

# Synthesiology

化学物質代替に伴うリスクトレードオフ評価  
の枠組みの開発

A first empirical analysis of JIS lifespan

最表面原子層を分析する光電子分光装置 EUPS の開発

日本林業の蘇りを目指した新たな技術開発

シンセシオロジー編集委員会

本誌は、成果を社会に活かそうとする研究活動の目標と社会的価値、具体的なシナリオや研究手順、また要素技術の構成・統合のプロセスを記述した論文誌です。本号論文の価値が一目で判るように、編集委員会が作成したシンセシオロジー論文としてのポイントを示します。

シンセシオロジー編集委員会

### 化学物質代替に伴うリスクトレードオフ評価の枠組みの開発

#### — 相対比較によるリスク評価のアプローチ — 蒲生 昌志ほか

化学物質のリスクを低減することは重要であるが、そのための代替物質が別のリスクを生ずる可能性がある場合、その評価方法が極めて大切になる。蒲生氏（産総研）らは、要因が異なるリスクの大きさを定量的に相対比較するための共通指標導入の方法論に立脚した上で、それをリスク評価に実際に適用する方法論を示している。またそれを規制の事例に適用して効果を実地に検証している。これらの成果は、必ずしも化学物質分野に限らず、多様な分野のリスク評価にも応用が期待されるもので、意義深い研究と言える。

### A first empirical analysis of JIS lifespan

#### — Implications for the review system of de jure standards — Suguru TAMURA

JIS（日本工業規格）は日本の種々の製品に関する規格や標準であり、イノベーションに適切に資することが期待されているものの、その見直しは定期的であり柔軟性に乏しい。田村氏（経済産業研究所）は、約4500のJIS規格を対象に、規格の型、技術分類、ISO規格の有無などにより、規格としての存続期間がどう異なるかをデータを駆使して統計的に導き出している。その結果を踏まえて、イノベーションに寄与する標準の見直し時期の最適化、標準マネジメントの効率化の必要性が説かれており、示唆に富んだ論文となっている。

### 最表面原子層を分析する光電子分光装置EUPSの開発

#### — レーザー生成プラズマ光源の実用化技術開発とEUPSが見せる材料最表面の魅力 — 富江 敏尚ほか

物質最表面原子層は触媒機能、表面反応、電気伝導性などを制御する重要な領域であり、その観測・制御は多くの材料精密設計にとって喫緊の課題である。富江氏（産総研）らは、長年にわたり超短パルスレーザーにより発生するプラズマ光源を利用した極端紫外光励起光電子分光法（EUPS）と、それを利用した多くの表面計測技術を開発してきた。本論文はその開発と利用成果の総合的な報告であり、具体的に最表面原子層の超微量汚染、絶縁薄膜の非帯電現象、電気伝導率と触媒活性などの観測により、極めて興味ある応用が示されている。他の手法では困難な特徴的な表面分析が可能であるので、今後さらに多くのユーザーによる利用が進展することが望まれる。

### 日本林業の蘇りを目指した新たな技術開発

#### — 日本林業の特異性を克服する伐倒マニピュレータの提案 — 白井 裕子

我が国の林業は特殊な自然環境や制度などのために産業としての自立が困難である。そのため産業としての自立を促す技術開発の必要性を説く白井氏（早稲田大学）は、独自に開発してきた幾つかの伐倒マニピュレータの実証実験成果とその産業への活用の可能性を示している。特徴的なことは、林業蘇生に向けた具体的なシナリオや道筋を示すとともに、それを支える独自の「環境との相互作用を徹底的に重視する技術設計論」を展開していることである。これらの方法論は今後種々の分野にも適用が可能であり、大変興味深い。

# Synthesiology 第9巻第4号(2016.11) 目次

論文のポイント	i
<b>研究論文</b>	
化学物質代替に伴うリスクトレードオフ評価の枠組みの開発 — 相対比較によるリスク評価のアプローチ — ・・・蒲生 昌志、竹下 潤一	187-197
A first empirical analysis of JIS lifespan — Implications for the review system of de jure standards — ・・・Suguru TAMURA	198-215
最表面原子層を分析する光電子分光装置 EUPS の開発 — レーザー生成プラズマ光源の実用化技術開発と EUPS が見せる材料最表面の魅力 — ・・・富江 敏尚、石塚 知明	216-234
日本林業の蘇りを目指した新たな技術開発 — 日本林業の特異性を克服する伐倒マニピュレータの提案 — ・・・白井 裕子	235-251
<b>編集委員会より</b>	
編集方針	252-253
投稿規定	254-255
第9巻総目次(2016)	260-261
編集後記	262
<b>Contents in English</b>	
<b>Research papers (Abstracts)</b>	
<b>Development of a framework for risk tradeoff analysis associated with substitution of chemical substances</b> —An approach to risk assessment using relative comparison— --- M. GAMO and J. TAKESHITA	187
<b>A first empirical analysis of JIS lifespan</b> —Implications for the review system of de jure standards— --- S. TAMURA	198
<b>Development of EUPS for analyzing electronic states of topmost atomic layer</b> —Materialization of laser- produced plasma source application and EUPS observed fascinating surface— --- T. TOMIE and T. ISHITSUKA	216
<b>A revolutionary technical development to revitalize Japanese forestry</b> —A proposal for a portable tree felling manipulator to address specific properties of Japanese forestry— --- Y. SHIRAI	235
<b>Editorial policy</b>	256-257
<b>Instructions for authors</b>	258-259

# 化学物質代替に伴うリスクトレードオフ評価の枠組みの開発

## — 相対比較によるリスク評価のアプローチ —

蒲生 昌志\*、竹下 潤一

化学物質のリスク削減対策として採用されることの多い物質の代替は、別の物質のリスクが生じるというリスクトレードオフが生じる可能性が高い。これまで、このようなリスクトレードオフ評価のための概念整理はなされてきたものの、実施可能性が高い手法として開発されていなかった。この研究では、可能性のあるアプローチを複数検討し、その上で、物質の相対比較のアプローチによる手法を提案し、ケーススタディを行った。

キーワード: 化学物質、リスク、トレードオフ、相対比較、評価手法

## Development of a framework for risk tradeoff analysis associated with substitution of chemical substances

—An approach to risk assessment using relative comparison—

Masashi GAMO\* and Jun-ichi TAKESHITA

A chemical substance is often substituted for another to reduce risks caused by the original substance. However, the replacement may be associated with new risks, which introduces a risk tradeoff problem. Although the concept of risk tradeoff analysis has been proposed, no feasible method has been developed. In this study a new assessment method was proposed based on relative risk comparison among substances through an examination of some possible approaches. Case studies were also conducted to assess the efficacy of this method.

Keywords: Chemical substances, risk, tradeoff, relative comparison, assessment methodology

### 1 はじめに

化学物質は、我々の豊かで持続可能な社会を実現するために必要である一方で、一部に人や生態系に対するリスクの懸念もある。これまでに、リスクが大きいと判断された化学物質は、しばしば規制や自主管理等により生産・使用・排出が制限されてきた。例えば、水銀・カドミウム・鉛等の重金属や、PCB (ポリ塩化ビフェニル)、一部の塩素系農薬、臭素系難燃剤等のように厳しく規制されている物質もあれば、トルエン等の大気汚染物質のように自主的な排出抑制により大気への排出量が経年的に減少してきている<sup>[1]</sup>物質もある。

ある化学物質の使用・排出を制限することによって、その物質によるリスクは削減されるものの、対策のための費用が必要となるだけでなく、化学物質が用いられる製品の機能を維持するために、しばしば別の物質への代替が行われる。例えば、臭素系難燃剤 decaBDE (デカブロモジフェニルエーテル) は、芳香族縮合リン酸エステル BDP (ビ

スフェノール A-ビス-ジフェニルホスフェート) 等の物質への代替が<sup>[2]</sup>、鉛はんだは、鉛を含まないスズ-銀-銅系等の「鉛フリーはんだ」への代替が<sup>[3]</sup>、また、塩素系の工業用洗浄剤は、炭化水素系や水系の洗浄剤への代替が行われてきた<sup>[4]</sup>。

物質の代替がリスク管理として適切であったかを評価するためには、単に対象となる物質のリスクが削減されたことが示されるだけでは不十分である。物質の代替により新たに使われるようになった物質のリスクを考慮する必要がある。このようにある種のリスクを削減するために別のリスクが生じることを「リスクトレードオフ」と呼ぶ。代替物質のリスクが代替前の物質のリスクよりも低いものであるか、さらに、物質の代替前後のリスクを比較して、その削減が、物質の代替により対策費用を上回るリスク削減効果があったかを評価する必要がある。

岸本<sup>[5]</sup>は、化学物質のヒト健康リスクの評価手法を、社会ニーズに沿った形で構築する必要性を主張し、新たな社

産業技術総合研究所 安全科学研究部門 〒305-8569 つくば市小野川 16-1 つくば西  
Research Institute of Science for Safety and Sustainability, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan \* E-mail: masashi-gamo@aist.go.jp

Original manuscript received March 31, 2016, Revisions received May 9, 2016, Accepted May 16, 2016

会ニーズとして「異なる種類の化学物質同士のリスクの比較や排出削減対策の費用対効果の評価」の必要性を提示した上で、トルエンのリスク評価を事例として示した。そこでは、ニーズからのバックキャストにより、リスクの指標としてQOL (Quality of Life: 生活の質) を用いてヒト健康リスクを定量化する手法が提案されている。この手法は、トルエンに関するリスク削減対策の費用対効果を、他の化学物質や、感染症、事故、災害等の他のリスクに対する削減対策と比較することを可能にするものであった。

しかし、岸本の提案は、トルエン等のようにその有害性に関して豊富な情報が入手できる物質に対してのみ適用可能であるというのが実情である。それに対して、物質代替に伴うリスクトレードオフでは、しばしば、比較的情報のある物質から、十分な情報が得られない物質への代替が行われている。すなわち、リスクトレードオフ評価が、現実的な評価手法となるためには、岸本が提案したリスク比較の概念を実行可能とする手段を開発することが必要になる。

この論文では、そのために行ってきたアプローチの検討や、化学物質代替のリスクトレードオフ評価を可能にする要素技術の開発、ケーススタディの結果を示し、考察として今後の展望について述べる。

## 2 アプローチの検討/考察

リスクトレードオフ評価として、物質の代替前後のリスクを比較する目的で、可能性のあるアプローチの得失を検討した。図1は、下記で検討した評価手法検討のシナリオと要素技術の関係を示した。

### 2.1 一般的なリスク評価方法

最初に考えられるアプローチは、化学物質リスクの一般的な評価方法の適用である。この方法では、化学物質への暴露レベルと許容レベルとの比較により、リスクの懸念の有無が判断される。許容レベルとは、有害性の発現が懸念されないような暴露レベルのことであり、多くの場合、動物試験やヒト疫学調査の結果に対して不確実性係数（安

全率）を適用して算出される。一方、暴露レベルは、環境媒体(大気、水、食品等)の濃度を実測またはシミュレーションによる予測により求め、それに媒体の摂取量を乗じて算出される。暴露レベルが許容レベルを下回る場合にはリスクがない、上回る場合にはリスクが懸念される、という判断がなされる。

しかし、暴露レベルと許容レベルの比較は、個々の物質においてなされるものであるため、例えば、二つの物質において暴露レベルと許容レベルの比がそれぞれ0.1と0.5と計算されたとすると、どちらのリスクが大きいということではなく、いずれもリスクなしと判断すべきである。これは特に二つの物質で有害性の種類が異なる場合に問題となる。このアプローチによるならば、結果として、物質代替前後でのリスクの増減は、単にリスク懸念の有無の変化としてしか把握できない。

また、許容レベルの算出には、動物試験やヒト疫学調査の結果が必要である。代替後の物質ではしばしば許容レベル算出に足るだけの充実した有害性情報が得られない場合が多いため、この方法によるリスクトレードオフの実施は困難であると言わざるを得ない。

### 2.2 リスクの共通指標を用いた方法

複数の物質のリスクの比較ができないという一般的なリスク評価方法の問題点への対応としては、岸本<sup>[5]</sup>の提案に代表されるように、健康リスクの大きさを、物質の違いによらず共通の指標によって定量的に表現するアプローチがある。共通指標としては、健康影響による寿命の短縮や、それに生活の質の調整を行ったものが多い。例えば、損失余命 (= 寿命の短縮) という指標は、Gamo *et al.*<sup>[6]</sup>においてシロアリ防除剤の代替事例の評価で、また、Gamo *et al.*<sup>[7]</sup>においては主要な環境汚染物質のランキングで用いられた。質調整生存年数 (= 寿命を生活の質で補正したもの) の損失という指標は、岸本<sup>[5]</sup>によるトルエンの詳細リスク評価や、Cohen *et al.*<sup>[8]</sup>による魚の摂取における多価不飽和脂肪酸の便益とメチル水銀のリスクとの比較に用いられ

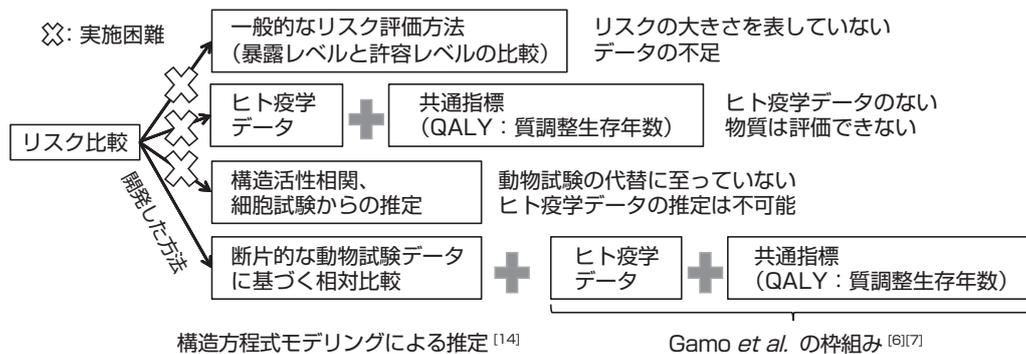


図1 リスクトレードオフ評価のためのリスク比較の手法開発のシナリオと要素技術

た。また、障害調整生存年数（＝疾病による障害を勘案した寿命）は、WHO（世界保健機関）において世界の疾病負荷を集計する際の指標として用いられており<sup>[9]</sup>、また、Havelaar *et al.*<sup>[10]</sup>により飲料水の消毒処理による感染症リスクの低減と臭素酸塩の副生によるリスクの比較に用いられた。

このアプローチの問題点は、推定のためにヒト疫学調査の結果が必要な点にある。物質代替に関わる多くの物質は、ヒト疫学調査結果どころか、十分な動物試験データもないため、このアプローチの実施可能性は、2.1に述べた一般的なリスク評価方法よりも劣っていると言わざるを得ない。

### 2.3 構造活性相関と細胞試験からの推定

前節までに述べた方法が持つ問題点のうち、代替後の物質において有害性情報が不足している点についての対応としては、構造活性相関や細胞試験に基づいてリスク推定を行うアプローチが考えられる。構造活性相関とは、化学物質の構造と活性（この場合には有害性）の関係式のことであり、それを多数の化学物質のデータに基づいて構築することにより、データの無い物質についての有害性の推定を可能にする。今まで多数の研究が行われてきたが、最近、我が国においては、HESS (Hazard Evaluation Support System) と呼ばれる反復投与毒性に関するカテゴリー化に基づく予測システムが開発されている<sup>[11]</sup>。

一方、細胞試験に基づくアプローチは、動物の代わりに細胞を用いた試験を実施し、それによって関心のある有害性の有無や程度を判断するものである。化学物質の変異原性を評価するエームズ試験（細菌を用いて突然変異性を検出する）が有名であり、OECD（経済協力開発機構）のテストガイドラインにも多数の細胞試験方法が規定されている。しかし、細胞での影響を生物個体での影響と関連づけることには大きな困難があるという認識が一般的である。

これらの手法は、動物試験にかかる費用削減への要求や動物愛護の観点から、将来的な活用の拡大が期待されているものの、現時点では動物試験を代替するには至っておらず、これらの推定結果や評価結果からヒト疫学調査結果に相当する情報を推定することは技術的に不可能である。また、仮に技術開発が進み、各物質のリスク懸念有無の判定ができるようになったとしても、それだけでは、2.1に述べた一般的なリスク評価の手法と同様、リスクの比較に至ることはできない。

### 2.4 物質の相対比較による方法

物質代替に伴うリスクトレードオフ評価を可能にするために、我々は、定量的なリスク評価手法（2.2節）をベースとしつつも、ヒト疫学データが得られない場合の推定手法と

して、物質の相対比較によるアプローチを提案した。すなわち、ヒト疫学データに基づいて健康リスクを共通尺度により評価できる物質を参照物質として設定した上で、評価したい対象物質の有害性評価を参照物質との相対比較によって行うというものである。これによって、動物試験結果（細胞試験や構造活性相関に基づく推定を含む）からヒト疫学データを推定するという困難さを回避することを可能とした。

このような物質の相対比較により、データの無い物質を評価するというアプローチは、最近、いくつかの報告が出てきている。例えば、Maier<sup>[12]</sup>は、有害性データの無い医薬品中間物について、細胞試験を用いてデータのある物質との活性の比較を行うことで、作業環境許容濃度を設定する「平行四辺形アプローチ」を提案している。細胞試験の結果から直接に個体影響を推定するのではなく、あくまで相対比較の道具として用いる点が、我々の提案との類似性である。また、Nakanishi *et al.*<sup>[13]</sup>は、CNT（カーボンナノチューブ）のリスク評価を行うにあたり「2軸アプローチ」という手法を提案している。これは、作業者の多様なCNTへの吸入暴露によるリスクを評価するにあたり、標準的だが莫大な費用がかかる吸入暴露試験は代表的なCNTのみに実施し、多くの他のCNTについては簡易法である気管内投与試験（CNT分散液を動物の気管に投与）を実施して広く相対比較を行うというものである。

この論文で示す手法としては、参照物質についてのリスクを定量化する部分については、過去に開発した手法<sup>[6][7]</sup>をベースとすることとした。一方、参照物質と評価対象物質の相対比較については、既往研究がなく、特に限られた情報に基づいて行う手法についての新たな開発が必要であった<sup>[14]</sup>。具体的には次章に述べる。

## 3 評価の枠組みと要素技術

### 3.1 全体構成

前提として、評価対象物質には、断片的な動物試験データがあるのみで、2.2節に述べたような定量的なリスク評価が可能なヒト疫学データが存在していない状況を想定する。ここで、断片的な動物試験データとは、必ずしも全ての臓器の全ての影響についての評価はないが、例えば、肝臓影響のみを観察したような論文のデータ等が存在しているケースを意味している。また、ヒト疫学データとは、具体的には、ヒトにおける用量反応関係（暴露量と影響の発生率との関係）を意味している。

当該物質について得られている断片的な動物試験データのみから、直接的にヒト疫学データを推定することは、動物とヒトとの種差を考えたときに、現実的には全く不可能

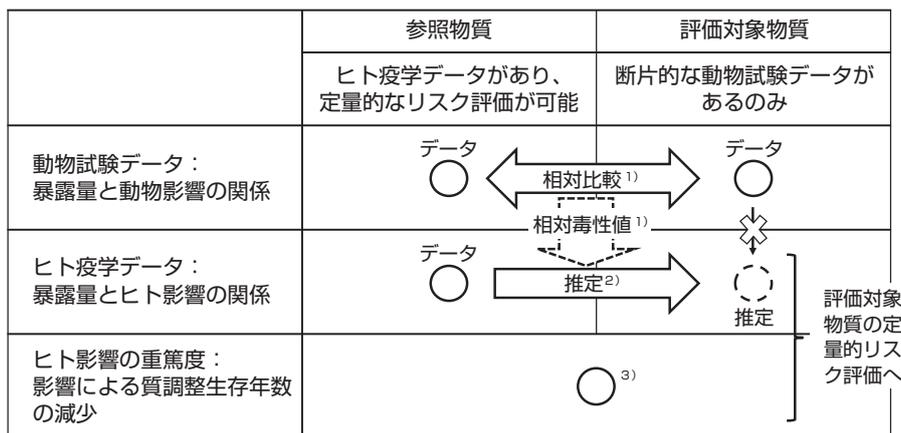
である。そこで、以下の手順での推定を行う枠組みを考案した（手順の概念図は図2）。

- 1) ヒト疫学データがあり、定量的なリスク評価が可能である物質を参照物質として設定する。
- 2) 次に、動物試験データのレベルで、参照物質と評価対象物質との相対比較を行い、相対毒性値を算出する。相対毒性値とは、ある有害性の強さを生じる参照物質の暴露量を1としたときに、同じ有害性が生じる評価対象物質の暴露量がいくつであるかという値である。
- 3) 最後に、参照物質について得られている用量反応関係に、2) で算出した相対毒性値を乗じることによって、評価対象物質の用量反応関係を推定する（図3）。その際、推定された用量反応関係式には信頼区間が付与されることが望ましい。
- 4) 評価対象物質の用量反応関係と、想定される影響の重篤度を共通指標で表した値とを組み合わせることで、定量的なリスク評価を行う。

一般に化学物質は、複数の臓器に影響を生じるが、どの程度の暴露量を受けるとその臓器に有害影響が発現するかは、臓器ごとに違いがある。したがって、物質の有害性の多様性を反映するため、上記の推定を臓器ごとに行うことが望ましいと考えられた。そこで、主要な有害性発現臓器である肝臓と腎臓を別個に扱うこととし、それぞれについて、参照物質の設定と相対毒性値の算出を行うこととした。

### 3.2 参照物質と用量反応関係

肝臓影響と腎臓影響について参照物質を設定するにあたっては、CHE (The Collaborative on Health and the Environment：国際的な環境グループ) による「毒物及び疾病データベース」<sup>[15]</sup>を参照し、臓器別に有害性を生じることが知られている化学物質を探索した。このデータベースは、3つの著名な毒性学の教科書に基づいており、多数の疾病ごとに原因となりうる化学物質を検索することができる。



- 1) 参照物質と評価対象物質の相対比較、相対毒性値の算出は Takeshita *et al.* <sup>[14]</sup> による（具体的には 3.2 節）。
- 2) 参照物質のヒト疫学データと相対毒性値から評価対象物質のヒト疫学データを推定する概念図は図3に示した。
- 3) 影響の種類に対する一般的な値であり、暴露する物質の種類にはよらないものと仮定した。

図2 物質の相対評価に基づくリスクトレードオフ評価の枠組み

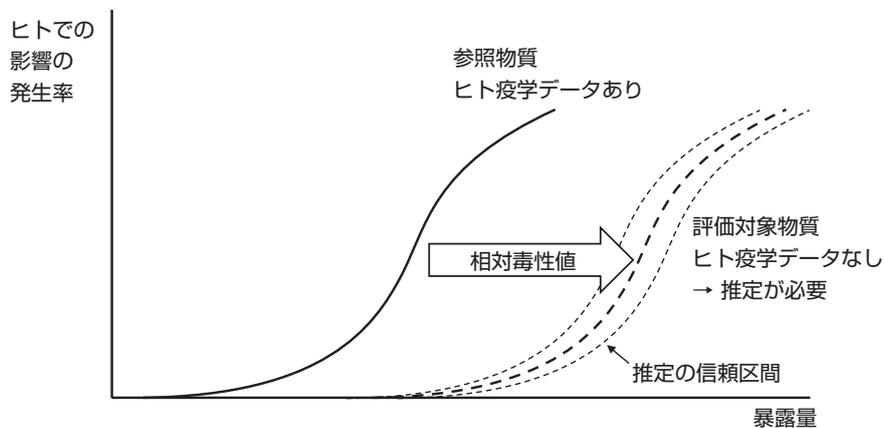


図3 参照物質の用量反応関係と相対毒性値による評価対象物質の用量反応関係の推定

肝臓と腎臓について、まず、証拠の確かさが Strong とされている物質を選び、既往の有害性評価書を参照してヒト疫学データが報告されている物質を絞り込むというプロセスを経た。その結果として、肝臓影響については塩化ビニルモノマー、腎臓影響についてはカドミウムを参照物質とすることにした。以下に、それぞれの物質のヒト用量反応関係の情報を示す。

### 3.2.1 肝臓影響

Ho *et al.* [16] は、空気中の塩化ビニルモノマーに暴露した労働者について調査し、1～20 ppm (2.5～50 mg/m<sup>3</sup> に相当) に暴露された 271 人のうち、12 人に肝機能不全(うち 4 人に肝臓腫大、4 人に肝脾腫大、2 人に脾臓腫大)が見られたことを報告している。これは、1 濃度区のみの影響発生率のデータであるため、Huijbregts *et al.* [17] によって提案された非発がん影響の感受性の分布の幅、すなわち個人差として対数正規分布を仮定した場合の幾何標準偏差 = 1.82、を適用することとした。その結果として、塩化ビニルモノマーへの吸入暴露について、肝臓影響の用量反応関係式を、対数正規分布(幾何平均値 = 31 mg/m<sup>3</sup>、幾何標準偏差 = 1.82) と規定した。経口暴露のリスク評価に用いる際には、気中濃度を、呼吸量や体重を仮定することで、一日摂取量(単位: mg/kg/day) に換算した。

### 3.2.2 腎臓影響

カドミウムのヒトへの影響は詳細に調べられており、感受性の高い有害影響としては尿細管障害が知られている。用量反応関係式としては、以前に実施したカドミウムのリスク評価で構築したものを用いた。そこでは、尿細管障害を、尿中  $\beta_2$  マイクログロブリン濃度が 1000  $\mu\text{g/g}$  creatinine の状況であると定義している。この尿細管障害は、年齢によって感受性が異なっており、Gamo *et al.* [18] と中西他 [19] では、年齢別に用量反応関係式のパラメータが示されている。

### 3.3 相対毒性値の導出方法<sup>[14][20]</sup>

開発すべき方法が満たす要件として、考慮した点は、下記の二つである。

- ・データ欠損の補完が可能であること: 動物試験データが断片的であるという想定においては、肝臓と腎臓の片方、または両方のデータが欠損している可能性がある。その場合でも両臓器についての相対毒性値が推定できなければ、実際のリスクトレードオフ評価で用いるのは困難である。このように、複数臓器での影響の大きさを相互に見積もるような手法をQAAR (Quantitative Activity-Activity Relationship: 定量的活性-活性相関) と呼ぶ。

- ・推定の信頼区間の見積もりが可能であること: 推定には不確実性が伴う。不確実性を見積もりはリスクトレードオフ

評価の結果の考察に不可欠である。例えば、物質の代替によりリスクが低減しているように見えるケースで、それを確かな低減と呼べるかどうかを判断するには、推定の信頼区間の見積もりが欠かせない。

我々は、上記の実現のための手法として、構造方程式モデリングを用いることにした。これは、線形回帰分析や因子分析を包括する統計解析手法であり、変数間の関連性を規定したモデルから算出した分散・共分散がデータから算出された分散・共分散に最もフィットするようにパラメータを決定するものである。その手順の概念図を図 4 に示した。

モデル構築のためのデータは、「化学物質排出把握管理促進法 (PRTR 法)」の第一種指定化学物質 165 物質を中心に、文献情報から既存試験データを収集・整備した。毒性観察項目は合計 45 種類であり、標的臓器(肝臓、腎臓、血液、尿、体重、死亡、脾臓、消化管、呼吸器、脳等)、試験動物種(ラット、マウス)、試験方法(経口暴露、吸入暴露)の組み合わせからなる。

構築されたモデルを用いて、まず、個々の物質について、各毒性観察項目での無毒性量 (NOEL) の推定を行い、その結果に基づいて、二つの物質の相対毒性値の推定を行う。物質 A を参照物質、物質 B を評価対象の物質とし、 $\hat{a}$ ,  $\hat{\sigma}_a$ ,  $\hat{b}$ ,  $\hat{\sigma}_b$  をそれぞれ、物質 A と B の NOEL の自然対数値とその標準偏差とする。このとき、物質 A を基準とする物質 B の相対毒性値とその 95 % 予測区間は、それぞれ下式により算出される。

相対毒性値:  $\exp(\hat{b} - \hat{a})$

95 % 予測区間:

$$[\exp(\hat{b} - \hat{a} - 2\sqrt{\hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_b^2}), \exp(\hat{b} - \hat{a} + 2\sqrt{\hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_b^2})]$$

個々の物質の NOEL の推定精度については、OECD の検証の原則に沿って行うこととした。具体的には、Leave-one-out 法と呼ばれる方法を用いた。報告値を一つずつ取り除き、それを残りのデータから推定し、それを報告値と比較することを繰り返す方法である。報告値と推定値の相関係数が 0.89 となり、推定精度は、推定の 95 % 予測区間が報告値を含む割合が 93 %、推定値と報告値の比が 10 未満である割合が 97 % であった。

### 3.4 影響の共通指標

2.2 節で述べたように、ヒト健康影響の共通指標としては、損失余命、質調整生存年数、障害調整生存年数等がある。ここでは、寿命の短縮と QOL とを考慮した指標である質調整生存年数を指標として用いた。特に生活の質の低下については、同じ臓器への影響であっても疾病によ

て、病態によってさまざまな値が報告されているが、ここでは、具体的な病態を想定せず、一般的な値として設定することとした。肝臓影響と腎臓影響のそれぞれの参照物質について得られる情報が異なるため、それぞれ異なった推定方法となった。

### 3.4.1 肝臓影響

3.2.1で述べたHo *et al.* [16]で報告された肝機能不全は、労働者の観察に基づくものであり、必ずしも重篤な段階に至っていないもの、すなわち、化学物質への長期暴露による比較的軽微な慢性影響と見なした。Gamo *et al.* [7]は、環境汚染物質のリスクランキングの中で、ある程度の自覚症状を有するような健康状態による寿命の短縮を1年とした評価を行っていることから、ここでもそれに準じた評価を行う。また、QOLについては、Tengs *et al.* [21]が整理した多数のデータを概観し、肝臓疾患の中から最も軽度の肝障害の値として0.01という値を用いることとした。この値は、例えば、この健康状態で生涯（約80年）過ごすとした場合に、80年×0.01 = 0.8年の寿命が短縮するのと同等の重篤度であることを意味している。

### 3.4.2 腎臓影響

カドミウム暴露による尿細管障害は、この影響は50歳を超えた集団で発生すると考えられ、そのような状態にある人の死亡率は、健常な人の死亡率の1.57倍（男性）または1.81倍（女性）という報告がある [22]。この情報に基づ

いて、生命表（年齢別の死亡率を表にしたもので、平均寿命等の計算を行うことができる）により寿命の短縮を計算した。腎臓の疾患によるQOLの低下についても、Tengs *et al.* [21]が整理した多数のデータを概観し、最も軽度な腎障害の値として0.01を用いることとした。

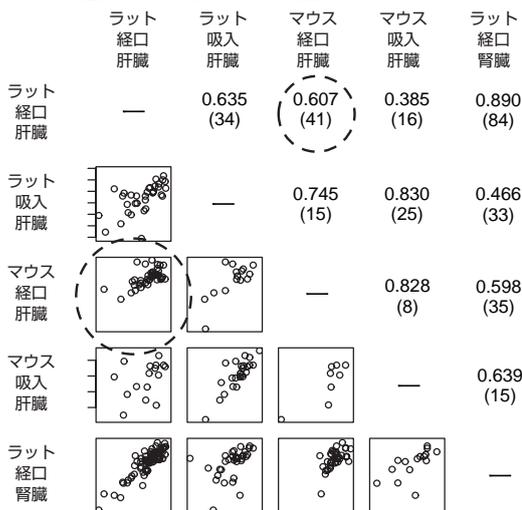
## 4 ケーススタディ

上記の手法は、産総研安全科学研究部門で実施した3つのリスクトレードオフ評価 [21-24] で用いられた。その中で、ここでは、プラスチック添加剤としての難燃剤の代替事例 [2] の概要を示す。代替の現状としてdecaBDE（デカブROMジフェニルエーテル）が、一部BDP（ビスフェノールA-ビス-ジフェニルホスフェート）（不純物としてTPP（トリフェニルホスフェート）を含む）に代替されたシナリオと、decaDBEの代替がないという架空のシナリオが検討された。これらのシナリオについて、各物質の需要量、市中ストック量、廃棄量の評価からなるマテリアルフロー解析を行い、その上で、各物質の室内空気、環境、食品を経由した暴露量が推定された。このシナリオごとの各物質の推定暴露量をベースにリスクトレードオフ評価を行った。

共通指標に基づく定量的なリスク評価の前に、まず、代替によるリスクの増減について検討した。そのために、代替前の物質であるdecaBDEを参照物質として、それに対するBDPとTPPの相対毒性値を算出し、各シナリオでの

#### Step 1: データセットの予備的解析

毒性観察項目（動物種・試験方法・臓器別の無毒性量）間の相関関係の確認



散布図行列の一部

左下三角部：散布図（両軸は無毒性量の対数値）

右上三角部：Pearson相関係数（括弧：標本数）

#### Step 2: 構造方程式モデリング

毒性観察項目間の相関の強さを  
基に全ての項目間の関連を規定



データセットがもつ  
(implied) 共分散構造を導出

#### Step 3: 最良予測式の決定

$$\begin{cases} \hat{y} = \mu_y + \sum_{xy}^t \sum_{xx}^{-1} (\hat{x} - \mu_x), \\ \text{Cov}(e) = \sum_{yy} - \sum_{xy}^t \sum_{xx}^{-1} \sum_{xy}. \end{cases}$$

○ 推定したい物質の既存動物試験データ

● Step 2で求まる毒性観察項目間の関連を  
定量化したベクトル・行列

第1式：平均値の推定式

第2式：分散・共分散の推定式

図4 構造方程式モデリングによるQAAR手法開発の手順

Step1の散布図行列中の点線丸は、経口暴露による肝臓影響の無毒性量を、ラットとマウスで比較した場合の散布図（横軸：ラットの値、縦軸：マウスの値）とPearson相関係数を表している。

表1 難燃剤の物質代替における推定暴露量 (decaBDE当量) の変化：肝臓影響

		推定暴露量(mg/kg/day : decaBDE当量)			
		decaBDE	BDP	TPP	合計
代替あり シナリオ	相対毒性値の平均値を用いた場合	$2.1 \times 10^{-4}$	$8.8 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-4}$
	相対毒性値の95 %上限値を用いた場合	$2.1 \times 10^{-4}$	$4.1 \times 10^{-4}$	$7.9 \times 10^{-6}$	$6.3 \times 10^{-4}$
代替なしシナリオ		$3.3 \times 10^{-4}$	—	—	$3.3 \times 10^{-4}$

表2 難燃剤の物質代替における推定暴露量 (decaBDE当量) の変化：腎臓影響

		推定暴露量(mg/kg/day : decaBDE当量)			
		decaBDE	BDP	TPP	合計
代替あり シナリオ	相対毒性値の平均値を用いた場合	$2.1 \times 10^{-4}$	$6.9 \times 10^{-5}$	$5.1 \times 10^{-8}$	$2.7 \times 10^{-4}$
	相対毒性値の95 %上限値を用いた場合	$2.1 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-4}$	$3.1 \times 10^{-7}$	$6.2 \times 10^{-4}$
代替なしシナリオ		$3.3 \times 10^{-4}$	—	—	$3.3 \times 10^{-4}$

表3 代替シナリオごとの難燃剤のリスク<sup>[2]</sup> (日：質調整生存年数：生涯暴露での一人あたりの値)

	代替あり (現状の代替状況)		代替なし (架空の状況)
	相対毒性値の平均値 を用いた場合	相対毒性値の95 % 上限値 を用いた場合	
肝臓影響	$\ll 0.001$ ( $2.8 \times 10^{-57}$ )	$\ll 0.001$ ( $2.0 \times 10^{-53}$ )	$\ll 0.001$ ( $9.5 \times 10^{-57}$ )
腎臓影響	$\ll 0.001$ ( $1.4 \times 10^{-140}$ )	$\ll 0.001$ ( $1.0 \times 10^{-122}$ )	$\ll 0.001$ ( $8.8 \times 10^{-137}$ )
合計	$\ll 0.001$ ( $2.8 \times 10^{-57}$ )	$\ll 0.001$ ( $2.0 \times 10^{-53}$ )	$\ll 0.001$ ( $9.5 \times 10^{-57}$ )

推定暴露量に重み付けして集計することを行った。集計した暴露量は decaBDE 当量(mg/kg/day) として表現した。表1に肝臓影響、表2に腎臓影響について示した。代替ありシナリオでは、代替なしシナリオに比べ、decaBDEの推定暴露量は減少している。相対毒性値の推定平均値を用いる場合、代替ありシナリオにおいてBDPとTPPを加算しても、decaBDE当量としての暴露量は若干低減したと判断できる。しかし、相対毒性値の推定95%上限値を用いた場合には、むしろ物質代替によりdecaBDE当量としての暴露量は増加することが示された。すなわち、代替物質の有害性の強さの推定に関する不確実性を考慮した場合、物質の代替が必ずしもリスク削減に寄与するとは判断できないことを意味している。ここで、相対毒性値の95%上限値と平均値の比は、BDPとTPPの肝臓影響について、それぞれ4.7と20であり、腎臓影響では、同様に6.0と6.0であると計算された。物質や臓器によって比の値に違いが生じるのは、無毒性量の報告値の有無や値の大きさが異なることを反映している。

表3は、3章で述べた方法に基づいて実施した共通指

標による定量的なリスクの比較の結果である<sup>[2]</sup>。リスクの大きさは、生涯暴露での一人あたりの質調整生存年数(日)で表している。どちらのシナリオでも、肝臓影響と腎臓影響のいずれも極めて小さい値と計算された。ここでは、しばしば許容できるリスクレベルの上限の日安として用いられる生涯発がん確率 $= 10^{-5}$ が、約0.04日の寿命の短縮に相当する<sup>[23]</sup>ことを踏まえて、0.001日よりも小さい質調整生存年数の損失のレベルにおいては、物質代替が適切であったかを、リスク削減効果の観点から議論することはできないと判断することができる。

## 5 考察

4章で示した難燃剤に関するケーススタディ<sup>[2]</sup>や、鉛はんだ<sup>[3]</sup>、工業用洗浄剤<sup>[4]</sup>の物質代替にかかるリスクトレードオフは、主に、代替前の物質へのリスクの懸念が発端となり生じたものである。これらの代替がリスク削減の観点から適切であったかは、科学的根拠に基づいた定量的リスク評価が不可欠であり、安全科学研究部門で実施したのが最初の事例であると言える。それを可能にしたのは、こ

の論文で示した評価手法の開発によるところが大きい。岸本<sup>5)</sup>により概念が整備され、それを実施可能にするための要素技術の開発という流れで研究を進めてきた。

これまで実施してきたリスクトレードオフ評価では、化学物質の有する機能、例えばプラスチックの難燃効果、を維持することを前提とした物質の代替を扱った。しかし、リスク削減のために、ある物質の使用を削減するだけの対応もありうる。そのような場合には、化学物質の有害性以外のリスクへのトレードオフが生じることになる。例えば製品機能の低下により火災や事故のリスクの増加や、エネルギー効率の低下により温暖化のリスクを上昇させることもありうる。化学物質同士のリスク比較の手法の枠組みは概ねできあがったと考えられるが、他の種類のリスクとの比較の検討が今後の課題であると言える。異なる種類のリスクをどのような共通指標で表現するか、またそれ以上に、性質の大きく異なるリスクのトレードオフを社会としてどのように受け止めるべきかの議論が必要であると考えられる。このことは、ナノ材料のような将来の技術につながる物質のリスク評価でも考慮すべき事項である。すなわち、現状ではそれほど実用化が進んでいないため、仮にそれに厳しい規制をかけても、現時点でのリスクトレードオフは生じない。しかし、そのことが、将来の技術の可能性を狭めてしまうことによって、何らかの分野でのリスク削減の可能性を消してしまうかもしれないリスクが考慮されるべきである。

この論文で示した化学物質のリスクトレードオフ評価手法は、さらに次のような点での改良の余地があると考えている。今回有害性の相対比較のために構築したQAARモデルの基礎となった有害性データは、一般の論文等で報告された動物試験の結果であり、データの信頼性が精査されたものではない。現在、行政では、有害性の構造活性相関モデルの作成の目的で、化学物質審査規制法の枠組みで収集された信頼性の高い試験データを活用する方向の動きがある。そういったデータを基礎としてモデルを再度構築することが、評価結果の信頼性を高めることにつながる。また、この論文のQAARモデルは、動物で観察された毒性観察項目間の相関関係のみに基づいたモデルとなっているが、動物試験の全く得られていない物質の評価を可能にするため、構造活性相関による無毒性量の推定値、細胞試験の結果、または化学物質の構造に関する記述子を、構造方程式モデリングの変数として用いることが考えられる。さらに、モデルの信頼性の向上のためには、化学物質の作用機序の情報に基づいて、変数の選択や変数間の因果関係の設定を行うといったことが考えられる。さらに、今回、主要な臓器影響として腎臓影響と肝臓影響とを取りあげた。化学物質による有害性としては、主要なものだけ

でも神経毒性や感作性等の影響があり、それらに対する参照物質の選択とその用量反応関係の把握、質調整生存年数の推定は今後の課題である。

この論文では、トレードオフ評価における不確実性の見積もりの重要性を指摘するとともに、毒性観察項目間の相関関係に基づく相対毒性値の推定にかかる不確実性を定量化した。一方、明示的に扱われていない不確実性の要因もある。大きいものとしては、例えば、参照物質の選択（＝同じ「肝臓影響」でも、物質によって異なる参照物質を設定する必要があるかもしれない）、参照物質の用量反応関係推定（＝参照物質のヒト疫学データの信頼性、得られる用量反応関係の導出方法に付随する不確実性）、懸念される影響の質調整生存年数の設定（＝同じ「肝臓影響」でも物質によって重篤度が異なるかもしれない）がある。また、暴露評価においても、代替シナリオの設定、暴露量の見積もりにも不確実性がある。評価方法の研究開発においては、不確実性の大きな要因について不確実性を減らすことが基本となり、これまでの多くの研究開発はその方向で行われてきた。しかし、不確実性の低減に限界がある場合や、不確実性が大きくても意思決定に影響しない（例えば、不確実性を考慮しても、物質Aと物質Bとの優劣は揺るがないなど）場合もある。今後、評価の不確実性を前提としつつも、意思決定に資するリスクトレードオフ評価方法とするために、不確実性の定量的な見積もりや、不確実性の大きさに関する合意形成が大事になってくると考えている。

実施可能なリスクトレードオフ評価の方法とケーススタディを示すことができた意義として、物質代替においてリスクトレードオフを勘案することが社会に浸透することを期待している。それによって、科学的根拠に乏しい物質規制や代替が行われることを回避することができる。物質の代替は、それ自体にコストがかかるばかりでなく、場合によってはリスクがむしろ増大する可能性があることは上に述べたとおりである。リスクトレードオフを適切に評価することは、化学物質を製造する企業にとっても、使用する一般市民にとっても必要なことである。今のところ具体的な規制等に取り入れられる動きはないものの、例えば、OECDでは、有害化学物質の代替にかかるアドホックグループを立ち上げて、より安全な物質代替のための評価を支援する手法構築を検討しているところである<sup>12)</sup>。我々の評価手法やケーススタディも適宜こういった場に発信している。

今回示した相対比較に基づくリスク評価のアプローチは、化学物質分野に限らず、多様な分野のリスク評価での応用が期待される。特に従来技術を代替するような新規技術の場合には、新規技術によりもたらされる可能性のあるリスクを直接推定するよりも、従来技術によるリスクの現状

を踏まえた上で、従来技術と新規技術との相対比較を行う方が現実的であり、社会での納得性も高い。相対評価に基づくアプローチの適用要件や、内在する不確実性の整理と社会における納得性との関係の検討も今後の課題であると考えている。

## 謝辞

この研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）および経済産業省受託プロジェクト（環境安心イノベーションプログラム／化学物質総合評価管理）「化学物質の最適管理をめざすリスクトレードオフ解析手法の開発」（2007年度～2011年度）で実施された。

## 参考文献

- [1] NITE（独立行政法人 製品評価技術基盤機構）: PRTR 届出データの年度比較, <http://www.nite.go.jp/chem/prtr/prepdata.html>, 閲覧日2016-03-31.
- [2] 産総研安全科学研究部門（2012）: リスクトレードオフ評価書 プラスチック添加剤-難燃剤-, <https://www.aist-riss.jp/assessment/12151/>, 閲覧日2016-03-31.
- [3] 産総研安全科学研究部門（2012）: リスクトレードオフ評価書 金属-鉛はんだ-, <https://www.aist-riss.jp/assessment/12151/>, 閲覧日2016-03-31.
- [4] 産総研安全科学研究部門（2012）: リスクトレードオフ評価書 工業用洗浄, <https://www.aist-riss.jp/assessment/12151/>, 閲覧日2016-03-31.
- [5] 岸本充生: 異なる種類のリスク比較を可能にする評価戦略-質調整生存年数を用いたトルエンの詳細リスク評価-, *Synthesiology*, 1 (1), 31-37 (2008).
- [6] M. Gamo, T. Oka and J. Nakanishi: A method evaluating population risks from chemical exposure: A case study concerning prohibition of chlordane use in Japan, *Regul. Toxicol. Pharm.*, 21 (1), 151-157 (1995).
- [7] M. Gamo, T. Oka and J. Nakanishi: Ranking the risks of 12 major environmental pollutants that occur in Japan, *Chemosphere*, 53 (4), 277-284 (2003).
- [8] J. T. Cohen, D. C. Bellinger, W. E. Connor, P. M. Kris-Etherton, R. S. Lawrence, D. A. Savitz, B. A. Shaywitz, S. T. Teutsch and G. M. Gray: A quantitative risk-benefit analysis of changes in population fish consumption, *Am. J. Prev. Med.*, 29 (4), 325-334 (2005).
- [9] WHO (World Health Organization): Global burden of disease, [http://www.who.int/topics/global\\_burden\\_of\\_disease/en/](http://www.who.int/topics/global_burden_of_disease/en/), 閲覧日2016-03-31.
- [10] A. H. Havelaar, A. E. M. De Hollander, P. F. M. Teunis, E. G. Evers, H. J. Van Kranen, J. F. M. Versteegh, J. E. M. Van Koten and W. Slob: Balancing the risks and benefits of drinking water disinfection: Disability adjusted life-years on the scale, *Environ. Health Perspect.*, 108 (4), 315-321 (2000).
- [11] Y. Sakuratani, H. Q. Zhang, S. Nishikawa, K. Yamazaki, T. Yamada, J. Yamada, K. Gerova, G. Chankov, O. Mekenyan and M. Hayashi: Hazard evaluation support system (HESS) for predicting repeated dose toxicity using toxicological categories, *SAR QSAR Environ. Res.*, 24 (5), 351-363 (2013).
- [12] M. S. V. Maier: Setting occupational exposure limits for unstudied pharmaceutical intermediates using in vitro parallelogram approach, *Toxicol. Mech. Methods*, 21 (2), 76-85 (2011).
- [13] J. Nakanishi, Y. Morimoto, I. Ogura, N. Kobayashi, M. Naya, M. Ema, S. Endoh, M. Shimada, A. Ogami, T. Myojo, T. Oyabu, M. Gamo, A. Kishimoto, T. Igarashi and S. Hanai: Risk assessment of the carbon nanotube group, *Risk Anal.*, 35 (10), 1940-1956 (2015).
- [14] J. Takeshita, M. Gamo, K. Kanefuji and H. Tsubaki: A quantitative activity-activity relationship model based on covariance structure analysis, and its use to infer the NOEL values of chemical substances, *J. Math-for-Ind.*, 5B, 151-159 (2013).
- [15] CHE (The Collaborative on Health and the Environment): CHE Toxicant and Disease Database, <http://www.healthandenvironment.org/tddb>, 閲覧日2016-03-31.
- [16] S. F. Ho, W. H. Phoon, S. L. Gan and Y. K. Chan: Persistent liver dysfunction among workers at a vinyl chloride monomer polymerization plant, *Occ. Med.*, 41 (1), 10-16 (1991).
- [17] M. A. Huijbregts, L. J. Rombouts, A. M. Ragas and D. van de Meent: Human-toxicological effect and damage factors of carcinogenic and noncarcinogenic chemicals for life cycle impact assessment, *Integr. Environ. Assess.Manag.*, 1 (3), 181-244 (2005).
- [18] M. Gamo, K. Ono and J. Nakanishi: Meta-analysis for deriving age and gender-specific dose-response relationship between urinary cadmium concentration and  $\beta_2$ -microglobulinuria under environmental exposure, *Environ. Res.*, 101 (1), 104-112 (2006).
- [19] 中西準子, 小野恭子, 蒲生昌志, 宮本健一: 詳細リスク評価書シリーズ13 カドミウム, 丸善, 東京 (2008).
- [20] 産総研安全科学研究部門 (2012): 化学物質の代替に伴うリスクトレードオフ評価のためのガイダンス(ヒト健康)予備の公開版, <https://www.aist-riss.jp/assessment/12131/>, 閲覧日2016-03-31.
- [21] T. O. Tengs and A. Wallace: One thousand health-related quality-of-life estimates, *Med. Care*, 38 (6), 583-637 (2000).
- [22] 中川秀昭: カドミウム汚染地域住民の健康障害に関する研究 腎尿細管障害程度およびカドミウム曝露量と生命予後-15年間の追跡調査-, 環境保健レポート, 65, 76-79 (1999).
- [23] 蒲生昌志, 岡敏弘, 中西準子: 発がん性物質への暴露がもたらす発がんリスクの損失余命による表現-生命表を用いた換算-, 環境科学会誌, 9 (1), 1-8 (1996).
- [24] OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) : Substitution of hazardous chemicals, <http://www.oecd.org/env/ehs/risk-management/substitutionofhazardouschemicals.htm>, 閲覧日2016-03-31.

## 執筆者略歴

蒲生 昌志 (がもう まさし)

1991年東京大学工学部都市工学研究科卒。1996年東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻博士課程修了。学位：博士（工学）。同年、工業技術院資源環境技術総合研究所に入所。2001年産業技術総合研究所化学物質リスク管理研究センター（2002年よりリスク管理戦略研究チーム長）。2008年同安全科学研究部門リスク評価戦略グループ長。化学物質とナノ材料のリスク評価手法開発およびケーススタディの実施に従事。この論文では、リスクトレードオフ評価手法の枠組みの検討および当該箇所の執筆を担当。



竹下 潤一（たけした じゅんいち）

2004年早稲田大学理工学部応用物理学科卒。2009年九州大学大学院数理学府数理学専攻博士課程修了。学位：博士（機能数理学）。2011年産業技術総合研究所に入所、安全科学研究部門リスク評価戦略グループに所属。専門は応用数学。化学物質のリスク評価・管理研究に資する数理解析手法の研究およびケーススタディの実施に従事。この論文では、物質の相対毒性値算出のためのモデル構築とケーススタディの実施および当該箇所の執筆を担当。



## 査読者との議論

### 議論1 全体について

コメント（小野 晃：産業技術総合研究所）

要因が異なるリスクの大きさを定量的に比較するために共通に使える指標を導入する方法論に立脚した上で、リスク評価の実践的方法論を新たに提示しています。またそれを規制事例に適用して、その効果を検証したことは注目されます。

リスク評価の実践的方法論に関していくつかの異なるシナリオを比較検討しています。シナリオ選択の検討過程が示されており、シンセシオロジー誌の研究論文としてふさわしいものとなっています。

### 議論2 リスク推定値の不確実性

質問（小野 晃）

リスクの推定値に対してその不確実性（95%信頼区間：2 $\sigma$ 相当）の見積もり方法を考案し実施したことを高く評価します。不確実性は重要な概念で、今後の研究の展開において軸になっていくものと思います。その点を踏まえて質問2とそれ以降の質問・コメントを提示します。

不確実性の具体的な大きさを理解したいと思います。表1、表2、表3のそれぞれにおいて、不確実性（2 $\sigma$ ）は平均値のおよそ何倍になっているのでしょうか。

またヒト疫学データのない評価対象物質の相対毒性値を統計的な手法を用いて推定していますが、このとき不確実性の要因にはどのようなものがあるのでしょうか。効果の大きい要因をいくつか例示して下さい。（例えば動物試験データの質・量が十分でないとか、毒性観察項目間の相関が低いとか、選択した参照物質と評価対象物質との類似性が低いとか。）

この研究のポイントの一つは、評価対象物質の相対毒性値の推定の不確実性をいかに小さくするかということだと考えます。そのためには不確実性を大きくしている要因を明確にして、大きいものから順に小さくしていく努力が必要だと思いますがいかがでしょうか。

回答（蒲生 昌志）

相対毒性自体の値は示していませんでしたが、95%上限値の平均値に対する比は、BDPとTPPの肝臓影響について、それぞれ4.7と20であり、腎臓影響では、同様に6.0と6.0であると計算されました。物質や臓器によって比の値に違いが生じるのは、無毒性量の報告値の有無や値の大きさが異なることを反映したものです。

この論文では、トレードオフ評価における不確実性を見積もりの重要性を指摘するとともに、毒性観察項目間の相関関係に基づく相対毒性値の推定にかかる不確実性を定量化しました。一方、ご指摘のように、明示的に扱われていない不確実性の要因もいくつか存在します。大きいものとしては、例えば、参照物質の選択（＝同じ「肝臓影響」でも、物質によって異なる参照物質を設定する必要があるかもしれない）、参照物質の用量反応関係推定（＝参照物質のヒト疫学データの信頼性、得られる用量反応関係の導出方法に付随する不確実性）、懸念される影響の質調整生存年数の設定（＝同じ「肝臓影響」でも

物質によって重篤度が異なるかもしれない）があります。また、暴露評価においても、代替シナリオの設定、暴露量の見積もりの不確実性があります。

評価方法の研究開発においては、不確実性の大きな要因について不確実性を減らすことが基本となり、これまでの多くの研究開発はその方向で行われてきました。しかし、不確実性の低減に限界がある場合や、不確実性が大きくても意思決定に影響しない（例えば、不確実性を考慮しても、物質Aと物質Bとの優劣は揺るがないなど）場合もあります。今後、評価の不確実性を前提としつつも、意思決定に資するリスクトレードオフ評価方法とするために、不確実性の定量的な見積もりや、不確実性の大きさに関する合意形成が大事になってくると考えています。

これらのことについて、この論文に加筆しました。

### 議論3 不確実性を見積もり方法の妥当性検証

質問（小野 晃）

統計的な手法を用いてリスク推定値の不確実性を見積もっていますが、何らかの方法でその妥当性を検証できないでしょうか。

例えば、ある評価対象物質に対して参照物質を複数選びます。それぞれの参照物質ごとに、評価対象物質のリスク推定値がどの程度ばらつくかは、妥当性の一つの評価指標になりませんかでしょうか。

また例えば、十分にヒト疫学データがそろっている二つの物質を選びます。そのうちのどちらか一つを参照物質にし、他の物質を評価対象物質と位置付けてそのリスクをこの論文の手法で推定します。そのとき評価対象物質のヒト疫学データはあえて使わずに、動物試験データのみを使用することとします。また参照物質と評価対象物質を入れ替えて同じことができるとします。ヒト疫学データを用いた信頼性の高い推定値と、動物試験データのみを使った推定値にどの程度の差が出るかは妥当性の一つの評価指標になりませんかでしょうか。

回答（蒲生 昌志）

この論文で提示しました手法のうち、相対毒性値を推定する部分の不確実性を見積もりの妥当性については、3.3節においてLeave-one-out法による検証の結果を示しました。推定の95%予測区間に報告値が含まれる割合が93%という結果が得られ、不確実性を見積もりは適切であったと考えています。この方法は、統計的な推定手法の検証方法として、OECDをはじめとして、最も受け入れられている方法です。

一方、参照物質の設定にかかる不確実性を見積もり方法としては、コメントいただきましたような、参照物質を複数設定して、それぞれに基づく推定結果を比較したり、参照物質の無毒性量を相互に推定・検証したりすることが有効であると考えられます。ヒト疫学データのある物質は多くありませんが、今後の検討課題の一つと思われます。

### 議論4 選択しなかったシナリオのデータ活用

コメント（小野 晃）

図1において4つのシナリオを比較検討して4番目を当該研究のシナリオとして選択しています。選択しなかった3つのシナリオについては実施困難と評価しています。しかし実施困難としたシナリオに含まれている暴露/許容濃度のデータや構造活性相関、細胞試験のデータは、それら単独ではリスクトレードオフの実施が困難なものの、有害性に関する一定の有用な情報を含んでいることは事実ではないでしょうか。ですので、それらの情報を何らかの形でこの研究に取り入れて活用すれば、この研究のリスク評価の不確実性をより小さくできるのではないかと考えます。

5章「考察」の第3段落で将来の方向性として、それらのデータをこの論文の方法に取り入れ融合させることが推定結果の信頼性を高めるポイントであると著者も言及されています。どのようなメカニズムでデータを融合し不確実性を小さくできるのか、現時点でのお考えで結構ですので著者の見解をお聞かせ下さい。

回答（蒲生 昌志）

ご指摘のように、選択しなかった3つのシナリオについても、それらを構成するデータや手法の中には、リスクトレードオフ評価で有効に活用できるものがあると考えています。

動物試験データが皆無である物質については、動物愛護の観点からも、構造活性相関や細胞試験の利用が重要です。可能性のあるアプローチは、構造活性相関による無毒性量の推定値や細胞試験の結果、または化学物質の構造に関する記述子を、構造方程式モデリングの観測変数として用いることです。一方、この論文で提示した手法では、構造方程式モデリングにおける変数間の関連性の記述を、毒性観察項目間の相関関係にのみ依存して行いましたが、変数の選択や変数間の因果関係の設定を、一般的なリスク評価方法でも議論される化学物質の作用機序の情報に基づいて行うことが考えられます。

5章「考察」の第3段落を、上記のような具体的な記述に変更しました。

## 議論5 難燃材を代替した理由

質問（小野 晃）

表3に従来の難燃剤を例としたリスク評価の結果が示されています。表の一番右の欄の代替なし（架空の状況）ですが、従来の難燃剤をそのまま使い続けた場合、その難燃剤の使用をやめた場合と比べて質調整生存年数がいくら減少するかを示していると理解しました。

従来の難燃剤もその代替物質もリスクの推定値は非常に小さい値になっています。許容できるリスクレベルの上限の目安に相当する0.04日の質調整生存年数の減少分と比べると桁違いに小さい値です。このようにリスクが桁違いに小さく評価された理由は何でしょうか。これまでリスクを過大に評価していた要因が、実ははるかに小さいものであることが分かったということでしょうか。あるいは質調整生存年数という共通指標を導入したこと自体が理由でしょうか、ご教示願います。

また同様の質問になりますが、この評価結果によると、質調整生存年数の減少分は問題にならないほどわずかなものであり、この物質代替は科学的に意味がなかったと結論付けていると思います。おそらくこの結論は正しいものと思いますが、それではなぜ当時この難燃物質を代替することにしたのか、その理由は何だったのでしょうか。科学的に妥当な理由でなかったかもしれませんが、当時は説得力のある理由と受け止められていたと思います。どのような理由だったのかご存じの範囲で結構ですので著者の見解をお聞かせ下さい。

回答（蒲生 昌志）

表3では、相対毒性値に平均値を用いるか95%上限値を用いるかによって、代替ありシナリオと代替なしシナリオでのリスクの推定値（質調整生存年数）の大小関係が逆転します。これは表1と表2が示すところと同様ですが、評価の不確実性を考慮すると、物質の代替が必ずしもリスク削減に寄与したとは判断できないことを示しています。

今回のケーススタディで、リスクの推定値が極めて小さい値であると算出されました。ただし、一般的なリスク評価方法（暴露レベルと許容レベルの比較）によっても、リスクがないと判断できるという結論になったものと考えられます。しかし、2.1節に書きましたように、一般的なリスク評価方法では、「リスクがない」という結論が得られるのみであり、今回、リスクの大きさが、質調整生存年数として具体的に示されたことで、リスク削減対策の必要性を議論すべきレベルのリスクではないことが明確になったと言えます。

なぜこの難燃剤の物質代替が正当化されたのかについては、従来の難燃剤の有害性の側面のみに関心が持たれ、その物質を避けたいという雰囲気広まってしまったことによるものと考えています。ここでは、一般的な方法のリスク評価すら十分には実施されておらず、また、代替前後の物質の有害性の比較やリスクの比較も、この論文での解析のような丁寧な議論はなされなかったものと考えています。

# A first empirical analysis of JIS lifespan

## —Implications for the review system of de jure standards—

Suguru TAMURA<sup>1, 2, 3</sup>

In this study, we normatively discuss the road map scenario to improve the management system of standards and then to improve the national innovation system. In AIST, there are many research projects of standards' generation, but the research about the management of established standards is rare. For this purpose, factors related to the lifespan of de jure standards are examined. We especially focus on the effect of technological categories of standards on lifespans. Under the system used by the Japanese Industrial Standards Committee, the review period for standards is five years, and it has not been changed for several decades. The system of ISO has been in the same situation for several decades as that of Japan Industrial Standards (JIS). By using the record of about 4500 JIS standards, the de jure standards of some industrial technology areas are shown to have a tendency toward longer lifespans. Depending on the obtained study results, we proposed a road map scenario to improve the national innovation system through the management of standards, which incurs less administrative costs and makes timely market creation.

**Keywords:** Lifespan, de jure standard, review interval, technological category

### 1 Introduction

In this study, we normatively discuss innovation to improve the management system of standards in a science and innovation policy perspective. For this purpose, we focus on the review system of the standards. Through this study, we have found that the review intervals of standards are fixed regardless of technological fields and the system has been the same for decades from the previous century. This system is the same for international standardization organization such as International Organization for Standardization (ISO) and de jure standards in Japan.

The research on standards in terms of innovation management is still in its introductory phase.<sup>[1]</sup> This study focuses on de jure standards, as set by governmental agencies, rather than on de facto standards, which are the results of market competition. De jure standards are fundamental for innovation. For example, MPEG (Motion Picture Experts Group), the digital format for exchanging moving pictures, is standardized as a de jure standard and is widely used to exchange digital movies.<sup>[2]</sup> A topic of research in the formation of the standards is the parallel development of standards and R&D activities. However, in the case of R&D of a public research institution in Germany (BAM: Federal

Institute for Materials Research and Testing), previous research pointed out that standardization does not move parallel to the R&D results of published papers in the field of basic research.<sup>[3]</sup> This implies that the formation of standards does not necessarily contribute directly to innovation. In the case of the US research institute for standards, the National Institute of Standards and Technology (NIST), the evaluation of individual R&D projects is still in the preliminary stage.<sup>[4]</sup> This case also shows that the formation of standards (pre-formation) itself is only a part of the national innovation system and we need to explore how to manage standards (post-formation). In this study, we explore the management system of formed standards, with the aim to achieve an efficient national innovation system. We suggest a road map scenario, which includes both pre-standardization and post-standardization steps to improve the national innovation system through an efficient management system of standards. We base our analysis on the survey of a number of research articles related to standardization released by the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).

In this study, we focus on a public national research institution, AIST in Japan, as in the above-mentioned research in Germany.<sup>[3]</sup> In AIST, there are many research projects

---

1. Research Institute of Economy, Trade and Industry (RIETI) 1-3-1 Kasumigaseki, Chiyoda-ku 100-8901, Japan, 2. Research Institute for Science and Engineering/Comprehensive Research Organization, Waseda University 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku 169-8555, Japan, 3. Policy Alternatives Research Institute, The University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku 113-0033, Japan E-mail: tamura.edu@nifty.com

Original manuscript received May 13, 2016, Revisions received July 15, 2016, Accepted July 15, 2016

focusing on standards' generation, but there seem to be no research on how to manage already established standards, in their innovation scenarios. There has been little research and almost no discussion about the role of standards after their formation for the transformation of laboratory technologies into market practices. More discussion is needed on this issue in terms of integration of related elements including both social and technological factors.<sup>[4]</sup> We especially need further discussion to clarify the links among R&D results, standards' formation (pre-standards' formation) and standards' management (post-standards' formation) in different innovation scenarios, both nationally and internationally. The OECD Frascati manual, the international guideline for innovation measurement since 1963, does not discuss how to manage already formed standards.<sup>[5]</sup> From the economic perspective, researchers have been focusing more on why and how standards are formed, rather than how we normatively manage already formed standards.<sup>[6]-[9]</sup>

How do scholars and practitioners approach the topic of standards' management after they are formed? One fundamental aspect is the lifespan of standards. The importance of this aspect is easily inferred from the case of patents and copyrights. The legal lifespan of patents and copyrights is a key factor to determine the value of patents and copyrights, after they are formed. The legal lifespan of patents is 20 years in Japan, but in some technology areas, like biotechnology, it can be extended to protect the value of patents. The lifespan of patents is a matter of value management for innovation. We ask whether we already have sufficient knowledge about the lifespan of standards to manage existing standards. It seems clear that we do not. We have surveyed the existing knowledge and several factors related to the lifespan of de jure standards, which are examined from the standards' management perspective. Among all factors, we focus on the effect of the technological category of standards on their lifespans. Our results suggest a management system of standards leading to less administrative costs and achieving timely market creation. This management system is normatively presented in a following road map scenario for innovation.

## 2 Background

In AIST, there are many research projects reflecting a wide

range of technology sectors. In addition, several research projects involve standardization. AIST is organized into 5 departments and 2 centers, which range from life science and information technologies. Its budget is about 1269 million USD for 2014. AIST is conducting research with a focus on industrialization. It has about 2200 researchers and it is one of the largest R&D institutions in Japan. The institution is also in charge of national measurement standards in Japan, like the National Institute of Standards and Technology (NIST) in the US. It promotes international standardization as part of its open innovation strategy.<sup>[10]</sup> In terms of policies, AIST is an affiliated agency of the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). METI is in charge of the management and formation of de jure standards in Japan, known as Japanese Industrial Standards (JIS), and of the country's innovation policy. Because of this twofold organizational structure, there is much research related to standardization conducted at AIST, in various technology fields. In addition, the AIST staff plays a key role in both the committees of the International Organization for Standardization (ISO) and the International Electrotechnical Commission (IEC). While 48 researchers from AIST have served as chairs, secretaries and conveners, 258 researchers have participated in meetings of those organizations as experts.<sup>[10]</sup>

In terms of standardization, the research conducted at AIST includes the following topics:

1. Environmental analysis methods of hazardous chemicals;<sup>[11]</sup>
2. Production and utilization of thermophysical property data;<sup>[12]</sup>
3. High pressure gaseous hydrogen;<sup>[13]</sup>
4. Four dimensional radiotherapy system;<sup>[14]</sup>
5. Secure password authentication schemes;<sup>[15]</sup>
6. Methodology for designing cryptographic systems;<sup>[16]</sup>
7. Utilization of thermophysical property data;<sup>[17]</sup>
8. SOFC systems;<sup>[18]</sup>
9. Font size for elderly people;<sup>[19]</sup>
10. SOFC cell/stack power generation performance tests;<sup>[20]</sup>
11. Utilization of observational data;<sup>[21]</sup>
12. Analysis method for oxygen impurity in magnesium and its alloys;<sup>[22]</sup>
13. Automotive navigation and route guidance system;<sup>[23]</sup>
14. Thermoelectric hydrogen gas sensor;<sup>[24]</sup>

15. Safe usage of moving images;<sup>[25]</sup>
16. Evaluation device of cosmetics for UV protection;<sup>[26]</sup>
17. Cryptographic modules;<sup>[27]</sup>
18. Three-dimensional shape for supporting industry;<sup>[28]</sup>
19. Geological map;<sup>[29]</sup>
20. Accessible design for senior citizens.<sup>[30]</sup>

However, these studies mainly focus on the formation process of standardization (pre-standards' formation), without consideration of the management of standards after their formation is completed (post-standards' formation). In our study, we also present a roadmap to innovation after the standards' formation is completed so as to integrate R&D results and standardization activities more effectively and comprehensively. This knowledge could improve the results of R&D in social settings, reducing their management costs and increasing efficiency.

In Japan, de jure standards are prepared by the Japanese Industrial Standards Committee (JISC). Such standards are reviewed every 5 years to decide whether standards are to be terminated, revised, or continued. The review interval has been fixed to a 5-year period, regardless of technological differences for several decades. However, some standards may not need to be reviewed so often. Previous studies did not show the distribution of the lifespan of each standard and this led to a fixed review interval. If the statistical evidence regarding the lifespan of standards is provided, a more appropriate review interval can be considered, following the academic evidence. We can use the knowledge of the lifespan for the international standardization organizations such as ISO since ISO also has been using the fixed interval review system for several decades.

Producing new standards and then maintaining them requires both human and financial resources. Under the current JISC rules, standards are reviewed every 5 years. Is the fixed 5-year review interval the most adequate, in a scientific perspective? This is the fundamental research question of this study. Our results show that the standards in specific technological categories tend to have longer lifespans. These standards can be revised to make their review periods longer.

For the sake of this study, the lifespan, defined as the number of years between the establishment of a standard and its end,

was the dependent variable in our model. Several factors supposed to be related to the lifespan are used for statistical analysis. Specifically, the following factors are considered: 1) technological category; 2) relationship with an international standard; 3) legal status (e.g., whether the standard has been incorporated into legislation yet); 4) revisions (e.g., revision of contents); and 5) type of standard. The relationship among these variables is defined as follows:

$$\text{Lifespan of standard} = f(\text{technological category, relationship with an international standard, legal status, revision, type of standard}). \quad (1)$$

Technological category is supposed to have a relationship with lifespans because the product lifecycle (e.g., technology lifecycle) is related to the lifespan of standards. In addition, international standards are supposed to have an effect on lifespans because changes in an international standard, such as a standard of the ISO or IEC, can lead to corresponding amendments in the JIS system. The revision status of a standard may have a relationship with lifespans because revisions are presumed to lead to a renewal of the technology targeted by the standard. The type of standards may also have a relationship with lifespans because the production standards will no longer be necessary once a product has left the market.

For the sake of this study, the e-JISC, the electric database of reference for METI, was used. This database is used for administrative purposes, and it has been used for this type of analysis for the first time in this paper.

In this study, about 4500 JIS are surveyed. Our major contributions are as follows:

- 1) The lifespans of JIS in each technological category is first investigated and the data we obtained are shown in figures;
- 2) We found statistically significant differences in the marginal effects of technological categories on lifespans. As a result, the standards of certain technological sectors are observed to have longer lifespans than others. This evidence leads to support a flexible interval system;
- 3) Based on our results, we proposed a road map scenario

to improve national innovation systems through the management of standards.

### 3 Literature review and hypothesis formation

#### 3.1 Management of standards

The existing research on the management of standards is mainly focused on how to form standards.<sup>[31]</sup> How to manage already formed standards in terms of innovation systems has not been recognized as a fundamental research topic so far, for the following reasons:

- 1) The formation of standards is still the main interest among researchers and research on the management of standards is still in its introductory phase;
- 2) Lack of available data for the purpose of standards' research.<sup>[32]</sup>

#### 3.2 JIS preparation process

JIS are mainly prepared to meet the needs of the private sector. Around 80–90 % of JIS are newly established or revised as a consequence of proposals from the private sector under Article 12 of the Industrial Standardization Act.<sup>[33]</sup>

In the formation process of standards, a draft for the JIS is prepared by a group of interest. This draft is then submitted to a drafting committee whose participants are drawn from producers, users, and third parties. If this step is successful, then, as the next step, the confirmed draft is sent to JISC. Finally, JISC deliberates about the draft and the standard may be authorized.<sup>[34]</sup>

#### 3.3 Effective terms of de facto standards

Several studies have focused on the effective terms of de facto standards, but they do not include de jure standards in their scope. Known as the most famous case study on the effective terms of de facto technology standards, David<sup>[35]</sup> investigates the standard of QWERTY typewriters. In his research, it was noted that such technology standards lasted for about 100 years without revision, not even after more efficient keyboard arrangements were developed. The key arrangement that was first developed is not the most efficient arrangement possible and was, in fact, designed to reduce typing speed. This feature of the design was important at the time of its introduction about 100 years ago because the typing speed of humans was faster than the mechanical capabilities of typewriters.

Today, nearly all typewriters have been replaced by personal computers. Inputs can even be provided to personal computers through a virtual touch screen keyboard instead of a physical keyboard. Hence, replacing the arrangement of keyboards would improve efficiency. Nevertheless, the QWERTY keyboard layout is still in use, even in touch screen interfaces. This case shows a lock-in effect, strong enough to effectively prevent changes in the basic interface of personal computers. David used this case to illustrate the persistency of standards.<sup>[35]</sup>

Another case study focusing on de facto standards in the fields of audio-visual and information technologies was conducted by Yamada.<sup>[36]</sup> This research showed that a de facto standard is established when the market share of a product reaches 2 %–3 %. David's research explained the persistency of standards in terms of a lock-in effect, focusing on human learning, but not all factors related to market dynamics were analyzed. Yamada's research gives some guidelines about the timing of formation for de facto standards, but not all determinants other than market share were discussed. In both cases, the focus is on de facto standards.

Although these studies discussed the effective terms of standards, they did not normatively discuss a scenario to improve the management system of standards, depending on their research results. Our study suggests a way to improve innovation systems through the effective management of standards.

#### 3.4 Other related research

There are several related studies to be taken into account.

##### 3.4.1 International standards

The relationship between international standards and international trade flows was studied by Blind and Jungmittag.<sup>[37]</sup> As for the consistency between JIS and international standards, about 6,000 of the 10,000 JIS were related to international standards.<sup>[33]</sup> Harmonizing with international standards has become more important after the introduction of the World Trade Organization's Technical Barriers to Trade (TBT) agreement in 1995. Since then, JISC has been promoting consistency between JIS and international de jure standards, such as those published by the ISO and IEC. However, the relationship between the JIS lifespan and

international standards has not been studied yet, even after the TBT enforcement. We control for this effect in the evaluation of the influence of the technological categories.

### **3.4.2 Legal usage**

JIS are used in some laws and regulations, such as the Pharmaceutical Affairs Act, the Fire Service Act, and the Human Resource Development Promotion Act in Japan. JIS are cited around 6,500 times in the Japanese law.<sup>[33]</sup> Nevertheless, the relationship between legal citations and JIS lifespans has not been studied previously. We control for this effect in the evaluation of the influence of technological categories.

## **3.5 Selection of relevant elements**

### **3.5.1 Overview**

The purpose of this study is to find a way to improve the management of standards. For this purpose, we need to identify which technological category influences the lifespan of standards. In addition, we need to introduce a set of control variables.

In this study, the hypothesis that technological category effects the lifespan of standards is formulated and examined through statistical estimation. The economic value of standards can be measured in several ways. Lifespan is a way of assessing their value. Under JISC rules, JIS are reviewed every 5 years; in the review, it is decided whether to terminate a standard or not, taking into account the opinion of the related industrial sector. This means that, if a standard does not seem to be needed in the 5-year review, such standards will be terminated. In this research, the lifespan of a standard is used as a proxy for the economic value of standards.

Although details vary across technological categories, the lifespan of a standard is supposed to be related to a certain stage in the product life cycle. When a product leaves the market, the related standard is supposed to be terminated. Each standard is associated with a specific technological category. In the JIS classification scheme, there is a category for management standards. Management standards are rule-related standards that are used in organizations and in society as a whole. This research includes management standards within the scope of its analysis.

## **3.5.2 Control variables**

### **3.5.2.1 International standard**

Some JIS were prepared on the basis of international standards to ensure standards to be domestically and internationally harmonized. In this analysis, “international standards” refers to ISO and IEC standards. When an international standard is converted into JIS, it is likely that there will be both positive and negative effects on the lifespan. The contents of the associated international standards are used in more areas and countries than in the case of JIS. Hence, the relationship with an international standard tends to produce a strong lock-in effect, and the standard is less likely to be terminated. Because of this, the lifespan of locked-in standards will tend to be longer. To control for this effect on the lifespan, a variable related to international standards needs to be included in the estimation of the model.

### **3.5.2.2 Legal usage**

Some standards have legal effects, and one of the important roles of JIS is to provide national rules for Japan, where JIS represent the de jure set of standards. Some laws use JIS for quantitative regulation and for reference. As such, this usage requires stability, to be in line with the regulative purpose, hoping that such standards will stay in force. In addition, to change laws and administrative rules that are based on JIS, a formal process, typically involving Congress or the Cabinet, is needed. As a result, JIS in legal usage are usually thought to have a longer lifespan. To control for this effect on lifespan, a variable related to legal usage needs to be included in the model.

### **3.5.2.3 Revision**

The revision of standards is likely to extend their lifespan because, when revisions are made, technological progress is incorporated into the revised standards. Hence, technological progress will be reflected in the contents of such standards, and, therefore, a revision should extend the lifespan of a standard. To control for this effect on lifespan, a variable related to revision needs to be included in the model.

### **3.5.2.4 Type of standard**

The type of a standard may be related to its lifespan. For example, in the case of measurement standards, the described measurement method may be used to gather information about the quality of products. However, the need for standards

concerning specific products will diminish as those products leave the market. Hence, measurement standards seem, in general, to be useful over a longer span than product-related standards. Nevertheless, it is also possible to conceive a relationship in the opposite direction. In industries where radical innovation is more frequent than incremental innovation, innovation in products and measurement cannot lag behind. Thus, innovation in products and measurement will happen together. When an obsolete product leaves the market, the associated measurement methods will also leave the market. In such industries, measurement standards may have lifespans similar to those of product standards. This means that technological replacement will be associated with the replacement of measurement methods. In short, in industrial sectors with frequent and radical innovations, measurement standards will be less static. For example, when digital media such as CDs (compact discs) were introduced, the technology related to analog storage media (like LP records) disappeared from the market. To control for this effect on the lifespan, a variable related to the type of standards needs to be included in the model. In addition to the categories such as 1) product and 2) measurement, there is the type of standards, which relate to a design and a mark. We formulate standards of the design and mark.

### 3.6 Hypothesis

To evaluate the effect of technological categories, we control for the above-mentioned elements. The following hypothesis is used in this study for the empirical analysis and scenario formation:

*Hypothesis (H). The technological category of a standard affects positively or negatively the lifespan of a standard.*

## 4 Method and Models

In this study, the relationship among the above-mentioned elements is statistically analyzed.

### 4.1 Model formation

We estimate the following regression to show the relationship among relevant elements and test the above-mentioned hypothesis. The dependent variable in the models is the lifespan, measured in years.

$$\text{Model1: } LIF = \text{constant} + \sum_{i=1}^{18} \beta_i \text{TEC}_i + \text{control variables} + u, \quad (2)$$

where the following is referred:

control variables: ISO, LEG, REV, ESY, and ENY

LIF: lifespan of a standard;

TEC: category of a standard (dummy);

ISO: international standard status (dummy);

LEG: legal status (dummy);

REV: revision (dummy);

ESY: establishment year of a standard (ten-year interval categories (dummy));

ENY: end year of a standard (ten-year interval categories (dummy));

constant: constant term; and

u: error term.

In addition, to check the robustness of Model 1, we formulate Model 2, in which the type of standards is added as a control variable. In Model 2, to evaluate the effect of the type of standards (e.g., a) production; b) measurement; c) design and mark), we add an additional control variable (dummy variable), as follows:

$$\text{Model2: } LIF = \text{constant} + \sum_{i=1}^{18} \beta_i \text{TEC}_i + \text{control variables} + u, \quad (3)$$

where control variables include ISO, LEG, REV, ESY, ENY, and TOS, and TOS is a dummy variable for the type of standards. All other variables are the same as in Model 1.

### 4.2 Method

The ordinary least squares (OLS) analysis is used to estimate the coefficients of both models and to test our hypothesis. The statistical package STATA is used for the estimation.

#### 4.2.1 Dataset

In this study, we used data from the e-JISC, the electric database of reference for the METI officials. The e-JISC provides data including the information of the *JIS Handbook*.<sup>[38]</sup> For example, besides the contents of each standard presented in the *JIS Handbook*, the e-JISC provides data relating to JIS, such as, 1) starting time; 2) ending time; 3) amendment time; 4) title; 5) identification number in a database format. Currently, the e-JISC is prepared and maintained by METI and used for administrative purposes.

For this research, we used the database under the academic cooperation between METI and RIETI (Research Institution of Economy, Trade and Industry). In this study, we use such information to build a new data set and we conduct a comprehensive analysis of the JIS lifespan for the first time.

At present, around 12,000 JIS are in effect, and in the past about 7,600 have been ended. Only standards for which complete data are available were chosen. We ended up with 4,483 standards (observations). We first analyzed the lifespan distribution in each technological category. The distributions are presented in Fig. 1. The distribution of the lifespan of standards varies across technological categories.

#### 4.2.2 Variables

A detailed explanation of each variable is reported in Table 1. The categories specified in JIS were used as technological categories in our models, and dummy variables were introduced for each category in Table 2. The type of standards was determined from the description in the title of each standard, and categorized into 1) product; 2) measurement; and 3) design and mark. Dummy variables for the time when each standard was established (beginning) and the time when each standard was terminated (ending) were introduced, using ten-year intervals.

The dependent variable in the models is lifespan, measured in years. As shown in Table 2, we introduce the variables “c1” to “c19” corresponding to the technological categories of JIS. The variable “iso\_iec” indicates the relationship with international standards. The variable “legal” indicates the use of a standard in legislation or for regulatory purposes. The variable “re” indicates whether a standard has been revised or not. For the purpose of controlling for the generation effect, we introduce the dummy variables “year10b#” and “year10e#” (where # represents an index), which represent the introduction and end years of a standard, respectively.

Among the categorical variables, c1 “A: Civil engineering and architecture” (technological category), year10b1 (starting year), year10e1 (ending year), and p\_type (type of standard) are used as baseline categories for the empirical estimation. “A: Civil engineering and architecture” was selected as the default industrial category due to its adequate number of observations.

## 5 Results and discussion

Table 3 shows the descriptive statistics for all variables. The OLS regression results are shown in Table 4.

In Model 1, looking at the coefficient on the industrial sector, the categories (c8) “H: Non-ferrous materials and metallurgy” and (c13) “Q: Management system” are not statistically significant. The categories (c11) “M: Mining” and (c15) “S: Domestic wares” show a tendency to be significant ( $p < 0.10$ ). The other sectors’ coefficients are all statistically significant. This result supports our hypothesis. Only the category (c17) “W: Aircraft and aviation” shows a negative coefficient, although this is relative to that of the baseline category (c1) “A: Civil engineering and architecture.” In Model 2, we use the type of standards as a control variable to check the robustness of the results of Model 1. In both Model 1 and Model 2, the significance of the results is the same. From the above results, the model is rewritten as

$$\text{Lifespan of standard} = f(\text{technological category (+/-)}) \quad (4)$$

Standards are reviewed at 5-year intervals, but those standards that are likely to have a longer lifespan would benefit from longer review intervals. Among all technological categories, those with larger coefficients tend to have longer lifespans. Coefficients larger than 2 are highlighted in Table 5, and include (c6) “F: Shipbuilding” and (c2) “B: Mechanical engineering.” In terms of sectors showing a shorter lifespan, (c17) “W: Aircraft and aviation” is statistically significant, but the coefficient is about -1, which is not large in this context. The difference in the coefficients between the two industrial categories does not seem large enough to suggest shortening the review period.

As for the theoretical model of the lifespan of the standards in the dynamic innovation process, transitions to newer technologies occur after the market for a prevailing technology is saturated, and new standards are required corresponding to the emergence of new markets.<sup>[39]–[41]</sup> Repetition of the sequence generates sequential innovation. The observed result empirically shows that the time-series behavior of the innovation processes differs according to technological categories.

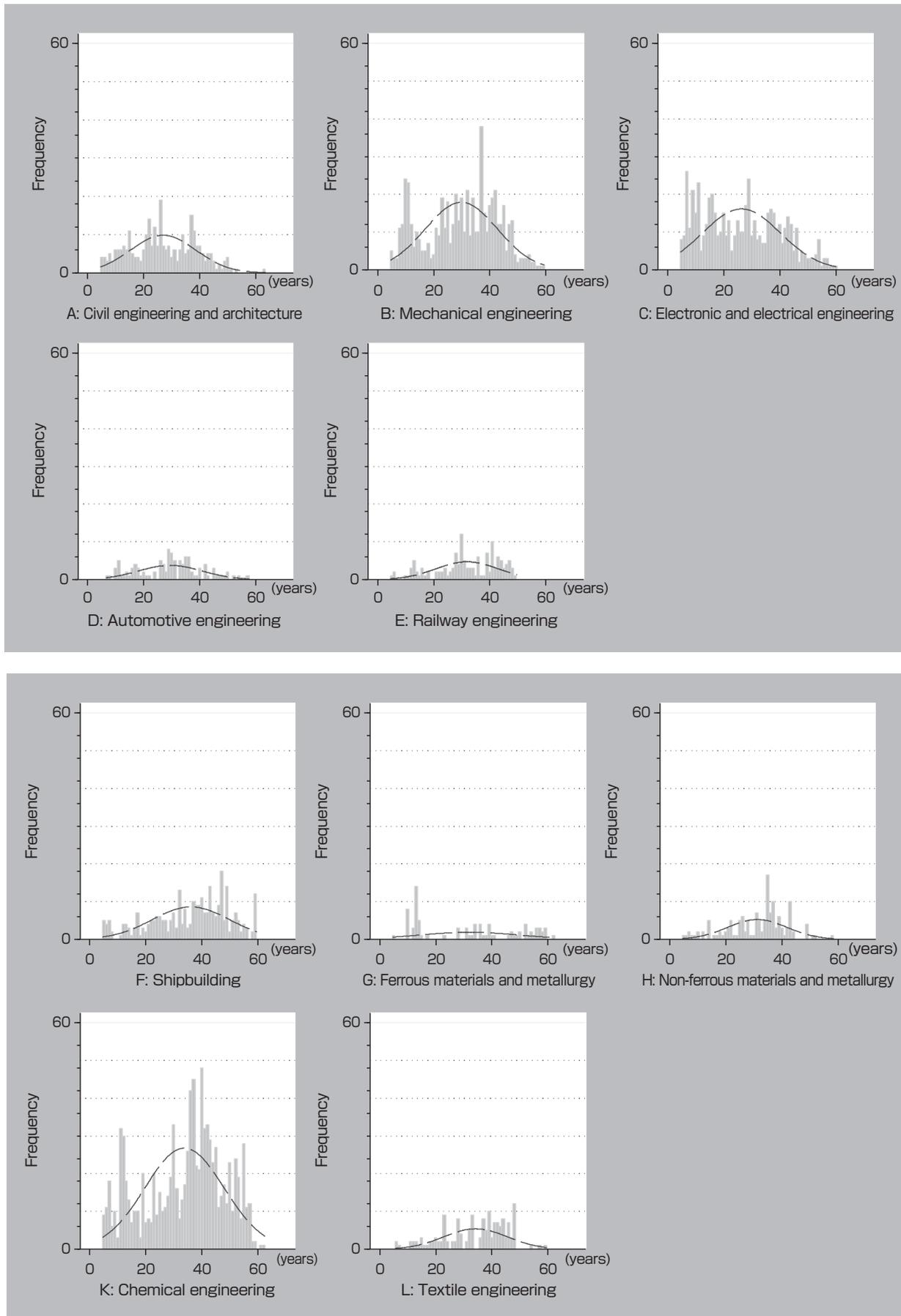


Fig. 1 Lifespan distribution of JIS standards

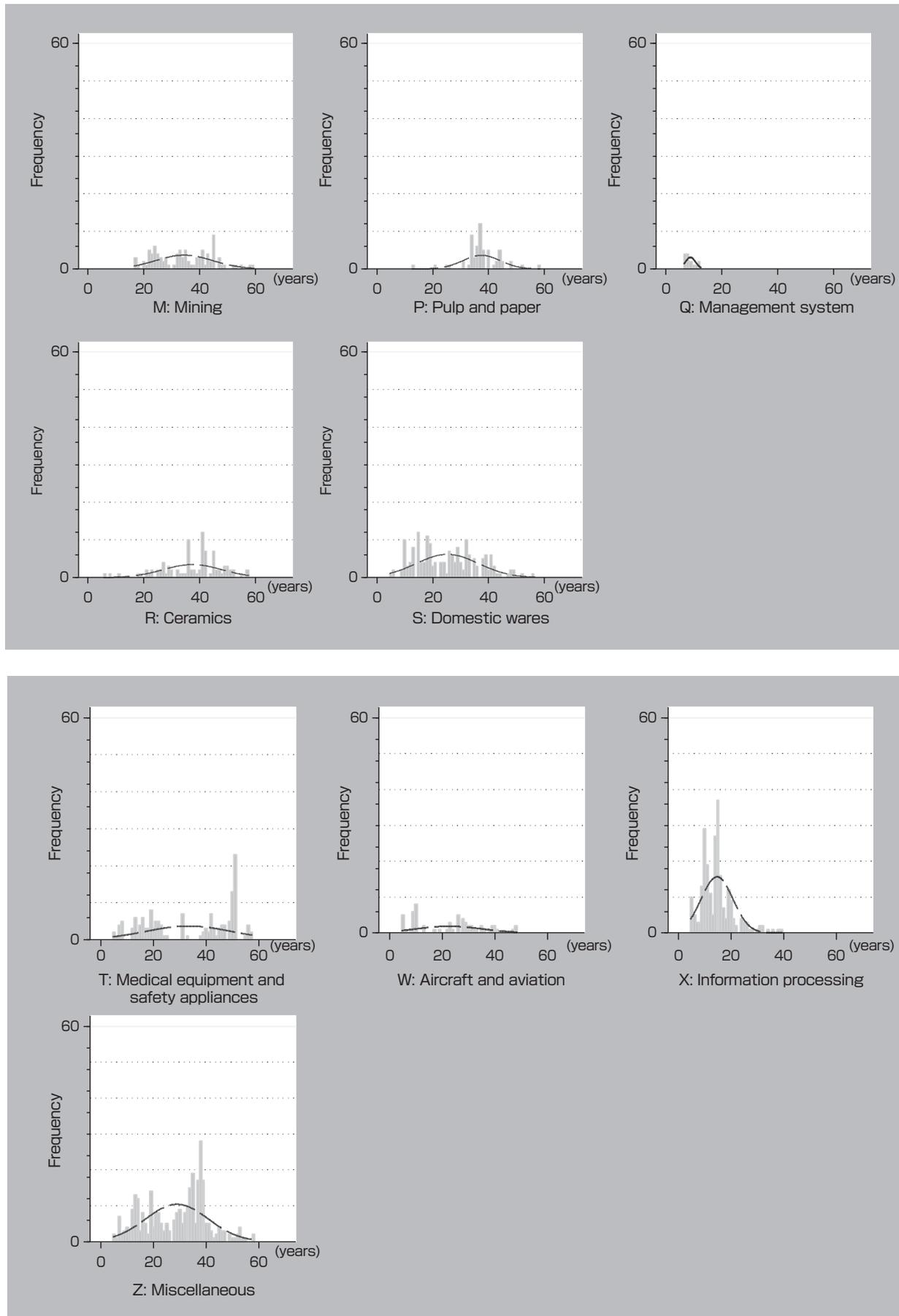


Fig. 1 Lifespan distribution of JIS standards

**Table 1. Explanation of variables**

Variable	Notation in analytical results	Explanation	Source	Notes
LIF	lif	<i>Lifespan of standard</i> : The number of years while the standard have been in place	Data from Japanese Standards Association (2011) and JISC data	Dependent variable
TEC	c1, c2, c3, ..., c19	<i>Technological category</i> : Dummy variable for technological category	Data from Japanese Standards Association (2011) and JISC data	Independent variable
ISO	iso_iec	<i>International standardization</i> : Dummy variable for international standardization	Data from Japanese Standards Association (2011) and JISC data	Independent variable Control variable
LEG	legal	<i>Legal status</i> : Dummy variable for legal usage	Data from Japanese Standards Association (2011) and JISC data	Independent variable Control variable
REV	re	<i>Revision</i> : Dummy variable revised or not	Data from Japanese Standards Association (2011) and JISC data	Independent variable Control variable
ESY	year10b#	<i>Established year</i> : The year when a standard is formed (ten year categorization basis; “#” is group number.)	Data from Japanese Standards Association (2011) and JISC data	Independent variable Control variable
ENY	year10e#	<i>End year</i> : The year when a standard is terminated (ten year categorization basis; “#” is group number.)	Data from Japanese Standards Association (2011) and JISC data	Independent variable Control variable
TOS	p_type m_type d_type	<i>Type of standard</i> : Dummy variable for standard category: i) “d_type” indicates a design and mark standard; ii) “m_type” indicates a measurement standard; iii) “p_type” indicates a production standard.	Data from Japanese Standards Association (2011) and JISC data	Independent variable Control variable

**Table 2. Alphabetic JIS technology code and technology area name**

Alphabetic JIS technology code and technology area name	Corresponding independent dummy variable in models 1 and 2
A: Civil engineering and architecture	c1
B: Mechanical engineering	c2
C: Electronic and electrical engineering	c3
D: Automotive engineering	c4
E: Railway engineering	c5
F: Shipbuilding	c6
G: Ferrous materials and metallurgy	c7
H: Non-ferrous materials and metallurgy	c8
K: Chemical engineering	c9
L: Textile engineering	c10
M: Mining	c11
P: Pulp and paper	c12
Q: Management system	c13
R: Ceramics	c14
S: Domestic wares	c15
T: Medical equipment and safety appliances	c16
W: Aircraft and aviation	c17
X: Information processing	c18
Z: Miscellaneous	c19

**Table 3. Descriptive statistics of variables**

Variable	Obs	Mean	Std.Dev.	Min	Max
1.Independent variable					
<i>lif</i>	4483	30.01115	13.75334	5	63
2.Dependent variable					
<i>c1</i>	4483	0.06402	0.244815	0	1
<i>c2</i>	4483	0.128485	0.334667	0	1
<i>c3</i>	4483	0.125139	0.330914	0	1
<i>c4</i>	4483	0.024091	0.153349	0	1
<i>c5</i>	4483	0.029445	0.169068	0	1
<i>c6</i>	4483	0.066473	0.249136	0	1
<i>c7</i>	4483	0.018961	0.136401	0	1
<i>c8</i>	4483	0.031229	0.173956	0	1
<i>c9</i>	4483	0.211912	0.408708	0	1
<i>c10</i>	4483	0.034352	0.182152	0	1
<i>c11</i>	4483	0.020968	0.143294	0	1
<i>c12</i>	4483	0.013607	0.115866	0	1
<i>c13</i>	4483	0.003123	0.055802	0	1
<i>c14</i>	4483	0.020299	0.141037	0	1
<i>c15</i>	4483	0.038367	0.192103	0	1
<i>c16</i>	4483	0.033906	0.181007	0	1
<i>c17</i>	4483	0.013384	0.114925	0	1
<i>c18</i>	4483	0.052866	0.223792	0	1
<i>c19</i>	4483	0.069373	0.254116	0	1
Control Variable					
<i>iso_iec</i>	4483	0.152353	0.359403	0	1
<i>legal</i>	4483	0.003569	0.059641	0	1
<i>re</i>	4483	0.711131	0.453288	0	1
<i>d_type</i>	4483	0.009146	0.095205	0	1
<i>m_type</i>	4483	0.167076	0.373085	0	1
<i>p_type</i>	4483	0.823779	0.381051	0	1
<i>year10b1</i>	4483	0.002454	0.04948	0	1
<i>year10b2</i>	4483	0.348204	0.476454	0	1
<i>year10b3</i>	4483	0.227303	0.419137	0	1
<i>year10b4</i>	4483	0.158822	0.365551	0	1
<i>year10b5</i>	4483	0.119563	0.324486	0	1
<i>year10b6</i>	4483	0.107963	0.310369	0	1
<i>year10b7</i>	4483	0.03569	0.185538	0	1
<i>year10e1</i>	4483	0.05242	0.222898	0	1
<i>year10e2</i>	4483	0.498996	0.500055	0	1
<i>year10e3</i>	4483	0.326121	0.468844	0	1
<i>year10e4</i>	4483	0.122463	0.327856	0	1

Table 4. Estimation results

Dependent variable: lif		
Independent variable	model1 (coefficient/t-value)	model2 (coefficient/t-value)
1. Technological category		
<i>c2</i>	2.0567 [7.30]***	2.0542 [7.28]***
<i>c3</i>	1.1003 [3.86]***	1.0972 [3.84]***
<i>c4</i>	1.2082 [2.75]***	1.2039 [2.74]***
<i>c5</i>	1.1824 [2.91]***	1.1844 [2.91]***
<i>c6</i>	3.8369 [11.89]***	3.8403 [11.85]***
<i>c7</i>	2.2717 [4.63]***	2.2738 [4.64]***
<i>c8</i>	0.2524 [0.63]	0.2551 [0.64]
<i>c9</i>	1.4889 [5.57]***	1.4918 [5.58]***
<i>c10</i>	2.2951 [5.88]***	2.298 [5.89]***
<i>c11</i>	0.8809 [1.91]*	0.8738 [1.90]*
<i>c12</i>	2.6987 [4.95]***	2.7002 [4.92]***
<i>c13</i>	-1.1582 [-1.08]	-1.158 [-1.08]
<i>c14</i>	1.3432 [2.88]***	1.3335 [2.86]***
<i>c15</i>	0.6355 [1.70]*	0.6399 [1.71]*
<i>c16</i>	2.0533 [5.15]***	2.057 [5.15]***
<i>c17</i>	-1.3009 [-2.36]**	-1.2956 [-2.35]**
<i>c18</i>	1.0596 [2.83]***	1.0524 [2.78]***
<i>c19</i>	1.2459 [3.90]***	1.2466 [3.90]***
<i>constant</i>	35.6928 [29.04]***	35.6594 [28.98]***
2. Control variable		
ISO	yes	yes
LEG	yes	yes
REV	yes	yes
ESY	yes	yes
ENY	yes	yes
TOS	no	yes
R-squared	0.9231	0.9231
Adj-R-squared	0.9226	0.9225
N	4483	4483
NOTE: [ ] t-value, * p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01. Control variables: 1)international standardization(ISO), 2)legal status(LEG), 3)revision(REV), 4)established year(ESY) and 5)end year(ENY) are included in both models. Type of standard(TOS) is only included in the model2.		

**Table 5. Technology categories and coefficients**

	Positive coefficient (Model 1 / Model 2)	Negative coefficient (Model 1 / Model 2)	Significant level (Model 1 / Model 2)	Notes
A: Civil engineering and architecture				c1(Base group)
B: Mechanical engineering	2.05/2.05		***/**	c2
C: Electronic and electrical engineering	1.10/1.09		***/**	c3
D: Automotive engineering	1.20/1.20		***/**	c4
E: Railway engineering	1.18/1.18		***/**	c5
F: Shipbuilding	3.83/3.84		***/**	c6
G: Ferrous materials and metallurgy	2.27/2.27		***/**	c7
H: Non-ferrous materials and metallurgy				c8
K: Chemical engineering	1.48/1.49		***/**	c9
L: Textile engineering	2.29/2.29		***/**	c10
M: Mining	0.88/0.87		*/*	c11
P: Pulp and paper	2.69/2.70		***/**	c12
Q Management system				c13
R: Ceramics	1.34/1.33		***/**	c14
S: Domestic wares	0.63/0.63		*/*	c15
T: Medical equipment and safety appliances	2.05/2.05		***/**	c16
W: Aircraft and aviation		-1.30/-1.29	**/**	c17
X: Information processing	1.05/1.05		***/**	c18
Z: Miscellaneous	1.24/1.24		***/**	c19

Note: Coefficients with absolute value greater than 2 are highlighted. (\*p < 0.1, \*\*p < 0.05, \*\*\*p < 0.01)

## 6 Future scenario and policy implications

In Fig. 2, we present a road map scenario for the future development and further integration of the elements presented. We propose a scenario that covers both short-term and long-term outcome goals. The current scenario, as implicitly shown in AIST research, only focuses on a short-term scenario. Our scenario includes both pre-standardization and post-standardization management, while the current roadmap includes only pre-standardization management of invented technology. Moreover, the pre-standardization management mainly focuses on the R&D perspectives. Today, standards play an important role and, in some cases, standards are essential for the formation of new product markets. Standards play an important role in the dynamic change of the product life cycle. Innovation and standards are complementary to each other.<sup>[39]–[41]</sup> Previous research mainly discussed the first stage of the proposed scenario “1. R&D and standardization.” In this study, we show that we can improve the scenario focusing on “2. Integration of relevant elements.” Knowing that lifespan varies across technological categories, we can improve the management system of standards, focusing on the post-standardization phase. As a result, we can introduce a third stage “3. Improvement of the management system of standards,” achieving more effective management systems for the established standards and timely market creation, and obtain “4. Improvement of the innovation system,” which means the establishment of a platform for the management of standards for innovation systems.

We suggest the possibility to reduce the administrative cost of maintaining standards simply by allowing longer review intervals of standards. This is the key feature of the proposed stage “3. Improvement of the management system of standards.” The current interval of 5 years could be extended for some categories, as suggested by the coefficients in our estimation results. The results from Models 1 and 2 suggest that the following industrial categories are ideal candidates for less frequent reviews: (c2) “B: Mechanical engineering;” (c6) “F: Shipbuilding;” (c7) “G: Ferrous materials and metallurgy;” (c10) “L: Textile engineering;” (c12) “P: Pulp and paper;” (c16) “T: Medical equipment and safety appliances.” De jure standards are prepared and used across both developed countries and developing countries, even though de facto standards are established by corporations from developed countries. The aim of this research is also to help improve administrative systems based on de jure standards, including the ISO and IEC, around the globe. Such reforms would improve national innovation systems both in developing and developed countries, through the improvement of the management system of standards.

### 6.1 Theoretical contribution

We identified the key determinants of the lifespan of standards and the relationship as  $\text{Lifespan of standard} = f(\text{technological category (+/-)})$ . This result leads to a different treatment of standards across technological categories. As the timely creation of a market is essential in the current innovation system, a correct timing for standards’ review

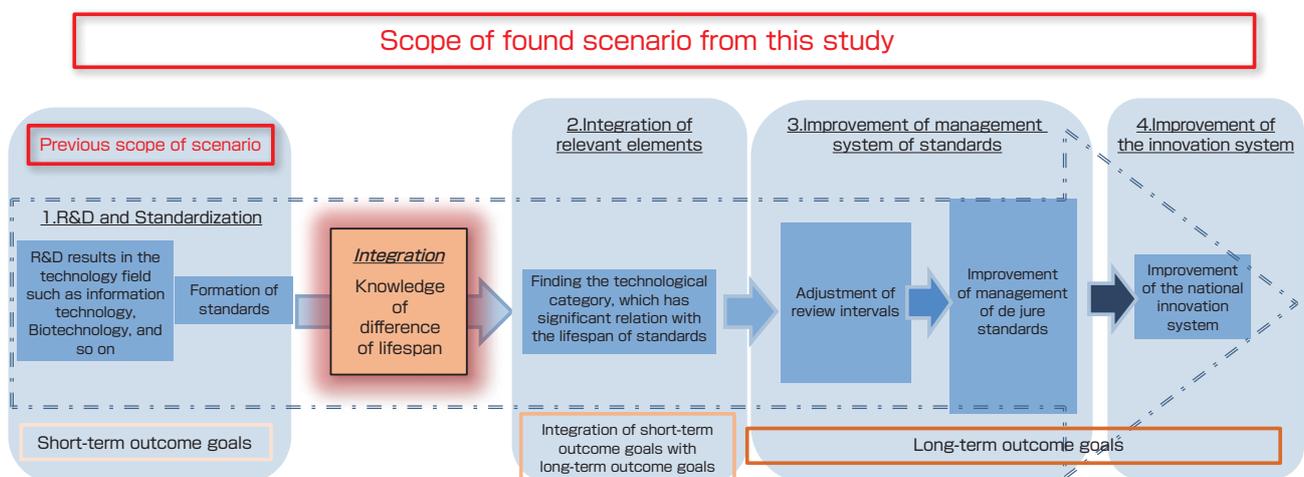


Fig. 2 Road map scenario for the improvement of the national innovation system through the management of standard

is important and can lead to the implementation of more valuable standards. This is expressed as

$$\max (\text{Value of standards}) = f(t^*),$$

where  $t^*$  is the equilibrium point of the review period in terms of the value of standards, in each technological category.

## 6.2 Managerial contribution

Our result shows that we can use the lifespan of standards as tools for the management of such standards, as in patent or copyright legal systems. We can reduce the administrative and related transaction costs for reviewing standards. We can adjust the current 5-year interval to longer intervals, for some categories, as our estimation results (Table 5) seem to suggest. Through this empirical analysis, a comprehensive management scenario for both the pre-standardization and post-standardization periods is presented for the first time as an explicit conceptual framework. This result applies to both the international standards' system in ISO and IEC and to each country's de jure standards' management system. Our result has potential global implications, since de jure standards are necessary tools in both developing and developed countries.

## 7 Further study

We study the general tendency of each technology sector. The next study will aim to investigate the lifespan and the reason behind each technology standard. For this, it is necessary to know the nature of the technology. The role of standards in terms of product life cycle should be discussed for each related product.

We proposed the scenario in Fig. 2. To improve the mindset for fostering innovation through the review term of the standardization, it is necessary to check the difference in the lifespan of each technology field when JISC plans the review schedule, which usually occurs on a yearly basis.

## 8 Conclusion

In our study, we presented a roadmap to innovation after the standards' formation is completed so as to integrate R&D results and standardization activities more effectively

and comprehensively. For the purpose, this study focused on the lifespan of standards as the variable of interest. We normatively discussed the review interval of standards. First, we found an empirical relationship between the technology sectors and the lifespan of standards. This means that differences in technological characteristics have a strong influence on the lifespan of de jure standards. This is true for industrial sectors, such as (c6) "F: Shipbuilding" and (c2) "B: Mechanical engineering." We can optimize the review periods of standards following these results. In some contexts, extending the review interval can be appropriate. This may lead to a reduction in the cost of maintenance of standards and to adequate market creation. We also presented a road map scenario, focused on both the pre-standardization and post-standardization periods, to improve the national innovation system through the revision of the management system of standards, by referring to the research result of standardization in AIST. This result is beneficial to public agencies in Japan, as well as to international organizations, such as ISO, which deal with de jure standards with fixed review interval systems for several decades.

## Acknowledgements

This study is conducted as part of the Project at Research Institute of Economy, Trade and Industry (RIETI). The author appreciates the valuable comments of the Discussion Paper seminar participants at RIETI, the support from Director Nagano, Director Yamamoto, Director Fukuda and Director Izumi of Technical Regulations, Standards and Conformity Assessment Unit at the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) and Professor Omori of the economics department at The University of Tokyo. This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 15K03718.

## References

- [1] G. Tasse: *Method for Assessing the Economic Impacts of Government R&D*, National Institute of Standards & Technology, Gaithersburg (2003).
- [2] H. Yasuda: Standardization activities on multimedia coding in ISO, *Signal Processing: Image Communication*, 1, 3–16 (1989).
- [3] K. Zi and K. Blind: Researchers' Participation in Standardisation: a Case Study from a Public Research Institute in Germany, *The Journal of Technology Transfer*, 40 (2), 346–360 (2015).

- [4] A. Ono, M. Akamatsu and N. Kobayashi: Scenario in synthetic-type research: its role and description, *Synthesiology—English edition*, 9 (1), 27–41 (2016).
- [5] OECD: *Frascati Manual 2002: Proposed Standard Practice for Surveys on Research and Experimental Development*, OECD, Paris (2002).
- [6] W. B. Arthur: Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events, *Economic Journal*, 99, 116–131 (1989).
- [7] K. Blind: Explanatory Factors for Participation in Formal Standardization Processes: Empirical Evidence at the Firm Level, *Economics of Innovation and New Technology*, 15 (2), 157–170 (2006).
- [8] K. Blind and A. Mangelsdorfa: Motives to Standardize: Empirical Evidence from Germany, *Technovation*, 48–49, 13–24 (2016).
- [9] C. Antonelli: Localized Technological Change and the Evolution of Standards as Economic Institutions, *Information Economics and Policy*, 6 (3/4), 195–216 (1994).
- [10] AIST: *2015 AIST REPORT*, Tokyo (2016).
- [11] S. Taniyasu, N. Hanari, Y. Horii and N. Yamashita: Standardization of environmental analysis methods of hazardous chemicals, *Synthesiology—English edition*, 5 (4), 270–286 (2013).
- [12] T. Baba and M. Akoshima: A social system for production and utilization of thermophysical quantity data, *Synthesiology—English edition*, 7 (2), 49–64 (2014).
- [13] T. Iijima, T. Abe and H. Itoga: Development of material testing equipment in high pressure gaseous hydrogen and international collaborative work of a testing method for a hydrogen society, *Synthesiology—English edition*, 8 (2), 61–69 (2015).
- [14] Y. Hirata, N. Miyamoto, M. Shimizu, M. Yoshida, K. Hiramoto, Y. Ichikawa, S. Kaneko, T. Sasagawa, M. Hiraoka and H. Shirato: International standardization of four dimensional radiotherapy system, *Synthesiology—English edition*, 7 (4), 229–238 (2015).
- [15] K. Kobara and S. Shin: Secure password authentication schemes and their applications, *Synthesiology—English edition*, 7 (3), 174–184 (2014).
- [16] G. Hanaoka, S. Ohata, T. Matsuda, K. Nuida and N. Attrapadung: Methodology for designing cryptographic systems with advanced functionality based on a modular approach, *Synthesiology—English edition*, 7 (2), 92–104 (2014).
- [17] T. Baba and M. Akoshima: A social system for production and utilization of thermophysical quantity data, *Synthesiology—English edition*, 7 (2), 49–64 (2014).
- [18] Y. Tanaka, A. Momma, A. Negishi, K. Kato, K. Takano, K. Nozaki and T. Kato: Progress towards realizing distributed power generation with highly efficient SOFC systems, *Synthesiology—English edition*, 6 (1), 12–26 (2013).
- [19] K. Sagawa and K. Kurakata: Estimation of legible font size for elderly people, *Synthesiology—English edition*, 6 (1), 38–49 (2013).
- [20] A. Momma, K. Takano, Y. Tanaka and T. Kato: Evaluating uncertainty for the standardization of single cell/stack power generation performance tests for SOFC, *Synthesiology—English edition*, 5 (4), 251–261 (2013).
- [21] K. Iwao: International cooperation for the utilization of earth observational data in an integrated manner, *Synthesiology—English edition*, 5 (3), 160–170 (2012).
- [22] A. Tsuge and W. Kanematsu: An analysis method for oxygen impurity in magnesium and its alloys, *Synthesiology—English edition*, 5 (1), 25–36 (2012).
- [23] H. Ito: Integrated development of automotive navigation and route guidance system, *Synthesiology—English edition*, 4 (3), 162–171 (2012).
- [24] W. Shin, M. Nishibori and I. Matsubara: Thermoelectric hydrogen gas sensor, *Synthesiology—English edition*, 4 (2), 99–107 (2011).
- [25] H. Ujike: Developing an evaluation system of visually induced motion sickness for safe usage of moving images, *Synthesiology—English edition*, 5 (3), 139–149 (2012).
- [26] Y. Takao and M. Sando: Products and evaluation device of cosmetics for UV protection, *Synthesiology—English edition*, 3 (2), 140–150 (2010).
- [27] A. Satoh, T. Katashita and H. Sakane: Secure implementation of cryptographic modules, *Synthesiology—English edition*, 3 (1), 86–95 (2010).
- [28] S. Osawa, T. Takatsuji and O. Sato: High accuracy three-dimensional shape measurements for supporting manufacturing industries, *Synthesiology—English edition*, 2 (2), 95–106 (2009).
- [29] K. Wakita, T. Igawa, S. Takarada and Y. Fusejima: Creation of seamless geological map of Japan at the scale of 1:200,000 and its distribution through the web, *Synthesiology—English edition*, 1 (2), 73–84 (2008).
- [30] K. Kurakata and K. Sagawa: Development and standardization of accessible design technologies that address the needs of senior citizens, *Synthesiology—English edition*, 1 (1), 15–23 (2008).
- [31] A. E. Leiponen: Competing Through Cooperation: The Organization of Standard Setting in Wireless Telecommunications, *Management Science*, 54 (11), 1904–1919 (2008).
- [32] S. Tamura: Generic Definition of Standardization and the Correlation between Innovation and Standardization in Corporate Intellectual Property Activities, *Science & Public Policy*, 40 (2), 143–156 (2013).
- [33] JISC: *Japan's Standardization Policy 2013*, Japanese Industrial Standards Committee, Tokyo (2013).
- [34] S. Tamura: Who participates in de jure standard setting in Japan? The analysis of participation costs and benefits, *Innovation: Management, Policy & Practice*, 17 (3), 400–415 (2015).
- [35] P. A. David: Clio and the economics of QWERTY, *The American Economic Review*, 75, 332–337 (1985).
- [36] H. Yamada and S. Kurokawa: How to profit from the de facto standard-based competition: learning from Japanese firms' experiences, *International Journal of Technology Management*, 30 (3/4), 299–326 (2005).
- [37] K. Blind and A. Jungmittag: Trade and the impact of innovations and standards: the case of Germany and the UK, *Applied Economics*, 37, 1385–1398 (2005).
- [38] Japanese Standards Association: *JIS handbook*, Tokyo (2011) (in Japanese).
- [39] T. M. Egyedi and M. H. Sherif: Standards Dynamics through an Innovation Lens: Next-Generation Ethernet Networks, *IEEE Communications Magazine*, 48 (10), 166–171 (2010).
- [40] M. H. Sherif: A Framework for Standardization in Telecommunications and Information Technology, *IEEE Communications Magazine*, 39 (4), 94–100 (2001).
- [41] K. Jakobs, R. Procter and R. Williams: Standardisation, Innovation and Implementation of Information Technology, *Computers and Networks in the Age of Globalization*, 57, 201–217 (2001).

## Author

### Suguru TAMURA

Joined the Ministry of International Trade and Industry, and worked at the Technology Evaluation and Research Division, Industrial Science and Technology Policy and Environment Bureau, and at the Council for Science and Technology Policy, Cabinet Office. Associate Professor of the Faculty of Science and Engineering, Waseda University from 2009 to 2012. Senior Fellow of the Research Institute of Economy, Trade and Industry from 2012. Main accomplishments include publication in the *Synthesiology*, *Journal of the American Ceramic Society*, *Science and Public Policy*, *International Journal of Technology Management*, *Technovation* and others. Research topics include the innovation management and the R&D evaluation method.



## Discussions with Reviewers

### 1 Overall

#### Comment (Naoto Kobayashi, Waseda University)

This paper presents original results, which are useful and interesting from the viewpoint of optimizing the review period of the standards that contribute to innovation. The process is expected to help the efficient management of standards. Therefore, this paper deserves to be published in *Synthesiology* owing to the improvement of the synthetic method of logical expression.

#### Comment (Hiroaki Tao, AIST)

By analyzing about 4500 JIS standards, this paper describes the influence of factors, such as technology categories, ISO standards, legislative application, review records, and the type of standards (design, measurement, and product), on the lifespan of standards. The paper is a valuable contribution to be published in *Synthesiology* as there have been no papers that address the lifespan of de jure standards and the policy implications for innovation systems based on the improvement of technology standards' management.

### 2 Relevance of lifespan to the standards' properties

#### Comment (Naoto Kobayashi)

The lifespan of standards was investigated by introducing the technology category as an independent variable in the regression analysis. It is necessary to analyze the relevance of the lifespans to the properties of the lifespan distribution shown in Fig. 1. For example, in *C: Electronic and electrical engineering*, the frequency of the lifespan decreases almost monotonically toward the longer lifespan. In *T: Medical equipment and safety appliances*, it is found that many specific standards have a lifespan of about 50 years. I recommend that you describe the relevance of the results of your current analysis to the properties of standards in the corresponding technology category.

#### Answer (Suguru Tamura)

The aim of this study is to present a statistical analysis for the existent categories. It is possible, however, to study the characteristics of technology standards and their statistical properties in a narrower technology classification. Examining the reason why individual standards differ in age is a subject for future research. This point is added in Chapter 7, "Further research."

### 3 Revising the review interval of standards

#### Comment (Hiroaki Tao)

This study's proposition that innovation systems can be improved through the management of standards in addition to the formation of technology standards is novel and important. However, the resulting policy implications are limited to extending the review interval and, as a consequence, seem to focus only on the reduction of management costs. The recommendation is an obvious one. Could you present a recommendation on reducing the review interval that would improve innovation speed?

#### Answer (Suguru Tamura)

According to the results presented in Table 5, the coefficient is large enough to serve as evidence in support of our discussion on the policy implications. Several coefficients are positive and almost exceed the value two. This value corresponds to the situation where the review interval tends to be 50 % longer than the current five-year interval. Nevertheless, there are not enough large and negative coefficients. Hence, in the discussion on policy implications, we consider only the extension of the review interval.

### 4 Technology classification and review intervals

#### Comment (Hiroaki Tao)

In Fig. 1, *B (Mechanical engineering)* and *K (Chemical engineering)* seem to have two peaks. This suggests that setting a single and fixed review interval, which depends on the existing technology categories, is not rational. Could you comment on this?

#### Answer (Suguru Tamura)

Under the current system, reviews with a specific interval are a requirement. Hence, to formulate policy recommendations, it is necessary to consider a review interval. In our analysis, the review periods correspond to the pre-existent JIS technology categories, and the revision of the review period is suggested according to those categories. This suggestion depends on the existing framework for technology classification. In addition, we study the factors that affect the age of technology standards in each technology category as a whole. Let us consider the example of smoking and the health risk it poses from the medical point of view. There are smokers, who do not suffer from lung cancer, but, on average, the ratio of cancer sufferers is higher among smokers when we consider the difference between groups of smokers and non-smokers. When we contemplate this result in the context of policy implications and the policy framework, we consider the average figure for each group, rather than data on a single individual. This example illustrates that, for statistical analysis, the established group category is used in many cases. For classification purposes in our study, we follow the category of JIS technology standards, which has been used in the literature for a long time.

One may point out that, for example, to divide each existing technology category into subgroups and to decide the review interval according to the subgroup is theoretically possible. However, to achieve that, exploring other category classification criteria is essential. This essentially means searching for the reason for the different lifespan of each standard. We think that this is not within the research scope of this paper and the issue is discussed as a subject for further research in Chapter 7, "Further research."

### 5 Analysis concerning the characteristics of technology categories

#### Comment (Hiroaki Tao)

It is contemplated that the influence of ISO standards,

legislative application, review records, and the type of standards on the lifespan is different in each technology category, but the differences in such an influence between technology categories does not seem to be analyzed in the present study. Is it difficult to address this in your study?

Moreover, emerging, mature, or obsolete technologies change over time differently in each technology category. It has been suggested that this influence manifests in the number of standards produced, the frequency of reviews, and the number of aborted standards. Is it possible to observe the technology transitions in each technology category?

**Answer (Suguru Tamura)**

In this study, we first control the influence of factors such as ISO standards, legislative application, review records, and the type of standards. Later, we discuss the influence of technology categories. When we observe the variance in age, we should recognize that the source of the variance is ISO or technology categories. Otherwise, our conclusions concerning the factors' influence and policy implications are erroneous. Therefore, we use the control variables to isolate the influence of the unintended factors. With this method, the factor of interest—the technology

category—is analyzed separately. Certainly, if we were addressing a different research goal, we could observe the influence of ISO by treating the other factors as control variables, rather than as policy variables. The current research setting largely corresponds to our research goal. For a discussion on this theoretical issue, see, for instance, *Introductory Econometrics: A Modern Approach* by Wooldridge.

Finally, the control variables we used in this study are:

1. ESY, in order to capture the generation differences when standards were established;
2. ENY, in order to capture the generation differences when standards were abolished.

Through this treatment, we can estimate the influence of categories on age by excluding the influence of the generation background. On the other hand, we can estimate the influence of the generation difference by treating ESY and ENY as policy variables and including the technology categories as controls, although such setting diverges from our research goal. This analysis shows that, for example, the standards established in certain decades tend to have a longer—or shorter—lifespan than those established in other decades.

# 最表面原子層を分析する光電子分光装置 EUPS の開発

## — レーザー生成プラズマ光源の実用化技術開発と EUPSが見せる材料最表面の魅力 —

富江 敏尚<sup>1, 2\*</sup>、石塚 知明<sup>2</sup>

レーザープラズマ光源の最有望応用技術として極端紫外光励起光電子分光法、EUPS、の原理を考案してから、4半世紀が過ぎた。最表面原子層の超微量汚染の検出、バンド曲がり、表面のキャリア密度の評価、導電率の評価等、他の手法では困難な分析がEUPSで可能になっており、触媒活性との良い相関が得られるなど、材料の有用な分析手段になっている。ユーザーの課題解決のために生まれた分析法が多く、ユーザーによりEUPSが高度化されたと言える。EUPSの着想に至るまでの経緯、実用装置にするための要素技術の選定と構成、従来の光電子分光にはない新たな分析法を可能にしたのはEUPSのどのような特徴によるか、などを記述した。

**キーワード:** レーザー生成プラズマ、EUPS、飛行時間法、最表面原子層、バンド曲がり、キャリア密度、二次電子

## Development of EUPS for analyzing electronic states of topmost atomic layer

—Materialization of laser-produced plasma source application and EUPS observed fascinating surface—

Toshihisa TOMIE<sup>1,2\*</sup> and Tomoaki ISHITSUKA<sup>2</sup>

A quarter century has passed since the principle of EUPS (extreme UV excited photoelectron spectroscopy) was invented as the most promising application of a laser-produced plasma source. EUPS enables analysis of electronic states of the topmost atomic layer, band bending of semiconductors, estimation of carrier density, and evaluation of electrical conductivity from secondary electron signals. These newly emerged analyses provide useful information for developing catalysts, protective insulators and other materials. These new analyses were born when problems needed to be solved were brought in by users. We can say that EUPS was sophisticated by the needs of users. In this paper we describe the historical background leading to the invention of the principle of EUPS, the selection and development of the component technologies those constitute the EUPS system, and the birth processes of novel analyses those emerged.

**Keywords:** Laser-Produced Plasma, EUPS, time-of-flight, topmost atomic layer, band bending, carrier density, secondary electron

### 1 はじめに

#### 1.1 光電子分光の新たな応用を切り拓くEUPS

パルスレーザー生成プラズマ (LPP: Laser produced plasma) 光源の応用として、極端紫外光励起光電子分光法、EUPS (EUV excited photoelectron spectroscopy)、を考案<sup>[1]</sup>したのが1992年。それ以来四半期にわたって、装置開発および応用分野の開拓を行ってきた。EUPS分析を普及するためユーザーの獲得に努めたが、ユーザーの要求に応える中で、EUPSの潜在能力が引き出され従来の光電子分光法では困難あるいは不可能な種々の分析が可能になっている。EUPSに素晴らしい多くの潜在能力があったことは、原理を考案した者の大きな喜びである。人々の

生活水準を維持発展するために今後開発すべきデバイス・材料は、従来の簡単な改良ではなく、革新的な性能が求められるだろう。EUPSが、技術イノベーションを促進する革新的分析技術の一つになる、と期待できる。

現在、文部科学省のナノテクノロジープラットフォーム事業<sup>[2]</sup>の中の微細構造解析プラットフォームの分析装置の一つとして、図1に示すEUPSシステムを公開し、一般ユーザーの利用に供している。この論文では、EUPSの実用化に至る過程、EUPSの構成、および、EUPSが開拓した新しい分析法について述べる。

1.2で、EUPSの考案に至るまでのLPP応用の研究の歴史の概略を述べ、1.3でLPPの光源としての特徴を述べ

1 中華人民共和国 長春理工大学、2 産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 中央第2  
1. Changchun University of Science and Technology, People's Republic of China No.7089 Weixing Road, Changchun, Jilin 130022, China,  
2. Nanoelectronics Research Institute, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan \* E-mail: t-tomie@aist.go.jp

る。2章で、LPPを光源とするEUPSを実用装置にするための工夫を述べ、3章で現在の実用機に至るまでのプロトタイプ機の歴史を述べ、4章で現実用機を構成する要素技術の詳細を述べる。5章に、EUPSが開拓してきた新分析法の紹介を行う。

## 1.2 レーザー生成プラズマ光源の研究の歴史

まず、実用化されているおそらく唯一のLPP応用技術であるEUPSの考案に辿り着くまでの経緯を述べる

パルスレーザーを固体に集光照射すると、熱伝導による冷却が起きる前にエネルギーが注入できるため、超高温状態になる。数百万度も可能である。このような高温状態では、固体は電子と多価イオンからなるプラズマ状態になる。密度が高く温度が高いため、超高圧も得られる。プラズマが高速で吹き出し、その反作用でレーザー照射された固体ターゲットが押され、これは宇宙空間でのロケットの推進力として利用可能である。物質を吹き出す反作用で内部を圧縮して超高密度状態を作り出して核融合を起こそうという、慣性核融合と呼ばれる方式のアイデアは、Maimanによるレーザー発振の報告<sup>[3]</sup>以降に現実味を帯びた。1 kJのエネルギーで注入エネルギーと核融合エネルギーが等しくなるブレークイーブンが得られる可能性があるという、1972年のNuckollsらのNature論文<sup>[4]</sup>は、世界中に大きな衝撃を与えた。オイルショック直後と言う時代背景もあっただろう、産業技術総合研究所(産総研)の前身の研究所の一つである電子技術総合研究所(電総研)でも3つの研究室がグループを作って慣性核融合に向けた研究が始められた。著者の一人(TT)は、その研究要員として採用され、慣性核融合のための大出力ガラスレーザーシステムの開発に携わった。その発振器であるガラスレーザー発振器の研究を行う中で、共振器内パルス圧縮現象を発見解明した<sup>[5]</sup>。これはこの後で登場するフェムト秒レーザー発振の原理の現象である。当初は1 kJ程度のパルスレー

ザーで核融合が可能と言われたが、その後数MJが必要と言うことになった。このような超巨大レーザーを必要とする研究の小研究グループでの継続は難しいと考えた著者は、開発した大出力レーザーを用いるプラズマ応用の研究に方向転換した。

レーザーの登場後間もなくLPPからのkeV X線の発生が確認され<sup>[6]</sup>、電気からレーザーへの変換効率を含めてX線管X線源と同程度の変換効率になるとの計算も示された<sup>[7]</sup>。これまでに数多くのLPPの高輝度X線源としての利用研究がある。著者も、いくつかの応用研究を試みた。半導体素子の微細化法としてX線等倍露光<sup>[8]</sup>が提案され、技術開発はもっぱら放射光を用いて行われたが、LPPも等倍露光用光源の候補とされた。著者が最初に行ったLPP研究が、X線等倍露光光源用としてであった。産業用光源にするには、ほぼ等方的に放射されるX線を捕集するX線反射鏡が必須条件との考察が、短い期間だった著者自身の研究の成果だった。

次に行ったのは、生物の微細構造を見るX線顕微鏡研究であった。生きている環境では、生物は大量の水を含んでいる。4.4 nm(炭素のK吸収端)と2.3 nm(酸素のK吸収端)の間の波長のX線を用いれば、水(酸素)の影響を抑制して、生物の構造を形成する炭素の分布、つまり、生物の構造が見える、と言う意味で、その波長領域は“水の窓”と呼ばれる。電子顕微鏡で生物を観察するためには、水分を除去する処理が必要であるが、“水の窓”X線を用いれば、生きている環境での生物の構造が見える、と言う論理である。強力なX線源である放射光で多くのX線顕微鏡研究が行われている。

LPPがX線顕微鏡用の光源として重要なのは、パルス光源でありかつ超高輝度光源であるからである。X線吸収でX線像を得る時には、空間分解能の4乗に反比例して試料が吸収するエネルギー密度が増大する<sup>[9]</sup>。1 μm空間

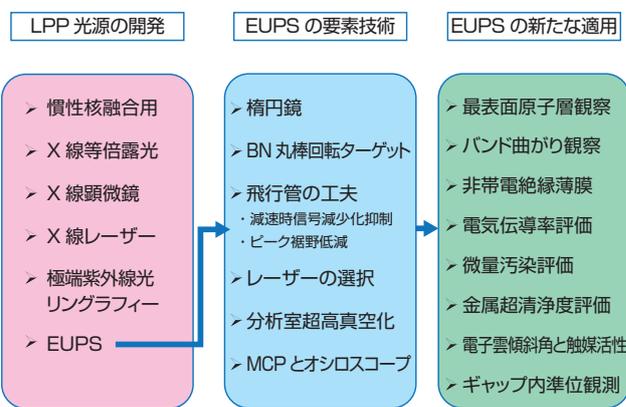


図1 試料分析に公開しているEUPS2号機とEUPS開発の過程、構成、新たな適用

分解能での吸収エネルギー密度は、生物の致死量数 Sv (数 J/kg) 程度になる。つまり、医療診断では分解能を高くし過ぎてはいけない。LPP は、このような超高密度の X 線をナノ秒程度の短パルスで供給可能である。数十 nm の空間分解能では、必要な線量があまりにも高すぎてごく短時間で生物試料が爆発する。著者らは、ステレオ X 線像撮影で、生物試料が 60 ns 程度で蒸発することを示した<sup>[10]</sup>。著者らの 0.5 ns のパルス幅の LPP の密着法露光 X 線像に 50 nm 程度の構造が見えた<sup>[11]</sup>が、熱衝撃で破壊される前の、真の構造、と言える。

百万度程度の高温でかつ急激に電子状態が変化する LPP では、真空紫外域に反転分布の生成が可能で<sup>[12][13]</sup>、いわゆる“X 線レーザー”が可能である。著者 (TT) は、1986 年の 1 年間、英国で X 線レーザーの研究チームに加わって<sup>[14][15]</sup> 経験を積んで帰国後、日本での研究を開始した。“水の窓” X 線レーザー用の LPP の生成には、日本でただ一つ程度の規模の超巨大レーザーシステムが必要である。他の手法では不可能な生きた状態の構造が撮影できる、とは言え、巨大レーザーを使うことが正当化できるか、生物学研究に、巨大な研究費に見合う貢献ができるか、と言う課題があった。またそれは世界中の X 線レーザー研究者の課題でもあった。

X 線顕微鏡以外への X 線レーザーの応用の可能性を探る国際会議が米国で開かれた<sup>[16]</sup>。プロシーディングスを読んで表面研究への応用の可能性を初めて知った著者は、自らの考察も加え、X 線レーザーの最高の応用は光電子分光である、と国際会議で主張する<sup>[10]</sup>に至った。理由は、スペクトル幅が極めて狭いという X 線レーザーの最大の特長が最大に活かされるから、であった。X 線顕微鏡用 X 線レーザーでは、水の窓以外の波長は無意味で、1 ショット照射で試料が破壊されるために繰り返しは無用で、パルス幅は 1 ns 以下が必要である。光電子分光では、どのような波長でも使用可能であり、スペクトルの S/N 比は検出電子総数で決まるので、積算光子数を大きくするために繰り返し率が高いことが重要である。

光源を X 線レーザーにする必然性はなく LPP 光源で十分であり、さらに、実用化には小型化が必須条件と言うことで、著者 (TT) の研究は、X 線レーザー研究から LPP 光源による光電子分光の実用化の研究に、再び転向し、現在に至っている。

1990 年代半ばから、LPP の重要な応用分野として登場したのが、極端紫外光 (EUV: Extreme Ultraviolet) リソグラフィ (EUVL) である<sup>[17]</sup>。半導体素子の進歩が今日の情報社会を作り上げているが、それは寸法の縮小による集積度の増大によるものであり、それを可能にしたの

は、回路パターン of 縮小転写技術であるリソグラフィ技術の進歩である。リソグラフィの進歩は、露光波長の短波長化でなされた。KrF レーザーの 248 nm から ArF レーザーの 193 nm へと短波長化が進んだが、光学材料の透過波長の限界により、それ以上の短波長化は困難とされ、反射光学系を用いる EUVL の技術開発が行われた。Mo/Si 多層膜反射鏡で高い反射率が得られる 13.5 nm の光源として、錫 (Sn) の LPP 光源が開発され、米、欧、日、巨大国家プロジェクトとして開発が行われた。現在では、100 W を越える 13.5 nm パワーが得られると報告されている。驚異的な数字であるが、未だに、EUVL で作られた半導体素子は市場にない。それは、光源開発の進歩の速度が、半導体素子の微細化の進展に伴う平均パワーの増大の要求に間に合っていないからである。量産工場への導入には、いまや数百 W が必要と議論されている。X 線顕微鏡に絡んでの LPP 光源の数少ない研究者であった著者 (TT) は 1990 年代半ばから EUVL に関わった<sup>[17]</sup>。20 年にわたって EUVL に深く関わってきた者として、要求される EUV パワーの増大が止まってきて、いつか、EUVL が実用化されると期待する。

### 1.3 LPP 光源の特徴

LPP 光源<sup>補足 1</sup>の長所は、ターゲットの選択によりスペクトルが変えられる、短パルスである、図 2 下図<sup>[18]</sup>に示す様に輝度が極めて高い、点光源などである。欠点は、図 2 上の写真に見る様に、大量の汚染物 (微粒子、プラズマ) が放出される、発光している時間が短い、四方に発散する光源であるため捕集が容易でない、などである。

図 2 の下図は、いくつかの X 線源のピーク輝度の比較である。ピーク輝度は、光源の単位面積から単位立体角あたり単位バンド幅あたり単位時間に放出される光子数で定義される。黒丸のデータは著者らの実験で得られた値で、温度が 200 eV の黒体放射の輝度に近い。この輝度は、偏向電磁石放射光のそれより 2-3 桁大きい。LPP は、X 線管 X 線源と比べると 10 桁近く高輝度である。アンジュレータ放射光は LPP より 5 桁近く明るい。デューティ比が極めて小さく時間平均輝度は高くないものの、超短パルスレーザーの高次高調波や LPP を用いる X 線レーザーも瞬時輝度としてはアンジュレータと同程度である。

EUVL<sup>補足 2</sup>においては、点光源であることが LPP の重要な特長である。発散光源である欠点は、 $\pi$  ステラジアンという極めて大きな捕集立体角の捕集鏡の開発で克服された。発光している時間の短さは、繰り返し率を 10 kHz 以上にすることで、克服されている。

あらゆる LPP 応用で、最大の課題は、ターゲットから発生する微粒子およびプラズマによる周辺光学素子の汚染の

抑制であり、EUVL 用の LPP 開発においても、最大の課題は汚染の抑制である。液化 Xe 等、室温で気体の材料をターゲットに用いれば、付着による汚染が解決できる、と言うことで、EUVL 開発が本格化した経緯がある<sup>[17]</sup>。

プラズマによる汚染では、ターゲット材原子の付着のみに注目が集まるが、実は、高速イオンによる周辺材料のスパッタの方が深刻である。放電光源では、スパッタによる電極の消耗が激しい。錫は、付着するので汚い LPP 用ターゲット材料として悪名高いが、実は、EUVL 用の材料として最適である。理由の一つは、多層膜鏡の表面への錫蒸気の付着と高速錫イオンによるスパッタを釣り合わせることで、原理的には、可能だからである。これを利用して、多層膜鏡の長寿命化が図れる。

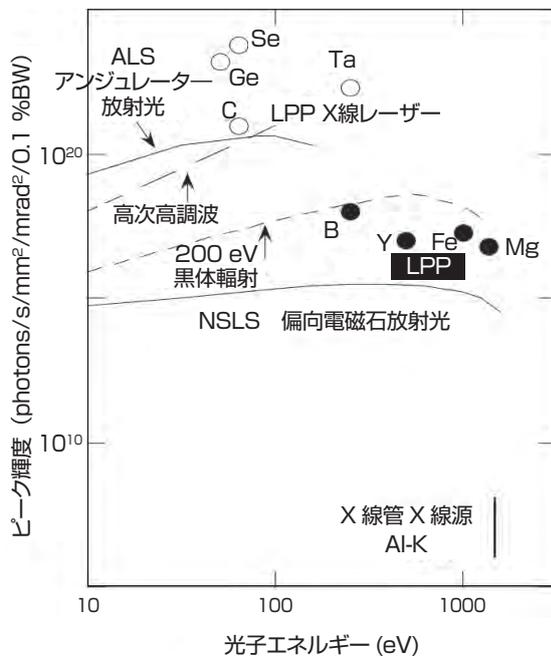
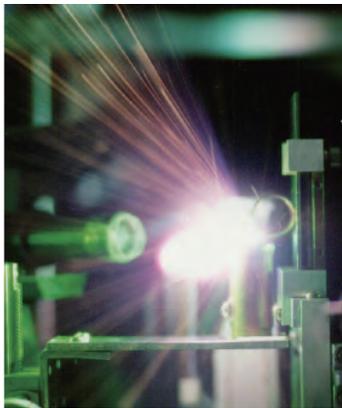


図2 (上)ある LPP の写真。デブリ対策が実用化の最大課題。(下) 各種光源の瞬時輝度の比較<sup>[18]</sup>。LPP は、偏向電磁石を 2-3 桁上回り、X 線管の 10 桁近い輝度の光源。但し、持続時間がナノ秒程度と短いため、工夫がないと、利用できる時間平均光源パワーが極めて低い。

## 2 EUPSの考案

### 2.1 光電子分光用光源に求められること

光電子分光は、図3に示す様に、光励起で物質外に放出された電子のエネルギーを測定することで物質内の電子状態の情報を得る分析法である。電子励起のオージェ電子分光との比較では、エネルギー分解能の高さが特長であるが、多くの分析において、1 eV 程度の分解能があれば十分である。ちなみに、材料分析に広く用いられている XPS<sup>補足3</sup> の通常の分解能は 0.8 eV であり、高分解能 XPS では 0.3 eV が得られる。EUPS では、0.3 eV の分解能を確認している。

高いエネルギー分解能の光電子スペクトルを得るには、狭帯域スペクトルの励起光源と、エネルギー分解能の高い電子分光器が必要である。統計雑音を小さくするため、大きな積算カウント数が必要である。

LPP を光源とする光電子分光の研究を別のグループが行っていた<sup>[19]</sup> が、良好な光電子スペクトル波形を得るための積算時間が極めて長かった。レーザーのパルス幅が 10 ns で発光時間が同じであれば、10 Hz 繰り返しのレーザーを使って、千万分の一の時間しか光らない。繰り返し率が 1 kHz のレーザーを使っても、十万分の一の時間しか光らない。図2に見る様に瞬時のピーク輝度が極めて高くても、時間平均光子束は低い。LPP が光電子分光の実用的光源になれるはずがない、が EUPS の原理を学会発表した時の反応であった。

### 2.2 EUPSの工夫

EUPS では、デューティ比が小さいという LPP の短所を

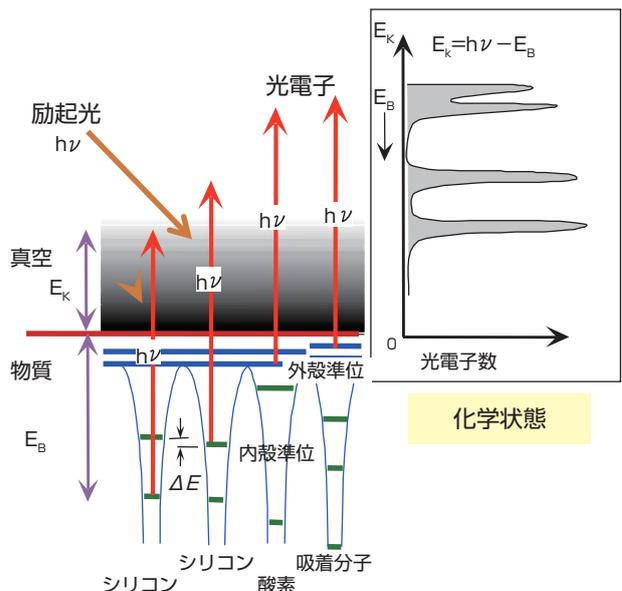


図3 光電子分光の原理

特長である高いエネルギー分解能のため、励起光の狭帯域性と電子分光の高エネルギー分解能が求められる。

二つの工夫により克服した。一つが、狭帯域スペクトルを得るのに分光器を用いないこと。もう一つが、飛行時間法 (TOF: Time-of-flight) の電子分光である。

放射光施設では、試料に到達する光子フラックスは、放射光から放出されるフラックスよりかなり低い。それは、連続スペクトルから狭帯域スペクトルを得るための回折格子分光器の透過率が極めて低いからで、分光器の挿入で光量が4-5桁も低下する。LPPでは、ターゲットとレーザー照射条件の適切な選択で、狭帯域線スペクトルの発光が可能である。単一の線スペクトルは得られないが、図4に見る様に、適切なフィルターがあればほぼ単一の狭帯域線スペクトルが選択できる。数桁の分光器挿入損失が減らせるため、10 Hzの繰り返し率でも放射光を用いる場合と遜色のない、試料上光子フラックスが得られる<sup>[18]</sup>。

TOF電子分光の採用は、LPPの欠点とされた短パルス性を、長所に変えた。

TOFでは、図5に示す様に、パルスの発生する電子を、一定距離を飛行させたのち、時間分解能を有する検出器

で検出して電子の速度分布を得る。

時間的に連続的に電子が発生する場合には、二重半球や二重円筒等の構造の電極間に電界を印加し、電界による電子の軌道の偏向度合いが電子の速度で異なることを利用して電子のエネルギーを識別する。複数の電子検出器を設けて、複数のエネルギーの電子を同時に検出する工夫が凝らされるが、基本的には、あるエネルギーの電子の検出中には、他のエネルギーの電子を捨てることになり、検出効率が極めて低い。一方、TOFでは、1回の測定で、すべてのエネルギーの電子を検出するので、電子の検出効率が高い。全立体角を捕集する検出器を用いての100%の検出効率も、原理的には、不可能ではない。1原子当たり10,000個以下の内殻励起で起きると考えられる放射線損傷の抑制のため、検出効率の高さは決定的に重要である<sup>[18]</sup>。検出効率が高いと励起強度が抑えられるので、励起強度に比例する帯電の抑制にもTOF法の採用は有用である。

パルス光源であることは、デューティ比が小さくなるためLPPの欠点、とされてきたが、高い検出効率のTOF法

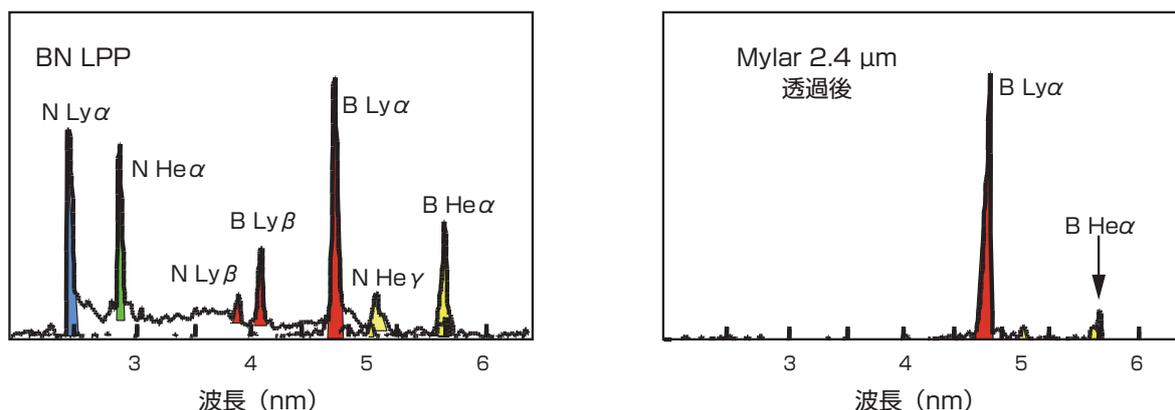


図4 EUPSで用いているLPP光源のスペクトル<sup>[22]</sup>  
窒化ボロンLPPの発光スペクトル(左)は、マイラー薄膜透過後はほぼ単色(4.86 nm)になる(右)。フィルターによる分光損失は小さい。

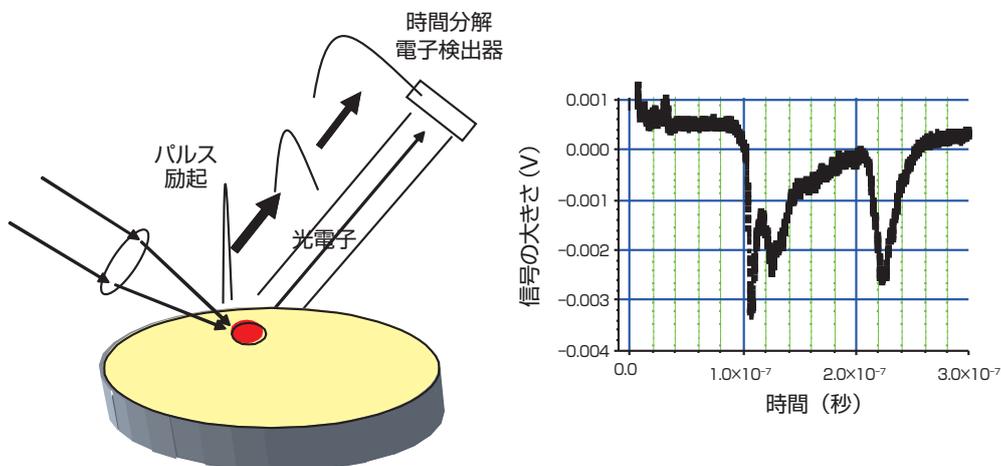


図5 飛行時間法 (TOF) の電子分光は、全エネルギーの粒子が同時に検出できるので検出効率が高い。

が採用できることから、逆に、光電子分光に適した重要な長所である。レーザーの高次高調波を用いての TOF 法電子分光の研究例はあった<sup>[20]</sup>が、LPP で TOF を採用したのは EUPS が初めてである。

### 3 EUPSプロトタイプ機の歴史

EUPS の基本原理は、特許<sup>[1]</sup>に記載されているが、実用化には、いくつもの要素技術の開発と高度化が必要であった。EUPS 用の LPP のターゲット材料は、ほぼ一意的に決まる。

あらゆる LPP 応用の最大の課題は、汚染物の遮蔽である。光電子分光においては、試料表面の 1 原子層の汚染も避ける必要があり、プラズマからのあらゆる物質を完全に遮断するフィルターの使用が必須である。EUV 光が透過しなければならぬので、第 1 の必要条件としてフィルターは超薄膜である必要がある。その一方、プラズマや微粒子等を遮断しなければならぬので、第 2 の必要条件としてフィルターには機械的強度が求められ、一定の厚さが必要である。さらには、プラズマからの物質の遮断によりフィルターに大量の物質が付着し破損するので、頻繁な交換が必要になる。このため、第 3 の条件として安価であることも、実用上、極めて重要である。

この 3 条件を満たす材料として、炭素ポリマー膜を選定した。商品名でもある mylar は、1.4  $\mu\text{m}$  の厚さの膜がかなりの安価で購入できる。

炭素の K 吸収端 4.4 nm の長波長側の近傍の波長であれば、mylar 膜を高い透過率で透過できる。水素様ボロンイオンの Lyman  $\alpha$  線の波長は 4.86 nm であり、mylar と非常に相性が良い。ボロンプラズマ中にはヘリウム様イオン等いろいろな価数のボロンイオンが存在するが、それらの線スペクトルの波長は長く、mylar による大きな吸収を受け、実用上無視できる大きさになる。ボロンを含むロッド状の材料として窒化ボロン (BN) ロッドがある。窒素プラズマの発光は炭素の K 吸収端の短波長側にあり、mylar 膜で大きな吸収を受け、光電子分光測定に大きな影響を与えない。

十分に膜厚が薄く安価な mylar 膜を透過できる波長領域に強い線スペクトルを発するボロンと言う元素が存在し、それが、ロッドと言う形状で合理的な価格で供給されている。これらは、EUPS の実用化のために天が与えた幸運である。

従来の光電子分光装置とは異なる構成であることを明示するため、2001 年に、EUV excited photoelectron spectroscopy から、EUPS と名付けた。

#### 3.1 1号機

1990 年代半ばから、EUPS の開発を開始した。基本原理の検証実験用の 1 号機では、磁気シールドを施した長さ 50 cm の飛行管中に測定試料を置き、数 cm に近接させてプラズマを生成するターゲットを置き、その上にパルスレーザーを集光してプラズマを生成した<sup>[22]</sup>。パルスエネルギーは 100 mJ であった。ターゲットに BN 板を用い、試料とプラズマとの狭い間に挟んだ mylar 薄膜で、水素様ボロンイオンの Lyman  $\alpha$  発光線を選択して試料照射し、飛行管に 135 V の負の電位を印加して運動エネルギーが 150 eV 程度の Si2p からの光電子を 15 eV 程度に減速し、減速により飛行時間を長くして、時間分解能で制限されるエネルギー分解能を高くして、96 ショットの時間波形を積算して得た Si2p 電子の光電子スペクトルで、Si 基板、SiO<sub>2</sub>、SiN による化学シフトが分離して観測され<sup>[23]</sup>、EUPS の原理が確認できた。mylar 薄膜は真空分離の役割も果たし、プラズマ空間の真空度は 10<sup>-3</sup> Pa 程度で、試料空間の真空度は 10<sup>-4</sup> Pa 程度であった。

1 号機の経験で EUPS の実用化のための課題が抽出できた。最大の課題は、波長選択および真空分離に用いる mylar 薄膜の交換であった。試料上の EUV 強度を弱くしないために LPP を試料に接近させる必要があった。すると、mylar 薄膜はターゲットからの汚染物によりたちまち汚れて交換が必要になった。さらに、試料とプラズマの間が狭いため、mylar 薄膜の交換が極めて困難であった。

#### 3.2 3号機と4号機

1 号機の経験を経て製作したのが、現在稼働中の 2 号機である。次章に述べるように要素技術は次々と改良したので、最初の 2 号機の要素自体は残っていないが、基本構成は変わっていない。2 号機とは基本構成の異なるプロトタイプ機も製作してきたので、先に、簡単に述べる。

3 号機では、電子の捕集効率を大きくできると期待された磁気ボトル<sup>[用語1]</sup>の有用性を検証した。目論んだ性能は得られず磁気ボトルの採用を止めた。

4 号機では、空間分解能を追求した。シュバルツシルト集光鏡<sup>[用語2]</sup>を用いて、サブミクロンビームを形成し、1 ミクロンを切る空間分解能の光電子像の取得に成功した。

シュバルツシルト鏡を構成する凸面鏡と凹面鏡の表面には、垂直入射率を高くするために多層膜の成膜が必要である。利用できる波長は、Mo/Si の場合の 13 nm の若干長波長側または、技術は Mo/Si ほどは熟してはいないが La/B4C 多層膜の 6.7 nm 近傍等に限られる。LPP では、その波長で、孤立した強力な線スペクトルを発光させるのは困難であるためエネルギー分解能はそれほど高くできない。また、光源の利用立体角が小さく、1 ショットの試料上の光子数が少ないため、実用的な計測速度にするには、

光源の 10 kHz 程度の高繰り返しが必要である。調査した範囲で、ミクロン程度の空間分解能には、技術の困難度に見合う需要は見い出せず、シュバルツシルト集光鏡を用いるシステムの開発は止めた。

#### 4 実用機を構成する要素技術

1号機での経験を経て設計した、現在稼働している EUPS2 号機では、大きく3つの変更を行った。一つが、試料とプラズマの間に楕円鏡を挿入することであった。二つ目は、ターゲットを板から棒に変えたことである。三つ目は、飛行管を鉛直に立てることであった。構成図を図6に示す。

##### 4.1 楕円鏡の使用

実用の光電子分光装置においては、長時間の連続運転が必須である。これは、大量の汚染物を放出する LPP の応用において、極めて困難な要求である。真空分離用の薄膜の汚染速度を大幅に低減する必要があるが、プラズマと真空分離用薄膜の距離を大きくするのが第1の手段である。

このために、長軸距離が 70 cm の楕円鏡でプラズマの像を試料に転写する構成にした。楕円鏡とプラズマの間に十分なスペースが生まれたので、mylar 膜は、プラズマからの距離を 10 cm にした。さらにいくつかの工夫を行うことで、現在は、1週間程度、mylar 膜の交換なしでの測定が行えている。

楕円鏡には、4.86 nm 光の反射率を高めるため、Ni/C 多層膜の成膜を施しており、設計値は、ピーク反射率 25 % でスペクトル幅 0.5 nm である。

##### 4.2 BN丸棒回転ターゲット

固体にパルスレーザーを集光してプラズマを生成すると、高温に加熱された部分が吹き飛び、後に、数十ミクロンの穴ができる。その穴にレーザーを集光すると、生成されるプラズマの密度が低くなって、発光強度が大きく低下

する。発光強度を保つには、平坦な箇所にレーザーを集光する必要がある。1号機では、平板を水平および鉛直に走査して、平坦部にレーザー集光したが、平板の走査機構が複雑になることと、大きな容積が必要になることから、丸棒ターゲットに変更した。2号機では、丸棒ターゲットを回転させながら上下運動(螺旋運動)させることでターゲット交換なしで1週間程度の長時間使用ができています。

##### 4.3 飛行管の工夫

飛行管は、1号機では水平に置いたが、2号機では、鉛直に立てる配置にした。これは、試料を水平に置くためである。試料ホルダーを水平にしたことで、ロードロック室からの試料搬送が容易になった。試料を水平で受け取ったマニピュレーターには5つの自由度があり、5.6で後述の様に、試料への 4.86 nm 光の入射角が変えられる。通常の EUPS 測定では、信号を大きくするため、入射角を 10 度に行っている。

電子の質量を  $m_e$ 、運動エネルギーを  $E$  と置けば、速度  $v$  は  $v = (2E/m_e)^{1/2}$  であり、飛行距離が  $L$  の時の飛行時間  $t$  は、 $t = L (m_e/2E)^{1/2}$  である。運動エネルギーが 100 eV の電子の速度は  $6 \times 10^8$  cm/sec であるので、飛行距離が  $L = 48$  cm の時の飛行時間は、 $t = 80$  ns である。

時間分解能が  $\Delta t$  の時のエネルギー分解能  $\Delta E$  は、

$$\Delta E = -2 (\Delta t/t) E \propto \Delta t E^{3/2}$$

であり、時間分解能が  $\Delta t = 3$  ns の時、100 eV 電子のエネルギー分解能は、 $\Delta E = 2 \times 100 \times 3 / 80 = 7.5$  eV になる。光電子分光としては極めて不十分である。100 eV の電子を 10 eV に減速すれば  $\Delta E = 0.24$  eV になり、これは十分に高いエネルギー分解能である。TOF では、高いエネルギー分解能を得るため、電子を減速させて測定する。試料が接地されていれば、飛行管の電位を -90 V にすることで、100 eV の電子が 10 eV に減速される。

電子を減速することでエネルギー分解能は高くなるが、電子を減速すると信号が小さくなるという問題が発生した。また、ピークの低エネルギー側が大きく裾を引き波形を損なう問題も発覚した。良好な光電子分光スペクトルの取得を妨げるこれらの問題は、特許を取得した二つの工夫により解決した。

##### 4.3.1 減速時の信号の減少問題の解決

平板電極で電子を減速すると信号が減少する原因は、MCP<sup>用語3</sup> 検出器に向かう速度は小さくするが、直行する方向の速度は変わらないため、MCP に向かっていった電子が壁に向かう(検出器で検出される立体角が小さくなる)から、と考えた。この問題を解決するため、図7に示す様に、減速電極に曲率を持たせる考案を行った<sup>[24]</sup>。ビームが照射する位置と曲率中心が一致すれば、減速しても電子の運動の

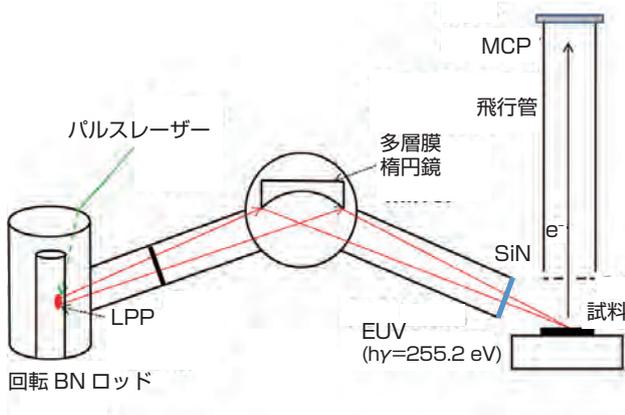


図6 EUPS2号機の構成図

向きは変化せず、検出器の捕集立体角は変化せず、信号の大きさは変化しない。電子発生源を曲率中心より外に置けば、減速電界の印加により、円筒壁に向かう速度成分がより大きく減速され、電子を円筒の中心方向に曲げる“凸レンズ効果”を持たせることもでき、信号を大きくすることができる。

#### 4.3.2 ピークが裾を引く問題の解決

TOF 信号には、鋭く立ち下がるべきピークの後に、緩やかに減衰する大きな信号が付随した。この信号の由来は、何年もの間不明であったが、いくつかの実験により、飛行管壁から発生することを突き止めた。

EUV 照射された試料から発生する光電子は広い角度に放出する。その一部が MCP に直接到達するが、大半の電子は、飛行管壁に衝突する。すると飛行管壁から低エネルギーの二次電子が発生する。二次電子の速度は遅いので、試料から直接 MCP に捕集される光電子が到達した後に、飛行管壁から発生する二次電子が MCP に到達する。飛行管壁から発生する二次電子も広い角度分布を持って放出され、MCP に到達する二次電子の割合は、MCP に近い飛行管壁では多く、遠ざかるに従って少なくなる。MCP から遠いほど到達遅れが大きい。これが、ピークの後に付随する緩やかに減衰する成分の起源である。このように推測した。

上の考察から、飛行管壁の二次電子が MCP に到達しないようにする図 8 に示す工夫を行った<sup>[25]</sup>。検出器の近隣の飛行管出口の近くに、試料から放出される光電子は遮蔽せず、飛行管壁から発生する二次電子は MCP に届かない

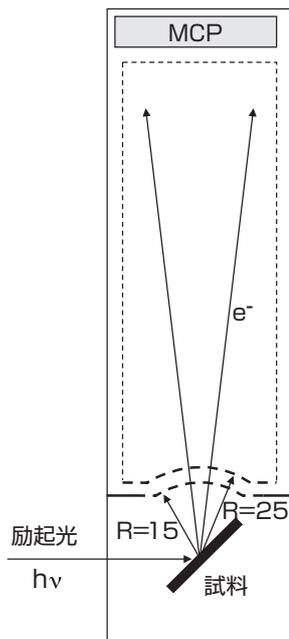


図7 高エネルギー分解能分光のための電子の減速時に信号が減少する問題を解決するため、減速電極に曲率を与えた<sup>[24]</sup>。

様に、複数のつばを設置した。もう一つの工夫は、飛行管壁を板ではなくメッシュにしたことである。メッシュの開口率を大きくして、メッシュから発生する二次電子量を大きく減じた。さらに、メッシュ線は曲率を持っているので、メッシュで発生する二次電子の殆どが MCP には向かわない。この二つの工夫により、大きなピークの後の裾が、ほぼゼロにできた。

#### 4.4 レーザーの選択

LPP 生成用のレーザーも 1 号機とは異なる、繰り返し率可変で、良好な波形のパルスが供給できる、Coherent 社の Infinity という名称のレーザーを用いている。Infinity は、誘導ブリュアン散乱 (SBS) 鏡<sup>[4]</sup>を持っていることが特徴である。SBS 鏡により、パルス波形がパルス幅 3 ns のきれいなガウシアンである、空間パターンが TEM<sub>00</sub> モードである、繰り返し率 100 Hz までの繰り返し率およびパルスエネルギーに依らずビームパターンおよびパルス波形が良好である。これらは、科学実験、特に LPP 生成にとって極めて重要である。

1 号機で用いた Q-switch YAG レーザーは、広く用いられるレーザーの一つである。SBS 鏡を備えていないため、一定の出力パワーでの運転が要求され、繰り返し率およびパルスエネルギーを変えると、レーザービームの時間および空間波形が変化する。パルス幅は 10 ns 程度であり、Q-switch の電気パルスを工夫することで、2.5 ns のパルスが得られるが、両サイドにも小さなパルスが伴い、単一ガウシアンではない。Infinity では 1 パルスエネルギー 30 mJ で十分に大きな光電子信号が得られるが、1 号機で使っ

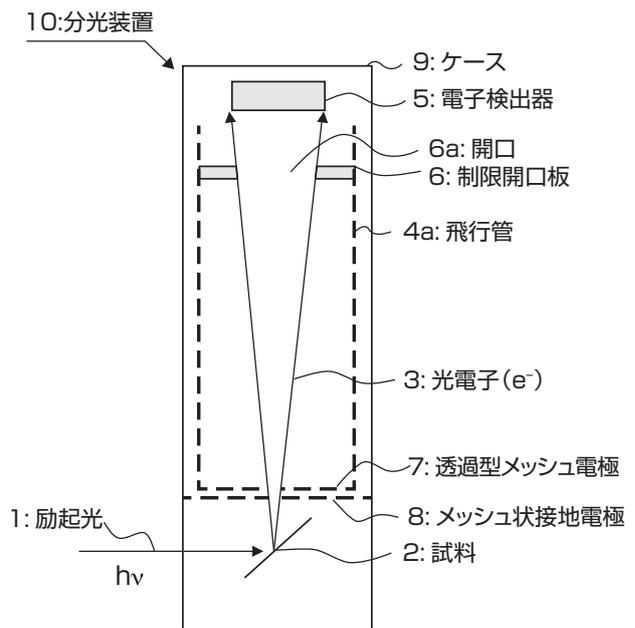


図8 飛行管壁から発生するノイズの通減法<sup>[25]</sup>

た YAG レーザーを用いると、同じ EUV 強度を得るのに、100 mJ 程度が必要である。ターゲットからの汚染物質の発生量はパルスエネルギーに比例し、mylar 膜の汚染速度も大きくなる。安全面から、視感度の高い 532 nm 光を用いることは 1 号機と同じである。

#### 4.5 100 nm 厚の SiN フィルターを用いた分析室の超高真空化

mylar 膜を用いて、LPP 空間と楕円鏡空間の真空分離を行っているが、mylar 膜による真空の分離度は 6 桁程度であり、楕円鏡空間の真空度は  $10^{-4}$  Pa にとどまる。プラズマの被ばくにより mylar 膜が劣化し、真空分離度が低下する。楕円鏡空間が  $10^{-2}$  Pa に達すると mylar 膜を交換するようにしている。

楕円鏡空間が  $10^{-2}$  Pa でも分析室の真空度が  $10^{-7}$  Pa 程度に保てる様に、楕円鏡空間と分析室の間を SiN 薄膜で真空分離している。SiN 膜の 4.86 nm における吸収係数は大きいので、SiN フィルターによる EUV 光の減衰を小さくするため、SiN の膜厚は 100 nm あるいは 50 nm にしている。4.86 nm における透過率は、mylar 3  $\mu\text{m}$  が 17 % で SiN 100 nm が 48 % であり、楕円鏡の NiC 多層膜の反射率は 25 % であるので、総合透過率は、2 % の計算である。

#### 4.6 MCP とオシロスコープ

TOF では、時間分解能がエネルギー分解能を制限するため、電子を検出する MCP と電子流を記録するオシロスコープには高時間分解能が要求される。両方ともに 1 ns 程度の時間分解能を有する製品を選択した。大きな信号とするために、電子の捕集立体角が大きい必要があり、直径 40 mm の MCP を選択した。市販品で著者が知っている最大の大きさである。

通常の光電子分光装置では、検出される電子の出現の時間間隔が長いので、デッドタイムが数  $\mu\text{s}$  のカウンティング検出器が使用できる。EUPS では、200 ns の時間で数十の光電子、3  $\mu\text{s}$  の時間で数万の二次電子がやってくるので、通常のカウンティング検出器は使用できない。オシロスコープを用いて電流として検出している。測定後のデータ処理時間を短縮するため、オシロスコープ上で数十から数百ショットの信号を平均させて出力している。

#### 4.7 事象計数モード

最近、微小信号の測定をする機会が増えた。信号が微小になると、統計ノイズを減らすべく積算数を増やしても良好なスペクトル波形が得られないことが大きな問題になった。

これは、信号ケーブル、オシロスコープ内部等、信号系に乗るノイズが原因だと考えた。MCP の利得は大きいので、1 電子の信号はノイズよりも十分に大きい。しかし、複

数ショットで同じ時刻に現れる確率は極めて低い。一方ノイズは毎ショット同じ時刻に出現する。このため、多数ショット信号の平均を行うと、電子の信号がノイズに埋もれてしまうと考察した。複数ショットの平均をせずに、全ショットの TOF 信号を記録して各ショット信号のノイズ処理をすれば、この問題が解決できる。

我々が選択したオシロスコープには、0.1 ns のサンプリング間隔で 1  $\mu\text{s}$  の間持続する 10 ~ 50 Hz で発生する全ショットの信号を記録するモード、sequential mode、が備わっている。ごく最近、微小信号の計測時には、sequential mode で測定するようにしている。ただし、データ量が膨大になり、オシロスコープからのデータ出力時間がかなり長くなり、また、データサーバーの容量も大量に消費するため、特殊用途に限定している。

sequential mode で取得したデータを、一定レベル以上の信号を一つのイベント(事象)とし、イベントを計数して、スペクトル描画する。イベントカウンティングでは、ほぼ統計ノイズのみになると期待できる。これにより、5.7 で紹介するように超微弱構造も観測できるようになった。

### 5 EUPS で新たな光電子分光分析法の開拓

#### — ユーザーの要求が装置を高度化 —

構成要素の選択と統合されたシステムは、世界で唯一の装置であるが、世界で唯一なだけでは、広く使ってもらえないことは承知していた。自らがユーザーとなって、EUPS ならではの知見が得られることを示さないと、一般ユーザーは使ってくれないことを承知していた。このため、装置としてほぼ完成した後の 10 年間、さまざまな試料の EUPS 観察に挑戦してきた。

しかし、自ら考案した EUPS を正当に評価していなかったことには、思いが至らなかった。多くのユーザーに声をかけ、声をかけられ、彼らの問題を解決すべく取り組む過程で EUPS の潜在能力が引き出された。ユーザーにより EUPS は高度化された。ユーザーの要求で、新たな分析法が誕生し、また、装置の改良が行われた。この関係を図 9 に示す。

EUPS では、従来の光電子分光法では不可能あるいは

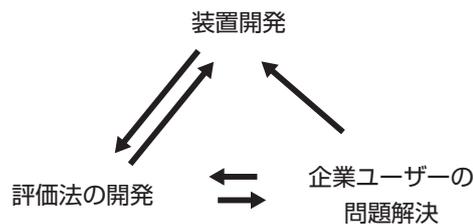


図 9 EUPS 高度化のプロセス

困難な以下の分析が可能である<sup>[26]</sup>。

1. 最表面原子層の電子状態の分析
2. 半導体のバンド曲がりの評価
3. 帯電中和せずに絶縁薄膜の分析
4. ナノ粒子金属表面の清浄度の評価
5. ナノ粒子表面の電気伝導率の評価
6. 電子雲の傾斜角の評価

### 5.1 最表面原子層の観察

EUPSの装置開発を始めた当初、複数の人から、波長4.86 nmは長すぎる、炭素と酸素の1sが見えないことや深い内殻電子が見えないことは、光電子分光として重大な欠陥である、というコメントを貰った。255 eVの光子エネルギーがあれば、C、N、F以外の内殻は見える、と回答していたが、4.86 nmこそが有用な波長であることに気づいたのは、いろいろな試料の分析を始めてからであった。

EUPSの最初の試料としてSiウエハーを観察した。自然酸化膜のSi2pしか見えず基板Siは見えなかった。弗酸処理して初めて基板のSi2pが見えたが、自然酸化膜のSi2pは容易には消えず、EUPSでは汚染物しか見えない、と言う批判があった。しかし、これは醜いアヒルの子であった。通常は見えない汚染物の信号がとても大きいのは、表面分析において極めて有用であった。

図10にパナソニック社が行った汚染分析の例を示す<sup>[27]</sup>。

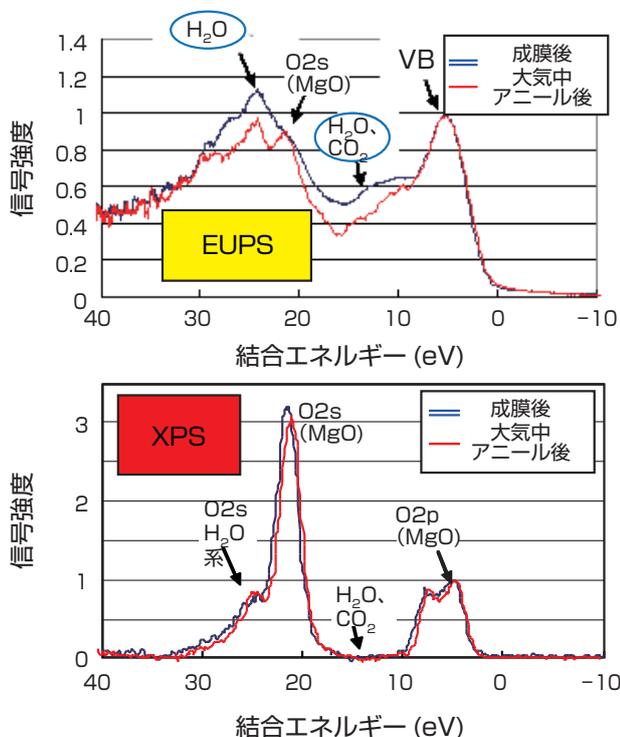


図10 プラズマディスプレイの電極保護絶縁膜の汚染低減化プロセス開発用の汚染分析のEUPSとXPSの感度比較<sup>[27]</sup>

彼らは、プラズマディスプレイの電極の絶縁保護膜の性能向上のため、汚染を低減する製造プロセスの改良を行っていた。従来、XPSで絶縁保護膜の汚染の評価を行っていたが、汚染に起因する信号が小さかった。同社は分析展でEUPSを知り、サンプル試料の評価でEUPSの感度を確認したのち、我々と共同研究を行った。同一試料をXPSで見た場合とEUPSで見た場合の比較が図10である。EUPSの感度が高いことが分かる。種々のプロセスでの汚染の評価を行い、EUPS分析の結果を基に製造プロセスの改良が行われた、との報告を受けている。

産総研研究者から提供された試料のEUPSスペクトルを図11に示す。Siウエハーを弗酸処理して表面の自然酸化膜を除去して見える基板のSi2p信号は、厚さ2.1nmのSiO<sub>2</sub>が成膜された試料では10%位でしかなく、4.9nmのSiO<sub>2</sub>膜を通しては、殆ど見えない。基板のSi2p信号のSiO<sub>2</sub>膜厚依存から、EUPSでは、表面から0.5nm程度しか観察されることが分かる。一方XPSでは、SiO<sub>2</sub>2nmでは基板信号の方が大きいことから、数nmの深さの平均を見ることが分かる。

深さ分解能の違いは、観測する光電子の運動エネルギーの違いによる。物質中でエネルギーを失わないで真空中に脱出する“脱出深さ”は、物質の依存は小さく、数十~100 eVで最も小さく、0.5nm程度である<sup>[28]</sup>。XPSで見るとき

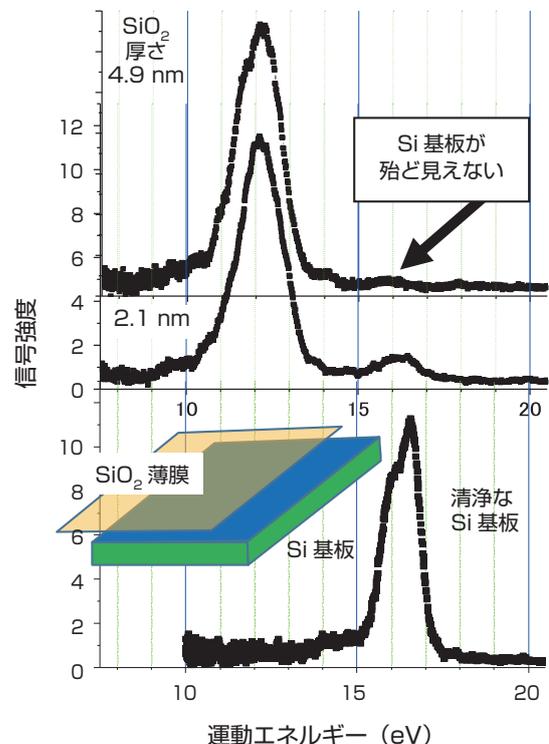


図11 EUPSの深さ分解能は、厚さ2.1 nmのSiO<sub>2</sub>膜を通して見える下地信号の大きさから、0.5 nm程度と評価。一原子層は0.3 nm程度であり、最表面原子層の情報が得られる。

の Si2p 電子の運動エネルギーは 1 keV より大きく、脱出深さが数 nm になる。EUPS で確認した脱出深さを図 12 に示す<sup>[29]</sup>。電子の運動エネルギーが小さくなると、絶縁物では脱出深さが急激に増大する。

最表面原子層の情報を得るには EUPS で用いている 200 eV 前後の光子エネルギーが最適と言うことに、原理考案時には思いが至らなかった。

### 5.2 半導体のバンド曲がりの観察

EUPS による光電子分光分析の最初の試料として Si ウエハーを選び、n 型、p 型の識別ができるかどうかを試みた時、n 型と p 型では Si2p のピーク位置が異なっていたが、ドーピング<sup>[5]</sup> 依存によるフェルミ準位の変化とは一致しなかった。また、照射強度を変えるとピーク位置が変化することに気づいた。これが、バンド曲がり<sup>[6]</sup> を観測していることに理解が至ったのは、数年後であった。EUPS では、超高密度のパルス励起を行っているため、他の光源では不可能な、曲がったバンドの平坦化により生じた現象であった。

Si ウエハー上に製膜した厚さ 12 nm の HfO<sub>2</sub> 膜を EUPS で測定すると、Hf4f ピーク位置が、EUV の励起強度に依存した。強い励起での測定を続けると、ピーク位置が低運動エネルギー側にシフトした。シフトが飽和したのち、強度を変えて測定すると、強度依存ピークシフトがさらに大きくなった<sup>[30]</sup>。

絶縁膜中に正電荷が捕獲されると、その電界により Si 表面の電子のポテンシャルが下がり、光電子スペクトルのピークが低運動エネルギー側にシフトする。EUV 照射で捕獲正電荷が増え、帯電シフトが増大するが、すべての捕獲中心が電荷を捕獲し終わると、帯電シフトが止まる。

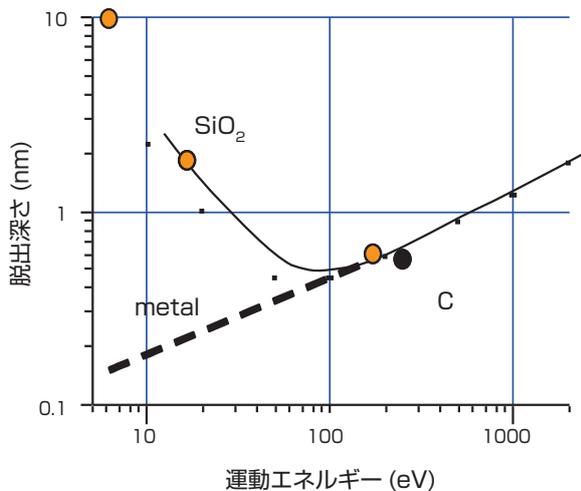


図 12 物質依存が小さいとされる、エネルギーを失わずに脱出できる深さの電子の運動エネルギー依存を、EUPS で検証<sup>[29]</sup>。100 eV 以下では、物質依存が大きく“ユニバーサル”曲線は存在しない。

試料を EUV 励起すると、Si 中に電子・正孔対が作られる。絶縁膜中の電荷が作る電界のため、電子は絶縁膜/Si 界面に、正孔は Si 内部に流れる。分離した電子と正孔が作る電界は、絶縁膜中に捕獲された電荷が作る電界を打ち消す。EUV 励起強度を大きくして電子・正孔対を大量に生成すれば、絶縁膜中の電荷が作る電界を完全に打ち消すこともできる。つまり、曲がったバンドが平坦化できる。

絶縁膜中に捕獲された電荷の面密度を  $10^{12} / \text{cm}^2$  とすると、バンドの平坦化には同程度以上の電子・正孔対が必要である。電子正孔対の寿命を 10 ns とすると、 $10^{12} / \text{cm}^2 \text{ sec}$  で電子正孔対を生成する必要がある。しかし、姫路にある日本で一番強力な放射光施設である SPring-8 の硬 X 線アンジュレータでも、光子フラックスは  $2 \times 10^{16} \text{ photons} / (\text{cm}^2 \text{ sec})$  であり、検出可能なほどにバンド曲がりに影響を与えることはできない。一方、EUPS では、1 パルスでの試料上の光子密度は  $3 \times 10^{12} / \text{cm}^2$  程度と見積もっており、255 eV 一光子で 10 個以上の電子・正孔対が生成されるとすれば、 $3 \times 10^{13} / \text{cm}^2$  程度の電荷によるバンド曲がりも平坦化することが可能である。

超高輝度パルス光源を使えば半導体表面の重要な分析法であるバンド曲がりの評価が可能になる。このことに、EUPS 考案時に思いが及ぶはずもなかった。

### 5.3 絶縁薄膜は帯電しない

XPS では絶縁材料の帯電が大きな問題で、帯電中和のため中和銃を備えるのがほぼ必須になっていることは承知していたが、EUPS2 号機には中和銃は備えていない。絶縁物の帯電が気になり、SiO<sub>2</sub> 薄膜の帯電を調べたところ、大して帯電しない。

厚さ 100 nm の熱酸化膜を観測すると、時間とともに Si2p がシフトしたが、3 eV 程度のシフトで飽和した。この後に、ごく微小電流でイオン照射して大きく帯電させた。その後で試料を EUPS 測定すると、25 eV 程度あったピークシフトが急減し、10 eV 程度のシフト位置で飽和した。その次に赤外線でも 1000 °C 近くに加熱した後に EUPS 測定すると、帯電はほぼ完全に消滅していた。EUPS 測定を続けると帯電シフトを始めたが、その大きさはわずか 0.1 eV であった<sup>[31]</sup>。

電子が真空中に放出された後に残された正孔が、絶縁膜中を流れないために絶縁膜は帯電する、と光電子分光の教科書は説明するが、図 13 から、薄膜においてはこの説明は間違いである。図 13 の結果は、以下のように説明できる。

イオン照射で 25 eV もの帯電シフトをしたことから、実験で使った SiO<sub>2</sub> は高い絶縁耐力 (>4 MV/cm) を有する

ことが分かる。EUPS 測定により帯電シフトが小さくなったことから、EUV 照射が SiO<sub>2</sub> の絶縁耐力を下げたことが分かる。EUV 照射により電子・正孔対が作られ、これが絶縁薄に導電性を与え、蓄積された電荷も放出される、と説明できる。同様の現象は XPS や電子顕微鏡でも起きていると考えるが、絶縁薄膜が導電性を付与されると言う議論は、我々が初めてと考える。

まず、イオン照射による大きな帯電シフトの EUV 照射による減少が 10 eV にとどまったこと、第二にその帯電が赤外線加熱アニールで完全に消滅したこと、第三に EUV 照射による帯電シフトが、初期には 3 eV であったのに対して、高温アニール後はわずか 0.1 eV にとどまったこと、この 3 つから、絶縁膜の帯電シフトは、電荷捕獲中心の数で決まることが推測できる。電荷捕獲中心の数は、イオン照射後 > 初期 > 高温アニール後、と言える。

帯電シフトの大きさは、電荷捕獲中心の数と言う重要な特性を与える重要な情報であり、中和で消してはならないことが分かる。

### 5.4 帯電シフトからの電気伝導率の評価

ガラス板等厚さが 1 μm 以上の絶縁物は、EUV 光が透過しないので、導電的になることはなく、EUV 照射で電子が真空中に放出され、帯電する。

あるとき、触媒の分析を依頼され、室温で測定したところ、スペクトル構造が全く見えなかったが、温度をあげると次第にスペクトル構造が現れた。温度をあげるとピーク位置が高運動エネルギー側にしたことから、帯電が減っていったことは分かったが、触媒の種類により、帯電シフトの温度依存性が異なっていた。その結果を図 14 に示す。

帯電シフトは、電気伝導率と関連付けられる。

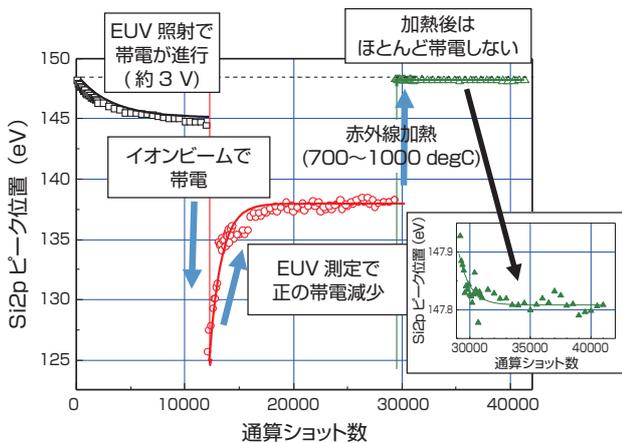


図 13 試料から電子が飛び出るから絶縁物は帯電するという、光電子分光の世界の「常識」を打ち破る実験  
イオンで大きく正に帯電させた厚さ 100 nm の SiO<sub>2</sub> のシフト量は、EUV 測定により、逆に減った。EUV 照射により試料が光導電性を帯びたためと解釈できる。

厚さ  $d$ 、面積  $S$  の試料を、電気容量が  $C$ 、リーク抵抗が  $R$  の電気回路に置き換えると、表面にたまった電荷  $Q$  は、時定数  $\tau = CR$  で減衰する。 $C$  と  $R$  は、電気導電率  $\rho$  および誘電率  $\epsilon$  を用いて、 $C = \epsilon S/d$  および  $R = \rho d/S$  で与えられるので、 $\tau = CR = \epsilon \rho$  になる。つまり、放電の時定数  $\tau$  は試料の形状 ( $S$  &  $d$ ) に依存しない。誘電率は物質により数倍程度しか異ならずまた同一物質で大きくは変化しないが、一方導電率は桁も変化する。したがって、放電時定数を測れば、電気伝導率が求まることになる。

光電子分光では、電子が真空中に放出され正電荷が試料に残されて、絶縁物の表面に正電荷が蓄積されピークシフトする (図 15) が、時定数  $\tau$  のリークにより、蓄積電荷量は飽和する。1 ショットでの帯電シフトの大きさを  $V_0$ 、パルス間隔を  $\Delta T$  と置けば  $n$  ショット後のシフトの大きさ  $V$  は、

$$V = V_0 (1 - \exp(-\Delta T / \Delta)) / (1 - \exp(-\Delta T / \tau))$$

で与えられ、飽和値 ( $\equiv V_0 (\tau / \Delta T)$ ) は時定数  $\tau$  に比例する。1 ショットでの帯電シフトの大きさ  $V_0$  は、試料の形状で決まる  $C$  とパルスエネルギーに依存するが、校正しておけ

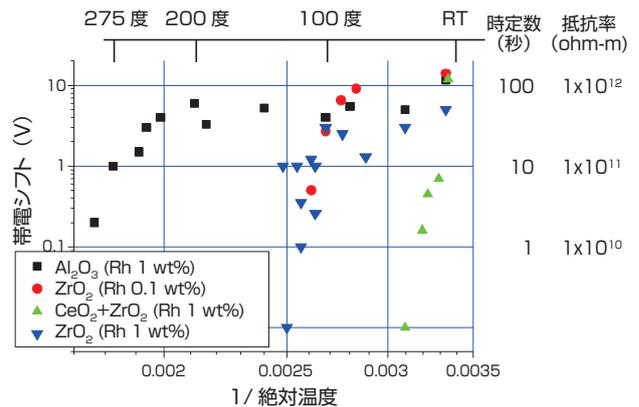


図 14 帯電シフトから見積もった電気伝導率と触媒活性に相関が認められた

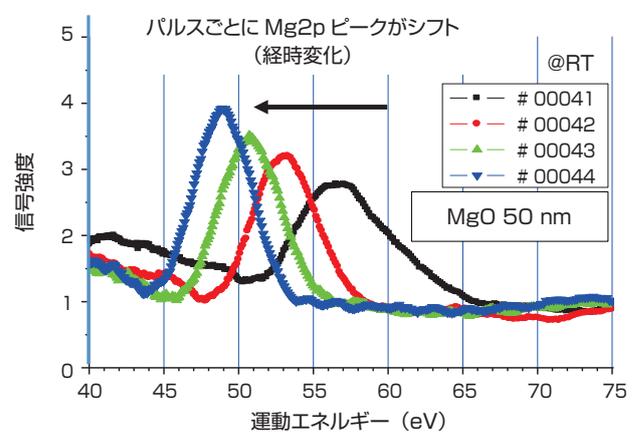


図 15 厚さ 50 nm の MgO の Mg2p ピークが測定毎にシフト。シフトの時定数から、電気伝導率が求まる。

ば、帯電シフトの大きさから時定数が得られ、誘電率が既知であれば、電気伝導率の絶対値が得られる。

この手法は、微粒子等あらゆる形状の材料に適用できる点が利点であり、粉末触媒の触媒活性と伝導率の相関の研究の手段として用いている<sup>[32]</sup>。

### 5.5 ユーザーの要望で始めた二次電子の測定

プラズマディスプレイの電極の絶縁保護膜の分析を EUPS で行ったパナソニック社の研究者から、真空準位を見たいと要望が出されて始めたのが、二次電子の測定である。試料のポテンシャルが可変できるように、マニピュレーターおよび試料ホルダーの構造の改良を行った。

#### 5.5.1 真空準位 (仕事関数) 評価

光子のエネルギーを貰って原子から飛び出た (一次) 電子は、周りの原子と衝突し、その原子から新たな電子 (二次電子) をたたき出し、エネルギーを若干減らす。エネルギーを減らした一次電子は、周囲の原子と次々と衝突して、次々と二次電子をたたき出し、エネルギーを失っていく。二次電子も、同様に、周囲の原子と次々と衝突して、新たな二次電子を生成する。雪崩的に大量の二次電子が生成され、試料中に二次電子の海ができる。真空準位を越える運動エネルギーの二次電子が検出されるので、二次電子のエネルギースペクトルのカットオフ位置から、真空準位が得られる。

Si ウエハーの上に 10 nm の厚さの TaN と W 薄膜を成膜した試料の二次スペクトルの例を図 16 に示す。TaN の場合には、2.6 eV に鋭いエッジがあり、W の場合には 3.5 eV に鋭いエッジがある。これから、W の真空準位は TaN の真空準位より 0.9 eV 高いことと、基板との間の SiO<sub>2</sub> の有無は、真空準位を変えないこと、が分かる<sup>[33]</sup>。

運動エネルギーが小さな電子は、試料を取り囲む空間のごくわずかの浮遊電界や磁界で、運動が影響を受けて、検出器に届く量が影響を受けるので、これを避けるために、

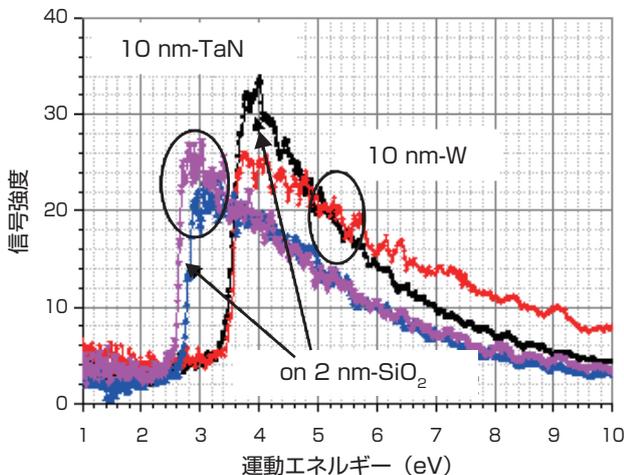


図 16 厚さ 10 nm の TaN と W の二次電子スペクトル

試料に負電位のバイアスをかけて、電子を加速して測定する。図 16 では、試料に -2 V のバイアスをかけて測定した。

二次電子スペクトルの測定では、数十 meV の非常に高いエネルギー分解能で数十 eV の広い領域を測定することがしばしば必要である。このような超多数チャンネルの測定は TOF 法が最も得意とする測定である。

#### 5.5.2 二次電子強度で、金属の超清浄度の判別やキャリア密度の評価

以上は、ユーザーの求めに応じた活用法であるが、試料により、二次電子の強度が異なることに気づいた (図 17)。金属で信号が小さく、絶縁物で信号が大きいため、二次電子の信号強度の違いは、低エネルギー電子の脱出深さの違いによるものである、と解釈した。

絶縁試料の場合に、二次電子のエネルギーがバンドギャップより小さくなると、新たな励起ができなくなるので、それ以上エネルギーを失わないで、試料表面に達し、真空に脱出できる。

一方、金属では、連続バンドの中にフェルミ準位があるので、二次電子のエネルギーがどんなに小さくなくても、価電子帯電子が励起でき、どこまでもエネルギーを失う。試料表面のごく近傍にある原子で作られた二次電子のみが、エネルギーを失う前に試料表面に達して真空に脱出できる。したがって、金属中での低エネルギー電子の脱出深さはとても浅く、金属の二次電子強度は小さくなる。

これを利用して、図 18 に示す様に、超薄膜の金属性が評価できる。下地からの透過電子の影響を小さくするため二次電子強度の小さい W を 100 nm 成膜し、その上に TaN の膜厚を変えた試料を準備した。二次電子信号強度は、TaN 10 nm で最も小さく、薄くなるにつれ増大し、TaN 1 nm では、10 nm の 4 倍になった。これから、膜厚が小さくなると金属性が弱まること分かる<sup>[34]</sup>。

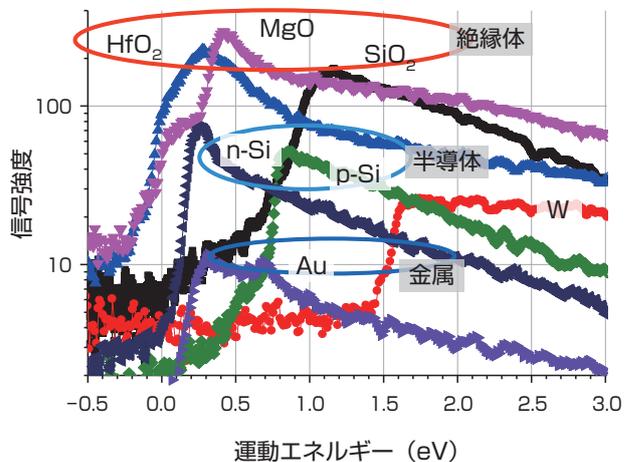


図 17 二次電子信号強度は、絶縁体>半導体>金属の順

この分析手法で、有機半導体レーザー材料のドーピングによるキャリア密度の定性的な議論ができる。光デバイス用有機半導体材料では、ドーピングを行うことで、キャリア密度をあげ、そしてフェルミ準位を制御して、電気抵抗が下げられ、それにより高い注入電流密度の実現が可能になる、と期待される。2%のCs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>をドーパントとしたn型のAC5-CF<sub>3</sub>の二次電子スペクトルは、非ドーブ試料と比べて、カットオフ位置が0.9 eV小さくなるとともに、信号強度が半分になった。ドーピングは、真空準位を基準にしてフェルミ準位を0.9 eV上げ、そして、キャリア密度を大きくしたことを示す。ちなみに、AC5-CF<sub>3</sub>に比べて仕事関数が1 eV大きいAC5の二次電子強度は、AC5-CF<sub>3</sub>の2倍であった<sup>[35][36]</sup>。

### 5.6 電子雲の傾斜角と触媒活性の相関

LPPからの発光は無偏光であるが、EUPS2号機では、その配置から、偏光励起と同じ測定になる。水平にEUV光照射を行い、電子を鉛直方向で検出するため、水平に振動する電場(s偏光)で揺すられる電子は検出されず、p偏光で励起される電子のみが検出される。スペクトル強度の角度依存から、電子雲の角度依存が見える(図19)。

電子雲の角度依存は、最初にSiウエハーで検出された。Si3pの向きが、Siの結晶面方位によって異なった。

後述の粉末試料で、光電子スペクトルに角度依存が見えた時は、大きく驚いた。電子雲の向きは結晶面で決まると考えられる。とすると、個々の粒子の結晶面の向きがランダムな粉末試料では角度依存がなくなる。ところが粉末試料でも角度依存が見えた。ということは、電子雲の向きが、結晶面ではなく、外形で決まることを意味し、極めて興味深い。これは、最表面原子にのみ期待できることであり、数nm内部まで見てしまうXPSでは見えないということになる。

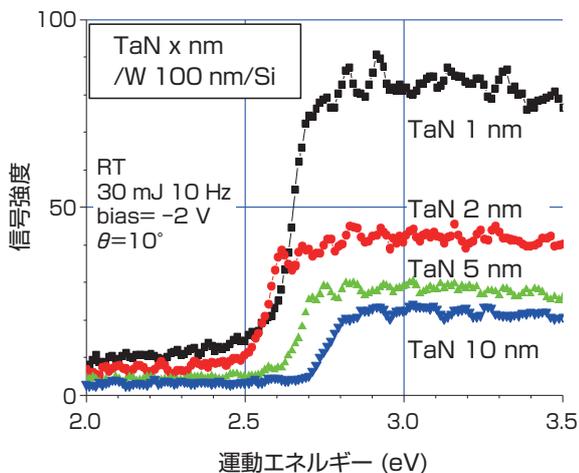


図18 TaN超薄膜の二次電子スペクトル<sup>[33]</sup>  
TaN膜が薄いほど信号が大きくなることから、TaN膜は薄いと電子密度が低いと言える。

自動車の排気ガスの浄化触媒として用いられるZrO<sub>2</sub>粉末について、添加する貴金属を変えた7種類の試料のZr3d光電子ピークを測定したところ、最大強度になる角度が異なり、水性ガスシフト反応CO+H<sub>2</sub>O ⇌ CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>の触媒活性と、非常に良い相関が見られた<sup>[37]</sup>。ガス分子の分解能率と触媒原子の電子雲の傾斜角との相関が見つかったのは、おそらく初めてのことである。触媒機構の理解に重要な情報を与えると期待できる。これも、最表面原子層を見るEUPSならではの分析である。

### 5.7 伝導帯とギャップ内準位<sup>脚註7</sup>の観測

図20は、4つの試料のフェルミ準位近傍の光電子スペクトルである。4.6で述べたように、ごく最近、オシロスコープをsequential modeで用いての事象計数のデータ取得ができるように改良を行った。このため、極めて微弱な構造も観測できるようになった。その結果、光源に含まれる連続スペクトルの影響を取り除くこともできるようになった。図4のスペクトルを入念に眺めると、4.86 nm光は、微弱な連続スペクトルの上に乗っている。この寄与をこれまでは無視してきたが、フェルミ端等の鋭い構造の観測時には、この寄与が見えてくる。図20は、連続スペクトルの影響を取り除いた後のスペクトルである。4つの試料の信号の大きさは異なり、それぞれのピーク値で規格化してある。

図20の左図に見るように、Pt、Pdにはdバンド中にある鋭いフェルミ端が見える。縦軸を拡大して表示した右図に見るように、フェルミ準位以外にも1~2%の大きさの信号が見える。

厚さ100 nmのSiO<sub>2</sub>では、横軸22 eVの位置にあるフェルミ準位の5 eV下で鋭く落ちる価電子帯上端とフェルミ準位の間に、2%程度の大きさの平坦な構造が見える。SiO<sub>2</sub>100 nmの上に成膜したHfO<sub>2</sub>の場合は、価電子帯上端位

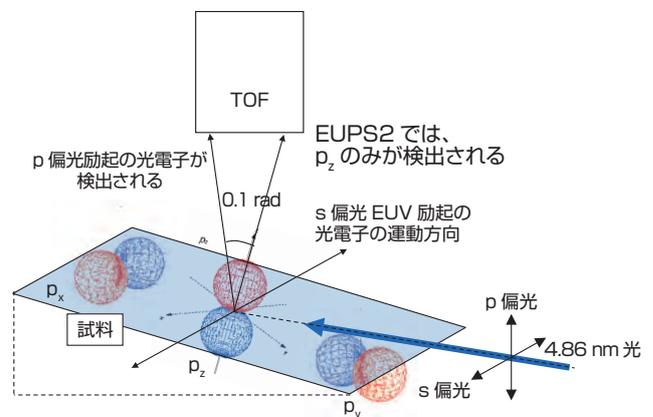


図19 EUPS2号機では、水平照射のp偏光で励起された電子が、鉛直に設置した検出器で検出される。

置が明確でないほどにフェルミ準位近傍の信号が大きい。

試料によって大きさとスペクトル形状が異なっているの  
で、観測された伝導帯電子信号は本物であると考えが、  
極めて小さい信号であるので、本物であると断定するには、  
今後の研究が必要である。

バルク金属の伝導帯電子の寿命は、 $<1$  fs  $\sim$  100 fs である  
と報告されている<sup>[38]</sup>が、表面準位の寿命はかなり長  
くなると思われる。3 ns パルスでかつ超高密度励起を行う  
EUPS では、寿命が 3 ns 程度以上になれば過渡準位が  
観測されても不思議ではない。表面・界面にできるギャッ  
プ内準位と伝導帯準位は材料の物性に大きな影響を与える  
と考えられ、その分析は重要である。

## 6 おわりに

狭帯域線スペクトルを発する、そして短パルスである、  
と言う LPP 光源の特徴を最大に活かした応用が、EUPS  
である。そのことで、LPP 光源応用の、おそらく初めての  
実用化技術になった。分光器を用いずに狭帯域光を得る、  
そして飛行時間法で電子分光を行う、のが、基本的に重  
要な構成技術である。しかし、真に実用化に至る迄には、  
多くの要素技術の開発が必要であった。実用的分光装置  
にするための構成の過程を紹介した。

LPP 光源応用の最大の課題である汚染物の遮断を、BN  
ロッドを LPP 生成のターゲットに用いて安価な mylar 膜を  
フィルターに用いることで、実現した。汚染物遮断フィルタ  
ーの頻繁な交換を容易にすることを、楕円鏡の導入で解決し  
た。回折格子を挟まないことで、放射光を用いる場合と同  
程度の試料上の時間平均フラックスが得られている。LPP  
光源のパルス性を活かした分光法として TOF 法を採用し  
たが、実際に装置にすると紙の上では予想できなかった問  
題が発生したが、飛行管の工夫で問題を解決した。

実際の試料の測定を始めると、次々と予想外の現象が  
出現した。それらを一つ一つ理解していくことで、従来の  
光電子分光法では行われていない、新たな分析法が生ま  
れた。最表面原子層の極微量汚染、欠陥の検出、絶縁薄  
膜の帯電中和なしでの測定、帯電シフトを利用した電気伝  
導率評価、最表面原子の電子雲の傾斜角、二次電子強度  
からのフェルミ準位近傍電子密度の評価、金属粒子表面の  
超清浄度評価等である。

次世代半導体研究センター当時に装置が完成し、また、  
半導体関連の研究者を多く知っていることから、当初は半  
導体試料を中心に測定を行ったが、意欲的な外部ユーザ  
ーの出現で、半導体以外の試料の測定が大半、に変わっ  
ている。EUPS が最表面原子に関する種々の知見を与えるこ  
とから、最表面原子で反応が起きる触媒現象の分析に最も  
威力を発揮すると考えられる。実は最表面原子が決定的な  
役割を果たしていると言うことが明らかになる触媒以外の  
分野があれば、その分野でも威力を発揮する。そのような  
新たな分野の発見には、多様なユーザーの参加が必要であ  
る。EUPS ならではの新分析法の多くは、ユーザーから持  
ち込まれる試料の分析の中で生まれた。光電子分光の経  
験がなく EUPS 開発を始めた著者に、従来にはない新た  
な光電子分光分析法が予想できるはずもなく、EUPS の素  
晴らしい潜在力が引き出したのは、意欲的なユーザーが現  
れてくれたからであった。“ユーザーの要求が装置を高度化す  
る”は、広く適用できる原理の様に思える。

既存の光電子分光法である XPS および UPS とは、ユー  
ザーフレンドリ性は比較にならない。これは、著者の手に  
負えるものではなく、製品化しての広い普及が必要である。  
しかし、EUPS を製品化に持ち込むまでは、考案者の責任・  
義務であろう。

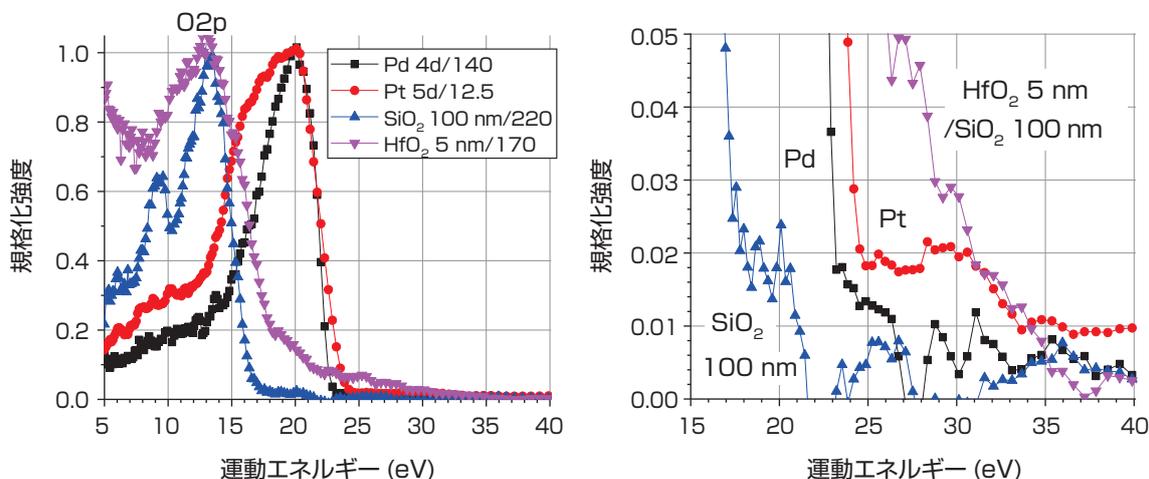


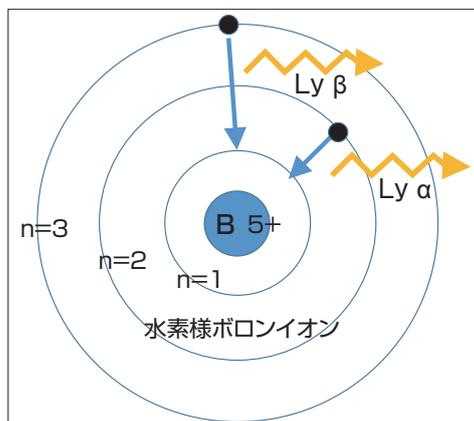
図 20 Pd、Pt、SiO<sub>2</sub>、および HfO<sub>2</sub> のフェルミ準位近傍の光電子スペクトル  
ピーク信号で規格化して表示。縦軸を拡大して表示した右図で、1% 前後の強度の伝導帯信号が認められる。

## 謝辞

X線顕微鏡の研究を行っていた当時の木村錫一極限技術部長の“LPPを産業応用できないのか?”この言葉がなかったら、EUPSの開発の着手はなかった。紙の上のアイデアであったEUPSを、Si2pスペクトルが得られるまでの装置(1号機)に組み上げたのは、ニコンから電総研に何年も常駐で研究をしてくれた近藤洋行氏である。彼を電総研に派遣して頂いたニコンの永田浩氏、飯塚清氏がいなければ、EUPS研究は離陸しなかった。X線顕微鏡研究の共同研究者である清水秀明氏の強力な支援がなければ、大きな研究費を得て装置開発が進んだ科学技術振興調整費に応募できるだけの成果は得られなかった。それがなければ、産総研になってから始まったMIRAIプロジェクトに、廣瀬プロジェクトリーダーによって加えて頂くこともなく、現2号機の開発はなかった。そのほかにも、ポスドク、試料提供者、ユーザー含め、数限りない方々の支援のおかげで今日に至っている。EUPSは今も成長し続けているが、それを支えてくださる方々がいる。多くの方々のご厚意には感謝しきれない。

## 補足説明

補足1:LPPからのX線発生機構:自由電子が完全電離ボロンイオンに捉えられ、主量子数 $n=2$ から主量子数 $n=1$ に遷移するとき、4.86 nmのLy $\alpha$ 線が放出される。EUPSでは、完全電離ボロンイオンが十分な量存在し、かつ、自由電子が十分に高速に再結合する、適切な温度になるよう、レーザーの集光密度を調整する。発光強度は、イオンの密度と電子の密度の積、つまり、プラズマの密度の自乗に比例するので、プラズマの密度が高いほど発光強度が大きくなる。一方で、密度が高すぎると自己吸収が大きくなり、輝度が飽和し、線スペクトルの幅が広がる。極限の輝度が「黒体放射」輝度であり、高密度の極限では、スペクトル構造が消えて、平坦なスペクトル構造になる。



造になる。EUPSでは、励起EUV光のスペクトル幅はLPPの発光スペクトルで決まるので、プラズマ密度を高くし過ぎてはいけぬ。一方で、強い発光が欲しいので、ある程度の密度が欲しい。LPPの密度は、励起レーザーの波長によって異なる。YAGの2倍高調波0.53  $\mu\text{m}$ は、狭帯域の4.86 nm光の発生には適当な波長と思われる。

補足2:リソグラフィー用と光電子分光用LPPの相違:光電子分光とリソグラフィーでは光源への要求が大きく異なる。EUVL用光源では、取り出せるEUVパワーの大きさ、パワー変動の小ささ、レーザーからEUVパワーへの変換効率の高さ、さらには、一年等の長期にわたるメンテナンスフリー性等が求められる。一方、光電子分光用光源では、スペクトル幅の細さが最も重要である。パワー変動の小ささ、変換効率の高さ、メンテナンスフリー性は、あれば好ましいが、必須要件ではない。EUPSでは、分光器を用いないため、LPPの発光スペクトルに狭帯域性を要求する。EUVL用光源では、利用パワーを大きくするため多層膜反射スペクトルの全幅(2%ほど)を埋める幅広い発光が求められるが、EUPSでは、0.1%程度の狭帯域発光が求められる。TOF法では、エネルギー分解能が時間分解能で決まるため、光源の発光時間はなるべく短いことが望ましく、EUPSでは、3 nsである。一方、リソグラフィー用光源では、パワーを大きくするため、パルス幅はなるべく長いことが好ましい<sup>[21]</sup>。数十nsのパルス幅が用いられている。このため、リソグラフィー用光源とEUPS用光源では、レーザーの選定、照射条件、ターゲット材料、構造、供給法等、あらゆること異なる。ターゲット材料は、EUVLではSnが用いられ、EUPSではBNを用いている。EUPSでは、丸棒ターゲットを用いているが、EUVLでは液滴を用いる。EUPSでは、パルス幅3 ns、波長0.53  $\mu\text{m}$ 、繰り返し率10HzのYAGレーザーを用いるが、EUVL用光源では、波長1  $\mu\text{m}$ のYAGレーザーあるいは波長10.6  $\mu\text{m}$ のCO<sub>2</sub>レーザーが用いられる。EUPSでは単一パルスだが、EUVL用光源ではプレパルスの使用が必須である。二つの応用で、全く別のLPP光源であり、一方の光源技術開発は、他方には役立たない。

補足3:EUPSとXPSの比較:今日材料開発において必須になっているXPS分析であるが、我田引水的に言えば、元素分析にとどまっている。この論文で紹介したような、材料の性能発現の本質に迫る、最表面現象の魅力を捉える分析は、行われていない。ただ

し、深い内殻が励起できるために元素分析に威力を発揮するXPSにEUPSが置き換わることはない。EUPSの製品化技術が進んだ場合、価格的には、EUPSが安価になると考えられる。

### 用語の説明

用語1: 磁気ボトル: 瓶様の構造の磁力線配置。1テスラ以上の磁束密度の瓶の口に試料を置いて、電子を磁力線に巻き付け、磁力線を断熱的に広げれば、電子の運動エネルギーは変えずに、運動の方向のみが変えられるので、瓶の底の位置に置いた電子検出器で電子の拡大像が得られるというアイデア。期待したTOFが観測できなかったのは、3号機に用いた磁気ボトルが十分な性能を持っていなかった可能性があり、今後の開発で成功する可能性はある。しかし、磁束密度を1テスラ以上にするために、試料を設置できる空間が1 mm以下にならざるを得ず、測定可能な試料が極めて限定されることに気づき、磁気ボトルの採用を断念した。

用語2: シュバルツシルト鏡: 微小径への集光には、光学収差を小さくする必要があり、垂直入射が求められる。凹面鏡と凸面鏡を組み合わせた垂直入射光学系であるシュバルツシルト鏡では、サブミクロン分解能が可能。しかし、X線多層膜で大きな垂直反射率を得るのは容易ではなく、唯一Mo/Siの多層膜で70 %程度の高い垂直入射反射率が得られている。10枚以上の多層膜鏡が用いられるEUVLで13.5 nmが選択されたのは、これが理由である。

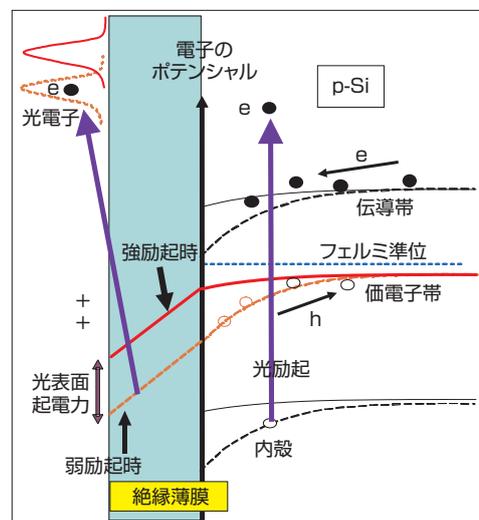
用語3: MCP (Microchannel Plate): 高速の粒子検出器。内径が10  $\mu\text{m}$ 前後の毛細管 (microchannel) を多数束ねた円形あるいは矩形のガラス板の両面に2 kV程度の電圧を印加し、粒子の衝突でMCP表面に発生する二次電子を毛細管に導き、数桁の増幅をする。10<sup>7</sup>以上の増倍率で単一電子の検出も可能。立ち上がり時間が1 ns以下の高速応答性が特徴であり、電子のTOF分光には必須。

用語4: 誘導ブリュアン散乱 (SBS) 鏡: 入射波と位相が反転した (位相共役) 反射波が発生すると、両波の干渉により物質中に回折格子状の音波が発生する。音波を介するレーザーの後方散乱、誘導ブリュアン散乱 (SBS:stimulated Brillouin scattering) 、では、歪んだ媒質を通過することで受ける入射波の波面歪と反射波の波面歪は逆位相であるので、強励起による光学歪を受けたレーザー媒質を往復しても、戻ってくるレーザービームの波面歪は大して大きくならない。SBS鏡を用いれば、良質のレーザービームが得られる。

用語5: 半導体へのドーピング: 電子の存在確率が50 %になるエネルギー位置であるフェルミ準位は、純半導体ではバンドギャップの中心である。ショットキー障壁の高さの制御等のためのフェルミ準位の位置の調整のために、不

純物を混入 (ドーピング) する。電子を供給する不純物をドーピングすると、フェルミ準位が伝導帯の底に近づきn型半導体になり、電子を受け取る不純物をドーピングすればp型半導体になる。

用語6: バンド曲がり: 非常にしばしば、界面に電荷が捉えられ、あるいは金属と半導体の間に挟んだ絶縁膜中に電荷が捕獲され、半導体の伝導帯底等の、界面でのバンドの位置が、バルクでの位置と異なる。すると、目論んだキャリア移送の制御性が損なわれ、デバイス性能が低下する。バンド曲がりの大きさを知ること、意図しないバンド曲がりを小さくすることは、デバイス開発においてとても重要である。EUPSでは、強励起することでバンドの平坦化が可能であるので、弱励起時との光電子スペクトルの位置の差から、バンド曲がり が評価できる。



用語7: ギャップ内準位: 結晶では、周期性により、エネルギー準位が価電子帯と伝導帯に分離し、エネルギーギャップができる。ところが表面・界面では奥行き方向の周期性が失われるため、バンドの境界が曖昧になり、バルク中のエネルギーギャップ内にあたるエネルギー位置にも電子の準位が発生する。キャリアの移送特性に大きく影響すると考えられるので、ギャップ内準位の位置および量の評価は重要である。特に、最表面原子の上で反応が起きる触媒においては、触媒活性に決定的な役割を演じている可能性がある。

### 参考文献

- [1] 特許「光電子分光方法」, 第2580515号 (1996). 特許「電子分光方法とこれを用いた電子分光装置」, 第2764505号 (1998). Electron spectroscopy apparatus: US Patent No.5569916 (1996).
- [2] NanotechJapan: <http://nanonet.mext.go.jp/>, 閲覧日2016-05-17.
- [3] T. H. Maiman: Stimulated optical radiation in ruby, *Nature*, 187, 493–494 (1960).

- [4] J. Nuckolls, L. Wood, A. Thiessen and G. Zimmerman: Laser compression of matter to super-high densities: Thermonuclear (CTR) applications, *Nature*, 239, 139–142 (1972).
- [5] T. Tomie: Picosecond pulse generation by self-phase modulation in an actively mode-locked and Q-switched phosphate glass laser, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 24, 1008–1017 (1985).
- [6] P. Langer, G. Tonon, F. Floux and A. Dugauze: Laser induced emission of electrons, ions, and X rays from solid targets, *IEEE J. Quantum, Electr.*, 2 (9), 499–506 (1966).
- [7] M. J. Bernstein and G. G. Comisar: X-ray production in laser-heated plasmas, *J. Appl. Phys.*, 41, 729–733 (1970).
- [8] D. L. Spears and H. I. Smith: X-ray lithography: A new high resolution replication process, *Solid State Technol.*, 15 (7), 21–26 (1972).
- [9] T. Tomie, H. Shimizu, T. Majima, T. Kanayama, M. Yamada and E. Miura: Flash contact x-ray microscopy of biological specimen in water, *Proc. SPIE*, 1741, (1993).
- [10] T. Tomie, H. Kondo and H. Shimizu: Application of X-ray laser to photoelectron micro-spectroscopy, *Inst. Phys. Conf.*, 151, 520–527 (1996).
- [11] T. Tomie, H. Shimizu, T. Majima, M. Yamada, T. Kanayama, H. Kondo, M. Yano and M. Ono: Three-dimensional readout of flash X-ray images of living sperm in water by atomic-force microscopy, *Science*, 252, 691–693 (1991).
- [12] L. I. Gudzenko and L. A. Shelepin: Negative absorption in a nonequilibrium hydrogen plasma, *Sov. Phys. JETP*, 18, 998–1000 (1964).
- [13] AG Molchanov: Lasers in the vacuum ultraviolet and in the x-ray regions of the spectrum, *Sov. Phys. Usp.*, 15, 124–129 (1972).
- [14] C. Chenais-Popovics, R. Corbett, C. J. Hooker, M. H. Key, G. P. Kiehn, C. L. S. Lewis, G. J. Pert, C. Regan, S. J. Rose, S. Sadaat, R. Smith, T. Tomie and O. Willi: Laser amplification at 18.2 nm in recombining plasma from a laser-irradiated carbon fiber, *Phys. Rev. Lett.*, 59 (19), 2161–2165 (1987).
- [15] M. Grande, M. H. Key, G. Kiehn, C. L. S. Lewis, G. J. Pert, S. A. Ramsden, C. Regan, S. J. Rose, R. Smith, T. Tomie and O. Willi: Measurement and detailed analysis of single pass gain at 81 Å in a recombining laser produced fluorine plasma, *Opt. Commun.*, 74, 309–312 (1990).
- [16] R. London, D. Matthews and S. Suckewer eds.: *Proc. Applications of X-ray Lasers*, (1992).
- [17] T. Tomie: Tin laser-produced plasma as the light source for extreme ultraviolet lithography high-volume manufacturing: history, ideal plasma, present status, and prospects, *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, 11 (2), 021109 (2012).
- [18] T. Tomie, H. Kondo, H. Shimizu and P. Lu: X-ray photoelectron spectroscopy with a laser plasma source, *Proc. SPIE*, 3157, 176–183 (1997).
- [19] S. Aoki, T. Ohchi, S. Sudo, K. Nakajima, T. Onuki and K. Sugisaki: X-ray photoelectron spectroscopy using a focused-laser-produced plasma X-ray beam, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32, L1574–L1576 (1993).
- [20] T. Munakata, E. Ishikawa, I. Kinoshita and T. Kasuya: Scanning photoelectron spectromicroscope based on coherent vacuum ultraviolet radiation, *Rev. Sci. Instrum.*, 62, 2572–2578 (1991).
- [21] T. Aota and T. Tomie: Ultimate efficiency of extreme ultraviolet radiation from a laser-produced plasma, *Phys. Rev. Lett.*, 94, 015004, (2005).
- [22] H. Kondo, T. Tomie and H. Shimizu: Time of flight photoelectron spectroscopy with a laser-plasma x-ray source, *Appl. Phys. Lett.*, 69 (2), 182–184 (1996).
- [23] H. Kondo, T. Tomie and H. Shimizu: Observation of chemical shifts of Si 2p level by an x-ray photoelectron spectroscopy with a laser-plasma x-ray source, *Appl. Phys. Lett.*, 72 (21), 2668–2670 (1998).
- [24] 特許「飛行時間型分析装置」, 第4431698号 (2010).
- [25] 特許「飛行時間型エネルギー分光装置」, 第4936375号 (2012).
- [26] T. Tomie, T. Ishitsuka, T. Ootsuka and H. Ota: Observation of work functions, metallicity, band bending, interfacial dipoles by EUPS for characterizing high-k/metal interfaces, *AIP Conf. Proc.*, 1395 (1), 148 (2011).
- [27] 森田幸弘, 寺内正治, 中山貴仁, 吉野恭平, 山内康弘, 西谷幹彦: PDP用保護膜材料の評価技術, *月刊ディスプレイ*, 12, 62 (2011).
- [28] M. P. Seah and W. A. Dench: Quantitative electron spectroscopy of surfaces: A standard data base for electron inelastic mean free paths in solids, *Surf. Interface Anal.*, 1 (1), 2–11 (1979).
- [29] 石塚知明, 大塚照久, 葛西彪, 太田裕之, 富江敏尚: 金属中の数eV電子の非弾性平均自由行程のEUPSによる評価, 第57回応用物理学会関係連合講演会, 神奈川工科大学, (2011), 25p-KW-7.
- [30] 富江敏尚, 葛西彪, 岩住ひろ美, 片山俊治, 井上真雄, 朝山匡一郎: EUPSで測定したHfSiON/Siのバンド曲がりの膜厚依存性, 第54回応用物理学会関係連合講演会, 青山学院大学, (2007), 28p-ZH-2.
- [31] 大塚照久, 石塚知明, 葛西彪, 森田行則, 秦信宏, 富江敏尚: 光電子分光測定におけるSiO<sub>2</sub>薄膜の帯電シフトの機構, 第71回応用物理学会学術講演会, 長崎大学, (2010), 16p-S-17.
- [32] M. Nagata, T. Yamada, R. Ando, I. Kim and T. Tomie: Surface conductivity measurement of catalyst materials by EUPS and its correlation to catalyst performance, *SAE Int. J. Engines*, 9 (3), (2016).
- [33] 大塚照久, 石塚知明, 葛西彪, 太田裕之, 富江敏尚: EUPSを用いたTa<sub>2</sub>NとWの仕事関数の評価, 57回応用物理学会関係連合講演会, 東海大学 湘南キャンパス, (2010), 19p-C-7.
- [34] 石塚知明, 大塚照久, 葛西彪, 太田裕之, 富江敏尚: 二次電子の観測によるTa<sub>2</sub>N薄膜の金属性の膜厚依存の評価, 第57回応用物理学会関係連合講演会, 東海大学 湘南キャンパス, (2010), 19p-C-9.
- [35] Y. Kawaguchi, F. Sasaki, H. Mochizuki, T. Ishitsuka, T. Tomie, T. Ootsuka, S. Watanabe, Y. Shimoi, T. Yamao and S. Hotta: Electronic states of thiophene/phenylene co-oligomers: Extreme-ultra violet excited photoelectron spectroscopy observations and density functional theory calculations, *J. Appl. Phys.*, 113, 083710 (2013).
- [36] F. Sasaki, Y. Kawaguchi, H. Mochizuki, S. Haraichi, T. Ishitsuka, T. Ootsuka, T. Tomie, S. Watanabe, Y. Shimoi, T. Yamao and S. Hotta: Effects of pn doping in thiophene/phenylene co-oligomers thin films, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 620 (1), 153–158 (2015).
- [37] 石塚知明, 伊藤友章, 永田誠, 富江敏尚: 排気ガス浄化用粉末触媒の電子雲の傾斜角と触媒活性の相関, 第57回応用物理学会関係連合講演会, 東海大学 湘南キャンパス, (2010), 18p-P-14.
- [38] M. Bauer and M. Aeschlimann: Dynamics of excited electrons in metals, thin films and nanostructures, *J. Electr. Spectr. Rel. Phen.*, 124, 225–243 (2002).

## 執筆者略歴

富江 敏尚 (とみえ としひさ)

電総研および産総研で、大出力ガラスレーザー技術開発、X線顕微鏡、X線レーザー、光電子分光、EUVL用光源等の研究に従事。1986年科学技術庁原子力関係長期留学制度で英国ラザフォードアップルトン研究所の客員研究員。EUPS、X線屈折レンズ、多層膜マスクブランク欠陥検査法などを発明。産総研研究顧問、NEDOプログラママネージャー、産総研招聘研究員を経て、中華人民共和国の海外専門家“千人計画”に採択され、2014年7月より3年間長春理工大学の特聘教授。2015年4月に国家特聘專家の称号。光電子顕微鏡PEEMとフェムト秒レーザーを用いたAu-TiO<sub>2</sub>ナノ粒子系におけるキャリアダイナミクスの研究およびEUV光源の研究の指導。産総研客員研究員としてEUPS研究を継続。この論文ではEUPSの発明、実用装置化技術開発、光電子分光新応用技術の開拓を担当。



石塚 知明 (いしづか ともあき)

1992年茨城大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、日立マクセル(株)入社。2008年産総研テクニカルスタッフ。以来、一貫して、EUPS測定に従事。現在、EUPS等の機器開発研究および開発機器を用いた支援業務(微細構造解析プラットフォーム事業を含む)に従事。この論文では5章で紹介したデータの大半の測定を担当。



## 査読者との議論

### 議論1 全体について

コメント(小林 直人:早稲田大学)

この論文は長年にわたって熱心に研究開発を行ってきたレーザー生成プラズマ(LPP)光源の実用化に向けた光電子分光法開発と種々の応用に関する論文で、LPP光源の初期の目標設定から徐々に新たな光電子分光法の確立とそのさまざまな先端的应用に至る経緯が詳細に述べられており、科学的および工学的価値が十分ある論文だと思います。これはLPP光源という技術シーズの特徴と利点を活かして実用に結びつける典型的な「シーズ駆動型の研究」であったと言えますが、その実用化にあたってはさまざまなユーザーの声が大きな役割を果たしたと記されています。これらのユニークな技術構成の方法とプロセスはシンセシオロジーに相応しい論文であると言えます。

コメント(藤井 賢一:産業技術総合研究所)

表面や表面汚染状態の分析においてX線光電子分光法(XPS)が近年多用されるなかで、その光源としてパルスレーザー生成プラズマに着目し、極端紫外光励起光電子分光法(EUPS)の開発に至った経緯やその効果的な応用について記述したこの論文の価値は極めて高いと思います。

回答(富江 敏尚)

詳細に読んで頂き、この論文に多数の有益なコメントを頂きました。どれも適切と同意します。最後に用語説明を行う等ご提案頂い

た幾つかの構成の改善もしました。ご提案の副題は魅力的であり、使わせて頂きます。

### 議論2 LPP光源について

コメント(藤井 賢一)

この技術を一般の技術者や研究者にも広く知ってもらうためには、光源としての生成原理について、よりわかりやすく説明する必要がありますかと思いますが。1.2節(レーザー生成プラズマ光源の研究の歴史)において、その概要が説明してありますが、LPPに用いられる励起用レーザーはどのようなものなのか、そこからどのようなメカニズムで極端紫外光が発生するのか、などについて図を交えながら解説すると読者の理解が深まると思います。

回答(富江 敏尚)

レーザーの選定は重要であり、「4.4 レーザーの選択」で、次のような必要項目を挙げてあります。すなわち誘導ブリュアン散乱(SBS)鏡等を道用いてパルス波形がパルス幅3 nsのきれいなガウシアンであること、空間パターンがTEM00モードであること、繰り返し率100 Hzまでの繰り返し率およびパルスエネルギーに依らずビームパターンおよびパルス波形が良好であること、などが重要です。ご提案により、文末に幾つかの補足説明を追加しました。

### 議論3 今後の展望について

コメント(小林 直人)

新たに開拓したEUPSは、さまざまな物質表面の新しい観察手段を提供したことがわかります。特に最表面の電子の振る舞いについて従来にはない新たな知見が得られています。今後、科学的および工学的にどのような分野への応用が期待されるのでしょうか？

回答(富江 敏尚)

「6 おわりに」に、以下の記述を追加しました。

「EUPSが最表面原子に関する種々の知見を与えることから、最表面原子で反応が起きる触媒現象の分析に最も威力を発揮すると考えられる。」

### 議論4 商用機について

コメント(小林 直人)

これだけ多くのユーザーの利用によって技術が高度化されたのですから、メーカーの力で商用機が出て良いかと思われそうですが、そのような動きはありましたでしょうか。もしあまり芳しくないとしたら商業化のための隘路は何でしょうか？

回答(富江 敏尚)

10年前には、分析メーカー行脚をしましたが、反応は芳しくありませんでした。最近のユーザーからは、製作するとどれくらいかかるか、と言う質問が複数あり、五千万円ならば安い、と言う声も聞きました。具体的な話には進展していません。

EUPS分析で製造プロセスを改善したと聞くパナソニックさんはPDP事業から撤退したため、宣伝をお願いすることができませんが、EUPS分析により事業が発展した、と言う事例を幾つか作り、それが広まれば、製品化の要求が強くなると考えます。製品化に至る前の、基礎的なデータの科学論文雑誌への掲載が少ないことが知名度が低くとどまっている最大の原因であり、大いに反省すべきですが、最近、ユーザー執筆の論文が出始めており、徐々に知名度が高まると期待します。それにより、商品化も具体化する、と期待します。6 おわりに、に書いたように、EUPSを製品化に持ち込むまでが私の責任です。

# 日本林業の蘇りを目指した新たな技術開発

## — 日本林業の特異性を克服する伐倒マニピュレータの提案 —

白井 裕子

最初に日本林業の特異性について解説することで、日本林業の課題を示す。そこから目標に「日本林業の蘇生」をあげ、目標を達成するためのシナリオを示し、そこで、どのような研究が求められているか解説する。この中で、我々が取り組んでいる技術開発の位置付けと役割を述べる。また具体的な技術開発の実施例として、立木を伐り倒すマニピュレータTATSUMIの詳細と実証実験結果について報告する。TATSUMIは、作業者一人で持ち運べるよう小型軽量で、現場に普及しているエンジンチェーンソーを着脱して使い、立木を伐り倒す機械である。そして、さらに日本の山林を相手にする機械開発に対して、新たな設計手法を見出したことについても述べる。

**キーワード:** 日本林業、設計手法、マニピュレータ、立木の伐倒作業、モビリティ

## A revolutionary technical development to revitalize Japanese forestry

### —A proposal for a portable tree felling manipulator to address specific properties of Japanese forestry—

Yuko SHIRAI

First, we present issues in Japanese forestry based on an explanation of the specific properties of Japanese forestry. Then, taking the revitalization of Japanese forestry as a goal, we present a scenario for the achievement of that goal and comment on the type of research that is needed for it. This includes descriptions of the positioning and role of the technical development currently undertaken by the authors. As a concrete example of machine development, we report on the details of a manipulator for cutting down trees, "TATSUMI", and the results of verification tests. The TATSUMI manipulator is a machine that is compact and lightweight enough to be carried by a single worker. This machine cuts down trees using mountable/dismountable chainsaws that are commonly available at forestry sites. We also discuss new design methods for machine development that were identified as suitable for the mountain forests of Japan.

**Keywords:** Japanese forestry, design methods, manipulator, tree felling operation, mobility

### 1 はじめに

我々は、山林内の立木を伐り倒す2種類のマニピュレータと山林内の不整地を走破するモビリティを開発している。このほか森林情報を計測、可視化するシステム<sup>[1]</sup>や地形条件等から山林内の林業用の路網を自動生成するシステム<sup>[2]</sup>を手がけている。

この論文では、最初に日本林業の特異性について解説する。そこから研究全体の目標として日本林業の蘇生をあげ、目標達成へのシナリオを示し、ここに求められる研究課題を設定する。この中で我々は林業の安全性と生産性の問題に対して、新たな機械を提案し開発している。この論文では、この実施例として、山林内の立木を伐り倒す「伐倒ポータブルマニピュレータ TATSUMI」を取り上げて報告する。

山林内の作業環境も作業対象となる立木も、二つと同じ

ものがなく、そしてその環境差、個体差も大きい。立木を伐り倒す作業方法自体も経験則により数値的根拠も得られていない。日本の山林を相手にする機械開発に対しては、これまでのVモデルやアジャイルといった設計手法で対応するのは困難である。そこで新たな設計開発手法を見出した。この設計手法についても報告する。

### 2 日本の林業の特異性

日本林業の特異性について解説する(図1)。まず欧米と比した時に、日本林業を難しくしている理由に、我が国の自然環境がある。ヨーロッパで林業は「森」で行われ、日本で林業は「山」で行われている。これが根本的な違いである。次から研究課題を導き出すため、日本林業の特異性を一つずつあげて解説する。

## 2.1 資源の種類と量、そして位置

国土の67%が森林で、面積(2,500万ha)、蓄積(49億m<sup>3</sup>)の絶対量も多い。特筆すべきは、我が国は、単位面積あたりの蓄積量が大きいことである<sup>[3]</sup>。さらにその蓄積量が増え続けている。また量を増やしているのは、人が植えた人工林である。1年間に木が成長する量を成長量といい、この7割を伐って良いとされ、スウェーデン、フィンランド、オーストリアは、毎年、成長量の約7割を収穫している<sup>[4][5]</sup>。しかし我が国では成長量の約2割しか収穫していない<sup>[5][6]</sup>。林業のみならず、自然環境の保全のためにも、我が国では森林資源を利用すべきである。

またこれらの数値は推計値であり、この増え続ける莫大な資源について、どこに、どのようなものが、どれだけあるかは、正確には把握されていない。そして、その資源には、所有者や所有境界が不明なものがある。これも日本林業を難しくしている点である。

この資源の計測は、主に国家資源を把握する目的と、林

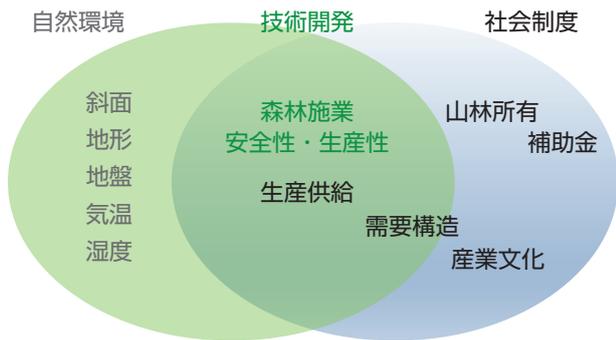


図1 日本林業の特異性

業を目的に行われる。そしてその計測のほとんどが手作業である点もあげる。

## 2.2 山林所有

森林の所有権をどう扱うか、欧州と日本では対照的である。日本の行政は、個人の財産としての権利を守る方向に動くが、ヨーロッパでは、所有する権利に対して、責任を問う方向に制度が設計されている。またドイツ等の森林法では、森林に立ち入る権利は万人に保障されている<sup>[7]</sup>。著者のドイツ調査では、他人が所有林に入ることの、所有者の負担を推計しており、行政の担当官は、所有者が犠牲を払って、公共に尽くしてくれるから、補助金を与えると回答している。一方、日本では山の手入れをするため、その山林所有者を捜し出すことに、行政が時間と費用を費やしている。

## 2.3 補助金

林道、造林に対する行政投資額、つまり補助金は2,962億円/年で、木材生産額2,143億円/年を超えている<sup>[8][9]</sup> (図2)。なお林業産出額のうち、きのこの生産額は2,037億円/年で、木材生産額と同等である<sup>[9]</sup>。

現在の日本林業は、その時々補助金を得るために、行政の指示通りに作業を行っている組合、事業者が多く、そして補助金自体もその時の時勢によっているだけで、そこに何らかのルールも見出せない。本来イノベーションが生まれるのは現場である。しかし現行の制度は、現場が試行錯誤し、創意工夫できる環境を用意していない。

## 2.4 森林施業の安全性・生産性

### 2.4.1 労働災害

林業の死傷事故は1970年代には、1年に16,000件を



図2 木材生産額と行政投資額<sup>[8][9]</sup>

超え、死亡者は250人近くにもものぼっていた<sup>[10]</sup>。林業の労働災害の発生率を災害の発生度合いを表す「千人率」で他産業と比べると、現在でも、全産業の中で最も高く、全産業平均2.1に対して、林業は27.7と突出している（2011）<sup>[11]</sup>。図3に林業の労働災害を示す。死傷事故は2011年まで2000件を切らず、近年では2010年に59人の死者を出している<sup>[10]</sup>。木材収穫の生産性も低い、その前に安全性に問題がある。

我々が開発している伐倒マニピュレータは、立木を伐り倒す作業を対象にしている。伐倒作業は、林業において最も危険な作業で、労働災害の半数が伐木作業中に発生している。

作業者が高速回転（7,000～10,000 rpm）する刃物を取り付けたチェーンソーを握り、高さ15、6 m、重量数百キログラムある立木の真下で伐り倒す。また人間による伐倒は、その作業精度が低く、安定しない。このため高速回転する刃物や思わぬ時に思わぬ方向へ倒れる立木に接触することで、致命的な労働災害が発生する。

#### 2.4.2 林業機械

林業機械には、チェーンソー等の在来型林業機械に対して、大型の高性能林業機械<sup>用語1</sup>がある。また切った木を車両に積んで集める（車両系）か、また空中にワイヤーを張って、そこに吊して集める（架線系）かの違いがある。主に車両系の高性能林業機械は欧米で開発され、その多くは複数の機能を有する大型林業機械である。我が国では車両系建設機械をベースに、海外で開発、製造、そして輸入、または模倣して我が国で造られたアタッチメントが取り付けられている。またベースごと輸入する場合もある。

高性能林業機械は1988年の23台から2014年には7,089台に急増している<sup>[12]</sup>。補助金はこの大型の林業機械に対しても支払われており、補助率は2分の1である。しかしこの急増にともない、生産量が増えたり、死傷事故が減ったりはしていない。欧米で林業は、なだらかな丘陵地で行われ、高性能林業機械は、そこで使用されている機械である。日本でその効率と性能を十分に発揮することは難しい。

日本の山林は、欧米に比べて斜面が急で、地形が複雑、そして地盤も軟弱、さらに高温多湿で、欧米ほど路網の整備とその維持管理は容易ではない。また山林内の路網密度も19.5 m/ha（2013）<sup>[13]</sup>と低い。立木を伐倒する大型の林業機械には、ハーベスタ並びにフェラーバンチャがある。これら大型林業機械は、一般道は走行できず、一般道が林業用路網につながる地点まで、トレーラ等で運搬する。そこから、これらの大型の林業機械が進入できるのは、林内に走行可能な道が整備されたエリアのみである。また作業範囲は、そこからブーム、アームの届く範囲に限られる。

図4に静岡県傾斜分布図を示す。静岡県の森林率は64%で、海岸沿いに広がる市街地以外は森林が占める。この図からも林業が急傾斜地で行われているのが分かる。大型の林業機械が走行する道を、急傾斜地に整備すること自体危険である。そこを走行し、作業するのは、言うまでもない。

現在でも、日本の伐倒作業の多くは、チェーンソーで行われている。日本の山林ほど、条件は厳しくはないが、ヨーロッパで比較的急傾斜と言われるオーストリアでも、伐倒作業の89%がチェーンソーであると、著者の現地調査でオーストリア農科大学の研究者が回答している。日本林業

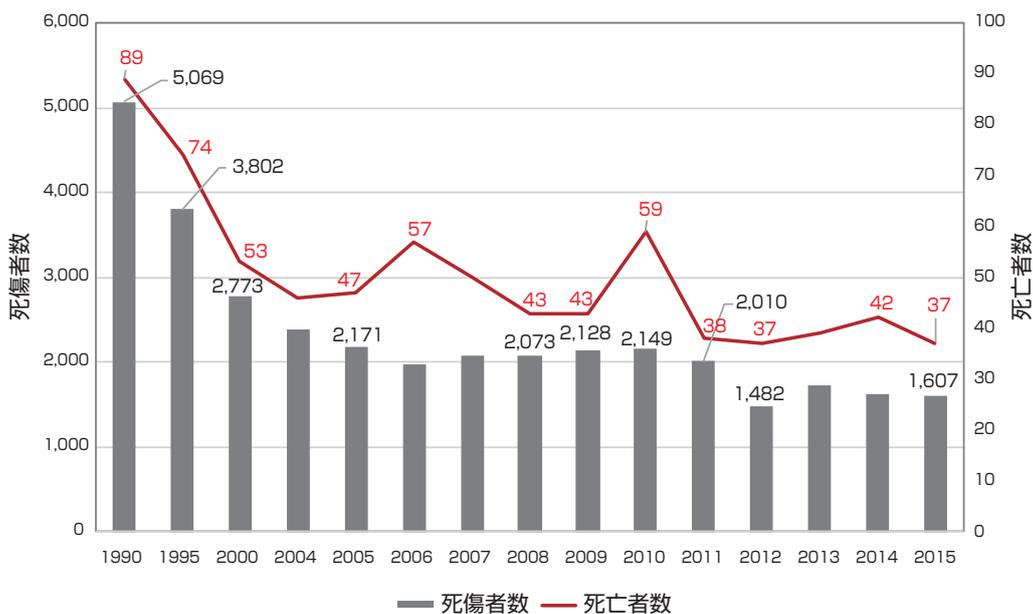


図3 林業の労働災害<sup>[10]</sup>

では、チェーンソーや本提案機のように、人が持ち運べる「可搬式機械」と、ワイヤーを張ってそこに木を吊して集める架線系の林業機械は、今後も使われ続け、これらの改良、開発も必要である。もしこれらの機械がなくなると、日本では木材を収穫できない地域が出てくる。

## 2.5 生産供給と需要構造

日本林業の特異性として、需要先と量、そして価格が未定のまま、生産し、供給している点をあげる。誰がどれだけ、いくらで買うか分からないまま、補助金による誘導で、全国各地から一斉に同じような木材が出されれば、材価は下落する。国産材の価格は下がり続け、輸入材よりも安くなった<sup>[14][15]</sup>。

## 2.6 産業文化

チップ、パルプは、もともと主に広葉樹が原料で、さらにチップ、パルプは取引金額も低く、チップ、パルプだけを生産していても、山林に再生産費を還すことができない。

我が国のスギ、ヒノキは、建築用材として収穫するために、植林されている。しかし国内生産量も落ち込み、そのうち製材用は現在1960年代の35%（2013年）になった<sup>[15]</sup>。また木造建築を集成材や合板ではなく、木そのものの性質を活かす無垢材で建築しようとする、その入手に困る。海外の木材製品として入ってくる木の方が、流通が整備されている。

特に我が国の伝統木造建築が必要とする木材は、その価格も高く、単位面積あたりの木材使用量も多い。しかし伝統的な木造建築は住宅レベルでも、現在の法制度上、建築の手続きに時間も費用もかかり、建築困難になっている。

我が国の歴史は、木の文化を誇っていた。しかし木を木として扱う産業、文化が衰退している。日本林業の健全性

に寄与する、これら木材の付加価値を高める産業と文化も損なわれつつある。

## 3 目標とシナリオ

現在の人工林の多くは、戦後の拡大造林時に植林されたもので、これが伐期を迎えている。拡大造林前に自然林であった地域は、戦後、国家の指示通りに、植林、保育を行ってきただけである。このため林業の経験は乏しい。しかし一方で、日本には中世から林業を行っていた歴史を持つ林業地もある<sup>[16]</sup>。前述した日本林業の特異性に対して、機械の輸入または模倣、また海外の制度による外発的発展は長続きしない。日本の自然、産業文化や歴史、地域社会に立脚した日本林業の蘇生を目指すべきである。ここで、目標として日本林業の産業としての蘇生をあげ、目標を達成するための要素、そしてそのシナリオを描く。

目標達成に向けて研究が求められる要素として、技術課題以外には、まず山林の所有者や所有境界が確定できない問題、また所有権の強さゆえに効率的な林業の展開が行いにくい問題、そして補助金制度、生産供給と需要構造等の問題がある。

まずイノベーションは現場で起こる。現場の創意工夫、そして意志決定や責任を担う能力を奪い、産業の自立性や持続性を損なってはならない。補助金制度により、民間企業や現場作業者の主体性を損なうのは、本来の目的と反する。補助金は現場を行政の思い通りに動かすツールではなく、補助した事業や産業が、行政の手を離れて、離陸していくように設計すべきである。

また林業の特徴として、森林の公益的機能が、市場経

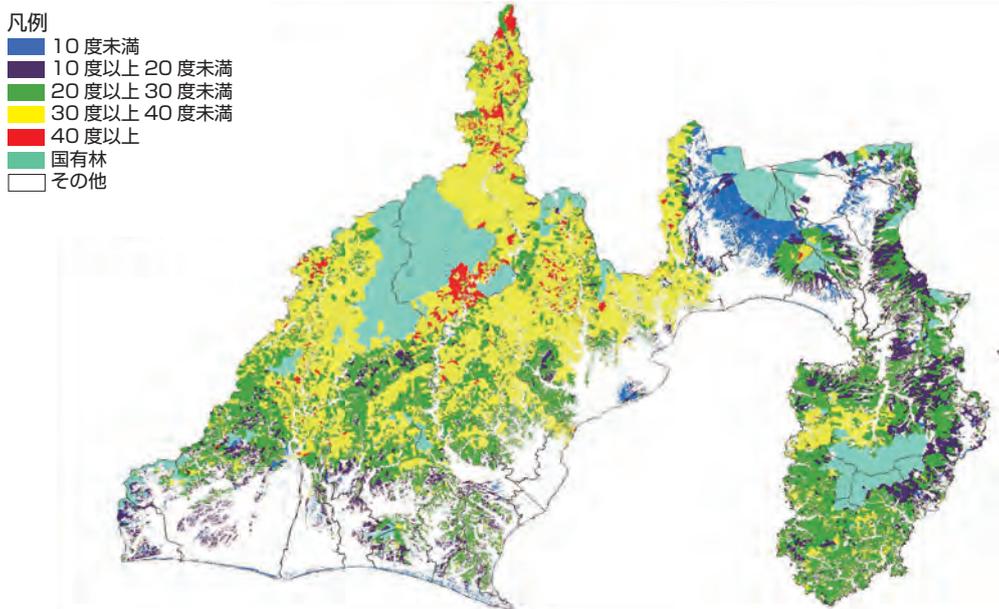


図4 静岡県の傾斜分布図（静岡県庁提供資料）

済を通さない外部効果に関与する点をあげる。欧州において、この森林の公益的機能、役割の維持保全を山林所有者が「所有するという権利」に対する「責任」として捉える傾向がある。しかし我が国は、むしろその逆で、森林の公益的な役割を理由に、それが私有林であっても、公的な資金や制度により保護する傾向が強い。

税金である補助金を用い、人に何かをさせる制度を、どう設計するかではなく、誰しも自分が主体者たる現場で本来の役割を果たすことが大事である。行政ならば、行政にしかできない、まずは、森林の公私の役割を、どのように社会制度に作り込むか、それにより林業の産業としての自立性や持続性を回復し、高めるための制度をどう作っていくのか、期待されている。

さらに生産供給と需要構造について言えば、本来の植林の目的に立ち返り、まず山に再生産費を還せる付加価値の高い木材の加工、流通を現代に再興する必要がある。木を木として扱う産業、文化の再興である。こういった我々人がつくった人為的な社会の仕組みを見直し、そこで厳しい自然環境下において、まず安全性、そして生産性確保を目指した技術開発が生きてくる。技術開発だけでは、日本林業の蘇生には限りがある。

### 3.1 本技術開発の位置付けと役割

技術開発も、海外のイノベーションに頼るのではなく、日本林業の特異性から着意すべきである。また「日本の山林を相手にするには<日本的な>発想で技術開発」をする必要がある。そこで我々は、高性能林業機械でも、在来型林業機械でもなく、両者の中庸を得た技術開発を提案している。

森林施業は、地拵え<sup>1)</sup>に始まり、植林、下刈、枝打ち、そして除伐、間伐等を経て、最終的な収穫作業を行う。この収穫においては、立木を1本、1本調べる毎木調査<sup>2)</sup>

に始まり、立木を伐り倒す作業、枝を払い、丸太にする造材作業、土場まで集める集材作業があり、そこから市場まで運ぶ作業がある。この運材を一般道に出てトラックが行う以外は、何らかの技術開発をする必要がある。著者の調査から、安全性なら立木を伐り倒す作業、生産性なら集材作業、労働強度なら下刈作業に関する技術開発を行う必要があることが分かった<sup>17)</sup>。技術開発のシナリオにおいては、まず林業に従事することで、人が死に、傷を負うことを減らし、なくすことが最重要である。まず個々の作業から労働災害の原因を取り除く。そして次に生産性の向上を目指す。これには各作業の高度化、そして個々の作業を滞ることなくつなぎ、作業全体の効率をあげるシステム全体の開発が求められる。山土場や原木市場で、木材が滞ることなく、山林から消費者までをつなぐ生産流通体制を構築する必要もある。そしてこれからは需要から供給、生産、山づくりを考える必要があるだろう。図5に、目標とシナリオにおける要素を抽出し、そこに本開発の位置付けを示した。

### 3.2 本機械開発着手に至るまでの調査

著者はまず山林の伐採現場から、森林組合、原木や製品市場、製材所等、現場へ赴き、ニーズとシーズを照合する調査をはじめた。その後、農林水産省の融合新領域研究戦略的アセス調査（2006年度）に応募、採択された。この事業において、問題を整理し、技術ニーズを抽出し、開発に向けた目的と課題設定を行った。これらの知見は、日本ロボット学会で解説論文<sup>17)18)</sup>として発表した。また森林から木材、木造建築に至るまで、それまでの研究から得られた知見を一般社会に対して、一般書として報告した<sup>19)</sup>。その後も国内外の現場で調査を続け2011年に農林水産省事業に採択され、実際の機械開発に着手した。

### 3.3 先例のない開発に着手するために採ったアプローチ

立木を伐倒する技術として、防振対策に特化したチェー

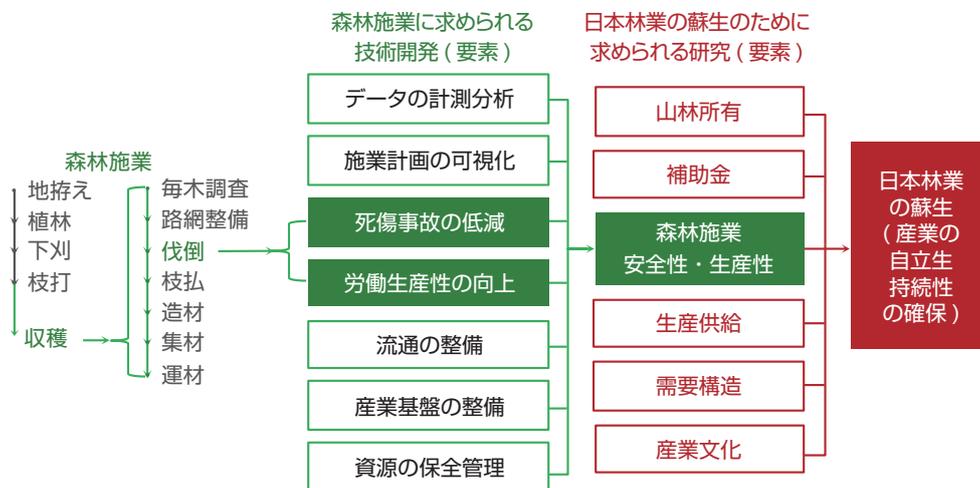


図5 目標とシナリオにおける技術開発の位置づけ

センサーの自動化が試みられたことがある<sup>[20]</sup>。しかし実用化に至らず、1970年代以降、行われていない。既往研究をもとに、開発を始めることができなかった。また設計にあたり、考慮しなければならない与条件が多過ぎる。そこでシミュレーション等で設計指標となる代表値を収集することから始めるのではなく、最初から簡単な機械装置を作り、現場で実作業することから始めた。なぜ現場から始めたのか。それは数値や言葉に示せ、それを基準に判断できることが限られているからである。ある指標で事象を代表させると、その数値に漏れる事象が無視される。機械開発にあたり、林業技術者同様に、現場での経験と勘を培う必要があると考えている。逆に生き物としての総合的な感覚、判断が必要とされない作業ならば、これだけの労働災害は発生せず、すでに作業を代替する機械が開発されていたと思う。

### 3.4 一つの解ではなく、最適解を導く

立木は、作業者がその立木の直径から目安をつけて、立木に入れる切り目の寸法を決める。この寸法も経験則であり数値的根拠はない。また山林内の作業環境は、土壌や林床にある枝葉、切り株、そして周囲の木との位置関係等、二つと同じ条件はなく、それぞれの違いも大きい。また作業対象である立木は、杉の含水率を例にしても、50～250%と個体差が大きく、一つの個体でも、切り込みを入れる部位により木理の通り方も異なる。そこで作業環境と作業対象を一つのモデルに収束させるシミュレーションでは、一つの解は得られるが、それが多くの作業環境、作業対象に対応可能であるかは、分からない。そこで一つの解ではなく、最適解を求める必要があると考えた。それには必要最少の動きを実現するプロトタイプを作り、実際の現場で実作業を行い、この結果から、次の開発へと、このプロセスを繰り返して最適解のモデルに近付けるように、設計開発を進めた。この結果、下記の新たな設計論に至った。

## 4 新たな設計論の構築

### 4.1 日本の山林を相手にする機械の設計論

機械開発に着手する前段で、新たな設計開発手法を見出し、この方法を採用したことで開発着手から2年で、製作した機械装置で作業を実証することに成功した。日本林業の現場へ行き、そこで調査し、現場で本当に使える機械を考えた末に、必然的に至った設計論である。

設計論としては、Vモデル<sup>[21]</sup>等がある(図6)。しかし日本の山林を相手にする機械の開発、特に実用化を前提にしている場合には、機械でも特にロボットと言われてイメージされる機械の設計手法を用いて、現場に通用するものを

開発するのは困難である。何でもできそうな機械は、結果的に何の役にも立たないことがある。

Vモデルを例にとると、図6の左上から下に下り、右上に至る<sup>[21]</sup>。左上から下へ、最初に考え得るすべて設計に対する要求を洗い出し、そこに制約条件も考慮し、仕様を精査し、設計を詰めていく。そして開発し、下から右上へと順次実験を行い、最終的に現場で実証実験に至る。この論文で述べる設計論では、この流れに逆行し、右上、つまり現場で動かす、実作業することから始める。必要最少の動きをする機械装置を作り、実際の作業現場で動かす、作業することから始める。考え得るどのような動作も機械に代替させようとするのではなく、日本の山林を相手にする場合、まず「どうしてもこれだけは機械にさせなければならない動き」に絞る。我が国では、それは死傷事故が多発する作業、もしくは重労働である。また自然環境下において人間のセンシング、コントロールに勝るものはない。これを無理に作業員から取り上げる必要もない。またそれは危険につながる。代替可能な限りの作業を、機械に代わらせようとする、かえって人間ではなく機械にさせる優位性を損なう。この閾値を超えた失敗例は、現場で使うはずの目的で開発されたロボットに見られる。この反動として、ロボット開発においても、単機能化を目指す傾向も見られるようになった。

右上の現場での実証実験から始め、仕様が明確化した部分については、屋内実験も取り入れていく。右上から下へと下る。機械が担うべき必要最少の動き、そこに必要な機能要件を付加し、その結果として仕様を列挙する。そして最後にシステムの全体像を作り、下から左上へと至る。

本機械開発の設計論を図7にまとめる。本報で述べるTATSUMIの目的は、伐倒作業の安全性確保である。この目的を達成するために、最重要な「どうしてもこれだけは機械にさせなければならない動き」を、必要最少の形と機構で実現することを、まず目指した。そしてマニピュレータを使う環境も対象も二つと同じ条件はなく、それぞれの違いも大きい。このため要求仕様を明確に設定して設計を始

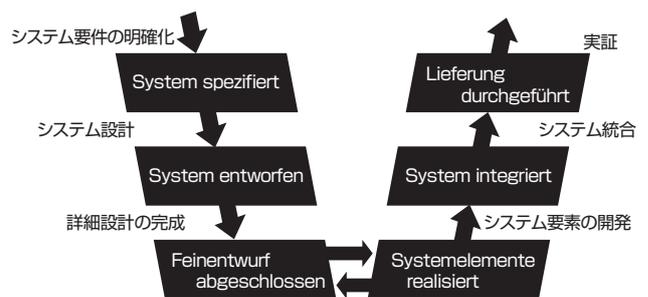


図6 Vモデル<sup>[21]</sup>

めると実際には使えない機械になる恐れがあり、また一旦決めた仕様も変更せざるを得なくなることもある。そこで図7の赤のループ「設計仕様決定ループ」を回す必要がある。このループで TATSUMI I, II を開発した。これは Web の設計論と似ており、多様な自然環境に、個々作業者が対応することが、Web 関連技術の「どのような接続環境で、誰がどのように使用するかわからない」そして「実際に作って、現実の世界に実装して動かしてみないと、何が起こるか分からない」という特徴に共通しているからである。ともに人を含む使用環境との相互作用を経験しないと、現実の社会での使用に堪える仕様にはならない。

そして次に TATSUMI III に入り、緑の「システム統合ループ」で開発を進めた。本機械開発は、この設計仕様決定ループとシステム統合ループが統合されたものであり、特に前段の設計仕様決定ループによる開発が重要である。

#### 4.2 日本林業の現場から着想した機械

設計開発プロセスの右上から下へ下るプロセスで、伐倒ポータブルマニピュレータの異 TATSUMI では、市販のチェーンソーをそのまま使うことに決めた。もし左上のシステム要件の明確化から始めていたら、そのままのチェーンソーを採用せず、切削機能自体から設計していたであろう。しかし現場で使える機械を目指すなら、まずはチェーンソーをそのまま着脱できる方が、現実的であると判断した。

高性能林業機械のハーバスタも、ソーチェーンを搭載している。立木を切削する刃物として、ソーチェーンを超えるものはまだない。またチェーンソーは林業従事者約 5 万人 (2010) に対して、公称で 18 万台 (2014) 普及している<sup>[12]</sup>。作業員ならば、所有しない、使用しない者はいない。どの現場にもある。また林内の路網密度は 19.5 m/ha (2013)<sup>[13]</sup> と低く、作業員がみずからの足で入る現場に対応できることが重要である。日本のチェーンソーは、コンパクトに進化

してきた機械である。この小さく軽く改良が続けられているチェーンソーを採用することで、マニピュレータの小型軽量化も目指した。

伐木作業中の事故には、作業員が切っている最中に、立木が思わぬ時に、思わぬ方向に倒れ始め、作業員がその立木の下敷きになったり、また立木が目標とは違う方向に倒れて、かかり木<sup>用語4</sup>になり、そのかかり木の近くの立木を、作業員が伐り倒している最中に、そのかかり木が倒れてきて、作業員がその下敷きになる等がある。この災害で死者が出る。人は、立木の根元でチェーンソー操作に集中しており、周囲や稍近くの変化を察知するのが難しく、立木が倒れ始めても、気付かず、逃げ遅れて、死傷事故が発生する。人が、立木の根元で、チェーンソーを握り、操作していなければ、これらの危険は回避できる。また作業員の思わぬ時に思わぬ方向に倒れるのは、人による作業では、精度が定まらないことも一つの原因である。機械でチェーンソーを操縦すれば、作業精度を安定させることができ、目標方向に倒すことにつながり、作業員が立木の下敷きになったり、かかり木等が発生することも防げる。

さらにチェーンソーのエンジンの回転数は、フルスロットルで 1 分間に 10,000 rpm を超える。伐倒作業中に、この高速回転する刃物から距離を保つことは、死傷事故の回避のみならず、振動障害の低減にもつながる。

立木とチェーンソーから作業員を引き離すことで、この二つの危険物に起因する労働災害を排除し、同時に機械による作業で、立木を切る精度を安定させ、目標方向に立木を倒すことを機械開発の目的に据えた。

## 5 実施例

本章では実際に開発した成果について述べる。表 1 に開発機の概要を示す。機械として、異 TATSUMI<sup>[22][23]</sup> と天竜 TENRYU (図 8)<sup>[24]</sup> と名付けた立木を伐り倒すマニピュレータ、そして林業用路網も整備されていない林地を、作業員について、走破し、重量物を運ぶモビリティ (図 9)<sup>[25]</sup> を開発している。この論文では、異 TATSUMI を取り上げる。なお、これから述べる伐倒ポータブルマニピュレータ異 TATSUMI III と IV の設計の詳細と実験については、日本機械学会の論文<sup>[22]</sup>、特許<sup>[23]</sup> で発表した内容を含んでいる。

### 5.1 TATSUMI I

TATSUMI I (図 10) は、チェーンソーを 3 軸で、直線的に送る直進対偶<sup>用語5</sup>のみで構成した。なお、次に開発した TATSUMI II (図 11) は回転対偶のみで構成し、TATSUMI III (図 19) は、この TATSUMI I, II から得られた知見から、直進対偶と回転対偶を組み合わせた。

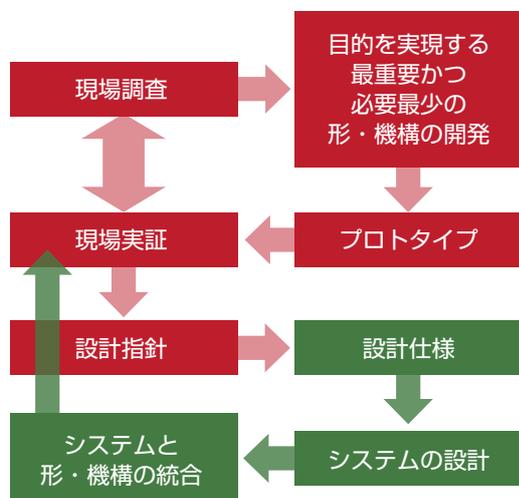


図7 設計仕様決定ループとシステム統合ループ

表1 開発機の概要

名称	特徴	開発時期
TATSUMI I	直進対偶 <sup>用語5</sup> のみで構成、3自由度 ※提案機のフィジビリティを検証	2011-2012
TATSUMI II	回転対偶のみで構成、3自由度	2012
TATSUMI III	直進対偶 1、回転対偶 3 の 4 自由度 ※一つのマニピュレータモデル（最適解）を提示	2012-2013
TATSUMI IV	直進対偶 1、回転対偶 3 の 4 自由度 ※関節の改修とチェーンソーの回転数制御機能を付加	2013-2014
TATSUMI V	直進対偶 1、回転対偶 3 の 4 自由度 ※マニピュレータの設置部と作業部を分け 取り付け、取り外し、設置、運搬の作業性を向上	2014-
TENRYU I	直進対偶のみで構成 ※提案機のフィジビリティを検証	2011-2012
TENRYU II	切削断面の直径分のドリル・エンドミルを開発し搭載 ※IIとIIIの主な違いは、刃長と切削軌道	2012
TENRYU III	切削断面の半径分のドリル・エンドミルを開発し搭載 ※一つのマニピュレータモデル（最適解）を提示	2012-
MOBILITY I	クローラ部 <sup>用語6</sup> のみで構成	2012-2013
MOBILITY IR	クローラ部と牽引アーム部で構成 ※牽引アームにより、登坂性能を向上	2013-2014
MOBILITY II	新たに開発したクローラ部のみで構成 ※斜面や地面の凹凸に対する荷重変化、姿勢変化 への対応性を向上	2014-

TATSUMI Iにエンジンチェーンソーを自動操縦させ、現実的に、切削作業が正常に維持されるか確認し、振動によるチェーンソー固定のゆるみやモータやエンコーダへの影響、また通常の使用状態では発生しない本体姿勢の変化による燃料漏出、燃料供給停滞がなく、定速送り、定速回転による立木への切り込みができることを確認した。

## 5.2 TATSUMI II

TATSUMI IIは、TATSUMI Iを直進対偶のみで構成

したのに対し、回転対偶のみで構成した。IとIIから得た知見より、次機 TATSUMI IIIにおける最適な関節の種類と配置について検討した。

## 5.3 設計指針

現場での調査、TATSUMI IとIIから得た設計指針を述べる。

- (1) ハードウェアの「形」と「機構」を突き詰めた必要最少の機械装置。そして必要最少の外界認識と制御を求める。



図8 天竜TENRYU：左からI、II、III



図9 モビリティ：左からI、IR (Iの改良)、II

- (2) 機械装置が生み出すシンプルな動きで、多様な環境と多様な作業に対応する。つまり、あらゆる環境において、あらゆるパターンの作業を実現する、シンプルな動き、それを生み出す機械装置を目指す。機械装置そのものが、あらゆるパターンの作業を実現するのではない。
- (3) メカニズムの考案には、伝統的に踏襲されてきた「型」と「所作」を重んじる。
- (4) 日本柔道のように、相手（対象物）の形や重さを利用した仕組み、巧みな技で仕事ができる機械装置を目指す。これにより小型軽量化を実現する。
- (5) 作業プロセスにおいて、最重要構成要素は人

まず(1)はハードウェアの形とその仕掛けを突き詰めることで、簡素な機械装置を目指すこと、そして特に必要最少の外界認識と制御方法を求めることをあげる。その理由として、まず林内で使用する機械は我が国の山林環境下における気温差、多雨多湿に耐えなければならないからである。海外の林業機械も日本では電子回路において腐食が発生する等の問題が発生している。また自然環境内は識別が困難な要素で構成されており、自動感知に依存した機械装置の制御は、誤作動が発生し易く、特に刃物を高速回転させる作業では、危険が生じる。そしてまた日々の保守点検、並びに修理の多くは、現場の作業者ができなければならない。そのため機械装置自体が分かり易い構造でなければならない。

(2)と類似する発想を持つ機械として、日本の在来型林業機械に「集材機」がある。集材機自体は、ワイヤーを繰り出し、巻き取るだけの機械である。この集材機は、どのような山林の集材にも使用できる。またチェーンソーも、機械そのものは、ソーチェーンを回転させているだけである。しかしこのチェーンソーで、たいていの立木を伐り倒すことができる。この対極にあるのが、ヒューマノイドロボットと言われてイメージする機械である。この開発過程で、さまざまな知見が得られる。しかしヒューマノイドそのものを現場で使おうとすると話は異なる。人間のように、あらゆることができそうな機械は、人がする意味と機械に代替

させる意図が曖昧になり、かえって機械本来の優位性を損なう可能性がある。

また作業についても、林業には似た考えで捉えられる作業が多い。最も一般的な伐倒方法は、受け口・追い口切り<sup>用語7</sup>による伐倒である。この手法は、基本はチェーンソーで三面を切り込むだけで、多くの立木を伐り倒すことができる。また我々が異 TATSUMI とは別に開発している天竜 TENRYU は、我が国 1300 年の歴史がある「三ッ紐伐り」を採用している<sup>[26]</sup>。「三ッ紐伐り」は、伊勢神宮の御用木を伐り倒す手法である。立木を三か所から切り込み、たいていの巨木を安全に伐り倒すことができる。儀式では斧を用いるが、これをドリルとエンドミルの機能を併せ持つ特殊刃物を搭載したマニピュレータで再現している<sup>[24]</sup>。

また(3)ではメカニズムの考案にあたり、伝統的に踏襲されてきた作業方法を尊重している。本提案機の異 TATSUMI で採用した受け口、追い口切りも(図12)、その弦<sup>つる</sup>(図13)<sup>用語7</sup>の寸法は経験的に受け継がれてきたもので、科学的根拠はない。しかしこれら伝統的な手法は長い時間をかけ、合理的な型や所作に淘汰されている場合が多いからである。

(4) 長大な重量物な対象物(立木)に対して、欧米の大型機械のように、力に力<sup>あらが</sup>で抗うのではなく、日本柔道のように、相手をいなす、つまり相手(対象物)の形や重さを利用した仕組み、巧みな技で仕事する装置を目指す。言い換えると<日本のな>発想で技術開発を行う。

そして(5)では、作業プロセスにおいて、人が最重要構成要素であり、全自動を目指すのではなく、作業による認識と判断、作業の補正・補助を入力できるシステムを目指している。このため作業者が直感的に使い易い機械であることを目標としている。

## 5.4 TATSUMI III

### 5.4.1 仕様

TATSUMI I と II の成果から TATSUMI III の仕様を導出した。

- (1) 作業者が路網から外れた林地内でも運搬できる重量:



図10 TATSUMI I: 直進対偶のみで構成



図11 TATSUMI II: 回転対偶のみで構成

18 kg 以下

- (2) 自立稼働の保証：エンジンチェーンソーの搭載（電動チェーンソーは、山林内の伐倒作業には対応できない）
- (3) 作業性の確保：チェーンソーの着脱（チェーンソーは、伐倒前後の作業で多用）
- (4) チェーンソーに最適な伐倒手法の選択：受け口・追い口切りの採用
- (5) 伐倒時の作業者の安全確保：自動動作（立木（戦後の植林された杉檜）は高さ15、6 m、重量数百キロで、その直下で作業は行われ、また高速回転する刃物を扱う。この二つから作業者が距離を保つことができれば、事故は防げる）
- (6) 対応直径・対応樹種：間伐目的 350 mm まで、植林された人工の杉檜

### 5.4.2 鋸断軌道

立木を伐り倒す鋸断軌道を図12、13に示す。前述の通り受け口・追い口切りを採用する。伐倒方向は図12、13とも左方向である。受け口は幹の伐倒方向に作る三角形の空間で、追い口は受け口の反対側から切り込む1面の平面である。このように受け口と追い口は、平面切削を得意とするチェーンソーに適し、3つの平面を切り込み、立木を伐り倒す。受け口と追い口を切削した後に残る部分を弦と呼び、図のCにあたる。受け口を入れて追い口を入れると、この弦が蝶番の役割をして立木は受け口方向（図12、13左方向）に倒れる。

### 5.4.3 機能要件

TATSUMI I、II から得られた知見をもとに、最適解に近づくよう機能要件を導いた。

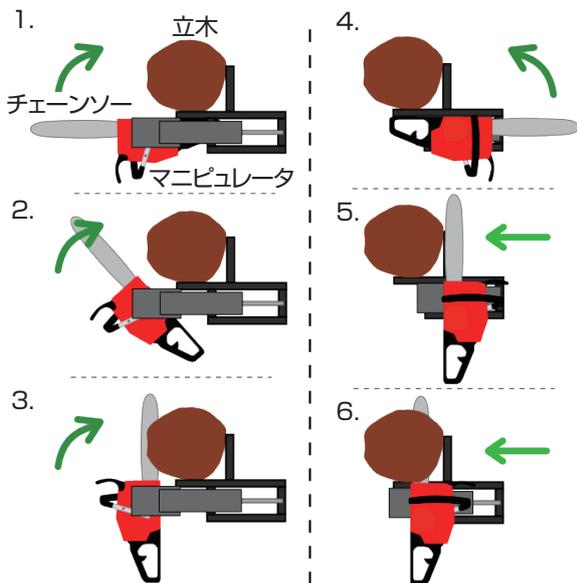
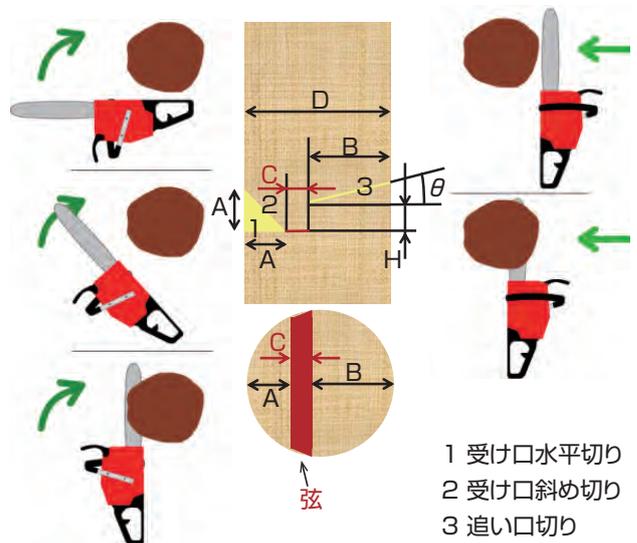


図12 受け口と追い口切り

- (1) 鋸断面を下げる：収穫した立木を用材とする場合、最大直径が得られる根元近くが最も価値があり、伐根（鋸断面）を下げた方が良い。（IIIにおいてL字型のアームを考案し、IIにあった中間の回転関節を排し、その結果、IIIではIIより鋸断面の高さを150 mm下げることができた）
- (2) 受け口はチェーンソーを回転させて切る：図13の左側に示したように、回転で木を切れば、チェーンソーを立木の外側まで移動させる必要がなく、マニピュレータの移動域を縮小でき、本体自体の小型軽量化につながる。
- (3) 追い口はチェーンソーを回転させるのではなく、チェーンソーを平行に移動させて切る：追い口も受け口同様に回転で切ると、残る弦幅が不均一になる状態が発生し、切削中に不意に倒れ始める危険性がある。この現象を避けるため追い口切りは、受け口の切り終わり線（会合線）とガイドバーの向きを常に平行に保ち切り進める。
- (4) アーム自体を移動させ、対応直径を広げる：アームの根本が回転しかせず、そのものの移動を拘束された条件で、作業領域すなわち対応可能な樹木の直径を広げようとすると、アーム長を長くする必要がある。この方法を取ると根本の関節に求められるトルクが増大し、



- A: 受け口の高さと深さ
- B: 追い口の深さ
- C: 弦幅
- D: 鋸断直径
- H: 追い口の高さ
- $\theta$ : 追い口の角度
- $A=1/4D \sim 1/3, C=1/10D, B=D-A-C, H=2/3A$

図13 切削寸法と切削順序

受け口は2回の回転の動きで、追い口は1回の平行移動の動きで切削

装置全体の重量増や大型化を招く。そこで、アーム自体を平行移動させることで、小型・軽量を維持したまま作業領域を広げる方式を取る。この方式で設計したIIIは、最大鋸断直径が350 mmまで広がり、IIより大きな立木を伐倒できるようになった。

#### 5.4.4 主要寸法の決定—L字型アーム—

全体形状と寸法（図14）、自由度配置（図15）、そして各対偶への直進と回転の振り分けを示す。まず条件として鋸断面の高さを下げる必要がある。そこでベース、つまり立木への固定位置からチェーンソーのブレードまでの高さが最も低くなるアーム形状を求めた。まず高さをあげることに繋がる機構をベースとチェーンソーの間から排した。さらに受け口切りの回転時に、チェーンソーがアームと干渉しない形状とした。そして受け口の姿勢を取った際に、チェーンソーがベースに最も接近する機構と形状を求めた。これら条件に、搭載するチェーンソーを抱え込める最小寸法で設計し、L字型アームを導いた。アームの寸法を図16、図17、図18に示す。L1とL2がL字型アーム部の寸法で、L3とL4はアームの先端にチェーンソーを取り付けた際に、先端の回転軸から鋸断位置までのオフセットを表してい

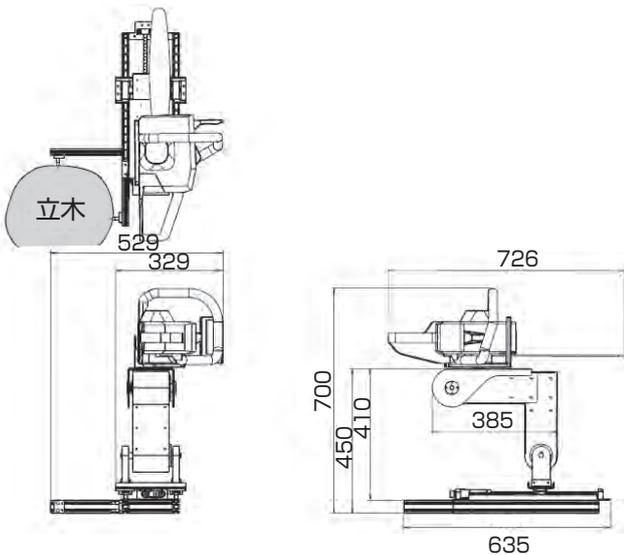


図14 全体形状と寸法

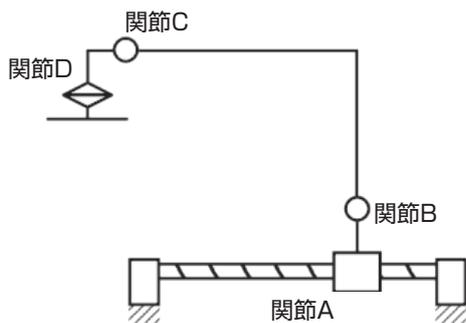


図15 自由度配置

表2 関節の可動域

関節	可動域
関節 A [mm]	0.0-320.0
関節 B [deg]	0.0-127.4
関節 C [deg]	-180.0-10.0
関節 D [deg]	32.0-45.0

る。またベースの直動部の長さは、受け口・追い口切りに必要となるアームの移動量を算出して導いた。

マニピュレータの総重量はチェーンソー約6 kgを加えて18 kg以下となった。チェーンソーはゼノア (G3711EZ)、排気量約40 ccを搭載した。高さ方向の寸法は700 mm、長手方向のサイズは約725 mm、そして短辺方向は529 mm、ベースのバーを除けば329 mmに納まる。

#### 5.4.5 関節の構成

本項では関節数とそれぞれの配置を述べる。前述の鋸断軌道を実現するためには、最少4自由度が求められた。直進による最下端の節（関節A、直進対偶）、そして一軸の回転でチェーンソーを回す節（関節D、回転対偶）、そしてL字型アーム自体を回転させる節（関節B、回転対偶）、

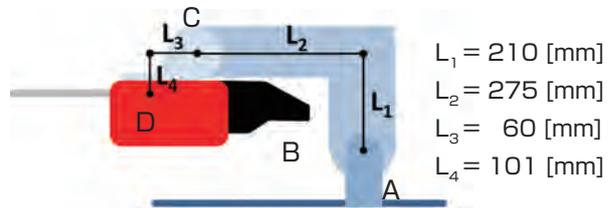


図16 アームの寸法

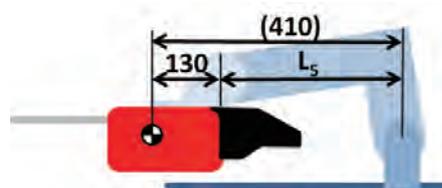


図17 関節Bの最大伸展サイズ

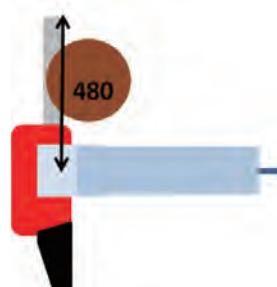


図18 チェーンソーの回転半径

表3 減速比

関節	名称	減速比
関節 A	ギアヘッド	139:1
関節 B	タイミングプーリ	3:1
	ハーモニクドライブ	160:1
	計	480:1
関節 C	タイミングプーリ	4:1
	ハーモニクドライブ	100:1
	計	400:1
関節 D	タイミングプーリ	4:1
	ハーモニクドライブ	100:1
	計	400:1

表4 モータの仕様

	関節 A	関節 B	関節 C	関節 D
メーカー	マクソン	マクソン	マクソン	マクソン
機種	RE25	EC60flat	RE30	RE30
モータ質量 [g]	130	470	260	260
公称電圧 [V]	24	24	24	24
定格出力 [W]	20	100	60	60
最大連続トルク [mNm]	26.3	221	85.6	85.6
最大許容回転数 [rpm]	14000	6000	12000	12000

表5 ギアの仕様

	関節 A	関節 B	関節 C	関節 D
メーカー	マクソン	ハーモニク・ドライブ・システムズ		
機種	GP26A	CSD-20-160-2UH	CSD-17-100-2UH	
質量 [g]	93	650	460	460
減速比	139:1	160:1	100:1	100:1
許容最高入力回転速度 [rpm]	8000	6500	7300	7300
平均負荷トルクの許容最大値 [Nm]	4.5	34	27	27

チェーンソーを反転させる節（関節 C、回転対偶）の 4 つの関節を設けた。各関節の可動域を表 2 に示す。

各関節の設計について述べる。チェーンソーはソーチェーンの形状から切り進むように作られている。このため切削時の反力は、最初に立木に接触し、切り込み始める時が最大である。この反力は計測で約 20 N であった。この値を関節 A、D の設計で参考にした他は、静止時における回転モーメントから各関節の機構を設計した（表 3、表 4、表 5）。

メカニズムの考案にあたり、伝統的に踏襲されてきた手法を参考にしている。受け口・追い口切りは、作業者がチェーンソーを用いて行うものであり、作業者に最も負担が少ない伐倒方法の一つとして踏襲されている。本提案は人の手

作業をマニピュレータで代替するものであり、TATSUMI の I、II でも、マニピュレータにも人力を超える過大な反力は生じないことを確認した。

#### 5.4.6 制御システム

作業を数値制御するプログラムを開発した。このアルゴリズムで、材寸から鋸断軌道を自動計算し、制御プログラムに渡し、マニピュレータを制御する。言語には汎用性を考慮して C++ を用いた。

### 5.5 実証実験

#### 5.5.1 TATSUMI III の実証実験

TATSUMI III を用いて、実際に山林内の立木を伐り倒す実証実験を行った（図 19）。実験地は静岡県浜松市



図19 TATSUMI III

①・②受け口の斜め切り、③・④追い口の切り込み。

の天竜地域で、実験対象としたのは人工林の杉、胸高直径は240 mm、鋸断部直径は265 mmで、樹高は約15 mである。

伐倒作業の精度は作業現場では、受け口と追い口の寸法、弦の形状、そして立木を伐り倒し、予定伐倒方向に対し実際に木が倒れた方向（実伐倒方向）で評価しており、その手法に準じ、マニピュレータ III の性能を評価した。

TATSUMI III で、受け口の水平切りから始め、斜め切りを行い、受け口を切り落とし、姿勢を変えて追い口を切削し、立木を伐り倒すまでの作業を一貫してできることを実証した。

課題としては、受け口の斜め切りが目標線より下がり、受け口が小さくなった。これはマニピュレータの根元と先端の両関節において、トルクを伝達するシャフトが十分に押さえられていなかったためである。



図20 TATSUMI IV

### 5.5.2 TATSUMI IVの実証実験

そこで TATSUMI IV では、TATSUMI III の関節部を改修し、設置ベースをマニピュレータから取り外せるようにし、またチェーンソーの回転数の制御を、遠隔から操縦できる機能を搭載した。TATSUMI IV (図 20) で実施した4回の実験において、マニピュレータが受け口の水平切りから始め、斜め切りを行い、受け口を切り落とし、姿勢を変えて追い口を切り込み、立木を伐り倒すまでの作業を一貫してできることを実証した。図 21、22 に示した4本の立木の鋸断直径は、それぞれ  $D=260$  mm、250 mm、230 mm、270 mm である。受け口を入れて、立木を伐り倒すまでの時間は、それぞれ 278 s、330 s、219 s、267 s であった。チェーンソーはフルスロットルで立木に切り込み、マニピュレータはチェーンソーを 5 mm/s で送った。

### 5.5.3 受け口・追い口、弦の切削線

林業では伐倒作業の上手、下手は、受け口と追い口、弦の切削線で判断するため、これを評価に用いる。人による作業は安定せず、また正確に受け口と追い口ができず、予定通りに弦が切り残らない。このため人による作業では、作業途中の立木が予期せぬ時に予期せぬ方向に倒れ、死傷事故が発生することもある。作業の安定性や鋸断精度は、作業後に残った受け口と追い口、弦の切削線から評価できる。

図 21 は伐り倒した立木の伐根を縦断面で見た図である。青が目標線、赤が実際の切削線である。すべての実験で切削線の傾きが目標線とほぼ一致した。立木の倒木

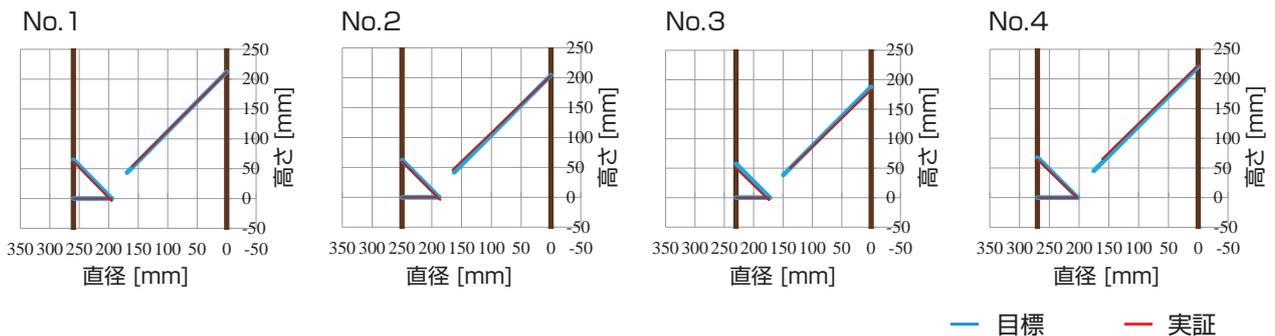


図21 受け口、追い口の切削線

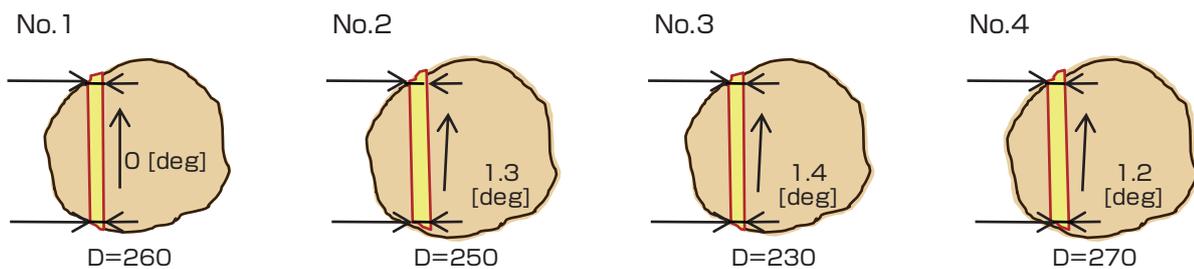


図22 弦の形状

方向を制御するには、特に伐倒方向側に作る受け口が目標通りに切り取られる必要がある。実験では受け口の水平切りと斜め切りの切り終わりの線も一致している。提案した機械システムによる作業は安定しており、また鋸断精度も高いことを確認した。

図 22 に伐根に残った弦形状を示す。プログラムが目標値とした弦幅は直径の 1/10 である。立木が伐根から切れて離れる時に弦を引きちぎる現象を考慮に入れると、プログラムの指示通り、弦は作成できたと言える。チェーンソーのガイドバーは全長にわたって一定幅ではなく、ラグビーボールのように先端ほど先細る。鋸断直径がガイドバーの有効長に近くなると、マニピュレータと反対側の弦がガイドバーの形状に倣って、弦が厚く残されると予想していた。そのためガイドバーの形状に起因して奥側の弦が厚く残り、弦が切れにくくなり、伐倒方向が乱れるといった現象も予想していた。しかし、実験では、伐倒方向に影響するほどの不均一な幅の弦とはならず、伐倒方向の狂いも 1.4 deg 以下となり、ほとんど発生しなかった。

死傷事故の原因となる長大で重量のある立木と、高速回転するソーチェーンから、作業者が離れた状態で、マニピュレータによる作業を実証した。また作業自体も安定しており、その鋸断精度も評価でき、提案したマニピュレータの有効性を示すことができた。

## 5.6 TENRYUとMOBILITY

TENRYU は「三ツ紐伐り」を斧ではなく、ドリルとエンドミルの機能を併せ持つ特殊刃物で実現する。この特殊刃物のエンドミル部の刃数を 2 枚、4 枚そして TENRYU III では 3 枚として、TENRYU I と II で鋸断直径分あった刃長を、III ではその半分の刃長とした。TENRYU III において、立木の伐倒作業を実証することができた。その後、マニピュレータの剛性をあげるなどの改良を行っている。MOBILITY は I と IR の開発後、その知見を生かし、新しいサスペンション機構を提案して II を開発した。II では、山林内の不整地を想定し、片側のクローラ<sup>甲</sup>のみで 245 mm の障害物を乗り越えるなど、山林内の不整地で求められる性能を実証している。

## 6 日本林業の蘇生に向けた展望

### 6.1 TATSUMIの展望

大学の一つの役割は、社会で問題になっていることを紐解き、その問題の解き方を考え出し、そこに、これまでになかった新しい考えや仕掛け、仕組みを提示することである。ここまでの研究で、伐倒作業の安全を確保する、ある最適解を提示することができた。今後は、実用化に向け、この一つの新しいアイデアを民間企業に渡し、ともに

開発を進めていく予定である。企業は大学の研究とは違う目的を持つため、これからは販売、普及等企業内の当該専門家も交えて開発を進めることになるであろう。現在の TATSUMI の課題として、さらなる小型軽量化と運搬と立木への設置の容易性の向上をあげる。また将来展望としてチェーンソーのエンジンの検討をあげる。日本林業で使われるエンジンチェーンソーの排気量は 40 ~ 60 cc で、単車のエンジンを抱えて、人もマニピュレータも作業していることになる。そこでエンジン以外の動力の検討や動力とブレードの分離も視野にある。

TATSUMI の技術以外の課題には、普及方法がある。マニピュレータの制作費から、コストそのものの設定では、特に問題ないと考えている。なお伐倒機能を有するハーベスタ、フェラーバンチャ等高性能林業機械は、そのアタッチメントだけで、数千万円である。

### 6.2 技術開発の展望

日本林業の蘇生のために研究が求められる要素のうち、技術開発は主に林業の安全性の確保と生産性の向上が重要である。技術開発の順としては、まず個々の作業から死傷事故をなくすこと、そして次に生産性の確保、そして作業を次の作業へと滞ることなくつなぐ、作業システム全体の構築が求められる。単一の作業効率が向上しても、その前後の作業が変わらなければ、作業はそこで停滞する。山林を調べ、収穫対象を決め、伐倒して、集め運び出すまで、一つの収穫作業においても、作業システム全体を向上させなければ、生産性は向上しない。

冒頭の第 2.1 節に記述したように、国家資源として、また林業として資源の計測やデータ分析の高度化は必要である。その技術開発も着手され始めているが、現在もそのほとんどが手作業である。この膨大な作業の高度化が必要である。また山林内にどのように路網を配置するか、架線を張るかは、現場技術者の経験と勘によっている。土砂災害が発生しても、そのフィードバックも不可能である。また山林やその地域全体で、どのように路網を整備していくのか、現状ではビジョンを作ることもできない。またそこから、どのように林業をするのか、施業計画を可視化する技術も必要であろう。山林内とその作業を「見える」ようにする、つまり作業をリアルタイムで把握できるようにする技術も求められている。

### 6.3 技術開発以外の展望

第 2 章で日本の林業の特異性を解説しながら、技術開発のみならず、まずは社会制度の見直し、新たな設計が必要であることを述べた。ここでは異なる観点から、日本林業の蘇生について述べる。

ドイツでは農林家が多く、林業用として、もとは農業機

械に丸太を牽引するウインチを取り付けたものもある。日本では、農業との兼業はほとんどなく、他産業に従事している者は、所有している山林の存在を忘れていた程である。この TATSUMI のような機械の出現により、林業が専業ではない人々から、新しい日本林業に対して関心を寄せ、彼らが山の手入れに関わり始めるきっかけになることも期待している。

工業製品は早く、安く生産することが重要で、また出荷時点が最高で、その後、商品価値は下がる。しかし木材製品は、山林で立木を仕立てることから、その乾燥を含む加工、木造建築に至るまで、手間をかけて生産し、そして時の経過で価値を増す性質がある。このような製品の生産と流通を許容し、その価値を評価する社会を取り戻す必要もあるだろう。著者の海外現地での調査からも、欧州では、地域社会における職人やその職能、仕事が大事にされ、工業化社会との共存に配慮されていることが分かっている。我が国の 67 % を占める山林に関わる林業を始めとした産業をどう蘇生し、成立させ続けるかを考えることで、地域社会再興への糸口につながるかもしれない。

## 7 おわりに

この論文で報告した TATSUMI は、2011 年に開発費を獲得し、2012 年度に I 号機を開発し、そして同年に III 号機で一つのマニピュレータモデルを提示した。III 号機で、受け口から追い口まで一貫して作業をし、作業者が距離を保った位置から、立木を切り倒すことに成功した。次の IV 号機では、鋸断精度の高さを評価し、目標の伐倒方向に伐り倒すことを実証した。鋸断精度に狂いがなく、安定していることも確認した。その後も改良を続けている。当初から実用化を目標とした開発であり、我々が採った設計論は評価できると考えている。

著者は、民間企業で研究者、コンサルタントとして、研究に従事した経験がある。そこには、研究を必要とし、そこから得られた成果で、何かしらの問題を解決する「相手」がいて「現場」があった。相手も現場も一つではなく、与条件も多様で、そして一つ一つの与条件を、一つの値に代表させては、顧客の要望に応えることができなかった。そこで一つの解ではなく、専門家としての経験や勘、つまり感覚や判断が交じった最適解を求めることになる。この時の判断を間違えないために、重要なことは、自分みずから現場へ行き、自分の経験を通じて、理解することである。さまざまな分野において、行き着いた場所には、既視感がある。現場へ行き、そこで何かしらの経験を得て、物事を理解することは、あらゆる分野において重要であると思う。

## 謝辞

国立研究開発法人森林総合研究所の多くの研究者にお世話になっています。また静岡天竜の方々には、実証実験でご協力を頂いています。そして現在、キャノン財団の研究助成を受けて研究を続けています。皆様に感謝を申し上げます。

## 用語の説明

- 用語1: 高性能林業機械<sup>\*1</sup>: 1991年に農林水産省が公表した高性能林業機械化促進基本方針に掲げた多機能を有する作業性能の高い伐出用機械および育林用機械をいう。
- 用語2: 地拵え<sup>\*1</sup>: 苗木を人工植栽するのに先だって、造林予定地に苗木を植付けやすくする準備作業をいう。
- 用語3: 毎木調査<sup>\*1</sup>: 林分成長量の測定、林分構造を明らかにするための基本的な調査方法である。
- 用語4: かかり木: 伐り倒そうとしている木が、周辺の立木にひっかかり、倒れなくなる。このかかり木は、いつ倒れてくるか分からず、またこのかかり木を解消しようとする作業でも、災害が発生する。
- 用語5: 対偶<sup>\*2</sup>: 二つ以上の節がたがいに拘束しあって限定した運動をする時、これらの節は対偶 (pair) をなすという。
- 用語6: クローラ: キヤタピラである。クローラは、ベルトが地面と接している面積がタイヤより広く、軟弱地盤や多少の不整地で、タイヤより走行が有利となる。一方、タイヤより、速度は遅くなる。
- 用語7: 受け口・追い口切りと弦: 立木を伐り倒す方法の一つである。受け口・追い口切りでは、立木を伐り倒す方向に、まず受け口をつくる。受け口は、水平と斜めに切り込みを入れ、図13の寸法Aは、直径の3分の1から4分の1とする。そして弦の寸法Cが、直径の10分の1残るように、反対側から追い口を入れる。また弦は、立木を伐り倒す際に蝶番の役目を果たす部分である。通常、追い口は水平に入れる。立木が倒れ始めない場合には、最後に追い口側の切り目に楔くさびを入れて打って倒す。このマニピュレータでは、追い口を水平ではなく、斜めに入れている。これはハードウェアの干渉を避け、そして斜めに入れることで、立木が自然に倒れ始めるようにするためである。

\*1 日本林業技術協会編: 森林・林業百科事典, 丸善, 2001

\*2 日本ロボット学会編: ロボット工学ハンドブック, コロナ社, 1990

## 参考文献

- [1] T. Kato, A. Kato, N. Okamura, T. Kanai, R. Suzuki and Y. Shirai: Musasabi: 2D/3D intuitive and detailed visualization system for the forest, *SIGGRAPH 2015 Posters*, 79, (2015).
- [2] 白井裕子, 野澤直樹, 藤井祥万, 佐藤隆哉, 加藤卓哉: 路網ルート設計装置及びそのプログラム、並びに路網ルート生成表示システム, 特願2016-95747, 出願日2016年5月12日.
- [3] 林野庁編: 森林・林業統計要覧2015, 日本林業協会, (2015).

- [4] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE): UNECE Statistical Database, Forestry (FOREST EUROPE/UNECE/FAO), [http://w3.unece.org/PXWeb2015/pxweb/en/STAT/STAT\\_\\_26-TMSTAT1\\_\\_005-TM15Others](http://w3.unece.org/PXWeb2015/pxweb/en/STAT/STAT__26-TMSTAT1__005-TM15Others), 閲覧日2016-08-12.
- [5] 石井寛, 神沼公三郎: ヨーロッパの森林管理, 日本林業調査会, (2005).
- [6] 林野庁: 木材需給表 長期累年統計表, (2016).
- [7] ドイツ連邦森林法の第14条 (Bundeswaldgesetze §14 Betreten des Waldes), <https://www.gesetze-im-internet.de/bwaldg/BJNR010370975.html>, 閲覧日2016-08-12.
- [8] 総務省: 行政投資実績, (1992~2016).
- [9] 農林水産省: 生産林業所得統計, (1991~2016).
- [10] 林業・木材製造業労働災害防止協会: 林業労働災害防止関係統計資料, [http://www.rinsaibou.or.jp/cont03/03\\_frm.html](http://www.rinsaibou.or.jp/cont03/03_frm.html), 閲覧日2016-08-12.
- [11] 厚生労働省: 労働災害統計, [http://anzeninfo.mhlw.go.jp/information/h08\\_26\\_sen01.html](http://anzeninfo.mhlw.go.jp/information/h08_26_sen01.html), 閲覧日2016-08-12.
- [12] 農林水産省: 平成27年度森林・林業白書 (平成28年公表), (2016).
- [13] 農林水産省: 平成26年度森林・林業白書 (平成27年公表), (2015).
- [14] 農林水産省: 木材価格統計調査 長期累年統計表, (2015).
- [15] 農林水産省: 木材統計調査 長期累年統計表, (2015).
- [16] 土倉梅造: 完全復刻 吉野林業全書, 日本林業調査会, (1983).
- [17] 白井裕子, 菅野重樹: 林業高度化に向けたロボティクスへの期待, *日本ロボット学会誌*, 28 (1), 43-48 (2010).
- [18] 白井裕子, 菅野重樹: ロボットの実用化に関する一考察, *日本ロボット学会誌*, 27 (6), 634-639 (2009).
- [19] 白井裕子: 森林の崩壊, 新潮社, (2009).
- [20] 舟渡清人: リモコンチェーンソ開発への歩み, *林業技術*, 424, 13-16 (1977).
- [21] V-Modell XT Das deutsche Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte Version: 2.0, Verein zur Weiterentwicklung des V-Modell XT e.V. (Weit e.V.) c/o 4Soft GmbH, [http://www.cio.bund.de/Web/DE/Architekturen-und-Standards/V-Modell-XT/vmodell\\_xt\\_node.html](http://www.cio.bund.de/Web/DE/Architekturen-und-Standards/V-Modell-XT/vmodell_xt_node.html), 閲覧日2016-08-12.
- [22] 白井裕子, 飯塚隆真: 伐倒ポータブルマニピュレータ 巽TATSUMIの開発, *日本機械学会論文集*, 81 (831), 15-00169 (2015).
- [23] 白井裕子, 飯塚隆真, 松尾雄希, 遠藤寛士, 菅野重樹: 樹木の伐倒システム, 樹木情報検出装置及びそのプログラム, 特願2013-63309, 出願日2013年3月26日.
- [24] 白井裕子, 松尾雄希, 飯塚隆真, 遠藤寛士, 堀場一輝, 菅野重樹: 樹木の伐倒装置, 特願2013-63308, 出願日2013年3月26日.
- [25] Y. Shirai and H. Endo: Crawler-type transport mechanism that can travel over forest land, *Journal of the Japan Forest Engineering Society*, 31 (3), 113-120 (2016).
- [26] 坂巻俊彦: 残したい三ツ紐伐り, 平河工業社, (1988).

## 執筆者略歴

白井 裕子 (しらい ゆうこ)

早稲田大学理工学術院准教授。早稲田大学理工学部建築学科卒業、稲門建築会賞。ドイツパウハウス大学留学。早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了、早苗賞。株式会社野村総合研究所勤務。早稲田大学にて博士（工学）、日本学術振興会特別研究員（PD）、フランス国立科学研究機構研究員、2010年より早稲田大学理工学術院准教授、現在に至る。一



級建築士、著書に森林の崩壊（新潮新書）。理工学の視点から森と水などの我々の生活に深く結びついた社会基盤、その制度について研究しており、その知見から技術開発も行っている。この論文のすべてを執筆。

## 査読者との議論

### 議論1 全体について

コメント (小林 直人: 早稲田大学)

この研究の中で、日本の林業の現状の問題点を概観した上で、産業として自立し得ていない最大の課題を解決する手段として新たな技術開発を提供するという、極めて野心的で重要な目標を設定しています。また、その目標を達成するためのシナリオを構築し、具体的方策として安全で使い易い伐倒マニピュレータを開発することを選択しました。この論文では、その技術開発の詳細を述べると同時に、その過程で発見した新たな設計手法も紹介しています。論文の構成も明確でしっかりしており、シンセシオロジー誌に掲載する論文として相応しいと考えられます。

コメント (今富 裕樹: 東京農業大学)

林業界におけるとても重要な課題である安全性確保に向けた新たな機械開発研究として評価すべき研究論文と考えます。この論文では、我が国における林業の特異性を考慮しながら、日本林業の産業としての蘇生を目標として、目標達成に向けた研究要素が提示されています。また、目標達成に向けた研究要素とこの研究の技術開発要素の位置付けがよく理解できます。専門分野以外の読者に対しても理解し易いように、最終原稿の改訂をご検討ください。

### 議論2 設計論について

コメント (小林 直人)

この論文の中で、著者はユニークな設計論を主張しています。特にドイツで生まれたVモデルとの比較を行い、今回は本来V字の左上から出発し右上で終わるVモデルと全く異なり、右上から出発して右下に至ると述べています。Vモデルはソフトウェア開発のシステム設計論として生まれた経緯があり、当初から全体システムの要求仕様を明確に決定して出発することができます。一方、今回のマニピュレータの開発のように使用環境が非常に複雑な場合、初期の設計仕様が不明確であると同時に、一旦それを決定してもすぐに変更せざるを得なくなることも考えられます。また著者はWeb設計論との比較を行い、こちらの設計論に近いことも述べています。これらに共通なことは環境（人を含む）との相互作用を何度も経ないとシステムの設計仕様が決まらないということだと思われます。仮の設計仕様が決まりそれによる一定のプロトタイプ開発を想定しても、さらにその修正が必要になると思われます。したがって、今回の設計では、以下に説明するプロセスになるのかと考えました。まず、前段に設計仕様を決定するループがあり、これを何度も回すことにより設計仕様を決定することができます (TSUNAMI I, II)。次にこの決定された設計仕様に基づいたより大きなループでシステム設計やシステム開発を行い実証に至ります。この後半のループ (TSUNAMI III等) は基本的にはVモデルに近いものと考えられます。このようにこの研究での設計論は「①設計仕様決定ループと②システム統合実証ループ」が統合されたもので、特に前段の「設計仕様決定ループ」が極めて重要であると理解しました。このような考え方はいかがでしょうか。

回答 (白井 裕子)

4.1に設計仕様決定ループとシステム統合ループを示す図を追加するとともに、関連する加筆を行いました。

### 議論3 可搬式伐倒機械を今後も使用する必要性について

コメント (今富 裕樹)

立木を伐り倒すことができる林業機械として、現在、我が国では

チェーンソーの他に、フェラーバンチャ（伐倒・集積機能を有する）やハーベスタ（伐倒・造材機能を有する）があります。この研究ではチェーンソーを利用した伐倒マニピュレータの開発をなされていますが、チェーンソーやこの研究開発機械のような可搬式機械を我が国では今後も使用していかなければならない必要性について、森林地帯における地形傾斜の分布等のデータも示しながら明確に示しておくことが理解を深める意味でよいと思いますが、いかがでしょうか。

回答（白井 裕子）

「2.4.2 林業機械」を加筆し、ハーベスタやフェラーバンチャについて触れ、チェーンソーやこの研究開発機械のような「可搬式機械」を我が国では今後も使用しなればならない必要性について述べました。またここで一例として静岡県における傾斜分布図を示しました。

#### 議論 4 この研究開発機械の普及について

コメント（今富 裕樹）

我が国においては立木の伐倒にはチェーンソーが使用されることが一般的です。チェーンソーは可搬式機械として小型化、軽量化、高性能化が実現し、我が国の林業においてなくてはならない存在となっています。このような中で安全化に向けた考え方からこの研究では、伐倒マニピュレータの開発がなされているところですが、チェーンソーといった高性能な林業機械が存在する中で本開発機械のような新しい機械の普及方法はそう簡単ではないと思います。本開発機械の完成度が高まった時の普及方法について示しておかれるとよいと思います。

回答（白井 裕子）

「6.1 TATSUMIの展望」に普及に向けた展望に関する記述を加筆しました。

# 編集方針

シンセシオロジー編集委員会

## 本ジャーナルの目的

本ジャーナルは、個別要素的な技術や科学的知見をいかに統合して、研究開発の成果を社会で使われる形にしておくか、という科学的知の統合に関する論文を掲載することを目的とする。この論文の執筆者としては、科学技術系の研究者や技術者を想定しており、研究成果の社会導入を目指した研究プロセスと成果を、科学技術の言葉で記述したものを論文とする。従来の学術ジャーナルにおいては、科学的な知見や技術的な成果を事実（すなわち事実に知識）として記載したものが学術論文であったが、このジャーナルにおいては研究開発の成果を社会に活かすために何を行なえば良いかについての知見（すなわち当為的知識）を記載したものを論文とする。これをジャーナルの上で蓄積することによって、研究開発を社会に活かすための方法論を確立し、そしてその一般原理を明らかにすることを目指す。さらに、このジャーナルの読者が自分たちの研究開発を社会に活かすための方法や指針を獲得することを期待する。

## 研究論文の記載内容について

研究論文の内容としては、社会に活かすことを目的として進めて来た研究開発の成果とプロセスを記載するものとする。研究開発の目標が何であるか、そしてその目標が社会的にどのような価値があるかを記述する（次ページに記載した執筆要件の項目1および2）。そして、目標を達成するために必要となる要素技術をどのように選定し、統合しようと考えたか、またある社会問題を解決するためには、どのような新しい要素技術が必要であり、それをどのように選定・統合しようとしたか、そのプロセス（これをシナリオと呼ぶ）を詳述する（項目3）。このとき、実際の研究に携わったものでなければ分からない内容であることを期待する。すなわち、結果としての要素技術の組合せの記載をするのではなく、どのような理由によって要素技術を選定したのか、どのような理由で新しい方法を導入したのか、について論理的に記述されているものとする（項目4）。例えば、社会導入のためには実験室的製造方法では対応できないため、社会の要請は精度向上よりも適用範囲の広さにあるため、また現状の社会制度上の制約があるため、などの理由を記載する。この時、個別の要素技術の内容の学術的詳細は既に発表済みの論文を引用する形として、重要なポイントを記載するだけで良いものとする。そして、これらの要素技術は互いにどのような関係にあり、それらを統合

するプロセスにおいて解決すべき問題は何であったか、そしてどのようにそれを解決していったか、などを記載する（項目5）。さらに、これらの研究開発の結果として得られた成果により目標にどれだけ近づけたか、またやり残したことは何であるかを記載するものとする（項目6）。

## 対象とする研究開発について

本ジャーナルでは研究開発の成果を社会に活かすための方法論の獲得を目指すことから、特定の分野の研究開発に限定することはしない。むしろ幅広い分野の科学技術の論文の集積をすることによって、分野に関わらない一般原理を導き出すことを狙いとしている。したがって、専門外の研究者にも内容が理解できるように記述することが必要であるとともに、その専門分野の研究者に対しても学術論文としての価値を示す内容でなければならない。

論文となる研究開発としては、その成果が既に社会に導入されたものに限定することなく、社会に活かすことを念頭において実施している研究開発も対象とする。また、既に社会に導入されているものの場合、ビジネス的に成功しているものである必要はないが、単に製品化した過程を記述するのではなく、社会への導入を考慮してどのように技術を統合していったのか、その研究プロセスを記載するものとする。

## 査読について

本ジャーナルにおいても、これまでの学術ジャーナルと同様に査読プロセスを設ける。しかし、本ジャーナルの査読はこれまでの学術雑誌の査読方法とは異なる。これまでの学術ジャーナルでは事実の正しさや結果の再現性など記載内容の事実性についての観点が重要視されているのに対して、本ジャーナルでは要素技術の組合せの論理性や、要素技術の選択における基準の明確さ、またその有効性や妥当性を重要視する（次ページに査読基準を記載）。

一般に学術ジャーナルに掲載されている論文の質は査読の項目や採録基準によって決まる。本ジャーナルの査読においては、研究開発の成果を社会に活かすために必要なプロセスや考え方が過不足なく書かれているかを評価する。換言すれば、研究開発の成果を社会に活かすためのプロセスを知るために必要なことが書かれているかを見るのが査読者の役割であり、論文の読者の代弁者として読者の知りたいことの記載の有無を判定するものとする。

通常の学術ジャーナルでは、公平性を保証するという理由により、査読者は匿名であり、また査読プロセスは秘匿される。確立された学術ジャーナルにおいては、その質を維持するために公平性は重要であると考えられているからである。しかし、科学者集団によって確立されてきた事実的知識を記載する論文形式に対して、なすべきことは何であるかという当為的知識を記載する論文のあり方については、論文に記載すべき内容、書き方、またその基準などを模索していかなければならない。そのためには査読プロセスを秘匿するのではなく、公開していく方法をとる。すなわち、査読者とのやり取り中で、論文の内容に関して重要な議論については、そのやり取りを掲載することにする。さらには、論文の本文には記載できなかった著者の考えなども、査読者とのやり取りを通して公開する。このように査読プロセスに透明性を持たせ、どのような査読プロセスを経て掲載に至ったかを開示することで、ジャーナルの質を担保する。また同時に、査読プロセスを開示することによって、投稿者がこのジャーナルの論文を執筆するときの注意点を理解する助けとする。なお、本ジャーナルのように新しい論文形式を確立するためには、著者と査読者との共同作業によって論文を完成させていく必要があり、掲載された論文は著者と査読者の共同作業の結果ともいえることから、査読者氏名も公表する。

## 参考文献について

前述したように、本ジャーナルの論文においては、個別の要素技術については他の学術ジャーナルで公表済みの論文を引用するものとする。また、統合的な組合せを行う要素技術について、それぞれの要素技術の利点欠点について記載されている論文なども参考文献となる。さらに、本ジャーナルの発行が蓄積されてきたのちには、本ジャーナルの掲載論文の中から、要素技術の選択の考え方や問題点の捉え方が類似していると思われる論文を引用することを推奨する。これによって、方法論の一般原理の構築に寄与することになる。

## 掲載記事の種類について

巻頭言などの総論、研究論文、そして論説などから本ジャーナルは構成される。巻頭言などの総論については原則的には編集委員会からの依頼とする。研究論文は、研究実施者自身が行った社会に活かすための研究開発の内容とプロセスを記載したもので、上記の査読プロセスを経て掲載とする。論説は、科学技術の研究開発のなかで社会に活かすことを目指したものを概説するなど、内容を限定することなく研究開発の成果を社会に活かすために有益な知識となる内容であれば良い。総論や論説は編集委員会が、内容が本ジャーナルに適しているか確認した上で掲載の可否を判断し、査読は行わない。研究論文および論説は、国内外からの投稿を受け付ける。なお、原稿については日本語、英語いずれも可とする。

## 執筆要件と査読基準

(2008.01)

項目	執筆要件	査読基準	
1	研究目標 (「製品」、あるいは研究者の夢) を設定し、記述する。	研究目標が明確に記述されていること。	
2	研究目標と社会とのつながり	研究目標と社会との関係が合理的に記述されていること。	
3	シナリオ	道筋 (シナリオ・仮説) が合理的に記述されていること。	
4	要素の選択	要素技術 (群) が明確に記述されていること。要素技術 (群) の選択の理由が合理的に記述されていること。	
5	要素間の関係と統合	要素間の関係と統合が科学技術の言葉で合理的に記述されていること。	
6	結果の評価と将来の展開	研究目標の達成の度合いを自己評価する。本研究をベースとして将来の研究展開を示唆する。	研究目標の達成の度合いと将来の研究展開が客観的、合理的に記述されていること。
7	オリジナリティ	既刊の他研究論文と同じ内容の記述をしない。	既刊の他研究論文と同じ内容の記述がないこと。

# 投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定	2007年12月26日
改正	2008年6月18日
改正	2008年10月24日
改正	2009年3月23日
改正	2010年8月5日
改正	2012年2月16日
改正	2013年4月17日
改正	2014年5月9日
改正	2014年11月17日
改正	2015年4月1日
改正	2015年10月1日

## 1 掲載記事の種類と概要

シンセシオロジーの記事には下記の種類がある。

・研究論文、論説、座談会記事、読者フォーラム

このうち、研究論文、論説は、原則として、投稿された原稿から査読を経て掲載する。座談会記事は編集委員会の企画で記事を作成して掲載する。読者フォーラムは読者により寄稿されたものを編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。いずれの記事も、多様な研究分野・技術分野にまたがる読者が理解できるように書かれたものとする。記事の概要は下記の通り。

### ①研究論文

成果を社会に活かすことを目的とした研究開発の進め方とその基となる考え方（これをシナリオと呼ぶ）、その結果としての研究成果を、実際に遂行された研究開発に関する自らの経験や分析に基づき、論理立てて記述した論文。シナリオやその要素構成（選択・統合）についての著者の独自性を論文としての要件とするが、研究成果が既に社会に活かされていることは要件とはしない。投稿された原稿は複数名の査読者による査読を行い、査読者との議論を基に著者が最終原稿を作成する。なお、編集委員会の判断により査読者と著者とで直接面談（電話・メール等を含む）で意見交換を行う場合がある。

### ②論説

研究開発の成果を社会に活かすあるいは社会に広めるための、考えや主張あるいは動向・分析などを記述した記事。主張の独自性は要件としないが、既公表の記事と同一あるいは類似のものではないものとする。投稿された原稿は編集委員による内容の確認を行い、必要な修正点等があればそれを著者に伝え、著者はそれに基づいて最終原稿を作成する。

### ③座談会記事

編集委員会が企画した座談会あるいは対談等を記事にしたもの。座談会参加者の発言や討論を元に原稿を書き起したもので、必要に応じて、座談会後に発言を補足するための追記等を行うことがある。

### ④読者フォーラム

シンセシオロジーに掲載された記事に対する意見や感想また本誌の主旨に合致した読者への有益な情報提供など

を掲載した記事とする。1,200文字以内で自由書式とする。編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

## 2 投稿資格

投稿原稿の著者は、本ジャーナルの編集方針にかなう内容が記載されていれば、所属機関による制限並びに科学技術の特定分野による制限も行わない。ただし、オーサーシップについて記載があること（著者全員が、本論文についてそれぞれ本質的な寄与をしていることを明記していること）。

## 3 原稿の書き方

### 3.1 一般事項

3.1.1 投稿原稿は日本語あるいは英語で受け付ける。査読により掲載可となった論文または記事はSynthesiology (ISSN1882-6229) に掲載されるとともに、このオリジナル版の約4ヶ月後に発行される予定の英語版のSynthesiology - English edition (ISSN1883-0978) にも掲載される。このとき、原稿が英語の場合にはオリジナル版と同一のものを英語版に掲載するが、日本語で書かれている場合には、著者はオリジナル版の発行後2ヶ月以内に英語翻訳原稿を提出すること。

3.1.2 研究論文については、下記の研究論文の構成および書式にしたがうものとし、論説については、構成・書式は研究論文に準拠するものとするが、サブタイトルおよび要約はなくても良い。

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

### 3.2 原稿の構成

3.2.1 タイトル（含サブタイトル）、要旨、著者名、所属・連絡先、本文、キーワード（5つ程度）とする。

3.2.2 タイトル、要旨、著者名、キーワード、所属・連絡先については日本語および英語で記載する。

3.2.3 原稿等はワープロ等を用いて作成し、A4判縦長の用紙に印字する。図・表・写真を含め、原則として刷り上り6頁程度とする。

3.2.4 研究論文または論説の場合には表紙を付け、表紙には記事の種類（研究論文か論説）を明記する。

3.2.5 タイトルは和文で10～20文字（英文では5～10ワード）前後とし、広い読者層に理解可能なものとする。研究

論文には和文で15～25文字（英文では7～15ワード）前後のサブタイトルを付け、専門家の理解を助けるものとする。

3.2.6 要約には、社会への導入のためのシナリオ、構成した技術要素とそれを選択した理由などの構成方法の考え方も記載する。

3.2.7 和文要約は300文字以内とし、英文要約（125ワード程度）は和文要約の内容とする。英語論文の場合には、和文要約は省略することができる。

3.2.8 本文は、和文の場合は9,000文字程度とし、英文の場合は刷上りで同程度（3,400ワード程度）とする。

3.2.9 掲載記事には著者全員の執筆者履歴（各自200文字程度。英文の場合は75ワード程度。）及びその後、本質的な寄与が何であったかを記載する。なお、その際本質的な寄与をした他の人が抜けていないかも確認のこと。

3.2.10 研究論文における査読者との議論は査読者名を公開して行い、査読プロセスで行われた主な論点について3,000文字程度（2ページ以内）で編集委員会が編集して掲載する。

3.2.11 原稿中に他から転載している図表等や、他の論文等からの引用がある場合には、執筆者が予め使用許可をとったうえで転載許可等の明示や、参考文献リスト中へ引用元の記載等、適切な措置を行う。なお、使用許可書のコピーを1部事務局まで提出すること。また、直接的な引用の場合には引用部分を本文中に記載する。

### 3.3 書式

3.3.1 見出しは、大見出しである「章」が1、2、3、…、中見出しである「節」が1.1、1.2、1.3…、小見出しである「項」が1.1.1、1.1.2、1.1.3…、「目」が1.1.1.1、1.1.1.2、1.1.1.3…とする。

3.3.2 和文原稿の場合には以下のようにする。本文は「である調」で記述し、章の表題に通し番号をつける。段落の書き出しは1字あけ、句読点は「。」および「、」を使う。アルファベット・数字・記号は半角とする。また年号は西暦で表記する。

3.3.3 図・表・写真についてはそれぞれ通し番号をつけ、適切な表題・説明文（20～40文字程度。英文の場合は10～20ワード程度。）を記載のうえ、本文中における挿入位置を記

入する。

3.3.4 図については画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）を提出する。原則は白黒印刷とする。

3.3.5 写真については画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）で提出する。原則は白黒印刷とする。

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

雑誌：[番号] 著者名：表題、雑誌名（イタリック）、巻（号）、開始ページ～終了ページ（発行年）。

書籍（単著または共著）：[番号] 著者名：書名（イタリック）、開始ページ～終了ページ、発行所、出版地（発行年）。

ウェブサイト：[番号] 著者名（更新年）：ウェブページの題名、ウェブサイトの名称（著者と同じ場合は省略可）、URL、閲覧日。

## 4 原稿の提出

原稿の提出は紙媒体で1部および原稿提出チェックシート（Word ファイル）も含め電子媒体も下記宛に提出する。

〒305-8560

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第1

産業技術総合研究所 企画本部広報サービス室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

## 5 著者校正

著者校正は1回行うこととする。この際、印刷上の誤り以外の修正・訂正は原則として認められない。

## 6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

## 7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 企画本部広報サービス室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology-ml@aist.go.jp

## Editorial Policy

*Synthesiology* Editorial Board

### Objective of the journal

The objective of *Synthesiology* is to publish papers that address the integration of scientific knowledge or how to combine individual elemental technologies and scientific findings to enable the utilization in society of research and development efforts. The authors of the papers are researchers and engineers, and the papers are documents that describe, using “scientific words”, the process and the product of research which tries to introduce the results of research to society. In conventional academic journals, papers describe scientific findings and technological results as facts (i.e. factual knowledge), but in *Synthesiology*, papers are the description of “the knowledge of what ought to be done” to make use of the findings and results for society. Our aim is to establish methodology for utilizing scientific research result and to seek general principles for this activity by accumulating this knowledge in a journal form. Also, we hope that the readers of *Synthesiology* will obtain ways and directions to transfer their research results to society.

### Content of paper

The content of the research paper should be the description of the result and the process of research and development aimed to be delivered to society. The paper should state the goal of research, and what values the goal will create for society (Items 1 and 2, described in the Table). Then, the process (the scenario) of how to select the elemental technologies, necessary to achieve the goal, how to integrate them, should be described. There should also be a description of what new elemental technologies are required to solve a certain social issue, and how these technologies are selected and integrated (Item 3). We expect that the contents will reveal specific knowledge only available to researchers actually involved in the research. That is, rather than describing the combination of elemental technologies as consequences, the description should include the reasons why the elemental technologies are selected, and the reasons why new methods are introduced (Item 4). For example, the reasons may be: because the manufacturing method in the laboratory was insufficient for industrial application; applicability was not broad enough to stimulate sufficient user demand rather than improved accuracy; or because there are limits due to current regulations. The academic details of the individual elemental technology should be provided by citing published papers, and only the important points can be described. There should be description of how these elemental technologies

are related to each other, what are the problems that must be resolved in the integration process, and how they are solved (Item 5). Finally, there should be descriptions of how closely the goals are achieved by the products and the results obtained in research and development, and what subjects are left to be accomplished in the future (Item 6).

### Subject of research and development

Since the journal aims to seek methodology for utilizing the products of research and development, there are no limitations on the field of research and development. Rather, the aim is to discover general principles regardless of field, by gathering papers on wide-ranging fields of science and technology. Therefore, it is necessary for authors to offer description that can be understood by researchers who are not specialists, but the content should be of sufficient quality that is acceptable to fellow researchers.

Research and development are not limited to those areas for which the products have already been introduced into society, but research and development conducted for the purpose of future delivery to society should also be included.

For innovations that have been introduced to society, commercial success is not a requirement. Notwithstanding there should be descriptions of the process of how the technologies are integrated taking into account the introduction to society, rather than describing merely the practical realization process.

### Peer review

There shall be a peer review process for *Synthesiology*, as in other conventional academic journals. However, peer review process of *Synthesiology* is different from other journals. While conventional academic journals emphasize evidential matters such as correctness of proof or the reproducibility of results, this journal emphasizes the rationality of integration of elemental technologies, the clarity of criteria for selecting elemental technologies, and overall efficacy and adequacy (peer review criteria is described in the Table).

In general, the quality of papers published in academic journals is determined by a peer review process. The peer review of this journal evaluates whether the process and rationale necessary for introducing the product of research and development to society are described sufficiently well.

In other words, the role of the peer reviewers is to see whether the facts necessary to be known to understand the process of introducing the research finding to society are written out; peer reviewers will judge the adequacy of the description of what readers want to know as reader representatives.

In ordinary academic journals, peer reviewers are anonymous for reasons of fairness and the process is kept secret. That is because fairness is considered important in maintaining the quality in established academic journals that describe factual knowledge. On the other hand, the format, content, manner of text, and criteria have not been established for papers that describe the knowledge of “what ought to be done.” Therefore, the peer review process for this journal will not be kept secret but will be open. Important discussions pertaining to the content of a paper, may arise in the process of exchanges with the peer reviewers and they will also be published. Moreover, the vision or desires of the author that cannot be included in the main text will be presented in the exchanges. The quality of the journal will be guaranteed by making the peer review process transparent and by disclosing the review process that leads to publication.

Disclosure of the peer review process is expected to indicate what points authors should focus upon when they contribute to this journal. The names of peer reviewers will be published since the papers are completed by the joint effort of the authors and reviewers in the establishment of the new paper format for *Synthesiology*.

## References

As mentioned before, the description of individual elemental technology should be presented as citation of papers published in other academic journals. Also, for elemental technologies that are comprehensively combined, papers that describe advantages and disadvantages of each elemental technology can be used as references. After many papers are accumulated through this journal, authors are recommended to cite papers published in this journal that present similar procedure about the selection of elemental technologies and the introduction to society. This will contribute in establishing a general principle of methodology.

## Types of articles published

*Synthesiology* should be composed of general overviews such as opening statements, research papers, and editorials. The Editorial Board, in principle, should commission overviews. Research papers are description of content and the process of research and development conducted by the researchers themselves, and will be published after the peer review process is complete. Editorials are expository articles for science and technology that aim to increase utilization by society, and can be any content that will be useful to readers of *Synthesiology*. Overviews and editorials will be examined by the Editorial Board as to whether their content is suitable for the journal. Entries of research papers and editorials are accepted from Japan and overseas. Manuscripts may be written in Japanese or English.

### Required items and peer review criteria (January 2008)

	Item	Requirement	Peer Review Criteria
1	Research goal	Describe research goal (“product” or researcher's vision).	Research goal is described clearly.
2	Relationship of research goal and the society	Describe relationship of research goal and the society, or its value for the society.	Relationship of research goal and the society is rationally described.
3	Scenario	Describe the scenario or hypothesis to achieve research goal with “scientific words” .	Scenario or hypothesis is rationally described.
4	Selection of elemental technology(ies)	Describe the elemental technology(ies) selected to achieve the research goal. Also describe why the particular elemental technology(ies) was/were selected.	Elemental technology(ies) is/are clearly described. Reason for selecting the elemental technology(ies) is rationally described.
5	Relationship and integration of elemental technologies	Describe how the selected elemental technologies are related to each other, and how the research goal was achieved by composing and integrating the elements, with “scientific words” .	Mutual relationship and integration of elemental technologies are rationally described with “scientific words” .
6	Evaluation of result and future development	Provide self-evaluation on the degree of achievement of research goal. Indicate future research development based on the presented research.	Degree of achievement of research goal and future research direction are objectively and rationally described.
7	Originality	Do not describe the same content published previously in other research papers.	There is no description of the same content published in other research papers.

## Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

Revised February 16, 2012

Revised April 17, 2013

Revised May 9, 2014

Revised November 17, 2014

Revised April 1, 2015

Revised October 1, 2015

### 1 Types of articles submitted and their explanations

The articles of *Synthesiology* include the following types:

- Research papers, commentaries, roundtable talks, and readers’ forums

Of these, the submitted manuscripts of research papers and commentaries undergo review processes before publication. The roundtable talks are organized, prepared, and published by the Editorial Board. The readers’ forums carry writings submitted by the readers, and the articles are published after the Editorial Board reviews and approves. All articles must be written so they can be readily understood by the readers from diverse research fields and technological backgrounds. The explanations of the article types are as follows.

#### ① Research papers

A research paper rationally describes the concept and the design of R&D (this is called the scenario), whose objective is to utilize the research results in society, as well as the processes and the research results, based on the author’s experiences and analyses of the R&D that was actually conducted. Although the paper requires the author’s originality for its scenario and the selection and integration of elemental technologies, whether the research result has been (or is being) already implemented in society at that time is not a requirement for the submission. The submitted manuscript is reviewed by several reviewers, and the author completes the final draft based on the discussions with the reviewers. Views may be exchanged between the reviewers and authors through direct contact (including telephone conversations, e-mails, and others), if the Editorial Board considers such exchange necessary.

#### ② Commentaries

Commentaries describe the thoughts, statements, or trends and analyses on how to utilize or spread the results of R&D to society. Although the originality of the statements is not required, the commentaries should not be the same or similar to any articles published in the past. The submitted manuscripts will be reviewed by the Editorial Board. The authors will be contacted if corrections or revisions are necessary, and the authors complete the final draft based on the Board members’ comments.

#### ③ Roundtable talks

Roundtable talks are articles of the discussions or

interviews that are organized by the Editorial Board. The manuscripts are written from the transcripts of statements and discussions of the roundtable participants. Supplementary comments may be added after the roundtable talks, if necessary.

#### ④ Readers’ forums

The readers’ forums include the readers’ comments or thoughts on the articles published in *Synthesiology*, or articles containing information useful to the readers in line with the intent of the journal. The forum articles may be in free format, with 1,200 Japanese characters or less. The Editorial Board will decide whether the articles will be published.

### 2 Qualification of contributors

There are no limitations regarding author affiliation or discipline as long as the content of the submitted article meets the editorial policy of *Synthesiology*, except authorship should be clearly stated. (It should be clearly stated that all authors have made essential contributions to the paper.)

### 3 Manuscripts

#### 3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

Accepted articles will be published in *Synthesiology* (ISSN 1882-6229) in the language they were submitted. All articles will also be published in *Synthesiology - English edition* (ISSN 1883-0978). The English edition will be distributed throughout the world approximately four months after the original *Synthesiology* issue is published. Articles written in English will be published in English in both the original *Synthesiology* as well as the English edition. Authors who write articles for *Synthesiology* in Japanese will be asked to provide English translations for the English edition of the journal within 2 months after the original edition is published.

3.1.2 Research papers should comply with the structure and format stated below, and editorials should also comply with the same structure and format except subtitles and abstracts are unnecessary.

3.1.3 Research papers should only be original papers (new literary work).

3.1.4 Research papers should comply with various guidelines of research ethics.

### 3.2 Structure

3.2.1 The manuscript should include a title (including subtitle), abstract, the name(s) of author(s), institution/contact, main text, and keywords (about 5 words).

3.2.2 Title, abstract, name of author(s), keywords, and institution/contact shall be provided in Japanese and English.

3.2.3 The manuscript shall be prepared using word processors or similar devices, and printed on A4-size portrait (vertical) sheets of paper. The length of the manuscript shall be, about 6 printed pages including figures, tables, and photographs.

3.2.4 Research papers and editorials shall have front covers and the category of the articles (research paper or editorial) shall be stated clearly on the cover sheets.

3.2.5 The title should be about 10–20 Japanese characters (5–10 English words), and readily understandable for a diverse readership background. Research papers shall have subtitles of about 15–25 Japanese characters (7–15 English words) to help recognition by specialists.

3.2.6 The abstract should include the thoughts behind the integration of technological elements and the reason for their selection as well as the scenario for utilizing the research results in society.

3.2.7 The abstract should be 300 Japanese characters or less (125 English words). The Japanese abstract may be omitted in the English edition.

3.2.8 The main text should be about 9,000 Japanese characters (3,400 English words).

3.2.9 The article submitted should be accompanied by profiles of all authors, of about 200 Japanese characters (75 English words) for each author. The essential contribution of each author to the paper should also be included. Confirm that all persons who have made essential contributions to the paper are included.

3.2.10 Discussion with reviewers regarding the research paper content shall be done openly with names of reviewers disclosed, and the Editorial Board will edit the highlights of the review process to about 3,000 Japanese characters (1,200 English words) or a maximum of 2 pages. The edited discussion will be attached to the main body of the paper as part of the article.

3.2.11 If there are reprinted figures, graphs or citations from other papers, prior permission for citation must be obtained and should be clearly stated in the paper, and the sources should be listed in the reference list. A copy of the permission should be sent to the Publishing Secretariat. All verbatim quotations should be placed in quotation marks or marked clearly within the paper.

### 3.3 Format

3.3.1 The headings for chapters should be 1, 2, 3..., for subchapters, 1.1, 1.2, 1.3..., for sections, 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, for subsections, 1.1.1.1, 1.1.1.2, 1.1.1.3.

3.3.2 The chapters, subchapters, and sections should be enumerated. There should be one line space before each paragraph.

3.3.3 Figures, tables, and photographs should be enumerated. They should each have a title and an

explanation (about 20–40 Japanese characters or 10–20 English words), and their positions in the text should be clearly indicated.

3.3.4 For figures, image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be in black and white.

3.3.5 For photographs, image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be in black and white.

3.3.6 References should be listed in order of citation in the main text.

Journal—[No.] Author(s): Title of article, *Title of journal* (italic), Volume(Issue), Starting page–Ending page (Year of publication).

Book—[No.] Author(s): *Title of book* (italic), Starting page–Ending page, Publisher, Place of Publication (Year of publication).

Website—[No.] Author(s) name (updating year): Title of a web page, Name of a website (The name of a website is possible to be omitted when it is the same as an author name), URL, Access date.

## 4 Submission

One printed copy or electronic file (Word file) of manuscript with a checklist attached should be submitted to the following address:

*Synthesiology* Editorial Board  
c/o Public Relations Information Office, Planning  
Headquarters, National Institute of Advanced  
Industrial Science and Technology(AIST)  
Tsukuba Central 1, 1-1-1 Umezono, Tsukuba  
305-8560

E-mail: [synthesiology-ml@aist.go.jp](mailto:synthesiology-ml@aist.go.jp)

The submitted article will not be returned.

## 5 Proofreading

Proofreading by author(s) of articles after typesetting is complete will be done once. In principle, only correction of printing errors are allowed in the proofreading stage.

## 6 Responsibility

The author(s) will be solely responsible for the content of the contributed article.

## 7 Copyright

The copyright of the articles published in “*Synthesiology*” and “*Synthesiology English edition*” shall belong to the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST).

Inquiries:

*Synthesiology* Editorial Board  
c/o Public Relations Information Office, Planning  
Headquarters, National Institute of Advanced  
Industrial Science and Technology(AIST)  
Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212  
E-mail: [synthesiology-ml@aist.go.jp](mailto:synthesiology-ml@aist.go.jp)

## Synthesiology 第9巻総目次(2016)

## 第9巻第1号

## 研究論文

3次元IC積層実装技術の実用化への取り組み

-基盤技術から実用技術へどのようにしてステップアップするのか?-

・・・青柳 昌宏、居村 史人、加藤 史樹、菊地 克弥、渡辺 直也、  
鈴木 基史、仲川 博、岡田 義邦、横島 時彦、山地 泰弘、  
根本 俊介、Thanh Tung BUI、Samson MELAMED 1-14

レアメタル資源の安定供給を目指して

-レアアース資源確保のための取り組みと課題-

・・・高木 哲一 15-25

構成型研究におけるシナリオ:その役割と表現

-シンセシオロジー誌掲載論文による検証の試み-

・・・小野 晃、赤松 幹之、小林 直人 26-38

## 論説

太陽電池モジュールの信頼性向上と試験法開発に関するコンソーシアム研究

-「高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム」の運営-

・・・増田 淳、井川 奈々子 39-50

## 第9巻第2号 特集:地質の調査

## 研究論文

地球化学標準物質の開発と利用

-地質試料元素分析の信頼性向上のために-

・・・岡井 貴司 60-72

都市域の3次元地質地盤図

-都市平野部の新たな地質情報整備-

・・・中澤 努、野々垣 進、宮地 良典 73-85

極小微動アレイによる浅部構造探査システム

-大量データの蓄積と利活用に向けて-

・・・長 郁夫、先名 重樹 86-96

高温高压岩石変形実験技術の開発

-千年スケールで進行する地質現象の加速化と検証-

・・・増田 幸治 97-107

第9巻第3号 特集:ナノ材料

研究論文

- ナノカーボン電極による人間親和型高分子アクチュエータの開発  
 -人工筋肉の実現を目指して- . . . 安積 欣志 117-123
- プラズマを用いたグラフェンの高品質高速大面積CVD合成  
 -高スループットプロセスを目指して- . . . 長谷川 雅考、津川 和夫、加藤 隆一、古賀 義紀、石原 正統、山田 貴壽、沖川 侑揮 124-138
- 放射性セシウム汚染灰除染技術  
 -ナノ粒子の吸着材としての活用と実用化アプローチ- . . . 川本 徹、田中 寿、伯田 幸也、高橋 顕、Durga PARAJULI、南 公隆、保高 徹生、内田 達也 139-153
- 高性能吸着剤ハスクレイ<sup>®</sup>の開発  
 -粘土系ナノ粒子による省エネシステム用吸着剤の開発展開- . . . 鈴木 正哉、前田 雅喜、犬飼 恵一 154-164
- スーパーグローース法  
 -単層カーボンナノチューブの工業的量产技術開発- . . . 畠 賢治 165-177

第9巻第4号

研究論文

- 化学物質代替に伴うリスクトレードオフ評価の枠組みの開発  
 -相対比較によるリスク評価のアプローチ- . . . 蒲生 昌志、竹下 潤一 187-197
- A first empirical analysis of JIS lifespan  
 - Implications for the review system of de jure standards - . . . Suguru TAMURA 198-215
- 最表面原子層を分析する光電子分光装置 EUPS の開発  
 -レーザー生成プラズマ光源の実用化技術開発と EUPS が見せる材料最表面の魅力- . . . 富江 敏尚、石塚 知明 216-234
- 日本林業の蘇りを目指した新たな技術開発  
 -日本林業の特異性を克服する伐倒マニピュレータの提案- . . . 白井 裕子 235-251

## 編集後記

本号は第9巻の最終号となりました。本号では、4論文が掲載されていますが、そのうち2論文は産総研の外部からの投稿論文ですので、Synthesiology誌の広がりという点から大いに歓迎すべきことと言えます。

本号の論文に共通していることは、どの論文も「非常に有用性が高い」ことだと思います。特に最初の「化学物質代替に伴うリスクトレードオフ評価の枠組みの開発」においては、異なるリスクの影響を相互に定量比較する方法を導出し実際の規制の例に適用して、その有用性を検証しています。この手法は、必ずしも化学物質のみならず他の物質や医薬品さらには医療装置などにも応用が考えられ、その発展が大いに期待されます。

2番目の「A first empirical analysis of JIS lifespan」は今まであまり学術的な対象として取り上げられる機会が少なかったJIS規格に注目して、イノベーションに役立つ適切な見直し時期や効率化を論じています。そこでは多数のデータから共通的な統計手法で規格の特性を評価することを行っており、その手法そのものとともに今後JIS規格の見直しの考察に関しても有益であると言えます。

一方、上記2論文および第4論文がいわゆるニーズとしての目標が明確な研究に関する論文であるのに対して、「最表面原子層を分析する光電子分光装置EUPSの開発」は有望な研究シーズを開拓した上で、それが適用可能な多くの事例を

研究してその多様な有用性を明らかにした論文であり、いわゆる「シーズドリブン」な研究です。本研究で開発した手法は他の手法では見出し得ない物質最表面原子層の特性が観測できるという利点がありますので、今後の発展が大いに期待されます。そのためにはユーザーのさらなる開拓が必要とされましょう。

最後の論文「日本林業の蘇りを目指した新たな技術開発」は、今まで本誌では対象となることが稀な林業という分野での技術開発に関するもので、研究目標やそこに至るシナリオ、そのための設計論など大変興味深い内容を多く含んでいます。特に日本の林業が産業としての自立を図るためには、森林環境が厳しい中での木材伐倒の安全化・自動化による省力化や効率化が必須であると著者は説明していますが、本論文で示された研究成果はその解決例を与える非常に期待が高い技術と言えます。早い時期に実用化されることが期待されます。

なお、これらの研究成果は有用性が高いと述べはしたものの、それらがイノベーションに結びつくためには、まだ大きなハードルを幾つも超えなければなりません。しかもそのハードルは、技術開発に関するものだけではないことは言うまでもありません。是非これらの研究がさらに飛躍して、将来のイノベーションに結びつくことを願ってやみません。

(編集幹事 小林 直人)

## シンセシオロジー編集委員会

委員長：金山 敏彦

副委員長：湯元 昇 (国立循環器病研究センター)、四元 弘毅

幹事 (編集及び査読)：池上 敬一、栗本 史雄、清水 敏美、富樫 茂子、山田 由佳

幹事 (普及)：赤松 幹之、小林 直人 (早稲田大学)

幹事 (出版)：高橋 正春

委員：安宅 龍明 (先端素材高速開発技術研究組合)、綾 信博、一村 信吾 (名古屋大学)、小賀坂 康志 (国立研究開発法人 科学技術振興機構)、小野 晃、景山 晃、後藤 雅式、竹下 満 (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)、多屋 秀人 (株式会社 J-Space)、内藤 茂樹、藤井 賢一、松井 俊浩 (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)、吉川 弘之 (国立研究開発法人 科学技術振興機構)

事務局：国立研究開発法人 産業技術総合研究所 企画本部広報サービス室内 シンセシオロジー編集委員会事務局

〒305-8560 つくば市梅園 1-1-1 中央第1 産業技術総合研究所企画本部広報サービス室内  
TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212  
E-mail：synthesiology-ml@aist.go.jp  
ホームページ：http://www.aist.go.jp/aist\_j/aistinfo/synthesiology/index.html

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

---

## *Synthesiology* Editorial Board

Editor in Chief: T. KANAYAMA

Senior Executive Editor: N. YUMOTO (National Cerebral and Cardiovascular Center), H. YOTSUMOTO

Executive Editors: K. IKEGAMI, C. KURIMOTO, T. SHIMIZU, S. TOGASHI, Y. YAMADA, M. AKAMATSU, N. KOBAYASHI (Waseda University), M. TAKAHASHI

Editors: T. ATAKA (Research Association of High-Throughput Design and Development for Advanced Functional Materials(Hi-Mat)), N. AYA, S. ICHIMURA (Nagoya University), Y. OGASAKA (Japan Science and Technology Agency), A. ONO, A. KAGEYAMA, M. GOTOH, M. TAKESHITA (New Energy and Industrial Technology Development Organization), H. TAYA (J-Space Inc.), S. NAITOU, K. FUJII, T. MATSUI (New Energy and Industrial Technology Development Organization), H. YOSHIKAWA (Japan Science and Technology Agency)

Publishing Secretariat: Public Relations Information Office, Planning Headquarters, AIST

c/o Public Relations Information Office, Planning Headquarters, AIST  
Tsukuba Central 1, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8560, Japan  
Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212  
E-mail: synthesiology-ml@aist.go.jp  
URL: http://www.aist.go.jp/aist\_e/research\_results/publications/synthesiology\_e

● Reproduction in whole or in part without written permission is prohibited.

## 「Synthesiology」の趣旨 — 研究成果を社会に活かす知の蓄積 —

科学的な発見や発明が社会に役立つまでに長い時間がかかったり、忘れ去られ葬られたりしてしまうことを、悪夢の時代、死の谷、と呼び、研究活動とその社会寄与との間に大きなギャップがあることが認識されている。そのため、研究者自身がこのギャップを埋める研究活動を行なうべきであると考え。これまでも研究者によってこのような活動が行なわれてきたが、そのプロセスは系統立てて記録して論じられることがなかった。

このジャーナル「Synthesiology - 構成学」では、研究成果を社会に活かすために行なうべきことを知として蓄積することを目的とする。そのため本誌では、研究の目標設定と社会的価値、それに至る具体的なシナリオや研究手順、要素技術の統合のプロセスを記述した論文を掲載する。どのようなアプローチをとれば社会に生きる研究が実践できるのかを読者に伝え、共に議論するためのジャーナルである。

## **Aim of *Synthesiology*** —Utilizing the fruits of research for social prosperity—

There is a wide gap between scientific achievement and its utilization by society. The history of modern science is replete with results that have taken life-times to reach fruition. This disparity has been called the *valley of death*, or the *nightmare stage*. Bridging this difference requires scientists and engineers who understand the potential value to society of their achievements. Despite many previous attempts, a systematic dissemination of the links between scientific achievement and social wealth has not yet been realized.

The unique aim of the journal *Synthesiology* is its focus on the utilization of knowledge for the creation of social wealth, as distinct from the accumulated facts on which that wealth is engendered. Each published paper identifies and integrates component technologies that create value to society. The methods employed and the steps taken toward implementation are also presented.

Synthesiology 第9巻第4号 2016年11月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 国立研究開発法人 産業技術総合研究所



## Research papers

Development of a framework for risk tradeoff analysis associated with substitution of chemical substances

—*An approach to risk assessment using relative comparison*—

M. GAMO and J. TAKESHITA

A first empirical analysis of JIS lifespan

—*Implications for the review system of de jure standards*—

S. TAMURA

Development of EUPS for analyzing electronic states of topmost atomic layer

—*Materialization of laser-produced plasma source application and EUPS observed fascinating surface*—

T. TOMIE and T. ISHITSUKA

A revolutionary technical development to revitalize Japanese forestry

—*A proposal for a portable tree felling manipulator to address specific properties of Japanese forestry*—

Y. SHIRAI

## Editorial policy

### Instructions for authors

### Aim of *Synthesiology*