

Synthesiology

水素エネルギー社会実現に向けた高圧水素ガス
中材料試験装置の開発と材料評価方法の国際比較

NEDOプロジェクト開発成果の社会的便益に関する研究

電子加速器を利用した研究の産業技術への橋渡し

導波モードセンサーを用いたインフルエンザウイルスの検出

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

水素エネルギー社会実現に向けた高圧水素ガス中材料試験装置の開発と材料評価方法の国際比較

－国際標準化への貢献を目指した取り組み－

燃料電池車や水素ステーションの普及には、高圧水素容器等の安全性の確保が必須である。飯島（産総研）らは、高圧水素ガス中で使われる金属材料の信頼性を保証する材料評価手法を米国の研究所と協力して開発した。また、開発に成功した評価手法の国際標準化へのシナリオについても考察されている。

NEDOプロジェクト開発成果の社会的便益に関する研究

－「NEDOインサイド製品」トップ70に関する考察－

NEDO プロジェクトは、開始後約 30 年で約 3 兆円の開発予算が投入されているが、このような国の投資の効果を分析する方法論は確立されていない。山下（NEDO）らは、NEDO プロジェクトの中で実用化・製品化に成功し、大きな売上げのある 70 件について、単に売上効果に留まらず、雇用創出効果、CO₂削減効果などを総合的に論じており、費用対効果を分析する方法論を示した貴重な論文である。

電子加速器を利用した研究の産業技術への橋渡し

－レーザーコンプトン光子ビームの発生と非破壊検査への応用－

豊川（産総研）は、原子核の研究等に用いられている技術を非破壊検査に応用し、産業用技術とするために、要素技術の開発・改良および選択・統合を行っている。豊川は、橋渡し研究を「自分の拘りや考え方を整理して社会に受け入れられる姿に徐々に近づけていく作業」と位置づけ、ユーザーの声を多く聴き、研究の方向性を調整した過程が記述されている。

導波モードセンサーを用いたインフルエンザウイルスの検出

－手のひらサイズの高感度センサーを開発－

栗津（産総研）らは、「簡便で高感度なインフルエンザウイルス検出装置の実現」というゴールに向かって、要素技術を結合してセンサーの小型化などの中間統合技術を開発し、それらを組み合わせて統合技術を構築している。著者らがもともと蓄積していた技術に加えて、表面化学やウイルス学等の専門家との共同研究による異分野融合のプロセスが記述された興味深い論文である。

Synthesiology 第8巻第2号(2015.5) 目次

論文のポイント	i
研究論文	
水素エネルギー社会実現に向けた高圧水素ガス中材料試験装置の開発と材料評価方法の国際比較 — 国際標準化への貢献を目指した取り組み — ・・・飯島 高志、阿部 孝行、井藤賀 久岳	62-69
NEDO プロジェクト開発成果の社会的便益に関する研究 — 「NEDO インサイド製品」トップ70に関する考察 — ・・・山下 勝、萬木 慶子、木村 紀子、宍戸 沙夜香、吉田 朋央、一色 俊之、竹下 満	70-88
電子加速器を利用した研究の産業技術への橋渡し — レーザーコンプトン光子ビームの発生と非破壊検査への応用 — ・・・豊川 弘之	89-96
導波モードセンサーを用いたインフルエンザウイルスの検出 — 手のひらサイズの高感度センサーを開発 — ・・・粟津 浩一、藤巻 真、Subash C. B. GOPINATH、王 曉民	97-106
編集委員会より	
編集方針	107-108
投稿規定	109-110
編集後記	115
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Development of material testing facilities in high pressure gaseous hydrogen and international collaborative work of a testing method for a hydrogen society — Toward contribution to international standardization — --- T. IJIMA, T. ABE and H. ITOGA	62
Research on social benefits resulting from NEDO projects — Study of the top 70 NEDO Inside Products — --- M. YAMASHITA, Y. YURUGI, N. KIMURA, S. SHISHIDO, T. YOSHIDA, T. ISSHIKI and M. TAKESHITA	70
Application of laser Compton photon beam to nondestructive tests — A spin-off technology from nuclear physics — --- H. TOYOKAWA	89
Detection of influenza viruses with the waveguide mode sensor — Development of a palmtop sized sensor — --- K. AWAZU, M. FUJIMAKI, S. C. B. GOPINATH and X. WANG	97
Editorial policy	111-112
Instructions for authors	113-114

水素エネルギー社会実現に向けた高圧水素ガス 中材料試験装置の開発と材料評価方法の国際比較

— 国際標準化への貢献を目指した取り組み —

飯島 高志^{1*}、阿部 孝行¹、井藤賀 久岳²

安全性と経済性を両立させた水素エネルギー社会の実現に向けて、燃料電池自動車および水素ステーションの普及を進めるためには、高圧水素ガス関連機器に使用される材料の使用基準について国際調和を図ることが重要である。そのため、高圧水素ガス中で使用される金属材料に与える水素の影響を正確に評価できる手法の確立と、その手法を用いた高圧水素ガス関連機器に使用可能な鋼種の見極めが求められている。我々は、120 MPaまでの高圧水素ガス中で引張試験、破壊靱性試験、遅れ破壊試験等が可能な材料試験装置群を開発し、その運用ノウハウを蓄積するとともに、汎用金属材料についての材料試験データを収集している。特に、サンディア国立研究所と協力して、Cr-Mo系低合金鋼の日米の規格材について破壊靱性試験方法の国際比較を実施し、変位増加法で求めた破壊靱性値は高圧水素ガス中での金属材料の評価に有効なことを見いだした。

キーワード: 水素脆化、破壊靱性、材料試験、燃料電池自動車、水素ステーション

Development of material testing facilities in high pressure gaseous hydrogen and international collaborative work of a testing method for a hydrogen society

– Toward contribution to international standardization –

Takashi IJIMA^{1*}, Takayuki ABE¹ and Hisatake ITOGA²

To commercialize fuel cell vehicles and hydrogen filling stations, and to achieve a reliable and economical “hydrogen society”, international accordance of the material usage standard for high pressure gaseous hydrogen equipment is regarded as an important issue. Therefore, a precise method to evaluate the effect of gaseous hydrogen on structural metallic materials is required to qualify the materials compatibility for high pressure gaseous hydrogen equipment. For this purpose, our research group developed testing facilities such as slow strain rate tensile test, fracture toughness test, and delayed fracture test up to 120 MPa of gaseous hydrogen. We acquired operation expertise of the facilities and testing data of commercialized metallic materials. In particular, fracture testing methods of Cr-Mo standard steel in Japan and USA were compared in an international collaborative study between Sandia National Laboratories, Livermore and our research group. We concluded that estimating fracture toughness with a rising displacement is essential for testing method in a high pressure gaseous hydrogen environment.

Keywords: hydrogen embrittlement, fracture toughness, material testing, fuel cell vehicle, hydrogen filling station

1 はじめに

2025年度までに70 MPaの高圧水素ガスを使用する燃料電池自動車の200万台程度の普及と、約1000カ所の水素ステーション設置を目標に、2015年度までには燃料電池自動車を商用化することが予定されている^[1]。既に、2014年6月にはトヨタ自動車が市販予定の燃料電池自動車を公開している^[2]。この目標を実現させるためには、燃料電池自動車の価格、および水素ステーションの建設コストの低下が重要で、水素エネルギー社会の実現に向けて「水

素・燃料電池戦略ロードマップ」が公表されている^[3]。70 MPa燃料電池自動車および水素ステーションに使用される高圧水素ガス関連機器の部材において、最もコストを要するものは高圧水素容器である。燃料電池自動車では車載容器と呼ばれ、水素ガスの圧力は70 MPaを想定しており、水素ステーションでは蓄圧器と呼ばれ、水素ガスの圧力は82 MPaを想定している^[4]。そのため、配管、バルブ類等も含む高圧水素ガス関連機器に使用されるさまざまな材料について、100 MPaを超える高圧水素ガス中で水素が材

1 産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 〒305-8569 つくば市小野川16-1 つくば西、2 九州大学 水素材料先端科学研究センター 〒819-0395 福岡市西区元岡744

1. Energy Technology Research Institute, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan * E-mail: iijima-t@aist.go.jp, 2. Research Center for Hydrogen Industrial Use and Storage, Kyushu University 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

Original manuscript received August 29, 2014, Revisions received December 2, 2014, Accepted December 4, 2014

料特性に与える影響、特に金属材料の水素脆化についての評価技術を確立させ、材料データベースを蓄積することは、安全で経済的な水素エネルギー社会を実現するための重要な課題である。また、高圧水素ガス関連機器に用いられる材料に関する国内基準と海外基準の調和を図ることは、低コストの機器・部材の開発を促進し、自動車関連産業やインフラ関連産業の国際競争力強化にも繋がるものと期待されている。

このような背景から、我々は 100 MPa を超える水素ガス中で材料試験が可能な実験装置の開発、それを用いた水素脆化をより正確に評価可能な材料試験方法の確立と材料試験データの蓄積、および材料試験データの関連産業分野への周知と共有化が、高圧水素ガス中で使用される材料の評価方法並びに使用基準の国際標準化に大きく貢献するものと考えている。そこでこの論文では、先ず高圧水素ガス関連機器に使用される金属材料に求められる特性について、国内、国外の状況も含めて概観する。次いで、産総研における高圧水素ガス中材料試験装置の状況と、それを用いた材料試験方法の検討、および材料試験方法の国際比較について述べることで、材料試験方法に関する国際標準化への貢献の可能性について考察する。

2 高圧水素ガス関連機器に使用される金属材料に求められる特性

2.1 水素脆化とは

金属材料は水素雰囲気中にさらされると、水素原子が金属の格子中に拡散し、金属材料の材料特性が低下することが知られており、水素脆化と呼ばれている。具体的には、金属材料の引張試験を高圧水素ガス中で実施した場合、もしくは水素雰囲気中で曝露することにより水素をチャージした金属材料の引張試験を大気中(不活性ガス中)で実施した場合、降伏応力や引張強さ等の強度特性、または破断伸びや絞り等の延性が低下する現象である。「脆化」の言葉から、「水素脆化」は金属材料が伸びを示さず弾性域で破断してしまう印象を持たれる場合がある。もちろん、水素雰囲気中において弾性域で破断する材料も一部存在するが、多くの材料は塑性変形を示す。そのため村上らは、水素脆化を「ミクロな塑性変形を伴う延性破壊」と表現している^[5]。

今日までに、さまざまな材料に関する強度や延性に与える水素の影響について、データが蓄積されてきている。その結果、水素脆化を全く示さない金属材料は存在しないが、①弾性域で破断するなど、水素脆化の影響が大きくて使えない材料、②水素脆化の影響により伸び、絞り等の延性が低下するものの、或る一定条件の下では使用の可能性

を有する材料、③限定された使用条件範囲において水素脆化の影響が少ない材料、に大きく分類できることが明らかになってきた。③に分類される材料として、Ni含有量の高いオーステナイト系ステンレス鋼、アルミニウム合金等が知られている。また、②に分類される材料の一つが低合金鋼である。低合金鋼は、化学プラントをはじめとしたさまざまな分野で構造用材料として幅広く使用されている鉄鋼材料で、オーステナイト系ステンレス鋼よりも材料強度が高く、安価であるなどの特徴を有している。

2.2 高圧水素ガス関連機器に使用される材料の使用基準

燃料電池自動車用車載容器と水素ステーション用蓄圧器については、現在世界中で基準の策定、見直し作業が進められている。特徴的なのは、世界中に流通する燃料電池自動車と比べて、水素ステーションはそれぞれの国に設置されるため、国内事情がより強く反映されることである。

車載容器に関しては、日本は高圧ガス保安法の容器保安規則で定める技術上の基準である「容器検査等に係る例示基準」(2013)により、圧縮水素燃料電池車用車載容器の最高充填圧力は 70 MPa、使用可能な材料は所定の化学成分(ニッケル当量)を有するオーステナイト系ステンレス鋼(SUS316L)、およびアルミニウム合金(6061-T6)と規定されている^[6]。米国ではSAE(Society of Automotive Engineers:自動車技術者協会)J2579(2009)のANNEXにおいて、70 MPa圧縮水素燃料電池自動車用の車載容器に用いられる材料として6061アルミニウム合金と高ニッケルSUS316を例示し、それ以外の材料を使用する場合には、材料試験方法として①水素中もしくは水素チャージした材料の低歪み速度引張試験、②水素ガス中での疲労試験、③水素ガス中でのき裂進展試験、を指定している^[7]。また、欧州における70 MPa車載容器の基準はISO/TS 15869(2009):Gaseous Hydrogen Blends & Hydrogen Fuels: Land Vehicle Fuel Tanksに準じていたが、後述するように国連による世界統一基準の検討が開始されたため、2013年よりISOの専門委員会(TC197/WG18)において見直しが始まっている^[8]。その国際連合欧州経済委員会(UN/ECE)自動車基準世界調和フォーラム(WP29)では、安全で環境性能の優れた自動車を普及させるために、国際的に調和した世界統一基準を作成し国際的な相互認証を推進する必要性から、「水素及び燃料電池自動車に関する世界技術規則(HFCV gtr: global technical regulations)」の作成が2007年より開始され、gtr Phase 1が2013年に採択された。それに伴い、日本においても2014年6月に容器保安規則の細目が改正される方向となった^[9]。しかし車載容器の材料使用基準等

については gtr Phase 2 として検討が継続されている。

蓄圧器に関しては、日本は高圧ガス保安法の一般高圧ガス保安規則関係例示基準（2014）において、圧縮水素蓄圧器および圧縮水素が通る配管に使用される材料として、ステンレス鋼（SUS316, SUS316L）を例示し、常用の圧力（82 MPa）と常用の温度（-40 ~ 250 °C）における化学成分（ニッケル当量）を規定している。また、常用圧力 40 MPa 以下の蓄圧器については機械構造用合金鋼材（SCM435）の使用も認めている^[10]。また米国では、ASME（米国機械学会）の Article KD-10 in Division 3: Special Requirement for Vessels in Hydrogen Service（2010）において、103 MPa までの高圧水素ガス中で使用できる材料として、SA-372, SA-723 などの合金鋼、SA-336, Gr. F316 などのステンレス鋼、6061-T6 などのアルミニウム合金を例示している。さらに使用に際しては、①大気中での荷重増加または変位増加による平面歪み破壊靱性値： K_{IC} （ASTM E 399 または E 1820 に準拠したき裂進展開始試験）、②水素ガス中での定荷重または定変位による破壊靱性値： K_{IH} （ASTM E1681 に準拠したき裂進展停止試験）、③水素ガス中でのき裂進展速度： da/dN 、について評価することを求めている^{[11][15]}。欧州においては、日本の高圧ガス保安法に相当する PED 97/23/EU（1997, Pressure Equipment Directive：圧力容器指令）のもと、欧州統一規格 EN13445（1999, Unfired Pressure Vessels: 火なし圧力容器）で高圧ガス容器が規定されているが、材料の水素脆化評価については ISO 11114-4 に準拠している^{[16][17]}。ISO-11114-4（2005）では、常用圧力 30 MPa 以下の水素ガス圧力容器用材料として、引張強さが 950 MPa までの Cr-Mo 系合金鋼を使用する場合、水素脆化評価試験方法として、①円板試料の片側に印可した水素ガスの圧力を増加させ、き裂を貫通させる破裂試験、② 15 MPa の水素ガス中でステップ荷重を増加させる、き裂進展開始試験、③ 15 MPa の水素ガス中での定変位または定荷重による、き裂進展停止試験、を求めている。しかし、常用圧力が 82 MPa である水素ステーション用蓄圧器の材料評価方法としては、水素ガス中での試験圧力が十分ではないため、ISO の専門委員会（TC197/WG15）において水素ステーション用蓄圧器の基準について検討が継続されている。

このように、燃料電池自動車用車載容器、水素ステーション用蓄圧器等の高圧水素ガス関連機器の材料使用基準は、世界的に整備途上である。また、SUS 316L ステンレス鋼や A 6061 系アルミニウム合金は高価であるため、燃料電池自動車および水素ステーションを普及させるためのコストダウンの実現には、高圧水素ガス関連機器の容器や配

管等に使用できる材料の選択肢を増やす必要がある。そのため、水素脆化の影響は受けるものの、或る一定条件下で使用の可能性を有する低合金鋼等を対象として、有限寿命設計の視点から高圧水素ガス中での疲労特性や破壊靱性等の材料評価技術を検討し、高圧水素ガス中での材料挙動をより正確に評価可能な手法の確立が求められている。我々は、100 MPa 以上の高圧水素ガス中での材料試験装置の開発、それを用いた材料試験データの取得および水素脆化現象の正確な評価と脆化メカニズムの理解による試験方法の有効性検証、さらに材料評価結果のデータベース化による産業界への情報提供と周知、および標準策定にかかわる関係機関への働きかけを通して、高圧水素ガス関連機器に使用される材料に関する試験方法の国際標準化に貢献することを目指している（図 1）。

3 高圧水素ガス中材料試験装置の開発

100 MPa を超える水素ガス圧力中での材料試験装置を有する研究機関は、世界的に見てもあまり多くない。2014 年 10 月時点において、日本では九州大学（120 MPa）と産総研エネルギー技術研究部門（120 MPa）、および数社の民間企業が 100 ~ 120 MPa の材料試験装置を保有している。米国ではサンディア国立研究所（140 MPa）、欧州ではイギリスの TWI（The Welding Institute: 100 MPa）、アジアでは中国と韓国がそれぞれ 120 MPa の材料試験装置を有している。

我々の研究グループでは、使用する水素ガスの圧力を 1 MPa から 40 MPa、70 MPa、120 MPa と徐々に高圧化させ、運用ノウハウを蓄積させてきた。それらを基に、2011 年に高圧水素ガス供給系統の一元化によるシステムの簡素化と、PC を用いた遠隔操作、監視カメラ、緊急遮断装置

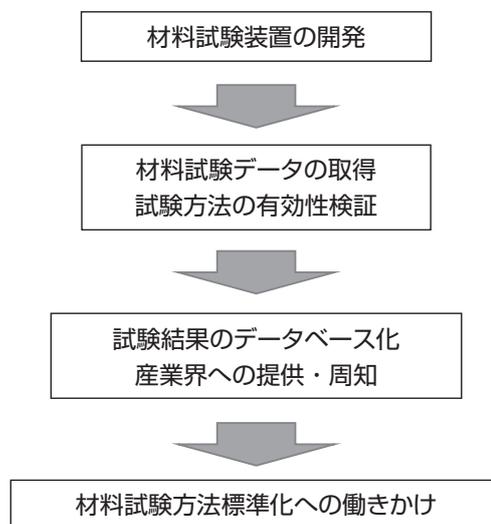


図 1 国際標準化への貢献を目指した取り組み

の導入、および防護壁を用いた各試験装置の相互隔離による試験区域の無人化を図り、高圧水素ガスを使用した実験のさらなる安全性の向上を達成した。120 MPaの圧縮機に、疲労試験機、低歪み速度引張 (SSRT) 試験機、曝露容器等が並列に接続されており、圧縮機と各バルブの操作は、図2に示すように制御室からPCを用いたマウスによる遠隔操作で行い、それぞれの装置に対して、同時に水素ガスを供給することができないシステムとなっている。また図3に示すように、各試験装置を隔離するために、防火壁に囲まれた防爆エリアの中に防護壁が設置されている。さらに、高圧水素ガスは試験容器内だけに密閉されており、試験容器内に水素ガスを導入後、配管および圧縮機内の水素ガスは排出され、大気圧まで減圧される。したがって、もし材料試験中に試験容器から水素ガスが漏洩したとしても、実験室空間の水素濃度は爆発限界よりも遙かに低い値となるように設計されている。

主要な試験装置の諸元を図4に示す。図4 (a) の疲労

試験機は、水素中でも動作が安定な歪みゲージを用いた内部ロードセルおよび信号取り出し口を有し、常用圧力 115 MPa、室温の水素ガス雰囲気中で、荷重サイクル 1 Hz における疲労試験、き裂進展試験、変位増加法等による破壊靱性試験が可能である。図4 (b) の低歪み速度引張試験機は、常用圧力 70 MPa、室温の水素ガス雰囲気中で、 $1 \times 10^{-5} \text{ S}^{-1}$ 以上の速度での引張試験が可能である。図4 (c) の曝露容器は信号取り出し口を有しており、常用圧力 115 MPa、室温～350 °C までの水素ガス雰囲気中で材料への水素チャージ、および定変位法等による破壊靱性試験 (遅れ破壊試験) が可能である。

4 破壊靱性試験方法の国際比較

4.1 有限寿命設計のための破壊靱性評価方法の検討

水素ガスの充填-放出のサイクルにより繰り返し応力が印可される蓄圧器や配管において、破壊限界き裂長さの想定や破裂前漏洩 (LBB: Leak Before Brake) の考え方



図2 制御室に設置されたPC制御システム

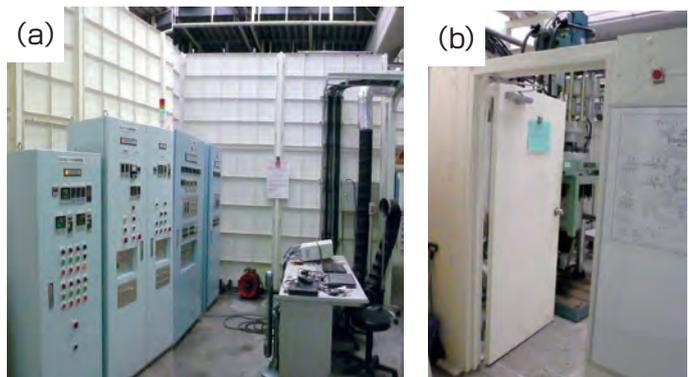


図3 (a) 防火壁と非防爆エリアに設置された制御盤、(b) 各試験機を隔離する防護壁

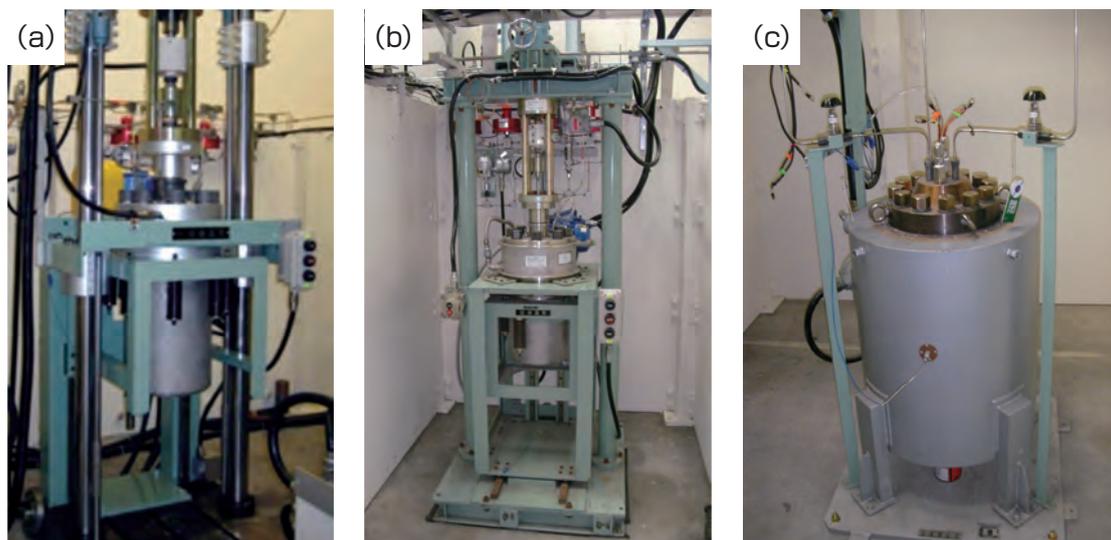


図4 (a) 疲労試験機：常用圧力 115 MPa、室温、(b) 低歪み速度引張試験機：常用圧力 70 MPa、室温、(c) 曝露試験機：常用圧力 115 MPa、室温～350 °C

表1 SCM 435 と SA-372 Grade J の材料特性および組成

	Yield stress	Tensile strength (MPa)	C	Cr	Mo	Mn	Si	P	S	Fe (mass%)
SCM 435	700	828	0.38	1.1	0.23	0.79	0.22	0.006	0.004	Bal
SA-372 Grade J	762	889	0.49	0.99	0.18	0.93	0.28	0.008	0.004	Bal

を基にした有限寿命設計を試みるためには、高圧水素ガス環境下での材料の破壊靱性値を求めることが重要である。前述のように、高圧水素ガス容器用材料の評価基準の一つである ASME Article KD-10 in Division 3 では、水素ガス中で定荷重法もしくは定変位法による破壊靱性試験の実施を求めている^[11]。

ところが、最近のサンディア国立研究所の研究により、高圧水素ガス関連機器への使用が期待できる引張強度 950 MPa 以下の比較的強度で高靱性のフェライト鋼に関して、103 MPa の高圧水素ガス雰囲気中で定変位法により求めた破壊靱性値 (K_{THa}) と変位増加法により求めた破壊靱性値 (K_{JH}) を比較した結果、 K_{JH} 値は K_{THa} 値よりも低く、破壊抵抗として控えめな値になることが指摘された^{[18][19]}。定変位法とは、あらかじめ予き裂を形成したボルト負荷コンパクト試験片 (Bolt-Load Compact Specimen: 図 5 (a)) を用いて、ボルトの締め込によりき裂開口変位を一定に保ったまま、き裂先端に荷重を印可し、特定の環境下でき裂が成長し停止するまで保持する ASTM E1681 に準拠した試験方法で^[15]、遅れ破壊試験とも呼ばれている。サンディア国立研究所では、不活性ガス中でボルトを締め込み、高圧水素ガス中で最長 3800 時間程度まで試験片を保持し、最終的に停止したき裂の長さから破壊靱性値を求めている。き裂の進展が停止する破壊靱性値を求めることから、き裂進展停止試験と見なすこともできる。また変位増加法は、予き裂を形成したコンパクト試験片 (Compact Specimen: 図 5 (b)) に高圧水素ガス雰囲気中でき裂開口変位が増加するように荷重を負荷する材料試験で、ASTM E1820 に

準拠した方法である^[13]。サンディア国立研究所では、開口変位は差動変圧器 (LVDT) を用いて、き裂の長さは電位差法を用いて測定し、荷重、開口変位、き裂長さから、き裂が進み始める破壊靱性値を求めている。そのため、き裂進展開始試験と見なすこともできる。

4.2 除荷コンプライアンス法を用いた破壊靱性評価

我々の研究グループでは、ASTM E1820 に準拠したもう一つのき裂長さ測定法である除荷コンプライアンス法を用いて変位増加試験を行い、サンディア国立研究所で得られた測定データとの直接比較を試みている^[20]。除荷コンプライアンス法を用いた変位増加試験とは、予き裂を導入したコンパクト試験片 (図 5 (b)) のき裂開口変位を一定速度で増加させるとともに、任意のき裂開口変位ごとに荷重の一部を除荷し、その時の開口変位と荷重の関係からき裂長さを計算し、き裂が進展し始める破壊靱性値を求める手法である。実験には、今後高圧水素ガス関連機器を低コスト化するための材料として期待されている Cr-Mo 系低合金鋼の日本、米国両方の規格材である、SCM435(日本規格)、SA-372 Grade J (米国規格: サンディア国立研究所より支給) を使用している。表 1 に SCM435 と SA372 grade J の材料特性および組成を示す。また、除荷コンプライアンス法による試験条件の概要は、参考文献 [20] に示した。

4.3 破壊靱性評価データの日米直接比較

図 6 に、SCM435 について 115 MPa 水素ガス中で除

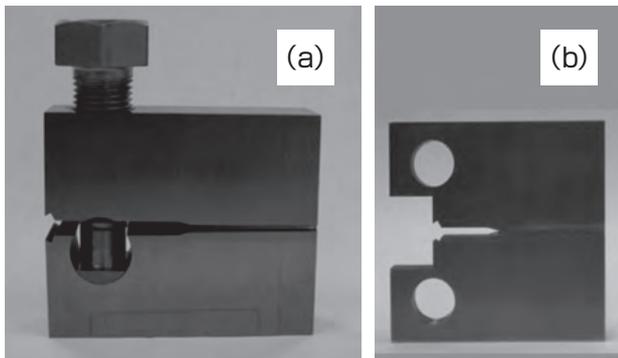


図5 (a) ボルト負荷コンパクト試験片、(b) コンパクト試験片

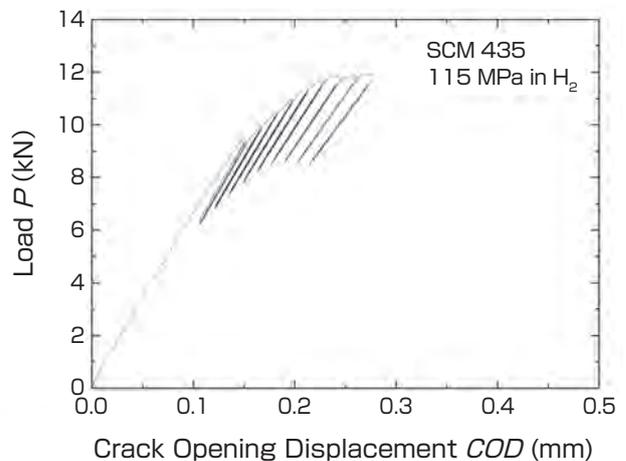


図6 除荷コンプライアンス法による SCM 435 の P-COD 曲線

表2 SCM 435 と SA-372 Grade J^[20] の破壊靱性

	Yield stress σ_{ys} (MPa)	115 MPa in H ₂ $K_{JIC,H}$ (MPa m ^{1/2})
SCM 435	700	63
SA-372 Grade J	762	66 (K_{QH})

荷コンプライアンス法を用いて求めた荷重-開口変位 (P - COD) 曲線を示す。図から、 J 積分値とき裂進展長さの関係 (R 曲線) を求め、き裂が進展し始める破壊靱性値 (J_{IC}) を導出し、下記に示す ASTM E1820 に記載されている J と K の関係式より、き裂の進展が開始する下限界の応力拡大係数 ($K_{JIC,H}$) を導出した。但し、ヤング率 $E = 206$ GPa、ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。

$$K_F = \sqrt{\frac{EJ_F}{1-\nu^2}}$$

実験により得られた SCM435 の破壊靱性値は、115 MPa の水素中では $K_{JIC,H} = 63$ MPa m^{1/2} であった。また、SA-372 Grade J の破壊靱性値は 115 MPa 水素ガス中で $K_{QH} = 66$ MPa m^{1/2} であった^[20]。SCM 435、SA-372 Grade J の 115 MPa 水素ガス中での破壊靱性値を表 2 に示す。

サンディア国立研究所において定変位法 (K_{THa})、変位増加法 (K_{JH}) で得られた高圧水素ガス中 (103 MPa) での破壊靱性値^[18] と、今回我々が除荷コンプライアンス法を用いた変位増加試験で求めた高圧水素ガス中 (115 MPa) での破壊靱性値 ($K_{JIC,H}$) について、材料強度との関係を図 7 に示す。変位増加法の一つである除荷コンプライアンス法で得られた破壊靱性値 $K_{JIC,H}$ は、サンディア国立研究所において変位増加法で得られた K_{JH} とほぼ同等の値を示し、定変位法で得られた K_{THa} よりも低いことが分かる。

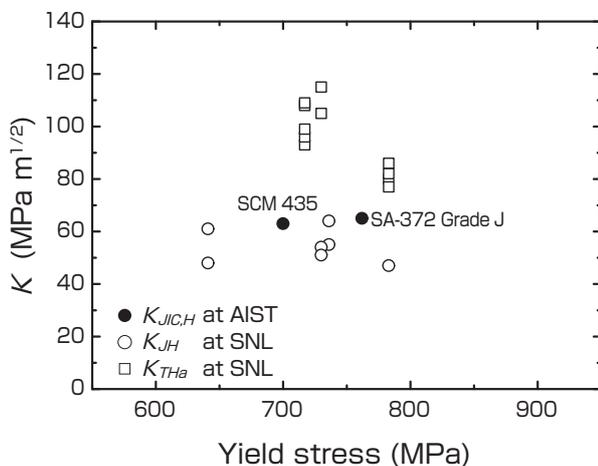


図7 Cr-Mo 系低合金鋼の降伏応力と破壊靱性の関係^{[18][20]}

このことは、変位速度、負荷-除荷過程、水素純度、予き裂の形成等の詳細な測定条件や、試験装置の形状や水素置換手順等の測定ノウハウが異なっても、変位増加法による破壊靱性の評価結果は大きく変わらず、評価方法としての普遍性を有することを示唆している。さらに、変位増加法で求めた K_{JH} 、 $K_{JIC,H}$ は定変位法で求めた K_{THa} よりも低いことから、変位増加法による破壊靱性値は控えめな (conservative) 値であり、高圧水素ガス中での金属材料の挙動を定量的に評価するための有効な手法と考えることができる。

5 まとめ

高圧水素ガス中で使用される金属材料に与える水素の影響を、より正確に評価可能な手法を確立させるために、我々の研究グループでは常用 115 MPa までの高圧水素ガス中で引張試験、破壊靱性試験、遅れ破壊試験等が可能な材料試験装置群を開発している。また、これらの試験装置群を用いて、高圧水素ガス関連機器の容器や配管等に使用可能な材料の選択肢を増やすために、汎用金属材料について高圧水素ガス中での材料試験データの収集を行っている。中でも、高圧水素ガス関連機器の低コスト化に貢献すると期待されている Cr-Mo 系低合金鋼の日米の規格材について、サンディア国立研究所と協力して、破壊靱性試験方法の国際比較を試みている。その結果、高圧水素ガス中での変位増加法を用いた破壊靱性試験が、汎用金属材料の水素脆化を定量的に評価可能な材料試験方法として有効であることが明らかになってきた。今後は、さらにさまざまな試験条件、特に水素ガス圧力や変位速度の影響についてのデータを蓄積することで、高圧水素ガス中での変位増加法による破壊靱性試験方法の有効性を検証するとともに、サンディア国立研究所を含む関連する研究機関との連携の下、高圧ガス関連機器に使用される材料の試験方法として国際標準に貢献できるか、その可能性について検討していく予定である。

謝辞

この研究の一部は、経済産業省日米クリーン・エネルギー技術協力事業により行われた。また、研究を推進するに当たり、実験の実施やデータ解析に協力していただいた、エネルギー技術部門水素材料先端科学グループの安白氏、孫正明氏、中道修平氏に感謝申し上げます。また、高圧水素ガス関連機器を取り巻く状況や、材料強度特性に与える水素の影響について幅広くご助言を賜りました、九州大学の松岡三郎教授、栗山信宏教授に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 燃料電池実用化推進協議会(2010年3月): FCVと水素ステーションの普及に向けたシナリオ2010, http://fccj.jp/pdf/22_csj.pdf, 2014-07-09.
- [2] トヨタ自動車株式会社(2014年6月25日): トヨタ自動車, セダンタイプの燃料電池自動車を, 日本で2014年度内に700万円程度の価格^{※1}で販売開始, ニュースリリース, <http://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/3274916/>, 2014-07-09.
- [3] 経済産業省(2014年6月24日): 水素、燃料電池戦略ロードマップ, ニュースリリース, <http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004.html>, 2014-07-06.
- [4] 経済産業省: 一般高圧ガス保安規則第7条の3及びコンビナート等保安規則第7条の3
- [5] 村上敬宜, 松岡三郎, 近藤良之, 西村 伸: 水素脆化メカニズムと水素機器強度設計の考え方, 養賢堂, 東京 (2012).
- [6] 高圧ガス保安協会: 「容器保安規則の性能基準の運用について」および「70MPa圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準KHK S0128 (2010)」, 容器保安規則関係例示基準集 改訂版, 高圧ガス保安協会 (2013).
- [7] SAE International (2013-03-28): SAE J2579, Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles, http://standards.sae.org/j2579_201303/, 2014-10-14.
- [8] 高圧ガス保安協会: 平成22年度経済産業省委託燃料電池システム普及用技術基準調査報告書, 高圧ガス保安協会 (2011).
- [9] 経済産業省: 燃料電池自動車の普及促進策! 国際圧縮水素自動車燃料装置用容器を技術基準化します, プレスリリース, <http://www.meti.go.jp/press/2014/05/20140530002/20140530002.html>, 2014-06-17.
- [10] 高圧ガス保安協会 (平成26年5月): 高圧ガス保安法令関係例示基準資料集 第6次改訂版 (平成25年3月22日発行) 新旧対照表, https://www.khk.or.jp/publications_library/publications/dl/kouatsu_reiji_sinkyuu.pdf, 2014-10-16.
- [11] 2010 ASME BPVC Section VIII - Division 3, Article KD-10, Special Requirements for Vessels in High-Pressure Gaseous Hydrogen Transport and Storage Service, ASME, New York, (2010).
- [12] ASTM E 399-09, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Material, ASTM International, West Conshohocken, PA (2009).
- [13] ASTM E 1820-09, Standard Test method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International, West Conshohocken, PA (2009).
- [14] M. D. Rana, G. B. Rawls, J. R. Sims and E. Uppitis: Technical basis and application of new rules on fracture control of high pressure hydrogen vessel in ASME Section VIII, Division 3 code, *Proc. ASME 2007 PVP Conference*, PVP2007-26023 (2008).
- [15] ASTM E 1681-03, Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA (2013).
- [16] 高圧ガス保安協会: 平成23年度経済産業省委託石油精製業保安対策事業(海外における技術基準に関する調査(高圧ガス設備の関する欧米の設計基準及び維持基準の調査))報告書, 高圧ガス保安協会 (2012).
- [17] ISO 11114-4, Transportable gas cylinders - Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents - Part 4: Test methods for selecting metallic materials resistant to hydrogen embrittlement, (2005).
- [18] K. A. Nibur, B. P. Somerday, C. San Marchi, J. W. Foulk, III, M. Dadfarnia, P. Sofronis and G. A. Hayden: Measurement and interpretation of threshold stress intensity factors for steels in high-pressure hydrogen gas, *Sandia Report*, SAND2010-4633, Sandia National Laboratories, Livermore, CA. (2010).
- [19] K. A. Nibur, B. P. Somerday, C. San Marchi, J. W. Foulk, III, M. Dadfarnia and P. Sofronis: The relationship between crack-tip strain and subcritical cracking threshold for steels in high-pressure hydrogen gas, *Metall. Mat. Trans., A*, 44A, 248-269 (2013).
- [20] T. Iijima, H. Itoga, B. An, C. San Marchi and B. P. Somerday: Measurement of fracture properties for ferritic steel in high-pressure hydrogen gas, *Proc. ASME 2014 PVP Conference*, PVP2014-28815 (2014).

執筆者略歴

飯島 高志 (いじま たかし)

1988年東北大学大学院工学研究科博士課程後期材料物性学専攻修了、工学博士。1993年工業技術院東北工業技術研究所入所。1997-1998年マックス・プランク金属研究所客員研究員。2001年産業技術総合研究所に改組後、スマートストラクチャー研究センター、計測フロンティア研究部門、水素材料先端科学研究センターを経て2013年よりエネルギー技術研究部門水素材料先端科学グループ長。東京理科大学客員教授（連携大学院）。九州大学客員教授。この論文では、データの取りまとめと執筆を担当。



阿部 孝行 (あべ たかゆき)

1970年～2009年、金属材料技術研究所：NRIM（現 物質・材料研究機構：NIMS）に在職し金属疲労破壊の研究に携わる。2004年、芝浦工業大学に於いて工学博士を取得。2011年、産業技術総合研究所水素材料先端科学研究センター、2013年よりエネルギー技術研究部門水素材料先端科学グループにて高圧水素ガス環境中に於ける破壊靱性試験に従事。この論文では、破壊靱性試験条件の検討ならびに試験の実施を担当。



井藤賀 久岳 (いとうが ひさたけ)

2005年岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程生産開発システム工学専攻修了、工学博士。1995～2007年中日本自動車短期大学教員。2007～2013年産業技術総合研究所水素材料先端科学研究センター特別研究員。2013年より九州大学水素材料先端科学研究センター准教授。金属材料の強度特性に関する研究に従事するとともに、特に2007年以降は材料強度特性に及ぼす水素の影響についての研究を行っている。この論文では、破壊靱性試験結果の解析を担当。



査読者との議論

議論1 全般

質問・コメント (中村 守: 産業技術総合研究所)

燃料電池自動車の実用化のための水素貯蔵・供給システムの構築のためには、高水素圧力下で使用できる金属材料の信頼性を保証する材料評価手法の確立と、その国際標準を定めることが、必要不可欠です。この論文では、特性の内、破壊靱性の評価手法について、米国国立研究所との共同研究を実施した成果等が記述されており、興味深い内容です。

質問・コメント（羽鳥 浩章：産業技術総合研究所）

燃料電池自動車の実用化において不可欠な、高圧水素貯蔵容器の材料評価手法を開発した経緯は、構成学的に興味深く、社会との関係も明確な技術開発分野です。現在進行中の国際標準化戦略については、燃料電池自動車のさらなる普及に向けて鍵となることから、将来への取り組みも視野に入れた構成学的考察をすることには大きな意義があると思います。

議論2 内外の標準化に関わる研究の現状と国際標準化戦略の記述の整理

質問・コメント（中村 守）

水素圧力下で使用できる金属材料の破壊靱性の評価手法の国際標準化については、まだ、3つの手法の比較を行っている段階で、標準化に向けた方向性や戦略は示されていません。最初に、水素圧力下での特性評価の内外の全体像と現状について概略を述べ、その後で、ここで検討する破壊靱性の位置付けを説明し、国際共同研究の成果について記述するというように整理された方が分かりやすいと思います。

具体的には、「2.2 高圧水素ガス関連機器に使用される材料の使用基準」「4.1 有限寿命設計のための破壊靱性評価方法の検討」に記載されているいくつかのASMEの規格と、我が国の規格（準備段階?）、および国際標準との関係の現状がよく分かりません。整理して記述していただいた方が良いと思います。

回答（飯島 高志：産業技術総合研究所）

2章で日米欧の標準化の状況につきまして、燃料電池自動車用車載容器と水素ステーション用蓄圧器に関して現状を整理し、それを基に材料試験方法の国際標準化への貢献に向けた戦略を記述しました。さらに、3章において世界における高圧水素ガス中試験装置の状況を概観し、我々の装置開発の取り組みを述べることにしました。また、破壊靱性値については2章で述べたように、さまざまな評価手法が提案、模索されている状況です。そこで、4章において、定変位法と変位増加法による破壊靱性評価方法に関する、サンディア国立研究所との国際共同研究の成果を記述しました。

質問・コメント（羽鳥 浩章）

コメント1:

3章については、開発に成功した材料評価手法について、研究目標を実現するための道筋（シナリオ・仮説）、そのための要素技術の選択とその統合という、構成学的考察を強化する必要があるかと思っています。4章における、今後の国際標準化への取り組みも含めて、研究開発のシナリオ・戦略を研究開発モデルとしてまとめた図を追加すると読者に分かりやすいと思います。これに伴い、4章における技術の詳細部分は、説明を簡略化し、ある部分は引用文献の提示にとどめて、シナリオ・戦略を中心とした議論を加えると良いかと思っています。

コメント2:

国際標準化についてですが、この論文では米国との技術比較が明確に示されている一方で、欧州の状況が述べられていません。本分

野の国際標準化において欧州の動向は今後影響しないのでしょうか？この技術分野への社会的な要求という観点も含め、日米欧を比較して考察することで、国際標準化戦略がより明確になるのではないかと思います。

回答（飯島 高志）

コメント2でご指摘いただきました通り、ISOを含む欧州の動向についての記述がありませんでした。そこで2章に、車載容器、蓄圧器それぞれに対する日米欧の標準化に関する動向を記述し、それを基に国際標準化への取り組みを目指した研究開発のシナリオについて考察し、開発モデルの概念図（図1）を追加しました。その際、我々が直接標準化を推進する立場ではないことから、材料試験方法に関する国際標準化への働きかけ、もしくは貢献との表現を用いました。また、日米欧における取り組みを補足する意味で、世界的に見た高圧水素ガス中試験装置の現状を3章に加えました。

また、コメント1に従い、4章における技術の詳細についての記述を簡略化し、SA-372 Grade Jのデータについては2014年7月に発表した論文からの引用とさせていただきます。

議論3 異なる手法で評価された水素ガス中での破壊靱性値の比較

質問・コメント（中村 守）

論文中の「破壊靱性評価データの日米直接比較」では、SA-372 Grade JとSCM435の水素ガス中での亀裂の進展挙動がかなり違うので、SA-372 Grade Jについては、別の評価方法を採用したことが記述されていますが、得られた破壊靱性値はほとんど同じになっています。亀裂進展挙動が大きく異なる以上、破壊靱性値がほぼ同じという結果は、やや不自然に感じました。これは、評価方法によって破壊靱性の評価値はかなり異なるが、この場合は「偶然」、異なる手法で測ったと同じ値になったのではないかとも思われますが、如何でしょうか。

回答（飯島 高志）

実験データから分かりますように、115 MPaの水素ガス中ではSA-372 Grade JとSCM435の破壊靱性値はかなり低下しており、現在までの所その詳細なメカニズムは不明ですが、線形弾性的破壊と弾塑性的破壊の中間的な挙動となっていると想定されます。この点につきましては、今後さらに詳細な実験が必要と考えております。ASTM E1820ではunstable crack extensionおよびstable crack extensionを示す試料の破壊靱性を評価する手法として、除荷コンプライアンス法などにより求めたJ-Rカーブを用いた破壊靱性値の導出について記載しております。それと同時に、unstable crack extensionが主な場合には、除荷を行わないP-COD曲線から破壊靱性値を求める方法についてもASTM E1820 Annex A5で併記しております。従いまして、SA-372 Grade JとSCM435の破壊靱性値は「偶然」同等の値を示したのではなく、ASTM E1820に基づいて得られた材料試験結果のため、比較可能な値であると判断しております。SA-372 Grade Jの破壊靱性値の評価の詳細につきましては参考文献[20]に記載しております。

NEDO プロジェクト開発成果の 社会的便益に関する研究

— 「NEDOインサイド製品」トップ70に関する考察 —

山下 勝*、萬木 慶子、木村 紀子、宍戸 沙夜香、吉田 朋央、一色 俊之、竹下 満

NEDOプロジェクトにより生み出された開発成果をコア技術として活用した製品やプロセスを「NEDOインサイド製品」と定義し、直近の売上、将来の売上見込等の売上効果、雇用創出効果、CO₂削減効果等について分析、試算を行ったところ、直近の売上は4.08兆円/2010年、2011～2020年までの将来の売上見込額は69.1兆円と試算された。また、2011年～20年までの雇用創出効果は、10.9～18.5万人/年、CO₂削減効果では、5,300万トン/年程度の削減効果があることが明らかとなった。さらに、2000年以降に開発された部材・部品、加工技術の成果が、最近の家電製品、コンピューター、自動車関連製品の中で数多く利用されていることを体系的に示すと共に、社会的便益が大きい事例としてリサイクルシステムの構築に、NEDOプロジェクトが大きく貢献していることを明らかにした。

キーワード: 追跡調査 国家プロジェクト、開発成果、インパクト評価、社会的便益

Research on social benefits resulting from NEDO projects

– Study of the top 70 NEDO Inside Products –

Masaru YAMASHITA*, Yoshiko YURUGI, Noriko KIMURA, Sayaka SHISHIDO
Tomonaga YOSHIDA, Toshiyuki ISSHIKI and Mitsuru TAKESHITA

“NEDO Inside Products” are defined as products or processes using core technologies resulting from NEDO research and development projects. In this study, we analyzed and estimated the benefits of NEDO Inside Products to society, including recent and forecasted product sales, job creation, and CO₂ emission reductions. Our analysis revealed that NEDO Inside Products sales in 2010 amounted to 4.08 trillion yen while projected sales from 2011 to 2020 are estimated to increase to 69.1 trillion yen. Job creation estimates between 2011 and 2020 range from 109 to 185 thousand people per year, and CO₂ emission reductions are estimated to be 53 million tons per year. Furthermore, in-depth and systematic analysis showed that many NEDO Inside Products developed after 1999, including components and manufacturing technologies, are being utilized in the latest electric home appliances, computers, and automotive products. Lastly, we found that NEDO projects have contributed significantly to the establishment of various types of recycling systems, as another example of the extensive benefit to society brought about by NEDO’s research and development projects.

Keywords: Follow-up monitoring, national project, development result, impact evaluation, gross social benefit

1 はじめに

日本では国費を利用した研究開発に関する経済性評価の事例研究は数多くあるものの、開発成果の費用対効果に関する評価では分析に必要な要因（成果の寄与率、生産原単位等）を精緻に決めることができないため、限定された条件のもとでの試算や感度分析に止まっている。塩谷らは原子力発電における発電コスト削減効果、環境負荷低減効果、生命リスク低減効果、エネルギーセキュリティ向上効果、資源枯渇抑制効果、燃料輸入削減といった効果を考慮し、投資対効果について分析している^[1]。また、柳沢らは、放射線を利用した製品に関する費用対効果につ

いて、装置費用、放射線量、製品の付加価値等に対する寄与率等を考慮して、さまざまな観点から試算している^[2]。木村らは、国家プロジェクトに関する経済性評価という観点から、熱エネルギー関連プロジェクトにおける省エネルギー効果について、定性的にインパクト効果を評価している^[3]。その他にも、公共政策の立場からさまざまな経済性評価や便益効果に関する報告が行われているが^{[4]-[10]}、いずれの報告も、開発成果の実用化への寄与率、販売単価、販売数の推移、マーケット市況の影響に関するさまざまなパラメーターの設定や変動要因について精緻さに欠け、ある一定の傾向を捕らえることに力点が置かれている。一方、

新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター 〒211-8554 川崎市幸区大宮町 1310 ミューザセントラルタワー 16 階
New Energy and Industrial Technology Development Organization, Technology Strategy Center 16Floor, MUZA Kawasaki Central Tower, 1310 Omiya-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 212-8554, Japan * E-mail: yamashitamr@nedo.go.jp

Original manuscript received September 10, 2014, Revisions received December 26, 2014, Accepted January 5, 2015

米国エネルギー省の G.B. Jordan らは、公的 R&D プロジェクトによる再生可能エネルギー開発や省エネルギー開発について、経済性評価、エネルギー便益、環境便益、エネルギー安全保障便益等に関するコスト利潤を求める手法に関する精緻なガイドラインを作成しており、感度分析やライフサイクルにおける要因分析を含めたケーススタディーを行っている^[11]。

一方、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構：New Energy and Industrial Technology Development Organization 以下 NEDO と記す。）で実施されているプロジェクトは、原資が税金で賄われているため、納税者である国民に対して、開発投資がどのように有効に還元されているのかを評価し、説明責任を果たすことが求められている。そのため、2009 年度から NEDO では、NEDO プロジェクトで生み出された開発成果をコア技術（実用化に際して、不可欠な技術であり、他に真似ができない革新的な技術：新規な機能発現技術、新規な摺合わせ技術、革新製造・処理技術、新規プロセス、高信頼性評価技術等）として製品やプロセスに活用されたものを「NEDO インサイド製品」と定義し、売上に対する開発成果の寄与率を 100 % と仮定して、直接の売上等の経済的なインパクトに関する試算を行ってきた^{[12]・[18]}。

この研究では、NEDO プロジェクトの中でも、特に、基礎・基盤的なプロジェクトおよび実用的に近いプロジェクトを通じて顕著な開発成果を上げ、大きな売上を上げている「NEDO インサイド 70 製品」に関する直接の売上、経済的誘発効果、技術的波及効果、および社会的便益（CO₂削減、省エネ効果、雇用創出）など社会へのインパクトについて調査、評価、分析した（図 1）。ここで、開発成果の実用化、事業化のためには、企業において、NEDO の R&D 投資の 10 倍以上の投資が必要であることは十分理解しているが、実際の投資額の情報を入手できないため、ここで考慮していない。しかし、この研究で取り上げる総合的なインパクトの手法は、これまで NEDO が投資した研究開発に対する開発成果を大まかに評価することで、今

後の研究開発の方向性の一助になることが期待でき、学術的、社会経済的、政策的に大変意義が大きいと考えられる。

2 「NEDO インサイド製品」候補の抽出

1980 年度から NEDO による研究開発プロジェクトはスタートし、年間 100 ～ 200 件以上を実施しており、これまでに約 3 兆円を超える開発予算を投入してきた。当初、その中から NEDO プロジェクトの開発成果が実用化し、売上に直接繋がっていることを見出すことは非常に困難であった。そこで、NEDO が発行した 20 年史、30 年史の中から、NEDO プロジェクトの開発成果が実用化に繋がっているだろうと思われる製品やプロセスを列挙し、過去のプレスリリース、企業等のホームページ、論文、NEDO の成果報告書、追跡調査のレポート等から候補製品に関する 1 次抽出を行った。さらに、プロジェクト参加者等へのアンケートやヒアリング等で 2 次抽出を行った。その後、外部専門家を交えて NEDO プロジェクトで得られた開発成果の実用化への貢献度、売上状況等を議論し、有望な「NEDO インサイド製品」候補を選定した。以下に選定のための構成要件を列挙する。

2.1 「NEDO インサイド製品」候補の選定方法

「NEDO インサイド製品」候補の選定に当たっては、直近売上が大きい、売上は小さいが社会的便益が特に大きい製品について、業界レポート、NEDO プロジェクト成果報告書、企業レポート等から対象となる候補製品を選定し、当時の NEDO プロジェクトに参加した企業に対してアンケート調査（現状および将来の売上、社会的便益）やインタビューを行った。関係各社から回答があった売上、社会的便益については、業界団体等へのヒアリングまたは専門家からなる委員会等で精査した。なお、十分なアンケート回答が得られなかった場合には、NEDO において、業界団体、民間調査機関の公表データから補完計算し、その結果について参加企業、業界団体等に確認等を得たうえで、採用した。以下に、具体的な調査方法、70 製品の選定方法について記す。

2.2 「NEDO インサイド製品」の対象

NEDO プロジェクトでは、大学・公的研究機関等の基礎研究において学術的に大きなインパクトが得られた研究成果を実用化したり、社会的に緊急課題が発生した場合の対応など、企業単独ではリスクが高く、解決できないようなハードルの高い社会的課題に対して産学官連携で実用化に向けた技術開発に取り組むことが多い。そのため、「NEDO インサイド製品」では、NEDO プロジェクトから生み出されたコア技術が、極めて高い開発目標の達成やノウハウが活用されている場合が多い。NEDO プロジェクト

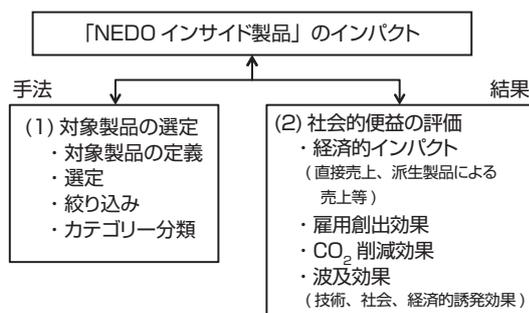


図 1 「NEDO インサイド製品」に関する選定手法と社会的便益に関する構成

で開発されたコア技術とは、産官学の連携によって開発され、実用化に際して、不可欠な革新技術のことであり、具体的には、高変換効率、高速分解、高速反応、超長寿命化、超軽量化、高耐久性、表面制御、省エネ化、高効率燃焼制御、高信頼性評価、相反機能発現等の実現が挙げられる。また、開発成果の寄与率を100%とした理由として、該当するおおよそすべての製品が、1) 中長期に渡って複数のプロジェクトに参加していた、2) 社内では取り上げ難いテーマで、資金獲得が難しい状況であった、3) 企業研究では難しい外部専門家等からのサポート、4) プロジェクトの開発成果がなかったら、実用化はなかったと思っている開発者の意思、5) 大切な時期に研究費を税金で賄ってもらったのだから、実用化するのは企業の義務、6) 寄与率は製品によって状況が異なっており、企業自体も把握できていない、7) 実用化の時期は、プロジェクト成果の仕上がり次第に左右されており、事業化の段階は研究というよりノウハウ、自社製造の貢献であると捕らえた方が正しい等、いずれの製品も複数の理由があり、NEDO プロジェクトでの開発成果がなかったら到底、実用化はできなかつたであろうという仮定の下で、寄与率100%として試算することとした。これまでにNEDOプロジェクトから生まれた製品に関する売上については、断片的な情報しか明らかになっていなかった。そのため、最初に対象製品を分類するため、「NEDO インサイド製品」において、(i) 1,000億円以上の直近単年度売上程度であれば、新規事業部の新設レベル、(ii) 100億円以上1,000億円未満の直近売上程度であれば、新規製品の発売レベルであり、その他の候補製品として、(iii) 売上は小さいが、社会的便益が大きいと見込まれる製品として分類することにした。具体的な手順は下記のとおり。

2.3 「NEDOインサイド製品」の定義

「NEDO インサイド製品」候補製品を以下のとおり定義した。

- 1) プロジェクトの前段階、もしくは後段階に他の研究開発に参加しても、コア技術がNEDOプロジェクト期間中に開発され、上市・製品化に大きく寄与していれば対象とする。
- 2) プロジェクトに参加した大学・公的研究機関等によって開発された成果を、参加企業によって上市・製品化に利用していれば対象とする。
- 3) 企業への補助・助成事業、および導入・普及を目的とする『国際実証・連携事業』の開発成果は対象としない。
- 4) 調査研究事業による開発成果は対象としない。

2.4 企業へのアンケート項目

NEDO プロジェクトへ参加した企業へのアンケート項目としては、①製品名、②プロジェクト名、実施期間、投入

予算、③プロジェクトの成果概要、開発成果が「NEDO インサイド製品」のどこに使われているのか、④売上を上げている参加企業名、⑤参加企業ごとの5年間の累積売上、または業界全体の売上データ^{[19][23]}、⑥2010年における直近売上、2011～2020年の将来の売上見込額、⑦⑤、⑥の試算に使った根拠（公開データ、論文等）、⑧社会的便益（CO₂削減量、省エネ効果、雇用等）、⑨特許・論文、ノウハウ、他の製品への波及効果、受賞歴、その他重要な項目について事業社からの回答を得た。但し、アンケートで十分な回答が得られなかった場合には、NEDOにおいて⑩業界団体の公表データ、⑪公的機関、民間調査機関の公表データを用いて、⑫さらに不足するデータについては、上記の取得データから各種売上、社会的便益等について補完計算を行ったうえで、その結果について参加企業に確認して取得データとした^{[12][16]}。

2.5 「NEDOインサイド製品」に関する候補製品の絞り込み

「NEDO インサイド製品」候補製品の絞り込みについては、図2に示すように情報収集・抽出、1次絞り込み、2次絞り込み、情報確定の4段階で行った。情報収集・抽出の手段では、①追跡アンケート、追跡ヒアリング等、②特許、文献、業界誌、NEDO関連資料等、③プレスリリース、IRデータ、報道資料等、④プロジェクト参加者からの事例紹介、⑤業界キーパーソンからの事例紹介、による5つの方法で行ったが、いずれの方法にも長所と短所があり、一つの情報源で「NEDO インサイド製品」の母集団とすることは困難であった^[24]。①～④については確実にNEDOプロジェクトの実用化事例を抽出することができる一方、現在の市場動向は不明な場合が多かった。特に、開発年次が古い技術やニッチな市場であるほど、上市時点での情報があるのみで、その後の販売状況についての情報が得られない場合が多かった。一方、⑤については、市場投入に関する情報を効率的に得ることができる一方、開発当初にNEDOプロジェクトと、どのような形で関わった

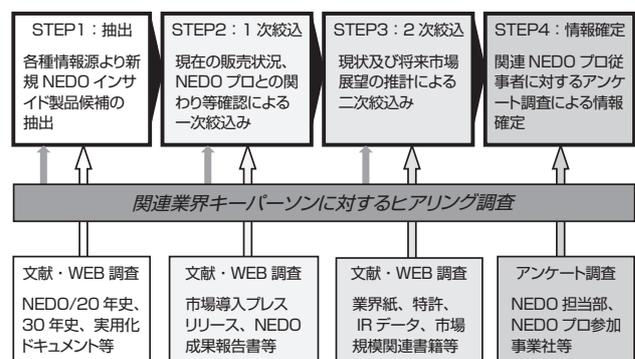


図2 「NEDO インサイド製品」に関する選定スキーム

表1 「NEDO インサイド 70 製品」に関するカテゴリー分類

指標	狙い	概要	効果	具体的な「NEDO インサイド製品」（製品 / 部品の順）
1. 【市場創出の先駆者】	数多くの新規市場創出を先導!	民間企業が 1 社ではできないようなリスクの高い革新的な技術開発を、中長期にわたり支援し、市場創出を実現する。	・市場創出 ・売上げ ・雇用効果	【12 製品】・・・太陽光発電、ブルーレイディスク関連技術、家庭用ヒートポンプ給湯器、ガスタービン、風力発電、家庭用燃料電池、ロボット（産業用、動作支援等）、クリーンディーゼル乗用車、天然ガス自動車、超電導線材、移動体用蓄電池、高出力二次電池
2. 【国際競争力のプースター】	世界トップの技術で産業競争力の優位性を確保!	国際競争が激しい分野で、技術開発を加速されることで、我が国の産業競争力強化に資する。	・国際戦略 ・売上げ ・プレゼンス	【15 製品】・・・高性能ストーカ炉、エキシマレーザー半導体装置、大型 CAT-CVD 装置、ターボ冷凍機、半導体評価技術装置、ピンチテクノロジによる工場地域のエネルギー共有技術、高性能 LED 材料、ハードディスクドライブ、半導体不揮発性メモリ、積層 DRAM、パワー半導体材料、宇宙用蓄電池、自動車用無段変速機、液晶ディスプレイ用偏光フィルム、電気二重層キャパシタ、電子チップ積層フィルム
3. 【幅広い分野の底上げ】	基盤技術開発で幅広い分野の技術の革新を後押し!	民間企業が単独で開発するには時間と費用のかかる材料開発や基盤技術開発に関する技術革新を促進する。	・産業基盤 ・社会インフラ ・学術波及	【8 製品】・・・産業用中型発電機、鋳造シミュレーション、高機能・信頼性サーパ、樹脂部品用接着剤、金属ガラス、光触媒、高性能セラミックス、MEMS
4. 【環境・エネルギー問題解決への貢献】	高信頼性技術で環境・エネルギー問題の解決に貢献!	深刻化する環境・エネルギー問題（省エネ、新エネ、有害物質削減等）に対し、新しい技術開発によって環境配慮型の社会作り貢献する。	・規制対応 ・地球環境 ・省エネ ・快適便利	【16 製品】・・・地熱発電、廃棄物発電、高性能工業炉、低公害ハイブリッドディーゼル車、省エネ型建機、産業用ヒートポンプ、待機電力型デジタル複写機、蓄熱輸送、次世代吸着式冷凍機、冷熱蓄熱システム、液中燃焼法フロン破壊、低燃費タイヤ、廃棄物固形燃料、サルファーフリー軽油、エコセメント、高性能・高機能真空断熱材
5. 【安全・安心・快適生活の実現】	多様な技術レパートリーで安全・安心・快適生活を実現	新しい技術の開発と、それを様々な用途に適用することで、国民の生活、世界の人々の生活をより安全・安心・快適になるように後押しする。	・安心安全 ・社会貢献 ・快適便利	【19 製品】・・・ナノイ応用製品、4 次元 X 線 CT 診断装置、バイオ研究顕微鏡、共焦点レーザー顕微鏡、極低温電子顕微鏡、短下肢装具、省エネ型大型ディスプレイ、ガソリンペーパー回収装置、ノン VOC 塗装システム、糖鎖微量迅速解析システム、体脂肪計、双腕仕様機、活性汚泥法 (MBR) 用膜ユニット、高効率嫌気性生物処理 (UASB 等)、排ガス後処理システム、バイオレメディエーション、電子材料用絶縁材料、半導体製造用クリーニングガス、アスベスト代替ガasket

かに関する情報が得られない場合も多かった。NEDO プロジェクトとの関わりについては、NEDO 内データベース等で確認を行ったが、80 年代など古いプロジェクトの開発成果については十分に情報が得られない場合もあった。そこで、実際には、①～⑤の情報を組み合わせながら、「NEDO インサイド製品」候補を抽出した^{[12][16]}。さらに、上記①～③によって 1 次絞り込みを行ったうえで、アンケート結果や④、⑤による有識者ヒアリング等の結果によって 2 次絞り込みを行い、外部専門家からなる委員会等において情報の確定を行って、最終的に「NEDO インサイド製品」としてトップ 70 製品を決定した。

「NEDO インサイド 70 製品」については、すでに報告した「NEDO インサイド 50 製品」^[24]における、その後の売上状況、同類製品（ロボット、パワー半導体等）の統合により、47 製品に統合、再整理した。そのため、この研究では、新規製品として 23 製品を追加した。新規な候補製品の抽出では、NEDO プロジェクトの成果報告書や NEDO データベース検索等^[25]により NEDO プロジェクトとの関わりを再度確認した。また、現在の市場導入状況については、当該事業社による市場関連プレスリリースや関連分野の専門誌による市場導入関連記事の検索等を行ったのち、過去 5 年間の累積売上、直近の売上、将来の売上見込額、社会的に大きな社会的便益が期待できる製品として、内部評価を行って、1 次絞り込み 154 製品を決定した。さらに、2 次絞り込みとして、定量評価、ヒアリング等を行いながら、

外部有識者等からなる委員会等で 72 製品に絞り込み、最終的に売上が多い上位 70 製品を決定した。

2.6 「NEDO インサイド製品」のカテゴリー分け

当初、NEDO プロジェクトの基本計画、および製品が有する特性と照らし合わせて、①市場の先駆者、②国際競争力、③基礎基盤による底上げ、④社会課題への対応で分類したが^{[12][16]}、NEDO のミッションから、④項が半数以上を占めていた。そこで、さらに④項について詳細な分析、検討を行ったところ、社会的な要請や身近な課題に分類することで、製品の特性が明らかになることが判り、「資源・エネルギー課題解決」、「安心・安全、快適生活の実現」と再分類することにした。その結果、「NEDO インサイド 70 製品」では、(1) 市場創出の先駆者：12 製品、(2) 国際競争力のプースター：15 製品、(3) 幅広い分野の底上げ：8 製品、(4) 環境・エネルギー課題解決への貢献：16 製品、(5) 安全・安心・快適生活の実現：19 製品、と 5 分類に再整理した(表 1)。このカテゴリー分けで明らかのように、「NEDO インサイド製品」は、社会的な課題解決 (CO₂削減、省エネ、新エネ、地球環境、有害物質削減、排ガス、生活関連、廃棄物、医療等) に関する製品やプロセスに関する開発が多く、売上は大きくないものの、規制対応、環境問題への対応、医療診断、福祉機器等社会的貢献が大きい製品が数多く含まれていることが明らかとなった。

2.7 「NEDO インサイド製品」に関する将来売上予測

「NEDO インサイド製品」の売上は、上市後の時間経過

に応じて変動する。多くの製品の場合、上市後は、小さな売上期間が数年経過した後、徐々に売上が伸びて、一定の売上を得た時点で成熟して売上の伸びが鈍化し、その後、一定期間を経て、最終的には減少傾向に至る。図3(A)に「NEDO インサイド製品」に関する売上のライフサイクル曲線を示す。「NEDO インサイド製品」には、製品寿命が太陽光発電のような30年近いものから、電子部品のような数年のものまで多様であった。そのため、製品の性質に応じて、売上カーブをどの程度のスピード感で描いていくのか、さまざまな観点から調査して、最適な寿命カーブを選択する必要があった。「NEDO インサイド製品」の売上効果を評価するため、過去5年間の累積売上、直近の売上、将来の売上見込額の3種類の売上进行を試算した。なお、将来の売上見込額は製品によって、図3の(B)、(C)、(D)にあるような推移で売上が変化することが想定される。図3-(B)は、今後一定期間、売上伸び率が前年を上回っていくと期待されている製品で、過去から2011年からの売上の伸び率で2020年まで伸びると想定して試算するケースである。図3-(C)は、業界、国等により売上金額が毎年一定額伸びていくと予想されている製品で、アンケートの企業回答に将来の売上見込額がある場合には、2011年から将来の当該年度までの伸び率で2020年まで伸びると想定して試算するケースである。図3-(D)は、製品寿命が短い、または、将来、売상을予想し難い製品で、2011年時点から売上の伸びはなく、毎年、同額の売上が続く想定して試算するケースである^{[13]-[18][24]}。なお、(E)、(X)、(Z)のような売上カーブを示す製品は、すでに売上がない、売上があっても極めて小さい、あるいは過去に売上はあったが、今はほとんどないものであり、今回の候補製品からは除外されている製品やプロセスである。

2.8 「NEDOインサイド製品」における成功要因について

「NEDO インサイド製品」において、成功に繋がった大きな要因として、1) 普段の研究に比べて、かなり多くのデータを取得できた、2) 大学との共同研究を通じて、メカニズムを解明して、信頼性向上、問題点の解決、研究方針の作成・変更、スケールアップ等に役立てた、3) 最初から実用化、成功できる技術として自信を持っていた、4) 長い間、心の中でアイデアを暖めていた、5) 他の研究者には真似できないノウハウ、武器を持っており、プロジェクトの中で磨いて活用した、6) マーケット情報は当てにならないと判っていたので、提案思考で共同研究先(ニーズ)と情報交換を行っていた、7) プロトタイプによる実証実験を行い、検証と改良の繰り返しにより、完成度を高め、事業部門との架け橋となった等、が開発者のアンケートやヒアリングから明らかとなった。その他の要因もあると考えられるが、今後の追跡調査で明らかにしていく必要がある。

3 「NEDOインサイド製品」のインパクト評価

3.1 「NEDOインサイド製品」の特長

「NEDO インサイド 70 製品」の中で、太陽光発電、風力発電、ガスタービン、家庭用ヒートポンプ給湯器、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)、クリーン自動車等は1,000億円以上の直近売上があり、売上を順調に伸ばしているが、廃棄物発電、家庭用燃料電池等の100億円以上1,000億円未満の直近売上がある製品は、大方の導入が終わっている、または高コストのために期待されるほどの大きな売上の伸びはなかった。特に、大型の製造設備等に関する製品の売上は景気の動向に左右されやすく、一旦、導入すれば運用だけしか売上にカウントで

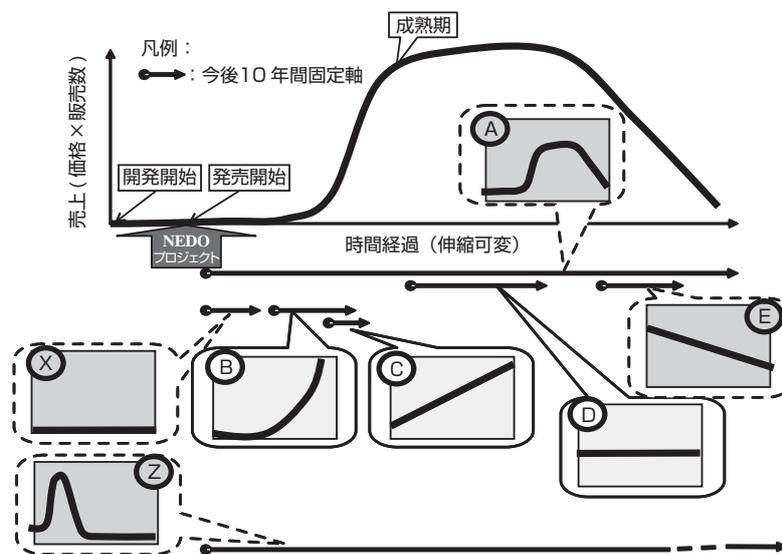


図3 「NEDO インサイド製品」に関する売上のライフサイクル

表 2 「NEDO インサイド 70 製品」の売上実績と将来の売上予測

(単位：億円)	NEDO 投入費用		売り上げ実績		将来の 売り上げ見通し (2011~20年の累積)
	単年度 平均研究開発費	累積 研究開発費	直近単年度 (2010年)	最近5年間 の累積	
太陽光発電	58	1,735	15,800	46,400	219,400
風力発電	4	85	2,600	7,300	41,100
ガスタービン	35	532	2,600	11,900	40,100
家庭用 HP 給湯器	12	154	3,400	16,000	38,500
家庭用燃料電池	49	880	120	300	11,600
ブルーレイ関連製品	12	61	5,100	14,500	51,500
半導体関連製品	35	280	500	1,700	65,000
MEMS	18	250	400	1,200	6,700
高性能セラミックス	5	123	100	110	10,500
高性能工業炉	11	80	20	400	1,100
廃棄物発電	10	100	200	1,500	2,500
水処理 (膜分離等)	19	118	400	1,300	6,000
バイオ顕微鏡	20	98	100	90	1,200
その他	—	1,913	9,460	40,100	196,000
合計	—	6,409	40,800	142,800	691,200

市場創出の先駆者 国際競争力のプースター 幅広い分野の底上げ 環境・エネルギー課題解決 安全・安心・快適な生活実現

「その他」：ロボット、大型ディスプレイ、廃棄物発電、真空断熱材、フロン破壊、HDドライブ、半導体製造技術、CNG自動車、エコセメント、MEMS、体脂肪計、半導体接着技術、ナノイー応用製品、X線CT診断装置、省エネ型建機、電子材料用絶縁材料、産業用ヒートポンプ、省エネ複写機、氷蓄熱システム、サルファーフリー軽油、糖鎖微量迅速解析システム、高機能・信頼性サーバー、超電導材料、ストーカー炉、光触媒等

きないビジネス特有の事情がある。一般的に、売上が大きい製品は、コモディティー化によって単価は急激に低下し、国内外での売上販売台数の増加等によって、ある程度の売上を確保、または拡大している。また、売上は小さいが社会的便益や産業競争力強化に大きく貢献している製品 (大幅なCO₂削減、コア部品として国際的なシェアが大きい等) は、社会的な課題解決 (環境問題、安心安全の確保、快適な生活等) に資する製品に多く含まれている。

3.2 「NEDOインサイド製品」における直接売上に関する評価

「NEDO インサイド 70 製品」に関する NEDO の投資金額、過去 5 年間の累積売上、直近売上、将来 10 年間の売上見込額を試算した結果を示す (表 2)。70 製品に関する研究開発累積費 6,409 億円に対して、直近売上実績：4.08 兆円、直近 5 年間の累積売上実績：14.28 兆円、2011～2020 年までの将来の売上見込額：約 69.1 兆円と試算された。なお、単独企業によって販売された製品に関する売上は、公表することが難しいために、複数社で同一製品を売上している場合は合算額を計算し、その他の単独企業が売上している製品は、「その他」の項にまとめて合算した^[19]。

NEDO プロジェクトの原資は国費であることから、「NEDO インサイド製品」に関する将来の税収見込み額や雇用創出効果についても試算を行った。これまでに「NEDO インサイド 70 製品」に対するプロジェクト投資額 6,409 億円、「NEDO インサイド 70 製品」に対する今後 10 年間の累積売上額は 69.1 兆円であり、税収を式 (1) で試算すると、1 兆 291 億円の税収見込みがあることが試算された。売上から得られる将来 10 年間の税収が、プロ

ジェクト投資額を超えることが明らかとなった。

○70製品に対する国費支出額累計は約6,409億円

○法人所得課税：約69.1兆円×3.66% (税引き前利益率^{用語1})
×40.69% (法人実効税率)
=約1兆291億円……… (1)

なお、NEDO はこれまでの 30 年間に約 3 兆円の研究開発投資を行ってきており、上記の結果から、売上に寄与した 6409 億円に対して、残りの約 2.36 兆円の投資は人材育成や技術的波及効果はあるものの、売上に直接寄与しているかは、現在のところ把握できていない。現状では、約 3 兆円の投資に対して、今後 10 年間で 69.1 兆円の売上が期待できるという結論に至った。そのため、売上に繋がらなかった約 2.36 兆円の投資がいかに、その他の経済的なインパクトや社会的便益について寄与しているのかを検討することがさらに必要である。

3.3 雇用創出効果 (2010年、および2011~2020年の累計)

雇用創出効果については、直近売上と今後の累積売上予測額 (2011～2020年) をもとに、国内製造業の売上に対する人件費率と平均年収 (ともに 2004～2008 年度実績) から、それぞれ試算したところ、2010 年には年間 10.9 万人程度の雇用が創出され、2020 年までには年間 18.5 万人の雇用を生むことが明らかとなった (式 (2) および (3))。なお、実際には、同じ人材が継続的に雇用されることが想定されることから、2011 年以降は、約 7.6 万人の新規雇用が生み出されることに相当することになる (式 (4))。

○約4.08兆円×13.38% (売上高人件費率^{用語2}) ÷ 499万円

表3 「NEDO インサイド製品」に関する CO₂ 削減効果

カテゴリー	具体的な「NEDO インサイド製品」	CO ₂ 削減効果 ¹⁾ (トン-CO ₂ /年)
1. 市場創出の先駆者	【8 製品】・・・太陽光発電、家庭用ヒートポンプ給湯器、風力発電、家庭用燃料電池、移動体用蓄電池、ガスタービン、高出力二次電池、クリーンディーゼル乗用車	196,756,986
2. 国際競争力のプースター	【5 製品】・・・パワー半導体材料、ターボ冷凍機、自動車用無段変速機（ベルト CVD）、ピンチテクノロジーによる工場地域のエネルギー共有技術、高性能 LED 材料	37,443,907
3. 幅広い分野の底上げ	【1 製品】・・・産業用中型発電機	231,250
4. 環境・エネルギー問題解決への貢献	【14 製品】・・・廃棄物発電、高性能工業炉、低公害ハイブリッドディーゼル車、エコセメント、液中燃焼法フロン破壊、産業用ヒートポンプ、高性能・高機能真空断熱材、待機電力型デジタル複写機、サルファーフリー軽油、省エネ型建機、蓄熱輸送、地熱発電、廃棄物固形燃料、低燃費タイヤ	274,152,410
5. 安全・安心・快適生活の実現	【2 製品】・・・電子材料用絶縁材料、半導体製造用クリーニングガス	20,968,776
総計 (30 製品)		529,553,329

1) CO₂ 削減量は、2011～2020 年における機能発現、導入予測台数で、累積 CO₂ 削減量を試算

(平均収入) = 約10.9万人/年・・・・・・ (2)

○約69.1兆円×13.38 % (売上高人件費率^甲註2) ÷499万円

(平均収入) = 約185万人/10年・・・・ (3)

○18.5万人/年 (2011年以降の雇用増加分) -10.9万人/年 (2010年雇用) = 約7.6万人/年・・・・ (4)

3.4 「NEDOインサイド70製品」に関するCO₂削減効果

「NEDO インサイド 70 製品」のうち年間 100 万トンの CO₂ 削減効果が期待できる製品は 30 製品が該当するが、具体的には、太陽光発電、風力発電、家庭用ヒートポンプ、高効率ガスタービン、パワー半導体、LED 材料、廃棄物発電、フロン破壊、廃棄物固形燃料、半導体クリーンガス、高性能工業炉等であった。これらの製品による CO₂ 削減効果は、既存製品に置き換わった場合やフロン分解のように GWP (地球温暖化係数：Global Warming Potential) として CO₂ 換算で大きく温室効果ガスの削減に寄与する可能性がある。いずれの場合も、事業社、業界団体等、あるいは NEDO が対象となる「NEDO インサイド製品」に置き換わることを前提とした試算を行ったうえで、専門家からなる委員会等において精査して、CO₂ 削減量を推定した^{[17][18]}。その結果、これらの製品やプロセスによる今後 10 年間における CO₂ 削減効果は約 5.30 億トン/10 年となった (表 3)。なお、2012 年度の国内の CO₂ 排出量は 13.43 億トン/年であることから、年間で換算すると 3.94 % の削減に寄与することが明らかとなった。

4 「NEDOインサイド製品」に関する経済的インパクト

産業連関表の活用により、「NEDO インサイド製品」に関するサプライチェーンの上流・下流に及ぼす経済的な誘発効果を推計することができる。しかし、経済的な誘発効果を推計することができる「NEDO インサイド製品」は慎重

に選定する必要がある。この研究で示す経済的インパクトとは、当該製品に関する「直接売上」、および製品製造により、新たに誘発される売上による「一次経済的誘発効果」および雇用売上による「二次経済的誘発効果」のことであり、下記のように定義した。

<経済的インパクトの定義>

- ・「直接売上」：当該製品自体の売上額
- ・「一次経済的誘発効果」：当該製品を製造するのに不可欠な川上側の部品・材料
- ・「二次経済的誘発効果」：直接効果および一次誘発効果によって生じる雇用、消費

例えば、売上規模が小さく、産業連関表等の統計資料において存在感が非常に小さな製品は、推計上の誤差が大きくなり、誤った開発成果の広がり性を示すことになりかねない。このことを念頭に、具体的には、以下の条件を満たす製品やプロセスを試算対象とした。

4.1 経済的な誘発効果 (一次、二次) を推計対象とする要件

半導体産業や、自動車、エネルギー分野等では、複数の開発成果が活用されており、具体的には、素材、部品、製造装置、最終製品等、多岐にわたる。一方、一つの成果が及ぼす直接売上は限定的であり、当該産業における NEDO プロジェクトの開発成果の位置付け (部品、製造装置、機器、最終製品、代替製品等) は、直接売上と経済的な誘発効果の推計重複を防ぐためにも明確にしておく必要がある。以上から、本試算では「NEDO インサイド 70 製品」のうち、下記の経済的な誘発効果 (産業連関を活用した他産業での売上に関する波及効果) の推計対象とする条件を満たすものは表 4 に示す 20 製品が該当した。

- ・一定規模の売上があること (例えば、年間100億円以上)
- ・当該市場において一定程度普及・定着しており、経済的

な効果の広がりが期待できること

- ・既存製品・プロセスの付加価値向上ではなく、新規産業創出や革新的製品・プロセス変換が見込まれるもの
- ・統計上、製品・プロセスのカテゴリーにおいて一定の存在感を有していること

4.2 経済的な誘発効果に関する推計の検討

NEDO プロジェクトによる開発成果を活用した製品・プロセスは多岐にわたり、必ずしも同一の売上推計手法が適用できるとは限らない。そこで、「NEDO インサイド製品」の特性を整理したうえで、各々の製品やプロセスについてこの研究で推計すべき経済的誘発効果について検討した。下記に推計上の留意点と対応を記す。

①推計には産業連関表を用いるが産業連関表自体の調整は行わず、2005年版（全国108部門）を活用

②部品・素材と製造装置の位置付けの相違：

半導体産業分野におけるNEDOプロジェクトの開発成果については、素材や部品として市場に導入されているケースが多い。一方、製造装置で算出される経済的効果は製造装置（産業機械）の市場投入に係る直接売上である。そのため、半導体に関する推計では、素材・部品等の存在感が大きいことから、製造装置は直接売上（装置の売上）のみを検証し、素材・部品に関しては一次、二次の経済的誘発効果までを計上した。

③部品・素材と最終製品に係る誘発効果の重複：

自動車産業については、NEDOプロジェクトにおける開発成果が素材・部品、製造装置、最終製品（自動車）に活用されている。本試算では、自動車分野でNEDOプロジェクトが大きな役割を果たした最終製品（低公害ハイブリッドディーゼル車、クリーンディーゼル乗用車）のみを計上した。

④産業連関分析による二次誘発効果の取り扱い：

一次経済的誘発効果がサプライチェーン上の上流における経済効果を示す指標である一方、二次経済的誘発効果は、直接売上効果（NEDOプロジェクトによる開発成果を活用した製品、プロセスの売上）と一次経済的誘発効果によって生まれる雇用による消費を示す指標であり、特定産業への経済効果というよりも雇用拡大による経済の底上げという社会的効果として計上した。

⑤エネルギー分野における経済的効果の取り扱い：

蓄電池以外の各製品の共通点は、『エネルギーを生産する装置・機器』であり、再生可能エネルギーを供給するものと、従来エネルギーの省エネに繋がるものがある。特に、再生可能エネルギー関連装置（太陽光発電、風力発電、地熱発電）は、新規に市場を創出する製品群であり、サプライチェーンの上流市場に直接売上に及ぼした他

にも、売電収入の拡大、雇用の創出等多様な効果を発揮している。一方、再生可能エネルギー関連装置、ガスタービン、燃料電池は省エネ関連機器として既存の化石燃料の削減に繋がっている。

4.3 産業連関表分析における一次経済的誘発効果、二次経済的誘発効果の推算

「NEDO インサイド製品」製造に係わる産業への一次経済的誘発効果（産業連関による「NEDO インサイド製品」製造にかかる他産業での売上）については、太陽光発電であれば当該技術を用いたパネル製品の国内における売上に直接売上とし、そのパネル製品の生産に必要な中間製品ごとの需要額を産業連関表の中間投入係数等により推算し、それに自給率およびレオンチェフ逆行列を乗じることにより一次経済的誘発効果（生産誘発額）を推算した^[26]。さらに直接売上および一次経済的誘発効果から誘発される「雇用者所得増」を推算し、それに消費転換係数を乗じることにより「消費需要としての最終需要額」を推算した。それらの結果に「産業別民間消費支出」を乗じて産業別の消費需要額を推算し、それに自給率およびレオンチェフ逆行列を乗じることにより二次経済的誘発効果（産業連関による雇用拡大等に伴う効果額）を推算した。また、当該素材・部品が活用されている最終製品の市場規模については、NEDO が調査した産業系図の情報^{[27]、[30]}、および関係団体等の統計資料^[31]を活用して推算した。

4.4 半導体関連製品に関する一次経済的誘発効果と二次経済的誘発効果の推算

「NEDO インサイド製品」における半導体関連製品には半導体部品および半導体装置が含まれているが、4.2の②の理由から、対象となる半導体部品（半導体関連製品の中で一次、二次誘発効果が発生すると考えられる製品；携帯電話・スマートフォン、携帯ゲーム機、パソコン、ハードディスクドライブ装置、自動車等）に関する生産増加額は53,470（百万円／年）となった。それがすべて国内で供給されると仮定すると、直接売上は53,470（百万円／年）となる。それらの結果に投入係数（「部品（素材）」）を乗じて、直接売上から発生する中間投入財の生産額を37,936（百万円／年）と推算した。これらの中間投入財には海外から輸入されるものが含まれるため、各財の国内自給率を乗じて国内需要増加額（第1次）は32,331（百万円／年）と推算した。それらの結果に逆行列係数を乗じて、一次経済的誘発効果が64,133（百万円／年）と推算した。次に、直接売上からの雇用者所得増9,822（百万円／年）と一次経済的誘発効果からの雇用者所得増15,816（百万円／年）を足して雇用者所得誘発額（直接＋第1次）を推算し、それに消費転換率と消費パターンを乗じて家計消費支出増加

額 17,972 (百万円 / 年) を推算した。ここで消費されるものには、海外から輸入されるものが含まれるため、それに各財の国内自給率を乗じたうえで、逆行列係数を乗じて二次経済的誘発効果を 27,410 (百万円 / 年) と推算した。同様に 2011 年～2020 年の累計経済効果の広がりについても推算した (図 4-1、4-2)。また、他の各産業についても同様の形で経済的効果として、直接売上、一次経済的誘発効果、および二次経済的誘発効果を推算した。

4.5 「NEDOインサイド製品」に関する一次誘発効果と二次誘発効果の推算

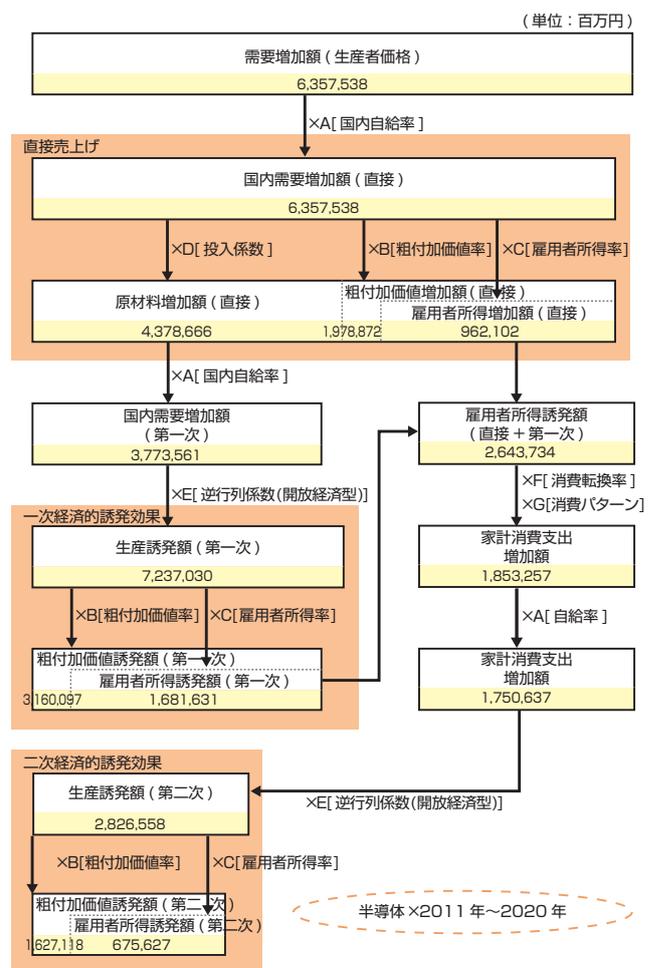
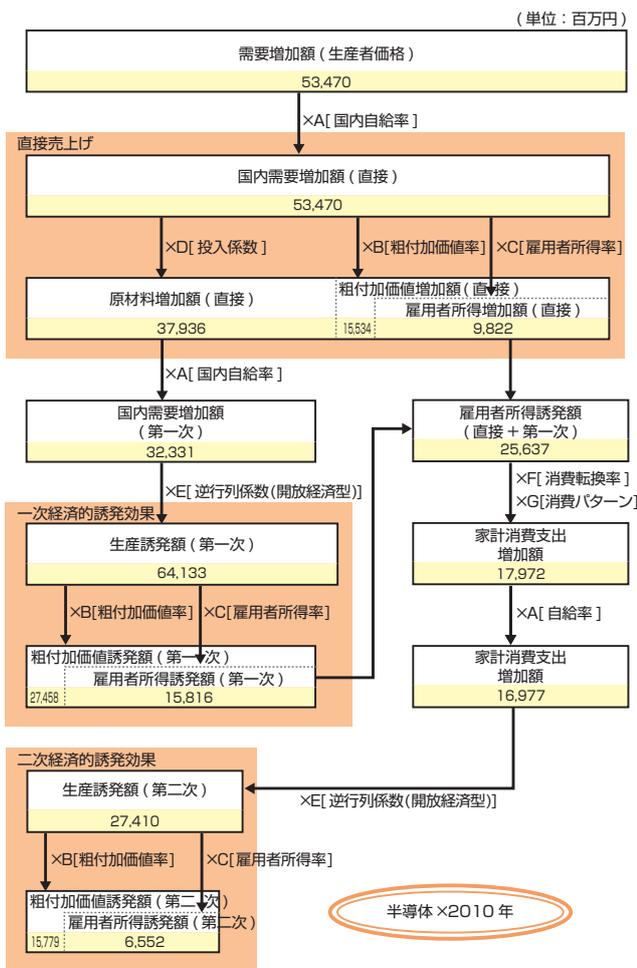
産業連関表の活用により、「NEDO インサイド製品」に関するサプライチェーンにおける上流・下流に及ぼす経済的誘発効果(一次、二次)を推計できる製品は 20 製品であり、具体的な産業分野としては、エネルギー、半導体、自動車、住宅に分類され 2011 年から 2020 年までの直接予想売上、経済的効果として、直接売上 (65.76 兆円)、一次経済的誘発効果 (62.1 兆円)、および二次経済的誘発効果 (24.76

兆円) を表 4 にまとめた。直接売上が大きいエネルギー関連製品が、経済的誘発効果でも大きいことが明らかとなった。なお、直接予想売上には、一次、二次誘発効果があるなしにかかわらず、すべての当該分野の製品予想売上を合算した。表 4 の結果から、エネルギーや住宅関連製品について二次経済的誘発効果(雇用への影響)の寄与が大きい理由は、他の製品に比べて、製造に伴う雇用以外に現地設置、運搬等に関与する雇用が上乘せられることによる。NEDO プロジェクトでは、製造業の雇用促進に繋がる研究開発が数多く行われているが、雇用効果の拡大を狙ったプロジェクトでは、現地設置、運搬等に関与する雇用まで広がるような製品開発として捕らえる必要がある。

5 「NEDOインサイド製品」に関する技術的波及効果

5.1 要素技術として技術的波及した「NEDOインサイド製品」

「NEDO インサイド製品」の中には、直接売上が少な



*需要増加額 (生産者価格) とは、一次誘発効果や二次誘発効果が発生する当該製品のための単年度売上げ及び将来売上げから試算

図 4-1 産業連関表を用いた経済波及効果フロー (半導体部品：2010 年)

図 4-2 産業連関表を用いた経済波及効果フロー (半導体部品：2011-20 年)

表4 「NEDO インサイド製品」に関する今後10年間の予想売上及び経済的誘発効果

(単位：億円)

分野	具体的な「NEDO インサイド製品」 ¹⁾	経済的な誘発効果(2011～2020年)		直接予想売上 ²⁾ (2011～2020年)
		一次誘発効果	二次誘発効果	
エネルギー	太陽光発電、風力発電、家庭用燃料電池、ガスタービン、廃棄物発電等	360,539	154,440	319,811
半導体	ダイボンド、MEMS、不揮発性メモリ、DRAM、電子材料用絶縁材料、パワー半導体材料等	72,370	28,266	72,058
自動車	製品：低公害ハイブリッドディーゼル車、クリーンディーゼル乗用車 部品：サルファーフリー軽油用脱硫触媒、サルファーフリー軽油	68,406	17,488	162,404
住宅	真空断熱材、家庭用燃料電池、家庭用ヒートポンプ等	119,670	47,358	103,358
	総計	620,985	247,552	657,632

1) 「NEDO インサイド 70 製品」のうち副次的誘発効果は 20 製品が該当

2) 一次、二次誘発効果があるなしにかかわらず、当該分野の全ての製品に関する総額を試算

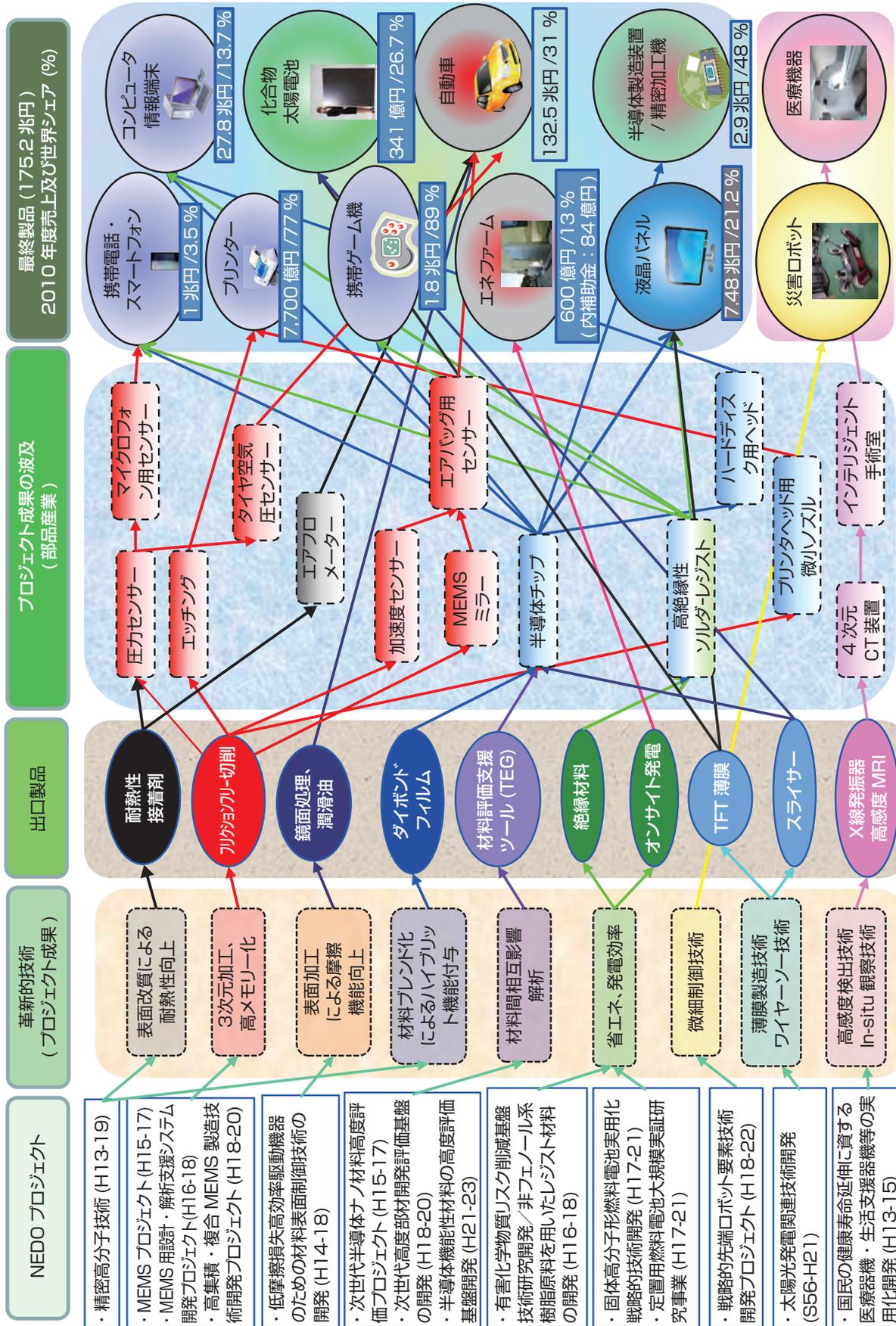
いものの、既存の製品の改良に大きく貢献した部品・部材、加工技術、中間製品がある。2000年以降に実施したNEDOプロジェクトから生まれた高機能な部品、加工プロセスの中で、技術的波及効果が大きかった「NEDO インサイド製品」に関するプロジェクトから製品への流れ、2010年度における国内売上および世界シェアを図5に示す。新エネルギーや環境関連のように開発期間が長い製品やプロセスに比べて、製品の寿命が短く、汎用性が高い高機能性部品や中間製品がさまざまな産業(自動車、コンピューター関連製品、家電等)への技術的波及効果となって急速に広がっている。各企業へのヒアリングでも、開発に費用と時間が掛かる革新的な大型装置やプロセス等の開発よりも、短期間で、開発費用が抑えられる高機能性部品や中間製品への研究開発へシフトしており、他の最終製品への技術的波及効果も大きいことが明らかとなった。その結果、関連する製品への売上効果は175.2兆円程度まで拡大していることが試算された^{[14][16][31]}。太陽光発電、ガスタービン、高性能工業炉、家庭用燃料電池等の最終製品は、売上が容易に試算することができるが、部品・部材、加工技術、中間製品等は、どのような最終製品に組み込まれているか、企業の研究者、業界団体等の有識者からのヒアリングやさまざまな情報ソース等によって推定することになる。例えば、NEDOプロジェクトにおいて開発された要素技術(MEMS、多層化フィルム、微細レーザー加工、In-Situ観察技術等)が後に、機能性中間製品(圧力センサー、加速度センサー、マイクロフォン等)の製造に寄与しており、さらにサプライチェーンの形でさまざまな最終製品(自動車、携帯電話、ゲーム機等)へと組み込まれていることが明らかとなった。また、「NEDO インサイド製品」に含まれる高性能中間製品の中には、他の「NEDO インサイド製品」との組み合わせによって、より高機能化、低コスト化、

省エネ化を実現し、国内の有力な基幹産業における重要な最終製品へと組み込まれていることが明らかとなった。

5.2 社会的便益が大きい「NEDOインサイド製品」

「NEDO インサイド製品」の中には、直接売上が少ないものの、社会的便益が大きい製品がある。特に、環境関連や省エネルギー関連製品については、CO₂削減やリサイクル(資源循環、埋め立て処分場の削減寄与)等が該当する。CO₂削減効果が大きな「NEDO インサイド製品」としては、フロン破壊プロセスがある。空調用のフロン冷媒を製造する段階で副生されるGWP(地球温暖化係数)が大きいHFC-23(トリフルオロメタン)を無害化できるプロセスが典型的な事例であり、国内に14基、海外で8基以上が稼働しており、国内では700万トンのCO₂換算/年削減に寄与しており、2010年には、COP3(京都議定書：気候変動枠組条約第3回締約国会議)の目標達成に大きく貢献した。

一方、社会システムの構築に大きく貢献した事例としてリサイクル技術の開発がある。NEDOプロジェクトの中で100テーマ以上の研究開発が行われ^{[16][18]}、その開発成果は、規制と相まって、我が国の廃棄物処分場の逼迫、有害物質の抑制、省資源といった社会的な課題の解決に大きく貢献した。図6に、リサイクル技術に関する技術体系を示す。リサイクルが十分でない時代には、空き瓶や新聞紙の回収、リユースが中心に行われていたが、NEDOプロジェクトの中でさまざまな材料や資源に関するリサイクル技術に関する基礎的、実用的な研究開発が行われ、技術の進展、処理能力の向上により、低コストが実現し、さまざまな廃棄物や半製品(混合物)へと波及し、リサイクル率向上へと繋がった。さらに、LCA(Life Cycle Assessment)やDfE(Design for Environment：環境配慮設計)などのソフト技術が発展することにより、のちにリサイクルしやすい製品の開発などソフト技術とハード技術の良い連鎖が起こることに繋がっ



*(第1期および第2期中計プロジェクトで、第2期中計中に確認された「NEDO インサイド製品」から作成)

図5 NEDO プロジェクトから生まれた革新的技術と中長期アウトカム (技術的波及効果)

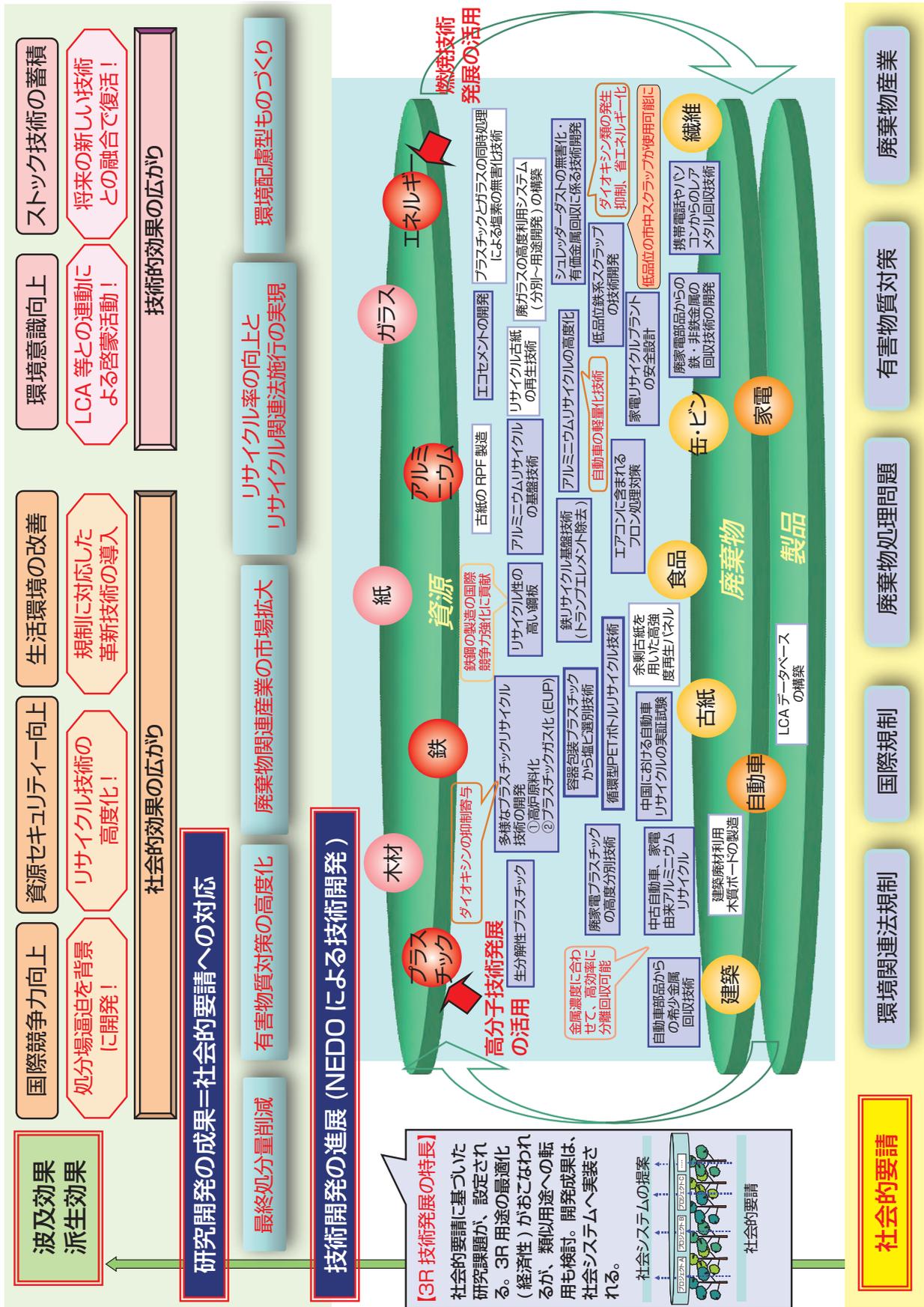


図 6 「NEDO プロジェクト」とリサイクルシステムの関連

ていった。リサイクル技術の開発の中で、特に社会的便益が大きい事例として、“白物家電4製品（テレビ、クーラー、洗濯機、冷蔵庫）のリサイクルプラント”、“廃プラスチックの再資源化（高炉吹き込み、油化、RPF（Refuse Paper & Plastic Fuel：廃棄物固形燃料））”等がある。白物家電のリサイクルについては、自動車リサイクルとは異なり、製造事業社が自主的にリサイクルしなければいけないことが法律によって決められたため、業界が一体となって、経済的なリサイクルシステムを開発しなければならないことになった。そのため、それぞれの家電製造事業社が得意とする装置開発を担当、企業間の利害関係を乗り越えて、短期間で各社が最適な処理装置を開発し、その成果を実証、長時間連続運転を通じてシステム化させ、現在、国内で49箇所、年間処理量931千トンのリサイクルに大きく貢献していることが、事業社ヒアリングにより明らかとなった。この開発の中で、もっとも重要な要素技術は、“分別技術”であった。現在のリサイクルシステムが導入される以前は、自治体による廃棄物処分が行われていたため、廃製品の多くが裁断処理後、埋め立て処分されていたが、NEDOプロジェクトによって高度な分別技術が開発されたことにより、有用物の大部分を低コスト、効率的に回収することが可能となり、飛躍的にリサイクル率が向上することとなった。

一方、廃プラスチックの処理に関しては、当初、新しい技術が開発されるまでは埋め立て処分によって対応していたが、廃棄物処分場の逼迫、コスト高、燃焼に伴うダイオキシン発生の問題等、さまざまな社会問題を引き起こした。その後、LCAや精緻な経済性評価が行われることにより、サーマルリサイクルの形で熱エネルギー（一部は電気エネルギー）として回収することが、経済的に有利になることが明らかとなり、その後の処理では安全な焼却処理（排ガス処理）が行われるようになり、90%以上のリサイクル率（燃焼に伴う発電およびサーマルリサイクル）の向上に繋がっていった。一方、廃プラスチックの再資源化（油化等）については、法律の改定、ニーズのマッチング（素性が判った廃棄物、安定した廃棄物量、有償の引き取り手が存在する等）が十分対応できるケースについては、システムとして実用化できたが^{[16][18]}、多くの研究開発では、技術的には成功したものの、廃棄物が十分集まらない、人件費や輸送によるコスト高の問題で、多くの研究開発が中止、中断することになった。

1990年代にNEDOプロジェクトにおいて開発された装置やプロセスの開発においても、さまざまな失敗を繰り返しながらも、早期の実用化を目指して官民一体で研究開発に取り組んでいた。一方で、廃棄物のリサイクル処理費用を誰が負担するのか、という大きな社会問題が起きていた。その理由として、廃棄物処理にできる限り費用を掛けたくないとい

うのが世の中の大勢を占めており、研究開発ばかりでなく、リサイクルに対する強い意識転換が求められた。このような社会状況から、NEDOにはさまざまな情報が集まり、技術開発への戦略作りが行われたことで、新しい開発方針や他の研究開発へのヒントが獲得でき、無駄な研究開発を行わなくて済んだ等、当事者ばかりでなく、さまざまな開発者に対して良い影響（無駄な投資、時間、人材投入等）を与えていたことが、事業社ヒアリングから明らかとなっている。

6 「NEDOインサイド製品」拡充に向けた今後の課題

「NEDO インサイド製品」に関する調査、分析結果から、今後、該当製品の拡大に向けて、以下の課題が明らかとなった。いずれの観点も、この研究を行っている段階で、特に気になった観点と対策をまとめた^{[17][18]}。

(1) 「NEDO インサイド候補製品」の探索

NEDOが発足してから30年以上経過していることから、今回は開発成果が挙がっていると思われる過去のプロジェクトから生まれたと考えられる有望な製品やプロセスを任意に列挙して、文献調査、報告書の精査、関係者からのヒアリングなど、非効率な調査を行ってきた。これらの経験から、網羅的かつ効率的に「NEDO インサイド製品」を探索する手段として、NEDOが行っている追跡調査の最終回答（追跡調査6年経過時点）から、さらに5年、10年、20年と経過したすべてのプロジェクトに対して、現在の上市状況を確認するアンケート調査を実施する方法などが考えられる。また、NEDOプロジェクトの開発成果に関するデータベース構築、企業退職者へのヒアリング拡大など、開発成果の把握が拡大できる国レベルのシステムの整備が急がれる。

(2) 古いプロジェクトの開発成果に係る情報収集の困難さ

70～80年代に開発をスタートしたNEDOプロジェクトにおける古い開発成果については、当時のプロジェクトの位置付け、その後の製品市場導入までの動き、技術発展の経緯について、正確に情報収集することは非常に困難であった。対策としては、まずは、30年以上前の研究開発テーマに対する現状における市場の評価を確認する必要がある。そのうえで、当該分野のキーパーソンや、当時のプロジェクト担当者からヒアリングを行い、その結果を整理し、過去の“研究開発遺産”として記録し、今日の技術力の源泉がどのように育ってきたかを分析することが重要である^{[32][36]}。

(3) 売上推計に対する厳正な評価

今回、推計した市場規模・将来展望をもとに、NEDOプロジェクト参加者に対してアンケート調査を実施し、数値の確認・修正を行った。しかし、“どの範囲をNEDOインサイドと認識するか”に関しては個人差が生じてしまう。市場規模等の推計についてもNEDOが独自で実施すると範囲や手

法に都合が良い推計になってしまう可能性がある。今回のように、NEDO が厳格に試算、貢献度に関する評価をしたうえで、妥当性については、NEDO プロジェクト従事者ではなく、NEDO プロジェクトに関連した経緯を持つ学識経験者(例えば PL: Project Leader)、学会会長経験者) や業界団体関係者等に精査、チェックしてもらうことで厳密性を確保できる可能性が高い。

(4) 売上効果以外の効果に関する定量化の問題点

今回は、直近売上や将来売上見込額をもとに「NEDO インサイド製品」の絞り込みを行った。NEDO プロジェクトの開発成果には多様な効果があり、売上以上に評価すべき観点もある。例えば、生活の向上、幸福の実現等の視点から、評価を試みたが、直接的な売上に比べて、便益を同軸で評価することは個人差があるため難しく、売上と同じように比較ができる新たな手段を考える必要がある^[18]。定量化が難しい「NEDO インサイド製品」は、定性的に示すことも可能となるが、NEDO プロジェクトのように多分野、他企業の成果を整理しようとすると、総花的になってしまい、インパクト(効果、便益等)が薄らいでしまうことになる。分野別、カテゴリー別等にして、誰にでも判るように、過去の製品と比べる工夫など、提示の仕方を考える必要がある。

7 まとめ

「NEDO インサイド製品」について、NEDO プロジェクト参加者、業界団体等の関係者へのアンケート、ヒアリングを実施して、特に、経済的インパクト(売上、経済的誘発効果)が大きい、あるいは社会的貢献が大きい観点からトップ 70 製品を選定した。「NEDO インサイド製品」で取り上げられる製品については、市場での価格の低下、売上数の変動など、数年単位で大きく入れ替わっており、継続的に売上、

波及効果等を見直していく必要がある。いずれの製品も、NEDO プロジェクトが終了してから、各社において実用化、事業化のための研究開発、資本投資が継続的に行われてきた結果である。開発成果の実用化、事業化のためには、企業において、NEDO の R&D 投資の 10 倍以上の投資が必要であることは十分理解しているが、実際の投資額の情報を入手できないため、今回の試算では、実際の売上における事業投資に関しては、考慮していない。いずれの場合も革新的な研究開発に基づく実用化、製品化には、10 年、20 年以上の歳月を要することを忘れてはならない^[24]。このことは、長期的な研究投資により他が真似できないオンリーワンの技術を醸成するばかりでなく、普通の研究者をリーダー格まで成長させ、将来の先行投資に繋がることが多いということを意味している。

今回、NEDO プロジェクトの開発成果による売上への寄与率を 100 % という仮定の下で試算することで、最大値の売上、研究開発成果の寄与を示すことができた。また、開発成果の大まかな傾向、実用化にキーとなる観点(産官学連携の有効性、マネジメントの成功要因: 2.8 参照、規制対応、失敗の克服等)を知ることができた。さらに総合的なインパクトとして、売上以外に、経済的誘発効果、社会的便益(CO₂削減効果、省エネ効果、雇用創出効果)等を検討することにより、これまで NEDO が投入した開発投資に関する開発成果を大まかに評価することができた。

NEDO プロジェクトがスタートして、30 年、開発予算として約 3 兆円を投入している。今回の試算では、一部の有望な製品のみの上の実績で試算しており、試算対象製品以外のプロジェクトの中で得られた波及効果やノウハウの活用によるインパクト効果、社会的便益は、一切含まれていない。図 7 に、「NEDO インサイド製品」における経

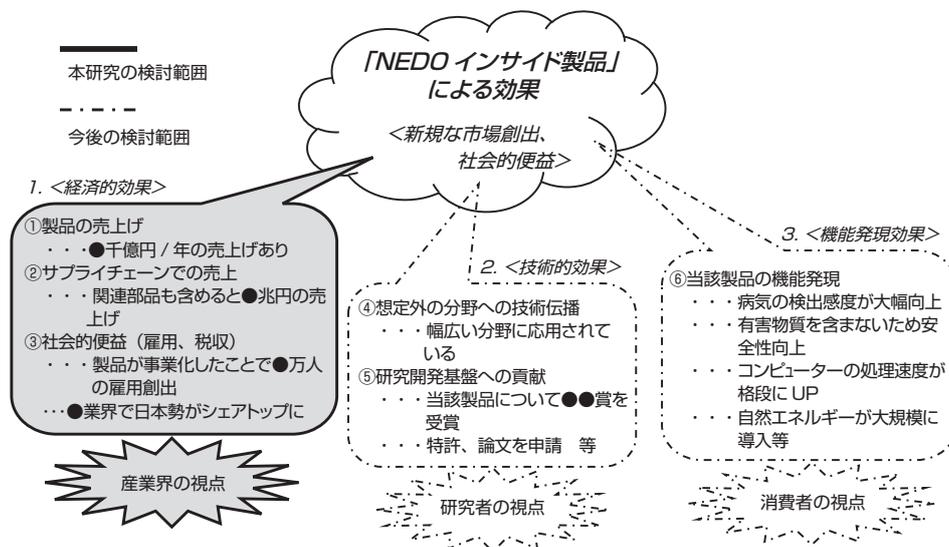


図 7 「NEDO インサイド製品」に関する波及効果

済的効果、技術的効果、機能発現効果のイメージを示す。産業界の視点は製品の売上や雇用創出等に伴う経済的効果であり、研究者の視点は論文投稿や特許出願、受賞歴等の技術的効果に期待している。一方、消費者の視点は生活向上、安心・安全といった社会的便益としての視점에重きが置かれている。この研究では、「NEDO インサイド製品」における経済的効果、社会的便益といった観点から、総合的なインパクト評価に取り組んだ。経済性についてはある程度の定量的な評価ができるものの、社会的便益に関しては、CO₂削減効果や雇用創出効果のように定量化できるものと、生活の向上や便利といった定量化が難しいものがある。今後は、生活の向上、社会インフラ、投資削減、利便性向上、安心・安全、健康保持等の機能発現について、追加的に調査を行いながら、本インパクト評価手法の改善を図っていく必要がある。また、NEDO インサイド製品に関する知的財産について調査中であり、まとめ次第、論文投稿する予定である。

謝辞

この研究を実施するにあたり、御園生誠東京大学名誉教授、三菱総合研究所（高島由布子主任研究員、土谷和之主任研究員、圓井道也研究員、今村治世研究員）、NEDO プロジェクトに参加した関係各社等から貴重なアドバイスを、サポートをいただいた。ここに、深く感謝申し上げます。

用語の説明

用語1：税引き前の利益率：財務省「法人企業統計」^[28]より、製造業における税引きの前当期純利益を売上高で除したものの（2004～2008年度実績の平均値）。また、開発費の投入に対する税収の試算（2011～2020年の累計）は税引き前の利益率（2004～2008年度実績：国内の製造業平均値）を用いて試算した。

用語2：売上高人件費率：財務省「法人企業統計」^[28]より製造業の値を算出したもの（2004～2008年度実績の平均値）。平均収入は、国税庁「民間給与実態調査」より製造業（化学工業、金属機械工業、繊維工業、その他の製造業を合計）の平均給与額を算出したもの（2004～2008年実績の平均値）。

参考文献

- [1] 塩谷洋樹, 安松直人, 篠田佳彦, 小野清: FBRサイクル研究開発に関する投資対効果評価手法の開発, *サイクル機構技報*, 16, 93-104 (2002).
- [2] 柳沢和章: 核エネルギーの持つ価値の評価, *研究計画学会講演要旨集*, 27, 2F26 (2012).
- [3] 木村幸: 国プロはどのように技術の実用化を生み出すのか - 熱エネルギー分野における省エネ技術開発プログラムの

- 事例分析 - , *電力中央研究所報告*, Y07040 (2008).
- [4] 中山智弘, 田中一宣: 研究開発投資の費用対効果の定量的検討: 重点4分野の比較と国際比較, *研究計画学会講演要旨集*: 2G13, 25, 848-852 (2010).
- [5] 長岡貞男, 江藤学, 内藤祐介, 塚田尚稔: NEDOプロジェクトから見たイノベーション過程, *経済研究*, 62 (3), 253-269 (2011).
- [6] 青島矢一, 松嶋一成, 江藤学: 公的支援R&Dの事業化成果: NEDO研究プロジェクトの追跡調査研究, *日本企業研究のフロンティア*, 有斐閣, 7, 73-87 (2011).
- [7] 松嶋一成: 公的支援による民間の研究開発活動への影響, *日本企業研究のフロンティア*, 7, 99-111 (2011).
- [8] 安永裕幸, 工藤祥裕: 政府研究開発プロジェクトの費用対効果分析手法に関する一考察: 電子・情報分野のNEDO研究開発プロジェクトにおける実例分析, *研究計画学会講演要旨集*, 19, 218-221 (2004).
- [9] K. Kohmoto, J. Yoshida and M. Kishioka: Research on cost-benefit analysis of additionality of public R&D investment: Japan's photovoltaic power R&D projects, *Research Evaluation*, 18 (5), 397-404 (2013).
- [10] 弓取修二, 矢野貴久, 若林節子, 幸本和明: 公的資金による研究開発プロジェクトのアウトカム調査手法に関する検討, *研究・技術計画学会講演要旨集*: 1C17, 21 (1) 127-130 (2006).
- [11] R. Ruegg and G. B. Jordan: Guide for Conducting Benefit-Cost Evaluation of Realized Impacts of Public R&D Programs, Revised working draft, U.S. Department of Energy, (2011), http://www1.eere.energy.gov/analysis/pdfs/eere_b-c_guide_2011.pdf, Accessed 2014-07-25.
- [12] 真鍋洋介, 山下勝, 宍戸沙夜香, 福井和生, 吉田准一, 吉村大輔, 竹下満: NEDOプロジェクトにおける費用対効果に関する一考察 - 「NEDOインサイド製品」に関する調査結果の概要 -, *研究・技術計画学会講演要旨集*: 2B15, 25, 391-394 (2010).
- [13] 萬木慶子, 山下勝, 竹下満: NEDOプロジェクトから生まれた「NEDOインサイド製品」に関する経済性効果と社会的便益に関する研究, *研究・技術計画学会講演要旨集*: 2F28, 27, 685-688 (2012).
- [14] 萬木慶子, 山下勝, 木村紀子, 竹下満: NEDOプロジェクトから生まれた「NEDOインサイド70製品」に関するインパクト評価に関する研究, *研究・技術計画学会講演要旨集*: 1E07, 28, 173-177 (2013).
- [15] NEDO: 身近なところにNEDO技術(NEDOインサイド製品), http://www.nedo.go.jp/shortcut_result.html, 閲覧日 2014-08-10.
- [16] 萬木慶子, 山下勝, 竹下満: 中長期NEDOプロジェクトから生み出されるNEDOインサイド製品に関する分析, *研究・技術計画学会講演要旨集*, 26, 790-793 (2011).
- [17] 三菱総合研究所: NEDOプロジェクトから生まれた製品、NEDOインサイドに関する俯瞰調査, *平成23年度成果報告書*, NEDO, (2014).
- [18] 三菱総合研究所: NEDOプロジェクトから生まれた製品、NEDOインサイドに関する体系化調査, *平成24年度成果報告書*, NEDO, (2013).
- [19] 内閣官房: コスト検証委員会報告書 (平成23年12月19日), <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20111221/hokoku.pdf>, 閲覧日2014-08-10.
- [20] 経済産業省: 工業統計調査, <http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/>, 閲覧日2014-08-10.
- [21] 環境省: 再生可能エネルギー普及に要する費用と普及がもたらす具体的な効果, https://funtoshare.env.go.jp/roadmap/media/h21_2/ref07.pdf, 閲覧日2014-08-25.
- [22] 経済産業省資源エネルギー庁省エネルギー・新エネルギー部: 第14回買取制度小委員会説明資料(平成23年度における太陽光発電買取価格について), <http://www.meti.go.jp/>

- committee/summary/0004601/013_02_00.pdf, 閲覧日2014-08-25.
- [23] 冷凍空調機器の国内出荷実績、冷凍空調機器の中期需給予測(日本冷凍空調工業会), <http://www.jraia.or.jp/statistic/index.html>, 閲覧日2014-08-25.
- [24] M. Yamashita, Y. Yurugi, S. Shishido, T. Yoshida and M. Takeshita: Impact evaluation of Japanese public investment to overcome market failure review of the top 50 NEDO Inside Products, *Research Evaluation*, 22 (5), 316-336 (2013).
- [25] NEDO成果報告書データベース: http://www.nedo.go.jp/library/database_index.html, 閲覧日2014-09-04.
- [26] NEDO: NEDOの取り組みの見える化に係る手法の調査:(1)客観的事実関係の整理によるNEDO取り組みの見える化(2)NEDOプロ成果活用製品・プロセスの売上推計による見える化, 平成25年度成果報告書, (2014).
- [27] 財務省: 法人企業統計, <http://www.mof.go.jp/pri/reference/ssc/>, 閲覧日2014-09-04.
- [28] 富士キメラ総研: 2011 MEMS関連市場総調査 (2010).
- [29] マイクロマシンセンター: 調査研究ミニレポート (2012), <http://mmc.la.coocan.jp/research/market/>, 閲覧日2014-09-04.
- [30] Yole Développement: Top 30 MEMS companies 2012 – Fast growing consumer markets continue to shake up MEMS sector, *MEMS industry report*, (2012).
- [31] 富士キメラ総研: 平成22年度産業技術調査事業「日本企業の国際競争力ポジションの定量的調査」, 経済産業省, (2011).
- [32] S. Shishido, M. Yamashita, J. Yoshida and M. Takeshita: Research on derivative effects created by Japanese national R&D projects, *Research Evaluation*, 21 (5), 344-353 (2012).
- [33] 資源総合システム: 太陽光発電システム及びその関連技術に係るアウトカム調査, 平成18年度成果報告書, NEDO, (2006).
- [34] NEDO編: スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム8年間の研究開発の成果, (1993).
- [35] 日本工業炉協会: 高性能工業炉に係るアウトカム調査報告書, NEDO, (2011).
- [36] NEDO: 国際エネルギー消費効率化等モデル事業, 成果報告書, http://www.nedo.go.jp/activities/AT1_00175.html, 閲覧日2014-09-04.

執筆者略歴

山下 勝 (やました まさる)

1991年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(工学博士)、同年4月同大工学部助手(工業物理化学)、1994年NEDO入構、水素・アルコール・バイオマス開発室、省エネルギー開発室、東京大学工学部助教授、大阪大学工学部 / 東邦大学理学部非常勤講師、環境技術開発室、評価部等を経て、技術戦略研究センター主任研究員。この論文では、NEDO インサイド製品候補の探索および体系化、経済性評価試算(売上、将来売上、派生売上等)、リサイクル技術の体系化事例研究の部分を担当。

萬木 慶子 (ゆるぎ よしこ)

1996年NEDO入構、太陽技術開発室、国連大学、NEDO パンク事務所、広報部、評価部等を経て、ロボット・機械システム部主査。この論文では、NEDO インサイド製品候補の探索および体系化、経済性評価試算(売上、将来売上等)、リサイクル技術の体系化に関する研究の部分を担当。

木村 紀子 (きむら のりこ)

1994年NEDO入構、アルコール事業本部、研究開発業務部、産業技術開発室、機械システム技術開発部、バイオテクノロジー・医療

技術開発部、評価部等を経て、ロボット・機械システム部主査。この論文では、NEDO インサイド製品候補に関する経済性評価試算(派生売上等)、リサイクル技術に関する事例研究の部分を担当。

宍戸 沙夜香 (ししど さやか)

2007年NEDO入構、燃料電池・水素技術開発部、評価部等を経て、スマートコミュニティ部主任。この論文では、NEDO インサイド製品候補(環境、エネルギー分野)の探索および経済性試算に関する研究を担当。

吉田 朋央 (よしだ ともなが)

2006年NEDO入構、ナノテクノロジー・材料技術開発部、企画調整部、総務企画部、評価部等を経て、プロジェクトマネジメント室主査(工学博士)。この論文では、NEDO インサイド製品候補(産業技術分野)の探索および経済性試算に関する研究を担当。

一色 俊之 (いっしき としゆき)

2010年NEDO入構、電子・情報技術開発部、電子・材料・ナノテクノロジー部を経て、評価部主任(理学博士)。この論文では、NEDO インサイド製品候補(産業技術分野)の探索および経済性試算に関する研究を担当。

竹下 満 (たけした みつる)

1984年3月広島大学理学部大学院化学専攻修了。同年NEDO入構、シドニー事務所長、材料・ナノテクノロジー室主任研究員、バイオテクノロジー・医療技術部統括研究員、評価部長を経て、プロジェクトマネジメント室長兼特命審議役。この論文では、NEDO インサイドに関する概念の提示、NEDO インサイド製品候補の探索、製品候補の試算に関する研究の部分を担当。

査読者との議論

コメント1 全体 (景山 晃: 産業技術総合研究所イノベーション推進本部、小林 直人: 早稲田大学研究戦略センター)

国の予算を投入した研究開発に対して費用対効果(投資効果)を算出し、公開することが社会的要請となっているが、その方法論が確立されていない中で、NEDO プロジェクトの中で実用化、製品化に成功し、大きな売上げを上げている70製品を抽出し、費用対効果を論じた貴重な論文である。特に、開発成果に関する効果については当該製品の売上効果だけでなく、経済的な誘発効果、雇用創出効果、他の技術への波及効果、CO₂排出削減効果等の社会的便益までを含めた総合的な解析と考察を行った結果が述べられている。また、NEDO インサイド製品の成功要因を抽出して示したことを含め、今後の国の研究開発政策・イノベーション政策に対して機知に富んだ示唆を与えることが期待でき極めて重要である。

議論1 論文の位置付け

コメント (鷲津 明由: 早稲田大学社会科学総合学術院)

科学技術予算の費用対効果を明示することが社会的要請となっている一方で、特定の予算が、どれだけの特定の具体的な成果に結び付いたのかを明らかにすることは一般的には難しい。しかし、この研究はNEDOという組織であればこそ可能であった調査研究の成果を踏まえてそれらを明らかにしており、貴重な学術的成果であると評価することができます。

コメント (景山 晃)

具体的にはNEDOの研究開発プロジェクトとして取り組んだテーマから70製品を抽出し、費用(投資)対効果を論じた貴重な論文です。特に、効果については当該製品の売上げ効果だけでなく、経済的な誘発・波及効果、雇用創出効果、CO₂の排出削減等の社会的便益までを含めた総合的な解析と考察を行った点に特長がありま

す。時間の経過や技術的波及効果の連関線が増えて複雑化し、調査・解析が難しくなるとは思います。従来、暗黙知とされていたことを形式知に変えていく努力（挑戦といってもよい）は、NEDO プロジェクトに関する説明責任として NEDO および産業界双方で不可欠なことですので、NEDO がリーダーシップを取って評価システムの一つとして定着していくことを期待します。さらに査読者との議論を経て、NEDO インサイド製品の成功要因を抽出して示したことは、今後の研究開発プロジェクトの運営マネジメントに重要な示唆を与えるもので、研究開発の方法論（Methodology）としても有益な論文と考えられます。

コメント（小林 直人）

この論文により研究開発への国の投資の有効性を検討する際の非常に有用な例示ができたものと思います。今後は、NEDO のプロジェクトを遂行するに際して、各推進主体が予め十分調査・蓄積するための方法論を用意しておくことが今後の国の研究開発政策・イノベーション政策にとって極めて重要だと思います。

コメント（鷲津 明由）

また、この研究は NEDO プロジェクトで開発された個別的科学技術が相互にどのように関連し、最終的にどのような製品に結実したかについて、その経路を詳しく追跡調査した結果がまとめられており、これはシンセシオロジーの分析課題に極めて合致していると考えます。

回答（山下 勝）

NEDO プロジェクトが国費を使っている限り開発成果を定量的に示すことがいかに重要かと考え、今回、その効用を示すきっかけになればと論文を投稿させていただきました。このような機会をいただき、関係者の方々には大変感謝する次第です。数年前にアメリカ評価学会で口頭発表した際、各国の専門家より高い評価をいただきましたので、昨年、アメリカ評価学会誌（Research Evaluation）に投稿いたしました。その後、改めて新しい角度から調査、研究を行ってオリジナル性の高い論文とし、シンセシオロジー誌に投稿させていただくことになりました。この度は、査読者の皆さま方の貴重なご意見を本投稿論文に反映させていただいたことで、NEDO インサイド製品の成功要因をある程度明確に抽出して示すことができ、完成度が高い論文に仕上がったと考えております。これまで、NEDO では、プロジェクト成果に関する外部への説明が定性的に留まっておりましたが、今回は、半定量的な評価や目に見えない成果を見せるなど、チャレンジングな検討を行って、完成度を高めることができました。

この論文のような活動は、中長期に渡って地道に続けていくことが重要であり、今後も、継続的に数値の見直しや新たな方向性を探っていきつつ、追跡調査を行っていくことが重要と改めて考えております。さらに、この論文の結果を活用して、NEDO 内におけるマネジメントの効率化が図れるシステムが構築できればと強く感じております。また、本調査の中では、新しい発見が見出すことが多々ありました。ぜひ、国内の多くの研究者の方々や経営者の方々に読んでいただき、NEDO プロジェクトや各企業、大学の研究開発でも成功するための新しいヒントや指針になるよう積極的に情報発信していこうと考えております。

議論2 論文の構成について

コメント（小林 直人）

この論文の目標は、「国費で賄われた NEDO プロジェクト開発成果の社会的便益の評価」だと思います。それに向けて大きな二つの要素が、(1)「NEDO インサイド製品」の抽出と、(2)「NEDO インサイド製品」の社会的便益評価、だと思います。また(1)のサブ要素として、「NEDO インサイド製品」の定義、選定方法、絞り込み等の方法論が、(2)のサブ要素として経済性評価、雇用創出効果の評価、CO₂削減効果評価、波及効果予測等が、あると思われます。こ

れらを構成図にして1章の末尾に示してこの研究における構成的考え方を明示してはいかがでしょうか。

回答（山下 勝）

大変貴重なアドバイスをありがとうございます。新たに1章の末尾に、この論文の全体が分かるイメージ図として図1を追加いたしました。

議論3 カテゴリー分類と産業連関分析について

質問・コメント（鷲津 明由）

製品の 카테고리 分類について既存の分類では不適であったため、新しい分類カテゴリーを定義しています。分類は分析の基礎となり、非常に重要と考えられますので、なぜ、このような分類に至ったのかをもう少し詳しく（先行文献等も参照しながら）論ずる必要があるように感じます。一般的にはイノベーションはプロダクトイノベーションとプロセスイノベーションに大別されます。多分前者は、今までにはない商品の出現と既存商品の改良に分けられるかもしれませんが。また後者は、製造装置のイノベーションと製品に体化される材料開発に分類されるかもしれません。こうした分類は、後のイノベーションがもたらす社会効果の性質の考察にもつながると思うので、ぜひ詳しく論じていただければと思います。

産業連関分析は直接効果に対する間接効果を計算するための手法として用いられており、この論文の使い方も産業連関のオーソドックスな使い方です。

しかし、産業連関表はその創始者である Leontief が指摘する通り、技術の変化を投入係数の変化としてとらえることにより、技術変化の効果を変換するための手法として考えられています。また最近では工学分野のライフサイクルアセスメントの分析手法にも応用され、環境影響や CO₂ の波及効果分析がなされるようになりました。せっかく産業連関分析をするならば、今後はぜひ、このような考察もお願いしたいというのが希望です。イノベーションが投入係数にどう反映されるのか、といった情報は一般にはなかなか手に行きませんが、NEDO という組織であればそれができるはずだと思います。今後の課題として、NEDO のプロジェクト評価事業の一環として、ぜひ、こうした展開の方向性について考えていただくことを希望します。また、なぜ、図4のような計算方法を選択したのか、既往文献等にも言及しながら、説明があった方がよいように思います。

回答（山下 勝）

貴重なご指摘をありがとうございます。この論文では NEDO インサイド製品が社会へ与えるインパクトを効果的に示す必要があると考えました。NEDO のミッションとして、環境・エネルギー、産業技術の強化といった観点で、国家プロジェクトを推進している立場から、前回の論文では、①市場の先駆者、②国際競争力、③基礎基盤による底上げ、④社会課題への対応と分類しましたが、NEDO の設立趣旨もあり、④項が半分以上を占めていました。そこで、各技術を精緻に分析したところ、社会的な要請と我々の身近な課題とにより分類する方が、わかりやすいと考え、外部専門家との意見交換を交えて、④項を「資源・エネルギー課題解決」と「安心安全、快適生活の実現」と再分類（合計5分類）することに致しました。この経緯を2.6に詳細に記載しました。

産業連関分析について今回の論文では、スペースの関係で記載することが難しいため、関係する詳細が出ている引用文献を4.3に追記いたしました。ご指摘の通り LCA 等では良く使われる手法ですが、今回、NEDO インサイド製品において、産業連関表からの誘発効果を試算するに当たっては、(1) 誘発効果を計算することができる製品とできない製品を区分すること、および、(2) 計算するための境界条件を十分吟味することの二つを中心に多角的に検討いたしました。その結果、産業連関表を使って誘発効果を計算しても問題ないものとして、B to B の製品が試算の対象となり、B to C の製品については、

産業間の誘発効果は殆どなく NEDO インサイド製品の売上だけが寄与するという前提のもとで試算いたしました。なお今後は、売上げばかりでなく、環境影響や CO₂ の波及効果分析についても産業連関表を活用して、便益、誘発効果を試算したいと考えております。

議論4 産学官連携とNEDOプロジェクトの寄与率について

質問・コメント（景山 晃、小林 直人、鷺津 明由）

NEDO プロジェクトで投入した研究開発費のほかに、当該プロジェクトに関して企業が自己負担している研究開発費があると思われまが、投資効率を見る場合にこの部分はどのように取り扱ったのですか。NEDO の研究開発成果の寄与率を 100 % とし、当初、その理由として、1) 該当する成果がなければ実用化が大幅に遅れた、または実現していない、2) 当該製品の多くが基礎・基盤から実証に向けた開発が行われた、3) 実用化に対する寄与率は製品によって異なり、厳密な立証に大きな困難が伴い精緻化できない等の理由を挙げています。東日本大震災の時に半導体の工場が被害を受け、世界中の自動車メーカーの操業を圧迫したように、どんな小さな部品であってもそれが欠ければ製品全体のサプライチェーンは成り立たないわけですから、寄与率 100 % の仮定は一つの見方を示していると思います。しかし、この仮定については評価が過大ではないかとの批判が起こることは必至ではないかと思ひます。

研究開発の経営論では「死の谷」を越えても次には「ダーウィンの海」があるという議論があって関係者の間でかなり共有されており、特に企業ではダーウィンの海を越えることで初めて新製品・新事業にできると認識しています。また、「該当する成果がなければ実用化が大幅に遅れた、または実現していない」ことは事実（必要条件）であり、最も重要ですが、一方で企業が新事業・新製品として売上を実現するには相当な追加投資（注*）が必要となる（十分条件）ことを考えると、寄与率を 100 % とすることについての考察と論述が必要と思ひます。

（注*）①技術の再現性、②収率・歩留りの向上検討、③スケールアップの検討と最適化、④マーケティング、⑤ユーザー企業との共同研究を含む緊密な連携、⑥品質保証体系の構築等

回答（山下 勝）

大変貴重なアドバイスをありがとうございます。ご指摘の点に関しては多くの研究者から同じご質問をいただいております。NEDO インサイドで取り上げられている製品は、開発者、関係団体、関連する研究者からの同意をいただいて、売上を出しております。その際、寄与率を 100 % としていますが、ほぼ全ての製品は、1) 中長期に渡って複数のプロジェクトに参加していた、2) 社内でも取り上げ難いテーマで、資金獲得が難しい状況であった、3) 企業研究では難しい外部専門家等からのサポート、4) プロジェクトの成果がなかったら、実用化はなかったと思っている開発者の意思、5) 大切な時期に研究費を税金で賄ってもらったのだから、実用化するのには企業の義務、6) 寄与率は製品によって状況が異なっており、企業自体も把握できていない、7) 実用化の時期は、プロジェクト成果の仕上がり次第に左右されており、事業化の段階は研究というよりノウハウ、自社製造の貢献であると捕らえた方が正しい等、いずれの製品も複数の理由があることから、寄与率 100 % として最大の効果（売上）を算出いたしました。従いまして、2.2 に「NEDO インサイド製品」の対象の項目を、上記の内容に追記して、差し替えることに致します。なお、7 章で「開発成果の実用化、事業化のためには、企業において NEDO の R&D 投資の 10 倍以上の投資が必要である」との記述を追加しました。

議論5 NEDOプロジェクトの研究開発費のとらえ方について

質問・コメント（鷺津 明由）

研究開発費用を考えるととき常に問題になるのが、失敗した研究開発にかかった費用をどう評価するという事です。この研究では成功に繋がった開発プロジェクトを取り上げて成果を評価していますから、失敗の分の研究開発費用は含まれていないと考えられます。しか

し、失敗に終わった開発プロジェクトであっても図 5 のような技術の波及効果はあり、さらに「これではだめ」ということが分かったことも貴重な成果であり、それが成功のプロジェクトを生み出した要因でもあると考えられます。従って、この分も成功の成果の費用と考えられると思います。費用対効果の計算のうち、効果の方については寄与率 100 % の仮定のもとで最大効果を計算していますので、費用の方もこうした考察を念頭におき、少しふくらまして見せて感度分析を行うなどの工夫があってもいいのではないかと思います。

回答（山下 勝）

ご指摘の観点については、全くその通りだと考えております。NEDO は 30 年間に約 3 兆円の研究開発費を投入してきました。今回の NEDO インサイドで取り上げられた製品は、そのうちの 70 製品にすぎません。3.2 に示しますように、約 6400 億円が実用化し、売上を上げ、残り 2.34 兆円が失敗したことになります。これまでの NEDO の追跡調査からプロジェクト参加者の約 2 割が実用化、上市に至っていますが、そのなかで売上を上げているものとなると、さらに限定されてしまいます。しかし、失敗した研究者に関するアンケート結果から、ほぼ全ての研究者が、論文、特許、ノウハウ、人材育成、ネットワークを獲得したと回答されており、80 ~ 90 % の方々から、研究開発を行っている時には、いろいろ大変だったけれども大変満足度が高かったとの回答を得ています。しかし、このことを論文に書いても、自己満足や感覚的な評価となることから、この論文では極力、定量化したデータを提示したいと考えました。なお、直接的な売上ではないですが、雇用、CO₂ 削減効果、社会的二次効果、社会的便益（リサイクルによる資源循環、CO₂ 削減、環境対応等）等は数値で明らかにできるデータですので、これをさらに充実させていくことが先決かと考えました。

議論6 技術的波及効果について

コメント（鷺津 明由）

この論文で技術開発そのものに触れた図 5 と図 6 は面白いです。特に、目に見えない技術の波及効果は重要と思われるので、これらの図を分かりやすくするとともに、5 章の記述をもう少し丁寧に行うとよいと思います。

回答（山下 勝）

技術の波及効果についてはスペースの関係で、今回の論文ではエッセンスに止めておりますが、より分かりやすい表現に改善するため、5 章の記述を具体的な表現に致しました。特に最終パラグラフの記載は、技術的ばかりでなく、人材、周りへの影響について記載いたしました。また、図 6 に関しましては見え難いのご指摘を受け、簡略図に書き直しました。

議論7 成功要因と今後のプロジェクト運営への展開について

質問・コメント（小林 直人、景山 晃）

この論文の「NEDO インサイド製品」を選別・抽出に当り、そのような言わば「優等生」を生み出すためには、企業側・NEDO 側にどのような有効な取り組みがあったのか、あるいは市場環境がどのように有効に作用したかなどの分析もされていると思います。この論文では紙数が足りないと思いますが、そのエッセンスを第 2 章の末尾等で述べるとよいと思います。

また、成功例と失敗例を分析することで、投資効果を測る簡易かつ有用な評価法として完成させ、今後の研究開発プロジェクトの運営や評価に活用するのがよいと考えます。

回答（山下 勝）

対象となっている NEDO インサイド製品についてはアンケートばかりでなく、ほぼ全ての商品でヒアリングを行っています。一般的には、ニーズとシーズのマッチング、マーケットを捕らえていた等ばかりでなく、次の観点が、成功の大きな要因になっていました。1) 普段の研

究に比べて、かなり多くのデータを取得していた、2) 大学との共同研究とを通じて、メカニズムを解明して、信頼性向上、問題点の解決、研究方針の作成・変更、スケールアップ等に役立てた、3) 最初から実用化、成功できると技術に自信を持っていた、4) 長い間、心の中でアイデアを暖めていた、5) 他の研究者には真似できないノウハウ、武器を持っており、プロジェクトの中で磨いて活用した、6) マーケット情報は当てにならないと判っていたので、提案思考で共同研究先（ニーズ）と情報交換を行っていた、7) プロトタイプによる実証実験を行い、検証と改良の繰り返しにより、完成度を高め、事業部門との架け橋となった等、2.8に「NEDO インサイド製品における成功要因例」を設けて記載しました。

プロジェクト終了5年まで、プロジェクト単位で企業へのヒアリングとアンケート（ほぼ全員）を実施し、回帰分析等を使って成功事例や失敗事例について大まかな行動パターン分析をしています。その結果、失敗プロジェクトと成功プロジェクトに含まれる失敗の克服はかなり異なることが判っています。今回、査読者との議論の結果、NEDO インサイド製品の成功要因を抽出し、提示することができ、完成度が高い論文に仕上がったと考えております。この辺の要因分析の結果を共有して、NEDO 内のマネジメントに反映させるようにしています。また、これらの成果は、あるタイミングで論文に投稿する

予定です。

議論8 NEDOインサイド製品の知的財産について

コメント（景山 晃）

この論文では紙数の関係もあると思いますが、特許についての記述がありません。特許は研究開発の成果を守る手段として極めて重要です。NEDO インサイド製品 70 テーマについて、どの程度の特許でガードされているかを示すと、技術的効果の一部を表すことができ、かつ、日本発の技術の国際競争力を示す指標になると思います。数行程度の記述でもよいと思いますので、知的財産の重要性を視野に置いていることを示した方がよいと思います。

回答（山下 勝）

ご指摘のとおり特許は重要な成果です。現在、特許についてプロジェクトとの紐付け作業を行っている約3万件に限られますが、近々に共同研究者が学会発表や論文等で発表する予定です。そのため、この論文では7章のまとめに、「NEDO インサイド製品に関する知的財産について調査中であり、まとも次第、論文投稿する予定である」を追記することにしました。

電子加速器を利用した研究の産業技術への橋渡し

— レーザーコンプトン光子ビームの発生と非破壊検査への応用 —

豊川 弘之

原子核の研究等に用いられているレーザーコンプトン光子ビームを非破壊検査技術に応用し、透過力の強い産業用ラジオグラフィ技術の実証研究を行った。大型加速器の利用研究・維持管理等を行いながら新しい研究を立ち上げた経過を整理し、要素技術の開発と高度化に始まり、ユーザー利用研究の推進、研究成果の検証、そして新たな研究の方向性を定めて、それに向かって進んでいく過程について、技術的な説明を交えて解説した。研究実施例を基に、橋渡し研究の方法論を抽出することを試みた。

キーワード: 電子加速器、レーザー、放射線、ラジオグラフィ、非破壊検査

Application of laser Compton photon beam to nondestructive tests

– A spin-off technology from nuclear physics –

Hiroyuki TOYOKAWA

Laser Compton photon beams generated by a high-energy electron storage ring have energy in the gamma-ray range. X-ray radiography for industrial products using the laser Compton photon beam is expected to show good spatial and density resolutions, because of its monochromaticity and good beam property. A radiography and computerized tomography system was built using AIST's TERAS electron storage ring. The performance of the system was examined. A summary of the development process is outlined, which includes the processes of market survey and target setting, scenario planning, and integration of technologies. In conclusion, a general methodology for the translational research was discussed.

Keywords: Electron accelerator, laser, radiation, radiography, nondestructive inspection

1 はじめに

科学技術には研究機関の基礎研究成果を、企業活動へたく強く結びつけることが要求される場合がある。いわゆる「橋渡し研究」である。橋渡し研究とは、自分の拘りや考え方を整理して社会に受け入れられる姿に徐々に近づけていく作業である。成果を急ぐあまり安易に妥協して周囲に迎合すると研究レベルが下がってしまうし、自分のやり方に拘り過ぎると社会から離れてしまう。繊細で忍耐強い擦り合わせ作業が必要である。さらに、タイムリミットもある。研究活動には多くの要因があり、これらのバランスを取ることで研究は成長し、成果はさまざまな形態で拡散し人々に利用される。

この論文は、新たなコンセプトの産業用ラジオグラフィ装置を社会へ提案すること、そして広く公開利用に供することで産業技術としての価値を見極めることを目的としている。研究としては装置の性能向上やチャンピオンデータを出すことが目的ではなく、ユーザーの声を聴くことでマーケティング

グを行い、適切な形で研究成果を社会に橋渡しすることを目的とした。さらには、将来の研究につながるスピノフ技術の育成や調査も行う。

この研究は以下のシナリオによって構成される。

- ①要素技術の開発と高度化: 要素技術を開発して原理実証を行う。
- ②ユーザー利用研究の推進: 装置のユーティリティを高度化してユーザー利用を推進する。ユーザーの声を多く聴き、研究の方向性を微調整する。
- ③研究成果の検証: 得られた成果は当初の予想どおりであったか、予想外であるなら何を見落としていたか、他にもっと良い方法はないか等を、ユーザーの声を聴きながら客観的に理解し、当初の研究構想を検証する。
- ④研究方向性の決定: 今後の装置や技術開発の要点を整理する。研究を進めるかどうか、費用対効果や所属組織の諸事情を加味して判断する。判断結果にしたがって速やかに行動する。

産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2

Research Institute of Instrumentation Frontier, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan E-mail: h.toyokawa@aist.go.jp

Original manuscript received September 15, 2014, Revisions received December 27, 2014, Accepted January 19, 2015

この論文は4章から構成される。第2章では、学術的背景と装置開発の過程、研究成果について述べる。第3章は上記①～③に対応し、橋渡しに向けた技術課題の選択と統合過程を述べる。第4章は④に対応し、要素技術の選択と統合の過程を振り返り、目標達成に向けた取り組みと得られた結果について考察する。

2 学術的背景と装置開発の過程

原子核や素粒子物理学の計測技術は高度に洗練されており、産業技術に応用できるケースがある。そこで、原子や原子核反応の相互作用断面積を測定する手法を産業用ラジオグラフィを用いた非破壊検査へ応用することを試みた。具体的には電子加速器を用いて高エネルギー光子ビームを安定して発生する技術とラジオグラフィ技術を開発し、さらに Computerized Tomography(CT) を用いることで、従来にない高い空間分解能と密度分解能を持つ非破壊検査システムを開発するものである。

光子とは量子化された電磁波の呼称であり、この論文では X 線あるいはガンマ線を意味する。ラジオグラフィ (Radiography) とは放射線を用いた撮影方法であり、いわゆるレントゲン撮影や X 線 CT による断層撮影等が含まれる。産業用ラジオグラフィは自動車、航空機やロケット、焼結材料や鋳物、電子基板等多くの工業製品の開発において、製品の信頼性を高めることに役立っている^[1]。我々の生活をより安全、快適なものにするための基盤技術である。大型の産業用 CT 装置には高エネルギー光子が必要であり、エネルギー数 MeV の電子加速器が用いられる。エンジンブロックを丸ごと空間分解能 2～3 mm で撮影できる性能を持った装置も開発されている。

インフラ診断において、最近では可搬型の電子加速器を使って橋梁検査を現地で行う技術が開発されている^[2]。コンクリート内部の鉄筋や、その周辺に発生するき裂などを非破壊で高精細に可視化する手法は社会で根強く求められている。化学プラントの配管や木材内部の非破壊可視化等のニーズもある。産業界では高エネルギー光子を用いた非破壊検査用ラジオグラフィの需要は非常に多い。

この研究では電子蓄積リングを用いたレーザーコンプトン散乱 (Laser Compton Scattering; LCS)^[3] という技術を用いている。電子蓄積リングとは円形の電子加速器であり、ドーナツ状の超高真空容器内に磁場を用いて電子を閉じ込め、電場を用いて加速する装置である。著者が用いたのは直径 10 m、周長 30 m の電子蓄積リングであり、中小規模のものである。電子蓄積リングの場合、基本的に電子加速は行わず、電子が周回する際に放射したエネルギーのみを補うことで、電子を安定に長時間蓄積することを目的とし

て設計されている。対照的なのが電子線形加速器であり、これは電子を連続的に加速して、短い区間で電子を効率よく加速するための装置である。

LCS とは、電子加速器を用いて高エネルギー光子を発生させる手法の一つである。高エネルギー電子にレーザーを照射するとコンプトン散乱によってレーザー光子が電子エネルギーの一部を受け取り、X 線やガンマ線領域の電磁波となる。コンプトン散乱とは、光子と電子の衝突であり、双方の粒子の挙動はエネルギーと運動量の保存則による古典力学によって正確に記述される。レーザーコンプトン散乱 (LCS) の場合、電子静止系においては通常のコンプトン散乱と同じように記述できるが、電子のエネルギーが高くほぼ光の速さであるため、実験室系では、レーザー光子が電子によって弾き飛ばされるように見える。LCS における、散乱前後の光子エネルギーと実験室系における散乱角、および電子エネルギーとの関係は式 1 によって記述される。

$$E_{\gamma} = \frac{E_0(1 - \beta \cos \theta_1)}{1 - \beta \cos \theta_2 + E_0 \frac{1 - \cos(\theta_2 - \theta_1)}{E_e}} \quad (式 1)$$

Kinematics は図 1 に示したとおりである。本手法は、電子加速器を用いてレーザーを高エネルギー X 線やガンマ線に変換する一種の波長変換器でもある。産総研では、旧電総研時代の 1985 年より LCS 光子発生基礎研究を開始し、1990 年代後半～2000 年には 1～40 MeV の光子領域の光子ビーム源を整備して利用研究に供してきた実績がある^{[4][5]}。高エネルギーかつ指向性の高い光子ビームが得られるため、原子核実験、放射線検出器の応答関数測定、光核反応断面積測定、原子の吸収断面積測定等に用いられている。

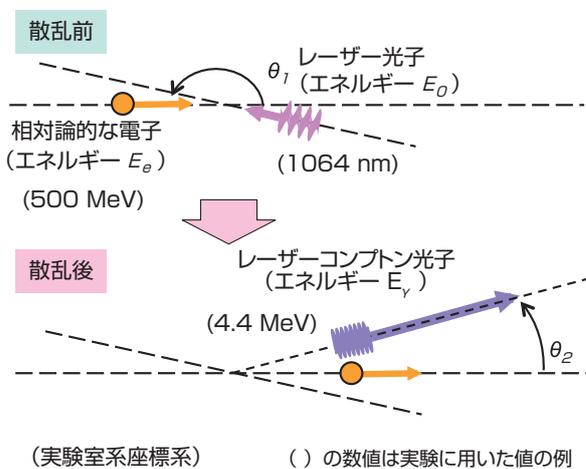


図1 レーザーコンプトン散乱のkinematics。

3 技術の選択と統合の過程

(1) 要素技術の開発と高度化

工業製品において異物を検査するためには1 mm以下の空間分解能が必要であり、さらに、樹脂中の気泡を可視化するには、線減弱係数^[6]の絶対値として概ね 10^{-2} cm^{-1} 以下の分解能が必要である。物質中を通過する光子束は、通過距離に対して指数的に減衰し、線減弱係数は指数の肩であり長さの逆数の次元を持つ。

X線CTでは光子(X線)の減衰が指数関数で表されると仮定して線減弱係数を画像化している。しかし、線減弱係数は、図2に示すように物質の種類と光子エネルギーの関数である。さらに、一般的に使われているX線CT装置では、さまざまな波長(エネルギー)を含む白色光子が使用されているため、実際には全てのエネルギーの線減弱係数の荷重平均値がCTによって画像化されることとなる。その結果、CT画像には人為構造、すなわちアーチファクトが現れる。

医療用のCTにおいては、主として生体を測定するため、全ての物質を水と等価であると見なすことができる場合が多い。CTで画像化される物理量はCT値と呼ばれ、実際にはX線エネルギースペクトルや検出器の効率等によって決まる指標である。医療分野では水と空気を基準としてCT値を規格化したHounsfield unit (HU)を用いることが一般的である。その場合、CT画像は水の密度分布と見なすことができるため、X線のエネルギー広がりによって発生したアーチファクトを水ファントム等を用いて補正することが可能である。

しかし、産業用非破壊検査においては、さまざまな物質が測定対象であり、それらの密度分布や形状を定量的に評価することが求められるため、基準となるファントムを決定することは難しい。これを解決するには単色光子を用いると良いが、金属等に対して十分な透過力を持つ光子が必要である。そこで、高エネルギー単色光子が必要となる。

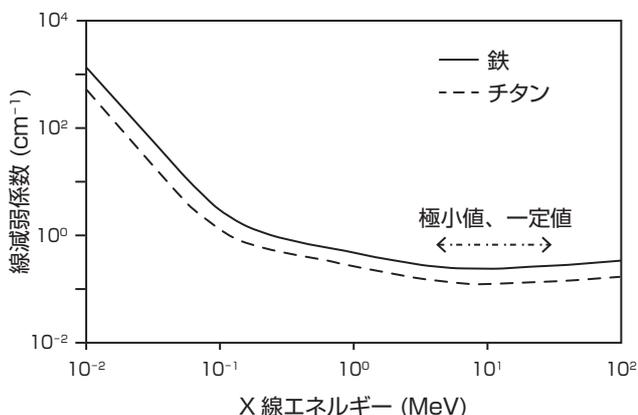


図2 10 keV~100 MeVにおける鉄およびチタンの線減弱係数^[6]。

図2に示すが、多くの金属の線減弱係数は、光子エネルギー5~20 MeVにおいてあまり変化しないことが分かる。例えば、鉄の線減弱係数は光子エネルギー $10 \pm 3 \text{ MeV}$ において0.6%の変動を示す。この値は1 keVの光子における数eVのエネルギー広がりに対応する。つまり、エネルギー広がりが数10%のMeV領域の光子を用いたCT測定は、keV領域でエネルギー広がりが1%以下の光子CT測定と等価となるため、単色光子と見なすことができる。また、鉄の線減弱係数は、およそ10 MeV付近で最低値となり、他の物質でも概ねMeV領域で最小となる。そのため、MeV領域の光子は物質を最も良く透過する。すなわちMeV領域の光子ビームは、厚い試料を高い密度分解能で検査する最適なツールである。

そこで、この研究では、MeV領域の光子を用いた産業用ラジオグラフィを試作し、密度分解能や空間分解能において高い数値性能を実証し、高精細なCT画像を提示することを目標とした。良いラジオグラフィ装置には、高い空間分解能、密度分解能、時間分解能(計測時間の短さ)が要求される。これらを同時に達成するには、(1)試料をペンシル状の細いビームで小さなピッチでスキャンするか、あるいは微小点から発生したコーン状のビームと小さな画素のカメラを用いた撮影を行うこと、および(2)透過した光子を高効率で検出することが必要である。これらを実現するモデルを図3に示した。(A)は細いビームを用いてスキャンするCTの方法であり、これは第1世代と呼ばれるCT手法である。細いビームに対して試料を併進、上下、回転させることで360度全ての方向からの透過画像を測定し、画像を再構成する。(B)はコーン状のビームに対して、試料の背後にX線カメラ等置いて透過像を一気に測定する手法であり、第3世代と呼ばれるCT手法である。回転動作のみで(A)と同等の測定を行うことができるため、時間分解能に優れている。ただし、(B)の場合は、良い画質を得るためにはX線カメラの素子を小さくすることが

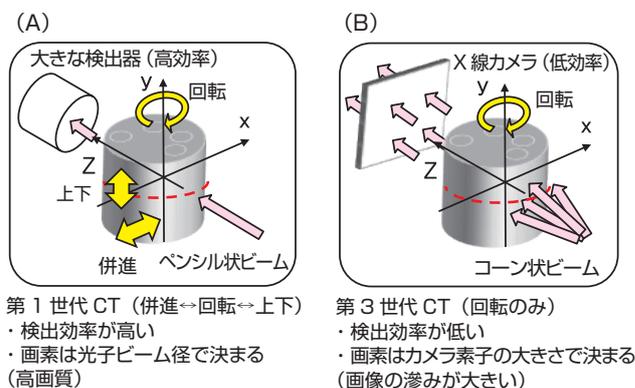


図3 CTにおける世代の説明。(A) 第1世代、(B) 第3世代。

必要であるが、我々が用いる LCS 光子ビームの透過力は非常に高く、厚さ数 cm の鉛を簡単に透過する。そのため X 線カメラ内部で光子が散乱してしまい、第 3 世代 CT を用いて数 cm 以下の空間分解能の画像を得ることは技術的に難しい。

そこで、本研究では第 1 世代 CT システムを構築した。同手法は、細い光子ビームとそれを受ける大きな検出器を対として、その間に試料を置き、光子ビームの減衰量を測定する。この研究で実際に開発した第 1 世代 CT システムの概要を図 4 に示す。

これで、この研究の要素技術は概ね完成したが、次は技術の改良を行いユーティリティを向上し、装置を公開利用に供して本手法の使い勝手をユーザーに評価してもらい、改良点や要求仕様等についてユーザーと協議を重ねることが必要である。高額な装置になるがユーザーはどのような反応を示すか、検査スループットはどの程度必要なのか、将来の発展性はどうか等、さまざまなことを検証するため、実際にシステムをユーザーに開放して、その声を聴くこととした。

(2) 利用研究の推進

この研究を開始するにあたって自動車産業や原子力産業の企業へヒアリングを行ったが、彼らの要望は少なくとも空

間分解能として 1 mm 以下であること、焼結材料の密度として 1 % 程度の密度ムラを検知できること等であった。本ラジオグラフィシステムを用いて工業製品の透過像を測定した結果を図 5 (左) に示す。研究開発初期に行った金属ボルトの撮影実験では、原理実証には成功したが満足する画質が得られなかった。

そこで、性能向上のためにさまざまな改良を行った^[7]。例えば、コリメータの配置精度やアライメント方法の改良、モニタ機器の高度化によるレーザーと電子ビームの時間・空間的な衝突精度の向上、コリメータや検出器の寸法等の最適化、電子加速器の制御系改良による LCS 光子ビーム強度の増強と安定化等である。また、検査にかかる費用対効果を最大にするには、システム全体を効率よく運転できるようにすることが、実は非常に重要である。そこで、電子蓄積リングおよび入射器に用いる電子線形加速器の制御・モニタ系の整備と改良を行った。ビームモニタ機器を用いた電子軌道の歪み補正、ビーム電流の増大等の制御ハード/ソフトウェア整備等である。その結果、電子加速器システムは、ほぼ一人で運転ができるシステムとなり、LCS 光子のエネルギーと強度はオンラインで計測できるようになった。

その結果、画質が向上して、最終的には 1 mm 以下の

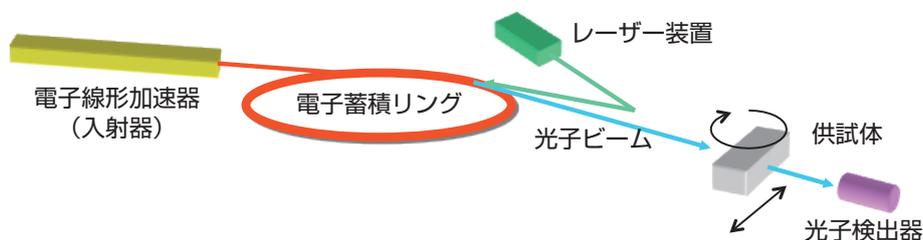


図4 電子加速器を用いたLCS光子CTシステム。

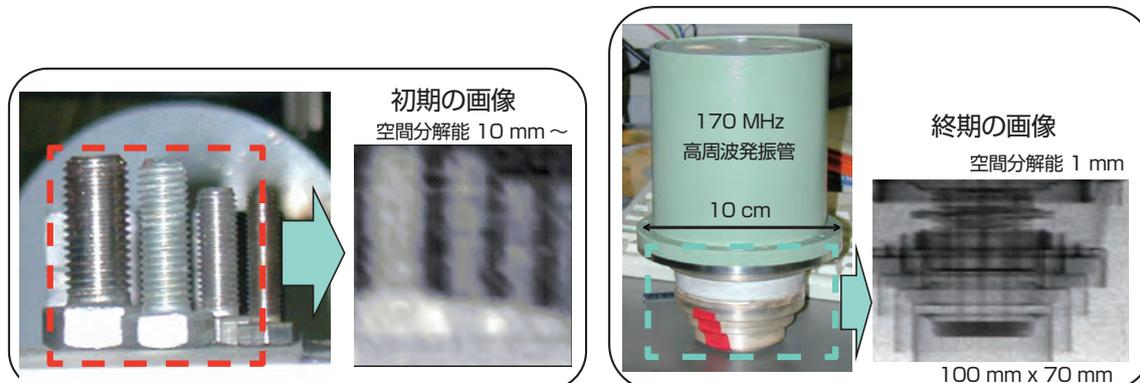


図5 LCS光子を用いた透過型ラジオグラフィ
左：ステンレスボルトを10 MeVのLCS光子で撮影（白黒を反転している）、右：高周波発振管の電極部を10 MeVのLCS光子で撮影（空間分解能1 mm。図の一部は参考文献[8]より引用）

空間分解能を達成し、高い解像度の画像を測定することができた^[8]。また、高精細な CT 画像を得ることができた(図 6)^[9]。その他、さまざまな物質に対して CT 値を正確に測定し、線減弱係数と線形であることを確認し、1 % 以下の密度分解能を達成することに成功した(図 7)^[10]。さらに、本 CT システムを用いて、コンクリート中の 0.2 mm 幅のき裂や、厚さ 50 cm の鉄筋コンクリート断面の CT 等、インフラ診断のための計測技術としての有用性を検証することもできた^[11]。

以上に述べた要素技術の改良やユーティリティーの向上のための研究開発が、どのようにラジオグラフィの性能向上へ結びついたのかについて、図 8 にチャートによって整理した。

(3) 研究成果の検証

装置の自動化が進むことで、ユーザーが自分で加速器の調整運転を行って LCS 光子ビームを発生することが可能となった。それに伴い、CT 研究にも成果が開始された。自動車産業や原子力産業関連の企業との共同研究を行い、持ち込まれた供試体を CT で計測し、その結果を評価し、さらに装置の改良を数年間重ねた。その過程で空間分解能や密度分解能の評価や向上を行い、当初目的とした性能を達成することができた。

本 CT システムを用いた数年間の実証実験を経て、これまで見えなかった製品の細部が見えるようになり、画像測定の定量性にも信頼性が増してきた。その後、次第にユー

ザーからは、自社の工場に導入できるような小型装置を開発して欲しいという声が聞かれるようになってきた。これを行うには加速器の小型化と低コスト化が必須である。

この論文でこれまでに述べてきた方法では、電子のエネルギーは数 100 MeV というかなり高い値が必要である。装置の小型化は加速器システムの小型化とはほぼ等価である。しかし加速エネルギーは装置規模に比例するため、単に装置寸法を小さくすることは困難である。小型加速器で高エネルギー加速を実現するには、いくつかの重要な技術開発が必要である。例えば、数 100 MV/m 以上の高電界に耐える材料の開発や表面処理技術、それらをサブマイクロメートル精度で機械加工する技術および超高真空下での使用、高精度な磁場分布を実現できる磁石の開発と磁極の機械加工技術、さらには電子ビームの空間電荷効果を抑えるビーム収束技術の大幅な高度化等が必要である。これらの全てにおいて部品単位での小型軽量化が必要である。真空部品のフランジ等の規格も改善する必要がある。大型加速器の全ての性能を、小型装置で実現することは非常に難しい。小型化するためには、ある特定の機能に絞った装置開発が必要である。

この研究によって、産業用高エネルギー光子 CT 技術の有用性や問題点が明らかになってきた。医療用 X 線 CT とは異なり、産業用ラジオグラフィではさまざまな材料を測定対象としており、焼結材や鋳物等の密度分布や異種材料の境界面を正確に測定する必要がある等、医療分野よりも

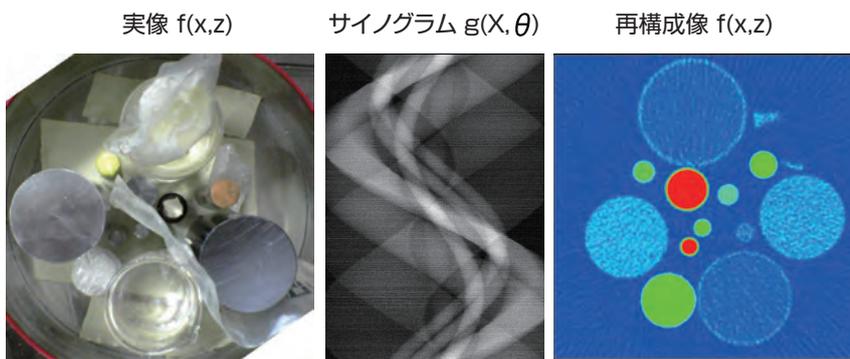


図 6 (左) サンプル写真、(中央) Sinogram、(右) CT 像^[9]
 サンプルはビーカーに入れた水やシリコン、アルミニウム、タンゲステン等の各種金属ロッド。青色～緑色が低密度の領域を、黄色～赤色は高密度の領域を示している。

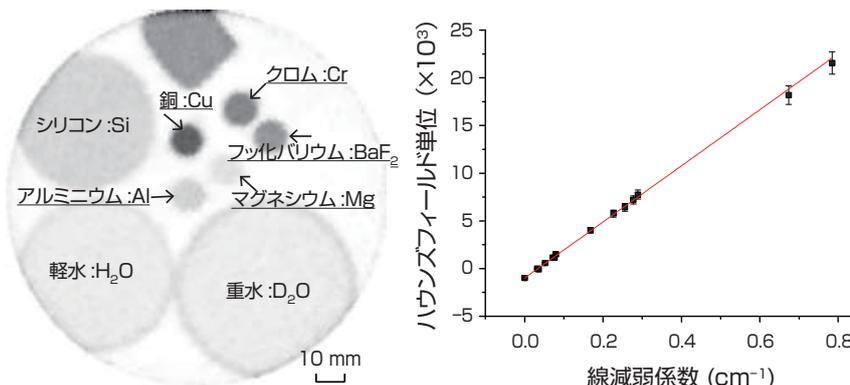


図 7 (左) さまざまな素材の線減弱係数と、HU で表した CT 値をプロットした^[10]。図中の記号は物質を表す；例 D₂O = 重水など。

広範で定量性のある計測結果が求められる。現在、高エネルギー X 線 CT を用いた産業用非破壊検査における、製品形状計測手法の標準化、標準となるサンプル材料の検討が進められている^[12]。

4 今後の展開

現在、この研究は加速器の小型・軽量化を検証するフェーズに入っており、テーブルトップサイズの電子加速器の開発と X 線非破壊検査への応用について研究を進めている。具体的には、MeV 領域の電子加速を数 cm の領域で行うことが可能な、高周波電子銃の開発を行い、コンクリート構造物内部の非破壊検査を行うことを目指している。高周波電子銃は加速器として最もシンプルである。この研究では、電子が放出されるカソード面にカーボンナノ構造体（Coniferous Carbon Nano Structure; CCNS）^[13]を用いることで、カソードを加熱するヒーター機構を不要とし、さらにシンプルな構造のシステムを目指している。

加速器の軽量化には、さまざまな機構をシンプルにしていくことが非常に重要であり、技術開発全体を方向付けることになる。一つの要素技術に集中しすぎると全体を俯瞰することが難しくなるので、コアとなる技術を中心に据え、それを高度化することに研究資源を集中する。それによって、研究資源の費用対効果が向上できる。

現在、同装置を機械式アームやリニアステージ等へ搭載し、後方散乱 X 線等を用いて内部を透視するシステムを構築し、これをインフラ構造物の非破壊検査装置へ適用するためのプロジェクトを立ち上げたところである^[14]。最大電子エネルギーおよび X 線エネルギーは、0.9 MeV を目指している。本システムでは、レーザーコンプトン散乱 (LCS) 光

子を用いるには電子エネルギーが低すぎるため制動放射線を用いる。そのため X 線エネルギーは連続分布をする白色となることから、高い密度分解能は達成できない。また、電子エネルギーが低いことから、発生する X 線のビーム指向性が低く、第 1 世代 CT のように細いビームを用いるためには強度が大幅に下がってしまう。そこで、ビームを細く絞らずに、良い画像を測定することが必要であることから、この研究では、新たに X 線カメラの開発も行う。現在、大学や企業等と一緒に、後方散乱 X 線イメージングシステムの開発を進めている。

冒頭部の再掲となるが、以上に述べたことを一般化すると以下のシナリオとなる。

- ①要素技術の開発と高度化
- ②ユーザー利用研究の推進
- ③研究成果の検証
- ④研究方向性の決定

概ね上記のような流れで研究を進めることで、効率よく橋渡し研究を実施できると思われる。特に②のユーザー対応は集中力と体力を要する仕事もあり、ここにあまり長く留まったり、研究資源を集中すると、装置の安定供給が主目的になってしまい、③への移行の時期を逸してしまうことがある。このフェーズはあくまでも③に至るための通過ポイントである。時には経営判断で強制的に③へ移行させることも必要である。橋渡し研究は社会の要請を研究現場が直に聴くことになるので、研究者に強い問題意識と動機付けが生じる。橋渡し研究をボトムアップで進めると、組織の研究資源が細分化され、ガバナンスが低下する危険がある。推進には組織力を強化する改革と一体で進めていく必要がある。

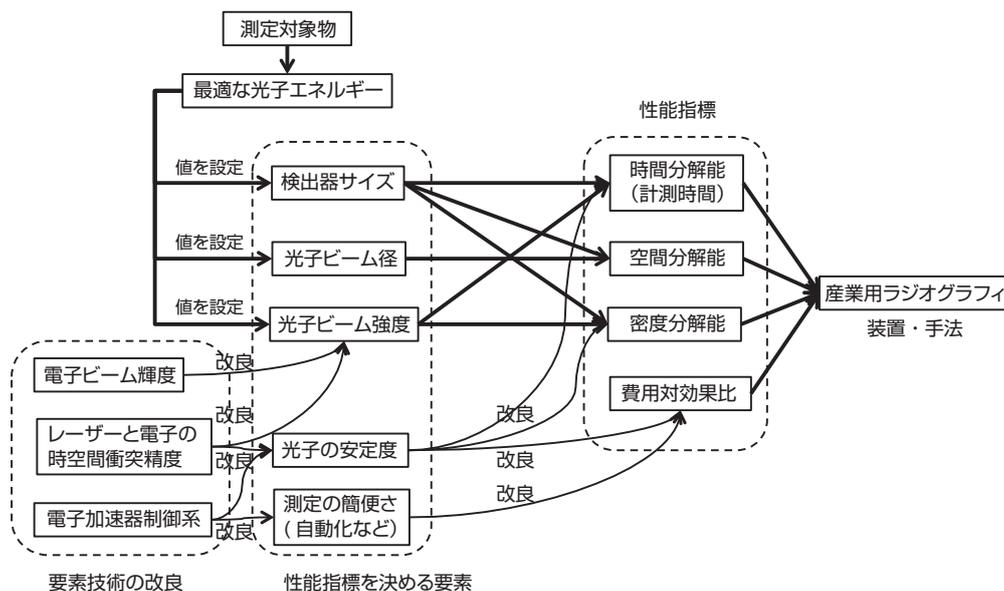


図8 要素技術の改良、性能指標を決める要素、および装置・手法の高度化との関係。

参考文献

- [1] 藤井正司: マイクロCT, 非破壊検査, 54 (5), 228-232 (2005).
- [2] M. Uesaka, T. Natsui, K. Lee, K. Dobashi, T. Yamamoto, T. Fujiwara, H. Zhu, K. Demachi, E. Tanabe, M. Yamamoto, N. Nakamura, J. Kusano, T. Higo, S. Fukuda, M. Yoshida and S. Matsumoto: 950 keV, 3.95 MeV and 6 MeV X-band linacs for nondestructive evaluation and medicine, *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A*, 657 (1), 82-87 (2011).
- [3] R. H. Milburn: Electron scattering by an intense polarized photon field, *Phys. Rev. Lett.*, 10 (3), 75-77 (1963).
- [4] T. Yamazaki, T. Noguchi, S. Sugiyama, T. Mikado, M. Chiwaki and T. Tomimasu: Generation of quasi-monochromatic photon beams from Compton backscattered laser light at ETL electron storage ring, *IEEE Trans. Nucl. Sci. NS*, 32 (5II), 3406-3408 (1985).
- [5] T. Tomimasu, T. Noguchi, S. Sugiyama, T. Yamazaki, T. Mikado and M. Chiwaki: A 600-MeV ETL electron storage ring, *IEEE Trans. Nucl. Sci. NS*, 30 (4II), 3133-3135 (1983).
- [6] J. H. Hubbell and S. M. Seltzer: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest* (<http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/>), Accessed 2015-01-18.
- [7] H. Toyokawa, S. Goko, S. Hohara, T. Kaihori, F. Kaneko, R. Kuroda, N. Oshima, M. Tanaka, M. Koike, A. Kinomura, H. Ogawa, N. Sei, R. Suzuki, T. Ohdaira, K. Yamada and H. Ohgaki: Recent progress in generation and application of AIST laser-Compton gamma-ray beam, *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A*, 608 (1 Supp.), S41-43 (2009).
- [8] H. Toyokawa, H. Ohgaki, T. Mikado and K. Yamada: High-energy photon radiography system using laser-Compton scattering for inspection of bulk materials, *Rev. Sci. Instrum.*, 73 (9), 3358-3362 (2002).
- [9] 豊川弘之: レーザーコンプトン光子ビームを用いた γ 線CT, *応用物理*, 78 (4), 351-354 (2009).
- [10] H. Toyokawa: Industrial imaging method using high-energy photon beam CT, *Proc. 3rd International Workshop on Process Tomography (IWPT-3)*, 95(1)-95(8) (2009).
- [11] H. Toyokawa, H. Kanada, T. Kaihori, M. Koike and K. Yamada: Application of high-energy photon CT system with laser-Compton scattering to non-destructive test, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 55 (6), 3571-3578 (2008).
- [12] 産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会: 「次世代3次元内外計測の評価基盤技術開発」事前評価報告書, (2012).
- [13] 鈴木良一: 乾電池駆動可搬型高エネルギーX線発生装置の開発。- X線非破壊検査におけるイノベーションを目指して -, *Synthesiology*, 2 (3), 237-243 (2009).
- [14] JST (平成26年10月28日): SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)課題「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」において新たに4名の研究責任者を公表, プレスリリース(科学技術振興機構報第1064号), <http://www.jst.go.jp/pr/info/info1064/index.html>, 閲覧日2015-01-18.

執筆者略歴

豊川 弘之 (とよかわ ひろゆき)

1997年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年独立行政法人産業技術総合研究所光技術研究部門、2004年から計測フロンティア研究部門。2010年から同研究部門光・量子イメージング技術研究グループ長。2013年から同研究部門小型量子ビーム源グループ長。



査読者との議論

議論1 全体

コメント(小林 直人: 早稲田大学研究戦略センター)

この論文はレーザーコンプトン散乱のラジオグラフィへの応用技術について述べたものです。著者の長年の豊富な研究成果を整理する形で、目標に向かって技術を選択・統合した過程を述べ、極めてしっかりした内容になっておりシンセシオロジーにふさわしい論文になったと言えます。

ただし初稿前半のレーザーコンプトン散乱応用の部分は、すでに他論文に掲載されたものをレビューした形になっており、必ずしもシンセシオロジーに特有の構成学的研究を十分記しているとは言えませんでした。構成学の論文としては、具体的な目標(レーザーコンプトン散乱のラジオグラフィへの応用)を実現するためにどのような研究開発シナリオを作り、どのように要素技術を選択し、さらに統合してシナリオの実現に至ったかを順序良く述べるとよいと考えられます。また論旨を明確にするためにも、それらを図示することも必要だと思われました。

議論2 論文の主眼について

コメント(一村 信吾: 名古屋大学イノベーション戦略室)

考察で記述されていたように、「基礎研究成果を、企業活動へ太く強く結びつけることが要求される場合がある。いわゆる橋渡し研究の重視である。橋渡し研究とは、自分の拘りや考え方を整理して社会に受け入れられる姿に徐々に近づけていく作業である。」という点、を論文の主眼としてはいかがでしょうか。すなわち、「橋渡し研究の方法論」を論文の主眼としてはどうかと思います。

またその方法論を「高エネルギー光子ビームの発生技術と非破壊検査への応用」を事例として扱うこととして、その際、論文にも記述がある

A) 成果を急ぐあまり安易に妥協して周囲に迎合すると研究レベルが下がってしまう、

B) 自分のやり方に拘り過ぎると社会から離れてしまう

C) 繊細で忍耐強い擦り合わせ作業が必要である。

D) さらに、タイムリミットもある。

という項目に関して、具体的にどのように折り合いをつけていったのかを、現在の論文の前半に記述された内容をもとに整理してみたいかがでしょうか

コメント(小林 直人)

アブストラクトに「技術が一つの形を持つに至る過程について考察した」とあり、その形とは「社会への貢献」であると考え、それはシンセシオロジーの論文として価値があることなので、その「過程」とその「考察」に力点を置いて論文を再構成されるのが望ましいと思われる。その意味では、「橋渡し研究」を一つの目標としたときに、それに向けてのシナリオとして、第6、7章で記された内容を提示し、それを構成する要素技術としてのLCSの個々の技術の選択と統合の「過程」を述べ、最後に考察を記すという構成をすることを勧めたいと思います。

回答(豊川 弘之)

頂いたご意見を参考にして、論文構成を大きく変えました。技術のレビューは最低限述べるとども、全体を4章から構成することとしました。

1章は研究の背景やこの論文で取り上げる研究の領域について、2章では学術的背景と研究の過程について技術レビューを交え解説しました。3章では技術の選択と統合の過程について具体例を示しました。また全体の目標やそれに向けた技術の構成を示す図8「要素技術の改良、性能指標を決める要素、および装置・手法の高度化との関係」を入れました。4章では前章に示した事実に対して補足説明を行いつつ、成果の意義や位置付けについて述べました。これによって、この論文を橋渡し研究の方法論に拡張することを目指しました。

ただし、橋渡し研究の方法論というレベルまで持ち上げることは、なかなか難しい作業です。方法論として普遍化しようとする、一般的な言葉に集約されがちなこと、具体例から一般論へ展開する際にさまざまな情報の粒度が係わってくるのが問題の本質で、この論文の難しさはそこにあると思いました。

議論3 論文の再整理について

コメント（一村 信吾）

改訂論文は3章と4章において、下記の①～⑥の番号に応じた内容を展開しています。

- ①要素技術開発を行う（本例では5年間。基礎研究が実施可能な外部資金を活用）。
- ②原理実証の後に利用研究を開始。同時に装置のユーティリティを高度化する。
- ③ユーザー利用研究を円滑に進める。
- ④今後の装置・技術開発のポイントを整理。
- ⑤研究を進めるかどうか、費用対効果比や所属組織の事情等を加味して判断する。
- ⑥判断結果が出たら速やかに技術開発を開始する。

また改訂論文は、概ね①～②までが3章、③～⑥までが4章になっています。しかし内容的には①～④までが開発の1段階で、⑤、⑥は、それを踏まえたさらなる展開段階とも考えられるのではないでしょ

うか。この考え方が妥当であれば、3章と4章を再整理して、①～④までに相当する章（タイトルは現在の3章のものでよい）と、⑤、⑥に相当する章に分け直したほうがよいと思います。また①～⑥の番号に応じたサブタイトルをつけて分けると分かりやすいです。併せて、下記に関する記述を若干詳しくしていただくと読者が理解しやすいでしょう。

- A) 「要素技術の開発」として第1世代のCTと呼ばれる方法を選択したとしても、著者の独自性の高い開発項目があったはず。それに関する具体的な記述があるとわかりやすい。簡単な表で示すのもよい。
- B) 「ユーティリティの高度化」に相当するか所では、どのような検査対象で何が不足と考えられ、その解決に向けて高度化したのか、もう少し詳しい記述があったほうがよい。
- C) ⑤に相当する記述のエッセンス部分では、どんな要請（考慮）条件のもとで、どのような判断を下し、記述された結論に至ったかに関してもう少し記述を加えていただくと、橋渡し研究を方法的に理解する上で役立つ。

回答（豊川 弘之）

頂いたコメントを参考にして、全体の構成を調整しました。併せて、説明を適宜加筆修正、削除、移動等を行いました。それぞれについては3章(1)、(2)、(3)において少し詳しく記述しました。

導波モードセンサーを用いたインフルエンザウイルスの検出

— 手のひらサイズの高感度センサーを開発 —

栗津 浩一*、藤巻 真、Subash C. B. GOPINATH、王 曉民

我々はかつてシンセシオロジー誌^[1]において、導波モードセンサーの開発を報告した。この論文では、波長掃引方式の開発や装置の小型化方法についての研究紹介を行うとともに、応用例としてインフルエンザウイルスH3N2とその他の亜型の識別が明確にできたことを報告する。また我々はシアル酸の吸着の違いによるH3N2型とH5N1型の識別が導波モードセンサーで可能であることを示した。イムノクロマトグラフィー、ELISA、SPRとの感度比較をH3N2 Udorn株を用いて行い、この中では導波モードセンサーが最も高感度であることを確認した。このような小型高感度センサーは感染症の国内への侵入防止に対する水際対策として空港、航空機内、アリーナ等で有効であると考えている。

キーワード: バイオセンサー、導波モード、インフルエンザウイルス、小型センサー

Detection of influenza viruses with the waveguide mode sensor

– Development of a palmtop sized sensor –

Koichi AWAZU*, Makoto FUJIMAKI, Subash C. B. GOPINATH and Xiaomin WANG

We developed a highly sensitive sensor, based on optical waveguide modes, which was reported in the journal, *Synthesiology*^[1]. The first part of the present paper reports the method for reducing sensor size. Applications include identification of influenza virus A H3N2 and other subtypes of influenza viruses. We also found that sialic acid based detection using the waveguide sensor system analysis was very useful in distinguishing between H3N2 and H5N1 viruses. Using these techniques, H3N2 and H5N1 strains of influenza viruses have been successfully identified with the waveguide-mode sensor. Sensitivity comparison was also conducted for waveguide-mode sensor, immunochromatography, enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA), and surface plasmon resonance (SPR). Of these techniques, waveguide mode sensor showed the greatest sensitivity for the H3N2 Udorn strain. The palmtop sized, high sensitive sensor will be useful in border control against intrusion of infections, for example, in aircraft, at airports, and arenas.

Keywords: Bio sensor, waveguide mode, influenza virus, palmtop sensor

1 初めに

人類は20世紀に3回、今世紀に入っただけで1回のインフルエンザパンデミック（世界的大流行）に見舞われている。20世紀のパンデミックは1918年のスペイン風邪（スペイン・インフルエンザ）、1957年のアジア風邪、1968年の香港風邪である。そして今世紀2009年の新型インフルエンザは記憶に新しい。インフルエンザは届出が必要な伝染病である^{注1)}。スペイン・インフルエンザでは、7ヶ月でパンデミックとなり、感染者および死者の見積もりには幅があるものの世界人口18億人のうち、10億人が感染し、8000万人が死亡している。日本で最初の感染者が報告されてから3週間で日本中に広まり、国民の42%が感染し、45万人が死亡したと伝えられている。スペイン・インフルエンザが終息したのは1920年であり、1929年から始まった世界大恐慌の遠因となったと経済学者は見ている^[2]。そ

して2009年春発生の新型インフルエンザでは、アメリカ Center for Disease Control and prevention (CDC) によると全米で2010年10月までに約27万人が入院し、1万2千人が死亡している^[3]。過去の流行に比べてそれほど多くの死者が出なかった原因は、弱毒型^{注2)}であったためである。日本では累計で2068万人が感染したと報告されている^[4]。

それでは何故、このようなパンデミック型のインフルエンザが周期的に現れるのであろうか。まずインフルエンザにはA型、B型、C型の3種類がある。このうちA型は、抗原性の異なる16種類の赤血球凝集素(HA)と9種類のノイラミニダーゼ(NA)の組み合わせによって144種類の亜型が存在する。新型インフルエンザとはこのHAやNAが変異することである。このHAとNAの型からH1N1型インフルエンザといった呼び方をする。新型インフ

産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 〒305-8565 つくば市東1-1-1 中央第5
Electronics and Photonics Research Institute, AIST Tsukuba Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8565, Japan * E-mail: k.awazu@aist.go.jp

Original manuscript received September 22, 2014, Revisions received January 2, 2015, Accepted January 5, 2015

ルエンザとは新たな型の HA や NA が人類の間に出現することで、抗原連続変異と不連続変異、またはインフルエンザの遺伝子が鳥から人へ入ることによる。その後の研究からスペイン・インフルエンザは鳥インフルエンザ由来の弱毒型の H1N1 型であることがわかっている。

新型インフルエンザが深刻な理由として以下の 3 つが挙げられる。①これまで存在しなかった型のために誰にも免疫がない。②インフルエンザの感染力が極めて強い。空気感染するような能力を獲得したインフルエンザウイルスだけがパンデミックを引き起こせるとも考えられている。③未知のウイルスであるために、ワクチンを作っておくことができない。またスペイン風邪で顕著であった現象として若い人が全身感染や多臓器不全、ウイルス感染への過剰生体反応であるサイトカインストームといった重篤な病態へと進んでいく。例えばスペイン・インフルエンザでは死者のピークは 24-29 歳であった。日本でも、“働き盛りから順に倒れる”といった新聞の見出しが残されている。すなわち、社会を支える働き盛りの人たちを中心に瞬間に患者は広がり、死に至り社会機能が麻痺してしまう。厚生労働省の試算によれば^[6]、もしスペイン・インフルエンザ並み(致死率 2.0%)のインフルエンザがパンデミック型で発生した場合、64 万人が死亡すると考えている。しかし H5N1 亜型の変異ウイルスの場合致死率 60% であることから、さらに大きな被害がでるとの予測もある^{[6][8]}。

人類だけでなく、動物にとってもインフルエンザは重要な問題である。鳥インフルエンザウイルスの家禽や家畜への感染が確認されれば、現在の対策は家畜伝染病予防法に基づき広範囲にわたる殺処分を行うことになっている。例えば 2010 年には鳥根県の養鶏場で H5N1 亜型が確認され、21,549 羽が殺処分されている^[9]。殺処分だけに留まらず、半径 10 キロ圏内の養鶏場の立ち入り検査、防疫作業、鶏舎に至る道路の通行止め措置を行う必要があるので甚大な経済的損害である。そこで鳥インフルエンザ発生源を一刻も早く発見し、最低限の殺処分だけで収束させることができれば、広範囲にわたる殺処분을しなくて済む。またパンデミック化を防ぐことも可能となり、経済的な効果は大きい。この教訓もあり、2014 年 4 月 13 日に熊本県の肉用鶏農場で発生した高病原性鳥インフルエンザ(その後 H5N8 と判定)では、初動が速かったために被害の拡散は最小限に留まった。

現在問題となっている同じ鳥インフルエンザでも H5N1 型と H7N9 型はそれぞれ全く異なった課題を有している。H5N1 型は強毒型でありニワトリを始め多くの鳥類に致死感染を引き起こすが、鳥から人への感染は例外的に起きるだけと考えられている。これに対して H7N9 型は弱毒型で

表 1 鳥インフルエンザウイルスによる死亡者数
2014 年 6 月 27 日現在。^{[7][8]}

	死亡者数 / 感染者数
H5N1	393/667
H7N9	118/393

あるために、鳥が感染しても症状は現れず、したがって鳥の体温等のモニターは意味をなさない。ところが弱毒ではあっても鳥から人への感染は発生しており、人には免疫がないために重症となっている。

H5N1 および H7N9 型の鳥インフルエンザは動物だけの問題では済まなくなっている。両ウイルスとも動物から人への感染が起こりうる。しかも、その致死率は表 1 に示したとおり極めて高い。さらに、問題を深刻化させる可能性が危惧されている。頻繁に人に感染することで、より人に適応変異したインフルエンザウイルスが生じ、人から人へ効率よく感染が広がる可能性である。現時点では、両ウイルスともに、基本的にはニワトリからの感染で人が発症していると考えられているが、事態がいつ変化し急激な人での流行が起こるか、誰にも予測できない。

2 ベンチマーク

通常、病原微生物の同定には、その遺伝子または抗原タンパク質の同定が必要である。遺伝子の同定にポリメラーゼ連鎖反応 (PCR)、逆転写ポリメラーゼ連鎖反応 (RT-PCR) を用いた場合、陽性検体が 1 度でも漏れいするとエアロゾルコンタミネーションで擬陽性結果が出る危険性が高い。密閉チューブ内での遺伝子増幅法である qRT-PCR、qPCR 等リアルタイム PCR や Digital PCR がここ数年で目覚ましい発展を遂げたが、それでも PCR 産物のエアロゾルコンタミネーションの可能性は否定できない。これがひとたび起きると PCR 偽陽性が常態化してしまう。メーカー作成のガイドブックでの指針でもコンタミネーションを避けるための手法に数ページを割いているが、前処理、後処理を別の部屋に分けて、各部屋専用の試薬セット、ピペット、ディスプレイ機器類を揃えることを推奨している^[10]。したがって、PCR 系の解析法は、設備の整った研究施設で、熟練者が実施する場合には威力を発揮するが、一般の診療所、空港検疫所、集会所、学校等の通常施設での検出、同定には不向きである。さらに鳥インフルエンザウイルスの場合、鶏舎、生鳥市場や屠畜場等のフィールドでの検出が求められるが、このような環境を PCR は苦手としている。もしフィールドで PCR を行い、最初の検査では、ネガティブコントロールがネガティブであったとしても、同じ場所で

の2度目の測定ではPCR産物汚染の可能性が格段に増加する。また検出に時間がかかり、操作が煩雑であることも欠点である。これに比べ、抗体による検出は、検出感度は遺伝子検査に及ばないものの検出時間は短く、遺伝子増幅や特殊な工程を必要としない簡便な方法であり、抗原タンパク質のコンタミネーションの可能性はほとんどない。これは抗原タンパク質の増幅の過程がないことによる。

抗体を用いた検査手法として最も普及しているのがイムノクロマトグラフィーである。保険点数が150点と高いことも手伝ってインフルエンザA、B型診断用のイムノクロマトグラフィーが普及している。しかし、最近の研究で例えば2009年にHurtらは3種類のイムノクロマトグラフと5種類のインフルエンザA H1N1とH3N2を用いて感度試験を行っている^[11]。その結果、検出限界は検査キットおよび対象ウイルスによって大きく異なり $10^3 \sim 10^5$ TCID50/mLであったと報告している。山口らは、イムノクロマトグラフィーに付属のウイルス陽性コントロールを用いて感度比較を行っている^[12]。その結果、 $0.7\text{-}1.4 \times 10^3$ TCID50/mLと高感価の場合、的中率は熟練した臨床検査技師で98.8%、検査室職員（助手・看護師、看護学校教員）で85.4%と比較的高かったが、 $3.5\text{-}7.0 \times 10^2$ TCID50/mLと低感価の場合、的中率は熟練した臨床検査技師で60.7%、検査室職員で43.8%と極めて低かった。

Baccamらは鼻ぬぐいにより採取されるA/Hong Kong/123/77 H1N1株は罹患後2～3日で最大値をとるが、その値は $5 \times 10^2\text{-}1 \times 10^3$ TCID50/mL nasal wash程度であると報告している^[13]。以上3つの報告を総合して考えると、罹患後ウイルス量が最大となる時期でないとイムノクロマトグラフ法で精度良く検出ができないことがわかる。

国立感染症研究所によると、イムノクロマトグラフ法によ

る偽陽性（真の陰性）は、インフルエンザがコミュニティの中であまり流行していない、アウトブレイクの初期、および最後の時期により多く見られやすくなっている^[14]。またイムノクロマトグラフ法による偽陰性（真の陽性）については、インフルエンザがコミュニティで流行している、アウトブレイク中に多く見られるとしている。

鳥インフルエンザでも同様で、環境省ではイムノクロマトグラフ法の問題点として、感染した鳥でも陰性を示すことが報告されている^[15]。例えば確定検査で陽性だった60羽のうち、簡易検査で陽性だったのはわずか27羽であった事例が同マニュアルで紹介されている。逆に簡易検査で陽性でありながら、確定検査では陰性となった事例も示されている。この原因として持ち帰ってから、ウイルス分離の確定検査までの間に乾燥もしくは低温でない状況により、何らかの理由で試料中のウイルスが不活化してしまったことが挙げられている。つまり、その場で現行法よりも数ケタ高感度かつ迅速な検出を行う技術が求められている。

3 開発内容

3.1 小型導波モードセンサーの開発

我々は独自の導波モードセンサーを開発してきた^{[16][17]}。最も初期の導波モードセンサーは、すでにシンセシオロジーでも報告してきたとおり^[1]、ある特定の入射角において反射膜層および導波路層において、導波モードが形成される。光源として波長632.8 nmのHe-Neレーザーを用いて角度掃引を行うと、ある特定の角度において反射強度が減少する。表面に分子が吸着するなど表面状態が変化すると、それに伴う表面の屈折率変化を計測することができる。しかし、この場合、図1の光学系に示したとおり光源側と検出器側の二つのゴニオメータを同期させて掃引する

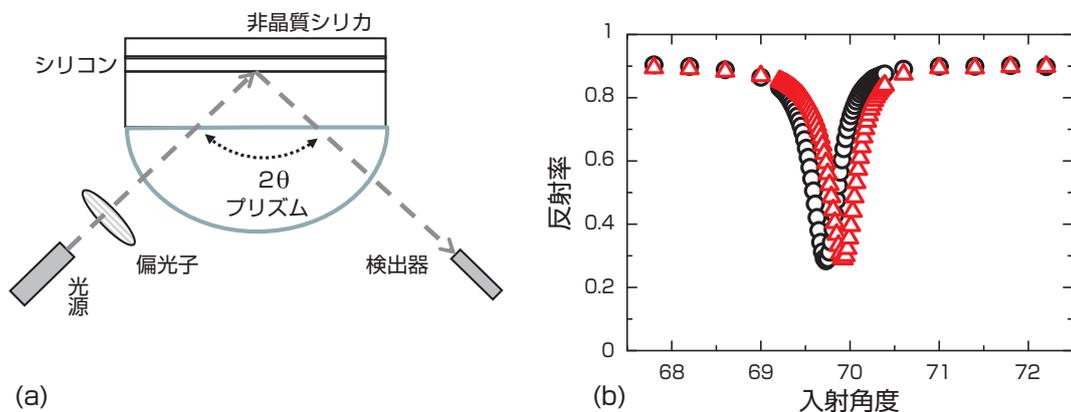


図1 (a) 角度掃引型導波モードセンサーの光学配置。プリズム下のSiO₂ガラス基板にはシリコン単結晶膜(c-Si)が張り合わされている。c-Siを熱酸化して非晶質SiO₂(a-Si)膜としている。このSiO₂膜中に射導波モードが形成される。ある特定の角度 2θ で反射強度が急激に変化することが確認される。非晶質シリカ表面に分子が付着すると 2θ の値が変化する。角度 2θ は2つのゴニオメータを同期させている。
(b) (a)の光学系で非晶質シリカ表面に分子が吸着した場合のイメージ。横軸が 2θ になる。分子が吸着する前が○、吸着した後は△となる。

必要があり、光学系自身が大型かつ複雑になるという問題点があった。このため、角度掃引型では携帯型センサーというユーザーのニーズを満足させることはできないと考えた。そこで、角度を掃引するのではなく、波長を掃引する手法を考案した。波長を掃引することでスペクトルが得られれば、小型化の障害となっている二つのゴニオメータをなくすことが可能となる^[18]。図2は、直径5 nmのタンパク質（屈折率1.45）が吸着したと想定した場合の吸着前後での反射率変化量のシミュレーション結果である。単結晶シリコン層厚さ220 nm、シリカ導波路層厚360 nm、プリズム材質はシリカ、またS偏光での計算である。幾つかのピークが確認でき、例えば500 nm、68°付近で反射率変化量が最大となる領域にピークが存在する。この計算結果から、入射角度を固定して、入射光の反射スペクトルを観測することによっても、ターゲット物質の検出が可能であることがわかった。

波長を掃引することでも導波モードでの測定が可能なことから、図3のような光学系を設計した。励起光は白色光のまま測定部背面に到達し、その後反射光はコリメータレ

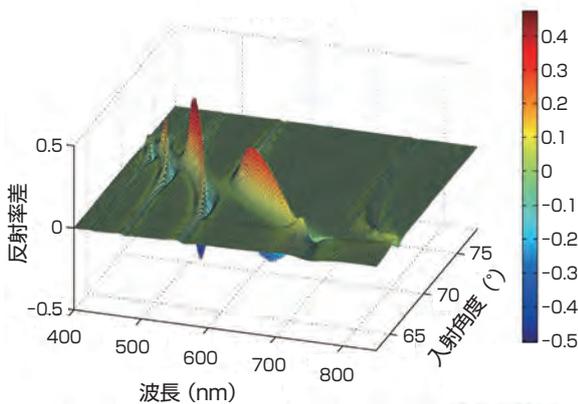


図2 反射率変化の角度、波長依存性の計算結果
反射率変化量を色で表した。波長を固定して、角度を掃引しても反射率変化のピークが観察されるが、角度を固定し波長を掃引しても反射率変化のピークが観察されることがわかる。

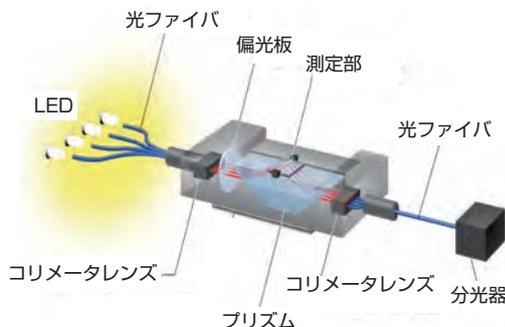


図3 波長掃引型の導波モードセンサー
光源として白色LEDを用いる。測定部に測定板を設置して、測定板上の反応を反射光で検出する。光ファイバーの光軸を揃えることで、分光器まで反射光を導くことができる。

ンズ、光ファイバを経て分光器に到達する。光源を4つ使うことにより測定部で4点の計測が可能となる。この光学系により、同期させながら掃引させる2台のゴニオメータが不要となり、小型化が可能となった。

測定時における図3の測定部をより詳細に示したものが図4である。表面反応を検出する検出板はSiO₂ガラス基板上の単結晶シリコン(c-Si)膜を形成したものを、シリコンを熱酸化し非晶質シリカ(a-SiO₂)とすることで得ている。このa-SiO₂層表面での屈折率変化に対して最も大きな反射率変化量が得られるようにc-Si膜厚とa-SiO₂膜厚を設計することで表面反応を鋭敏に検出する仕組みである。図5は、波長512 nm、シリカ導波路層厚さ284 nm、単結晶シリコン層厚さ220 nmで検出板表面付近の電場強度分布を計算したものである。導波路層表面に強い電場が形成され、高感度な検出が実施可能であることがわかる。したがって表面に抗体を固定化しておき、ウイルスと反応させることによる表面の屈折率変化を捕えることが可能である。また、後述のように金ナノ粒子で信号を増幅することも可能である。

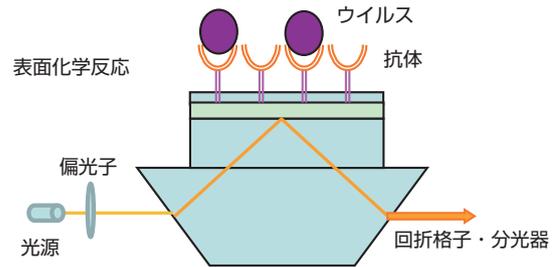


図4 導波モードセンサーの光学配置
プリズム上のSiO₂ガラス基板、検出板の構成は図1と同じ。出射光は分光器で分光される。

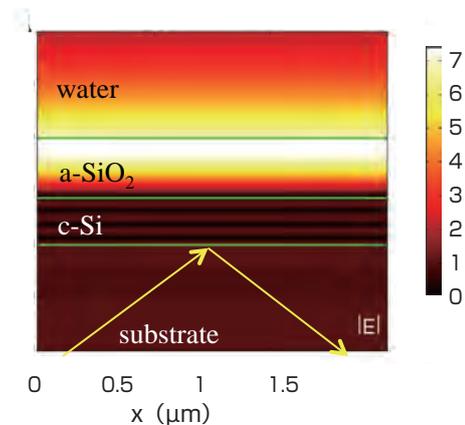


図5 c-Si層220 nm、SiO₂層284 nm、励起波長512 nm 導波モードの電場強度分布
図1と同様、黄色の矢印が光入射、出射方向である。SiO₂層最表面に電場強度が最大になるように膜厚等を設計した。横のスケールバーが電場強度を示している。

小型化までの変遷を図6に示した。初期においては、(a)のように1 m × 50 cmで2段の定盤上に光学系を設定した角度掃引型であったが、その後図2、3のとおり波長を掃引することでも導波モードでの測定が可能なることから、図3のような光学系を設計した。励起光は白色光のまま測定部背面に到達し、その後反射光はコリメータレンズ、光ファイバを経て分光器に到達する。この光学系により、同期させながら掃引させる2台のゴニオメータが不要となったために、図6(b)のとおり小型化(30 cm × 15 cm × 20 cm)に成功し、技術移転先企業より製品化された。この装置にはパソコン、通信用Bluetooth、バッテリーが搭載されている。その後、主として光学系のさらなる小型化に努め(c)のとおり7 cm × 5 cm × 15 cmを達成した。

3.2 インフルエンザウイルス亜型の識別

導波モードセンサーでインフルエンザ亜型の識別を試みた^[20]。ポリクローナル抗体は、H3N2 A/Udorn/307/1972

を健康なウサギに免疫することで得た。このポリクローナル抗体を検出板表面に固定化した。4種類のH3N2インフルエンザウイルスは界面活性剤であるTriton X-100で分解した後、検出板表面に固定化したポリクローナル抗体と反応させた。その後、ポリクローナル抗体を金ナノ粒子の周りに固定化した標識を用いて高感度化させた。測定に使用したウイルスは1 μgである。図7はその結果で、点線がウイルスのみを反応させたもの、実線が金ナノ粒子で高感度化させたものである。ウイルスの種類は(a) A/Shandong/9/1993、(b) A/Brisbane/10/2007、(c) A/Panama/2007/1999、(d) A/Wisconsin/67/2005である。すべてに関してスペクトル反射率の変化が確認され、反応性に差はあるものの、同じH3N2の抗体に対して、H3N2は結合することがわかった。なお誤差は反射率変化にして20%以内である。

次に、表面に固定化した抗体を同じ抗H3抗体とし、

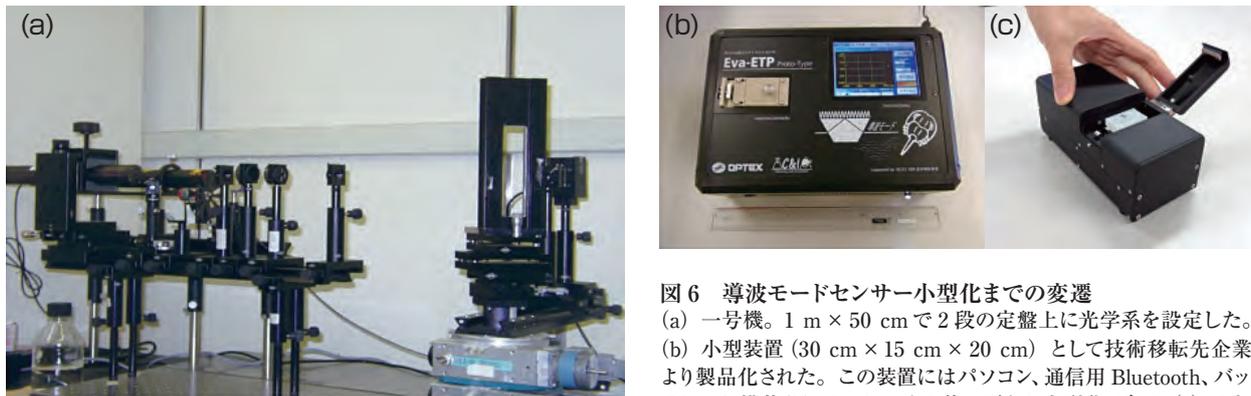


図6 導波モードセンサー小型化までの変遷
(a) 一号機。1 m × 50 cmで2段の定盤上に光学系を設定した。
(b) 小型装置(30 cm × 15 cm × 20 cm)として技術移転先企業より製品化された。この装置にはパソコン、通信用Bluetooth、バッテリーが搭載されている。その後、更なる小型化に努め(c)のとおり7 cm × 5 cm × 15 cmを達成した。^[19]

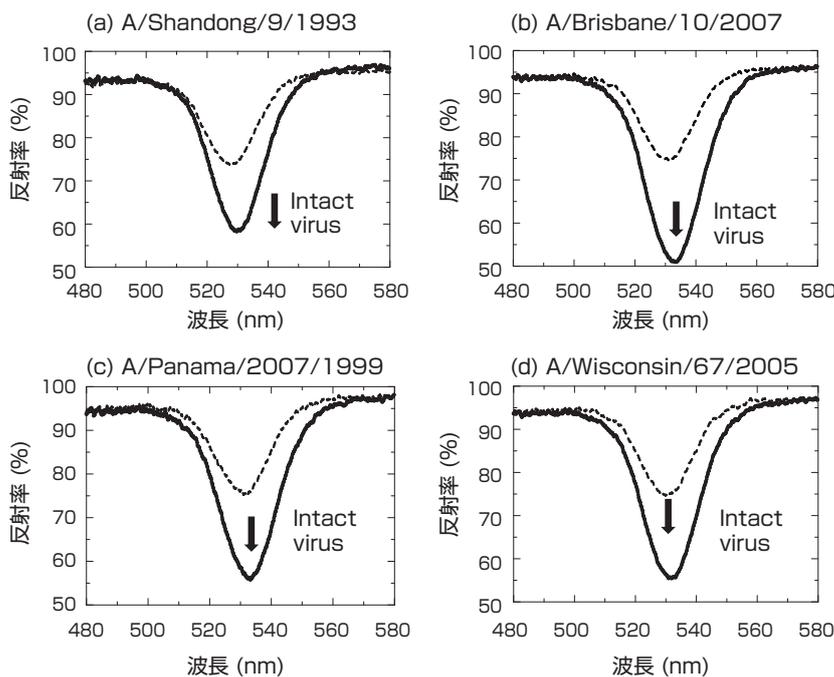


図7 H3N2抗体を固定化させた検出板を用いて各種H3N2ウイルスの検出を行った結果
(a) A/Shandong/9/1993、
(b) A/Brisbane/10/2007、
(c) A/Panama/2007/1999、
(d) A/Wisconsin/67/2005
である。

検出対象として H3N2 以外のサブタイプのウイルスを用いた。H5N1 のウイルスは国内では扱いが難しいので、すべて赤血球凝集素 (HA タンパク) を用いた。結果を図 8 に示した。点線がウイルスのみで反応させたもの、実線が金ナノ粒子で高感度化し検出したものである。測定に使用したウイルスは 1 μg である。図 8 (a)、(b)、(c)、(d) はそれぞれ A/Wisconsin/67/2005 (H3N2)、A/chicken/India/NIV33487/2006 (H5N1)、A/California/07/2009 (H1N1)、A/Japan/305/1957 (H2N2) の赤血球凝集素の検出試験を行った結果である。H3N2 であれば赤血球凝集素だけでも (a) に示すとおりスペクトルの変化が見られた。しかし、他の亜種の赤血球凝集素では全くスペクトルに変化は見られなかった。このことは、固定化した抗体と異なる亜種の赤血球凝集素は結合しないことを意味する。したがって、H3N2 の抗体を固定化した検出板を用いると H3N2 のウイルスの検出はできるが、それ以外の亜種は検出できないことを意味しており、導波モードセンサーにより亜種の識別が可能であることが示された。

もう一つのインフルエンザウイルス亜型の識別方法について紹介したい^[21]。各々の反応の模式図と実験結果とを図 9、10 に示した。検出対象はヒトインフルエンザ A 型 H3N2 のウイルス粒子、および鳥インフルエンザ H5N1 の赤血球凝集素を用いた。それぞれのウイルスを識別するために、2,6 シアル酸および 2,3 シアル酸でコーティングした 2 種類の金ナノ粒子を標識として用いた。金ナノ粒子を標識とすることで増感もなされている。ヒトインフルエンザ H3N2 ウイルスの HA タンパクは金ナノ粒子表面の 2,6 シ

表 2 H3N2 Udorn 株を用いた導波モードセンサー、免疫クロマトグラフィーおよび ELISA の検出限界濃度比較

手法	H3N2 pfu/ml
導波モードセンサー	800
免疫クロマトグラフィー	8×10^4
ELISA	2×10^3

アル酸と反応しスペクトルが変化するが (図 9 (a) (c))、金ナノ粒子表面の 2,3 シアル酸とは反応しないためスペクトルは変化しない (図 9 (b) (d))。逆に、鳥インフルエンザ H5N1 の赤血球凝集素は金ナノ粒子表面の 2,6 シアル酸と反応しないためスペクトルは変化しないが (図 10 (a) (c))、金ナノ粒子表面の 2,3 シアル酸とは反応しスペクトルが変化する (図 10 (b) (d))。このようにして、ヒトインフルエンザ H3N2 ウイルスと鳥インフルエンザ H5N1 の赤血球凝集素の簡易識別が可能となった。

次にウイルスを使った検出感度試験として A 型のインフルエンザウイルス H3N2 Udorn を用いた。ここでは、感染力の指標である plaque forming unit (pfu) を用いて比較を行い、表 2 にまとめた。導波モードセンサーでの検出試験では、まず、ウイルスと金ナノ粒子標識された抗体を混ぜて 10 分放置した後、この混合液をセンサー上に滴下して 30 分後の信号を測定した。この時、導波モードセンサーの検出限界は 8×10^2 pfu/ml となるデータが得られた。免疫クロマトグラフィーでは同試料にて検出限界は 8×10^4

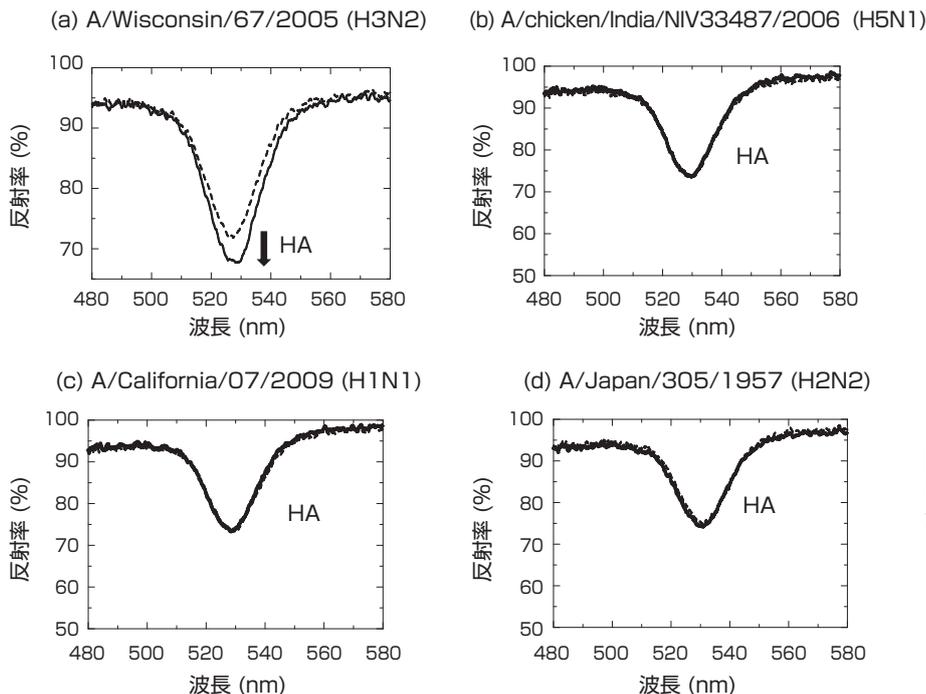


図 8 H3N2 抗体を固定化させた検出板を用いて各種亜型の赤血球凝集素の検出を行った結果 (a) A/Wisconsin/67/2005 (H3N2)、(b) A/chicken/India/NIV33487/2006 (H5N1)、(c) A/California/07/2009 (H1N1)、(d) A/Japan/305/1957 (H2N2) である。

pfu/ml だった。サンドイッチ法 ELISA の H3N2 ウイルスの検出限界は 2×10^3 pfu/ml だった。以上の定量的試験の結果より、導波モードセンサーは SPR や免疫クロマトグラフィーおよび直接吸着法 ELISA との比較において、1～2桁高感度であることがわかった。サンドイッチ法 ELISA は、前処理などの煩雑さと数時間～1日におよぶ所要時間が煩わしく、また試験者の技量に依存する。したがって導波モードセンサー技術は、前処理の簡便さと所要時間の短さにおいて、圧倒的な優位性を有していると考えられる。

3.3 非特異吸着抑制表面

抗原抗体反応による検出において重要なのは、非特異吸着を防ぐことである。産総研バイオメディカル研究部門との共同開発において図 11 のような表面形成を行った^[22]。タンパク質の非特異吸着を抑制するシラン表面修飾材料としてメトキシオリゴエチレングリコール-トリエトキシシランを用いた。これは末端をメチル化したオリゴエチレングリコール基となっており、およそ完全に非特異吸着を抑制で

きる。また抗体を固定化するシラン表面修飾材料としてスクシンイミドエステル-トリエトキシシランを用いた。表面末端にスクシンイミド基を有しており、抗体固定化が可能である。この2種類のハイブリッド溶液にシリカ表面を有する検出板を浸漬させるだけで、高レベルのプロッキング特性と抗体固定特性が発現した。現在は、血清や血漿中のウイルスの検出において、非特異吸着を効率よく抑制できることを確認済である。鼻ぬぐいによる検体中のインフルエンザウイルスを特異的に検出することが期待できる。

3.4 構成学的考察

以上を構成学的に図 12 に記載した。統合技術である「簡便で高感度なインフルエンザウイルス検出装置の実現」は、ニーズでありゴールである。また一方、要素技術のうち、シリコンテクノロジーと光学、電磁気学はすでに我々は蓄積を有していた。統合技術を達成するには互いにほとんど学問的に重なり合っていない要素技術の4分野の融合が不可欠であった。そこで表面化学とウイルス学の専門家と

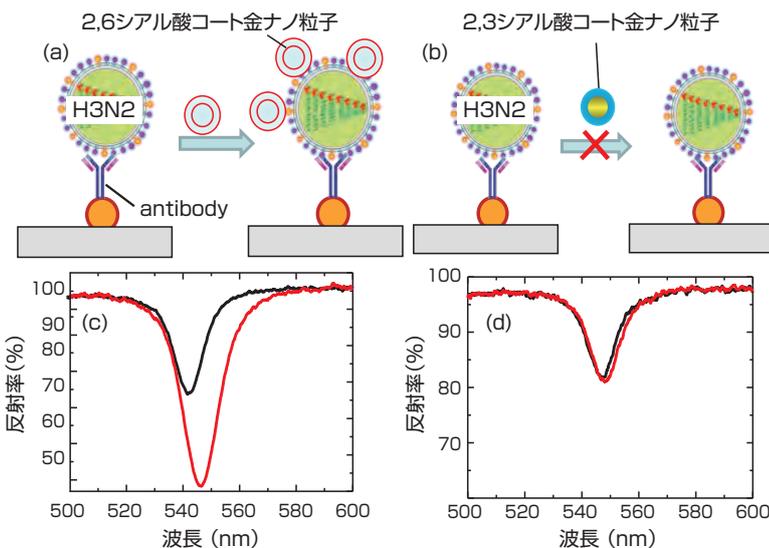


図 9 抗体を用いて H3N2 ウイルスを導波モード検出板に固定化させた。その後 2,6 シアル酸と 2,3 シアル酸で直径 5 nm の金ナノ粒子をコーティングしたものを用いてラベル化した。金ナノ粒子により増感されている。(a) 金ナノ粒子表面の 2,6 シアル酸は H3N2 の HA タンパク質とは結合する。(b) 金ナノ粒子表面の 2,3 シアル酸は H3N2 の HA タンパク質と結合しない。実際に (a) (b) の反応を導波モードセンサーを用いて観察すると、(c) 金ナノ粒子表面の 2,6 シアル酸は H3N2 の HA タンパク質とは結合して、スペクトルが変化した。(黒線から赤線) (d) 金ナノ粒子表面の 2,3 シアル酸は H3N2 の HA タンパク質と結合しないので、スペクトルの変化も見られなかった。

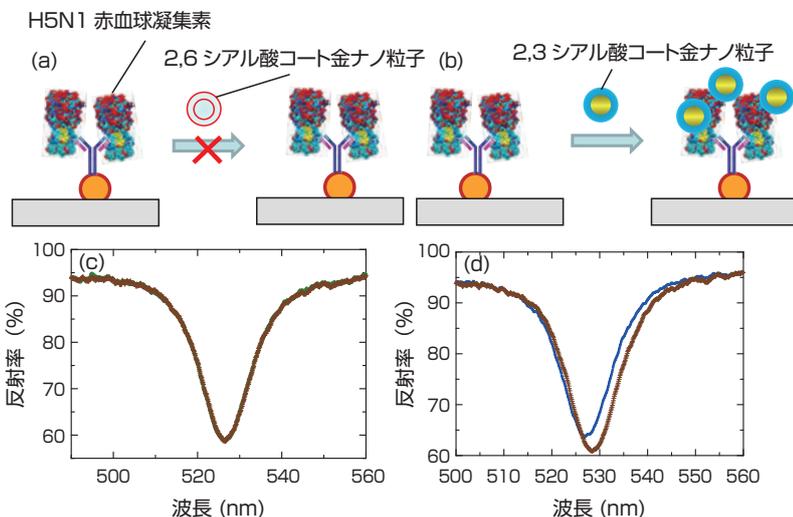


図 10 抗体を用いて H5N1 赤血球凝集素を固定化させた。その後 2,6 シアル酸と 2,3 シアル酸で直径 5 nm の金ナノ粒子をコーティングしたものを用いてラベル化させた。(a) 金ナノ粒子表面の 2,6 シアル酸は H5N1 とは結合しない。(b) 金ナノ粒子表面の 2,3 シアル酸は H5N1 と結合する。実際に (a) (b) の反応を導波モードセンサーを用いて観察すると、(c) 金ナノ粒子表面の 2,6 シアル酸は H5N1 とは結合せずスペクトルも変化しない。(d) 金ナノ粒子表面の 2,3 シアル酸は H5N1 と結合し、スペクトルの変化が見られた。(青線から茶線)

共同研究を行うことで、中間統合技術の開発に成功した。ゴールに向かって、要素技術に再三立ち戻りながら中間統合技術を最適化させて、統合技術を構築させた。

4 異分野融合のプロセス

この研究は、小型センサーを設計、製作するために光学の実験と計算両方の研究者の協力が必要であった。さらにその設計を実現するために企業との協力があつた。実際にできたセンサーを使用する社会課題として、新型インフルエンザの迅速検査の提案をいただいたのは内科医師からであった。2008年にもしも新型インフルエンザが大流行した場合、当時のPCR技術では時間がかかること、イムノクロマトグラフィーでは新型かどうか判別できないことから、内科医として打つ手がないというご意見をいただいた。2009年春にメキシコで新型インフルエンザが発生、パンデミック化する1年前の話である。本センサーを用いることで新型インフルエンザの迅速、その場同定という喫緊の社会課題に対応できると考えた。表面反応を観測する上で重要なのは、非特異吸着の抑制である。多くの論文では、非

特異吸着を抑制する工夫の記述がないが、検体中のウイルスを測定する上では、重要な課題である。これに関しては、所内バイオメディカル研究部門との共同研究により解決できた。このようにこの研究は異分野の研究者の持つ情報や技術要素の連携により達成できたものである。

5 最後に

安全安心な社会を実現するためには将来的には、インフルエンザウイルスのみでなく各種ウイルスの検出が必要と考えている。ウイルス感染に国境はないので、各国できめ細かくウイルスを常時モニタリングし、水際でウイルスの拡散を防止することが重要である。また、ウイルスの感染と温度、湿度、バクテリアが関連していると言われているがまだ明確にはなっていない。すべてのデータを地理情報と一括で管理することで、IT医療、IT農業として新たなビジネスとして展開可能である。この際、センサーという商品を売るのみでなく、サービス、情報、メンテナンスとパッケージにすることにより、売り切りモデルでないビジネスが展開できる。

この論文では、インフルエンザウイルス検出に特化した内容を紹介してきた。現在、導波モードセンサーを用いた簡易血液検査装置の開発も行っており、B型、C型肝炎等感染症や血液型判定を行なえるようにすることを目指している。これができれば、被災地の避難所内で直接輸血をしたり、救急車の中で血液検査を済ませてしまうことも可能である。また、表面反応を観察するシステムであり、めっき液の劣化の常時モニターをはじめとする生産ラインの管理にも用いることができる。すでに、めっき工場を持つ複数社が関心を示している。

謝辞

この研究開発において、早稲田大学理工学術院大木義道教授研究室の学生諸氏には実験を手伝っていただいた。生化学やウイルス学に関する助言は日本大学医学部黒田和道准教授、神戸大学医学研究科感染症センター清水一史特務教授よりいただいた。

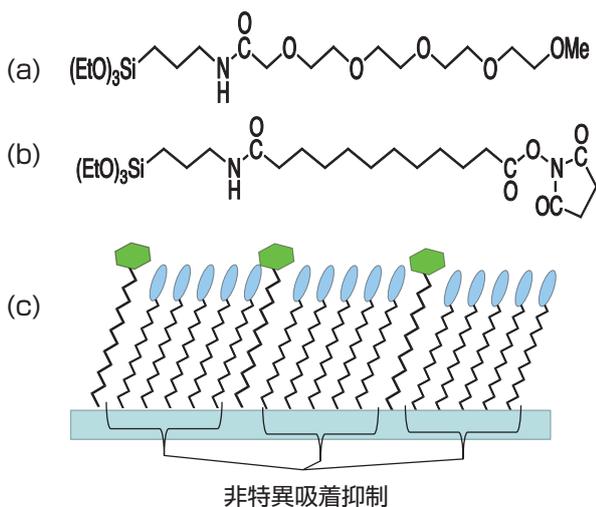


図11 非特異吸着抑制表面
トリエトキシシランに (a) メトキシオリゴエチレングリコール、(b) スクシンイミドエステルをそれぞれ結合させた。(a) は非特異吸着を抑制し、(b) のスクシンイミド基が抗体のカルボニル基と結合する。

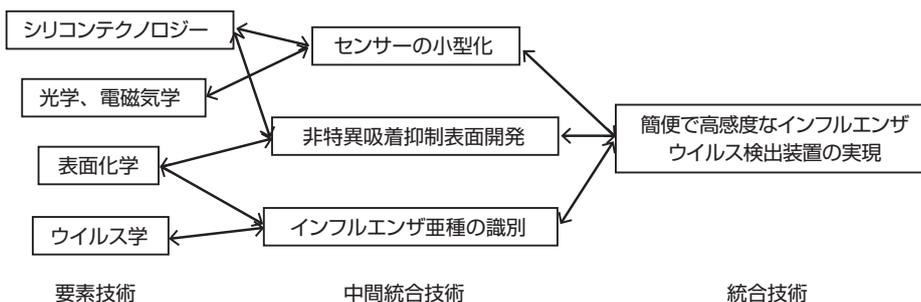


図12 構成学的記述

注1) 日本語では、風邪 (flu) とインフルエンザを混同して用いているが全く異なり、後者は届出の必要な伝染病である。感染症には全例の届出が必要なもの、一部の指定病院のみが届出が必要なものがある。季節性インフルエンザは後者である。
 注2) 強毒インフルエンザの明確な定義は難しいが、通常は、鳥インフルエンザに用いられ、条件の一つはHAのプロテアーゼ開裂部位が強毒型であることである。そういう意味で、スペイン・インフルエンザは弱毒型によるということになる。

参考文献

[1] 藤巻真, 粟津浩一: 高感度分子吸着検出センサの開発, *Synthesiology*, 2 (2), 147-158 (2009).

[2] 岡田晴恵, 田代真人: 新型インフルエンザH5N1, 岩波書店, 7, 10 (2007).

[3] Centers for Disease Control and Prevention: H1N1 Flu, http://www.cdc.gov/h1n1flu/estimates_2009_h1n1.htm, 2015-01-02.

[4] 内閣府: 新型インフルエンザ全般に関する参考資料, <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/ful/syakai/dai2/sankou2.pdf#search=%E6%96%B0%E5%9E%8B%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%95%E3%83%AB%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%82%B6+%E6%AD%BB%E8%80%85%E4%BA%88%E6%B8%AC>, 2015-01-02.

[5] 厚生労働省: 新型インフルエンザ対策行動計画 平成21年2月17日改訂版 全体版, 7 (2009).

[6] 速水融, 立川昭二, 田代真人, 岡田晴恵, (岡田晴恵編): 強毒性新型インフルエンザの脅威, 藤原書店, 161 (2006).

[7] 厚生労働省健康局結核感染症課作成2014年6月27日現在, <http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kekkaku-kansenshou02/>, 2015-01-02.

[8] 内閣官房新型インフルエンザ等対策室: 鳥インフルエンザA (H7N9) への対応について, 2014年3月25日.

[9] 島根県庁: http://www.pref.shimane.lg.jp/industry/norin/ringyo/choujyu_taisaku/koubyougenseitoriihuruenzanoha_sseinuituie.html, 2015-01-02.

[10] ロッシュ・ライフサイエンス: PCRの一般的なガイドライン, http://roche-biochem.jp/pdf/prima/molecular_biology/pcr/PCR_manual_J/third_edition/PCR_manual_chapter2_J.pdf, 2015-01-02.

[11] A. C. Hurt, C. Baas, Y.M. Deng, S. Roberts, A. Kelso and I. G. Barr: Performance of influenza rapid point-of-care tests in the detection of swine lineage A(H1N1) influenza viruses, *Influenza and Other Respiratory Viruses*, 3 (4), 171-176 (2009).

[12] 山口育男, 青山知枝, 山本優, 木下恵子, 伊藤由美, 西村秀一: イムノクロマト法インフルエンザウイルス抗原検出キットBDペリターシステムFluにおける機器判定の感度とその目視判定に対する優越性の検討, *日本臨床微生物学雑誌*, 23 (3), 39-44 (2013).

[13] P. Baccam, C. Beauchemin, C.A. Macken, F.G. Hayden and A.S. Perelson: Kinetics of influenza A virus infection in humans, *J.Virology*, 80 (15), 7590-7599 (2006).

[14] 国立感染症研究所: 感染症情報センター, http://idsc.nih.go.jp/disease/swine_influenza/2009cdc/CDC_rapid_testing.html, 2015-01-02.

[15] 環境省: 高病原性鳥インフルエンザに備えて(対応編), http://www.env.go.jp/nature/dobutsu/bird_flu/manual/pref_0809/4_chpt2.pdf, 18, 2015-01-02.

[16] K. Awazu, C. Rockstuhl, M. Fujimaki, N. Fukuda, J. Tominaga, T. Komatsubara, T. Ikeda and Y. Ohki: High sensitivity sensors made of perforated waveguides, *Opt. Express*, 15 (5), 2592-2597 (2007).

[17] M. Fujimaki, C. Rockstuhl, X. Wang, K. Awazu, J. Tominaga, Y. Koganezawa, Y. Ohki and T. Komatsubara:

Silica-based monolithic sensing plates for waveguide-mode sensors, *Opt. Express*, 16 (9), 6408-6416 (2008).

[18] X. Wang, M. Fujimaki, T. Kato, K. Nomura, K. Awazu and Y. Ohki: Optimal design of a spectral readout type planar waveguide-mode sensor with a monolithic structure, *Opt. Express*, 19 (21), 20205-20213 (2011).

[19] K. Awazu, M. Fujimaki and S. C. B. Gopinath: Palmtop waveguide-mode sensor: Comparison of sensitivity and subtyping of influenza viruses with SPR, ELISA and Immunochromatography, *Sensors*, 2013 *IEEE*, *ieeexplore*.iee.org (2013).

[20] S. C. B. Gopinath, K. Awazu, M. Fujimaki and K. Shimizu: Evaluation of anti-A/Udorn/307/1972 antibody specificity to influenza A/H3N2 viruses using an evanescent-field coupled waveguide-mode sensor, *PLoS ONE*, 8, e81396, 1-9 (2013).

[21] S. C. B. Gopinath, K. Awazu, M. Fujimaki and K. Shimizu: Neu5Aca2,6Gal and Neu5Aca2,3Gal receptor specificities on influenza viruses determined by a waveguide-mode sensor, *Acta Biomaterialia*, 9 (2), 5080-5087 (2013).

[22] M. Tanaka, K. Yoshioka, Y. Hirata, M. Fujimaki, M. Kuwahara and O. Niwa: Design and fabrication of biosensing interface for waveguide-mode sensor, *Langmuir*, 29 (42), 13111-13120 (2013).

執筆者略歴

粟津 浩一 (あわづ こういち)

1991年東京工業大学博士後期課程修了。博士(工学)。同年電子技術総合研究所入所、加速器応用工学の研究に従事。1996年から98年までモントリオール大学招聘研究員。2001-2002年新エネルギー・産業技術総合開発機構主任研究員、2002-2004年分子科学研究所客員教授。2003-2010年産業技術総合研究所近接場光応用工学研究センターチーム長、2005-2007年東京大学工学系研究科客員教授、2009-2012年情報通信エレクトロニクス分野研究企画室長、2012年から現在電子光技術研究部門副研究部門長、ナノフォトニクス、医療との融合領域の研究に従事している。この論文では、界面、表面の状態観察に関する検討を行った。



藤巻 真 (ふじまき まこと)

1998年早稲田大学博士後期課程修了。博士(工学)。1998-2000年日本学術振興会特別研究員として、早稲田大学、モントリオール大学にて、光通信デバイスの研究に従事。その後、科学技術特別研究員として、電子技術総合研究所にてパワーエレクトロニクス素子、光通信素子の開発に従事。その後、早稲田大学助教授を経て、2004年に産業技術総合研究所に入所。2012-13年情報通信エレクトロニクス分野研究企画室企画主幹、2013-現在電子光技術研究部門光センシング研究グループ長。近接場光を用いたバイオセンシング技術の開発に従事している。産総研技術移転ベンチャーの取締役に就任し、産総研の技術の実用化に従事。この論文では、主に光学設計を行った。



Subash C. B. GOPINATH (さばっしゅ ごびなす)

1999年インド国マドラス大学博士課程修了、同年台湾中央研究院、2003-2013年産業技術総合研究所、博士研究員およびテクニカルスタッフ、2013年-現在マレーシア国マレーシアプリンス大学ナノ電子工学研究所准教授、バイオとナノテクの融合領域の研究に従事。この論文ではウイルス検出全般を担当。



王 曉民（おう ぎょうみん）

1999年東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻博士課程中退。通信・放送機構招聘研究員を経て、2000年に技術研究組合フェムト秒テクノロジー研究機構に参加し、超高速光伝送の研究に従事。2003-2010年産業技術総合研究所近接場光応用工学研究センターにて、新規光デバイスの開発に従事。その後、ナノエレクトロニクス研究部門に移り相変化新機能デバイスの研究に従事している。2011年博士（工学）（早稲田大学）。この論文では、電磁波の数値計算と高感度化のための光学設計を行った。



査読者との議論

議論1 全体

コメント（小林 直人：早稲田大学研究戦略センター）

この論文は、導波モードセンサーによる光反射スペクトル変化を検出することによりインフルエンザウイルスを簡便・迅速に同定することが可能な装置を研究開発した報告です。健康・医療に関する社会での喫緊の課題を解決する極めて有用な手法を生み出した経緯を詳細に述べており、イノベーション創出の一例としてのアピール度も高くシンセシオロジー誌の論文として相応しい内容です。

ただし、初稿ではすでに引用文献に示された著者らの既発表論文の総説的な表現となっているきらいがあったので、イノベーションの方法論として論文の再構成を提案しましたが、その結果目的・シナリオ・要素技術とその構成等が整理して論述され、シンセシオロジーの論文に相応しいものになったと思います。

コメント（三石 安：産業技術総合研究所）

ナノ粒子の吸着を感度良く検出する導波モードセンサーを用いたウイルス検出器の小型化に関する論文で、技術移転企業が実用機としての小型装置の開発に取り組んでいる点で、シンセシオロジー論文として適切です。ただし、論文初稿の記述では抗原抗体反応に基づく検出データの部分に記述を多く割いており、現場使用に耐えるための工夫や、小型化の工夫に関する記述が少なくこの論文で表現すべき目標をまだ十分に記述できていないと感じました。

議論2 構成学的な記述について

コメント（小林 直人）

シンセシオロジー誌では、研究の目標、それを実現するためのシナリオ、研究目標を達成するための要素（技術）の選択と統合、結果の評価を記述することになっています。これらの関係がよく分かる図を示すとともに、この研究での要素技術、中間統合技術、統合技術（目標）の関係を記述してはいかがでしょうか。また、今回の簡便・迅速なインフルエンザウイルス検出の研究開発方法に関する総合的な評価と今後の展望を記して下さい。

回答（栗津 浩一）

新たに図12として構成学的な図を記載しました。ここで統合技術

である「簡便で高感度なインフルエンザウイルス検出装置の実現」は、ニーズでありゴールです。また一方、要素技術のうち、シリコンテクノロジーと光学、電磁気学はすでに我々は蓄積を有していたものです。統合技術を達成するには互いにほとんど学問的に重なりを持っていない要素技術の4分野の融合が不可欠でした。そこで表面化学とウイルス学の専門家と共同研究を行うことで、中間統合技術の開発に成功しました。また、ゴールに向かって、要素技術に再三立ち戻りながら中間統合技術を最適化させて、統合技術を構築しました。このような内容を新たに「3.4 構成学的考察」として記述しました。また本雑誌の趣旨に添うように、総合的な評価と今後の展望に関して「4 異分野融合へのプロセス」という項目を起こしました。

議論3 性能の優位性について

コメント（三石 安）

抗原抗体反応の特異性が非常に高いことは周知ですので、今回の論文では、角度掃引型の検出器を感度を犠牲にせずに波長掃引型にするためのセンサー設計の工夫や、現場での使用を考えた小型装置への実装の工夫の部分を中心に記述していただく目標が達成されると思います。またインフルエンザウイルスの重型を、既存の抗原抗体反応を用いた検出手法より、精度、感度ともによく、加えて迅速に検出できるという優位性が明確に伝わるように、記述を整理してください。

回答（栗津 浩一）

角度掃引から波長掃引に変えるということのイメージが読者に伝わりにくいことから、新たに計算を行った結果の図2を加えました。この図より、それぞれの掃引方法により現れる導波モードが3次元的に理解いただけると思います。また、本手法の既存の手法に対する優位性については表2を作成し、また感度、測定時間の記載を行いました。

議論4 本研究成果の反響について

質問（小林 直人）

この研究成果は、長時間の前処理や測定の必要性、低感度性等が課題であった従来の方法に比べて、簡便性・迅速性の観点から画期的な方法を開発したと考えられます。すでに関係者にもこの研究成果は披露されていると思いますが、反響はいかがでしょうか。もし評価するコメント等があればご紹介ください。

回答（栗津 浩一）

実際にできたセンサーを使用する社会課題として、新型インフルエンザの迅速検査の提案をいただいたのは内科医師からでした。2008年にもしも新型インフルエンザが大流行した場合、当時のPCR技術では時間がかかること、イムノクロマトグラフィーでは新型かどうか判別できないことから、内科医として打つ手がないというご意見をいただきました。本センサーを用いることで新型インフルエンザの迅速、その場同定という喫緊の社会課題に対応できると考えています。この点は、「4 異分野融合へのプロセス」という項目の中で紹介しました。

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。
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。

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

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。)及びその後に、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。

〒305-8568

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2

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

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 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba
305-8568

E-mail: 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

編集後記

本誌を発行している産業技術総合研究所(産総研)は、平成13年4月の発足以来、基礎的研究の成果を社会に活かす役割を担い、基礎的研究から実用化研究まで一体的かつ連続的に取り組んできました。本誌の役割は、巻末の趣旨にあるように、研究成果を社会に活かす知の集積を目指すところにあります。本年4月より産総研は、独立行政法人から国立研究開発法人となるとともに、第4期中長期期間がスタートしましたが、今期中長期目標では革新的な技術シーズを迅速に事業化につなげていくための「橋渡し」機能の強化が特に求められています。

本誌が目指している構成的・統合的な研究活動の成果を蓄積することは、「橋渡し」のために重要であることは言うまでもありません。筆者は以前に本誌の編集委員会の小林直人幹事らとともに、本誌に掲載された70編の論文を対象として構成方法の分析を行ったことがあります(*Synthesiology*, 5 (1), 36-52 (2012))。その結果、研究分野ごとに構成方法に特色がありますが、社会導入に向けては、社会的試用によりフィードバック・プロセスを何回も回していくことが必要であることが明確となっています。本号の「電子加速器を利用した研究の産業技術への橋渡し」の論文でも、ユーザーの声を多く聴き、研究の方向性を調整した過程が記述されています。

最近、本誌の編集委員会では、これまでに本誌に論文を掲載された著者に対してアンケート調査を行い136人から回答を得ました。その結果、18%の著者が本誌に論文を掲載したことは大変有益、69%が有益と回答されました。合計90%近い著者から有益と回答があったことは筆者も大変喜んでおります。一方、本誌の執筆を他の人に勧める際には、本誌の認知度が低いことが障害となると回答された方が58%となりました。編集委員会では、これまでも本誌の認知度の向上に向けて色々な方策を行ってきましたが、今後さらなる方策が必要と思いますので、皆様からも是非アイデアを頂ければと思います。

上記の著者アンケートでも、自分自身の研究を構成学的立場から体系化できたことが有益であったとの回答が多くみられました。構成方法を分析するという方向に関しては、知が集積してきていると思いますが、その知を活用して要素技術をどう構成して革新的シーズの事業化を加速するのか、という方向はまだこれからと思います。今後の本誌の発展により、この方向が明確になれば本誌の価値は飛躍的に上がると思います。

(編集副委員長 湯元 昇)

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、四元 弘毅

幹事（編集及び査読）：栗本 史雄、清水 敏美、田中 充、富樫 茂子、羽鳥 浩章

幹事（普及）：赤松 幹之、植田 文雄（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）、小林 直人（早稲田大学）、前野 隆司（慶應義塾大学）、山崎 正和

幹事（出版）：高橋 正春

委員：赤穂 博司、一村 信吾（名古屋大学）、上田 完次（兵庫県立工業技術センター）、小野 晃、景山 晃、金丸 正剛、久保 泰、神武 直彦（慶應義塾大学）、坂上 勝彦、田尾 博明、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）、立石 裕、多屋 秀人（株式会社 J-Space）、佃 栄吉、中島 秀之（公立ほこだて未来大学）、仁木 栄、長谷川 裕夫、馬場 靖憲（東京大学）、松井 俊浩、三石 安、村山 宣光、持丸 正明、矢野 雄策、矢部 彰、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

〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2 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/synthesiology>

●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, H. YOTSUMOTO

Executive Editors: C. KURIMOTO, T. SHIMIZU, M. TANAKA, S. TOGASHI, H. HATORI, M. AKAMATSU, F. UEDA (New Energy and Industrial Technology Development Organization), N. KOBAYASHI (Waseda University), T. MAENO (Keio University), M. YAMAZAKI, M. TAKAHASHI

Editors: H. AKOH, S. ICHIMURA (Nagoya University), K. UEDA (Hyogo Prefectural Institute of Technology), A. ONO, A. KAGEYAMA, S. KANEMARU, T. KUBO, N. KOHTAKE (Keio University), K. SAKAUE, H. TAO, M. TAKESHITA (New Energy and Industrial Technology Development Organization), H. TATEISHI, H. TAYA (J-Space Inc.), E. TSUKUDA, H. NAKASHIMA (Future University Hakodate), S. NIKI, Y. HASEGAWA, Y. BABA (The University of Tokyo), T. MATSUI, Y. MITSUISHI, N. MURAYAMA, M. MOCHIMARU, Y. YANO, A. YABE, 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 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, 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8巻第2号 2015年5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 material testing facilities in high pressure gaseous hydrogen and international collaborative work of a testing method for a hydrogen society

—*Toward contribution to international standardization*—

T.IIJIMA, T.ABE and H.ITOGA

Research on social benefits resulting from NEDO projects

—*Study of the top 70 NEDO Inside Products*—

M.YAMASHITA, Y.YURUGI, N.KIMURA, S.SHISHIDO, T.YOSHIDA, T.ISSHIKI and M.TAKESHITA

Application of laser Compton photon beam to nondestructive tests

—*A spin-off technology from nuclear physics*—

H.TOYOKAWA

Detection of influenza viruses with the waveguide mode sensor

—*Development of a palmtop sized sensor*—

K.AWAZU, M.FUJIMAKI, S.C.B.GOPINATH and X.WANG

Editorial policy

Instructions for authors

Aim of *Synthesiology*