

# Synthesiology

サンゴ骨格分析による過去の気候変遷の復元

Development of methane hydrate production method

鉄鋼厚板製造プロセスにおける一貫最適化に向けて

災害救助支援のための情報共有プラットフォーム

ロボット技術を用いたスピニング加工(へら絞り)

シンセシオロジー編集委員会

## 「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨

研究者による科学的な発見や発明が実際の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<sup>(注1)</sup>。これまで研究者は、優れた研究成果であれば誰かが拾い上げてくれて、いつか社会の中で花開くことを期待して研究を行ってきたが、300年あまりの近代科学の歴史を振り返れば分かるように、基礎研究の成果が社会に活かされるまでに時間を要したり、埋没してしまうことが少なくない。また科学技術の領域がますます細分化された今日の状況では、基礎研究の成果を社会につなげることは一層容易ではなくなっている。

大きな社会投資によって得られた基礎研究の成果であっても、いわば自然淘汰にまかせたままでは<sup>(注1)</sup>、その成果の社会還元を実現することは難しい。そのため、社会の側から研究成果を汲み上げてもらうという受動的な態度ではなく、研究成果の可能性や限界を良く理解した研究者自身が研究側から積極的にこのギャップを埋める研究活動(すなわち本格研究<sup>(注2)</sup>)を行うべきであると考えます。

もちろん、これまでも研究者によって基礎研究の成果を社会に活かすための活動が行なわれてきた。しかし、そのプロセスはノウハウとして個々の研究者の中に残るだけで、系統立てて記録して論じられることがなかった。そのために、このような活動は社会における知として蓄積されずにきた。これまでの学術雑誌は、科学的発見といった基礎研究(すなわち第1種基礎研究<sup>(注3)</sup>)の成果としての事実的知識を集積してきた。これに対して、研究成果を社会に活かすために行うべきことを知として蓄積する、すなわち当為的知識を集積することを目的として、ここに新しい学術ジャーナルを発刊する。自然についての知の獲得というこれまでの科学に加えて、科学的知見や技術を統合して社会に有益なものを構成するための学問を確立することが、持続的発展可能な社会に科学技術が積極的に寄与するための車の両輪となる。

この「Synthesiology」と名付けたジャーナルにおいては、成果を社会に活かそうとする研究活動を基礎研究(すなわち第2種基礎研究<sup>(注4)</sup>)として捉え直し、その目標の設定と社会的価値を含めて、具体的なシナリオや研究手順、また要素技術の構成・統合のプロセスが記述された論文を掲載する。どのようなアプローチをとれば社会に活かす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。そして、ジャーナルという媒体の上で研究活動事例を集積して、研究者が社会に役立つ研究を効果的にかつ効率よく実施するための方法論を確立することを目的とする。この論文をどのような観点で執筆するかについては、巻末の「編集の方針」に記載したので参照されたい。

ジャーナル名は、統合や構成を意味する Synthesis と学を意味する -logy をつなげた造語である。研究成果の社会還元を実現するためには、要素的技術をいかに統合して構成するかが重要であるという考えから Synthesis という語を基とした。そして、構成的・統合的な研究活動の成果を蓄積することによってその論理や共通原理を見いだす、という新しい学問の構築を目指していることを一語で表現するために、さらに今後の国際誌への展開も考慮して、あえて英語で造語を行ない、「Synthesiology - 構成学」とした。

このジャーナルが社会に広まることで、研究開発の成果を迅速に社会に還元する原動力が強まり、社会の持続的発展のための技術力の強化に資するとともに、社会における研究という営為の意義がより高まることを期待する。

シンセシオロジー編集委員会

- 注1 「悪夢の時代」は吉川弘之と歴史学者ヨセフ・ハトバニーが命名。「死の谷」は米国連邦議会 下院科学委員会副委員長であったバーノン・エーラーズが命名。ハーバード大学名誉教授のルイス・ブランスコムはこのギャップのことを「ダーウィンの海」と呼んだ。
- 注2 本格研究： 研究テーマを未来社会像に至るシナリオの中で位置づけて、そのシナリオから派生する具体的な課題に幅広く研究者が参画できる体制を確立し、第2種基礎研究<sup>(注4)</sup>を軸に、第1種基礎研究<sup>(注3)</sup>から製品化研究<sup>(注5)</sup>を連続的・同時並行的に進める研究を「本格研究 (Full Research)」と呼ぶ。本格研究 [http://www.aist.go.jp/aist\\_j/research/honkaku/about.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/research/honkaku/about.html)
- 注3 第1種基礎研究： 未知現象を観察、実験、理論計算により分析して、普遍的な法則や定理を構築するための研究をいう。
- 注4 第2種基礎研究： 複数の領域の知識を統合して社会的価値を実現する研究をいう。また、その一般性のある方法論を導き出す研究も含む。
- 注5 製品化研究： 第1種基礎研究、第2種基礎研究および実際の経験から得た成果と知識を利用し、新しい技術の社会での利用を具体化するための研究。

# Synthesiology 第5巻第2号(2012.5) 目次

「Synthesiology – 構成学」発刊の趣旨	i
<b>研究論文</b>	
サンゴ骨格分析による過去の気候変遷の復元 — 生体鉱物を用いた地球化学的手法による地球環境研究 — ・・・鈴木 淳	80–88
<b>Development of methane hydrate production method</b> — A large-scale laboratory reactor for methane hydrate production tests — ・・・Jiro NAGAO	89–97
鉄鋼厚板製造プロセスにおける一貫最適化に向けて — 生産管理に関するマルチスケール階層モデルの提案 — ・・・西岡 潔、水谷 泰、上野 博則、川崎 博史、馬場 靖憲	98–112
災害救助支援のための情報共有プラットフォーム — データ仲介による情報システム連携 — ・・・野田 五十樹	113–125
ロボット技術を用いたスピニング加工(へら絞り) — 手作りの現場密着型ものづくり — ・・・荒井 裕彦	126–134
<b>座談会</b>	
科学技術政策と構成学、その具体化と価値への“つながり” ・・・有本 建男、小林 直人、赤松 幹之	135–140
<b>編集委員会より</b>	
編集方針	141–142
投稿規定	143–144
編集後記	151
<b>Contents in English</b>	
<b>Research papers (Abstracts)</b>	
<b>Paleoclimate reconstruction and future forecast based on coral skeletal climatology</b> — Understanding the oceanic history through precise chemical and isotope analyses of coral annual bands — - - - A. SUZUKI	80
<b>Development of methane hydrate production method</b> — A large-scale laboratory reactor for methane hydrate production tests — - - - J. NAGAO	89
<b>Toward the integrated optimization of steel plate production process</b> — A proposal for production control by multi-scale hierarchical modeling — - - - K. NISHIOKA, Y. MIZUTANI, H. UENO, H. KAWASAKI and Y. BABA	98
<b>Information sharing platform to assist rescue activities in huge disasters</b> — System linkage via data mediation — - - - I. NODA	113
<b>Spinning process using robot technology</b> — Field-based bricolage of manufacturing technology — - - - H. ARAI	126
	145
Messages from the editorial board	147–146
Editorial policy	149–148
Instructions for authors	-150

# サンゴ骨格分析による過去の気候変遷の復元

— 生体鉱物を用いた地球化学的手法による地球環境研究 —

鈴木 淳

大気中の二酸化炭素増加による地球温暖化が注目されている。産業革命以降の温暖化傾向や過去の温暖化事象を精密に復元することにより、地球温暖化予測モデルの高度化に寄与できる。海域では、サンゴ骨格の化学分析から過去数百年にわたる水温や降水量、塩分を高い時間分解能で復元する技術が注目を集めている。また、18世紀頃の小氷期<sup>1)</sup>や約2万年前の冷涼な最終氷期、あるいは350万年前の鮮新世<sup>2)</sup>温暖期といわれる時代のサンゴ化石から、さまざまな指標を複合的に評価し、当時の気候を正確に復元することも重要な課題である。サンゴ骨格を用いた研究手法は、異常高水温によるサンゴ白化現象や、海洋酸性化現象の解明にも貢献することができる。

キーワード：サンゴ、気候、地球温暖化、海洋、酸素同位体比

## Paleoclimate reconstruction and future forecast based on coral skeletal climatology

– Understanding the oceanic history through precise chemical and isotope analyses of coral annual bands –

Atsushi Suzuki

Global warming (due to increased carbon dioxide in the atmosphere) has attracted much attention. Yet, predicting trends in the Earth's climate remains difficult. A more sophisticated and accurate Global Warming model can be obtained by reconstructing climatic change since the Industrial Revolution, and other past periods of warming. To this end, a promising area of research in marine science is coral skeletal climatology, which offers a unique method for accurately reconstructing marine temperature and saline concentration over the past several hundred years, with a high temporal resolution (ca. 2 weeks) based on chemical and isotope analysis of long-lived coral skeletons. This method has been successfully applied to the Little Ice Age around the 18<sup>th</sup> century and the mid-Pliocene warming period of 3.5 million years ago. It can also be applied to biological and environment studies on massive coral bleaching events caused by unusually high oceanic temperature levels and other environmental issues such as ocean acidification.

Keywords: coral, climate, global warming, ocean, oxygen isotope ratio

### 1 はじめに

地球規模での気候変動を理解するためには、長期間にわたる高解像度の海域・陸域の観測記録が不可欠であるが、1950年以前になると測器による海洋観測の記録は少ない。そこで、大型の造礁サンゴ群体を採取してその骨格にみられる年輪を用いた過去数百年にわたる水温や降水量、塩分の復元が注目されている(図1、2)。サンゴ骨格における年輪の発見は1933年にさかのぼるが、その利点が注目され活発な研究対象となったのはおおむね1995年以降であり、「サンゴ骨格気候学」として大きく発展したのは極めて最近である(図3)。この小論では、サンゴ骨格が過去の地球の気候変動の記録媒体として大変優れており、それから過去の記録を読み出す試みが、最先端の分析技術を駆使して大きく発展していることを示す。

2007年に発表された気候変動に関する政府間パネル

(IPCC)の第4次評価報告書の第一部会の第7章は、「Paleoclimate (古気候)」という題名のもと、数年から数

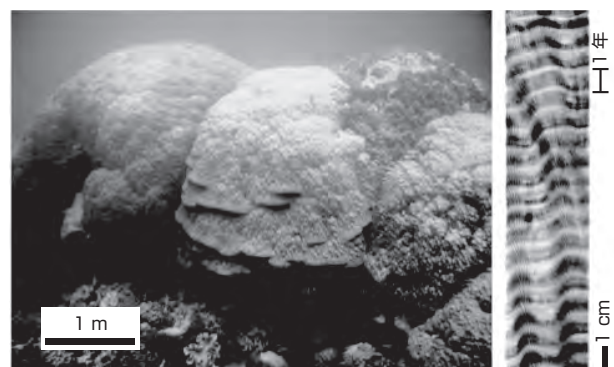


図1 琉球列島石垣島のサンゴ礁でみられるハマサンゴ属の塊状群体(左)と柱状試料の엑스線ポジ写真(右) 엑스線写真では、濃色のバンドが高密度部に、淡色のバンドが低密度部に対応し、一組でおおよそ1年間の年輪に対応する。

産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7

Institute of Geology and Geoinformation, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: a.suzuki@aist.go.jp

Original manuscript received September 15, 2011, Revisions received April 9, 2012, Accepted April 26, 2012

十万年のスケールでの気候変動にかかわる研究のレビューが行われた<sup>[1]</sup>。この中で、熱帯・亜熱帯域のサンゴ試料の酸素同位体比などの間接指標を用いた高時間解像度（約2週間）の海洋環境復元の研究成果が数多く引用されている。低緯度海域の多くの箇所から現生の大型サンゴにより最近200年間の海水温がそれ以前に比べて明瞭に高い状態にあることを示したことは、サンゴ骨格気候学の成果の代表例とされている。図2に古気候復元に用いられるさまざまな研究対象とサンゴ骨格研究の位置付けを示した<sup>[1][2]</sup>。

また、小氷期<sup>用語1</sup>や中世の温暖期、完新世<sup>用語2</sup>あるいは350万年前の鮮新世<sup>用語3</sup>温暖期といわれる時代のサンゴ化石から、当時の気候を復元することも重要な課題である。サンゴ骨格を用いた研究手法は、異常高水温によるサンゴ白化現象や、海洋酸性化現象の解明にも貢献できる。

この論文では、現生および化石サンゴの骨格を対象として、過去の気候変遷の復元を目指す研究について、近年のブレイクスルーをテーマとし、さまざまな指標を複合的に評価して進展している最新の研究例を解説しつつ、地球環境の将来の予測精度を向上するための方法論を論じる。

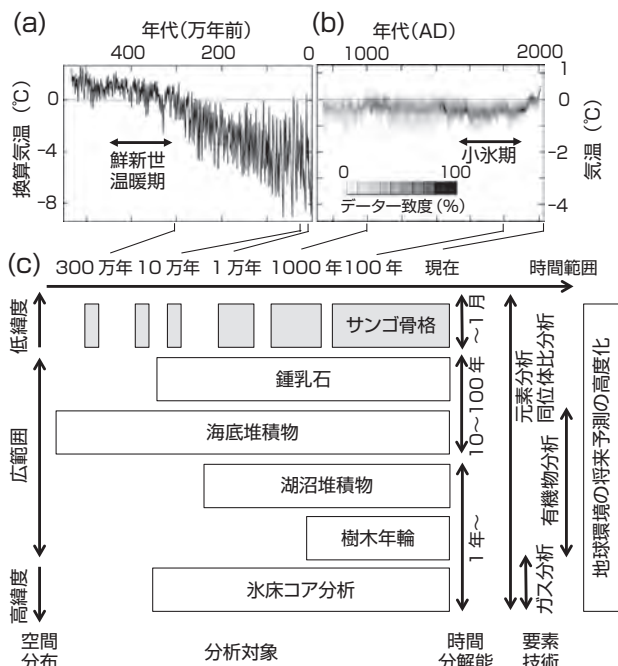


図2 古気候復元に用いられる研究対象とサンゴ骨格研究の位置付け  
 (a) 過去550万年間の気温の変化についての推定例<sup>[2]</sup>。深海底堆積物の柱状試料から得られた底生有孔虫の炭酸塩殻の酸素同位体比が、全球の水床量のような指標となることから、過去の気温を推定した。南極域について現在との気温差を推定したもので、緯度や地域により気温差の絶対値については大きく異なる。(b) 過去1200年間の気温の変遷（文献<sup>[3]</sup>のFigure 6.10.cより）。1961-1990年の平均値に対する偏差が示され、多数の研究の一致度が濃淡で示されている。(c) サンゴ骨格およびその他の古気候復元に用いられる研究対象の産出範囲と分析手法、時間分解能を模式的に示した。

## 2 サンゴ骨格の化学組成から過去の水温と塩分を知る

熱帯から亜熱帯の浅海域に広く分布するハマサンゴ (*Porites*) 属等の塊状群体には、炭酸カルシウムを主成分とする骨格を1年間に厚さ1~2 cm ずつ分泌しながら、過去数百年にわたり成長を続けるものがある(図1)。骨格は密度の高い部分と低い部分が交互に重なり、通常これで1年の年輪を形成している。群体表面が生きているサンゴから柱状試料を採取すれば、年輪を数えることにより、骨格の形成年代を正確に知ることができる。骨格の成長軸に沿って0.2~0.4 mm 間隔で微小試料を切削して分析することにより月単位あるいはそれよりも高い分解能で古気候を復元できる。

サンゴ骨格の化学組成の中でも、酸素同位体比は研究例が多い。通常、酸素同位体比は、試料中の同位体比(<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O)について標準試料に対する千分偏差を求めて、 $\delta^{18}\text{O}$ と表記する。炭酸カルシウムに含まれる酸素の同位体比、および海水の水に含まれる酸素の同位体比は、それぞれ添え字 c および w を付けて、 $\delta^{18}\text{O}_c$ 、 $\delta^{18}\text{O}_w$ と表す。炭酸カルシウムの酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}_c$ )は、析出したときの水温と海水の酸素同位体比(塩分に相関)に依存する(図4)。骨格の酸素同位体比から水温の推定のためには、その群体上部の酸素同位体比と水温観測記録を比較して得られる関係式を用いることが望ましい。また、骨格成長速度が化学組成に与える影響を避けるために、成長速度が5 mm y<sup>-1</sup>以上の群体の最大成長軸に沿った分析を行う。年間を通じて塩分の変化が小さい海域では、サンゴの酸素同位体比は水温のよい指標となる。例えば、琉球列島石垣島のサンゴの酸素同位体比は水温とよく対応している<sup>[3]</sup>。

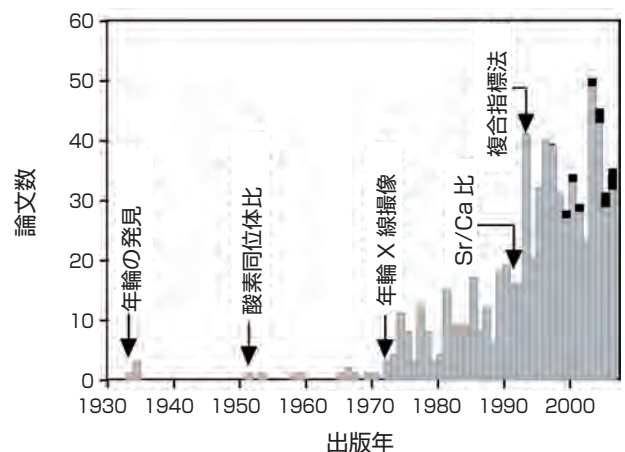


図3 造礁サンゴ年輪に関する論文数の変遷  
 オーストラリア海洋科学研究所のホームページに掲載されているAUSCORE, Coral banding bibliographyの論文数より(<http://www.aims.gov.au/pages/auscore/auscore-08.html>)。産総研が関与した論文を黒のシンボルで示した。

サンゴ骨格については、酸素同位体比の他にも有用な間接指標がいくつも見いだされている。サンゴ骨格のストロンチウム/カルシウム比(Sr/Ca 比)やウラン/カルシウム比(U/Ca 比)は水温のみに依存して変化する。

サンゴ骨格の酸素同位体比は水温と塩分(正確には海水の酸素同位体組成)の双方に依存し、Sr/Ca 比は水温のみに依存する。したがって、骨格の Sr/Ca 比から水温を推定し、骨格の酸素同位体比の変動から水温による変化分を差し引けば、その残差として海水の酸素同位体比組成の変化あるいは塩分の変化を知ることができる<sup>[4]</sup>。これがサンゴ骨格の酸素同位体比・Sr/Ca 比複合指標法である(図5)。Sr/Ca 比の代わりに、U/Ca 比を使うこともできる。

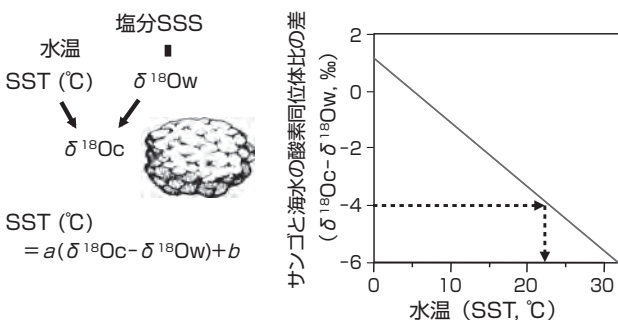


図4 サンゴ骨格の酸素同位体比 ( $\delta^{18}O_c$ ) と水温(表層水温, sea surface temperature, SST)  
 酸素同位体比は、試料中の同位体比 ( $^{18}O/^{16}O$ ) について標準試料に対する千分偏差を求めて  $\delta^{18}O$  と表記し、炭酸カルシウムの酸素同位体比については、添え字  $c$  を付けて表す。サンゴ群体表面部の酸素同位体比と水温観測記録を比較して関係式を求めれば、過去の骨格の酸素同位体比から当時の水温が推定できる。厳密には海水の酸素同位体比 ( $\delta^{18}O_w$ ) が影響するが、塩分(表層塩分, sea surface salinity, SSS) の変化が少ない海域では無視することもできる。なお、塩分<sup>[4]</sup>は海洋学の取り決めにより無単位で表記される。

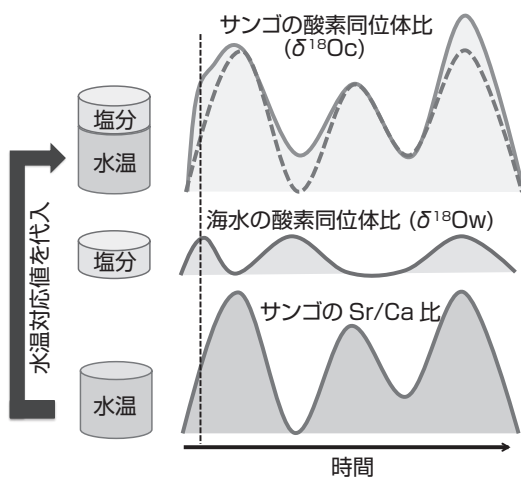


図5 サンゴ骨格の酸素同位体比・Sr/Ca 比複合指標法の概念図  
 水温と塩分の季節変化を復元する場合について示した。

### 3 サンゴ骨格から復元された石垣島と小笠原・父島の近過去の気候変動

日本周辺の北西太平洋域における長尺サンゴ研究は、海外と比較してまだまだ立ち遅れている。我々の研究グループでは、琉球列島の石垣島(24° N, 124° E)と小笠原諸島の父島(27° N, 135° E)についてそれぞれ100年を越える長尺ハマサンゴ柱状試料の化学分析を行い、解析を進めている(図6)。

太平洋ではレジームシフトと呼ばれる気候状態の急変が起きることが知られており<sup>[5]</sup>、南半球では1988/1989年のイベントが顕著である<sup>[3]</sup>。このレジームシフト以前では、石垣島サンゴ礁浅部の冬の水温は、シベリア高気圧の吹き出しに敏感で、季節風の強さを表すモンスーン指数(イルクーツクと根室の気圧差)とよい相関がみられた。また、石垣島のサンゴ骨格の冬の酸素同位体比は専ら水温に規定されていて、酸素同位体比から復元された冬季最低水温も1971~1987年にかけて冬の季節風の強さを表すモンスーン指数とよい相関を示した。これに対し、レジームシフト以後の石垣島の水温は、モンスーン指数との相関が低下した。そして、モンスーン指数よりも南方変動指数(SOI)との対応がみられるようになってきた。亜熱帯域に区別されていた石垣島の熱帯化ともいべき現象であり、興味深い。また、このサンゴ試料の1900年近傍には低水温期の存在が認められた<sup>[6]</sup>。1902年1月は冬のシベリア高気圧の勢力が強かった冬として記録されており、旧日本陸軍の八甲田山雪中行軍遭難事件が起こった。

一方、小笠原サンゴ記録を用いた約130年間にわたる水温と塩分の復元は、北西太平洋域における複合指標法の最初の本格的な適用例である<sup>[7]</sup>。また、このサンゴ試料に

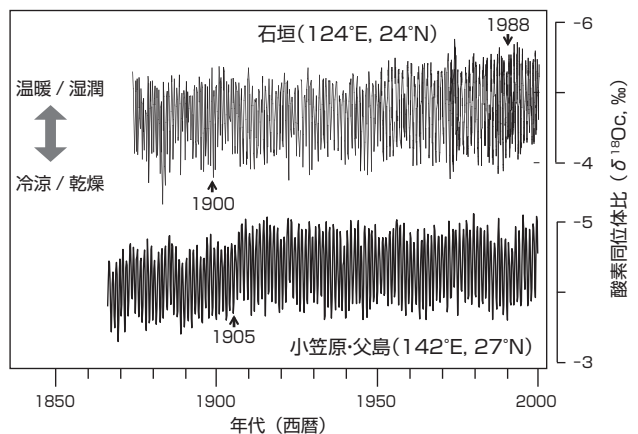


図6 琉球列島石垣島と小笠原諸島父島から採取されたサンゴ骨格の酸素同位体比記録<sup>[6][7]</sup>  
 1~2ヶ月の時間分解能をもち、水温等の季節変動が復元できる。この論文で論じる石垣島サンゴの1900年頃の低水温期、1988/89年のレジームシフト、そして父島サンゴの1905年頃の塩分シフトについては、矢印を付した。

については、Sr/Ca 比同様に水温の良好な指標とされる U/Ca 比も分析された（図 7）。酸素同位体比と Sr/Ca 比あるいは U/Ca 比の 2 通りの組み合わせによる水温と塩分の復元結果がよく一致したことは、このサンゴ記録の信頼性が高いことを示唆する（図 8）。復元された水温については、太平洋数十年変動との対応がみられた<sup>[8]</sup>。より興味深いのは、1905-1910 年頃に塩分に急激な低下傾向が認められたことである。推定される塩分<sup>[用註 4]</sup>の変化はおおよそ 1 であり、大きさの妥当性については問題が残るが、約 130 年間のサンゴ記録の中で最も顕著な変化である。この期間の骨格に続成変質等の兆候は認められなかった。小笠原における 20 世紀初頭の塩分低下の原因としては、当時の偏西風の減衰による小笠原高気圧の弱体化に伴う蒸発量の減少等が想定され、石垣島のサンゴ記録にみられた低温イベントとの関係も興味深い。

#### 4 鮮新世温暖期の化石サンゴによるエルニーニョ現象の復元

太平洋赤道域で数年ごとに発生するエルニーニョ現象は、現在の気候システムにおいて重要な役割を果たしている。今後、地球温暖化が進行すると、このエルニーニョやエルニーニョ・南方振動 (ENSO: El Niño / Southern Oscillation) 現象はどのように変化していくのだろうか？ IPCC 第 4 次評価報告書では、強力なエルニーニョ現象の頻発化を予測しているが<sup>[9]</sup>、異論も多い。この問題に関してサンゴ骨格を用いた検討も精力的に行われてきた<sup>[1]</sup>。産業革命以前を含む約 500 年間のサンゴ記録の解析によると、エルニーニョの強度は平均水温と相関し、高水温ほどエルニーニョが活発であった。これは、ENSO 変動が地球の平均的な気候状態に影響されることを示し、今後の温

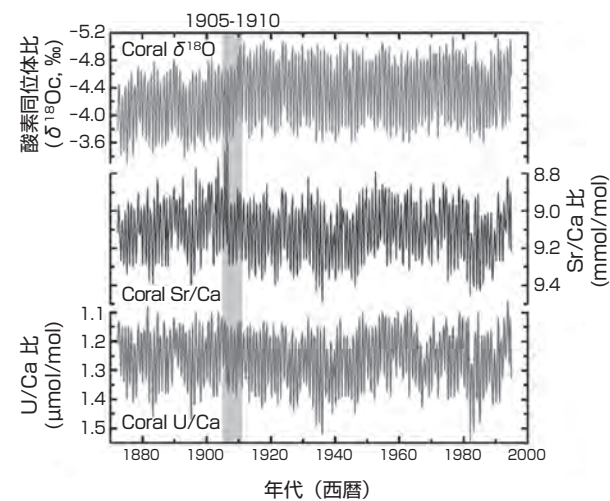


図 7 小笠原諸島の父島のサンゴの酸素同位体比および Sr/Ca 比、U/Ca 比の 130 年間の変動<sup>[7]</sup>  
酸素同位体比の急激な増加がみられる 1905-1910 年にハッチを施した。

暖化に伴い ENSO 変動が変調する可能性を示唆するものである。また、完新世<sup>[用註 2]</sup>中期（約 6000 年前頃）や過去 12 万年間にいくつかみられる温暖期について、当時の水温と ENSO 変動の強度に相関が認められている。これらはみな、ENSO 変動が地球の平均的な気候状態に影響されるとする仮説と整合的である。

約 460 万年前～約 300 万年前の鮮新世温暖期は、将来訪れる温暖化地球の気候条件に最も類似した過去の温暖期であると言われている（図 2a）。各種の恐竜が生息していた約 1 億年前の中生代<sup>[用註 5]</sup>のジュラ紀や白亜紀も温暖な時代であるが、当時の大陸配置は現在とは大きく異なっていて、現在の気候と単純に比較することはできない。そして、鮮新世温暖期については、現在のエルニーニョ現象を引き起こす太平洋の東西の水温勾配がなくなり、全域の水温が高い「永続的エルニーニョ状態」になって、数年ごとのエルニーニョ現象は発生しなくなるという仮説が提唱されている。一方、当時も現在のようなエルニーニョ現象は存在し、むしろ太平洋の東西の水温勾配が大きくなって、エルニーニョ現象はより強く、より頻発していたのではないかとする仮説もある。この二つの説は、どちらも時間分解能が数千年～数万年程度である深海底堆積物の柱状試料の解析に基づいたもので、数年間隔で起こるエルニーニョ現象を直接捉えることは困難であった。

著者らの研究グループでは、フィリピン・ルソン島でこの温暖期に相当する地層から保存状態のよい化石サンゴを発見し、その分析からエルニーニョ現象の直接的な証拠としては最古となる水温の変動記録を得ることに成功した<sup>[10]</sup>。

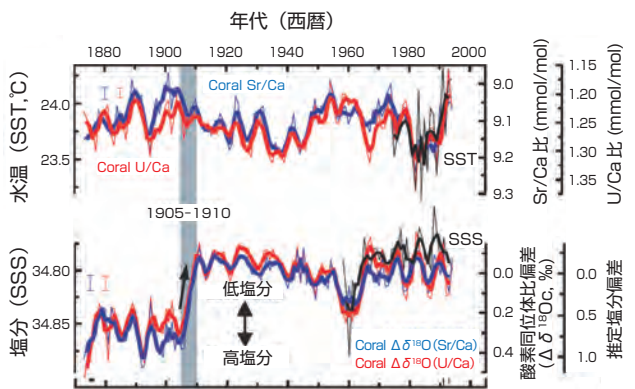


図 8 小笠原諸島父島サンゴから復元された水温 (sea surface temperature, SST) と塩分 (sea surface salinity, SSS) の変動<sup>[7]</sup>  
塩分については、サンゴ骨格から複合指標法で求められた酸素同位体比の塩分変化寄与分を、北西太平洋海域における海水の酸素同位体比と塩分の関係（塩分 1.0 増加あたり酸素同位体比 0.42 ‰増加）を用いて、塩分に換算したもので、近年の値からの偏差を推定塩分偏差と標記した（右軸）。酸素同位体比と Sr/Ca 比（青線）および U/Ca 比（赤線）の 2 通りの組み合わせによる結果が示されている。観測水温および塩分を併せて示した（黒線）。急激な塩分低下がみられる 1905-1910 年にハッチを施した。

サンゴはアラレ石の骨格を分泌するが、時間の経過とともに地表の温度・圧力条件ではより安定な方解石に変化してしまう。通常、10万年を越えると未変質のサンゴ化石の産出は極めて稀である。しかし、この地層ではサンゴ化石を不透水層である泥岩が取り囲んでおり、初生的なアラレ石骨格の保存に効果的であったと思われる。採取された二つの群体のサンゴ化石について酸素同位体比組成(水温と塩分の指標)を分析し、計70年分の大気と海洋環境の季節変動および経年変動パターンを抽出した(図9a)。

フィリピン周辺の海域は、水温と塩分の変動がエルニーニョ現象の影響を強く受けている場所であり、現生サンゴの酸素同位体比の変動パターンは、現在のエルニーニョ現象の変動パターンをよく記録していることがわかっている。現生サンゴを化石サンゴと同じ手法で解析した結果と比較したところ、鮮新世温暖期には現在とおおよそ同じ周期でエルニーニョ現象が起こっていたことが明らかになった(図9b)。

この結果は、これまで比較的有力であった温暖化地球ではエルニーニョ現象は起こらないとする永続的エルニーニョ説の可能性を否定するものである。また、将来の温暖化した地球においてもエルニーニョ現象が存在することを

強く示唆する。今回の結果は、将来の温暖化におけるエルニーニョ現象の予測とその影響を予測するための新たなヒントになるであろう。

### 5 異常高水温によるサンゴ白化現象とサンゴ礁生物多様性の減少

1998年初頭、南半球のオーストラリア・グレートバリアリーフで発生したサンゴの白化現象は、季節の推移とともに北半球に移行し、1998年の8月には琉球列島周辺のサンゴ礁においても、かつて例をみない大規模なサンゴの白化現象が発生した<sup>[11]</sup>。サンゴ白化現象に関しては、サンゴと共生藻の関係について生物学的・生化学的な研究が盛んに行われてきたが、ここではサンゴの骨格に注目する。サンゴが白化したとき、骨格にはどのような記録が残るのだろうか？

石垣島東岸の安良崎沖のサンゴ礁には、3つのハマサンゴ群体が融合した群体があり、1998年の大規模白化イベントに際し、一つの群体は白化を呈し、隣接する二つの群体は白化を起こさなかったことが確認されている<sup>[12]</sup>。骨格の成長軸に沿って高分解能で分析した酸素同位体比プロファイルに白化時期に対応するジャンプが認められ、白化直後から数カ月間、サンゴの骨格成長が停止したことによるものと解釈された<sup>[13]</sup>。なお、大規模白化イベントから4年が経過した2002年9月にこれらの群体から再び柱状試料が採取され、エックス線画像の観察が行われた。1998年部分の骨格だけ成長速度が顕著に低下した様子が確認できる(図10)。地球温暖化が進行し、高水温現象が頻発化すると、サンゴの骨格成長は阻害され、生育には不適切な環境になることが懸念される。一方で、高水温状態が

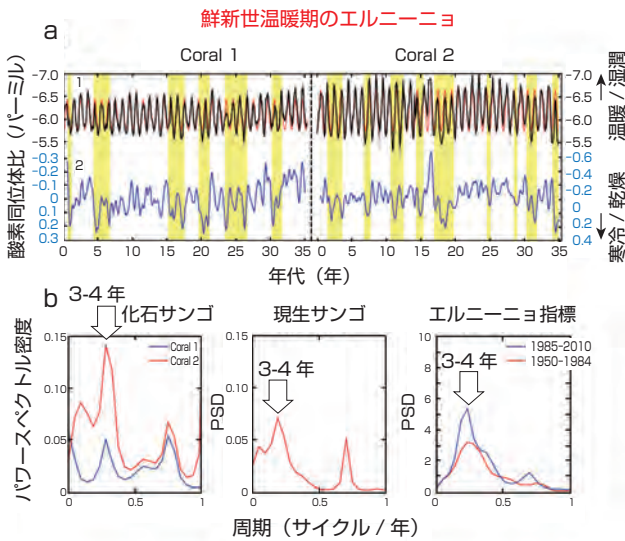


図9 (a) 二つの化石サンゴ群体に記録された鮮新世温暖期のエルニーニョ [10]。約350万年前における、時期の異なる二つのサンゴ群体(Coral1およびCoral2)のそれぞれ約35年間の年周変化を示す。黒線は酸素同位体比変動曲線、赤線は期間内での平均の酸素同位体比の季節パターン。青線は酸素同位体比の変動曲線から平均の季節パターンを差し引いて計算した異常値。黄色ハッチで示した期間がエルニーニョ現象と推定される。(b) パワースペクトル密度<sup>[10]</sup>。パワースペクトル密度は時系列データについて、どの周期で変動が大きいかを示し、周期的な変動成分を検出する目安となる。左からそれぞれ化石サンゴの酸素同位体比(青線;Coral1、赤線;Coral2)、現生サンゴの酸素同位体比、エルニーニョ指標(Nino 3.4 index: 熱帯太平洋の水温異常値、青線;1985年~2010年、赤線;1950年~1984年まで期間)のパワースペクトル密度。0.3 サイクル/年(3-4年周期)付近に共通のピークがある。

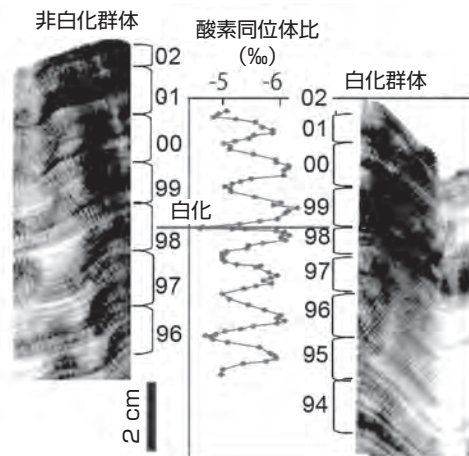


図10 石垣島のハマサンゴ骨格にみられる1998年8月の大規模白化イベントの影響。白化を呈した群体と白化を起こさなかった群体骨格それぞれのエックス線写真と白化したサンゴ骨格の成長軸に沿う酸素同位体比プロファイル。2002年9月に採取された。



短時間で解消すれば、ハマサンゴ等の一部のサンゴは白化から回復して生存を続けることができるかもしれない。異常高水温現象がサンゴおよびサンゴ礁生態系に与える影響の評価も大切な研究課題である。

## 6 海洋酸性化現象のサンゴ礁への影響

海洋酸性化は、新たな地球規模の環境問題として近年注目を集めている<sup>[14]</sup>。人間活動により大気に放出された二酸化炭素が海洋に移行して海水のpHと炭酸塩の飽和度を低下させ、海洋生物の発生やサンゴや有孔虫の石灰化に悪影響を与える<sup>[15][16]</sup>。グレートバリアリーフの69の海域で採取された塊状ハマサンゴ328群体における骨格分析は、過去400年間安定していた石灰化速度が急速に変化し、1990年以降だけでも14%減少していたことが報告されており、海洋酸性化との関連が示唆されている<sup>[17]</sup>。サンゴ骨格中のホウ素同位体比(<sup>11</sup>Bと<sup>10</sup>Bの存在比)は海水のpHのよい指標であり<sup>[18]</sup>、長尺サンゴ試料や化石サンゴを用いて過去の海水pHの変遷を復元することは意義ある今後の課題である。ホウ素同位体比の分析は、表面電離型質量分析計(TIMMS)あるいはマルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析計(MC-ICP-MS)を用いて測定されるため、これら的高性能分析装置の導入も今後の研究の高度化には必須である。

## 7 まとめと今後の展望

サンゴ骨格が過去の地球の気候変動を記録している媒体として大変優れていること、そして、それから気候変動の記録を読み出す試みが最先端技術を駆使して発展してきたことを示した(図11)。地球温暖化予測の高度化に向け

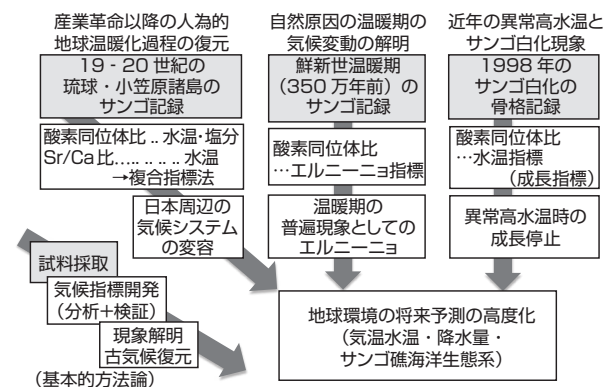


図11 サンゴ骨格気候学の基本的な方法論(左下)と論文で取り上げた3つの研究の展開  
「サンゴ骨格から復元された石垣島と小笠原・父島の近過去の気候変動」、「鮮新世温暖期の化石サンゴによるエルニーニョ現象の復元」、「異常高水温現象によるサンゴ白化現象」の3つの研究について、用いられた指標に意味および解釈、そして最終目標への貢献のシナリオを示した。

て、今後もサンゴ骨格研究の必要性は一層高くなるであろう。また、IPCC第4次評価報告書によると、気候モデルによって亜熱帯域では降水量の減少が予測されているが、その確度には向上の余地がある<sup>[9]</sup>。水温と合わせて、降水量と関係が深い過去の塩分変動を復元することは急務である。この期待に応えることができるのは、小笠原のサンゴ骨格の例で示した酸素同位体比・Sr/Ca比複合指標法である。この手法は、化石サンゴにも適用することが可能で、例えば、東シナ海では最終氷期のサンゴ化石について検討した例がある<sup>[19]</sup>。IPCCの第5次評価報告書は2013年頃に公表の予定である。この間、酸素同位体比・Sr/Ca比複合指標法による気候変動解析とホウ素同位体比分析によるpH復元を推進し、その結果を第5次報告書に反映させていくべきと考える。このために一層のサンゴ骨格気候学の推進が求められる。

一方で、なぜサンゴ骨格の化学組成および同位体組成に水温等の気候因子が記録されるのかという基本的なメカニズムについてはいまだ未解明の部分もあり<sup>[20]</sup>、これまでの地球化学的手法に加え、生物学的作用の解明のために飼育実験<sup>[21][22]</sup>や分子生物学的な手法<sup>[23]</sup>も含めた研究が必要である。このようなこれまでの学問分野も超えた研究は、来るべき海洋酸性化によって引き起こされるであろう海洋生物の石灰化阻害現象の予測評価にも応用できる可能性がある(図12)。

2011年3月11日には東北地方太平洋沖地震が発生し、それに伴って発生した津波により、東北地方と関東地方の太平洋沿岸部を中心に壊滅的な被害が発生した(東日本大震災)。日本各地で過去の津波被害の再評価が喫緊の課題とされているが、特に、869年に東北地方を襲った貞観地震津波と1771年に南琉球地方を襲った明和地震津波は、今回の東北地方太平洋沖地震と津波の高さや人的被

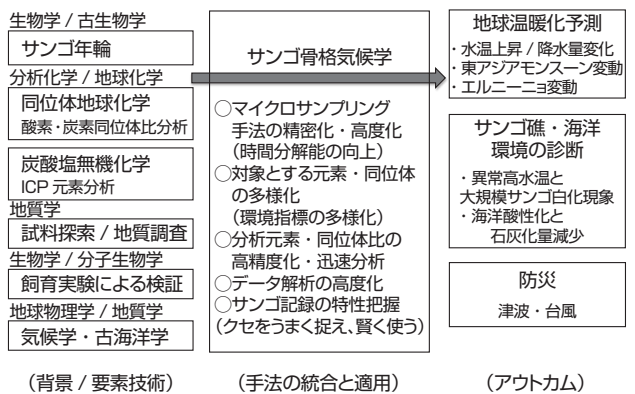


図12 サンゴ骨格気候学の研究展開に係るスキーム  
研究の背景になる要素技術や基本的な分野、そしてサンゴ骨格気候学の本体を構成する手法の統合と実際の研究対象への適用、さらにアウトカムとして貢献が予想される社会的ニーズを示した。

害の規模の類似性から注目を集めている。サンゴ骨格気候学は、ハマサンゴ津波石に注目することで、災害研究にも応用することが可能である。著者らの研究グループでは、南琉球・石垣島東岸に分布するハマサンゴ巨礫に放射性炭素年代測定法とサンゴ骨格気候学の手法を適用し、これらが明和の大津波で打ち上げられたものであることを明らかにしている<sup>[24][25]</sup>。沖縄地方有数の歴史的な地震津波である明和の大津波についての研究への貢献は、地域防災上の観点からも社会的要請が大きい。

## 謝辞

この論文は、下記の方々との共同研究の成果に基づくものである。記して謝意を表します。東京大学・大気海洋研究所・川幡穂高教授、横山祐典准教授、井上麻夕里博士、オーストラリア国立大学・M.K. Gagan 博士、プレーメン大学・T. Felis 博士、琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設・酒井一彦教授、井口 亮博士、岩瀬晃啓博士、国立環境研究所地球環境研究センター・野尻幸宏博士、慶応義塾大学理工学部・鹿園直建教授、岡山大学大学院教育学研究科・菅浩伸教授、北海道大学大学院理学研究員・渡邊剛講師、(株)環境総合テクノス・日比野浩平氏、東京都立大学理学部・塚本すみ子博士、産業技術総合研究所・長尾正之博士、岡井貴司博士、塚本 齊博士。また、技術研修生等として産総研でサンゴ骨格関連の研究を実施した檜尾由理子、佐藤崇範（東京都立大学）、加藤郁子（岡山大学）、角田友明、田子裕子、多比良仁、泉田悠人、高橋 ぬり（慶応義塾大学）、三島真理、小泉真認、小林達哉、牛江裕行、荒岡大輔、川久保友太、福嶋彩香、林恵里香（東京大学）、小俣珠乃（海洋研究開発機構）、川島龍憲（北海道大学）の各氏に厚くお礼を申し上げる（敬称略）。

## 用語解説

用語1：小氷期：およそ14世紀半ばから19世紀半ばにかけて続いた寒冷な期間のこと。気温の低下幅や地域性については不明な点が多い。

用語2：完新世：地質時代区分（世）のうちで最も新しいもので、現代を含む。最後の氷期が終わる約1万年前から現在までを指す。

用語3：鮮新世：新生代の地質時代の一つであり、約500万年前から約258万年前までの期間。アウストラロピテクス等の初期の人類が誕生したのもこの時代である。

用語4：塩分：海水の塩分の分析法および表記については、改訂の長い歴史がある<sup>[26]</sup>。電気伝導度の計測による海水の塩分測定が一般化すると、「実用塩分」が定義されるようになったが、標準海水と試水の電気伝導度比に基づく

値であり、無単位とされた<sup>[27]</sup>。現在もこの表記が広く用いられている。最近になって、塩分から海水の密度等の物理量をより精密に計算するために、溶存物質の重量を正確に評価した「絶対塩分」が提唱され、これは $\text{g kg}^{-1}$ の単位をもつ<sup>[28]</sup>。「実用塩分」から「絶対塩分」への換算式も提唱されている。この論文では、実用塩分を塩分と表記し、無単位数として取り扱う。

用語5：中生代：古生代と新生代に挟まれる地質時代の一つであり、現在から約2億5000万年前にはじまり、約6500万年前まで続く。中生代は、三畳紀、ジュラ紀、白亜紀の3つの時代区分で構成されている。恐竜が生息していた時代である。

## 参考文献

- [1] E. Jansen, *et al.*: Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S. *et al.* (eds.)], 433-497, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2007).
- [2] L. E. Lisiecki and M. E. Raymo: A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records, *Paleoceanography*, 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071 (2005).
- [3] T. Tsunoda, H. Kawahata, A. Suzuki, K. Minoshima and N. Shikazono: East Asian monsoon to El Niño/Southern Oscillation: A shift in the winter climate of Ishigaki Island accompanying the 1988/1989 regime shift, based on instrumental and coral records, *Geophysical Research Letters*, 35, L13708, doi:10.1029/2008GL033539 (2008).
- [4] M. T. McCulloch, M. K. Gagan, G. E. Mortimer, A. R. Chivas and P. J. Isdale: A high resolution Sr/Ca and  $\delta^{18}\text{O}$  coral record from the Great Barrier Reef, Australia, and the 1982-1983 El Niño, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 2747-2754 (1994).
- [5] 見延庄士郎: 北太平洋における気候の数十年スケール変動に関する研究-2006年度堀内賞受賞講演-, *天気*, 55 (3), 135-147 (2008).
- [6] M. Mishima, A. Suzuki, N. Nagao, T. Ishimura, M. Inoue and H. Kawahata: Abrupt shift toward cooler condition in the earliest 20th century detected in a 165 year coral record from Ishigaki Island, southwestern Japan, *Geophysical Research Letters*, 37, L15609, doi:10.1029/2010GL043451 (2010).
- [7] T. Felis, A. Suzuki, H. Kuhnert, M. Dima, G. Lohmann and H. Kawahata: Subtropical coral reveals abrupt early 20th century freshening in the western North Pacific Ocean, *Geology*, 37, 527-530, doi: 10.1130/G25581A.1 (2009).
- [8] T. Felis, A. Suzuki, H. Kuhnert, N. Rambu and H. Kawahata: Pacific Decadal Oscillation documented in a coral record of North Pacific winter temperature since 1873, *Geophysical Research Letters*, 37, L14605, doi:10.1029/2010GL043572 (2010).
- [9] IPCC: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], 18, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2007).

- [10] T. Watanabe, A. Suzuki, S. Minobe, T. Kawashima, K. Kameo, K. Minoshima, Y. M. Aguilar, R. Wani, H. Kawahata, K. Sowa, T. Nagai and T. Kase: Permanent El Niño during the Pliocene warm period not supported by coral evidence, *Nature*, 471, 209-211, doi:10.1038/nature09777 (2011).
- [11] 鈴木 淳, 川幡穂高: 骨格の酸素・炭素同位体比にみるサンゴ白化現象の記録. *地球化学*, 38, 265-280 (2004).
- [12] A. Suzuki, H. Kawahata, Y. Tanimoto, H. Tsukamoto, L.P. Gupta and I. Yukino: Skeletal isotopic record of a *Porites* coral during the 1998 mass bleaching event, *Geochemical Journal*, 34, 321-329 (2000).
- [13] A. Suzuki, M. K. Gagan, K. Fabricius, P. J. Isdale, I. Yukino and H. Kawahata: Skeletal isotope microprofiles of growth perturbations in *Porites* corals during the 1997-1998 mass bleaching event, *Coral Reefs*, 22, 357-369 (2003).
- [14] 諏訪僚太, 中村崇, 井口亮, 中村雅子, 守田昌哉, 加藤亜記, 藤田和彦, 井上麻夕里, 酒井一彦, 鈴木 淳, 小池勲夫, 白山義久, 野尻幸宏: 海洋酸性化がサンゴ礁域の石灰化生物に及ぼす影響, *海の研究*, 19, 21-40 (2010).
- [15] A. Kuroyanagi, H. Kawahata, A. Suzuki, K. Fujita and T. Irie: Impacts of ocean acidification on large benthic foraminifers: Results from laboratory experiments, *Marine Micropaleontology*, 73, 190-195 (2009).
- [16] M. Morita, R. Suwa, A. Iguchi, M. Nakamura, K. Shimada, K. Sakai and A. Suzuki: Ocean acidification reduces sperm flagellar motility in broadcast spawning reef invertebrates, *Zygote*, 18, 103-107, doi:10.1017/S0967199409990177 (2010).
- [17] G. De'ath, J. M. Lough and K. E. Fabricius: Declining coral calcification on the Great Barrier Reef, *Science*, 323, 116-119, doi:10.1126/science.1165283 (2009).
- [18] S. Reynaud, N. G. Hemming, A. Juillet-Leclerc and J.-P. Gattuso: Effect of  $p\text{CO}_2$  and temperature on the boron isotopic composition of the zooxanthellate coral *Acropora* sp., *Coral Reefs*, 23, 539-546 (2004).
- [19] M. Mishima, H. Kawahata, A. Suzuki, M. Inoue, T. Okai, and A. Omura: Reconstruction of the East China Sea paleoenvironment at 16 ka by comparison of fossil and modern Faviidae corals from the Ryukyus, southwestern Japan, *Journal of Quaternary Science*, 24, 928-936, doi:10.1002/jqs.1268 (2009).
- [20] 鈴木 淳, 川幡穂高: サンゴなどの生物起源炭酸塩および鍾乳石の酸素・炭素同位体比にみる反応速度論的效果, *地球化学*, 41, 17-33 (2007).
- [21] A. Suzuki, K. Hibino, A. Iwase and H. Kawahata: Intercolony variability of skeletal oxygen and carbon isotope signatures of cultured *Porites* corals: Temperature-controlled experiments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 4453-4462 (2005).
- [22] T. Omata, A. Suzuki, T. Sato, K. Minoshima, E. Nomaru, A. Murakami, S. Murayama, H. Kawahata and T. Maruyama: Effect of photosynthetic light dosage on carbon isotope composition in the coral skeleton: Long-term culture of *Porites* spp., *Journal of Geophysical Research*, 113, G02014, 15, doi:10.1029/2007JG000431 (2008).
- [23] C. Shinzato, E. Shoguchi, T. Kawashima, M. Hamada, K. Hisata, M. Tanaka, M. Fujie, M. Fujiwara, R. Koyanagi, T. Ikuta, A. Fujiyama, D. J. Miller, N. Satoh: Using the *Acropora digitifera* genome to understand coral responses to environmental change, *Nature*, 476, 320-323, doi:10.1038/nature10249 (2011).
- [24] A. Suzuki, Y. Yokoyama, H. Kan, K. Minoshima, H. Matsuzaki, N. Hamanaka and H. Kawahata: Identification of 1771 Meiwa Tsunami deposits using a combination of radiocarbon dating and oxygen isotope microprofiling of emerged massive *Porites* boulders, *Quaternary Geochronology*, 3, 226-234, doi:10.1016/j.quageo.2007.12.002 (2008).
- [25] D. Araoka, M. Inoue, A. Suzuki, Y. Yokoyama, R. L. Edwards, H. Cheng, H. Matsuzaki, H. Kan, N. Shikazono and H. Kawahata: Historic 1771 Meiwa tsunami confirmed by high-resolution U/Th dating of massive *Porites* coral boulders at Ishigaki Island in the Ryukyus, Japan, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11, Q06014, 11, doi:10.1029/2009GC002893 (2010).
- [26] F. J. Millero: History of the equation of state of seawater. *Oceanography*, 23, 18-33, doi:10.5670/oceanog.2010.21 (2010).
- [27] UNESCO: The practical salinity scale 1978 and the international equation of state of seawater 1980, *UNESCO Technical Papers in Marine Science* 36, 13-21 (1981).
- [28] T. J. McDougall, D. R. Jackett and F. J. Millero: An algorithm for estimating Absolute Salinity in the global ocean, *Ocean Science Discussion*, 6, 215-242 (2009).

#### 執筆者略歴

鈴木 淳 (すぎき あつし)

1992年東北大学大学院理学研究科博士課程後期中退、同年工業技術院地質調査所海洋地質部採用。1995年理学博士（東北大学）。産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門を経て、2010年より同地質情報研究部門物質循環研究グループ長、現在は同部門海洋環境地質研究グループ長。海洋地質学、生物地球化学が専門。海洋における炭素循環の研究、サンゴ骨格による古気候復元の研究を行ってきた。現在は、海洋酸性化問題に対して主に飼育実験手法を用いた研究を進めている。



#### 査読者との議論

##### 議論1 全般的コメント1

コメント (富樫 茂子: 産業技術総合研究所)

持続的な社会の実現に不可欠な人間活動による気候変動影響を評価し、将来の予測精度を高めるために、サンゴ骨格に残された過去の気候変動の解析について、新たな地球化学的指標の導入によりブレークスルーしてきていることが示されています。今後の方向についても記述されていて、シンセシオロジーの論文として適格です。

なお、IPCCにおける古気候に関して他にどのような課題があり、その中でサンゴ骨格の位置付けがわかるような概要の図を示していただけないでしょうか。また、気候変動の要因やそれを解析するための要素技術としての指標等との関係がわかるとよいと思います。

回答 (鈴木 淳)

図2として、古気候復元に用いられる研究対象とサンゴ骨格研究の位置付けについて説明図を追加しました。サンゴ骨格以外に古気候復元の対象となる研究材料や分析手法をまとめました。また、対象とする地質時代全体について、気温(水温)の復元図を示し、大局的な傾向を分かりやすく示すことを試みました。気候変動の要因については、図のキャプションの中で解説しました。

##### 議論2 全般的コメント2

コメント (内藤 耕: 産業技術総合研究所サービス工学研究センター)

今回の論文は複雑な自然現象を緻密な化学分析の結果のデータを組み合わせ、多面的にモデル化を目指す構成的アプローチです。特にこれまで定性的にモデル化されてきた自然現象を定量的に理解する試みは1990年代から始まったばかりで、今後の実社会への貢献

が大きく期待される研究分野と言えます。そのような意味で、地球科学以外にも多くの研究者や実務者にも関心のある分野であることから、専門用語をできるだけ使わない今回の努力は読者に大きなインパクトを与えます。

そのような意味で、分野外の読者にも内容を理解できるよう、「鮮新世」「完新世」「中生代」「ジュラ紀」「小氷期」といった年代区分を補足説明する表の作成をお願いします。

回答（鈴木 淳）

地質時代の区分については、末尾に「用語解説」を作成して、補足説明をしました。「小氷期」「完新世」「鮮新世」「中生代」について解説をしました。

### 議論3 シンセシオロジー論文としての構成

コメント（内藤 耕）

全体の理解をさらに進めるために、論文中で利用しているデータがどのような意味をもち、それぞれがどのような相互関係をもっているのかをチャートとして1枚の図を作成し、論文の最後に挿入されることを薦めます。論文を読み進めばそれらは理解できますが、専門外の人がゆっくり読み、最後に全体の論旨や構造の理解を助けることになります。

回答（鈴木 淳）

改訂に際し、あらたに図を加えました。

図11として、論文中で取り上げた3つの研究「サンゴ骨格から復元された石垣島と小笠原・父島の近過去の気候変動」、「鮮新世温暖期の化石サンゴによるエルニーニョ現象の復元」、「異常高水温現象によるサンゴ白化現象」についてデータの意味および解釈、相互の関係を説明することを試みました。また、さらに図12として、サンゴ骨格気候学の研究展開に係るスキームを整理したチャートを用意しました。図11および図12により、現在取り組んでいるサンゴ骨格気候学の全体構造を俯瞰していただけるものと思います。

### 議論4 さまざまな指標を複合的に評価することの強調

コメント（内藤 耕）

要旨を読みますと自然現象の理解が前面に出ており、より統合的アプローチとしてのシンセシオロジーを明確にするために、まとめの節にあるとおりさまざまな指標を複合的に評価し、現象を正確に理解することの重要性を強調されるとよいと思います。

回答（鈴木 淳）

ご指摘のとおり、サンゴ骨格を対象とした地球化学的手法による気候変遷の復元では、短所長所のある指標を複合的・総合的に評価し、当時の気候を正確に復元することが極めて大切です。この観点を、要旨と（はじめに）で強調しました。

### 議論5 新たな地球化学的指標の導入によるブレイクスルー

コメント（富樫 茂子）

旧図2に関しては、AUSCOREの引用ですが、新たな地球化学的指標を導入することによりブレイクスルーをする様子がわかるよいグラフです。できればこれに加えて産総研のグループの寄与を示すことはできないでしょうか？

回答（鈴木 淳）

旧図2は、改訂版では図3となりました。このヒストグラムの中に、産総研グループによる論文を示すように変更致しました。

### 議論6 化石サンゴに記録されている過去の気温変化のスケール

コメント（富樫 茂子）

現世サンゴに記録されている気温変化の観察を、化石サンゴに適用できるという部分は、過去の年代的な拡がりによりわかりやすくするために、鮮新世以降のおよその気温変化を示してください。

回答（鈴木 淳）

新たに追加した図2aに、鮮新世以降の対象とする地質時代全体について、気温の復元図を示し、大局的な傾向を分りやすく示すことを試みました。なお、この気温復元は、深海底堆積物の柱状試料から得られた底生有孔虫の炭酸塩殻の酸素同位体比を元に、南極域について現在との気温差を推定したもので、緯度や地域により気温差の絶対値については大きく違う可能性があることにご留意下さい。

# Development of methane hydrate production method

## – A large-scale laboratory reactor for methane hydrate production tests –

Jiro NAGAO

Natural gas hydrates off the shores of Japan are valuable resources for the country. To utilize these resources, it is necessary to establish a gas production technology and investigate suitable conditions for extraction of methane from methane hydrate reservoirs. While core-scale dissociation experiments yield reproducible results on how methane hydrate dissociates under various conditions, a production test at a real gas field would provide information about the type of dissociation phenomena occurring in a geological reservoir field. The performance of natural gas production from methane hydrate reservoirs is dependent upon the size and characteristics of reservoirs, such as temperature and permeability. In other words, while a core-scale dissociation test in a laboratory can demonstrate the heat transport process, dissociation in an actual reservoir is dominated by the material flow process. Thus, I believe that it is important to couple data obtained from core-scale tests with the results of field-scale tests by using a large-scale laboratory reactor in which dissociation experiments can be conducted under similar conditions to the actual reservoir. In this paper, I report the goals of the Methane Hydrate Research and Development Program being conducted by the Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan, and describe the research objective of a large-scale laboratory reactor for methane hydrate production tests at MHRC (Methane Hydrate Research Center) of AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology).

**Keywords:** Methane hydrate, the Methane Hydrate Research and Development Program, MH21 Research Consortium, gas production method and modeling, large-scale laboratory reactor

### 1 Introduction

In Japan, most of the fossil fuels used as primary energy sources are imported from overseas. As natural gas is a relatively environmentally clean energy resource compared with crude oil or coal, its demand is increasing worldwide. Methane hydrate is a crystalline material comprised of methane and water molecules under high-pressure and/or low-temperature conditions. The crystalline structure of methane hydrate is shown in Figure 1. Methane hydrate is naturally distributed in permafrost and subsea environments, which are believed to contain huge amounts of potentially



**Fig. 1 Crystalline structure of methane hydrate**

Water molecules form “cage” structures, and methane gas molecules are captured in the water cages.

extractable natural gas, of which methane is the main component (thus comes the term ‘methane hydrate’). The existence of methane hydrate has been confirmed in offshore areas of Japan (Figure 2), particularly in the Nankai Trough, by means of observations made by bottom simulating reflectors (BSR)<sup>[1]-[3]</sup>. Therefore, it is believed that methane hydrate will become a valuable domestic energy resource of Japan once its production technique is established. To this end, the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) launched the Methane Hydrate Research and Development Program, and the Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan (MH21 Research Consortium) was established. In the eastern Nankai Trough area, sedimentary core samples were obtained by the MH21 Research Consortium aboard the research vessel JOIDES Resolution. Laboratory analysis of sedimentary core samples taken from the eastern Nankai Trough area revealed that the concentration of methane hydrates is very small and methane hydrates exist within the pore spaces of sandy sediments. Kida *et al.* summarized the chemical characteristics of these sediment samples<sup>[4]</sup>.

Several methods have been proposed for recovering natural gas from methane hydrate reservoirs, including

---

Methane Hydrate Research Center, AIST 2-17-2-1 Tsukisamu-Higashi, Toyohira, Sapporo 062-8517, Japan E-mail: jiro.nagao@aist.go.jp

Original manuscript received September 29, 2011, Revisions received November 16, 2011, Accepted November 16, 2011

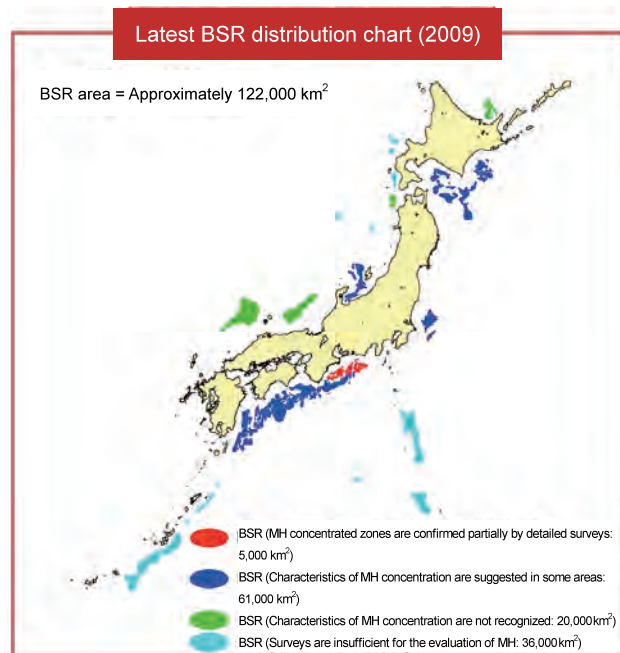
depressurization, thermal stimulation and inhibitor injection<sup>[5]</sup>. The depressurization method decreases the reservoir pressure below the equilibrium pressure of methane hydrate formation at the reservoir temperature. This method appears to be a cost-effective solution for producing natural gas from methane-hydrate-bearing layers<sup>[6]</sup>. On the basis of numerical simulations of gas productivity, this method is considered to be predictable and effective for producing gas from the reservoirs consisting of alternating layers of sand and mud. However, hydrate dissociation is a very complex process of coupling heat and mass transfers with the kinetics of hydrate dissociation. Therefore, to understand the dissociation process of methane hydrate existing within the pore spaces of sandy sediments, dissociation experiments on methane-hydrate-bearing cores in a laboratory would be useful<sup>[7]-[10]</sup>.

The performance of gas production strongly depends on the size and permeability of the samples. Heat transfer is a predominant factor in dissociation experiments on methane-hydrate-bearing cores performed in a laboratory (of the order of a few centimetres), whereas mass transfer dominates the dissociation process in an actual reservoir field (of the order

of a few 100 m). This difference in the dominant factors between core-scale experiments and field-scale production is responsible for the difference in gas production behaviours. To overcome this problem and to establish gas production conditions at a reservoir field, it is necessary to conduct methane hydrate sedimentary core production experiments on a larger scale. Thus, AIST recently developed and introduced a large-scale apparatus for methane hydrate laboratory production tests, which can conduct gas production experiments under conditions similar to those at actual natural methane hydrate reservoir fields. In this paper, I first present an overview of the Methane Hydrate Research and Development Program<sup>[11]</sup>. Then I describe the problems in conducting research issues such as methane hydrate production experiments at a laboratory scale, actual field production tests and numerical prediction of productivity, and finally, I report the advantage and certification of a large-scale reactor developed recently to overcome such problems.

## 2 Overview of Japan's Methane Hydrate Research and Development Program

The Methane Hydrate Research and Development Program has a three-phase approach<sup>[11]</sup>. At the starting period of this program, since AIST had high potential in gas hydrate chemistry, the Methane Hydrate Research Laboratory (now Methane Hydrate Research Center: MHRC) joined as a conducting member of research on the production method and modeling. In phase 1, from FY 2001 to 2008, the MHRC performed laboratory experiments on methane-hydrate-bearing cores taken from the eastern Nankai Trough, where the methane hydrate reservoir consists of alternating layers of sand and mud. The experiments showed that methane hydrate existed within the pore spaces of sand layers. Details of physical properties such as absolute permeability, porosity, methane hydrate saturation, thermal conductivity and sedimentary strength were also obtained. To evaluate gas production performances from methane hydrate reservoirs, a numerical production simulator called MH21-HYDRES was developed. Through laboratory experiments and numerical simulations using MH21-HYDRES performed by the MHRC, MH21 Research Consortium revealed that the depressurization method was determined to be the optimal production method for use in a methane-hydrate-bearing layer, which is the main sedimentary structure in the



**Fig. 2 Methane hydrate distribution off the shores of Japan calculated by observing bottom simulating reflectors**

Red: MH concentrated zones are confirmed partially by detailed surveys (5,000 km<sup>2</sup>), Blue: Characteristics of MH concentration are suggested in some areas (61,000 km<sup>2</sup>), Green: Characteristics of MH concentration are not recognized (20,000 km<sup>2</sup>) and, light blue: Surveys are insufficient for the evaluation of MH (36,000 km<sup>2</sup>). Total BSR area is approximately 122,000 km<sup>2</sup>. (Copyright@MH21 Research Consortium)

eastern Nankai Trough. For the first time, the validity of the depressurization method was verified by means of an onshore gas hydrate production field test conducted in March 2008 in a permafrost zone in Canada.

In phase 2, from FY 2009 to 2015, the use of methane hydrate extracted off the shores of Japan will be evaluated as a highly reliable energy resource. In addition, although it has been known that the depressurization is a useful method for gas production from methane hydrate reservoirs by laboratory characterization of core samples, the technical difficulties of commercializing gas production from methane hydrate reservoirs will be studied, where the commercialization will be inducted by public and private sectors in phase 3 from FY 2016. The MH21 Research Consortium has set up four research groups: the Research Group for Field Development Technology, the Research Group for Production Method and Modeling, the Research Group for Resource Assessment and the Administrative Coordination Section. The Research Group for Field Development Technology, coordinated by the Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC), will implement offshore production tests, characterize the methane hydrate resource field, investigate offshore development systems, analyze the findings of a second onshore gas hydrate production test and implement long-term tests. The Research Group for Resource Assessment coordinated by JOGMEC will evaluate methane hydrate distribution off the coast of Japan and investigate methane hydrate systems. Within the Administrative Coordination Section, an R&D team that assesses environmental impacts has been organized to analyze environmental risks and investigate appropriate countermeasures, develop technology to measure the environmental impact, assess environmental impacts in offshore production tests and make a comprehensive assessment of the environment and optimize the assessment methods used for developing methane-hydrate-bearing layers.

The MHRC at AIST coordinates the Research Group for Production Method and Modeling. The aim of this group is to establish an economical and efficient gas production method by developing technologies for advanced production methods, evaluating technologies for productivity and production behaviour and evaluating technologies for sedimentary characteristics. Research activities related to

each of these R&D issues are described below.

### **(1)Development of technologies for advanced production methods**

As mentioned above, the depressurization method can be applied to a methane-hydrate-bearing layer consisting of alternating layers of sand and mud. In such a case, the higher the initial reservoir temperature, the higher the rate of methane gas production and recovery<sup>[12]</sup>. As gas hydrate dissociation is an endothermic reaction, the gas production rate gradually decreases as the reservoir temperature decreases. Therefore, to guarantee continuous gas production by maintaining reservoir temperature at a certain range, the development of a combined production method coupling depressurization with the other production methods is being investigated. Furthermore, to ensure long-term stable methane gas production, factors that reduce permeability of the methane-hydrate-bearing reservoir should be quantitatively analyzed, e.g. impact of sand production<sup>[13]</sup>, skin formation and flow obstructions resulting from methane hydrate reproduction.

### **(2)Development of evaluation technologies for productivity and production behaviour**

In order to provide reliable predictions of productivity and production behaviours for various reservoir characteristics, the MH21-HYDRES production simulator will be upgraded. To enhance the sensitivity and accuracy of gas production behaviour, analytical models and/or routines relating to issues such as permeability of the reservoir, thermal characteristics and consolidation properties will be developed<sup>[14]</sup>. To evaluate production damage, the calculation parameters will be justified through the verification of onshore gas hydrate production tests and offshore production tests. To evaluate production behaviours in a wide area and over a long-term period, three-dimensional reservoir models that consider discontinuity, faults and heterogeneity of the reservoirs will be developed and loaded into MH21-HYDRES. On the basis of these results, a comprehensive evaluation of the production method will be performed and an optimized economical system according to the reservoir characteristics will be developed.

### **(3)Development of evaluation technologies for sedimentary**

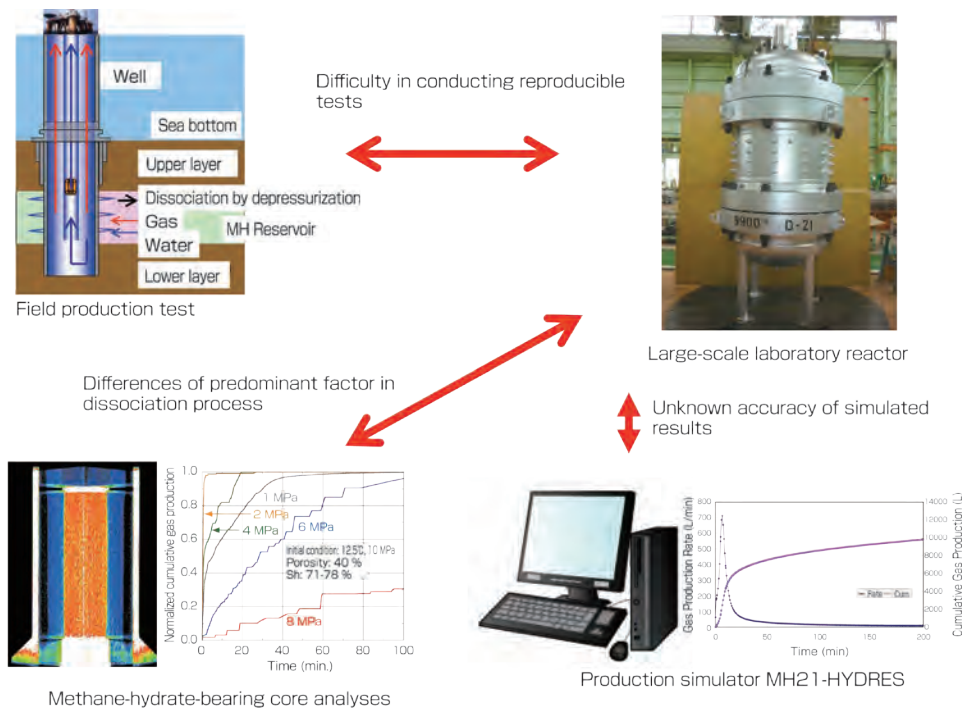
**characteristics**

To assess environmental impacts such as the stabilization of production wells, the probability of landslides and the risk of methane gas leakages from methane-hydrate-bearing sediment layers during gas production, evaluation routines called COTHMA will be developed for the sediment deformation simulator. Through a comprehensive evaluation of the mechanical properties of deep-water unconsolidated sedimentary layers by using COTHMA, the geo-mechanical stress around wells and border areas as well as long-term sediment deformation will be ascertained.

**3 Development of a large-scale laboratory reactor for methane hydrate production test**

To commercialize gas production from a methane hydrate reservoir, the technical issues described above need to be investigated. In addition, optimal production conditions that are adaptive to prevailing methane hydrate reservoir characteristics need to be ascertained. For this purpose, production tests in reservoir fields, core analyses and predictions of gas production and geo-mechanical properties obtained using MH21-HYDRES and COTHMA will yield important results, particularly when coupled with the results of investigations of the methane hydrate reservoir structure.

Field production tests will yield real productivity data on real methane hydrate reservoirs, which will enhance the accuracy of numerical simulators. However, it is difficult to conduct reproducible tests under various production conditions. Numerical simulations can provide a prediction of the productivity and the stability of a methane hydrate sedimentary layer. In addition, by introducing parameters into the numerical calculations, suitable conditions of gas production for various reservoirs can be predicted. However, these parameters are obtained from methane-hydrate-bearing core analyses, and the obtained results will be evaluated and fine-tuned through comparisons with results from the real field production tests. A dissociation experiment on methane-hydrate-bearing cores in a laboratory is useful for determining chemical and structural properties and understanding dissociation behaviour of methane hydrate distributed within pore spaces. However, because of the size of methane-hydrate-bearing cores (of the order of a few centimetres), heat transfer becomes a predominant factor. As mass transfer dominates the dissociation process in an actual reservoir field, the difference in dominant factors between core-scale experiments and field-scale production would result in a difference in gas production behaviours. As mentioned above, these R&D concepts have advantages and disadvantages and are closely related to each other, as shown in Figure 3.



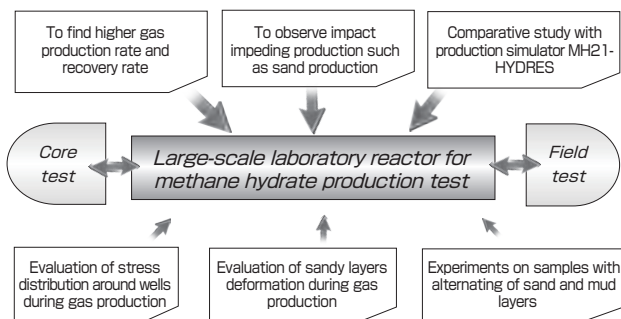
**Fig. 3 Large-scale laboratory reactor for resolving disadvantages of production tests, core analyses and production simulations**  
 These issues are the main research concepts for establishing gas production methods and evaluating conditions in methane-hydrate-bearing layers.



To overcome the above problems, AIST developed a large-scale laboratory reactor for methane hydrate production tests. Especially, to design this reactor, we have focused on solving the problem of predominant factors on hydrate dissociation, and a numerical analysis by MH21-HYDRES has been performed<sup>[15]</sup>. From this analysis, we cleared that mass transfer dominates the dissociation process for sandy sample having over 1m-size. Furthermore, taking into account the research activities of the Research Group for Production Method and Modeling, the reactor was designed by considering the technical issues, as presented in Figure 4. As stated above, three main research activities need to be conducted by the Research Group for Production Method and Modeling. Although it has been determined that the depressurization method is economically suitable for gas production from methane hydrate reservoirs off the shores of Japan, detailed conditions and procedures for depressurization remain unknown. Thus, AIST designed the large-scale laboratory reactor to aid the development of technologies for advanced production methods and to analyze the impact of sand production, skin formation, and flow obstructions. To achieve these goals, in the reactor, highly

sensitive temperature and pressure sensors with a wide range and fluid flow metres are arrayed to examine a range of production conditions so that a higher gas production rate and a higher recovery rate can be obtained. To evaluate the sand production phenomenon, a sand screen is fitted to a well tube. The overall volumes of the high-pressure vessel and line tubes are estimated to reduce data error enabling comparison of the results with those of numerical predictions obtained by MH21-HYDRES. Thus, evaluation of mechanical properties can be avoided. To verify the deformation of sandy samples during gas production, it is necessary to position mechanical sensors at many locations for measuring changes in stress and confinement pressure. For this purpose, holes need to be configured in the sides and bottom of the vessel, which is a complex task.

A schematic diagram of the large-scale laboratory reactor is shown in Figure 5. The steel high-pressure vessel has an inner diameter of 1000 mm and a height of 1500 mm. The vessel consists of three chambers, and its volume and weight are 1710 L and 9900 kg, respectively. This is four times larger than the large-scale production reactor LARS developed by the SUGAR Project in Germany<sup>[16]</sup>. The objective of the SUGAR Project is to clarify the characterization of CO<sub>2</sub> geological storage and methane gas production using the reaction heat of CO<sub>2</sub> hydrate generation in the methane hydrate reservoir. Our vessel can be loaded with core samples of sand with a diameter of 1000 mm and a length of 1000 mm. An inner plate is placed on top of the methane hydrate sedimentary sample to exert an overburden pressure of up to 16.5 MPa; this pressure is similar to that in a subsea environment. The overburden pressure is supplied by injecting water into the space between the upper chamber and the inner plate. A production well is simulated using a steel pipe with a diameter of 100 mm and a length of 1000 mm with 32 holes drilled along its length; the pipe is placed at the centre of a sandy sample layer. A sand screen can be placed over the holes to terminate sand production. A total of 50 holes in the sides and 19 holes in the bottom of the vessel are provided to allow the insertion of gas, water and temperature and pressure sensors. The position of sensors can be adjusted depending on the characteristics of the sand sample and the production conditions. To simulate conditions of a methane hydrate reservoir at the eastern Nankai Trough area, the vessel is placed in a large cabinet that can control



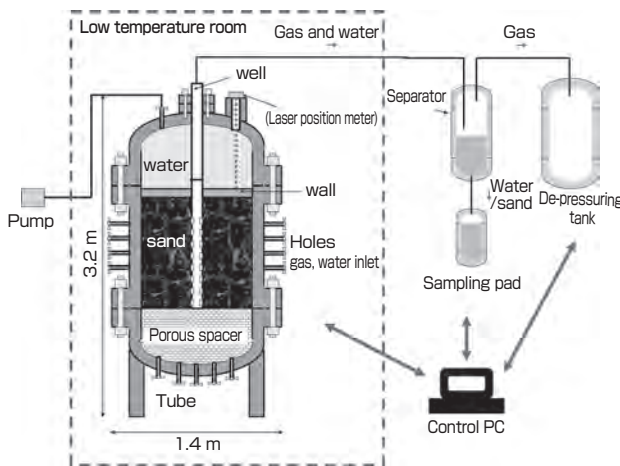
**Fig.4 Relationship between the experimental issues on large-scale laboratory reactor and the roles of research teams of the Research Group for Production Method and Modeling**

Evaluation of production behaviours such as (1) enhancement of production rate and recovery rate and (2) analysis of impact impeding production are the main experimental issues on a large-scale laboratory reactor. Also, various production conditions to obtain a higher gas production rate and recovery rate can be examined. The experimental results are compared with those from small scale core experiments and analyses of MH21-HYDRES, which is a numerical model of a large-scale laboratory reactor. Finally, the results will be compared to production results of real field tests which will be held in FY2012. However, research regarding geo-mechanical characterization has not been conducted. To achieve relatively uniform methane hydrate formation within the pore spaces of a sandy sample, the positions of the perforations cannot be adjusted for experiments on samples with alternating layers of sand and mud.

the temperature of the high-pressure vessel from  $-5$  to  $20$  °C. Holes in the sides and bottom of the vessel for the insertion of gas and water are connected to a  $\text{CH}_4$  gas supplier and pumps that supply pure water into the sandy sample layers, respectively. The production well is connected to a gas and water separator. Real-time observations of the rate of the production of gas and water as well as the amount of fine sand particles can be performed under various temperature and pressure conditions.



(a) High-pressure vessel of the large-scale laboratory reactor



(b) Schematic flow diagram of the large-scale laboratory reactor

**Fig. 5 Schematic illustrations of the large-scale laboratory reactor**

To aid the development of technologies for advanced production methods and to analyze the impact of sand production, skin formation and flow obstructions, the highly sensitive temperature and pressure sensors with a wide range and fluid flow metres are arrayed to side holes of the vessel. To evaluate the sand production phenomena, a sand screen is fitted to a well tube. Water and fine sand are collected in a sampling pod arrayed to the water/gas separator. The overall gas volume is measured at de-pressuring tank arrayed to the water/gas separator. All measured data were collected in a PC automatically.

Pure water is injected into the high-pressure vessel via the holes in the sides of the vessel and the centre pipe. Once the designated amount of pure water has been filled in the vessel, sand particles are added to the pure water, and vibration is applied to ensure homogeneous accumulation of sand particles. After the vessel is filled with wet sand particles, the inner plate is positioned above the sand sample layer, and the top chamber is closed. Pure water is injected into the interior of the top chamber to apply overburden pressure to the sandy sample layer by pressurizing the inner plate. To adjust the water content, water in the sandy sample layer can pass through the holes in the bottom of the vessel.

For the formation of methane hydrate in the sandy sample layer and control of the confinement pressure, the flow rate of  $\text{CH}_4$  is adjusted.  $\text{CH}_4$  is continuously supplied via holes in the sides of the vessel. The temperature of the cabinet is decreased below the equilibrium temperature of methane hydrate formation. By calculating the injected volume of methane gas and the initial water content, the end of the methane hydrate formation can be estimated. After methane hydrate formation, pure water is injected into the pore spaces of the sandy sample layer because natural gas hydrate reservoirs are usually saturated with water.

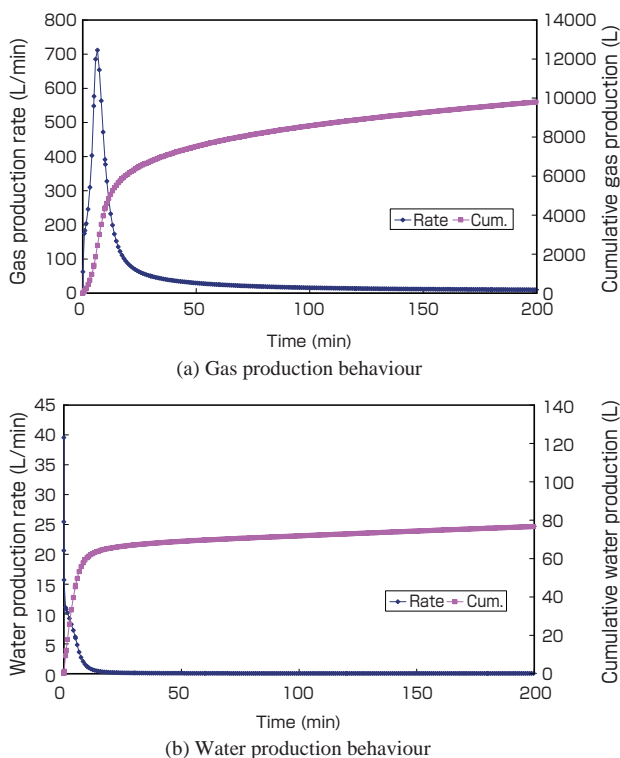
The top of the centre pipe is connected to a backpressure regulator. To examine the depressurization method, the pressure value of the regulator is adjusted to a designated pressure. After adjustment, gas and water flow out through the centre pipe, which may contain fine sand components. The centre pipe is connected to the gas-water separator, and each line tube is connected to a fluid flow metre that measures water and gas volumes during the experiment. To evaluate the sand production phenomenon, a water flow line is connected to the accumulation chamber to collect the fine sand particles.

Figure 6 shows the predictions of water and gas production by the MH21-HYDRES production simulator using the results of depressurization experiments conducted in the large-scale laboratory reactor. The results show the water and gas production behaviours when pressure is decreased from 10 to 3 MPa. The parameters for the numerical simulation were temperature of  $10$  °C, pressure of 10 MPa, permeability of sandy sample layer of  $1000 \text{ mD}^{[17]}$ , initial effective

permeability of  $26 \text{ mD}^{\text{Term1}}$ , hydrate saturation of 60 % and water saturation of 40 %. From these results, gas production shows a peak during the first period, indicating that mass transfer is predominant in the dissociation process. Gas production experiments conducted using depressurization to ascertain the relationship between the degrees of reduction in pressure and the gas production rate have been underway. The obtained results will be compared with those obtained from a numerical simulation study conducted using the MH21-HYDRES production simulator. This study will contribute to the first field production test to be conducted off the shore of Japan in FY 2012.

## Acknowledgements

This study was financially supported by the Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan (MH21 Research Consortium) to carry out the Methane Hydrate R&D Program conducted by METI. I thank Dr. Hideo Narita, Dr. Yoshihiro Konno, and Dr. Hiroyuki Oyama of AIST for their valuable suggestions in the preparation of this manuscript.



**Fig. 6 Predictions of gas and water productions based on depressurization experiments in the large-scale laboratory reactor using the MH21-HYDRES production simulator**

A peak during the first period in gas production behaviour indicates that mass transfer is predominant in the dissociation process.

## Terminology

Term 1. Darcy (D): a traditional unit for permeability. The SI unit for permeability is  $\text{m}^2$ . 1D is ca.  $10^{-12} \text{ m}^2$ .

## References

- [1] M. Satho: Distribution and resources of marine natural gas hydrates around Japan, *Proc. 4th Int. Conf. Gas Hydrate*, 175 (2002).
- [2] F. Colwell, R. Matsumoto and D. Reed: A review of the gas hydrates, geology, and biology of the Nankai Trough, *Chemical Geology*, 205, 391 (2004).
- [3] Bottom simulating reflector (BSR) is observed in seismic profile data, which broadly mimics the relief of the sea floor. This boundary is to mark the pressure and temperature dependent base of the methane-hydrate stability field. Namely, above the BSR, methane hydrate exists as hydrate.
- [4] M. Kida, K. Suzuki, T. Kawamura, H. Oyama, J. Nagao, T. Ebinuma, H. Narita, H. Suzuki, H. Sakagami and N. Takahashi: Characteristics of natural gas hydrates occurring in pore spaces of marine sediments collected from the eastern Nankai Trough, off Japan, *Energy & Fuels*, 23, 5580 (2009).
- [5] E. D. Sloan: *Clathrate Hydrates of Natural Gases*, 2nd ed., Marcel Dekker (1998).
- [6] M. Kurihara, A. Sato, H. Ouchi, H. Narita, Y. Masuda, T. Saeki and T. Fujii: Prediction of gas productivity from Eastern Nankai Trough methane-hydrate reservoirs, *Offshore Technology Conference*, SPE international, Society of Petroleum Engineers, OTC-19382 (2008).
- [7] M. H. Yousif, P. M. Li, M. S. Selim and E. D. Sloan: Depressurization of natural gas hydrates in Berea sandstone cores, *Journal of Inclusion Phenomena and Molecular Recognition in Chemistry*, 8, 71 (1990).
- [8] Y. Kamata, T. Ebinuma, R. Omura, H. Minagawa and H. Narita: Decomposition behaviour of artificial methane hydrate sediment by depressurization method, *Proc. 5th Int. Conf. Gas Hydrate*, 3016 (2005).
- [9] T. J. Kneafsey, L. Tomutsa, G. J. Moridis, Y. Seol, B. M. Freifeld, C. E. Taylor and A. Gupta: Methane hydrate formation and dissociation in a partially saturated core-scale sand sample, *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 56, 108 (2007).
- [10] H. Oyama, Y. Konno, Y. Masuda and H. Narita: Dependence of depressurization-induced dissociation of methane hydrate bearing laboratory cores on heat transfer, *Energy & Fuels*, 23, 4995 (2009).
- [11] Detail and research planning of the Japan's Methane Hydrate Research and Development Program and research scheme of Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan (MH21 Research Consortium) are described at <http://www.mh21japan.gr.jp/english/>.
- [12] Y. Konno, Y. Masuda, Y. Hariguchi, M. Kurihara and H. Ouchi: Key Factors for Depressurization-Induced Gas Production from Oceanic Methane Hydrates, *Energy & Fuels*, 24, 1736 (2010).
- [13] H. Oyama, J. Nagao, K. Suzuki and H. Narita: Experimental Analysis of Sand Production from Methane Hydrate Bearing Sediments Applying Depressurization Method, *J. MMIJ*, 126, 497-502 (2010) (in Japanese).
- [14] Y. Konno, H. Oyama, J. Nagao, Y. Masuda and M. Kurihara: Numerical Analysis of the Dissociation Experiment of Naturally Occurring Gas Hydrate in Sediment Cores Obtained at the Eastern Nankai Trough, Japan, *Energy & Fuels*, 24, 6353 (2010).

- [15] Y. Konno, Y. Masuda, H. Oyama, M. Kurihara and H. Ouchi: Numerical Analysis on the Rate-Determining Factors of Depressurization-Induced Gas Production from Methane Hydrate Cores, *Proc. Offshore Technology Conference 2010*, 20591 (2010).
- [16] J. Schicks, E. Spangenberg, R. Giese, B. Steinhauer, J. Klump and M. Luzzi: New Approaches for the Production of Hydrocarbons from Hydrate Bearing Sediments, *Energies*, 4, 151 (2011).

---

## Author

### Jiro Nagao

Completed the two-years masters course at the Graduate School of Engineering, Hokkaido University in 1991. Joined the Government Industrial Research Institute, Hokkaido, Agency of Industrial Science and Technology, Ministry of International Trade and Industry in 1991 (current AIST). Received Doctor (Engineering) in 2000 from Hokkaido University. Became the leader of the Production Technology Team, Methane Hydrate Research Center in 2009. Also became the leader of the Research Group for Production Method and Modeling of the MH21 Research Consortium in 2010. Engaged in research of physics and chemistry of clathrate materials and development of production method and modelling of gas hydrate resources.




---

## Discussions with Reviewers

### 1 General construction of the manuscript

**Comment (Hiroshi Tateishi, The New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO))**

For the development of the gas production technology from methane gas hydrate reservoirs, this manuscript first explains the overview of Japan's Methane Hydrate Research and Development Program, and then the development of the apparatus for methane hydrate production tests carried out by the author is described. The construction of the manuscript is rather unusual, because the experimental results from the apparatus have not yet been obtained at present. In spite of this fact, the manuscript is acceptable after revision because publication of such type of manuscript is requested from the outside. From the standpoint of the journal, *Synthesiology*, the manuscript lacks issues as pointed out in the following comments. From the viewpoint of "synthesis", there is a dual structure of synthesis: one is micro-level technology synthesis to integrate elemental technologies toward the development of the apparatus which is the main purpose of the present manuscript, and the other is macro-level system synthesis to integrate the results obtained with the apparatus toward the development of the production system. For the revision of the manuscript, please take these points into consideration.

**Answer (Jiro Nagao)**

Concerning the development of a large-scale laboratory apparatus for the optimization of production conditions toward commercial utilization of methane hydrate, the outline of the program, the R&D issues of the Research Group for Production Method and Modeling of MH21 Consortium coordinated by the MHRC at AIST, and the important issues to be analyzed with this apparatus have been described. In response to the reviewer's

comments, the author has added and revised the description in the text and the reference. However, the development of the production system depends not only on the production method, but also on the economic evaluation of methane production including the combination of machines in production tests at the sea bed conducted by JOGMEC. Thus, it is difficult to consider the validity of the production system based only on the tests with the large-scale apparatus. Therefore, the author has not described the development of the production system in this paper.

### 2 The role of MHRC

**Comment (Hiroshi Tateishi)**

In the latter half of "2. Overview" section, the goals of R&D issues in phase 2 at MHRC are explained. However, the description is sudden and difficult to understand for the readers since the relevance of phase 2 with phase 1 is not explained. Brief explanation for the following points is required: why MHRC is assigned for this part of R&D, what kind of results MHRC obtained in phase 1, and how the results obtained in phase 1 are connected to phase 2.

**Answer (Jiro Nagao)**

The author has added the following explanation. At the start of the program, the Methane Hydrate Research Laboratory of AIST (the present Methane Hydrate Research Center) participated in the MH21 Consortium as the research supervisor of R&D of production method & modeling in phase 1 since the laboratory had high level knowledge on methane hydrate engineering. The foregoing explanation has been connected to the subsequent description of implementation challenges and the research results. It has been found that depressurization is effective for the gas production method from the methane hydrate resource as a research result in phase 1. The finding is linked to the research purpose of phase 2 (technology advancement toward commercialization).

### 3 Development of 1m-size test apparatus

**Comment (Hiroshi Tateishi)**

1. I can understand the logic that thermal decomposition is dominant in cm-size samples whereas mass transfer is dominant in the actual 100m-size bed, therefore a test filling the gap in between is required. Yet it is difficult to judge the adequateness of the specifications of the apparatus since no quantitative explanation is given on the scale boundary that separates the dominant factors. It seems difficult to set a strict boundary, but explanation is required such as, "Since critical scale is around this level because of such and such reasons, a 1m-size apparatus is adequate enough".

2. Since the explanation of the specifications of the apparatus is simply listed, it is not clear where the focus is. For example, if the author arranges the explanation in the order of main items to test with the apparatus, technological issues and required functions to achieve the issues, the ways to clear the issues, the readers can understand the idea more easily. Especially, the manuscript lacks the explanation of originality of the MHRC.

3. The author briefly explains the large-scale production apparatus LARS developed by the SUGAR Project in Germany. Since only the size is mentioned, it is difficult to understand the significance of the comparison. Please describe the purpose and design concept of the LARS and explain the difference of the two apparatuses, LARS and the apparatus of MHRC.

**Answer (Jiro Nagao)**

1. In order to design our apparatus, we have focused on solving the problem of predominant factors of hydrate dissociation. The sample size dependence of the rate-determining step has been investigated by using the production simulator, MH21-HYDRES. Another study shows that in the case of

permeability of 10 mD order, the mass and heat transfers become comparable at the sample size of 0.5 m (Konno *et al.* Proc. Offshore Technology Conference 2010, 20591 (2010)). On the basis of the study and the analysis, we have judged that mass transfer dominates the dissociation process with an apparatus of over 1m-size. We have added the explanation in lines 3-8 on page 93 and reference No.15.

2. On designing the apparatus, we have set the most important R&D issues to be investigating the dependence of productivity of the depressurization method on the permeability of the sample and finding the most suitable depressurization conditions, and analyzing quantitatively the impact of sand production, skin

formation, and flow obstructions. The explanation of the functions prepared to clear the issues, their technological issues and the ways to clear the issues have been added to the manuscript.

3. It was described in a paper that the objective of the SUGAR Project is to clarify the characteristics of CO<sub>2</sub> geological storage and that the apparatus was introduced to carry out the methane hydrate decomposition using the reaction heat generated in the formation of CO<sub>2</sub> hydrate. The explanation of the objective has been added to this manuscript. However, the author has not obtained the accurate information on the design concept of the apparatus and cannot explain it.

# 鉄鋼厚板製造プロセスにおける一貫最適化に向けて

## — 生産管理に関するマルチスケール階層モデルの提案 —

西岡 潔<sup>1,4\*</sup>、水谷 泰<sup>2</sup>、上野 博則<sup>3</sup>、川崎 博史<sup>1</sup>、馬場 靖憲<sup>4</sup>

鉄鋼業において、製造工期の短縮と能率向上を両立する生産の一貫最適化は、どのように可能であろうか。先行例としてのリーン生産方式では、生産の時間スケールをメインラインのそれに同期化したのに対して、鉄鋼業では自動車と同水準の製造の同期性と時間スケールの圧縮は本質的に難しい。この事例は、生産管理を時間に関するマルチスケール階層構造としてモデル化することにより、鉄鋼産業において工場単位の最適一貫生産がどのように探究されたか、そのプロセスを明らかにした。この論文は、幅広いキャリアを積んだ現場の技術者の生きた知識を構成学的にモデル化し、産業界からの製造知識の体系化を目指した試みである。

**キーワード:** 鉄鋼、一貫最適化、生産管理システム、マルチスケール階層モデル、リーン生産方式

## Toward the integrated optimization of steel plate production process

### – A proposal for production control by multi-scale hierarchical modeling –

Kiyoshi NISHIOKA<sup>1,4\*</sup>, Yasushi MIZUTANI<sup>2</sup>, Hironori UENO<sup>3</sup>, Hirofumi KAWASAKI<sup>1</sup> and Yasunori BABA<sup>4</sup>

Integrated optimization of production in the steel industry to simultaneously minimize lead time and improve productivity is a real challenge. Lean manufacturing, recognized as a leading successful example of such optimization, is characterized by synchronization of time scale of production with that of the mainline. However, in the steel industry, it is inherently difficult to implement synchronization and reduction of production time to the same degree as in the automobile industry. This difficulty motivated our method for integrated optimization of production at the plant level in the steel industry, by modeling the production control as a multi-scale hierarchical structure in time. This paper describes an attempt to systematize production knowledge in industry by a synthesis of practical knowledge (of shop-floor engineers) and company experiences.

**Keywords:** Steel industry, integrated optimization, production control system, multi-scale hierarchically structured model, lean production system

### 1 はじめに

最小の資源で、無限のバラエティーをもつ製品を、欠陥ゼロ、在庫ゼロ、最小の製造工期<sup>[1][2]</sup>で製造する生産管理における一貫最適化は、ものづくりの究極の目標である。一般に、生産管理はプル型とプッシュ型に大別される<sup>[1][2]</sup>。下流である顧客の要求に合わせて上流が最適な部品や中間財を順次提供するプル型は自動車で代表される組み立て産業に適用され、20世紀を代表する成功事例としてのリーン生産方式を生んだ。一方、プッシュ型は、下流工程の要求とは関係なく、プロセスの入口を起点に上流から下流に部品や中間財を流しながら生産を指示する方式であり、鉄鋼また化学産業のようなプロセス産業を含む多くの産業に

適用されてきた。プッシュ型の生産管理において、製造工期の短縮と能率向上を両立する生産の一貫最適化はどのように可能になるのだろうか。

この論文は新日鉄君津製鉄所における事例に注目し、プッシュ型生産管理に適した工程構造を有する鉄鋼業の製造プロセスにおいて、元来はプル型生産管理を起源とするリーン生産方式の概念また手法がどのように利用できるか考察する。君津製鉄所厚板工場においてプロセス産業における一貫最適化実現のための生産管理が革新され、その結果、中国経済の急拡大によって需要が急増した2000年代初頭において、仕掛品の削減による大幅な製造工期の短縮と(図1)、国内他厚板工場と比較して迅速な生産

1 新日本製鐵株式会社 〒100-8071 千代田区丸の内2-6-1, 2 新日本製鐵株式会社 君津製鐵所厚板工場 〒299-1141 君津市君津1, 3 新日本製鐵株式会社 名古屋製鐵所厚板工場 〒476-8686 東海市東海町5-3, 4 東京大学先端科学技術研究センター 〒153-8904 目黒区駒場4-6-1

1. Nippon Steel Corporation 2-6-1 Marunouchi, Chiyoda-ku 100-8071, Japan \* E-mail: knishi@hyper.rcast.u-tokyo.ac.jp, 2. Nippon Steel Corporation Kimitsu Works 1 Kimitsu, Kimitsu 299-1141, Japan, 3. Nippon Steel Corporation Nagoya Works 5-3 Toukai, Toukai 476-8686, Japan, 4. Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), The University of Tokyo 4-6-1 Komaba, Meguro-ku 153-8904, Japan

Original manuscript received November 11, 2011, Revisions received January 27, 2012, Accepted January 31, 2012

量の拡大が実現された（図2）。複雑な製造フローをもち生産における制約条件のハードルが高い厚板製造において、工場単位の全体最適はどのように可能になったのであろうか。この論文は、製造現場においてどのように生産管理が革新されていったのかを紹介し、実現された生産管理システムを時間に関するマルチスケール階層構造として把握し、モデル化することにより、プロセス産業である鉄鋼業がリーン生産方式から何が学べるかを明らかにする。

## 2 鉄鋼厚板製造について

製鉄所の製造プロセス<sup>用語2</sup>は、鉄鉱石、石炭等の原料を高炉で銑鉄とし、転炉、精錬を経て鋼を得る。その後の連続鋳造においてスラブ（長方形の鋼片）を造り、圧延され製品である厚板となる。厚板製造は綿密な生産計画による受注生産であり、転炉一鍋 300～400 トンの大ロットから 3 トン程度の厚板を細分化して製造する。製品としての厚板は船やビル、橋、建設・産業機械、液化天然ガス・海底油田掘削用の海洋構造物等多岐にわたる構造物の重

要部材として広く使われており、規格が多種多様である、使用か所が厳密に決まっている、一品一葉ごとのスケッチサイズである等、他の鉄鋼品種とは異なる特徴をもつ。

厚板は多品種小ロットの受注生産であり、用途が多岐にわたるために、その製造プロセスは複雑である。まず、圧延プロセスで多種多様なサイズの厚板を製造するとともに、金属組織を制御して材質を造り分ける。次に、精整プロセスでは、上流工程で生じた不具合の修正や、用途や必要特性に応じてさまざまな付加的な処理（熱処理、塗装等）を行う。

圧延工程における材質の造り込み、とりわけ水冷型のオンライン加工熱処理プロセス（TMCP: Thermo-Mechanical Control Process）は 1980 年代に日本で開発され、その後 30 年間にわたり、高級厚板製造の最先端技術として日本の厚板製造の根幹技術となっている。厚板圧延プロセスの概括を図3に示す。

TMCP では圧延後の加工組織に対して冷却速度制御を行うことによって、必要になる金属組織と特性を自由に作り

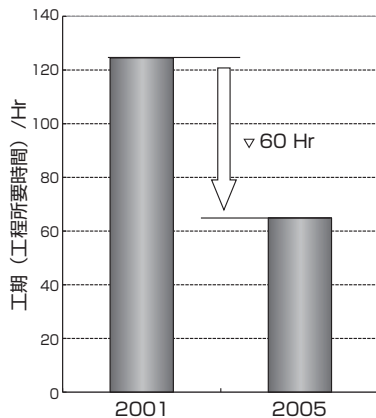


図1 君津厚板工場における製造工期の短縮

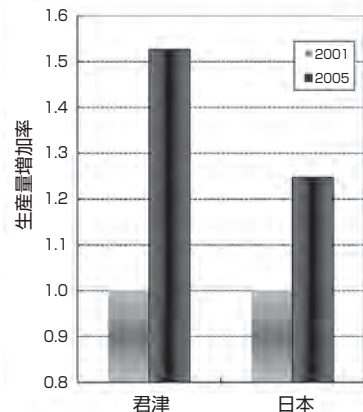


図2 日本の厚板工場の生産量増加率の比較  
(出典：日本鉄鋼連盟 鉄鋼用途別受注統計月報（普通鋼/特殊鋼）)

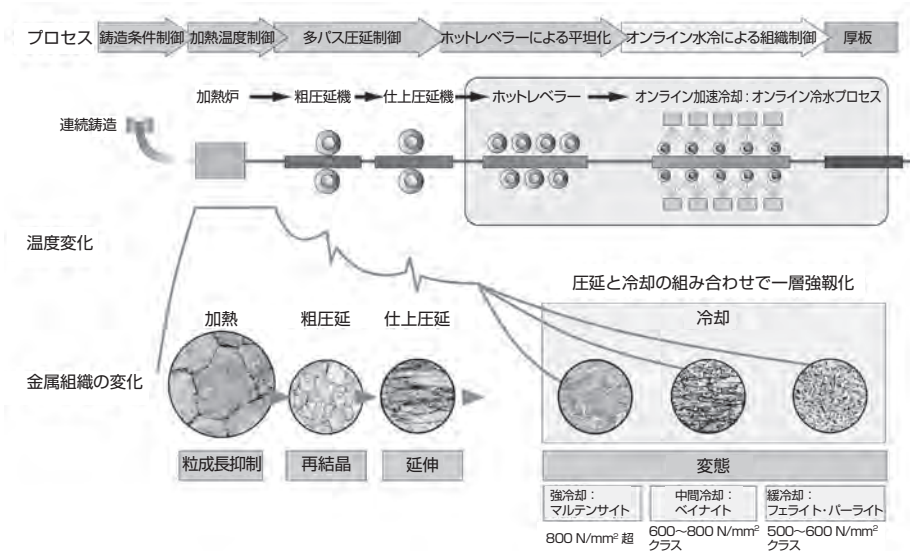


図3 厚板における金属組織制御とTMCP技術<sup>13)</sup>

分けることが可能になり、近年の厚板における新鋼材開発において基盤技術の役割を果たしている。しかし、TMCP鋼は形状確保が難しく、数メートルオーダーの幅と長さを持つ巨大な厚板を均質に冷却することは容易ではない。さらに、高級鋼の製造では付加価値を付けるための熱処理、塗装等の一連の工程が増加するため、精整工程における負荷（処理能力に対する処理すべき量）の増大、一貫生産能力の低下、製造工期延長、在庫増大といった問題が顕在化した。

### 3 自動車業におけるリーン生産方式との比較

自動車業におけるリーン生産方式とはどのような生産管理であったのであろう。まず、自動車業の特徴として、組み立てラインにおける時間の有効活用が目標とされた。目標の実現のために、自動化やジャスト・イン・タイムという形で概念化されたさまざまな手法が援用され、製造現場における無駄の排除が徹底され、市場動向と生産工程の変動に柔軟に対応できる生産方式が完成した<sup>[4][7]</sup>。同生産方式の本質は、最終マーケットに向けて下流工程が必要なものを必要なだけ最適のタイミングで上流工程が提供するプル型生産管理にある<sup>[2][8]</sup>。組み立て産業では、電気機器メーカーを中心に、流れ作業でない例えばセル生産方式が導入されているが<sup>[9]</sup>、同方式も時間を有効に管理する点でその目的はリーン生産方式と等しい。

組み立て産業で大きな成功をあげた生産方式が、鉄鋼業において、これまで大きな成功をみなかったのはなぜであろうか。その理由を考える上で、組み立て産業とプロセス産業の工程構造は本質的に異なることを認識する必要がある。リーン生産方式はメインラインの徹底的な平準化を前提として、サブラインと同期を図ることにより成立する。一方、鉄鋼業は高炉－転炉－圧延という一貫工程を所与とし、設備の大規模化による能率向上を追求してきた。厚板工場は上流工程において規模を追求するプッシュ型工程構造の中に位置付けられるため、下流工程に合わせて各作業工程が連動しながら在庫と製造工期の最小化を追求するプル型工程構造を前提とするリーン生産方式を適用することは困難であった。

鉄鋼業における能率向上においては、一品一品の注文から半製品－出鋼といった、関連する上流工程において生産ロットを大きくすることが重要であり、その結果、上流工程で大きく造って下流工程で小さく造り分ける「ロットをまとめる」プロセスが不可欠と考えられてきた。上流工程における規模の追求は品種やサイズの等しい中間財を生産することであり、通常は必要とされる生産ロットは製品の出荷ロットと比較すると大きいいため、納期の異なる製品の中

間財が混在するとともに、跛行性をもって下流工程を流れることになる。このような工程構造が仕掛品を増大させる原因であり、単純にリーン生産方式から学ぶことによる製造工期の短縮は困難であった。

## 4 厚板製造における一貫最適化の取り組み

### 4.1 これまでの取り組み

日本の鉄鋼業は、1973年のオイルショック以降の長期にわたる構造的な不況の中で、縮小再生産と合理化を進め、労働生産性の向上に注力してきた。一方、厚板の主要ユーザーである造船、建築、橋梁、タンク、ラインパイプ等の分野では軽量化、高機能化、複合特性化が進み、厚板には高強度化、高靱性化、高耐環境性化等の製品特性が求められた。新機能材はTMCP技術を利用して開発されたが、加速冷却材には一般材に比較して圧延能率<sup>[用註3]</sup>が低下するという問題があった。さらに、TMCP技術の適用が進むにつれて、形状を確保するための矯正工程<sup>[用註4]</sup>の負荷が高くなった結果、品種構成の高度化とともに精整工程の高負荷化が進展した。このような状況のもと、精整能力向上の必要性が次第に認識されていったが、厚板生産において工場全体の一貫能率を向上することは難しいとされ、生産システムのボトルネックの解消は、製造工期短縮による短期的な収益向上効果が見えない中では優先して取り組む経営目標ではなかった。

さらに、製鉄－製鋼という上流工程は一貫製鉄所のコスト構造で大きな比重を占めるため、コスト視点からの製鉄所マネジメントの関心は上流工程に偏りがちであった。その結果、製品品種の高度化とともに発生する仕掛品の増加やロットの細分化への対応は遅れがちとなった。現場に慢性的な仕掛品の滞留を許容する操業体制が定着化する中で、需要の増大時には精整工程のボトルネックが顕在化し、大幅な製造工期の延長による納期遅れや受注調整を必要とする事態が発生したが、現場ではボトルネック工程への人員投入等の対症療法的な対応が常態であった。

### 4.2 一貫最適化を可能にした経営革新

工場単位での全体最適を可能にする生産管理の実現のためには、それを可能にする一連の経営革新が存在しなければならない。日本の粗鋼生産が長期低迷する中で、新日鉄は長期にわたり経営の合理化を進めてきたが、1990年代に入り、経営トップの強力なリーダーシップのもとで鉄鋼事業の競争力強化を目的に組織・経営体制の改革が進められた。中心になったのが製販一体化を含む品種別経営であり<sup>[10]</sup>、本社機能のスリム化と階層の圧縮による組織の大幅な統合・改編である<sup>[11]</sup>。1997年に行われた全社規模の組織改革によって、現場の経営に対して工場長等のミ



ドル層に一元的意思決定の権限が与えられ、ミドル層が企業家として活動する機会が与えられた。君津製鉄所では、それまでは、工程管理等の共通部門が個別製品を生産する各製造部門を支援する組織体制であったが、組織改編の結果、それまでは共通部門にあった工程管理、品質管理、設備整備という厚板の製造にかかわるすべての機能が厚板工場に統合された。新体制のもとで、厚板工場長は工場経営に対する一元的権限を活用し、厚板生産に関する管理体制の革新に着手した。工場を単位とする一貫最適化こそが、長期にわたる製品競争力の源泉であるという視点から、これまでの設備単位の生産性向上を目指す生産管理から、仕掛品削減による製造工期短縮を目指す生産管理へと経営パラダイムを大きくシフトした。そして、本来はプッシュ型に適した工程構造をもつ厚板製造に対して、プル型構造を起源にもつリーン生産方式を適用するという挑戦が始まった。

#### 4.3 現場ミドルマネジメントの対応

圧延工程は厚板工場の品質・コストに大きな影響を与えるため、工場長は圧延能率の向上をまず目標にして、生産管理に対する支援モデルの開発とその適用に取り組んだ。次に、圧延能率の向上による精整工程の能力不足に対応するために、ボトルネック工程（矯正工程等）に加え、精整全工程にわたる各工程の能率の向上に取り組んだ。これまで、精整工程は圧延のサブ工程として位置付けられていたため、設備保全に関する対応はブレイクダウン・メンテナンス（BDM）が中心となっていたが、設備・装置を必要ときに必要な状態で稼働することを目的に、厚板工場に統合された設備整備部門とラインが一体となってトータル・プロダクティブ・メンテナンス（TPM）活動を開始した。

さらに、工場経営の全体最適化のためには、現場の製造ラインの一貫最適化に関連したスタッフによる一連のバックアップが必要になった。なによりも、精整工程における仕掛品削減は、前工程の生産ロットの拡大を制約することにより、短期的なコストプッシュ要因となる可能性があるため、精整工程における仕掛削減は個別設備の能率向上だけでは解決できず、計画レベルにおける工程負荷の平準化が必要であった。生産ロットの設計（材料設計）は工程管理スタッフの業務であるが、精整負荷の平準化を考慮した材料設計を行う仕組みは当時存在していなかった。この問題に対処するために、現場操業を熟知し、システム開発にも優れた技術スタッフを工程管理グループに投入し、コスト・能率・製造工期の視点から精整負荷を平準化する支援システムを構築した。以上の作業が時系列的にどのように進展したかについて、技術的な詳細を次節に述べる。

## 5 厚板工場における生産管理システムの革新

### 5.1 支援システム開発の歴史

生産管理の体系および日程計画の類型に関しては、自動車業における観察をもとに、計画のタイプを大日程（全般的生産）計画、中日程（基準生産）計画、小日程（順序）計画に分類し、それぞれのタイプについて、計画期間、日程の単位、計画修正の頻度、製品カテゴリー、計画対象といった計画要素が整理される<sup>[12]</sup>。

生産管理の支援システムについては、MRP（Material Requirement Planning：資材所要量計画）が1950年代半ばにゼネラル・エレクトリック社で導入されて以来、当初のMRPの弱点を克服するために、MRP II、ERP（Enterprise Resource Planning）、また、APS（Advanced Planning and Scheduling）といった生産計画支援システムが開発された。その利用と普及に関しては、MRPとAPSについて単純かつ安定的な製造工程に対する適用事例が報告されているのに対して、複雑かつ生産変動が頻繁に発生する製造工程に対する適用事例はいまだ報告されていない<sup>[12][21]</sup>。この現状は、リーン生産方式に代表されるプル型の生産管理が効果的な組み立て産業においては多段階で計画の見直しを行うので、実着工に近づくのに伴って部品発注等の計画精度が必然的に高くなるため<sup>[12]</sup>、異なった時間スケールの計画間を動的かつ有機的に連結する包括的なモデル／支援システムを構築するニーズが必ずしも高くなかったことを反映している。

一方、代表的なプロセス産業である鉄鋼業では、一貫連続する大規模設備の操業のために、膨大な制御情報、生産管理情報が必要となることから、他産業に先駆けて大規模計算機援用による生産管理システムを導入してきた<sup>[13]</sup>。鉄鋼業の生産管理システムは、本質的にはプッシュ型の生産管理に対応し、高熱・高温プロセス工程の最適制御、上流工程の生産変動への対応、および注文情報の集約による製造ロットの極大化の実現を重視してきた。そのため、中間財工程の製造工期と在庫を検討する一貫最適化のための計画立案、スケジューリング支援への対応は極めて限定的であった。さらに、近年の製品の高度化と仕様の多様化によって、厚板製造では生産管理の複雑性が増大した。通過工程が異なる多品種の製品を組み合わせる大規模生産を行うため、製造開始段階において個別中間財の通過工程を確定することはできず、製造工期の予測、制御は極めて困難であった。

このような環境下でプル型生産管理を実現するためには、製造ロットのサイズが各工程の能率および製造工期に及ぼす影響を包括的に把握できるモデルを構築し、支援システムを活用することにより、製造ロットサイズと全工程に

における製造工期の最適化を動的に実現する必要がある。生産変動・ばらつきが大きい鉄鋼業において、これまで利用可能なMRP、APS等がなかったため、筆者らは、一連のモデルを順次構築し、現場に導入した。

## 5.2 新しい生産管理システム構築の経緯

### (1) 能率モデル

これまで、厚板生産において、メインラインである圧延工程の能率（圧延工程の場合は、時間当たりの処理スラブ量）向上は一貫して最重要の課題であった。これまでは、個別設備の増強がその主たる対策であったが、短周期での設備増強投資は経営上の負担が大きいことから容易ではない。TMCP技術の拡大に伴う圧延の高負荷化、多品種化による能率低下を克服することを目的に、筆者らは、連続、直結、直列に配置された圧延工程全体の能率向上への取り組みを開始した。圧延各工程の能率は、製品仕様に応じて大きく変動する。また、工程間のバッファが小さいため、前後材料の処理の干渉（前後の処理の時間が異なることで生じる無駄な待ち時間）が頻繁に発生し、材料ごとにプロセス中のボトルネック工程が逐次変化する。ボトルネック対策の重要性はTOC理論（Theory of Constraint）<sup>[14]</sup>に明らかだが、圧延工程に対して単純なボトルネック対策を適用することは困難であることから、圧延各工程間の干渉に起因する能率低下を定量的に評価可能とする新たな能率モデルの構築に取り組んだ。能率モデルの構築の背景にはTOC理論が圧延工程のような連続かつ複雑な工程における問題解決にも適用可能であるという仮説があった。

### (2) 製造工期モデル

能率モデルの活用による工程設計の最適化とボトルネック工程への適切な設備増強により、圧延工程の生産能率は飛躍的に向上したが、それに伴い精整工程の能力不足が顕在化し、処理すべき量の変動に由来する仕掛品の増大を招いた。これに対処するため、精整全工程にわたる各工程の能率向上に取り組むとともに、研究開発部隊の協力を得て、離散事象システムをモデル化するシミュレーションツールによる物流シミュレーターを開発し、仕掛品の削減と工期短縮に取り組んだが、十分な成果をあげるには至らなかった。シミュレーターは、日ごとの製造ロットや品種構成、各精整工程の処理能力、稼働率等のパラメーターを所与の条件としており、処理優先順位の微調整を目的としていた点に、本来的な問題があったと考えられる。

筆者らは、先事例であるリーン生産方式の学習を通して、物流シミュレーターの限界も踏まえ、ボトルネック工程への適切な設備投資を実行するとともに、平準化生産が最重要であることをあらためて認識した。そこで、製造ロットの拡大と精整負荷の平準化の両立を図ることを目的に、製

造工期のばらつきと納期達成率の関係、さらには、品種構成、製造ロットサイズと、製造工期、在庫の関係を包括的に記述可能な製造工期モデルの構築に取り組んだ。

### (3) 所要時間 / 仕掛モデル

上記の取り組みによって、これまで予測が困難であった品種ごとの製造工期と、それに対する工程ごとの通過所要時間の関係が明らかになった。しかし、各工程の通過所要時間がどのように決まるのか、またその制御因子は何か、ということは明確には理解されていなかった。一方、厚板の精整工程のように事象発生の頻度および間隔、処理の間隔にばらつきがある場合の待ち時間の解析に関しては待ち行列理論（Queuing System Theory）<sup>[12]</sup>が存在しており、工程ごとの通過所要時間と仕掛量を記述可能なモデルの開発が、待ち行列理論に基づく所要時間 / 仕掛モデルの構築によって可能となった。

## 5.3 能率モデルの構築

厚板生産は、上流の圧延工程と下流の精整工程に大別されることはすでに述べた。圧延工程は、加熱、圧延、冷却等により構成され、各工程は、連続、直結、直列に配置されている。一方、精整工程は、熱処理、超音波探傷、塗装、ガス、矯正、手入等により構成され、各工程は、独立、並列に配置されている。

厚板の圧延工程のように多品種が混流することによって各工程の能率が大きく変動し、なおかつ工程が連続、直結、直列配置される場合、材料ごとのプロセス条件に応じて各工程の能率が変動してボトルネック工程が逐次変化する。それに伴い、前後材料の処理の干渉が頻繁に発生し、工程全体としての能率が大きく変動する。一方、工程が独立配置の場合、工程間に十分なバッファとしての仕掛をもつことが可能なため、工程間の処理が干渉することはまれで、各工程の能率は材料ごとのプロセス条件によりおおよそ一意に決定される。

筆者らは、TMCP・加速冷却技術の適用拡大による高負荷化、多品種化を克服し、圧延能率の向上を図るためには、材料の多品種化に伴うプロセス条件の多様化と処理ロットサイズの低下に起因する圧延各工程間の干渉の低減が、最重要の課題であると考えた。そこで、材料仕様に応じたプロセス条件および処理ロットサイズから各工程の能率を定めるとともに、ボトルネック工程を特定し、工程間の干渉に起因する能率の低下を定量的に評価可能とする能率モデルの構築を試みた。

圧延各工程には、能率に影響を与える異なる因子が存在する。例えば、加熱工程では、加熱開始温度、加熱条件等、粗圧延工程では、加熱抽出温度、圧延サイズ等、仕上げ圧延工程では、TMCP温度、圧延スラブ重量等があげられ

る。筆者らは、各工程の能率影響因子を適正に抽出し、これらの影響因子が有意な差異をもつ製品群に分類し、製品群ごとに能率を統計的に算出するとともに、製品群ごとに各工程の能率を比較することにより、直列、直結のサブ工程中のボトルネック工程を特定して、製品群ごとの固有の圧延工程全体能率を決定する圧延能率モデルを構築した。製品群サイズを適正に調整すると、圧延工程全体では一貫能率の実績値と製品群の固有の一貫能率の誤差が相殺され、生産順列に起因する変動にかかわらず、圧延能率を高精度に予測することが可能となる<sup>注1)</sup>。また、この圧延能率モデルによって、品種ごとに下流工程で発生する工程の発生率を推定することができる。

能率モデルは、各工程の能率および負荷を決定することを目的としているが、上記に示したようなこのモデルの適用により、圧延工程における大幅な圧延能率の向上を達成した。

#### 5.4 製造工期モデルの構築

筆者らは、圧延工程の大幅な能率向上を達成したが、この結果、プッシュ型の構造がさらに強化され、ロットサイズ拡大に起因する精整工程の所要変動（処理すべき量の変動）が増大した。すなわち、上流工程である製鋼から圧延のロットサイズ拡大と下流工程である精整負荷の平準化を両立させる最適化の必要性が顕在化した。

中間仕掛製品総量は、日当たりの平均生産量と製造工期（日数）の積におよそ等しく、適正な製品在庫量は製造工期のばらつきと、狙いとする納期達成率から定まる。しかし、これまでは、両者の影響因子と連関を定量的に把握し、精密かつ最適に制御する生産スケジューリングがなされているとは言い難かった。したがって、製造工期を短縮し在庫削減を実現するためには、製造工期のばらつきと納期達成率の連関を明らかにするとともに、注文品種構成や製造ロットサイズが、各工程および一貫での製造工期や在庫に及ぼす影響を包括的かつ定量的に記述可能なモデルを構築する必要がある。

製造工期は、短ければ短いほど良い変数であり、負にはならない値であるが、日数の平均と標準偏差にはある程度の線形関係がみられる。この事象を表す最も単純なモデルはばらつきの大きさが瞬時値に比例するというものであるが、この場合、ばらつきの分布は対数正規分布となるので、製造工期分布を対数正規分布にて近似することとした（図4）。製造工期分布が対数正規分布に従うとすると、目標とする納期を達成するのに必要とされる日数を簡便に算出可能となり、製造工期モデルの構築あるいは評価を行う上で極めて有用である。対数正規分布は次式のように表される。ここで $\mu$ は $x$ の対数平均、 $\sigma$ は $x$ の対数標準偏差である。

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

納期に対する製造完了の余裕日数の実績値はおよそ正規的に分布しており、その平均値および標準偏差が定めれば、納期達成率、すなわち、納期余裕日数（製造完了～納期）が0日以上となる確率は、次式に示す累積確率分布関数を用いて簡易に算出される。

納期達成率:

$$p(x > 0; \mu, \sigma) = 1 - \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dt$$

ここで、 $x$ : 納期余裕日数  $\mu$ : 納期余裕日数平均値  
 $\sigma$ : 納期余裕日数標準偏差

次に、納期余裕日数のばらつきの要因について検討した。注文により納期が設定され、輸送機関や品種ごとの仕様に基づき圧延開始タイミングが決まる。このとき、注文された多様な製品をまとめてロットとして出荷するために、納期余裕と個別の製造工期は独立的になる。また、圧延開始タイミングはさらに上流である製鋼工程の変動の影響を受ける。納期余裕日数のばらつきに対しては、圧延開始のタイミング（圧延開始納期余裕日数：圧延開始～納期）のばらつきと製造工期（圧延開始～製造完了）のばらつきが影響する。構成する事象が独立に発生する場合、各独立事象の

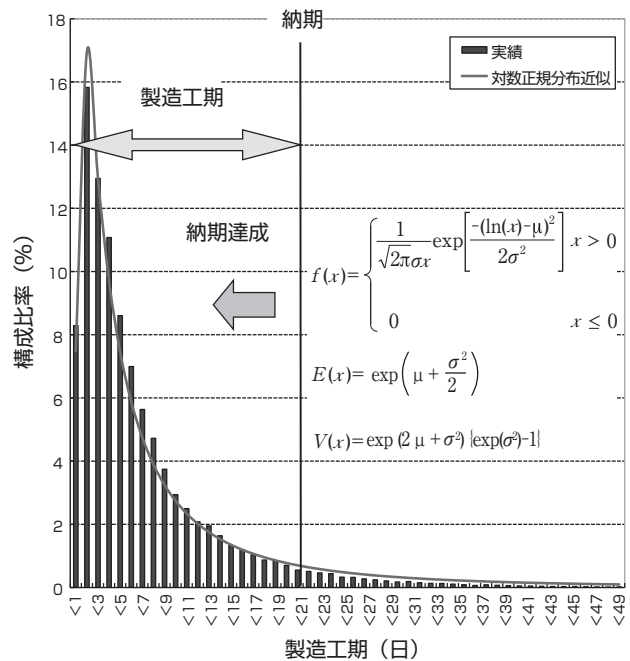


図4 製造工期分布

分散の和は全体の分散の和に等しくなる。すなわち、それぞれのばらつきが独立に決まるものとする、納期余裕日数の標準偏差は下式にて推定される。

$$\sigma_{\text{納期余裕日数}} = (\sigma_{\text{圧延開始納期余裕}}^2 + \sigma_{\text{製造工期}}^2)^{1/2}$$

ここで、 $\sigma_{\text{納期余裕日数}}$ ：納期余裕日数（製造完了～納期）

の標準偏差

$\sigma_{\text{圧延開始納期余裕}}$ ：圧延開始納期余裕日数（圧延開始～納期）の標準偏差

$\sigma_{\text{製造工期}}$ ：製造工期（圧延開始～製造完了）の標準偏差

納期余裕日数の予測値は実績値とよく一致しており、それぞれが独立事象と仮定することの妥当性が確認された。上式により納期余裕日数の標準偏差に対する各項の寄与を算出したところ、納期余裕日数の標準偏差に対する圧延開始納期余裕日数、製造工期のばらつき寄与は、それぞれ約70%、30%であり、前者の寄与が支配的であることが確認された。したがって、納期余裕日数の標準偏差の低減のためには、納期に対する圧延開始タイミングの標準偏差を減少させることが重要である。これは、在庫量低減のためには、圧延／製鋼製造のロットサイズの制御が不可欠であることを意味する<sup>注2)</sup>。

### 5.5 製造工期～工程毎工期の寄与に関する分析

次に、製造工期のばらつきに及ぼす厚板各工程の寄与について検討した。精整各工程の通過所要時間がそれぞれ独立に決まるとすると、全体製造工期の分散は、各工程通過所要時間の分散の和として、下式のように表現される。厚板工程全体製造工期の標準偏差と、精整各工程の通過所要時間がそれぞれ独立に定まるものとして次式にて算出した圧延+剪断+精整工期の標準偏差はおよそ一致しており、各工程の通過所要時間が独立であるとの仮定が妥当であることが確認された。したがって、当式を用いれば、各工程の所要と能力の変動が厚板製造全体の製造工期に及ぼす影響を簡易に推定可能となる。

$$\sigma_{\text{圧延+剪断+精整}} = (\sigma_{\text{圧延+剪断}}^2 + \sum \sigma_{\text{精整各工程}}^2)^{1/2}$$

ただし $\sigma_{\text{圧延+剪断+精整}}$ ：圧延+剪断+精整工期の標準偏差

$\sigma_{\text{圧延+剪断}}$ ：圧延+剪断工期の標準偏差

$\sigma_{\text{精整各工程}}$ ：精整各工程（手入、冷間矯正、油圧プレス矯正、ガス、塗装、超音波探傷、電溶、マーキング、ショット、焼準、焼入、焼戻）の通過所要時間標準偏差

上記の評価の結果、圧延+剪断工程の全工程の製造工期に対する寄与は20%に過ぎず、製造工期短縮に対する圧延能率の向上効果は限定されることがわかった。一方、

精整工程の工期については、大部分は作業待ち時間であり、必要作業時間の寄与はたかだか5%に留まる。すなわち、納期に対する圧延開始タイミングのばらつきを低減し、適正なロットサイズに制御するとともに、各工程の所要時間と仕掛量を最小化する操業を実現するならば、製造工期が大幅に短縮される可能性が高いと考えられた。

品種ごとの通過工程数および製造工期を図5に示す。品種により、通過工程数および製造工期は大きく異なること、製造工期は通過工程数におよそ依存していることが分かる。したがって、各工程の負荷平準化のためには、品種ごとの投入量の平準化が必要であり、さらには投入量の跛行性を予防する観点から、ロットサイズの制御が重要であることが理解される。

筆者らは、通過パターンごとに製造工期分布を求め、それらを製造品種ごとの通過パターンの構成比率で按分することで、製造品種ごとの製造工期分布を求める方式を採用した<sup>注3)</sup>。製造工期を本製造工期モデルにて予測した結果、予測値は実績とよく一致しており、本モデルの妥当性が確認された。したがって、通過工程と各工程での所要時間が分かれば、製造工期が予測できることになる。

### 5.6 所要時間/仕掛モデルの構築

工程が独立配置の場合、工程間に十分な仕掛をもつことが可能な場合は、各工程の能率が他工程の影響を受けることは少ない。一方、十分な仕掛がない場合には、他工程の処理待ちの発生や段取り替え時間が増加する等の能率が低下する「リスク」がある。そのため、置場能力が許す範囲内にある限りは仕掛を低減しようとする動機が働かず、精整工程のボトルネック工程への設備増強後も仕掛の最小化はなかなか進展しなかった。精整工程の工期は、前述のように必要作業時間の寄与はたかだか5%であり、大部分が作業待ち時間であることから、各工程の所要時間と仕掛量を最小化する操業が製造工期の短縮へ向けての課題であった。

厚板の精整工程のように、発生の頻度および間隔、処理の間隔にばらつきがある場合の待ち時間の解析には待ち行列理論の適用が有効であることが知られている。そこで筆者らは、工程ごとの通過所要時間を記述可能なモデルを構築することを目的として、待ち行列理論を厚板製造へ適用し、各工程の製品の通過所要時間と仕掛量の予測モデル（所要時間/仕掛モデル）を構築するとともに、その妥当性（各工程仕掛量と通過所要時間の精度良い予測が可能）を検証した。

時間ごとの発生頻度と処理頻度が一般分布で変動するとともに、設備故障等に起因する休止の頻度および時間が変動する場合、ある工程の所要時間および仕掛は待ち行

列理論を用いて下式のように導出される<sup>[22]</sup>。

$$W = \frac{1}{1 - \rho_X(1 + \rho_Y)} \left[ \frac{1}{2} \rho_X (1 + \rho_Y)^2 (1 + C_{SX}^2) E_X + \frac{1}{2} \frac{\rho_Y}{1 + \rho_Y} (1 + C_{SY}^2) E_Y \right]$$

$$= \frac{1}{1 - \rho_B} \left[ \frac{1}{2} \rho_X (1 + \rho_Y)^2 (1 + C_{SX}^2) E_X + \frac{1}{2} \frac{\rho_Y}{1 + \rho_Y} (1 + C_{SY}^2) E_Y \right]$$

$$N = \lambda W$$

ただし、待ち時間 $W$ および仕掛 $N$ が安定的に定まるための必要条件は

$$\rho_B = \rho_X(1 + \rho_Y) < 1$$

$$\rho_Y = 1 - \rho_L \rho_X$$

である。

ここで、 $W$ :平均待ち時間、 $N$ :平均仕掛数、 $E_X$ :平均処理時間、 $E_Y$ :平均休止時間、 $C_{SX}$ :処理時間の標準偏差と平均の比、 $C_{SY}$ :休止時間の標準偏差と平均の比、 $\rho_B$ :総合利用率、 $\rho_X$ :利用率、 $\rho_Y$ :休止率、 $1 - \rho_Y$ :稼働率、 $\lambda$ :平均発生率、 $\mu$ :平均処理率、 $\delta$ :休止発生率、 $\gamma$ :休止終了率、 $\rho_L$ :前工程稼働率、 $\rho_0$ :作業率、 $\mu_0$ :上限処理率

この所要時間 / 仕掛モデルを厚板精整工程へ適用し、所要時間および仕掛を予測した結果、発生、処理、休止の頻度にばらつきがある場合においても、所要時間、仕掛量とも実績とよく一致しており、待ち行列理論を適用した本モデルの妥当性が確認された。

## 6 製造知識の体系化に向けて

### 6.1 生産管理に関するマルチスケール階層モデルの提案

前章では、生産管理において個別課題の解決のためにどのように支援システムが構築されたかについて、君津製鉄所厚板工場の事例を時系列的に示した。この章においては、実現された生産管理システムをどのような視点から概念的にモデル化すれば、プロセス産業における一貫最適化に対する理解を深化することができるか考察する。筆者らが経験した個別の技術課題に対する一連の問題解決活動から得られた知見を構成化（シンセシス）し、以下に概念モデルを提案する。

この論文が先行例とするリーン生産方式では、これまで

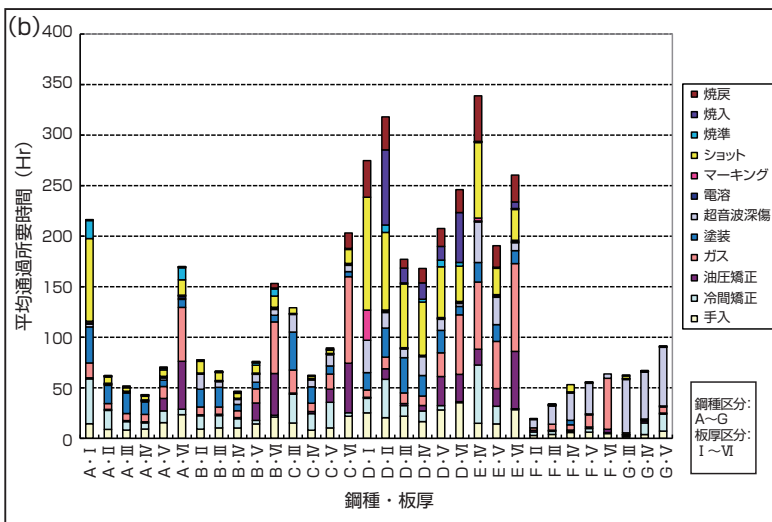
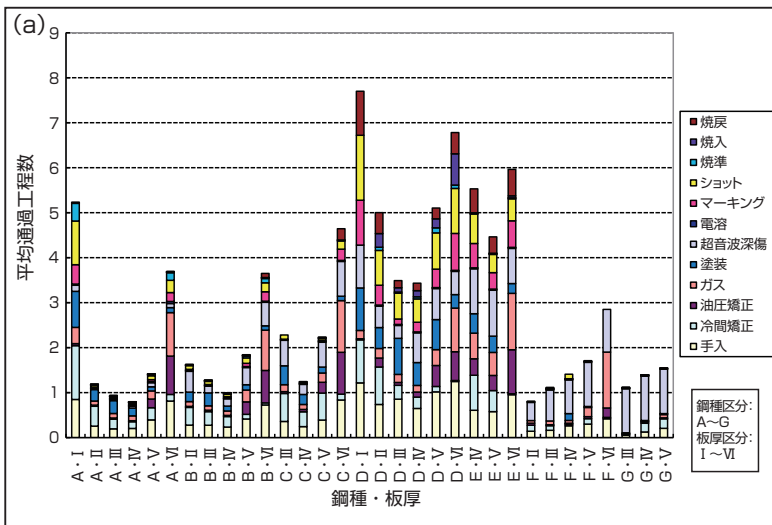


図5 品種ごと平均通過工程数と平均通過所要時間  
(a) 品種ごと平均通過工程数  
(b) 品種ごと平均通過所要時間

の生産管理における常識であった、秒単位の製造ライン・月単位の生産計画・長大な製造工期・在庫という時間的プロセス構造が、在庫の流れを製造ラインの流れと同期化（ジャスト・イン・タイム）することによって、生産管理における時間スケールはメインラインのそれに同期化される。一方、厚板製造に関する生産管理の時間プロセス構造に注目すると、それはプロセッシング（秒単位）、ロット計画（時単位）、日計画（日単位）、週計画（週単位）、月次計画（月単位）という時間的なマルチスケール階層構造として成立しており、現場の操業とスタッフによる生産管理はこのような階層構造を与件として行われてきた。これまで、月次計画において想定される品種構成に基づき、各工程の能力を表計算にて算定するマクロ能力モデルが存在したが、筆者らは、厚板製造の一貫最適化を実現する過程において、能率モデル、所要時間/仕掛モデル、製造工期モデル、という3モデルを構築した。これらのモデルは、厚板製造における時間的なマルチスケール階層構造に対応している。すなわち、能率モデルは秒（プロセッシング）～時（ロット）計画～日計画に、所要時間/仕掛モデルは、時（ロット）計画～日計画～週計画に、製造工期モデルは、日計画～週計画～月次計画に関するものであり、3モデルはそれぞれ相互に関連する。能率モデルによって、能率や処理負荷が分かるだけでなく、プロセスパラメータやロット計画等の変数から、品種ごとに下流工程で発生する工程の発生率（品種毎工程発生率）が得られる。この処理負荷および品種毎工程発生率を日/週計画とともに所要時間/仕掛モデルに入れることで、工程の所要時間と仕掛量が求められる。日/週計画および月次計画で決められた品種に対して、能率モデルから得られる品種毎工程発生率と所要時間/仕掛モデルから得られる所要時間を製造工期モデルに入力することで製造工期が求められる（図6）。

前章に示したように、現場での試行錯誤は、複雑な工程と製品仕様を有する厚板製造に対して、異なる時間スケール（階層）をまたがり、要求される計画精度と生産/注文の変動への対応力を両立する生産管理システムを成立させるに至った。筆者らは、同システムを時間に関するマルチスケール階層構造の視点から把握し、生産管理に関するマルチスケール階層モデルとして概念化することを提案する。

複雑な組織構造を有する鉄鋼材料に関する材料研究の分野において、Olson は、空間的なマルチスケール階層モデルを提案し、階層ごとに独立に構築した物理モデルの有機的な結合により、サブナノスケールの電子レベルの量子力学的現象、ナノスケールの転位を含む原子配列構造、ミクロンスケールの変態現象、ミリ～メートルレベルの実用鋼の組織と特性を包括的に記述可能であることを示した<sup>[23]</sup>。

筆者らは、この空間的なマルチスケール階層モデルを、時間的なマルチスケール構造の記述に適用する。すなわち、生産管理の時間スケールを3階層に分割し、それぞれの階層ごとに能率モデル、所要時間/仕掛モデル、製造工期モデルを対応させるとともに、これらを有機的に連結する一貫生産管理に関する時間的なマルチスケール階層モデルを提案する（図6）。本モデルは、厚板製造における時間に関するマルチスケール性を明らかにし、ミクロ（個別工程におけるプロセッシング）からマクロ（製造工期の管理）に至る意思決定に関する定量的な評価と最適点の探索を可能とする一貫モデルである。本モデルにより、プッシュ型の生産管理手法による上流工程におけるプロセス条件の最適化と、出荷を基軸としたプル型の生産管理を志向する下流工程における製造工期の短縮という両立が難しい要請を、バランスよく調整するための最適スケジュールの探索が可能となった。

生産管理モデルの難しさは時間スケールの階層性にあるが、階層構造を有する複雑な物理現象を記述することは、鉄冶金学の研究開発における最も基本的な研究テーマである。筆者の一人（水谷）は、米国における博士研究において、物理現象を発現させるメカニズムをモデル化する際に構造を階層ごとに分割することによる単純化が有効であることを学習し、身に付けていた。さらに、当該技術者は、理論を理論として机上で学習することに加え、知識の活用を製造の現場に移した。そこで、先行事例としてのリーン生産方式に関する知見と技術者が体得していた研究の進め方のノウハウを現場の活動を通じて融合することにより、複雑現象を階層構造として分析することを可能にしたと考えられる。

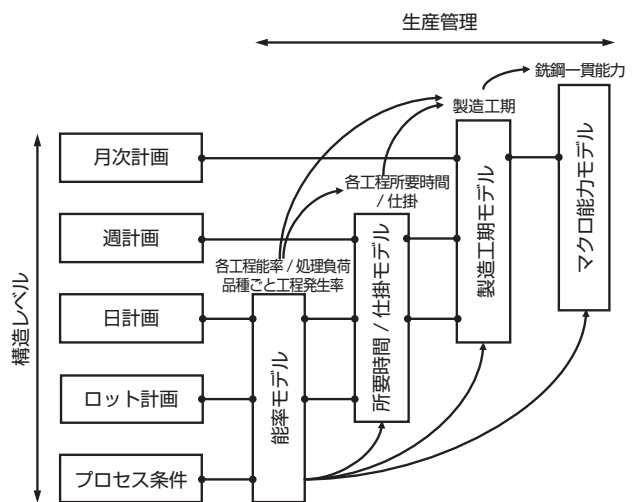


図6 生産管理マルチスケール階層モデル

## 6.2 マルチスケール階層モデルの意義

鉄鋼製造の生産管理のルーチンは、業務効率性の観点から各タスク階層に分断されており、各ルーチンに関する熟練を形成しても、製造における生産管理システムの全体像をとらえることは極めて難しい。マルチスケール階層モデルの最大の意義は、システムの全体像を俯瞰的に提示することによって、生産管理を通じた工場単位の一貫最適化という経営課題を技術的に詳細に検討できるフレームワークを提供することにある。そもそも、製造システムの設計と再設計による継続的改善を使命とする技術者にとって、生産管理システムの全体像の俯瞰的な把握は業務推進のための大前提であり、提案モデルの果たす役割は大きい。

しかし、今回提案のモデルは全体最適を実現する最適化評価関数を有するものではなく、理論的、定量的に全体最適を保証するものではない。最適化の探索には種々のモデルが不可欠だが、自動車に代表される組み立て産業と比較すると、鉄鋼業では特に上流工程である製銑、製鋼工程における日々の生産操業変動が極めて大きく、計画の変更も頻繁に発生する。このような状況の中で、モデルは外乱を含む実績に基づき構築されることから高精度な予測は困難であり、その信頼性にはおのずと限界がある。完全情報を前提として最適解を探る決定論的アプローチは明らかに適しておらず、トップダウンの分析によって得られるモデルをシステムに組み込んで膨大な計算を精緻に行うことは、時間的にも、また有効性の観点からも現実的ではない。

対照的に、提案モデルの構築の経緯を振り返ると、この研究が対象とした生産管理システムにおいては、(i) システムを構成する個別要素は局所的に組織化され、システムに要求された機能を実現する構造は、試行錯誤（仮説形成と検証）を通じて、順次、決定され、(ii) 導出された適応解は（最適解ではないとしても）、これまでの方法では解けない複雑な問題に対して予想を超えた解答を与え、動的環境で活動する製造現場の意思決定を実効的に支援していることが判る。筆者らの観察は、提案モデルを構築するプロセスが創発的プロセスであったことを強く示唆するものである<sup>[24]</sup>。

それでは、本事例でみられた創発現象はどのように誘発されたと考えるべきなのであろう。組織の戦略展開を創発的プロセスとして理解する経営学者は、企業活動に適切な「場」（環境）を設定することによって、組織を構成する個人間での創発現象を誘発することが促進可能であると主張する<sup>[25]-[27]</sup>。筆者らは、4章で示したように、本事例においては、本社レベルでの経営革新、また、工場レベルでのミドルマネジメントのリーダーシップのもと、現場で創発現象を誘発するための基本的環境設定が行われたと

考える<sup>[26]-[27]</sup>。さらに、生産管理システムがどうして可能になったかという観点からは、当該企業において、ボトムアップ型シンセシスを担える中核的人材が組織的に育成され、そのような人材が現場における創発活動を推進する役割を果たした事実が重要である。

提案モデルの構築に貢献した技術者が所属する「技術グループ」の役割を紹介すれば、同グループは製造現場とスタッフ部門をつなぐ中継点に位置し、工場運営に関し単に製造技術に限定されない広範な調整機能を持ち、生産システムの運用と革新に中核的役割を果たす<sup>[註4]</sup>。技術系スタッフは、入社時に、「技術グループ」に配属されることが一般的であり、新入社員時には3交代勤務の現場経験を積む。その後、技術系スタッフはさまざまなキャリアを経験するが、工場長他、製鉄所の幹部の候補となる優秀な人材が「技術グループ」に定着する傾向がある。このようなキャリア・パスは、企業が、「技術グループ」のスタッフに対して、幅広いOJTを経験させることによって調整や問題解決手段についての知識を身体化させ（ブルデューのハビトゥス<sup>[用語5]</sup>にあたる<sup>[28]</sup>）、創発的プロセスにおける主要なイネプラー<sup>[29]</sup>（創発活動において他者に目的の実現を可能にする人材）として育成することを志向してきたことを示唆する。

システムインテグレーターとしての技術者には、設備・操業技術の高度化による技術的優位性と経済合理性を両立する使命がある。鉄鋼業に対してリーン生産方式を自動車業レベルで導入するときに発生するコストとリスクは、現場の工場経営に許される許容範囲を大きく超えると想定される。生産プロセスの一貫最適化は、工場経営における全体最適化の視点から評価する必要があり、提案モデルは、現場のマネジメントが技術と経営からの相反する要請をどのようにバランスするか、具体的に検討するための定量的指針を提供する。例えば、リーン生産方式の推進のために必要になるボトルネック工程の解消のために、どの程度の設備投資が最適なのかを検討する際、これまでは、精整工程の設備増強による一貫能率向上が定量的に評価できなかったために、精整工程に対する適切な投資判断が難しかった。提案モデルは、一貫最適化の効果と必要性を、厚板工場内はもとより、君津製鉄所の経営層や営業部門に対して効果的に提示する可能性を開いた。また、現場の操業改善やスタッフによる生産管理業務の改善を目的とした材料設計や出鋼スケジュールの最適化およびサプライチェーンマネジメント基盤整備等の生産管理システムを順次開発したが、その過程においてマルチスケールモデルを用いた定量的な解析は大きな効果を発揮した。

このようにこの研究が提案するマルチスケールモデルの形成の経緯には、以下のような二面性がある。まず、モデ

ルをその形成プロセスから観察すれば、同モデルの構造が開発を担当した技術者の有する研究の進め方のノウハウ、具体的には、複雑な現象に対する階層構造アプローチによって主導されたという側面が認められる。他方、筆者らは、紹介してきた一連のモデルが整備され一つの生産管理システムとして出現したとき、同システムを広く産業社会に普及することの価値を認めるに至った。そして、同システムの形式化を進めるにあたって、それを相互作用のあるマルチスケールモデルとして体系化することから得られる利点を再認識したのである。

## 7 まとめと展望

製造業の本質が「情報を材料に転写する」ことにあるならば、材料のフローを創り出すとともに、情報のフローを同期させるリーン生産方式は、製造業の本質を追究した「目指すべき姿」の一つである<sup>[30]</sup>。フォードに始まる大量生産方式による規模経済性の追求は、秒単位の製造ラインと、月単位の生産計画、長大な工期・在庫という生産管理の時間的マルチスケール階層を生み出したが、リーン生産方式を主導した大野は脱規模を旗印に製造ロットサイズの制御と製造のラインへの同期の追求によりこれを克服した<sup>[4]</sup>。リーン生産方式を時間マルチスケールのフレームでとらえると、製造の時間スケールをメインラインのそれに一本化したものと理解できる。一方、プロセス産業である鉄鋼では、製造ロットサイズが生産性および品質に及ぼす影響が組み立て産業である自動車と比較してより大きいことから、自動車と同水準の製造の同期性や時間スケールの圧縮を実現することは本質的に困難である。しかし、この論文の事例は、鉄鋼以外の他産業においても、生産システム全体を時間的なマルチスケール階層構造として把握し、支援システムによって各階層を適切に連結することによって一貫最適化が実現される可能性を示している。

多くの産業において、製造に要する時間の短縮は、多岐にわたる付加価値製品を開発し、これを競争力ある製品として製造するために不可欠の要素である。例えば、鉄鋼業とは一見対極にあるように思われる医薬分野においても、製品の競争力が価格とスピードで決まる時代が始まっている。これまで、医薬品の分野においては、特許によって差別化された製品を有することが競争力を決定付けていた。しかし、ジェネリック医薬品の普及に伴い、多品種にわたる薬をいかに価格競争力ある製品として製造できるかが重要な経営課題となりつつある。例えば、錠剤は、混合～造粒～篩過～混合～打錠～コーティングといった一連の設備、製造プロセスを用いて多種多様な製品に造り分けられるが<sup>[31]</sup>、このプロセスは鉄鋼製造プロセスと同様にコンピュー

ターによって精緻に管理されている。すなわち、工程構造的にも、多様な品種への対応が必要とされる点でも、鉄鋼業と類似の課題を有しており、この論文で提案するモデル化によるアプローチは医薬分野を含む多くのプロセス産業に今後横展開される可能性があるものと考えられる。

日本の製造業では、一連の技術スタッフが現場において着実に製造技術と生産管理の革新にあたってきた。その過程で生まれた製造知識は、本来、教科書化され実学としての工学は学問として体系化を進めることが期待されていた<sup>[32]</sup>。もとより、製造の現場における一貫最適化を実現するためには、ミクロからマクロに至る各階層における現象を理解し、モデル化を進め、構築したフレームワークにおいて他業種・他企業におけるベストプラクティスと比較・対照する必要がある。この論文が提案する生産管理に関するマルチスケール階層モデルは、キャリアを通じて幅広く深いOJTを経験した現場エンジニアの生きた知識をモデル化したものであり、この論文は、産業界からの製造知識の体系化の必要性を強く示唆する。

## 謝辞

この研究は科学研究費補助金 基盤研究 (B) 17330082 の支援を受けて実施された。

この研究に関し、学術的視点から助言をいただいた、清家彰敏、藤本隆宏、新宅純二郎、桑嶋健一各氏に感謝する。また一貫最適化を推進するにあたり、ご指導ご支援をいただいた三村明夫、宗岡正二、王寺陸満、萬谷興亜、市瀬圭次各氏に感謝する。

**注1)** 実際の生産においては、複数種の製品群を組み合わせ製造するため、ネック工程が逐次変化し、当該製品群の固有のネック工程とは異なる状況が頻繁に発生する。そのため、実際の生産で観測される圧延工程の能率の実績値は、同一製品群を連続して製造する場合の固有の一貫能率とは異なり、期間ごとに変動する生産順列の組み合わせの影響を受け、実績を集計した期間ごとに変動する。この能率モデルでは、実際の圧延工程全体の能率が固有の一貫能率を中央値として分布するように、各工程の処理能率影響因子を適正に抽出し製品群を定義するとともに、圧延工程プロセス全体では生産順列にかかわらず一貫能率の実績値と製品群の固有の一貫能率の誤差が相殺されるように製品群サイズを適正に調整することにより、上記の問題を回避し、圧延工程の全体能率をこれまでのモデルと比較してより高精度に予測することに成功した。

**注2)** 鉄鋼厚板の生産は多様な製品注文（注文当たり同一仕様の製品は約3 t）を、ロットで製造して（同一の製鋼製造条件：最低300 t、生産性を考慮すると2,000 t超が望ましい）、ロットで出荷する（同一の需要家、納期、輸送機関ごとに）点に特徴がある。納期は同一の出荷ロットに対して設定されるが、需要家のニーズにより、多様な製品注文が同一の出荷ロットに含まれるため、製造ロットは出荷ロットとは一致しないことが一般的である。そのため、圧延開始のタイミングは、納期から想定される製造工期をさかのぼって決定はされるものの、製造ロットをまとめるためのばらつきを不可避的にもつ。



**注3** 精整工程の通過工程数と製造工期に相関があることを活用し、①製造仕様から精整工程の通過パターン（通過有無を表す01の並び）を予測した後、②この通過パターンに大きくり品種を表す分類コードを付加した文字列（製造品種）を一つのグループとし、この製造品種ごとに工期分布を予測する方式を採用した。分類コードを付加した理由は、同じ通過パターンでも発生工程の通過頻度（発生率）が異なることで、工期分布が異なるケースがあること、通過パターンと通過頻度が同じであっても、品種によっては納期達成率の設定値が異なるケースがあるためである。

厚板の製造では、手入やガス切断、矯正工程等、注文仕様決定の時点では通過有無が未定であり、圧延後に通過有無が決まる発生工程があるため、注文の製造仕様から単純なロジックで精整工程の通過パターンを算出することはできない。そこで、データマイニングの汎用的手法である決定木 (Decision Tree) を用いて、通過パターン予測モデルを構築した。

製造品種ごとの工期分布を求める際には、実績データから同じ製造品種のプレートを集めて、それらの実績工期のヒストグラムを工期分布とする方法が単純である。しかし、稀にしか製造されない製造品種も存在し、このようなデータ母数の少ない製造品種の工期分布は、信頼性が低くなる問題がある。そこで、筆者らは、通過パターンごとに工期分布を求め、それらを製造品種ごとの通過パターンの構成比率で按分することで、製造品種ごとの工期分布を求める方式を採用した。

**注4** さらに、製鉄所トップマネジメントへの情報発信（ライン代弁者としての、あるいは技術責任部門としての説明責任）、ライン経営に関連した短期的課題にかかわる関係スタッフ部門（生産技術、生産業務、総務、人事、労働、設備）との調整、中長期計画の企画・立案、研究開発部門との研究開発戦略の策定、本社関連スタッフ部門との調整等々、職務が必ずしも明快でない領域も含めて、ライン部門を中心として発生する諸問題に対する総合調整的な役割を担う。

## 用語説明

用語1：製造工期：鉄鋼用語。リードタイムと同義。製造に要する時間をいう。その定義は受注～納品、製造着手～製造完了等、さまざまであるが、この論文では、厚板圧延開始～製造完了までに要する時間をいう。

用語2：製鉄所の製造プロセス：鉄鉱石から一貫して鉄鋼製品を製造する製鉄所を銑鋼一貫製鉄所と呼び、その工程は、高炉で鉄鉱石を還元して銑鉄を製造する製鉄工程、転炉で銑鉄から炭素分を除去し必要な合金元素を付与して鋼を製造する製鋼工程、製鋼工程で製造された半製品を圧延してさまざまな製品を造り分ける圧延工程の3つに大別される。厚板は圧延工程の一つであり、厚板製品を圧延、製造する。

用語3：圧延能率：能率は、一定時間内にできる仕事の割合を示す。圧延工程は、加熱、圧延、冷却等の工程が連続、直列、直結されているため、これらの設備群を連続処理する能率を圧延能率と呼ぶ。

用語4：矯正工程：厚板の圧延工程で生じた形状 (flatness) の不良をローラー矯正機やプレスで形状修正する工程。

用語5：ハビトゥス：ハビトゥスに類似する概念として暗黙知 [Polanyi, M.: *The Tacit Dimension*, Doubleday Anchor, N.Y. (1967)] がある。ハビトゥスは科学活動における暗黙知とみなすことができ、研究をどのように進めるかに関する広義のノウハウである。

## 参考文献

- [1] J. P. ウォーマック and D. T. ジョーンズ: *リーン・シンキング*, 日経BP社, 東京 (2008).
- [2] 圓川隆夫, 黒田充, 福田好朗: *生産管理の事典*, 朝倉書店, 東京 (1999).
- [3] 吉江淳彦: 厚板・2, *Nippon Steel Monthly*, 6 (169), 7-10 (2007).
- [4] 大野耐一: *トヨタ生産方式*, ダイアモンド社, 東京 (1978).
- [5] J.P. Womack, D.T. Jones and D. Roos: *The machine that changed the world*, Donna Sammons Carpenter, NewYork (1990).
- [6] 清家彰敏: *日本型組織間関係のマネジメント*, 白桃書房, 東京 (1995).
- [7] 下川浩一: フォード・システムからジャスト・イン・タイム生産システムへ, *企業経営の歴史的研究*, 中川敬一郎編, 岩波書店, 東京 (1990).
- [8] 門田安弘: *新トヨタシステム*, 講談社, 東京 (1991).
- [9] 坂爪裕: セル生産方式と分業の新展開, 導入企業8社の事例研究, *日本経営学会誌*, 16, 95-110 (2006).
- [10] 新日鉄: 「しんにつてつ」(*新日本製鐵社内報*), 81, 2-5 (1994).
- [11] 新日鉄: 「しんにつてつ」(*新日本製鐵社内報*), 117, 6-9 (1997).
- [12] 藤本隆宏: *生産マネジメント入門I: 生産システム編*, 日本経済新聞社, 東京 (2001).
- [13] 夏目大介: *鉄鋼業における生産管理の展開*, 同文館出版, 東京 (2005).
- [14] S.J. Balderstone and V.J. Mabin: A review of goldratt's theory of constraints (TOC) - lessons from the international literature, *Operations Research Society of New Zealand 33rd Annual Conference*, University of Auckland, New Zealand (1998).
- [15] J. Ashayeri, R.J.M. Heuts, H.G.L. Lansdaal and L.W.G. Srijbosch: Cyclic production-inventory planning and control in the pre-Deco industry: A case study, *International Journal of Production Economics*, 103 (2), 715-725 (2006).
- [16] M. Gupta and A. Kohli: Enterprise resource planning systems and its implications for operations function, *Technovation*, 26 (5-6), 687-696 (2006).
- [17] K.J. Watson, J.H. Blackstone and S.C. Gardiner: The evolution of a management philosophy: The theory of constraints, *Journal of Operations Management*, 25 (2), 387-402 (2007).
- [18] Z. Li and M. Ierapetritou: Process scheduling under uncertainty: Review and challenges, *Computers and Chemical Engineering*, 32 (4-5), 715-727 (2008).
- [19] C.T. Maravelias and C. Sung: Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities, *Computers and Chemical Engineering*, 33 (12), 1919-1930 (2009).
- [20] J.M. Framinan and R. Ruiz: Architecture of manufacturing scheduling systems: Literature review and an integrated proposal, *European Journal of Operational Research*, 205 (2), 237-246 (2010).
- [21] Y.-W. Chen, Y.-Z. Lu, M. Ge, G.-K. Yang and C.-C. Pan: Development of hybrid evolutionary algorithms for production scheduling of hot strip mill, *Computers and Operations Research*, 39 (2), 339-349 (2012).
- [22] T. Altiok: Performance analysis of manufacturing systems, *Springer Series in Operations Research*, ed. P. Glynn, Springer (1996).
- [23] G.B. Olson: Transformation plasticity and toughening, *Journal de Phys. IV, Colloque C1*, 407-418 (1996).
- [24] 上田完次: *創発とマルチエージェントシステム*, 培風館, 東京 (2007).
- [25] 野中郁次郎, 竹内弘高: *知識創造企業*, 東洋経済新報社, 東京 (1996).
- [26] D.J. Teece: *Dynamic Capabilities and Strategic Management*, Oxford University Press, Oxford (2009).

- [27] C.E. Helfat, S. Finkelstein, W. Mitchell, M. Peteraf, H. Singh, D. Teece and S.G. Winter: *Dynamic capabilities, Understanding Strategic Change in Organization*, Blackwell Publishing (2007).
- [28] ピエール・プルデュール: *科学の科学: コレージュ・ド・フランス 最終講義*, 藤原書店, 東京 (2010).
- [29] ゲオルク・フォン・クロー, 一條和生, 野中郁次郎: *ナレッジ・イネープリング*, 東洋経済新報社, 東京 (2001).
- [30] 藤本隆宏: *日本のものづくり哲学*, 日本経済新聞社, 東京 (2004).
- [31] 邊見公雄, 武藤正樹: *ジェネリック医薬品講座*, ぎょうせい, 東京 (2011).
- [32] 吉川弘之: *テクノグローバリズム*, *日本機械学会誌*, 94 (868), 200-204 (1991).

事業部参与。2008年日本鉄鋼協会渡辺義介記念賞受賞。この論文では、2001年に厚板工場長に就任し、工期短縮と生産拡大を実現。

馬場 靖憲 (ばば やすのり)

1977年東京大学経済学部卒業。1986年サセックス大学博士課程修了 Ph.D., SPRU フェロー、科学技術政策研究所主任研究官等を経て、1993年4月より東京大学人工物工学研究センター助教授、1997年同教授。2001年7月以降、同先端科学技術研究センター教授。2007年4月より同大学院工学系研究科先端学際工学専攻。この論文では、知見の構造化、体系化を担当。



### 執筆者略歴

西岡 潔 (にしおか きよし)

1977年大阪大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。1977年新日本製鐵株式会社に入社。厚板の製造、研究、本社技術行政、役員として本社技術開発企画を担当。1997年君津製鐵所厚板工場長(部長)、2001年本社厚板営業部部長、2005年取締役、2006年執行役員、2009年顧問、東京大学先端科学技術センター客員研究員、現在に至る。2005年日本鉄鋼協会技術貢献賞、2007年谷川熱技術振興基金粉生熟技術振興賞受賞。この論文では、1997年に厚板工場長として厚板生産管理の革新に着手、一貫最適化の実現を主導。



水谷 泰 (みずたに やすし)

1991年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。2006年ノースウエスタン大学博士課程修了 Ph.D (Materials Science and Engineering)。1991年新日本製鐵株式会社に入社。技術開発本部君津技術研究部主任研究員、君津製鐵所厚板工場厚板技術グループリーダー、厚板課長等を経て、現厚板工場マネージャー。これまでに、厚板製造における生産性向上、TMCP技術の開発、一貫最適化に従事。この論文では、技術スタッフとして、一貫最適化の企画、実行推進とともに、生産管理マルチスケール階層モデルの構築を主導。



上野 博則 (うえの ひろのり)

1996年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。1996年新日本製鐵株式会社入社。君津製鐵所厚板工場にて主に高効率化やTMCP技術開発等、操業技術改善ならびに設備企画・開発、厚板製造プロセスの抜本的改善に従事。2005年国際鉄鋼協会(World Steel Association)への派遣等を経て、現名古屋製鐵所厚板工場厚板技術グループマネージャー。この論文では、技術スタッフとして現場改革、操業改善に貢献。



川崎 博史 (かわさき ひろふみ)

1980年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。1980年新日本製鐵株式会社入社。君津製鐵所厚板工場配属後技術スタッフとして工場操業技術改善、商品技術開発に従事。本社技術本部厚板技術室掛長、君津製鐵所厚板工場長(部長)等を経て、現本社厚板



### 査読者との議論

#### 議論1 鉄鋼厚板製造プロセスの生産性

コメント(上田 完次:産業技術総合研究所)

プロセス産業の最適一貫生産という重要で困難な問題を取り上げ、実践的な取り組みにより解決課題項目を明らかにしてモデル化を行い、具体的な鉄鋼厚板製造プロセスでの実績の事例をまとめた論文であり、構成学にふさわしい内容と言えます。この研究のシナリオでは、リードタイム最小化と生産性向上の両立の困難さの認識を根拠にしていますが、この論文での生産性向上とは何を意味するかを明確に記述してください。

回答(西岡 潔)

生産性は、時間当たりの生産量、すなわち、「能率」を意味しております。鉄鋼業におけるプロセス改革・改善は、メインラインの能率向上に重点がおかれてきました。しかし、個別の設備あるいは設備群の能率向上は製造工期の最小化には繋がらず、逆にこれを悪化させる原因にもなります。この両者をいかに両立させるかがこの研究の主題とするところです。

#### 議論2 ミドルマネジメント

質問(上田 完次)

この論文の主張の一つとして、経営革新におけるミドルマネジメントの役割の重要性が記述されていますが、ミドル層の意味を明確にできませんでしょうか。

回答(西岡 潔)

この論文におけるミドル層は、現場の工場長クラスを念頭においています。トップマネジメントは、会社全体の組織と制度を変える権限を有するのに対し、ミドルマネジメントは制度と構造の範囲の中で、運用と評価を変える権限を有しています。経営トップの強力なリーダーシップによる全社的な組織、業務構造の改革と、現場経営を担当するミドル層による革新活動が同期化することによって、本来変わりにくい組織活動が一新され、変化する市場環境に対して能動的に対応することが可能となることを、この論文は示唆しています。

#### 議論3 マルチスケール階層モデルが得られた経緯と今後の展開

コメント(上田 完次)

6章は、製造知識の体系化に向けて、あらたなモデルの提案をするという主張です。興味深い内容ですが、どのようにしてこのモデルが得られたかが明確ではありません。また、このモデル提案が、今後どのような産業やプロセスに横展開されるべきか等、展望を述べてください。

回答(西岡 潔)

提案モデルは、演繹的に導出されたものではなく、試行錯誤を経て作成したモデルを帰納的に理解すれば、時間階層に跨るモデル構

造を有しているということが理解されることを示しています。これまでの製造実績に基づく結果系の生産管理に対して、マルチスケール階層モデルは時間的に生じる現象の原因と結果を繋ぐ視点を付加することによって、より適切な時間管理、生産管理が可能になることを示唆しています。リーン生産管理は、プロセッシングというラインの運動性の中で一貫最適化の極限を追求できるという画期的な生産管理を生み出しました。一方、既存設備の更新やレイアウトの変更が困難な設備産業およびプロセス産業においては、プロセッシングという時間範囲の最適化のみで、全体としての一貫最適化を実現するのは困難です。すなわち、多くの産業において、ものづくりの時間構造がマイクロからマクロに亘る中での一貫最適化を図るためには、時間階層を越えた現象の理解、すなわち原因-結果系に関わるモデル化が必要であると考えられます。その階層区分は、今回の事例においては3階層ですが、これは、プロセスに応じて2階層であったり4階層であったりすることも当然考えられます。重要なことは、どのような階層に跨って、またどのような形でモデル化することが、そのプロセスの現象の適切な理解と、一貫的な生産管理に資することになるかということで、今回の事例はその一例を提示しています。

多くの産業において、製造に要する時間の短縮は、多岐にわたる付加価値製品を開発し、これを競争力ある製品として製造するために不可欠の要素であり、今回のモデル提案を通じた生産管理における時間構造の体系的な理解は、その一助となるものと考えられます。今後の展望については7章に記載しました。

#### 議論4 マルチスケール階層モデルの適用範囲

コメント（上田 完次）

論文中に部分最適化ではなく全体最適化という趣旨が表明されていますが、この論文の手法は、理論的に全体最適を求めたものではないので、全体最適解を保証するものではないと思われまます。したがって、今回の手法の有効性あるいは適用限界についても言及するのが良いと思います。

質問（赤松 幹之：産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門）

3つの異なる時間スケールのモデルによる構成がこの論文の主張点であり、これらによってマイクロからマクロまでの定量的評価ができ、最適点を見出すことができると主張されていますが、マルチスケールのモデルをどのように統合あるいは連関させて利用するのでしょうか。

回答（西岡 潔）

今回提案のモデルは、全体最適を実現する最適化評価関数を有するものではないので、理論的、定量的に全体最適を保証するものではなく、また生産管理システムにそのまま実装されて使用されるものではありません。

プロセス産業の代表的な事例である鉄鋼業、とくに鉄鋼高炉メーカーでは、その象徴である高炉が、天然資源を原材料とすること、高温・高熱プロセスであること、原材料ヤード等が屋外設備であり、天候・気候の影響を受け易いこと等のプロセス固有の物理的な制約を有しており、これらを克服する手段として、設備の一貫連続化、大規模化による生産性および高熱プロセスのエネルギー効率の向上を歴史的に追及してきました。

このような一貫連続な大規模生産設備において、円滑な生産活動を行うためには、膨大な制御情報、生産管理情報が必要となることから、製鉄産業の一貫製鉄所では、他産業に先駆けて大規模計算機援用による生産管理システムを導入してきました。一貫製鉄所の生産管理システムは、上流工程である原料、製鉄、製鋼が、前述のような制約を有し、生産変動やばらつきがある程度大きくなるを得ないこと、高熱・高温プロセスの中では時間的制約が大きく中間仕掛がないこと、したがって本質的にプッシュ型の生産構造を有すること、上流工程である原料から製鉄工程の「製品」はモノグレードであること、一貫製鉄所建設当初は最終製品の品種も限定されており、

現在のような複雑な要求が少なかったこと等の事由により、高熱・高温プロセス工程の最適制御、さらには、上工程の生産変動・ばらつきへの対応および注文製品情報の集約により上工程の製造ロットサイズを極大化することを重視する一方、注文製品の品質管理とデリバリーを連結した視点から、熱延や厚板等の中間製品工程の製造工期および在庫を検討する製造一貫の全体最適計画立案、スケジューリング支援への対応は極めて限定的となっていました。

最適化の探索には、種々なモデルが不可欠ですが、鉄鋼生産では、特に上流工程である製鉄、製鋼において、自動車に代表される組立産業と比較すると、生産／プロセスの日々の生産操作における変動が大きく計画の変更が頻繁に発生すること、さらに、モデルは外乱を含む実績に基づき構築されることを鑑みると、現状では、モデルによる高精度な予測が困難であること、したがって、誤差を多く含むモデルに依存する最適解には、自ずとその信頼性に限界があることが理解されます。

このような状況では、全体最適解を厳密に探索する精緻なスケジューリングを日常のルーティンの中で行うことは、有効性および計算・業務負荷の観点から現実的なものではなく、最適解に近づくためのアプローチは、この論文で例示したような継続的、漸近的なものとならざるをえないと考えられます。

提案モデルは、期間毎に実績を把握し、その実績に基づいて管理を行う結果系の生産管理に加えて、その実績が生まれる原因系を明らかにし、より適切な管理を行うためのツールと位置付けられます。現実的な問題として、個別工程におけるプロセッシングという短時間に生じるマイクロな事象から、圧延開始から製造完了に至る製造工期という長時間にわたるマクロな事象に至る全ての時間階層に至る総合モデルの作成は、極めて大きな困難を伴います。試行錯誤を重ねる中で構築されたモデルを全体として俯瞰すれば、それぞれのモデルが時間階層を越えて全体を繋ぐ構造となっており、これをマルチスケール階層モデルと名付けました。すなわち、提案モデルは、あるレベルの時間階層を跨ぐ原因-結果系のモデルであり、構造的にマイクロからマクロに至る現象の理解に寄与するものの、最適解を保証するものではありませんが、継続的、漸近的により最適解に近づくための一つのアプローチの手段を提供するものと理解できます。上記の趣旨を、6.2「マルチスケール階層モデルの意義」を新設し、追記いたしました。

#### 議論5 能率モデル

質問（赤松 幹之）

能率モデルとこれまでの生産計画の手法との違いはどこにあるのでしょうか。

回答（水谷 泰）

処理能率は、圧延工程においては時間当りの処理スラブ重量、精整工程においては、時間当りの処理製品枚数として定義されます。

圧延工程は、連続、直列、直結に配置されたスラブヤード工程、加熱工程、粗圧延工程、仕上圧延工程、加速冷却工程、剪断工程から構成されており、スラブヤード工程では製鋼から受け入れた鋼片の切断、加熱工程では鋼片の再加熱、粗圧延工程では再加熱された鋼片の幅出し圧延、仕上圧延工程では幅出し後の鋼片の厚みおよび長さ制御圧延による材質の造り込み、加速冷却工程では仕上圧延後のスラブの大水量冷却による焼入れ組織の造り込み、剪断工程では、圧延/冷却後のスラブの分割切断、をそれぞれ行います。厚板製品は、厚さ、幅、長さのサイズ及び規格仕様が多岐にわたり、各工程のプロセス条件も不可避的に多様となるため、製品仕様に応じて各工程の処理能率は大きく変動します。すなわち、圧延工程は、大規模であるとともに多品種の混流生産であり、工程間のバッファが小さいため、前後材料の処理の干渉が頻繁に発生します。このため、材料毎にプロセス中のネック工程が逐次変化するのに伴い、圧延工程全体としての能率が大きく変動することとなるため、これを高精度かつ簡易に予測することは、技術的に難しい課題でした。既存の生産、製造、処理計画立案は、さまざまな条件を仮定し、それぞれの

条件に応じた個別の事象を逐次算定、積算し、その結果を評価関数により評価、比較して最適値をとる条件を選択する方案が大半でしたが、大規模かつ多品種の混流生産において、生産順列、すなわちシミュレーションの計算条件の組合せが膨大となる場合、計算機の負荷が過大となり、実用に適さない問題がありました。

圧延各工程には、処理能率に影響を与える異なる因子が存在します。例えばスラブヤード工程では、スラブ切断速度、スラブ重量等、加熱工程では、加熱炉装入温度、加熱条件（加熱炉抽出温度、保持時間）等、粗圧延工程では、加熱炉抽出温度、スラブサイズ等、仕上圧延工程では、圧延速度、圧延組織制御のための圧延パス間の待ち時間、圧延長さ等、剪断工程では、切断速度、切断精度等が挙げられます。

この能率モデルでは、各工程の処理能率に影響を与えるこれらのパラメータを抽出するとともに、これらのパラメータが有意な差異をもつ製品群に分類し、製品群毎に処理能率を統計的に算出しました。さらに、品種、サイズ、加熱炉装入温度等により分類された製品群毎に各工程の処理能率を比較することにより、製品群毎に直列、直結、多段の複数サブ工程中のネック工程を特定して、製品群毎の固有の一貫能率を求める手法を採用しています。

## 議論6 一貫工期モデル

質問（赤松 幹之）

圧延工程の能率向上によって、精整工程の所要変動が増大した、とありますが、能率向上がロットサイズの拡大につながり、ロットサイズが大きくなると、精整工程が多様であるために精整工程に取りかかれずに仕掛品が多くなるという理解で良いのでしょうか。

納期余裕日数の分散に関して、圧延開始納期余裕と製造工期とが独立であることから、それぞれの分散の和で求められるとしていますが、しかし、圧延開始から製造完了は、圧延開始から納期に含まれ

ており、互いに依存性があるように想像されます。圧延開始納期余裕と製造工期とがなぜ独立とみなせるのでしょうか。

回答（水谷 泰）

圧延工程の能率向上によって、日当りの圧延量が增大すると、不可避的に精整工程への流入量、すなわち、精整工程の所要量が增大し、それに伴い所要変動も増大します。「能率向上によってロットサイズが大きくなった」とのご指摘のとおりです。精整工程への発生量のばらつきが大きくなると、待ち時間の延長、仕掛の増大につながります。

鉄鋼厚板の生産は論文中に述べておりますように、多様な製品注文（注文当たり同一仕様の製品は約3 t）を、ロットで製造して（同一の製鋼製造条件：最低 300 t、生産性を考慮すると 2,000 t 超が望ましい）、ロットで出荷する（同一の需要家、納期、輸送機関毎に）点に特徴があります。納期は同一の出荷ロットに対して設定されますが、需要家のニーズにより、多様な製品注文が同一の出荷ロットに含まれるため、製造ロットは出荷ロットとは一致しないことが一般的です。そのため、圧延開始のタイミングは、納期から想定される製造工期を遡って決定はされるものの、製造ロットをまとめるためのばらつきを不可避的にもつとともに、厚板とは独立の、上流工程である製鋼工程の操業変動に伴うばらつきをもつこととなります。一方、製造工期は発生工程の有無や操業の変動に依存して、やはりばらつきをもつこととなります。したがって、納期余裕日数は、圧延開始納期余裕日数（圧延開始～納期）と製造工期の差として求められます。

納期余裕日数=圧延開始納期余裕日数（圧延開始～納期）-製造工期  
右辺の2項が独立である場合は、この論文中にある

$$\sigma_{\text{納期余裕日数}} = (\sigma_{\text{圧延開始納期余裕}}^2 + \sigma_{\text{製造工期}}^2)^{1/2}$$

が成り立ちます。実績により検証したところ、ほぼ上記式の関係が成り立つことが確認されたことから、「右辺の2項は独立」との仮定がほぼ妥当なものであると結論しております。

# 災害救助支援のための情報共有プラットフォーム

## — データ仲介による情報システム連携 —

野田 五十樹

東日本大震災ではさまざまな「想定外」に国や自治体の防災体制が翻弄されることとなった。このような事態を軽減するためには、さまざまな要請に臨機応変に対応して構成していける災害情報システムが望まれる。この論文ではその基盤として、データ仲介による緩い情報システム連携の考え方とそれに基づく減災情報共有プラットフォームを提案する。このプラットフォームではさまざまな情報システムを簡単に連携させることができ、災害時の多様な状況に対応してシステムを迅速に組み上げることができる。データ仲介によるシステム連携の考え方は東日本大震災でも有効に働いており、今後、この考え方に基づく設計の在り方を普及させていくことが重要である。

キーワード：情報共有、防災・減災、データベース、情報システム連携

## Information sharing platform to assist rescue activities in huge disasters

### – System linkage via data mediation –

Itsuki NODA

Various “unexpected” situations caused by the Great East Japan Earthquake severely hampered disaster-control systems of Japanese national and local governments. A flexible framework for disaster information systems that is reorganizable depending on circumstances is required to mitigate such serious situations. In this article, I propose the concept of “loose linkages” of information systems based on data mediation and a platform for disaster mitigation information sharing. The platform enables us to link various systems quickly, so that we can reconstruct disaster information systems according to various situations in major disasters. I found that the concept was effective for the Great East Japan Earthquake along with various ad-hoc activities of information volunteers. We should spread this concept and platform to Japanese national and local governments, and support organizations to prepare for future disasters.

Keywords : Information sharing, disaster mitigation, database, system integration

### 1 はじめに

2011年3月11日の東北太平洋沖地震は、自然災害の猛威とともに、災害の多様さ、予測困難さを我々に思い知らせることになった。この15年あまりの間、我が国の震災対策の多くは、阪神淡路大震災を一つのモデルとして進められてきた。阪神淡路のケースでは直下型地震による家屋倒壊や火災延焼により多数の被害者が出ることになり、広域の消防・医療応援とそれを支援するための情報共有が大きな課題となった。これを受け、初動における組織間の事前取り決めや自治体間の相互応援体制等の整備は徐々に進められてきた。一方、今回の震災では被害者の大半は大津波によるものであり、時間差で襲ってくる津波に対する情報の伝達等に多くの課題を突きつけた。もちろん阪神淡路の経験が無駄になったわけではなく、関係各機関の初動や広域連携についても一定の進歩がみられ、長年にわたる取り組みは災害対応として着実な改善をもたらしている。

ただ、災害対策には十分というレベルはなく、どのように万全の対策をしても「想定外」を覚悟しなければならないことを、今回の震災で再認識することになった。

災害列島と言われる我が国<sup>[1]</sup>では、災害に対する備えを継続的に整えていかなければならない。各自治体は、地震や火山噴火、津波、台風・風水害、雪害等、多種多様な自然災害からは逃れることはできない。また、首都圏や京阪神・中京地区等の大都市圏では、建物や交通機関が密集しており、テロや災害が発生した際に影響が拡大することが懸念されている。実際、日本の大都市は災害等の危険度で上位に名を連ねている<sup>[2]</sup>。これに対し、災害時の被害を少しでも軽減する対策を打っていくことは、住民の生命・財産を守ることに加え、安心して投資していける地域としての地位を確立して産業振興を助ける意味でも重要である。

災害対策では、耐震等ハード面での備えと並んで、情報収集・活用の面での枠組み・体制作りが必須である。想定

産業技術総合研究所 サービス工学研究センター 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2  
Center for Service Research, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan E-mail: i.noda@aist.go.jp

Original manuscript received December 20, 2011, Revisions received February 22, 2012, Accepted March 1, 2012

外を含めた災害に対するには臨機応変な判断が不可欠であり、そのためにはできるだけ多くの、そして確度の高い情報を収集・共有する必要がある<sup>[3][4]</sup>。その意味で、先端的なITを用いた防災情報システムが災害対策を改善できる余地は少なからずあると思われる。しかし実際には、東日本大震災でも相変わらず手書きのメモが壁一面に張られ、ホワイトボードにさまざまな情報が書き散らされているのが現実である。また、組織間の連絡も相変わらずFAXが主流であり、情報伝達の遅延や欠落の原因となっている。もちろん、この情報収集・共有の重要性は広く認識されており、国や各県・市町村において、各種防災情報システムが構築されているが、残念ながら、今回の震災でもこれらのシステムが期待どおりに効果を発揮したという事例はあまり耳にしない。この防災情報システムがなかなか活用できない理由としては、防災専用で変更のきかない閉じたシステムとして設計されている点が大いと思われる。他の災害対策と同様、情報システムについても臨機応変が求められる。

このような困難を克服できる災害情報システムを設計する上で重要となる視点が、臨機応変さとライフサイクルである。災害で生じる現象は多岐にわたるため、それらすべてに対処できる情報処理機能を予見して事前にシステムに組み込んでおくことはおよそ不可能である。実際、東日本大震災後の自治体ヒアリング<sup>[5]</sup>でも、事前の防災計画をいろいろと手直しせざるを得なかったことが明らかになっている。一方、今回の震災では5節でも述べるように、情報ボランティアによる支援が有効に機能した。このボランティアによる活動の特徴は事後に必要なに応じてシステムを組み上げていく臨機応変さである。もちろん災害情報システムをすべて事後に構築することは現実的ではないが、このような臨機応変さを取り込む余地をシステム設計時に考慮しておくことは、必須の要件と考えられる。また、ライフサイクルの視点とは、日進月歩の情報技術の進歩と百年・千年に一度の大災害という、時間スケールの差の捕らえ方である。つまり、その時々最先端技術を数多く盛り込むことよりも、時間の経過とともに各技術が廃れて次の技術に引き継がれていくところに留意して、災害情報システムを設計していかなければならない。

この二つの視点を取り込んだ災害情報システム設計手法を確立するため、この論文では「データ中心のアドホックなシステム構築」という考え方を導入する。この考え方は、次の3点を情報システムの構築時の設計方針とする。

- ・オープンシステム：システムの各機能を切り出したの利用や他のシステムとの連携を前提として、情報システムを構築する設計方針。臨機応変およびライフサイクルの視点に応える。

- ・汎用的データフォーマット・プロトコル標準：機能の連携を単純化し、また、システムの置き換え・引き継ぎを容易にするため、連携部分を共通化する設計方針。臨機応変およびライフサイクルの視点に応える。

- ・ダウンロードスケーラビリティ<sup>注1)</sup>：情報機器・インフラの規模や種類を選ばずにどこでも動作させられるための設計方針。臨機応変の視点に応える。

そして、これらの設計方針を実現する基盤技術として、システムの基本デザインとなる減災情報プラットフォームとその核となる共有プロトコル（MISP）およびデータベース（DaRuMa）を紹介する。これら視点・設計方針・基盤技術の関係を図1に示す。

次節以降、この論文は次のような構成をとる。まず2章において減災情報共有プラットフォームとそのプロトコル・データベースについて述べる。次に3章において、提案プラットフォームの設計方針を防災・減災の視点で議論する。4章では、提案プラットフォームによる実証システムや実働システム例について紹介する。さらに5章では東日本大震災でのいくつかの事例を取り上げ、上記の設計方針の有効性と問題点を議論する。

## 2 減災情報共有プラットフォームの設計思想と実装

この章ではまず、この論文で提案する災害情報共有のための枠組みである減災情報共有プラットフォーム<sup>[6][7]</sup>の設計思想と、その実装の要となる減災情報共有プロトコル（Mitigation Information Sharing Protocol、以下、MISP）および減災情報共有データベース（Database for Rescue Utility Management、DaRuMa）について述べる。

### 2.1 データ中心のモジュール連携による減災情報共有プラットフォーム

我々が想定している災害情報共有の枠組みは、図2に示すように、異なる組織で運用される各種災害情報システム（以下ではモジュールと呼ぶ）を、データベースを介して連携させるものである。この枠組みをここでは減災情報共有プラットフォームと呼ぶ。

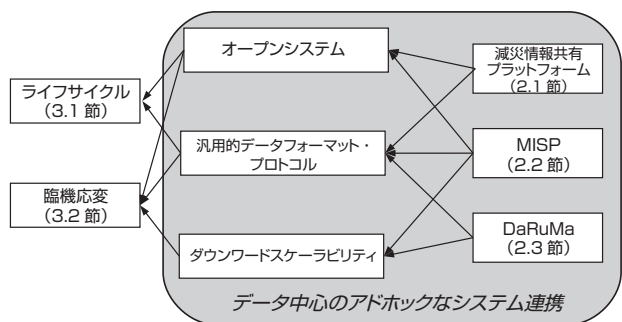


図1 災害情報システムの視点・設計方針・基盤技術の関係

前章でも述べているようにこのプラットフォームの重要な考え方は、データを仲介したアドホックなモジュール連携である。すなわち、各モジュールは、他のモジュールの機能を直接呼び出すのではなく、他モジュールがデータベースに書き出したデータを取得することで、情報の共有や機能の連携を実現する。データの仲介に限定することで、連携の形態が整理され、汎用性の高い枠組みを提供できると考える。このような、中心にハブとなる仲介モジュールにおいてモジュールを連携させる設計方針は、特に目新しいものではないが、ハブの機能とデータの仲介のみに連携の形態を限定することで、継続的かつ柔軟なシステム改変が可能となる。近年では Web サービスのマッシュアップという考え方で、機能を高度に連携させる仕組みも数多く運用されているが、この論文で提案する枠組みでは臨機応変およびライフサイクルの視点を考慮してあえて単純な仕組みを採用する。この妥当性については 3 章において議論する。

## 2.2 減災情報共有プロトコルMISP

減災情報共有プラットフォームの要となるのが、共通プロトコルとなる MISP<sup>[8]</sup> である。MISP は XML をベースとしたデータベースアクセスプロトコルであり、データベースで必要とされる基本機能、すなわち、データの検索 (Query)、登録 (Insert)、修正 (Update、Delete) の呼び出し方を定めている (図 3 の上部)。SQL (Structured Query Language) におけるテーブルジョインといったデータ再構成機能はあえて用意せず、基本的な機能に絞込むことでデータ表現の単純化を促し、データ仲介のモジュール連携を狙っている。さらに、アドホックな連携を助けるための機能として、オンラインでのデータ構造定義機能 (RegisterFeatureType) を含む、データベースのメタ機能を提供している (図 3 の下部)。このデータ構造定義機

能では、取り扱うデータの型を XML Schema によってオンラインでデータベースに追加登録できる。このため、プラットフォームの運用中にシステムを停止させずに新規データ型を追加することが可能であり、新規モジュールの追加時にリアルタイムに新規データ型のテスト・修正ができるようになる。これは数多くの組織にまたがってモジュールを連携させることが必要となる防災情報システム統合では重要な機能となる。すなわち、新しいモジュールを追加する際、必要となる新規データ型の登録のためにシステム全体を停止する等のコストが発生すると、試行錯誤を必要とするモジュール連携が進みにくくなる。オンラインのデータ定義機能の呼び出しをモジュール側に解放することで、これらの障害を回避し、システム連携を円滑にすることを、この仕様は狙っている。

このプロトコル設計にあたっては、機能の単純さと記述の簡潔さを維持することを重視した。通常のインターネットのプロトコル設計では、高機能さや機能の拡張性を担保することが意識されがちである。例えば XML データベースの検索プロトコルとしては XPath や XQuery が提案されてきているが、高機能な検索やデータ再構成を実現するため、徐々に複雑になりつつある。日進月歩の情報技術の分野では、このような短期的な拡張性は重要ではあるが、後で議論するように、災害対処のライフサイクルが 10 年 100 年であることを考慮した場合、拡張性にも高機能追及とは別の視点が必要であり、この論文で提案するプラットフォームでは、単純さ・簡潔さを重視することとした。これについては 3 章で議論する。

MISP の基本機能は WFS (Web Feature Service)<sup>[9]</sup> をベースとしており、WFS と関連する GML (Geography Markup Language)<sup>[10]</sup>、XML Schema<sup>[11]</sup>、SOAP (Simple

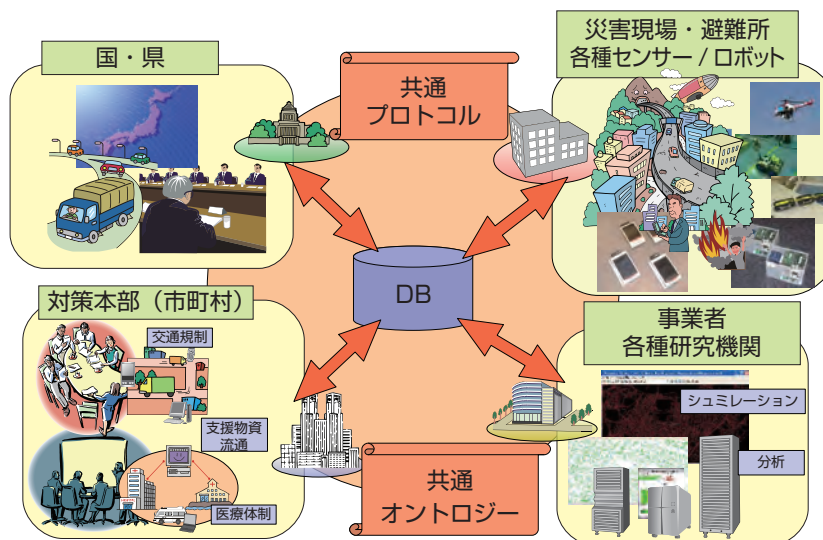


図 2 減災情報共有プラットフォーム

Object Access Protocol)<sup>[12]</sup>等の各種標準を用い、その上で災害情報を共有するにあたり、不足すると思われる部分を追加する形で規定した。

これらはすでに ISO 等で標準化され広く使われている規格であり、現存のシステムや今後作成されるシステムとの親和性を高めることを目指している。標準の採用は同時に既存のツール等をそのまま利用できるという利点があり、災害以外の目的のためのシステムとの連携や応用が期待できる。また、センサーシステムのような、大きな計算能力の期待できないシステムでも扱えるよう簡潔さを保たせ、ダウンロードスケーラビリティを担保している

表記形式としての XML の採用の理由は、近年の多くのシステムでの採用と同じく、そのデータ表現としての汎用性・柔軟性・拡張性にある。基本データ型としては数値（整数・実数）と文字列に加え、災害情報では不可欠の空間・地理表現（GML で定義されている点・線・面）および時間表現の 4 つを用意してあり<sup>注2)</sup>、それらの任意の組み合わせを XML Schema で定義することで、多様なデータ構造を扱えるようになっている。つまり、データとしては災害情報に限らず任意の定型データを扱えるようになっており、平時での業務でも活用できるようになっている。

MISP のプロトコル例を図 4 に示す。この例は RoadLink というタイプの地物を定義しており、その地物データは、misp:GeometryFeature に定義される要素（位置形状の情報要素 gml:GeometryProperty を定義している）に加え、GML で記述される representativePoint や交差点等のノードのリスト（nodeList）、道幅（roadWidth）等により構成されていることを示している。

### 2.3 減災情報共有データベース DaRuMa

DaRuMa は、2.2 節で述べた MISP に準拠して動作するプロトタイプ実装として開発されたデータベースであり、減災情報共有プラットフォームでは各モジュールを連携させ

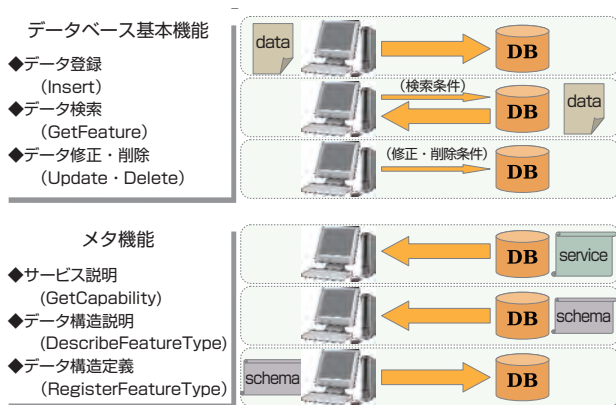


図3 MISPの基本機能

るハブとして働く。DaRuMa の設計・実装は以下の方針で行われた。

- ・ダウンロードスケーラビリティとマルチプラットフォーム動作環境として要求するスペックはできるだけ低く抑え、また、幅広いOSやハードウェアをサポートする。大災害時には情報通信インフラもダメージを受ける可能性が大きく、高性能なサーバーや大規模なデータセンターを確保できない場合もあり得る。そのため、できるだけさまざまな計算環境で動作可能であることを要件の一つとした。
- ・既存ソフトウェアの利活用とオープンソース化  
提案プラットフォームの目的は災害時の情報共有の枠組みの確立であり、新規のデータベース技術の研究開発ではない。そのため、既存ソフトウェアを最大限活用し、開発そのものにコストをかけないことを念頭に置く。また、情報共有の枠組み確立と普及を円滑にするため、成果物はオープンソースとして公開することを前提として開発を進める。

実際に開発された DaRuMa は、図 5 に示すように、既存の関係データベースである MySQL または PostGIS<sup>注3)</sup> をバックエンドとして利用し、Java でかかれたミドルウェア（MISP Processor）により SQL と MISP の仲介・変換を行う構造になっている。このため、Java や MySQL・PostGIS がサポートしている広範囲の OS・ハードウェアで DaRuMa を動作させることが可能になっており、Linux、FreeBSD、Windows、MacOS の各バージョンでの動作実績がある。さらには、機能的には制限されているが、Ruby により実装されたミドルウェアもあり、Linux Zaurus 等の携帯端末でも動作させることが可能となっている等、ダウンロードスケーラビリティを確保している。また、システムとしても軽量となっており、4.2 節で述べる実証実験でも、旧式のノート PC（Mobile Pentium III 933 MHz、メ

```
<misp:RegisterFeatureType uri="urn:gfs:dtd:test:Node">
<xsd:schema misp:id="urn:gfs:dtd:test:Node" targetNamespace="http:..."
xmlns="http:...">
<xsd:element name="RoadLink" type="RoadLinkType" />
<xsd:complexType name="RoadLinkType">
<xsd:complexContent>
<xsd:extension base="misp:GeometryFeature">
<xsd:sequence>
<xsd:element name="representativePoint" type="gml:GeometryPropertyType" />
<xsd:element name="nodeList" type="nodeListType" />
<xsd:element name="roadWidth" type="xsd:float" />
<xsd:element name="nLanes" type="xsd:integer" />
<xsd:element name="direction" type="xsd:string" />
</xsd:sequence>
</xsd:extension>
</xsd:complexContent>
</xsd:complexType>
</xsd:schema>
</misp:RegisterFeatureType>
```

図4 MISPのデータ構造定義例（RegisterFeatureType）



メモリ 512 MB) を用いて 30 分間で 8,000 件を越える住民通報を受けつつ他の情報システムやシミュレーションの連携を取り持つことに成功している。この性能は中規模都市の災害情報システム連携としては十分と考えられ、いざというときには用済みの PC を活用して情報システムを稼働させることもできるようになっている。これを容易にするために、USB でブートすれば自動で DaRuMa が稼働する Linux のライブイメージも作成している。

DaRuMa の開発と平行して、DaRuMa と各種システムを接続するツール群の開発・整備も進めている。減災情報共有プラットフォームでは、すべてのモジュールは DaRuMa と MISP により通信することになっている。しかし既存の災害情報システムをすべて MISP 対応に変更することは現実的ではない。それよりも、図 6 の右半分のように、既存のシステムの機能をできるだけ活用して部分的にでも連携を実現し、システム更新のタイミング等で徐々に連携を深めていくことが有効であると考えられる。以下にあげるように、DaRuMa のツール群はそれらの部分的連携を支援するものとして開発されてきている。

・CSV 接続ツール

CSV (Comma Separated Value) 形式で書き出されたデータを XML に変換し、MISP を通じて DaRuMa に登録するツール。また逆に、MISP により取得したデータを CSV 形式ファイルに変換するツール。多くの災害情報システムには、表計算ソフトの汎用データ形式である CSV ファイルの入出力をサポートしていることが多い。この接続ツールを整備することで、部分的な連携自動化が可能となる場合がある。この連携自動化のために、定期的に時間的差分データを入出力したり、DaRuMa からのデータ取得に条件を指定したりする機

能をもつ。

・GIS ビューワ連携ツール

DaRuMa に格納されている情報のうち地図上の位置に結び付けられた情報 (地物、Feature) を、KML 等に変換し、GoogleEarth や GoogleMap 等の GIS ビューワに表示するツール。地物が主体となる災害情報では、モジュール間の連携をとるためにはデータベースに格納されている情報を随時地図上で確認できることが大切である。また連携支援だけでなく、GoogleEarth 等の高性能で無償・廉価な GIS ビューワは関係機関への情報提供手段としても有効であり、それへの接続ツールの存在は既存ソフトウェアの利活用の上でも重要である。

・ログ再生ツール

DaRuMa への MISP の通信やデータベースの操作をタイムスタンプ付きで記録したログを活用し、共有情報の変化を時間軸を含めて再現するツール。複数モジュールの連携を調整する場合、それらのモジュールを絶えず利用可能にしておくことが難しい場合がある。特に複数の組織・機関に跨がる連携を進める場合、連携調整のために相手先のモジュールを利用できる機会は限られる。ログ再生ツールは、記録しておいた相手先モジュールの動作を擬似的に再現できるため、連携調整を簡便にすることが可能となる。また、このツールは擬似的な合同訓練を実施する場合にも活用できる。

3 データ仲介を核とした災害情報システム連携

3.1 システムのライフサイクルとデータの継続性

災害情報を共有・活用する仕組み、特に情報システムを設計する上で留意しなければならないのが、災害と情報技術のライフサイクルの違いである。

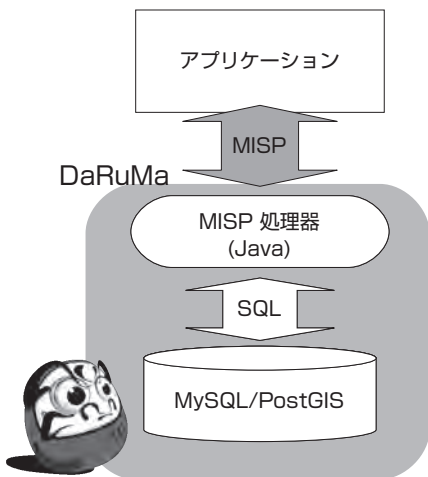


図 5 DaRuMa の構造

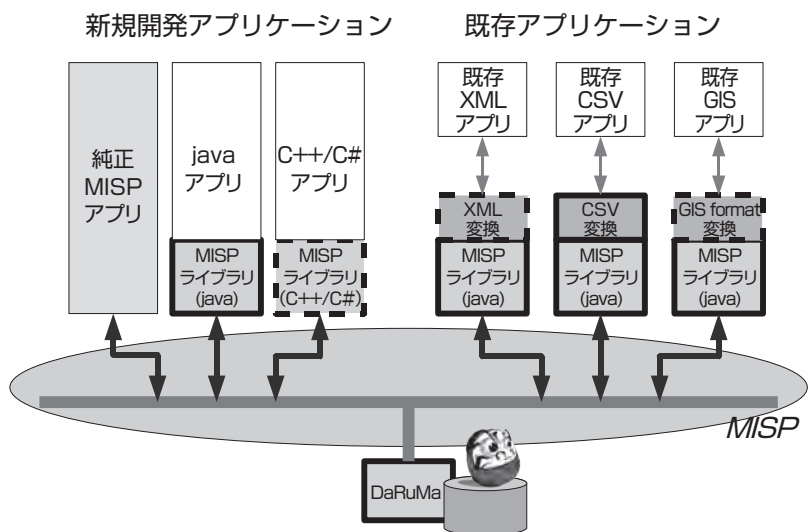


図 6 減災情報共有プロトコル MISP と DaRuMa によるシステム統合

多くの災害は不定期、しかも長い時間間隔をおいて起こるものである。例えば地震では、社会的な被害の出るような規模の地震は、ある特定の地域で見れば、数十年～数百年、場合によっては千年のスパンでしか起こらない。比較的頻度の高い風水害にしても、毎年必ず襲ってくるものではなく、まれに起こるからこそ思わぬ大きな被害が生じることになる。裏を返せば、まれな時を除いた残りの期間は、災害情報システムは、訓練等を除いてほとんど稼働しないことになる。一方、情報技術の進歩は日進月歩である。自治体がつもつ災害情報システムは、だいたい5～10年の間隔で更新されることが多く、その更新のタイミングで時々最新の技術や機能が組み込まれていく。それと同時に、古びた技術や機能は徐々に外されていく。このためほとんどのシステム・技術は、ほんの数回、場合によっては全く実際の災害に使われずに役割を終えることになる。

このライフサイクルの時間スケールの差を乗り越えるのがデータの継続性である。システムの頻繁な更新に比べると、データは長期に渡って蓄積されるものであり、その寿命は長い。特に再利用可能な形で記録されたデータの価値はなかなか古びないことが多い。先にも述べているように、自治体の情報システムは5～10年間隔で更新されるが、その更新の際にデータがいかに引き継がれるかが重要となる。このことから、災害情報共有のシステムを設計する上では、十年・百年の長期にわたるデータの再利用性・蓄積性を中心に考えることが有効である。

### 3.2 データ中心による臨機応変なシステム連携

データ中心の考え方は、臨機応変なシステム連携の視点でも重要である。災害への対処は数多くの組織が関わる活動であり、災害情報システムもそれらの組織を跨って運用されなければならない。このような複数組織が関わる情報システムをモノリシックに設計・実装することは、現実問題として難しい。よって、各組織がサブシステムとして個別に情報システムを設計・構築し、それらを連携させることが現実的な解となる。この場合、その連携を機能中心に設計するか、データ中心に設計するか、二つの考え方がありうる。

機能中心のシステム連携の一例が、WSDL (Web Services Description Language) や UDDI (Universal Description, Discovery and Integration) を活用したウェブサービス連携である。ウェブサービス連携では、各サーバーがさまざまな機能を実現・公開し、それらを組み合わせて高次のサービスを実現する。この考え方は、多様な要求に柔軟に 대응することを容易に実現できるという点で優れており、さまざまな対応が求められる災害救助でも有用な考え方ではある。しかし、各サーバーは「連携」を意識した設計・実装を行う必要があり、各自治体において必

要な機能をそろえておく必要がある。

データ中心のシステム連携は黒板モデルで代表される。この黒板モデルでは、各サブシステムは共通領域（黒板）にデータを提供し、あるいはそこにあるデータを取得することで、サブシステム同士の連携を実現する。この考え方では、黒板にデータが提供されれば各サブシステムを機能させることができ、各サブシステム同士の「連携」を意識する必要はない。一方、機能を密にあるいは柔軟に組み合わせることは難しく、多機能・高機能の実現には向かない。

災害情報システムは日本全国の自治体で活用されることを考えると、システム連携の仕組みは機能中心よりもデータ中心とすべきである。南北に広がる我が国では、災害の種類も多岐にわたり、雪害に悩む地域もあれば、水害を最重要視しなければならない地域もある。よってそこで必要とされる機能もさまざまであり、組み合わせも複雑となる。また、自治体の防災体制や関係組織は画一的ではなく、サブシステムの構成方法も異なってくる。このため、必要とされる機能やデータをどのサブシステムに担わせ、不足しているものをどう補うかが重要となるが、不足機能の補填は即席では困難である一方、不足データについては、精度や動的性・正確性の劣化を許容すれば、補うことは難しくない。

さらに、東日本大震災を被災した自治体でのヒアリング<sup>[9]</sup>によると、さまざまな想定外の事象により、多くの自治体では事前の防災計画をいろいろと手直しせざるを得なかったことが明らかになっている。この震災を契機に各自治体での防災計画はさまざまな形で見直されると思われるが、それでも想定外のことは起きるものとして、対応の柔軟性を確保しておくべきである。それに伴い、情報システムも事後に機能の組み替えを行うものとして設計されなければならないといえる。そして、この事後の組み替えを迅速に行う鍵として、データ仲介による単純な連携は効果的である。これについては、次章の実証システムで事例を示す。

このデータ中心のシステム連携は、オープンソースでのプログラム開発にも通じる考え方である。E. Raymondは「伽藍とバザール」(<http://cruel.org/freeware/cathedral.html>)の中で、有名なハッカーの言葉として以下のような記述をしている。

“賢いデータ構造と間抜けなコードのほうが、その逆よりずっとまし。” (フレデリック・P・ブルックス著「人月の神話」第十一章)

“コードだけ見せてくれてデータ構造は見せてもらえなかったら、私はわけがわからぬままだろう。データ構造さえ見せてもらえれば、コードのほうはたぶんいらぬ。見るまでもなく明らかだから。”

比較的緩い方針の下で多数の人間により開発が進められ

るオープンソースのシステム開発では、他の人が作成したモジュールをどう再利用するかが重要となる。上記の言葉は、モジュールの機能ではなくモジュールが扱うデータ構造の方が、その再利用のための知識の受け渡しがスムーズであることを示していると言える。災害情報システムも同じく、多数の人間・組織が部分的なモジュールの設計・開発に携わる。また、その開発スパンも長期にわたるものであり、その設計思想やアーキテクチャの知識の伝承は重要となる。その意味においても、データを中心としたモジュール連携の考え方は、災害情報システムの開発手法としての的を射ていると言える。

#### 4 実証システム

この論文で提案している減災情報共有プラットフォームは、文部科学省の大都市大震災軽減化特別プロジェクト、科学技術振興調整費、安全安心科学技術プロジェクト、首都直下地震防災・減災特別プロジェクトおよび経済産業省の戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト等を通じて開発を進めてきた。そして、これらのプロジェクトを通じて数多くの連携システムを構築し、実証実験を行ってきた。この章ではこのうち、見附市と豊橋市の実証実験の概要について述べる。

##### 4.1 見附市実証実験

災害時には、現場から報告された情報および各部署間での情報の共有が重要である。提案アーキテクチャに基づく各種災害情報システムを多数連携させる試みとして、2006年10月27日に新潟県見附市市役所にて、水害を対象とし

て防災、減災に関わる多数の機関、多数の各種情報システムのDaRuMaを介した情報システム統合を行う実証実験を行った(図7)。この実験では、市役所の複数の関係部署および消防・警察と、電力・ガス等のライフラインの情報をDaRuMaを介して統合し、相互に情報を共有することを試みた。同時に、災害ボランティア等からの携帯端末を使った通報や水位観測センサーからの自動通報等も統合し、災害対応にあたる職員が情報の整理に忙殺されることなく、災害対応活動に専念できる統合システムを構築した<sup>[13]</sup>。

この実験の特徴は、図7に示した10以上に上る多数の情報システムの連携を延べ3日で実現した点である。一般にシステムの連携は、その機能合わせやプロトコルの擦り合わせ等で時間を要することが多く、特に別々に設計・実装されたシステムを連携させる場合、かなりの工数を要することになる。一方、提案のプラットフォームでは、連携はすべてDaRuMa上におかれたデータを介してのみに限定し、プロトコルもMISPという単純なデータベースプロトコルとしている。これにより各システムの改変はMISPへの対応という形で最小限で済み、また、個別システムとDaRuMaの接続テストが容易であったため、短時間での接続が可能となったと考えられる。

この実験は市役所の防災訓練の一環として行われ、実際の市の防災担当職員により、現実的な災害シナリオにのって進められた。こういったシステムの評価は難しいが、システム連携により情報が一元化できたことで、災害対応を確実にできるという評価を、訓練を体験した職員より得ている<sup>[13]注4)</sup>。この点と、システム連携に要した時間の少な

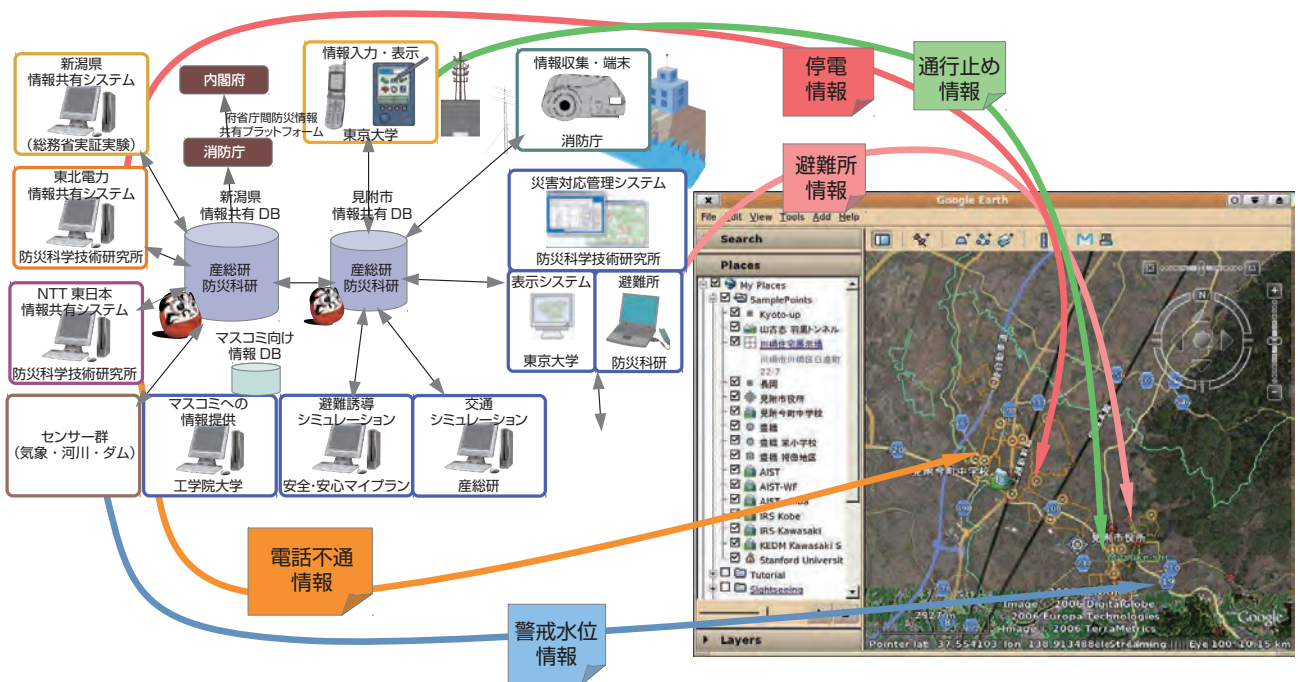


図7 見附市実証実験全体図

さにより、プラットフォームの設計思想の有効性が示されていると考えることができるだろう。

#### 4.2 豊橋市実証実験

2006年11月12日に愛知県豊橋市にて、地震を対象として多数の各種情報システムをDaRuMaを介して統合した（図8）。この実験では、避難所に来る市民からの膨大な情報をDaRuMaを使って整理・統合し、それらの情報を元に、火災延焼や交通渋滞予測、避難経路探索等を行い、災害対応行動を円滑に進めるのに有用な情報提供を行うことを試みた<sup>[14][15]</sup>。つまり、避難所に逃げてくる住民が避難途中に見た地元の被害状況を避難所で報告しそれをシミュレーション等に反映することで、被害想定や災害対策の精度をあげることを狙っている。同時に、そういう住民の情報収集活動が災害対策に役に立つことを分かりやすい形で示し、住民の防災意識、当事者意識を喚起することも目的としている。

この実験の提案プラットフォームとしての主眼はシミュレーション連携である（図9）。複数シミュレーションの連携ではシミュレーション間の接続で入念な境界条件の依存関係調整等が必要となる。この実験ではこの依存関係を一方通行で単純化するという割り切りを行い、簡便に連携を実現した。この割り切りはシミュレーション連携の厳密

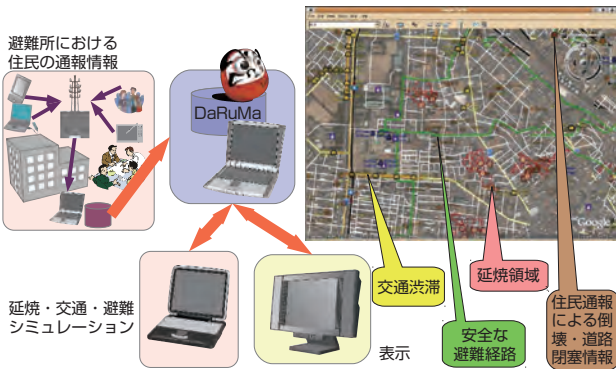


図8 豊橋市実証実験のシステム構成

さという点では劣るが、災害救助という文脈ではそれでも十分に活用できる場面が多くあり、有効な手段である。また、データベースによる仲介ということで、複数のシミュレーションを実行する計算機環境を無理に合わせる必要がない点も、臨機応変にさまざまな組み合わせのシミュレーション連携を実現する上で大切である。なお、各シミュレーションシステムの動作は、以下のとおりである。

- ・延焼シミュレーションシステム

現地から報告された出火情報等を初期設定とし、延焼予測を行う。

- ・避難シミュレーションシステム

道路被害情報、延焼シミュレーターによる火災による危険道路予測、避難の出発地・目的地等の設定を情報共有データベースから取得し、避難に適した経路を解析する。

- ・交通シミュレーションシステム

道路被害情報、避難経路を取得し、それらの道路の通行に制限がある設定でシミュレーションを行い、渋滞・混雑が発生すると予測される道路を予測する。

図10に道路被害情報の有無による交通シミュレーション結果の変化の例を示す。この例では、右上から中心にかかる幹線道路での閉塞情報がシミュレーションに反映された場合とそうでない場合の交通渋滞の予想の違いを示して

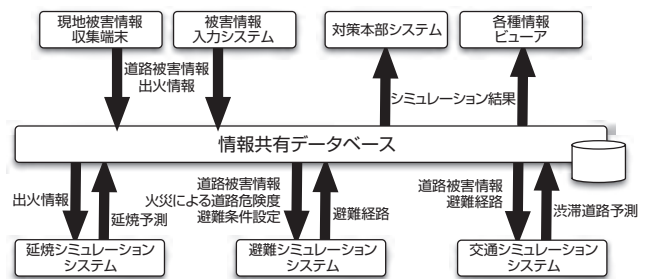


図9 豊橋市実証実験のシステム構成



(a) 道路被害情報なし



(b) 道路被害情報あり

図10 道路被害情報の有無による交通シミュレーション結果の変化（豊橋市高師口付近）

いる。このように、各種シミュレーションモジュールは、条件となる情報を情報共有データベースから取捨選択するだけでなく、シミュレーション結果を情報共有データベースに出力する。これによって、その結果を対策本部のシステム等で被害情報とともに確認したり、別のシミュレーションモジュールで利用することを用意に可能としている。このように通報や各種シミュレーションの連携を単なるデータ連携として扱うことで、確度の高い情報のみの分析や一般市民の通報やシミュレーションの予測を含む確度の低い情報を取り込んだ予測等、さまざまなレベルのシミュレーションを容易に実現できることを、この実験のシステムは示している。

見附市実証実験と同様に実証実験後に市役所職員へ評価のための聞き取り調査を行った。その結果として、「被害想定、応急対応需要量、応急対応項目は災害対策本部または災害対策本部員会議で参加者全員が共通認識をもって初動に取り組む際に必要なものであると思われる」、「実験で提案された仕組みは行政機関等が行う情報収集と合わせ有効な手段となりうる」との評価を得た。

#### 4.3 通れた道路マップ

大災害時における救助救援活動を円滑にするためには、救助隊や物資輸送隊が移動するための道路の情報、特に通行可能な道路の情報が必要となる。しかし、通常、自治体や警察が提供する道路情報は通行不能情報あるいは通行制限情報であることが多く、しかも情報として網羅できているわけではないため、救助隊、特に遠隔地からの救助隊にとって目的地までの経路を確実に見つけることは困難であることが多い。

この問題を解決する方法として考え出されたのが、道路の通行実績情報である。これは、一般の自動車の走行デー

タをもとに、発災後のある日、あるいはある時間帯に実際に利用された道路を抜き出し、地図データとして統合するものである。何台かの自動車が実際に走っていることから、少なくともその道路はある程度利用可能であることが期待できる。特に近年は通信機能を有するカーナビを搭載する自動車が増え、特定地域の道路をかなり網羅した通行実績を示せるようになってきている。また、走行実績の台数により道路を分類することも可能であり、基幹道路としての使用可能性を推定することもできる。

産総研は、本田技研工業(株)（以下、HONDA）の協力のもと、東京大学の秦康範氏（現山梨大学）らと共同して、2007年7月の中越沖地震の際にこの通行実績情報を「通れた道路マップ」（図11）としてとりまとめ、Webにて情報提供を行った<sup>[16]</sup>。この「通れた道路マップ」では、次のような手順で各道路の通行実績情報を処理した。まずHONDAの通信カーナビゲーションシステムのセンターには、同サービスを受けている車輛の実走行経路データが集積されている。このデータの内、被災地域にかかっているものを1日分取りまとめ、個人情報の匿名化<sup>[注5]</sup>・ハズレ値や誤差の除去・道路データとのマッチングを行った後、各道路の平均速度を求め、通行状況を3段階に分類する。その結果をGoogleEarth上で地図情報と重ね合わせて表示し、画像データとしてWeb上で公開した。この情報は1日ごとに更新され、日々、前日の通行実績を確認できるようにしてきた。

この「通れた道路マップ」作成過程は、減災情報共有プラットフォーム上で実現され、各工程の途中経過はDaRuMa上に保存していた。この処理は発災後に試行錯誤しながら実現していったが、DaRuMa上のデータ仲介

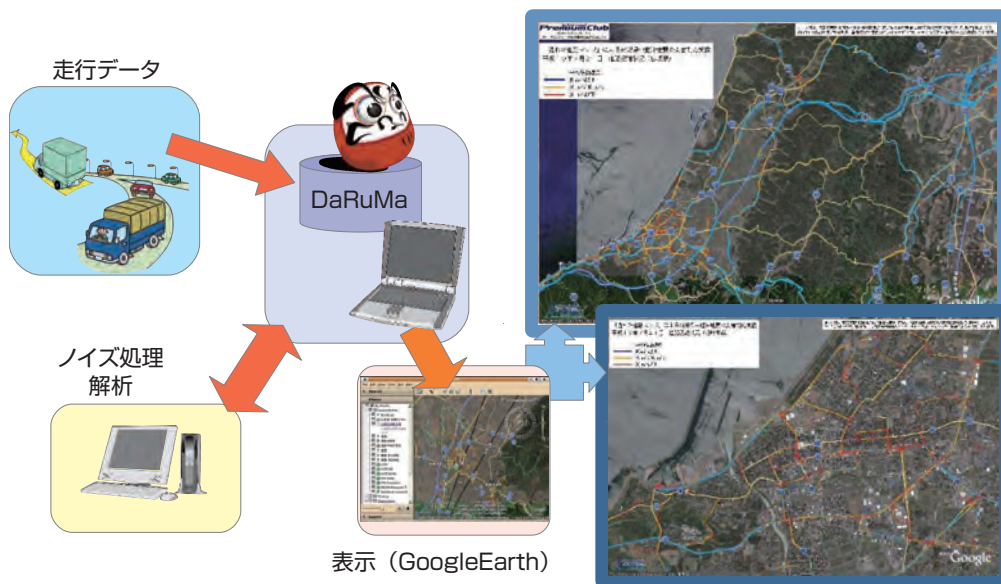


図11 中越沖地震で情報提供した通れた道路マップ

の形をとっていたおかげで試行錯誤が手早く簡潔に行え、発災後3日目には情報提供に漕ぎ着けることができた。

なお、後で述べるように、この通行実績情報は処理方法として確立できたため、東日本大震災ではHONDAから直接一般に提供されることになり、その後、TOYOTA、ITS Japanからの情報提供として広がっていった。さらには、2011年9月の台風による紀伊半島の被害においても、ITS Japanから同様の情報提供が行われ、災害情報の一つとして定着してきている。

## 5 東日本大震災をふまえて

2011年3月11日の東日本大震災では、多くの防災関係者が自らの無力さを思い知らされることとなった。この論文執筆時点での死者・行方不明者数は19,503人に上り、福島第一原子力発電所の事故も含めれば、経済的被害は今だ増え続けている。

ただその中においても、少しでも被害を少なくする減災への取り組みの試行錯誤がさまざまな形で行われた。それを可能とした要因はさまざま考えられるが、この論文で提案したプラットフォームの設計方針、すなわち、オープンシステム、標準、ダウンロードスケーラブルの考え方は有効に働いたと考えることができる。

この震災では、インターネットを介した情報ボランティアによる被災地支援が多く見られた。例えばGoogle等が中心となったPerson Finderでは、手書きの避難者名簿をデジカメで撮り、被災地外のボランティアがテキストデータとして打ち込み、データベースを作り上げた。この単純であるが効果的な方法は、クラウドコンピューティングや高速イ

ンターネット等の先端技術に支えられてはいるものの、機能としては単純なもの（デジカメによる撮影、人間による文字認識、データベースの検索）を、画像データやテキストデータで仲介したと見なせる。人間による処理のように時間的に遅れがあっても問題なく連携できているのも、機能ではなくデータで仲介している効果であると言える。

4.3節で述べたように、「通れた道路マップ」（道路通行実績情報）も、HONDAやTOYOTA、ITS Japan等から大規模に展開されたが、今回はKMLという国際標準のフォーマットを用いて詳細データが公開された<sup>注6)</sup>。このため、このデータを用いたさまざまな情報統合の試みがなされた。例えば筆者らはこの通行実績情報を軽量化しつつ、ガソリンスタンド・道路通行止め情報等を統合した地図を作成して情報提供してきた（図12）<sup>[17]</sup>。また、PC等でしか参照できない通行実績情報を携帯電話等でも参照できる画像ファイルに直す取り組みをしていたボランティアも見られた。このようなさまざまな試みが同時並行で取り組めることは、防災における多種多様な要望に応える一つの解と考えられる。そしてそれを可能とする土台の一つが、汎用フォーマットによるデータを仲介することで処理を組み上げていく点にあることは、もっと注目されるべきであろう。このような草の根的システム開発や、改変・連携を中心としたアドホックなシステム構成は、人命を預かるという重い使命を担う災害対策では敬遠されがちである。しかし想定外を含めた事態への臨機応変な対応が求められることを考えると、このような緩いがしなやかな手法の併用も想定しておかなければならず、その準備として、オープンシステム・汎用フォーマット/プロトコル標準・ダウンロードスケーラビリ

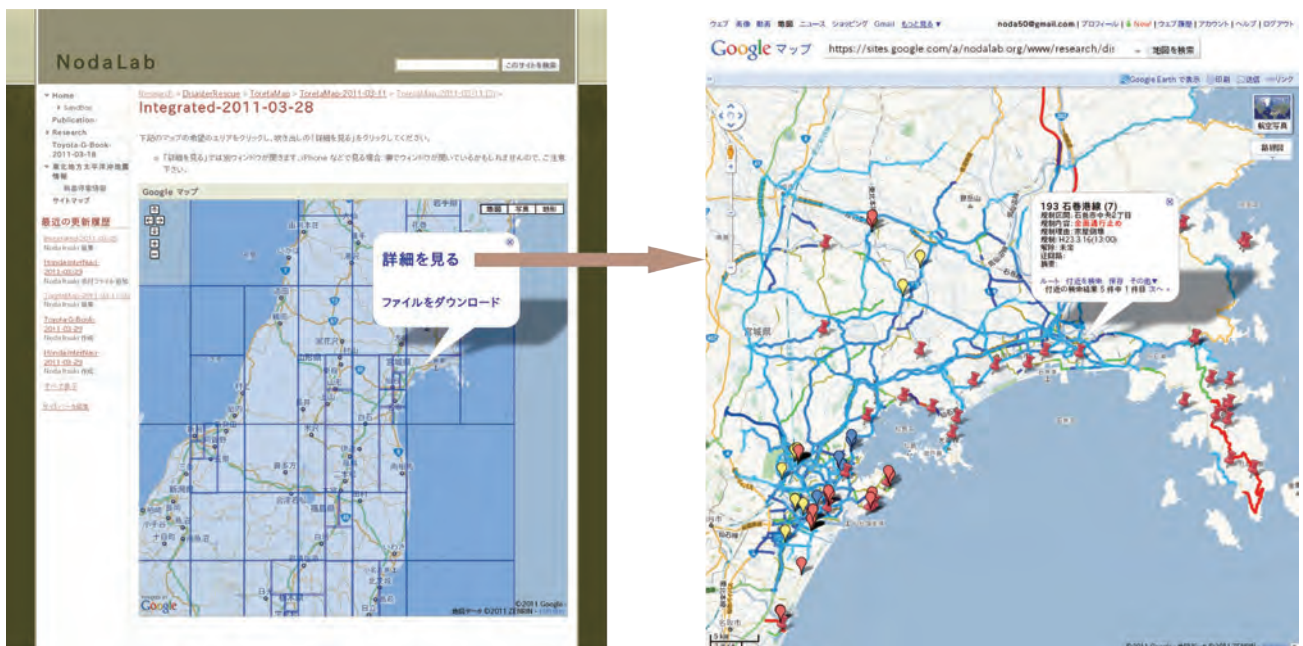


図12 東日本大震災で情報提供した通れたマップ

ティという考え方に基づくシステム構成の考え方を広げていかなければならない。

## 6 おわりに

この論文ではデータ仲介を核とするモジュール連携という考え方を元にした災害情報システムの設計方針と、その実装である減災情報共有プラットフォームについて述べた。

データ仲介の考え方は粗で簡潔なモジュール連携を目指すものであり、高機能の高度な連携よりも、単純な機能の臨機応変な連携を実現する。

3章で議論したように、さまざまである災害は多かれ少なかれ想定外の事象を含むものであり、各自治体に柔軟な対応が求められる。東日本大震災での多くの事例では、そのような臨機応変の対応の必要性和、それを支えるためのデータ仲介によるアドホックなシステム構築の有効性を示している。

もちろん、単なるデータ連携ですべての防災業務が賄えるわけではなく、また、プライバシーに関する情報を扱うためのセキュリティー技術や、大量のデータを確実・高速に処理する枠組み等が、技術の進歩とともに必要となり可能となっていく。それらの変化に対応しながら、この論文で提案した考え方やプラットフォームを今後も発展させていかなければならない。

## 謝辞

この研究は文部科学省の大都市大震災軽減化特別プロジェクト、科学技術振興調整費、安全安心科学技術プロジェクト、首都直下地震防災・減災特別プロジェクトおよび経済産業省の戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトの支援を受けた。またこれらのプロジェクトに関与された多くの方々の協力のもと、システムの開発が進められた。ここに感謝したい。

**注1)** より小規模・貧弱な情報処理機器で運用しても、その機器の能力に応じて機能を維持できるようにシステムを設計する考え方。規模が拡大しても機能を維持する「(アップワード) スケーラビリティ」に対する概念である。

**注2)** マルチメディアデータについては、MIME形式等いくつか標準形式はあるが、データサイズの問題やストリーミング型等XMLでは扱いきれないタイプも存在する。これらについては、今後、XMLにこだわらず、長期に渡って機能することを重視した形式を採用していく必要がある。

**注3)** バックエンドデータベースとの接続部分は独立性が高く実装されており、他のデータベースへの切り替えも容易になっている。

**注4)** 見附市は2004年7月の7.13水害において甚大な被害を経験しており、多くの職員はその際に情報の錯綜による対応の困難さを経験している。このため、この実験においてもその時の経験をもとに実運用を想定して評価を行ってもらっている。

**注5)** 単一の通行実績しかない場合は個人が特定できてしまう可能性があるため、複数の通行実績があるところのデータのみ

を抽出した。

**注6)** 中越沖地震の際には、個人情報保護の観点から詳細情報の公開ができず、道路地図の画像情報での提供にとどまった。東日本大震災の際には個人情報保護にめどがついたため、詳細な情報提供が可能となった。

## 参考文献

- [1] 内閣府(編):平成22年版防災白書,内閣府(2010).
- [2] Munich Re Group: *Statistics and natural hazard risk for 50 selected megacities*, Jan (2005).  
[http://www.munichre.com/app\\_pages/www/@res/pdf/media\\_relations/press\\_releases/legacy/pm\\_2005\\_01\\_11\\_01\\_en.pdf](http://www.munichre.com/app_pages/www/@res/pdf/media_relations/press_releases/legacy/pm_2005_01_11_01_en.pdf)
- [3] 座間信作, 細川直史, 関沢愛: 地震被害情報の効率的収集方法, 第10回日本地震工学シンポジウム, 3479-3484 (1998).
- [4] 山田博幸, 古戸孝, 浦山利博, 角本繁: 自治体の地震防災に貢献する防災情報システムの構築に関する研究, *地域安全学会論文集*, 6, 67-74 (2004).
- [5] 野田五十樹, 近藤伸也, 沼田宗純, 秦康範: 災害対応の現状と求められる情報システム-東日本大震災での災害対応ヒアリングを通じて-, *人工知能学会「社会におけるAI」研究会第13回研究会予稿集*, 人工知能学会 (2011).
- [6] I. Noda *et al.*: IT framework for disaster mitigation information sharing, *Journal of Disaster Research*, 3 (6), 467-478 (2008).
- [7] 下羅弘樹, 松井宏樹, 野田五十樹: 分散システムアーキテクチャによる防災システム連携, *日本地震工学会論文集*, 9 (2), 61-72 (2009).
- [8] 防災科学技術研究所, 産業技術総合研究所, 減災情報共有プロトコル, (2005).  
<http://www.kedm.bosai.go.jp/project/info-share/infosharp/index.html>
- [9] Open GIS Consortium, Inc. *Web Feature Service Implementation Specification (OGC02-058)*, ver. 1.0.0 edition, May (2002).  
[https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact\\_id=7176](https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=7176)
- [10] Open GIS Consortium, Inc. *OpenGIS Geography Markup Language (GML) Implementation Specification (OGC-02-023r4)*, ver. 3.00 edition, Jan. (2003).  
<http://www.opengis.org/docs/02-023r4.pdf>
- [11] W3C. *Xml schema part 2: Datatypes second edition*, chapter 3. built-in datatypes.  
<http://www.w3.org/TR/xmlschema-2/#built-in-datatypes>
- [12] World Wide Web Consortium (W3C). *Soap version 1.2*, (2001).  
<http://www.w3.org/TR/2001/WD-soap12-20010709/>
- [13] 鈴木猛康, 秦康範, 天見正和: 災害時情報共有に関する実証実験の実施と評価, *日本災害情報学会誌*, 6, 107-118 (2008).
- [14] 村上正浩, 柴山明寛, 久田嘉章, 市居嗣之, 座間信作, 遠藤真, 大貝彰, 関沢愛, 末松孝司, 野田五十樹: 住民・自治体協働による防災活動を支援する情報収集・共有システムの開発, *日本地震工学会論文集*, 9 (2), 200-220 (2009).
- [15] 柴山明寛, 久田嘉章, 村上正浩, 座間信作, 遠藤真, 滝澤修, 野田五十樹, 関沢愛, 末松孝司, 大貝彰: 被害情報収集支援システムを用いた災害情報共有に関する研究, *日本地震工学会論文集*, 9 (2), 113-129 (2009).
- [16] 鈴木猛康, 秦康範, 下羅弘樹: 災害時の道路情報提供の試み-新潟県中越沖地震における取組みと今後の展開-, *日本災害情報学会第9回学会大会予稿集*, 11月2007, 通れたマップ
- [17] 東日本大震災通れた道路マップ.  
<https://sites.google.com/a/nodalab.org/www/research/disasterrescue/toretamap/toretamap-2011-03-11/toretamap-2011-03-11-11>

## 執筆者略歴

野田 五十樹 (のだ いつき)

1992年京都大学大学院工学研究科修了、通商産業省工業技術院電子技術総合研究所に入所後、改組を経て現在、独立行政法人産業技術総合研究所サービス工学研究センターサービス設計支援技術研究チーム長。筑波大学大学院および東京工業大学大学院の連携講座教授を兼務。博士（工学）。マルチエージェント社会シミュレーション、災害情報システム、機械学習の研究に従事。人工知能学会、情報処理学会会員。人工知能学会、RoboCup Federation、ロボカップ日本委員会、防災推進機構 理事。



## 査読者との議論

### 議論1 シンセシオロジー論文としての主張点の整理

コメント (中島 秀之: 公立はこだて未来大学)

データ仲介によるシステム連携によって実現された災害情報システムについての論文であり、さまざまな、あるいは将来の情報システムを連携させようという、事前にすべてを規定できない開いた系を対象としたシステムを構成（シンセシス）することを目的としたもので、シンセシオロジーの論文として、とてもふさわしい論文です。

シンセシオロジーの編集方針として、こういった開いた系に対するシステム構築における基本方針が明確に述べられていることを期待していますが、実際に本文中にそういった基本方針が書かれています。ただ、個々の記述については良く理解できるのですが、全体としての考え方が読者に分かるような工夫があるとよいと思います。特に、「構成的手法」をもう少し強調していただき、サービス工学としての手法を中心に据えた記述が望まれます。

第1章において、「オープンシステム、標準、ダウンワードスケラビリティ」の3点が設計の基本方針として掲げられています。一方、2.1節および3章においてデータ中心（あるいはデータ仲介連携）の考え方、2.3節では、設計・実装方針として、1) ダウンワードスケラビリティとマルチプラットフォーム、2) 既存ソフトウェアの利活用とオープンソース化の2点が掲げられています。これらの対応関係が必ずしも明確ではないようです。図あるいは表で全体的な考え方を整理して、それに則って記述をしたらさらに分かり易くなると思います。

一案ですが、災害情報システムが備えるべき特徴を掲げて、それからトップダウン的に必要要件を位置付け、それに対応して実装した機能を位置付けることができると思います。以下のような理解で良いでしょうか？

### 災害情報の特性

- ・さまざまな組織（あるいは個人も？）がいろいろな規模の災害情報システムを運用
- ・災害と情報技術の時間スケールの違い
- ・災害対策は頻繁に修正、場合によっては大幅修正が必要

これらの目的を満たす連携プラットフォームとして、データ仲介によるシステム連携が好適である。

それを実現するための要件を整理すると

- ・新規の連携接続を簡単にするため
- ・汎用性の確保：汎用的な入力形式、汎用的な出力、共通の構造等
- ・新規連携のための作業を簡便に
- ・計算機能力を問わないで済むため

がある。

これに対して、実装したときのポイントとなった機能としては、

- ・データを介したモジュール連携：各種災害情報システムを連携させるため

- ・データ構造定義機能：新規モジュール追加時にリアルタイムに新規データ型のテスト・修正ができる
- ・MISPの基本機能に標準を採用：既存システム、将来システムとの親和性を高める。簡潔であり計算能力のないセンサーシステムでも扱える
- ・XMLの採用：汎用性、柔軟性、拡張性
- ・要求動作環境を低く：大型サーバーが機能しないことも想定して、小型端末でも動作可能
- ・オープンソース化：情報共有枠組確立と普及の円滑化
- ・MISPのみに限定せず部分的にでも連携できるためのツール群
- ★CSV接続ツール：表計算ソフトウェアの汎用データ形式がシステムで広くサポートされている
- ★GISビューワー連携ツール：GoogleEarth等のGISビューワーに表示するツール
- ★ログ再生ツール：各モジュールの共有情報の変化を時間軸を含めて再現するツール。連携調整を簡便に。等がある。

これらの機能と上記要件とをマトリックス的に関係付けた表あるいは図等を追記していただくと、研究目標に対するシンセシスの考え方（研究のシナリオ）が明確になり、シンセシオロジー論文として有益な情報を読者に提供できると思います。

回答 (野田 五十樹)

有益なご指摘、ありがとうございます。ご指摘のとおり、論文全体の流れとキーワードの関係が分かりにくくなっておりました。それを補うために、第1節を大幅に加筆しました。また、キーワードの関係を示す図も挿入いたしました。

### 議論2 タイトル

コメント2 (赤松 幹之: 産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門)

上記の主張点が見えるようなタイトルとサブタイトルを付けてください。例えば「災害情報システム連携のためのプラットフォームの構成—データ仲介による長期にわたって変化するさまざまな情報システムの連携—」。主張点と合わせてご検討ください。

また、第3章の節タイトルについても、論文としての主張点が明確になるようにご検討ください。

回答 (野田 五十樹)

タイトルについては、提案する技術である「プラットフォーム」を入れることとしました。また、3章の節タイトルについても、第1節で取り上げたキーワードを用いて、対応関係が分かるようにしました。並行して、図1のキーワード関連図でも、節番号を付与しました。

### 議論3 DaRuMa

質問 (赤松 幹之)

図7を見るとDaRuMaが新潟県と見附市向けの二つがつけられたようですが、二つないとうまく運用できなかったのでしょうか？二つのDaRuMaを導入した理由があれば記載してください。

回答 (野田 五十樹)

見附市の実験当時は、DaRuMaにアクセス制御機能がなかったため、DaRuMaへアクセスできるシステムには全情報が参照できてしまうようになっていました。このため、市役所庁内で閉じておくべき情報はDaRuMaに載せられず、庁内での情報共有が進まないという問題が生じました。これを避けるため、内部用のDaRuMaと外部用のDaRuMaに分け、その間にフィルター機能のあるミラーリングツールを用意し、公開してもよい情報のみ外部用DaRuMaに反映される仕組みを用意しました。その後、DaRuMa（およびMISP）にはアクセス制御機能を設けたため、現状ではこのような仕組みは必要なくなりましたが、論文では実験当時のシステムの構成として、当時のままの



ものを載せてあります。なお、アクセス制御についてはこの論文では主題でないため、説明を省いてあります。

#### 議論4 マップ

質問（赤松 幹之）

この論文では、実証システムとして、見附市の実証実験、豊橋市の実証実験、そして HONDA の通れた道路マップが示されています。この研究では、実現場で実証することは極めて重要なことだと思いますが、実証実験の場として提供してもらえた理由はどういったことが背景にあるのでしょうか？現場の人達が参画するモチベーションがどのような点にあったのか、分かる範囲で結構ですので紹介していただけませんか（これらは、いずれも文科省、科振費等のプロジェクトメンバーだったのでしょうか。プロジェクトメンバーだったのなら、それぞれの組織がこのプロジェクトに参画することになったモチベーションが何だったのでしょうか。モチベーションのある組織とモチベーションのない組織の違いはどこにあるのか等も、構成学としては明確化していきたいと思いますので）。同様に、東日本大震災での ITS Japan による通れたマップは、だれが最初に働きかけて実現したのでしょうか。

回答（野田 五十樹）

現場となる自治体等との関係は、プロジェクト単発ではなく、事前

や事後に継続して維持することが最も大事であると言えます。この論文で紹介した各実証実験を行った各自治体は、プロジェクトに参画していた研究者の個別のつながりで協力していただきました。このつながりの多くは、自治体の首長や防災担当者が熱心であった等の偶然がきっかけになっています。ただ、この偶然のつながりを各研究者が大事に継続し、現地や現場に足を運んで共通の問題意識を培っていくことで、新しい技術への理解が生まれ、実証実験に結び付いてきました。各プロジェクトは数年の期間しかありませんが、自治体とのつながりはそれ以前から、あるいはプロジェクト終了後も続いているものが多くあります。私自身はここで紹介したプロジェクトで他の共同研究者のつながりの恩恵を受けたに過ぎませんが、プロジェクト終了後はできるだけ多くつながりを維持できるよう努力しています。

ITS Japan のケースについては、きっかけは、中越地震の際の山梨大学の秦先生の着想を温めていたところ、中越沖地震でたまたま HONDA の協力が得られ、即席に造ったシステムで小規模に情報発信できたことが発端になっています。この成功があったおかげで、東日本大震災では HONDA や Google が動き出すきっかけができ、最終的には ITS Japan のもとの、オールジャパンで情報発信する体制となりました。この例でも、中越・中越沖地震の頃（さらには、それ以前よりさまざまなツールを造り始めた時期）から、NPO の研究会等の活動を通じて関係を維持していた継続性が大事であったと考えています。

# ロボット技術を用いたスピニング加工 (へら絞り)

## — 手作りの現場密着型ものづくり —

荒井 裕彦

スピニング加工とは、金属素材を回転させながら加工ローラーを押し付けて成形する塑性加工法で、金型コストが低く多品種少量生産に有利である。スピニング加工にロボット技術を導入して、これまでは困難だった異形状の成形を実現し、加工機メーカーとの連携により実用的な加工機のプロトタイプを開発した。この研究では、実用化の優先を基本的方向性としてボトムアップかつ探索的に進め、現在の状況に応じ目標やシナリオを常時修正した。その場で入手可能な有限のリソースの組み合わせを活用するブリコラージュが研究活動において大きな役割を果たした。現場・現物・現実を重視する三現主義の立場で意思決定を行った。顧客満足度の向上を価値基準に加え、営業活動も研究のうちに位置づけた。

**キーワード:** スピニング加工、ロボット、塑性加工、ボトムアップ、ブリコラージュ、三現主義

## Spinning process using robot technology

### – Field-based bricolage of manufacturing technology –

Hirohiko ARAI

Metal spinning is a plastic forming method in which rotating metal material is pushed by a roller to form a product. It is suitable for production of a wide variety of products in small quantities due to low cost forming dies. We have achieved fabrication of non-axisymmetric shapes by using robot technology, which was difficult to realize by conventional methods. A prototype of a practical spinning machine has been developed in collaboration with a spinning machinery manufacturer. In this research, we have basically set preference for commercial realization over academic contribution. This research was carried out in a bottom-up and trial-and-error manner, and the targets of this research were frequently modified depending on the situation. Bricolage, utilizing the combination of available and limited resources at hand, has played a key role in the research activity. Decision-making has reflected Three-actuality theory, which values actual field site, actual material, and actuality. We have added the increase of customer satisfaction to the criteria of value and have set the sales activities as a part of the research.

**Keywords:** Metal spinning, robot, metal forming, bottom-up, bricolage, san-gen-shugi

### 1 開発技術の概要

スピニング加工(図1)とは、板やパイプ等の金属素材をモーターで回転させながら、加工ローラーを押し付けて成形する塑性加工の一手法である<sup>[1]</sup>。空洞状の金属製品を作る方法として、アルミニウム、鉄、ステンレス他さまざまな金属素材に適用できる。照明器具、調理器具、自動車、電気製品、化学プラント、圧力容器、航空宇宙、建築装飾等の産業に広く利用される。また人力によるスピニング加工をへら絞りと呼び、ものづくりの高度な熟練技能の一つとして知られている。スピニング加工の長所は、①金型がオス側だけで済むために金型コストが低い、②切削加工と比べ材料の歩留まりが良い、③加工に要する力が小さく装置が小型で騒音・振動が少ない等である。

筆者らは、より付加価値の高い加工を行うために、スピニング加工へのロボット制御技術の導入を試みてきた<sup>[2]</sup><sup>[6]</sup>。特に楕円形や多角形、偏心等の異形状が成形できる

スピニング加工機および加工法を開発している。中空の金属製品を作る場合、これまでのスピニング加工で成形できる丸物以外の製品は、手間のかかる板金溶接や型代の高価なプレスで作らざるを得なかった。この加工法では一般に金型を1個しか必要とせず、型を使わずに成形できる場合もあるので、プレス加工と比べて型のコストがとても低

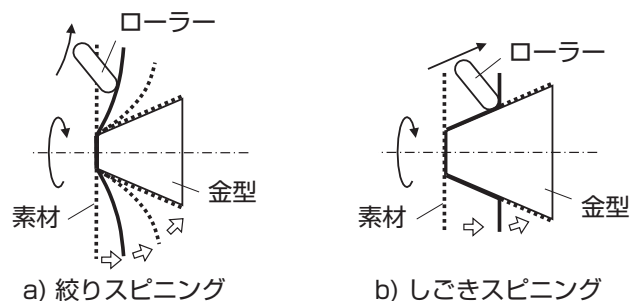


図1 スピニング加工(板材の場合)

産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1 つくば東  
Advanced Manufacturing Research Institute, AIST 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan E-mail: h.arai@aist.go.jp

Original manuscript received January 26, 2012, Revisions received March 5, 2012, Accepted March 7, 2012

く、立ち上げも速くなる。現状では1個あたりの加工時間が数十秒～数分程度かかるため、大量生産にはやや不向きだが、小ロットの多品種少量生産、単品の特注品や製品開発における試作等に威力を発揮することが期待できる。

異形形状を成形するには「力制御スピニング」「同期スピニング」という二つの方法を用いている。これらにより、これまでの丸物用のスピニング加工機ではもちろん、熟練者によるへら絞りでも不可能だった異形形状の成形に対応できるようになった。力制御スピニング<sup>[3]</sup>では、作りたい形状と同じ異形形状の金型を用い、加工ローラーを力制御して成形を行う。ローラーの押し付け力を適切な値に保つように制御し、回転する金型に素材を押し付ける。一方、金型の回転軸と平行な方向には、ローラーを一定速度で送り制御する。ローラーは金型形状に倣って動き、素材を型に密着させる。その結果、金型と同じ異形形状の製品を作ることができる(図2)。

初めは図3のような加工機を実験に用い、ローラーをボールネジで駆動していたが、異形形状を成形する場合、金型の表面形状に合わせてローラーを半径方向にとても速く往復させる必要がある。そこで、ローラーをリニアモーターによって直接駆動する新たなスピニング加工機(図4)を試作した<sup>[4]</sup>。力制御の応答性が高く、ローラーが金型の形状に

すばやく追従するので、成形時間を大幅に短縮できる。また、力センサーを用いない開ループ力制御でも異形断面形状が成形できる。

同期スピニング<sup>[6]</sup>では、加工ローラーをワークの回転角と同期して数値制御する(図5)。そのため回転角が制御できるサーボモーターによって主軸を駆動する。ワークの回転角に応じて加工ローラーを半径方向に前進/後退させ、ローラーとワークの接触点の軌跡が作りたい断面形状を描くようにローラーを動かす。一方、主軸方向に沿って断面形状を変化させ、ワーク全体を所定の形状に成形する。この方法では金型を用いずに異形断面形状を成形することもできる。成形後の型の取り出しが困難な異形断面管を中空のまま成形する際等に、特に有効である。同期スピニングによるパイプ加工に適した2ローラーの加工機(図6)も試作した。

さらに、スピニング加工機の専門メーカーである株式会社大東スピニングとともに、異形形状に対応した実用的なスピニング加工機のプロトタイプ(図7、表1)を共同開発した<sup>[6]</sup>。上記の力制御スピニングと同期スピニングの両方が、この機械で実行可能である。推力増加と摩擦低減を両立させた吸引力相殺型リニアモーターを採用し、ワーク直径400 mm、厚さ2 mmの鋼板まで成形できる。この機械は

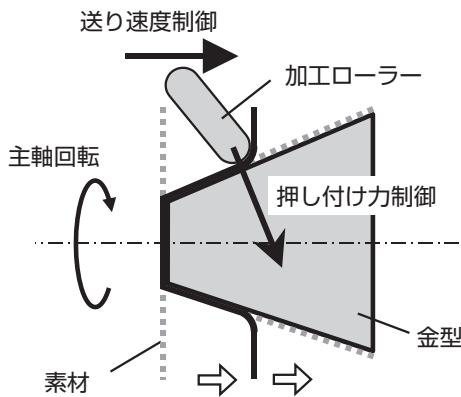


図2 力制御スピニングによる異形形状の成形

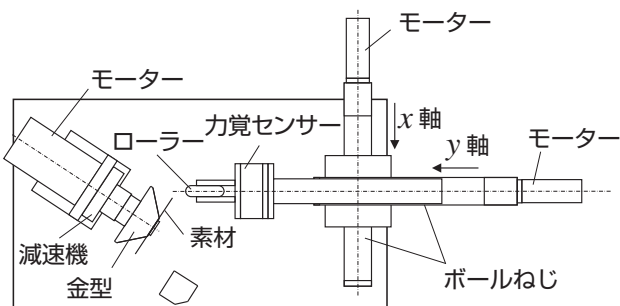


図3 スピニング加工実験装置

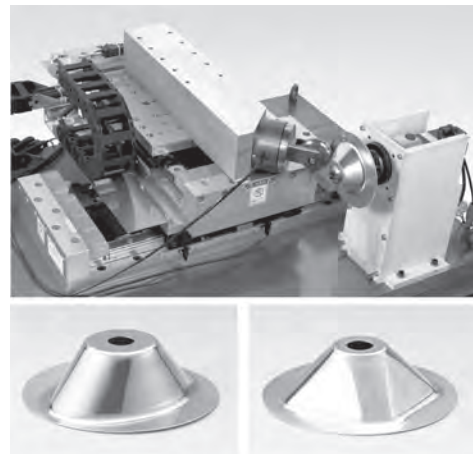


図4 リニアモーター駆動スピニング加工機(実験機)と成形例  
[http://staff.aist.go.jp/h.arai/linspin\\_j.html](http://staff.aist.go.jp/h.arai/linspin_j.html)

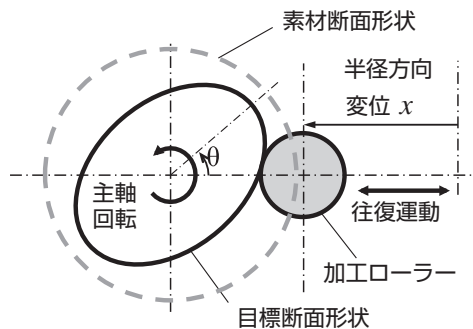


図5 同期スピニングによる異形形状の成形

開発以来、日本国際工作機械見本市、おた工業フェア等多数の展示会に出展し、異形状のスピニング加工の実演を行った。同社ではこれをベースとした加工機の受注販売を開始した。現在までの出荷実績は1台のみだが、株式会社パパスという金属加工業の企業に納入されている(図8)。

## 2 背景と動機

### 2.1 学術性偏重への反省

この研究は産業技術総合研究所（産総研）が独立行政法人化した2001年頃に着手した。そのきっかけとなったのは、それまでの工業技術院（工技院）時代に筆者自身が行ってきたロボット分野の研究-学術性の偏重-への反省である。例えば、学術論文の冒頭で研究目的を説明するとき、自分自身の対応を振り返ると、それは多くの場合、近い将来には実現することが困難な目標を掲げる等、学術的な研究を正当化するために机上で創作したフィクションだった。論文の研究目的にはある程度のもっともらしさは求められるが、厳密な真偽の検証は要求されず、査読過程にお

表1 プロトタイプ機の主要な諸元

寸法	巾 2875 mm × 奥行 1820 mm × 高さ 1895 mm
X軸 (半径方向)	吸引力相殺型リニアモーター 定格推力 4000 N
Z軸 (主軸方向)	サーボモーター + ボールねじ 定格推力 10000 N
主軸	サーボモーター + 遊星減速機 定格出力 7.5 kW 定格回転数 375 rpm
ワーク	最大直径 400 mm 最大高 350 mm

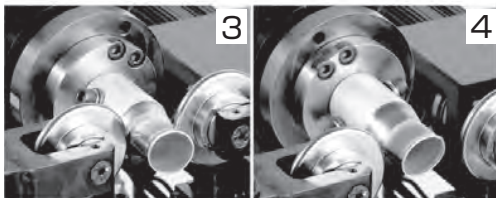
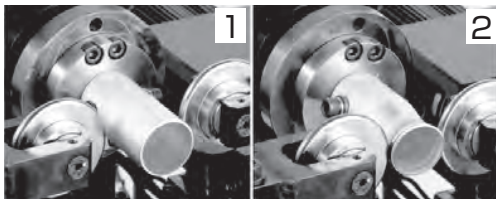
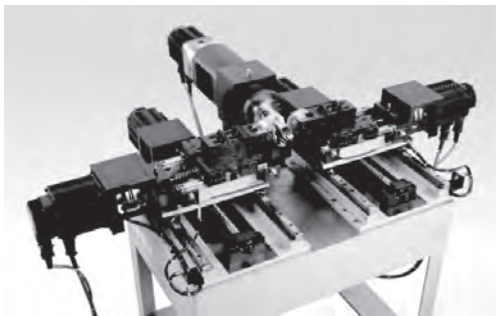


図6 2ローラー加工機を用いた同期スピニング

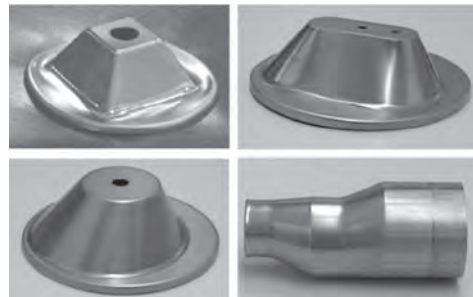
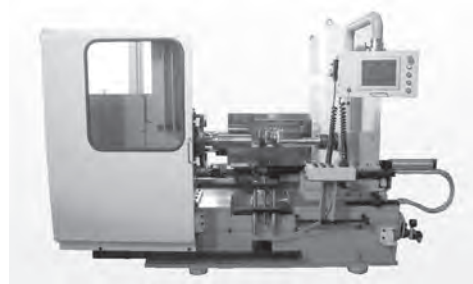


図7 異形状が成形可能なスピニング加工機の実用機プロトタイプ



図8 企業に導入された異形スピニング加工機

いて採否には影響しない傾向がある。一方、いったん論文が採択されると、こうした虚構であるかもしれない研究目的を含めて研究内容がオーソライズされがちである。こうして作られた研究目的は、研究の存在意義を肯定するのに都合よくできているため、同じ系譜の研究では正当化の理由が継承されることが多い。また先行研究の存在自体が後発研究を正当化する場合もある。研究目的の再引用が繰り返され、多数の研究者間で流通するうちに、フィクションがあたかも検証された事実であるかのように錯覚され、独り歩きを始める危険性がある。筆者自身、虚構と自覚しつつ書いた研究目的がそのまま他の研究者に引用されるに至り、空恐ろしさを感じるようになった。

この研究に着手した当時、ロボット分野では産学が乖離し、学術的な研究は盛んだが研究成果の実用化は進まない、という状況が続いていた。その背後には、こうした研究目的の虚構性という問題があると感じられた。また筆者は、それまで産業用ロボットへの関心が薄く、製造業分野を応用先として想定したことがあまりなかったが、それも実用に結びつく研究ができない原因の一つと考えた。こうした問題意識のもとに、ものづくり分野での実用的なロボット研究の課題を模索しはじめた。

## 2.2 へら絞りとの出会い

2001年8月にH2Aロケット1号機が打ち上げに成功し、そのノーズコーンがへら絞りで製作されたことから、へら絞りの作業がテレビで繰り返し放映された。その頃「ものづくり」のブームがあったことも一つの原因である。筆者はそれにより、へら絞りの存在を初めて知り、一種の直観として説明できないが、この研究の着手を決心した。

当初は、産業用ロボットの応用として、先端にローラー工具を取り付けたロボットアームを用いるへら絞り作業(図9)をイメージし、人工の熟練技能工の工学的な実現の一例として構想していた。ロボット工学においては、ロボットアームの力制御が長年にわたり研究され、多くの理論的・技術

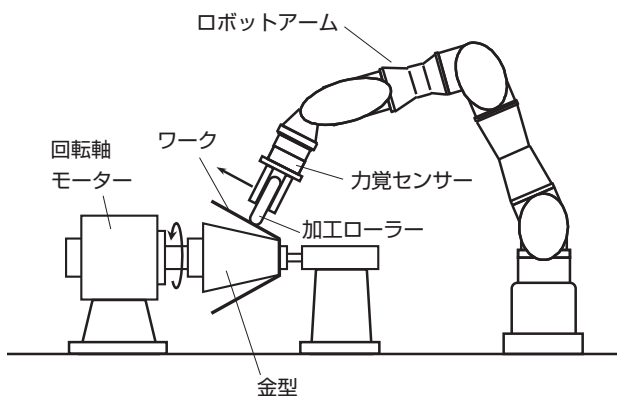


図9 初期の構想（へら絞りロボット）

的な蓄積を有する。しかし、ロボット研究者の製造業離れとも相まって、力制御が実用化されているのは組立・研削等わずかな種類の作業にすぎず、付加価値性の高い有効な応用については、未だに模索の状態にあった。へら絞りでは作業者の感覚、特にローラーを介して伝わる力の感覚が重要な役割を果たす。また局所変形による加工のため、他の塑性加工と比べて加工力のはるかに小さい。制御パラメータが多く加工の自由度が高い点でも、ロボットに適した作業と考えた。手作業による生産がビジネスとして成立していることからわかるように、多品種少量生産かつ高付加価値の加工法であり、ロボット技術を導入した際の採算性は高いと推測した。またこの研究には研究を通じたロボット研究者へのメッセージ発信という裏の意図も込めており、ロボット技術の特長とポテンシャルを活かせる良質な応用領域が、ものづくり分野に開けていることを具体的な応用例をもって示すことで、ロボット研究者の製造業への関心を喚起したいと考えた。

## 3 研究のスタイルと行動原理

### 3.1 ボトムアップの研究スタイル

この研究は、筆者にとってロボット分野から塑性加工分野という異分野への進出であり、予備知識ゼロからのスタートのため、何も分からない状態から手探りで研究を進めていった。そのため前章に述べた研究目標も正しく設定できているとは信じて、あくまで仮のものという前提に立った。したがってトップダウンで目標実現の具体的なシナリオを立て、開発すべき要素技術へとブレイクダウンするという計画駆動的なやり方は選択しなかった。

代わりに、「ロボット技術を応用してスピニング加工に役立つ技術を実用化する」という程度の緩い方向付けのもとで、曖昧な研究目標、仮のシナリオのまま、とりあえず手を動かしてものを作り、随時修正を加えるという戦術をとった。現物を動かすことで、研究の進展、新たな発想、認識の変化、偶然の外部要因等の状況変化が生ずる。それに応じて、目標変更やシナリオ書き換えを常に行う。また、要素技術はその場その場での手持ちのありあわせを使い回し、第一の選択基準は今すぐ手に入って使えることとした。こうしたものを使って開発された技術を、新たに要素技術のストックに加えた。ボトムアップで探索的なアプローチであり、分析的な計画による事前合理性よりも結果のフィードバックによって得られる事後合理性<sup>[7]</sup>を重視した。

### 3.2 研究の方向性と行動原理

基本的な方向性は、実用化の優先で、学術的な興味よりも有用性を第一に考え、さきに述べた研究目的の虚構性を極力排除するよう努めた。また行動原理としては、①ブ

リコラージュ、②三現主義、③営業マインド、の3点に特徴があったと考える。

「ブリコラージュ」bricolage とは、人類学者レヴィ=ストロースが著書「野生の思考」<sup>[8]</sup>の中で創造的な思考活動の原初的な形態として取り上げた概念である。フランス語で「器用仕事」を意味し、持ち合わせの道具や材料を工夫して組み合わせ、自分の手で物を作ることをいう。芸術や教育の分野で注目されることが多かったが、近年、経営学等の分野で、技術経営や知識管理、組織論の立場から、事業創出やイノベーションにおけるブリコラージュの実利的な効用が議論されている<sup>[9]~[14]</sup>。制約された経営資源のもとでの事業創出におけるブリコラージュの役割を論じた文献<sup>[13]</sup>では、ブリコラージュを「新たな問題や機会に対して手持ちの資源の組み合わせを用いて間に合わせること」と再定義している。ここで資源とは、単に道具や材料等の物的資源だけでなく、技術や人材等を含む広い意味に拡張されている。また、ブリコラージュを構成する主要な要素として、1) 目下の問題とは関係なく集められた持ち合わせの資源を利用すること、2) 本来の用途から外れた使い方も含む組み合わせで、既存の資源から新たな価値を生み出すこと、3) 制約を受け入れず、問題に対して積極的行動を指向すること、の3点を挙げている。この研究のスタイルは、意識してブリコラージュを行ってきたわけではないが、上記3点のいずれとも合致していると言える。

三現主義とは、現場・現物・現実の3つの「現」を重んじる考え方である。問題が生じたときに、机上の論理に頼るのではなく、現場に足を運び、現物を手に取って眺め、現実を把握するという基本姿勢であり、ホンダやトヨタをはじめとする日本の企業の多くに行動規範として広く浸透している。こうした考え方は日本ばかりでなく、例えばファーガソンによる「技術屋（エンジニア）の心眼」<sup>[15]</sup>にも三現主義に近い思想が見られる。また文献<sup>[11]</sup>でブリコラージュの成功例として取り上げられた、デンマークの風力タービン開発も現場重視で進められた。三現主義は単なる精神論ではなく、最終結果からのフィードバックの経路を短く、修正のサイクルを速くすることにより、途中で加わるノイズやバイアスを排除する効果をもつ。この研究では探索的な意思決定の場面で、現場・現物・現実に基づく判断を行うことが多かった。ただし、産総研は開発された成果が実際に使われる生産の現場をもっているわけではない。そこでこの研究では、そうした現場に少しでも接近するためのいくつかの工夫を行った。

また研究者とは、無形の財を提供するなりわいである点で、突き詰めればサービス業に属する。サービスは顧客に届いて、はじめて意味をもち価値を生む。そこで、顧客満

足度の向上を研究の価値基準に加え、営業活動も研究のうちという意識をもつように努めた。

## 4 研究の経過

### 4.1 手作りの加工機からの出発

まず、自分で実際にスピニング加工を行うために簡単な加工機（図3）を組み立てるところから出発した。高価な力センサーやサーボドライバーは、昔の装置のジャンクを再利用し、約100万円の材料費で作ることができた。また制御用のパソコンは、他の研究者から中古を譲り受けたものにISAバスの入出力ボードを搭載し、Windows98のDOSモードでTurbo C++を使ってプログラミングを行った。装置を動かすためのプログラムや制御則等も、過去のロボット研究で用いたものを改造して流用した。当時としても時代遅れの構成だったが、1 msecのサンプリングでの実時間制御が十分可能であり、これを用いて力制御を用いたスピニングの基礎実験を進めた。

### 4.2 ロボットアーム応用の挫折

一方、産業用ロボット応用による熟練技能の実現という技術コンセプトは、比較的早い時期に挫折した。ロボットアームを用いて行ったスピニング加工は、剛性不足による振動発生で失敗し、後にも再度挑戦<sup>[16]</sup>するが、実用化につながるような結果はいまだ得られていない。もう一つの問題は、誰がこの技術の顧客となるのかが曖昧なことだった。産業用ロボットメーカーなのか、ロボットを使って加工を行うユーザー企業なのか、スピニング加工機メーカーがロボットアームを使うのか、ということが絞られていなかった。以後は産業用ロボットの応用ではなく、旋盤型の加工機に集中して、従来機の高機能化という形をとる。これにより技術の提供先が加工機メーカーへと明確化した。

### 4.3 技能観の変化による方向転換

また、元旋盤工の作家である小関智弘氏の著作<sup>[17][18]</sup>から、町工場におけるものづくりについて学ぶうち、熟練技能の本質は反復訓練による体技ではなく、創造的な思考プロセスにあることを認識した。人間には人間の技能、機械には機械の技能があり、人間の技能をそのままロボットにコピーすることは意味がない。技能そのものが目的ではなく、それによる製品の付加価値が重要なことから、人間の技能にこだわらず、機械なりの特長を活かせればよいと考えた。

機械を現場で使うのもやはり人間であるから、そこには新たな技術を使いこなす新しい技能が生まれる。力制御スピニングで言えば、どのような押し付け力を設定するかは最終的には現場の経験で決めなければならない。ものづくりにおける熟練は、必ず創造のプロセスを含んでいる。

へら絞りも鍋釜を絞るところから始まったのであって、最初から高度な製品を作る熟練技能が完成していたわけではない。筋力や手技を機械に置き換えたとしても、再現できる技能は固定されたものでしかない。現場で試行錯誤して絶えず技能をレベルアップする人材は、やはり不可欠である。そこで熟練技能者の代替ではなく、人間が使いこなすことで威力を発揮する高度な道具としての装置開発を目指すようになった。

#### 4.4 異形状成形への集中化

一方、最初に作った装置では、力制御スピニングの応用により異形状の成形に成功し、これがこの研究のセールスポイントとして製品イメージの中心となる。その頃、産学官連携部門の協力で、企業との定期的な交流を開始した。スピニング関連を含む数社の企業を招いた研究会で産総研のシーズを紹介する一方、企業側のニーズを聞くことで開発ターゲットをある程度絞込んだ。加工機メーカーの(株)大東スピニングはこの研究会に参加しており、異形状の成形に深い関心を示して共同研究の申し出があった。この提案に基づいて中小企業庁による共同研究予算を獲得し、同期スピニングの実験機(図6)を試作した。

力制御スピニングによる異形状では加工時間の短縮が問題だったが、たまたま訪れた国際ロボット展でリニアモーターを見かけたことから、加工機への利用を考案した。この研究では学会発表よりも特許出願に力を入れていたが、リニアモーターを用いた加工機についての出願がきっかけとなって知的財産部門による特許強化の予算を獲得し、リニアモーター実験機(図4)を試作することができた。

#### 4.5 実用機の普及を目指して

後述する試作トライと展示会での加工実演を繰り返すうち、(株)大東スピニングから知財ライセンス契約の申し出を受けた。これをもとに、特許関連予算により実用機プロトタイプ共同開発を行った(図7)。一方で、筆者自身は2009年に先進製造プロセス研究部門へ異動し、研究の重点をロボットの応用分野開拓から加工技術自体に移すこととなる。(株)大東スピニングでは異形状に対応可能な加工機の受注生産も開始したが、リーマンショック以後の景気停滞で普及は滞っており、打開を模索している。

#### 4.6 シナリオに依存しない研究展開

上記のように研究が進展する経過を辿ると、一貫したシナリオはなく、外部要因や偶然要因によって研究目標が大きく変遷していることが分かる。予算獲得や企業との交流、展示会への出展等のポジティブな外部要因としては、産総研内の産学官連携部門や知的財産部門からの働きかけというケースが多く、これらの研究支援部門がこの研究の進展に果たした役割はとて大きい。またこの研究で

は、工技院時代からの名残でロボット分野と製造分野の研究室がモザイク状態に混在して配置されていたことがプラスに作用し、特に塑性加工分野の知識習得でとても役立った。

### 5 特徴的な研究活動

#### 5.1 ブリコラージュによる構成—ボトムアップの要素技術統合

前章の冒頭で述べた加工機の自作も典型的なブリコラージュだが、この研究では随所でさまざまなレベルのブリコラージュを行っている。要素技術はおおよそ階層構造に整理でき、下位から見て実現すべき機能が上位から見れば要素技術となっている。例えば開始当初は力制御や位置制御を手持ちの要素技術としてもっていた。それらを組み合わせて、加工機の動作としての力制御スピニングや同期スピニングを実現した。次の段階では、それらを要素技術として組み合わせて、実際の部品に対して板材加工やパイプ加工を行った。このように下からの積み重ねで技術をストックした道具箱を充実させていった(図10)。このとき基本要素となっている制御則等は、ロボット分野で行った研究に由来しており、例えば力制御スピニングで用いたインピーダンス制御は、もともと人間とロボットの協調作業の研究<sup>[19]</sup>に用いていた制御則をアレンジして使っている。

加工時間短縮のために採用したリニアモーターも、すぐ入手可能な既存の要素技術である一方、通常の用途とは少し違う使い方をしている。リニアモーターステージは高速・高精度の位置決めデバイスとして使われることが多いが、ここではバックドライバビリティ(力が加わったときに、柔軟にその力に追従して押し戻される特性)が優れた力制御用のアクチュエータとして用いた。資源のもつ属性を読み替えて、意図された機能とは異なる機能をも引き出して使うというブリコラージュの特徴が、ここにも見られる。また、リニアモーターではボールネジ等の伝達機構による損失がないことを利用して、力センサーを用いない開ループ制御で力制御を行っている。これは20年以上前に行った、ダイレ

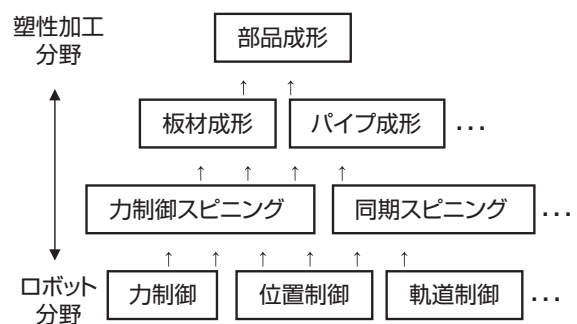


図10 要素技術の階層構造

クトドライブロボット（関節軸に減速機を用いないロボット）による開ループ力制御の経験<sup>[20]</sup>から発想したものである。

（株）大東スピニングとの連携により、現場での使用に根ざした手持ちの要素技術のレパートリーを増やすことができた。実用機プロトタイプの開発では、金属素材を主軸に固定するための心押し棒やブランク受け、素材の板にしわが発生するのを防ぐバックアップローラー等、これまでのスピニング加工機が備えていたさまざまな周辺機能を付加することで、実用性をより高めている。

## 5.2 試作トライによる加工ノウハウの蓄積—現場・現物・現実に近づきたい

この研究では、企業との共同研究を通じた実部品の試作トライが大きな役割を果たしている。生産の現場をもたない産総研にとって決定的に不足するのは、経験の積み重ねに基づく要素技術へのフィードバックである。例えば異形断面形状の成形に成功したといっても、当初は限定された材料と加工条件の下での単純な形状の成形にすぎなかった。これをさまざまな金属材料、加熱下の温間加工、多サイクルの絞りスピニング、段やくびれのある複雑形状等へとバリエーションを広げていかなくてはならない。一方、どの要素を優先して開発を進めるべきかを絞り込まなくては、いたずらに労力を費やす結果となる。開発する価値のあるノウハウをピンポイントで選択して効率良く開発していくためには、企業と連携して、現実の部品を試作することが最も近道である。開発された加工技術は少なくとも類似部品に関しては無駄にならない。手持ちのノウハウを増やし、それらを組み合わせることで多彩な加工に対応することができる。

金属加工業、自動車部品、計測機器、金属材料等多数のメーカーから試作テストの依頼を受け、保有している実験用加工機を駆使して企業から提示された部品の試作を行い、それを通じて加工に必要なノウハウを開発した（図11）。実際のテストはこれまでに10件程度だが、打診のみのケースを含めると30件以上にのぼる。テストには至らな

い場合でも、打ち合わせの過程で、どのような形状にニーズがあるのか把握することができ、とても参考となった。テストでは開発スピードが重要なため、治具や材料等については企業から現物支給を受けた。また、加工機の改良に必要な設計データを取得した。こうした実績を積み種々の加工サンプルを揃えることは、加工法のPRともなった。実際の装置導入には至っていないものの、ユーザー企業から（株）大東スピニングに装置製作の見積り依頼を行うケースも出てきている。

試作トライを通して、材料特性等の塑性加工知識の重要性を再認識した。またユーザーには、装置だけでなく加工ノウハウも提供する必要があることを理解した。試験の積み重ねにより、手持ちの治具の種類が増えてきたため、これまでは難しかった形状や材料にも対応し易くなった。成形する形状は角筒、変形パイプ、湾曲形状等次第に難度の高いものとなっており、扱う材料も種類が増えて、異形部品成形のノウハウの幅を広げることができた。工場の現場に入って加工テストを繰り返すうち、現場知識を取り入れてそれを開発に活かす機会も多い。筆者自身もかなり職人化することで、現場技術者との意思疎通が円滑となった。

## 5.3 営業活動と研究活動の融合

### 5.3.1 展示会における加工実演

この研究では、外部の展示会に加工機を持ち込んだ加工実演を重視しており、現在までに出展回数は11回に上る。成果普及のメディアとしてとても有効であり、潜在ユーザーからのフィードバックを受ける場としても活用してきた。特に工作機械見本市等ものづくりの専門企業が多数出展する大規模展示会では、中小企業の現場作業員から大企業の管理職まで広い範囲のプロフェッショナルに加工を見せて、意見や質問を聞くことができた。とても厳しい意見も含め、実用化のために取り組むべき課題について、学会発表よりもはるかに有益な知見が得られた。試作トライを依頼してきた企業の大半は、展示会で加工実演を見た企業である。一方で、産学連携を目的とした分野不問の展示会では、専門家の来場者比率が少なく、あまりこうした効果は得られなかった。

### 5.3.2 Web利用による営業活動

上記の試作トライと展示会出展も営業活動の一環だが、Web利用を軸とした営業・広報も展開した。研究に着手した時期に、スピニング加工の業態、地域分布、加工例等を学ぶため、Web検索でスピニング加工関連の企業を検索した。国内115社・国外189社の企業が見つかり、開発した技術の受け皿として十分なボリュームをもつ産業であることが確認できた。これを基に「スピニング加工・へら絞りリンク集」というリンク集<sup>[21]</sup>を作成した。各社に対して

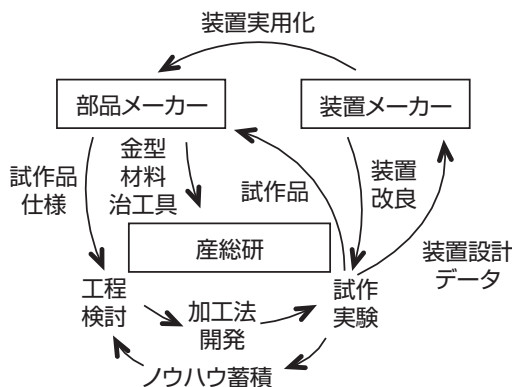


図11 試作トライによる加工ノウハウの蓄積



リンク作成の連絡をすると同時に産総研での研究内容を送付して紹介した。また、企業連絡先をリスト化し、展示会の前には近隣の企業に招待状を送付した。展示会で関心を示した企業には、資料や加工の動画 CD、場合によっては加工サンプルを送る等のフォローアップに努めている。「スピニング加工」で google 検索をかけると第 1 位はこの研究のページで、第 2 位は上記のリンク集（2012 年 1 月までに約 2 万 9 千ヒット）である。このページが入口となったリンク依頼、技術相談、試作問い合わせ等企業からの接触も多い。こうした営業活動も、手持ちの限定された資源を組み合わせることで効果を得ている点で、一種のブリコラージュと言える。もっとも、スピニング業界に広い販路をもつ株大東スピニングと連携してからは、アマチュア的な営業の出番も減ってきている。

## 6 考察と今後の展開

基本的に既存技術で構成されたこの研究の価値は、専門分野のはざまで見落とされたニッチ領域を発見できた点にあると思われる。ロボット分野と塑性加工分野の間の発想のギャップのために誰も着手していないところに、思い切って飛び込んだことが、異形成形のブレイクスルーを生んだと考える。ロボット研究者は製造業への関心が低く、そこでの応用模索を怠り、塑性加工研究者はメカトロニクス知識が壁となって新規な制御技術の適用を敬遠するため、どちらからも空白となっていた所にうまくはまり込んだ形である。

元来ブリコラージュは近代的な科学技術と対立する思考様式として文献<sup>[8]</sup>に登場する。しかしこの研究では、ブリコラージュが研究活動そのものとして重要な役割を果たした。ブリコラージュは既存かつ有限の資源から出発するが、各資源の意味の読み替えにより無限の組み合わせが生じ、新たな価値が創造される<sup>[14]</sup>。新製品の開発においても、本質的に新しい要素技術は通常ほんの一部であり、大半は既存技術で構成されるため、そこにはブリコラージュが要求される。またブリコラージュでは、一般に使い慣れた手に入りやすい構成要素を使うため、信頼性が高く実用化の敷居の低い技術が得られると考えられる<sup>[11]</sup>。

この研究では、当初のシナリオや自己のコア技術に固執せず、臨機応変に外部要因や結果のフィードバックに対応して研究を化けさせていったこと、とりわけ袋小路に陥りそうな方向から迅速に撤退したことが良い結果をもたらした。現場・現物・現実の三現主義が早期の判断の助けとなった。

現時点では経済状況の影響もあって、いまだ実際の生産現場で十分使われておらず、売れる技術になっていない点が極めて不満足である。いわゆる「研究の手離れ」よりも

普及に至るまでのアフターサービスを志向しており、最後まで責任をもちたいと考えている。多品種少量生産に有利といっても加工のスピードは重要であることが企業との交流から理解できたので、今後の展開として、加工機の高速度・強化とそれに伴う課題に取り組みたい。また、マグネシウム等難加工材料への適用にも着手しており、材料学的な知見との融合もさらに必要と感じている。

## 参考文献

- [1] 日本塑性加工学会編: スピニング加工技術, 日刊工業新聞社 (1984).
- [2] 荒井裕彦: ロボットによるスピニング加工の研究-力フィードバック制御を用いたしごきスピニング-, 日本ロボット学会誌, 22 (6), 798-805 (2004).
- [3] 荒井裕彦: ロボットによるスピニング加工の研究-力制御を用いた非軸対称製品の成形-, 日本ロボット学会誌, 24 (1), 140-145 (2006).
- [4] 荒井裕彦: リニアモータを用いた力制御スピニング加工機, 日本ロボット学会誌, 26 (1), 49-56 (2008).
- [5] 荒井裕彦, 藤村昭造, 岡崎功: 同期スピニング加工による非軸対称断面管の成形, 第56回塑性加工連合講演会講演論文集, 687-688 (2005).
- [6] 荒井裕彦ほか: 異形断面形状が成形可能な力制御スピニング加工機, 日本ロボット学会誌, 28 (1), 49-50 (2010).
- [7] 林晋, 黒川利明: 二つの合理性と日本のソフトウェア工学, 科学技術動向, 42, 11-21 (2004).  
[http://www.nistep.go.jp/achieve/ftx/jpn/stfc/stt042j/0409\\_03\\_feature\\_articles/200409\\_fa01/200409\\_fa01.html](http://www.nistep.go.jp/achieve/ftx/jpn/stfc/stt042j/0409_03_feature_articles/200409_fa01/200409_fa01.html)
- [8] C. レヴィ=ストロース(大橋訳), 野生の思考, みすず書房, 22-28 (1976).
- [9] K. E. Weick: *Making sense of the organization*, Wiley-Blackwell, 57-68 (2000).
- [10] C. Ciborra: *The labyrinths of information: Challenging the wisdom of systems*, Oxford University Press, 29-53 (2002).
- [11] R. Garud and P. Karnoe: Bricolage versus breakthrough: Distributed and embedded agency in technology entrepreneurship, *Research Policy*, 32 (2), 277-300 (2003).  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733302001002>
- [12] T. Baker, A. Miner and D. Eesley: Improvising firms: Bricolage, account giving and improvisational competency in the founding process, *Research Policy*, 32 (2), 255-276 (2003).  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733302000999>
- [13] T. Baker and R.E. Nelson: Creating something from nothing: Resource construction through entrepreneurial bricolage, *Administrative Science Quarterly*, 50 (3), 329-366 (2005).  
<http://asq.sagepub.com/content/50/3/329>
- [14] 三宅秀道: ブリコラージュと製品開発, 東海大学紀要政治経済学部, 43, 161-175 (2011).  
[http://www.u-tokai.ac.jp/undergraduate/political\\_science\\_and\\_eco/kiyou/index/pdf/2011/12\\_mitake.pdf](http://www.u-tokai.ac.jp/undergraduate/political_science_and_eco/kiyou/index/pdf/2011/12_mitake.pdf)
- [15] E.S. ファーガソン: 技術屋(エンジニア)の心臓, 平凡社 (1995).
- [16] A. Ozer and H. Arai: Robotic metal spinning – Experimental implementation using an industrial robot arm, *Proc. 2009 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2009)*, 140-145 (2009).
- [17] 小関智弘: 町工場 世界を超える技術報告, 小学館 (1999).
- [18] 小関智弘: 鉄を削る-町工場の技術, 筑摩書房 (2000).
- [19] 田窪朋仁, 荒井裕彦, 谷江和雄, 林原靖男: 人とロボットに

よる長尺物の協調運搬(仮想非ホロノミック拘束による水平面内の制御手法), *日本機械学会論文集C編*, 66 (648), 2677-2684 (2000).

- [20] 荒井裕彦, 館暉: 直接駆動マニピュレータの人力操作における操作力検出と能動的力補助, *日本ロボット学会誌*, 4 (3), 209-219, (1986).
- [21] 荒井裕彦: *スピニング加工・へら絞りリンク集* (2003). [http://staff.aist.go.jp/h.arai/splink\\_j.html](http://staff.aist.go.jp/h.arai/splink_j.html)

## 執筆者略歴

荒井 裕彦 (あらい ひろひこ)

1982年東京大学工学部卒業。同年本田技研工業(株)勤務。1984年通産省工技院機械技術研究所入所。2001年産業技術総合研究所知能システム研究部門技能・力学研究グループ長。2003年同部門副部門長付主任研究員。2009年先進製造プロセス研究部門難加工材成形研究グループ主任研究員。2005年より筑波大学大学院システム情報工学研究科教授(連携大学院)兼任。博士(工学)。日本機械学会フェロー、日本ロボット学会フェロー。日本塑性加工学会、IEEEの会員。この研究では着想から装置開発、加工実験、営業活動までを担当。



## 査読者との議論

### 議論1 第4章の構成

質問(長谷川 裕夫:産業技術総合研究所つくばセンター)

研究の成果をまとめた第4章の部分は、ロボットアーム適用の挫折から、熟練技能の代替というロボットの発想ではなく高度な道具を目指し、加工機の改良のアプローチによる成功、さらに高付加価値製品製造を可能とする力制御スピニングの開発に至る、この論文における独自の研究開発の流れが明確になるよう構成してください。

回答(荒井 裕彦)

第4章をいくつかの節に分割してタイトルを付け、ある程度のみより毎に意味を与えました。第4章で最も言いたいことは、「研究が進展する経過をたどると、一貫したシナリオはなく、外部要因や偶然要因によって研究目標が大きく変遷している」という点でした。それがこの研究でとったボトムアップで探索的なアプローチと密接に関連しています。そこで、研究開発の過程でいくつかの事柄が複線的に流れながらいろいろな事象がランダムに起きて、そのつど臨機応変に対応していくという、混沌とした研究経過の現実の姿をなるべく反映させるような記述を採りました。

### 議論2 第5章の構成

質問(長谷川 裕夫)

第5章は、第3章で述べた行動原理の具体的な記述となっています。プリコラージュ、三現主義、営業マインドの3つの原理に対応させて、節とそのタイトルを構成してください。また、研究開発におけるプリコラージュの部分では、理解を助けるための図がある方がよいと思われます。

回答(荒井 裕彦)

第5章の各節のタイトルを、「5.1 プリコラージュによる構成 - ボトムアップの要素技術統合」、「5.2 試作トライによる加工ノウハウの蓄積 - 現場・現物・現実に近づきたい」、「5.3 営業活動と研究活動の融合」として、第3章で述べた行動原理のそれぞれが第5章の活動のどこに現れているかが明確になるように構成しました。また、プリコラージュによる構成の説明用として「要素技術の階層構造」を示す図を追加しました。

### 議論3 この開発技術の達成レベル、ブレイクスルー

質問(松木 則夫:産業技術総合研究所四国センター)

第1章の開発技術の概要において、達成された技術レベルの自己評価をしてください。開発された技術が、例えばこれまでの熟練者によるへら絞り加工等と比較してどうなのか、精度、加工速度、制限事項等の項目について検討をお願いします。また、今回開発された技術しかできないブレイクスルーがあれば、記述してください。

回答(荒井 裕彦)

第1章に、「これらにより、これまでの丸物用のスピニング加工機ではもちろん、熟練者によるへら絞りでも不可能だった異形状の成形に対応できるようになった」という記述を追加し、この開発技術がこれまでの加工技術にない優位性をもつことを明らかにしました。この開発技術で一番のブレイクスルーと考えられる異形状成形に関しては、スピニングという同じ土俵の上では直接比較する対象がありません。プレス加工との比較として、「現状では1個あたりの加工時間が数十秒~数分程度かかるため大量生産にはやや不向きですが、」という表現を追加しました。

### 議論4 ブレイクスルーを生み出した研究開発の流れ

質問(松木 則夫)

この開発技術のブレイクスルーや特徴的な技術が、どのような研究スタイル、行動原理により得られたのか、という視点で、第3章、5章を対比する形で記述していただくと分かりやすくなると思います。同様に、第4章では、新たに達成された技術がどうして起こったのか、という視点を強調していただきたいと思います。

回答(荒井 裕彦)

第3章、第5章の活動は、第1章に述べたブレイクスルーを得るためというよりも、ブレイクスルーを現実解に落とし込んで、使ってもらえる形にするための努力のほうにウエートを置いています。第3章で述べた行動原理のそれぞれが第5章の活動のどこに現れているかが明確になるように第5章の各節のタイトルを修正しました。

第4章では、「研究が進展する経過をたどると一貫したシナリオはなく、外部要因や偶然要因によって研究目標が大きく変遷している」という点を最も述べたかったため、いくつかの事柄が複線的に流れながらいろいろな事象がランダムに起きて、そのつど臨機応変に対応していくという、混沌とした研究経過の現実の姿をなるべく反映させるような記述を意図的に選びました。新たに達成された技術が得られた要因は、むしろ第6章で述べた「専門分野のはざまで見落とされたニッチ領域を発見できた」ということが最も大きいと思われるので、その部分の記述を強調しました。

# 科学技術政策と構成学、 その具体化と価値への“つながり”

第4期科学技術基本計画では、グリーン・イノベーションやライフ・イノベーションのように「課題解決型」のイノベーションの創出が目指されています。科学技術振興機構社会技術研究開発センター（JST-RISTEX）では、この方向に沿って研究成果の社会での実装までを目指した種々の研究開発プログラムを推進しています。この考え方は、シンセシオロジーにも共通する考え方なので、座談会においてセンター長の有本建男さんにその考え方をお聞きしました。

シンセシオロジー編集委員会



## 座談会出席者

- |       |                            |
|-------|----------------------------|
| 有本 建男 | 科学技術振興機構社会技術研究開発センター センター長 |
| 小林 直人 | 産総研（シンセシオロジー副編集委員長）        |
| 赤松 幹之 | 産総研（シンセシオロジー編集幹事）          |

**小林** 昨年、平成23年度から27年度を対象とした第4期科学技術基本計画が策定されました。東日本大震災を始めとする日本の危機や世界規模のさまざまな課題を踏まえ、目指すべき国の姿を実現するための科学技術政策の基本方針をうたっています。有本さんは国あるいは大局的な科学技術政策をご覧になっている立場から精力的にご発言されておられますが、まず第4期科学技術基本計画を中心に、今後の内外の科学技術政策の動向について、今までのご経験やお考えをお聞きたいと思います。

## 第4期科学技術基本計画の特徴「課題解決型研究重視の意義」

**有本** 科学技術基本法が与野党全会一致で成立したのが1995年ですが、背景には今ほどではなかったにせよ、グローバル化が進む中、急激に日本の競争力が落ちているのではないかという危機感があったわけです。1期から3期の15年間は、日本の科学技術政策を重点化するためバイオ、IT、ナノテク等の分野の重視ということで時代的な価値はあったと思いますが、時代が変わり社会情勢が変わっていろいろな欠陥も見えてきたため、第4期では課題解決、イシュードリブンを重視するという方向になりました。通常ベースでは平成23年3月末の閣議決定だったのですが、東日本大震災を受けて見直した結果、ますま

すデマンドドリブンあるいはソリューションオリエンティッドにウエイトがかかってきたと思います。これは世界的なトレンドでもあります。世界の科学技術政策は、上流側の研究開発重視の政策から下流側も含めて、“バリュー”をどうやって創出できるかという、イノベーション重視へドライブがかかっています。

もう一つ、第4期基本計画では、「社会と科学技術の関係深化」「実効性のある科学技術イノベーション政策の推進」を挙げています。一方で、上流側の基礎科学や基礎研究のサポートは大丈夫なのか、多様性・豊穡性が維持されるのか、ということについては、大切な視点です。

**小林** 第2期ではライフサイエンス、情報通信、環境分野、ナノテクノロジー・材料分野を重点4分野として優先的資源配分を行い、第3期ではこの重点4分野における選択と集中に加えて、国家基幹技術、課題解決型研究開発、新興・融合領域への対応等が重要政策とされました。FIRST（最先端研究開発支援プログラム）の採択結果を見ても、ナノテクノロジーやライフサイエンスに重点的な投資がされた影響が出たかなという印象がありますが、第4期のライフイノベーション、グリーンイノベーションの推進や、科学技術イノベーションの推進に向けたシステム改革への“つながり”については、いかがでしょうか。

**有本** 一般論ですが、この間論文はたくさん生産されたと思います。ご指摘の“つながり”という意味は、最後の価値の創造に向かってきちんと動いているか、ということだと思いますが、そこは決してうまくいっていないと私は思います。それは総合的問題で、科学コミュニティー、ファンディング、ポリシー、それから企業の責任もあるでしょうし、人の能力や意識、教育、将来のキャリアアップの道があるのか、にもつながるでしょう。

**赤松** Synthesiology は構成・統合の Synthesis と学の -ology をつなげた造語なのですが、“つなぐ”ということが一つのキーワードかもしれません。研究者は、これまで優れた研究成果を出せばいいと考えがちでしたが、その研究成果を社会の価値として“つなげる”ことが大切です。どのようなアプローチをとればその研究成果を社会で活かすことができるかというシステムづくりを考えること、そしてそのシステムの中で動く「人」を育てることが必要だと思うのです。

**有本** 多様性をもって裾野を広くサポートしているか、あるいはそれを審査した上で研究の段階に応じたサポートをしているかについては、大学の研究・教育、それから各ファンディングプログラムについて、役割、構造を共有することが大切です。基礎科学のフェーズ、キュリオシティ・ドリブン・フェーズがあり、それからミッションオリエンティッド基礎、さらに応用・プロトタイプ開発の段階がある。ファンディングの規模の大きさもステージに応じて異なる。こうしたイノベーションのプロセスや構造が科学者・技術者、行政・政治の中で共有されていないと思います。

#### 諸外国の科学技術政策・推進活動の動向

**小林** イノベーションの推進に向けたシステムあるいは構造が、日本の中で理解されていないというお話でしたが、これは日本に限ったことでしょうか。海外の状況についてはいかがですか。

**有本** いや、日本ほどではありませんが、各国ともに科学技術政策から科学技術イノベーション政策に思い切りウィングが広がっていますし、目指す価値が多様化する中でそのためのファンディング・マネジメントやレビュー、人の養成の仕方等、特に先進国は悩みながら今新しいシステムを作ろうとしています。どのように自分達の競争力を保持できるか、あるいは一般市民の生活の質を維持するための科学技術を持続的に発展させるかという視点が重要です。

強調したいのは、ファンディングが大変重要な役割を果たすことです。ファンディングというのは、もともと1930年くらいからグラントやコントラクトの制度が開発され、研究所や大学の境界を破って、研究者・技術者を集めて、研究や技術的問題を解いていく仕組みを整備し成熟していったのですが、今、この原点に戻って新しいモデルを作る必要があると考えています。

**小林** 1930年代のお話がありましたが、アメリカはマンハッタン計画で「科学者を国家的に動員してやるとすごいことができる」ということを経験して、それが戦後、DARPA型という一つのモデルになったと思いますが、今また課題解決のために科学者は垣根を越えて協力すべきだ、という方向へドライブしようとしているということでしょうか。

**有本** そのとおりです。今、各国でファンディングの仕組みを変えようとしています。上流側はかなり成熟していますが、下流側のバリューに向けての仕組みがとても弱い。アメリカはDARPA型の仕組みをいろいろな役所でつくろうとしています。エネルギー省におけるARPA-E（先端研究プロジェクト庁）の設置もその一例です。

各国の例を少し申し上げますと、フランスは数年前、ANR（フランス国立研究機構）という競争的資金のファンドができて、けっこう大きな金額になっています。スウェーデンもVINOVVA（イノベーションシステム開発庁）をつくりましたし、イギリスは古典的にリサーチ・カウンシルが強いですし、ドイツはマックス・プランク（学術振興協会）はベ-



赤松 幹之氏



有本 建男氏

シックですが、フラウン・ホーファー（協会）の取り組みはイノベーションシステムとして興味深いですね。

### 将来の科学技術へのファンディング戦略

**小林** 「ファンディングが大切」とおっしゃったのは、我々のようにファンディングに応募する側からいうと全くそのとおりで、マッチしたプロポーザルを作って、その中でいいものが通るわけですから、ファンディングをいかに戦略的に作るか、ということが政策にとって重要だということになりますね。

**赤松** ファンディングの重要性とともに忘れてはならないのは、誰が、どのようにプロポーザルをレビューするのか、ということだと思うのです。つまり、「アナリシスではないレビューは可能なのだろうか」ということを小林さんとよく議論しているのですが、ファンディングに採択されるためにいい点をとろうとすると、アナリシスに耐えられるような内容になりがちになります。

**有本** そこはファンディングをデザインするときの目標にはっきり入れないといけないでしょうね。ピアレビューだけで選べば、保守的になりがちですが、アメリカではプログラムオフィサー（PO）・プログラムディレクター（PD）が10年後のその分野の発展方向への洞察をもとにある程度の裁量権をもっています。先進国にこのような危機感があるのは、各国とも今後、財政悪化に陥る中で研究開発費はほとんど伸びない、あるいは減少する中で、効果的にファンドを使って成果を出していくためには今のシステムを変え、人材確保を維持しなければいけない、という状況に直面しているからです。その危機感が私は日本にあまり共有されていないと思います。

**小林** アメリカの場合、NSF や NIH で PD・PO は専門的に育っていると聞いています。しかし、日本はそういう人材を育てるシステムがなかったような気がするのです。1970



小林 直人 氏

年～80年代の日本が右肩上がりの頃は、その役割は科学技術庁や通産省の技術系の役人がやっていたのでしょうか。

**有本** かなり大きいプロジェクトはやっていたのだと思います。役人が1～2数年で担当が変わってもそれができたのは、キャッチアップでモデルがあったからでしょう。まねすれば良かったわけですから。しかし、日本の位置が変わって、今は専門家がやらなければだめです。そういうプロフェッショナル集団を日本はリスペクトしてこなかった、あるいは人材育成しなかったことが、大きな転換期の今、深刻になっているのだと思います。

日本では、研究をする人とお金を配る人、大学においても教官と管理する人に二分化しており、両方を“つなぐ”人、媒介する者が、気付いてみたらほとんど育っていなかった。サイエンスコミュニケーターも含めて、そういう方々が職業として安定的に仕事ができるような仕組みになっていないですね。

**小林** 日本でも新たな政策形成プロセスの構築に向けて「科学技術イノベーション政策のための科学」を担う政策担当者および研究者の育成が大切であると言われていま

**有本** 日本も今まで科学技術の政策づくりを総合科学技術会議を中心にやってきましたが、エビデンスベースといえるか最終的に政治家が決めるのだけれども、いろんな政策的分析を統合して、ポリシーデザインして、政策のオルタナティブを出していくところのプロセス、それから“人”あるいは“方法論”をしっかりとすることが、これから大事だと思います。

**小林** アメリカではNSFがSciSIP (Science of Science and Innovation Policy) を助成する等していますが、アメリカはその面はやはり進んでいるのでしょうか。

**有本** アメリカも悩みを抱えているようです。Science of Science Policy のファンドを作って5年になるのですが、アナリティカルな経済学的手法にずっと予算がいつてしまっていて、これはまずいという反省がだいぶあるようです。2012年のAAAS年次総会で日本のSciSIPを紹介した際、科学技術政策の重鎮 Lewis Branscomb (元ハーバード大学教授) が「ハーバード大学行政大学院では、政策分析(policy analysis) と政策設計 (policy design) のバランスをとることを主張してきたが、いまだに analysis が多く決着してい

ない」と述べています。これは大変印象に残る発言でした。欧米の SciSIP 関連の大学のプログラムを見ても、さまざまなものがあり、まだ日本が努力して国際的に通用するプログラムを作る余地は十分あると見ています。

### 社会技術研究開発センターの活動とシンセシオロジー

**小林** 社会技術研究開発センター (RISTEX) では、サイエンス・フォー・サイエンスイノベーションのためのファンディングなり、あるいはプログラム・フォーメーションを実際にやっておられると思うのですが、そのあたりの状況を教えてくださいいただけますか。

**有本** RISTEX の理念的基礎はブダペスト宣言 (21 世紀の科学の責務：「知識のための科学」に加えて「平和のための科学」、「技術的發展のための科学」、「社会における、社会のための科学」) です。この宣言を基に、2000 年に「社会技術の研究開発の進め方に関する研究会」(吉川弘之座長) は「社会の問題の解決を目指す技術」「自然科学と人文・社会科学との融合による技術」「市場メカニズムが作用しにくい技術」の 3 つの意見を提言しました。それを受けて社会技術研究システムが設置され、2005 年に社会技術研究開発センターに組織・名称が改組されました。実は、最初の 5 年間は方法論が未成熟であった通常の研究助成でやっていたので、論文は出るけれども、社会問題の解決という当初目的と違うのではないかとのおきびしい批判が出ました。そこで、5 年前から領域設定の仕組みも変える、審査の基準も変える、それからマネジメントのやり方、評価のやり方も変えるということでやってきました。今はやっとうまくいった方法がかなり成熟してきたと思います。

**小林** RISTEX の研究プロジェクトは全国で展開しているようですが、興味深い例を挙げていただけますか。

**有本** 例えば、平成 19 年度採択の「子どもの被害の測定と防犯活動の実証的基盤の確立」は代表者が科学警察研究所の部長さんなのですが、「子どもへの犯罪防止は科学的データはないし、ケースが積み上がって進化するようになっていない。昔ながらの刑事の「足で稼ぐ、勘でやる」、これを科学的にやりたい」ということで、地域に協力していただいて、データを集めて、危険な箇所等がわかってきました。昨年、国際犯罪学会が神戸で開かれたのですが、事例発表をしてとても反響を呼びました。

もう一つ、これは公募でないと取り上げられなかったと思うのは、20 年度に採択された「犯罪から子どもを守る司法面接法の開発と訓練」です。代表者が北海道大学の心

理学の先生ですが、子どもが犯罪に遭ったときに、最初に誰が子どもからその状況を聞くか。例えば、こわもての警察官が聞いたり、どういう手法で聞くかということで、子どもが真実をしゃべらない、あるいは恐れてあまり言わなくなる。そこで児童相談所と組んで、手法の開発や地域の児童相談所の人たちへ訓練することをしました。この方法が今は全国に広がり始めています。これは良かったですね。

他に、「地域に開かれたゲノム疫学研究のためのながはまルール」は代表者が長浜市の職員の方です。長浜市に大学から、市民層をゲノムの疫学研究の対象としたいという提案があったようなのですが、委員会をつくって大学側の研究者と市、それから仲介者が議論して、条例ができました。これを持続して実施するために NPO をつくろうということになった。

このように、一つ一つにストーリーがあるのです。“物語性”をどうやって一般化するかが大事だと言われますが、自分がやってみて、しみじみそう思います。抽象化するには多くの事例と科学的方法が要るのですが、まず一つ一つの事例の現場の実情をよく知り把握することが大切です。

### シンセシオロジーが目指す社会における研究成果活用との接点

**赤松** 問題を探索・抽出し、研究開発を進め、プロトタイプまでつくる。小さく、あるところでやるということまでは、大変でしょうけれども、たぶんできる。では、それを今度は社会実装していくためには、たぶん 3 年ではできなくて 5 年くらいかかるでしょう。できて、見せることができると、「良かったね」というふうになって次のステップが上がっていく。その“からくり”がどうしても必要になってくると思うのです。

**有本** おっしゃるとおりです。あるところでやったものを他のところで展開するという事は、同じようなサイズの地域ぐらいたったらできるでしょう。それを広域まで広げるといことは、どうやっていいか一つの試金石になるかなと思ったのは、吉川弘之先生が言われていたのですが、3.11 の震災後、多くの若い研究者やポスドクを震災地に派遣するようなフェロウシップ体制をつくると、新しい発想が出てくるのではないかと。これ、大切な示唆と思っています。

**小林** プロトタイプを社会に実際に適用するためには、これらをいかに学として表現するか、という取り組みが必要になります。『シンセシオロジー』はそこから出発したところがありまして、吉川先生が産総研に来られて、第 1 種基礎研究、第 2 種基礎研究、製品化研究をコヒーレントに

行う本格研究が大事ですとおっしゃった。第1種基礎研究は、これまでのピアレビューで評価されるようなアナリティカルな研究が中心ですが、我々は「第2種基礎研究」を軸に、シナリオに基づいて異なる分野の知識を幅広く選択し、構成・統合する研究を推進したいと考えているのですが、それを成果として発表し、学として評価する場がないのではないかと、自分達で作ったのがこの『シンセシオロジー』です。ですから、一番大きなコンセプトは、「社会のために」ということですが、有本さんがおっしゃったように、どうやってシナリオを描き、社会への実装につなげていくかが、最も重要です。

ただ、このジャーナルはあくまでも -ology-、“学”ですので、スタートは研究者のキュリオシティドリブンであっても、それがどう社会につながるか、というところをきちんと述べ、シナリオを描き、そのためにどのような要素技術を選択したか、その要素間の関係と統合、そして将来の展開を学術論文として書いていただいています。今日のお話を聞くと、科学技術振興機構（JST）なり、RISTEX でおやりになっている仕事も『シンセシオロジー』とつながるところがあるのではないかな、という気がしたのですが。

**有本** とてもつながると思います。『シンセシオロジー』の「発刊の趣旨」はとても緻密に書かれている。これから一種の学問としてちゃんと成熟させ、認知させていくことが大事です。しかし、一方では、常に学問はドメインをつくと他を排除しようとする。ですから、『シンセシオロジー』も RISTEX も賛同してくれる仲間やコミュニティーを増やすことが大切ですね。

**赤松** RISTEX は、社会や自然を観察し、地域のニーズや社会的な問題を把握する「観察型科学者」と、問題解決のための方法論や制度設計を提案する「構成型科学者」、そして社会の中の「行動者」と「科学者」の連携を目指すとあります。その構成型の研究をできる人達のキャリアパスをどうするかというところの問題と、「社会のための科学」は密接に絡んでくると思うのです。

**有本** そうですね。先ほどの「政策のための科学」をする人たちの多くも構成型科学者とかかなり類似していると思いますが、そのときのキャリアパスはとても心配しています。

**小林** まさに「社会のための科学」ということですね。

**有本** 産総研は昨年、研究・技術計画学会において構成学ワークショップをされましたが、ああいう形で外に出て

活動されるのはとても大事だと思います。それぞれが独立性を維持しながら、共に創るという、“コクリエーション”。私は社会技術の取り組みにおいて、この“共創”がキーワードになると思っています。

これは運動だとも思っています。この運動をそれぞれ個別にやってきた、産総研の『シンセシオロジー』、RISTEX は具体的な事例の実践が主ですけれども、それぞれがメタフェーズで方法論をまとめようというフェーズにきています。ケースを集めることが大事です。継続して積み上がっている事例をある一定の軸でまとめられるといいと思います。

それから、『シンセシオロジー』では査読者の名前や議論をオープンにしていますが、これは新しい方法論や評価の軸が発展するためにとても大事です。とてもいいことをやっておられる。ぜひ続けてほしいと思います。

**赤松** 査読者はその分野がわかる人と分野外から選ばれますので、ピアレビューの査読にならないということが特徴の一つです。

それから、先ほど人材のキャリアパスの話が出ましたが、これは重要なことだと思います。

**有本** そうです。やはり人材です。RISTEX には、1テーマに一人のポストドクあるいは若い研究者がいるとして、100人近くになります。印象に残っているのは、群馬大学の先生が「津波災害総合シナリオ・シミュレータ」を開発して、住民への意識啓発活動や小中学生の防災教育訓練を継続されていたのですが、その活動拠点の一つが釜石市です。「津波のシミュレーションに頼るな。自然はそれを乗り越えることが往々にしてある」と言われていたのですね。そこまで行動の原理を埋め込まれていたから子ども達が自分たちで判断して逃げた。だから、ほとんどの子供達が助かった。

これですよ。最後は“人”になります。社会実装にウエイトをかけている人は、論文生産とは目標が違うわけです。論文ではない、「いざとなったときに一人でも助けたい」。伝統的な近代科学のディシプリンベースの研究者は、そんなことは言いません、自分を否定することになるから。ただ、アクションリサーチが中心の研究活動をしている多くの若手研究者が悩んでいるのは、論文が書けない、ということです。だからこそ、この『シンセシオロジー』ができたのでしょね。

**赤松** ええ、確かに社会実装に関連することは論文には書きにくいです。そういう受け皿として『シンセシオロジー』があると思うのです。

## 工学部の教育を論文至上主義から価値至上主義へ

**小林** 本来、工学は、社会の役に立つものをつくること、だったと思うのです。ところが、工学も科学になってしまっ  
て、どんどんアナリティックな方に行っています。

一つの例ですが、大学で建築学科がありますけれども、論文をたくさん書いている先生より、よい建築作品を残せる人の方が評価が高いのですが、それだけではいわゆるディシプリンから言うとなかなか難しい。我々は、それ自体を成果としてちゃんと出せるような論文誌をつくらうということ  
で始めたのです。

**有本** 今、小林先生がおっしゃったことはとても大事で、これは吉川先生が最近提唱されていますけれども、工学部の教育、訓練の方法を変えないといけないということで、「論文至上主義から価値至上主義に行く」ということです。そのためには工学部のカリキュラムを変えることが必要ではないかと。JABEEが2005年にワシントンアコードに加盟するとき、日本に国際調査団が審査に来て、その報告書にははっきり書いてあるので私はびっくりしました。「日本の工学教育はおかしい。システムやデザインを教えていない。トレーニングしていない」とあるのです。明治の初めの工部大学校のときには基礎、実学、訓練と世界に冠たるサンドイッチ方式の工学教育をやったのに。

その一つの大きな要因は、あまりにみんなが隘路に入っ  
てしまって、ディシプリンベースになっていて、市民が欲していること、あるいは政策が欲しているオーバーオールな、

それこそシンセサイズされた政策提言なり、あるいはシンセサイズされた知識や技術、例えば、福島は今後どうなっていくのだ、というようなことを科学的知識をベースにほとんど語れないということでもあると思うのです。去年の3月11日以来の日本の科学者、技術者、その集団の世の中に対する対応、あるいは政策に対する対応は、あまりにも社会からの期待とはかけ離れている。市民には、それが見えているわけです。科学不信が拡大しています。これは何とかしなければいけない。

**小林** 我々科学者が何かできるのか、そして『シンセシオロジー』はどんな貢献ができるのかを含め、これからも考えていきたいと思います。本日は、どうもありがとうございました。

この座談会は、2012年2月27日に東京都千代田区にある(独)科学技術振興機構(JST)社会技術研究開発センター(RISTEX)において行われました。

## 略歴

有本 建男(ありもと たてお)

1974年京都大学大学院理学研究科修士課程修了、科学技術庁入庁。内閣府大臣官房審議官(科学技術政策担当)、文部科学省科学技術・学術政策局長等を経て、2006年から(独)科学技術振興機構社会技術研究開発センターセンター長、研究開発戦略センター副センター長を兼務。政策研究大学院大学、同志社大学、早稲田大学、東京理科大学客員教授。著書に「グリーン・ニューデールーオバマ大統領の科学技術政策と日本」(共著、丸善プラネット、2009)、「科学技術庁政策史—その成立と発展」(共著、科学新聞社、2009)等。



# 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

## 1 投稿記事

原則として、研究論文または論説の投稿、および読者フォーラムへの原稿を受け付ける。なお、原稿の受付後、編集委員会の判断により査読者と著者とで、査読票の交換とは別に、直接面談（電話を含む）で意見交換を行う場合がある。

## 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。読者フォーラムへの原稿は、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読者への有益な情報提供などとし、1,200文字以内で自由書式とする。論説および読者フォーラムへの原稿については、編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

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、英文の場合は刷り上で同程度（3,400ワード程度）とする。

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

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

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

### 3.3 書式

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

#### 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 広報部広報制作室内

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 広報部広報制作室内

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

## MESSAGES FROM THE EDITORIAL BOARD

There has been a wide gap between science and society. The last three hundred years of the history of modern science indicates to us that many research results disappeared or took a long time to become useful to society. Due to the difficulties of bridging this gap, it has been recently called the valley of death or the nightmare stage <sup>(Note 1)</sup>. Rather than passively waiting, therefore, researchers and engineers who understand the potential of the research should be active.

To bridge the gap, technology integration <sup>(i.e. Type 2 Basic Research – Note 2)</sup> of scientific findings for utilizing them in society, in addition to analytical research, has been one of the wheels of progress <sup>(i.e. Full Research – Note 3)</sup>. Traditional journals, have been collecting much analytical type knowledge that is factual knowledge and establishing many scientific disciplines <sup>(i.e. Type 1 Basic Research – Note 4)</sup>. Technology integration research activities, on the other hand, have been kept as personal know-how. They have not been formalized as universal knowledge of what ought to be done.

As there must be common theories, principles, and practices in the methodologies of technology integration, we regard it as basic research. This is the reason why we have decided to publish “*Synthesiology*”, a new academic journal. *Synthesiology* is a coined word combining “synthesis” and “ology”. Synthesis which has its origin in Greek means integration. Ology is a suffix attached to scientific disciplines.

Each paper in this journal will present scenarios selected for their societal value, identify elemental knowledge and/or technologies to be integrated, and describe the procedures and processes to achieve this goal. Through the publishing of papers in this journal, researchers and engineers can enhance the transformation of scientific outputs into the societal prosperity and make technical contributions to sustainable development. Efforts such as this will serve to increase the significance of research activities to society.

We look forward to your active contributions of papers on technology integration to the journal.

“*Synthesiology*” Editorial Board

- Note 1** The period was named “nightmare stage” by Hiroyuki Yoshikawa, President of AIST, and historical scientist Joseph Hatvany. The “valley of death” was by Vernon Ehlers in 1998 when he was Vice Chairman of US Congress, Science and Technology Committee. Lewis Branscomb, Professor emeritus of Harvard University, called this gap as “Darwinian sea” where natural selection takes place.
- Note 2** *Type 2 Basic Research*  
This is a research type where various known and new knowledge is combined and integrated in order to achieve the specific goal that has social value. It also includes research activities that develop common theories or principles in technology integration.
- Note 3** *Full Research*  
This is a research type where the theme is placed within the scenario toward the future society, and where framework is developed in which researchers from wide range of research fields can participate in studying actual issues. This research is done continuously and concurrently from *Type 1 Basic Research*<sup>(Note 4)</sup> to *Product Realization Research*<sup>(Note 5)</sup>, centered by *Type 2 Basic Research*<sup>(Note 2)</sup>.
- Note 4** *Type 1 Basic Research*  
This is an analytical research type where unknown phenomena are analyzed, by observation, experimentation, and theoretical calculation, to establish universal principles and theories.
- Note 5** *Product Realization Research*  
This is a research where the results and knowledge from *Type 1 Basic Research* and *Type 2 Basic Research* are applied to embody use of a new technology in the society.

Edited by *Synthesiology* Editorial Board

Published by National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

*Synthesiology* Editorial Board

Editor in Chief: S. ICHIMURA

Senior Executive Editor: N. KOBAYASHI, M. SETO

Executive Editors: M. AKAMATSU, M. TANAKA, H. TATEISHI, Y. HASEGAWA, K. NAITO, H. TAYA

Editors: H. AKOH, S. ABE, K. IGARASHI, H. ICHIO, K. UEDA, A. ETORI, K. OHMAKI, Y. OWADANO,  
M. OKAJI, A. ONO, A. KAGEYAMA, T. KUBO, K. SAKAUE, T. SHIMIZU, K. CHIBA,  
E. TSUKUDA, S. TOGASHI, H. NAKASHIMA, K. NAKAMURA, Y. BABA, J. HAMA, K. HARADA,  
Y. HINO, N. MATSUKI, K. MIZUNO, Y. MITSUISHI, N. MURAYAMA, M. MOCHIMARU,  
A. YABE, H. YOSHIKAWA

Publishing Secretariat: Publication Office, Public Relations Department, AIST

Contact: *Synthesiology* Editorial Board

c/o Website and Publication Office, Public Relations Department, AIST

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

Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212

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

URL: <http://www.aist.go.jp/synthesiology>

\*Reproduction in whole or in part without written permission is prohibited.

## 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

### 1 Types of contributions

Research papers or editorials and manuscripts to the “Readers’ Forum” should be submitted to the Editorial Board. After receiving the manuscript, if the editorial board judges it necessary, the reviewers may give an interview to the author(s) in person or by phone to clarify points in addition to the exchange of the reviewers’ reports.

### 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. Manuscripts for “Readers’ Forum” shall be comments on or impressions of articles in *Synthesiology*, or beneficial information for the readers, and should be written in a free style of no more than 1,200 words. Editorials and manuscripts for “Readers’ Forum” will be reviewed by the Editorial Board prior to being

approved for publication.

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.

3.3.2 The text should be in formal style. 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).

## 4 Submission

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

*Synthesiology* Editorial Board  
c/o Website and Publication Office, Public Relations  
Department, 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](mailto:synthesiology-ml@aist.go.jp)

The submitted article will not be returned.

## 5 Proofreading

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

## 6 Responsibility

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

## 7 Copyright

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

Inquiries:

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

## 編集後記

シンセシオロジー（構成学）を創刊してから5年目に入りました。この論文誌は、学界や産業界の研究開発が個別要素技術の細部を追求する傾向が強まっているという認識から、社会に一石を投じる狙いで創刊したものです。

科学や要素技術開発の分析的な進め方とは異なり、シンセシオロジーは複数の要素技術を統合的にまとめること、あるいは、課題解決のために要素技術を確立する際に複数の方法や研究アプローチを検討するプロセスを経て行われる技術開発について論述した論文を対象としています。これは、社会が期待しているソリューション提供型の研究開発の方法論（Methodology）と位置付けることもでき、結果として顧客・社会に対してより満足度が高いハード、ソフトさらにはサービスを提供するための思考パターンを意識させるものでもあります。

昨今の米国 Apple 社による iPad の大ヒットや、1990 年代に米国 IBM が進めたメインフレームやパソコンから ICT を用いたソリューション提供型企業への転進等を見ると、読者諸兄もシンセシオロジー的な発想の重要性にお気づきのことと思考します。筆者は民間企業と産総研での研究開発の現場を経験していますが、このような発想を積極的に取り入れ、統合的な、あるいは構成的な観点から技術開発・新製品開発に取り組むセンスは産業界の方が優れているのではないかと思います。したがって、企業の皆様には積極的に論文を出していただき、大学や公的研究機関がシンセシオロジー的な発想を具体的に考えるきっかけとなることを期待しています。

この号において「鉄鋼厚板製造プロセスにおける一貫最適化に向けて」は鉄鋼企業においてリーン（プル）生産モデルとプッシュ型生産モデルの狭間で生じる本質的乖離ともいえる難題に対して、技術グループが現場に入り込むことでマルチスケール階層モデルを開発し、その実用価値を検証しています。「サンゴ骨格分析による過去の気候変動の復元」では地球温暖化という 21 世紀の課題に対してサンゴを対象とした地球化学的アプローチに生物学的アプローチを取り入れ、現場の事象に迫ろうとしており、今後の展開が期待されます。また、「ロボット技術を用いたスピニング加工（へら絞り）」ではプリコラーージュの概念と三現主義とを研究開発の構想作りの段階から積極的に取り入れており、イノベーションの方法論として提唱されているリニアモデルから連鎖モデルないしはコンカレントモデルへの転換を具体的に実行しています。これらに共通する研究方法論は、意識的に異なる領域の知見、技術を組み合わせて本質に迫ろうとする点にあり、シンセシオロジーそのものといえます。

この号の論文はシンセシオロジーの概念を実践した事例ですが、定型化された方法論を用いているわけではなく、各課題に適合する最適と思われる方法論を筆者が創り出している点が大きな特徴です。5 巻 2 号にいたるまでの 80 報を超える各論文がきっかけとなり、大学、公的研究機関、民間企業の各界でシンセシオロジー的な構想やデータ整理に基づく新しいジャンルが広がっていくことを期待するものです。

（編集委員 景山 晃）

Synthesiology 5 巻 2 号 2012 年 5 月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 独立行政法人 産業技術総合研究所

---

### シンセシオロジー編集委員会

委員長：一村 信吾

副委員長：小林 直人、瀬戸 政宏

幹事（編集及び査読）：赤松 幹之、田中 充、立石 裕、長谷川 裕夫

幹事（普及）：内藤 耕

幹事（出版）：多屋 秀人

委員：赤穂 博司、阿部 修治、五十嵐 一男、一條 久夫、上田 完次、餌取 章男、大蒔 和仁、大和田野 芳郎、岡路 正博、小野 晃、景山 晃、久保 泰、坂上 勝彦、清水 敏美、千葉 光一、佃 栄吉、富樫 茂子、中島 秀之、中村 和憲、馬場 靖憲、濱 純、原田 晃、檜野 良穂、松木 則夫、水野 光一、三石 安、村山 宣光、持丸 正明、矢部 彰、吉川 弘之

事務局：独立行政法人 産業技術総合研究所 広報部広報制作室内 シンセシオロジー編集委員会事務局

問い合わせ シンセシオロジー編集委員会

〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第 2 産業技術総合研究所広報部広報制作室内

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。



## Messages from the editorial board

### Research papers

Paleoclimate reconstruction and future forecast based on coral skeletal climatology

*-Understanding the oceanic history through precise chemical and isotope analyses of coral annual bands-*

A.SUZUKI

Development of methane hydrate production method

*-A large-scale laboratory reactor for methane hydrate production tests-*

J.NAGAO

Toward the integrated optimization of steel plate production process

*-A proposal for production control by multi-scale hierarchical modeling-*

K.NISHIOKA, Y.MIZUTANI, H.UENO, H.KAWASAKI and Y.BABA

Information sharing platform to assist rescue activities in huge disasters

*-System linkage via data mediation-*

I.NODA

Spinning process using robot technology

*-Field-based bricolage of manufacturing technology-*

H.ARAI

### Round-table talks

Science and technology policies and synthesiology; actualization and “connection” to value

### Editorial policy

### Instructions for authors