

Science & Technology Trends 科学技術動向

10
2008
No.91



レポート

p2.11

ロジスティクス高度化への
オペレーションズ・リサーチの役割

p3.25

地震予知研究の動向と問題点

トピックス

ライフサイエンス分野

p4

難病患者細胞からのiPS細胞の作製

情報通信分野

p5

磁気メモリ構造によるマイクロ波発振

エネルギー分野

p6

米国、豪州、アイスランドによる
地熱技術国際協力

フロンティア分野

p7

親ウナギが産卵場で初めて発見される

特別記事

p8

2008年ノーベル賞自然科学3部門の受賞者決まる

2008
No.91

10

Science&Technology Trends

科学技術動向

今月も「科学技術動向」をお届けします。

科学技術動向研究センターは、約 2000 名の産官学から成る科学技術人材のネットワークを持ち、科学技術政策において重要な情報あるいは意見の収集を行い、また科学技術予測に関する活動も続けております。

月刊「科学技術動向」は、科学技術動向研究センターの情報発信手段の一つとして、2001 年 4 月以来、毎月、編集・発行を行っています。意識レベルの高い科学技術関係者の方々、すなわち、科学技術全般に関して広く興味を示し、また科学技術政策にも関心をお持ちの方々に読んでいただけるものを目指しております。「トピックス」では最近の科学技術および政策から注目される話題をとりあげ、また、「レポート」では各国の動向や今後の方向性などを加えてさらに詳しく論じています。これらは、科学技術動向研究センターの多くの分野のスタッフが学際的な討議を重ねた上で執筆しています。「レポート」については、季刊の英語版の形で海外への情報発信も行っています。

今後とも、科学技術動向研究センターの活動に有効なご意見を読者の皆様からお寄せいただけることを期待しております。

文部科学省科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター センター長
奥和田 久美

このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします。

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「科学技術動向・月報一覧」でご覧いただけます。

文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

【連絡先】 〒100-0013

東京都千代田区霞が関 3-2-2 中央合同庁舎第 7 号館東館 16 F

【電話】 03-3581-0605 【FAX】 03-3503-3996

【URL】 <http://www.nistep.go.jp>

【E-mail】 stfc@nistep.go.jp

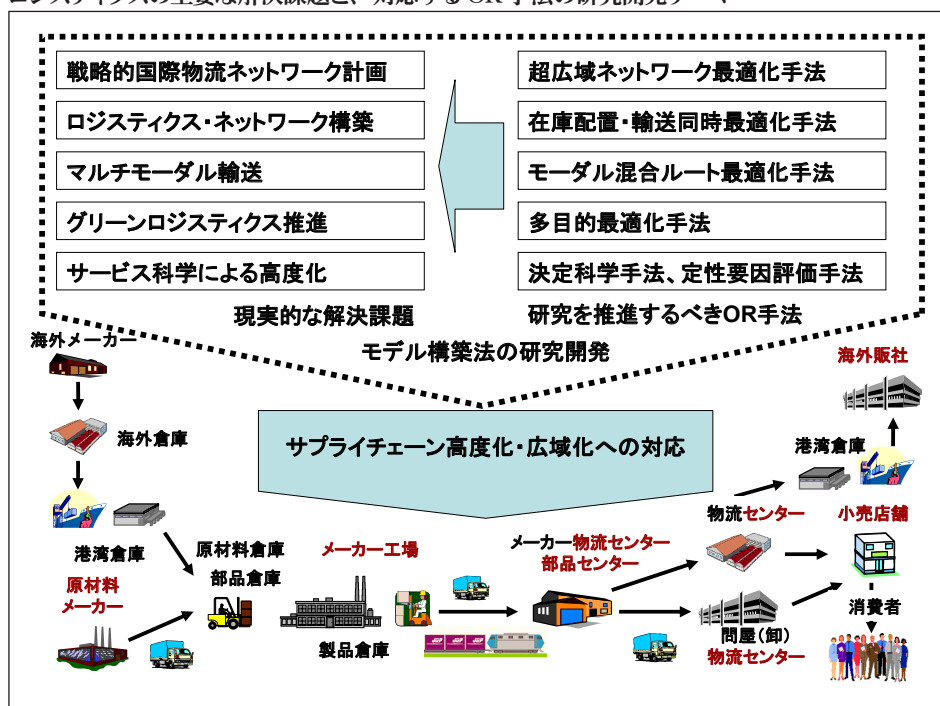
ロジスティクス高度化への オペレーションズ・リサーチの役割

製品の原材料から始まって、最終製品が消費者に届くまでのサプライチェーンは、現在、企業活動のグローバル化や企業間関係の変化による構造的変化と、市場への適応性、省エネ化や環境対応などといった機能的要求の高度化という大きな変換点を迎えている。このような状況に対し、具体的なモノの移動を遂行する仕組みであるロジスティクスも変革と高度化を迫られている。ロジスティクスのような複雑な活動の計画と運用においては、数理科学的な分析と最適化の手法であるオペレーションズ・リサーチ（OR）の適用が必要であり、適用の推進と共に手法の高度化が求められる。

輸送機器や輸送網整備といったハードウェアによる改善だけでなく、ORを適用することにより、大規模な物流ネットワークにおける拠点の配置や、輸送ネットワークの最適化、最適な安全在庫配置による工場や中継倉庫配置の最適化、輸送計画による温暖化防止などが期待される。しかし、我が国においては、ORは欧米に比べて普及してはず、大学においても実務的な研究があまり行われていない。

今日のロジスティクスが直面する課題に応え、将来の問題を解決するためには、課題解決のための研究と同時に、高度なOR手法の研究開発が必要となってくる。また、最近の課題として、産業構造の主要部分を占めるサービス産業の生産性と質的向上のため、サービス科学によるイノベーションが期待されているが、ロジスティクスはその具体的研究対象として非常に有力な研究領域であると考えられる。そのためには、理工系を重視し、経済学などの社会科学分野などとの学際的研究を促進することが求められる。ロジスティクスやORの研究分野としての認知、人材の養成、具体的施策検討のための省庁横断的、あるいは地域横断的な研究の促進が求められる。

ロジスティクスの主要な解決課題と、対応するOR手法の研究開発テーマ



科学技術動向研究センターにて作成

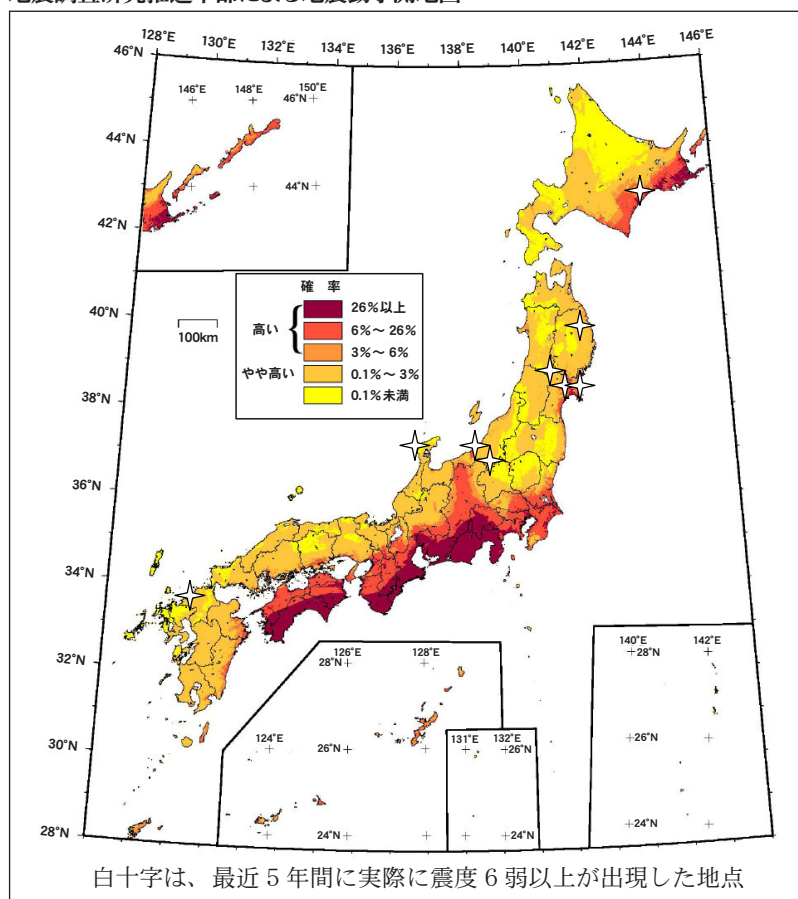
地震予知研究の動向と問題点

中国・四川大地震を初め、最近相次いだ我が国の内陸地震に対して有効な事前情報は出なかった。このため、「地震はいつでもどこでも起こり得る」との言い方がマスコミ間に定着することになったが、その裏には現在の地震予知研究への不信が見える。

我が国では、1962年にまとめられた「地震予知－現状とその推進計画」を基本指針として官学が連携した地震予知研究体制がスタートした。1990年代に入り、地震予知の可否に関する世界的な議論に巻き込まれる中、阪神・淡路大震災が勃発し、それまでの予知研究のあり方に疑問符がつけつけられることとなった。これをきっかけにして政府は、「地震発生予測」への取り組みをスタートし、また、地震予知研究者グループは、地震発生過程の物理学的解明へと方向転換を図った。その後10年を経て、「全国を概観する地震動予測地図」の完成を見たが、実際の地震発生は、必ずしも予測地図どおりとはいっていない。これは、沿岸海域を含めた「ひとまわり小さい活断層」が把握しきれなかったためとされ、こうした小規模活断層を抽出するための新たな事業計画が策定されることとなった。

一方、物理学的アプローチへと方向転換した地震予知研究では、この10年間に新たな発見が相次ぎ、地震発生過程についての理解は格段に深まった。統計解析に基づく「地震発生予測」に対し、付加情報を加味するという意味の「地震予知」ならば現状でも存在すると言える。ただし、その社会的意義は不十分であって、研究者の捉える「地震予知」と社会が求める「地震予知」との間にはなお大きな隔りがある。

地震調査研究推進本部による地震動予測地図



出典：参考文献²⁰⁾

iPS細胞作製技術の登場により、多能性幹細胞の応用可能性が再注目されている。最近米国ハーバード大学の研究グループより、10種類の難病の患者からiPS細胞が作製できたとの報告があり、患者細胞と遺伝的に同一のiPS細胞の誘導ができ、種々の組織の細胞に分化できる可能性が示された。今後このようにして誘導された細胞の、病因の解明や治療法の開発への応用が期待されるとともに、染色体への遺伝子導入を伴わないiPS細胞作製法の開発や、その基礎情報としての初期化のメカニズムおよび初期化状態の理解を目的とする基礎的研究の推進が望まれる。

トピックス / 難病患者細胞からのiPS細胞の作製

iPS細胞作製技術の登場によりES細胞の倫理的問題を回避し、多能性幹細胞の応用可能性が再注目されている。応用可能性としては、ES細胞と同じく再生医療への利用、各種正常細胞作製による創薬への利用、疾患由来細胞作製による疾患の解明と治療薬創製への利用が取り上げられている。特に疾患由来の細胞は、ある疾患を有する患者の皮膚等の細胞からiPS細胞を樹立し、これをその疾患で特徴的な病態を示す組織の細胞に分化誘導して解析に用いるという手法である。このように作製された細胞は、病因を除いて正常化できれば、患者に戻して細胞治療ができるという応用も考えられるため、現在日本を含め世界的に研究が進められている。

米国ハーバード大学を中心とするグループは、10種類の難病の患者からiPS細胞の作製を報告した¹⁾。10種類とはアデノシンデアミナーゼ欠損重症複合免疫不全症、ゴーシェ病III型、デュシェンヌ型筋ジストロフィー、ベッカー型筋ジストロフィー、ダウン症候群、パーキンソン病、若年性I型糖尿病、Shwachman-Bodian-Diamond syndrome (SBDS)、ハンチントン病、レッシュナイハン症候群である。SBDSは患者の骨髄間葉系細胞を使用し、それ以外は全て細胞等の配布機関より入手した患者の皮膚線維芽細胞を用いた。*OCT4*、*SOX2*、*KLF4*の3遺伝子と、場合により*c-MYC*または*NANOG*も導入することにより、各iPS細胞作製に成功した。それぞれのiPS細胞を解析したところ、例えばダウン症候群では3本の第21番染色体が保持されて

おり、また原因遺伝子が明確なものは、ほとんどの場合それぞれの遺伝子の変異や異常が確認された。反復配列マーカーの解析からは、いずれも元になった患者細胞から由来することが確認された。一方、胚様体や奇形腫の形成と、そこに含まれる細胞種の解析により、多様な細胞に分化できる多能性も確認された。また導入した前出の遺伝子の発現はiPS細胞の状態では内因性の発現に比べほとんど見られないと述べられている。以上の事実より、各種疾患の遺伝子的特性を保持した状態で多分化能を有するiPS細胞が作製できたと考えられた。

本報告により、患者細胞からそれと遺伝的に同一のiPS細胞が誘導でき、種々の組織の細胞に分化させられる可能性が示された。このことは、各種疾患の解析や治療法の研究に大きな材料が提供されたと言える。

一方で、今後このような研究においてiPS細胞を目的の細胞種に効率良く分化させる手法の開発が強く求められる。これはES細胞での研究で先行してはいるもののiPS細胞でも更なる検討が必要である。さらに研究グループは論文中で、導入した遺伝子の発現は低いと記載してはいるが、低いとはいえこのような発現がどのような影響を与えるかは不明である。染色体への遺伝子導入を伴わない、すなわち化合物やその他因子等を用いたiPS細胞作製法の開発にも期待が持たれる。そのためにも初期化のメカニズムおよび初期化状態の理解を目的とする基礎的な研究の推進が望まれる。

参 考

- 1) Park, I.-H., et al., "Disease-Specific Induced Pluripotent Stem Cells" Cell Vol.134, 877-886 (2008)

大阪大学の鈴木義茂教授らと(独)産業技術総合研究所の湯浅新治氏らの共同研究グループは、2008年8月に磁気メモリに使用されている強磁性トンネル接合からのマイクロ波自励発振の高出力化に成功したと発表した。従来より観測されていた出力は1nW程度と極めて小さく、マイクロ波の利用は困難と考えられていた。共同グループによる大電流への耐性向上や最適条件の発見により、0.1 μ W以上の大出力化が可能となった。磁気メモリが同時に実用レベルのマイクロ波発振器としても使えることで、今後、メモリ素子間の無線通信などを含む新しいデバイスが作製できる可能性もある。

トピックス 2 磁気メモリ構造によるマイクロ波発振

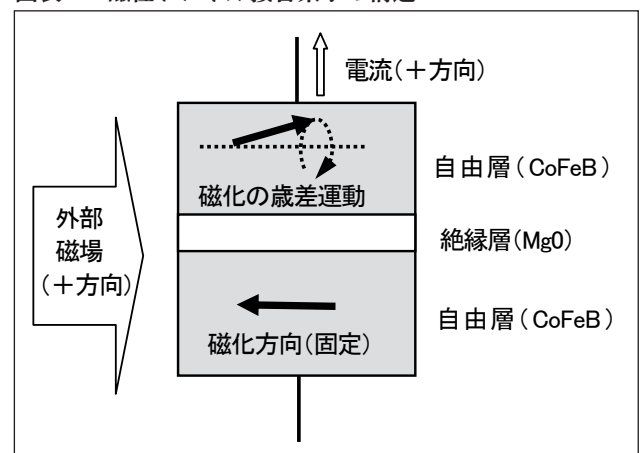
大阪大学の鈴木義茂教授らと(独)産業技術総合研究所の湯浅新治氏らの共同研究グループは、2008年8月に強磁性トンネル接合によるマイクロ波自励発振の高出力化に成功したと発表した^{1,2)}。強磁性トンネル接合は、MgOの薄い絶縁性トンネル層を挟んで両側にCoFeBなどの磁性層を接合したもので、磁性層の磁化方向が互いに平行か反平行かで抵抗が大きく異なるために、不揮発性スピンRAM³⁾と呼ばれる磁気メモリとして研究されてきた。片方の磁性層を厚くして磁化が動かないようにし(固定層)、もう一方を薄くして電流や外部磁場に応じて自由に動けるように(自由層)素子を構成する。電流を流した時に両側の磁化を平行または反平行に揃える方向にトルクが働き、自由層の磁化の歳差運動(図表1参照)によってマイクロ波が発振することは以前より知られていた。しかし、従来観測されていた出力は1nW程度と極めて小さく、マイクロ波の利用は困難と考えられていた。今回、大阪大学らの共同研究グループは、大電流への耐性向上や最適条件の検討などにより、0.1 μ W以上の大出力化を可能とした。

共同研究グループは、磁場方向や電流強度などの様々な条件で、発振周波数(3~10GHz)と発振出力の関係から、自由層の磁化方向とは逆方向にトルクが働く時に、発振出力が大きくなる(図表2の斜線領域)ことを明らかにした。また、その場合でも、自由層の磁化方向が固定層の磁化方向と反平行の時に出力が大きい(図表2の左側の斜線領域)。この時に測定された発振出力は0.14 μ Wだが、導波路とのインピーダンス・ミスマッチのために9割程度は配線途中で損失しており、実際の発振出力はその測定値の10倍以上と推測している。

マイクロ波発振器については、ガン発振器やクライストロンなど数種類のもが実用化されているが、今

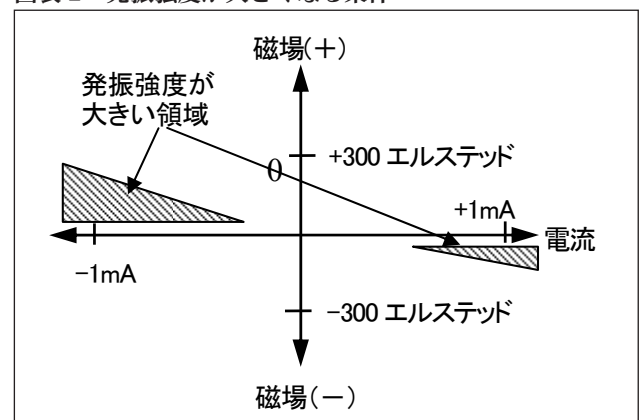
回見いだされた技術でナノレベルの大きさの発振器が可能であることや、磁気メモリが同時に実用レベルのマイクロ波発振器として使えることは、メモリ素子間の無線通信など新たなデバイスの可能性という点で興味深い。発振器とメモリが両立してどの様に使えるかについては、今後の議論が待たれる。

図表1 磁性トンネル接合素子の構造



参考文献²⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 発振強度が大きくなる条件



参考文献²⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

参 考

- 1) 産総研プレス・リリース : http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2008/pr20080828_3/pr20080828_3.html
- 2) A.M.Deac, et al; nature physics : <http://www.nature.com/nphys/journal/vaop/ncurrent/abs/nphys1036.html>
- 3) 科学技術動向, No.80 2007年11月号, 「高速不揮発性スピンRAMの進展」

2008年8月28日、米国エネルギー省は、米国、オーストラリア、アイスランドが「地熱技術国際パートナーシップ(IPGT)」の設立文書に調印したと発表した。IPGTでは、エネルギーセキュリティを高め、地球規模での気候変動に対応するため、この枠組みを通じて、地熱利用や地熱発電に関する高度な専門知識を共有し、深度掘削や地熱エネルギー変換などの強化地熱システム(EGS)について政策面・技術面での国際協力関係を構築する。また、地熱エネルギーの開発を加速し、近い将来、クリーンな国産自然エネルギーを市場に提供できるとしている。このような地熱技術推進に関する国際協力は世界初であり、地熱エネルギーのポテンシャルの高い我が国としても今後のIPGTに注目する必要がある。

トピックス 3 米国、豪州、アイスランドによる地熱技術国際協力

2008年8月28日、米国エネルギー省(DOE)は、米国、オーストラリア、アイスランドが「地熱技術国際パートナーシップ(International Partnership for Geothermal Technology; IPGT)」の設立文書に調印したと発表した¹⁾。IPGTは、エネルギーセキュリティを高め、地球規模での気候変動に対応するため、最先端の地熱技術を積極的に推進する計画である。DOEは、オーストラリア資源エネルギー観光省、アイスランド工業エネルギー観光省と、この枠組みを通じて、地熱利用や地熱発電に関する高度の専門知識を共有し、深度掘削や地熱エネルギー変換などの強化地熱システム(Enhanced Geothermal Systems; EGS)について、政策面・技術面での国際協力関係を構築する。

EGSは、地下深くの高温地層岩体に井戸を掘削し、水圧を用いて高温岩体を破碎し、高温水あるいは蒸気の地熱貯留層を新たに形成、または既存の貯留層を拡張・増大させ、その後最初の井戸の周囲に別な井戸を掘削し、一方から水を注入し、他方より高温水あるいは水蒸気を得て、発電などに利用するシステムである(図表参照)。

すでに米国ではカリフォルニア州やネバダ州などでEGS技術の実証試験を、アイスランドでは地下5,000mの高温地熱源への掘削プロジェクトを、またオーストラリアでは南部でEGS開発プロジェクトを、それぞれ独自に進めている。

IPGTでは、各国の強みと経験を活かし、EGSや深度掘削技術の研究・開発・展開、優良実績の情報交換、教育・訓練プログラムの支援などを進める。また、異なる国や地質環境のプロジェクトから得られる知見を通じて、地熱技術の発展を加速させるための緊密な協調関係を構築する。そして、近い将来、

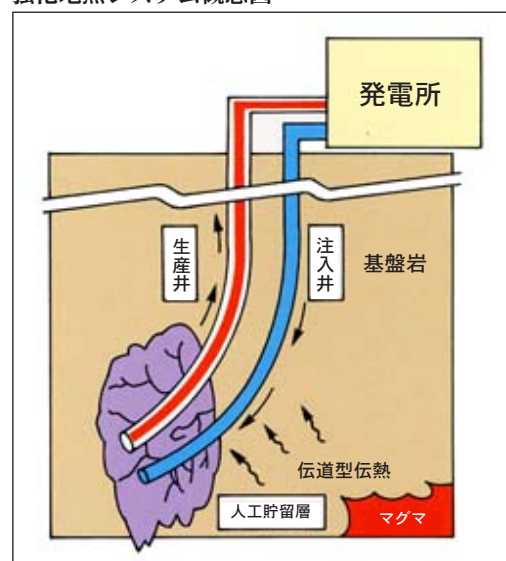
このクリーンな国産自然エネルギーを市場に提供できるとしている。さらに今後、他国の参加によるIPGTの拡大も考えられている。

世界有数の火山国である我が国でも、地熱エネルギーのポテンシャルは高く、また安定した出力の得られる自然エネルギーであることから、温室効果ガス抑制の観点からも地熱利用の推進が望まれている。しかし、国立公園や観光地などの制約から、近年その開発は進展していない。

立地に制約のある既存の地熱発電技術とは異なり、EGSは地熱貯留層の有無に因らないことなどから、立地点選択の裕度が広がる可能性がある。また、既設地熱発電所での高深度の高温利用による出力向上も期待できる。

我が国としても、今後のIPGTの動向やEGSの推進に注目する必要がある。

強化地熱システム概念図



出典：参考文献²⁾

参 考

- 1) DOE プレスリリース： <http://www.energy.gov/news/6492.htm>
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁ホームページ： <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/ground/index.html>

2008年9月22日、ニホンウナギの親魚がグアム西方の太平洋で捕獲されたことを、水産庁と(独)水産総合研究センターが発表した。親ウナギが産卵海域で発見されたのは世界で初めてである。2008年6月と8月にマリアナ諸島北西海域で、水産庁漁業調査船が、ニホンウナギの雄2匹、雌2匹を捕獲した。今回の調査により産卵海域に親ウナギは確かに存在することが実証された。ただし親ウナギは海洋のまっただなかで捕獲されており、産卵場は海山なのかという新たな疑問も出てきた。また現段階では、産卵生態は依然として謎のままである。今後も産卵場の生育環境や親ウナギの生理状態を研究し、ウナギの人工孵化技術の向上につなげることが期待されている。

トピックス 4 親ウナギが産卵場で初めて発見される

ウナギの幼生がはるか海洋で生まれることがわかったのは19世紀末のことであり、それからウナギの産卵場探しが始まった。ニホンウナギの産卵場がグアムの北西海域であるとほぼ結論づけられたのは、21世紀になってからのことである。ウナギがどこでどのように生まれるのかという謎の解明とウナギの完全養殖に向けた研究開発は、ともに多くの研究者から注目されている。

2008年9月22日、ニホンウナギの親魚がグアム西方の太平洋で捕獲されたことを水産庁と(独)水産総合研究センターが発表した。親ウナギが産卵海域で発見されたのは世界で初めてのことであり、同センターは水産庁漁業調査船「開洋丸」(2,630トン)で本年6月と8月にマリアナ諸島北西海域において大型の中層トロール網を曳いて捕獲調査を行い、ニホンウナギの雄2匹、雌2匹を捕獲した。雄は体重の18%を精巢が占めており、雌は卵巣が収縮し、残った卵もあるため、産卵後と判断された。親ウナギが捕獲された水深は200～350m(水温25～13℃)と推定されている^{1, 2)}。

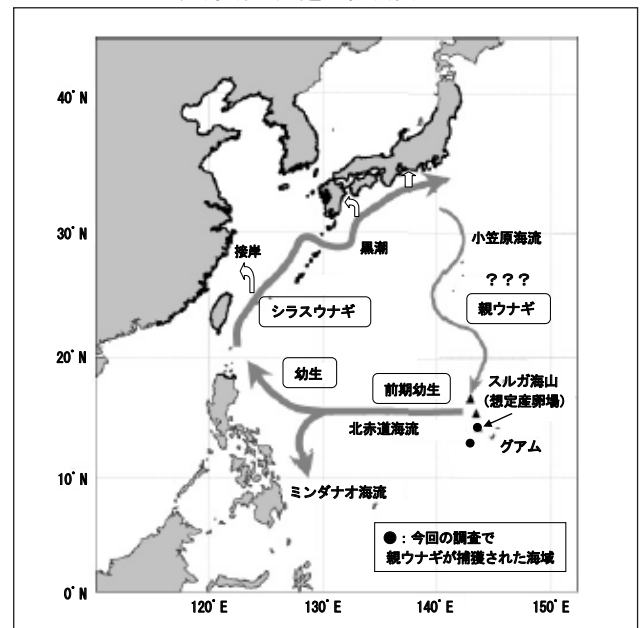
ニホンウナギの産卵場については、東京大学海洋研究所のグループが長年にわたり調査研究を行ってきた。2005年の調査航海で孵化直後の前期幼生を大量に採取して、産卵場はグアム西方海域のスルガ海山(Suruga Bank)であると推定した³⁾。

ニホンウナギがグアムの西方海域で産卵するであろうことはそれ以前の長い調査研究で予想されていた。卵は2日ほどで孵化して幼生となり、海流によって西方へ運ばれるうちに成長し、シラスウナギとなって台湾、中国、日本などの沿岸に接近する。しかし遊泳能力も方向検知能力もない幼生がいかにして黒潮を見つけるのか、また適当な時期になにをきっかけ

に黒潮から降りて沿岸に向かうのか依然として不明である。また沿岸にたどり着き、河川を遡上したものは数年間その場所で成長し、親ウナギになると産卵海域に戻っていくとされている。しかし戻る途中の親ウナギはまだ見つかっていない。どのような経路で産卵海域にたどりつき、またなにを手がかりに産卵行動をおこなうのかも解明されていない。

今回の調査成果は、産卵海域に親ウナギが確かに存在することを実証したことであり、ただし親ウナギは海洋のまっただなかで捕獲されており、産卵場は海山とはいえないかもしれないという新たな疑問が出てきた。今後も産卵場の生育環境や親ウナギの生理状態を研究し、人工孵化技術の向上につなげることが期待されている。

ニホンウナギの産卵場と回遊の推測図



参考文献^{1, 3)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

参 考

- 1) 水産庁：水産庁漁業調査船開洋丸によるニホンウナギの産卵生態調査の結果について、2008年9月22日
- 2) 張成年：産卵海域でウナギの捕獲に成功！、日本水産学会誌、Vol.74、No.6、2008年
- 3) 塚本勝巳：ニホンウナギの産卵場、月刊海洋 別冊 No.8 ウナギ資源の現状と保全、2008年

特別記事

2008年ノーベル賞 自然科学3部門の受賞者決まる

2008年のノーベル賞自然科学3部門(生理学・医学賞、物理学賞、化学賞)の受賞者が決まった。10月6日にスウェーデン カロリンスカ研究所より生理学・医学賞が、同国王立科学アカデミーから7日に物理学賞、8日に化学賞が発表された。以下に受賞者と受賞理由について紹介する。

自然科学3部門受賞者と受賞理由の概要

(1)生理学・医学賞

Harald zur Hausen (独)：ドイツがん研究センター
Françoise Barré-Sinoussi (仏)：パスツール研究所
Luc Montagnier (仏)：世界エイズ研究予防財団

受賞理由

「子宮頸がんを引き起こすヒトパピローマウイルスおよびヒト免疫不全ウイルスの発見」に対して

性的接触により伝播して拡がる感染症、いわゆる性行為感染症(STD)とよばれる疾病のなかに、エイズや子宮頸がんがある。前者はヒト免疫不全ウイルス(human immunodeficiency virus:HIV)による疾病であり、世界中で3,000万人以上が感染(2007年推定)、我が国においては薬害としても問題になっている。後者はヒトパピローマウイルス(human papilloma virus:HPV)により引き起こされ、子宮頸がんのみならず、世界中で診断されるがんの5%以上はHPVの持続感染によるものとされている。3氏はこれら病原ウイルスを発見し、後の病原性解明、診断法や治療法の開発に貢献した業績が評価された。

Hausen氏は、ヒトの子宮頸がん組織に特定の型のHPVゲノムが高率に存在することを初めて突き止め、その成果は1983年に「異なる地域から採取した生検サンプルにおける、子宮頸がんからのパピローマウイルスDNAと有病率(A papillomavirus DNA from a cervical carcinoma and its prevalence in cancer biopsy samples from different geographic regions)」の論文で報告した(Proc.Natl.Acad.Sci.USA 1983,80:3812-5)。

一方、Sinoussi氏とMontagnier氏は、後天性免疫不全症候群を呈した患者から原因ウイルスを分離、LAV(Lymphadenopathy-associated virus)と命名し、1983年のScience誌に「後天性免疫不全症候群のリスクを有する患者からのT細胞親和性レトロウイルスの分離(Isolation of a T-lymphotropic retrovirus from a patient at risk for acquired immune deficiency syndrome (AIDS))」として報告した。当ウイルスは後にHIV-1と改称された。

現在、HPVに対してはその感染予防ワクチンが開発されており、またエイズに対しても種々の治療薬が開発されている。これら疾病に対する治療法の開発は目を見張るものがあり、近い将来の撲滅が期待されている。

(2) 物理学賞

南部 陽一郎(米)：シカゴ大学

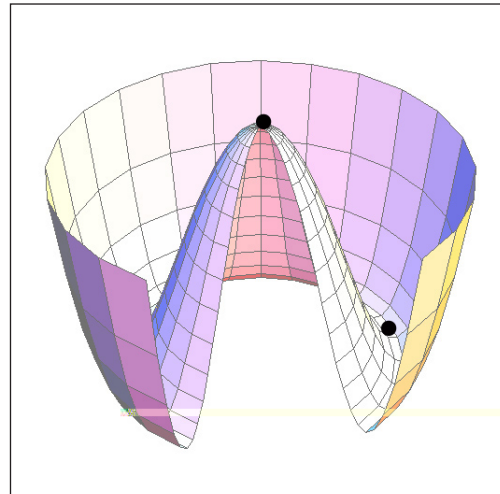
小林 誠(日)：高エネルギー加速器研究機構

益川 敏英(日)：京都産業大学

受賞理由

「対称性の自発的破れの発見(南部氏)および第3世代のクォークの存在を予言した対称性の破れの起源の発見(小林氏・益川氏)」に対して

自然界には、空間や時間の並進対称性といった連続的な対称性に加えて、時間の反転(T-対称性)や空間の反転(P-対称性、またはパリティ)という離散的な対称性が存在する。空間反転に関しては、鏡に写した時の対称性、あるいは右手系と左手系の対称性と呼んでも良い。また、全ての素粒子に対し反粒子が存在し、この粒子・反粒子の対称性を荷電対称性(C-対称性)と呼ぶ。この3つを合わせて、CPT対称性と言う。これ以外に、等方的な状態が相転移により任意の特定の方向を向くという対称性も存在する。強磁性相転移はこの例である。ポテンシャルで記述すれば図の様なワイン・ボトル型となり、中心部の状態が、“自発的に対称性を破り”、ワイン・ボトルの底の状態(基底状態または真空状態)に移る。この時、底の状態は一通りではなく、底の部分の円に相当する無数の基底状態が存在する。しかし、自然界はその等価な基底状態の中から1つを選ぶ。この様に、基底状態の配位が、全体系のポテンシャルの対称性を表さないという事情を、対称性は“自発的に破れている”という。



超伝導のBCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) 理論が完成した直後に、南部氏は超伝導理論を場の理論で定式化しようと試みた。そして、超伝導の基底状態は対称性が自発的に破れた状態であることを発見した(Quasi-Particles and Gauge Invariance in the Theory of Superconductivities, Phys. Rev. 117, 1960, 648)。しかし、ポテンシャルとしては対称性が破れていないので、この自発的対称性の破れを補う南部・Goldstone ボソンと呼ばれる粒子が発生する。これは、ワイン・ボトルの底をぐるぐる回る状態を表す粒子と考えてよい。南部氏は対称性の自発的破れという概念を素粒子の理論にも適用し、弱い相互作用では軸性カレントは部分的にしか保存しないことを発見した(Axial Vector Current Conservation in Weak Interaction, Phys. Rev. Lett. 4, 1960, 380)。これを、南部・Jona-Lasinio モデルとして発展させ(Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity. I', Phys. Rev. 122, 1961, 345)、素粒子のクォーク・モデルや量子色力学(QCD)の礎を築いた。また、“ひもモデル”としても発展し、当初のモデルは“南部のひも”と呼ばれる。南部・Goldstone ボソンは、すべての物質に質量を与えるとされる未発見のHiggs粒子の原型ともなった。今回の受賞対象となった「対称性の自発的破れ」は、物理学のあらゆる分野の基本概念となった。

弱い相互作用ではP対称性が破れること(即ち左右非対称)はすでに知られていたが、空間反転と同時に荷電反転するCP対称性は保存すると考えられていた。しかし、1964年に、K中間子崩壊でのCP対称性の破れが観測され、新たな理論が必要となった。小林氏・益川氏の論文(CP Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interactions, Prog. Theor. Phys. 49, 1973, 652)は、このCP対称性の破れの起源を明確に説明しただけでなく、新たなクォークの存在をも予言した。現在、次の6種類のクォークの存在が確認されている。

$$\begin{pmatrix} u(\text{アップ}) \\ d(\text{ダウン}) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c(\text{チャーム}) \\ s(\text{ストレンジ}) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t(\text{トップ}) \\ b(\text{ボトム}) \end{pmatrix}$$

左より、第1世代、第2世代、第3世代と呼ばれるが、第2世代までの4種類だけでは、自由度が足りずCP対称性は破れない。小林氏・益川氏は、第2世代までのクォークを混合するというCabibboのアイデアを拡張し、 d, s, b を混合する3行3列の行列を考えた。そして第3世代のクォークが存在する時にCP対称性が破れることを示した。これは同時に、第3世代の2種類のクォークの存在をも予言したことにもなる。その後、1977年にボトム・クォークが、1994年にトップ・クォークが実際に発見された。これは、CP対称性の破れは単にK中間子崩壊だけの問題ではなく普遍的な現象であることを意味し、宇宙開闢以来の粒子と反粒子の存在比の偏りもこのCP対称性の破れで説明できる。

(3) 化学賞

下村 脩(米)：ウッズホール海洋生物学研究所

Martin Chalfie (米)：コロンビア大学

Roger Y. Tsien (米)：カリフォルニア大学

受賞理由

「緑色蛍光タンパク質(Green fluorescent protein, GFP)の発見と開発」に対して

生命科学研究において、生体を構成する細胞や分子の動態をリアルタイムで解析することは極めて重要である。動態を連続的に測定し、正確に描写する有効なツールの一つにGFPというタンパク質が挙げられるが、3氏はこのタンパク質の発見・開発に貢献した業績が評価された。

下村氏は、北米西海岸沿岸を漂うオワンクラゲの体内からイクオリン(aequorin)というタンパク質とともにGFPを初めて分離・精製し、紫外線を当てると当タンパク質が緑色に光ることを発見した。その成果は1962年に「オワンクラゲという発光クラゲからの生物発光タンパク質、イクオリンの抽出・精製と性質(Extraction, purification and properties of aequorin, a bioluminescent protein from the luminous hydromedusan, Aequorea)」という論文で報告した(J.Cell.Comp.Physiol.1962,59:223-39)。

一方、Chalfie氏は、GFPを使って線虫などの細胞をラベルし、GFPが種々の生物学的な現象を解析する上で有用なツールであることを示した。それらの研究成果の一部は「遺伝子発現マーカーとしての緑色蛍光タンパク質(Green fluorescent protein as a marker for gene expression)」(Science 1994,263:802-5)の論文で報告した。

またTsien氏は、GFPが発光するメカニズムを解明するとともに、GFPを変異させることによって新たな発光タンパク質を開発した(改変型GFP)。その研究成果の一部は1998年に発表されている(The green fluorescent protein. Annu.Rev.Biochem. 1998, 67:509-44)。

GFPおよびその改変型は、特定のタンパク質と融合させて細胞内に導入することで、細胞内のタンパク質の挙動を知ることができる。また生きたままの細胞を観察することが可能なため、より実態に近い生体内の動態解析が可能であり、細胞生物学、発生生物学や神経生物学をはじめとした生命科学研究に多用されている。また各種疾患研究にも応用され、今後、更なる利用の展開が期待される。

参考文献：ノーベル賞ホームページ、<http://nobelprize.org/>

ロジスティクス高度化への オペレーションズ・リサーチの役割

高井 英造
客員研究官

1 はじめに

製品の原材料から最終製品が消費者に届くまでのサプライチェーンは、現在、その構造的変化と機能的要求の高度化という2つの大きな転換点を迎えている。構造的変化は企業活動のグローバル化による国際物流の広域化と複雑化、従来の単純な系列的な調達・供給連鎖から、オープンなネットワーク的連鎖への企業間関係の変化、ICTの発展に伴うeビジネスの拡大などによる流通形態の変化などがもたらしたものである。一方、機能的要求水準の高度化は、製品モデルチェンジの短期化、変化の激しい市場への適応性、高エネルギーコストに対応する合理化と省エネ化、環境対応などによるものである。グローバル化の進展によるサプライチェーンの高度化の重要性は、今年度の「ものづくり白書(平成19年度ものづくり基盤技術の振興施策)」¹⁾においても、冒頭に述べられている。

このような要求は、とりもなおさず、サプライチェーンにおける

具体的なモノの移動を遂行する仕組みであるロジスティクスの変革と高度化が求められているということである。

ロジスティクスの変革とさらなる高度化には、より高度で洗練された情報の活用が必要であり、ここでは数理科学的な分析と最適化の手法であるオペレーションズ・リサーチ(OR)の適用の推進と高度化が求められる。輸送機器や輸送網整備といったハードウェアによる改善も重要であるが、計画と運用の高度化なしに問題は解決しない。物流のネットワーク全体を見通した合理的な計画には、OR手法による、工場や中継倉庫配置の最適化やそれらを結ぶ輸送経路と手段の選択などが不可欠である。変化の激しい市場と、継続的な新製品の投入などに対応するためには、ORによる柔軟性と迅速性を持った効率的な運用の仕組みが求められる。ロジスティクスの進化は、輸送機器や倉庫の自動化といったハードウェアの進歩だけ

でなく、ORの進歩と普及によるところも非常に大きい。

また、最近の課題として、産業構造の主要部分を占めるサービス産業の生産性と質的向上のため、サービス科学によるイノベーションが期待されているが、ロジスティクスはその具体的研究対象として非常に有力な研究領域であると考えられる。

本レポートは、ものづくり白書においてもその重要性が指摘されているサプライチェーンの高度化のためのロジスティクスの計画に対する研究開発に焦点をあてて論じる。サプライチェーンとロジスティクスの概念と現在の問題点を整理し、現在ロジスティクスが直面している問題の解決や、今後研究が進められるべき問題について、ORがどのような役割を果たしているかを論じる。最後に、今後重点的に研究されるべき課題についてまとめ、これからの我が国におけるロジスティクスとORの研究振興について考える。

2 我が国におけるロジスティクスの課題と問題点

2 - 1

サプライチェーンにおけるロジスティクスの発展と課題

実体経済を支える原材料や製品の移動と貯蔵を行う、いわゆる「物流」と言われる概念は古くから存在する。それを経営的あるいは技術的側面から研究し、改善、合理化してゆこうという考え方は、特に大戦後に米国を中心に盛んになり、第二次大戦後に「物流マネジメント」(Physical Distribution Management) という概念ができ、さらに、物流と情報システムの融合による新しいビジネスモデルとして、「ロジスティクス」(Logistics) という概念に変化した。我が国ではこの2語はほぼ同義にもちいられているが、前者がモノの移動(輸送)や貯蔵といった個別の業務を中心にした概念であるのに対して、ロジスティクスは情報による物流全体の統合的設計、管理運営に中心を置いている。ロジスティクスは元来は軍事用語の「兵站」であって、戦闘に必要となる、兵員・武器弾薬・食料などを作戦計画や前線の必要に従って、供給・管理・補給する活動を指していた。経済分野における活動についてはビジネス・ロジスティクスと呼ぶこともある。米国ロジスティクス・マネジメント協会(CLM、現CSCMP)²⁾の定義によれば、「ロジスティクスとは、サプライチェーンプロセスの一部であって、顧客の要求を満たすために、発生地点から消費地点までの「モノ」(goods)、サービス、および関連する情報についてのフローと保管、計画、実施、および管理を効率的かつ効果的に行うことである」とされている。

ロジスティクスに含まれる具体的な活動として一般には、在庫管理、

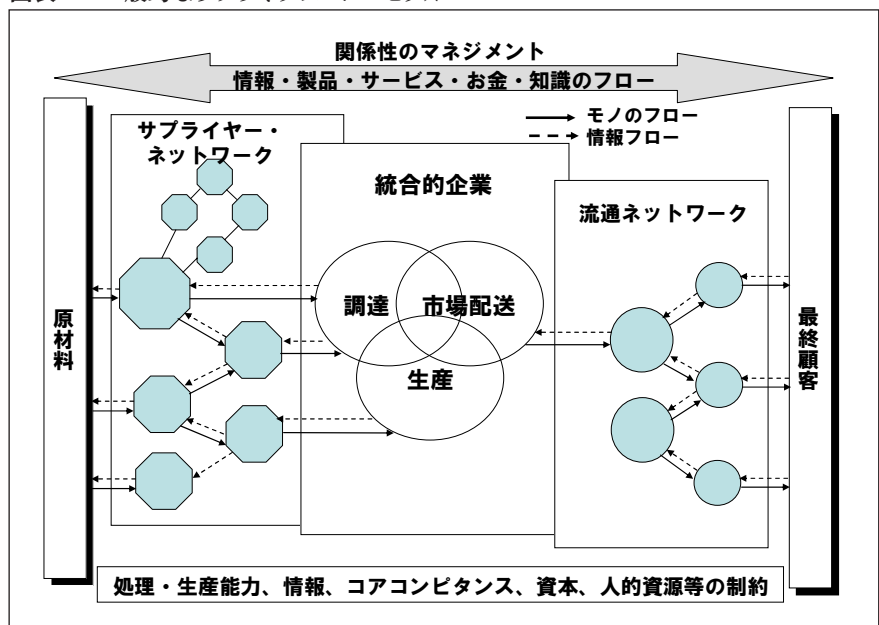
運輸輸送、倉庫管理、マテリアルハンドリング、包装、返品・回収などが取り上げられ、需要予測、受注処理などが含まれる場合もある。ランバート³⁾はこれらに加えて、工場・在庫拠点選定、顧客サービス、調達、部品・サービス支援、などを挙げている。最近は我が国でも一部で使われ始めたが、米国においてはCLO(Chief Logistics Officer)という言葉が定着している。米国ではロジスティクスという分野が我が国よりも広がりを持って認識されていることを示していると言えよう。

上記の定義にも出てくるサプライチェーンという概念は、「供給連鎖」を意味している。原材料の調達から生産・販売・物流と言った諸活動の連鎖を経て最終需要者に至るまでの製品やサービス提供のための一連活動を指す。一方、物流という業務は単一の企業や商品を対象として、「商品を間違いなく届ける」という思想のもとに発達してきた。サプライチェーンは、その後を受けて、原料から商品に至るまでの広範囲な企業活動と企業間

の流れを、製造業における設計開発、生産から最終消費者に対する顧客管理サービスまでを含めて意識し、全体として最終的な価値を生み出すビジネスの連鎖を意識している点が異なっている。サプライチェーンという考え方は、1990年代以降の、事業部門や企業の枠を超えた活動を統合することによって、新しい、合理的なビジネス・プロセスを具体化し、企業活動の価値を高める方法論であるサプライチェーン・マネジメント(SCM)の概念によって一層広まったといえる。

図表1は、一般的なサプライチェーンの概念を示したものである⁴⁾。中心的企業の活動と原材料から最終顧客に至るまでの間のさまざまな関連企業が、業務、情報、具体的なモノ(原材料、部品、製品、商品)のフロー(流れ)によって結合された全体をサプライチェーンと考えている。図中の実線矢印は上流から下流へのモノの流れであり、点線矢印は下流から上流に伝えられる発注情報、需要情報などの主要な情報の流れである。また、各

図表1 一般的なサプライチェーン・モデル



参考文献⁴⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

関連企業や機能組織の持っている生産能力・処理能力・専門性・情報、資本・人的資源などによって、全体のフローが制約されている。サプライチェーンの高度化というのは、適切な組み合わせと能力の調整、情報の結合によってこのシステム全体の生産性、効率、効用を高めることであり、それがSCMの目的と言える。

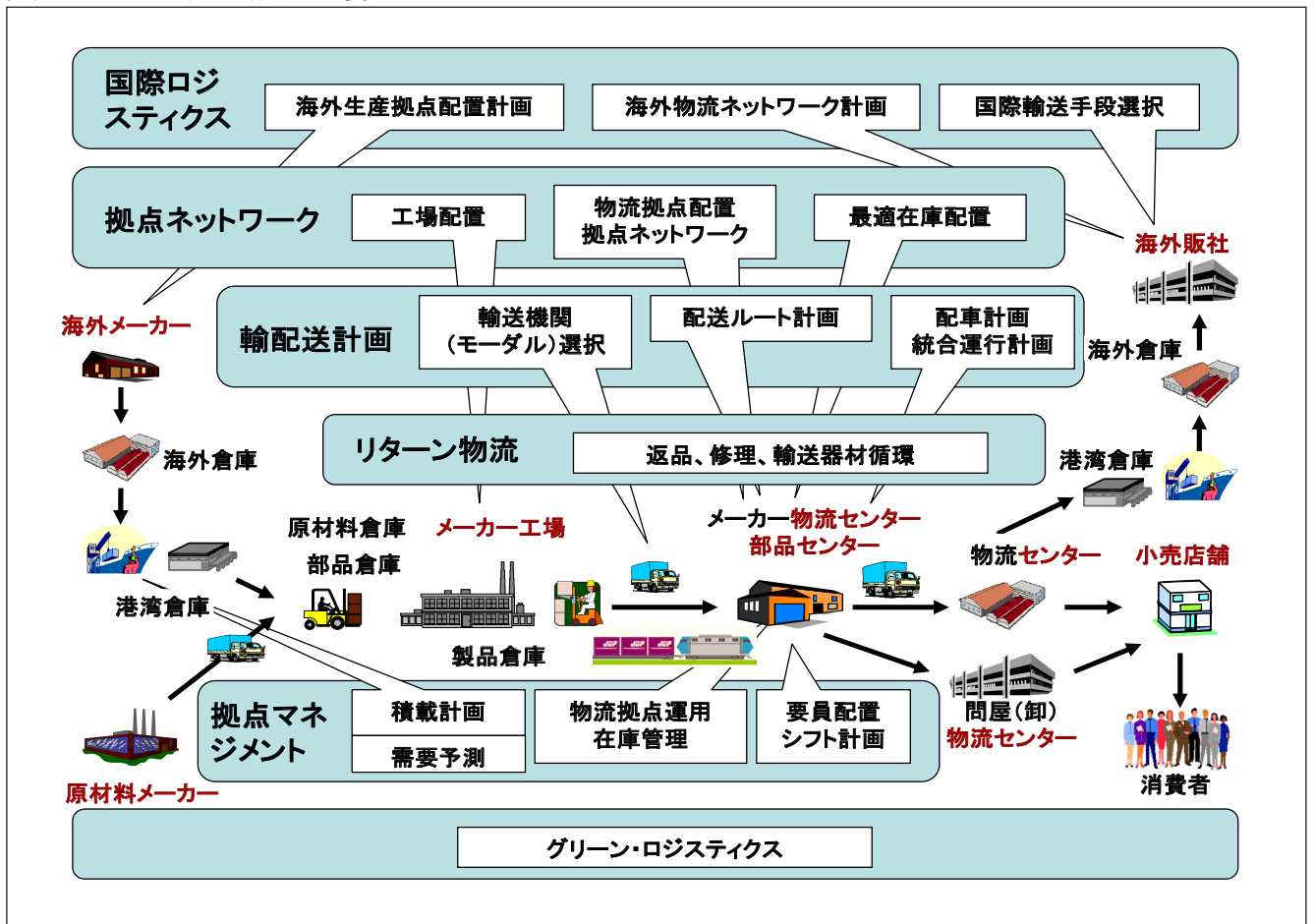
SCMは1990年代に発展したマネジメントの方法論である。生産と物流を同等のレベルで合理的に結合することによって、従来の需要予測を起点とする計画生産では対応しきれない変動の激しい予測の困難な市場に対して、作り過ぎや不足の無駄を無くして、効率的な運用を可能にする仕組みを指す。基本は、組織や企業の壁を越えて全体を一つのビジネス・プロセスとしてとらえ直して統合することであり、SCMの導入によって、製品ライフ

サイクルの短縮化や、国際的な分業体制の進展が加速したと言える。言い換えると、「物流」の時代には、原料、工場、倉庫、販売店、といった各段階の全てに在庫を抱えて、「在庫と在庫の間を輸送でつないで作るサプライチェーン」であったが、SCMは、「在庫を(可能な限り)持たずに直接的に原料から消費者までを効率的に短時間で繋いでゆくサプライチェーン」への変換を可能にするための方法論と言える。

SCMの概念は、1980年代に米国アパレル産業の再生を可能にしたQR(クイックレスポンス)というビジネス・プロセスの統合モデルによる成功が始まりとされる⁵⁾。それを一般化し、デルコンピュータ社やウォルマート社などで、さまざまな手法や名称を持ったモデルが次々と考えられ、形を変えながら他の産業にも採用されて発展した。さまざまな方法論が提案されてきたが、

基本的には、下流の(需要側の)情報を上流工程が共有することや、それによって上流の工程を管理することで、供給リードタイムの短縮・欠品の回避・無駄な作り過ぎや在庫の削減を実現するということに集約できる。上記QRにおいては、米国内のアパレル産業が、市場情報に連動した柔軟な生産計画変更や工期短縮、原料や半製品での在庫期間の短縮などを実現することによって、原糸から最終製品まで56週間かかっていた総工程を12週間に縮めることに成功した。全体の在庫を大幅に削減しながら、市場動向に沿った製品の供給を迅速に行い、短期間で商品の入れ替えを可能にし、それによって、低い生産コストだけが強みであった輸入衣料品に対抗できるビジネスモデルを確立した。このモデルの構築が、今日の国際的な流通網をもつ新しいタイプのアパレル企業誕生のきっかけとなった。「下

図表2 ロジスティクス計画上の主要課題



科学技術動向研究センターにて作成

流が上流を支配する」という思想は、世界的に知られている「トヨタのカンバン方式」と呼ばれるモデルの基本でもあり、それを支える JIT (ジャスト・イン・タイム) 納入もその思想の延長で理解されている。

今日、SCM は、製品設計から顧客管理までの非常に幅広い分野を含む概念にまで発展してきた。しかし、依然としてその基本はサプライチェーンにおけるモノの生産と移動と情報の関係の高度化である。したがって、その実行上の中心はやはりロジスティクスであると言える。

本レポートは、先に述べたように、ロジスティクスの計画に対する研究開発に焦点をあてて論じる。図表 2 は、サプライチェーン上の主要な関係者間のロジスティクスにおいて、どのような計画上の課題が存在しているかを示したものである。実際のロジスティクスにおいて、問題はより輻輳しているが、起点から終点までのあらゆる過程や、戦略的な意思決定から日常の运营管理におけるまで、あらゆる経営的な階層において計画策定が必要とされることが理解できる。図表 2 において、ごく大まかに分類してあるように、主要な計画上の課題は、①国際的な物流に関する問題、②工場や倉庫と言った拠点の配置とネットワークに関する問題、③拠点における在庫配置や在庫計画・管理に関する問題、④拠点間の輸送機関選択や配送ルート、あるいは配車等の輸送に関する問題、⑤その他(需要予測、貨物の積み付け方法、人員配置やシフトなど)の課題に分類できる。さらに、最近では、これらの問題が組み合わさった課題として、温暖化ガス排出削減や資材の削減、リサイクルなどを含めたグリーン・ロジスティクスに関する課題がある。

図表 2 に示した各種の計画の策定については、いずれも多種多様なデータに基づいてさまざまな外的条件の下での最適性を追求する必要がある。このような多様で複雑

な問題に対して合理的で最適な計画をたてるためには、OR を用いた数理的な手法の適用が求められる。問題の複雑性や大規模化に対応してより高度な手法の開発研究も必要である。これらの問題については第 3 章で述べる。

2 - 2

最近の我が国の ロジスティクスにおける 問題点

最初に述べたように、サプライチェーンの大きな変換点にある現在、我が国におけるものづくりの基盤強化に対しても、原材料や部品の調達と市場への製品供給の要である国際物流の広域化と複雑化、高度な市場適応性への要求、国内における経済的合理化圧力と省エネ化、環境対応などに関して、ロジスティクスの高度化は、重要な課題となっている。国際的には、北東アジアからインド・中東・欧州に至る大規模陸上輸送網が今後発展すると考えられ、これらを含めた国際輸送実現への協力など国際的競争力の強化に向けた施策の研究は重要な課題である。

国内産業における物流コストの総額は年間約 42 兆円(2005 年)で、国内総生産(GDP)のほぼ 8% に上っている⁶⁾。自動化機器や RFID の利用などこの分野における技術的進歩もみられ、安全在庫量の最適化、配車最適化計画の普及などのソフトウェア面での改善も見られる。しかしこの領域は労働生産性が低く、(財)社会経済生産性本部の「労働生産性の国際比較(2006 年版)」⁷⁾によれば米国のほぼ 50% と言われている。さらなる合理化が強く求められる領域である。

この生産性の低さについては、我が国の物流、流通業界における、独特の商慣行である持ち届け制度

(商品の価格に需要家までの輸送コストを含めてしまうやり方。物流コストが潜在化してしまうため、物流合理化の意識が低くなる原因と考えられている。)や、店舗規模にも原因する小口多頻度配送、我が国の消費文化の特色といえる突出した鮮度へのこだわり、豊富な品揃えの要求などが原因となっている可能性が指摘されているが、さらに世界でも類を見ない厳しい物流品質(納期遵守率、注文充足率、破損率など)が求められていることも一因という意見もある。最近の研究によれば、たとえば納期遵守率(契約納期通りに納品される確率)は米国の平均 90% に対して、日本は 99.99% であり⁸⁾、これが、効率的生産を支えていることは間違いないが、一方で、必ずしも必要のないところにまで同じ精度を要求することによって、物流コストの増加につながっている可能性が指摘されている。

先に述べた 42 兆円の物流コストの中で 70% 近くが輸配送の運輸に関するコストである。近年の温暖化対策から求められている CO₂ 削減を主目的とするいわゆるグリーン・ロジスティクスへの関心の高まりや、原油高騰にともなう省エネルギー・省燃料物流の必要性から、合理的な配送手段や配送システムへの関心が非常に高まっている。この手段の一つとして、マルチモーダル輸送と呼ばれる、トラックや鉄道による陸上輸送・海上輸送・航空輸送などの組み合わせによる解決策が検討されている。これを合理的に実現するためには、設備的な対応だけでなく、複雑かつ大量の物流を実現するための OR による高度な数理的手法を用いた最適化計画が不可欠である。

当然のことであるが、サプライチェーンの変化の影響は産業全体に及ぶ。ロジスティクスに関する合理化は、サービス産業に属する

物流企業(運輸運送業・フォワーダー・倉庫事業・3PL(サードパーティーロジスティクス)と呼ばれる物流事業受託業者など)だけの問題でなく、製造業やエネルギー産業においても必要性が高まっている。

上記の図表2に示したロジス

ティクスの計画業務に関しては、すでに先進的な手法が普及している部分もある。しかし、全てにわたるサプライチェーンの変化の影響を受けて、運用を含めた大規模な国際物流ネットワークの最適設計や、グリーン・ロジスティクス実現のための高度な手法の開発な

ど、民間だけでは困難な課題の解決を、今後は大学など専門的研究機関に期待したい。第3章において、特に効果が期待され、技術的研究開発が強く求められる課題に関して、ORによる解決手段と必要な研究開発について述べる。

3 ORによるロジスティクスの高度化と期待される研究分野 ●●●●●●●●

ロジスティクスのような複雑な活動においては、単純な因果関係の想定だけではすまない。現実の状況や将来の計画について、さまざまな条件においてロジスティクスの組織や実行システム全体がどのような挙動を示し、想定したように動くかどうかを検証し、膨大な代替案について比較検討して最適な計画を策定することが不可欠である。したがって、数理科学的方法論であるOR手法の適用が必要となってくる。

3に示すように、製品やサービスを生み出す企業活動や社会的活動を、入力を与えると結果を出力するシステムとしてとらえ、その根幹的な活動の仕組みを数理的なモデルとして構築し、そのシステムの運用方法についての問題を、目的に即した数理科学的な道具を用いて分析し、最適な解決策を見出す方法論を指す。具体的には、数理統計学的手法・システム・シミュレーション・最適化アルゴリズムなどのさまざまな手法を用いて、問題の発見と解決案の検討が行われる。

強い関係があった。初期の基本技術の多くは現在でもロジスティクス計画の基本的な技法となっている。すなわち、需要予測・在庫理論・最適発注量決定・最短経路計画・数理計画法(資源配分問題・拠点配置最適化問題)・待ち行列理論・離散型シミュレーションなどの基本的な手法が解決課題として研究されてきた。

ORはすでに実業界において成果をあげている学問領域であるが、他の分野と同様につねに進化を求められている領域でもある。ORはその誕生以来、経営や計画の問題解決の学問として、つねに新しい問題に対して実務と一体になっ

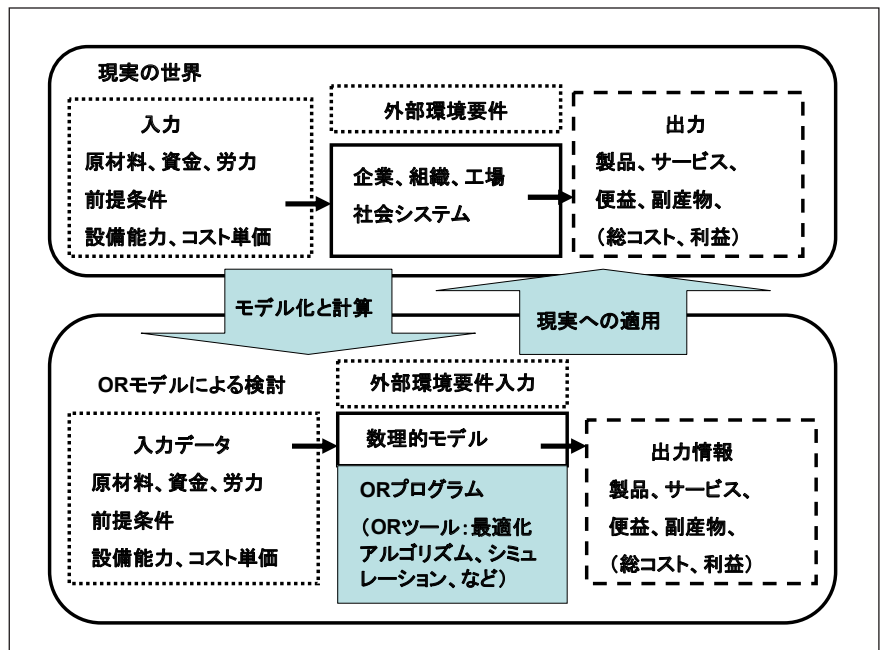
3 - 1

ORの発展とロジスティクス

OR(オペレーションズ・リサーチ)は、第二次世界大戦終盤に英国においてレーダーや夜間戦闘機、水中機雷などの新しい軍事技術を効果的に活用するために、テクニカル・リサーチに対応する概念であるオペレーショナル・リサーチ(運用研究)として誕生した。その後、米国に渡ってオペレーションズ・リサーチ(この場合は作戦研究)として発展し、軍事作戦から後方支援に至るまで、幅広く効果をあげた。戦後、その技術が企業に公開され、さまざまな産業で幅広く応用され、発展したのが今日のORである。

ORについてはさまざまな定義がなされている。一般には、図表

図表3 ORモデルによる検討の概念



科学技術動向研究センターにて作成

て新しい解決手法を開発することで発展し進化し続けてきた。結果として、新しい理論の展開によって、さらに新しい応用の局面が開拓されると言う循環がさらなる発展をもたらしてきた。

例えば、ロジスティクスの関連では、最近の航空輸送業界における著しい運賃低下は、画期的な手法による合理的な運行計画管理が可能となった結果である。このような問題は古くから大規模な数値モデルを整数計画法という手法で解けばよいことは分かっていたが、モデルのサイズが100万変数を超すような大規模な整数計画法問題を実用的な速度で解く方法が無く、部分的な計画にとどまっていた。この解決の起点となったのは、1988年にAT&Tベル研究所(当時)のカーマーカーによる手法の開発である(AT&Tはこの画期的な解法について特許を取得した。これは世界初の数式特許として、その是非を巡って論争を引き起こし一躍有名になった。)⁹⁾。今日ではこの種の問題に対して次々と実用的な解法が提案され、最適化ソフトウェアという形で製品化され、半導体の生産計画や物流拠点配置の最適化などに広く使われている。

我が国のロジスティクス分野におけるORの普及は、欧米に比べてまだ遅れている。その一つの原因は、大学において実務的な研究があまり行われていないことにある。欧米においてはORによるロジスティクス戦略などの研究と策定は、大学と企業や公共事業体との共同研究として広く行われている。その結果は、企業における研究と実施も含めて、学会発表などで公開されている。しかし我が国においては、その重要性の認識が一般的に薄い。企業と大学との連携が少ないだけでなく、企業が必要以上にデータや結果の公表を避ける傾向がある。これによって、企業における実践・研究開発・高

度な知識と応用力をもった人材の育成といったさまざまな面で遅れを取っている。優れたレベルにある我が国の研究者の多くが、研究室内の理論的研鑽にとどまってしまっている。この状況を打破する政策的な展開が求められる。後で述べるような具体的な問題、かつ政策的な立場からの推進が望まれる問題に関して、研究開発を活性化する施策がとられ、その結果が産学で共有されることを期待したい。我が国のロジスティクスは我が国の消費者行動、企業経営に合わせた独自の発展を遂げている。我が国なりの研究開発によって、さらなる高度化と貢献が期待できる領域でもある。公的な研究を推進し結果を公開していくことによって、実務的な成果に加えて、研究結果の公開が進まない事態の改善が期待でき、理論的な研究推進にも役立つ。

3 - 2

ロジスティクスへ高度化の課題とOR

(1) 広域化、複雑化するサプライチェーン・ネットワークへの対応

①大規模な物流ネットワークの拠点配置、輸送ネットワークの最適化
最近のロジスティクスに関する問題で特に注目されるのが、広域化および複雑化する拠点ネットワーク全体構造の最適化に対する問題である^{10), 11)}。

ロジスティクスにおける輸送ネットワークは原材料の生産地から、工場・倉庫・最終需要先と言った物流拠点とそれらを結ぶ輸送経路から成る。この全体をモデル化すると、しばしば万単位の式と変数をもつ大規模なネットワークモデルとなる。最適な拠点配置・選択・輸送ネットワークの合理化を行うことによって、拠点の運用

コストと輸送コストを30%近く削減することができる事例が多数報告されている。特に、コスト削減の主要部分を占める輸送コストの低減は、直接的に輸送距離の低減につながり、温暖化ガス削減につながっている。

多段階で大規模なネットワークにおける最適な経路と拠点配置に関する問題は、拠点数・輸送機関台数・配送ルートと拠点の組み合わせといった整数値でなければならぬ変数を扱うため、極めて大規模な整数計画モデル(数万~100万変数以上)による最適化計算が基本となる。このような問題は最近まで、ごく限られた計算環境を持った研究的機関しか取り扱えなかった。しかし、近年の計算アルゴリズムの進化とハードウェアの高速・大容量化によって、一般のPCでも実務的な速度で解くことができるようになった。これによって、大規模かつ広域のサプライチェーンの最適計画を行うことがかなり容易になった。

図表4にそのような計算モデルがどの程度の規模になるかの例を示してある。中継される拠点の数・製品の種類・配送手段(輸送機関)などの多様な条件を全て組み合わせた経路選択を行う最適化モデルは巨大である。このような配送ネットワーク合理化に関する数値モデルの適用は、我が国では数理的最適化に関する知識と関心の不足から、従来はあまり注目されてこなかった。しかし、燃料高騰による輸送費の増加、企業統合などによる拠点の統廃合の進展などによって、我が国でも多方面で適用が進みつつある。図表5に北米における家電物流ネットワークの拠点合理化案における最適化計画の例を示した¹²⁾。面的に大きく広がったネットワークの代替案が存在する欧米においては、マルチモーダル輸送とも絡めて、企業や大学などの研究機関を中心に、理論と実施

の両面でさまざまな研究が行われている。

特に、欧州諸国、たとえばオランダやベルギーなどにおいては、米国企業や日本企業を主な対象として自国の港湾設備や空港を起点とした物流センター拠点地区を開発し、欧州全域に対する海運(RO-RO船による近海輸送)・トラック・鉄道・河川輸送などを組み合わせたマルチモーダルの一貫輸送ネットワークが、政策的な振興策をモデルを用いて検討され提案されている^{13~15)}。

我が国では、2008年度のものづくり白書の冒頭にサプライチェーンの重要性と高度化の必要性が挙げられているが、特に我が国にとっては、今後、アジア諸国やロシアとの物流連携が重要となる。例えばシベリア鉄道の活用については、我が国から欧州に向けての輸送日数が40日以上から約20日と半減することになるため、いくつかの企業がすでに活用を表明している。政府としても「ユーラシア産業投資ブリッジ」構想として近代化に支援を行うことが表明されている¹⁶⁾。今後特に重要となるのは、アジア全域における輸送網の構築と運用に関して、輸送設備や鉄道の振動対策などハードウェアもさることながら、陸路、海路を含めた一環輸送経路の合理的な運用で

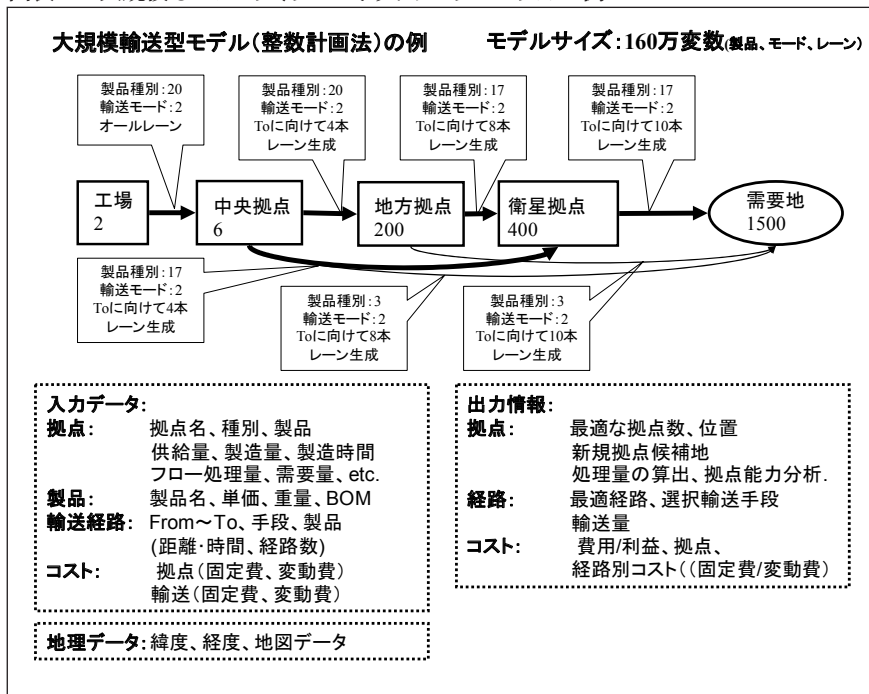
ある。他の東アジア諸国との関係も含めて戦略的に検討し、港湾設備や拠点倉庫の整備などを、省庁横断的な研究によって政策的に行っていくことも望まれる。今後のアジアにおける国際ロジスティクスの近代化において、我が国が近隣諸国に先んじて国際的な物流ネットワークの最適化研究をリードしてゆくことが求められる¹⁷⁾。

②最適な安全在庫配置による在庫量削減

広域ネットワークにおいては、

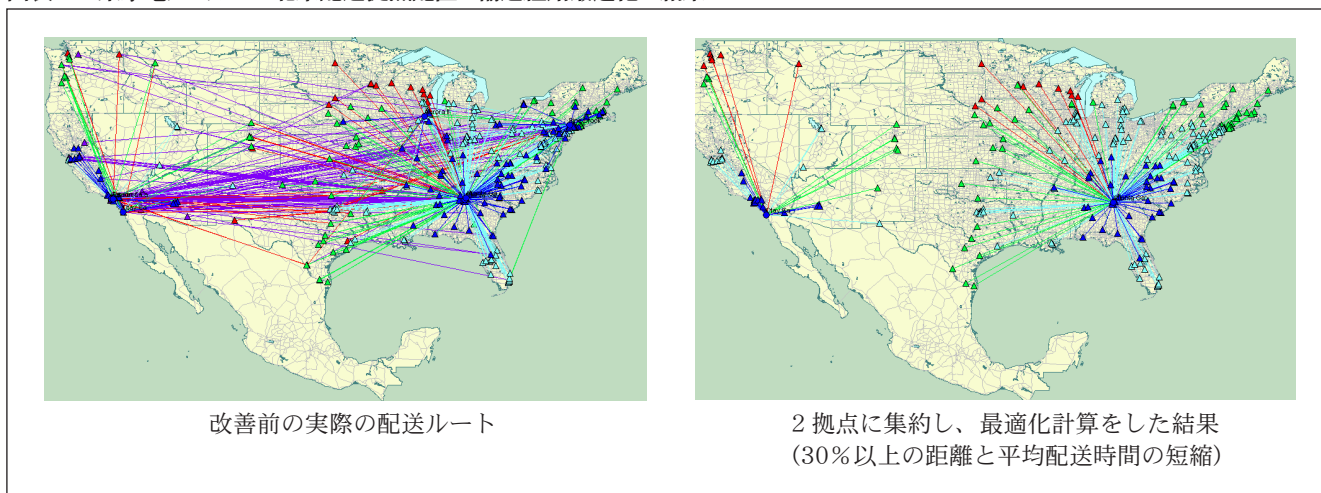
最終需要の変動と需要家への供給リードタイム短縮の要求に応えるために、最終需要地近くに大量の在庫を置くことは経済的には最適解とはならない。供給と輸送のリードタイムを勘案した最適な安全在庫量を、ネットワークのどの地点にどれだけ持っておくかは、資源の有効利用と経済最適性から大きな問題であり、実務的な解を得ることは難しい問題とされていた。しかし、最近開発された動的計画法による手法や複雑系のシミュレーション技術などによって

図表4 大規模なロジスティクス・ネットワーク・モデルの例



フレームワークス社資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表5 某家電メーカーの北米配送拠点配置と輸送経路最適化の結果



参考文献¹²⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

解決に近づいた^{10, 18)}。このような最適化によるコスト低減の効果は30%に上る事例もある。先に述べたグローバル化への対応のためにも、今後もさらなる最適化技術の発展によって大きな経済的効果が期待される。特に国際的な市場展開を行っている製造業においては、サービスパーツの在庫をどこにどれだけ置くかを、サービスレベルと在庫コストとの関係から最適化する利益は大きい。国際的な展開をしている北欧の家具メーカー¹⁹⁾、欧州のタイヤメーカー、プリンターメーカー、自動車メーカーなどが積極的に研究を行っている。しかし、拠点ネットワークにおいて本来は同時に最適化されるべき、輸送コストから見た拠点配置の最適化と拠点における在庫配置の最適化を同時に行うことのできる解法は、現在のところまだ発見されていない。今後の研究が期待される分野である。

③モーダルシフトとマルチモーダル輸送

最近の生産と市場のグローバル化に伴って、陸上(トラック、コンテナ、鉄道)・海上(コンテナ船とトレーラー船)・航空を組み合わせたマルチモーダルな国際一貫輸送についての最適化計画が必要となっている。輸送経路の複雑化と時間的な計画の困難性をともなっているため、合理的な経路選択と運行計画のためには、ここでも数理的なモデルが必要である。また、先に述べたような、特にアジア地域や亜欧間輸送のような広域の計画策定には、マルチモーダル輸送の研究は不可欠である。

同様な問題は、国内でのモーダルシフトによるCO₂削減計画においても起こっている。ここでは幹線輸送と地域配送(ラスト・ワン・マイル)の組み合わせ計画が必要になっている^{20~23)}。最近では、電子部品の組み立て工場への大規模

な巡回集荷・配送(ミルクラン)と完成品の需要地への幹線輸送、最終需要家への共同配送を大規模な配車コントロールシステムで実現し20%のCO₂削減を実現した事例などが発表されている^{24~26)}。

この場合にも、我が国では、実務的なデータの入手が困難なことであって、大学のような研究機関がこの分野の研究を行うのは困難になっている。欧米では、輸送コストタリフ(運賃表)がオープンに入手可能である。また、先に述べたネットワークの面的な広がりや代替輸送手段がいくつも存在する(トラック、トレーラー、鉄道、河川輸送、空路)。このため、この領域の研究がさまざまな側面から行われている。我が国においても、地方港湾の有効利用、あるいは地域産業集積地の活性化のために、企業との共同研究はもちろんであるが、行政区分も超えた輸送最適化の研究が一層活発に行われることを期待する。

(2)新しいモデル構築法と計画手法の開発が期待される課題

以下のテーマはいずれも企業のロジスティクスにおける重要な問題である。しかし、解決法については、産学連携によるさらなる研究が期待される。実務的な対応は個々の企業にゆだねられる問題もあるが、我が国の優れた数理科学研究者と、実務家の協力によって新しい手法開発が実現すれば、世界のロジスティクスとORに対して貢献する可能性をもつ。

①需要変化に迅速に対応する、動的最適化配送計画

変化する需要に迅速に対応することのできる、生産、輸送システムの高度化のための新しい数理的解決手段の開発は、今後大いに期待される。GPSやRFIDによるリアルタイムな情報収集を起点として、リアルタイムの再スケジュー

リング・近未来シミュレーション・動的な配車配送計画変更などを、先に述べたような大規模最適化アルゴリズムの実用化などを突破口として実現する技術が期待される。

トラックの配車を数理的なアルゴリズムによるツールを使って合理化することは、我が国でも普及しつつある。しかし、都市交通の緩和、平均50%というトラック積載率の向上による省エネルギーとコスト低減は、温暖化ガスの低減にも直接つながるため、配車計画システムの一層の精緻化と普及が期待される。これによって、積み荷の共積みや共同配送による効率化、合理的な配送時間帯選択による運行コストの低減、集荷と配送の組み合わせなど、きめの細かい運行計画が広く実施されることが、後に述べるグリーン・ロジスティクスの推進にもつながる。

②リスク管理と経済最適性を目的とする調達計画

原材料や部品調達のグローバル化とオープンソース化にともなって、災害やテロなどのリスクに対応し、かつ、安定供給と経済性をともなった調達計画と、複雑な要因をもつ調達先の最適選択には、組み合わせ理論を用いた解決が期待できる。

地震などの災害による交通途絶に対応する代替的な輸送手段を確保するためには、必要な公共投資を合理的に決定しなければならない。このような決定には数理的な検討による社会的コストのシミュレーションが役立つと考えられる。

③製品とサプライチェーンの併行設計(コンカレント・エンジニアリング)

最近、海外においても研究が進みつつある領域の一つが、製品設計と同時併行的にサプライチェーンの設計を行い、最適調達や製品配送

ルートを考慮して、設計そのものを変化させるという方法論である。我が国の複写機メーカーにおいて、最終製品化の地点をサプライチェーン上のどこにおくかを再検討し、中間地点において容易に市場変化に適合した最終製品化を行えるように、部品のモジュール化設計を行い、大幅な納期短縮と在庫削減によるコストダウンに成功した事例があるが、これは理論的な最適化から導いたものではない。このような設計技術をより広範囲に適用して、部品の調達経路も含めて一般化するには、複雑系のシミュレーション技術など、あたらしい数理的な開発研究を進める必要がある。

製品の設計を含めたサプライチェーン最適化は、今後進むと考えられるカーボン・フットプリントの実施においても良い影響を及ぼす。カーボン・フットプリントは原料から生産、販売、物流に至るまで、商品のライフサイクル全般にわたって排出される温室効果ガスを CO₂ 排出量として商品パッケージなどに表示する。英国において活発に進められていて、我が国でも適用の検討が始まっている。消費者には低環境負荷製品の選択を促し、生産者にはより負荷の少ない製品の生産を促進させることができる²⁷⁾。工場立地によっては、工場のエネルギー源による温暖化ガス発生に加えて輸送による負荷増大もあり得る。

④新しい輸送手段とその有効活用のための数理的解決策の研究

今後、エネルギーコストと環境負荷の低減を目的として、新しい輸送手段の開発が進むことが考えられる。中近距離海上輸送に対応する Ro-Ro 船 (Roll-on/roll-off ship の略で、トレーラーなどの車両を、自走で搭載・揚陸できる構造の貨物船。中短距離輸送にはコンテナより適している。) によるトレーラー輸送の国際的な実現や、すでに一部の自動車メーカー

で実施されている新しい鉄道コンテナと専用トレーラーによるマルチモーダル輸送の実用化、鉄道による海上用 40 フィートコンテナ輸送の実現とその有効活用をはかるための貨物集約、積み替えセンターの配備などハード面が革新されつつあり、それらに合わせた新しい運行計画の最適化システムが求められる。これに加えて、省資源のための循環型ロジスティクスを実現するためには、RFID による国際的なコンテナ管理・パレット管理・循環輸送のルート計画技術などが一層研究されなければならない。

⑤サプライチェーンにおけるビジネス・ワークフロー構造の設計と最適化の研究

複数の企業や異なった事業体を結合するサプライチェーンの構造とワークフローの最適化について、標準化プロセスモデル (SCOR モデル)²⁸⁾ やビジネスプロセスモデリング (IDEF など) の適用についての研究がより一層必要である。個別の課題対応のみに終始しがちな我が国のサプライチェーン合理化においては、このような全体最適性を当初から意図したトップダウン型のモデル構築と設計思想はなじみが薄く、ようやく最近になって注目され始めたところである。今後の全体的な視点に立つサプライチェーン合理化のための一層の研究が求められる。一方、SCOR のような方法論は、基本的にはトップダウン的な組織経営を前提にしたものである。したがって、我が国のボトムアップ型の決定機能をもつ組織において効果を発揮するためには、欧米の引き写しでない独自のモデル化と実施のための理論が研究されなければならない。

⑥社会科学的アプローチとの協働によるサプライチェーン構造の研究

サプライチェーンのネットワー

クは多くの同業種、あるいは異業種の企業(場合においては異国籍の企業)によって構成されている。各企業における意思決定は、他の意思決定主体(他企業)の存在を意識したものでなければならない。しかし、従来の理論や経営的なソリューションは単一の意思決定主体を前提として成り立っている。このような相互作用を前提とした戦略的な意思決定を科学的に扱うためには、ゲーム理論やミクロ経済学、あるいはエージェントモデルなどの助けを借りなければならない²⁹⁾。環境問題を含めて、複雑な構造をもつサプライチェーン・ネットワークの挙動を解析し、その効率性の測定や改善を図るためには、理数系のアプローチによる研究と社会科学的なアプローチによる研究との学際的な協働作業が不可欠である。海外においてはサプライチェーンやロジスティクスの問題に対して、このような協働作業による研究が盛んに行われていて、経営工学系の学術論文誌には多くの発表がなされている。学際的な立場で、マネジメントのあり方を研究することは、企業の意思決定に役立つだけでなく、我が国の産業政策策定などにも有益な知見をもたらすと考えられる。

3 - 3

グリーン・ロジスティクスの推進に対する OR の役割

我が国は、2008 年から 2012 年までの京都議定書の第一約束期間を迎えて、この期間に温室効果ガス排出量を基準年度 (CO₂、CH₄ および N₂O については 1990 年度、代替フロン等 3 ガスについては 1995 年度) 比で 6% 削減することが目標となっている。しかし、実際には 2006 年度の我が国の温室効果ガス排出量は 13 億 4,000 万トン (CO₂ 換算) で

あり、基準年度比 6.2% 増となっている。

これは、我が国の温室効果ガス排出量の約 9 割に当たる化石燃料起源の CO₂ 排出量が 2006 年度で基準年度比 12% と大幅に増大したことが主な原因である。この化石燃料起源の CO₂ 排出量の中で、約 20% を占める運輸部門からの排出量は 1990 年度比で約 20% 増大している。

このような状況に加えて、最近の燃料油の高騰による輸送コスト増を背景にして、我が国産業の基盤を守るために、ロジスティクス部門における省エネルギー化は極めて重要になっている。

第 3 章で述べた、さまざまな課題に対する OR の適用においても触れたように、ロジスティクス合理化は直接的にグリーン・ロジスティクスの実現に寄与することが多い。しかしながら、グリーン・ロジスティクスに特徴的な課題も存在する。

グリーン・ロジスティクスに対する OR の適用において、特に研究されるべきテーマは、複数の目的関数、すなわち、エネルギー効率・温暖化ガス排出量・コスト、などの同時最適化を行う手法とモデル構築である。数理的モデルの最適化においては複数の目的関数を同時に満足する解の策定、いわゆる多目的計画に関する研究の必要性がある。グリーン・ロジスティクスを対象として多目的関数モデルの解法としていくつかの提案がなされている。大きく分けて、①複数の目的関数に対して、それぞれの解に、あるウエイトをつけて一つの関数にまとめ、その最小化(環境負荷合計+コスト、など)あるいは最大化(対策の効果)を行うもの、②ある目的関数を最小化あるいは最大化することを、他の目的関数の目標値を制約条件として解く方法、③複数の目的関数の値の収斂点をたとえばパレート最

適化などを用いて求めるもの、が提案されている。しかし、いずれも決定的な方法とはなっていない。この方面に対して、実際的な問題のモデル化の方法と、数理的な解法の双方からの研究が期待される²⁰⁾。

もう一つの大きな課題は、すでに 3 章でも触れているが、モーダルシフトとマルチモーダル輸送に関する研究である。輸送機関による CO₂ 排出量は図表 6 に示すように大きく異なる。したがって、輸送手段の研究は温暖化防止に効果を発揮する。具体的な対策としてすでに実施され始めているものとして、先に、適切な配車・配送計画で 20% の CO₂ 削減を行った例を述べた。モーダルシフトはさらに大きな効果が期待されている。すでに、幹線輸送の鉄道への切り替えによって、80% 近い CO₂ 削減を行った事例や、近距離海運の共同利用による今後の削減計画などが報告されている²⁵⁾。先に述べた、カーボン・フットプリントが実施されるとその重要性はますます大きくなると考えられる。

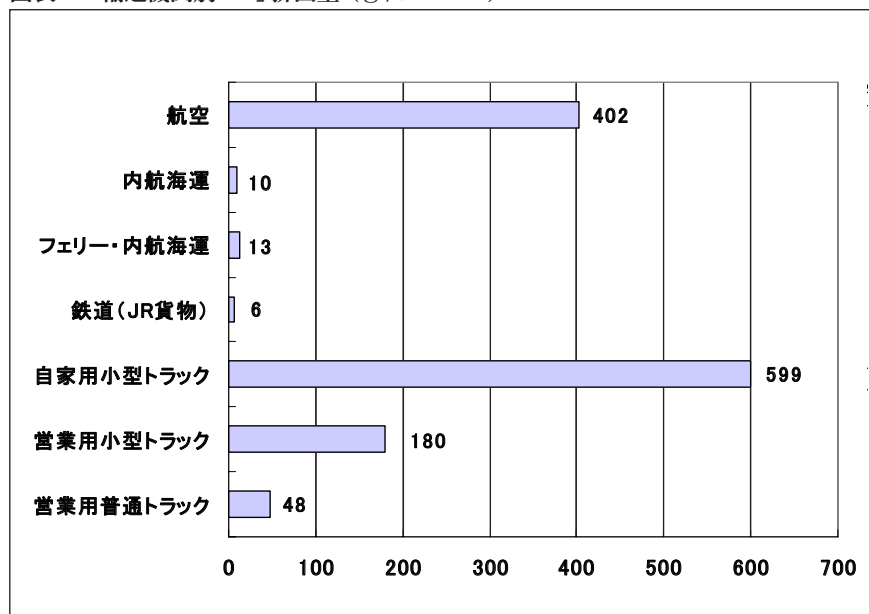
しかしながら、現在まで、我が国においては、検討が各個別企業の範囲に止まっていて、企業をま

たぐ、あるいは国家的な政策に向けての OR による研究がなされていない。欧州においては、EU 全体として、大学を中心に多くの研究がなされ、提案が行われている。国家的政策としてロジスティクス合理化を進めるには、企業間だけでなく、省庁や自治体の壁を越えた協力体制が不可欠である。

港湾整備や道路整備といった個々のインフラ整備にとどまらず、貨物の集配拠点の効果的な配置と機能の整備、あるいは鉄道を含む幹線輸送とラストワンマイルと言われる個別顧客への配送との組み合わせなど、複合的・総合的な計画立案とそのためのモデル開発や最適化アルゴリズムの研究などに、大学や公的研究機関が果たすべき役割は大きいと考えられる。このような研究に対して優先的な奨励政策を行うことも効果的であろう。

先に述べた、アジア全域とロシアを含めた輸送網の整備に関する研究においても、陸海空を含めたモーダル選択とそれによる国際的な環境負荷低減の施策検討が必要である。

図表 6 輸送機関別 CO₂ 排出量 (g / ton · km)



参考文献³⁰⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

ロジスティクス高度化にむけた サービス科学研究への期待

サービス科学はパルミサーノ・レポートと略称される米国競争力評議会(Council on Competitiveness) 国家イノベーション・イニシアティブ最終報告「Innovate America: Thriving in a World of Challenge and Change」(2004.12)³¹⁾において、イノベーションを誘発する可能性をもった新しい学問領域として紹介された。サービス科学は、新しい産業構造に対応した科学技術発展の一方方向として重要である。当然なことであるが、サービス産業として大きな位置を占めるロジスティクス産業についても、サービス科学の研究が進むことによって得られる利益は大きいと考えられる。

同レポートでは、サービス科学とORとの関連について下記のように指摘している。「新しい『サービス科学(services science)』の分野ほど、明らかに新しい学際的なアプローチを必要としている分野はない。『サービス科学』とは、コンピュータ科学、オペレーションズ・リサーチ(OR)、生産工学、数学、経営科学、デザイン・サイエンス(決定科学)、社会科学、法科学などの既存分野が融合したものである。そしてこれが企業活動全体に変革をもたらし、ビジネスとテクノロジーの専門知識が交差する領域でイノベーションを促進するのである。」

ORによるサービス生産性向上の好例としては、銀行ATM窓口やJR切符売り場が挙げられる。行列の待ち方が、以前の窓口ごとの行列からフォーク型に変わることによって、全体としての待ち時間が短縮され、単位時間におけるサービス率が向上し、顧客の心理にも好影響を与えている。これ

はORの典型的な手法の一つである待ち行列理論の適用によるものである。日本での普及は比較的最近であったが、この急速な普及には1991年NHKの番組「トライ & トライ」での森村東京工業大学教授(当時)の実証実験映像の影響が非常に大きかったといわれている³²⁾。この理論はサービス窓口数の設計・運用にも使われ、切符売り場の他、高速道路の料金収集所、空港の旅券検査窓口数などの設計にも適用されている。

サービス科学の目的の一つとして、サービスに対するエンジニアリング的手法の適用による生産性向上・コスト低減・品質向上がある。すなわち、サービスの定量化、サービス・ソリューションのモジュール化、標準化、モジュールの結合による全体設計などを研究し、それらを通してエンジニアリング手法のサービス産業への適用と、それによる生産性向上を図ろうというものである。

ロジスティクスはこのようなサービス科学のアプローチによって学際的に研究を進めることで大きな成果が期待できる領域であると考えられる。特に、サービスの品質という面で、サービス品質を対象に、すでに、KPI(Key Performance Indicator: 重要業績評価指数)、メトリックス、ベンチマークなど³³⁾の計量的概念が浸透している。データが集めやすいこと、サービスの提供者と受益者(顧客)の関係が比較的明確に特定しやすいことなど、研究対象として取り上げやすい条件も持っている。

例えば、ロジスティクスにおいては「完全オーダー達成率」という品質概念がある。これにはいくつかの異なった定義があるが、たとえば先に述べたSCORにおける定義では、数量充足率・納期遵守率・ドキュメント完全性・非破損率の4つの百分比を掛け合わせた数値

で示される²⁸⁾。これは欧米では物流業者の品質保証の一指標となっている。しかし、我が国では、まだこのようなコスト以外の数値に重点を置いた契約は珍しい。今後、品質とコスト、あるいは生産性との関係を研究するには格好の材料ではないかと考えられる。

一方において、サービス科学の研究においては、要素還元的な、物理的に計量できる数値にとらわれた方法論に頼りすぎないことも必要と考えられる。サービスの品質と顧客の満足度を分析し最適設計を行うには、ORの中でもデザイン・サイエンスと呼ばれる分野の手法が有効である。たとえば非定量的な要因の価値評価を行うAHP³⁴⁾(階層化意思決定法:最近では首都移転の候補地絞り込みに用いられた)や、コンジョイント分析(商品企画の分析などに使われる手法)、複数の入出力を同時に扱いながら組織の効率性評価を行うDEA³⁵⁾(包絡分析法:図書館や病院など公共サービス機関の分析事例がある)などである。

サービス科学において、我が国が特に貢献できる研究領域は、西欧的なアプローチでは軽視されがちな、定性的・感性的な品質についての評価に関する研究と、日本人の特質とも言える、部分と全体を同時に考えるホリスティックな考えに則った研究であろう。

我が国独特の、過剰とも言える品質へのこだわりは、ロジスティクスの分野においても見られる。それが社会的コストの増加をもたらしているという側面もあるが、同時に、快適な市民生活をもたらす結果になっていることを見過ごしてはならない。学際的・境界領域的な研究を推し進めることによって、計量可能な数値にこだわった評価基準の欠点を補うことは、サービス科学の発展に対する我が国の貢献として重要なことと考えられる。かつて、我が国は工

業製品の品質管理において、それまで二律背反と考えられていた、品質向上とコスト低減が両立可能であることを立証してみせた。ロジスティクスにおいても、例えば、コンビニエンスストアへの商品配送において、OR手法による配車計画と通過型配送センターの活用や、専用車両へのきめ細かな温度

帯別の配送スケジューリングを組み合わせた。これによって、1974年のコンビニエンスストア発足時には1日1店舗あたり70台、2年後でも42台であった配送便数を1987年には15台、2005年には9台に減少させた。しかも弁当やパンの新鮮さを向上させている。このようにサービスと効率性

の両方での解決を成功させている例もある³⁶⁾。こういった視点から、我が国ロジスティクスの強みと弱みを分析し、そこを基点にして学際的にロジスティクスの品質に関する研究を行うことができれば、サービス科学全般に対しても我が国が貢献できると考えられる。

4 結論と提言

以上、サプライチェーンの大きな変換局面を迎えて、産業の基盤として重要な役割を持つロジスティクスの合理的な計画と運用に対してORの手法を用いた最適化計算やシミュレーションによる支援の有効性と、特に今後の研究開発を期待する課題について述べてきた。

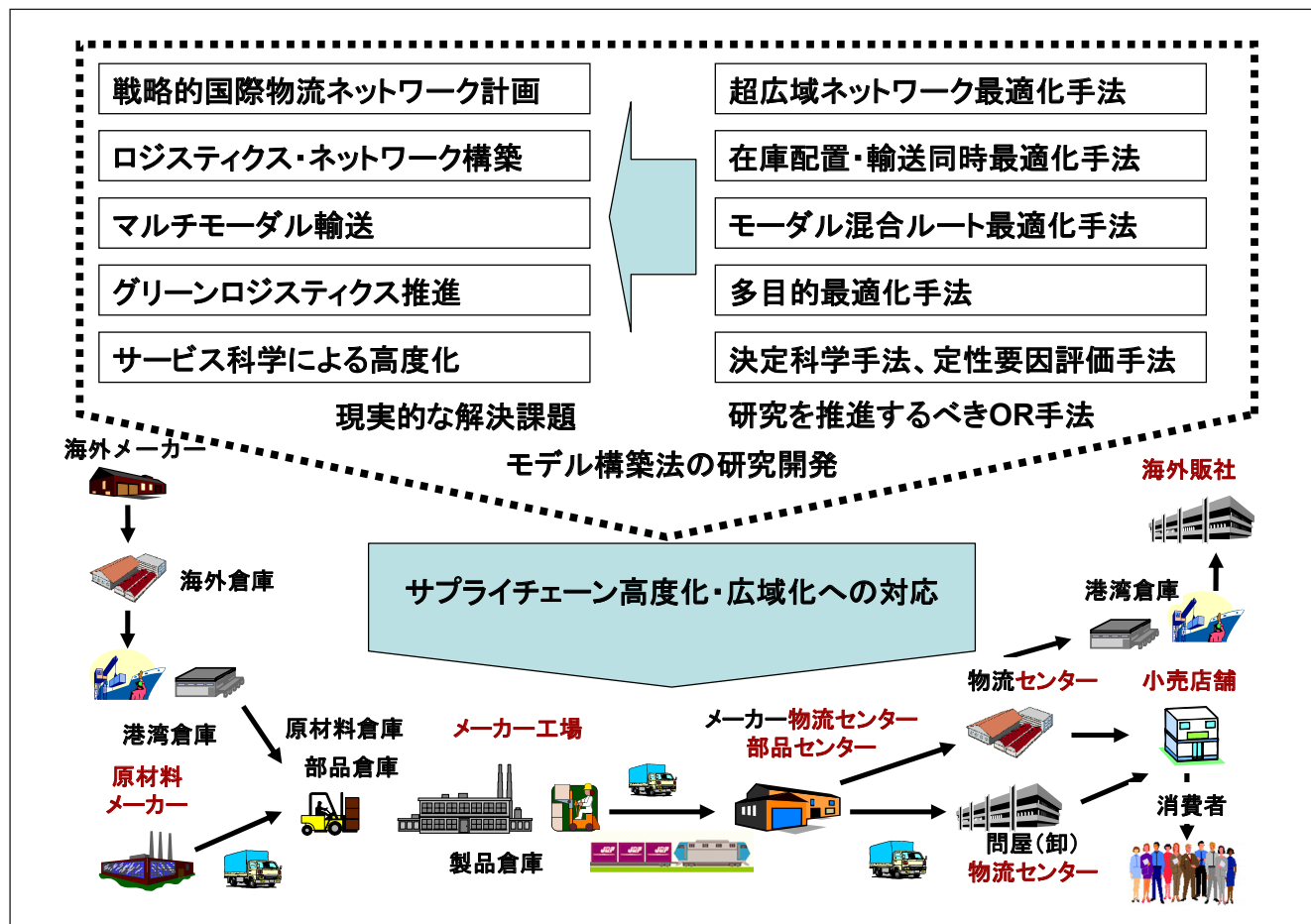
図表7は第3章で述べた解決課

題の中で特に重要な5つのテーマと、それらに対応するOR手法の研究開発テーマをまとめたものである。先に述べたように、今日のロジスティクスが直面する複雑化・広域化・国際化の課題に応え、将来の問題を解決するためには、図表7の左に示した戦略的視点を持った課題そのものの研究と同時に、右に

示した複雑な現実をモデル化し実際的な解を与えることのできる高度なOR手法の研究開発の両方が推進されなければならない。

今後の、ロジスティクスの高度化とそのためのOR技術の開発研究推進にあたっては、これらの重要課題の研究推進とともに、以下に述べるような政策的な対応が求められる。

図表7 ロジスティクスの主要な解決課題と、対応するOR手法の研究開発テーマ



科学技術動向研究センターにて作成

(1) 工学的問題としてのロジスティクスと人材養成

従来、我が国のロジスティクスのOR手法による合理化、最適化は、欧米に比して進んでいない。その理由は、欧米では基本的には工学的問題としてとらえられ、技術系の教育研究機関における研究が活発に進められ、また高等教育の学部も早くから確立していたのに対して、我が国では商学系の業務や営業・販売に付随する業務ととらえられる傾向が強く、企業においても理工系学界においても、その位置を確立できていなかったことにもあると考えられる³⁷⁾。近年、欧米やアジア諸国においては理工系大学がロジスティクス高度化推進の中心となっている。我が国においても、理工系を重視したロジスティクス研究推進体制ができることが望ましい。欧米においては、サプライチェーンに関する政策提言において、OR手法を駆使できるなど高度な能力をもった専門家の養成が上げられていて、産学官における具体的な教育体制やカリキュラムの検討も開始されている^{38, 39)}。アジア各国の大学においても、欧米大学との連携を進めて高度な能力を持ったSCMやロジスティクスの専門家養成に乗り出している^{40~42)}。我が国のロジスティクスの高度化のためにも、研究開発の促進のために、諸外国に比肩する人材の養成は急務であり、これ以上の遅れは許されない。高等教育機関におけるロジスティクス教育と研究を促進し、我が国が、この面においてアジアにおける国際的な水準の向上に寄与し、研究協力の推進者となることは今後の政策の重要課題の一つであると考えられる。

(2) ロジスティクス、SCMとORの研究分野としての認知

これらの分野の研究開発促進のためには、(独)日本学術振興会(JSPS)の科学研究費補助金(科研

費)の、系・分野・分科・細目に、現在は含まれていないサプライチェーン・マネジメント、ロジスティクス、物流と言った項目を追加して、研究対象分野として認知することが必要であろうと考えられる。(独)科学技術振興機構(JST)の技術分野分類にも含まれていない。これについても追加されることが望ましい。さらに、経営科学、OR、経営工学といった、欧米では重要な研究推進領域とされている項目もどちらにも含まれていない。これらについても速やかな追加が実現されることが望ましい。すでに歴史も規模もある関連学会が複数存在しているので、こういった措置が採られれば、関連学会の研究開発の活性化に大いに寄与するであろう。

(3) 学際的あるいは省庁横断的研究体制

グリーン・ロジスティクスとサービス科学へのOR展開を考えると、理工系分野と経済学など社会科学分野や人間科学といった分野との学際的研究の促進が求められる。このような、境界領域的な研究開発においては、日本的な社会システムの強みと弱みを研究し、欧米の要素還元的なアプローチのみにとらわれず、より全体的な視点からの問題解決を実現することによって、我が国が世界のOR発展に対して貢献できる可能性を秘めている。このような可能性に対する研究支援体制が求められる。

謝辞

本レポートの執筆にあたって、大学研究者、実務家を含め30名を超す多くの方々にインタビューや資料提供を頂き、参考にさせていただいた。ここに深甚の感謝を申し上げる。また、(社)日本オペレーションズ・リサーチ学会、(社)日本経営工学会のサプライチェーン関連研究部会メンバー、日本物

流学会の方々との討論から多くの示唆をいただいたことも特に付記しておきたい。

参考文献

- 1) 経済産業省、厚生労働省、文部科学省、「平成19年度ものづくり基盤技術の振興施策」(2008)
- 2) Council of Supply Chain Management Professionals: <http://cscmp.org/default.asp>
- 3) D.M.Lambert,J.R.Stock,“Strategic Logistics Management”, Macgraw-Hill/Irwin (2000)
- 4) D.J.パワーソックス他 阿保栄司他 訳「サプライチェーン・ロジスティクス」朝倉書店(2004)
- 5) 黒田充編著「サプライチェーン・マネジメント 企業間連携の理論と実際」朝倉書店(2004)
- 6) 日本ロジスティクスシステム協会「2007年度 物流コスト調査報告書」(2008)
- 7) 社会経済生産性本部「労働生産性の国際比較(2007年版)」
- 8) 圓川隆夫「SCM性能の国際比較からみる我が国現場力の強みとマネジメントの弱み」、科学技術政策研究所、所内講演会資料(2008)
- 9) 今野浩「役に立つ一次式—整数計画法「気まぐれな王女」の50年」日本評論社(2006)
- 10) D.E.スミチ・レビ他、久保 幹雄監訳「サプライ・チェーンの設計と管理—コンセプト・戦略・事例」朝倉書店(2006)
- 11) 久保幹雄「サプライチェーン最適化入門」朝倉書店(2004)
- 12) 井筒幸彦「国際ロジスティクスの基本的な考え方と要求機能について」OR学会サプライチェーン・ネットワーク研究部会報告(2005)
- 13) “Supply Chain 2020 Project Working Paper, A review of the Leading Opinions on the Future of Supply Chains”, Dec.2004
- 14) Allan Woodburn,“An Investigation of Container Train Service

- Provision and Load Factors In Great Britain”, University of Westminster (2006)
- 15) 藤原利久「ベルギーの陸海空総合物流調査～東アジア・北部九州の先進事例として～」、物流学会第25回全国大会予稿集(2008)
- 16) (社) ロシアNIS貿易会、第16回RBC国際ビジネス会議資料、小嶋 典明 経済産業省 通商政策局 欧州中東アフリカ課 ロシア室長、「日ロ経済関係と鉄道分野」：http://www.rotobo.or.jp/activities/rbc/rbc9_2.pdf
- 17) 岩間正春「物流の視点から考えたアジアのグローバル化」静岡学術出版(2008)
- 18) D.Simchi-Levi, “A New Approach for Inventory Planning”, Presentation, CLM2004(2004)
- 19) J. Shapiro, T. Dudas “Building the Optimal Logistics & Distribution Network Strategy” Presentation, CLM2004(2004)
- 20) Irina Harris, Mohamed Naim and Dr. Christine Mumford, “A Review of Infrastructure Modeling for Green Logistics”, Cardiff University(2007)
- 21) J. QuariguasiFrota Neto, J.M. Bloemhof-Ruwaard, J.A.E.E. van Nunen and H.W.G.M. van Heck “Designing and Evaluating Sustainable Logistics Networks”, Erasmus Research Institute of Management (ERIM)(2006)
- 22) A.Sbihi, R.W. Egl ese “The Relationship between Vehicle Routing & Scheduling and Green Logistics-, A Literature Survey”, Lancaster University Management School(2007)
- 23) Julie Paquett, “The Supply Chain Response to Environmental Pressures”, MIT(2005)
- 24) グリーン物流パートナーシップ会議、グリーン物流のしおり、経済産業省 商務情報政策局(2008)
- 25) 日本ロジスティクス・システム協会「第2期ロジスティクス環境会議、2007年度グリーン物流研究会活動報告」、日本ロジスティクス・システム協会(2008)
- 26) Yuji Yano, Katsuhiko Hayashi, “Typology of Efforts by Japanese Companies to Address Logistics-related Environmental Issues”, “Ryutsu Keizai University (2007)
- 27) 工藤拓毅(エネルギー経済研究所)、温室効果ガスマネジメントの標準化に関する最新動向と今後の展望、産業環境管理協会(2008)
- 28) Supply Chain Council, “Supply Chain Operation Reference Model V.9.0”(2008)
- 29) M.Nagarajan, G.Sosic, “Game-theoretic Analysis of Cooperation Among Supply Chain Agents: Review and Extensions”, European Journal of Operations Research (2006)
- 30) (社)日本物流団体連合会「数字で見る物流」(2007)
- 31) National Innovation Initiative and Summit and Report “Innovate America-thriving in a world of challenge and change” Council of Competitiveness (2005)
- 32) 森村秀典他「トライ&トライ：うまい待ち方、待たせ方」NHKアーカイブス(1991.1.29)
- 33) 藤田精一他「わが国物流現場の平均像とベスト・プラクティスを探る」、マテリアル・フロー(2008.8)
- 34) 木下栄蔵、大野栄治編集「AHPとコンジョイント分析」現代数学社(2004)
- 35) 刀根薫「経営効率性の測定と改善」日科技連(1993)
- 36) 田中陽「セブン-イレブン 覇者の奥義」日本経済新聞社(2006)
- 37) 圓川隆夫、市川隆一「ロジスティクスから経営者が生まれる」、経営とロジスティクス、Vol.1 (2008)
- 38) Jake Barr John Dischinger “The Emerging Need for Supply Chain Talent : Working to fill the gap...” Supply-Chain World 2008, Supply Chain Council (2008)
- 39) D.Aquino and L.Draper, “Supply Chain Talent: State of the Discipline”, AMR Reseach
- 40) シンガポール大学：<http://www.tliap.nus.edu.sg/>
- 41) 香港科技大学：<http://www.ielm.ust.hk/>
- 42) Supply Chain & Logistics Institute：<http://www.tli.gatech.edu/research/china/> 「TLI-Asia Pacific Program Sets Goals for Next Five Years」：<http://www.tli.gatech.edu/news-events/release.php?id=1887>

執筆者



高井 英造

客員研究官

(株)フレームワークス 特別技術顧問
<http://www.frame-wx.com>



研究分野はOR/MSだが、さまざまな業界のSCM、ロジスティクスに適用する面白さに惹かれている。いくつになっても、若い人たちと一緒に新しいアイデアを考えて実現してゆくのは楽しい。世代と専門を超えたコラボレーションが新しい活力とイノベーションの源泉と思っている。

地震予知研究の動向と問題点

松村 正三
客員研究官

1 はじめに

2008年5月12日中国四川省を襲った地震M(マグニチュード)8.0は、10万人に近い死者と行方不明者を出す歴史的な大災害となった。新聞報道によると、現地では今回の地震に対して予知情報が出なかったことに不満が噴出したとのことである。特に小中学校の建物崩壊による犠牲者の多さが問題視され、「中国の地震対策は井戸水や地殻の観測による予知に力を入れており、建物耐震対策が遅れている」との批判もなされた¹⁾。おそらくこれがきっかけとなって中国でも地震防災のための施策が見直され、建築物の耐震強化に向うことになるだろう。この地震によるショックがまだ冷めやらぬ6月14日、今度は、我が国で岩手・宮城内陸地震(M7.2)が起り、20人を超える犠牲者が出た。さらに、7月24日にも岩手県中部地震(M6.8)が発生した。いずれにせよ、地震は思いがけない時に思いがけない場所を襲うものだという印象がますます強められ、そうした言い方がマスコミ間で定着する始末となったが、これを裏返せば、現在の地震予知研究への不信が表明されたとも言える。地震予知研究の現状は一体どうなっているのだろうか。

中国に限らず世界中で、予知は地震研究の中心的な課題とされてきたが、その流れが変わったのは1990年代半ばである。我が国でも、1995年1月17日の阪神・淡路大震災(M7.3)によって6400人を超える死者が出たことが契機となり、この後、国家施策としての地震対策が見直されることとなった。これに伴って、地震研究も様変わりを余儀なくされ、予知研究一筋から、より現実的な防災研究へ、あるいは、より基礎的な研究へと分化していくこととなった。ただし、地震予知そのものが顧みられなくなったわけではない。「過去の事象を分析し、将来の事態を予測する」という道筋は科学の本道でもある。これまで安直に、あるいはやや不用意に使ってきた「予知」という言葉と概念に対して、より科学的な姿勢をもって対峙しよう、という態度表明がなされたと言うべきであろう。そうした方向転換から10年あまりを経過した現在、変革された地震研究は、予知にどう関わり、どのように貢献してきたのだろうか。所期の目標にどこまで近づいたのか、目標自体を捉え損ねていないのか、一旦、立ち止まって現況を振り返る時期にきているのではないだろうか。

本稿では、関連する研究の内容を「(狭義の)地震予知」と「地震発生予測」とに分けて取り上げる。「予知」と「予測」とで言葉自体の意味合いに大差はないが、ここでは次のように区別する。「地震発生予測」は、ある場所を指定した時、そこに起きるであろう地震のマグニチュードと発生確率を推定することを言う。同じ場所に同じ地震が繰り返し起きることを前提として、過去の事跡の発掘から得た情報、すなわち規模、繰り返し間隔とそのばらつき、および最新地震後の経過年数をもとにして統計的操作によって確率を求める。この場合、確率の値は時間とともに増大するとしても、その根拠となった情報そのものが変化するわけではない。これに対して「地震予知」では、特定の地震を対象とした時、観測されたデータの推移から震源域における応力蓄積がどのくらい限界に近いかを推定する。すなわち、何らかの前兆現象の検知を前提として、地震発生前の情報そのものの増大、特に直前での飛躍的増大を図るわけである。「地震発生予測」と「地震予知」の双方について、これまでの経緯と現状を振り返りながら筆者の感想を混じえることで、それぞれが抱える問題点を分析してみたい。

2 地震予知研究の変遷

2 - 1

我が国における被害地震の頻度

我が国で地震が実際にどのくらいの頻度で起きているかを確認しておこう。地震規模で分類するならば話は簡単である。日本とその近海で起きる地震個数は、M8が平均して年に0.1個、M7で1個、M6は10個、とマグニチュードが1下がるごとに頻度は約10倍となる。世界中で起きる地震の頻度はこの約10倍なので、逆に言えば日本近海では世界の1割の地震が起きていることになる²⁾。日本が地震大国と言われる所以である。もっとも、生活者として気になるのは地震そのものの大きさではなく地震によって起きる災害の程度であるが、過去に相当の被害をもたらした地震の頻度は大抵の人が認識しているよりも多い。

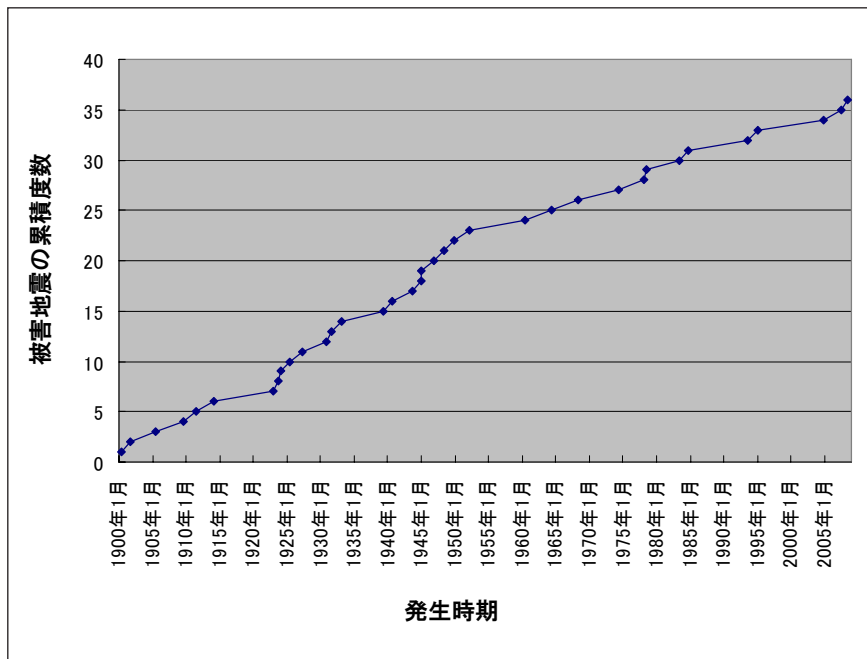
図表1および2は、1900年以降に10人以上の死者を出した地震のリストとその発生時系列を示すグラフである。総数は109年間で36個、平均発生間隔は3.1年となる。グラフから1950年以降頻度が低下したように見えるが、これは地震対策が進んだ効果によるというよりも、ここ50年間の地震活動度が若干低かったせいだと思われる。ただし低いといっても後半の平均発生間隔は4.5年であり、最近の活動度は復活してきているようにも見える。こうした状況にもかかわらず、現実には地震の発生を間遠に感じ、自分には関係ない、とつい思ってしまいがちなのは、当の地震が何処に起きるかが分からないからである。地震を研究する目的は、この問題、すなわち、何処にどのような地震が起きるか

図表1 1900年以降、我が国で10人以上の死者・行方不明者を出した地震のリスト (発生年、場所、マグニチュード、死者または行方不明者の数)

大きな被害地震 (死者・不明10人以上)				
1900	宮城県北部 (M7.0)	17	1944	東南海 (M7.9) 1,223
1901	八戸沖 (M7.2)	18	1945	三河 (M6.8) 2,306
1905	芸予 (M7.3)	11	1946	南海 (M8.0) 1,330
1909	江濃 (M6.8)	41	1948	福井 (M7.1) 3,769
1911	喜界島 (M8.0)	12	1949	今市 (M6.4) 10
1914	秋田仙北 (M7.1)	94	1952	十勝沖 (M8.2) 28
1914	桜島 (M7.1)	35	1964	新潟 (M7.5) 26
1922	千々石湾 (M6.9)	26	1968	十勝沖 (M7.9) 52
1923	関東 (M7.9)	142,807	1974	伊豆半島沖 (M6.9) 30
1924	丹沢 (M7.3)	19	1978	伊豆大島近海 (M7.0) 25
1925	北但馬 (M6.8)	428	1978	宮城県沖 (M7.4) 28
1927	北丹後 (M7.3)	2,925	1983	日本海中部 (M7.7) 104
1930	北伊豆 (M7.3)	272	1984	長野県西部 (M6.8) 29
1931	西埼玉 (M6.9)	16	1993	北海道南西沖 (M7.8) 202
1933	三陸 (M8.1)	3,064	1995	兵庫県南部 (M7.3) 6,437
1939	男鹿 (M6.8)	27	2004	中越 (M6.8) 68
1940	神威岬沖 (M7.5)	10	2007	中越沖 (M6.8) 15
1943	鳥取 (M7.2)	1,083	2008	岩手・宮城内陸 (M7.2) 23

参考文献³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成 (最近のデータを追加)

図表2 被害地震の累積度数分布図 (各点のデータは図表1)



科学技術動向研究センターにて作成

という将来の発生に関して何らかの回答を出すことにあったはずである。その意味で地震予知は科学研究の課題のひとつでありながら、同時に、人類の「夢」のひとつでもあった。そして、予知が「夢」であ

るといふ場合は今もって変わらない。何故ならば、厳密な意味で予知に成功したと多くの者が認める事例は今のところ皆無だからである。そこでまず、これまでの地震予知研究の経緯を追ってみよう。

各国における地震予知研究の経緯

地震予知が成功した試しが全くない、という言い方には多少、語弊があるかもしれない。まずは予知に成功したと言われる事例を挙げてみよう。もっとも有名な例は、1975年中国河北省で起きた海城地震(M7.3)である⁴⁾。この地震に先立つ数年前から近辺では地震活動が活発化、数日前からは微小地震、地殻変動、地下水変化などもろもろの異常現象が頻出した。これらの前兆現象に基づいて発された地震警報が効を奏し、多くの人々が難を逃れることができたのは事実である。それにもかかわらずこの成功が科学的な意味での地震予知の成果と認められ難いのは、翌1976年にやはり河北省で起きた唐山地震(M7.8)では警報が出ず、24万人という史上空前の死者が出たからである。中国ではその後も予知の試みが続けられたと思われるが、成功したという報道は聞かれない。冒頭で述べた2008年四川大地震も不成功の一例であり、再現性および普遍性が得られないのでは、結局、科学的成果としては認められないのである。

もうひとつの著名な研究例は、ギリシャにおけるVAN法である。ギリシャはプレートの収束帯にあって地震活動がきわめて活発であり、M5を超える地震による被害も多い。アテネ大学のヴァロソス教授を中心とした研究グループはバルカン半島南端に設置した地電位観測網の信号をモニターし、その異常変化による地震予知を唱えてきた。1993年には実際の避難行動に結びついた成功例があるとも報道されている⁵⁾。ところが、前兆現象として地中に異常な電気信号が生じるメカニズムが不明で手法の客観性にも疑問がある、との

声が出てきた。一方では、統計的検定に基づいてVAN法の信憑性を擁護する報告もなされた⁶⁾。結局、成否の結論は現在に至るもなお出ていない。もっとも、VAN法がこの研究領域にもたらした影響は大きく、我が国においても電磁気学的手法による地震予知が、地震・地殻変動・地下水などの力学的手法を抑え、学会の地震予知セッションにおける主流を占めるまでとなった。

VAN法が学会の話題を席卷したころ、「そもそも論」としての地震予知の可否に関する議論が世界中に巻き起こった。議論に火をつけたのはスタンフォード大学から東京大学に移籍したばかりのゲラー教授(当時、助教授)である。ゲラー教授は、地震の発生時とその規模の確定は偶然性に支配されており、予知は原理的に不可能であるという主張をNatureほかの雑誌に寄稿した⁷⁾。これに対してアラスカ大学のヴィス教授(現在、WAPMERR(World Agency of Planetary Monitoring and Earthquake Risk Reduction)に所属)らは、地震予知に関する国際シンポジウムを開き、前兆現象は歴として存在する、と反論した。こうして1990年代には、予知可能派と不可能派の間でかつてない論争が展開された。その後、論争は最終的な決着をみないままに尻すぼみとなり、やがて地震予知研究全体が衰退傾向を見せるようになっていった。

米国もその例にもれない。米国における地震予知研究の対象は、西海岸のサンアンドレアス断層に集中している。この断層では、1857年ロスアンジェルス地震(Fort Tejon地震M8.0)、および1906年サンフランシスコ地震(M7.8)が起きており、これらの地震の再来が懸念されるからである。2個の大地震には含まれた中間部では、断層は定常的なずれ運動を

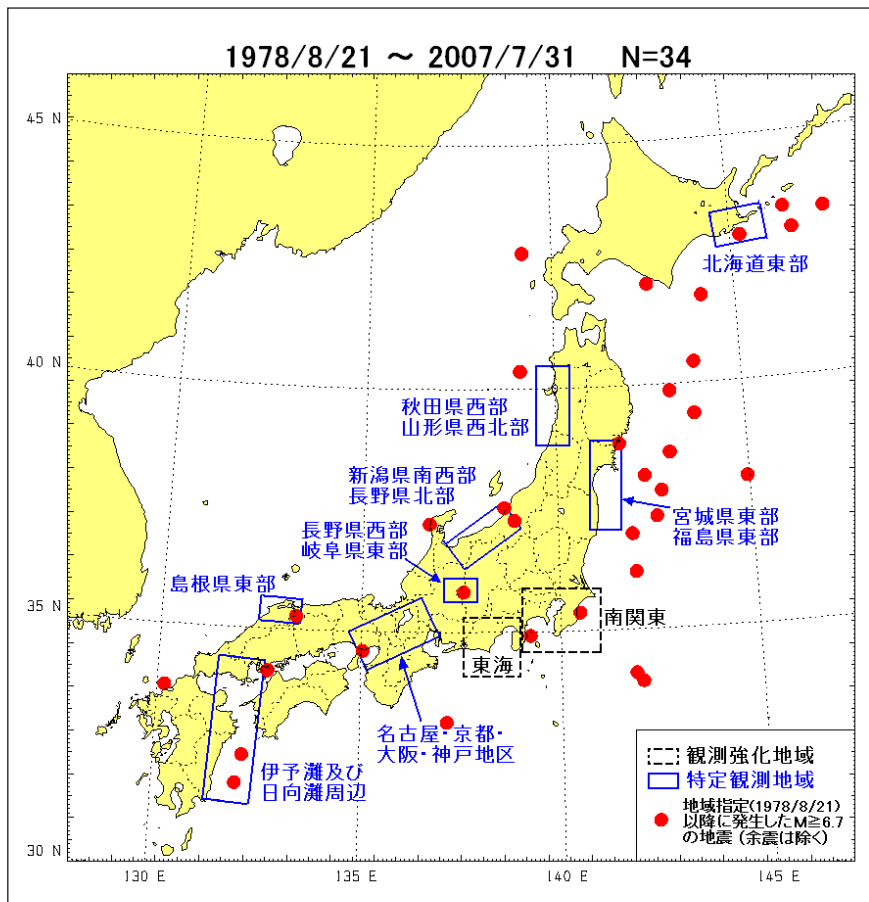
行っており、大地震が起きない。その中のParkfieldという町の近くでは、M6クラスの地震が20数年の間隔をおいて定期的に起きており、次の地震は1993年までに起きると予測されていた。この場所にこの程度の地震が起きたところで被害の出る恐れはなかったため、これは、地震予知のための格好の機会として捉えられた。こうして“Parkfield Experiment”と呼ばれた地震予知実験の現場に多くの観測手段と監視の目が集中されることとなった。ところが、お目当ての地震はなかなか起きず、結局、確率的にはありそうもない10年以上の遅れをもって2004年にM6の地震が発生したものの、期待された前兆現象は捉えられなかった⁸⁾。世界的な潮流にならって米国における地震予知研究が下火となっていったのもこれが潮目となっている。

我が国における地震予知研究の経緯

地震予知研究に関して、日本はつねに先導的な役割を果たしてきた。1962年、当時の学界の権威らが「地震予知－現状とその推進計画」(いわゆるブループリント)という予知研究の方向性に関する提言をまとめ、これをベースにして1965年には国家予算を伴った地震予知プロジェクトがスタートした⁹⁾。1969年、研究情報の集約機構として地震予知連絡会(以下、予知連)が発足し、その活動は、国土地理院長の諮問機関として今に至っている。1970年、予知連は全国の地震災害危険地域を抽出し、観測と監視を強化すべきとの提言を行った(後、1978年に改訂)。この地域指定は、自然条件のみならず社会条件をも加味して選定されていたが、岡田義光

(現在、(独)防災科学技術研究所理事長)によれば、改訂後の29年間で阪神・淡路大震災を含め多くの大地震が指定地域内に発生し、その的中率は80%に達したとのことである(図表3)¹⁰⁾。一方で、東京大学地震研究所助手の石橋克彦(当時、その後、神戸大学教授を経る)は、1976年秋の地震学会において駿河湾大地震説を発表した¹¹⁾。駿河湾では、1854年の安政東海地震を最後に、その後120年以上にわたって歪みの蓄積が続き、今や一触即発の危機にあると指摘したのである。政府は石橋の説を重要視し、1978年、M8クラスの駿河湾地震、すなわち東海地震を対象にした地震対策としては初めての法律「大規模地震対策特別措置法」¹²⁾を制定した。法律に基づいて静岡県を中心とする想定震度6以上のエリアが「地震防災対策強化地域」として線引きされ、対象エリアの常時監視を気象庁が担うこととなった。気象庁は、東海地震予知という任務遂行のため「地震防災対策強化地域判定会」(以下、判定会)を組織し、以後、毎月の打ち合わせ会をもつようになった。こうした中、1978年には伊豆半島と伊豆大島を結ぶ活断層上に伊豆大島近海地震(M7.0)が起り25人の死者が出た。この地震では、その発生前に地震活動、地殻変動、地下水位やラドンガス濃度など多様な観測項目に異常現象のあったことが発見され、地震予知まで今一步であったとの評価を得た¹³⁾。1977年、大竹政和(現在、東北大学名誉教授、予知連会長)らは、メキシコのオアハカ付近に地震活動の静穏化を発見し、大地震の発生を警告する論文発表を行ったが、翌1978年、実際にM7.7のオアハカ地震が起き、地震予知の可能性を強く印象づけた¹⁴⁾。1970年代から80年代にかけて全国に微小地震観測網が展開されるようになり、大学や国立研究所

図表3 予知連による指定地域と実際に起きたM6.7以上の地震



出典：参考文献¹⁰⁾

に地震予知研究センターが設置されるなど、この頃が、我が国において地震予知が最も期待を寄せられ、近い将来の実現が信じられていた時期であったと言える。

2 - 4

阪神・淡路大震災による衝撃

世界中を巻き込んでの地震予知可否論議が沸騰していた1995年1月17日、神戸から淡路島にかけての活断層を破壊した阪神・淡路大震災(M7.3)が勃発し、6400人を超える死者が出た。この地震は予測されていたとの報道も一部にはあったが、地域住民にとって大地震の危険はほとんど念頭になかったということが実情である。そのため、近年では未曾有の犠牲者を出したにもかかわらず事前に有効な警告が発信されてい

かったとして地震研究への風当たりは強く、予知研究の位置づけが大きく見直される契機となった。この地震は、国家施策をも大きく変針させるだけのインパクトとなった。地震予知という概念が否定されたわけではないにせよ、地震対策における予知への依存は基本的に排除される結果となった。具体的には、旧科学技術庁に新たに地震調査研究課(その後、文部科学省地震・防災研究課に移行)が置かれ、それまであった「地震予知研究推進本部」は「地震調査研究推進本部」(以下、推本)と改称・改組された¹⁵⁾。推本の下には政策委員会と地震調査委員会が設けられ、多くの部会・分科会が設置された。それらの委員会では我が国における地震活動の短期的および長期的評価を行い、その結果がマスコミを通じて社会に伝達されることとなった。また、行政機構内の「予知」という名称は、撤収変更

された。ただし、全てから「予知」が消え去ったわけではない。地震予知連絡会は、地震調査委員会との二重性が問題視され、廃止すべしとの意見も一時は飛び交ったが、結局は存続して現在に至っている。両委員会の議論の内容は重なる部分も多いものの、その目的

や評価の性格が微妙に異なるからである。気象庁の判定会も残された。形式的には現存する法律に規定されているからであるが、東海地震に限っては予知への期待が棄て去られていないからである。なお、東海地震に関しては、2001年に中央防災会議によって想定震

源域の見直しが実施された¹⁶⁾。新たな観測情報に基づいてそれまでの震源域が大きく描き直され、防災対策の対象エリアも拡張された。ただし、基本的な枠組みや予知への取り組み方は変わっていない。

3 地震発生予測への転換

推本の発足に伴う方針転換は、行政における施策を従来の予知指向から地震の発生予測へと向かわせることとなった。前述したとおり、これは、前兆現象を追うのではなく、過去に起きた事象と活断層の評価に基づいて大地震の発生確率を統計的に評価しようというものである。

3 - 1

基盤観測網の整備

大きな変貌を遂げたのは、全国観測網である¹⁵⁾。地殻活動観測において基本とされるのは地震と地殻変動(地面の伸び縮みや隆起・沈降)の観測であるが、それまで、地震については気象庁・大学・国立研究所が、地殻変動については国土地理院がこれを担ってきた。この時期は、いわば群雄割拠の時代と言える。それらは一応、全国をカバーしていたものの、観測密度に粗密があり、仕様も統一されておらず、なによりも機構間におけるデータの相互利用に高い障壁があった。また、測地測量が全国を一巡するには数年かかるという大変な時間と手間を要していた。世の中ではIT革命に乗って観測・通信・データ処理の分野で急速な技術革新が進んでおり、旧態依然とした観測網は取り残さ

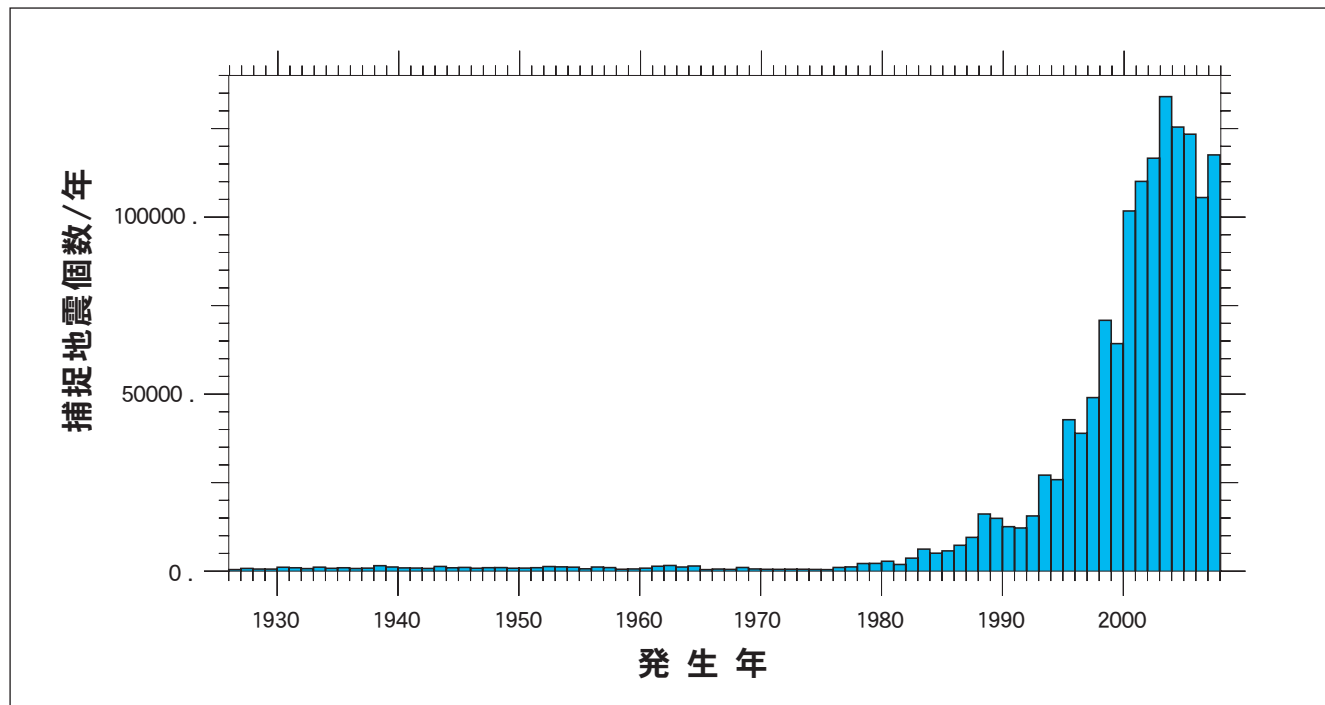
れる運命にあった。阪神・淡路大震災の後、推本は新たな予算を組み、統一仕様による全国観測網の整備を推進することとした。地震観測に対しては広帯域・高精度化が、地殻変動に対してはGPSを用いた準リアルタイム測量が図られ、その後10年を経ないうちに世界にも類を見ない高性能、高密度の観測網が整備されるに至った。こうして「基盤観測網」と呼称されるようになった内容は、GPSによる地殻変動観測網(国土地理院によるGEONETを中心に全国で約1400点)、高感度地震計観測網((独)防災科学技術研究所のHi-netを中心に約1000点)、強震動観測網(同K-netを含めて約7000点)、広帯域地震計観測網(同F-netを中心に約100点)である。特筆すべきは、基盤観測網から得られたデータの全てがインターネットを介して公開されるようになったことである。その結果、全国の研究者は、所属する大学や機関にかかわらずデータ利用に関してほぼ同じ研究環境に置かれるようになり、研究の自由競争が一挙に加速されることとなった。今では、被害地震は勿論のこと、問題とすべき地震が起きた際には、断層の形状、破壊過程など地震を特徴づける基本情報が、きわめて速やかに解析され報告されるまでになっている。図表4は、気象庁の地震カタログから日本周辺で捕

捉された地震数の変遷を示す。この間、地震活動自体にそれほど大きな変化があったわけではないが、地震の捕捉数は、観測網の増強とともに増加の一途を辿り、特に、基盤観測網が加わる2000年前後から急激に増加したことが分かる。

また近年、調査観測の手は陸域から海域へと延びていった。JAMSTEC((独)海洋研究開発機構)は、地球深部探査船「ちきゅう」を建造して海域における深部地殻構造調査に乗り出したほか、沿岸海域をカバーするための海底地震計網の展開を進めている¹⁷⁾。海上保安庁や大学では、海底に設置した音響測距装置とGPSとを組み合わせることで海域における地殻変動観測網の開発に取り組んでいる¹⁸⁾。

このように基盤観測網を初めとした全国観測網の整備は、防災面を含めた地震研究全般の推進に大きな効果をもたらしたと言えるが、そこに問題がないわけではない。主として運用面に関する筆者の危惧として次の二点を指摘しておく。基盤観測網が整備される以前の「群雄割拠」時代には、気象庁による全国網とは別にそれぞれの地域が旧帝国大学によって実質的に管轄されていた。例えば、北海道は北海道大学、東北は東北大学、関東・信越は東京大学、中部は名古屋大学、近畿・中国・四国は京都大学、九州は九州大学、といった具

図表4 気象庁によって日本周辺で捕捉された地震数



※ 2000年頃からの急増は、基盤観測網の整備による。

出典：気象庁地震カタログ

合である。こうした管轄の仕方は、データを囲い込むことにつながり、研究活動に障壁をつくり、阪神・淡路大震災後の反省をうむ発端となった。しかしその反面、それぞれの大学がそれぞれの地域の地殻活動の監視と評価を担うという、いわば「ホームドクター」としての意識と責任感を産み出す素因でもあった。これに対して現在の状況は、全国の研究者が同じデータを使って一斉に同じ解析に取り組む、というある種の無駄を内包した過当競争の場を作り出している。処理の迅速化と情報管理の一元化という意味では進歩と言えるだろうが、それぞれの地域のテクトニクス(プレート・テクトニクスに代表される造構運動)と活動状況を熟知した「ホームドクター」による長期的視野に立った監視と研究を推奨したい立場からは一種のディレンマを感じざるを得ない。

もう一点は、地震発生の周期と技術革新の速さとのタイムスケールの違いについてである。少なくとも数十～数百年はかかる地震の一周期を勘案すると、安定した条件下で長期の観測を継続すること

が必須要件となるが、技術革新と体制の変遷による観測条件の変化には避け難いディレンマがある。技術革新が必ずしも良い結果に結びつくとは限らないのである。例えば、気象庁の80年を超える地震カタログ(図表4)は我が国が世界に誇るべき貴重なデータ資産であるが、その中には技術革新と体制変化を原因とするマグニチュードの不統一が混ざっており、このことが折角のデータの価値を大きく毀損する元凶となっている。大規模に配備した基盤観測網を長年にわたって維持運用していくことは、これを建設・整備することよりも大きな困難を伴う。世の中の変遷に乗ぜられない観測の一貫性を保持していくことも、今後の重要課題となることを意識しておく必要がある。

3 - 2

地震動予測地図の作成

推本が基本的な事業課題として取り組んできたのが「全国を概観

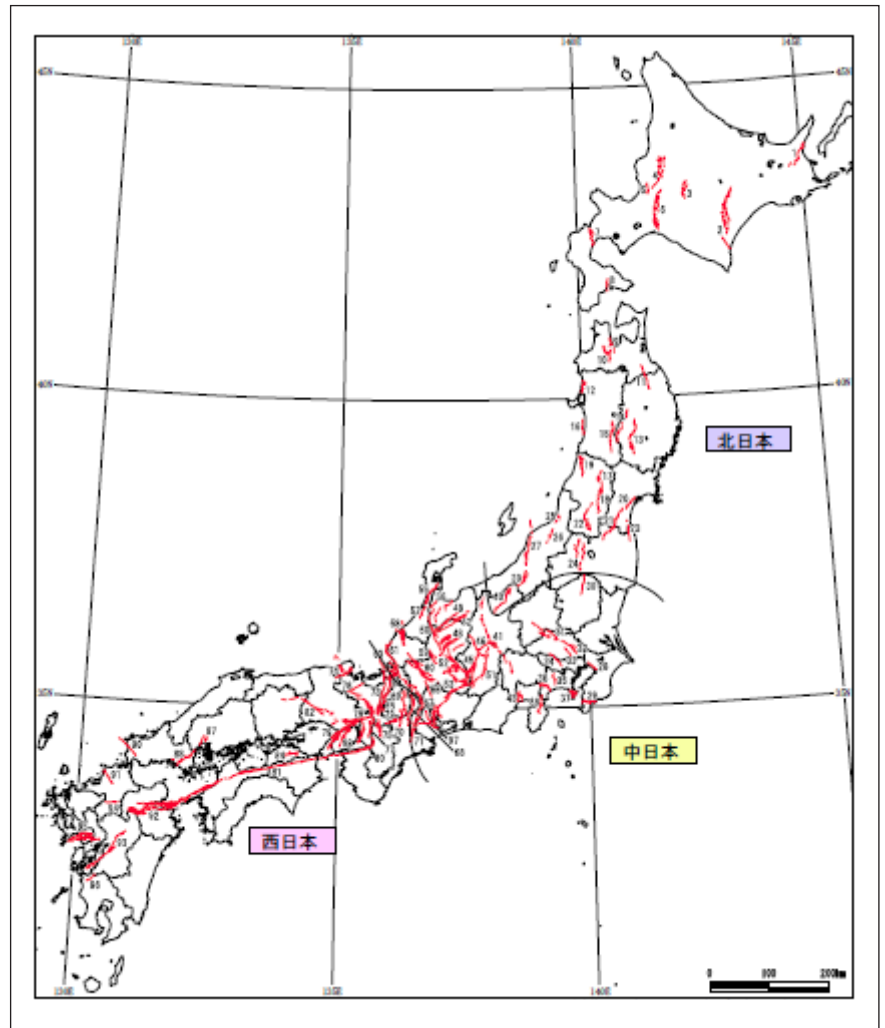
した地震動予測地図」の作成である¹⁵⁾。前述したとおり、ここでいう「予測」とは、同じ場所における地震発生が準規則的であることを前提にして、次回の発生を確率値として評価することを言う。前兆現象の有る無しはいまだ議論の俎上にあるが、地震発生の準規則性については大方の研究者の支持が得られており、このことが、行政による施策が「地震予知」から「地震発生予測」に転換された理由でもある。評価に必要な情報は、当該地震の発生周期とそのばらつき、および最新発生時期の3個のパラメーターである。このほかに、規則性からの逸脱を表現する統計モデルが必要となるが、推本では、一定量の応力蓄積率がランダムな擾乱じょうらんを受けるというBPT (Brownian Passage Time) モデルを採用している。

こうしたお膳立てのもと、実際に進められる手続きは次のとおりである。海溝沿いなど海域に起きる地震はM8程度の規模を持つが、その周期は数十～数百年と短く、したがって、多くの地震について過去の履歴が残されている。

結果的に、発生確率の評価は比較的容易であり、信頼性も高い。一方、内陸の浅い活断層に起きる地震は、最低でも千年以上と長いタイムスケールを持ち、その履歴はほとんど知られていない。推本では、長さ20kmを超す98の活断層を主要活断層と定めて拾い出し(図表5、その後追加されて110)、それらに対して調査を実施した。要所でトレンチ調査(浅い溝による掘削調査)やボーリング調査(深い穴による掘削調査)を行うことで、ひとつずつの活断層に対して前述のパラメーター値を決定しようとしたのである。現実には、パラメーターの値が確定的に定まることは珍しく、かなりのばらつきと不確定さを避けることはできなかったが、10年の調査期間を経て一応の結果がまとめられた。ここで起きる想定地震のマグニチュード度数分布は図表6の黒棒のとおりであり、その平均はM7.3である(主要活断層98の内、長大なものは分割して地震が起きると考えられるので総数は136個となっている)。また、主要以外のひとまわり小さい活断層も評価の対象とされ、その平均はM6.8となる(同図表の白棒、総数178個)。このほかに、「震源を特定しにくい地震」として、実際に観測された地震のマグニチュード分布と地域毎に設定した最大地震とから問題とすべき地震の発生確率が算定される。以上の全ての評価を融合させた結果を地点毎の地震発生確率としている。

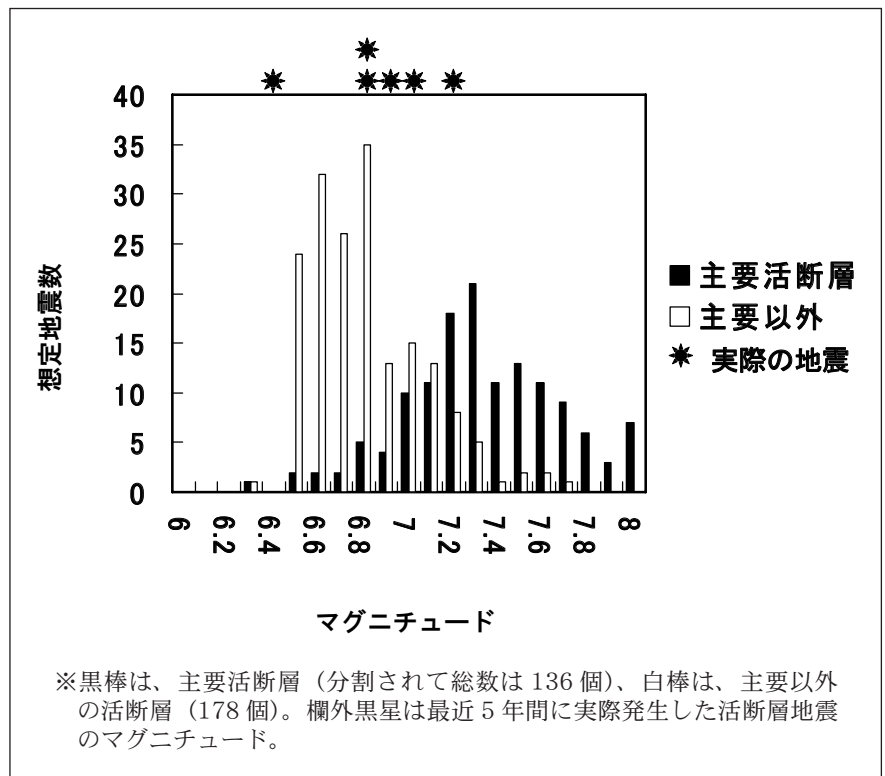
地震の発生確率が求まれば、次には、場所毎の揺れ、すなわち地震動の評価に移る。ここでは、震源距離とマグニチュードに基づいた揺れの評価式、あるいは断層モデルに基づいた地震波の合成法、さらには地下構造や地盤構造による地震波の増幅評価などさまざまな評価手法を組み合わせることで最終的な地表地震動が算出され

図表5 推本が取り上げた主要活断層



出典：参考文献¹⁵⁾

図表6 内陸活断層に発生する想定地震のマグニチュード度数分布



参考文献¹⁹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

る。自治体等ではこの結果を受けて被害想定や防災対策を策定することとなる。

これらの手続きの詳述は省くが、ともあれ、阪神・淡路大震災後10年の歳月を経て、「全国を概観した地震動予測地図」(以下、予測地図)の最初の試作版が2002年5月に、完成版が2005年3月に刊行された(図表7)¹⁹⁾。その後、予測地図は毎年のように更新されているが、大きな変更点はない。この地図では、今後30年以内に震度6弱以上となる確率が地域毎にカラー表示されている。震度6弱の発生確率、すなわち発災の危険度は、最低の0.1%未満から最高の26%以上まで5段階に分かれるが、最高段階のほとんどは静岡県から高知県までの太平洋に面した地域に分布する。これは、南海トラフ沿いの海溝型地震(東海・東南海・南海地震)が差し迫っているせいである。危険度第2位の地域も中部地方のフォッサマグナのほかに、全て太平洋岸に沿って分布し、海溝型地震と内陸の活断層地震の発生頻度が桁違いであるという事情を物語っている。

3 - 3

予測地図の成績

予測地図の完成版が公開されて、まだ3年目である。したがって、その評価を議論するには事実の蓄積が足りない。しかし、この間にも問題とすべき地震は起きており、今後の改訂のために何らかの方法で成績を評価しておく必要がある。果たして「予測」は当たったのだろうか。

試作版を含め予測地図が公表されて以来、実際に震度6弱以上が起きたケースは、2008年10月8日現在までの5年間ですでに10回に達した(図表7の白十字)。図

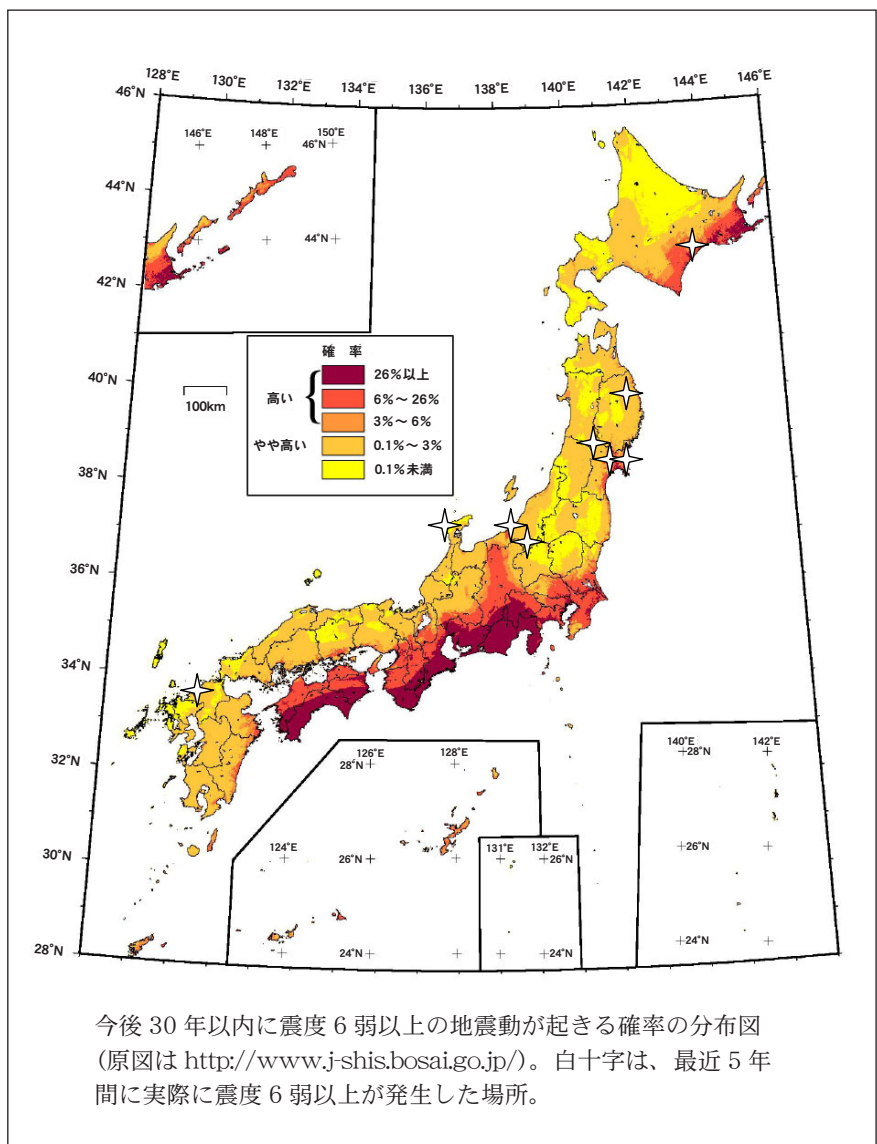
表8には、これらの地震の発生確率が予測地図でどう評価されていたかを、公開された報告書¹⁹⁾から筆者が読み取った数値(30年確率)でリストアップした。

まず、2003年9月十勝沖地震と2005年8月宮城県沖地震に対しては、事前にそれぞれ60%、98%と高い発生確率が提示されており、これらプレート間地震の発生はほぼ予測どおりであったと言える(十勝沖については地震発生直前の値。宮城県沖は想定地震の片割れとみなす)。残り8個の内、2003年5月宮城県沖地震と2008年7月岩手県中部地震は太平洋プレート内の地震として、また、2003年7月宮城県北部の地

震と2004年10月中越地震は、主要以外の活断層の地震として想定内とみることができる。しかし、残りの4地震は、沿岸海域の活断層、あるいは、内陸の伏在断層として、活断層地震の「想定外」であった。ただしこれらも「震源を特定しにくい地震」の範疇にあって、地震の発生そのものが意識されていなかったわけではない。

初めの2個は海溝型のプレート間地震であり、発生確率は高かった。一方、残りの8個はたとえ想定内だったとしてもその確率は極めて低いとされていた。結果的に前者が「あたり」、後者が「はずれ」となるのはある意味当然とも言える。しかしながらこのような単純

図表7 地震動予測地図



出典：参考文献²⁰⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

な総括には問題があるだろう。

「あたりはずれ」を正しく評価するには、本来は複雑な統計分析が必要となるが、ここでは簡単な試算を行ってみよう。図表 8 から 8 個の地震の 30 年発生確率の平均を 0.226%、また、平均マグニチュード M7.0 に対する震源域の拡がりを 200km² として全国を 1850 区画に分割する。その場合、5 年間で 8 区画以上に地震が起きる確率を計算すると、値は 0.0001% ときわめて小さい。つまり、結果的に 8 個の地震が実際に起きたという事実は、想定上ほとんどあり得ないはずの現象が現実となった、すなわち、想定に何らかの問題があったということの意味する。

3 - 4

予測地図の問題点

予測地図の作成には、「ひとまわり小さい活断層」の地震や「震源(活断層)を特定しにくい地震」も考慮されていた。しかし前述のように、結果から見れば、M7 前後の地震の発生は想定外であったという印象が否めない。2007 年 3 月能登半島沖地震の直後から、多くの新聞の社説は、「日本国内では、どの場所に住んでいても地震から逃れることはできない。予測地図の危険度レベルが低いからといって安心してはいけない」と書きためた。現在の予測技術のレベルを鑑みれば、予測地図に対するこの評価はかなり厳しい。また、わずか 5 年程度の実績によって、本来的に長期的情報である予測地図の評価を断定してしまうのは早計に過ぎる。しかし、予測地図は研究論文ではなく、行政と研究者が社会に向けて提示した情報である。これに対しての社会の受け止め方を無視するわけにはいかない。少なくとも

図表 8 最近 5 年間に震度 6 弱以上を起こした地震

		想定 M	発生確率 (%/30 years)	
2003 年 5 月	宮城県沖地震	M7.1	—	0.2~0.5 (プレート内地震)
2003 年 7 月	宮城県北部地震	M6.4	M7.1	0.082 (旭山撓曲帯)
2003 年 9 月	十勝沖地震	M8.0	M8.1	60 (プレート間地震)
2004 年 10 月	中越地震	M6.8	M7.1	0.79 (六日町断層帯)
2005 年 3 月	福岡県北西沖地震	M7.0	—	0.05 (沿岸域活断層)
2005 年 8 月	宮城県沖地震	M7.2	Mw7.4	98 (プレート間地震)
2007 年 3 月	能登半島沖地震	M6.9	—	0.02~0.05 (沿岸域活断層)
2007 年 7 月	中越沖地震	M6.8	—	0.2 (沿岸域活断層)
2008 年 6 月	岩手・宮城内陸地震	M7.2	—	0.1~0.2 (地質断層)
2008 年 7 月	岩手県中部地震	M6.8	—	0.1~0.2 (プレート内地震)

※発生確率は、地震動予測地図から読み取った 30 年以内の発生確率。
M は気象庁マグニチュード、Mw はモーメントマグニチュード。

参考文献¹⁹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

内陸活断層の地震について見当外れではなかったか、という批判には耳を傾ける必要がある。そこで現段階における問題の所在を分析してみよう。

最初の問題点は、地震を発生させる活断層が十分に捕捉されていたかということである。図表 6 の星印は、実際に起きた 6 個の活断層地震のマグニチュードを予測地図に用いられた想定マグニチュード分布図に重ねて示している。分布型を見比べると、これら 6 個の地震は主要活断層ではなく、主要以外のひとまわり小さい活断層で起きる地震に対応していることが分かる。この内、2003 年 7 月宮城県北部の地震(旭山撓曲帯)と 2004 年 10 月中越地震(六日町断層帯)の 2 個は、あらかじめ想定されていたと言えそうであるが、残りの 4 個は明らかに洩れている。図表 6 で、主要活断層から生じる地震の平均マグニチュードが M7.3 であるのに対し、主要以外の活断層では M6.8 とマグニチュードで 0.5 の差がある。これから、後者における地震発生頻度は前者の $\sqrt{10}$ 倍になると見積もられる。また、前者の平均発生間隔 4200 年(調和平均値)に対し、後者は 5300 年であることから、これらの地震の発生源となる活断層の数に換算する

と、主要以外の活断層の数は、主要活断層(この場合は 136 個)の約 4 倍、すなわち、500 個以上あるはず、ということになる。実際には、リストアップされた数(178 個)はその約 1/3 でしかなく、したがって、ひとまわり小さい活断層の大部分が捕捉から洩れていたと推察される。

図表 8 で活断層リストから洩れた 4 個の地震の内、3 個は沿岸海域の活断層に、1 個は地表踏査からでは分からなかった伏在断層によるとされた。こうした結果を受けて、推本では、沿岸海域の活断層、および主要活断層の延長部に存在すると思われる伏在断層の抽出などに焦点をあて、今後 10 年をかけて全国で 2000 の活断層を拾い出すとの方針を発表した(2008 年 7 月 13 日)²¹⁾。ただし、対象となる活断層の多くはその長さが 10km 程度以下と見積もられ、こうした小規模活断層は地表に顔を出していない可能性が高い。そのため、変動地形学に基づいた地表調査のほかに、反射探査、電磁気探査、地震波速度構造、重力分布、といった地下の構造情報を総合的に活用する必要がある、との提言もなされている。今後の調査による予測地図の改善が待たれるが、それでもなおかつ想定から洩

れる地震がありうることも覚悟しておく必要がある。

さらなる問題点として、活断層抽出の難しさと同時に、活動性評価の難しさがある。活動性評価とは、個々の活断層に固有な地震の発生頻度を推定することである。主要活断層の場合にはトレンチ調査(浅い溝による掘削調査)によって直接的に情報を得ることもできるが、位置の特定さえ困難な小規模活断層に対して十分な情報を得

ることはきわめて難しい。前節で述べたように、現在公表されているM7前後の地震に対する予測値は、実際の発生頻度に比べて圧倒的に小さい。これは、おそらく抽出の洩れだけに因るものではない。活断層の活動性から評価した地震の発生確率には、系統的な欠損が含まれる可能性がある。かつてWesnouskyらは、活断層の活動性評価に基づいた地質年代スケールでの変動速度と、地殻変動や地

震活動の観測に基づいた数十～数百年スケールでの変動速度に懸隔があると指摘した²²⁾。この問題は今もなお解決していない。長期的な地震の発生予測に対して活断層情報を基本とするのは当然だが、近年の地殻変動と地震活動の観測結果を矛盾なく説明するという観点からの研究も軽視してはならない。こうした研究を統合することで活断層評価の洩れを補完する必要があるのではないと思われる。

4 新たな地震予知研究

4 - 1

新たな動向

阪神・淡路大震災の衝撃は行政だけでなく、地震予知研究者グループに対しても新たな行動を促すきっかけとなった。新しい予知研究の道筋を探ろうという研究者グループの意思は、大学間を連携する機構である「地震予知研究協議会」へと集約され、その後、この機構は、行政への橋渡しも含め、予知研究を進める中核的な役割を担う存在となった。この機構を介して提唱された研究の方向性は、もっぱら前兆現象を探すといたったそれまでの現象論的アプローチをやめ、地震発生の過程を解明するという物理学的アプローチに立ち戻ろうとするものであった。ひとつの地震発生場をイメージした時、その時間発展プロセスを「地震の発生による応力解放と固着回復の過程」、「地震発生の準備過程」、「地震発生の直前過程」の三つのステージに分割する。そして、それぞれのステージについて、観測・解析・解釈・シミュレーションによる現象の再現と予測、という段階別の研究戦略を描き、これ

を予知達成のためのロードマップとした。こうして、ステージ別、あるいは、項目別にいくつもの研究グループが作られ、数多くの研究集会やシンポジウムが重ねられてきた。この10年間で当初の予想を超える発見や成果が積み上げられてきたが、これを支えたのは基盤観測網の存在である。

4 - 2

予知の鍵となる発見

この10年間の新しい発見のうち、地震予知の観点から特に重要なものとしては、「スロースリップの発見」と「アスペリティの認識」を挙げることができる。スロースリップとは、文字通り、断層をはさんでのゆっくりとした滑りのことを指す。本来の地震は、プレート間や断層面上の固着域が数秒からせいぜい1分間で一挙に滑るものであるのに対し、スロースリップの場合には、数日、あるいは数年にもわたってズルズルと滑りが続く。滑りにはさまざまな時定数をもつものがあり、「ゆっくり地震」や「サイレント・アースクエイク」といったものの存在

が、以前から推察されていた²³⁾。しかし、このような長周期性の動きは通常の地震計では見つけられず、事実としての現象を捉えるには、GEONETやF-net、Hi-netといった基盤観測網の整備を待つ必要があったのである。最近では、数年の時定数をもつ長期的スロースリップから始まって、短期的スロースリップ、超低周波地震、低周波地震、低周波微動、と広い周波数帯域に分布する滑り現象が相次いで発見されており、これらの現象が互いに関連性をもって決まった場所に現れるということも分かってきた²⁴⁾。

同時に、固着域の滑り過程を理解する上で重要な概念であるアスペリティの存在が実証されるようになった。アスペリティとは、プレート間や断層面上の固着域全体の中で特に強く固着している部分を指す。その概念自体は古くから議論されてきたものであるが²⁵⁾、観測の高精度化によって、現実のアスペリティの存在が検出されるまでになったのである^{26, 27)}。これにより、アスペリティが消滅することはなく、何度でも破壊と固着の回復を繰り返すものであることが検証された。また、M7を超える大地震では、震源域の中に複

数個のアスペリティが存在し、その組み合わせ方によって同一系列の地震でも破壊様式に差異が生じると解釈されるようになった。アスペリティとアスペリティの間は弱固着域であるが、準備過程の段階では固着していたその部分が、地震発生の前に準静的に滑るとの考えも広まりつつある。さらに、アスペリティのサイズにも階層性があり、ごく小さいアスペリティではM3～M5の「繰り返し地震」が規則正しく発生することが実際の観測で確認されている²⁸⁾。

4 - 3

シミュレーション研究の進展

観測と併行して、摩擦滑りを記述する数式に基づいたコンピューター・シミュレーションも長足の進歩を遂げた²⁹⁾。コンピューター上で繰り返し発生する地震を仮想的に作り出し、境界条件を調整することによって、実際に起きる複雑かつ多様な現象を模倣できるようになった。例えば、同一のアスペリティが繰り返し破壊されること、複数個のアスペリティを置いたときに組み合わせの異なる破壊によりさまざまな様相を持つ地震系列が作り出されること、スローリップを再現すること、などが模倣できている。さらには、スーパーコンピューターの「地球シミュレータ」を用いて、日本列島全域のテクトニクスと地殻活動のモデルを作り出そうというプロジェクトも進められた³⁰⁾。

シミュレーション研究の目的は、観測された現象の解釈にとどまらない。まず、現在の状況を示す観測値を初期値として入力することで近未来の予測を導き出す。この予測結果と実際に観測された状況を比較しながら、シミュレーションを規定する種々のパラメー

ターを調整する(これをデータ同化と呼ぶ)。これを繰り返しながら予測の精度をあげることで、実践的な地震予知にまで到達する。このように、シミュレーションは、新たな地震予知研究のロードマップ上に欠くことのできない手段として組み込まれたのである。

4 - 4

地震予知の実現性

観測・解析・解釈・シミュレーションによる将来予測の4段階を組み込んだロードマップに沿って地震予知研究は着実な進展を遂げてきた。地震の発生過程を物理学的に解明しようという新たな研究の方向性は、正しく実を結びつつあると言える。例えば、三陸釜石沖に発見された固有地震の繰り返し過程は微細にわたって解析され、次の発生がほぼ予測可能な域にまで達した³¹⁾。東海・東南海・南海地震は、百年余りの周期をもって繰り返し起きるが、3個の地震の発生様式は毎回同じではない。こうした不規則な発生様式もシミュレーションによって再現できるまでになった³²⁾。

さてそれでは、予知研究の現状は、描かれたロードマップを辿って目標に接近した、すなわち、実践的な地震予知に肉迫し得たと言えるだろうか。答えは否である。現実に地震予知に成功したという事実はない。普遍的な予知への道筋はまだ見えていない。

例えば、具体的な問題のひとつが、「プレスリップ」である。プレスリップとは、中核となるアスペリティ破壊を含む震源域全体の滑りの直前、端緒からゆっくりとスタートして徐々に加速し始める滑りのことを言い、これを検知することが直前予知の本命とされている。このようなプレスリップ検知

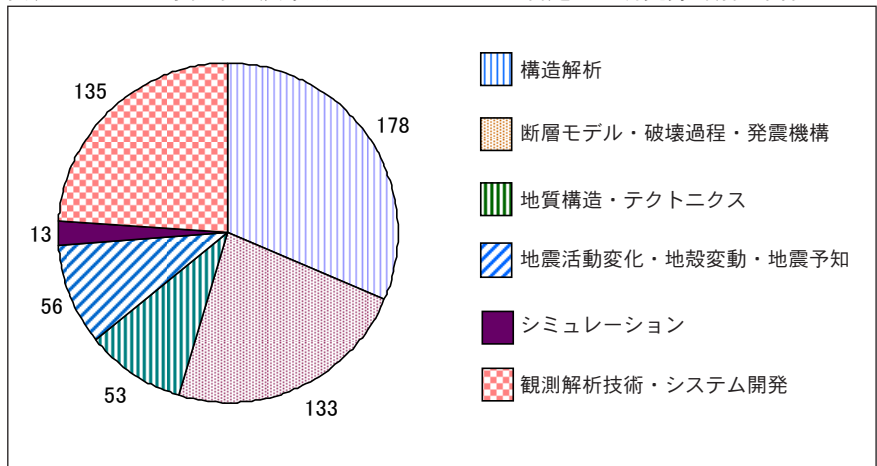
への期待は、シミュレーションから生み出された成果のひとつと言えるが、実は、現実の場でプレスリップが認識されたことは一度もない。図表8に掲げた10個の地震のどれでも、プレスリップは見つかっていない。我が国に限らず、世界中を見てもプレスリップを捉えたという報告は今のところ皆無である。ただし、結論を出すのはまだ早い。そもそもプレスリップを検知できるような高感度の観測機器が設置された場所は、きわめて少ない。もっとも条件が良かったのは2003年9月十勝沖地震(M8.0)であるが、この場合でも、震源に最近接の傾斜計は100km以上離れて設置されていた。内陸の活断層地震の場合には、もっと近距離の観測点もあったが、地震そのもののサイズが小さいため検知できなかったと想像されている。後述するように東海地震の予知もプレスリップの検知を前提としたものであるが、この場合は、M8級の震源域が内陸に入り込んでいるという特殊な条件下にあることが辛うじてプレスリップ検知への期待をつないでいる。

そのほかに、「静穏化」の問題もある。2-2節で紹介したヴィス教授らの検証においても、地震活動の静穏化は、最も確からしい前兆現象と認知されてきた³³⁾。実際の静穏化は、対象とするバックグラウンド地震の規模、静穏化のエリア、統計的有意性、さらにはデータベースの均質性など、多くの派生条件が関わる故に、結果としての静穏化情報そのものが玉石混交の状態にある。静穏化が数少ない有意な前兆現象であるだろうことは多くの研究者の認めるところであるが、その発現メカニズムを説明する定説は未だない。アスペリティや準静的滑りといった新しい概念を駆使して解釈しようという動きはあるものの、必ずしもこの分野の研究が進展しているとは言えないのが現状である³⁴⁾。

学会の動向を見れば、研究者の大勢が地震予知研究に邁進しているわけではないということも分かる。図表9は、2007年秋の(社)日本地震学会において発表された約600件のタイトルを筆者の判断で分類したものである。これによれば、「構造解析」と「断層モデル・破壊過程・発震機構」で50%を超える。さらに「地質構造・テクトニクス」を加えた、いわば空間情報に関する解析が64%に達し、これに対して時間情報といふべき「地震活動変化・地殻変動・地震予知」は10%に過ぎない。「構造解析」は地震研究の基盤であり、予知研究の出発点でもある。しかし、地震発生までのさまざまな過程を切り出して物理学的アプローチで迫ろうとする新しい予知研究の戦略を意識したときには、現状の課題の割り振りが偏向し、バランスを欠いているように見える。地震予知研究はその性格上、長期的な観測・監視に基づいたデータの解析・研究が本質的である。短時日での成果を要求する近年の風潮が研究者個人のテーマ選択にも影響し、地震予知のように「成果の創出があらかじめ約束されていない研究」は敬遠されるといった構造的な要因があるのかもしれない。

なお、1990年代を境に世界的に低調となった現象論的予知研究であるが、現在、米国を中心に新たな流れが生まれつつある。それは、カリフォルニアにおける地震予知を対象として、一定の条件下で個々の研究者がそれぞれの予想を提出し、競い合おうではないか、という試みである³⁵⁾。この流れは欧州に波及し、さらには我が国でも呼応する動きが出始めている。観測事実からともかく前兆現象を抽出しようという、かつて一度は否定された研究手法が、新たな知識や技術を背景として復活し始めたとも言えよう。

図表9 2007年日本地震学会のプログラムから判定した研究分野別の割合



日本地震学会 2007年度講演予稿集を基に科学技術動向研究センターにて作成

4 - 5

東海地震の予知

我が国において、予知の可能性を行政が認定している唯一のケースが、東海地震である。実際にプレスリップが出現するとしても、それを捕捉できるだけの観測条件を擁しているのは東海地震だけである。1998年3月、東海地震の判定会は、異常活動を検知した際に発動する招集基準を改訂した¹⁶⁾。プレスリップが検知された場合、72時間以内の発生を想定して判定会が招集されることになる。これは、シミュレーション技術の進歩が生み出した成果のひとつと言える。勿論、それはあくまでもシミュレーションであって事実の裏付けがあったわけではない。それ故、仮に東海で本物のプレスリップが出現するとしても、それに基づいて予知すること自体が「ぶっつけ本番」となるという不安要素は残る。このことを含め、東海地震の予知にはいくつもの問題が介在する。

東海地震予知の期待をプレスリップの出現にかけるのは、1944年東南海地震の前例があったことに拠る。この地震の前日、掛川付近での水準測量において想定外の傾斜変動が観測された³⁶⁾。

ところがこの観測に対して、それが真の地殻の動きだったのかどうかという疑問がつけつけられている³⁷⁾。また、この傾斜変動が事実であったとしても、震源から遠く離れた掛川で観測されたということに対しては、納得のゆく理由付けがなされていない。

推本の予測によると、東海地震発生30年確率は87% (参考値)とされている¹⁹⁾。これは、室町時代の明応地震(1498年)以来、4回にわたる東海地震の平均発生間隔を119年とした結果である。しかし、実際のところ、前回の安政東海地震(1854年)、前々回の宝永地震(1707年)は別として、これよりも前の東海地震の存在には疑問があり、発生間隔はもっと長かったかもしれない。すなわち、現在の発生確率がずっと小さくなる可能性がある。このことは、東海地震の想定震源域におけるプレートの相対速度が当初の想定(4cm/年)よりも小さいのではないかと、という指摘とも関係してくる。例えば、伊豆半島を乗せたフィリピン海プレートの一部が本体から切り離されたマイクロプレートであるとする説があり³⁸⁾、これによれば相対速度は2cm/年程度とされ、そのとおりであれば発生間隔は既出値の2倍となる。

また、多くの研究者は、東海地震は東南海地震、南海地震と連動

する可能性が高いと考えている。歴史上、東海地震が単独で起きた例はないからである。次回の東南海地震の発生確率は現状で60%であり、そのような発生予測から言えば2030年くらいが山場となる。連動するならば、東海地震は東南海地震に引きずられ、その頃まで発生がずれ込むだろうと見るわけである。

以上のように、東海地震予知の実現性には、なお多くの難題がつけつけられたままとなっている。しかしそれでもなお、東海地震はもっとも予知に近いと言える。2000年頃を境に想定震源域に隣接する浜名湖直下には観測史上最大規模のスロースリップが生じ、同時に震源域の固着状況にも有意な変化が見られた。我が国の高密度観測網ちゅうみつの中でも突出した稠密観測網によって、その動きが逐一捉え

られるようになったのである³⁹⁾。言い方を変えれば、現実の状況変化が刻々と捕捉されつつあるのは東海地震だけであるということになる。また、東海地震を対象にしたシミュレーション研究も少しずつ実際のものに近づきつつある。このような状況を勘案してもなお東海地震の予知が不可であるとするならば、それは地震予知の可能性そのものを否定するに等しい。その意味で、東海地震が地震予知の試金石であることに違いはない。

4 - 6

茨城県沖地震の予知

2008年5月8日、茨城県沖にM7.0の地震が発生した。ここでは1896年の歴史地震を初めとして今

回までに6個の地震が、20数年の間隔をおいてほぼ定期的に繰り返してきたことが知られている。さらに、地震波形の解析から、前回の1982年に起きたM7.0の地震と今回の地震は、同じアスペリティを破壊したことが分かった²⁷⁾。また、そのアスペリティは沈み込んだ海山が関わって形成されたものらしいという報告もなされている⁴⁰⁾。これらの事実や発見に基づいて、また、これまでに培われた地震の発生過程に関する新たな認識に基づくことによって、我々の茨城県沖地震に対する理解は格段に深まった。今回の地震では事前の地震活動変化も検知されており^{41, 42)}、おそらく20年後に来る次の茨城県沖地震に際しては、何らかの予知情報の出ることが十分に期待できる。

5 おわりに

行政が担う「地震発生予測」では、ほぼマニュアル化された解析の手法を介して最終成果としての地震動予測地図が導かれた。その予測結果に問題があるとなると、それは情報が不足していたためであり、さらなる調査が必要と判断されている。しかし、実際には、問題は情報量の不足だけにとどまらない。予測地図に到るまでの解析手続きそのものにも研究レベルの課題が残る。

一方、この10年間に新たな方向性のもとで進められてきた「地震予知」研究では、断層の破壊過程に焦点をあてた物理学的解明が大きく進展した。東海地震のようにピンポイントでの予知を一般化することはまだ無理としても、単なる「地震発生予測」に対して応力状況分析に基づいた付加情報を提供するという意味ならば、現状で

も「地震予知」は存在すると言って差し支えないだろう。ただし、それらの情報は未だ実効性に乏しく、その意味では、研究者が見つめている「地震予知」の実態と社会が期待する「予知」との間には大きな隔たりがある。

最近、朝日新聞に掲載された記事「地震予知、前提一変」は、こうした事情を報じ、地震予知研究の難しさを簡明に伝えている⁴³⁾。しかし、筆者には、それが「予知」に対して否定的宣告を下しているとは読めず、地震予知に寄せる社会の関心の強さをあらためて感じさせる記事のように見える。予知研究を推進させている原動力は、単に研究者の科学的関心だけではない。

4-6節で紹介した茨城県沖地震の事例は、予知研究においてはしばしば、ターゲットとする地震の発生によって研究全体が一挙にス

テップアップする、ということを実に示した。逆に言えば、普段は、研究の歩みが遅々として進まないように見える、という一面もある。地震予知の達成がいかにも困難に見えると思えば、その難しさの本質は、全ての創造的研究がそうであるように、あらかじめ結果が見えているわけではないというところにある。

参考文献

- 1) 2008年5月13日朝日新聞
- 2) Abe, K. and S. Noguchi, Determination of magnitude for large shallow earthquakes, 1898-1917, Phys. Earth Planet. Inter., 32, 45-59 (1983)
- 3) 岡田義光、「日本の地震地図」、東京書籍(2004)
- 4) 佃為成、「地震予知の最新科学」、サイエンス・アイ新書、SIS-039

- (2007)
- 5) VAN 法による観測: <http://contest.thinkquest.jp/tqj2000/30295/prediction/van.html>
- 6) Hamada, K., Statistical evaluation of the SES predictions issued in Greece: alarm and success rates, *Tectonophysics*, 224, 203-210 (1993)
- 7) Geller, R. J., Shake-up for earthquake prediction, *Nature*, 352, 275-276 (1991)
- 8) The Parkfield, California, Earthquake Experiment: <http://earthquake.usgs.gov/research/parkfield/index.php>
- 9) 「地震予知連絡会 30 年のあゆみ」、建設省国土地理院 (2000)
- 10) 岡田義光、地震予知連絡会による地域指定と近年の地震、地震予知連絡会会報、79、626-628 (2008)
- 11) 石橋克彦、東海地方に予想される大地震の検討—駿河湾大地震について—、地震学会講演予稿集、No.2、30-34 (1976)
- 12) 大規模地震対策特別措置法: <http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/houritsu/taishin/contents.htm>
- 13) 浜田和郎、「地震予知」、森北出版 (1986)
- 14) Ohtake, M., T. Matsumoto, and G. V. Latham, Seismicity Gap near Oaxaca, southern Mexico as a probable precursor to a large earthquake, *Pure and Appl. Geophys.*, 115, 375-385 (1977)
- 15) 地震調査研究推進本部: <http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
- 16) 中央防災会議東海地震に関する専門調査会: <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/tokai/index.html>
- 同判定会招集基準: <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/tokai/3/4-01.html>
- 17) (独) 海洋研究開発機構: <http://www.jamstec.go.jp/j/>
- 18) 海上保安庁海洋情報部: <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOHO/chikaku/kaitei/sgs/detail.htm>
- 19) 「全国を概観した地震動予測地図」の試作版(平成15年版): http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/03mar_kakuritsu/setsumei.pdf
- 同完成版(平成17年版): http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05mar_yosokuchizu/bunsatsu1.pdf
- 20) 地震ハザードステーション: <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 21) 2008年7月13日 読売新聞
- 22) Wesnousky, S. G., C. H. Scholz, and K. Shimazaki, Deformation of an island arc: Rates of moment release and crustal shortening in intraplate Japan determined from seismicity and quaternary fault data, *J. Geophys. Res.*, 87, 6829-6852 (1982)
- 23) 川崎一郎、「スロー地震とは何か」、NHK ブックス、1055 (2006)
- 24) 小原一成、深部低周波微動に同期する短期的スロースリップイベントの検出—防災科研 Hi-net 傾斜観測による成果—、測地学会誌、53,25-34 (2007)
- 25) Kanamori, H., The nature of seismicity patterns before large earthquakes, *Earthquake Prediction, Maurice Ewing Series 4*, 1-19 (1981)
- 26) 東海地震の発震源と見なされるアスペリティ4ヶ所を特定、科学技術動向、2007年12月号、No.81、p9(2007)
- 27) 山中佳子 NGY 地震学ノート:http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/
- 28) 松澤暢、地震予知の戦略と展望、地学雑誌、110、771-783 (2001)
- 29) Tse, S. T. and J. R. Rice, Crustal earthquake instability in relationship to the depth variation of frictional slip properties, *J. Geophys. Res.*, 91, 9452-9472 (1986)
- 30) 日本列島域の地殻活動予測シミュレーションモデルの開発: http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/sonota/05053002/h16houkoku/1502.pdf
- 31) 内田直希・松澤暢・三浦哲・平原聡・長谷川昭、小繰り返し地震解析による宮城・福島県沖プレート境界の準静的すべり、地震2、59、287-295 (2007)
- 32) Hori, T., N. Kato, K. Hirahara, T. Baba, and Y. Kaneda, A numerical simulation of earthquake cycles along the Nankai trough, southwest Japan: Lateral variation in frictional property due to the slab geometry controls the nucleation position, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 228, 215-226 (2004)
- 33) Habermann, R. E., Precursory Seismic Quiescence: Past, Present, and Future, *Pure and Appl. Geophys.*, 126, 279-332 (1988)
- 34) 松村正三、地震活動変化から何を読み解くか?—プレート境界地震のアスペリティの特定—、地震特集号、刊行予定
- 35) Schorlemmer, D., M. C. Gerstenberger, S. Wiemer, D. D. Jackson, and D. A. Rhoades, Earthquake Likelihood Model Testing, *Seism. Res. Lett.*, 78, 17-29 (2007)
- 36) Mogi, K., Temporal Variation of Crustal Deformation during the Days preceding a Thrust-type Great Earthquake — The 1944 Tonankai Earthquake of Magnitude 8.1, Japan, *Pure and Appl. Geophys.*, 122, 765-780 (1984)

- 37) 鷲谷威、1944年東南海地震直前の異常傾斜変動再考、日本地震学会2004年秋季大会、A45 (2004)
- 38) 日置幸介・宮崎真一、中部日本のプレート境界と東海地震、月刊地球号外、41,146-150 (2003)
- 39) Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yarai, and T. Nishimura, Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan, Science, 298, 1009-1012 (2002)
- 40) Mochizuki, K., T. Yamada, M. Shinohara, Y. Yamanaka, and T. Kanazawa, Weak Interplate Coupling by Seamounts and Repeating M ~ 7 Earthquakes, Science, 321, 1194-1197 (2008)
- 41) 井元政二郎、2008年5月茨城県沖地震の短期確率、地震予知連絡会会報、81、投稿予定
- 42) 松村正三、1982年及び2008年の茨城県沖地震に共通する先行地震活動のパターン変化、地震予知連絡会会報、81、投稿予定
- 43) 2008年8月27日 朝日新聞

執筆者



松村 正三

客員研究官

(独) 防災科学技術研究所 研究参事



専門は地震学。微小地震観測を通じて大地震の前兆現象検知を目指している。特に東海地震を対象にして、地震活動パターンの変化からスロースリップや準静的滑りに伴う応力再配分の状況を把握したいと考えている。地震調査研究推進本部専門委員。理学博士。

科学技術動向研究センターとは

2001年1月より内閣府総合科学技術会議が設置され、従来以上に戦略性を重視する政策立案が検討されています。科学技術政策研究所では、戦略策定に不可欠な重要科学技術分野の動向に関する調査・分析機能を充実・強化するため2001年1月より新たに「科学技術動向研究センター」を設立いたしました。当センターでは、「科学技術基本計画」の策定に資する最新の科学技術動向に係る情報の収集や今後の方向性についての調査・研究に、下図に示すような体制で取り組んでいます。

センターがとりまとめた成果は、適宜、総合科学技術会議、文部科学省へ政策立案に資する資料として提供しております。

センターの具体的な活動は以下の3つです。

1

「科学技術専門家ネットワーク」による科学技術動向分析

我が国の産学官の研究者を「専門調査員」に委嘱し、インターネットを利用して科学技術動向に関する幅広い情報を収集・分析する「科学技術専門家ネットワーク」を運営しています。このネットワークを通じ、専門調査員より国内外の学会合、学術雑誌などで発表される研究成果、注目すべき動向や今後の科学技術の方向性等に関する意見等を広く収集いたします。

これらの情報に、センターが独自に行う調査・研究の結果を加え、毎月1回、「科学技術動向」としてまとめ、総合科学技術会議、文部科学省を始めとした科学技術関係機関等に配布しています。なお、この資料は <http://www.nistep.go.jp> においても公開しています。

2

重要科学技術分野・領域の動向の調査研究

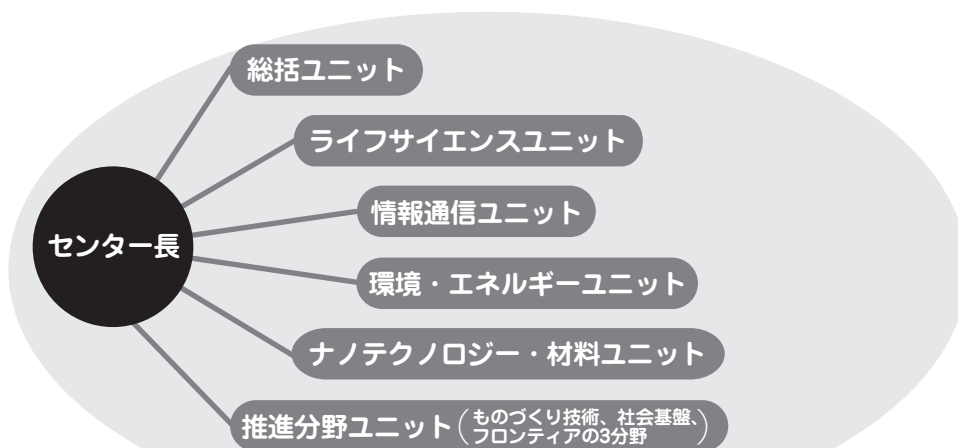
今後、国として取り組むべき重点事項、具体的な研究開発課題等を明確にすることを目的とし、重要な科学技術分野・領域に関するキーテクノロジー等を調査・分析します。

さらに、重要な科学技術分野・領域ごとの科学技術水準を欧米先進国と比較し、我が国の科学技術がどのような位置にあるのかについての調査・分析も行います。

3

技術予測に関する調査研究

当研究所では、科学技術の長期的将来動向を総合的に把握するため、デルファイ法を中心とする科学技術予測調査をほぼ5年ごとに実施しています。2005年には2年間にわたった「科学技術の中長期的発展に係る俯瞰的予測調査」を報告しました。



*それぞれのユニットには、職員その他、客員研究官（非常勤職員）を配置。
*センターの組織、担当分野などは適宜見直しを行う。

(2006年4月現在)

Science & Technology Trends

科学技術動向 10/2008



2008年10月号 第8巻第10号/毎月26日発行 通巻91号 ISSN 1349-3663



文部科学省 科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター