



日本地球惑星科学連合ニュースレター Vol. 8
November, 2012 No. 4

TOPICS	
中緯度気候力学研究の新しい流れ	1
地熱開発の動向と高温岩体システム	4
バイオミネラリゼーションの可視化	6
BOOK REVIEW	
「地球のからくり」に挑む	9
NEWS	
大型研究計画マスタープラン改訂	10
地球惑星科学の参照基準策定	11
Future Earth	13
国際地学オリンピック報告	14
新規団体会員の紹介	15
INFORMATION	
	15

JGL

Japan Geoscience Letters

2012 No. 4

TOPICS 地球環境

中緯度気候力学研究の新しい流れ

— 「気候系のホットスポット」としての暖流と海洋前線帯 —

東京大学 先端科学技術研究センター 中村 尚

中緯度の海洋は大気循環の変動に受動的に反応するだけというのが気象学・気候力学における「常識」であった。しかし、高解像度の人工衛星データや数値モデリングにより近年その「常識」は覆されつつあり、中緯度の強い暖流やそれに伴う顕著な水温前線が局所的な風系や雲・降水系の形成、さらには大洋・半球規模の大気循環系の形成や変動にも及ぼす影響が明らかになりつつある。

熱帯の影響による中緯度海面水温変動

中緯度海洋の表層水温は海面での熱交換などととも経年変動する。熱交換には、大気中の微小乱渦による海面での蒸発（潜熱フラックス）や乾燥対流（顕熱フラックス）が重要である。海面からの熱放出は海上風速や水温と気温の差が大きいほど大きく、また海上大気が乾燥するほど蒸発が増え、その際の潜熱効果により海面水温は低下する。一方、海上風が弱まり、水温と気温の差が小さくなる暖候期には、雲量変動に伴う日射を介した熱交換の変動も大きい。また、冬季に海上風からの運動エネルギー注入や海面冷却によって海洋表層に混合層が発達する際、下方から低温水を取り込む（エントレインメント）ため、混合層内の水温（すなわち、海面水温）が低下する。この過程を介しても、海上風変動が水温偏差の形成に寄与する。

20世紀後半における気候力学の最大の成果の1つは、エルニーニョ・南方振動（ENSO; El Niño/ Southern Oscillation）など、

熱帯大気海洋結合変動に伴う低緯度の降水異常が大気循環偏差を励起し中緯度に影響するという「遠隔影響（teleconnection）」の概念の確立で、現代の季節天候予報へ重要な根拠を供している。エルニーニョ時に赤道太平洋に暖水偏差が広がり、積乱雲の活動域が中部赤道太平洋にまで広がると、北太平洋上空の西風ジェット気流が強化される。同時に海上では亜熱帯高圧帯が強まり、その北に停滞するアリューシャン低気圧も強化・東偏し、両者の間を吹く海上偏西風も強まる。その結果、中緯度で冷水偏差が広がる。赤道域に冷水偏差が広がるラニーニャ（La Niña）時には、これら大気循環異常の符号は逆転する。

したがって、熱帯からの影響で中緯度に形成される水温偏差は、局所的な海面熱放出の偏差とは逆符号を持つ。すなわち、偏西風の強化（弱体化）に伴う熱放出の増大（減少）が冷水（暖水）偏差を生むという局所的過程だが、水温偏差は海盆規模となる。こうして、経験直交関数（EOF）解析では大規模な変動を抽出しがちなため卓越変動として

認識されやすい。たとえば、中緯度・亜熱帯北太平洋域のEOF解析で抽出される“太平洋10年規模振動（Pacific Decadal Oscillation）”には、ENSOの経年変動も含めた熱帯起源の水温変動が強く反映されている。従来、これらENSOに伴う経年変動やそれに重なる10年規模の長期変動を含め、北太平洋の表層水温は、熱帯からの影響を含む大気変動に受動的に反応するだけと考えられてきたのである。

大 洋西部の海流変動に伴う水温偏差

15年前程、筆者らは当時としては高解像度の観測データから、10年規模水温変動が北太平洋で最も卓越するのは三陸沖を東へ向かう親潮に沿った亜寒帯海洋前線帯であることを見出し、その後、前線帯での暖水（冷水）偏差が海面からの熱放出を増大（減少）させる傾向も見出した。つまり、大気変動の結果として中緯度海盆の中・東部に生じる水温偏差とは異なり、水温変動が大気へ熱力学強制を与えるのである。海盆西部においては強い暖流・寒流が接して、水温南北勾配の顕著な海洋前線帯を形成するが、その南北変位が持続的水温偏差とそれと同符号の熱放出偏差をもたらしている。これらは地球シミュレータでの高解像度海洋モデル（OFES）でも再現された。

さらに、亜寒帯海洋前線帯の北上（南下）

に伴う晩秋・初冬の暖水（冷水）偏差が、移動性高低気圧の活動や降水量の変化を通じ、1月の地表アリューシャン低気圧を明瞭に弱める（強める）働きが見出された。このとき、対流圏界面まで達する深い高気圧性（低気圧性）偏差が形成される。こうした傾向は、前線帯を表現できる大気海洋結合モデル（CFES）の長期積分でも確認された。観測・モデルとも三陸沖と熱帯域との水温変動に同時相関はほとんどないことから、熱帯域に対する中緯度海洋の受動的な応答ではなく、中緯度海洋の長期変動が大規模大気循環に及ぼすフィードバックと解釈できる。

中緯度の強い暖流： 「気候系のホットスポット」

中緯度の暖流からの大気への影響は、暖流による熱の輸送という、海洋循環の気候学的役割からも納得できる。一般に、亜寒帯高気圧に伴う高気圧性トルクの注入の下、地球の自転効果として生ずるエクマン輸送により、表層海水は大洋中央部に収束する。同じ速さの地衡流に働くコリオリ力が低緯度ほど弱いこと（ β 効果）を反映し、エクマン収束が起こる海域では赤道向きの流れとなり、その補償流として大洋西側の沿岸に強い暖流が形成される。これが「西岸強化」である。この暖流は、表層海洋が広く熱帯で受取った熱を中緯度に輸送し、大陸東岸沖の狭い海域で集中的に大気へ放出する。この熱は大気擾乱によりさらに高緯度へ運ばれる。こうして、莫大な熱と水蒸気を集中的に大気に放出し、気候系に能動的に影響する中緯度暖流域を、我々は「気候系のホットスポット」と名付けた。

暖流と付随する水温前線とは、以下3つの過程により大気へ影響し得る。1) 水温の南北勾配が下層大気の気温勾配を維持し、温帯低気圧の発達を促す「傾圧性強化」、2) この気温勾配を反映した下層大気の密度分布に伴い海面気圧の高低が生じる「気圧調整」、3) 暖流からの加熱で成層不安定化した境界層内で乱渦による鉛直混合が活発化し、上空の風の運動量が下方輸送され海上風が加速される「運動量混合」である。

海洋前線帯の大規模大気循環への影響

「傾圧性強化」の気候学的な現れとして、黒潮や湾流、南西インド洋のアグラス環流に伴う顕著な海洋前線帯に沿って、移動性高低気圧が頻繁に発達する「ストームトラック」が形成されている。これら大気擾乱は極向きに熱を輸送しつつ発達し、海上気温勾配を緩和させようとするが、寒冷前線背後

の寒気に暖流から大量の熱が供給されて効率的に気温勾配が回復するという「海洋傾圧調節」により、海洋前線帯に沿って低気圧が繰返し発達することが可能となる。なお、海洋との熱交換は個々の大気擾乱には熱的減衰として働くため、低気圧の発達には暖流からの水蒸気供給が重要となる。擾乱の熱輸送が対流圏の南北気温勾配を緩和させようと働くため、温度風平衡の制約の下で上空の西風運動量が下方輸送され海上偏西風が維持される。これが海洋循環を駆動し前線帯の形成に寄与することを鑑み、これら一連の過程を中緯度大気海洋結合系の観点からとらえ直すことが必要であろう。

なお、海上偏西風を伴う中緯度ジェット気流は極前線ジェット気流（亜寒帯ジェット気流）と呼ばれ、海洋前線帯に沿って発達する移動性高低気圧によって維持される。北半球では「北極振動」とも呼ばれる「環状モード変動」の本質は、このジェット気流の変動であることが明らかにされ、この変動が海洋前線帯の熱力学的影響を強く受けたレジームと大気の内部力学が卓越するレジーム間の遷移の現れという興味深い仮説も得られた。

前述の通り、北西太平洋亜寒帯前線帯の南北変位は、持続的水温偏差による「傾圧性強化」の変調を通じてストームトラックを南北変位させ、それが海盆規模の偏西風変動を引き起こすと解釈できる。また、本州南

岸の黒潮流路が大蛇行すると、それに対応して冬季の南岸低気圧の東進経路も沖合に離れる傾向も捉えられている。

暖流や海洋前線の局所的な影響

中緯度の暖流や水温前線が海上風・気圧の局所分布や対流性降水の集中化に与える影響も近年次々と見出されている。そのひとつが、東海沖から房総沖に黒潮とその続流沿いに形成される気圧の谷である。これは北西季節風に伴う下層寒気が黒潮から強く加熱されて海面気圧が低下したと解釈できるが、季節風の移流効果で黒潮のやや南にずれる。この「気圧調節」に伴い摩擦の影響で海上風が収束して上昇流が生ずるため、中層雲量が極大となっている。さらには、黒潮上で活発化した大気境界層内の「運動量混合」により上空から西風運動量が下ろされ、気圧の谷へはその北縁から地衡風から大きくずれた北風が吹き込み、特有の風系が形成されている。

別の典型例は、5月後半～6月に沖縄西方の黒潮沿いに起こる積乱雲の組織化である。この組織化は、その北方に停滞する梅雨前線へ向かう下層の高温多湿の気流が、黒潮流軸に沿った水温の極大上を吹く際に起き、梅雨前線に伴うものとは別の降水帯が現れる（図1）。実は、衛星観測による平年6月の降水量は平均的な梅雨前線の位置

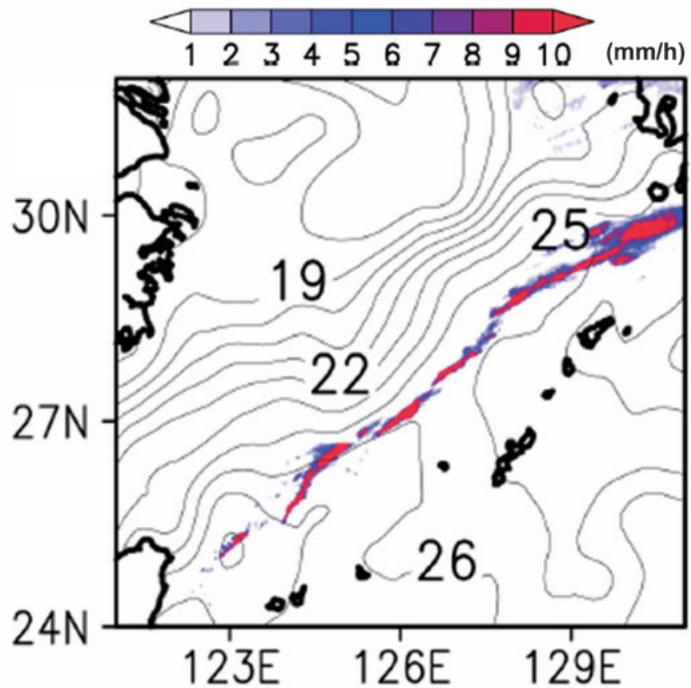


図1 2010年5月20日のレーダー観測雨量（色）に見られる、沖縄西方の黒潮沿いに組織化された積乱雲の列。等値線は海面水温（ $^{\circ}\text{C}$ ）。

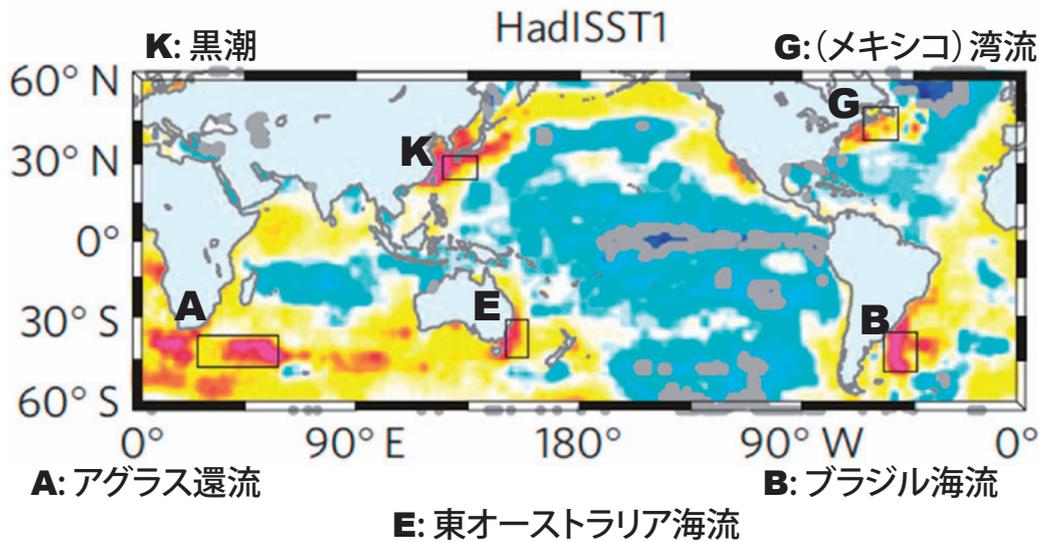


図2 過去109年間に海面水温に観測された直線の変化傾向(トレンド)の分布図。赤色はトレンドの全海洋平均値(100年当り+0.5°C)よりも1°C以上も速いペースで温暖化した海域(寒色系の海域でもそのほとんどで温暖化している)。

よりも南方の沖縄西方で極大となる。これには黒潮沿いに組織化される積乱雲が大きく寄与するものと考えられる。なお、黒潮よりさらに水温の高い湾流沿いには、夏季により上の高度まで積乱雲が発達する傾向が見出されている。

加 速する研究の進展

中緯度の暖流や付随する水温前線が大気に与える影響は、上記以外にも近年次々と見出されている。これらは熱帯の大気海洋変動の重要性を低めるものでは決していないが、従来の気候力学の「常識」が覆されつつあるのは事実である。これは、長年にわたる観測データの蓄積に加え、空間解像度の高い人工衛星データの解析や数値モデリングが近年可能になったことが大きい。

これら急速な研究の進展に我が国の研究者が果たした役割は大きい。その実績を踏まえ、平成22年度に文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「気候系のhot spot: モンスーンアジアの大気海洋結合変動」(代表: 中村 尚)が採択され、大学院生約30名を含む約100名の海洋物理学・気象学・気候学の研究者がさらなる研究の進展へ取り組んでいる(<http://www.atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp/hotspot/>)。本稿で概説したものの他にも、すでに多くの重要な成果が得られている。その幾つかは、領域発足の基盤となった成果も含め、米国気象学会専門誌 *J. Climate* の special collection: CLIVAR Western Boundary Currents に収録されている(アクセス自由)。また、本領域の発足に触発され、中国やフランスでも大型プロジェクトが発足

し、米国でも複数の有力研究者が研究予算を獲得した。今後国際連携が一層活発になろう。実際、筆者を含む国際研究チームは、大洋西部の中緯度暖流域が全海洋平均よりも2~3倍も速く昇温してきた事実を見出した(図2; Wu *et al.*, 2012)。地球温暖化に伴う全球的な海水温上昇が観測されるなか、海上風変化の影響が海洋循環の変化を介して暖流域に集中的に顕われているのが分かる。我々が「気候系のホットスポット」として着目する中緯度暖流域の大気海洋相互作用の重要性が一層増大しつつあることを示す結果である。興味を持たれた方はまずレビュー論文に当たっていただきたい(Kelly *et al.*, 2010; Kwon *et al.*, 2010)。

—参考文献—

- Kelly, K. A. *et al.* (2010) *J. Clim.*, **23**, 5644-5667.
- Kwon, Y.-O. *et al.* (2010) *J. Clim.*, **23**, 3249-3281.
- Wu, L. *et al.* (2012) *Nature Clim. Change*, **2**, 161-166.

■一般向けの関連書籍

中村 尚 他(編著) (2008) *中緯度海洋前線帯における大気海洋相互作用*, 月刊海洋号外, 海洋出版社。



著者紹介 中村 尚 Hisashi Nakamura

東京大学 先端科学技術研究センター 教授

専門分野: 気候力学, 大気海洋相互作用, 異常気象の力学。データ解析や数値実験を通じて、亜熱帯・中高緯度の気候循環系の形成と変動、将来変化、それらと海洋や海氷、陸面との相互作用に関する研究を進めている。

略歴: ワシントン大学大気科学科博士課程修了。東京大学大学院理学系研究科教授等を経て、現職。著書に「Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction」(AGU, 分担執筆)などがある。

とめ 株式会社とめ研究所

ソフトウェア研究開発受託

- ・画像処理、数値解析、データマイニング等の研究開発
- ・地球惑星科学系の博士課程出身者が多く在籍、技術者募集中

URL: <http://www.tome.jp> E-mail: info@tome.jp

地熱開発の動向と高温岩体システム (EGS)

産業技術総合研究所 地熱資源研究グループ 柳澤 教雄

2011年3月の福島第一原発の事故は、エネルギー政策の方向転換をもたらすことになり、地熱エネルギーなど再生可能エネルギーの開発が急務となっている。火山国の日本は約2,300万kWの地熱発電のポテンシャルを持っているが、開発初期投資が高いことや国立公園との関係などから開発が停滞していた。しかし、各種規制緩和や買い取り価格制度の成立など新規開発に向けての準備が整いつつある。2009年のJGL (Vol.5, No.3) で江原氏が「地熱エネルギー利用の現状と課題」で当時の状況を紹介しているが、本稿では、その後の状況や世界の動向、さらに最近注目されている高温岩体発電の開発の現状などを紹介したい。

地熱開発のしくみと現状

地熱発電は、1904年にイタリアのラルデレロで初めて実用化され、すでに100年以上の歴史を持つ。火山地域を中心に開発が行われ、2010年には24カ国で合計約1,080万kWの発電が行われている。日本では九州や東北を中心に17ヶ所で約53万kWである。

一般的な地熱発電の方法は、地下の地熱貯留層（熱水が溜まっているところ）まで井戸を掘り、取り出した高温高圧の蒸気の力でタービンを回し発電する、というものである。地熱貯留層の多くは深さ数kmで温度300°C前後であるが、有力な貯留層ほど深度が浅く、また井戸1本あたりの蒸気生産量が大きく発電量も稼げる。開発コストを低くするためには、有力な地熱貯留層を確実に探査し、掘削を成功させることが重要である。また、地下の熱水が枯渇しないよう、シミュレーションを通して適正な蒸気生産量および地熱発電量を評価する必要がある。

世界的に見ると地熱エネルギーの開発は近年急速に進んでいる。たとえばニュージーランドは、この5年間に10万kW規模の地熱発電所を2つ建設し、さらに多くの建設計画がある。北島のタウポ火山帯の有望地域を重点的に調査・開発することで、短期間に効率よく発電量を増やしている。

ところが日本の場合、世界第3位といわれる地熱発電ポテンシャルの80%以上が国立公園の特別地域にあり、これまで調査さえも実施されなかった。また、地熱資源の有望地域周辺には温泉が多く、地熱開発による温泉の枯渇の懸念から開発に着手されなかった地域もある。さらに諸外国に比べ掘削単価が高く、初期投資の負担が大きい。こうした要因により、1999年を最後に新規の発電所が建設できない状況が続いていた。

2008年頃から日本でも地熱開発について見直しがされてきた。まず、国立公園地域を含めた地熱開発ポテンシャルの再評価がされ、約2,300万kWと算出された。未開発

の有望地域抽出や、地熱開発をめぐる様々な課題と対応策が検討され、他の自然エネルギー団体と共同して、将来の供給可能性が検討された（江原ほか、2008）。2010年には秋田県湯沢市の雄勝地域で約4万kWの発電所建設に向けての調査が開始された。環境省による温泉発電の実証試験、温泉共生型の地熱貯留層管理システム開発のプロジェクトも始まった。

そして、東日本大震災に伴う原発事故に伴い、地熱発電に関する注目度は急速に高まり、各メディアで現状と課題が紹介されるとともに、自然公園内での調査・開発の基準の見直し、固定価格買い取り制度の導入が行われている。それでも有望地域の地熱貯留層の状況については不明な点も多く、詳細な調査が必要であり、そのための探査技術の開発も必要である。また、10年近く

本格的な研究開発が行われなかったため、関係機関では若手の育成が急務となっている。日本の地熱開発を促進するためには、こうした技術的・制度的な課題を克服し、早い段階で現在のニュージーランドのような開発サイクルにのせる必要がある。

地熱エネルギーは電力だけでなく、熱としての直接利用も広く行われている。現在、世界の地熱直接利用の約7割は地中熱ヒートポンプを利用した冷暖房、いわゆる地中熱利用である。これは、地下数十mで地下水温度が年間を通してほぼ一定（約15～18°C）であることを利用し、夏場は冷房、冬場は暖房を効率的に行う手法である。冷暖房に使う電力を50%近く節減でき、夏場に冷房後の排気を地下に戻すことでヒートアイランド現象も抑制できる。アメリカやヨーロッパ諸国、中国で導入が盛んであり、この15年で地中熱の年間利用量は20倍近くの伸びを示している。たとえばアメリカでは、すでに100万台の地中熱ヒートポンプが導入され、今でも年間8万台ずつ増えている。日本での導入はまだ1,000台程度と大きく遅れているが、ここにきて東京スカイツリーに導入されるようになるなど、認知度が上がってきている。今後、学校や病院、公共機関、ホテルなどでの導入が広まって、家庭用に気軽に導入

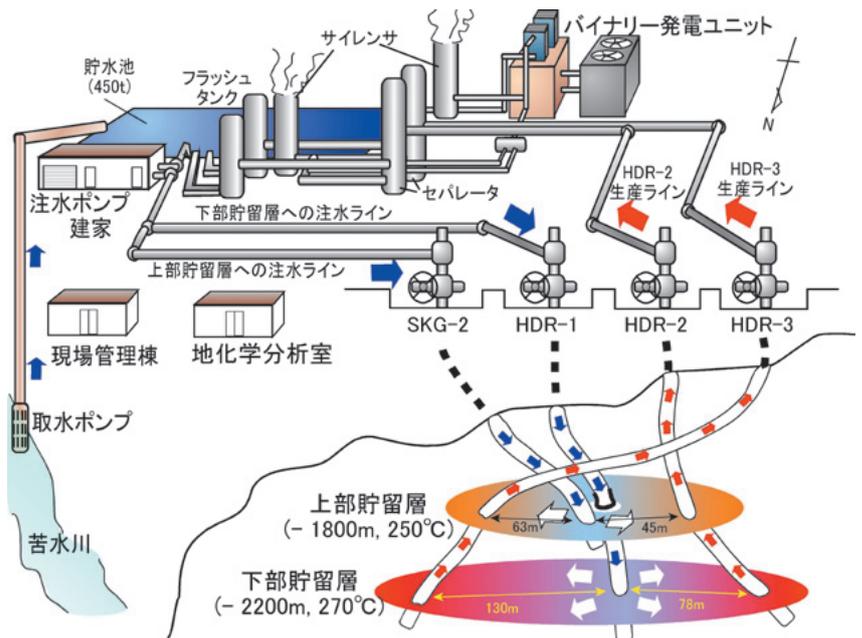


図1 肘折での高温岩体システム。Yanagisawa et al. (2008) を改変。

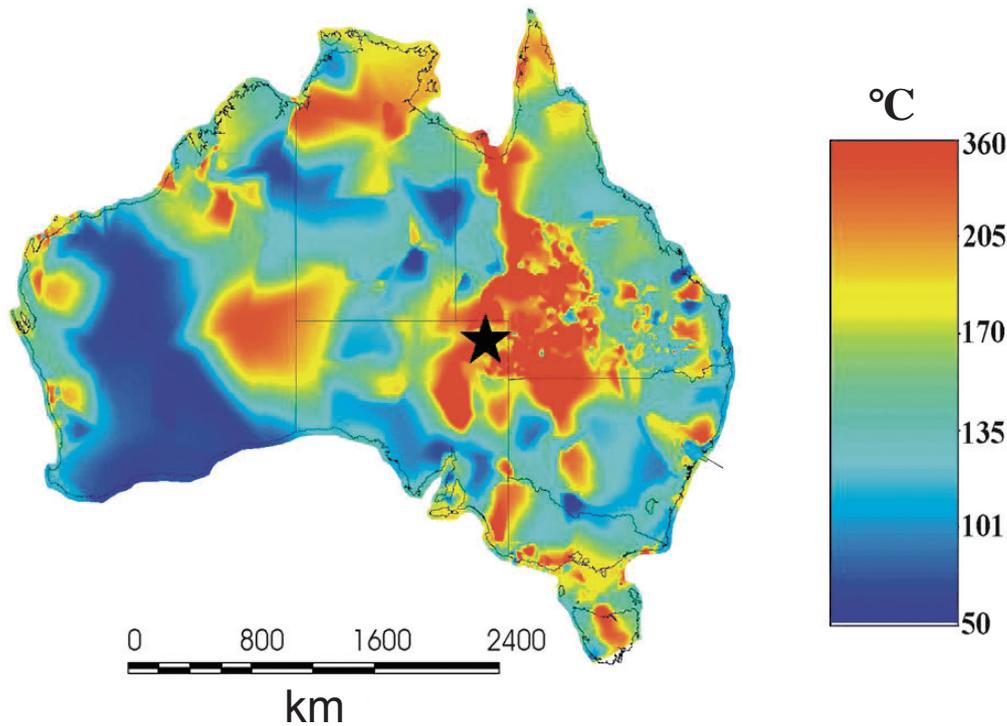


図2 オーストラリアの地下5 km の温度分布図とクーパーベーズン(★) (Somerville *et al.*, 1994).

できるようになることを期待したい。そのポテンシャルは十分にあると考えられる。

日本で行われていた高温岩体システム (EGS) 研究

地下が十分高温にもかかわらず、水が存在しないため地熱貯留層が形成されない、ということはいしばしばある。この熱を利用する手法として、地上から水を入れて地下で加熱して高温の蒸気を取り出すことが考えられる(図1)。具体的には、まず地下の高温岩体まで井戸を掘削し、高压の水を注入して岩体を水圧破碎し、人工的な亀裂すなわち貯留層を形成する。その形成をアコースティック・エミッション(AE; 岩石などの破碎に伴い弾性波が放出される現象)の観測などによって確認したうえで、できた貯留層に向けて2本目の井戸を掘削する。すると、1本目の井戸から水を注入すると、人工貯留層で加熱された蒸気が2本目の井戸から生産される、という循環システムが形成される。このような方式を高温岩体発電方式あるいは Enhanced Geothermal System (EGS) といい、現在アメリカやヨーロッパ、オーストラリアで研究開発が行われている。

高温岩体の研究は、日本でも火山カルデラ地域で行われていた。新エネルギー・産

業技術総合開発機構(NEDO)による山形県の肘折地域、電力中央研究所による秋田県の雄勝地域である。両地域において、井戸の掘削、水圧破碎による人工貯留層の造成、AE観測による貯留層の確認、循環試験が繰り返行われ、肘折では、図1に示すように2本の生産井と2本の注入井を利用して、約1年半の長期循環試験が行われた。

筆者は、肘折での循環試験でトレーサー試験(蛍光物質などを投入して、地上に戻るまでの時間や回収率などを測定)や、システム内での水-岩石反応の解析を行った。深度約2,200 m、270°Cの花崗岩中に形成された人工貯留層に注入された30°Cの水は、数日程度で160°C前後の二相流体(蒸気+熱水)として回収できた。ただ、循環とともに注入水が花崗岩中の硬石膏(CaSO₄)脈を溶解し、亀裂を徐々に広げていくケースもあった。そうした流路では、水の移動速度が速まる結果、水が十分に加熱されなくなり、生産温度が120°Cまで低下した。また、硬石膏の溶解で水中のCa濃度が増加し、地上部でCO₂と反応して方解石の沈殿物(スケール)を生成し地熱配管を閉塞させる問題(スケール問題)が生じた。逆に、水の通りにくい流路では、Caを含む鉱物の沈殿が貯留層内で起こり、トレーサーの戻りは循環

につれて遅くなった。ただし温度は160°Cに保たれ、スケール問題も生じなかった(Yanagisawa *et al.*, 2008)。

このように、井戸間の距離、注入温度、貯留層内での水-岩石反応などの要因によって、高温岩体内の循環中に熱水の温度や化学組成などが大きく変化する可能性が示された。そして、スケール問題への対策として、注入水の温度を高くする、坑井間距離を長くする、スケール抑制剤を注入する、などの手法が提案された。本来であればこのような課題を克服するための実用化研究が行われるべきであったが、残念ながら肘折のプロジェクトは2002年で終了となった。

オーストラリアの EGS

オーストラリアでは、地下5 kmの温度分布が図2のようにまとめられ(Somerville *et al.*, 1994)、大陸内部を中心に300°Cを超える領域が広がっていることが判明した。そこで、高温岩体システムが注目され、まずGeodynamics社が内陸のクーパーベーズン地域での開発に着手した。4,300 mまで掘削して水圧破碎を行い、AE観測から人工貯留層はほぼ水平に広がっていることが示された。そして深さ約4,300 m、坑井間距離約500 mの井戸2本を用いての循環試

験が行われた。15.5 kg/s で注入した 93°C の水が、回収時 213°C まで加熱された。筆者らがトレーサー試験を実施したところ、投入後 4 日目からトレーサーが出現し、10 日後に濃度がピークとなった。回収率は 78% に達し、肘折での 50% を上回った。

このように地下 4 km での循環システムは形成された。ただ、本地域は地下の地圧の異常に高いジオプレッシャー型と呼ばれる貯留層で、熱水の圧力が高く、井戸や地上配管などの耐圧性が課題となった。現在は、配管材料などが再選定され、発電に向けての掘削などが行われている。

オーストラリアでは、2008 年頃から地熱開発熱が高まり、地熱開発ライセンスを持つ企業は 50 近く、開発可能な面積は約 50 万 km² である。しかし、地熱開発特有の初期投資の高さは EGS も例外でなく、水圧破砕などの技術的課題もあり、まだ本格的な高温岩体発電には成功していない。

それでも、オーストラリアでは地熱資源の研究開発を重要視しており、各州の主要大学に地熱研究センターを設置し、多くの院生を受け入れている。たとえばアデレード大学では、水圧破砕のシミュレーションや、地下環境を模擬した水-岩石反応実験、クイーンズランド大学では、開発コストのモデル計算、地質調査に基づく熱源の解明、CO₂ を媒体にした高温岩体システム、西オーストラリア大学では地中熱利用の研究を行っている。さらにオーストラリア地球科学局

(Geoscience Australia) では、現在の地下温度図をベースにさらに詳細な調査を進行中である。

ブリスベンで 2012 年 8 月に開催された第 34 回国際地質学会議 (IGC) では、プロジェクトの最新情報を基調講演とした地熱セッションが開催された。2015 年にはオーストラリア・ニュージーランド共同で世界地熱会議 (WGC) を開催予定である。

地熱の利用促進にむけて

今後、再生可能エネルギーとしての地熱利用が重要となり、地熱利用のための地下環境解析において私たち地球科学者が貢献できる場は多くなっていくだろう。国立公園内などでの地熱貯留層の分布や形成メカニズム、地下 5 km 程度の温度分布図と高温岩体発電の可能性、燃料資源などとの関連性など、調査すべき案件は山ほどある。また、大学等では地中熱利用の施設を積極的に導入して節電につとめるとともに、地下水系のモニタリングや解析にも取り組んではどうだろうか。たとえば、アメリカのオレゴ

ン工科大学では大学内の地熱エネルギー利用を行っており、アジアでも地中熱利用は広がっている。日本でも秋田大学の鉱業博物館で地中熱利用を体験できるスペースができたが、そのような取り組みが全国に広がればよいと思う。

—参考文献—

江原幸雄ほか (2008) *日本地熱学会誌*, 30, 165-179.

Somerville, M. et al. (1994) *Energy Research and Development Corporation, Australia, Report*, 94/243, 133pp.

Yanagisawa et al. (2008) *Geothermics*, 37, 1-18.

■一般向けの関連書籍

江原幸雄 (2012) *地熱エネルギー—地球からの贈りもの—*, オーム社。



著者紹介 柳澤 教雄 Norio Yanagisawa

産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 地熱資源研究グループ 主任研究員

専門分野：地熱資源、鉱物学、地球化学。地熱配管に付着するスケールの解析や対応策、トレーサー試験、高温岩体発電、地中熱利用、温泉発電などの研究を行っている。

略歴：東北大学理学部地学科地学第二卒業。工業技術院東北工業技術研究所、地質調査所主任研究官を経て、現職に至る。

バイオミネラル化の可視化

— 細胞生物学的に見た有孔虫の石灰化過程 —

(独)海洋研究開発機構 豊福 高志

有孔虫類は地層に微化石として保存される 0.5 mm 前後の殻を持つ、地球惑星科学分野できわめてポピュラーな単細胞性の真核生物である。この小さな生き物がどのようにして石灰化を促進し、殻を形成しているのかについては、広く研究者の興味の対象となってきた。筆者は細胞内のカルシウムと pH を、蛍光試薬で染め分ける手法を応用し、生きた有孔虫の殻形成過程の観察を行なうことで、この問題にアプローチしている。蛍光観察の結果、有孔虫は石灰化を促すために、カルシウムを海水から濃集した上で、細胞内の pH 環境を細かくコントロールしていることがわかってきた。

バイオミネラル化

バイオミネラル化は生物が関わる鉱物沈着の過程である。中でも石灰化過程 (カルシフィケーション) は、生物

が海水からカルシウムイオンと炭酸イオンを得て、カルサイトやアラゴナイト (どちらも化学組成は CaCO₃ だが、結晶構造が異なる) などを、自らの殻などとして沈着する、バイオ

ミネラル化の一種である。生産された鉱物は、生物の外骨格として物理的な強度を与えたり、体型の保持や防御性能の向上に貢献する。また、必要な元素を貯蔵するなどして、化学環境の変動に備える。あるいは耳石のように感覚器の一部として役立っている場合もある。そして生物の死後、殻が堆積物に埋没し化石となる。化石は古生物の直接の証拠であると共に、様々な形で過去の環境情報とその変遷を記録している。

たとえば、新生代 (約 6550 万年前から現在) における寒冷化、過去の水温の復元、氷床量 (= 海水準) の変動など、地球惑星科

学で重要な事象が、有孔虫化石の分析によって明らかにされてきた。そのため、古生物学をはじめとする地球惑星科学を支える研究対象として重要である。有孔虫は地球化学的な分析を行うための試料として最も利用されている化石である。

バイオミネラリゼーションは、化石へいたる第一歩である。バイオミネラリゼーションの際、どのようにして環境情報が同位体比や化学組成として記録されていくのかを追求することは、より正確で高精度な古環境復元を行うための指標を確立する上で重要である。

さらに視点を変えて巨視的に概観すると、石灰化過程はカルシウムと炭素の物質循環として捉えることができる。カルシウムは岩石から溶出し海水に溶解している。一方で海水中の炭酸イオンは、大気中の二酸化炭素が溶解し、解離したものである。この二酸化炭素は火成活動や人間活動を起源として大気中に放出されたものである。これらが生物の働きによって結び付けられることで、炭酸カルシウムとして固定される。そして、生物の死後、堆積物に埋没することで、ついには地圏に戻るのである。バイオミネラリゼーションはこの大きな循環のなかで、生物が深く関与して物質の相が変化する局面であり、地球惑星科学と生命科学の両面から面白い研究対象であるといえる。

有孔虫の石灰化モデル

石灰質有孔虫は海洋における主要な石灰化生物であると共に、バイオミネラリゼーションを研究する対象としても好適な生物である。有孔虫は石灰化生物の中でも円石藻と並び最も繁栄している真核単細胞生物である。また有孔虫は、カルサイト、高マグネシアンカルサイト、アラゴナイトという

結晶系の異なる炭酸カルシウムを沈着し、ガラス質 (hyaline) と陶器質 (porcelaneous) とよばれる、構造の全く異なる殻を形成する (図 1)。ガラス質有孔虫の殻は、まず細胞外に有機膜を展開し、海水から取り込んだカルシウムをプールしている小胞と、pH が上昇し炭酸イオンが生産される小胞が別々にあり、これを石灰化部位で有機膜上に分泌することで、炭酸塩が沈着する。一方で、陶器質有孔虫は、細胞内の小胞で pH を上昇させ、炭酸塩の針状結晶を沈着し、その結晶を分泌する。このような、全く異なる様式の石灰化過程が、同じ有孔虫の異なる種によって行われている点は驚きに値する。

有孔虫細胞内部の環境分布

筆者は有孔虫が炭酸カルシウムの殻を形成するとき、細胞生物学的にはどのようなことが起きているのかについて検討するために、蛍光顕微鏡を使った観察を進めている。一般にカルシウムイオンは、細胞内の興奮を伝達するシグナル物質であり、細胞生理学的に重要である。細胞内におけるシグナリングを研究する目的で、カルシウムに反応して蛍光を発する、カルシウムプローブと呼ばれる試薬が市販されている。筆者は常々有孔虫細胞内のカルシウムが見えないものかと悩んでいたところ、顕微鏡会社のカルシウムイメージングの動画を目にして、これを有孔虫に応用することを思いついた。

カルシウムプローブを使った可視化手法は、有孔虫のように一つの細胞が大きい生物への応用例はあまり見当たらず、取込み条件の模索から取りかかった。都合の良いことに、有孔虫の殻の形成は数時間以上の時間を要する事象である。そのため、短時間に進行する細胞内シグナルの観察と違い、

高速カメラなどの高価な機械を必要としない。そのため、普通の蛍光顕微鏡と一般的なデジタル一眼レフカメラを組み合わせた、簡易な観察系を組み立てた。試行錯誤の末に、生物への影響を最小限に抑えながら、観察を行えるように条件を最適化した。その結果、有孔虫が殻を沈着するときの、カルシウムイオンの細胞内における分布を可視化できるようになった (Toyofuku *et al.*, 2008)。

有孔虫の石灰化で、カルシウムイオンと共に炭酸イオンが重要である。海水中の炭酸イオンの量は pH と強い関連がある。二酸化炭素が海水に溶解すると、炭酸 (H_2CO_3) ↔ 重炭酸イオン (HCO_3^-) ↔ 炭酸イオン (CO_3^{2-}) に解離する。この平衡は pH に依存しており、pH が高まると平衡は右へ、逆に pH が低下すると平衡は左へと移動する。通常の海水の pH では、約 9 割が重炭酸イオンの状態である。しかし、生物が pH を高めることで、石灰化に必要な炭酸イオンを得ることができる。そこで、有孔虫がどのように pH を変化させ、炭酸イオンを得ているかについて調べることにした。ピラニンという、pH に応じて蛍光特性が変化する試薬を用いることで、細胞内 pH 二次元分布を観察する手法を確立した (de Nooijer *et al.*, 2009)。

観察は次のように行っている。まずカルシウムまたは pH のプローブの海水溶液を調整する。その溶液中で生きた有孔虫を一昼夜培養して、細胞に取り込ませる。周囲の試薬を含む海水をろ過海水で洗い流した後、蛍光像を観察する (図 2)。有孔虫は単細胞であるが、これまでの殻に新たな部屋 (チャンパー) を付加することで成長する。とくに生まれてすぐはチャンパー形成の頻度が著しく、ほぼ毎日新しいチャンパーを形成する。

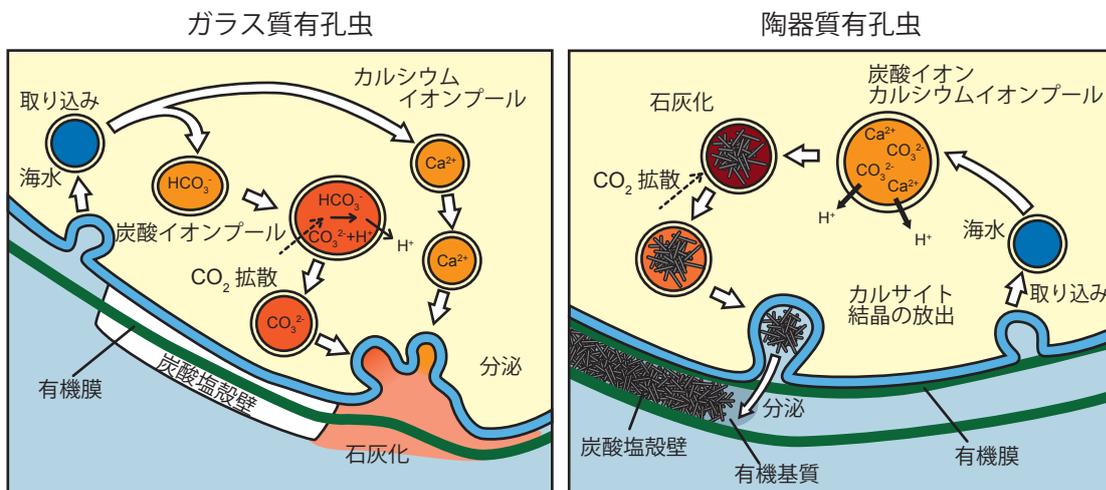


図 1 カルシウムおよび pH の細胞内空間分布から考えられる、有孔虫細胞による石灰化モデル。左はガラス質有孔虫、右が陶器質有孔虫を示す。

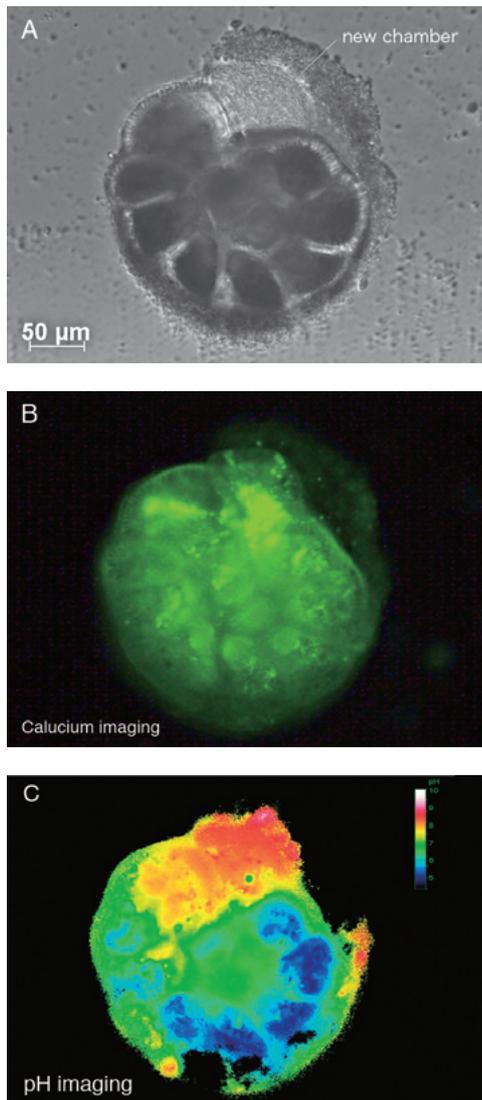


図2 カルシウムおよびpHプローブによる観察例。A: 微分干渉像, B: カルシウムイオン分布像, C: pH分布像。

そのため、無性生殖によって得た幼生を数多く観察していれば、その中には新たなチャンバーの形成している個体を容易に見出すことができる。

図2Aの微分干渉像では、新たなチャンバーの形をした有機膜が観察できる。図2Bでは新たに形成しつつあるチャンバーにカルシウムイオンを含む細胞質が入り込み、カルシウムを更に運び込もうとしているところであると思われる。このように細胞内のカルシウム分布は不均一であり、生物学的に強くコントロールされていることが示唆される。

図2CのpH画像では色がpHに対応しており、赤が高いpH (~9)、青が低いpH (~5)をそれぞれ示している。チャンバーを形成している部分で、pHが高いことを示す赤い部分がはっきりと見られる。この観察結果から、

有孔虫の細胞内部には、大きなpH環境勾配が存在していることがわかった。pHが高まった部分では炭酸系の平衡が重碳酸イオンから炭酸イオンにうつり、石灰化に用いられると考えられる。

以上の観察結果から、有孔虫は殻を形成するために、海水からカルシウムを取り込み、細胞内のpH環境を調節することで殻の

沈着を制御する、巧みな仕組みを持っていることが強く示唆される。現在、これらの一連の過程がいずれの細胞小器官によって制御されているのか確かめるべく、実験を進めているところである。

生命科学と地球惑星科学の架け橋

石灰化過程は化学式として $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3$ として捉えられているが、可視化された細胞内環境を観察したことで、生物活動が大きく関わっていることが実感できる。古海洋学では有孔虫の殻に含まれる、様々な微量元素や同位体を、過去の環境指標として用いている。これを古環境プロキシと呼ぶ。重要な古環境プロキシと考えられている元素が、細胞内にどのように取り込まれ、どういった挙動をして、殻に取り込まれているのかについては、実はまだよくわかっていない。また、個体周辺の微小領域における化学的な環境の影響などが、完全に把握できていないわけではない。今後の研究の中で、細胞内環境がどのように制御されているのか、外部の環境変動にどのように応答するのか、解き明かすのが楽しみである。さらに、この可視化手法は、地球惑星科学でよく利用されるサンゴや二枚貝、円石藻などの、他の様々な石灰化生物にも応用できると考えられる。各分類群の専門研究者と協力し、それぞれの生物が、どのようなプロセスで石灰化を行っているかについても、取り組んでいきたい。これからますますの発展が見込まれる研究テーマである。

—参考文献—

Toyofuku, T. et al. (2008) *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**, Q05005.

de Nooijer, L.J. et al. (2009) *Proc. Nat. Ac. Sci.*, **106**, 15374-15378.

■一般向けの関連書籍

渡部 哲光 (1997) *バイオミネラルゼーション—生物が鉱物を作ることの不思議*, 東海大学出版会, 180pp.



著者紹介 豊福 高志 Takashi Toyofuku

海洋研究開発機構 海洋・極限環境生物圏領域 チームリーダー

専門分野: 地球生物学, 実験古生物学。生きた有孔虫を用いて細胞内環境計測や微細構造観察を通して石灰化メカニズムや物質の循環について検討している。海洋生物と地球環境の相互作用とその進化に興味がある。

略歴: 静岡大学大学院理工学研究科博士課程修了。博士課程では有孔虫殻のMg/Ca比や安定同位体比を用いた水温・塩分指標について室内飼育実験を通して評価する研究を行った。千葉大学での学振PDを経て、現職。

「地球のからくり」に挑む

大河内 直彦 著
新潮社
2012年6月, 238p.
価格 740円 (本体価格)
ISBN 978-4-10-610472-5



横浜国立大学 環境情報研究院 ロバート・ジェンキンス

本書は「地球の定員」を超えて繁栄し続ける「人類」のからくりを迫った一般向けのサイエンス・ノンフィクションである。月刊誌「新潮45」に掲載された「化石燃料と文明」などの4本の記事を全12章に再編したもので、エネルギーと文明に焦点をあてている。

冒頭から続くショッキングな言葉が、読者を一気に「エネルギーの本質」の世界に引きずり込む。地球には本来、「定員」があるという。地球に降り注ぐ太陽エネルギーに限りがある以上、光合成によって「植物」が作り出す有機物、すなわち食料という名のエネルギーに限りがあるからだ。なぜ人類は「地球の定員」を大幅に超えることができたのか。著者は、「30人の奴隷」を雇うことによって、定員越えを可能にしているという。「30人の奴隷」とはエネルギーのことである。つまり、我々は、生きる上で最低限必要な基礎代謝量の30倍のエネルギーを、朝の洗顔に始まる日々の生活に利用しているのである。30倍ものエネルギーはどこから来ているのだろうか。そのからくりが第2章で紹介される「食料生産に重要な窒素肥料の人工合成」を皮切りに徐々に紐解かれていく。

植物の生育に欠かせず、農作地で不足し

がちな元素に窒素がある。その窒素が「地球の定員」を決めているという。窒素は大気に多量に含まれているものの、多くの植物はそれを直接使うことができない。そのため、一昔前はグアノと呼ばれる海鳥の糞が変質したものや硝石などの天然肥料を農作地に撒いていた。それが20世紀初頭のドイツで、窒素ガスからのアンモニア合成に成功して世界が変わった。アンモニアなら植物が窒素源として直接利用できる。その合成法は、金属触媒のもとで窒素ガスと水素ガスを高温高压で反応させる方法で、開発者らの名をとってハーバー・ボッシュ法と呼ばれる。水素ガスを発生させたり、高温環境をつくるには、石炭などのエネルギーが必要である。つまり、植物生産を促す肥料作りに多量のエネルギーを利用しているのだ。この製法は現在の農業生産も支えており、驚くべきことに、我々の体を構成する窒素の3分の2はこの製法によって作り出されたものらしい。良いことばかりではない。このアンモニア製造プラントは、火薬の原料となる硝酸の製造プラントに切り替えることができたのだ。アンモニアの大量合成を始めてからわずか2年後、ドイツ帝国は第一次世界大戦へと突

入していった。

このように、本書は石油(第4~7章)や石炭(第8章)、メタンハイドレート(第9章)、そして原子力(第11章)といった様々なエネルギー源の原理と開発の歴史、文明との関わりを示しながら進んでいく。第3章ではエネルギーを理解するための基礎知識とエネルギー計算について示されており、エネルギーそのものを理解できるようになっている。エネルギーというと、ワットやカロリー、ジュールなどの多様な単位が混在しており、わかりにくさに拍車がかかっている。しかし、本書ではエネルギーの単位を「キロジュール」に統一する工夫が凝らされていてわかりやすい。

著者の大河内直彦氏(海洋研究開発機構)は、バイオマーカー分析などを武器に、石油の成因や食物連鎖と生物生産の進化などの研究を展開しており、有機地球化学の最前線にいる。研究だけでなく、科学を平易に一般に伝える才能があることは、2009年に講談社科学出版賞を受賞した著者の前作である「チェンジング・ブルー(岩波書店)」で証明されている。「チェンジング・ブルー」では気候変動のメカニズムとその研究史を明快に語り、読者を魅了した。その鮮やかな語り口とストーリー展開は本書でも健在である。本書ではメカニズムの解説と研究史に、人類の文明史をクロスオーバーさせ、科学と我々の暮らしとの密接な関係を暴きだしている。逆に言えば、我々の文明を理解するには、地球のからくりを知らなくてはならない。本書は、これまであまり気にされてこなかったエネルギーの本質を捉えなおし、地球のからくりを目を向けた新しい世界観を共有するきっかけとなるだろう。

日本地球惑星科学連合 2012年 秋の公開講演会

～富士山・オーロラ・恐竜科学の最前線～

地球惑星科学は、太陽系の起源と進化を探り、地球史46億年の変動と進化、現在の地球の姿の解明を目指す基礎科学であるとともに、地震や津波、火山噴火、気象災害、地球環境変動など、私たちの社会と密接に関わる側面もあります。本講演会では富士山噴火など災害にみられる基礎科学の役割とその課題について考えるとともに、オーロラや恐竜の科学成果と将来の夢について解説します。

富士山の大规模噴火はあるか

藤井 敏嗣 (NPO 環境防災総合政策研究機構)

スプライト・オーロラから迫る新しい宇宙—地球観

高橋 幸弘 (北海道大学)

恐竜の鳥類進化

小林 快次 (北海道大学総合博物館)

日時: 2012年11月25日(日) 14:00~16:00 (13:30開場)

場所: 東京大学本郷キャンパス 小柴ホール

主催: 公益社団法人日本地球惑星科学連合

参加費: 無料

対象: 主に教員及び中高生(大学生・大学院生や一般の方も歓迎いたします)

申込方法: 先着170名。講演会HP内応募フォームよりお申し込みください。
http://www.jpogu.org/whatsnew/20121125JpGU_sympto/

日本学術会議

大型研究計画マスタープラン改訂をめぐる動向

日本学術会議地球惑星科学委員会委員長 永原 裕子 (東京大学)

はじめに

日本学術会議は国際レベルでのわが国の学術研究の推進における大型研究計画の重要性に鑑み、2010年3月に、提言“学術の大型施設計画・大規模研究計画—企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について—”(以下“マスタープラン2010”)を、2011年9月には一部改訂により“マスタープラン2011”を策定した。それらは、わが国における大型・大規模研究の在り方に大きな影響を与え、研究の将来像を議論することがさまざまな分野においてスタートした。さらに、そこに挙げられた計画の相当数に予算措置がなされたことから、従来大型研究・大規模研究を行っていなかった分野においても、新たな取り組みが開始された。

“マスタープラン”は3年に1回改訂されることが当初より決まっていたが、2011年に小改訂がなされたことから、日本学術会議では次回の改訂を2014年におこなうことを決定した。現在、学術会議科学者委員会“学術の大型研究計画検討分科会”において、2014年マスタープラン策定方針について議論が進められている。本報告では、地球惑星科学分野における今後の活発な議論に役立てていただくことを期待し、現在までに決定している学術会議全体および地球惑星科学委員会の今後の方針について報告する。

マスタープラン2014 策定方針

1. 目的・位置付け

- (1) マスタープランは、科学者コミュニティの代表としての日本学術会議が主体的に策定するもので、学術全体を展望・体系化しつつ、各学術分野が必要とする大型研究計画(大型施設計画とともに大規模研究計画を含む)を網羅し、その在り方について一定の指針を与える。
- (2) 大型研究計画と、諸観点から速やかに実施すべき重点大型研究計画を策定する。策定に当たっては、学術の大系化のために、学術研究領域を制定する。
- (3) 策定においては分野別委員会(われわれの場合は地球惑星科学委員会)の協

力と、研究者コミュニティの意思疎通を図る。また、透明性の確保と利益相反の回避に努める。

2. 大型研究計画の策定方法

(1) 学術研究領域の策定

当該分野の将来ビジョンを俯瞰的に描き、学術の体系化をはかるべく、各分野は研究領域を策定する。その数は各分野10以下とする。必要であれば小領域をもうけることができる。

(2) 学術大型研究計画の策定

- ・大型研究計画は、実施期間5～10年程度、予算総額数十億円超とし、(1)で定めた学術研究領域のいずれかに分類される。総数は200件程度とする。
 - ・策定は公募により、提案者は研究・教育機関長もしくは部局長、学術会議会員・連携会員、学協会長等のいずれかとする。また、提案は会員もしくは連携会員3名以上(会員1名を含む)の推薦を受けることとする。
 - ・分野別委員会または部(われわれの場合は第3部(理工学))では、一定割合(～200/応募総数)の絞り込みをおこなう。ただし各分野最大数を30とする。大型計画検討分科会は、その結果を参考にして、総数200件程度の学術大型研究計画を策定する。
 - ・すでに予算化がなされ実施中の大型研究プロジェクトについても、上記プロセスを経ることにより、リストに追加することができる。
- ##### (3) 重点大型研究計画の策定
- ・学術大型研究計画の中から、25～30件程度を、諸観点から速やかに実施すべき計画として選択する。
 - ・分野別委員会もしくは部は予備選考をおこない、全分野総計100件程度となるように絞り込む。
 - ・予備選考を踏まえて、新たに設置する審査小委員会においてヒアリングを含めた審査を行い、25～30件を選択する。審査小委員会は大型計画分科会委員、分野別委員会委員長、大型分科会が必要と認めた会員または連携会員で構成さ

れる。

- ・評価項目は、計画の学術的価値、研究者コミュニティの合意、計画の実施主体、共同利用体制の充実度、緊急性、戦略性、社会や国民の理解などの観点からおこなう。
- ・必要であれば、関係省庁との協議をおこなう。

3. 今後のスケジュール

- | | |
|----------|---------------------------|
| 2012年10月 | 学術会議総会において策定方針の決定 |
| 2013年1月 | 学術研究領域の策定 |
| 2013年2月 | 学術大型研究計画公募開始 |
| 2013年3月 | 学術大型研究計画公募締切 |
| 2013年6月 | 学術大型研究計画策定 |
| 2013年12月 | 重点大型研究計画策定 |
| 2014年2月 | 学術会議科学者委員会・幹事会における審議、パブコム |
| 2014年4月 | 学術会議総会において報告 |

地球惑星科学委員会における 取り組みと方針

1. 地球惑星科学分野における過去の経緯

マスタープラン2010策定の際には、地球惑星科学分野では43計画が提案され、地球惑星科学委員会ではそれらをまとめて7つの提案をおこなった。マスタープラン2011の小改訂では、コミュニティから35件の提案があり、公開ヒアリングを経て、以下の9計画が提案された。(a)“地域の知”の資源のグローバルな構造化と共有化プラットフォーム、(b)衛星および航空機を利用した地球観測システムの構築と大気海洋科学研究の推進、(c)海洋環境保全を担う統合観測システムの構築、(d)太陽地球系結合過程の研究基盤形成、(e)新統合国際深海掘削計画、(f)海底地震・地殻変動観測網の整備と海陸地震火山観測に基づく地震発生および火山噴火予測研究の推進、(g)広領域地熱システムの理解とエネルギー・資源の抽出、(h)複数衛星による地球磁気圏探査(SCOPE)計画、(i)太陽系進化の解明を目指す宇宙惑星探査・開発プログラム。文部科学省の学術審議会は、43計画からの変更・新規分につき再度ヒアリングをおこな

い、(g) と (i) の 2 つのみを優先度の高い計画とした。

2. マスタープラン 2014 に向けた地球惑星科学委員会の取り組み

地球惑星科学分野の計画のとりまとめは、地球惑星科学委員会企画分科会がおこなう。大型計画 200 件には、サイエンスの視点から地球惑星科学にとって重要なものはすべてを含め、重点課題には学術審議会の高い評価を受けるポテンシャルのあるものを推薦

すべきであると考えている。このことは、地球惑星科学の多くの分野が国策として進められている中で、重大な選択をおこなわなくてはならないことを意味する。

地球惑星科学委員会では、マスタープラン 2014 の策定を念頭に、地球惑星科学コミュニティにおける研究の将来像・大型計画提案を通じた共同研究体制の構築などが進むことを期待している。実際の議論は、ボトムラインは、学会レベルにおけるコンセンサス

であり、さらには日本地球惑星科学連合の各セクションにおけるコンセンサスである。数十億円超という予算にみあう科学的成果・分野の発展・国民の理解が期待される計画を、コミュニティレベルで適切に判断することが、今後の日本における大型研究展開の唯一の道筋である。さいわい地球惑星科学分野においては、日本地球惑星科学連合が存在し、5 つのセクションが活動している。これを最大限に利用し、この分野の発展につながる計画の提案を期待している。

NEWS

学術会議だより ②

地球惑星科学分野の参照基準策定について

— 大学教育の分野別質保証の取り組み —

日本学術会議地球惑星科学委員会 大学教育問題分科会委員長 西山 忠男 (熊本大学)

はじめに

タイトルだけ読んで、自分には関係のない問題だと思われた方が多いと思われる。しかし、これはいづれわれわれ全ての身に降りかかってくる問題である。大学に勤務している方は、この「参照基準」に沿って、それぞれの大学での地球惑星科学教育のカリキュラムを見直すことを求められ、研究機関に勤務している方は、やがてこの参照基準に沿った教育を受けた後輩たちとともに仕事をすることになるからである。ではこの参照基準とは一体何なのか、どこでそんなことが決められたのか、それらについて説明するとともに、「地球惑星科学分野の参照基準」としてより良いものを策定するために皆様のご協力を得たいというのが、この文を起草する趣旨である。ぜひご一読いただき、この問題についてのご理解を深めていただきたい。

参照基準とは何か

参照基準の考えは、分野別質保証の流れの中で出てきた。大学卒業までに身に付けるべき能力が「学士力」として定義され、学士力を保証する学士課程の再構築が求められていることは周知のとおりである(平成 20 年中央教育審議会答申「学士課程教育の再構築に向けて」)。「学士力」とは学生が専攻する分野に関わらず身に付けるべき一般的な能力のことであり、「知識・理解」、「汎用的技能」、「態度・志向性」、「統

合的な学習経験と創造的思考力」を柱としている。これに対して、各分野を専攻した学生に求められるべき分野ごとの能力も当然あるべきで、その能力を保証するのが「分野別質保証」の考え方である。

いまさら分野別質保証などと言わなくとも、そんなことは昔から専門教育の中で十分やっているじゃないか、と思われる方が多いと思われる。しかしながら、「学士力」や「分野別質保証」が声高に議論されるようになった背景には、昔ながらの質保証が機能しなくなった、という認識がある。それには大きく二つの要因がある。

一つは大学の大量化。30 年前と比較すると、少子化に加えて各大学の学生定員は大幅に増えているので、どの大学においても学生の平均的レベルは大きく低下しているはずである。この状況下における大学の役割は、これまでの「学術の継承」から「市民の育成」に変貌していく必要がある、というのが日本学術会議「大学教育の分野別質保証の在り方検討委員会」の認識である(参考文献 1)。

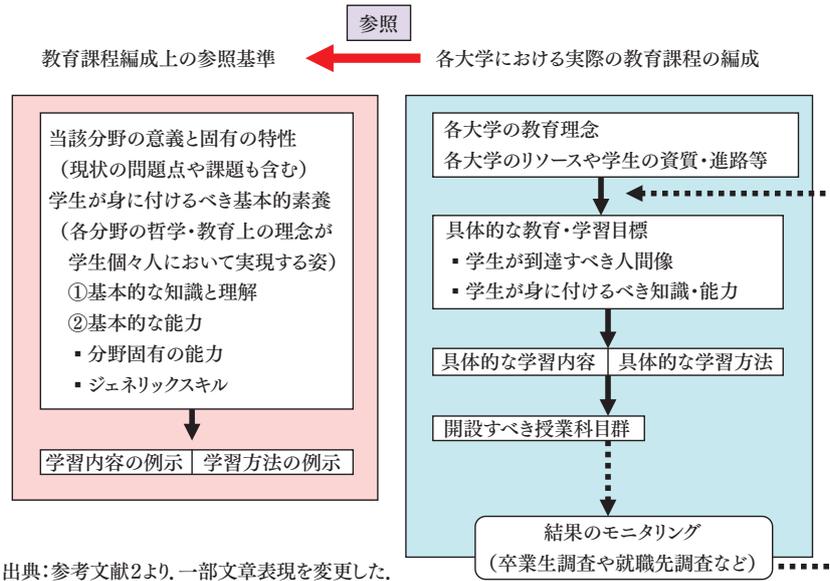
二つ目の要因は、従来の質保証の枠組みの機能が低下しつつあるという事実。従来の質保証の枠組みとは、次の 3 つである。大学設置基準と設置審査、大学入試、そして確固たる学問分野の枠組み。大学設置基準の大綱化、設置認可の規制緩和に伴い、多様な大学が出現したこと、入試の多様化と少科目化により学力低下が起こったこと、

そして学問の学際化と多様化により学習の構造が壊れたこと、これらが従来の質保証を破綻させつつあるとされている(参考文献 1)。地球惑星科学の分野においても、平成に入ってから全国的に旧来の地質学関係学科から地球惑星科学関係学科へ改組した大学が多く現れたが、どの大学においてもカリキュラムをどのように組み立てるかについては苦勞していると推測される。その改組が学生の質保証の観点から成功しているかどうか、それが問われている。

参照基準とは、各大学が実際に教育課程を編成する際に分野ごとに参照すべき基準のことで、両者の関係は図 1 に示されているとおりである。参照基準の内容は端的に言えば、その分野を専攻するすべての学生が身に付けるべき基本的な素養を定義したものであるが、やや詳しく定義すると、

参照基準とは

- ・単なるモデルカリキュラムや最低到達度のようなものではなく、その上に位置づけるべき各分野における学びの本質。
- ・今までの教育の在り方への反省や今後の社会の姿も見据えた未来志向の教育像であり、学生が何を身に付けるべきかの指針。
- ・教養教育を尊重し、各分野の意義に関する大学と社会との共通理解の形成を図るもの。



出典:参考文献2より,一部文章表現を変更した。

図1 「教育課程編成上の参照基準」と各大学における実際の教育課程の編成の関係。

表1 参照基準策定の流れ(今後の予定を含む)

平成20年5月	文部科学省高等教育局長から学術会議議長宛ての依頼 「大学教育の分野別質保証の在り方に関する審議について」
平成20年12月	中央教育審議会答申 「学士課程教育の構築に向けて」
平成22年7月	学術会議より文部科学省あての回答 「大学教育の分野別質保証の在り方について」
平成23年6月	大学教育の分野別質保証推進委員会設置 日本学術会議
平成23年10月	第22期地球惑星科学委員会地球惑星科学大学教育問題分科会設置 「地球惑星科学の参照基準」策定作業開始
平成24年3月	第2回地球惑星科学大学教育問題分科会 「分野別質保証について」:内閣府参事官 廣田英樹氏による講演
平成24年8月	中央教育審議会答申 「新たな未来を築くための大学教育の質的転換に向けて ～生涯学び続け、主体的に考える力を育成する大学へ～」
平成24年8月	第3回地球惑星科学大学教育問題分科会 「地球惑星科学分野の参照基準」第1案の提示と議論
平成24年12月	第4回地球惑星科学大学教育問題分科会(予定) 「地球惑星科学分野の参照基準」第2案の提示と議論
平成25年3月	第5回地球惑星科学大学教育問題分科会(予定) 「地球惑星科学分野の参照基準」分科会案の策定
平成25年5月～9月	「地球惑星科学分野の参照基準」分科会案の学協会・大学への提示(予定) 各学協会・大学へのフィードバックにより意見を聴取
平成25年10月	第6回地球惑星科学大学教育問題分科会(予定) 「地球惑星科学分野の参照基準」分科会最終案の策定
平成25年12月	地球惑星科学委員会(予定) 「地球惑星科学分野の参照基準」分科会最終案の承認

ということになる。これらの内容がやや抽象的な表現になっている理由は、「分野の本質的な部分を抽出する」、「各分野の本質的な学びの核心を提示する」のであって「単に身

に付けるべき知識や技術の列挙ではない」という考え方によっている。

各大学は教育課程の編成に当たって、具体的な教育・学習目標を設定する際に、こ

の参照基準を「参照」して、学習内容と学習方法を定め、開設すべき授業科目群を設定することになる。その際、参照基準はあくまでも検討の際の出発点にすぎず、それをどのように肉付けして、具体的な教育課程を編成するかは各大学が自主的に判断することになっている。各大学は編成された教育課程が質保証の観点から機能しているかどうかを不断に検証し、必要に応じて変更するなどのPDCAサイクルを構築することが求められる。詳細については参考文献2をご覧ください。

参照基準策定の流れ

ここまで読めば、さあ大変なことになった、という感想が自ずと浮かび上がる。下手な参照基準が作られてはたまらない、というのが率直な感想であろう。そして一体誰がこの参照基準を作るのか、という疑問も湧いてくる。いうまでもなく、大事なことは質の高い参照基準を策定することである。そしてその任を負わされたのが、日本学術会議地球惑星科学委員会であり、実動部隊としてはその下に設けられた大学教育問題分科会である。分科会では昨年10月よりこの問題の検討に入り、今年度中に参照基準(案)の策定を取り行うべく活動している。そして来年度には学協会あるいは各大学にこの(案)を示し、広く意見を求めることを考えている。最終案の策定は表1に示したとおり、来年12月を予定している。地球惑星科学は非常に広範な研究対象を含み、研究方法も極めて多様であるから、教育もそれに依拠して実に多様な内容を含むことは言うまでもない。それらをどのように抽象化して「学びの本質」として提示できるのか、それがわれわれ大学教育問題分科会の大きな課題である。大学教育問題分科会としては、非常に重たい課題を与えられたと認識しており、地球惑星科学の発展のためにできるだけ良い参照基準を策定すべく努力を重ねているところであり、皆様のご理解とご協力をお願いする次第である。

参考文献

- 1) Interview(日本学術会議 北原和夫委員長)日本学術会議が進める「分野別質保証」:Guideline, 2009年11月号, 21-23, 河合塾。
- 2) 日本学術会議 公表資料「回答 大学教育の分野別質保証の在り方について」, 平成22年7月22日。

Future Earth

— 地球環境変化研究における新たな国際的枠組み —

日本学術会議第 22 期会員 安成 哲三 (名古屋大学)

人間活動に起因する地球環境変化に関する研究は、とくに 1992 年のリオデジャネイロで開催された地球環境サミット以降、世界の多くの研究者により、いくつかの国際研究プログラムやプロジェクトを組織しながら進められてきた。現在、国際科学連合 (ICSU) を核にしていくつかの国際組織、国連機関などが合同で、世界気候研究計画 (WCRP)、地球圏生物圏国際研究計画 (IGBP)、生物多様性科学国際共同研究計画 (DIVERSITAS) や、地球環境変化の人間の側面に関する国際研究計画 (IHDP) などのプログラムが実行されており、すでに多くの研究成果が出されている。

たとえば「地球温暖化」研究については、さまざまな不確定な問題も含みながら、WCRP や IGBP 関係の研究者を中心に組織された IPCC (気候変動に関する政府間パネル) が、温暖化の実態と解明、予測、そして影響評価を進めている。

しかしながら、地球環境変化は、地球温暖化に限らず、さまざまなかたちで進行している。とくに産業革命以降、地球環境に対する人間活動の影響は急速に顕在化しており、現在は、地球史の中でも、人類が大きく地球システムを変えつつある時代である。オゾンホール研究で有名なノーベル賞科学者 P.クルツェン (P. Crutzen) は、この時代を人類世 (Anthropocene) と命名している (Crutzen, 2002)。ここでいう地球システムは、大気圏・水圏・地圏・生命圏のすべて

を含んでいるが、とくに、図 1 のように最終氷期が終わり比較的安定した気候が続いている完新世 (Holocene)、すなわち過去 1 万年間にわたって地球環境を維持してきた地球表層システムを想定している。この完新世の地球システムを構成してきた要素や水・物質循環系が、人間活動により変えられつつある時代として人類世が定義されているとよい。そして、このシステムの準平衡状態が、いくつかの要素についてはすでに限界あるいは急激な転換点 (tipping point) を超えて、システムそのものを大きく変えてしまう可能性が生じているのではないかという懸念が、Future Earth 提案の背景にある。

この提案の起草者の一人である J. ロックストローム (J. Rockstrom) らは、人間活動による地球システム変化を示す重要な指標として 10 の事象 (気候変化、海洋酸性化、成層圏オゾン減少、窒素循環変化、リン循環変化、全球的な淡水利用変化、土地利用変化、生物多様性減少、大気へのエアロゾル負荷増加、化学物質汚染) を取り上げ、その中で特に生物多様性、窒素循環、気候変化 (温暖化) については、すでに限界を大きく超えてしまっていると警告を発している (Rockstrom et al., 2009)。しかも問題は、これらの事象が個別に起こっているわけではなく、お互いに絡みあって地球システム変化を構成していることであり、分野を超えた連携・共同研究の推進が必要である。

そこで地球システムの機構解明を行いな

がら、人間社会を含むシステムの持続可能性 (Global sustainability) を構築していくための枠組として提案されたのが、Future Earth である。「未来の地球」計画とでも訳すべきであろうが、ここでは英文そのままを用いることにする。) この新しいプログラムの特徴は、先に述べた現在のいくつかのプログラムの統合再編も含めて、地球環境変化研究におけるシームレスな学際的・統合的研究を進めること、そして、人間活動のインパクトと人間活動への影響の両方を相互作用として理解するため、自然科学だけでなく、人文・社会科学とも連携した文理融合的な研究を進めること、さらに、持続可能な地球社会の構築という大命題のために、新たな価値観の創出とその研究へのフィードバックを進めることにある。

とくに、最後の目標のために、これまでの科学研究プロジェクトではコミットしなかった研究者コミュニティ以外のステークホルダー (政策担当者、経済界、市民団体など) も必要に応じて研究立案の段階から参加する枠組も計画に入っている。まさに、「社会のための科学」として、global sustainability study (全球的な持続可能性の研究) を位置付けているわけである。このような Future Earth 全体の構図は、図 2 にまとめられている。この図で明瞭に分かるように、これまでの地球環境科学は、「人類活動の発展」から時計周りに 3 つ目の「人類社会への影響」までを扱っていたが、Future Earth の枠組みで

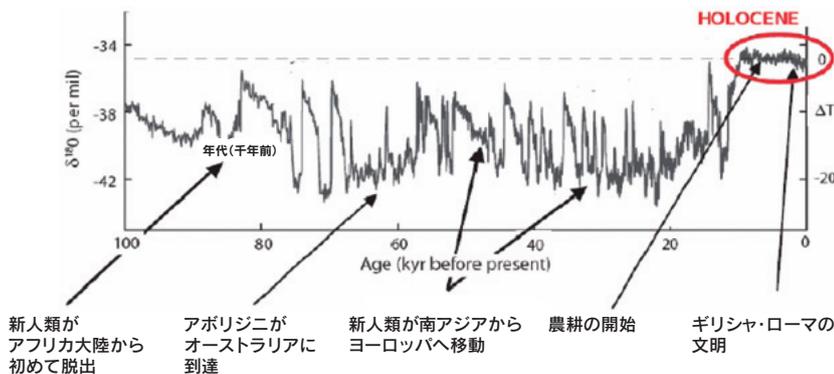


図 1 酸素同位体 $\delta^{13}\text{C}$ (気温の指標) からみた 10 万年前以降の最後の氷期・間氷期サイクルと過去約 1 万年の完新世 (Holocene)。いくつかの人類史上のイベントが記されている。(Rockstrom et al., (2009) に基づく)

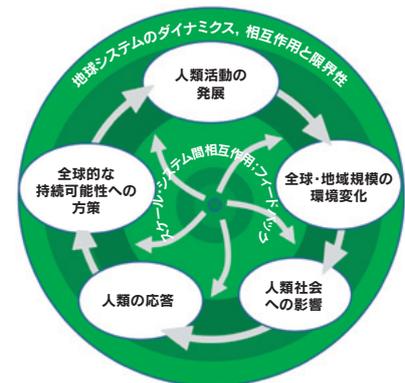


図 2 Future Earth の概念を示す模式図 (Future Earth website より)

は、さらに「人類の応答」から最終的には、新たな「人類活動の発展」にまでフィードバックする科学をめざすものと言っていいであろう。

当面 10 年計画として提案されている Future Earth はまだ計画段階であり、世界中の研究者や関係者からのインプットを求めている。詳細は、ICSU のウェブサイト (<http://www.icsu.org/future-earth>) に掲載され、常にアップデートされている。

現在、日本学術会議での関連委員会、分

科会では、地球環境問題のホットスポットとしてのモンスーンアジアからの問題提起なども含め、Future Earth へのインプットを議論している。とくに、東日本大震災の経験を踏まえて、地震・津波・火山活動など、突発的だが、社会システムを一瞬にして崩壊させてしまうという自然災害の要素を、この地球システムの中でどう考慮するべきか、という問題も、世界の大変動帯でありながら地球人口の 60% が住むモンスーンアジアでは重要である(安成, 2012)。このような問題も

含め、新しい地球科学研究の枠組としての Future Earth に JpGU 全体でもぜひ議論を進めていただきたい。

— 参考論文 —

Crutzen, P. J. (2002) *Nature*, 415, 23.

Rockstrom, J. et al. (2009) *Ecology and Society*, 14, 32.

安成哲三 (2012) *学術の動向*, 17(8), 53-59.

国際地学オリンピック報告

NPO 法人地学オリンピック日本委員会事務局長 瀧上 豊 (関東学園大学)

第 6 回国際地学オリンピック・アルゼンチン大会は 10 月 8 日から 12 日まで、首都ブエノスアイレスから南西に約 300 km 離れた田舎町のオラバリアで開催された。本来の第 6 回大会は日本で開催される予定であったが、3.11 の東日本大地震による原子力発電所の事故のため、急遽、アルゼンチンが肩代わりしてくれた大会であった。南半球の開催ではあったが、17 ヶ国・地域(オーストラリア、ブラジル、韓国、スペイン、フランス、ドイツ、インド、インドネシア、イタリア、日本、クウェート、ロシア、ルーマニア、タイ、台湾、ウクライナ、アメリカ)からの 66 人の高校生および 2 ヶ国のオブザーバー(アルゼンチン、オーストリア)の参加があった。常連のカンボジアやネパール、フィリピンなどは国からの援助が受けられなかったために参加できなかったことは残念であり、今後の国際地学オリンピックのあり方についての課題となった。また、開催国のアルゼンチンからの生徒の参加がなかったことや、経済的な状況が悪くて開催するのやっとの状態だったことは、肩代わりをしていただいた日本としては申し訳ない気持ちでの参加であった。



写真1 メダルを受賞した日本チームメンバー。

日本チームは 3 月の日本地学オリンピック本選にて優秀賞を得た生徒の中から選抜された 4 名とメンター 2 名オブザーバー 7 名の体制で望んだ。試験は 3 分野(地質・固体地球科学分野、気象・海洋科学分野、天文・惑星科学分野)の筆記試験と実技試験で競われ、見事金賞 1 名、銀賞 3 名の優秀な成績を収めることができた(写真 1)。5 月の 1 泊 2 日の英語研修、8 月の 2 泊 3 日の合宿研修、5 月から 9 月の通信研修の成果も大きかったと思われる。また、国内研修では外国人研究者・留学生との交流も行ったので、国際大会でも積極的に他国の生徒と国際交流に努め、各国の学生と協力して行う国際協力野外調査(ITFI)も例年以上にスムーズに行われた。写真 2 は表彰式後の 4 名の生徒と世界各国の生徒との集合写真撮影時の様子である。今年も参加高校生の表情が参加の前後で大きく変わったことが印象的であった。

帰国した 10 月 15 日午後には松本文部科学副大臣を表敬訪問し、メダルを受賞した全員が大臣表彰をされ、副大臣との懇談を行った。

また、大会初日の Jury 会議にて、2016 年の国際地学オリンピックの日本大会の開催が承認され、開催地三重県の紹介を行った。なお、2013 年はインド、2014 年はアメリカ、2015 年はロシアとなっている。さらに、日本チームのメンバーによる掘削船“ちきゅう”の説明と 3.11 東日本大震災前後での中高生の地学教育内容に関する意識変化の発表が行われ、大変好評であった。

2012 年度からの高校の新指導要領では“地学基礎”、“物理基礎”、“化学基礎”、“生物



写真2 海外の学生との集合写真撮影時の様子。

基礎”のうち 3 つの基礎科目の履修が必修となっているため地学の履修者が増えることと、国民の防災や環境問題の意識の高まりから地学の重要性が増している。そのため、地学オリンピックへの参加者が今後増えることが予想される。また、日本が参加した 2008 年から昨年までの国際大会参加高校生は 16 名になるが、現在高校に在学している 2 名を除く 14 名の生徒のうち 11 名が全国の地球科学・天文学の分野に進学しており、2008 年に開催された第 1 回フィリピン大会の OB は来年度大学院へ進学する。また、国際大会への参加はできなかったが、日本大会の優秀賞を受賞した高校生の多くがやはり同分野へ進学している。これらのことや 2016 年の三重県での国際地学オリンピック日本大会開催は、今後の地球惑星科学の発展に大きく寄与すると思われる。地学オリンピックの存在は、日本の地学教育・地球惑星科学分野の研究教育の将来に、ますます重要なものとなるであろう。このような地学オリンピックの運営には皆様の多大なるご支援・ご協力が不可欠ですので、今後ともよろしくお願いいたします。

日 本地球惑星科学連合 新規団体会員の紹介*

*2012年11月1日現在 49学協会

地球環境史学会 (2012年設立)



会長：川幡穂高。地球環境のさまざまな時系列のパラメーターを研究する分野は“PALEO...”と呼ばれています。本学会は Paleoclimatology, -ecology, -environments, -geography, -hydrogeology, -limnology, -magnetism, -microbiology, -oceanography, -seismology を扱います。近未来の環境変化に備えるため、地球環境に関する時系列情報を複合的観点から分析し、総合的に解析し、統合的概念に至ることが本学会の設立趣旨で、連合の活動にも積極的に寄与できればと考えております。

<http://paleo10.aori.u.tokyo.ac.jp> (公開予定)

INFORMATION

公 募情報

①職種②分野③着任時期④応募締切⑤URL

東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

①教授 ②気候力学分野。特に地球規模の気候変動に果たしている海洋と大気の影響を力学的に解明する分野 ③決定後なるべく早い時期 ④ H24.11.16 ⑤ <http://www.eps.s.u-tokyo.ac.jp/recruit/20120912-kikourikigaku.html>

静岡大学 理学部 地球科学科

①教授または准教授 ②地球ダイナミクス講座に関連する分野 ③ H25.04.01 以降のなるべく早い時期 ④ H24.11.16 ⑤ <http://www.sci.shizuoka.ac.jp/~geo/Kohbo2012Sept.pdf>

独立行政法人 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

①研究職、技術研究職 ②地球内部ダイナミクス領域 ③ H25.04.01 ④ H24.11.20 ⑤ http://www.jamstec.go.jp/recruit/details/iframe20121120_2.html

東京大学 大気海洋研究所

①教授 ②海洋システムモデリング研究分野 ③ H25.04.01 ④ H24.11.22 ⑤ <http://www.aori.u-tokyo.ac.jp/recruit/files/kyoju20121122.pdf>

北海道大学 大学院地球環境科学研究院 地球圏科学部門

①教授 ②気候力学もしくは気象学 ③ H25.04.01 ④ H24.11.30 ⑤ http://www.ees.hokudai.ac.jp/top/kobo/2012_koubo_chikyuu.pdf

名古屋大学 局域水循環過程研究部門

①准教授 ②雲・降水を中心とした大気中の水循環過程について、観測を主体としたプロジェクト型の研究 ③ H25.04.01 以降のなるべく早い時期 ④ H24.11.30 ⑤ <http://www.metsoc.or.jp/hiroba/koubo/2012.0919Nagoya-U.pdf>

愛媛大学 大学院理工学研究科 数理物質科学専攻 地球進化化学講座

①助教 ②地球化学およびその関連分野 ③ H25.04.01 ④ H24.11.30 ⑤ <http://earth.sci.ehime-u.ac.jp/koubo/index.html>

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 情報・通信工学専攻

①テニユア・トラック助教 ②電波天文学と工学の境界領域での研究教育 ③ H25.04.01 以降のなるべく早い時期 ④ H24.11.30 ⑤ http://www.ucc.ac.jp/about/advertisement/pdf/ad_20120828.pdf

九州大学 基幹教育院 自然科学部門

①教授 ②地球科学分野 ③ H25.04.01 ④ H24.12.03 ⑤ <http://www.artsci.kyushu-u.ac.jp/koubo2012/13.pdf>

イベント情報

詳細は各 URL をご参照下さい。

■水惑星の安心を支える 一熱帯降雨観測衛星 (TRMM) 15 周年記念シンポジウム

日時：2012年11月12日(月)
場所：大手町サンケイプラザ ホール
主催：JAXA, NASA, NICT
内容：TRMM 衛星の科学的・社会的成果を総括し、全球降水観測 (GPM) 計画に向けた展望をまとめる。また、TRMM 衛星や第一期水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W1) 衛星による活用例を紹介すると共に、衛星が果たす役割や将来への期待に関する議論を行う。
<http://comm.stage.ac/trmm15/>

■ The 4th Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and Global Precipitation Measurement (GPM) International Science Conference

日時：2012年11月13日(火)～16日(金)
場所：秋葉原 UDX 4F UDX GALLERY NEXT
主催：JAXA, NASA
<http://comm.stage.ac/4thconf/index.html>

■第 215 回 生存圏シンポジウム 東日本大震災以後の福島県の現状及び支援の取り組みについて

日時：2012年11月30日(金)
場所：京都大学宇治キャンパス 木質ホール
主催：京都大学生存圏研究所
内容：生存圏における緊急な課題である放射性物質の問題に対し、福島県における現状と、研究成果についての講演を行う。

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/articles/symposia/Symposium-0215.html>

■学習会「学習指導要領改訂と地学教育への影響 一次期改訂に備えて」

日時：2012年12月2日(日)
場所：東京都立両国高等学校
主催：JpGU 教育問題検討委員会
内容：2012年度から実施された高等学校学習指導要領の、特に理科の科目設置及び内容の編成過程と、その間に JpGU の行った提言等を時系列で対応させながら、次期学習指導要領の改訂に向けて、我々が今から何をすべきかを議論する。

<http://www.jpгу.org/whatsnew/121202learning.pdf>

■産総研環境・エネルギーシンポジウム シリーズ 第 4 回メタンハイドレート総合シンポジウム (CSMH-4)

日時：2012年12月13日(木)～14日(金)
場所：産業技術総合研究所 臨海副都心センター 別館 バイオ・IT 融合研究棟 11 階
主催：産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究センター
内容：ガスハイドレートに関する研究の進展と研究・技術分野を跨いだ体系的な議論の促進を目的に、最新の研究開発や技術開発の成果や動向について発表・討論を行う。

http://www.aist.go.jp/aist_j/event/ev2012/ev20121213/ev20121213.html

■第 3 回国際北極研究シンポジウム (ISAR-3)

日時：2013年1月14日(月)～17日(木)
場所：日本科学未来館
主催：北極環境研究コンソーシアム、日本学術会議地球惑星科学委員会 IASC 小委員会

<http://www.jcar.org/isar-3/index.html>

公募求人及びイベント情報をお寄せ下さい
JGL では、公募・各種イベント情報を掲載してまいります。大学・研究所、企業の皆様からの情報もお待ちしております。ご連絡は <http://www.jpгу.org/> まで。

公募及びイベントの最新情報は web に随時掲載しております。 <http://www.jpгу.org/> をご覧下さい。

