

はじめに：特集号『水；地球中心核から大気まで』

丸 山 茂 徳¹⁾ 江 口 孝 雄²⁾ 笠 原 順 三³⁾
下 司 信 夫⁴⁾ 松 本 淳⁵⁾ 松 山 洋⁶⁾
山 川 修 治⁷⁾

Preface for the Special Issue on “ Water; from the Earth's Core to Planetary Space ”

Shigenori MARUYAMA¹⁾, Takao EGUCHI²⁾, Junzo KASAHARA³⁾,
Nobuo GESHI⁴⁾, Jun MATSUMOTO⁵⁾, Hiroshi MATSUYAMA⁶⁾
and Shuji YAMAKAWA⁷⁾

Key words : water, Earth's core, mantle, hydrate minerals, ocean, climate change, water abundance

キーワード : 水, 地球核, マントル, 含水鉱物, 海洋, 気候変動, 水賦存量

I. 序

20 世紀の終わり頃まで科学者は自然を無数の要素に分解して、それぞれの要素を研究する専門家を育て、無数の科学者共同体を生み出してきた。今日世界で○○学会と呼ばれ、世界で認知されている科学者共同体の数は約 2000 に達している。地球科学の分野でも、40 程度の学会が存在する。それぞれの学会で、特殊な専門用語が次々

と作られ、専門的には充実した研究環境が作られてきたが、それらの特殊な用語は専門分野外の研究者にとってまるで外国語のようである。こうして科学は専門細分化の一途をたどってきた。そして自然の理解は格段に進み、科学が生み出す技術は物質文明として社会に大きく貢献している。

しかし、要素還元主義の科学は、今日多くの分野で大きな壁となって自然の理解を妨げている。例えば、人体をさまざまな器官に分解して理解し

¹⁾ 東京工業大学大学院理工学研究科

²⁾ 防衛大学校応用科学群地球海洋学科

³⁾ 日本大陸棚調査株式会社・静岡大学理学部地球科学教室

⁴⁾ 産業技術総合研究所地質調査情報センター

⁵⁾ 首都大学東京大学院都市環境科学研究科・海洋研究開発機構地球環境観測研究センター

⁶⁾ 首都大学東京大学院都市環境科学研究科

⁷⁾ 日本大学文理学部地球システム科学科

¹⁾ Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

²⁾ Department of Earth and Ocean Sciences, National Defense Academy

³⁾ Japan Continental Shelf Survey, Co. Ltd.; Faculty of Science, Institute of Geosciences, University of Shizuoka

⁴⁾ Geoinformation Center, Geological Survey of Japan, AIST

⁵⁾ Department of Geography, Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University; Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

⁶⁾ Department of Geography, Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University

⁷⁾ Department of Geosystem Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University

てきた医学分野では、各臓器を理解したからといって、人体を理解したことにならない。多種多様な臓器がつながって、人体はシステムとして機能しているからである。その機能に支障をきたすと人間は病気になるが、病気の本当の原因を知るには、人体という複雑なシステムを理解しなければならない。

地球の場合でも、同様の問題が多種多様な分野に存在する。地球は、核、マントル、プレート、大気・海洋、超高層、磁場、の6つの要素から構成され、それぞれは通常個別に変動するが、長期的には地球システム全体が変動する。各領域がつながり、物質と熱エネルギーが領域を越えて移動する。つまり、地球はシステムとして変動する(図1)。その原動力は二つある。地球外の力と地球内部の力である。太陽は地球表層の日常的な環境を支配する、気象・気候変動の主因である。一方、地球深部に起因する内力は長期的な地球変動の原因となる。ただし、地震と火山の噴火は瞬間的だが地球の内力による。

さて視点を変えて地球のシステム変動を見てみよう。地球という惑星が金星ほかの天体と決定的に違うのは液体の水が大量に地表に存在することである。この水は表層だけに安定に存在するのではなく、地球の中心から大気圏までの幅広い領域に渡り、広く分布し、しかも、地球システムの構成各要素間を循環する物質である(図1)。であるならば、水の役割は、地球システムの変動原理を理解する上で決定的重要性を持つに違いない。そして、そのような視点は、これまでの要素還元主義を越えて、専門分野を融合し、地球の総合理解に役立つだろう。このような視点で組まれた特集号は国内(例えば、磯崎ほか, 2000; 笠原ほか, 2003; 鳥海・笠原, 2004; 徳永ほか, 2006)・国外(例えば、Maruyama and Santosh, 2007)で数多くみられ、最近の傾向である。

しかし、この特集号が目指す目標は、それだけに止まらない。人文地理、社会科学、および政治問題までを組み入れ、自然科学と人文社会科学を融合しようと試みた。水をキーワードにして、地球の自然を理解するだけでなく、自然地理、人文

地理、さらに、社会科学や政治まで含めた、もっと大きな領域を概観し、人類が抱えた環境問題の本質をえぐり出すことが本特集号の狙いである。

II. 自然地理と水循環

日本列島は世界でも稀な水大国である。水循環が創り出す四季の美しさの中で日本人は暮らし、その奇跡的な自然環境を当然だと思い、誰も感謝しないで生きている。風土としての日本の自然美は、半ば砂漠と化した自然地理の中で生きてきた外国人にとっては自明でも、そこで生まれ生きてきた現地人にとっては理解を超えている。

日本列島の自然美を演出しているのは、中緯度地域の豊富な水循環だけではない。ニューヨークやロンドンにも四季があり、豊かな水循環がある。しかし、火山や地震がなく、現在進行形の造山運動があるわけではない。これらの都市は安定した大陸の上にある。ところが日本列島は4枚のプレートが収束する、世界でも稀なプレート境界上に位置し、そのために、多様な火山地形、褶曲山脈、断層地形が発達し、地震災害と火山噴火の恐怖にさらされているとはいえ、豊かな地形の原因となっている。これはまた、日本人固有の自然観・人生観に大きな影響を与えてきた。

新井(2007)は、このような人文社会的風土を育んできた日本列島の水について、自然地理学的背景に基礎を置きつつ、列島に降り注ぐ降水量、湖に蓄えられる貯水量、地下に潜り、海へと循環する地下水、山岳地帯に滞留する雪氷、それぞれを定量的・総合的に比較検討した。日本における水の地域性と季節性の両面を、自然系・人間系の視点から浮き彫りにしている。これらの中で、肥田(2007)は秋田県六郷扇状地の地下水の人工涵養を取り上げ、人工涵養による地下水資源の持続的な保全の可能性を示した。

III. 社会科学と水資源の争奪

現在、日常的にマスコミを賑わせている地球温暖化や地球環境問題の本質は、産業革命後きわめて深刻化している世界人口の爆発的増加である(図2)。今から1500年前の世界人口は3億人に

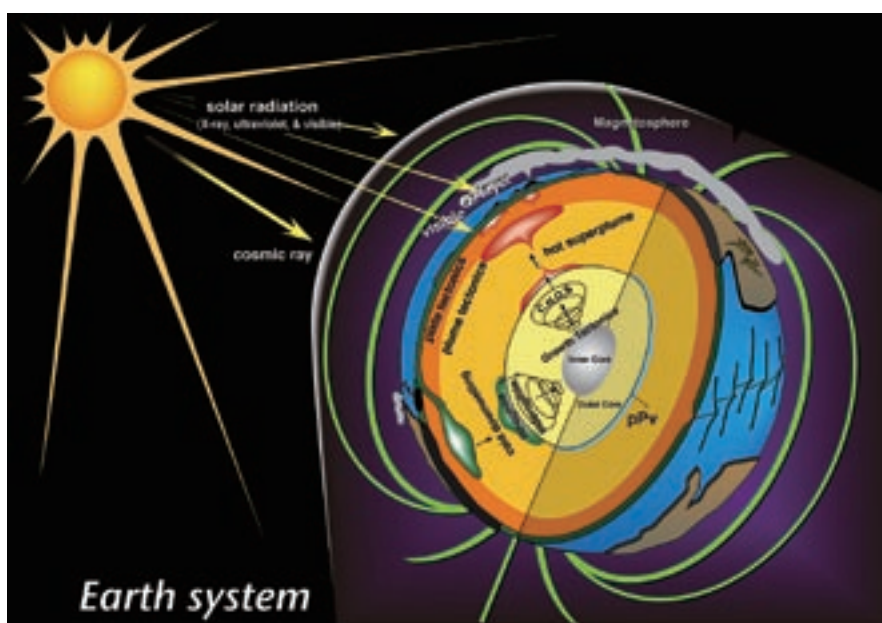


図 1 地球システムとその変動原理 (Maruyama *et al.*, 2007). 地球は核(固体内核が成長するテクトニクス)、下部マントル(ブルームテクトニクス)、上部マントル(プレートテクトニクス)、大気・海洋・生命圏、およびそれらすべてを貫く磁気圏が組み合わさったシステムとして変動する。表層は太陽エネルギーによって駆動され、固体地球は地球深部の内力によって変動する。両者は互いに独立しているが、しばしば、領域間を越えて物質と熱エネルギーが移動する大変動を起こし、表層環境が大きく変化して生物大量絶滅の一因ともなる。

Fig. 1 The Earth system and its dynamics modified after Maruyama *et al.* (2007). The Earth System is composed of five domains from the central core to the surface: (1) central core controlled by growth tectonics, (2) lower mantle controlled by plume tectonics, (3) upper mantle operated by plate tectonics, (4) hydro- and biospheres, and (5) magnetosphere penetrating all domains. The surface of the Earth is driven by solar energy as an external force, whereas the solid Earth is driven by internal forces from deep in the Earth's interior. These different domains generally work independently, but are catastrophically connected to each other to behave dynamically, transporting materials and internal thermal energy from deep Earth to the surface. This causes drastic changes to the surface environment and eventually triggers mass extinction.

すぎなかったが、現在(2007年)その数は65億人を突破し、1年間に約8000万人ずつ増加している。今世紀の半ば頃に世界人口は100億人に達すると予測されている。

大型動物である人間の増加は、当然だが、ほかの大型動物を次々と絶滅へと追いやり、きわめていびつな形で、人間中心主義の環境政策を標榜せざるを得ない状況を生み出している。

水と水循環は、生物生態系を支配する要の要素である。その頂点に座する人間の総数が異様に膨らむとさまざまな問題が発生する。その問題の一つ

が地球表層の水循環と水収支問題である。沖・鼎(2007)では、地球表層の水循環・水収支を定量的に扱い、世界の淡水資源の現状を整理して、人口増加がピークを迎える今世紀の展望を述べている。

世界人口の異様な増加と見事な比例関係を示すのが、戦争の回数である。19世紀の100年間に起きた戦争の総数は60回であったが、20世紀には1800回に増加し、都合2回の世界大戦を経験した(図2)。この史実は21世紀が戦争の世紀になることを示唆している。

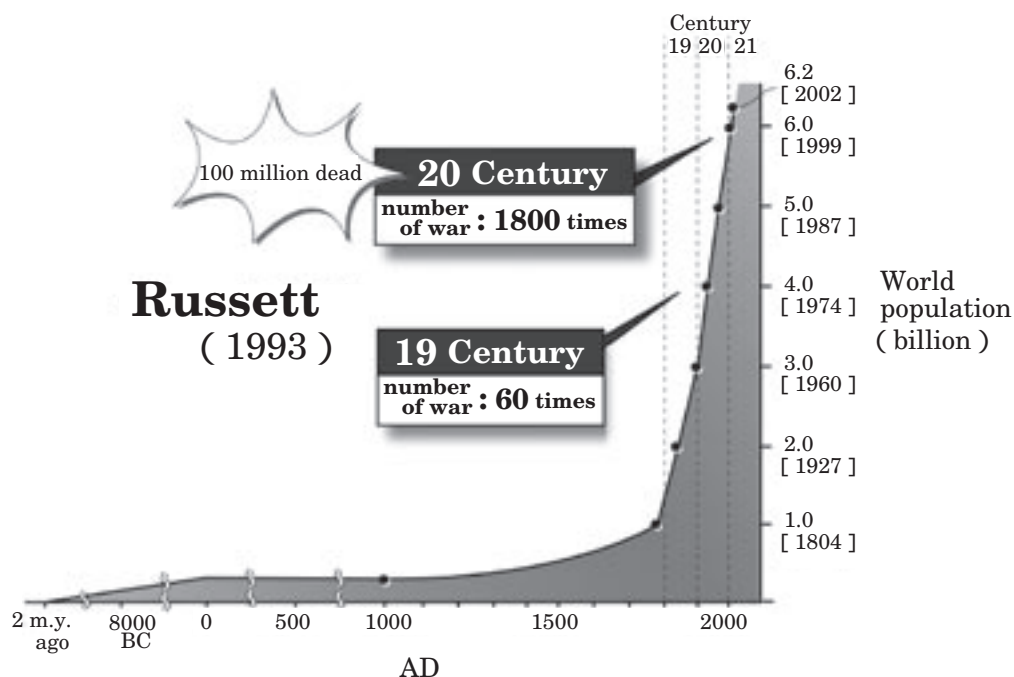


図 2 世界人口の爆発的増加の推移と戦争の数の変化（戦争の数のデータは Russett, 1993; 世界人口曲線は世界国勢図会 2004 2005 版（矢野恒太記念会, 2004）に 2006 年分を加筆）。

Fig. 2 The recent explosive increase of the human population of Sekai Kokusei Zu-e 2004 2005 Version (Tsuneta Yano Memorial Society, 2004) and increase in the number of wars after Russett (1993). Note the close co-relationship between the two, suggesting a dangerous future in the 21st century.

中山（2007）は国際流域での水の分配をめぐる係争と協調を扱い、21 世紀の危険な兆候である戦争の多発の原因の一つに水の分配の問題があることを危惧している。

さて、ここ 100 年間で地球の平均気温が 0.50 ~ 0.75 上昇したことは疑いがない。地球温暖化は、水循環を活発化させ、アジア大陸内部まで潤し、地球を全体としてみると水文環境は改善されるかとも思われる。しかし現実には、爆発的に増加する世界人口、アジアの都市化・工業化、過耕作・過放牧の波が中央アジアなどの砂漠化を加速させている。温暖化によって蒸発散量が増大し、一段と厳しい環境になりつつある。森（2007）はこれらの問題を自然地理学・水文学の視座から経年変動の解析に主眼を置いて取り扱っている。

1 万年前まで遡る長期的な時間軸の中で、小泉

（2007）は過去 1 万年間の気候変動をまとめ、文明の盛衰の関係をまとめている。最終氷期が終わった 1.2 万年前に地球は間氷期に入るとともに異様に安定した気候に恵まれた。それでも地球の平均気温は ± 6 程度の变化を示し、その結果、農業生産量が大きく変動して、民族大移動などの原因を作ったが、一方で、人類は、(1)農業・牧畜革命、(2)都市革命、(3)宗教革命、(4)産業革命、さらに(5)情報革命へと文明を発展させてきた。小泉（2007）は、人間によるイデオロギーの役割を気候変動の役割と比較検討して、文明の盛衰を論じた。人間の歴史もまた、とりわけ(1)から(3)まではイデオロギー主導ではなく、気候が主因であったとする学説をさらに支持するようにみえる。

IV．水の歴史と生命進化

地表には地球の質量全体と比べると、きわめてわずか（0.024％）だが、生物にとってかけがえない海洋がある。この海洋は地球史を通じて温暖で、赤道地域まで完全に凍結するような異常事態になったことがないと考えられてきた。しかし、近年になり、古地磁気と氷河性堆積物の研究から、23億年前、7.5億年前、6.5億年前に全球凍結が起きたことが明らかになってきた。田近（2007）は、この問題をレビューするとともに、直後に起きた生物の爆発的進化の関係について研究の最前線を紹介している。

生物は海洋で生まれ、海洋の中で、不連続的な進化を経て6.35億年前以降に急激に多細胞・大型化に成功し、やがて、人類の誕生へと生物大進化を起こした。このような生命進化を促進した原因は海洋の化学組成の大変化であるに違いない。小宮（2007）は独自に発明した手法を適用し、炭酸塩岩に残された化学組成から、海水の組成進化を38億年前に遡って復元した。化学組成といっても実に多数の成分があるが、酸素濃度一つとっても、これまでになされた試みは定性的な範疇を越えていない。小宮（2007）は、溶液化学の理論に基づき、定量的復元法を提唱している。彼の数式は今後さらに改良工夫の余地を残すものの、新しい時代の始まりを予感させる研究である。

V．水と固体地球のダイナミクス

水は、表層環境変動や生命進化にとってかけがえない重要な物質であるが、一見して無関係と思われる固体地球のダイナミクスにもきわめて重要な役割を持っている。地震は、力学の現象で、水の化学とは無関係だと地震学者は長年考えてきた。近年、地震と水の挙動についての密接な関係が定量化され始めた（例えば、磯崎ほか、2000；鳥海・笠原、2004）。

地震はプレート境界を特徴付けるが、プレートテクトニクスが確立した初期の頃、地震は沈み込むプレートの上面境界に沿って起きると考えられ

た。ところが、地震がスラブ内部で起きることが明白になり、その機構の解釈は、含水鉱物が分解することによって放出される流体が、応力を解放する原因になることが次第に明瞭となった。小原（2007）は深部非火山性微動地震を発見したパイオニアだが、ゆっくり起きるスロー地震もまた水と関係することを議論している。含水化したスラブが周囲の高温のマントルによって加熱されると、含水鉱物が分解して流体が排出され、それがゆっくりと移動することによって地震発生につながる流体が移動するらしい。

栗谷（2007）は古くて新しい問題を論じている。マグマはマントルが減圧されると発生するが、その融点は含水量によって驚くべき降下を示す。マントルの水は部分融解すると、ほとんどがマグマに入る。マグマは上昇して地表近くで定置してマグマ溜りを作ると、そこで結晶分化するが、このときにも水は大きな役割を持つ。マグマから水が抜けると、リキダスが高温側へ瞬時に移動するので、マグマから急激に結晶が晶出する。もともと水が多い沈み込み帯のマグマで斑晶が非常に多い理由はそのためである。噴火もまた、水の出し入れが原因で起き、爆発的噴火の原因となる。

島弧のマグマの特徴である水はマントルの含水鉱物に由来する。その安定領域は一般的には温度に大きく依存する。そのために、地球が高温であった太古代と現在の地球のような低温の地球ではマントル内部で含水鉱物の種類と割合が異なる。駒林（2007）はこの問題を超高压実験岩石学と熱力学計算から解析し、地球内部の含水鉱物についての新しい状態図を提唱している。もし、下部マントルでも異常に低温な領域が存在すれば、自由水が流体ではなく固体で存在することが理論的にはありうる。ただし、下部マントルの圧力領域では純粋な水は存在せず流体はマグマと区別できなくなるだろう。

含水鉱物の中の結晶水だけでなく、無水鉱物の中にわずかだが格子欠陥などに伴って水素や水酸基の形で水はマントル深部に存在しうる。岩森（2007）は、その効果も含めて、現在の沈み込み帯の温度構造と含水鉱物の安定領域を組み合わせ

て、地球規模の水の大循環を論じた。

VI. 水の起源

水はマントルだけでなく、核の中にも水素の形で存在しうる。核の密度欠損は約 10% 存在するが、その実態については昔から論争的であり、C, H, O, S, の他に、Si, Mg などの元素も含まれる。これらの定量的評価は実証不能であるが、水素は、その有力候補の一つである。奥地 (2007) は、水素の可能性を議論し、地球誕生時に遡り、水素を核に入れるメカニズムを議論している。低压化で、地球始源物質が部分熔融状態にあるとき、金属熔融鉄の中に溶け込む水素ほかの軽元素は現在の 10% の密度欠損を十分説明しうる。軽元素の実態が何であれ、これらは固体内核の成長とともに外核にとって過飽和になるために、スーパーブルームの活動とともに、マントルを突き抜けて重力的に安定な表層へと移動するだろう。ただし、その実証は困難である。

地球が誕生する前、水はどこにあったのであろうか。かつて、海洋の起源は炭素質コンドライトに含まれる粘土鉱物などに含まれる初生水だと考えられてきた。ところが近年、地球誕生後 6 億年も後に、外惑星のかなたから、土星と木星の重力に振り回されて、大量の氷惑星が太陽系の内側に送り込まれ、それが地球の海洋の水になったとする新説が現れた。あるいは、原始太陽系星雲の水素ガスに包まれて地球が成長した結果、その水素が海洋の起源となった可能性もある。この問題を新しいデータに基づいて、惑星形成理論の新展開を下敷きに、幾つかの可能な新説を生駒・玄田 (2007) がまとめている。

VII. むすび

本特集号「水；地球中心核から大気まで」は、以上のように多岐にわたる最新の知見が取り入れられた展開となっている。関連研究を推進するメンバーによる執筆で、多面的・多層的に構成されている。身近な存在でありながら地球とその生命の源として真にかけがいのない存在である“水”について、改めて深く考え直し、熟慮するととも

に、新たな探求の契機となれば幸いである。

文 献

- 新井 正 (2007) 風土としての日本の水—自然地理の視点から—。地学雑誌, **116**, 7–22.
- 肥田 登 (2007) 六郷扇状地における地下水人工涵養の実施と成果。地学雑誌, **116**, 23–30.
- 生駒大洋・玄田英典 (2007) 地球の海水の起源。地学雑誌, **116**, 196–210.
- 磯崎行雄・笠原順三・小出良幸・鳥海光弘編 (2000) 特集「スラブの水・物質循環」。地学雑誌, **109**, 495–660.
- 岩森 光 (2007) 沈み込み帯とマントルでの水循環。地学雑誌, **116**, 174–187.
- 笠原順三・鳥海光弘・西澤 修・増田幸治・藤本光一郎編 (2003) 特集「断層帯の物質科学と地震の発生過程」。地学雑誌, **112**, 811–1012.
- 小泉 格 (2007) 気候変動と文明の盛衰。地学雑誌, **116**, 62–78.
- 駒林鉄也 (2007) 含水カンラン岩の相関係と地球内部における水循環への応用。地学雑誌, **116**, 154–173.
- 小宮 剛 (2007) 地球の海水組成と生命の進化 46 億年。地学雑誌, **116**, 95–113.
- 栗谷 豪 (2007) 水とマグマ。地学雑誌, **116**, 133–153.
- Maruyama, S. and Santosh, M. (2007) Island arcs: Past and present. *Gondwana Res., Spec. Issue*, **11** (1–2).
- Maruyama, S., Santosh, M. and Zhao, D. (2007) Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core-mantle boundary. *Gondwana Res.*, **11**, 7–37.
- 森 和紀 (2007) 地球温暖化からみた水文環境の変化。地学雑誌, **116**, 52–61.
- 中山幹康 (2007) 国際流域での水の分配をめぐる係争と協調。地学雑誌, **116**, 43–51.
- 小原一成 (2007) スロー地震と水。地学雑誌, **116**, 114–132.
- 沖 大幹・鼎 信次郎 (2007) 地球表層の水循環・水収支と世界の淡水資源の現状および今世紀の展望。地学雑誌, **116**, 31–42.
- 奥地拓生 (2007) 地球中心核と水—地球形成時の水素分配反応—。地学雑誌, **116**, 188–195.
- Russett, B. (1993) *Grasping the Democratic Peace*. Princeton Univ. Press.
- 田近英一 (2007) 全球凍結と生物進化。地学雑誌, **116**, 79–94.
- 徳永朋祥・西澤 修・佐野 修・長田昌彦・江口孝雄・笠原順三・伊藤久男編 (2006) 特集号「地盤・岩盤と間隙水の力学的相互作用と地下流体挙動」。地学雑誌, **115**, 253–430.
- 鳥海光弘・笠原順三編 (2004) 特集号「観測的変成岩科学への革新」。地学雑誌, **113**, 563–784.
- 矢野恒太記念会編 (2004) 世界国勢図会 2004–2005 版。矢野恒太記念会。