

## 宇宙の水・地球の水

—日本学術会議気象研究連絡委員会主催シンポジウム概要—(1999年11月24日 福岡)

### 1. はじめに

田中 浩 (名古屋大学大気水圏科学研究所)  
 $H_2O$  と呼ばれる物質は宇宙には豊富に存在するが、液体の水は地球だけに存在すると考えられ、したがって地球だけが水循環の働く惑星であると思われてきた。本シンポジウムでは、地球以外にも液体の海が木星の衛星エウロパに存在することを観測的に確認した研究グループを代表して名古屋大学の山本哲生氏と、水循環の検出に有効な手段である酸素同位体を用いた大陸規模の水循環モデルの研究に取り組んでいる北海道大学の沼口 敦氏のお2人に日本気象学会1999年度秋季大会(福岡)の期間を利用して講演していただいた。以下はそれらの概要である。

### 2. エウロパの海

倉本 圭 (北海道大学理学研究科)  
 西願寺善彦 (北海道大学理学研究科)  
 山本哲生 (名古屋大学理学研究科)

#### 2.1 宇宙の水

液体の水は地球表面ではありふれた物質である。しかし宇宙においては  $H_2O$  はガス(水蒸気)または固体(氷)として存在している。例えばわれわれの銀河系では、圧力は星間空間の  $10^{-21}$  atm から白色矮星の内部のような高圧  $\sim 10^{17}$  atm, さらに高密度星である中性子星、ブラックホールでは  $\geq 10^{27}$  atm に及ぶ。温度についても、星間分子雲内の数 K から星の内部の数億 K 以上にわたる。これに対して液体の水が存在できる範囲は 1 atm, 300 K 付近の狭い領域に限られている。このため宇宙環境において液体の水の存在は極めて稀である。実際、これまで液体の水が存在することが確認されている天体は地球のみである。

#### 2.2 天体内部の海の探し方

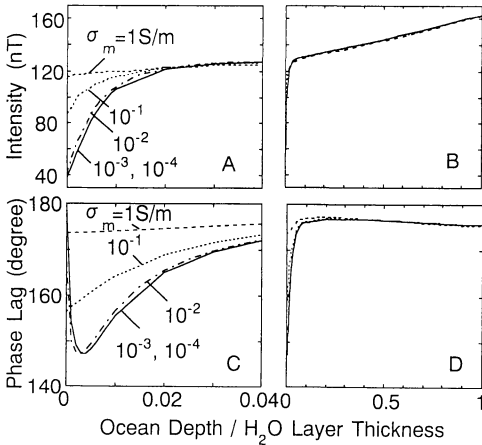
太陽系では、火星と木星型惑星の水衛星の内部に水

が存在する可能性がある。木星型惑星の水衛星は表面が氷で覆われている。観測から表面の氷の下の海の存在をどのようにすれば確認できるだろうか? われわれは水衛星の固有磁場を測定すれば、内部の海の存否を判定できることを示した (Kuramoto *et al.*, 1998)。同様なアイデアは同時期に独立に Khurana *et al.* (1998) によっても提案された。その原理を木星の水衛星の1つであるエウロパを例にとって述べよう。エウロパは木星の周りを公転している。その公転面は木星の磁気赤道面と一致しておらず約  $10^\circ$  傾いている。このため、エウロパが感じる木星磁場は公転にともない周期的に変化する。時間変化する磁場はエウロパ内の誘導電流を生じ、エウロパの固有磁場を生成する。固有磁場の強度と位相はエウロパの電気伝導度に依存する。液体の水(海水)は氷と比べて桁違いに大きい電気伝導度をもつため、生成される固有磁場の強度も氷の場合と比べてずっと大きくなる。したがって、エウロパの固有磁場の測定によって海の存在を判定できる。

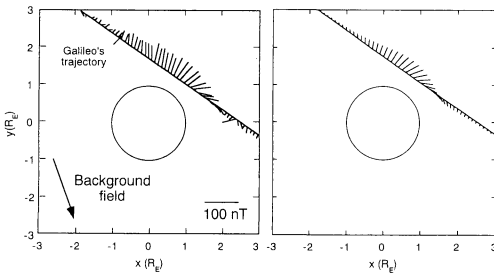
#### 2.3 エウロパの海の証拠

エウロパの固有磁場を正確に見積るためには、エウロパの内部構造とそれで決まる電気伝導度プロファイルを求めておく必要がある。われわれはエウロパを構成する物質の元素分配に関する考察と、エウロパのサイズと平均密度から3層モデルを構成した。すなわちエウロパは、1) 金属鉄と FeS からなるコア、2) その外側にシリケート・マントル、3) 塩を含む  $H_2O$  の最外層とからなる。エウロパの半径を  $RE=1570$  km とするとき、コア半径は  $0.6RE$ 、マントルは  $0.6RE \leq r \leq 0.9RE$  を占める。  $0.9RE \leq r \leq RE$  の領域が  $H_2O$  層である。  $H_2O$  層の厚さを  $D_{H_2O}=0.1RE$ 、海の厚さを  $DOCEAN$  とする。

エウロパの固有磁場の強度と木星磁場との位相差を海の占める割合  $DOCEAN/D_{H_2O}$  の関数として第1図に示した。磁場強度は磁極での最大値を示した。第1

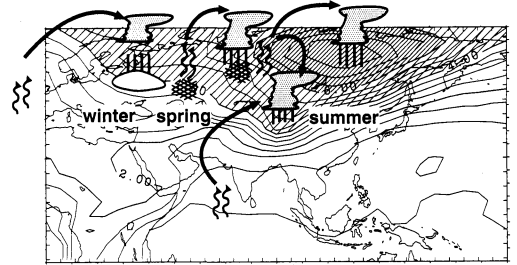


第1図 海の占める割合の関数としてのエウロパの生成する磁場の強度 (A, B) とその磁場と木星磁場との位相差 (C, D). A, C は海の占める割合がゼロ付近 ( $\leq 0.04$ ) における B, D の拡大図である. マントルの電気伝導度  $\sigma_m$  は構成物質のシリケートの酸化度や組成に応じて  $10^{-4} \sim 1 \text{ Sm}^{-1}$  の不定性をもつ.



第2図 ガリレオ探査機によるエウロパの磁場の強度と向きの測定 (1996年12月19日) (左図) と理論計算 (右図) との比較. 図では海の占める割合を  $DOCEAN = 0.9DH_2O = 140 \text{ km}$  とした. 磁場の表示では背景の木星磁場を差し引いてある. 中央の円はエウロパ.

図から次のことがわかる: 1) 薄い海 ( $DOCEAN \geq 0.05 DH_2O \sim 10 \text{ km}$ ) があるだけで, 全  $H_2O$  層凍結の場合と比べてずっと強い固有磁場を生成する. 2) 海が存在 ( $DOCEAN/DH_2O \geq 0.1$ ) によって木星磁場との位相差は  $180^\circ$  近くずれる. すなわち海は完全導体のように振舞う. ちなみにエウロパ大気はきわめて希薄なため, エウロパ大気のエ離層による磁場の遮蔽効果は無視できる.



第3図 6~8月に降る雨の水の平均年齢 (単位: 月). ここで水の「年齢」とは, 海から蒸発してからどの程度時間が経っているかを表す. 蒸発, 降水, 陸からの再蒸発の模式図を加えている.

計算とガリレオ探査機によるエウロパの磁場測定とを第2図で比較した. 上記1) より, この結果は海の割合が  $DOCEAN/DH_2O \geq 0.05$  である限り, 海の厚さにあまり依らないことに注意しよう. 計算と観測はきわめて良く一致し, 水で覆われたエウロパ表面直下に海が存在することを強く示唆する.

### 3. 大陸スケール水循環と安定同位体の利用

沼口 敦 (北海道大学地球環境科学研究科)

大陸スケールの水循環とその変動をとらえるためにはゾンデ観測や流出水文観測等を用いた水収支の議論が有効であるが, これらの収支解析からだけでは, 海から大気経由でもたらされ, 陸からの蒸発や河川で出ていくという大陸上の水の循環の全貌をとらえることは難しい. ここでは収支的な視点とは相補的な, 物質循環的な視点からの大陸スケールの水循環の評価の試みを紹介する.

第3図は, 大気大循環モデルによって, 大気と陸面の水を蒸発した海域などに依じていくつかに区別して扱うことにより, 水が大陸にもたらされている経路とその過程について調べた結果である. ユーラシア大陸上の水は,  $35^\circ \text{N}$  付近以南ではインド洋起源の水が多くを占めているが, 以北では大西洋から蒸発した水が大半を占める. 特に冬期に海面から蒸発した水の寄与が大きく, それが西部で積雪として蓄積され, 雪解け後は再蒸発と降水とをを繰り返しながら, 東部・内陸部に輸送されてゆく. 第3図の等値線は夏期 (6~8月) に降る雨の水が, 海から蒸発してからどのくらいの時間経っているかを示したものだが, 東シベリアなどでは平均6か月以上であり, 大気陸面間をやりとりされながら時間をかけて運ばれた水の寄与が大きいことを

示している。

このように水をトレーサーとして扱う方法は、大陸スケール水循環の新しい視点をもたらしてくれるが、定量的な面の評価のためには、何らかの観測的な裏付けが必要となろう。そのために有効と考えられるのが、自然界における水のトレーサーとしての安定同位体(重水素、酸素18など)の利用である。海水中の同位体の組成はほぼ一様だが、蒸発、凝結などの相変化の際に分別作用を受けるため、水の履歴によって同位体組成(同位体比)が異なってくる。

基本的には、同位体比は海から蒸発した水のうち、何割がそれまでに降水によって除去されたかによって決まっている。高緯度・内陸の気温が低い場所には既に降水によって大部分が除去された水蒸気が輸送されてくるため、重い同位体の割合が小さく(同位体比が軽く)なる。このため気温と同位体比の間には経験的な線形関係が存在し、古気候復元などに利用されている。しかし同位体比は気温のみを反映しているのではなく、それまでの降水、再蒸発という水の履歴によっても変化しうる。その変化は複雑であるため、これまでは簡単な定性的な議論しか行えなかったが、同位体を大気大循環モデルに組み込んだ同位体循環モデルを使うことにより、定量的に用いる可能性が開けてきた。

現在私たちは、チベット高原やシベリアなどで降水や陸水、水蒸気同位体比の観測を行い、同位体循環モデルと組み合わせて解析することで、大陸スケール水循環に関する新たな知見を得ようとしている。平均

標高5000 m近くに達するチベット高原への水の輸送過程はまだ謎のままであるが、ここでの高いd-excess値(重水素と酸素18の同位体比の差)の解析から、積雲対流によって運び上げられた水の降水中の蒸発過程が高原への水輸送に重要である可能性が示されている。またシベリアでは、夏期の降水の同位体比が気温に比べてかなり軽い値となっている。これを用いることにより、冬期に大陸上にもたらされた水の寄与が何割程度を占めるかの評価が可能と考えている。さらにその知見を南極などへ応用することにより、氷床コアからの古気候復元の精度を上げ、水循環に関する情報を引き出すことも大きな課題である。

#### 参考文献

- Khurana, K. K., M. G. Kivelson, D. J. Stevenson, G. Schubert, C. T. Russel, R. J. Walker and C. Polansky, 1998: Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto, *Nature*, **395**, 777-780.
- Kuramoto, K., Y. Saiganji and T. Yamamoto, 1998: Oscillating magnetic dipole moment of Europa induced by Jovian magnetic field: A possible probe for detecting Europa's ocean, *Lunar Planet. Sci.*, **XXIX**, #1254.
- Numaguti, A., 1999: Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model, *J. Geophys. Res.*, **104**, 1957-1972.



#### 一覧表

教官(東京大学大学院理学系研究科)募集のお知らせ	793
とうきゅう環境浄化財団の研究助成募集	816