

イオの酸化還元度と熱的状态および内部構造

Redox and Thermal States and Internal Structure of Io

樋山 克明 [1]; # 倉本 圭 [1]

Katsuki Hiyama[1]; # Kiyoshi Kuramoto[1]

[1] 北大・理・地球惑星

[1] Earth and Planetary Sci., Hokkaido Univ.

本研究では酸化還元度と熱的状态を考慮したイオの内部構造モデルを構築した。従来のモデルの多くは地球の内部構造との類似性を暗黙に仮定したのようになっており、マントル組成に Mg に富むかんらん石を、コア組成に金属鉄または Fe-FeS の共融組成を仮定している (Anderson et al.1996, Sohl et al.2002)。Sohl et al. (2002) は、このように単純化されたモデルに基づき木星系内側のイオ、エウロパについては太陽組成より Fe/Si 比が小さく、外側のガニメデ、カリストについて Fe/Si 比が高いと論じている。しかし、これらのモデルには二つの問題点がある。その一つは Mg と Si の存在度の問題である。太陽系元素存在度では Mg と Si の量比はほぼ等しいため、マントルの主要鉱物としてはかんらん石よりも輝石がより自然である。もう一つは Fe と S の酸化還元状態の問題である。ガリレオ衛星が形成された原始木星系円盤には H₂O が濃集していたと考えられ、原材料物質は著しく酸化的な化学組成になっていた可能性が考えられる。例えば C1 コンドライトには Fe は金属や硫化鉄の状態ではほとんど含まれておらず、酸化物や硫酸化物の状態で存在している。したがってコアやマントルの組成にはこれらの酸化的物質が考えられるが、これまでその可能性についてはほとんど調べられていない。そこで本研究ではイオの酸化還元状態として極端に酸化的な場合まで考慮し、イオの組成と熱的状态について考察した。

主要な金属元素の相対存在度には太陽系元素存在度を与え、酸化還元度に依存した鉱物組み合わせを計算する。鉄と硫黄の酸化に伴う相の変化は 1200 K での Fe-S-O 系の相図 (Lewis 1982) に従うとした。これにより得られた FeO と MgO と他の元素については、ノルム計算の規則に従うものとした。その鉱物組み合わせからなる原材料物質が均質に集積して原始イオが形成され、その後潮汐加熱により徐々に内部が昇温融解し、固液の重力分離が生じて分化が起こると仮定する。この過程に沿って地殻・マントル・核に各鉱物を分配した。融解順序には、各鉱物系の共融点温度を考慮した。

酸化還元状態の関数としてモデルイオの平均密度と慣性能率を計算し観測値と比較した。平均密度の観測値を説明する組成は、金属鉄、トロイライト、かんらん石に乏しくマグネタイト、MgSO₄ および輝石に富む酸化的な組成である。このような組成から出発した原始イオの分化は以下のように進む。トロイライトとマグネタイトが 1300 K で共融しまずトロイライトに富む核を作り、次に 1400 K で MgSO₄ が融解し地殻へ、その後 ~ 1570 K で斜長石と輝石が融解し斜長石に富む融液が地殻へ分配され、マントルはこれらの融け残りから成る。分化後の各層の組成 (イオ全質量に対する wt %) は以下の通りである; 地殻: MgSO₄(11.3), アルバイト (7.5), アノーサイト (1.9), エンスタタイト (1.2)。マントル: エンスタタイト (27.6), マグネタイト (19.4), フォルステライト (9.3), ディオプサイト (5.1)。核: トロイライト (14.2), マグネタイト (2.5)。このとき慣性能率係数は 0.3714 で、イオの観測値 0.3768 ± 0.00035 (Anderson et al. 2001) とほぼ一致する。

イオの平均密度と慣性能率を説明するには、Sohl et al.(2002) の提唱した Fe と Si の分別は必要ない。主に地殻に分配される MgSO₄ は 1200 ~ 1400 K で MgO と SO₃ に分解するので、イオ表層に堆積する S や SO₂ 大気の供給源になっている可能性がある。核はトロイライトとマグネタイトから成り、その共融点温度 1300 K は噴出マグマの最高温度 1700 ~ 2000 K (McEwen et al. 1998) よりも低いので、全融解していると考えられる。潮汐加熱により一定温度に保たれたマントルが核を覆っているとすると核で対流は起きずダイナモ作用は起こらないと考えられる。軌道進化により潮汐加熱が徐々に弱まってマントルがしだいに冷えているなら、ダイナモ作用は可能であろう。イオ周辺に観測される磁気異常はこのためかもしれない。