

エウロパの断層運動に関わる氷の摩擦実験

Ice on ice friction experiments related to the motion of strike-slip faults on Europa

荒川 政彦[1], 金澤 繁樹[1], 前野 紀一[2]

Masahiko Arakawa[1], Shigeki Kanazawa[2], Norikazu Maeno[3]

[1] 北大・低温研, [2] 北大低温研

[1] Inst. Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., [2] ILST, Hokkaido Univ., [3] ILTS, Hokkaido Univ.

<http://risu.lowtem.hokudai.ac.jp/~arak>

はじめに

木星の氷衛星であるエウロパの表層には活動的な構造運動を示す数多くの証拠が発見されている。その中でも最も目立つ地形が断層地形であり、エウロパの氷地殻全域を覆っている。エウロパの表層には木星重力による潮汐力を起源として周期的な地殻変形が起きている。この変形周期はエウロパの公転周期である3.55地球日と同期し、約35mの変位差が生ずると言われている。その結果、氷地殻は歪速度 $\sim 2 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ 、最大応力 $\sim 0.1 \text{ MPa}$ にさらされている。一方、エウロパはその平均密度や重力ポテンシャルのデータから、氷地殻の厚さが100km程度と言われている。そしてこの100kmのうち表層10数キロを除く部分は、海として液体の水があるのではないかと推測されている。内海が存在を示唆する証拠は、表層地形にも見られ、断層の一種であるPull-apart band地形もその一つである。Hoppa et al. (1999)らの研究によると、このPull-apart bandと横ずれ断層の運動は密接な関係にある。断層面の摩擦係数が1よりも大きい場合、横ずれ断層の断層面に垂直な応力成分(N)が圧縮になると、接触面での摩擦力が潮汐力に勝り、断層運動は停止する。Nが引っ張りに転ずると、断層面での摩擦力がなくなり、横ずれ運動を起こす。この繰り返しにより一方向の断層運動が生じ、キンクの開いた部分に地殻内部物質が上昇しPull-apart bandが形成される。

ここで、我々の知っている氷・氷間の摩擦係数について考えてみると、それは通常0.1以下の小さな値を持ち、上記モデルに必要とされる1以上という高い値とは大きく食い違う。これまで氷・氷間の摩擦係数は数cm/s以上の速度でのみ求められており、今回のエウロパの断層運動に相当するような 10^{-5} m/s 以下の低速ではほとんど実験がなされていない。一方、我々の研究室ではこの数年間、氷物性研究の一環として低速における氷・氷摩擦実験を進めている。本論文では、そこで得られた結果のうち、特にエウロパ等の氷衛星断層運動に関わる最新のデータに重点を置いて報告する。

実験方法

すべり速度 10^{-3} m/s 以下の低速で、安定した摩擦力の測定を行うため、スライダーを万能試験機(Tensilon UCT-2.5T)に直結させた平行移動型の摩擦実験装置を製作した。この摩擦実験装置は液体窒素を用いた冷却装置を備え、真空断熱により温度を保つことができるように設計されている。摩擦試料はすべてこの真空チャンパー内に設置される。垂直荷重はスライダー上にバネを用いて5~15kgfの範囲で与えた。試料となる多結晶氷は、その表面をマイクロトームで平滑に仕上げ、このスライダーとそれに対向する台座の上に固定した。速度範囲は $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{ m/s}$ であり、温度は一定(-10°C)で実験を行った。装置はすべて北大・低温研の低温実験室(-10°C)に設置されている。

実験結果

氷・氷摩擦では、スライダーの運動形態がすべり速度により変化する。すべり速度 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$ では、付着とすべりを繰り返す「スティック・スリップ」の運動形態を示し、 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ m/s}$ では滑らかにすべるような運動形態をとる。このスティック・スリップ運動を示す時、摩擦係数は速度の低下とともに0.1から0.5まで増加することがわかった。より低速の滑らかすべりでは、その摩擦係数は1を越えるようになる。今回の速度領域では運動形態の変化はあるものの、速度の低下とともに摩擦係数は単調に増加する。これまで氷摩擦においては、低速で摩擦を生じさせるメカニズムとして氷の塑性変形が考えられてきた。氷の流動則を元にした単純なモデルでは、すべり速度の低下とともに摩擦係数は低下することが予測され、実際、氷・ガラス、氷・花こう岩間の摩擦係数はそのような傾向となっている。今回発見された傾向はこれとは全く逆であり、摩擦係数を増加させる他のメカニズムがあると考えられる。我々は上載荷重による氷・氷接触面での塑性変形と氷両面間における焼結が、真実接触面積を増加させ、その結果、摩擦係数を増加させると考えた。この仮定に基づくモデルは今回の実験結果を良く説明できる。エウロパの一方向断層運動に必要なとされる、摩擦係数が1より大きいという条件は、 -10°C という高温域においても氷・氷間において、低速($< 10^{-7} \text{ m/s}$)で実現されることがわかった。エウロパ表面は150K以下の低温域であるが、断層面が存在する地殻内部は、内海が存在を考えると融点に近い高温域がかなりの領域を占めると考えられる。今回の結果は、そのような内海近傍の地殻底部を再現したものである。今後、地殻全域にわたる断層面の摩擦特性を知るため、より低温域での摩擦実験を行う予定である。Hoppa et al. (1999) Icarus, 141, 287-298