

氷河底面流動機構に関する研究Review

Mar. 5, 2001

北大 低温研 杉山 慎

はじめに

資料1は氷河の流動を構成する要素を模式的に示した図である。ここでは氷河底面での流動を、氷体内部、氷体底面と氷河底堆積物(又は岩盤)の界面、氷河底堆積物内部の3つの領域に分けて表した。このうちとをまとめて氷河底面流動と呼び、氷河表面での流動速度を「氷体内部の塑性変形」と「氷河底面流動」の和によって表現する事が多い。

氷河底面が圧力融解温度に達している温暖氷河では融解水が底面流動を活発にすると考えられており、氷河全体の流動を考える上で底面流動の寄与は重要である。Knightは温暖氷河での観測を中心にして上記の3成分が占める割合をまとめ(Knight 1999)、底面流動が氷河全体の流動に占める重要性を示している。また夏期の融解が激しい山岳氷河では数時間から1年という時間単位での流動速度変化が観測されており、氷河底面状態の変動に起因するという見方が強い。すなわち氷河底面流動は、その寄与の大きさ、時間変動の大きさといった面で、特に温暖氷河の流動に大きく影響を与えていると言えよう。さらに山岳氷河のみならず、南極氷床の流動を特徴付ける氷流においても底面流動が重要視されている点も見逃せない。

氷河底面での流動機構に関しては、限られた観測結果及び、想像力と計算力に富んだ机上理論を元にした議論が続けられてきた。しかし最近になって氷河底面で直接的な観測が行なわれるようになり、観測結果に基づいて氷河底面の流動機構をより正確かつ詳細に理解する試みがなされている。研究会では、流動機構に関して提案されている仮説をReviewした後、最近10年程の間に氷河底面で展開されてきたその場観測結果を紹介した。

氷河底面での流動機構

氷河底面での流動機構に関して、まず岩盤の上に氷体が載った「氷-岩盤」の系を考え、次に「氷-水-岩盤」、さらに氷河底堆積物の存在を考慮した「氷-水-堆積物-岩盤」の系を考える。

(1)復氷と応力集中による塑性変形(「氷-岩盤」の系)

変形する事のない岩盤の上に氷体がのっていると仮定した場合、氷と岩盤との界面での流動は氷体がいかに岩盤上の突起を乗り越えるかという問題となる。資料2ではWeertmanが提案した(Weertman 1957)復氷と塑性変形による流動機構を紹介した。まず岩盤上突起物の上流側で氷の圧力融解が、下流側では回り込んだ融解水の再凍結が起き、いわゆる復氷による氷の流動が起こる。さらに突起物の上流側では氷に加わる下流方向への応力が集中し、氷の塑性変形を促す。潜熱のやりとりが容易になる小さな突起物では復氷機構が、より大きな変形を生む大きな突起物では塑性変形機構が、それぞれ優先的に起きると結論されている。両機構は、氷河底につながるトンネル内での観察、底面氷の同位体分別などを通じて現実の氷河で確認されている。しかしながら圧力融解温度は不純物の影響が大きく、不純物や岩屑を多く含む氷河底面氷の力学的性質

は複雑である(Hook and others 1972, Lawson 1996)。そして何より岩盤形状を正確に把握する事の難しさが、定量的な議論を困難なものにしている。

(2)底面水の果たす役割(「氷-水-岩盤」の系)

氷河表面や底面での融解水、流域への降水などが氷河底面に供給された場合、底面流動は大きな影響を受ける。ここでは Benn and Evan によってまとめられた「突起物の水没」、「氷河底の空隙」及び「Hydraulic Jack」という3つの効果を紹介する(Benn and Evans 1998)。まず、底面水量の増加によって岩盤上の小さな突起物は水面下に水没する。その結果、多くの突起物に分散して支えられていた底面ずり応力成分は水没を免れた大きな突起物に集中し、氷体の局所的な塑性変形即ち底面流動が促される。これが「突起物の水没」による効果である。さらにこのような応力集中は、氷体の流動と底面水圧の上昇によって岩盤突起物の下流側に成長する「氷河底の空隙(Cavity)」によってもたらされる。水で満たされた空隙部分では底面ずり応力を支える事が出来ず、結果的に空隙以外の面に応力が集中するためである。またこのような空隙内に発生する水圧は氷体を下流側に押し出す効果を持つと考えられ、「Hydraulic Jack」と呼ばれている。等方的に発生する水圧は空隙の上流側で岩盤を、下流側で氷体底面を押し出す事になるため、あたかも岩盤を足場にして氷体をジャッキで押し出すような結果となる。

底面水による流動促進といえば、水によって氷体と底面の間が「滑っている」という印象を与えがちであるが、氷体にかかる力は常にすり合っている事を忘れてはならない。上で述べた3つの効果がいずれも応力の集中または増加を伴った氷の塑性変形促進に帰着する事を考えれば、底面水圧分布の把握に加えて、氷河底面氷の力学的性質と岩盤形状の適切な仮定がより定量的な議論への鍵となる。

(3)氷河底堆積物(「氷-水-堆積物-岩盤」の系)

氷河底面で氷体を支える物質が未固結の堆積物である場合、堆積物の変形も氷河の流動に寄与し得る。氷河底堆積物の流動観測は当初氷河末端近くのトンネル内に限られていたが(Boulton and Hindmarsh 1987)、最近になって100m以上の氷河底面でも有意な堆積物の変形が測定され、より関心が高まっている。氷河によって異なる様々な組成の堆積物が氷河底面でどう振る舞うか、その理解は非常に難しい。ここでは堆積物を完全塑性体と仮定して一般的な性質を考えた後、堆積物の力学的性質に及ぼす水圧の効果を検討する。

完全塑性体の降伏応力は、物質固有の凝集力 c を切片、摩擦角 ϕ の正接を傾きとして、垂直応力 N の一次関数で表される(資料3第1式及び右下図)。すなわち氷厚が大きい場合や、堆積物の深部はより大きな垂直応力下に置かれるため、堆積物の塑性変形にはより大きなずり応力が必要となる。今、降伏応力以上のずり応力 τ のもとに堆積物が置かれた場合を仮定すると、その歪み速度は $\dot{\epsilon}$ と N それぞれのべき乗で表現される事が多い(資料3第2式)。ずり応力が大きいほど、また垂直方向の押さえつけが少ない程、早い速度で変形が進むという関係は感覚的に馴染みやすい。資料1において堆積物の歪み速度が深さ方向に減少しているのは、この効果を

示したものであり、深さ方向に増加する氷体内部の歪み速度とは逆の傾向である。ではここに底面水が存在する場合、その水圧はどのような影響を与えるのであろうか。氷河底面の水圧は氷体の重力を支える効果を持つので、堆積物に作用する垂直応力は氷体の重力 P_0 と水圧 P_w との差となり、有効圧力 $P_0 - P_w$ という概念で表現される。この場合、堆積物の降伏応力と歪み速度は資料 4 の 2 つの式の中の N を $P_0 - P_w$ で置き換えた式となり(資料 4)、水圧の増加は堆積物の降伏応力を減少させ、歪み速度を増加させる効果を持つと予想される。

以上は地質学の一般的な知識を元にした議論であるが、この議論が氷河底堆積物にどこまで適用可能かは慎重に検討する必要がある。実際の氷河底での堆積物の変形を正確に表現するためには、それぞれの氷河における堆積物の詳細な物性と氷河底環境の理解が不可欠である。予想される応力条件下での堆積物の降伏応力や歪み速度、堆積物内深さ方向の水圧分布などを室内実験で明らかにする一方、氷河底面での堆積物や水脈の分布を把握する必要がある。

氷河底面での直接的な観測結果

数 100mにも達する氷の下という困難な環境ゆえ、底面流動の観測は氷河の側面や末端付近に穿たれたトンネル内を中心に進められてきた。しかし最近 10 年間は、温水を利用したドリルを用いて岩盤に達する掘削を行い、掘削孔の底に各種測器を設置する試みがなされている。より現実に近い条件下で得られる直接的な観測結果は、これまで想像の域を出なかった各種の流動機構を検証し、より正確な理解へと導くものである。ここでは 2 つの山岳氷河と、南極氷床氷流における最新の成果を紹介する。

(1)底面堆積物の強度と歪みの直接測定 (Sweden, Storglaciaren の例)

Sweden の山岳氷河 Storglaciaren では厚さ約 100mの氷体に全層掘削を行い、30cm 程度に堆積した氷河底堆積物の強度と変形が調べられている。Iverson らは氷河底面に設置した円筒状の物体が氷体の流動によって堆積物中を移動する際の引きずり応力を測定し、堆積物の降伏応力の時間的な変化を測定した(Iverson and others 1994)。また、小型の傾斜センサを利用した装置(Blake and others 1992)を用いて堆積物自身の歪みを観測し、歪み速度の変化を同時に測定している。氷河表面流速、底面水圧と合わせた融解期の連続的な測定結果は非常に興味深い(Iverson and others 1995)。特に注目されるのは、ほぼ日周期で変動する底面水圧と表面流動速度、底面堆積物歪み速度との関係である。底面水圧と表面流動速度との間に正の相関がある一方、堆積物の歪み速度は底面水圧と負の相関を示している。水圧の上昇が底面流動を促す事は予想されていたが、前節で紹介した「水圧の上昇 堆積物への垂直応力の減少 堆積物の強度減少と歪み速度の増加」という予測は成り立っていない。Iverson 等は採取した堆積物を実験室に持ち込み、垂直応力下での剪断実験を実施してこの現象を説明付けた(Iverson and others 1999)。氷河底面水圧が上昇するにつれて氷体の重力に起因する引きずり応力成分が堆積物に有効に伝わらなくなり、堆積物の強度が下がっているにも関わらず歪み速度が低下するというものである。彼等はこの現象を”Decoupling between a glacier and soft bed”と呼び、融解期に顕著な底面水圧変

動によって堆積物中のずり応力が変化している事を示唆した。氷河の流動が応力のつりあいのもとにある物体の静的な変形に基いている以上、物体の力学的性質と物体に生じる応力が流動変化を決定する。その両者が水圧変動によって有意に変化するという観測結果は、底面流動を把握する難しさを再認識させる。

(2)底面のどこで流動しているのか(南極, Ice stream B の例)

年間で数 100m 以上という速い流動速度で知られる南極の氷流 Ice stream B は、緩やかな表面傾斜を持つ氷体内部の塑性変形が流動にほとんど寄与しないと予想されている。その一方、1980年代に実施された地震波による探査結果は数mに達する水で飽和した底面堆積物の存在を示唆するものであり(Blankenship and others 1986)、堆積物の変形による流動機構が提唱された(Alley and others 1986)。その後行なわれた約 1000m の全層掘削は、数mに及ぶ底面堆積物が圧力融解温度と非常に高い水圧の下に存在している事を示している(Engelhardt and others 1990)。

これらの背景を踏まえて行なわれた掘削孔内での底面流動測定は興味深い結果を示した(Engelhardt and Kamb 1998)。氷流底面に設置された測器からの信号は、表面流動の 80%程度が氷体底面と底面堆積物のごく表層(数cm ~ 25cm程度)で起こっている事を明らかにしたのである。数mに及ぶ底面堆積物の大部分が予想に反して流動にあまり寄与していないという事実は、状況証拠に頼る事の多い底面流動機構の解釈における困難と危険を教えてくれる。

(3)底面状態が氷体の塑性変形に与える影響(Switzerland, Haut Glacier d' Arolla の例)

氷河の流動を「氷体内部の塑性変形」と「氷河底面での流動」の2成分に分け、それぞれ独立なものとして捉える事が多い。しかしながら氷河全体が力学的につり合っている事を考えると、氷河底面の状態変化が氷体の応力状態、即ち氷体内部の塑性変形に影響を与える事が予想される。Blatter 等は氷体と岩盤の界面での流動が無い(つまり氷体からのずり応力を 100%支える事のできる)底面の一部を、ずり応力を全く支える事のできない部分(例えば底面の突起が全て水没した状態)で置き換えた系を仮定し、氷河の流線に沿った縦断面内での氷体内部歪み速度分布を計算した(Blatter and others 1998)。底面がずり応力を支えられない部分では氷体の塑性変形は抑えられ、底面によって支えられない応力が流線方向の偏差応力となって上流及び下流側の塑性変形に影響を及ぼす。ずり応力を支えられない部分の上流側は下流側への引っ張り応力、下流側では上流側からの圧縮応力を受けて、結果的に両底面状態の境界付近で流動速度の勾配が大きくなる。

この計算をスイスの山岳氷河 Haut Glacier d' Arolla に適用し、現地での観測結果を使った検証がなされた(Hubbard and others 1998)。ある地点での氷河横断面内流動速度分布が数 10 本の掘削孔傾斜測定によって観測され、底面流動速度を境界条件とした計算結果との比較がなされている。計算と観測が共に示しているのは、底面水圧の激しい変動が観測された部分で流動速度が極大となり、その地点での流動速度がほぼ完全に底面流動によって占められているという結果

である。水圧の変動は底面水が選択的に流れている水脈の存在を示唆し、そのような部分で「底面ずり応力の減少 氷体内部塑性変形の消失と底面流動速度の増加 結果的に表面流速の極大」という減少が起こっている。従来は氷厚と表面傾斜から予想されていた氷体内部の塑性変形であるが、底面状態を考慮する必要性が確認されたと言えよう。氷体内部の塑性変形と氷河底面流動は独立したものではなく、氷河底面での応力分布を介して結びつけて考えるべきものなのである。

まとめ

資料 5 に氷河流動を構成する各成分をまとめた。氷体内部の塑性変形といえども底面状態に影響を受けうる事、氷体底面付近での流動も氷体の塑性変形に帰する事を考慮すれば、底面での応力分布と底面氷の力学的特性が重要である事、氷河底堆積物の変形機構が非常に複雑なものである事、などが今回の発表で強調したかった点である。

氷河底面流動に関しては、従来中心であった机上での議論や限られた観測結果からの考察がより直接的な流動観測によって確認され始めた。しかしながら、各氷河での観測結果は空間的にも時間的にも限られた条件下での現象である。個々の結果を安易に一般化することなく、まずは各事象の詳細を掘り下げる事が必要だと考える。

参考文献

- Alley, R.B., D.D. Blankenship, C.R. Bentley and S.T. Rooney (1986) Deformation of till beneath ice stream B, West Antarctica. *Nature* 322, 57
- Benn and Evans (1998) *Glaciers and Glaciation*, Oxford University Press inc., New York, 159
- Knight, P.G. (1999) *Glaciers*, Stanley Thornes Ltd, 125
- Blake, E., G.K.C. Clarke and M.C. Gerin (1992) Tools for examining subglacial bed deformation. *Journal of Glaciology* 38, 388
- Blankenship, D.D., C.R. Bentley, S.T. Rooney and R.B. Alley (1986) Seismic measurement reveal a saturated porous layer beneath and active Antarctic ice stream. *Nature* 322, 54
- Blatter, H., G.K.C. Clarke and J. Colinge (1998) Stress and velocity fields in glaciers: Part . Sliding and basal stress distribution. *Journal of Glaciology* 44, 457
- Boulton, G.S. and R.C.A. Hindmarsh (1987) Sediment deformation beneath glaciers: rheology and sedimentological consequences. *Journal of Geophysical Research* 92, B2, 9059
- Engelhardt, H., N. Humphrey, B. Kamb and M. Fahnestock (1990) Physical conditions at the base of a fast moving Antarctic Ice Stream. *Science* 248, 57
- Engelhardt, H. and B. Kamb (1998) Basal sliding of Ice stream B, West Antarctica. *Journal of Glaciology* 44, 223
- Hook, R.L., B.B. Dahlin and M.T. Kauper (1972) Creep of ice containing dispersed fine sand. *Journal of Glaciology* 11, 327

- Hubbard, A., H. Blatter, P. Nienow, D. Mair and B. Hubbard (1998) Comparison of a three-dimensional model for glacier flow with field data from Haut Glacier d' Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology* 44, 368
- Iverson, N.R., P. Jansson and R.L. Hook (1994) In-situ measurement of the strength of deforming subglacial till. *Journal of Glaciology* 40, 497
- Iverson, N.R., B. Hanson, R.L. Hook, P. Jansson (1995) Flow mechanisms of glaciers on soft beds. *Science* 267, 80
- Iverson, N.R., R.W. Baker, R.L. Hook, B. Hanson, P. Jansson (1999) Coupling between a glacier and a soft bed: . A relation between effective pressure and local shear stress determined from till elasticity. *Journal of Glaciology* 45, 31
- Lawson, W (1996) The relative strengths of debris-laden basal ice and clean glacier ice: some evidence from Taylor Glacier, Antarctica. *Annals of Glaciology* 23, 270
- Weertman, J (1957) On the sliding of glaciers. *Journal of Glaciology* 3, 33