

粘弾性 — 流れる固体

Q. 地球温暖化の話題で氷河に興味をもちました。普通の川のような蛇行をしている、きれいな写真にびっくりしました(図1左)。どうして、固体の氷が、液体の水のような性質を示すのですか?こんな現象は、他にもありますか?

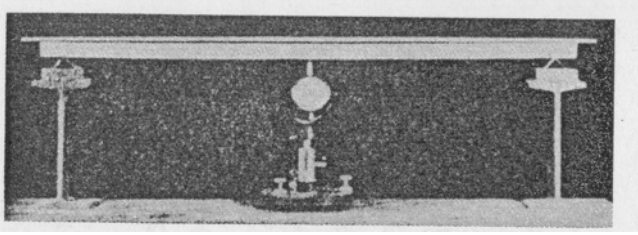


図1. 流れる固体. (左) アレッチ氷河 (スイスアルプス). 北海道大学低温科学研究所 白岩孝行氏提供. (右) セメント棒の垂れ下がり実験 (M.Reiner 1960). 最上部の水平な板をみると、すき間が中央ほど広いことが分かる.

A. 氷河の写真を見ると、粘り気のある液体であるかのように、曲がりくねりながら滑り落ちていきますね。ところで、質問にあるとおり、氷河は積もった雪が自分自身の重みで圧密し、氷になった「固体」です。アルプス、カナダやグリーンランドなどの氷河の上に実際に立ってみると、氷の世界であることがわかります。その氷の上に旗などの標識を立てて眺めていても、その場では流れているようには見えませんが、1年ぐらい経って訪れてみると、周囲の地形との比較から、数 cm から数十m以上も動いていることがわかります。氷河は長い時間の尺度で見ると、「流れる固体」なのです。

流れる固体について、1933年にライナーという人が行った、有名な実験を紹介しましょう。ライナーは長さ76センチの真っ直ぐなセメントの棒を用意して、それを二つの支点の上にわたして、長い期間放置してみたのです(図1右)。ずいぶん、ものぐさな実験ですね。さて、固まったセメントは固体なのに、なんと自分の重みで中央部が「じりじりと」垂れ下がってきたのです。図にみえる黒い隙間が、中央部ほど広がっているのが垂れ下がりを示しています。8ヶ月間で1mm垂れ下がったそうですから、この調子でいくと、あと60~70年たつと、隙間が10cmになる計算です。

この実験から、固体であっても、長い時間にわたって同じ方向に力が加えられ続けると、あたかも粘り気のある液体のように形を変える(変形する)ということがわかりました。もちろん、短い時間の尺度でみていれば、やはり固体として振舞います。もっと正確にいうと、力をかけると瞬間的に伸縮したり、たわんだりして変形するものの、力をかけるとやめると元の形に戻ってしまいます。この性質を弾性といいます。一方、ハチミツやシロ

ップのように粘り気のある液体（粘性流体）は、力を加えるとだらだらと変形を続け、たとえ力を加えるのをやめても、決して元には戻りません。このような性質を塑性といいます。完全な弾性や完全な塑性を示す物質は現実には存在しません。普通の物質は、弾性と塑性の中間の性質を示します。すなわち、それを特徴づける緩和時間（時定数）というものがあって、それより短い時間では固体のように弾性を示し、それより長い時間になると粘り気のある液体のように塑性を示すのです。弾性と塑性の中間なので、弾塑性あるいは粘弾性といいます。岩石の緩和時間は、温度や組成によってかなり変わりますが、数千年から数十万年ということが多いようです。

身近な例では、キャラメルや飴玉を観察すると粘弾性がみられます。1分とか1日ぐらいの尺度で見ると、これらは固体のように振舞います（弾性）。しかし、緩和時間が1か月ぐらいなので、それ以上長期にわたって重力がかかり続けると、「流れて」しまいます。何週間とか何ヶ月もビンや缶に入れた飴玉を放置すると、飴の表面が互にくっつくのは、そのためです。では、岩石が実際に粘弾性を示し、地球が流体のような姿を見せることがあるのでしょうか？ここでは、二つの例を挙げておきましょう。最初の例は、地球が回転楕円体に近い形をしていることです。考えてみれば、地球が約46億年前にできて以来ずっと、自転の遠心力が地球に加わり続けています。この時間は、岩石の緩和時間よりもずっと長いので、地球は粘性流体として振舞います。そのため、遠心力の最大となる赤道がふくらんだ楕円体になるというわけです。地球の自転は次第に減速していますから、未来の地球では次第に赤道のふくらみが減少していくことでしょう。

二つ目の例は、氷河時代や地球の温暖化に関係したものです。地球の温暖化で、南極やグリーンランドの氷河が溶け始めているのではないかという懸念が高まっています。雪の重みで大地が変形するのですから、氷河のような氷の重みでも大地は変形します。ましてや、南極の岩盤の上には厚さ三千メートルの氷がのしかかっている箇所もあるのですから、地面のへこみ具合もかなりのものだと思います。簡単のために、南極には最初は氷がまったくなかったのに、ほとんど瞬間的に（たとえば一晩のうちに）三千mの厚さの氷で南極全域が覆われたとしてみましましょう。詳しい計算をしてみると、この重みで地面は最大で100mぐらい、一気にへこんでしまいます。そのまま、厚さ三千mの氷が融けずに、数千年から1万年以上も、居座ったらどうなるでしょう？たとえば、最終氷期は約2万年前から6千年前まで続き、カナダのハドソン湾を中心とする地域やスカンジナビア半島なども数千メートルの厚さの氷で覆われていました（図2左）。岩石の緩和時間と同程度かそれ以上の時間にわたって、氷の荷重が加わり続けるのですから、岩石は粘性流体のように振舞うはずですね。つまり、やわらかくなったアスファルトのように、岩盤はゆっくりとへこみ続けると考えられます。

これらの氷は次第に融けて、六千年前にはなくなってしまうました。荷重が取り去られたのですから、また元に戻ろうとするでしょう。そのとき、弾性変形で一気に戻る分と、ゆっくりと粘性流体のように戻る（粘弾性）分とがあるはずで、大切なことは、氷で覆

われていた地域では、氷が融けた後まだ数千年（緩和時間）ぐらいいは、隆起が継続するという事です。これをポスト・グレイシャル・リバウンド（後氷期回復）といいます。「ダイエットをやめると、リバウンドする」というのと同じようなニュアンスですね。実際に、カナダやスカンジナビアでは、年間1センチぐらいいの隆起が続いています（図2右）。割合からいえば、1000年で10mも隆起することになります。こんなことがあると、スカンジナビア周辺のバルト海（ボスニア湾）では、海中から次第に島が浮き出してくることになります。また、最初は海辺だった漁港も、300年もたつと3mの高さの陸地になってしまい、海岸線がかなり沖合いに移動してしまうので、港の整備も大変かもしれません。

粘弾性の影響で起きる他の現象としては、アイソスタシーがあります。また、別の現象として、地層の褶曲があげられます。プレート同士が衝突したりすると、最初は水平に積もっていた地層に対して、水平方向の圧縮力が長期間、同じ方向に加わり続けます。すると粘弾性が現れて、固体の地層も飴のようにグニャグニャと変形し、褶曲が生じます。

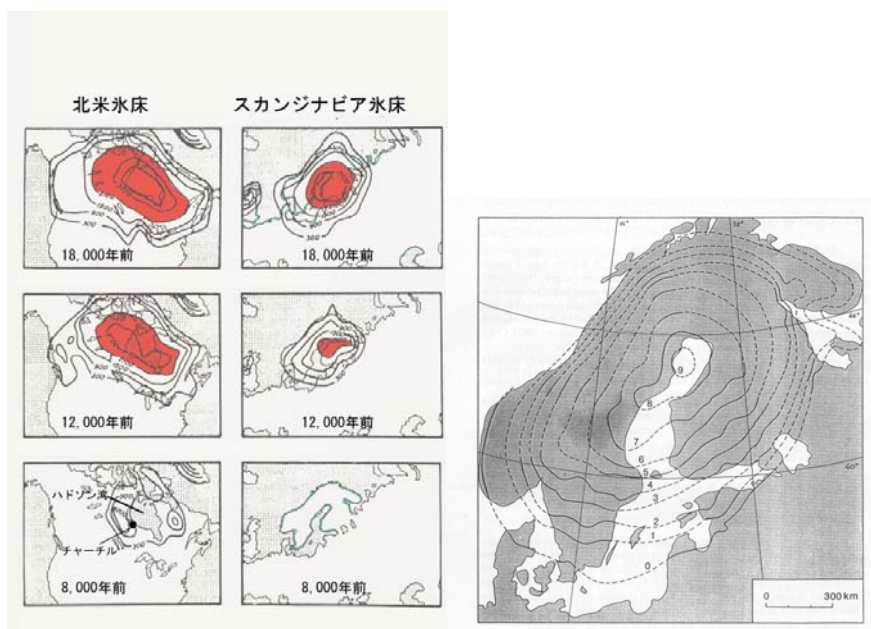


図2. (左) 最終氷期の氷床の厚さ (m) の変遷。(右) 現在のスカンジナビア半島の年間隆起速度 (mm/年)。3000m の厚さで覆われていた地域は、今でも年間1cm 弱の割合で隆起を続けている。