

講演2「太陽活動変動の地球気候への影響」

野沢 徹 (独)国立環境研究所 気候モデリング・解析研究室室長

本日は、太陽が地球の気温にどう影響するのかについてお話しします。はじめに気候に影響を与える要因を整理して、太陽活動が地球の気候に影響を与えるメカニズムに関する現在の知見、気候学から見た太陽活動の地球気候への影響、という順で説明します。

気候システムの変動要因

まず、気候システムの主要な構成要素には、陸面、海、雲、生態系、温室効果ガスなど様々なものがあり、それぞれが複雑に相互作用しているため、太陽活動や二酸化炭素濃度が変化しなくても揺らぐものです。これが内部変動と言われるものです。その気候システムに外から変化を与える外部変動要因は、人為起源と自然起源の2種類の要因に分けられます。さらに、自然起源の要因は、主に太陽からの影響と火山噴火の2つ、人為起源の要因は主に温室効果ガス、オゾン、エアロゾル、土地利用の変化の4つが挙げられます。これらの合計6つの要因が気候システムの構成要素に影響を与えて、気候変化が起こります。

人為起源の変動要因

温室効果ガスについては、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素などの温室効果ガス濃度を過去1万年くらい前から見ると、最近いずれも急激に上がっていることがわかっています。成層圏のオゾン層は、フロン類などのオゾン層破壊物質を人間が放出したことで1970年代からオゾン濃度が減少したものの、現在ではじわじわと回復の基調になりつつあります。成層圏のオゾンはどちらかといえば地表面を冷やす効果がある一方、対流圏のオゾンは大気を温める効果があり、成層圏のオゾンとその下の対流圏のオゾンでは、地上気温への影響が異なります。

次に、大気中を浮遊する微粒子であるエアロゾルは、化石燃料の使用や、焼畑農業、薪などのバイオマス燃料の使用などにより発生し、二酸化硫黄のような大気汚染物質や煤などとして現れます。黒い物質であれば太陽日射を吸収し大気を温め、白っぽい物質であれば日射を散乱させ、日射の一部を宇宙空間に戻して地球を冷やす効果があります。さらに、エアロゾルは雲の凝結核として雲の発生にも関わることから、日射の反射率や、雲の寿命や雲粒の大きさの変化による降水への影響など、地球の大気に複雑な効果をもたらします。

IPCCの第4次報告書によると、グリーンランドや南極のアイスコアの解析から、硫酸エアロゾルは過去約100年で急激に量が増えていて、その変化は北半球での二酸化硫黄排出量と非常によく一致しています。硫酸エアロゾルは吸湿性で寿命が数週間と短く、排出源

の近くで局所的に存在することが多い物質です。例として2001年の冬から春、夏から秋の衛星画像で様々なエアロゾルの分布を見てみると、中国、東南アジア、インドなど、バイオマス燃料の利用や、焼畑農業が行われる地域で多いことがわかります。

それから、土地利用変化による地表面の状態変化も影響を与えます。森林伐採を伴う耕作地への転換など、植生や土地利用の変化は、地表面の日射反射率（アルベド）や地面の蒸発散の能力に影響し、気温を変化させます。産業革命以前と1990年代の推計データを比べると、地球上で全体的に農地や放牧地が増えているのがわかります。地表面の変化という意味では、先ほどの煤などのエアロゾルが極域の雪氷面に付着して日射の反射率を下げ、気温を上昇させる場合もあります。また、土地利用では都市化にともなうヒートアイランドも挙げられますが、地球全体の平均気温への影響は限定的だろうと言われています。

自然起源の変動要因

次に、自然起源の気候変動要因としては大規模な火山噴火があります。ピナツボの噴火のように非常に高い噴煙が上がると、成層圏くらいまでエアロゾルが注入されるので、これらが上空を漂って日射が入らなくなります。ただ、すぐに拡散する上に、粒子が大きくて重力で落ちることから、気候に及ぼす影響は一時的で数年から10年程度だろうと考えられています（IPCC, 2007）。

最後に、太陽活動の影響についてお話しします。まず、太陽活動は黒点数、地球に達する宇宙線量、エネルギー量といろいろな形で測られています。例えば、衛星による1975年から2010年くらいまでのデータで見ると、黒点は11年くらいの周期で増減していることがわかります。また、太陽活動は活発化すると太陽の磁場が強くなり、地球に到達する宇宙線量が減少する、という非常によい相関関係があることもわかっています。太陽活動が活発化すると、温度の低い黒点も増えますが、温度の高い白斑も増えており、足し合わせるとうまく白斑の影響の方が上回るということになっているようです。

太陽が放出するエネルギーは平均で 1366W/m^2 くらいですが、11年周期の変動の極大期と極小期の間の変動は、わずか 2W/m^2 程度で全体の1%以下にすぎません。過去の衛星以外のデータを合わせても見ても、太陽活動の変動量はそれほど大きくないのではないかと、最近の太陽物理学の研究では言われているようです。

太陽活動の変動は、短波放射、紫外線、宇宙線、極域の高エネルギーのイオンなどが、大気の高さに影響を及ぼすことで、気候に影響を与えます。短波放射は地表面付近を温める日射のことで、 2W/m^2 の短波放射の変化では気温の変化はせいぜい 0.1°C くらいで、全球平均気温への影響は非常に軽微であると言えます。その小さな変化が海洋や大気循環を通して別の影響に波及する可能性はあり、そのような研究も行われていますが、きちん

と検出されているわけではないようです。

紫外線は、成層圏の中上部のオゾン層で吸収され、成層圏の温度を変化させますが、この温度の下層の対流圏への影響は、他の内部変動もあり検出は難しいと認識されています。

宇宙線の気候影響に関する研究には、スベンスマーク等により、地球を取り巻く磁場が弱くなって地球に達する宇宙線量が増えるとイオンが増え、下層雲の増加を招き、それが地球の気温を低下させる、という説があります。ただ、彼らの根拠としている雲のデータや解析方法にはやや問題があり、現在では信憑性の高くない可能性の一つだろうというコンセンサスがあると思います。まず雲凝結核となる物質には様々なものがあり、全体の量に対する宇宙線起源のイオンによる量的な影響をきちんと調べる必要があります。また、スベンスマークが最初に説を唱えた 1995 年以前には雲と宇宙線量は相関がありそうに見えた時期もありますが、最近の時系列図を見ると、相関があるようには見えません。この点でも太陽活動の雲への影響のメカニズムがあるとは言えないと思います。

極域の高エネルギー粒子については、極域の上部成層圏より上の化学物質に影響しますが、影響が極域の極渦の中だけに限定されるため、地球全体への影響は小さいと考えられます。

まとめ

これまで説明したいろいろな気候変動要因の温度変化能力をまとめると、温室効果ガス、オゾン、地表面状態（アルベド）、エアロゾル、太陽などがある中で、IPCC でも太陽は非常に影響が小さいとされていることがご理解いただけると思います。

また、過去 1000 年程度の太陽活動の影響に関する研究によると、19 世紀くらいまでは太陽活動は火山噴火と並んで長期の気候変動の主要因の一つと考えられると思います。その後の 50 年、20 世紀前半の温暖化は太陽活動とともに温室効果ガスの増加、火山噴火からの回復等が影響していた可能性が高いと思いますが、データもモデルの結果も不確実性が高いので、若干の注意が必要です。さらに後の 20 世紀後半の温暖化の 90%以上が人為起源の温室効果ガスによりもたらされている、という結論はおそらく間違いなく、太陽活動の影響では現在の温暖化を説明できないと言えると思います。

まとめますと、気候を変化させる外的要因は、大きく分けて自然要因と人為起源の 2 つに分けられ、それぞれ自然要因は太陽活動と火山噴火、人為起源要因は温室効果ガス濃度、エアロゾル濃度、オゾン濃度、土地利用の変化の計 6 種類に分けられます。太陽活動の中で地球の気候変動に影響する可能性があるものとしては、短波放射、紫外線、宇宙線、高エネルギー粒子の 4 種類が挙げられます。短波放射は効いているものの影響は小さく、紫外線は成層圏の高度では影響が認められるものの、その下の対流圏への影響が定量的に認

められていない、宇宙線と高エネルギー粒子は現状では非常に可能性が低い、と考えています。よって、現在の気候変動には太陽活動はほとんど影響を与えていないとまとめられると思います。

参考文献

- Ammann, Caspar M., Fortunat Joos, David S. Schimel, Bette L. Otto-Bliesner, and Robert A. Tomas, 2007, Solar influence on climate during the past millennium: Results from transient simulations with the NCAR Climate System Model, PNAS March 6, 2007 vol. 104 no. 10 3713-3718. doi: 10.1073/pnas.0605064103
- Gray, L. J., et al. (2010), Solar influences on climate, Rev. Geophys., 48, RG4001, doi:10.1029/2009RG000282.
- IPCC, 2007, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Meehl, Gerald A., Warren M. Washington, T. M. L. Wigley, Julie M. Arblaster, Aiguo Dai, 2003: Solar and greenhouse gas forcing and climate response in the twentieth century. J. Climate, 16, 426–444.
doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0426:SAGGFA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0426:SAGGFA>2.0.CO;2)
- Stott, Peter A., Gareth S. Jones, John F. B. Mitchell, 2003: Do models underestimate the solar contribution to recent climate change?. J. Climate, 16, 4079–4093. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<4079:DMUTSC>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<4079:DMUTSC>2.0.CO;2)
- 気象庁, 2005, 異常気象レポート 2005 近年における世界の異常気象と気候変動, http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change/