

過去 1000 年間の気候変動と 21 世紀の気候予測

三 上 岳 彦*

Global Climatic Variations for the Last 1000 Years and Their Prospects in Future

Takehiko MIKAMI *

I. はじめに

地球温暖化問題が議論されるとき、社会一般の関心は、将来の地球の気候がどの程度まで温暖化し、それによって人類がどのような影響を受けるのかという点に向けられがちである。そこで、気候の将来予測という観点から、日本を始め世界の気候モデル研究者の研究目標は、大気中の二酸化炭素濃度が倍増したときの地球気候を、GCM(大気大循環モデル)を用いていかに精度よく予測するかに絞られることになる。

一方、古気候研究者は、太古から現在まで地球の気候が大きく変動してきたことを様々な証拠から明らかにし、その変動要因が大気中の二酸化炭素濃度の変動だけでなく、地球の公転軌道や地軸の傾きの周期的変動であったり、太陽から地球に届く日射量のわずかな変化であったり、大規模な火山噴火による成層圏エアロゾル濃度の変動であったりすることに注目してきた。GCMによる気候の将来予測が的確であるかどうかを検証するためにも、過去の地球気候の変動とその要因を解明することは重要であり、意義がある。

本稿では、特に現在の地球温暖化が始まる前の15世紀から19世紀にかけて地球規模で起こったと考えられる「小氷期」の気候変動に焦点を絞っ

て、気候変動の実態とその要因について考察する。表題にある将来予測については、現時点での私見を述べる。

II. 変動する地球の気候

地球の気候は46億年の歴史の中で大きく変動してきたが、とりわけ人類の時代といわれる第四紀の約200万年間は、寒冷な氷期と温暖な間氷期が繰り返し訪れた点に特徴がある。現在は、最終氷期が終了した約11000年前以降、比較的安定した温暖な気候の続く間氷期に相当するが、過去の氷期・間氷期サイクルを当てはめると、確実に次の氷期に向かって寒冷化が進むフェーズに入っていると考えるのが自然である。しかし現実には、過去1000年の北半球平均気温の変動をグラフにえがくと、産業革命終了後の約150年間に顕著な温暖化を示しており、100年間の気温上昇率が0.7℃近くに達している(図1)。このグラフは、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の2000年版報告書に掲載され、近年の温暖化がいかに急激であるかを全世界に周知するきっかけとなったが、オリジナルはMann *et al.* (1999)である。

過去1,000年間の北半球平均気温を算出するのは実はそれほど容易ではない。グローバルに

* 東京都立大学理学部

* Tokyo Metropolitan University

本稿は2003年9月19日に行われた講演をまとめたものである。

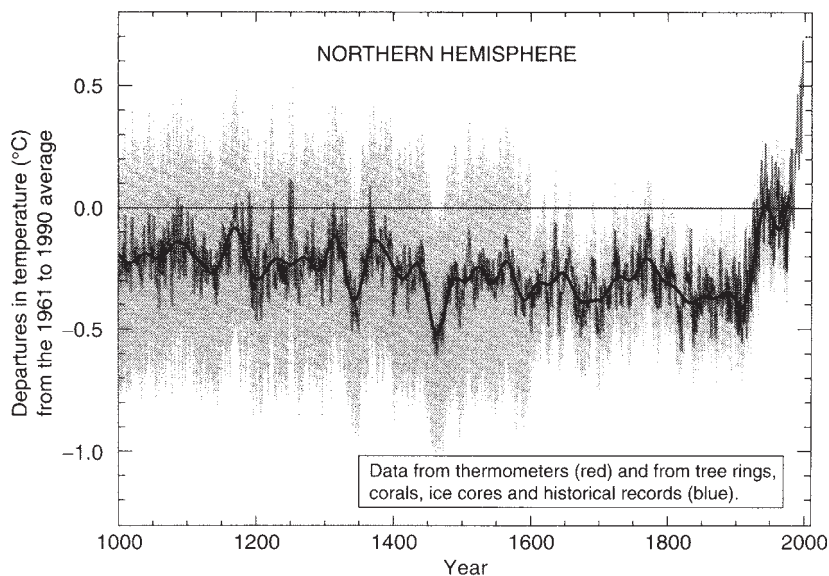


図 1 過去 1,000 年間の北半球平均気温の変動 (Mann *et al.*, 1999) .

気象観測記録が得られるのは過去 150 年足らずであり、大部分の期間については、代替データ (proxy data) から気温を推定することになる。樹木や珊瑚の年輪 (幅や密度、同位体組成など) 分析、極地や高山の氷床・氷河 (酸素同位対比) 分析、花粉分析、古文書解読など、北半球各地から得られた様々な代替データによる気温推定値は、当然のことながら大きな推定誤差 (曲線の上下の網かけ部分) をともなう。しかし、最近の顕著な温暖化は推定誤差の上限を超えており、その意味でも過去にほとんど例のない気候変動と言えるが、このような急激な温暖化の始まる直前の数百年間は、現間氷期約 11000 年間の中でも最も寒冷な時代の一つであり、小氷期 (Little Ice Age) と呼ばれている。次に、小氷期の気候変動の特徴とその要因について述べる。

III . 歴史時代の気候復元

気象観測記録の得られない歴史時代の気候変動を高精度・高分解能で知る手がかりとしてよく使われるのが、前述のように樹木の年輪幅・密度や極地氷床コアの酸素同位体比などの代替 (proxy)

データである。こうした自然の記録の他にも、様々な気象・気候情報を含む歴史文書記録があり、日本や中国を中心とする東アジアやヨーロッパ諸国では過去数百年から千年以上にわたる気候変動を解明するのに役立っている。ここでは、樹木年輪と文書記録を用いた数百年スケールの気候変動研究から、主として日本における歴史時代の気候変動の研究成果を紹介する。

樹木の年輪解析としては、年輪幅を測定してその長期変動から気温や降水量を復元するのが一般的であるが、最近では年輪内の成長期間の密度や年輪の炭素同位体比を分析して気候変動を推定する方法も開発されている。図 2 は、木曾ヒノキの年輪幅解析から過去 800 年間の冬季 (12 ~ 4 月) 気温変動を復元したものである (Sweda, 1994) 。14 世紀から 19 世紀にかけて「小氷期」に対応する低温傾向が続いているが、100 年スケールの周期的変動や 10 年スケールの変動も認められる。

次に歴史文書記録に基づく気候復元について述べる。日本や中国では歴史時代の天候や気象に関する記録が文書の形で数多く残されている。その中で長期間にわたり連続して気候復元に有効

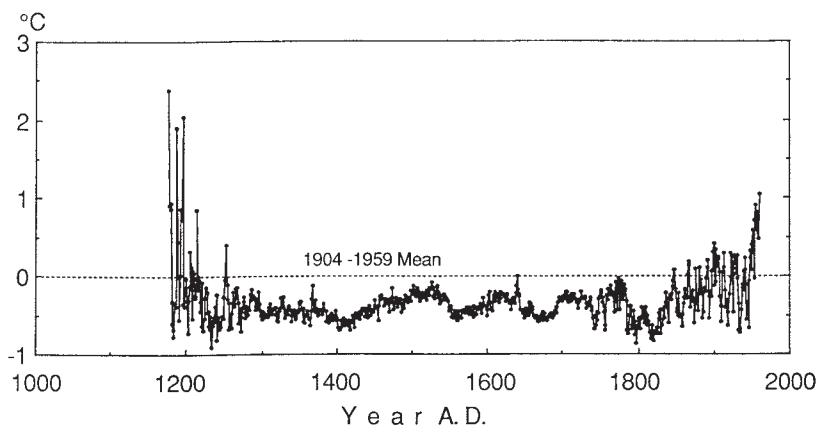


図 2 樹木（木曾ヒノキ）年輪分析による過去 800 年間の気温復元（Sweda, 1994）

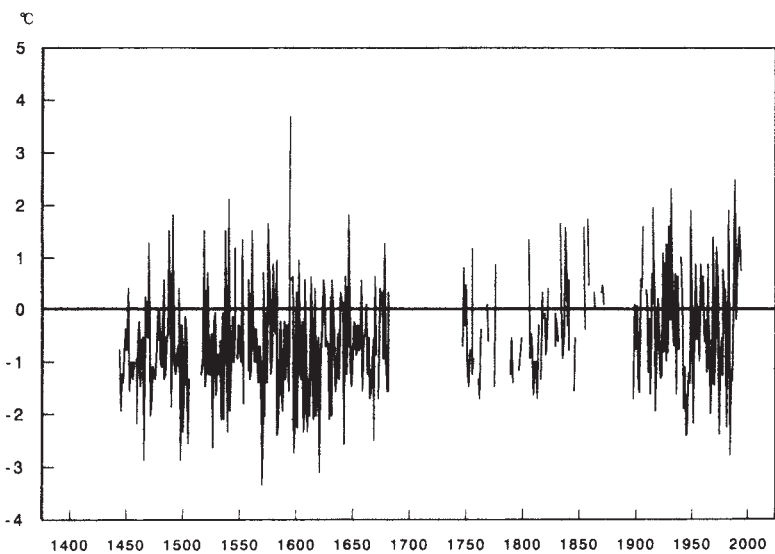


図 3 諏訪湖結氷期日から推定した過去 550 年間の諏訪の冬季（12 月・1 月）平均気温（三上・石黒, 1998）.

と考えられるのが、15 世紀以降 550 年以上も続いている長野県諏訪湖の結氷記録である。この記録は、毎年冬季の諏訪湖全面結氷期日、お神渡り発生日を含んでいるため、観測時代における冬季の結氷期日と平均気温の関係から導き出された直線回帰式を歴史時代の結氷期日に当てはめることにより、550 年間に及ぶ長期の気候変動を明ら

かにすることができる（三上・石黒, 1998）。図 3 は、諏訪湖結氷日から推定した諏訪の冬季（12 および 1 月）の平均気温の長期時系列グラフである。過去 550 年間で特徴的なのは、長期傾向よりも年々から数十年スケールの気候変動である。小氷期前半に相当する 15 世紀～17 世紀の変動幅が大きいものに対して、後半の 18 世紀～19

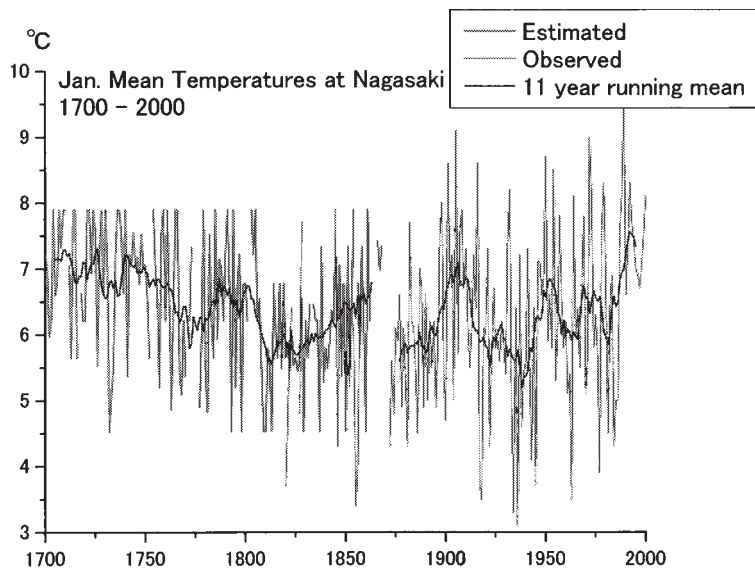


図4 日記天候記録の降雪率から推定した長崎の1月平均気温長期変動 (Mikami *et al.*, 2000)。

世紀では変動幅が小さい。16世紀に較べて18世紀後半から19世紀前半の方が低温となっているのは興味深い。

日本に特有の歴史気象文書記録として、江戸時代の藩日記に記載された毎日の天候記録があげられる。筆者らの研究グループでは、これまでに全国約40地点で各種の日記天候記録を収集し、その大部分をデータベース化した。定性的な日記天候記録から、客観的に気候要素を復元する試みを例示する。図4は、日記天候記録から冬季気温を推定復元した例で、観測時代の気象データから、1月の降雪率と平均気温の間に高相関 ($r = 0.8$) が認められることを利用して、長崎県諫早市の藩日記(1700-1868)の降雪率(降雪日数/降水日数)から長崎の1月平均気温を復元したものである。推定誤差が約1あるが、1840~50年代に行われていた長崎出島のオランダ人医師らによる気象観測記録と日記天候記録による推定値とは比較的良好に対応している。小氷期後半の気候の数十年変動が認められるが、特に1800年代前半の寒冷化が明瞭に現れている点が注目される。19世紀前半の寒冷化は、諏訪湖結氷記録から推定した冬

季気温の時系列にも現れている。

IV. 過去1000年間の気候変動

前述した様々な代替データを世界各地から収集し、過去数100~1000年間の全球および半球の気温偏差パターンを算出しようとする試みがいくつかなされている。それらの多くは樹木年輪分析から復元されたデータに基づいているが、その分布は北半球の中高緯度地帯に偏在しているため、観測時代と同じ精度で半球平均気温を算出することは困難である。Mann *et al.* (1999) は主として年輪分析のデータから過去1000年間の北半球平均気温を求めているが、16世紀以前についてはかなり推定誤差が大きいことがわかる(図1)。過去1000年間を通して見た場合、最初の900年間では年々変動は別として、徐々に気温が低下する傾向が読みとれる。この長期トレンドについて、著者らは天文学的な外部強制力(いわゆるミランコヴィッチ・サイクル)の現れではないかと推察している。この長期時系列のパワースペクトルからは、50~70年の周期的変動が検出され、10年スケール変動の複合したものとも考え

られる。しかし、この長期低温化傾向も 20 世紀に入って一転し、最近 100 年間の気温は著しい上昇傾向を示している。特に最近 10 年間の北半球平均気温は過去 1000 年間でも最も高くなっている点は、人為的要因によるところが大きいと考えるのが自然であろう。1300 年代と 1400 年代に気温の極小が認められるが、後者の低温傾向は前述の Sweda (1994) による年輪分析結果にも現れており (図 2)、グローバルな現象であった可能性が高い。

V. 「小氷期」の気候変動とその要因

図 1 から明らかなように、1400 年代以降、1800 年代末までの約 500 年間は、北半球では現在よりも 0.5 ~ 1.0 程度低温な時代で、「小氷期」と呼ばれている。Lamb (1977) によれば、ヨーロッパでは 1550 年から 1850 年の 300 年間は小氷期と定義づけられているが、数百年スケールの気候変動には地域差が生ずることが多く、その意味では 13 世紀頃の「中世の温暖期」が終わって寒冷化が始まったとみられる 1400 年代以降、近年の温暖化が始まる 19 世紀末から 20 世紀初頭までの約 500 年間は小氷期と呼ぶのが妥当であろう。

小氷期の寒冷化がグローバルであったのか、地域性が大きかったのかについては議論が分かれるが、数 10 年から数百年スケールの寒暖の波があったにせよ、15 世紀から 20 世紀初頭にかけての約 500 年間は、その前後の時代に較べて世界的に低温であったことは数多くの代替記録による気候復元の結果にも明瞭に示されている。小氷期における各地域の寒冷期を相互比較してみると、必ずしも同時的ではない。あえて言うならば、17 世紀と 19 世紀に寒冷であった地域が多く、この時期が「小氷期」と呼ぶのにふさわしい時期であったと思われる (松本, 1992)。寒冷な両世紀の中でも、特に 17 世紀後半と 19 世紀前半の低温化は、太陽活動や火山活動と密接な関連があると考えられる。1650 年頃から 1710 年頃にかけては、太陽黒点数がきわめて少ない「マウンダー極小期」に、また 1800 年代前半も比較的

太陽活動の不活発な時期に相当している。現在の温暖期と「マウンダー極小期」の太陽定数との差は約 2 ~ 3W/m² と推定される。これは、全球平均気温で約 0.4 の気温低下をもたらすと考えられる (増田, 1992)。19 世紀前半の太陽活動の低下は 17 世紀後半に較べると小さかったが、1815 年のインドネシア、タンボラ山の大噴火に代表されるように、この時期は小氷期中でも火山活動が活発であったことが重なり、気温低下が大きくなったと考えられる。

一方、20 世紀以降の顕著な温暖化は、おそらく人間活動による二酸化炭素等の温室効果ガスの増大に起因するであろうが、太陽定数も上昇傾向を示しており、両者の相乗効果とも考えられる。いずれにせよ、図 1 から明らかなように、過去約 1000 年間に示された長期的な低温下傾向が、20 世紀のわずか 100 年間に不連続的とも見える急激な温暖化傾向に転じたことは、自然の外的要因だけでは説明しきれない。

VI. 21 世紀の気候予測と課題

表題にもある 21 世紀の気候予測に関して、現時点では次のように考える。これは、あくまでも私見であり、必ずしも科学的根拠に基づくものではないことを予めお断りしておきたい。

従来、多くの地球気候予測は、大気中の二酸化炭素等の温室効果ガスが倍増したときの全球気温を GCM に基づいて計算するという手法を用いている。長期的な気候変動予測には、多くの不確定要因を考慮しなければならず、現状では全球平均気温を一定の誤差を見込んで予測することまでは可能であるが、気温上昇の地域的差異や季節による違い等については、モデル間で差が大きく、予測精度は必ずしも高いとはいえない。

これは、温暖化に付随して様々なフィードバックが生じるため、温暖化がさらに加速されるか、逆に抑制されるかを正確に見積もることが困難なためである。たとえば、温暖化によって雲量が増大すると予測されているが、上層雲量と下層雲量では気温変動に及ぼす効果がまったく異なる可能性がある。また、温暖化で高緯度や高山の雪氷面

積が減少すれば、アルベド（日射の反射率）が減少するため、さらに温暖化が促進されることになる（正のフィードバック効果）。

さらに、予測を困難にしているのが、温室効果以外の気候変動要因である。本稿でも述べた太陽活動の指標となる黒点数は、長期的に変動しており、将来、太陽活動が長期的にどのような変動をするかを的確に予測することは容易でない。さらに、短期的影響としては大規模な火山噴火も無視できない。また、近年、東アジアで深刻化している人為的な大気中のエアロゾル（Atmospheric Brown Cloud）の増大傾向は、温暖化抑制要因として働く可能性もある。

このような様々な不確定要因を考慮しても、地球規模の温暖化は少なくとも21世紀中は進行するのではなからうか。それが、2 程度の上昇ですむのか、それともIPCCの報告にあるように最大5.8 まで上昇するのかについては、不確定要因の多すぎる現状では予測が困難である。確実にいえることは、約150年前から始まった急激な温暖化が、少なくとも21世紀を通して寒冷化に転じる可能性はきわめて小さいということではなからうか。

VII. おわりに

以上、過去1000年間の気温変動に注目して、地球規模の気候変動とその要因について考察を試みた。10年～数10年スケールの周期的変動を議論するには、数10年間の観測データでは不十分である。しかし、グローバルスケールで信頼性のある観測データが得られるのは20世紀に入っ

てからであり、高層観測データやSSTデータに関しては1950年代以降の40～50年間に限定される。一方、樹年輪や氷床コア、歴史文書記録などの代替記録から復元された気候要素は、数百年から1000年以上の長期間の時系列を供する点で優れているが、常に一定の推定誤差を生ずるため、厳密さを重視する近代気象学的解析にはなじまないという意見もあろう。結局、許容できる範囲の誤差を見込んだ上で、できる限り長期間の高分解能・高精度のデータセットを作成することが、古気候学者に与えられた今後の課題ではなからうか。

文 献

- Lamb, H.H. (1977) *Climate: Present, Past and Future, vol. 2.*
- Mann, M.E., Bradley, R.S. and Hughes, M.K. (1999) Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 759-762.
- 増田耕一 (1992) 小氷期の原因を考える. 地理 **37**(2), 56-65.
- 松本 淳 (1992) 世界各地の小氷期. 地理, **37**(2), 31-36.
- 三上岳彦・石黒直子 (1998) 諏訪湖結氷記録からみた過去550年間の気候変動. 気象研究ノート, **191**, 73-83.
- Mikami, T., Zaiki, M., Konnen, G.P. and Jones, P.D. (2000) Winter temperature reconstruction at Dejima, Nagasaki based on historical meteorological documents during the last 300 years. In Mikami, T. ed.: *Proceedings of the International Conference on Climate Change and Variability, Commission on Climatology, IGU*, 103-106.
- Sweda, T. (1994) Dendroclimatological reconstruction for the last sub-millennium in central Japan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **5**, 431-442.