



ホッケースティック曲線の 何が間違いなのか

—— 本当の気温変動はわかったか？ ——

伊藤 公 紀

19世紀以降の気温変化が急激な上昇カーブを描く曲線を目にしたことのある人は多いであろう。「ホッケースティック曲線」とよばれるこの有名な曲線は、20世紀の気温上昇が人為的に引き起こされたことを示す証拠の一つとされ、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）をはじめ、多くのマスメディアで取上げられてきた。最近、この曲線の成り立ちについていくつかの新事実が明らかになり、専門家の間で話題になっている。不適当なデータ選択とデータ処理があったことが疑われている。

ホッケースティック曲線とは？

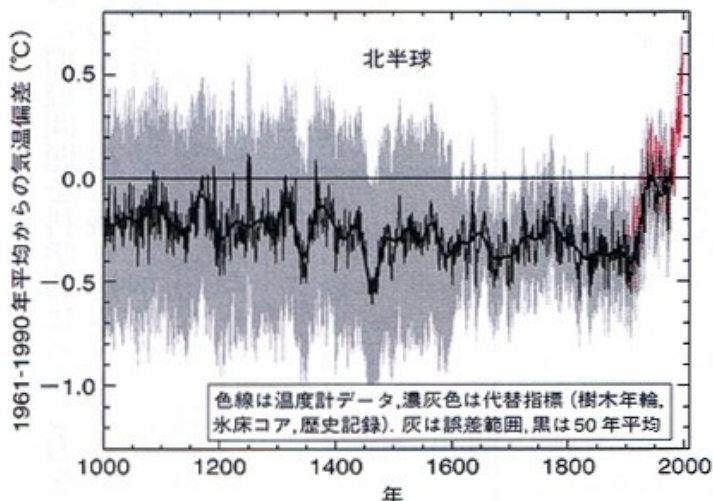
「20世紀の気温急上昇」を表す「ホッケースティック曲線」（以下HS曲線）をご存知の読者は多いだろう（図1）。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第三報告書の「政策決定者のための要約」に取上げられて以来、地球温暖化の象徴の一つとなり、現在でもしばしばマスコミなどに登場する。ところがIPCC第四報告書でのHS曲線は、自然変動の大きいほかの気温データに埋もれてしまった

（図2）。これはなぜなのか。また本当の気温変化の様子はどうか。

最近になって、HS曲線の検証を続けているカナダの統計学者S. マッキンタイア の努力によって、あっと驚くような事実がわかってきた（文献1a～d）。さらに、観測が進んだおかげで地球の過去気温の実態もみえてきている。われわれは今一度、目を見開く必要がある。

ホッケースティック曲線の問題点

米国のM. マンらが作成したHS曲線には複数のバージョンがあり、2008年のPNAS（米国科学アカデミー紀要）誌に発表されたのが最新である（以下HS08とよぶ）（文献2）。この論文では、いろいろな研究者が発表したデータを総合し、初めのHS曲線ほどではなくとも、やはり20



曲線のカーブがアイスホッケーのスティックの形に似ていることから「ホッケースティック曲線」とよばれている。

図1 20世紀の気温の「異常上昇」を示すホッケースティック曲線（IPCC第三報告書より）

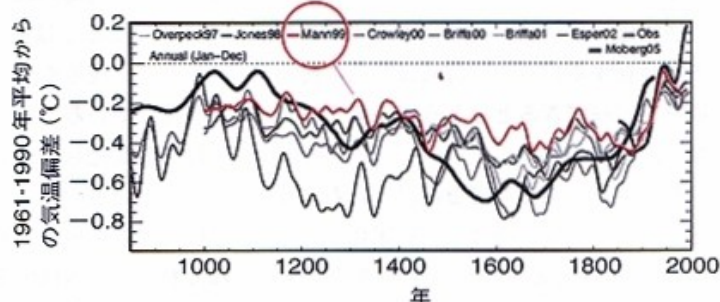


図2 いろいろな過去気温再構成データ（R. A. Kerr, Science, 307, 828 (2005)）

世紀の気温は異常だと結論した。しかしマッキンタイアの追跡評価によれば、マンらの解析にはきわめて問題が多い。まずこの点をみてみよう。

HS08曲線の元になっているのは、樹木年輪や湖底堆積物などの解析による、いわゆる代替指標データである。PNAS論文の補足資料には、使用された計19のデータがまとめられている。図3に示した各データをみると面白いことがわかる。数値が20世紀に大きく増加しているデータは五つで、ほかのデータでは20世紀が特に異常とはみえない。この5データのうち、Tiljanderとある四つのデータは、フィンランドのM. ティルヤンデルらのグループが報告したものである（文献3）。

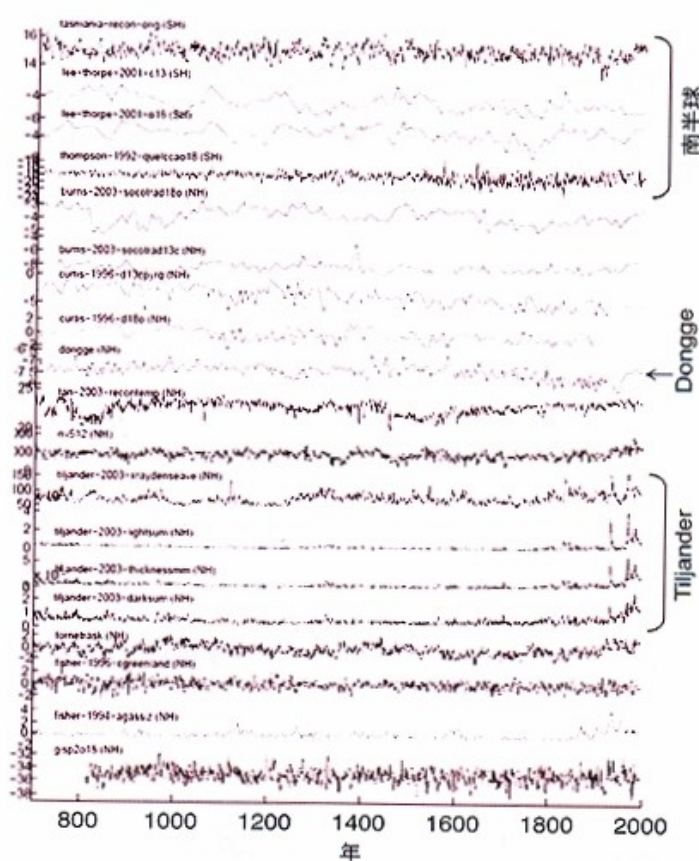
ティルヤンデルらは、フィンランドの湖で採取した湖底掘削試料（コア試料）を用い、コアを形成する異なる年代の層の密度をX線吸収強度測定から得た。フィンランドは北方に位置するので、冷涼な気候のときには植物が少なく、湖底の堆積物は鉱物中心になる。逆に、温暖なときには植物が繁茂し、コア層に有機物が増える。炭素や水素などの軽い元素を多く含む有機物は、重い元素を多く含む鉱物に比べてX線吸収が弱いので、コア層のX線吸収強度を測定すれば各層に含まれる有機物や鉱物の量が判断できる。図4左に示したこの密度データは、図3のTiljanderデータの一つ上に相当する。問題はこのデータが何を意味するかである。

コア層密度の解析によれば、1000～1200年の中世温暖期には有機物が多く、気温が高かったために植物が繁茂した。これは、X線吸収が弱いことからわかる。逆に、強いX線吸収は植物が少なかったこと、すなわち気温が低かったことを示す。

図4左では20世紀もX線吸収が強く、そのままでは「気温が低い」ことを示している。しかしティルヤンデルらによれば、この期間には農業と牧畜のために湖に流入する水量が変わったため、コア層の密度は気温と対応しない。つまり図4左は20世紀の気温については語っていないが、もしそのまま解釈するなら、20世紀の気温は下がったとすべきである。図3に収録されたほかのTiljanderデータも同様である。

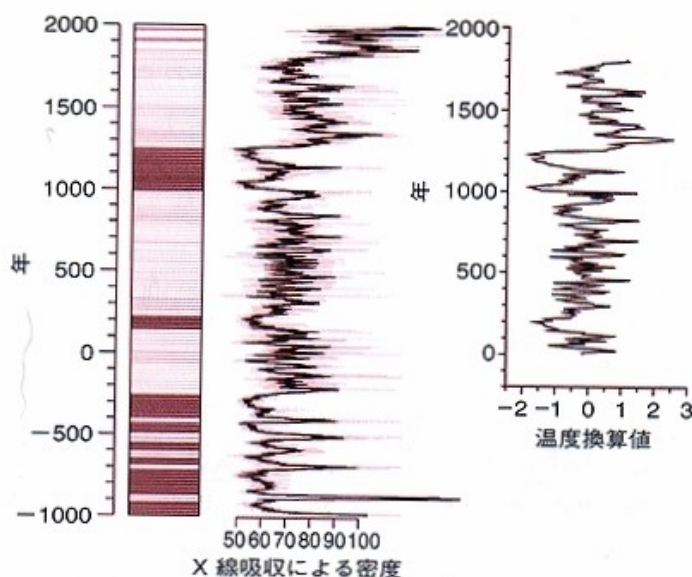
湖底コアデータの気温は 高低を逆にされた

マッキンタイアの主張によれば、なんとHS08曲線にはTiljanderデータが上下逆にされて入っている（文献1a, b）。つまり気温の高低が取違えられている。図3に並んだ



縦軸はそれぞれ温度換算値を表す。

図3 マンらが用いた代替指標（文献2補足資料より）



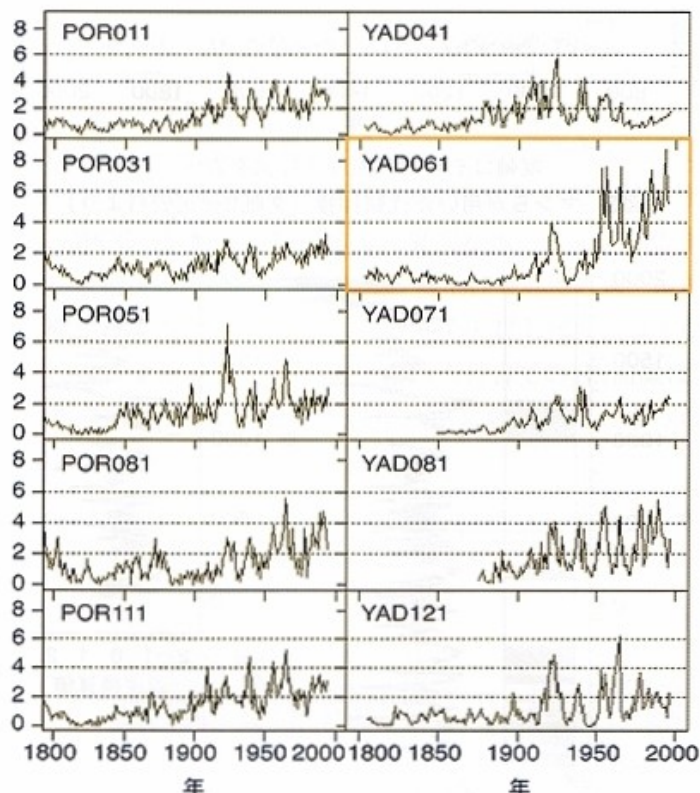
ティルヤンデルらの湖底試料X線吸収から求めた密度（Tiljanderほか、2003、Fig. 5を改変）。左）縞模様は湖底コアの模式図。濃い灰色は有機物が多いことを示し、温暖気候に対応する。粗い縞（最近約150年）は粘土層。中）数値が大きいと、鉱物が多く有機物が少ないので、冷涼気候に対応する（文献3、図5より）。20世紀の「温度低下」は湖の人為的擾乱による粘土層形成による。右）カウフマンらが初めに示した気温換算データ（Kaufmanほか、2008、Table S2より作成）。コア密度が大きいほうが、気温が高いとされている。

図4 中部フィンランドの湖で採取された湖底コアの密度データ

データをみると確かにそう見える。しかしPNAS論文とその補足資料にはくわしいことが書かれておらず判断が難しい。計算の中身まではわからないし、また、にわかには信じかねる内容の指摘である。

ところがマッキンタイアは、意外なところに決定的な証拠を見つけていた。マンらのPNAS論文の結果は、その後カウフマンらがScience誌の論文に引用したのだが、このScience論文の補足資料には、解析に用いた元データを気温に換算した結果が数値として公表されていた(文献4)。これをTiljanderコア層密度データ(図4左)と並べて図4右に示した。明らかに、高いコア層密度が高い温度に対応しており、マッキンタイアの指摘通りTiljanderデータでは気温の高低が逆にされている。ただし、1800年以降のデータは採用されていない。

結局、カウフマンらはマンらのデータ解析を利用しつ



年輪の幅は、成長期(夏)の条件(気候、日照)に依存するので、最近の気温・降水量データを参考にして、どの因子が支配的だったかを判断する。くわしくは年輪法の解説(たとえば<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html>)を参照。ただし、局所的な変化も影響するので難しい場合もある。

たとえば、近年になって開発が進んで周辺の樹木が減少すれば、日照が増えたり、栄養競争が有利になったりして、樹木の成長速度が増し、年輪幅は大きくなる。本図に挙げた例(特にYAD061)には、これらの効果が影響していると考えられる。

図5 ロシア・ヤマル地方で採取された樹木試料の年輪データ例(文献1cより)

つ、1800年以降の人為的攪乱についての注意書きを採り入れた、と判断できる。つまり、HS08曲線でもTiljanderデータは上下逆に使われたと考えられる。これがどのような効果を生むかは明らかである。20世紀に「気温上昇」が出現するだけでなく、中世温暖期が表れているほかのデータと足すことによって中世温暖期はつぶれてしまい、20世紀の異常はさらに目立つことになる。

この間違いには言い訳のしようがない。マンらの多代替指標法では、性質の異なる多数の代替指標を扱うので、一つ一つの吟味は難しいのかもしれない。しかしティルヤンデルらの元論文にはきちんと書いてあるので、杜撰の誹りは免れない。また図3でわかるように、TiljanderデータはHS08曲線の中で「20世紀の気温急上昇」を特徴づけるデータだ。しかも、同じ試料について4通りに測定された四つのデータすべてを使っており、解析中での統計的重みは大きい。

年輪データにも問題が

ほかの版のHS曲線はどうだろうか。おもに樹木年輪に基づくHS曲線の問題点も、マッキンタイアによって明らかになっている。しかも、これはマンのHS曲線だけの問題に留まらない。広く使われる元データに疑問が生じているからだ。

多くの研究者が過去気温の再構成に使用してきたロシア・ヤマル地方の樹木年輪データは、英国のK.ブリッファがまとめたものだ。その元データの一部を図5に示す(文献1c)。全体的に20世紀に増加がみられるが、一種類の試料は、特に大きな増加をみせている。結局、この試料(群)によって「20世紀の急激な気温上昇」が生まれたのである。当該試料は12あったが、同じ場所で採取されたほかの34試料には急激な変動がみられず、全体としてみれば20世紀の気温が特別であった証拠はない(文献1d)。事実、近隣のロシア・ウラル地方などで採取された樹木試料にはHS曲線的な要素はみられない。

ヤマル地方の樹木年輪データの一部が異常なのは、それらの樹木が育った環境の変化によるものだろう。このように、樹木年輪を初めとする気候代替試料は、超局所的な環境変化に由来する情報を含んでいることが多く、解析には注意が必要である。

徹底的な調査が必要

こうして、HS曲線はまさに破綻した。しかし、それだけではすまない。これだけ社会的な影響力をもってきた

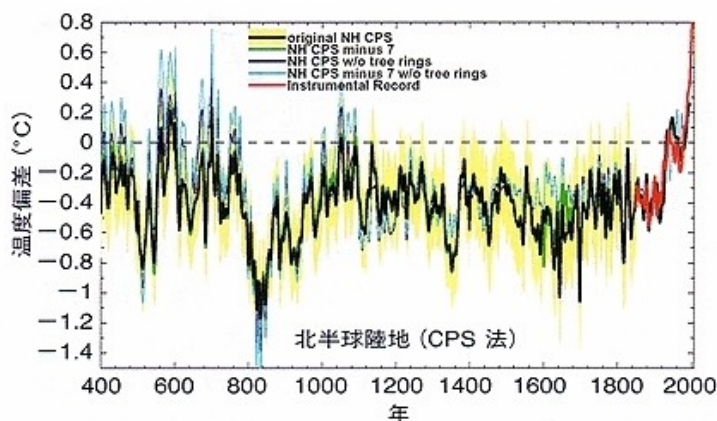
データが間違いであって、気候科学の研究自体が信用を失ってしまいかねない。この問題について、科学界は徹底的な調査を行うべきである。

実は、この話には後日談がある。マッキンタイアの指摘の後、カウフマンらは*Science*誌に訂正を提出した(2009年10月10日、文献5)。彼らの訂正は、23個の代替指標データの内、Tiljanderデータを含めて6個に及んだ。その中には、温度の高低を逆にされたほかの湖コアデータもあった。しかしヤマル地方の樹木年輪データはそのまま使用されている。彼らは、ほかの訂正によってTiljanderデータの訂正が打消されたために結論は変わらないとしているが、このような大きな訂正がそのまま受理されるのが不思議である。

一方、マンはマッキンタイアらの指摘(文献6)に対して、「データを逆にしたという指摘は奇妙である」(文献7)としたが、その後、大学のホームページにデータの修正を掲示した(文献8)。修正結果を図6に示す。疑問のあるデータを除いた結果(明るい青線)では、赤線で示された温度計測定データを除いてみると20世紀の気温は、中世温暖期や、それ以前の高気温期に比べて特になくなっていない。なお、温度計測定にも固有の誤差が含まれており、温暖化傾向が誇張される傾向にある(文献9)。

最近の過去気候の再現手法

このような問題が起きた理由の一つは、過去気候の推定



年輪データを含めて、不確かなデータを除いた結果が明るい青線で示されている。過去の高気温期と現在の比較に影響が生じていることがわかる。図中、CPS法はComposite Plus Scaling法(重ね合わせた代替指標を実測気温で校正)。w/oはwithoutの略。
(http://www.meteo.psu.edu/~mann/supplements/Multi-proxyMeans07/NHcps_no7_v_orig_Nov2009.pdf)

図6 マンが2009年11月にペンシルベニア大学のホームページに載せた修正データ(文献8より)

が困難であることにある。特に、過去と現在をつなぐのは難しい。いわば木に竹をつなぐようなものだ。しかし最近、手法が進んで妥当な結果が得られるようになり、説得力をもって過去と現在の気温変化を比べることができるようになってきている。その結果、歪まない形で気候変動をみられる可能性が出てきた。その例を紹介する。

図7上は、インドネシア近海海底堆積物の解析の結果

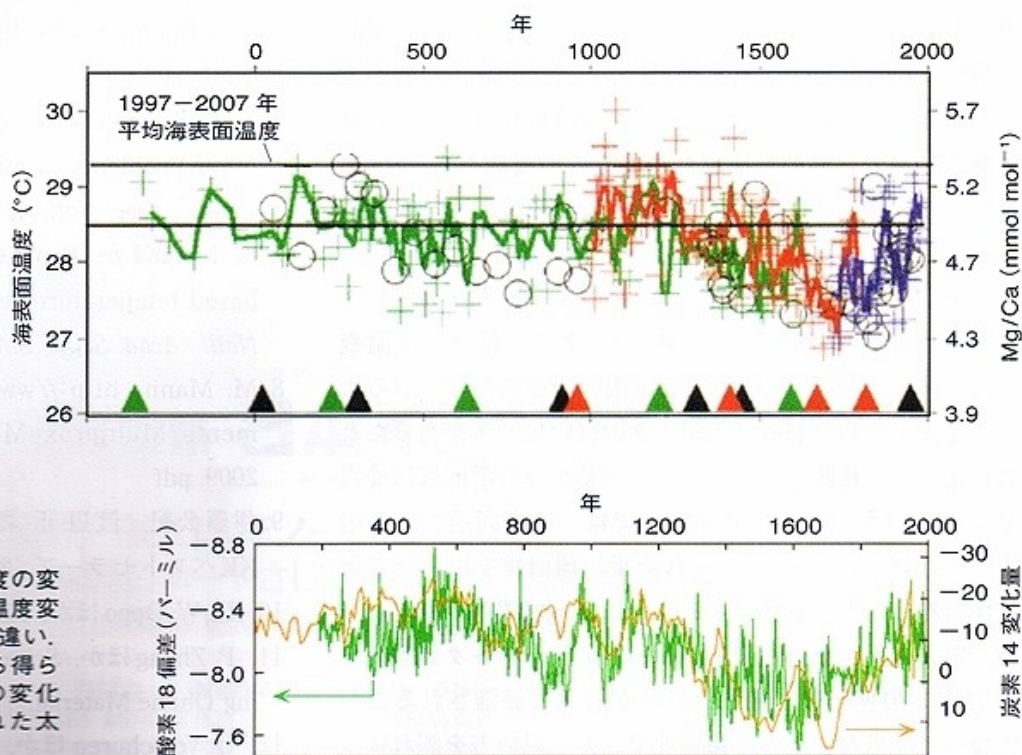


図7 上) インド太平洋の海面温度の変化(文献10より)。Mg/Caは温度変化の指標。色の違いは深さの違い。下) 中国万象洞の石筍試料から得られたアジアモンスーン強度の変化(^{18}O が指標)と ^{14}C から得られた太陽活動変化(文献11より)

である(文献10)。中世温暖期(1100年ごろ)および小氷期(1700年ごろ)の存在がはっきりとみえる。そして、現在の海面気温は中世温暖期と比べて高いわけではない。また、数十年規模の大きな振動がみられる。通常のコア採取法では海底の表面層が乱されてしまい、最近のコアデータが得られないので、この論文では、多脚付きの多コア採取装置を静かに沈めることにより、海底の表面層を攪乱せずに試料を採取する工夫が行われた。長いコアが得られる通常のスラスト式コア採取と組み合わせ、過去と現在を連続的に観測できている。また、この海域の海面気温が、地球平均気温とよく対応するのも重要な点である(文献10)。

このような全体的傾向は、ほかのデータにもみられる。図7下は、中国中央部の万象洞で採取された石筍(石灰質を含んだ水が地面に落ちてたけのこ状に固まったもの)を同位体解析して得られた、アジアモンスーンに伴う雨量変化である(文献11)。図7上の結果とよく対応している。併せてプロットされているのは、 ^{14}C 測定から推測された太陽活動の変動であり、機構は不明であるが太陽の影響が大きいことが推測される。

ここで、雨量変化と気温変化の関係について補足しておく。雨量を表す指標は、気温変化の指標として用いられることがある。マンのPNAS論文にも中国のDongge(東葛)洞の石筍のデータが用いられている。しかし、雨量と気温の関係は単純ではない。たとえば、アフリカモンスーンと太陽活動との関係(文献12)は、アジアモンスーン(図7下)とはちょうど逆になっている。場所によっては中間的な挙動になる可能性もある。したがって、雨量の影響が大きい場合には、気温代替指標として使うのには注意が必要である。過去気温の再構成におけるこの曖昧さも、HS曲線における間違いを生んだ背景の一つだろう。

ホッケースティック曲線の失敗：平均の意味

図1と図6を比較すると、図6の「より正確な」気温変化は、図1の誤差範囲の上限と下限の間を振動しているように見える。したがって、データの扱いにミスがあったとはいえ、誤差範囲を示したマンらの結果は科学的には妥当であるという主張も成り立つ。では、何が問題だったのか。それは、HS曲線とよばれた平均値曲線を出したこと自体だろう。平均処理をすることによって誤差が打消しあい、過去の大きな自然変動が覆い隠され、データ処理ミスで生じた20世紀の「気温上昇」が過大に評価されることになった。当たり前の平均処理でさえ、用い方を誤れば真

実を大きく歪めるのである。

最後に：気候変動の科学は始まったばかり

このように、過去気温の推定や、その変動の原因については、信用に足るデータがやっと出るようになってきた段階である。気候変動の科学は、終わったところか、本格的に始まったばかりといえる。この問題は確かに、広く深く複雑である。読者には、本稿を参考にして気候変動問題に興味をもっていただくとともに、科学に対する広い目を養っていただけることを望むものである。

参考文献

1. S. McIntyre, Climate Audit: a) <http://www.climateaudit.org/> "Upside-Down Mann and the "peer-reviewed literature," October 14th, 2009.
- b) "Kaufman and Upside-Down Mann," September 3rd, 2009.
- c) "YAD06-the Most Influential Tree in the World," September 30th, 2009.
- d) "Yamal: A "Divergence" Problem," September 27th, 2009.
2. M. Mannほか, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 105, 13252 (2008) および Supporting information.
3. M. Tiljanderほか, *Boreas*, 32, 566 (2003).
4. D. F. Kaufmanほか, *Science*, 325, 1236 (2009) および Supporting Online Material.
5. D. F. Kaufmanほか, <http://www.arcus.org/synthesis2k/synthesis/>
6. S. McIntyre and R. McKittrick, "Proxy inconsistency and other problems in millennial paleoclimate reconstructions," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 106 (2009) E10.
7. M. Mannほか, "Reply to McIntyre and McKittrick: Proxy-based temperature reconstructions are robust," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 106 (2009) E11.
8. M. Mann, http://www.meteo.psu.edu/~mann/supplements/MultiproxyMeans07/NHcps_no7_v_orig_Nov2009.pdf
9. 伊藤公紀, 渡辺 正 著, 『地球温暖化論のウソとワナ』, KKベストセラーズ (2008).
10. D. W. Oppoほか, *Nature* (London), 460, 1113 (2009).
11. P. Zhangほか, *Science*, 322, 940 (2008) および Supporting Online Material.
12. D. Verschurenほか, *Nature* (London), 403, 410 (2000).