

離散的データによる自然現象の把握について

HP 管理者 近藤 邦明

はじめに

本 HP における「CO₂地球温暖化仮説」の議論を通して、離散的なデータ（過去の自然現象についての観測値や数値実験）によって自然現象を解釈するという問題の重要性が見えてきたように思います。

自然現象とは、時空的なスケールを細分化していけば幾らでも細分化していくことが可能です。数学的に表現しようとするれば無限の自由度を持つ問題です。

ところが、我々が自然を認識しようとする場合、しかも定量的に把握しようとしても、利用しうる資源（例えば観測点や観測値の数、あるいは電子計算機の能力的限界など）は有限なのです。その意味で、自然現象を完全に理解しあるいはそれを再現することは厳密には不可能なのです。まずこの点を確認しておかなければなりません。

では我々はまったく自然現象を認識できないのか？厳密な認識は不可能でも、「実用上」において十分自然現象を表現し有意義な認識を得ることが可能な場合は存在します。問題は、対象とする事象について我々がどの程度の精度を要求し、それを実用上十分表現できるだけのデータを利用可能なかどうかを見極めたうえで判断を下すことなのです。

このレポートでは、自然現象を理解するうえで、離散的なデータによる自然現象把握の可能性と、その限界についての一般的な問題点を明らかにしようと試みるものです。

1. 観測値の意味と限界を知る

1-1 海面水温の経年変化

本 HP では、長らく海面水温ないし気温と大気中 CO₂濃度の経年変化の観測値の関係について考察してきました。ここでは一連の考察で用いた海面水温のデータについて取り上げることにします。

まず、このデータに着目した経緯について簡単に触れておきます。本 HP では、Keeling による気温変動と大気中 CO₂濃度変動（長期傾向を除く）の二者関係に着目した分析グラフ（1989年）に注目していました。気象学会では長期傾向を除いた分析であることを理由に、CO₂温暖化仮説の反証とはならないという立場をとっていました。本 HP では長期傾向を取り除かずに気温変動と大気中 CO₂濃度変動の関係を明らかにすることを目論んでいました。

その手法として、気温と CO₂濃度についての年増分を比較することにしました。Keeling のマウナロアにおける大気中 CO₂濃度観測値について年増分を求めたものが図 1 です。

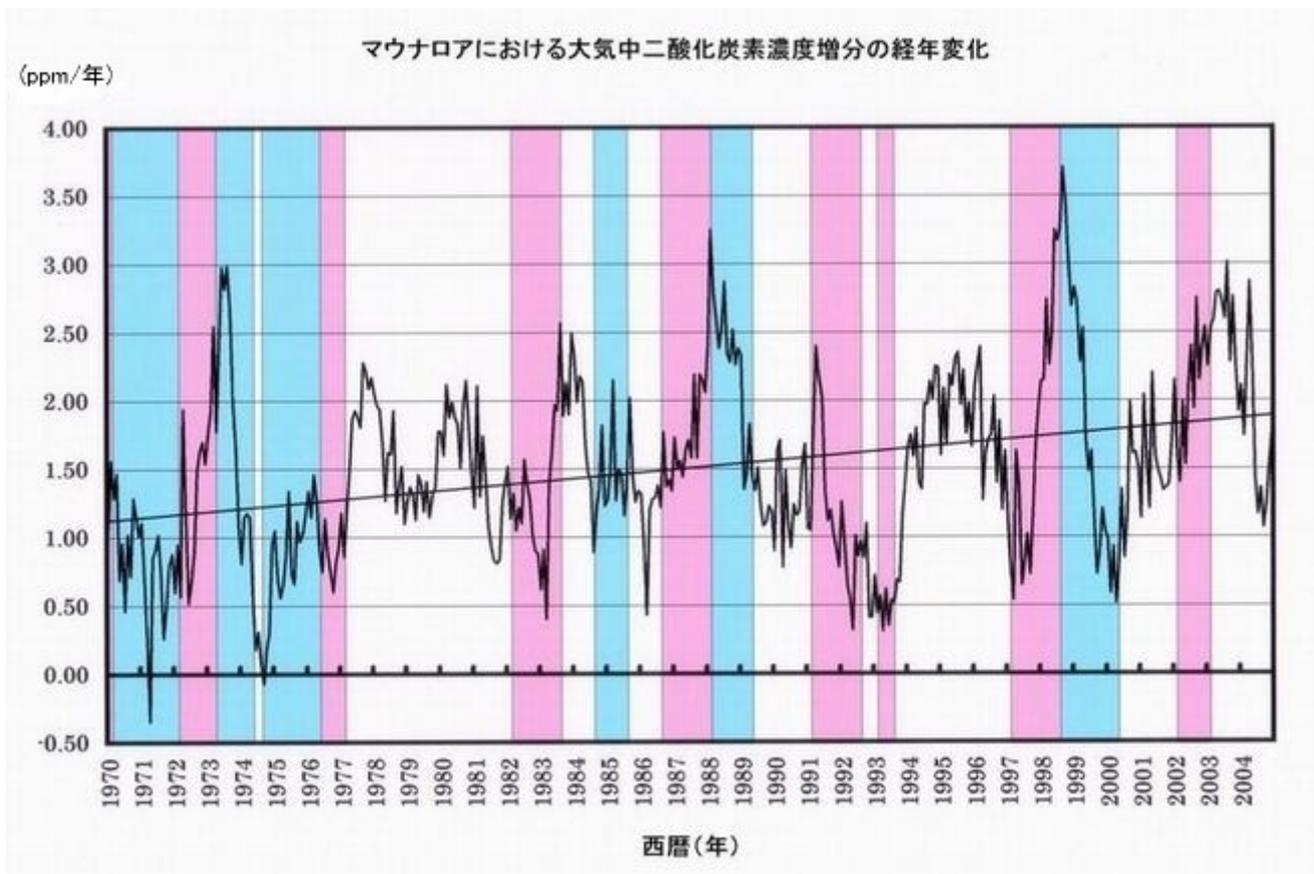


図 1 大気中 CO₂濃度年増分の経年変化

(出典 : <http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/maunaloa.co2>)

図 1 で桃色の着色期間はエルニーニョの発生した期間であり、水色はラニーニャの発生期間です。幾つかの例外はあるものの、エルニーニョが発生すると大気中の CO₂濃度年増分は急激な上昇傾向を示し、ラニーニャが発生すると逆に急激な下降傾向を示すことがわかりました。

この結果から、海面水温の変化が原因となって大気中 CO₂濃度を変化させる大きな要因になっていることが予測されました。そこで、まず海面水温と大気中 CO₂濃度の関係を探ることにしました。

海面水温の経年変化データを探して、気象庁の HP「領域平均海面水温偏差の時系列」において「全球平均海面水温偏差の変動」というグラフを見つけることが出来ました。目的は海面水温変動の年増分を求めることなので、このグラフの基になった数値データを入手することにしました。

だいぶ横道に逸れてしまいましたが、話を基に戻します。こうして入手したデータは、気象庁編集による「海況解析データ 2004年版」です。その中の「全球月平均海面水温データセット」を利用しました。データの意味を確認しておくことにします。

データは、南緯 80 度～北緯 80 度の範囲を緯度方向、経度方向とも 2 度の領域に分割し、各領域における月平均海面水温（観測値の精度は 0.1℃）を記録したものです。海面水温偏差を求める基準となる平年値は、各領域の 1971～2000 年の 30 年間の平均値です。

実際の海面水温の測定方法は、船舶やブイによる海面水温の測定だけではなく、米国海洋大気庁の極軌道衛星 NOAA の AVHRR によるリモート・センシングによる測定値も含まれているようです。

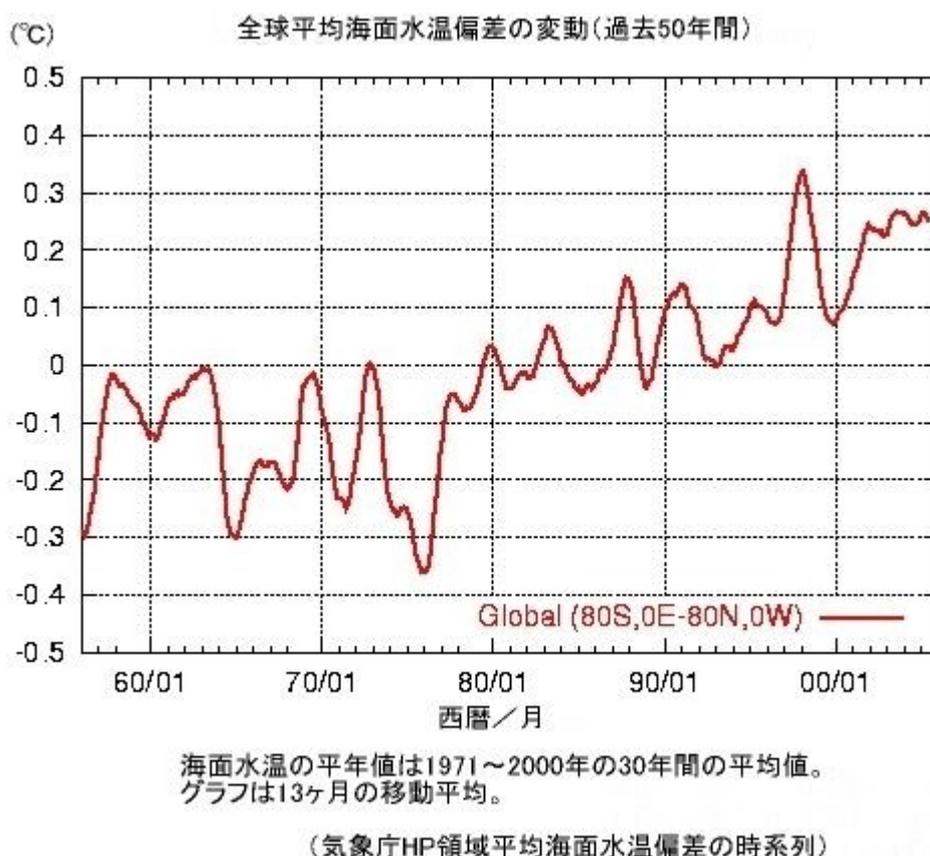


図 2 全球平均海面水温偏差の経年変化

(1) データに対する留意点

このデータを利用するに当たって、留意すべき点をまとめておきます。

まず観測値のサンプリング地点の空間的な不均一が挙げられます。地球は回転楕円体に近い形状をしていますが、ここでは、半径 6370km の球体だとします。緯度方向の 2 度の距離は、 $2 \times 6370 \times \pi \times (2 \div 360) \div 2 \approx 222\text{km}$ 程度で一定と考えてよいでしょう。

ところが、経度方向の 2 度の表す距離は緯度によって大きく変化します。赤道付近では緯度方向と同じ 222km 程度ですが、例えば緯度 45 度の地点では $2 \times 6370 \times \cos 45^\circ \times \pi \times (2 \div 360) \div 2 \approx 157\text{km}$ 、緯度 60 度の地点では $2 \times 6370 \times \cos 60^\circ \times \pi \times (2 \div 360) \div 2 \approx 111\text{km}$ と

なり、緯度が大きくなるにしたがって急激に小さくなっていきます。

つまり、同じ海面水温の観測値であっても、緯度の違いによってその値が代表する領域の面積が大きく違っているのです。その結果、低緯度の観測値の方が広い領域の代表値であるため、地球全体の気温に対する寄与率が大きく、その反面データとしての空間的な解像度は低いのです。

次に、データ欠損の問題があります。海面水温という、広範囲に及ぶ観測ですから、どうしても観測データの無い領域が出てくることは不可避です。いつでもすべての領域に船舶ないし観測ブイが存在するわけではありません。入手したデータでは、各領域における月平均気温の平年値は 1971～2000 年の 30 年間の平均値としていますが、実際には 30 年分のデータの無い領域が多く存在します。データが欠損している場合でも、最低 5 年間分のデータの存在する場合はその平均値を平年値としています。

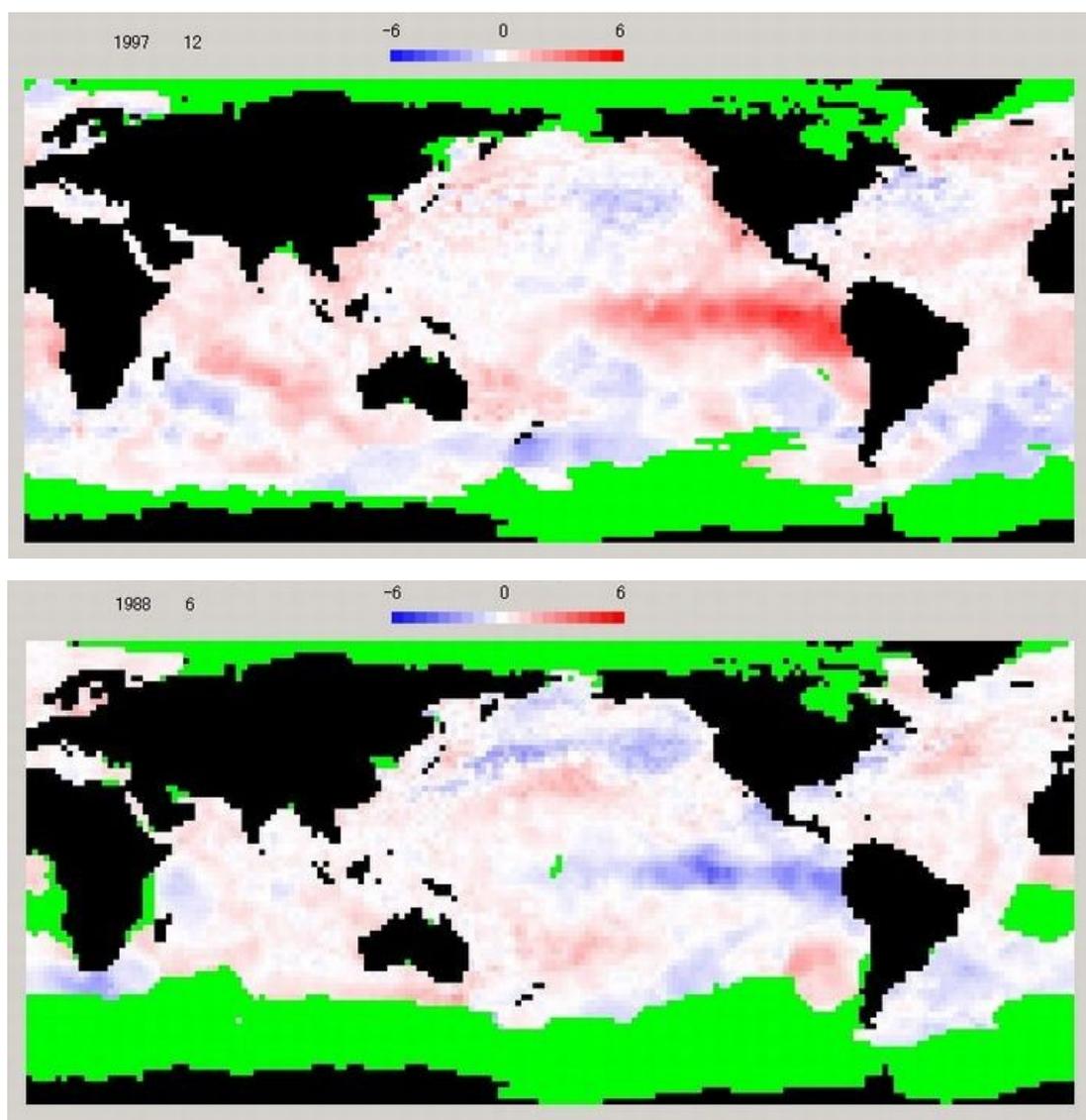


図 3a,b データ欠損の季節変化(上:1997.12/下:1988.6)

図 3 の緑色の部分がデータの欠損している領域です。主に高緯度地方、特に冬季の南極

周辺のデータ欠損が多くなっています。

次に、観測精度について、あらゆる観測点の計測機器を同じ条件でキャリブレーションしているとは考えにくいこと、直接的な温度観測とリモート・センシングによる温度観測は必ずしも一致しないことなど、データの精度も一律ではありません。

更に、このデータは、「月平均」の海面水温データですが、平均を求める元になったデータのサンプリング間隔・観測地点に関してはまったく情報がありません。そのため、1ヶ月以下の時間的な解像度を必要とする分析やより正確な位置が必要な分析には使うことはできません。

この海面水温データを利用する場合、最低でも以上に示したことに留意しなければなりません。

(2) 全球平均海面水温偏差

では、このデータを基に全球的な海面水温が全体としてどのような経年変化をしたのかを求めることにします。

この海面水温偏差の意味するものは、「着目する領域の着目年月に於ける月平均海面水温 (t_i) の同領域の 1971~2000 年の 30 年間の同月の平均値 (t_{0i}) からの偏差」です。これを全領域 (領域数 n) に対して算術平均したものが全球平均海面水温偏差 (T) になります。数式で表すと次のようになります。

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{0i})}{n}$$

一見これで問題ないようにも思いますが、どうでしょうか？仮に、すべての領域が同じ面積であればこれでよいと考えられます。しかし、実際には前述の通り観測値の代表する領域面積は緯度が増加するに伴って急速に減少しますし、沿岸部では領域の中に陸地が含まれているはずで

より現実を反映させるためには、領域内の海面の面積 (a_i) を重みとした加重平均として求めるべきでしょう。

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \{(t_i - t_{0i}) a_i\}}{\sum_{i=1}^n a_i}$$

しかし、残念ながら各領域の海面の面積についての情報がないため、実際には単純な算術平均を使用することになりました。算術平均による全球平均海面水温偏差というデータ

を使用するに当たっては、高緯度側の海域ほど海面水温変動を過大に評価しているのだと
言うことを常に念頭においておく必要があります。また、南極周辺、特に冬季の南極周辺
の情報が欠損していることも重要な留意点です。

さて、こうして求めた全球平均海面水温偏差の経年変化ですが、平均操作などの統計処
理をすればするほど実際に地球上で起きている物理現象についての情報は失われていきま
す。例えば標準偏差の情報を付加したとしても、それはデータのばらつきを示す指標に過
ぎず、空間的な広がりを持つ元の分布を再現することは決してできないのです。

仮に、異なる年月の全球平均海面水温偏差とその標準偏差がまったく同じであったとし
ても、それはその二つの時点に於ける地球の気温の状態が同じであることを表している保
証は何処にもないのです。私たちが観測データを利用する場合、そのデータの持つ意味と
限界について十分認識した上で使う必要があるのです。

全球海面水温偏差の経年変化と、その着目月の前後 6 ヶ月を含めた 13 ヶ月移動平均値
を求めたグラフを示しておきます。

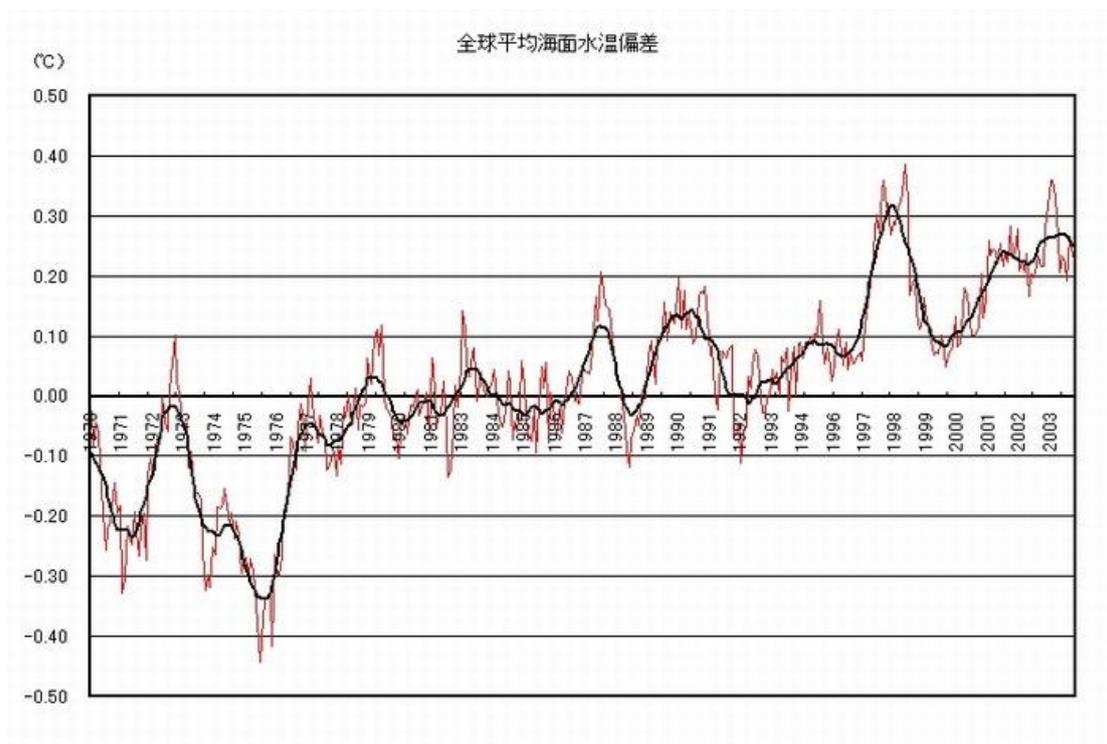


図 4 全球平均海面水温偏差(黒実線は 13 ヶ月移動平均)

(3) 全球平均海面水温偏差と大気中 CO₂ 濃度の関係

さて、これで準備ができたので、全球平均海面水温偏差と大気中 CO₂ 濃度の年増分を比
較することができます。

ところで、全球平均海面水温偏差は既に述べてきたように、全海域の海面水温の平均的

な変動に関する情報を与えるものです。これに対して、大気中の CO₂ 濃度は Keeling によって観測されたハワイ・マウナロア山という特定の観測点のデータです。これでは比較するデータ同士に整合性がないように思われます。

このようなデータの比較が意味を持つためには、大気中 CO₂ 濃度が地域依存性の少ないことが必要です。幸い、大気の混合・拡散速度は速く、その結果、大気は一様に攪拌されており大気中 CO₂ 濃度は全球で比較的均一な値を示すことが知られています。Keeling によるマウナロア山と南極における大気中 CO₂ 濃度変化は、季節変動を除くとほとんど同じ変動傾向を示します。

図 5 に全球平均海面水温偏差とマウナロア山に於ける大気中 CO₂ 濃度のそれぞれの年増分の経年変化を示します。年増分とは、着目する年月のデータ値から 1 年前のデータ値を差し引いた値を表し、単位は°C/年と ppm/年になります。いずれのデータも数年スケールの変動を見やすくするために 13 ヶ月の移動平均値を描いたものです。

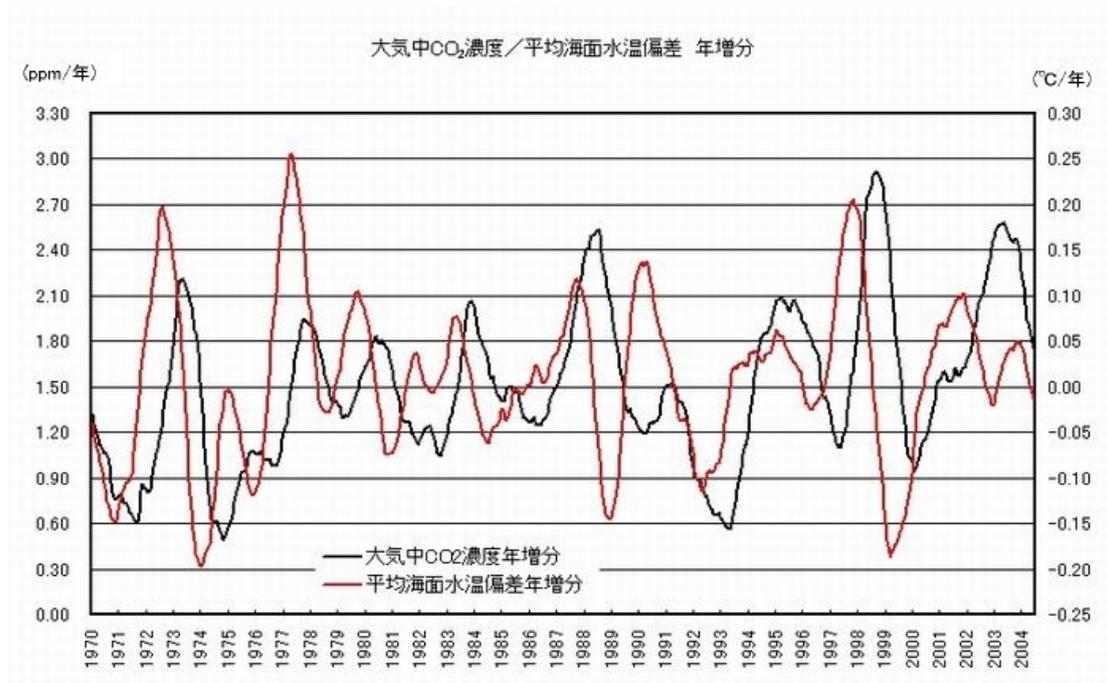


図 5 平均海面水温偏差年増分と大気中 CO₂ 濃度年増分

この図を見ると、二つの曲線の変動傾向、具体的には極値の発現状況が非常に良い対応を示していることが分かります。海面水温と CO₂ 濃度には何らかの因果関係があることは明らかです。また、海面水温の変動に対して CO₂ 濃度の変動は 1 年程度遅れて追従していることが分かります。つまり、数年周期の不規則変動は海面水温変動が原因となってその結果として CO₂ 濃度が増加すると判断できます。

しかし、注意しておくべき点もあります。二つの曲線の極値の発現状況はよく対応しているものの、振幅については必ずしも相似形としては現われていない点です。それにはいくつかの要因が考えられます。

まず、海面から大気中に放出される CO₂ 量は、海域の面積に比例するはずですが、全球平均海面水温偏差は、基になる海面水温偏差の代表する海域の面積を反映していない点が原因の一つとして考えられます。

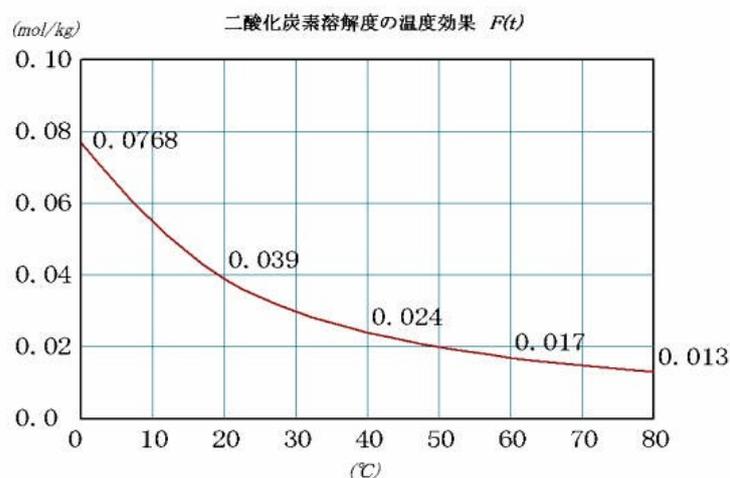


図 6 CO₂ 溶解度の温度変化

次に、CO₂ の放出量の変化は海面水温偏差という各海域の平均海面水温からの変動幅だけでなく、平均海面水温そのものの影響を強く受けることが考えられます。図 6 に示すように、二酸化炭素の溶解度の温度変化を表す曲線は、下に凸の減少関数となります。その結果、同じ温度変化でも、平均海面水温が高ければ CO₂ 溶解度の変化は小さく、平均海面水温が低ければ CO₂ 溶解度の変化は大きくなります。

更に、各海域の表層水に対する深海からの有機炭素供給の性状にも大きな影響を受けることが考えられます。これは気温とは直接係わりのない条件です。また、当然のことですが全球平均海面水温偏差には陸域の情報は一切含まれていないことも一つの原因です。

以上のような要因から、海面水温偏差年増分の変動に対して CO₂ 濃度年増分の変動が必ずしも相似形といえないことは不思議なことではありません。絶対量の定量的な把握のためにはここに挙げた点に留意しながら更にデータ収集することが必要です。

次に、海面水温偏差年増分の曲線は、0°C/年の周辺で変動しているのに対して、大気中 CO₂ 濃度年増分の曲線は 1.5ppm/年の周辺で変動している点です。この 1.5ppm/年は大気中 CO₂ 濃度が年率約 1.5ppm ずつ継続的に増加していることに対応しています。海面水温偏差に変動がないときに CO₂ 濃度は 1.5ppm/年増加しているということは、この 1.5ppm/年という値は、「海面水温偏差の変動」には直接関係しない増加量であることを示しています。最も考えられるのは、海面水温偏差を算定する際に取り除かれた、各海域の平均海面水温の値そのものに関連している現象であると推定されます。

以上、この分析において更に解明すべき点は存在しますが、本質的に重要な点は、少な

くとも海面水温と CO₂ 濃度の二者関係において、海面水温の変動が原因となって大気中 CO₂ 濃度が変動するという因果関係を定性的に明確に示したことなのです。

註) 気象庁によりますと、その後、平成 18 年 3 月から海面温度偏差のデータを全面的に変更しています。気象庁 HP から以下、引用しておきます。

新しい海面水温データ

新しい海面水温データは、エルニーニョ/ラニーニャ現象の監視等、気候の監視・解析に用いるもので、1891 年以降の全世界の海面水温を緯度経度 1 度毎に決定しています。従来の 1946 年以降の緯度経度 2 度毎のものに比べて、長期にわたって空白域のない高い解像度の海面水温データとなっています。

全球海面温度偏差のデータは、気象庁 HP から利用可能になっているようです。
http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/climate/glb_sst/movie/avesst/Global.txt

1-2 平均気温偏差の経年変化

(1) 算定方法

さて、地球温暖化の指標として最も頻繁に使用されるデータのの一つが世界平均気温の変動を示したデータです。日本では、気象庁の HP に「世界の月平均気温平年差」として最新のデータが公開されています（1891 年～現在）。

http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/temp/list/mon_wld.html

この世界月平均気温平年差の算定方法を、気象庁の HP から引用します。

○陸域で観測された気温データ

1880～2000 年までは、米国海洋大気庁気候データセンター（NCDC）が世界の気候変動の監視に供するために整備した GHCN（Global Historical Climatology Network）データを主に使用し、使用地点数は年により異なりますが、約 300～3900 地点です。2001 年以降については、気象庁に入電した月気候気象通報（CLIMAT 報）のデータを使用し、使用地点数は 1000～1300 地点です。

注：世界の観測所については、都市化による昇温を考慮して除いていません。

○海面水温データ

1891 年以降整備されている、海面水温ならびに海上気象要素の客観解析データベース COBE（Centennial in-situ Observation Based Estimates of variability of SST and marine

meteorological variables) 中の海面水温解析データ (COBE-SST) で、緯度方向1度、経度方向1度の格子点データになっています。

注：海面水温の変化は、広域的・長期的には直上の海上気温の変化と同じだとみなせることが確かめられており、均質な海上気温データの整備が難しいことから、世界的に広く海面水温データを用いた世界の平均気温の算出が行われています。

この基礎データを基に、緯度・経度 5° の領域内の観測点の気温を平均した上で平年値 (1971 年から 2000 年の 30 年間の平均値) からの偏差を求め、全球に対して領域面積による加重平均を求めています。

(2) 留意点

まず陸域のデータについて、観測値点数が約 300~3900 地点と極端に変化していることに注目しなければなりません。当然、時代を遡るにしたがって観測地点数は少なくなっていることが予想されます。また、観測点は一様に分布しているのではなく、人口密集地ほど密度が高いことが考えられ、都市化の影響を強く受けていることが考えられます。

これらの影響を考慮すれば、この時系列データの定量的な変化についてはかなり曖昧な部分が存在すると考えるべきです。

一般的に解像度が低い場合ほどデータの極値は平滑化され小さく評価されることとなります。過去に遡るほど気温変動の振幅が過小評価されている可能性が高いのです。

また、近年のデータほど都市化による局地的な極端な気温上昇の影響を強く受けていることが考えられます。

更に、観測技術ないし装置の信頼性・観測条件についても時間的、位置的に均質なものである保障はありません。

以上の要因を考慮すれば、この時系列データの質は精度的に均質ではなく、この 100 年間の長期的な気温の上昇傾向については過大に評価している可能性が高いと考えられます。例えば 100 年前の気温と現在の気温を定量的に比較することは余り意味を持たないと考えるべきなのです。

次に海面水温データですが、これについては気象庁 HP の説明にもあるとおり、平成 18 年 3 月以降に全面的に改訂されました。以前のデータは 1946 年以降の緯度・経度 2° の領域についてのデータを基に作成されていました。既に紹介したように、このデータにはかなりの欠損部分がありました。これは当然であろうと考えます。

ところが改定後のデータでは、1891 年以降にまで遡り、しかも解像度は緯度・経度 1° の領域になり、しかも欠損データがなくなっているのです。これは実に奇妙なことです。

およそ 100 年前に地球上の全海域における海面温度データが存在することはあり得ません。また、これまで欠損していた領域のデータが新たに見つかったと言うことも無いであろうと考えられます。考えられることは、何らかの推定手法を用いて欠損部分のデータを推定して補完したのです。

これは確かに見かけ上高解像度の欠損の無いデータになっていますが、それは恣意的な操作による現実を反映していないデータを付加した結果であり、現実の過去の海面水温の状況をより正しく表したデータである保証は無いのです。

いずれにしても海面水温データは陸域の気温観測データ以上に不確定性の大きなデータであることを理解しておかなければなりません。

以上を総合すると、気象庁の「世界の月平均気温平年差」という時系列データないしこれに類するデータの利用は、気温の定性的な変動傾向の概略を示していると理解するのが無難であろうと考えます。

こうした気温変動の時系列データについては定量的な評価に対する不確定要素が大きい
ため、近年の温暖化について疑問を呈する研究者が少なくないのは、当然であろうと考え
ます。

気温変動の時系列データに様々なノイズ（観測精度や地域的な解像度の偏りなど）が含ま
れていることは否定できず、絶対的な評価には疑問がありますが、相対的・定性的な評
価として、1970年代を底とする寒冷化の時期から現在に至る期間、全球の気温が上昇傾向
を示していることは認めてよいのではないかと考えます。

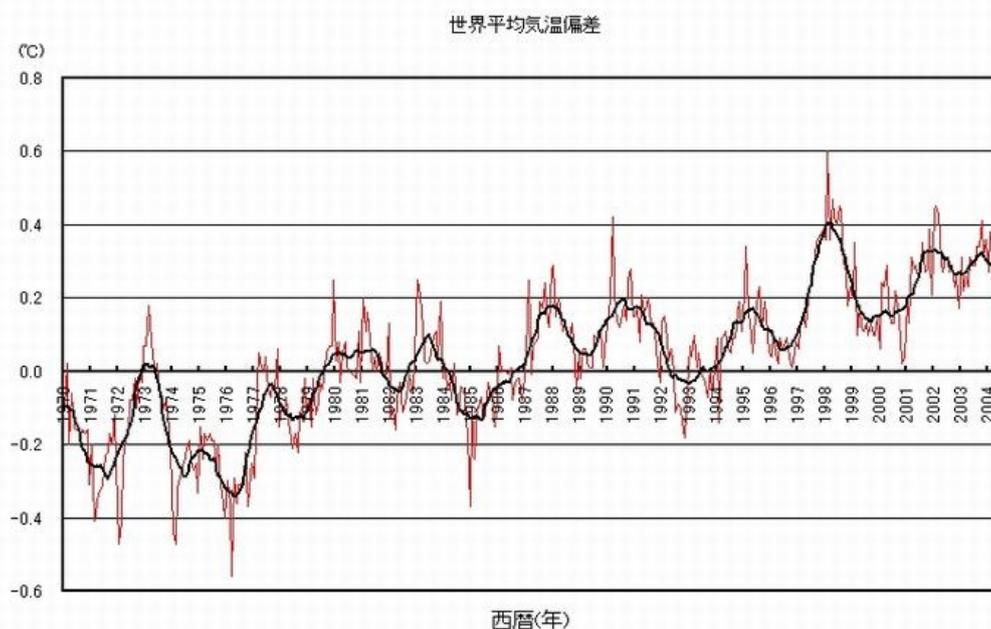


図7 世界平均気温偏差(黒実線は13ヶ月移動平均)

1-3 南極氷床アイスコアの分析

世界平均気温偏差と同時に、温暖化について有名になったデータとして、南極氷床のアイスコアの分析結果があります。

南極に降り積もった雪は、大気を封じ込めています。厚さ数千メートルに及ぶ南極氷床は南極に降り積もった雪が自らの圧力によって固まったものです。アイスコアに含まれる

物質を分析することによって雪の降り積もった時期の大気の状態を知ることができるとされています。

最も有名なデータはボストーク基地で採取されたもので、42万年程度前までの分析結果が公表されています。

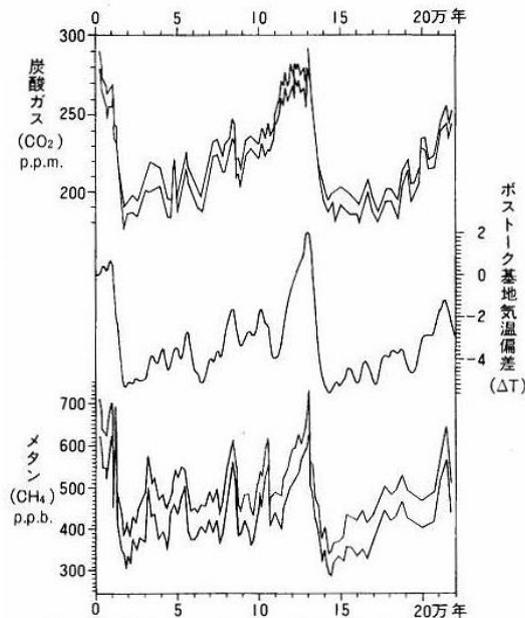


図6-4 南極ボストーク基地における過去22万年の気温、CO₂、CH₄の経年変化 (J. Jouzel et al., 1993による)

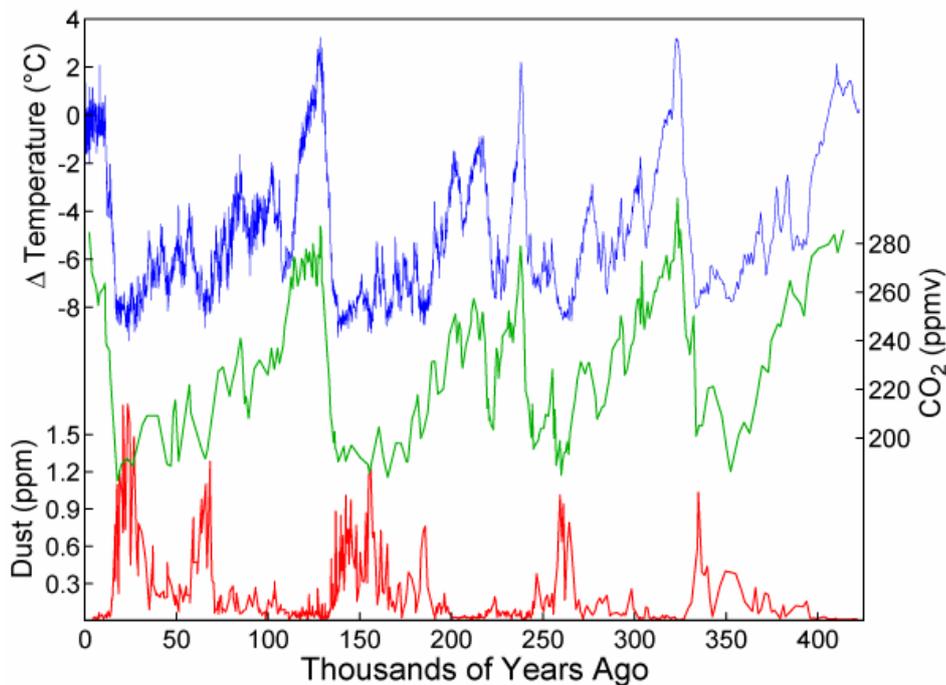


図 8a,b ボストークにおけるアイスコア分析結果

(1) 間接的な測定値の信頼性

氷床のアイスコア分析によって、様々なデータが抽出されています。よく知られている

のは、例えば気温、CO₂濃度、CH₄濃度、塵などでしょう。気温については、酸素同位体の含有比率から推定されているものでしょう。

つまり、すべて標本となる氷塊に含まれる物質の量を精密に測定することによってこれらのデータが得られているのです。ここに幾つかの問題点があることを考えておかななくてはなりません。

既に述べたように、氷床とは降雪が自らの圧力によって押し固められたものです。表面に近い雪は物理的な外力で乱されている可能性が大きいのです。そこに含まれている物質がしっかりした氷塊となって固定されるまでにはある程度の深度に達する必要があります。その結果、氷塊に含まれる物質はある程度の厚さで平均化されていると理解すべきです。つまり、時間的な解像度はかなり低いのです。

また、氷床の深部に至るほど作用する圧力が大きくなっています。氷の塑性的な側方流動による混合の可能性もあります。

これらを考え合わせると、氷床に残されている過去の大気の痕跡は、時間的な解像度が低く、既にかんりのノイズを含んでいることは避けようが無いのです。また、深度によってもその性質が一様ではないのです。

更に、アイスコアからの成分分析についても問題が指摘されています。氷床からアイスコアを切り出すという物理的な外力が加わることによって、標本が乱されることは避けられません。また、氷床から切り出すことによって圧力から解放されたアイスコア標本では、氷床中での力学的な安定状態が変化することなどが考えられるからです。

(2)留意点

氷床のアイスコアについて限った問題ではありませんが、ここでデータの解像度についてまとめておきます。

既にこれまでも幾つかの自然現象の観測データの図を示してきました。例えば世界平均気温偏差のグラフを見てください。月平均気温偏差そのものを示した赤い曲線とその13ヶ月の移動平均を比べると、当然のことですが、月毎のデータは短い周期で激しく変動しています。これは月毎のデータのほうが13ヶ月移動平均のグラフに比べて時間に対する解像度が高いことを示しています。そして、重要なのは例外なく解像度の高いデータのほうが極値は大きく現われるのです。

着目している現象について一体何を要求するのかによって、必要な解像度が得られているかどうかは非常に重要な視点になります。例えば、現象の絶対的な大きさを問題にするのであれば、注目している現象の時空間的な発現スケールよりも、最低1オーダー程度小さなサンプリング間隔が必要だと考えられます。

実際には未知の現象に対しては必要なサンプリング間隔は自明なものではありませんから、サンプリング間隔を徐々に小さくして、サンプリング間隔の変化による影響が無くなるまで試行錯誤によって適切なサンプリング間隔を見つける必要があるのです。

しかし、全地球規模の問題に対してそのような詳細なデータを測定することは事実上不可能です。その場合には、少なくとも定量的な比較が必要な問題に対しては、同等の精度と解像度によるデータの比較をするようにしなくてはなりません。

例えば、「観測史上の最高気温を記録した」という情報は余り意味のない情報です。基本的な条件として、観測史上とは一体どういう時間を対象としているのか、観測精度は同等なのかなどなど、様々な条件を考慮する必要があります。その上で更に、仮に同等の精度の観測値であったとしても観測地点数つまり空間的な解像度は近年ほど高くなっているのですから、全球的にはまったく平均気温の性状が変化していなくても、近年ほど最高気温が高くなるのはむしろ当然の結果なのです。

結局、特定の観測点で最高気温という瞬間値が更新されたことだけからは何も有効な情報は得られないのです。

大気中の CO₂ 濃度に関して、現在は過去最高であり、自然には起こりえないものであり、人為的な影響であるとしばしば言われます。これは、南極氷床のアイスコアの分析によるデータとの定量的な比較で言われているようです。

既に述べたように、アイスコアのデータには少なからずノイズが含まれているばかりでなく、時間的な解像度が低いため、近年の観測データと定量的に比較するということが自体が無意味なことです。

ただし、アイスコアの分析結果は、過去の気候変動について定性的に重要な内容を持っていることは間違いありません。内容を適切に評価するとともに、適用範囲を逸脱した使用をしないことが重要です。

2. 自然現象をどう捉えるか

2-1 自然現象の概念モデルと近似

(1) 線形系と非線形系

線形系とは、簡単に言えば入力とそれに対する応答が1次関数で表されるような現象です。簡単な例として、断面積の変化しない容器に水を溜める場合を考えます。容器に入れた水の量と容器にたまった水深は1次関数として表すことができます。水の量を x 、水深を $F(x)$ 、容器の断面積を A とすると次のように表すことができます。

$$F(x) = 1/A \times x = C \times x \quad \therefore C = F(x)/x \quad (1/A = C \text{ は比例定数})$$

バケツで水を入れるとして、1杯目には Q_1 、2杯目には Q_2 だけの水を入れたとします。合計の水の量を Q とすると、2杯の水を入れた容器の水深は次のように表せます。

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad \text{のとき} \quad F(Q) = F(Q_1) + F(Q_2)$$

この二つの式で表される性質を持つような系を線形系といいます。つまり、入力 x に対する応答 $F(x)$ の比が常に一定であり、全体の応答が部分の応答の和で表せるのです。

線形系は、部分の応答さえ分かれば、全体の応答は部分の和として求めることができ、入力と応答の対応関係は一意的に定まります。

非線形系とは、線形系の条件を満たさない系です。つまり、入力 x に対する応答 $F(x)$ の比が変化し、全体の応答を部分の応答の和として求められないのです。

例えば前の問題について、容器を上を開いた錐体だとすると水の量と水深は次の関係になります。

$$F(x) = C \times \sqrt[3]{x} \quad (C \text{ は定数})$$

よって、入力 x に対する応答 $F(x)$ の比は $\frac{C \times \sqrt[3]{x}}{x}$ となり、 x の関数になります。また、

$$F(Q) = C \times \sqrt[3]{Q} \neq C \times \sqrt[3]{Q_1} + C \times \sqrt[3]{Q_2}$$

つまり、非線形系における全体の応答は、部分の応答の和で表すことができないのです。また一般的には、非線形系の入力と応答の対応関係は一意的に確定できる保障はありません。

自然界の現象は一般的に非線形系の応答として観察されます。特に地球全体の気象現象という輻輳した様々な要因を内包する問題は、色々な要素が相互に複雑に影響しあう高度の非線形系だと考えられます。

伝統的な自然科学の方法とは、自然界の中から特定の現象を抽出して単純化した問題として分析的に理解することでした。この方法で、自然界の中から様々な現象を取り出して理解を深めることによって自然科学は進歩したのです。

もし自然現象がすべて線形系に分解可能であれば、理論的には分解された素過程を単純に重ね合わせ、足し合わせることで自然現象全体を再構成することが可能になります。

ところが、非線形系では分解された部分を単純に寄せ集めても全体を復元することはできません。関連する全ての現象の状態に矛盾が生じないように部分を当てはめていくことは非常に困難な作業です。一つの素過程を一旦当てはめたとしても、それによって系全体が相互に影響しあい変化してしまうため更に調整しなくてはならなくなるのです。

地球規模の気象現象のような巨大で複雑な系については、余りにも輻輳した相互関係を復元することは事実上不可能です。非線形系は部分への分解と全体の再構成は非対称なのです。

(2) 線形近似

自然現象は一般的に非線形系として認識すべきですが、ある限られた条件下では便宜的に線形系として取り扱うことが可能な場合があります。

まず、滑らかな微分可能な x の関数 $F(x)$ に対する Taylor の公式を考えます。 n 回微分可能な関数 $F(x)$ 、定点を a 、任意点 x とすると、次式で表すことができます。

$$F(x) = F(a) + \frac{(x-a)}{1!} \frac{dF(a)}{dx} + \frac{(x-a)^2}{2!} \frac{d^2F(a)}{dx^2} + \dots + \frac{(x-a)^{n-1}}{(n-1)!} \frac{d^{n-1}F(a)}{dx^{n-1}} + R_n$$

ここで、任意点 x を定点 a のごく近傍の点として、 $(x-a)=dx$ とします。この時、 dx の二次以上の高次項 (dx^2, dx^3, \dots) を因数に持つ項は 0 と見なすことができます。そこでこの時、 $F(x)$ の線形の近似式として次式を使うことができます。

$$F(x) \cong F(a) + \frac{dF(a)}{dx} dx$$

非線形系を線形系と見なすことができる条件は、対象とする現象が滑らかな微分可能な関数として表現され、系の状態が確定している点からの独立変数の変化量が十分小さい場合に限られます。

自然現象は本質的には非線形系に属する問題です。しかし、局所的な問題やごく小さな変化を考える場合は、便宜的に線形系と見なして取り扱うことによって実用上十分な精度の解を格段に簡単な操作で得ることが出来ます。しかし、その適用に当たっては近似が許される範囲を逸脱しないように常に留意する必要があります。

自然現象を線形近似するのは、対象となる現象について何らかの解を求めるという目的のための手段です。多次元の非線形系の解を解析的に求めることはできません。そこで線形近似で表現した線形系に初期値を与えて、数値的に近似解を求め、求めた近似解を基に更に解を改良していくという操作を、解が必要な精度を満足するまで収束計算を繰り返すこととなります。

近年の大きな問題は、こうした数値計算に慣れてしまった研究者たちの中に、本来は解を数値的に求めるための便宜的な手段であった線形近似を、誤って自然観そのものに転化している者が多く見られることです。その結果、本質的には非線形系として認識すべき自然現象の複雑さや多様さに対する認識が薄れ、分析的な情報を線形的に重ね合わせ、加え合わせることによって、全体が再現できるのだという誤った傲慢な自然観を形作っているのです。

2-2 人為的二酸化炭素地球温暖化仮説に見る自然観

人為的 CO₂ 地球温暖化仮説（以下、簡単に“温暖化仮説”と呼ぶ）は、複雑な自然現象を「線形的自然観」とでも呼べそうな認識によって組み立てられている典型的な例だと思います。

大衆にアピールするためには、できるだけ簡単なモデルを提示することが必要なので、特にマスコミは線形的な自然観を好んで採用することになります。

例えば『北極海の海氷面積、観測史上過去最低、このままでは今世紀半ばには海氷消滅！』などという記事を良く見かけます。この短い文章の中に多くの問題が潜んでいます。

まず、観測史上という時間スケールは何を意味するのでしょうか？北極海の海氷面積を系統的に同等の精度で連続観測したデータが存在するのは、1970年代に入って衛星からの観測が開始されて以降の高々30年間程度に過ぎないのです。1970年代は、ご承知の通り、寒冷化が進み、北極海の海氷面積は異常に拡大していた時期でした。また、もう少し大きな時間スケールで見れば、小氷期後期から現在に続く気温上昇過程の中での出来事であり、取り立てて大きな問題ではありません。

次に、このままでは今世紀半ばには海氷消滅と言う時、まず問題なのがこの現象の具体的な発現の機構が良く分かっていないことです。それにもかかわらずこのままでは云々という判断は、線形的な現象という予断の下に、これを外挿的に当てはめた場合どうなるのかという理論構成で推測されていることを示しています。

以下、温暖化仮説を構成する基本的な認識について検討することにします。

(1) 人為的 CO₂ 蓄積仮説

温暖化仮説の最も基本的な仮定の一つが、産業革命以降の近年の大気中 CO₂ 濃度上昇の主因が、主に化石燃料の燃焼によって人為的に排出された CO₂ が大気中に蓄積したからだと言及主張します。

地球の対流圏の大気は大気の流れによって急速に攪拌されるため、その大気組成は水蒸気を除けばほぼ均一です。一旦大気中に放出され一様に拡散した気体分子は、発生源の如何を問わず同様の振る舞いをすると考えられます。

CO₂ については、年間約 210Gt 程度が気圏と陸圏・水圏の間で循環していると考えられています。人為的な CO₂ 排出がほとんど無視できると考えられる産業革命以前でも同様です。

これは、大気中に存在する CO₂ が、ある確率で陸圏・水圏に吸収されていることを主張しています。前述の通り、対流圏大気は一様に攪拌されていますから、大気中に存在するすべての CO₂ は同じ確率で陸圏・水圏に吸収されることになります。吸収される CO₂ の1年当たりの確率（吸収率と呼ぶ）は、（陸圏・水圏の年間吸収量）／（大気中の CO₂ 総量）

で表されます。

大気中の CO₂ 濃度が定常状態にある場合には、大気から陸圏・水圏に吸収される CO₂ 量が、同じく陸圏・水圏から放出される CO₂ 量と釣り合っているのです。

注意すべき点は、吸収率や陸圏・水圏からの CO₂ 放出量は不変ではなく、地表～海洋～大気環境の変化によって変動するものだという点です。何らかの環境の変化で吸収率や CO₂ 放出量に変化が生じれば、気圏から陸圏・水圏への吸収量と、陸圏・水圏から気圏への放出量のバランスが崩れて大気中の CO₂ 濃度は非定常に変化し、新たな定常状態へ遷移するのです。

さて、人為的 CO₂ 蓄積仮説に話を戻しましょう。この仮説が主張される一つの背景は、南極氷床のアイスコア分析による過去 42 万年の大気中 CO₂ 濃度の変動から、過去の間氷期の CO₂ 濃度は高くても 300ppm 程度であり、現在の 385ppm という値は異常な数値であり、主要な原因としては人為的な CO₂ 放出量増加の影響以外に考えられないというものです。

これについては既に述べたとおり、アイスコアの分析データと近年の観測データを同等のものとして定量的に比較すること自体が無意味です。更に、過去の間氷期と現在の地表環境はまったく別のものであり、過去に無かったからという理由で人為的な CO₂ 放出量増加の影響と断定することは不可能です。

もう一つの「有力な」背景は、近年において大気中 CO₂ 濃度の連続観測において先駆的な働きをした Keeling 自身の主張です。1957 年から開始された大気中 CO₂ 濃度の連続観測データが示す大気中 CO₂ 濃度の増加傾向は、大気中に排出された人為的な CO₂ の半量程度が蓄積したと考えると非常によく説明できるという主張です。

彼のこの主張は非常に単純で大衆にも理解しやすいものであり、瞬く間に世界の主流の考え方となり、現在に至っています。正に京都議定書に始まる温室効果ガス、とりわけ CO₂ 削減政策の根幹を成す主張です。

しかし、この Keeling の主張は自然科学的に考えると非常に不合理な仮説です。彼の自然観は環境を線形系と見なす典型的な誤りを含んでいます。

まず第一の誤りは、産業革命以前の大気中 CO₂ 濃度が定常的であったという仮定です。

次頁に示す図 9 は、歴史的な大気中 CO₂ 濃度の実測値を示しています。1950 年代以降については、Keeling の系統的な連続観測のおかげで、ほぼその値は確定している（赤い部分）と考えられますが、それ以前の観測データは実に多様な値を示しており、信頼しうるデータは存在しないのです。結局、アイスコアの分析データと Keeling の実測データの間を「望ましい」値で補完してつないで見せたに過ぎないのです。

次に、仮に産業革命以前の大気中 CO₂ 濃度が定常的であったとして、それ以後の CO₂ 濃度の上昇部分をまったく別の過程として分離した上で線形的な蓄積モデルとして表現し、

更に産業革命以前の循環過程と線形的に重ね合わせることで全体をモデル化した点です。蓄積モデルの妥当性以前に、CO₂ という同じ物質の移動過程として、対流圏大気という同じ場の中に循環過程と蓄積過程というまったく異質な系が並立して存在すると言う主張は不合理です。人為的に排出された CO₂ だけが選択的に特殊な挙動を示す必然性が存在しないのです。

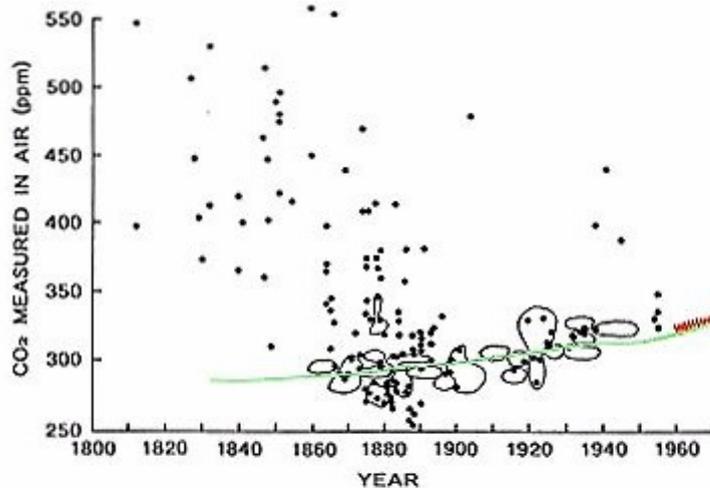


Figure 2. The mean values of atmospheric CO₂ measurements from Europe, North America, and Peru, between 1800 and 1955. The encircled values between 1860 and 1900 were arbitrary selected by Callendar [12] for estimation of 292 ppmv as the average 19th century CO₂ concentration. Slocum [11] demonstrated that without such selection these data average 335 ppmv. Redrawn after [3].

図9 大気中 CO₂ 濃度の実測値

更に、CO₂ 蓄積モデルでは、大気中に人為的に放出された CO₂ の半量程度が大気中に留まり続けると主張しますが、では残りの半量はどこに消えてしまったのでしょうか？消滅したり大気圏外に放出されたのでなければ、半量程度はやはり陸圏・水圏に吸収されたと解釈するしかありません。

では、例えば初年度1年間に人為的に放出された CO₂ が1年間で半量吸収されたとしましょう。そこにまた新たに1年分の CO₂ が放出されたらどうなるのでしょうか？今度は前年に残った半年分を加えて1.5年分の人為的 CO₂ 排出量の半分が吸収されるのではないのでしょうか？

ところが蓄積説では新たに加わった1年分の CO₂ の半量だけが吸収されて、前年に残った半量は変化しないと考えるのです。これは余りにも無理なモデルと言わねばなりません。蓄積仮説が成り立つためには、人為起源と自然起源の CO₂ が区別されるだけでなく、同じ人為起源の CO₂ についても放出された年毎に区別されなければならないのです。

現象的に考えると、大気中に放出された CO₂ は、地球をめぐる対流圏大気の運動によって、発生源の如何を問わず、また放出された年次を問わず速やかに攪拌され大気中に均一に拡散します。それは、大気中の CO₂ 濃度がマウナロアでも南極でもほとんど同じ値を示すことから確認されています。

大気中に一様に拡散した状態とは、熱学的には拡散エントロピーが極大の状態にあることを示しています。この一様に混合・拡散した CO₂ の中から、再び人為的に排出された特定年次の CO₂ だけが選択的に特殊な挙動を示すということは、エントロピーの減少を意味し、自然界では起こりえない現象なのです。現象面からも、産業革命以前の CO₂ 循環過程と人為的 CO₂ に対する蓄積過程が並立することはあり得ないのです。

人為的な CO₂ 放出が付加されたからといって循環過程そのものを変える必要は無いのです。人為的な CO₂ 放出は、単に循環過程において陸圏・水圏からの CO₂ 放出量が増加したに過ぎないのです。

この点について槌田敦は物理学会誌に発表した『CO₂ を削減すれば温暖化は防げるのか』(日本物理学会誌 Vol.62, No.2, 2007) において次のように述べています。

IPCC によれば、大気中の CO₂ の量は約 730 ギガトンであるが、毎年約 120 ギガトン陸と交換し、約 90 ギガトン海と交換している。つまり、大気中 CO₂ は毎年 30% が入れ替わり、大気中に残るのは 70% である。

… (中略) …

この人為的 CO₂ の大気中に溜まる量の最大値は、

$$0.7+(0.7)^2+(0.7)^3+\dots=0.7/(1-0.7)=2.33$$

と簡単に計算できて、人為的排出で溜まる CO₂ の量は最大でも 2.33 年分でしかない。これは一定割合で目減りする(負の利息の)定額貯金のようなものだ。

大気中の CO₂ で過去 45 年間に増加した 64ppm は人為的排出量の 25.2 年分に相当するから、2.33 年分はその 9% である。したがって、全体の増加量 64ppm のうち、人為増加量は 9% の 6ppm で、残りの 58ppm は気温などにより陸海から放出された自然増加量だったのである。

ここで付け加えておきますと、2.33 年分とは前年までに蓄積されている量であり、着目年の排出量を加えると最大で 3.33 年分が大気中に存在することになります。以上から、大気中に蓄積されている人為起源の CO₂ 濃度は 6ppm (9%) ~ 8ppm (13%) ということになります(1 年毎の離散量として考察した槌田の議論を元に、小島順氏によって連続量への拡張が行われ、その結果は 2.8 年分約 7ppm、ちょうど 6ppm ~ 8ppm の中間の値を得ています。)

以上より、近年の大気中 CO₂ 濃度上昇の主要部分は人為的な CO₂ 放出の結果ではあり得ないのです。

参考

■人為的二酸化炭素地球温暖化仮説を否定する

http://env01.cool.ne.jp/global_warming/report/buturigakkai/kondoh01.pdf

■ 大気中に含まれる人為起源二酸化炭素量の推計

http://env01.cool.ne.jp/global_warming/report/buturigakkai/kondoh03.pdf

■ CO₂を削減すれば温暖化は防げるのか 槌田敦

http://env01.cool.ne.jp/global_warming/report/tutida01.pdf

■ CO₂循環を理解するための数学的枠組み 小島順

http://env01.cool.ne.jp/global_warming/report/ikirusuugakumath.pdf

(2) Keeling 曲線の解釈

次に温暖化仮説の根幹を成す仮定が、大気中に付加された CO₂の温室効果によって地球が温暖化するというものです。

過去の観測データから、地球環境が温暖化すると大気中の CO₂濃度が上昇することが知られています。代表的なものは既に本稿で紹介した南極氷床の分析結果の示す過去 42 万年に及ぶ過去の大気の痕跡からの結論です。

温暖化仮説を支持する研究者は、過去の数万年オーダーの現象としては、気温変動が原因となって大気中 CO₂濃度が変化するが、近年ではそれが逆転して大気中 CO₂濃度の変動が気温変動の主要な原因だと主張します。これは何とも奇妙な主張です。

この問題に対して、最初に温暖化仮説に対する反証を発見したのは他ならぬ Keeling でした。彼は南極とマウナロアの大気中 CO₂濃度の精密連続観測データと世界平均気温偏差を用いて図 10 を発表しました。

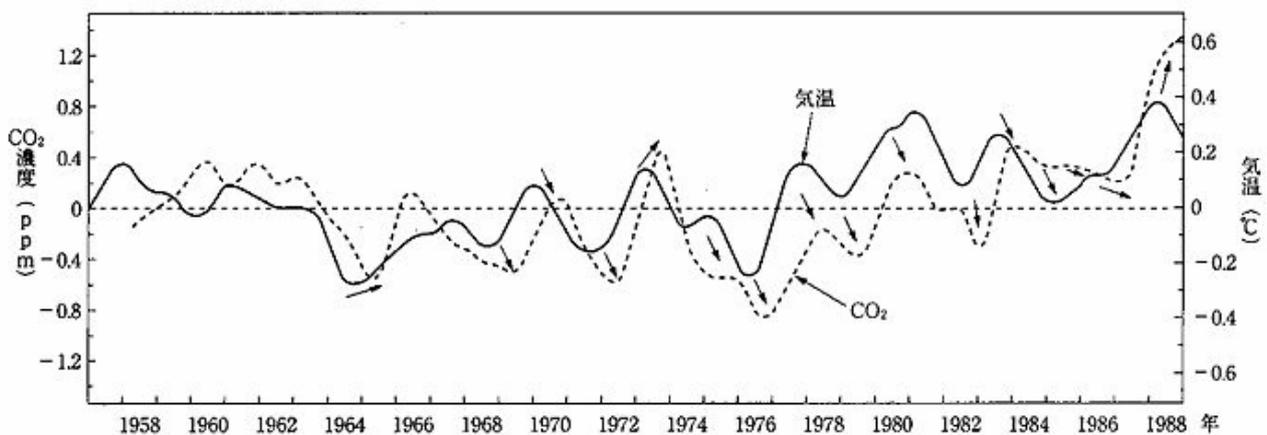


図 10 Keeling による世界平均気温偏差と大気中 CO₂濃度の関係

この図 10 は、南極とマウナロアにおける大気中 CO₂濃度の平均値から、大気中 CO₂濃度の長期的な変動傾向を取り除いた値（破線）と世界平均気温偏差を同じ時間スケールで比較したものです。

二つの曲線は見事に連動して変動していることが分かります。しかも極値の発現状況から、気温の変動の後を追いかけるように大気中 CO₂ 濃度が変動することが分かります。つまり、現在においても気温変動が原因となって大気中 CO₂ 濃度が変動することを強く示唆したのです。

この **Keeling** 曲線の意味する内容をもう少し深く考察していれば、現在の地球温暖化の狂騒状態は起こるはずは無かったのですが、気象学者たちの多くはこれを無視してしまいました。

さて、**Keeling** 曲線では確かに近年の気温の上昇傾向が大気中 CO₂ 濃度の上昇の原因である可能性を強く示唆しましたが、完全ではありません。まず一つには、大気中 CO₂ 濃度の長期的な上昇傾向を取り除いていることです。そしてもう一つは、これは温暖化仮説を支持する研究者は触れないのですが、世界平均気温偏差という統計量を求める段階で、平均気温を取り除いて、偏差の変動のみを表しているのです。

Keeling の研究を補完するためには、**Keeling** 曲線で取り除かれている、平均気温と大気中 CO₂ 濃度の長期的な傾向との間の関係を明らかにすることが必要です。この問題については一旦おいて、**Keeling** 曲線を温暖化仮説を支持する研究者がどのように評価しているのかを見ておくことにします。

気象学会の公式な評価を、気象学会誌『天気』（河宮未知夫、2005年6月）掲載の記事から引用しておきます。

「問題とされている図（**Keeling** 曲線）に関してまず注意しなければいけないのは、質問中でも指摘されている通り、二酸化炭素の長期的な上昇傾向が除いてあるという点です。地球温暖化の原因となるのは正にこの長期的な上昇傾向です。それが取り除かれたこの図で表されているのは自然起源の変動であり、人間活動に端を発する地球温暖化とは比較的関連の少ないものと言えます。」

まず、地球温暖化というものは人間活動、つまり人為的に大気に放出された CO₂ によって起こっているという予断の下に **Keeling** 曲線を解釈しようとしていることが分かります。ここで、気象学会に寄せられた疑問は、**Keeling** 曲線が表しているのは気温が CO₂ 濃度変動の原因ではないのかと言う疑問なのですから、これでは答えになっていないようです。また、そのような情報を **Keeling** 曲線から読取ることは不可能です。

温暖化の原因は人間活動であり、**Keeling** 曲線で取り除いた CO₂ 濃度の長期的な上昇傾向が温暖化の原因であるとしています。つまり、**Keeling** 曲線で取り除いた CO₂ 濃度上昇の長期傾向は人間活動起源の CO₂ であること＝人為的 CO₂ 蓄積仮説が正しいことを前提に組み立てられています。この点については前節の議論から成り立たないことが明らかになりましたが、やはり **Keeling** 曲線から読取ることはできません。

結局このコメントの中で **Keeling** 曲線に対する評価は、『この図で表されているのは自然起源の変動』であり、明示的には述べていませんが、自然変動については気温が原因とな

って CO₂ 濃度はその結果であるということのようです。これはほとんど無意味な回答と言
ってよいでしょう。

次に、物理学会誌（2007 年 Vol.62, No.07）に掲載された阿部修治（産総研）の解釈を
引用してみます。

『…，図 1（Keeling 曲線）で 0.5 度の気温変化に対応する CO₂ 濃度変化がわずか 1ppm で
あることからすれば，過去 45 年間で増加した 64ppm を気温上昇で説明することは，この間に
気温が 32 度上昇していない以上，不可能である。』

Keeling 曲線は 0 点の周辺で周期変動する世界気温偏差と長期傾向を取り除いた大気中
CO₂ 濃度の関係を示したものであり、その最大振幅は気温偏差に関しては±0.5℃の範囲、
CO₂ 濃度に関しては±1.2ppm の範囲に収まる程度です。この 2 者の比較から、阿部は気
温偏差と CO₂ 濃度の間に線形関係があるという仮定の下に、その比例定数を 0.5℃/ppm
とした結果、『64ppm を気温上昇で説明することは，この間に気温が 32 度上昇してい
ない以上，不可能』と結論づけているのです。

これはかなり無謀な推定と言わねばなりません。Keeling 曲線で対象となっている最大
で 1ppm オーダーの CO₂ 濃度変動についての傾向を、その 50 倍を超える 64ppm もの変動
に対して線形関係を前提とする予断の下に単純に当てはめているのです。しかも、この
64ppm の変化という長期傾向は Keeling 曲線では取り除いており、もともとこの問題につ
いての情報を含まないのですから、Keeling 曲線をもとに議論すべき問題ではありません。

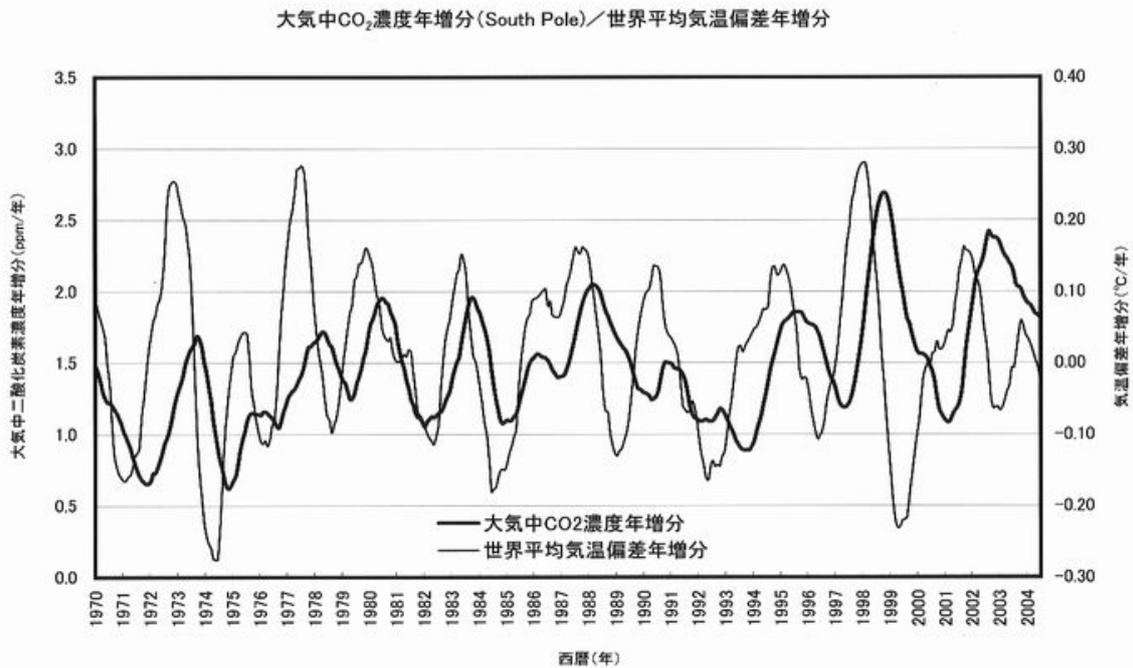


図 11 世界平均気温偏差年増分と大気中 CO₂ 濃度年増分

(出典 : <http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/sposio.co2>)

さて、私たちは **Keeling** 曲線で明らかになっていなかった点を明らかにすることにしました。

まず、**Keeling** 曲線で除かれた長期的な上昇傾向を含めた大気中 CO_2 濃度の変動と気温変動の関係を示すために、双方の年増分を比較することにしました。前頁の図 11 は、世界平均気温偏差と **Keeling** による南極における大気中 CO_2 濃度それぞれの年増分を示したグラフです。

図 11 から明らかなように、**Keeling** 曲線同様、気温変動に 1 年程度の遅れで大気中 CO_2 濃度が増加することが確認できました。更に、気温偏差年増分は $0^\circ\text{C}/\text{年}$ を中心に周期変動しているのに対して、 CO_2 濃度増分は約 $1.5\text{ppm}/\text{年}$ を中心に周期変動していることが分かります。

つまりこの間、 CO_2 濃度は平均的に約 $1.5\text{ppm}/\text{年}$ 上昇しているのです。これを時間について積分することによって大気中 CO_2 濃度の長期的な上昇傾向を求めることができます。

この分析によって、**Keeling** の取り除いた長期的な CO_2 濃度の変動傾向を含んだ議論が可能になりました。しかし依然として世界平均気温偏差を求める操作で除かれた平均気温についてはこのグラフでは情報を得ることが出来ません。なぜなら、平均気温とは具体的には時間に対する平均ですから、平均気温が何 $^\circ\text{C}$ であろうと、時間微分は必ず 0 になります。このグラフで表されている気温の年増分とは気温の時間微分の近似値なので、平均気温の年増分は平均気温の値に関わらず 0、即ち変化しないという情報しか得られないのです。

このグラフに対する温暖化仮説を支持する研究者からの評価は、前にも紹介した物理学雑誌（2007 年 Vol.62, No.07）に掲載された阿部修治（産総研）の見解だけです。彼の見解を以下に紹介します。

さらに、図 2.3 として引用された近藤邦明氏によるグラフは、二酸化炭素濃度年増分（左軸）と気温偏差年増分（右軸）の原点が異なっており、気温増加のゼロが CO_2 濃度の $1.5\text{ppm}/\text{年}$ に対応している。これは相関を示すためのグラフとしては奇妙である。「気温が変化しないという原因により、 CO_2 が増加するという結果がもたらされた」などという因果関係はありえないから、 $1.5\text{ppm}/\text{年}$ の定常的 CO_2 増加は気温上昇以外の原因によることを、これらの図はむしろ示している。

阿部の主張は、平均気温偏差年増分と大気中 CO_2 濃度年増分の間に関係が成立することを前提に述べられていますが、後述するように、それには無理があるようです。また彼は、気温そのものが大気中 CO_2 濃度に関係する可能性は無いと考えているようですが、気温 \rightleftharpoons 海面水温によって海水の CO_2 溶解度は大きく変動します。また、アイスコアの分析から、気温が高い時期には大気中 CO_2 濃度は高くなることが定性的に明らかになっています。

阿部は『 $1.5\text{ppm}/\text{年}$ の定常的 CO_2 増加は気温上昇以外の原因によることを、これらの図

はむしろ示している。』としていますが、私たちは、1.5ppm/年の定常的 CO₂ 増加の原因とは平均気温そのものだと考えます。

さて、これまでの議論で Keeling 曲線では平均気温偏差と大気中 CO₂ 濃度、私たちの示したグラフでは双方の年増分の経年変化を示しました。

阿部は Keeling 曲線について平均気温偏差と大気中 CO₂ 濃度の間に線形関係を仮定して、『64ppm を気温上昇で説明することは、この間に気温が 32 度上昇していない以上、不可能』と考えました。

年増分のグラフについて大気中 CO₂ 濃度の年増分が 0 になる気温偏差年増分を見ると約 -0.3°C/年になります。阿部が主張するようにこの両者の間に線形関係を仮定すると、大気中 CO₂ 濃度が定常状態になるためには気温が年率 0.3°C ずつ低下しなければならないのです。10 年で 3°C、100 年では 30°C の低下・・・というのにはあり得ない数値です。平均気温偏差年増分と大気中 CO₂ 濃度年増分を直接関連付けることには無理があるのです。

このグラフについて槌田によって重大な指摘がなされました。これまでの Keeling 曲線や年増分の曲線によって、気温変動が原因となって CO₂ 濃度が増加すると言う因果関係は示されたが、なぜ二つの曲線の間に 1 年もの時間差が生じるのか？槌田は年増分のグラフの観察から、気温増分の 0 点が CO₂ 濃度増分の極値に対応していると思えるべきではないかと考えたのです。

さて、ここで代表的な周期関数として sin 関数を考えることにします。0 点の周りで周期変動する sin 関数を微分すると cos 関数になります。二つの曲線は同じ形をしていますが、位相が 1/4 周期だけずれることになります。つまり、周期 2π の sin 関数に対して微分操作を行うと

$$\frac{d}{dx}(\sin(x)) = \cos(x) = \sin(x + \frac{\pi}{2})$$

になるのです。

気温の年増分 ≡ 気温の時間微分の 0 点が CO₂ 濃度年増分の極値に対応すると言うことは、気温の時間微分の時間積分、つまり気温そのものが CO₂ 濃度年増分と同期するのです。これを現象面から解釈すると、大気中 CO₂ 濃度の変化率^註 が気温に比例することに対応するということです。

この仮説を元に世界平均気温偏差そのものと大気中 CO₂ 濃度変化率の関係をまとめたのが次頁に示す図 12 です。図 12 から明らかなように、予想通り世界平均気温偏差と大気中 CO₂ 濃度は位相差なく見事に同期することが示されました。

もう少し詳しく見ると、両曲線の極値の発現状況は全域にわたってよく同期していますが、両曲線間の開きは必ずしも一定ではありません。このことから、大気中 CO₂ 濃度変化率に対して気温変動は主要な原因ですが、気温以外の要因の影響もあることを示していると考えられます。例えば 1990 年以降の時期については、エルニーニョの発生と同時にフィリピン

のピナツボ火山で大噴火が起きるといふ大きな出来事が重なって起きた時期に対応しています。

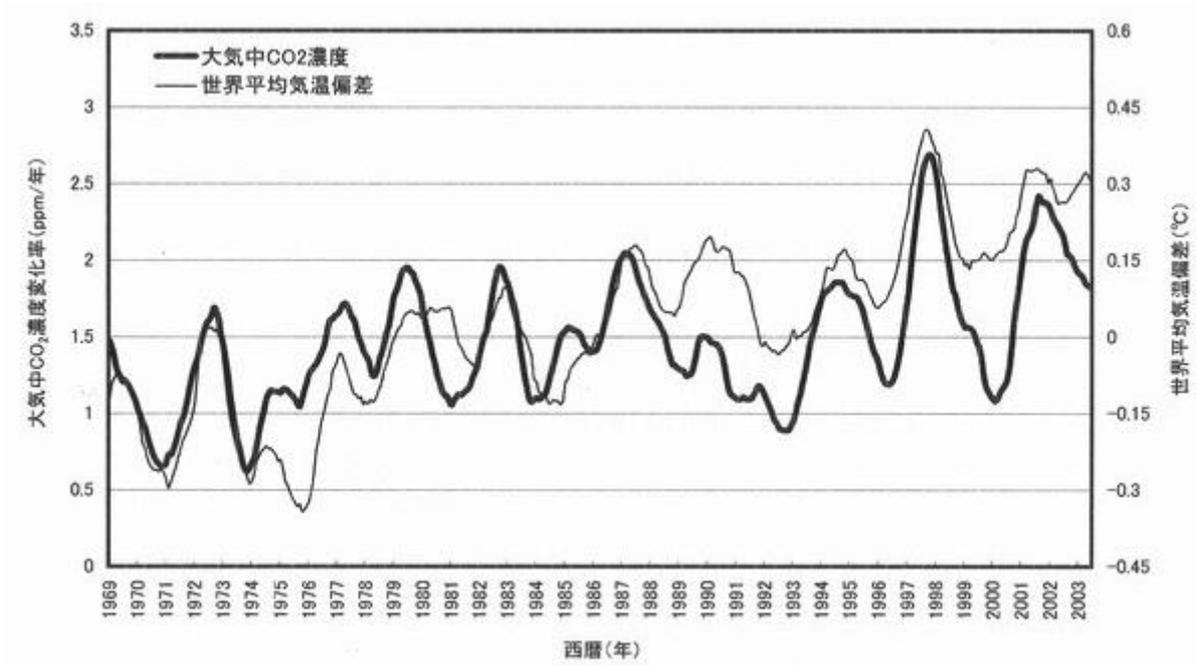


図 12 世界平均気温偏差と大気中 CO2 濃度変化率

さて、グラフの気温のスケールは℃ですから、気温という物理的な意味を持っています。0点はこの間（1971～2000年）の平均気温と等しいという意味であり、あくまでも相対的な尺度です。年増分のグラフに対して阿部が主張した『「気温が変化しないという原因により、CO₂が増加するという結果がもたらされた」などという因果関係はありえない』という批判はこの図には当たりません。

この図12から、気温がこの間の平均気温である場合には大気中CO₂濃度は年率約1.5ppm上昇するというを示しているのです。

註) 平均変化率のデータ処理について

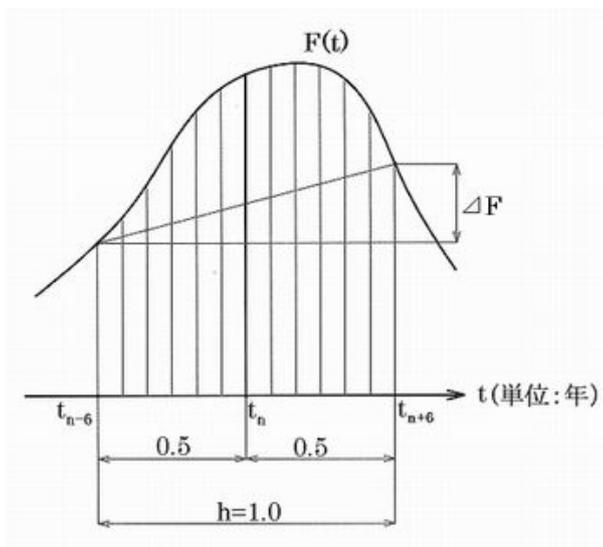
世界平均気温偏差と Keeling による CO₂ 濃度観測値は月毎の離散的なデータである。これらのデータをつないだ曲線を時間変数を t として仮に関数 $F(t)$ とする。関数 $F(t)$ の着目する年月 t_n における微分係数を次式（中央差分）で近似する。

$$\frac{dF(t_n)}{dt} \cong \frac{F(t_{n+6}) - F(t_{n-6})}{h} = \Delta F \quad (\because h = 1.0)$$

上式において区間幅を1年間（12ヶ月）にしたのは、世界平均気温偏差と大気中CO₂濃度の季節変動の影響を取り除くためである。

ΔF の物理的な意味は、世界平均気温偏差あるいは大気中CO₂濃度の1年あたりの平均的な変化率、あるいは関数 $F(t)$ で表される曲線の着目年月における勾配である。世界平均気温偏差についての単位は℃/年であり、大気

中 CO₂濃度についての単位は ppm/年である。今回の分析では、1年間当たり 12 点（月毎）について ΔF を計算し、これを結んだ曲線を示す。



変化率の定義

これまでは着目年月 t_{n+6} の観測値から 1 年（12 カ月）前の観測値を差し引いた値

$$(t_{n+6} \text{ の年増分}) = \frac{F(t_{n+6}) - F(t_{n-6})}{h} = \Delta F \quad (\because h = 1.0)$$

を「年増分」として用いてきたが、年増分を積分すると観測値そのものとの時間的な対応関係に 6 ヶ月の位相のずれが生じるため、今回新たに変化率を導入した。定義から明らかなように、これまでの年増分は 6 ヶ月遡った時点の変化率と等しい。気温と CO₂濃度の年増分どうし、あるいは変化率どうしの相対的な位相差は変化しない。

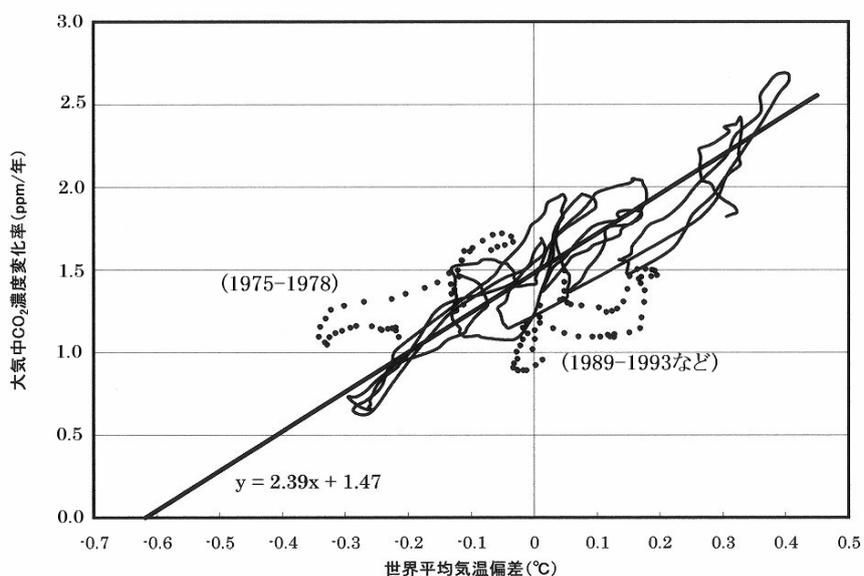


図 13 世界平均気温偏差と大気中 CO₂ 濃度変化率の散布図

更に図 12 に示された世界平均気温偏差と大気中 CO₂ 濃度変化率の関係を明らかにするために同じデータを用いた散布図を前頁の図 13 に示します。

図 13 に示した曲線は、気温以外の要因を排除するために、1990 年付近の時期など、両曲線間の開きの大きな時期を除いたデータをつないだものです。実直線はこの曲線についての回帰直線を示しています。

この回帰直線から、世界平均気温偏差の 0 点、つまりこの間の平均気温の状態では、年率 1.47ppm の大気中 CO₂ 濃度の上昇が見られたことを示しています。また、大気中 CO₂ 濃度変化率が 0 となる -0.62°C は、平均気温がこの間の平均気温よりも 0.62°C 低ければ大気中 CO₂ 濃度は定常状態になることを示しています。

以上の考察をまとめると、大気中 CO₂ 濃度が定常状態になる気温を $T_0 = -0.62^\circ\text{C}$ とし、大気中 CO₂ 濃度を表す関数 F の時間に対する変化率は世界平均気温偏差 T の一次関数として表すことが出来ます。

$$\frac{\partial F}{\partial t} = 2.39T + 1.47 = 2.39(T - T_0) = 2.39(T + 0.62)$$

大気中 CO₂ 濃度を表す関数は上式を時間 t で積分することによって

$$F = \int (2.39T + 1.47) dt = 2.39 \int T dt + 1.47t = 2.39 \int (T + 0.62) dt$$

と表すことができます。上式において、 $1.47t$ が大気中 CO₂ 濃度の長期的な変動傾向に対応します。また一番右端のように表現することによって、世界平均気温偏差と平均気温を分離することなく気温の効果として理解できることを示しています。

温暖化仮説では、Keeling 曲線あるいは年増分のグラフに現われた変動傾向を、変動部分と定常部分に分離して、変動部分は自然変動であり、定常部分は人為的な影響なのだという温暖化仮説のドグマに囚われ、また変動部分と定常部分を線形系として分離して理解しようとししました。これはまったく炭素循環モデルの場合と同じ線形的自然観による誤りであろうと考えます。

自然現象を理解しようとする時、観測データやそれを元に統計的に処理されたデータから、一体何が読取れ、あるいは何が不明なのかを常に意識しておくことが必要です。一つのデータから何らかの関係が推測されたならば、それを推測に止めるのではなく明らかにする手段を探し、確かめることが必要なのです。

参考

■ CO₂ を削減すれば温暖化は防げるのか 槌田敦

http://env01.cool.ne.jp/global_warming/report/tutida01.pdf

■ CO₂増加は自然現象だろうか 阿部修治（産総研）

http://env01.cool.ne.jp/global_warming/report/buturigakkai/buturigakkai01.pdf

■ CO₂濃度の増加は自然現象 近藤邦明・槌田敦（『天気』投稿論文）

http://env01.cool.ne.jp/global_warming/report/tutida04.pdf

3. 結論

以上、具体的な例を挙げながら、自然現象に関するデータからどのように現象を把握すべきかを考えてきました。

まず最も重要なことは、データの精度、解像度などの基本的な性状を理解し、利用しうる適用範囲を逸脱しないことです。また、系列の異なるデータ同士を定量的に比較する場合は、精度や解像度が同程度であることを確認することが必要です。

次に、データから現象についての何らかの関係性を抽象する場合、あくまでもデータから直接得られる情報をもって示さなければなりません。思い込みによる判断や、安易な推測による判断は厳に慎まなければなりません。

これは、まったく当たり前の結論とも呼べないような基本的な事柄ですが、現実の問題、例えば人為的 CO₂ 地球温暖化仮説のような、広く一般に信じられ私たちの社会生活にとっても重大な問題においてさえ、多くの点でこの基本的な事柄を逸脱しているのです。

自然現象を認識する場に臨んで、私たちはデータに対してどこまでも虚心で向かい合うことが最も重要なのです。自戒を込めて。

(2008/06/02)