

# Mauna Loaの炭酸ガス濃度長期変動の全球排出量累積値による説明

## An explanation of long term Keeling curve increasing by accumulated fossil fuel burning carbon dioxide emission

小林 博和

Hirokazu Kobayashi

### 1.はじめに

大気中炭酸ガス濃度の増加率は地球温暖化問題における基本的な関心事項である。例えば D.C.Keeling(1995)らによるMauna Loaにおける炭酸ガス濃度の長期観測は、地球大気全体の炭酸ガス濃度が増加していることを明らかにし、これに関心を持った研究者らが、大気中の炭酸ガス濃度の増加は、地球大気の応答モデルを用いるかぎり、地球の温暖化という人類の未来に対する大きなリスク要因であるという結論を導いたからである。提出されたりリスクは極めて重大であるゆえに、科学者は広範囲にわたって、温暖化に係る地球科学分野について研究を続けてきた。残念ながら、大気中炭酸ガス濃度は増加傾向を続け、多大な国際的努力や数多くの国際会議にも係らず、その増大率は楽観的にみても、抑制されているようにはみえない。

なかでも大気に放出された炭酸ガスが、その後、大気と海洋と陸上植物の間でどのように分配されるかについては、政策決定の上からも重大視されてきた、なぜなら分配率は、森林の形成や植林活動によって、地球温暖化を防止するという政策の決定に強く係っているからである。それゆえに科学的側面からも分配率の推定は、R.F.Keelingら(1992)以来は常に主要な研究対称の一つであり続けてきたのである。ただし、分配率が推定し得るから、陸上植生が大気中炭酸ガスの正味の吸収源である、とは言えないのであるが、社会的には長い間、陸上植生の保護が地球温暖化対策の主要な柱であると、看做されてきたという経緯がある。

本論は、大気中炭酸ガス濃度と排出炭酸ガス積算量の関係について述べ、大気中炭酸ガス濃度の増加とは、人類の化石燃料の消費活動の結果そのものであって、化石燃料消費の停止以外にその増加を避ける手段のないことを示す。

### 2. 炭酸ガス排出量の積算量と大気中炭酸ガス濃度の比較

ハワイ諸島にあるMauna Loa山では1950年代から大気中炭酸ガス濃度測定が継続されている。太平洋の中央にあって、工業地域などから隔離されているために、北半球全体の炭酸ガス濃度を代表していると考えられており、地球全体の大气中炭酸ガスの挙動を考える上も、そので基準値とみなし得る。そこで、この観測データのうち、1959年1月～2012年12月の間の月平均データ(注1)を以下の考察の対象と

する。その約50年間の変化をプロットしたものが以下の図である。季節変化にともなう植生の影響である1年周期の変動を除くと、1990年代に若干の上に凸な変化が認められるが、全体としては連続的に増加している。ことがわかる。本論の目的はこの変化を化石燃料燃焼に伴う炭酸ガス排出量によって説明することである。

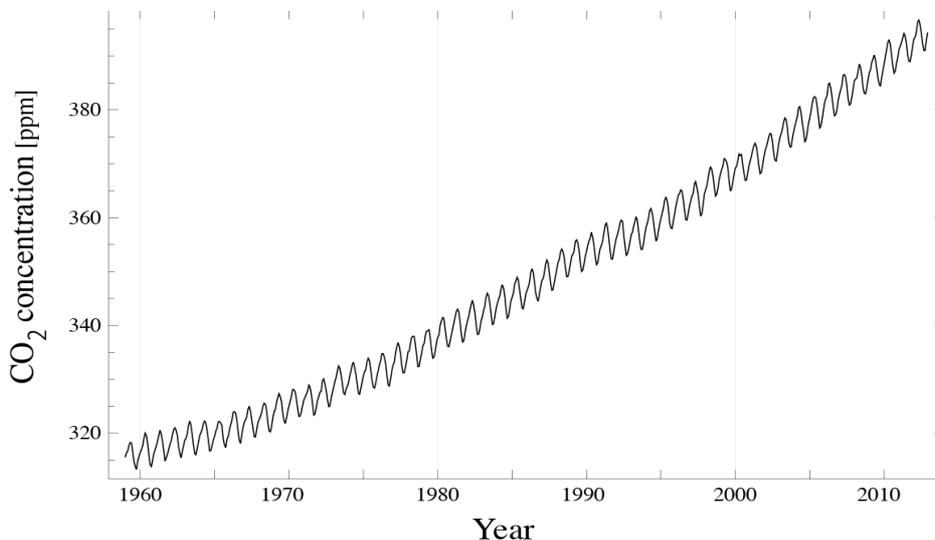


図1 Mauna Loaにおいて観測された大気中炭酸ガス濃度の変化

### 2.1. 化石燃料燃焼にともなって排出された炭酸ガス量の積算

CDIAC (Carbon Dioxide Information and data Archive Center) は全世界の炭酸ガス排出量データの取りまとめを行っている。ここでは、上記の大気中炭酸ガス濃度の観測期間に合わせるべく1959から2008年までの化石燃料燃焼による炭酸ガス排出量を用いた(注2)。化石燃料燃焼による排出量は年データなので、この後に述べる、月平均値である炭酸ガス濃度とマッチングさせるために補間したデータ列を作る(注3)。図2は炭酸ガス排出量の年変化であり、図3はその積算量の年変化である。

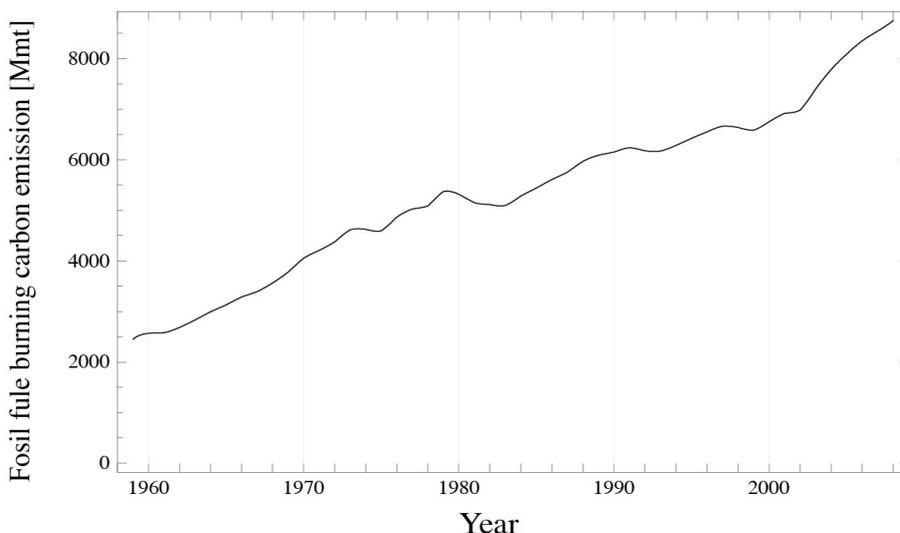


図2 排出された炭酸ガス量の推移

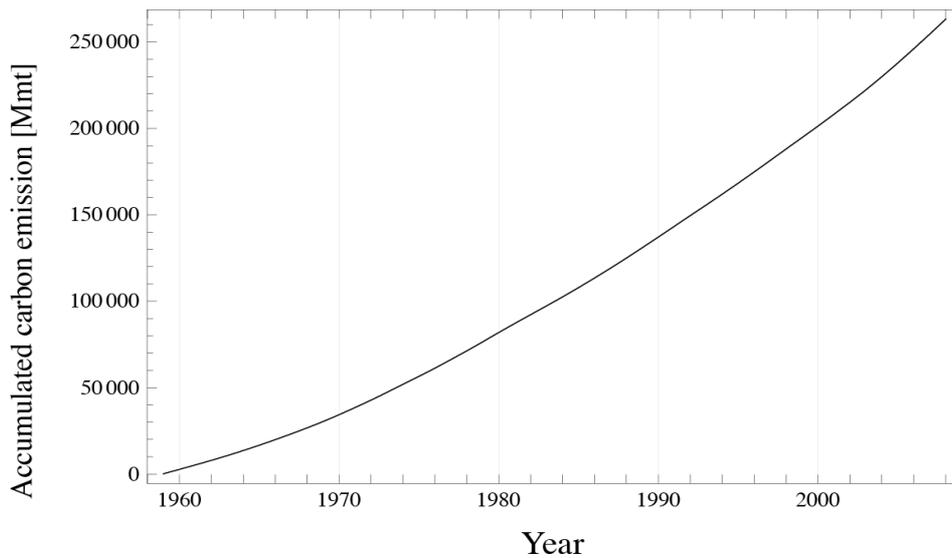


図3 排出された炭酸ガスの積算量の推移

## 2.2. 化石燃料燃焼にともなって排出された炭酸ガスの積算量と大気中炭酸ガス濃度のフィッティング

大気中の炭酸ガスのライフタイムの長さを考慮して、大気中に排出された炭酸ガスがそのまま大気に追加され、かつある時刻に対象領域全体に存在する量に比例した量が除去されるという、ボックスモデルを考えて、排出量の積算値を大気中炭酸ガス濃度を比較してみる。すなわち、ある時点における炭酸ガス濃度 $y$ が排出量の積算量 $E_t$  とそれに比例した減少量 $m \cdot E_t$  および常に一定な量 $c$  で表されると考えるとその関係は次式で表される。

$$y = (E_t - m \cdot E_t) + c$$

ここで、 $1 - m$ を $k$ と置けば、炭酸ガス濃度 $y$ は $E_t$ に関する一次式 $y = k \cdot E_t + c$ であることに変わりないことがわかる。そこで、図3に示した積算量を、図1の大気中炭酸ガス濃度にフィッティング（注4）してみた結果が図4である。図に見えるように両者はよく一致している。

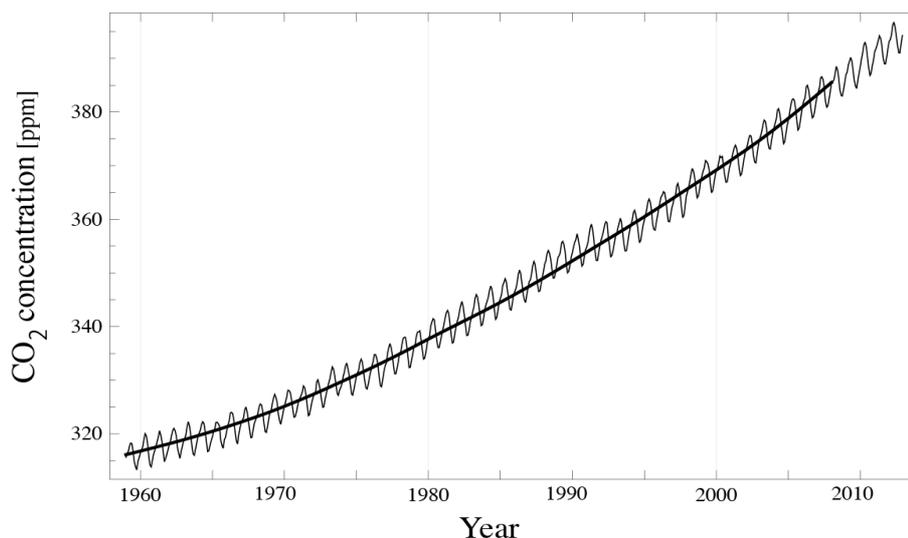


図4 化石燃料に由来する大気中に排出された炭酸ガスの積算量とMauna Loaで測定された濃度のフィッティング結果(太線が積算量でフィッティングした結果)

### 3. フィッティング残差の解析

フィッティング後の両者の差を示したのが図5である。両者の差すなわち残差には、陸上植物の季節変動にともなう炭酸ガスの吸収と放出分が含まれている。そこで、次にこの変動分を1年の周期をもつ三角関数でフィッティングしてみる。すなわち、残差を三角関数の重ね合わせで表す(注5)。関数の項数はフィッティングの残差が最小となるように決定した。

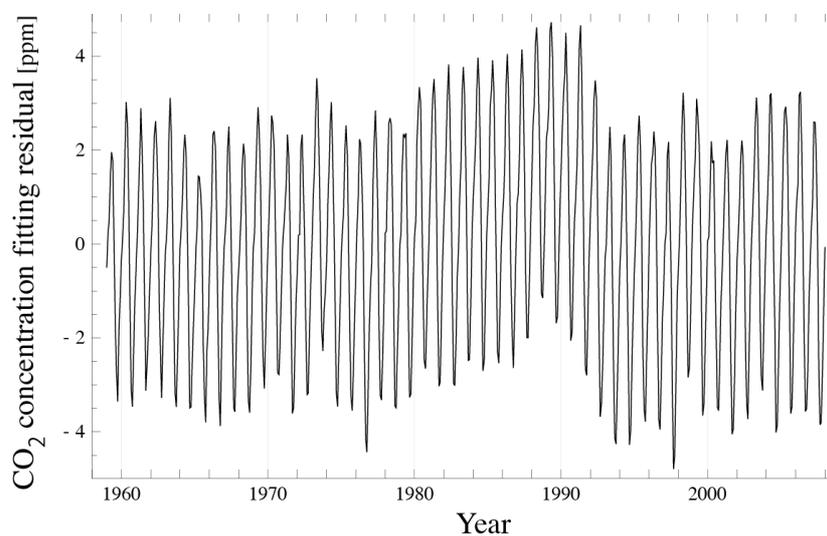


図5 フィッティング後の残差

三角関数によるフィッティング結果を上記の残差から差し引く、すなわち対象としている期間、陸上植物による影響と考えられる炭酸ガス濃度の周期的変動の振幅と周期、位相は、一定であるとした季節変動を取り除いた結果が図6に表される。

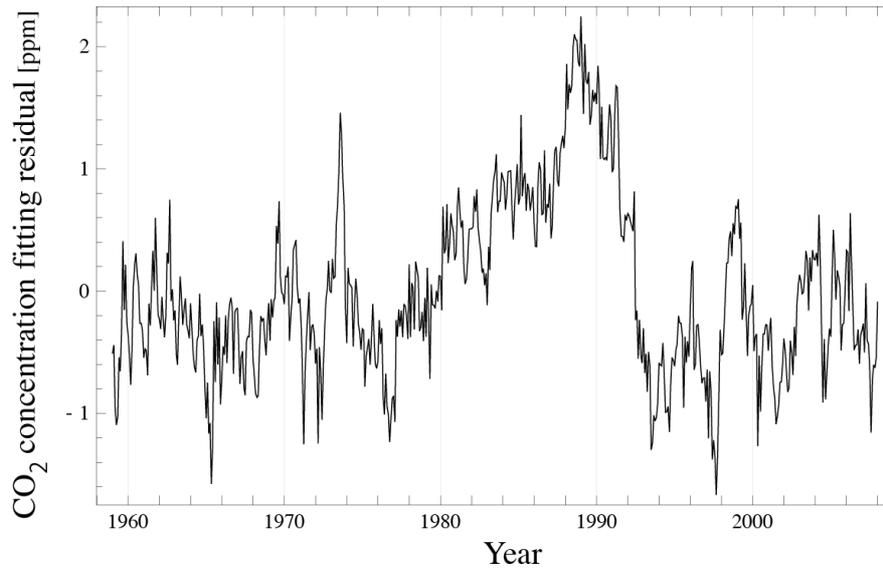


図6 大気中炭酸ガスの変動から化石燃料燃焼により排出された量の積算値と季節変動を取り除いた残差

この結果によれば、50年間の両者の差の残差のRMS(Root Mean Square)は0.7 ppm である。これは50年間の炭酸ガス濃度の中央値が350 ppmとすれば、約0.2%に相当する。この結果は50年間にわたって観測された物理値が、人為的に排出された量の年々値と一定の係数のみによって、0.2%の精度で推定可能なことを示すものである。Mauna Loaの測定値の不確からしさが0.07 ppm程度であること(注6)を考慮すると、この推定が極めて高い精度であること、言い換えれば、人為的な炭酸ガス放出量のみによって、大気中の炭酸ガス濃度の値が、高い精度で説明できるということに他ならない。

また、図5に示した植物の活動に由来する季節変動のRMSは2.2 ppmである。即ち、上記の推定の誤差は植物による季節変動の大きさを下回るものである。即ち、少なくともこの50年間に、人為的原因であれ、天然の原因であれ、植物によって一旦大気中に排出された炭酸ガスが固定されるという分配率が有意であるためには、植物活動の指標、たとえば季節変動振幅の長期的にみた場合の変動の大きさが、上記の残差RMSの0.7 ppmを超えるものでなければならないだろう。

#### 4 周期解析による大気中炭酸ガス濃度の変動成分の分離

さらに、図5に示した一次式と1年周期の三角関数によってフィッティングした後の残差について、これを、(a)一年を周期とする季節変動をもつ吸収源、すなわちその活性が季節により変動する陸上植物、および、(b)季節変動に関係しない吸収源(ただし吸収量が常に大気中濃度に比例するとは限らない)としての海洋、および(c)大気中への滞留分に単純化した上で、変動の周期に着目しつつ考察をすすめる。

既に述べたように、炭酸ガス季節変動が陸上植物の活性によるものであることとして、その活性指標の一つが振幅であることは認めてもよいであろう。そこで最初に、この振幅の変化について考察してみる。そ

のために図6に示した、残差に重なっている一年の周期をもつ三角関数では表現できなかった短い周期の変動あるいはランダムな変動を、ローパスフィルタをかけて、取り除いてみる。数年程度より短い周波数成分を持つ変動分を取り除くために、残差の時系列にフーリエ変換を施し、ヒューリスティックに選んだカーネルのフーリエ変換を乗じた上に、逆フーリエ返還を施してみる（注7）。このローパスフィルタを用いて1年程度の短周期の変動を取り除いた結果が図7である。

ここまで、図7にみられる1980年頃から始まり、1990年頃に終息したようにみえる10年程度続いた大きな変動、（ここではこの変動をdecade anomaly、この後単にアノマリーと呼ぶことにする）については言及してこなかったが、前節までの季節変動成分の長期変動の議論をふまえて、その性質について考察する。

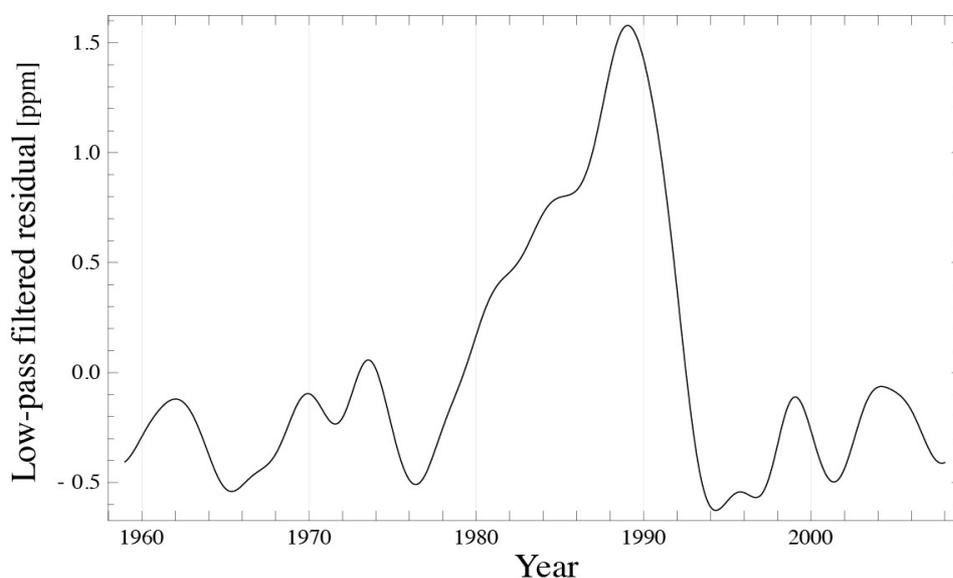


図7 ローパスフィルタにより残差から短周期変動分を取り除いた結果

#### 4.1. 大気中炭酸ガス濃度の一年より長い周期の変動について

最初に述べるべきは、この現象は火山活動とは無関係であることである。例えば、1991年の歴史的な大噴火であるピナツボ山の噴火は、このアノマリーの後の事象であり、両者に相関関係のないことは明らかである。

このアノマリーの後半の急激な炭酸ガス濃度の減少は、C.D.Keeling (1995) も着目した。この中でKeelingは”We point out, in closing, that the unprecedented steep decline in the atmospheric CO<sub>2</sub> anomaly ended late in 1993. Neither the onset nor termination was predictable. Environmental factors appear to have imposed larger changes on the rate of rise of atmospheric CO<sub>2</sub> than did changes in fossil fuel compustion rates, suggesting uncertainty in projecting future increases in atmospheric CO<sub>2</sub> solely on the basis of anticipated rates of industrial activity.”と述べて「工業活動による人為的な影響だけで大気中炭酸ガス濃度の増加を説明することに

は不確かさが伴う」としているのだが、既に論じたように、実際にはこのアノマリーは一過性のものであるとすると、対象とする期間を通じて大気中炭酸ガス濃度は人為的な影響として充分説明できるのである。

このアノマリーの原因を考察する前に、アノマリーを含む長周期の変動を用いて、残差の季節変動分についてより詳しくみることにする。

#### 4.2. 一年周期の変動について

残差の振幅を陸上植物の活性の指標の一つとして、この振幅の変化について考察してみる。図5に示した陸上植物に由来すると考えられる変動には、まだ長周期の変動分が含まれている。そこで、ここから、図7の結果を差し引けば、陸上植物の季節変動分のみ振幅の長期変動が得られると期待できる。その結果を示したのが図8である。

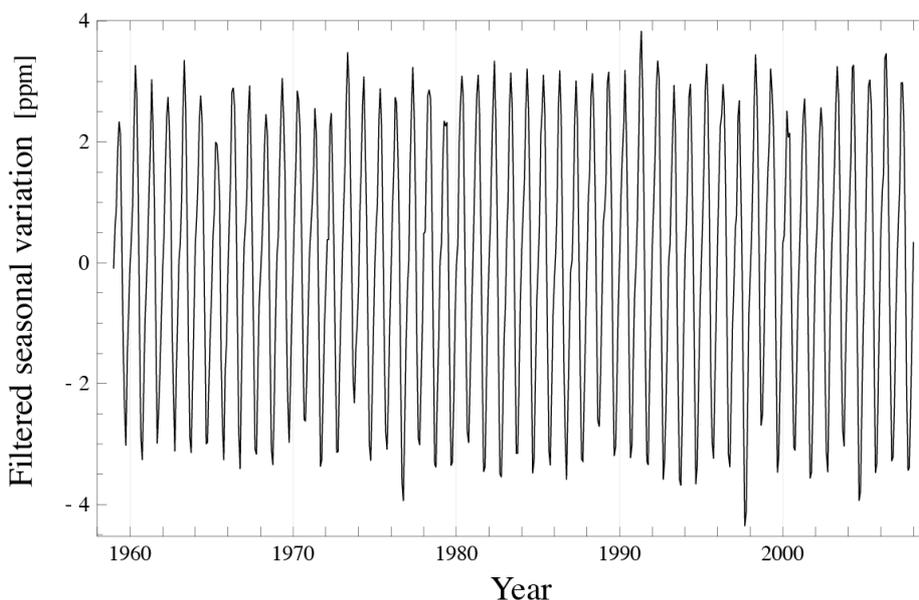


図8 1年程度の短周期成分を取り除いた後の季節変動振幅

図によれば振幅は僅かに増加する傾向がみえるものの、全期間を通して、その他の特徴的な変化を示しているようにはみえない。また図7により示したアノマリーがこれに大きな影響を及ぼしているようにも見えない。そこで、より詳細にこれをみるために、振幅の年々変動の絶対値をとった後、移動平均した結果が次の図9である。

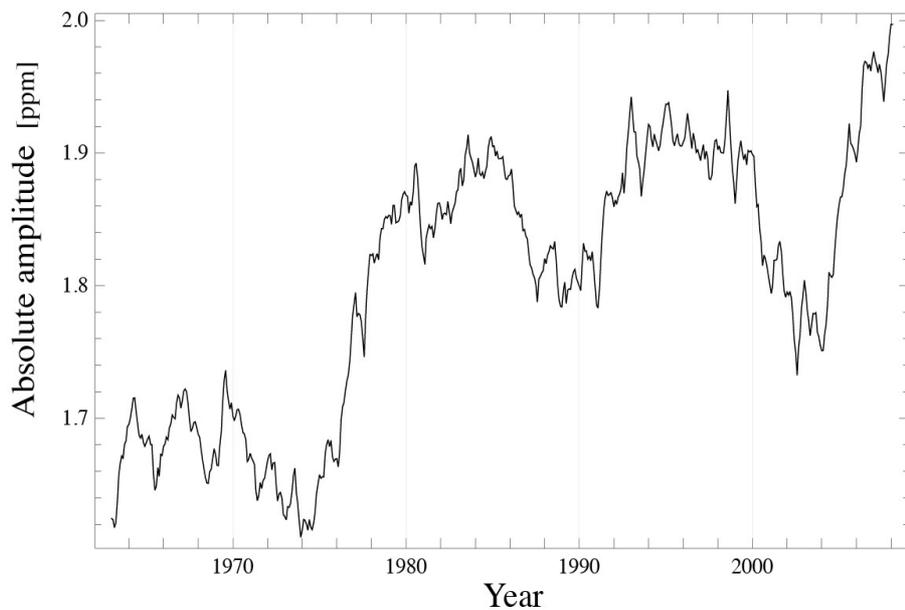


図9 季節変動振幅の絶対値の年々変動

上図によれば、季節変動振幅は、10年程度の周期とみられる大きな変動と、年々の小さな変動はあるものの、全対象期間とした50年間に0.4 ppm程度増加しているように見える。それでは、この振幅、ここでは陸上植物の活性と看做している変動分の、長期的な増加傾向の原因はどのようなものであると推察されるであろうか。植物の活性に最も影響を与えるのは気温であるのはよく知られた事実である。そこで1959年～2012年までの北半球の気温の平均値からの偏差(注8)との関係を試みる。

平均気温からの偏差に、スケーリング(注9)した振幅の絶対値を重ね合わせたものが図10である。

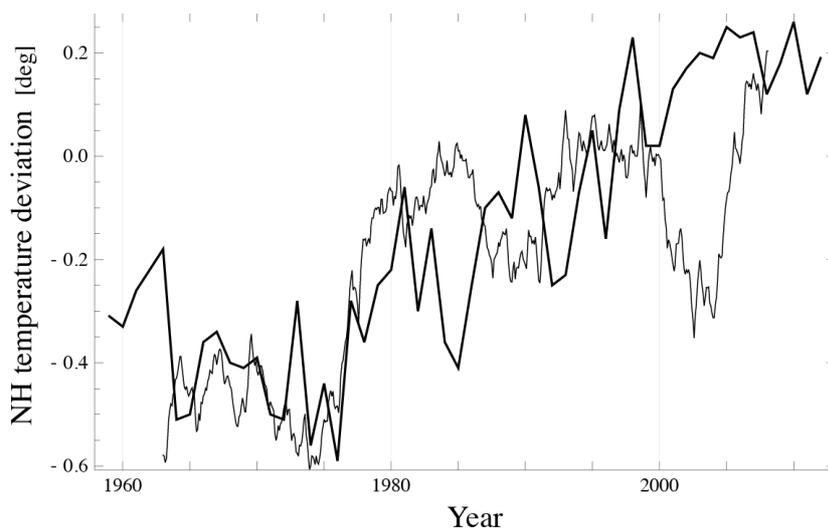


図10 北半球の温度変動とスケーリングされた振幅の絶対値との比較  
(太線が気温の偏差)

図によれば、1980年頃までは、植物活性と気温偏差との間には相関関係があるように見えるが、その後

は、必ずしも関連があるようにはみえない。

1990年代までの両者の関係を考察したC.D.Keeling(1996)は、”In addition, the annual amplitudes show maxima which appear to reflect a sensitivity to global warming episodes that peaked in 1981 and 1990. We propose that the amplitude increases reflect increasing assimilation of CO<sub>2</sub> by land plants in response to climate changes accompanying recent rapid increases in temperature”と述べ、「1981年から1990年の間にその頂点があった全球的な温暖化エピソードへの関連性を反映して、季節変動の年振幅もその最大値を示した。この振幅の増加は、近年の急激な気温上昇を伴う気候変化に反応した地上植生による炭酸ガス同化の増大の結果である」としたのであるが、図10にみられるように、1980年代まで良い相関関係がみられた気温と振幅は、その後、独立な変化をするようになり、振幅は全体として増加傾向にあると言えるものの、それが気温上昇と直接的に関連しているかどうかは、必ずしも明らかではない。

以上の考察から、このアノマリーについては以下のように取りまとめられる。

- (1)1980年代から1990年代にかけての変動（アノマリー）のあった時期に、例えば火山の大噴火のような、全球の陸地の植生に係わる一時的で大きなイベントが見いだせないとすれば、この変動は化石燃料消費と炭酸ガス濃度の季節変動からは説明できない、特異的な現象である。
- (2)このアノマリーが陸上の植生と無関係であるとして、この期間を除外すると化石燃料消費量から推定された、大気中炭酸ガス濃度のフィッティング残差のRMSはさらに減少し、0.7ppmの半分以下になる。
- (3)このアノマリーの原因が、陸生植物に依らないならば、その原因は海洋生物の変化に求めるべきである。

海洋生物の変化と大気中炭酸ガス濃度との関連については、必ずしも十分な研究が行われているとは言い難いものの両者の関連性が示唆される報告も存在する。例えば、H.E.Garcia, et.al. (2005)はNOAA/OSAが蓄積した海洋データを用いて海洋中の酸素量とAOU(apparent Oxygen Utilization：みかけの酸素消費量)の長期変動について議論している。この論文の中に示された北半球における海洋中酸素濃度に、図7に示した残差の長期変動をスケールリングしてマッチングさせたものを示したのが図11である。

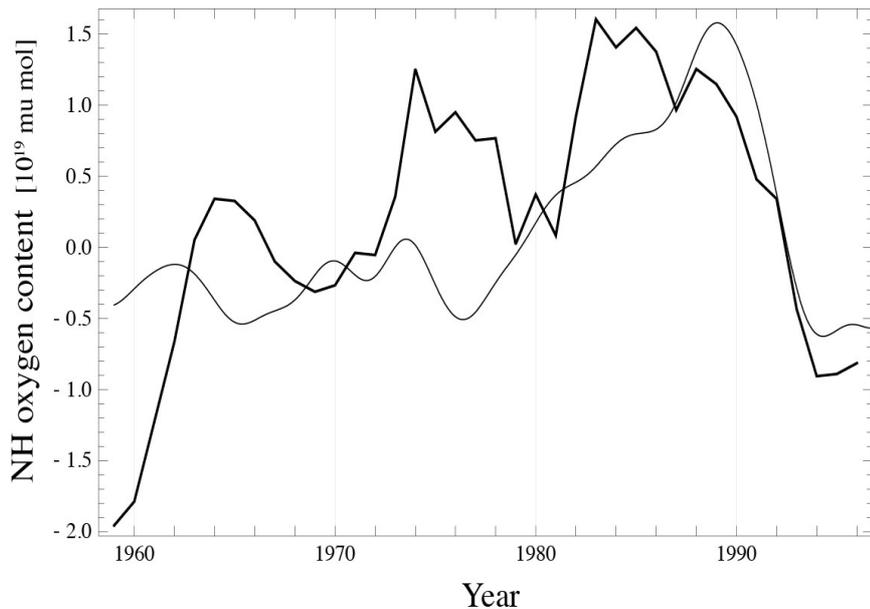


図11 北半球海洋中の酸素濃度とスケーリングした長周期残差の比較  
(太線が酸素濃度)

図の示すところによれば、海洋中の酸素濃度の変化は、アノーマリーの終了時とよい一致を示していることが分る。しかしながら、この結果のみで残差の長期変動を説明することはできない。これまでの議論でその原因を明確にできなかった残差のアノーマリーと海洋中に現象が無縁ではない可能性を示すものと考えらるべきであろう。

## 5 まとめ

これまでに述べた論述は、以下のように取りまとめられる。まず以下の前提条件が適切であるとする。

- (1) Mauna Loaにおいて観測されている炭酸ガス濃度の変動は、その時系列に含まれる季節変動の位相や振幅が、50年間その性質を変えないと仮定した上で、全球の化石燃料燃焼による炭酸ガス排出量の積分量で説明すると、その残差のRMSは0.7 ppmである
- (2) 50年間の炭酸ガス濃度の中央値を350 ppmとした時、0.7 ppmはその約0.2%である。大気の物理量測定という観点から、0.2%は非常に誤差の小さい推定値であると看做せる

これらの前提条件のもとに以下が言える。

- (1) 化石燃料の燃焼による大気中排出量積算量の一次関数で炭酸ガス濃度変動が説明できるということから、排出量データには信頼性がある
- (2) 大気中炭酸ガスが極めて安定であることが再確認できる。なぜなら、何らの変化があるとすれば排出量累積値の一次の関数ではフィッティングできないであろうから
- (3) ローカルに観測される季節変動が50年間でその振幅や位相が一定であるとして導いた、残差のRMSが

小さいことは、この50年間に陸上の植生の大気中炭酸ガス濃度に対する影響は前提条件の範囲で非常に小さいことを示す

- (4)大気中炭酸ガス濃度の増加に伴って植生による季節変動の振幅は増加していると看做すことができる。しかし振幅の増大が炭酸ガス濃度変動の残差に影響を及ぼす程の大きさであったとは言い難い
- (5)残差の50年間の変動に一定の増加・現象傾向は見られない、すなわち、50年間におよそ300 ppmから400 ppmまで増加した（大気中の蓄積量が1.3倍に増加した）過程に対して陸上植生の吸収と放出過程は、これに追従していない

以上述べたように、残差の変動に陸上植生の変化を見いだすことが困難であることは、すなわち、この50年間については、人間の行った森林破壊および植林等の影響も微小であったということである。結局のところ、大気中の炭酸ガス濃度の増加は、少なくともこの50年間については、化石燃料の燃焼による結果がその主たる原因である。即ち、化石燃料の消費を停止しなければ、大気中炭酸ガス濃度の増加を停止させることはできない。

#### 注

- (1)NOAAのページからデータ(interpolated)を抜粋した。

<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo>

- (2)CDIACの炭酸ガス排出量データは、以下のページにある。

[http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751\\_2008.ems](http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2008.ems)

- (3)1959年と2008年のデータから、1959年1月、2月...12月を作ることにする。そこで、1959年と2008年の値を端点として、データ列の補間関数を作り、1959年1月から2008年1月の間の各月についてデータリストを作る。このとき、1959年1月の値は1959年の排出量の1/12である。（単位はmillion metric ton）

- (4)Mauna Loa の観測値  $C$  は、化石燃料燃焼に伴う大気中炭酸ガス排出量  $A$  を用いて、 $C=0.000264*A+316.06$

と表される。

- (5)残差を  $R$  と置いた時、

$$R=a \sin(2\pi(x+pa)/dL)+b \sin(2\pi(x+pb)/dL)+c \sin(2\pi(x+pc)/dL)+d \sin(2\pi(x+pd)/dL)$$

と表した。このとき、 $a \rightarrow 2.80664$ ,  $b \rightarrow 0.771294$ ,  $c \rightarrow 0.0888719$ ,  $d \rightarrow -0.0665677$ ,  $pa \rightarrow$

$-1.22472$ ,  $pb \rightarrow 1.54113$ ,  $pc \rightarrow 1.2914$ ,  $pd \rightarrow 0.690462$ である。

- (6)Mauna Loa における測定は、米国国家標準とされる標準炭酸ガスを参照しながら作成された作業標準を参照しながら実施されている。標準ガスの精度とその時間的ドリフトについては様々な方法で検証されている（ Zhao, C.L.and P.P.Tans, 2006 ）

- (7)カーネル関数は  $\text{Exp}[-n^2/300]/\text{sqrt}[2\text{Pi}]$  ( $n=-294,..0...294$ ) をさらに正規化したものを用いた。

- (8) 気温偏差は気象庁が公表しているデータを用いた。なお、気温の平均値とは、30年間に平年値の統計期間として西暦の末尾が1となる年に10年ごとに更新する値である。（[http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/temp/list/an\\_wld.html](http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/temp/list/an_wld.html)）
- (9) 両者間の相関係数を変えずに、一方に拡大・縮小と移動操作を加えている。

#### 参考文献

- (1)R.F.Keeling, et.al., Seasonal and interannual variations in atmospheric oxygen and implications for the global carbon cycle, Nature, Vol .358, 27 Augst 1992
- (2)C.D.Keeling, et.al., Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980, Nature, Vol .375, 22 ,1995
- (3)C.D.Keeling, et.al., Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO2 measurement, Nature, Vol .382, 1996
- (4)H.E.,Garcia, et.al., On the variability of dissolved oxygen and apparent oxygen utilization content for the upper world ocean: 1955 to 1998, Geophysical Research Letters, Vol.32, 2005
- (5)Zhao, C.L.and P.P.Tans, Estimating uncertainty of the WMO mole fraction scale for carbon dioxide in air, Journal of Geophysical Research - Atmospheres, 111, D8, 2006