

§ 1. 気温とCO₂ 濃度の因果関係

気温の観測値と大気中のCO₂ 濃度の関係について、その先駆的な研究は、大気中CO₂濃度の精密連続観測を行ったKeeling によって行われた。Keeling は、大気中CO₂ 濃度の長期的な変動傾向を取り除いた変動と世界の平均気温の変動の関係を示し（図1）、大気中のCO₂ 濃度の変動が気温変動に対して1 年程度の遅れで追隨して変動することを示した。

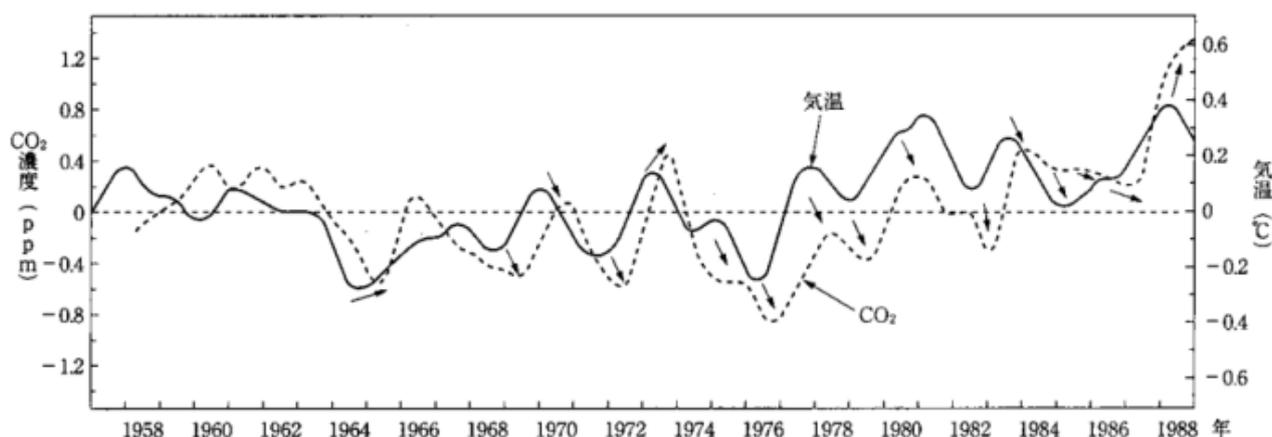


図1 気温とCO₂ 濃度の経年変化

(C.D.Keeling ; in D.H.Peterson(ed.) ; Geophysical Monograph 55 (1989)210, Fig.63)

このKeeling の報告について、根本順吉氏は、CO₂ 濃度の変化は気温の変化を後追いつており、気温が原因でCO₂ 濃度は結果であると発表した（根本順吉「超異常気象」中公新書）。

これに対して、河宮未知夫氏は気象学会誌「天気」2006 年6 月号において、「問題とされている図に関してまず注意しなければならないのは、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。」と述べた。

§ 2. 気温変化率とCO₂濃度変化率の因果関係

Keeling の報告には確かにCO₂ 濃度の「長期変動」を取り除くという恣意的な操作が含まれている。このような操作をせずにKeeling の研究を追試するために、筆者は大気中CO₂ 濃度と世界平均気温偏差の微分値^{註)}を比較した（図2）。

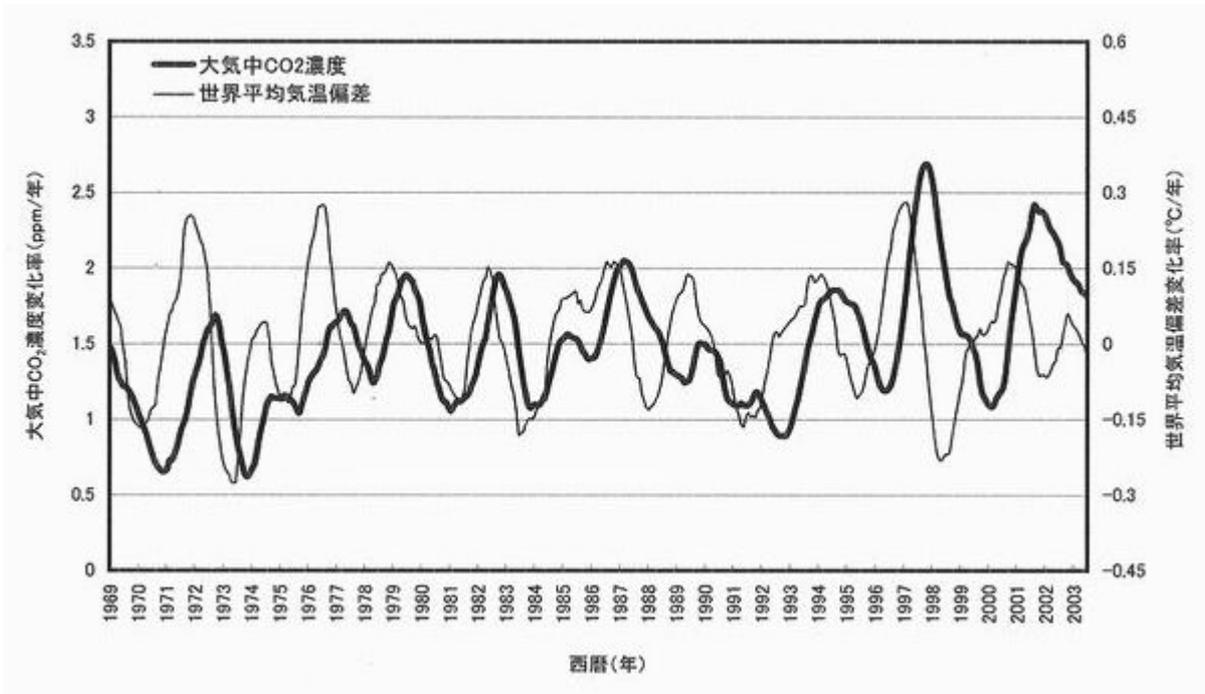
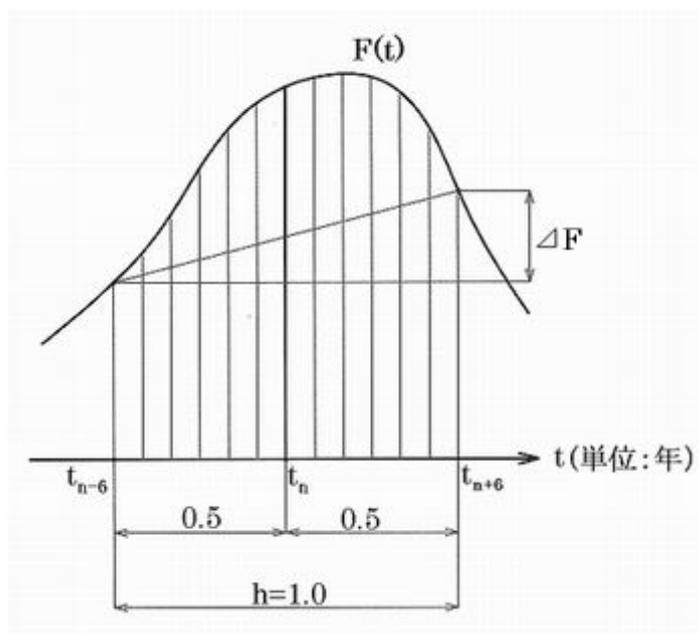


図2 気温変化率とCO₂濃度変化率の経年変化(13ヶ月移動平均)

図2では、CO₂濃度の長期的変動を取り除いていないので、河宮氏の批判はあたらない。そして、1969～2003年の全領域で気温の変化率がCO₂濃度の変化率に1年程度先行しているから、気温変化が原因でCO₂濃度変化が結果であることがわかる。

註)微分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。

△F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△Fを計算し、これを結んだ曲線を示す。

これまでこのHP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。

3. 気温とCO₂濃度変化率との因果関係

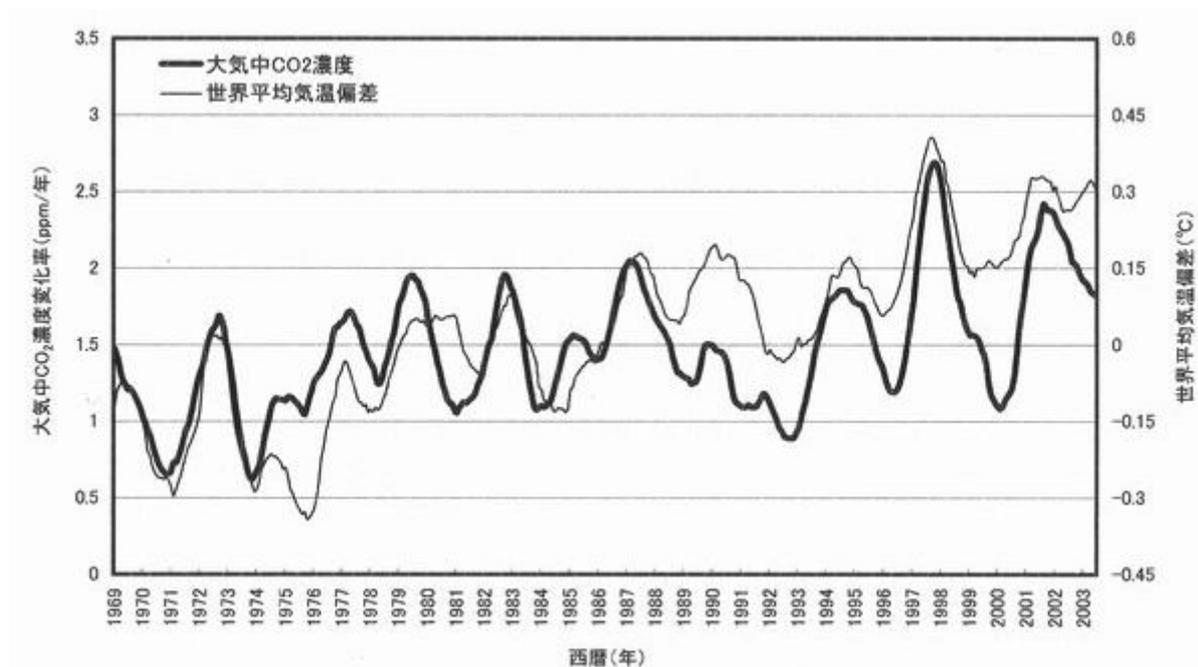


図3 気温とCO₂濃度変化率の経年変化(13ヶ月移動平均)

図2 について、槌田敦氏から次のような指摘があった。

「図2 について、これまで気温の微分（年増分）がCO₂ 濃度の微分（年増分）に1 年ほど先行すると解釈してきたが、この図において気温の微分がゼロの時、CO₂ 濃度の微分は極値を取っているように見える。気温の微分がゼロということは、気温が極値であることを示すから、気温とCO₂ 濃度の年増分が直接対応するのではないかと思われる。つまり気温そのものがCO₂ 濃度上昇の原因である」。

そこで、気温とCO₂ 濃度の変化率の関係を示したのが図3 である。この図から大気中CO₂ 濃度変化率と世界平均気温偏差は同期して変化することが示された。

§ 4. 考察および結論

今回得た世界平均気温と大気中CO₂濃度変化率の関係を現象面から解釈すると、CO₂を大気中に放出するという現象の反応速度が世界平均気温つまり環境温度に支配されていると解釈することが出来る。大気中のCO₂濃度は変化率の積分値であるから、それだけ位相が後にずれることになる。この結果からも気温変動が原因となって大気中CO₂濃度がこれに追隨して変化することが合理的に示されたと考える。

また、今回得たグラフから、世界平均気温が-0.45℃であれば、大気中CO₂濃度変化率はゼロ、つまり大気中CO₂濃度は変化しない定常状態になると考えることが出来る。つまり、今回の分析の対象となった1971～2000年の平均気温は、大気中CO₂濃度が定常状態にある気温よりも0.45℃程度高温であったと考えられる。

以上から、大気中のCO₂濃度が継続的に上昇しているのは、現在の気温が大気中CO₂濃度の定常状態になる基準温度よりも高いからであると言う槌田氏の主張（季刊『at』11号2008年3月発刊予定）は、考える合理的な解釈だと思われる。

(2008.03.06)

- 1) C.D.Keeling et al. ; in D.H.Peterson (ed.) ; Geophysical Monograph 55 (1989) p.210. Fig.63.
- 2) 根本順吉「超異常気象」（中公新書）。
- 3) 河宮未知夫「気温の変化が二酸化炭素の変化に先行するのはなぜ？」（気象学会誌「天気」2005年6月号pp.71-72）