

## 1. 今回取り上げる論文

Walker, J. C. G., P. B. Heys and J. F. Kasting (1981) A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of the Earth's surface temperature, *J. Geophys. Res.*, **86**(C10), 9776-9782

**abstract:** 我々は、負のフィードバックメカニズムによって地質的時間スケールを通じて、大気中の二酸化炭素分圧は緩衝されることを示した。このメカニズムは、ケイ酸塩鉱物の風化率が地表面温度に依存し、また地表面温度は温室効果を介して二酸化炭素分圧に依存するというものである。このメカニズムの定量的な詳細は推測の域をでないけれども、太陽系形成初期から生じ続けてきたと信じられている太陽光度の増加に対する地球の地表面温度の安定化を部分的に示しているように見える。

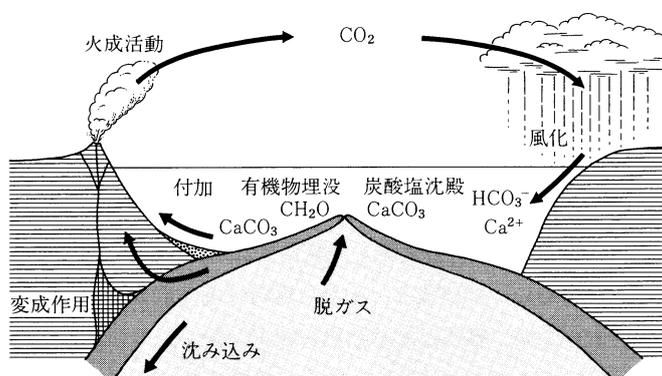


図 2.4 数十万～数百万年以上の時間スケールで見た場合の炭素循環システム (Tajika and Matsui (1992) にもとづく)。

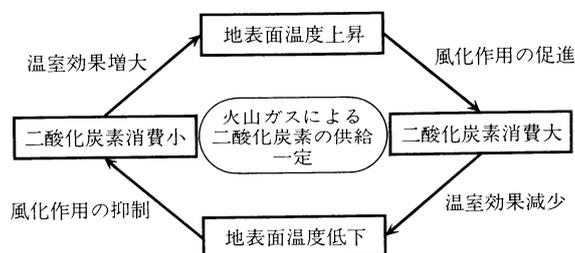


図 2.6 炭素循環システムにおける負のフィードバック機構の概念。

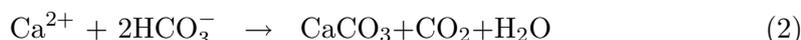
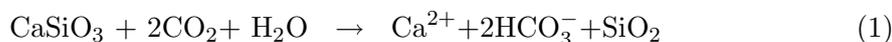
図 1: 上) 炭素循環の概念図, 下) フィードバックメカニズムの概念図, とともに田近, 1996, 岩波講座地球惑星科学 2 地球システム科学

## 2. 目的

以下では、我々は地表面温度変化に対する二酸化炭素分圧のフィードバックメカニズムの効率の見積もりを示す。我々はまず最初に全球平均風化<sup>1</sup>率と温度及び二酸化炭素分圧を結びつける試験的な関数関係を展開していく。次に、太陽光度と二酸化炭素分圧に対する全球平均温度の依存性を近似する。そのとき、提案したフィードバックメカニズムが太陽光度の変化に対する全球気候への衝撃を和らげていたかどうかを見る事ができる。

## 3. 全球平均風化率の二酸化炭素分圧・温度依存性

二酸化炭素の大気中からの除去機構として、ケイ酸塩鉱物の化学風化とそれにつづく石灰岩の沈殿を考える。<sup>2</sup> 反応式は以下の通り。上の式が化学風化、下の式が炭酸塩の生成を表している。この一連のプロセスによって 1 mol の二酸化炭素が大気-海洋系から除去される。



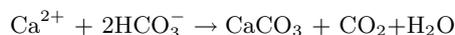
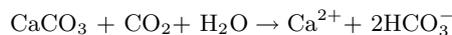
風化率のパラメータ依存性はこれまでの実験 (Lagache 1965; 1979) 及びフィールド観測 (Meybeck 1979) データから推測する。<sup>3</sup>

**雨水量依存性** フィールドデータより、明らかな依存性を示さない。SiO<sub>2</sub> 濃度は雨水量に強く依存してはいない (図 2a)。

**地表面温度依存性** フィールドデータ及び実験データより、実験データで得られた依存性はフィールドデータと合理的に一致している (図 2b)。よって実験データ

<sup>1</sup>ここで用いる”風化”は化学的風化を指して用いる。**化学的風化 (chemical weathering)**: 水との反応によって地表条件 (温度, 圧力, 酸化還元状態) で安定な鉱物の集合体へと変化する化学過程。主として大気中や土壌中の二酸化炭素が降水や地下水に溶け込んで炭酸 (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) となり、それが地表も岩石中に含まれる鉱物を溶解したり水和するような現象のこと。[田近, 1996, 岩波講座地球惑星科学 2 地球システム科学, P32]

<sup>2</sup>ケイ酸塩の他に地表付近には石灰岩大量に存在し、化学風化が生じている。しかし、石灰岩沈殿の際に風化の逆反応が生じてしまうため、二酸化炭素の除去機構に影響を及ぼすのはケイ酸塩鉱物の化学風化と考えられる。



<sup>3</sup>風化率は、SiO<sub>2</sub> 濃度を観測することから求める。炭素バジェット HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> と結合するのは Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> などの陽イオンであるが、これらの濃度はケイ酸塩の風化を暗示するものではない。なぜならば陽イオンの大部分が炭酸塩鉱物の溶解を起源とするためである (Maybeck, 1979)

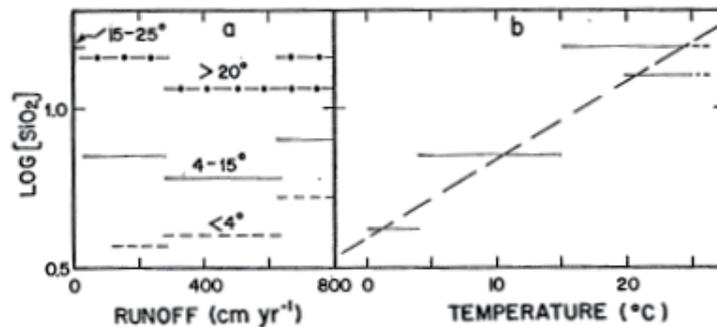


Fig. 1. The logarithm of the concentration of dissolved silica ( $\text{mg l}^{-1}$ ) in river water [Meybeck, 1979]: (a) as a function of runoff at various annual average temperatures ( $^{\circ}\text{C}$ ); (b) as a function of annual average temperature. The dashed line shows the slope of the temperature dependence deduced from the laboratory data of Lagache [1965].

図 2: 川の水で計測された  $\text{SiO}_2$  濃度の流量 (雨水の流入や水面からの水分の蒸発を考慮した値), 地表面温度依存性. (b) における点線は Lagache の実験データから求めた温度依存性を示している.

から得られた式<sup>4 5</sup> を直接風化率の温度依存性を表すために用いる.

**大気圧依存性** 二酸化炭素分圧がそれぞれ 2, 6, 20 気圧の場合の実験データより, 風化率は  $P^{0.3}$  に比例することが示されている. ただし,  $P$  は二酸化炭素分圧. この値を自然風化の場合にも外挿し, さらに低い気圧の場合でも成り立つと仮定する.

風化率の式は温度, 大気圧依存性を考慮して以下のように仮定する.

$$W \propto RP^{0.3} \exp\left(\frac{T - 285}{17.7}\right) \quad (3)$$

ただし,  $W$  が風化率,  $R$  は雨水の流量である. 近似的に濃度は流量に対して独立であるが, 温度や場合によっては二酸化炭素分圧にも依存するとした. 特に  $R$  の地表面温度依存性については, Manabe and Stoufeer [1980], Wetherald and Manabe [1975], Manabe and Wetherald [1980] の気候モデルによって全球平均流量に対する平均全球温度の依存性は非常に弱く, 近似的に  $R \propto \exp(T - 285)/60$  であることが示されている.

Lagache and Meybeck のデータから推測される風化率の直接的な温度依存性と, Manabe らの研究によってほめかされた雨水量の弱い温度依存性, Lagache の実験から推測され

<sup>4</sup>Lagache は, 曹長石 ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) やアデュラリア ( $\text{K}_{0.84}\text{Na}_{0.16}\text{AlSi}_3\text{O}_8$ ) の溶解時に固定された反応期間の後の陽イオン濃度の温度依存性 (100, 150, 200 $^{\circ}\text{C}$ ) を示した. Busenberg and Clemency [1976] の研究ではカルシウムを含むケイ酸塩鉱物, 炭素循環の観点から興味深い鉱物, はナトリウムやカリウムと同様に時間の関数として反応速度が表されることを示した. しかし, 溶解率の温度依存性にまで類似性が及ぶか否かは不明である.

<sup>5</sup>ある時間後の  $\text{SiO}_2$  濃度でしかないため, それを風化率, すなわち時間の関数に直すために何らかの変形が必要なのは確かだが, 特に明記されていない.

た圧力依存性を併せて、全球ケイ酸塩風化率を以下のようにおく。

$$\frac{W}{W_o} = \left(\frac{P}{P_o}\right)^{0.3} \exp\left(\frac{\Delta T}{13.7}\right) \quad (4)$$

ただし、 $\Delta T$  は現在の全球平均温度 285 K [Sellers, 1965] からの差であり、 $W_o$  は現在の風化率、 $P_o$  は現在の二酸化炭素分圧である。

大気海洋系間の炭素循環平衡を保つためには平均風化率は常に火山や変成による二酸化炭素の放出率  $V$ 、とほぼ比例している必要がある。

$$W/W_o = V/V_o \quad (5)$$

この二式より、

$$\frac{P}{P_o} = \left(\frac{V}{V_o}\right)^{10/3} \exp\left(\frac{-\Delta T}{4.11}\right) \quad (6)$$

となり、二酸化炭素分圧の温度及び放出率依存性の式が導かれた。

#### 4. 温室効果の二酸化炭素分圧依存性

我々は全球平均温度  $T_s$  を水蒸気及び二酸化炭素それぞれによる温室効果を区別し、いろいろ変化させた場合において見積もる。

$$T_s = T_e + T_g(\text{H}_2\text{O}) + T_g(\text{CO}_2) \quad (7)$$

$T_e$  は有効温度であり、太陽放射入射量及び惑星アルベド、フラックス因子に依存する。 $T_g$  は大気の温室効果の結果として増加した地表面温度である。なお、二種の気体の吸収帯が重なることによる影響は無視する。

水蒸気の温室効果に対しては、Henderson-Sellers and Meadows [1976] に引用された Rodgers and Walshaw [1966] の結果を用い、併せて水蒸気の地表面分圧は平均地表面温度における飽和水蒸気圧の 1/4 であるという仮定も用いた。<sup>6</sup>

$$T_g(\text{H}_2\text{O}) = 29.7 + 0.5(T_s - 285) \quad (8)$$

地表面温度は現在の平均温度 285 K からあまり離れていないため、結果は以下の式によってよく再現される。

二酸化炭素による温室効果の見積もりには、Owen *et al.* [1979] の結果を用いた。

$$T_g(\text{CO}_2) = 2.3 \left(\frac{P}{P_o}\right)^{.364} \quad (9)$$

<sup>6</sup>水蒸気分圧は地表面温度の増加に伴って指数関数的に増加するけれども温室効果は水蒸気圧に対して対数関数的に増加する。これは水蒸気の吸収帯が飽和するためである。結果として、そのような温室効果は地表面温度に対して線形の依存性を示す。

この式は Henderson-Sellers [1976] による純二酸化炭素大気における温室効果値とよく一致する。

これらの式を併せると、

$$\Delta T = 2\Delta T_e + 4.6 \left( \frac{P}{P_o} \right)^{.364} - 4.6, \quad \Delta T = T_s - 285, \quad \Delta T_e = T_e - 253 \quad (10)$$

この式によると、二酸化炭素分圧が 2 倍になった場合、地表面温度は 1.3 K 上昇する。これはより詳細な研究で明らかにされた 2 K という典型的な値に匹敵する。

## 5. 外部摂動に対する気候-二酸化炭素系の応答

二酸化炭素分圧と平均値表面温度を併せ持ったフィードバックシステムはこの 2 式で記述される。

$$\frac{P}{P_o} = \left( \frac{V}{V_o} \right)^{10/3} \exp \left( \frac{-\Delta T}{4.11} \right) \quad (11)$$

$$\Delta T = 2\Delta T_e + 4.6 \left( \frac{P}{P_o} \right)^{.364} - 4.6 \quad (12)$$

外部によるこの系を支配する因子は有効放射温度  $T_e$  及び火山や変成による二酸化炭素の放出率  $V$  である。これら 2 因子が決まると、地表面温度と二酸化炭素分圧が唯一に決定される。

他の因子 (惑星アルベドなど) が変化しない場合には、有効温度は太陽光度の 1/4 乗に比例し、地球史初期の太陽光度 (現在の 75%) では  $\Delta T_e = 18$  である。二酸化炭素の放出率が現在と変わらないと仮定すれば、 $T = 265\text{K}$  である。

我々が提案してきたフィードバックメカニズムは暗い太陽問題をそれ自身だけですべて解く事はできない。しかし問題の程度をかなり小さくした。地球史初期において高い二酸化炭素分圧、それゆえにより暖かい地表面を生み出すような因子は、1. 火山や変成による二酸化炭素の高い放出率、2. 大陸の低い風化率、3. 腐食性の (酸の混じった) 地下水を生み出す植物が少ないこと、である。三つの因子のうちの一つ目の起こりうる効果は図 3 のそれぞれ異なる  $V/V_o$  の曲線によって示された。大陸風化率の効果は同じ曲線が描く。なぜならば現在用いた近似において陸の減少は放出率の増加と等価だからである。

## 6. まとめ

単純な問題のパラメタリゼーションは大幅に誤差を含んでいるだろうという認識のもとで、我々は提案したフィードバックメカニズムの量的な見積もりを試みた。数値計算スキー

ムの存在は我々の量的モデルは大きな誤差を含むであろう。しかしながら、二酸化炭素の温室効果とケイ酸塩風化率の温度依存性を組み込んだ緩和メカニズムは非常にもっともらしいと考える。特に、風化率は水の凝固点を下回った温度では降水、浸食、流出という通常の過程は中断されるため非常に低い値まで落ちる。もし全球凍結が生じたとしたら、ケイ酸塩風化率はほとんど 0 まで落ちるに違いない。そして火山からの放出によって二酸化炭素が大気中に蓄積する。現在の放出率でさえ 1 気圧の二酸化炭素はたったの 2000 万年で

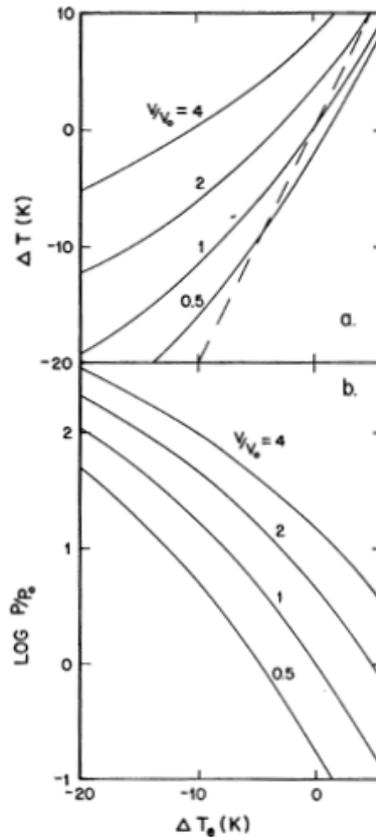


Fig. 2. Change in surface temperature ( $\Delta T = T_s - 285^\circ\text{K}$ ) and carbon dioxide partial pressure ( $P$ ) as functions of change in effective temperature ( $\Delta T_e = T_e - 253^\circ\text{K}$ ) for several values of the volcanic and metamorphic source of  $\text{CO}_2$ . Present day values are designated  $P_0$  and  $V_0$ . The broken line shows the surface temperature variation for constant  $\text{CO}_2$  pressure.

図 3: 地表面温度および二酸化炭素分圧の有効放射温度, 二酸化炭素放出率依存性. 横軸の有効放射温度は惑星のアルベドが一定であれば太陽光度のみに依存する値である. 太陽光度が地球史上で増加してきた事を思い出すと, この横軸は時間軸と見なす事も出来る. 破線はフィードバックが生じない場合の地表面温度 (at  $V/V_0 = 1$ ). これより, フィードバックメカニズムによって気候が温暖化するのがみてとれる. このメカニズムは  $V/V_0 = 1$  (現在の二酸化炭素放出率) の半分でも地表面温度の変化は減少する. 高い  $\text{CO}_2$  放出率では  $\text{CO}_2$  が増加し, より強い温室効果が生まれる.

生み出される。これに伴う強い温室効果は地質学的に短い時間で覆っていた氷を溶かすだろう。

## Warker et al. 全訳 (内容未保証)

### Abstract

我々は、負のフィードバックメカニズムによって地質的タイムスケールよりも長い期間、大気中の二酸化炭素分圧は緩和されることを示した。このメカニズムは、ケイ酸塩鉱物 (炭酸塩鉱物の沈殿によって形成される) の風化率が地表面温度に依存し、また地表面温度は温室効果を介して二酸化炭素分圧に依存するというものである。このメカニズムの定量的詳細は推測の域をでないけれども、太陽系形成初期から生じ続けてきたと信じられている太陽光度の増加に対する地球の地表面温度の安定化を部分的に示している。

### Introduction

地球型惑星大気の進化に関する考察は、暗い太陽問題によって制約を受けている。Sagan and Mullen [1972] で指摘されたように、恒星進化の理解、これは太陽光度は太陽系年齢を通じておよそ 25 % 増加してきたことを暗示する [Newman and Rood, 1997], 今から 3.8 Gyr 前にさかのぼるまで沈殿物が堆積している [Lowe, 1980] という流水過程の地質学的証拠との間で衝突が生じている。地球は温室効果、大気中の赤外放射を吸収する分子によって惑星放射を吸収し、その射出を地表面に戻すこと、が今よりも効いていない限りは、地表面に液体の水を維持するには寒冷すぎたであろう。Sagan and Mullen は大気中の水蒸気のみでは十分な温室効果は生じ得ないことを示し (この要因は吸収の窓領域での放射エネルギーの脱出である)、そして更なる吸収物質の候補としてアンモニアを提案した。しかし、アンモニアはその光化学的不安定性や、明白な非生物源的源の欠如 [Kuhn and Atreya, 1979] によって候補としては魅力的とはいえない。二酸化炭素のもっとも魅力的な魅力は近年 Owen *et al.* [1979] によって提唱されてきた。9–10, 12, 18  $\mu\text{m}$  における強い吸収帯の許容すると、著者らは二酸化炭素と水蒸気を併せた場合の温室効果は、過去の二酸化炭素分圧が現在のおよそ 1000 倍以上あれば、暗い太陽問題を解決するのに十分な程強いことを示した。若く、構造的に活発な地球において高い二酸化炭素分圧は妥当であるだろう。しかし我々は大気中の二酸化炭素の減少が、地球の地表面温度が一定に保つための減少率と太陽光度の増加率がちょうど一定に保たれるように生じてきたという可能性に対して疑問を持った。この論文では、地表面温度と二酸化炭素分圧の間の負のフィードバックについて記した。これはこの幸運なバランスを保つのを助けていたであろう。

火山や固体地球から大気や海への変成による二酸化炭素の放出量は  $(3.3 \pm 1.1) \times 10^{14}$   $\text{gm yr}^{-3}$  と見積もられており [Holland 1978], これはたった 400,000 年間の放出量が海と大気に含まれる二酸化炭素量の倍に匹敵するぐらいに大きい。地質学に有意な時間周期を通して、二酸化炭素は放出率と同程度の割合で固体地球へ戻されなければならない。この戻すメカニズムは有名である。それはケイ酸塩鉱物の風化を堆積岩内の炭酸塩の沈殿物に

よって補うものである。この総合的な過程は二酸化炭素と水を伴うケイ酸塩鉱物から二酸化炭素鉱物と二酸化ケイ素を生成する反応として示すことができる。詳細に言うと、ケイ酸塩の風化は陽イオン ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) を海の中に供給し、そこで炭酸イオン ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) と反応し炭酸塩鉱物として沈殿する。ケイ酸塩鉱物の風化による陽イオンの供給率は大気海洋系における二酸化炭素の許容量への影響を支配する。

## ケイ酸塩鉱物の風化率

溶解した成分による海への供給率の研究の一部としては、Mayback [1979] はケイ酸塩の風化率を支配する因子を明らかにするデータを分析した。彼は世界の川を水の流れと分水地点の平均温度をもとに分類し、いくつかの allowance を明らかにし、そのとき平均濃度と大量の溶解成分輸送率を気候上形 (morphoclimatic) の分類の関数として決定づけた。炭素バジェットと結合する最も興味深い陽イオンは、 $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{Mg}^{2+}$  であるが、川の水の中のこれらの濃集はケイ酸塩の風化を暗示するものではない。なぜならばそれらは大部分が炭酸塩鉱物の溶解を起源とするためである [Meybeck, 1979]。炭酸塩の風化によって基本的に放たれる陽イオンの、炭酸塩沈殿物内の再堆積は fluid carbon のバジェットに対してあまり影響を及ぼさない。火山や炭酸塩の変成は、ケイ酸塩風化によって放出された  $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{Mg}^{2+}$  イオンを含む固体層に戻す。

後で述べるように我々は溶けたケイ素をケイ酸塩の溶液への陽イオン放出率を示すものとして用いる [Meybeck, 1979; Carrels and Machenzie, 1971; Holland, 1978]。

表 1 には Meybeck による変成分類とに加えて  $\text{SiO}_2$  の溶液中への輸送率 (単位は  $10^6 \text{ gm km}^{-2}\text{yr}^{-1}$ ) を示した。これらのデータは、ケイ酸塩の風化率は流量もしくは温度の増加に対して明らかに増加していることを示す。このような振る舞いは完全に直感的な予想と一致しているが、これが注目されるのは研究における三番目の影響が存在するかもしれないことである。現在の表層土の気孔空間内の二酸化炭素の分圧は根の呼吸や有機物の腐敗により大気中の値よりも数オーダ以上に大きい [Holland, 1978]。この大きい大気圧はケイ酸塩鉱物の溶解を促進しただろう。風化反応は更に有機酸によっても促進されるだろう。よって、Meybeck のデータに現れたケイ酸塩風化率の地表面温度や流量に対する依存性は、惑星生産力に対する同様の变化によって大きく、ないしは小さく汚染されている可能性がある。

この複雑さにも関わらず、地球は例えば太陽光度の減少の結果として明らかに冷えつつ成長してきたようだ。高温風化率の変成域は aerial 範囲に制限されるかもしくはすべて消去されるだろう。低温下での低い絶対湿度は海から大陸への水蒸気輸送を多く許容しないために、これらは全球的な流量においてもまたかなり減少しただろう。二つの因子は全球的なケイ酸塩風化率を減少するのに寄与する。

火山や変成による二酸化炭素の放出率と同程度の減少率が生じなければ風化率の減少に

よって fluid carbon のバジェット内の非平衡が生じる。この非平衡によって海洋と大気内の二酸化炭素の蓄積が生じる。地質学的時間スケールにおいて、大気中の二酸化炭素分圧と海洋性重炭酸イオン濃度との平衡は瞬間的に生じる。気体及び液体間に炭素分配は温度と海洋の pH に依存するけれども、これらの因子は現在のつながりの中で強い関連をもつものではない。ケイ酸風化率の減少による殆ど回避できない結果は、大気海洋の炭素容量の増加と二酸化炭素分圧の必然的増加である。

しかし、二酸化炭素は温室効果気体であり、その分圧の増加は全球平均温度の上昇を起こし、想定される original decrease を中和する。これは我々提案する太陽光度の増加 phase でも地表面温度が等しく保たれたらう、負のフィードバックメカニズムである。地質学的時間単位では二酸化炭素の分圧は、海洋と大気間の流れが平衡になる地表面温度を保つように調整されていたことを我々は提案する。

以下では、我々はこのフィードバックメカニズムの効率の見積もりを示す。我々はまず最初に全球平均風化率と温度及び二酸化炭素分圧を結びつける試験的な関数関係を展開していく。次に、太陽光度と二酸化炭素分圧に対する全球平均温度の依存性を近似する。そのとき、提案したフィードバックメカニズムが太陽光度の変化に対する全球気候への衝撃を和らげていたかどうかを見る事ができる。このフィードバックメカニズムの試験はもし太陽光度が時間変化とともに変わる唯一の関連パラメータであれば、平均温度と分圧に起きていた事の予言として最も都合の良いものを提示する結果は大気中の二酸化炭素と気候の歴史の案として構築されるべきではない。多すぎる他の因子もまた変化してきたらう。これらの因子は火山や変成による二酸化炭素の放出、古地理学、さらされた大陸領域での風化、惑星アルベド、風化率による大陸植物へ起こりうる影響が含まれる。我々は未だこれらの他の因子による外部がこのフィードバックシステム対して生じ得る変化の結末を扱える位置にはいない。しかしながら、地球史の中の初期に結果として更に暗い太陽の問題を緩和する我々が計算していた値よりも高い温度や二酸化炭素分圧が維持されてきたのと同様に、これらの因子の多くは進化してきたらうこと我々は主張する。

## 長石溶解の反応速度

ケイ酸塩風化反応の速度やメカニズムに関するたくさんの研究が書かれてきた。この中でも、風化率に対する温度と二酸化炭素分圧の依存性に関する最も直接的な情報は、Lagache の研究によって供給された。

Lagache は既知の殆どの表面の単純な長石鉱物を定常温度及び定常二酸化炭素分圧において、既知の水体積によって風化させ、溶媒中の陽イオン濃度の増加を時間の関数として測定した。実験から実験への結果は、すばらしく再現性があり、与えられた地表面温度と分圧における陽イオンの濃度は、表面積の  $1/2$  乗及び時間の倍数に比例して増加する。この提案は特別な溶解率(単位面積あたり)が陽イオン濃度に対して反比例することを示す。水素イオン濃度 (pH) は影響を受けるだろう; この実験の条件下では、 $H^+$  濃度は陽イオン濃

度に反比例する。

現在の目的の為に、反応速度の詳細を調べる必要はない。Lagache の実験によって、自然界の風化プロセスの合理的な描写は与えられたらう。我々は、大気もしくは土壌の二酸化炭素と平衡下において、雨水が土壌や多孔石に浸透する限られた間、ケイ酸塩鉱物は雨水にさらされる。

もし、化学風化が水と鉱物とが接するこの限られた時間の間に主に生じうるのであれば、その場合、全体的な風化率は単にこの期間の最後での陽イオン濃度にしか依存しないだろう。それゆえに、固定された相互作用期間の後に温度と二酸化炭素分圧に対して、この濃度がどのように変化するかを知る必要が有る。Lagache の実験はこの情報と直接的に、確かに温度と圧力が現実的に直面した 100, 200°C 及び 2 から 20 気圧でのより高くなった場合の情報を与えた。我々は、Lagache によって計測された温度と圧力に対する依存性もまた地球表面での風化条件下に適用されると想定した。より低い温度への外挿は下に示した Meybeck データの参照から検証可能である。我々は低圧への外挿の検証方法を提案してはいない。

曹長石 ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) やアデュラリア ( $\text{K}_{0.84}\text{Na}_{0.16}\text{AlSi}_3\text{O}_8$ ) の溶解に関する Lagache のデータは、3 つの温度 (100, 150, 200°C) における固定された反応期間の後の陽イオン濃度を示し、それは Arrhenius 温度依存性  $\exp(-4600/T)$  によって表された。ただし、 $T$  は絶対温度である。285 K 付近の限定された温度範囲上ではこの依存性は  $\exp\{(T - 285)/17.7\}$  として近似出来る。Busenberg and Clemency [1976] の研究ではカルシウムを含むケイ酸塩鉱物、炭素循環の観点から興味深い鉱物、はナトリウムやカリウムと同様に時間の関数として反応速度が表されることを示した。しかし、溶解率の温度依存性にまで類似性が及ぶか否かは分からない。

図 1a では、Meybeck による流水中の溶解したケイ素の濃度のデータを様々な温度及び流量依存性に関して図示した。この濃度は流量に対する明らかな依存性を示さない、これは我々の仮説を支持する。仮説では、水が供給されている間はケイ酸塩鉱物と反応可能であるとしているため、濃度は流量に対して強く依存することはない。

図 1b では溶解したケイ素の平均濃度を平均温度に対してプロットした。破線は上述の長石の溶解に関する Lagache 実験室データから推定した温度依存性の傾斜を示した。実験室及びフィールドでのデータは合理的に一致する。それゆえに我々はこの式を直接風化率の温度依存性を表す為に用いる。

2, 6, 20 気圧における albite, adularia の Lagache データは固定された反応期間後の陽イオン濃度の圧力依存性に対して、 $P^{0.3}$  に比例する事を示せる。ただし、 $P$  は二酸化炭素部分圧である。図の意図として、我々はこの同じ数式を自然風化に外挿し、より低い二酸化炭素分圧でも維持されることを仮定しよう。気圧に関する依存性が弱ければ弱い程、強いフィードバックが供給されるだろう。

与えられた流域におけるケイ酸塩の化学風化による陽イオンの放出率の平均値 (単位は質量/面積/時間) は川の中の陽イオン濃度 (質量/体積) の反応物であり, 流量は質量/面積/時間で表される. 我々は近似的に濃度を流量に対して独立であるが, 温度と, 場合によっては二酸化炭素分圧にも依存するとした. 風化率は  $W \propto RP^{0.3} \exp(T - 285)/17.7$  であり, ただし  $R$  は流量である.

直感的に, 暖かい空気は冷たい空気と比較して海から物質により多くの水蒸気を運べるので  $R$  もまた温度に対する増加関数であると推測するだろう. 確かに, 東西平均年間降水量 [Sellers, 1965] は近似的に東西に平均化された年間平均温度の水の飽和水蒸気量に比例しており, 水蒸気の依存性は  $\propto \exp(T - 285)/14.1$  である. Manabe and Stouffeer [1980], Wetherald and Manabe [1975], Manabe and Wetherald [1980] の気候学的モデルは全球平均流量に対する平均全球温度の依存性は非常に弱い事を示しており, しかしながら近似的に  $R \propto \exp(T - 285)/60$ . 流量の温度に対する強い依存性はより効果的な温度緩衝を与えることはないという保守的な見積もりを調整しよう.

そのとき, Lagache and Meybeck のデータから推測される風化率の直接的な温度依存性と, Manabe らの研究によってほのめかされた流量の弱い温度依存性, Lagache の研究室実験から推測された圧力依存性を併せて, 我々は全球ケイ酸塩風化率を

$$\frac{W}{W_o} = \left( \frac{P}{P_o} \right)^{0.3} \exp\left( \frac{\Delta T}{13.7} \right) \quad (13)$$

ただし,  $\Delta T$  は現在の全球平均温度 285 K [Sellers, 1965] からの差であり,  $W_o$  は現在の風化率,  $P_o$  は現在の二酸化炭素分圧である.

大気海洋系間の炭素循環平衡を保つ為には平均風化率は常に火山や変成による二酸化炭素の放出率, 我々はこれを  $V$  と記述する, とほぼ比例している必要がある. 海水中の重炭酸イオン濃度の変化に対応する fluid carbon の質量変化は地質学的期間でわけ, 処理能力率に変換される時には, 無視出来るようになる.

$W/W_o$  と  $V/V_o$  が等しく, また数式 (1) を参照すると, 二酸化炭素分圧の式が明らかになる.

$$\frac{P}{P_o} = \left( \frac{V}{V_o} \right)^{10/3} \exp\left( \frac{-\Delta T}{4.11} \right) \quad (14)$$

## 全球平均温度の二酸化炭素分圧依存性

我々は全球平均温度  $T_s$  を水蒸気及び二酸化炭素それぞれによる温室効果を区別し, いろいろ変化させた場合において見積もる.

$$T_s = T_e + T_g(\text{H}_2\text{O}) + T_g(\text{CO}_2) \quad (15)$$

なお、二種の気体の吸収帯が重なることによる影響は無視している。この式では、 $T_e$  は有効温度であり、太陽放射入射量及び惑星アルベド、フラックス因子に依存する [Goody and Walker, 1972; Henderson-Sellers and Meadows, 1976]。  $T_g$  は大気の温室効果の結果として増加した地表面温度である。

水蒸気の温室効果に対しては、Henderson-Sellers and Meadows [1976] に引用された Rodgers and Walshaw [1966] の結果を用い、併せて水蒸気の地表面分圧は平均値表面温度における飽和水蒸気圧の 1/4 であるという仮定も用いた。地表面温度は現在の平均温度 285 K からあまり離れていないため、結果は以下の式によってよく再現される。

$$T_g(\text{H}_2\text{O}) = 29.7 + 0.5(T_s - 285) \quad \text{K} \quad (16)$$

水蒸気分圧は地表面温度の増加に伴って指数関数的に増加するけれども温室効果は水蒸気圧に対して対数関数的に増加する。これは水蒸気の吸収帯が飽和するためである。結果として、そのような温室効果は地表面温度に対して線形の依存性を示す。

二酸化炭素による温室効果を満つ持つ為には、Owen *et al.* [1979] の結果を用いた。引用文から地表面温度  $T_e$ ,  $T_g(\text{H}_2\text{O})$  を差し引くと、

$$T_g(\text{CO}_2) = 2.3 \left( \frac{P}{P_o} \right)^{.364} \quad (17)$$

この式は Henderson-Sellers [1976] による純二酸化炭素大気における温室効果値とよく一致する。我々の単純な式では全大気圧と温度に対する赤外不透明度の依存性を無視する。

これらの式を併せ、現在の全球平均温度 285 K からの差の項を現在の有効温度 253 K との差の項を書くと、

$$\Delta T = 2\Delta T_e + 4.6 \left( \frac{P}{P_o} \right)^{.364} - 4.6, \quad \Delta = T_s - 285, \quad \Delta T_e = T_e - 253 \quad (18)$$

この式は導出過程で用いた Owen *et al.* の結果を再現する。二酸化炭素分圧が 2 倍になった場合、地表面温度の 1.3 K の増加が生み出される。これはより詳細な研究で明らかにされた 2 K という典型的な値に匹敵する。地表面温度の二酸化炭素分圧依存性に関するより詳細なパラメタリゼーションは特により低い気圧では強く緩和された温度に帰着する。

## 外部摂動に対する気候-二酸化炭素系の応答

この非常に簡略化した数式では、二酸化炭素分圧と平均値表面温度を併せ持ったフィードバックシステムは 2 式で記述される。数式 (2) は地表面温度  $T(\Delta T = T_s - 285\text{K})$  二酸化炭素分圧  $P$  と火山や変成による  $\text{CO}_2$  の放出率の依存性を表している。外部によるこの系を支配する因子は  $T_e$  及び  $V$  である。これらの 2 因子の詳細によって、それぞれ地表面温度と二酸化炭素分圧が唯一に決定される。

図 2 は地表面温度と二酸化炭素分圧が有効温度, 火山及び変成源の  $\text{CO}_2$  量の様々な値に対してどのように変化するかを示した. 破線は フィードバックが生じない ( $P$  が一定) 場合の地表面温度変化を示した物である. 我々が仮定したフィードバックメカニズムは  $V/V_0 = 1$  (現在の二酸化炭素放出率) の半分でも地表面温度の変化を減少させる. 高い  $\text{CO}_2$  放出率では  $\text{CO}_2$  が増加し, より強い温室効果が生まれる. 低い二酸化炭素分圧 (高い有効温度に対応する) における温度プロットの曲率は弱い温室効果フィードバックを示す. 低い分圧下では我々の二酸化炭素による温室効果のパラメタリゼーションはおそらく低く見積もっている.

有効温度は太陽光度の  $1/4$  乗に比例し, 他の因子も同様に振る舞うため, 地球史初期の 25% の太陽高度減少は  $\Delta T_e = 18$  に対応する. これは  $V/V_0 = 1$  に対する  $\Delta T = 18$ , もしくは  $T = 265\text{K}$  に対応する. 我々が示してきたパラメータ群と伴に我々が提案してきたフィードバックメカニズムは暗い太陽問題をそれ自信だけですべて解く事はできない, しかし問題の程度をかなり小さくした. 地球史初期において高い二酸化炭素分圧, それゆえにより暖かい地表面を生み出すような因子は火山や変成によるより高い二酸化炭素の放出率, より低い大陸の風化率, より少ない腐食した地下水によって生まれるより少ない地球の植物である. 三つの因子のうちの一つ目の起こりうる効果は図 2 のそれぞれ異なる  $V/V_0$  の曲線によって示された. 大陸風化率の効果は同じ曲線が描く. なぜならば現在の程度の近似において減少した大陸の風化率は増加した放出率と等しい.

## まとめ

単純な問題のパラメタリゼーションは大幅に誤差を含んでいるだろうという認識のもとで, 我々は提案したフィードバックメカニズムの量的な見積もりを試みた. 数値計算スキームの存在は温室効果計算において当面の改良を容認すべきだ. しかし, 更なる研究では風化率の温度及び分圧の依存性を必要とする. 温度, 流量, 露出した大陸の緯度変化を組み込んだモデルは特に興味を持たせるだろう. 我々の量的モデルの不適當さにもかかわらず, 我々は二酸化炭素の温室効果とケイ酸塩風化率の温度依存性を巻き込んだ緩和メカニズムは非常にもっともらしいと考える. 特に, 風化率は水の凝固点を下回った温度では降水, 浸食, 流出という通常の過程は中断されるため非常に低い値まで落ちる. 二酸化炭素の消費率に一致する減少は 'ice catastrophe' と呼ばれるものをさけるのに十分である. ice catastrophe はアイスアルベドフィードバックの存在による全球エネルギー平衡を悩ませる. もし全球凍結が生じたとしても, ケイ酸塩風化率はほとんど 0 まで落ちるに違いない. そして火山からの放出によって二酸化炭素が大気中に蓄積する. 現在の放出率でさえ 1 気圧の二酸化炭素はたったの 2000 万年で生み出される. これに伴う強い温室効果は地質学的に短い時間で覆っていた氷を溶かすだろう.

我々が提案したメカニズム, 二酸化炭素分圧とその結果の二酸化炭素による温室効果はケイ酸塩鉱物の風化における二酸化炭素の消費率の温度依存性によって緩和される. また金星及び火星の大気進化の理解に影響を与えるだろう. このような影響は引き続き検討さ

れている。注目すべき事は太陽光度の増加もしくは火山性の二酸化炭素放出率の減少の結果として二酸化炭素分圧が現在値まで下がった場合、二酸化炭素による温室効果は水蒸気の値と比較して無視出来る程度となり、このメカニズムはその効力を失う事である。生物相は長い期間の中で規則的な地表面温度の増加に伴う二酸化炭素の消失を調節する必要があるだろう。