

•

1989年11月 Vol. 36, No. 11

201(二酸化炭素;温室効果)

大気中の二酸化炭素濃度のグローバル観測*

——平成元年度日本気象学会賞受賞記念講演——

中澤高清**

1. はじめに

この度,平成元年度の日本気象学会賞を載き誠に有難 うございます.大気中の二酸化炭素(CO₂)に関する研 究を始めて既に10数年になりますが,開始当時は「温室 効果」という言葉は一般の方に馴染みがなく,会社を訪 問し研究への協力をお願いする際,「温室効果」につい てまず説明しなければなりませんでした.しかし,今日 ではどなたでも「二酸化炭素」といえば「温室効果」「温 暖化」を連想されるようになりました.隔世の感があり ます.

さて、大気中の CO₂ 濃度が急速に増加していること は皆様よく御存知のことと思います.この増加傾向は Callendar (1958) によって初めて指摘されました.彼 は前世紀から今世紀中葉にかけて欧米で行われた化学分 析法を用いた観測の結果をまとめ、工業化以前の濃度は 約 290 ppm であり、人間活動の活発化に伴い 1955 年頃 には約325 ppm まで増加したと報告しました.しかし、 当時の分析法や試料空気採集法には多くの問題があり、 値としては疑わしいものでした.信頼できる方法で最初 に濃度増加を確認した人は、米国スクリップス海洋研究 所の Keeling です.彼は 1956 年に非分散型赤外分析計 (NDIR) という近代的測器を用いて研究所構内にある 棧橋の先端で連続測定を行い、大気中の CO₂ 濃度が1 年間で約0.7 ppm 程増加していることを発見しました. 翌々年,彼はこの測定システムをハワイのマウナロア山 の中腹と南極点に設置し,本格的な観測を開始しまし た. これらの観測は今日まで継続されており,世界で最 も長いレコードとなっています.14年に及ぶ観測の結果 は1976年に発表され(Keeling *et al.* 1976 a, b),これら の論文との出会いが私達の研究の始まりとなりました.

私達が研究を開始しました当時は、化石燃料消費によ って大気に注入される CO2 の半分が大気に残留し,残 りの半分は海洋と生物圏に吸収されると考えられていま した. しかし, 1978年に Woodwell et al. (1978) が, 生物圏は大気中の CO。の吸収源ではなく、主に熱帯域 における森林破壊や砂漠化によって放出源となっている と主張しました、しかも、その放出量は化石燃料消費に よる CO2 に匹敵あるいはそれを凌駕するという驚くべ き値でした. 仮に生物圏が CO2 の放出源としますと, 海洋は化石燃料消費からの CO2 の半分と生物圏からの CO2 を全て吸収しなければなりません. しかし, 現在 の海洋化学の知識からは、海洋がこのような膨大な量の CO2 を吸収しているとはとうてい考えられません。従 って、生物圏からの放出量の見積が大き過ぎるか、海洋 による CO2 の取り込み過程に取りこぼしがあるか,あ るいは相方に問題があるかということになります。いず れにしても,従来の炭素循環を全面的に見直す必要に迫 られました、この問題の解決なしには将来の濃度予測は 不可能です.

ここで考えています100年程度のスケールの現象にと

^{*} Global distribution of atmospheric carbon dioxide.

^{**} Takakiyo Nakazawa, 東北大学理学部超高層物 理学研究施設。



第1図 日本上空の対流圏各層における CO₂ 濃度 の変動

って重要な地球表層における炭素の貯蔵庫は大気・海 洋・生物圏であり、これらの貯蔵庫間の $CO_2 フラック$ スを正しく評価できれば、この問題は解決します. 正攻 法的にはフラックスを地球規模で厳密に測定することで すが、特に生物圏や海洋は不均質であり、また対象が余 りにも大き過ぎるため、この方法を採用することには大 変な困難が伴います. そこで、比較的測定が容易である 大気中の CO_2 濃度を地球規模で精密に測定することに よって時間的・空間的変動の実態を明らかにし、輸送モ デルで結果をシミュレートし、 CO_2 の放出源・吸収源 強度を評価することが現実的な策と考えられます. 私達 はこのような観点に基づいて今日まで研究を進めてまい りました.

2. 大気中の CO₂ 濃度の観測

大気中の CO₂ 濃度の測定には NDIR 分析計が広く 用いられます. この分析計は特別な配慮を払うことによ って高い精度の測定が可能ですが,赤外活性気体の光吸 収を利用しているため,同じ濃度を持つガスであっても ベースガスが違うと異なった指示を示すという欠点があ

ります (Griffith, 1982; Griffith et al. 1982). 私達が研 究を開始しました頃は、モニタリングステーションが少 ない上に、各研究機関の測定精度がまちまちであり、標 準ガスの製造を一手に 引き 受けていた Keeling が窒素 ベースのガスを出荷していたために、各機関によって取 られたデータを同等に扱うことができませんでした. そ こで、私達は自身の手で統一した濃度スケールと分析精 度の下に広域にわたる観測を実施することにしました. まず、高精度の分析装置と濃度が厳密に分かりかつ長期 的に安定した空気ベースの標準ガスの開発に着手し、世 界で最も優れた測定システムに仕上げることができまし た (Tanaka et al. 1983 a, 1987 a; 田中他, 1984). し かし、観測の実行には多くの困難が伴いました、世界の ほとんどの研究機関は島や山にステーションを固定して 長期観測を行っていますが、一大学の研究室がこのよう な手法を用いる ことは 人的・経済的理由から不可能で す。また、この方法によって得られるデータは地表付近 に限定されます. そこで, 地上観測の他に機動性に富ん だ航空機や船舶や大気球を多用し、空間的に密な観測を 展開することにしました.今日までに地上連続観測は仙 台近郊、富士山頂、沖縄、昭和基地で、航空機観測は日 本上空, 南極上空, 東京-アンカレッジ, 東京-シドニー で,船舶観測は横浜-メルボルン,東京-シアトル,東京-ニューヨーク、東京-ロスアンゼルス・サンフラン シス コ,大気球観測は三陸上空で実施しました (Tanaka et al. 1983 a, b, 1985, 1987 a, b, c, d, 1988, Nakazawa et al. 1984; Gamo et al. 1989). ここでは紙面に制限があ りますので、それぞれの観測結果について述べることが できません、第1図に結果の一例として1979年以来今日 まで継続しています日本上空における航空機観測の結果 を示します.対流圏各層で季節変化を伴って CO2 濃度 が確実に増加している様子がよくお分かり頂けると思い ます. このような 増加傾向は 世界各地 で 観測されてお り、ここ10年間の平均的な年増加率は1.6 ppm/年とな っております.

3. 大気中の CO2 濃度の増加原因

大気中の CO₂ 濃度が, 人間活動に よって 18 世紀後 半より増加したことは氷床コア分析等から明らかです (Neftel *et al.*, 1985; From and Keeling, 1986; Pearman *et al.*, 1986), また, 今世紀中頃までは, 化石燃料消費 の他に森林破壊が濃度増加に大いに関与していたことも 分かっております. しかし, 現在の増加傾向に生物圏が

4

N天気//36.11.



第2図 マウナロアにおける大気中の CO₂ 濃度の 変動.

・は季節変化を除去した測定値であり,実 線は1958年1月1日を基点とし,4.4%/年 の化石燃料消費の年増加率と58%の大気残 留率を仮定して計算した値である。

いかに係わっているかについてはよく理解されていません. ここではいくつかの側面からこの問題について検討してみたいと思います.

第2図は1958年以来今日まで継続されているマウナ ロアにおける観測の結果で,季節変化は消去してありま す. この結果と化石燃料消費の統計 (Marland, 1989) から、過去30年間の平均的大気残留率として58%が得ら れます.また、1973年に第一次オイルショックが起こる 前は化石燃料の年消費の増加率は4.4%/年でした 仮に 1973年以降も同様な増加率が続いたとしますと、期待さ れる濃度変動は図中の実線のようになります。1973年ま では計算値と観測値がよく一致していますが,1973年以 降は計算値が観測値を上回っており、特に1979年の第2 次オイルショック以降に両者の不一致が著しくなってい ます。すなわち、化石燃料消費を抑制するならば大気中 の CO2 濃度の増加傾向は鈍化します. この事から,現 在の大気中の CO₂ 濃度の主な増加原因は化石燃料消費 と考えられます. なお, 化石燃料消費による CO2 の年 放出量は1979年から炭素換算で5Gt (Gt=10¹⁵g)以 後, CO₂の放出量, 吸収量は炭素換算で表わします。) 付近で推移していましたが、1984年以降は再び上昇に転 じていることを申し添えます.

第3図と第4図は私達の観測から得られました対流圏 下部と上部における CO₂ 濃度の年平均値の緯度分布で す. なお,第3図には参考のためにアメリカ海洋気象局 の GMCC (Geophysical Monitoring for Climatic Change) がポイントバーロー (71°N) と南極点で測定



第3図 1982年から1986年までの対流圏下部における CO2 濃度の年平均値。



した結果も示してあります.対流圏下部の年平均濃度は 北半球中高緯度で最も高く,赤道域で若干の高濃度を示 しますが,南下するに従って減少し,南半球中緯度で最 も低くなります.一方,対流圏上部の年平均濃度は熱帯 収束帯が平均的に存在する 5°N 付近で最も高くなり, 両極に向かって減少し,北極域で再び高くなります.両 者の比較から,対流圏下部の濃度は常に南半球より北半 球で高く,北半球においては対流圏下部の値が上部より 高いことが分かります.この様な分布は,北半球中高緯 度の地表付近から大量の CO_2 が放出されていることを 意味します.これは取りも直さず,北半球中高緯度に存 在する先進諸国における化石燃料消費と考えることがで きます.なお,南半球においては対流圏上部の濃度が下 部より高くなっていますが,南半球の海洋が大気中の CO_2 の吸収源として働いている (Tans *et al.*, 1989) こ

1989年11月

5



 第5図 大気中の CO₂ 濃度の測定値と2次元輸送
モデルから推定された CO₂ の吸収源・放 出源の強度。
AはGMCC データ, Bは東北大学データ
についての結果であり,破線は化石燃料消費による CO₂ 放出を除去した結果である。

とと対流圏上部を通して CO₂ 濃度の高い北半球大気が 南半球へ輸送されていることの結果です. なお,対流圏 上部を通した北半球大気の南半球への輸送は特にモンス ーン循環の期間に効率良く行われていることが私達の観 測から分かっています.

さて、Keeling et al. (1985 a) は地上観測や船舶観測 の結果をまとめて1962年の年平均濃度の緯度分布を求め ています. 彼らの結果は,赤道域に南極域より1.6 ppm ほど濃度が高い明瞭なピークが存在し,北半球中高緯度 の濃度が南極域より 1 ppm ほど高かったことを示して います. この分布と現在の分布を比較してみますと、こ の20数年の間に,北半球中高緯度と南極域との濃度格差 は約 2 ppm ほど拡大しておりますが,赤道付近の値は ほとんど変化していないことが分かります. 1962年から 1984年までの期間の化石燃料消費による CO₂ の平均的 な年放出量は 4.3 Gt であり、その大半は北半球中高緯 度から大気に注入されており,結果として 2 ppm の濃 度格差が生じたと考えることができます. 一方、森林生 態学者が推定した赤道域の生物圏からの年放出量は値が 大きく異なっていますが、平均的には 2.5 Gt です

6

(Houghton et al., 1985). このような量の CO₂ が放出 されているとするならば,赤道域でも濃度格差は見出さ れるはずです.森林生態学者の推定した放出量が過大で あるとの疑いは赤道付近で行われた CO₂ 濃度と δ¹³C の同時観測からも指摘されています (Keeling et al., 1985 b). ただし,濃度の緯度分布の比較から生物圏の 役割を論ずる場合,経度による濃度の不均質性を考慮し なければなりません.すなわち,Keeling et al. (1985 a) が使用したデータは深層水の湧昇が強い中部太平洋で主 に取られており,私達のデータは湧昇が比較的弱い西部 太平洋で取られています.しかし,他の研究機関のデー タを合わせ考えたとしても,森林生態学者が主張する放 出量の内の大きな値は受け入れ難いものです.

第5図は1981年から1985年の間に GMCC と私達が対 流圏下部で取ったデータを2次元輸送モデルでシミュレ ートして得た CO2 の放出源・吸収源強度の緯度分布で す (Tans et al., 1989). 経度方向の濃度の不均質性を反 映して結果に違いがみられますが、共通した特徴は北半 球および赤道域で地表から CO₂ が放出され、南半球の 地表が CO2 を吸収していることです。北半球における ネットとしての放出量は GMCC データ については 1.6 Gt/年 (45°N 以北), 東北データについては 3.0 Gt/年 (25°N以北)です。GMCC の結果は 45°N以北で CO2 の放出が為されていることになっていますが、中緯度に おける GMCC のステーションの多くが陸地から遠く隔 たった海洋にあり、陸の情報が減衰してしまっているこ とによるものと考えられます. 化石燃料消費の寄与を差 し引くと、30°-65°N間の地表(海洋と生物圏)が吸収 する量はそれぞれのデータについて3.7Gt/年と2.2Gt/ 年になります。化石燃料消費の寄与を差し引いた南半球 の地表(主に海洋)による CO₂ の吸収量は, GMCC データについては 0.8 Gt/年 (30°-55°S), 東北データ については 1.5 Gt/年 (10°-45°S) です。赤道域から の放出量は GMCC データについては 2.3 Gt/年 (17°N --17°S), 東北データについては1.4 Gt/年 (11°N--11°S) となっています. 赤道域の海水は CO2 について 過飽和の状態にあり、大気に向かって CO2 を放出して いることが知られています (Keeling, 1968). この量を 0.8~2.3 Gt/年としますと、生物圏からの放出量として GMCC データからは 0~1.5 Gt/年, 東北データからは これより 1Gt/年ほど小さい値が得られます。東北デー タから推定された放出量が小さい理由は、前で述べまし た様に、深層水の湧昇が弱い西部太平洋で観測が行われ

*天気// 36. 11.

たためと考えられます. いずれにしてもモデルから推定 された生物圏からの CO₂ 放出量は森林統計の値より小 さくなっています. なお, Keeling のグループも3次元 モデルを用いて同様なシミュレーションを行っており, 赤道域の生物圏からは CO₂ がわずかに放出されている が, 北半球中高緯度の生物圏がこれを上回る量の CO₂ を吸収しており,地球全体の生物圏はネットとして CO₂ を吸収していると報告しています (Keeling *et al.*, 1985 a).

4. まとめ

前節で述べましたように、現在の大気中の CO2 濃度 の増加は主に化石燃料消費によるもので、森林破壊等に よる生物圏からの CO2 の放出は森林生態学者が以前に 主張したほどは大きくないと言えます。ちなみに、デー タや統計手法の見直しを行った結果,生物圏からの放出 量は最近では、0.4~1.6 Gt/年と小さくなっています (Detwiler and Hall, 1988). しかし, 生物圏からの放出 を1Gt/年と見積ったとしても、地球表層における炭素 循環は解明された訳ではありません。現在、化石燃料消 費によって大気に注入されている CO, は 5.6 Gt/年で あり, 生物圏からの1Gt/年を加えますと, 総量は 6.6 Gt/年となります. 一方, 観測事実として 3.2 Gt/年の CO2 が大気に残留していることが分かっています。残 りの 3.4 Gt/年は海洋が吸収しなければなりませんが、 現在の海洋化学の知識では 2 Gt/年程度の吸収しか考え られません.したがって、私達が持ち得ている炭素循環 の知識では現実に起きている現象を説明することができ ません. この問題の解決にとって、1節で述べました大 気中の CO2 濃度の精密測定と輸送モデルによるシミュ レーションが最良の策と考えられますが、多くの問題が 山積しています.現在,世界の約50ヵ所で CO2 濃度の バックグラウンドモニタリングが行われていますが、こ れらのほとんどは地上観測です. また今日までのモニタ リングステーションの配置は濃度の長期変動の監視に力 点が置かれ過ぎた傾向があります. 陸地から充分に離れ た孤島での観測は長期変動の監視には適していますが、 大気中の CO₂ の放出・吸収が強く行われる大陸の情報 が減衰してしまい、モデルを用いて吸収源・放出源強度 を推定する際には、このようなデータだけでは不十分で す. 今後は地上観測を充実させると同時に 航空機,船 舶,大気球を用いて空間的に密な観測を系統的に展開 し、CO₂の3次元的空間分布を明らかにする必要があり

ます. また,海洋と生物圏の寄与を分離するために δ^{13} C のデータも不可欠です. さらににモデルも未だ不十分な 点が多々あり,改善して行かなければなりません.

5. 謝辞

大気中の CO2 に関して研究する機会を与えて下さり, 今日まで一貫して御指導下さいました東北大学理学部田 中正之教授に心から御礼申し上げます。また、かつての 大学院生であった青木周司氏(現国立極地研究所),深堀 正志氏, 塩原匡貴氏 (現気象研究所), 大島裕之氏 (現 国際気象海洋株式会社), 宮下 孝治 氏 (現気象協会北海 道本部), 江角研二氏, 荒川隆氏(現気象協会東北本部), 酒井千春さん (現日本 システム 開発研究所),現大学院 生である村山昌平,橋田元,町田敏暢,森本真司の各氏 の参加なしには今日まで研究は続けられなかったと思い ます。特に CO2 研究の初代の大学院生であった青木周 司氏の貢献は大きなものでした。南極地域の観測は、川 口貞男教授,山内恭助教授(国立極地研究所),第24~ 30次南極地域観測隊の方々と、大気球観測は伊藤富造教 授,本田秀之氏(宇宙科学研究所)と共同して行いまし た、皆様方に深甚なる謝意を表します、さらに、標準ガ スの製造および分析計の開発に際しましてはそれぞれ日 本酸素株式会社小山第2工場, 堀場製作所株式会社に, 試料採取に際しましては,日本エアシステム株式会社 (旧東亜国内航空株式会社),日本フライングサービス株 式会社仙台営業所,日本航空株式会社,全日本空輸株式 会社,日本郵船株式会社,川崎汽船株式会社,大阪商船 三井船舶株式会社、ナビックスライン株式会社(旧山下 新日本汽船株式会社), 富士山測候所, 沖縄アクアポリ ス管理財団に全面的な協力を頂きました、厚く御礼申し 上げます.

文 献

- 田中正之,中澤高清,塩原匡貴,大島裕之,川口貞 男,山内 恭,1984:南極昭和基地における大気 中二酸化炭素濃度の連続観測システムの新たな開 発,南極資料,82,1-11.
- Callendar, G.S., 1958: On the amount of carbon dioxide in the atmosphere. Tellus, 10, 243-248.
- Detwiler, R.P. and C.A.S. Hall, 1988: Tropical forests and the global carbon cycle. Science, 239, 42-47.
- From, E. and C.D. Keeling, 1986: Reassessment of late 19th century atmospheric carbon dioxide variations in the air of western Europe and the British Isles based on an unpublished analysis of

1989年11月

contemporary air masses by G.S. Callendar, Tellus, 38**B**, 87-105.

- Gamo, T., M. Tsutsumi, H. Sakai, T. Nakazawa, M. Tanaka, H. Honda, H. Kubo and T. Itoh, 1989: Carbon and oxygen isotopic ratios of carbon dioxide of a stratospheric profile over Japan. Tellus, 41B, 127-133.
- Griffith, D.W.T., 1982: Calculations of carrier gas effects in non-dispersive infrared analyzers. I. Theory. Tellus, **34**, 376-384.
- , C.D. Keeling, J.A. Adams, P.R. Guenther and R.B. Bacastow, 1982: Calculations of carrier gas effects in non-dispersive infrared analyzer. I. Comparisons with experiments. Tellus, 34, 385-397.
- Houghton, R.A., W.H. Schlesinger, S. Brown and J.F. Richards, 1985: Carbon dioxide exchange between the atmosphere and terrestrial ecosystems. 113-140. In J.R. Trabalka (ed.), Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Keeling, C.D., 1968: Carbon dioxide in surface ocean waters, 4, Global distribution. J. Geophys. Res., 89, 4543-4553.
 - ——, R.B. Bacastow, A.E., Bainbridge, C.A. Ekdahl, P.R. Guenther, L.S. Waterman and J.F. S. Chin, 1976 a: Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Tellus, 28, 538-551.
- _____, J.A. Adams, C.A. Ekdahl and P.R. Guenther, 1976 b: Atmospheric carbon dioxide variations at the South Pole. Tellus, 28, 552-564.
- A.F. Carter and W.G. Mook, 1984: Seasonal, latitudinal and secular variations in the abundance and isotopic ratios of atmospheric CO_2 , 2. Results from oceanographic cruises in the tropical Pacific Ocean. J. Geophys. Res., 89, 4615-4628.
- , M. Heimann and R.A. Houghton, 1985 a: A three dimensional model of atmospheric CO_2 transport based on observed winds. 3. Analysis of the mean annual gradients of CO_2 . IAMAP/CACGP International Conference on Atmospheric Carbon Dioxide: Its Sources, Sinks and Global Transport. Kandersteg, Switzerland, 2-6 September, 1985, 253-260.
- Marland, G., 1989: Fossil fuels CO₂ emissions: Three countries account for 50% in 1986. CDIC communications, Winter 1989, 1–3.
- Nakazawa, T., S. Aoki, M. Fukabori and M. Tanaka, 1984: The concentration of atmo-

spheric carbon dioxide on the summit of Mt. Fuji (3, 776 m), Japan. J. Meteorol. Soc. Japan, 62, 688-695.

- Neftel, A., E. Moor, H. Öeschger and B. Stauffer, 1985: Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO_2 in the past two centuries. Nature, 315, 45-47.
- Pearman, G.I., D. Etheridge, F. de Silva and P.J. Fraser, 1986: Evidence of changning concentrations of atmospheric CO₂, N₂O and CH₄ from air bubbles in Antarctic ice. Nature, 320, 248-250.
- Tanaka, M., T. Nakazawa and S. Aoki, 1983 a: High quality measurements of the concentration of atmospheric carbon dioxide. J. Meteorol. Soc. Japan, 61, 678-685.
- , T. Nakazawa and S. Aoki, 1983 b: Concentration of atmospheric carbon dioxide over Japan. J. Geophys. Res., 88, 1339-1344.
- ——, T. Nakazawa and S. Aoki, 1985: Atmospheric carbon dioxide variations in the suburbs of Sendai, Japan. Tellus, 37**B**, 28-34.
- T. Nakazawa, M. Shiobara, H. Ohshima, S. Aoki, S. Kawaguchi, T. Yamanouchi, Y. Makino and H. Murayama. 1987 a: Variations of atmospheric carbon dioxide concentration at Syowa Station (69°00'S, 39°35'E), Antarctica. Tellus, **39B**, 72–79.
- , T. Nakazawa, H. Ohshima and S. Aoki, 1987 b: Temporal variations of atmospheric carbon dioxide at Okinawa, Japan. J. Meteorol. Soc. Japan, 65, 279-285.
-, T. Nakazawa and S. Aoki, 1987 c: Time and space variations of tropospheric carbon dioxide over Japan. Tellus, **39B**, 3-12.
- , T. Nakazawa and S. Aoki, 1987 d: Seasonal and meridional variations of atmospheric carbon dioxide in the lower troposphere of the northern and southern hemispheres. Tellus, **39B**, 29-41.
-, T. Nakazawa, S. Aoki and H. Ohshima, 1988: Aircraft measurements of tropospheric carbon dioxide over the Japanese islands. Tellus. 40B, 16-22.
- Tans, P.P., T.J. Conway and T. Nakazawa, 1989: Latitudinal distribution of the sources and sinks of atmospheric carbon dioxide derived from surface observations and an atmospheric transport model. J. Geophys. Res., 94, 5151-5172.
- Woodwell, G.M., R.H. Whittaker, W.A. Reines, G.E. Linkens, C.C. Delwiche and D.B. Botkin, 1978: The biota and the world carbon budget. Science, 199, 141-146.

8