

地球温暖化をはかる

廣瀬 勝己

1 はじめに

既に「ぶんせき」でも取り上げられているように、地球温暖化を含む地球規模の環境問題が社会的にも大きな話題となっている。これらの問題を引き起こす原因物質はいずれも化学物質で、産業革命以降地球規模に広がった人間活動により環境に放出された物質である。これらの化学物質が、地球上の自然の調節機能を超えて、環境に悪影響を及ぼすと考えられているが故に、大きな問題として対策も含め国際的に議論されている。地球温暖化の問題では人類活動による化石燃料の消費などによる二酸化炭素に代表される温暖化気体の大気中の増加に原因があると考えられている。ハワイ・マウナロア観測所における Keeling による 1958 年以来的の長期にわたる観測結果から大気中の二酸化炭素の増加が明らかにされた(図 1)¹⁾²⁾。二酸化炭素等の大気微量気体は赤外線を吸収することはよく知られている。大気中の二酸化炭素が増加すれば、増加した量に応じて赤外線の吸収量の増加が起こる。それが、対流圏大気に直接影響を及ぼせば、地表気温の上昇につながる。しかし、地球上には様々なフィードバック機構が存在する。従って、大気中の温暖化気体の増加がどの程度の地表気温の上昇に結びつくかどうかを評価することは簡単ではない。

気象学者は大気大循環モデルに二酸化炭素の増加の予測シナリオを組み込んだ計算をした結果、50 年後には地表大気の実平均値として現在より 1~2℃ の上昇が起こることを予想している²⁾。一方、地表気温の過去 100 年の観測結果によると、1980 年頃特に 1990 年代に入って、世界的な気温の上昇傾向が観測されるようになった(図 2)¹⁾。この上昇傾向が、温暖化気体の増大による温暖化の前兆なのか、それとも自然の変動の範囲内なのかを明らかにすることが求められている。

地球温暖化など地球環境問題の原因物質が化学物質という点から、この問題には分析化学が深くかかわっていると考えられる。しかし、必ずしも分析化学者がこの問題に直接かかわっているわけではない。地球物理学者が自身の研究目的から必要に迫られて各種化学成分の分析を実施しているのが現状であろう。このような研究から「地球環境研究のためには分析化学へ何が求められているか」という問題提起が可能かも知れない。逆に分析化学から地球環境科学における分析手法等に対する問題提起も可能である。

地球環境科学(あるいは地球科学)では必ず目的があって分析対象・分析設定目標が決定される。必ずしも、研究対象と考えられる目標物質が分析対象と 100% 一致している必要はない。元素あるいは核種分析を除いて、特に状態分析では分析概念と現実に分析される物質が厳密には一致していないことが

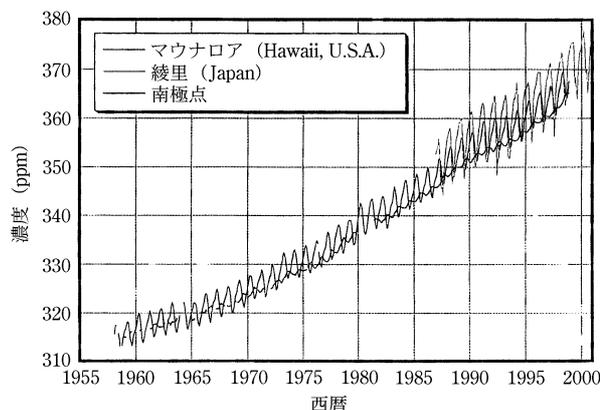


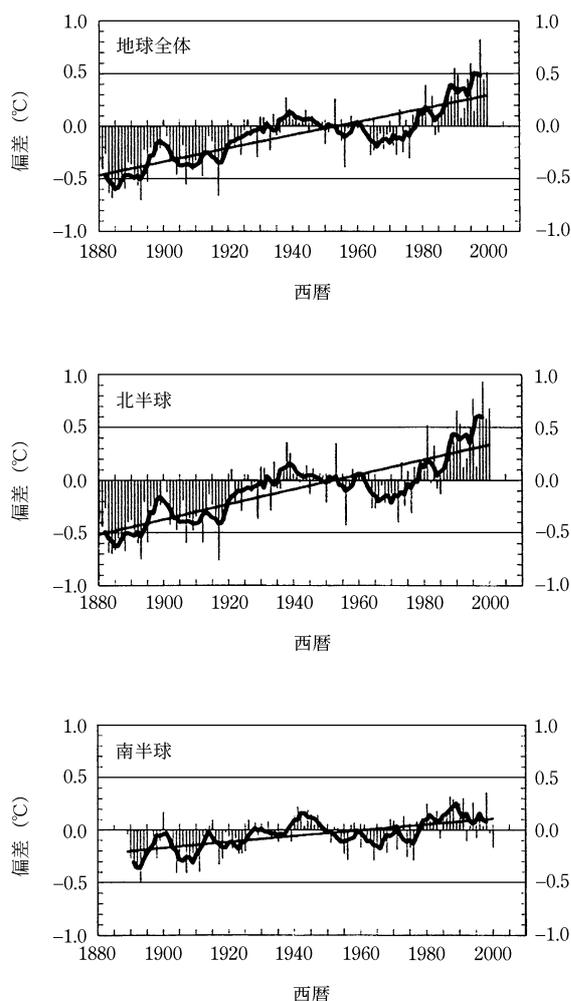
図 1 WMO/WDCGG のデータを利用して描いたマウナロア(ハワイ)、南極点、綾里における大気中二酸化炭素濃度の月間平均値の時間変化

多々ある。一方では、これを一致させる努力も必要であるが、もう一方でその分析対象のトレーサビリティが目標の精度範囲内で確保されていることがより重要なことが多い³⁾。地球科学の観点からすれば、分析値の時系列と空間分布の中から変化を見つけることが最も重要な課題であるからである。

多くの化学者・物理学者が行っていることは、実験室的で変化を作り出し、そこから多くの化学的・物理的事実を導き出すことである。一方、地球環境では、一般には人為的に地球規模の変化を作り出すことはできない(実際には、変化を作り出した所から問題が生じた)。従って、地球環境で起こっている変化(定量化された観測値の変化)を見つけだすことが求められている。変化の中に地球環境で起こる物事を駆動するメカニズムが潜んでいるからである。変化を知ることによって、私たちは、地球上の物質の動きを質的にも量的にも支配している機構を解明しようとしている。

2 温暖化気体の分析

地球規模の環境問題の中で最も大きく取り上げられているのが地球温暖化である。この問題については多くの議論が今日も行われている。そこでの基本的問題は温暖化気体といわれている二酸化炭素濃度が産業革命以降化石燃料の消費により増加し続けていることに由来する。大気中の二酸化炭素分圧の測定は 1958 年の国際地球観測年よりハワイのマウナロア観測所で Keeling により始められた(図 1)。その観測は NOAA に引き継がれ現在もデータが公表されている⁴⁾。大気中の二酸化炭素分圧の増加率は年間約 1 ppm と二酸化炭素分圧(360 ppm)と比較して決して大きくない。しかも、季節変動を示すので増



偏差は1961～1990年の平均値からの差で示す。曲線は5年の移動平均を直線は長期変動を示す。

図2 1880年から2000年までの年間平均地表気温の偏差 { 地球全体 (上), 北半球 (中), 南半球 (下) }

加率を正しく求めるためには多大な努力が必要である。簡単に述べれば、0.1 ppm (0.03%) 以下の精度でしかも数十年のスケールでトレーサビリティが確保される観測が要求されている。つまり、精度が1 ppm (0.3%) の場合、経年変動はおろか季節変動も検出できない。分析化学的にみてもこの目標は簡単ではない。この精度を維持するためには、共通の高精度の分析装置を使用するだけでは十分ではない。物理的計測 (重量測定ないし圧力測定) で値付けされた標準試料が必要である。さらに、標準試料が長期に亘って安定に保存されることが要求されている。

大気中の二酸化炭素分圧は、世界の研究機関で同じ規格の分析装置 (非分散型赤外吸収装置) を用いて測定されている。大気中の二酸化炭素分圧の変動を明らかにするためには、世界中で測定されたデータを使う必要がある。従って、世界中で大気中の二酸化炭素分圧が同じスケールで測定されていなければならない。現在は世界の一次標準ガスを米国の NOAA が供給している (WMO の枠組み)。日本ではメーカーが作成した標準ガスを気象庁が NOAA に送付し、NOAA が値付けをしたものを一次標準として用い、国内でトレーサビリティが確保でき

るようにしている。さらに、精度を担保する目的で大気中の二酸化炭素濃度を測定している研究所・国家機関の間で国際的な相互検定が実施されている。

他の温暖化気体 (メタン、一酸化炭素、 N_2O 、フロン等) については、現在のところ世界的な標準は整備されていない。世界標準ガスのない化学成分については自己検定によりトレーサビリティを確保する方策をとっている。具体的な例として、メタンについて紹介する⁵⁾⁶⁾。現在、日本で用いられている標準ガスは乾燥空気ベースで重量充填法を用いて作製されている。大気中のメタンは FID ガスクロマトグラフで測定しているので、直線性を確認するためにも、最低4本は必要である。なお、松枝らは上層大気中のメタン測定のため5本一組の標準ガスを使用している。この標準ガスは、世界的なトレーサビリティが確保できるまで長期に保存しなければならない。同時に長期の保存の間に、標準ガスの変質が起こる可能性がある。そのため、自己検定を実施している。自己検定としては、4本の標準ガスうち3本を用いて検量線を作成し残りの1本の値を求め、値付けされた値との差を調べる方法である。この方法により、標準ガスの保存についての安定性が担保される。結果として得られた上層大気 (高度約 10 km) のメタン濃度の経時変化によると、大気中メタンの場合、1993年から1998年までは年間約 5 ppb の増加速度で増加したが、1999年以降ほとんど増加は観測されていない。

3 海水の塩分の測定 標準についての考え方

海水中に溶存する主要化学成分は、まとめて塩分として電導度法により測定される。塩分は海水の密度に関連した重要な要素であり、海洋の循環を追跡する重要なパラメーターとして使われている。塩分の変化は地球環境 (特に水循環) の変化とも関連しており、海洋学 (あるいは気象学) では重視されている。塩分は過去には塩素滴定で求められてきたが、現在は電導度法により決定されている。従って、実用塩分と呼ばれ、この計測法は化学計測というより物理計測に近くなっている。塩分は、高精度で測定され、通常の海水の塩分が 34.000 について 0.002 以下の精度が要求されている (世界海洋循環実験で提示された基準)。ちなみに、日本海の深層水は塩分 34.069 ± 0.001 で極めて均一である。

海水中の塩分の標準については UNESCO により、一気圧 15 °C における塩化カリウム標準溶液 (純水 1 kg 中に PSS78 KCl 32.4356 g 含んだ溶液) との電気伝導度比によって定義されている⁷⁾。従って、塩化カリウムを手に入れることができれば、誰でも標準の作成ができることになる。しかし、実際に世界と同じ尺度の標準溶液を作成することは容易でない。その原因の一つとして、不純物として含まれる化学成分が電気伝導度の値に影響するので、共通の尺度にするためには、塩化カリウムに含まれる不純物組成が同じでなければならないという要件が挙げられるからである。従って、現在は IAPSO (International Association for the Physical Sciences of the Ocean) による標準海水が国際的に広く使用されている。

しかし、この標準海水には、バッチ間の差があることが知られている。バッチ間の差の原因については、標準海水製作時の値付けのときに作る塩化カリウム標準液のもとになる高純度塩

化カリウムそのものにロット間の差があるなどの原因により全く同じものを作成できないことから生じるという考え方（ロット間にoffsetがある）と、時間の経過とともに標準海水が変質するためにロット間に差が生じたという説がある⁸⁾⁹⁾。トレーサビリティの考え方からすれば、両者では大きな隔たりがある。ロット間のoffsetであれば基本的にoffset tableさえできれば、過去のデータについてトレーサビリティを回復することができる。しかし、後者の場合、トレーサビリティをとることは困難である。現在ではoffset説が有力であり、塩分0.001の差で海洋の変動を議論できる可能性がうまれている。

4 海水中の栄養塩の分析

既に紹介したように、地球温暖化の原因物質として二酸化炭素がある。そのため、人類活動で放出された二酸化炭素が地球上でどのように循環して、最終的にどこに蓄積されるかを明らかにすることは、将来の気候予測をするために重要である。すなわち、地球上の炭素循環の解明が求められている。現在、人類活動により放出された二酸化炭素の吸収源として、陸上植生と海洋が考えられている。有力な吸収源である海洋では、主に二つの過程が考えられている。二酸化炭素が物理化学過程で海水中に溶解し、海水の混合拡散で深層に輸送される。一方、海洋生物は海水中の無機炭素を材料にして粒子状炭素を生産する。生産された粒子状炭素は重力により沈降し深海へ運ばれ、一部は分解を受け無機炭素になる。この過程は生物ポンプとも呼ばれ、海洋で起るもう一つの炭素輸送過程である。海洋の生物の一次生産を支配するのは、溶存炭素ではなく栄養塩（硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩など）と呼ばれる化学成分である（海域によっては、海水中の微量成分の一つの鉄が生物生産の制限因子になっていることが明らかにされている¹⁰⁾）。従って、海洋の炭素循環を解明するための一つの要素として、海水中の栄養塩の変動の解明が求められている。そのためには、海水中の栄養塩の高精度の分析が必要とされている。

海水中の栄養塩の分析はかなり古くから行われ、海洋化学や海洋物理の基礎資料として活用されてきた。しかし、現時点で栄養塩の分析に適切な標準試料が整備されていないので、海水中の栄養塩の長期動態を追跡することが困難である。歴史的には、1970年代日本で製造されている栄養塩のCSKの標準が、海水中の栄養塩の分析に広く用いられてきた。この標準溶液は硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩（塩分35の塩化ナトリウム溶液）及び亜硝酸塩（純水ベース）で作製されているので、海水の場合、適切な補正をする必要がある（無視できないメディアム効果がある）。従って、高精度（海洋の物理的利用について、繰り返し精度0.2%、確度1~2%の目標値が与えられている）で海水中の栄養塩を測定することはできない。事実、1992年に実施された国際的な相互比較では、1%よりはるかに大きなばらつきがあることが報告されている¹¹⁾。

最近、浮過とオートクレーブによる滅菌法を用いて海水ベースの標準試料の作製の試みが行われた。その結果、数年のスケールで標準海水が安定に保存できることが明らかになった¹²⁾。海水ベースであるため、海水中の栄養塩分析に直接の尺度を与えることになる。この標準溶液が確立すれば、海水の栄養塩濃度についてreferenceの値に対する差として1~2%

でトレーサビリティを確保することができ、海洋における炭素循環の研究の発展に寄与することが期待されている。

5 まとめ

地球温暖化にかかわる大気微量成分を測定しその変動を明らかにするためには、本論で紹介したように現在の技術水準で最高の精度で測定されることが要請されている。言うまでもなく、地球科学では観測量（気温のような物理量や化学物質濃度など）の時間的空間的变化を正確に捉えることが求められている。そのため環境科学（あるいは地球科学）では、分析化学が極めて重要な役割を果たす。基本的には環境試料の分析を行い、値が得られ、その評価が行われる（その中には変化が、単に分析法に由来する人為的なものか自然現象なのかの判断も含まれる）。その評価の結果として、自然現象として起こりうる変化を検出する新たな目標設定が行われ、それを達成するための新たな分析手法の開発、トレーサビリティを確保するための水準の設定が行われる。その間のダイナミックな過程が、地球現象解明に不可欠である。中でも、標準試料の重要性は、強調してもし過ぎることはない。

本論では、「温暖化をはかる」という題目に関連して三つのケースを提出して、標準の考え方を紹介した。温暖化問題に関して言えば、標準の体系が確立して世界規模でトレーサビリティが確立しているのは、大気中の二酸化炭素に過ぎない。塩分のように概念として標準が定義されている例があるが、高精度を維持するためには、標準物質の整備は不可欠である。海水中の栄養塩のように、変動を見いだすための上限値としての精度の目標値は設定されているが、標準物質の未整備で変動を検出する水準にないものもある。環境中の多くの物質については、精度の目標も設定されてなく、標準物質の整備が遅れているのが現状であろう。

環境中の有害物質で環境基準が決まっている場合、検出限界以下であれば社会的要請は満たすが、科学的には十分ではない。その時代で可能な方法で値を決める努力が必要である。環境問題を理解するためには、対象となる有害物質の濃度が環境中で増加しているのか減少しているのかが重要な情報になるからである。環境科学（あるいは地球科学）では、分析値そのものに価値があり、得られた値は時代を越えて活用される可能性がある。従って、得られた数値について品質評価を与えることが重要である。品質評価を与えるためにはトレーサビリティが確保されることが不可欠である。さらに、トレーサビリティの確保には標準物質が本質的な意味を持つ。標準物質の整備・維持には多大な資金が必要なうえ、地味な仕事である。しかし、グローバルスケールで研究が進展するためには、標準物質の整備・維持は不可欠であり、国家戦略として、標準を捉えていく必要があるだろう。

本論をまとめるにあたり、青山道夫氏、松枝秀和氏、吉川久幸氏には資料の提供および議論をしていただきました。

文 献

- 1) Japan Meteorological Agency: Climate Change Monitoring Report 2000, JMA, Japan, (2001).
- 2) 環境省地球温暖化問題検討委員会: 地球温暖化の日本への影響, 2001 (2001).

- 3) 日置昭治: ぶんせき, 2001, 114.
 4) Japan Meteorological Agency in co-operation with World Meteorological Organization: WMO GAW WDCGG DATA SUMMARY: WDCGG No. 22, Japan Meteorological Agency (2000).
 5) H. Matsueda: Pap. Meteor. Geophys., 44 45 (1993).
 6) 定期航空機による上層大気中の温室効果気体の観測プロジェクト報告書, (2001).
 7) UNESCO: Tenth report of the Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards, Sidney, B. C., September 1980. Unesco Tech. Pap. In Mar. Sci., No. 36 (1980).
 8) 河野 健, 高槻 靖, 今井 淳, 青山道夫: 海洋調査技術, 13 11 (2001).
 9) 河野 健, 高槻 靖, 青山道夫: 海洋調査技術, 14 1, (2002).
 10) 宗林由樹: ぶんせき, 2001, 423.

- 11) M. Aoyama, H. Ota, H. Kamiya, S. Masuda, N. Nagai, K. Saito, S. Iwano: 2002 Ocean Sciences Meeting abstract, OS21B-25 (2002).
 12) H. Ota, M. Kimura, H. Tsubota, M. Aoyama: 2002 Ocean Sciences Meeting abstract, OS21B-24 (2002).



廣瀬勝己 (Katsumi HIROSE)

気象研究所地球化学研究部 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)。名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了。理学博士。
 現在の研究テーマ 環境放射能, 海洋化学, 大気化学。 趣味 音楽鑑賞。
 E-mail: khirose@mri-jma.go.jp

求人・求職

求人

H200218 ㈱日産アーク 解析技術者・専門家募集

当社は日産自動車グループ唯一の材料分析と解析の専門会社です。この度、業務分野の拡張、強化のため下記の技術者や専門家を急募致します。募集対象者: 高分子物性および熱分析の分野, ラマン・赤外などの振動分光分析分野における実戦型の解析技術者や専門家。応募資格: 大学卒以上, 年齢 24~30 歳ぐらいまで。募集人員: 若干名。勤務地: 本社 (神奈川県横須賀市)。応募方法: 履歴書, 成績証明書, 実績書 (特許, 文献, 発表等) を下記宛先に送付ください。書類選考の上, 面接日を連絡致します。連絡先: 〒237-0061 横須賀市夏島町 1 ㈱日産アーク総務部 (電話 0468-67-5280), <http://www.nissan-arc.co.jp>

H200220 東京理科大学工学部第 1 部工業化学科 嘱託助手募集

人員: 嘱託助手 1 名。分野: 分析化学。田中龍彦教授と協力して研究を行うことのできる方。資格: 博士号取得者 (見込みを含む) で, 30 歳ぐらいまでの方。授業担当: 分析化学実験など。着任予定: 2003 年 4 月 1 日。任期: 3 年。公募締切: 2002 年 10 月末日。提出書類: 履歴書, 業績リスト, 主要論文 5 編の別刷 (コピーでも可), これまでの研究の概要, 採用後の研究計画と抱負 (1000 字程度)。提出・問合せ先: 162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3 東京理科大学工学部第 1 部工業化学科 主任 好野剛夫 (電話: 03-5228-8319, E-mail: yoshino@ci.kagu.sut.ac.jp) または田中龍彦 (電話: 03-5228-8317, E-mail: ttanaka@ci.kagu.sut.ac.jp)

H200226 ジョンソン・マッセイ・ジャパン・インコーポレイテッド 分析技術者募集

当社で研究・開発中の自動車排気ガス浄化用触媒およびその原材料の

組成解析, 構造解析を行う技術者を募集しております。募集人員: 1 名。資格 (技術領域): X 線分析 (XRF 等) あるいは ICP 分析に関する技術と経験を有する方, 40 歳ぐらいまで。勤務地: 栃木県塩谷郡。応募方法: 写真付履歴書, 職務経歴書 (いずれも様式自由) を, 当社人事部 (〒329-1412 栃木県塩谷郡喜連川町大字喜連川 5123-3, フリーダイヤル: 0120-101966, 電話: 028-686-5781) までお送りください。秘密厳守。ただし応募書類の返却はいたしません。

H200227 千葉県警察職員 (科学捜査研究所研究員) 募集

職種: 物理 (工学), 化学のいずれかの分野の鑑定。募集人員: 2 名程度。資格要件: 大学等で上記分野を修学された 1972 年 4 月 2 日から 1981 年 4 月 1 日までに生まれた日本国籍の方。応募締切: 2002 年 10 月 11 日 (郵送の場合, 同日消印有効)。試験予定日: (第一次): 2002 年 10 月 19 日 (土), (第二次): 2002 年 11 月 8 日 (金)。応募: 下記まで履歴書 (写真貼付, 専門分野明記) を送付。連絡先: 〒260-8668 千葉市中央区市場町 1-2 千葉県警察本部警務部警務課人事第六係 小堀・菊地 (電話: 043-227-9131, 内線 2635)。

H200228 九州大学大学院工学研究院応用化学部門教授公募

募集人員: 教授 1 名。所属: 機能組織化学大講座。専門分野: 有機化学的アプローチに基づき, 生体情報の化学計測, バイオ分子材料の開発と工学的応用に関する教育と研究を行う。着任時期: 決定後できるだけ早い時期。提出書類: 1 履歴書 (書式自由, 写真含), 2 業績リスト, 3 主要論文 10 編の別刷各 1 部 (総説を含むことが望ましい), 4 業績内容説明と今後の抱負 (2000 字程度), 5 その他参考となる資料 (受賞歴, 特許, 教育活動, 学会活動, 科研費など), 6 意見を伺える方 2 名の氏名と連絡先。公募締切: 2002 年 11 月 22 日 (金) (当日消印有効) (「応募書類在中」と朱書き書留)。送付・問合せ先: 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学大学院工学研究院応用化学部門 (分子) 久枝良雄 (電話: 092-642-3592, E-mail: yhisatcm@mbox.nc.kyushu-u.ac.jp)。