

気象学および海洋学における 放射性元素の役割

杉 浦 吉 雄

1 は し が き

気象および海洋の諸現象に対するトレーサーとして、放射性同位元素を用いることは、近ごろ、流行の気配を示しつつある。この方法は、測定が比較的容易でありかつ、精度よく行われる点で優れている。しかし、他面、放射能の害を無視することができないので、野外実験に適用するには十分の注意が必要である。現在までの実験では主として、原水爆実験によって無慮にも大気中に放出された放射性物質や、宇宙線に由来する天然の放射性物質を利用している。一方、放射性物質を気象、海洋の測器に利用する面も展げつつある。

2 トレーサーとしての放射性元素の特質

放射性同位元素をトレーサー（追跡子）として用いる場合に、その重要な特性として次の三点をあげることができる。(1)ある元素の同位元素は、すべて、化学的性質が同一で互に区別することができない。(2)ふつうの元素の代りに、若干質量の違う放射性同位元素を用いても、研究対象の系に認むべき影響を与えない。これは、移流や拡散などの現象を研究するとき重要である。しかしこの点では、多少問題がある。それは、同位元素効果で例えば、吸着、拡散、交換反応の速度などが、同位元素の質量差によって多少違ってくることである。名古屋大学の小穴教授の研究によれば、空気中の水蒸気は軽い水に富んでいるが、海水には重い水が多い。蒸発のとき軽い水は重い水より蒸発しにくいからである。これは、天然に見られる同位元素効果の一例である。しかし、このような効果は、質量数が増すにつれて急速に減少する。水素と重水素の間に見られるほどには、Caの同位元素間には認められない。(3)放射性元素は化学分析では到底分析できないほどの微量でも、比較的簡単にその放射能によって、検出定量ができる。放射性元素の半減期を τ 秒とし、質量数を M とすると、1 mCに当るこの元素の質量は、 $8.9 \times 10^{-17} \tau M$ (g)となる。例えば、Ca-45では 5.3×10^{-8} gにすぎない。

効率10%のG・M計数管を用いたとすると、バックグラウンドを差し引いて10cmp程度が比較的精度よく測り得る最少の計数値であるから、Ca-45については 2×10^{-15} gぐらいまでは、比較的容易に測ることができる。これに対して、ふつうの化学分析では、 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ gの程度ま

でしか測ることができない。

3 気象学への応用

宇宙線の照射によって大気中の原子核が崩壊し、その結果生ずる中性子と、存在比のもっとも大きい窒素原子(N-14)の相互作用によって、放射性炭素(C-14)や放射性水素(トリチウム, H-3)ができることは、1946年 W.F. Libby によって予言され、その後、その存在が確認された。C-14は低エネルギーの中性子と窒素原子の相互作用により、トリチウムは高エネルギーの中性子と窒素原子の相互作用又は、宇宙線のスターから生ずる。また、高エネルギーの中性子と窒素および酸素原子の相互作用によって、Be-7(半減期53日)とBe-10(半減期 2.5×10^6 年)の生成が期待される。このうち、Be-7の実在については、最近、James R. Arnold, H. Ali Al-Salih によって確かめられた。

C-14の研究は、主として、W.F. Libbyによる。C-14の生成率は、中性子の平均の生成率すなわち、地表面1cm²あたり毎秒2.4ケにほぼ等しいと考えられている。

最近における全世界的な気温上昇の一因は、燃料に由来する炭酸ガスの増加であろうとされている。果してそうであるならば、50~100年前に枯死した植物と現在の植物についてC-14の含量を比較すれば、現在の植物ではC-14含量が少く出るはずである。

大気中のトリチウムは宇宙線による高エネルギーの二次中性子と窒素原子間の(n,t)反応によるか又は、宇宙線のスターから直接生成する。いずれにしても、トリチウムの生成率は、二次中性子と同様に緯度変化をすることはなく、これはC-14についても云えることであるが、C-14の場合は、その平均寿命(8000年)の間に、風や海流による均一化が十分行われて、緯度変化がカバーされてしまうのである。ローカルなトリチウムの生成率 Q (cm⁻²sec⁻¹)、大気中の水蒸気の滞留時間 τ (年)——水蒸気が海面を離れてから、雨や流水となって再び海にもどるまでの時間、大気中の含水量(固、液、気相のすべてを含む) w (m/cm²)、雨のトリチウム含量 T_r (T原子/10¹⁸H原子)、海上の水蒸気のトリチウム含量 T_0 (T原子/10¹⁸H原子)とすれば、

$$T_r - T_0 = 4.7Q\tau/w$$

の関係が得られる。4.7 は単位のとりに方で決まる定数。 w の値として、0.01~0.03 をとると、それぞれ対応する τ の値として、0.013, 0.039, すなわち、4.7, 14日を得る。ローカルな生成率が緯度によって異なる事実からみて、これ位の時間内では、南北の水平混合が十分に行われないと解すべきである。陸の雨のトリチウム含量は概して高い(海の雨では1 T原子/ 10^{18} H原子ぐらいだが、陸の雨では、この数字が3~6ぐらいになる)。これは、陸上では水蒸気の滞空時間が、海上に比べて長いことと含水量が低いことによる。将来、 w 既知の気塊についてその流跡線を知り、 Q の緯度変化を考慮して、雨のトリチウム含量を求めることができるであろう。

トリチウムの生成率に関する全世界の平均は、0.14ケ/cm²/sec である。ただし、この計算には、次の仮定がある。水蒸気の滞空時間は、トリチウムの半減期に比べ

第1表
シカゴの雨雪のトリチウム

採水年月日	トリチウムの存在比 (T原子/ 10^{18} H原子)
年 月 日 時	
1953. 4. 3	9.1±0.3
15	10.0±0.3
30	6.6±0.4
5. 22	6.7±0.3
6. 5	6.2±0.2
25	7.9±0.1
7. 1~2	4.3±0.3
5	7.6±1.5
17~20	2.1±0.4
8. 3	3.60±0.4
4	17.0±0.4
9. 4	7.3±0.6
18	12.0±0.4
10. 18	9.8±0.9
26	19.9±1.0
11. 20 ⁰⁹⁻¹¹	7.3±0.9
27 ¹⁶	13.5±1
20 (雪)	34.5±0.6
13. 2 ¹⁵	7.85±0.26
2 ¹⁷	8.3±0.3
3	5.8±0.4
12	7.8±0.3
1954. 1. 20	10.5±0.3
21 (雪)	18.7±0.4
26	19.4±0.5
2. 5	23.0±1.5
15	9.5±0.4
16	15.6±0.7
1954. 2. 20	4.2±0.2
3. 2 (雪)	20.8±0.5
19	385 ±5
24~25	283 ±3
29 (雪)	196 ±3
4. 7	248 ±5
15	360 ±6
19	425 ±20
5. 26~27	450 ±10
5. 27	416 ±15
6. 1	390 ±5

れば著しく短かいために、ヘリウムに壊変することなく雨水となって海に流入する。第1表はシカゴ(41°N, 88°W)で集めた雨水のトリチウム含量を示す。雨のトリチウム含量には、かなりの変動がある。それは、気塊の発生地や経路、含水量などによると思われるが、現在のところ明らかではない。

1954年3月以降、雨のトリチウム含量が一桁大きくなったのは、3月1日に始まった米国のピキニ(12°N, 165°W)における水爆実験によることは明らかである。甚だ興味深いことは、このような実験の影響が、第2表に示すように、プエルトリコ島(18°N, 165°E)では、明らかに認められても、チリーのヴァルパライソでは少しも認められないことである。この事実は、大気中のトリチウムが赤道を越えて南下しないことを示すものとして、重要であろう。

第2表 各地の雨雪のトリチウム含量の比較

場所	採水年月日	トリチウム 存在比 (T原子/ 10^{16} H原子)
シカゴ	1954 2. 20	4.2±0.2
〃	3. 19	385 ±5
〃	29	196 ±3
〃	4. 7	248 ±5
プエルトリコ	1954 3. 26	65.6±1.2
ヴァルパライソ, チリ	1954 4. 4~5	4.3±0.2

ベリリウムに関する研究は、Arnold と Salih による、彼らは雨水 5~50 ガロンを試料に用いた。1 ガロン当り Be⁺⁺1~2 ml (5mg BeO/ml) を加え、アンモニヤで Be(OH)₂ をおとし、その γ 線を1インチの NaI(Tl) の結晶を用いたシンチレーション・カウンターによって測った。測定の結果、 γ 線のエネルギーは472±10keV で半減期は文献値(53日)通りであることを確認した、第3表に示す如く、シカゴの雨について求めた Be-7 の値は、トリチウムの値(Libby の測定による)とほぼ平行すること。1954年3月以降、トリチウムは激増するが Be-7 はほとんど変化していないことは、注目すべきである。

年間降水量を1mとすれば、シカゴの地表1cm²当りに降下する Be-7 の量は、0.019 ケ/秒となる。さてこの値から Be-7 の生成率を算出するには次の諸過程の速さを推定する必要がある。(1)宇宙線による中性子の生成したがって、Be-7 の生成がもっとも盛んな地上15km 辺の成層圏における鉛直混合、(2)圏界面から雲の高さあるいはそれより低い所までの鉛直混合、(3)南北方向の混合(4)東西方向の混合、(5)一つの降雨から次の降雨までの時間。ごく大ざっぱにみると、下記のオーダーではないかと考えられる。

第3表
雨水中のBe-7の含量

採水地	採水年月日	試水量 ガロン	放射能 cmp/ガロン
シカゴ	1953	10 26	2.30±0.10
		2 12	1.42±0.22
	1954	1 20	2.81±0.34
		26	3.26±0.26
		2 28	0.70±0.16
		3 3	0.56±0.10
		13	1.15±0.30
		18	1.27±0.35
		24	1.67±0.11
		29	1.65±0.18
		4 21	5.00±1.12
		22	2.75±0.40
		5 4	1.37±0.33
		11	5.40±0.45
		6 17	3.52±0.14
		7 3	1.20±0.04
		6	2.44±0.07
ラファイエット	1954	1 20	3.76±0.24
		3 20	0.94±0.09
		19	0.88±0.13
		4 17	0.35±0.06
		27	0.48±0.07

成層圏の鉛直混合

温帯

60~180日

寒帯

30日

対流圏の鉛直混合

15日

南北混合

成層圏

100日

対流圏

10日

東西混合, 対流圏

5日

降雨の間隔

15日

東西方向の混合以外は、Be-47の半減期とほぼ同じオーダーであるから、生成率の計算は容易でない。いま、新たに生成したBe-7の原子は80日で雲の高さまで降下し、水平混合はシカゴにおけるBe-7の濃度を30%低減させ、また、降雨の間隔を10日と仮定すれば、 \bar{Q} の値として、0.05ヶ/秒/cm²を得る。一方、中性子と窒素原子の衝突の断面積や中性子の分布密度などのデータから求めると、 \bar{Q} の値は0.015~0.06ぐらいになり、割合よく一致する。Be-7はC-14やH-3に比べると、生成率は低い、検出は三者の中ではもっとも容易である。従って、この元素を前掲のような大気現象のトレーサーに用いることは、甚だ有望であろうとArnoldらは述べている。

昨年行われたビキニの水爆実験以後、我が国では、降水や空気の放射能を検索し、その結果、放射能分布と気塊の関係を求めたり、放射能の出所をつきとめる試みがいくつか為されてきた。筆者は本年4月12日旭川地方に降った放射能灰を調べた結果、その放射能は3月29日米国ネバタで行われた原爆実験で放出されたものであることを確認した。この灰は大気上層の偏西風に乗って、ヨ

ーロッパ経由で日本に達したものである。ネバタ、北海道間の直線距離を所要時間で割って灰の移動速度を求めると、約20m/secとなる。しかし、実際には、輸送経路は蛇行しているであろうから、上記の値は最低値を示すにすぎない。これは、ほゞジェットストリームの流速のオーダーになる。なお、この灰の本体は、北支の風成土にかなり近い化学組成をもつことが明らかとなった。

この項の終りに、放射性元素を用いた気象測器について、簡単に述べよう。

Co-60(γ 線のエネルギー、1.17, 1.33Mev)を用いた雪量計がある。物質を透過する γ 線は次式に従って減衰する。

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

μ は吸収係数、 $I = I_0/e$ となるに必要な厚さ x の逆数で与えられる。 μ の値はこの場合、0.059cm⁻¹である。従って、透過 γ 線の強度 I を知れば、積雪の含水量を求めることができる。実際には、Co-60をあらかじめ地表におき、この上に積った雪の層を透過する γ 線を、Co-60の真上、15フィートのところに設置してあるG・M計数管に受け、これを発信器につなぐ。ここから出るパルスを、適当な場所で受信するのである。も一つ、Po-210を用いた風速計について報告がある。二枚の平行板電極の一方に放射性物質を塗布すれば、電極間の空間は放射線によりイオン化する。電極間に電圧をかければ、勿論電流が流れるが、いま、電極に平行に風を送れば、電流は流速に応じて変化する。この原理を用いて、全方位式風速計や流量計ができる。

4 海洋学への応用

天然のC-14を用いて、深層水の動きを探知しようとする研究がある。Kulp(1953)は、いろいろの深さ、場所における海水のC-14含量を調べて、 $vFC = \lambda C$ により、 v を求めた。

ここに、 v は流速、 C はC-14の濃度、 λ はC-14の壊変常数である。Kulpによれば、この速さは1~0.01cm/秒である。

海岸侵蝕の問題に関して、GoldbergとInman(1955)は次のような巧妙な方法を発表した。砂の移動状況を知るためのトレーサーとして、中性子を照射した石英を用いるのである。従来、前記の目的には、着色ガラスや鈹物などを用いたり、砂に孔をあけて中に放射性物質をつめたりしていたが、以下に述べる方法に比べれば、二、三の点で劣る。例えば、粒度分布、密度、形などが同一でないために、輸送の状況や量が、トレーサーと砂粒で一致しないとか、予備処理が厄介であるとか、多数の砂粒の中からトレーサー物質を撰別するのが容易でないなどの欠点がある。

Goldberg & Inmanの方法に用いる石英は砂の主成

分であり、石英を砂から分け取るには、重液、磁力、静電気力などを用いれば、比較的簡単である。石英に中性子線を照射すると、石英中の微量の P-31 (ふつうの隣の原子) が放射性的 P-32 (半減期14.3日) に変わる。200~600ppm程度に隣を含有する石英は、熱中性子線の照射により容易にトレーサーにすることができる。

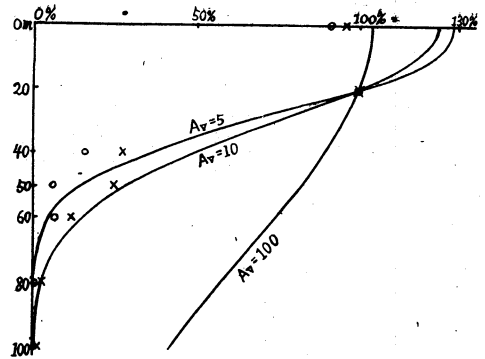
$10^{11}/\text{cm}^2/\text{sec}$ の中性子線束に1週間照射した石英の径約 0.1mm の粒子の数を、約 100 万個の非放射性的の石英粒子とまぜて、その混合物を 8.5×11 インチのセロハン紙の上に展げる。このセロハンの砂粒がついていない方の面を下にして、X線フィルムに4日間密着しオートラジオ・グラフをとる。この方法でこの程度が放射能を検出することのできる限界である。中性子照射後約2ヶ月間は、放射性的の石英をトレーサー実験に供し得る。さて、実施に当っては、保健上の注意が必要であるが、これについて、Goldberg & Inman は次のように述べている。カリフォルニア洲のサンタバーバラでは、1回の実験に13mCの放射性的石英が必要であるが、これを50倍以上に希釈して用いれば障害は起きない。

この例のように、中性子線の照射によって微量の非放射性的物質を放射性的物質に変え、その放射能を頼りに分析定量しようとする試みがなされている。これを放射性的化分析 (Activation Analysis) と呼んでいる。最近では海水中の微量の砒素やウランウムの分析にこの方法が応用されている。中性子線源には原子炉を使う。

昨年の俊鷗丸によるピキニ近海の調査 (筆者は海水、空気の放射能調査を担当した) は大規模な海洋学のトレーサー実験を、世界で最初に実施したことになった。調査の要はすでに「自然」や「科学」誌上に発表されたので省き、ここでは渦動拡散係数の計算についてだけ述べることにする。これは三好寿氏の計算による。調査当時、放射能海水は、主としてピキニ環礁から発して、北赤道海流に乗り西流していた。ピキニ環礁から放射能海水が進出する主要水路の平均深度は約30mであるから、厚さ30mの放射能海水層がピキニを発して3時間西流したとき (観測当時の条件によると、3時間で、海流はピキニ西方でもっともこれに接近した観測点に達する)、水面下どの辺の深さまで拡散するか、次式によって計算した。

$$S = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\int_{\frac{z}{2\sqrt{A_2 t}}}^{\infty} f(z + 2\sqrt{A_2 t} \cdot \xi) e^{-\xi^2} d\xi + \int_{\frac{z}{2\sqrt{A_2 t}}}^{\infty} f(-z + 2\sqrt{A_2 t} \cdot \xi) e^{-\xi^2} d\xi \right]$$

$$\text{ただし } f(z) = \begin{cases} C & 0 < z < 3000 \\ 0 & z > 3000 \end{cases}$$



第1図 ピキニ環礁西方150kmの海域における海水の放射能の鉛直分布 (12 June 1954) (三好氏による)

Z は深さ、 A_z は鉛直の渦動拡散係数、 S は単位体積の海水の放射能。 $t=3 \times 24 \times 60 \times 60$ とし、 $A_z=100, 10, 5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の三つの場合を計算し、三本の曲線を描いた。その結果を第1図に示す。これに対して、実測値をプロットしてみれば $A_z=5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ がもっともよく一致することが判る。これは従来の値より二桁も小さい。この研究は海水の β 放射能についてなされたものであるが、海水の γ 放射能をシンチレーション・カウンターで測ることは、 β 線を測るより手数が省けて便利である。シンチレーション・カウンターを船上におき、あるいは海水中に浸けて、航行しながらでも測定ができる。俊鷗丸の調査では、シンチレーション・カウンターから得た γ 線強度と、G・M計数管で求めた β 線強度が、ほとんど正比例することを認めた。米国の研究は、多く液浸型のシンチレーション・カウンターを用いている。この場合、海水中には K-40 (γ 線のエネルギー、1.55 Mev) が $4.5 \times 10^{-5} \text{ g/l}$ 含まれ、その放射能は $1.2 \times 10^{-2} \text{ dps/cc}$ に当るので、K-40 と異なる γ 線エネルギーをもつ Rb-86 (半減期19.5日, γ , 1.08 Mev) I-131 (8.5日 0.36~0.64 Mev) Ba-140 (12.8, 0.54 Mev) をトレーサーに用いることを R. Revelle は勧めている。

(気象研究所)