

ことは、挙げればきりがない。今や常識となった数々の事実、たとえば直近の氷河期がおよそ2万年に最寒期を迎えたこと²や、1万2000年ほど前にベーリング海峡を渡って北米大陸にやってきた人類がいたことなどが知られるようになった³。日本の縄文時代が同じく1万2000年前ごろに始まったとわかったことも、もちろんこの手法のおかげである⁴。¹⁴C年代法が開発されるまで、過去数万年にわたる年代を科学的に知る術はなかったから、この方法が開発された当時の歴史学、考古学、地質学における熱狂はすさまじいものだった。

その一方で、¹⁴C年代法がもたらした福音が、単に歴史科学の枠内に収まらないことはあまり知られていない。たとえば、人類活動によって生み出される二酸化炭素のかなりの割合が、海に溶けることなく長期間にわたって大気中に残留すること(そして気候を温暖化させること)も、この方法論が明らかにしたことである⁵。また、北半球と南半球の間で、大気との交換がきわめて短期間に起きていることも知られるようになった。このことは裏を返せば、年代を知るという一見単純なことが、きわめて多様な情報と深くつながっていることを示している。¹⁴C年代法の威力は、この手法を開発したリビー自身の予測をもはるかに上回っていたのだった。ノーベル化学賞の選考委員長だったアルン・ウェストグレンは、リビーの受賞を発表する際に、次のように述べている。

「これまで、化学における一つの発見が、これほど多くの研究分野の見解に衝撃を与えたことはなかったし、一つの発見がこれほど広く人々の興味を生み出したこともなかった。」

しかし、過去半世紀以上にわたるこの年代測定法の道のりは決して平坦ではなかった(図)。リビーがノーベル賞を受賞する頃には、大気上層で生成される¹⁴C濃度が時間とともに変動することが知られるようになった⁶。¹⁴C時計の「初期値」が自然変動することは、年代測定の大前提が崩れてしまうことを意味する。もっともこの点に関しては、木の年輪の測定など地道な研究の積み重ねによって、¹⁴C年代から暦年代へ「較正」する手法

三度目の春を迎えつつある放射性炭素年代法

大河内直彦^{*} おおこうち なおひこ

横山祐典^{**} よこやま ゆうすけ

^{*}海洋研究開発機構

^{**}東京大学大気海洋研究所

少々タイミングを逃してしまっただが、一昨年は放射性炭素年代法を確立したウィラード・リビーがノーベル化学賞を受賞してから半世紀目にあたる年だった。天然中に存在する放射性炭素(¹⁴C)は、大気上層で窒素原子(¹⁴N)の中性子捕獲によって生成される。生成後間もなく二酸化炭素に酸化され、対流圏下部にまで降りてきて、海洋や土壌、そして生物の中を縦横無尽に駆け巡る。およそ5730年の半減期をもつこの核種は、ベータ線を出していずれ再び¹⁴Nへ戻っていく。現代の天然物中に¹⁴Cは、安定な炭素(¹²C)に比べわずか1兆分の1しか含まれていない¹。だからその存在比を測定することは、現在でも決して容易なことではないし、ましてや70年も前にリビーが精密に測定しようと思立ったこと自体驚くべきことである。

この年代測定法の登場によって明らかにされた

2011	最初の微量放射性炭素年代測定ワークショップが開かれる
1998	炭素量 0.1 mg で放射性炭素年代が測定できることが報告される
1996	化合物レベル放射性炭素年代法が確立される
1994	放射性炭素年代の校正プログラム OxCal が作成・配布される
1986	放射性炭素年代の校正プログラム CALIB が作成・配布される
1977	加速器によって放射性炭素年代測定できることが報告される
1963	核実験によって北半球大気中の ^{14}C 濃度が天然レベルの2倍に達する
1962	放射性炭素年代の半減期が 5730 ± 40 年と改訂される
1960	リビーがノーベル化学賞を受賞する
1958	大気中の放射性炭素濃度が時代によって異なっていたことが初めて報告される
1955	放射性炭素年代の半減期が 5568 ± 30 年と提案される
1954	大気中の二酸化炭素に含まれる ^{14}C 濃度が年々減少していることが報告される
1952	ウィラード・リビーによる「放射性炭素年代(第1版)」が出版される
1949	最初の放射性炭素年代測定の結果が報告される
1947	天然物(下水中のメタン)中に ^{14}C が微量に含まれている証拠が見つかる
1940	放射性炭素がサイクロトロンを用いて初めて合成される
1934	放射性炭素が発見される

図一 放射性炭素年代法の歩み

がその後確立され、なんとか危機を乗り越えてきた。また、当初からの大きな欠点は、測定に大量の試料を必要とすることだった。リビーがこの手法を開発した当時、炭素量にしておよそ 10 g もの試料を測定のために必要としたのである。 ^{14}C が壊変する際に放出されるベータ線をカウントするわけだから、5000 年以上の半減期でゆっくりと壊変する ^{14}C の測定には、当然ながらそれなりの試料量が必要となる。おかげで考古学的あるいは歴史学的に貴重な資料や試料といえども、年代測定のためにごっそりと供せねばならなかった。

ところが 1970 年代後半に、大きな転機が訪れる。カリフォルニア大学やマクマスター大学の科学者らによって、加速器を用いて ^{14}C を直接測定する手法が実用化されたのである⁷。今では、加速器を用いたこの測定法がすっかり主流となっている。何せ、分析に必要な試料量がわずか 1 mg と、ベータ線をカウントする方法に比べ 4 桁も少ない。しかも分析精度は上がり、測定時間も大幅に短縮された。問題は加速器が巨大で、体育館サイズのハコを必要とする代物だったことと、加速器自体がきわめて高額で、潤沢な研究資金をもつ研究機関でなければ手も足も出なかったことだ。とはいえこの技術革新は、 ^{14}C 年代法に二度目の

春をもたらし、さらに多くの研究分野で使われるツールへと脱皮した。21 世紀の現在では、生態系の解析⁸やアルツハイマー病の研究⁹にまで応用され、研究の裾野はますます広がりを見せている。

最近、 ^{14}C 年代法にさらなる展開が開けつつある。加速器のサイズは時代とともに小さくなり、今や少し大きめの実験室なら十分収まるくらいになった。価格も随分安くなった。さらに重要なことは、測定に必要な試料量がさらに 1 桁以上下がったことだ。現在では東京大学の MALT を含め、いくつかのラボで炭素量にして 100 μg を下回る試料量で測定できるようになっている¹⁰。加速器そのものに革新的なイノベーションがあったわけではない。現場の研究者や技術者らが、日々積み重ねた小さな工夫を形にした結果、なしえた技術革新である。

どんな分野であれ、広く応用されている分析法が微量化されると、そこには全く新しい世界が開ける。 ^{14}C 年代法も例外ではない。今回の微量化の恩恵にあずかった分野では、視界が大きく開けつつある。特に、天然中に分布する数多くの有機分子を個々に測定する「化合物レベル ^{14}C 年代法」は、大きな恩恵を受けている¹¹。自然界は、出自の異なる有機分子の集合体であり、そのなか

ら特定の分子だけを取り出して ^{14}C 年代を測定することで、自然界で起こる個々の生物プロセスや輸送プロセスに時間軸が入るのだ。これまでになかったツールの登場によって、自然のペールがまた一枚めくられようとしている。 ^{14}C 年代法は今、三度目の春を静かに迎えようとしているのである。

次回以降は、 ^{14}C 年代法が切り出す新たな自然の一面について見ていくことにしよう。

文献

- 1—W. F. Libby: Radiocarbon Dating, 2nd ed., Univ. Chicago Press(1955)
- 2—R. F. Flint: Glacial and Quaternary Geology, John Wiley and Sons(1971)
- 3—C. V. Haynes: Science, **166**, 709(1969)
- 4—J. Habu: Ancient Jomon of Japan, Cambridge Univ. Press (2004)
- 5—R. Revelle & H. E. Suess: Tellus, **9**, 18(1957)
- 6—H. de Vries: Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap. Proc. B, **61**, 94 (1958)
- 7—D. E. Nelson et al.: Nature, **198**, 507(1977)
- 8—I. Tayasu & F. Hyodo: In: Earth, Life, and Isotopes(eds. N. Ohkouchi, I. Tayasu, K. Koba), Kyoto University Press(2010) pp. 3-16
- 9—M. A. Lovell et al.: Neurobiol. Aging, **23**, 179(2002)
- 10—Y. Yokoyama et al.: Radiocarbon, **52**, 310(2010)
- 11—T. I. Eglinton et al.: Anal. Chem., **68**, 904(1996)