

学 位 論 文 題 名

海水中のトリチウムと海洋学へのその応用

－北西部北太平洋とその縁辺海について－

学位論文内容の要旨

大気から海洋への物質の取り込みを考えると、海水の動き、特に中深層への表面水の沈み込みの程度が重要な因子となる。すなわち、中深層水が形成される海域やその周辺海域で、大気から物質を積み込んだ中深層水がどの程度の量形成され、どの程度のタイムスケールで動いているのかを知ることが必要となる。

一方、大気から海洋への物質除去の全球的な見積りに対して、全海洋の約四分の一を占める北太平洋とその沿岸域、特に、高緯度海域である北部北太平洋は大きな鍵を握っている。冬の北部北太平洋は低温で、冬季の荒天下に一挙に大気－海洋間の気体交換が起こり、このとき、表面水の冷却などにより、中層水が形成される。この中層水が大気から二酸化炭素などを大量に溶かし込んでいる可能性がある。このようなことを起こる北太平洋唯一の場であることから、この海域の果たす役割は大きい。このため、これらの海域での中層水の動きを知ることが必要となる。

これまで、北部北太平洋域やその縁辺海では、塩分、水温、流速計などを用いた物理的手法による解析が行われてきた（例えば、Shuto, 1981; Ohtani, 1989）。しかし、水塊の形成量やその寿命などの動きを見るには、時間軸をもち、中深層水のような表層の流れに比べてかなり遅い動きでも追える化学トレーサーが有効である。化学トレーサーには、トリチウム（ $^3\text{H}$ ）、放射性炭素（ $^{14}\text{C}$ ）、クロロフルオロカーボン類などがあるが、この内、表層からの中深層水の形成量やその寿命、経年変化を見るには、数十年位の時間軸をもつトリチウムが優れている。

トリチウムは、1960年代に水爆実験により人工的に大量に生成され、その多くが水分子（HTO）の形で大気から海洋表層へもたらされた。その半減期が12.4年であることと水分子として海洋中に存在していることから、トリチウムを数十年単位のタイムスケールで動く水塊を研究するのに有効な化学トレーサーなのである。

そこで、このトリチウムを中心に、北部北太平洋とその縁辺海の一部をなす親潮海域（北西部北太平洋）と日本海で、その中深層水の動きを解析した。

まず、日本海で1987年に観測を行った。日本海は水深130mにも満たないシルをもつ4つの海峡によって太平洋やオホーツク海と隔てられている。その平均水深は1350m、最大水深は3725mである。日本海の水深200m以深の水は低温(0.0~1.0℃)、低塩分(34.0~34.1)の特徴を持ち、日本海固有水と呼ばれる。その溶存酸素濃度は約230  $\mu$  mol/kgであり、太平洋の深層水と比較してかなり高い。また、その密度は同一深度の太平洋のものより小さい。これらのデータから、冬季に表層水が冷却され、沈降することにより活発に日本海固有水が形成されていることが示唆されてきた。(Suda, 1932; Shuto, 1981)。

本研究のトリチウムの結果でも、水深2000m付近までその濃度が検出され、かなり日本海の鉛直混合が活発であることを示した。そこで、このトリチウムのデータを、物理的な観測結果に基づいて日本海を3つに区切ったボックスモデル(Harada and Tsunogai, 1986)に適用して日本海水の鉛直混合に要する時間と、日本海の水が日本海内に留まっている時間を見積もった。その結果、前者は100年程度、後者は1000年程度となった。このことは、日本海では100年程度で鉛直混合が起こり、この過程を10回程度繰り返した後に太平洋へ水が出ていくことを意味している。

さらに、この結果から、日本海での大気から海洋への二酸化炭素の取り組み速度(交換速度)を見積もったところ、1.5m/dayとなった。この値は、海洋全体での平均的な二酸化炭素交換速度3.3m/day(Broecker and Peng, 1982)のほぼ半分である。このことから、日本海では水の鉛直混合は活発で、表層水と中深層水との交換が盛んに行われているが、表面で積み込まれる二酸化炭素の量は全海洋平均の約半分でしかないことが明らかとなった。

次に北西部北太平洋(親潮海域)に注目した。北西部北太平洋域は、オホーツク海やベーリング海に起源をもつ親潮海域であり、ここが北太平洋で唯一中層水(~水深1000m)を形成する可能性のある海域である。この海域でも、主に塩分、水温、流速による水塊の動態の研究が行われてきた(例えば、Ohtani, 1989)。この海域での化学トレーサの観測は1973年のGEOSECS計画(Ostlund and Brescher, 1982)の数測点のみであった。そこで、この親潮海域で、1988~1989年にかけて14測点でトリチウムを観測した。

その結果、本研究で得た海水中のトリチウムの存在量は、予想される大気からの降下量(Weiss and Roether, 1980)に比べて、平均63%しか存在しなかった。また、1973年のGEOSECSのトリチウムの平均存在量87%に比べても低いものであった。大気からの降下量よりも存在量が下回ることと、1973年に比べて本研究での存在量のほうが低かった事実から、この親潮海域から水平的にトリチウムが系外に運び出されていることが示唆された。

しかし、この内、オホーツク海に面した西部海域ではトリチウム存在量が約80%もあり、平均

値を大きく上回っていた。等密度面 ( $\sigma_\theta = 26.60, 26.80, 27.00, 27.20, 27.40$  : 水深100～1000m) 上で見ても、この西部海域のトリチウム濃度が他の測点よりも高かった。

そこで、この西部海域の水がオホーツク海とベーリング海に起源をもつこと (Favorite et al., 1976, Ohtani, 1989) から、この海域の水深200～1000mの中層水がオホーツク海およびベーリング海付近の表層から冬季に沈み込み、水平的にこの西部海域に運ばれて互いに混合し形成されているものとして、いつ頃に表層から潜り込んだものがこの海域に到達しているのかを求めた。その結果、 $\sigma_\theta = 27.00$  (水深約400m) 以浅の中層水は1980年以降、また、 $\sigma_\theta = 27.00 \sim 27.40$  (水深約400～1000m) の中層水は1970年頃に沈み込んだものがこの海域に到達していることがわかった。さらに、溶存酸素濃度と組み合わせると、 $\sigma_\theta = 27.00 \sim 27.40$  の中層水は1970年以前に潜り込んだベーリング海起源の水と1970年以降に形成されたオホーツク海起源の水が混ざっていることが示唆された。

これらの結果から、 $\sigma_\theta = 27.00$  以浅の中層水はオホーツク海やベーリング海の表層から沈み込み10年程度かかって、一方、 $\sigma_\theta = 27.00$  以深の水は約20年程度かかってこの西部海域に到達していることがわかった。

以上のように、親潮海域で、はじめて時間軸をもつ化学トレーサーにより中層水の動きを定量的に明らかにし、その形成年代を求めた。

また、北太平洋高緯度域の縁辺海である日本海で、水の鉛直混合に要する時間と日本海内に水が留まっている時間を求め、その動態を明らかにした。さらに、日本海での大気－海域境界面における二酸化炭素の交換速度を明らかにした。

## 学位論文審査の要旨

|    |     |         |
|----|-----|---------|
| 主査 | 教授  | 角 皆 静 男 |
| 副査 | 教授  | 大 谷 清 隆 |
| 副査 | 教授  | 梶 原 昌 弘 |
| 副査 | 教授  | 米 田 義 昭 |
| 副査 | 教授  | 松 永 勝 彦 |
| 副査 | 助教授 | 乗 木 新一郎 |

全海洋の4分の1を占める北太平洋、特に高緯度海域の水の流れを定量的に把握することは、大気から海洋への物質除去などの近年問題になっている種々の現象を全球的に解く上で重要である。その海水流動の内でも、海洋表面で物質を積み込んだ中深層水の流れが関係する問題が多い。そこで、この中深層水の流れに注目し、その形成量、寿命、行方などを時間軸をもつ化学トレーサーであるトリチウムを用いて定量的に明らかにすることを目的とした。

方法としては、(1)北太平洋で唯一、中層水が形成されている北太平洋高緯度海域（親潮海域）と(2)4つの浅い海峡に隔てられ、孤立し、単純な水塊構造をもつ日本海において、海水試料を得て、トリチウム濃度の断面図を描くこととした。

本研究の成果は以下の通りである。

まず、中深層水の海水流動に先だって、海水中のトリチウムの分析法の開発改良を行った。

(1) トリチウムは大気中にその供給源があるため、海水中では濃度が低い。そこで、電気分解による水素の同位体分別効果を利用してトリチウム濃縮を試み、電極板や電流等の条件を工夫して海水中のトリチウムを12倍程度に再現性よく濃縮し、液体シンチレーション法で測定することを確立した。

太平洋の中深層水の流動との比較と、さらにトリチウムが海水流動トレーサーとして優れていることを示すため、水塊構造が太平洋に比べて単純である日本海において海水試料を得て、トリチウムを測定し、以下のことを明らかにした。

(2) 水深2000m以深でも高濃度のトリチウムが検出され、1960年代以降に表層にあった水がすでに水深2000m以深にまで潜り込んでいることをみつけた。このことから、鉛直混合が活発であることを示した。

(3) 日本海水の流動を定量的に把握するために、このトリチウムのデータと、物理的な観測事

実を基に3つのボックスに日本海を区切ったモデルをつくり、これを応用した。そして、日本海水の鉛直混合に要する時間が100年程度と短く、鉛直混合が活発であるにもかかわらず、日本海内には1000年程度も留まっていること（つまり、10回程度鉛直混合を繰り返してから日本海の外へ出ていく）を明らかにした。

- (4) さらに、この日本海水の流動の結果に炭素の物質収支を入れて、日本海での大気－海洋間の二酸化炭素の交換速度が全海洋の平均値の約半分の $1.5\text{m/day}$ でしかないという結論を得た。これらのことから、日本海では、冬季の冷却により水の鉛直混合は活発であるが、深層水が形成される日本海北部は比較的穏やかで、海面を通しての気体の交換は活発ではないことを明らかにした。

次に、親潮海域（北西部北太平洋域）では、オホーツク海内と、ベーリング海から日本沿岸域にかけて測点を設け、海水試料を採取してトリチウム濃度の断面図をつくり、これを解析することで以下のことを明らかにした。

- (5) 水深1000m以深ではトリチウムは検出されず、1000m以深には、1960年代以降に表層から潜り込んだ水塊が貫入していないことをみつけた。
- (6) また、この親潮海域では、大気からの供給量に対する海水中のトリチウムの存在量（残存量）が平均して63%しかなく、このことから、表層水がこの海域の外に流れ出ている、その代わりに深層水が湧昇していることを確認した。
- (7) さらに、このトリチウムの結果と物理的な観察事実とをあわせて、オホーツク海またはベーリング海内で表層水が冷却され、沈み込むことによって生じた中層水が、等密度面に沿って水平的に運ばれ、ウルップ島沖までに到達するのに、水深400m以浅では10年以内、水深400～1000mでは約20年かかっていることを明らかにした。

これらは、親潮海域において、はじめて時間軸をもつ化学トレーサーにより中層水の動きを定量的に研究したものである。

以上、本研究によって得られた成果は、化学的手法を用いて海水の動き、特に中深層水の流動を時間軸をつけて定量的に明らかにした点で意義は大きい。よって、博士の授与にふさわしいものと認められる。