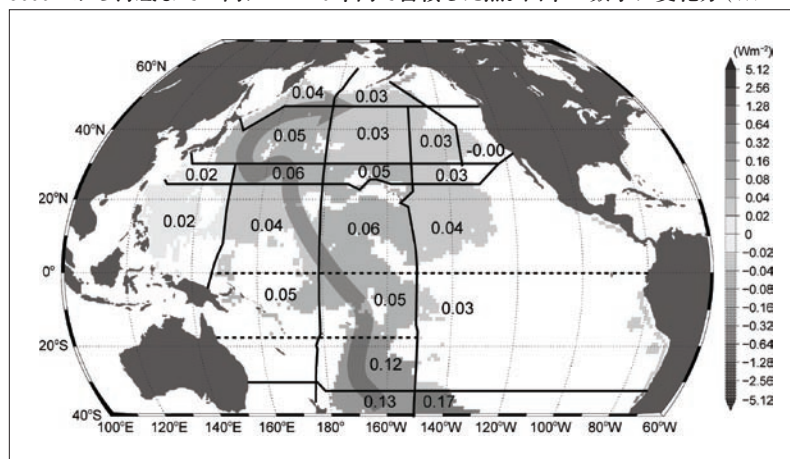


海洋深層循環と熱輸送に関する 観測研究の動向

気候変動は人類にとって喫緊な対応が必要な問題である。海洋の貯熱量変化は、地球上の熱の分配に大きく影響し、ひいては我々の生活圏である地上気温に強く影響を与える。近年、海洋の上層については貯熱量変化が精度よく検出可能となったが、気候変動に重要とされる海洋深層の知見は少ない。海洋深層循環は、地球の気候を決める要因の一つとして、両極で冷やされた海水が深海に沈み込み、地球全体を循環し、海水が冷やされる時の大気への大量の熱放出により極域の大気を加熱する。この深層循環を含む海洋の子午面循環の変化は、比較的急速かつ大きな気候変動に関係するとされている。大西洋においては、グリーンランド沖で沈み込み、大西洋の中・深層を南下し表面近くを北上する大西洋オーバーターンと呼ばれる循環がこの50年間に約30%弱まった可能性がある。これにより急激な寒冷化の可能性が指摘され、欧米では変動を詳しく調査する観測研究が実施されつつある。また、太平洋の最深部にはほぼ全域で貯熱量が増加しており、深度3000m以深は全球規模で貯熱量が増加している。特に深層水が形成される南極周辺海域での増加は顕著で、南極周辺で沈み込み、各大洋の最深部を北上し中・深層を南下する南極起源の南極オーバーターン全体の弱化を示唆し、深層循環研究の国際的研究計画が立案されている。

このような循環の変化を捉える観測研究は大規模かつ長期間にわたり、世界的にも不十分である。現在、我が国では個々の研究機関がそれぞれの経常的な研究の一部として深層循環研究を実施しているが、規模と継続性という観点からは極めて脆弱である。大規模研究を推進する枠組みが必要であり、その枠組みをもとに国際連携による研究を推進していくことが求められる。

5000mから海底までの間にこの10年間で蓄積した熱。図中の数字は変化分(W/m²)



参考文献⁹⁾を基に科学技術研究動向センターにて作成

海洋深層循環と熱輸送に関する 観測研究の動向

河野 健
客員研究官

1 はじめに

気候変動は人類にとって喫緊な対応が必要な問題である。海洋は大気に比べて比熱が約4倍、質量は約260倍であり、地球上の海洋の全熱容量は大気の大熱容量の約1000倍となる。そのため、海洋の貯熱量変化は、地球上の熱の分配、ひいては我々の生活圏の地上気温の変化に強く影響を与えている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)第4次報告書(AR4)¹⁾によれば、観測網が整備され貯熱量変化を精度よく検出可能になった結果、「全海洋の3000mまでの平均水温は上昇しており、海が気候システムに加えられた熱の80%超を吸収している」こと、「表面から700mまでの海洋全体の水温は平均でこの数十年間に0.1℃上昇している」ことなどが明らかになった。一方、AR4では、深層循環の変化については、「信頼できる予測はまだない」とされている。

海洋には、大規模で組織だった循環がある。一つは、風によって駆動され、海洋中の上層を水平方向に循環する風成循環で、例えば、黒潮などの海流は、この風成循環の一部である。もう一つが、海水の密度差によって駆動され表面か

ら海底までを鉛直方向に循環する対流のような循環で子午面循環と呼ばれる。この循環の海洋深層に達する部分を「深層循環」と呼ぶ。子午面循環は海面において大気から溶けた酸素や二酸化炭素などの物質を海洋内部に運ぶ役割を担っている。例えば、日本海において温暖化などの影響で循環が深層にまで達しなくなれば、深層に酸素が供給されなくなり、バクテリアや底生生物などの生態系が脅かされる可能性があり、最近、新聞等で報道²⁾されている。また、二酸化炭素の海洋内部への輸送は、比較的長い時間スケールでの海洋の二酸化炭素吸収力に影響する。

さらに、深層循環を含む海洋の子午面循環は気候変動に重要な役割を果たしていると考えられている。海洋子午面循環に伴い、両極付近に輸送された暖かい海水は、そこで大気に大量の熱を放出して冷却され、深海にまで沈み込み地球全体を循環する。すなわち、この循環に伴う熱輸送は、両極付近の大気を加熱していることになり、地球の気候を形成する上で大きな役割を担っている。そのため、この循環の変化は比較的急激な気候変動と強く関連している可能性が

ある。1万年以上前に、氷期の終了に伴い温暖化が進行する時期に温暖な亜間氷期から突然寒冷化し、亜氷期になったヤンガードリアスと呼ばれる時期があった。この気候の変化は海洋の子午面循環の大きな変化が原因という説が有力である。

最近の研究によれば、大西洋において、グリーンランド沖で沈み込み大西洋の中・深層を南下し海洋の表面近くを北上する子午面循環が、この50年間に約30%弱まった可能性がある。この可能性に関する論文が2005年にNature誌³⁾に掲載されて以来、事実であれば急速な気候変動(この場合、寒冷化)につながるかもしれないとの懸念から、その変動を詳しく調査するための観測研究が始められつつある。また、各大洋において深層の水温上昇が観測されているが、この水温上昇は、南極周辺で沈み込み、各大洋の最深部を北上後、中・深層を南下して戻るといった南極を起源とする循環の変化を示唆している可能性がある。このような近年明らかにされつつある事実から、海洋深層の変化に関する研究の必要性があらためて認識されている。

本報告では、子午面循環のうち、

特に海洋の最深層部に達するよう
な循環の変化が我々の生活圏の温

度に直接与える影響に着目して、
海洋深層研究の必要性と国内外に

おける研究の動向について詳しく
述べる。

2 深層循環と気候

2-1

熱塩循環のしくみ

地球は球体であることから、地表が太陽から受け取る熱は両極で小さく、赤道付近で大きくなる。一方、地球が宇宙空間へ放射する熱は緯度に依存する割合が小さい。そのため、中緯度およそ40度を境にして、赤道寄りではいつも温められ、南北の極寄りでは、常

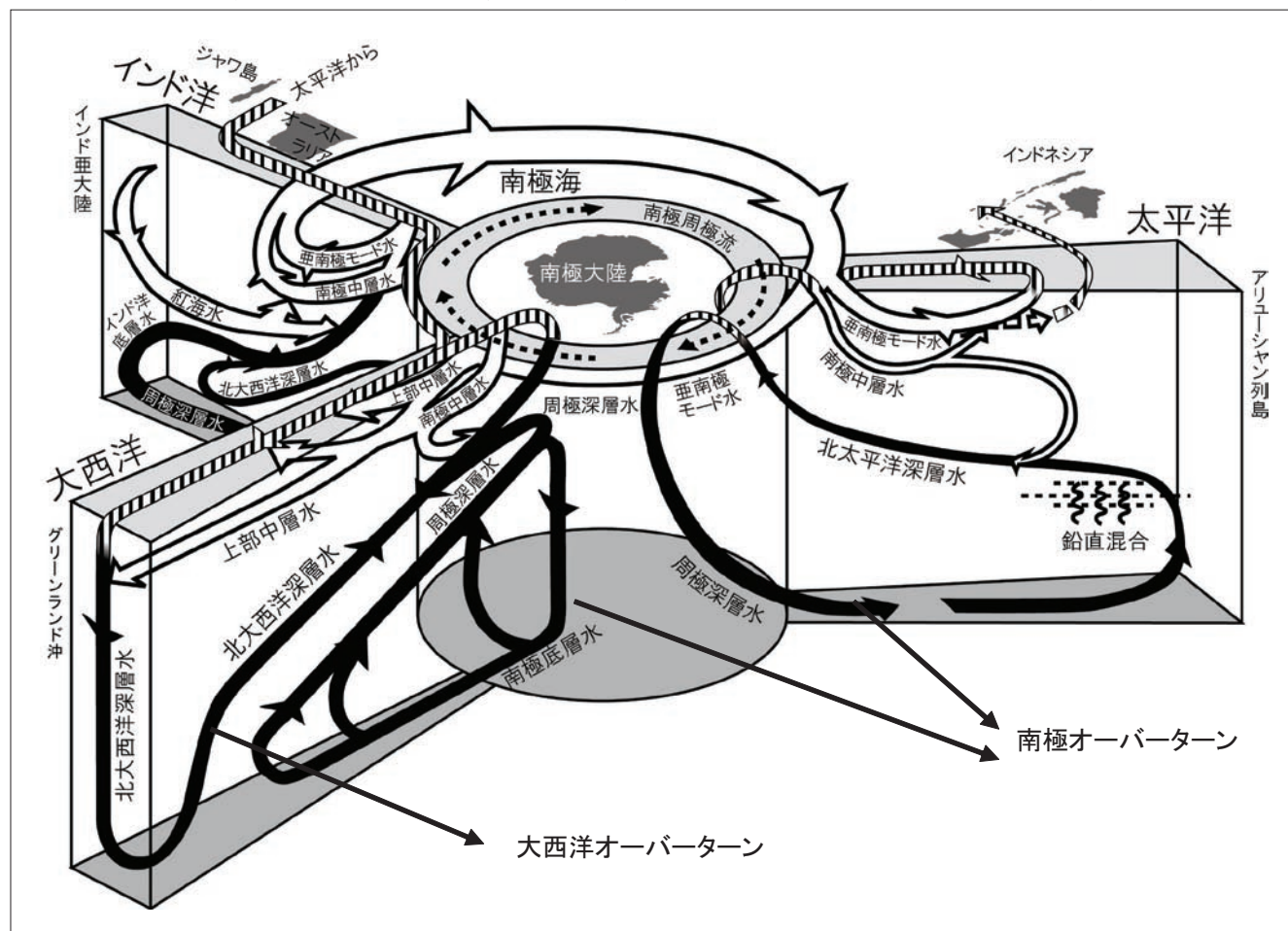
に冷やされる状態となる。極付近の海域では、海水が冷却され、また凍結する結果、低温、高塩分の重い海水が形成される。実際には、南極大陸周辺海域やグリーンランド沖でこうした重い海水が形成され、深層水となって沈み込んでいる。沈み込んだ海水は海中を移動し、周囲の海水との混合や海底の地熱によって軽くなり再び湧き上がってくる。このようにしてできる循環を「熱塩循環」という。

この循環は、低緯度で海水が得

た熱を高緯度地域で大気へと放出していることから、低緯度と高緯度の南北の熱の偏りを戻そうとする機能を持つ、海のなかの大きな対流であり、全海洋にわたり、南北方向に海面から海底までに至る大規模なものである。そのため、子午面循環(Meridional Overturn Circulation)とも呼ばれている。また、深層にまで達するため、この部分を称して深層循環とも呼ばれることもある。図表1は後述の世界海洋大循環実験の結果、明らか

図表1 熱塩循環の模式図

北大西洋で沈み込み、上層を北上してくる循環を大西洋オーバーターン、南極周辺で沈み込み最深部を北上して深層を南下して戻る循環(太平洋、大西洋、インド洋に存在する)を南極オーバーターンと言う。赤道付近の海面水温は30℃近くになるが、両極付近で冷やされた海水が常に深層に供給されるため、海底付近の水温は約1℃となる。



(独) 海洋研究開発機構より提供、参考文献⁴⁾を基に作成された図

となった子午面循環の模式図である。南極を中心として、太平洋、大西洋、インド洋の循環が模式的に描かれている³⁾。南極や北極で冷やされた海水が沈み込み、各大洋の子午面内を縦方向に循環している。場所によって海水の冷やされ具合や塩分が違うので沈み込む水の密度に差が生じ、そのため異なる深度で複数の経路を持つ複雑な循環となっている。図中、斜線の矢印が上層、白が中層、黒が深層の流れを示す。このような循環を担う海水は、水温や塩分、溶存物質等で特徴づけることが可能なため、それぞれ「水塊」として名称がつけられている。このうち、各大洋において最深層に達する深層循環には、南半球においては、南極周辺で海水が最深層まで沈み込み、太平洋、大西洋、インド洋の各大洋の海底を北上し、中・深層を南下してくる、という循環がある。これは南極オーバーターンと呼ばれている。沈み込んで太平洋底を北上する海水は周極深層水と呼ばれ、これは、北上しながら海底から熱を得たり、周辺の海水と混合したりすることで軽くなり、太平洋の深層を南下する。北半球においては、グリーンランド沖で最深部まで沈み込み大西洋の中・深層を南下し上層を北上する循環がある。

これは大西洋オーバーターンと呼ばれている。大西洋には南極オーバーターンによる循環もあり、南極周辺で沈み込んだ海水が大西洋の最深部を北上している。そして、太平洋同様に序々に変質して軽くなり、中層・深層を南下している。

2-2

熱塩循環が気候に与える影響

IPCC4 次報告書¹⁾の中で気候変動と関連して、海洋観測から判明したこととして挙げられている項目を整理すると、以下の通りである。

- ・観測網が整備され、水温や海面水位の変化を以前より精度よく検出可能になった。
- ・全海洋の 3000m までの平均水温は上昇しており、海が地球の気候システムに加えられた熱の 80% 超を吸収している。
- ・表面から 700m までの海洋全体の平均水温は、この数十年間に 0.1℃ 上昇している。
- ・海面上昇は、1961 から 2003 年で 1.8mm/年、1993 から 2003 年では 3.1mm/年で、1993 から 2003 年の上昇のうち約半分は熱膨張による。

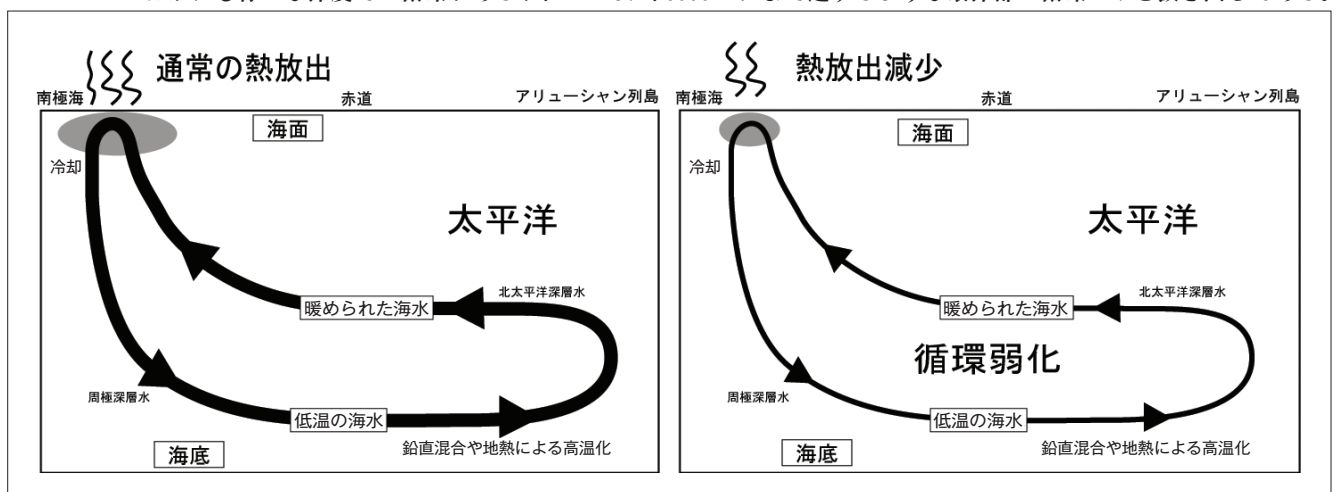
- ・塩分は、中・高緯度で減少、低緯度で増加傾向。降水と蒸発量の関係の変化を示唆している。

このように、海洋の比較的浅い部分における変動については知見が積み重ねられてきている。その一方で、「深層循環の変化についての信頼できる予測はまだない」、と指摘されている。しかし、深層循環も気候変動に大きな影響を及ぼすことは明らかである。特に極における深層水の形成は、海水の冷却に伴い海洋は大気に膨大な熱を放出し、大気を暖め、高緯度での比較的温暖な気候の維持に重要な役割を担っている。

深層循環の高緯度での気候維持への役割について、図表 1 で示した子午面循環のうち、太平洋の最深層に達する循環を例にとり図表 2 に模式的に示した。南極周辺で冷やされた海水は、重くなって沈み込み、太平洋底を北上する。その後、地熱や直上の海水との混合(鉛直混合)によって変質するとともに水温も上昇して軽くなり、太平洋の中層・深層を戻ってくる。そして南極周辺で熱を大気に放出し、すなわち再び冷やされ、重くなって沈み込む。この循環がいわば暖房器具におけるクーラントのような役割を果たして大気を加熱している。

図表 2 太平洋深層の循環の模式図

このほかにも様々な深度での循環があるが、ここでは、6000m にまで達するような最深部の循環のみを抜き出してある。



科学技術動向研究センターにて作成

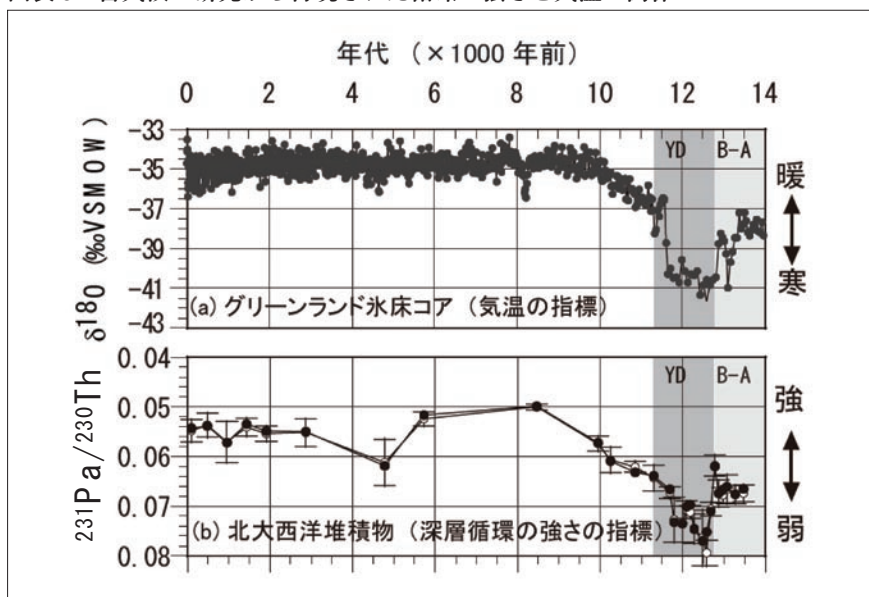
この循環が弱化すれば、熱を運ぶ能力が低下することとなり、南極周辺海域における熱放出が減少することとなる。この関係から、例えば、温暖化により南極周辺海域の気温が高くなると、海洋の表面水温との温度差が小さくなり、大気への熱放出が減る、すなわち海洋の冷却が弱まり循環が弱化することが予想される。このような気温の変化が深層循環と関わる熱輸送システムの変化を引き起こすという直接的な関係だけでなく、一方で、海洋内部での変化が高緯度での気候維持に重要な循環を変化させることも考えられている。例えば、水塊の変質や陸からの淡水の流入量増加などの要因で表面近くの海水の塩分が低下すれば、密度が大きく減り、沈み込み量の減少や循環の弱化を引き起こし、熱放出を減少させることになる。

このような過程を含むため海洋の深層循環は、地球の南北方向の気候の分布や熱バランスを決める要因の一つとなっている。深層循環は数百年の時間スケールを持つゆっくりとしたものだが、循環の変化が熱放出の変化を通じて大気に影響を与えはじめると、それは、数十年という時間スケールで気候に変化をもたらすようになる。そのため、深層循環の変化は、気候の大きな変化に直結している可能性がある、と懸念されているのである。

例えば、南極周辺やグリーンランド沖で海水の沈み込み量が減る、あるいは循環速度が低下する場合、高緯度での大気加熱が減少し、広い範囲で気候が急激に寒冷化へと傾く可能性がある。古気候の研究から、このような変化が過去に実際に起こったと考えられている。1万年以上前の温暖化進行中の亜間氷期（図中B-A）と呼ばれる間に、急激に気温が下がり、それが1000年以上続いた（図中YD）ことがわかる。これがヤンガードリアス期と呼ばれる時期である。

図表3は、過去の気温や循環の

図表3 古気候の研究から再現された循環の強さと気温の関係



(独) 海洋研究開発機構より提供、参考文献^{5, 6)}を基に作成された図

強さを示す指標を氷床に含まれる気体や海底堆積物に含まれる放射性核種を抽出して分析した結果である。水分子を構成する酸素には、質量数が16、17、18の3種類の同位体がある。温度が低いほど、質量数の小さい水分子がより多く気化する、という性質のため、蒸発-凝固-降水というプロセスによって氷床が形成される際、気温が低ければ、降水中の重い酸素の同位対比($\delta^{18}\text{O}$)は小さく、その結果、氷床に含まれる $\delta^{18}\text{O}$ も小さい。従って、氷床の酸素同位対比は、気温を示す指標となる。図表3(a)は、この性質を利用して、グリーンランドの氷床のコアに含まれる酸素の同位対比($\delta^{18}\text{O}$)から復元された過去の寒暖の変化である⁴⁾。ベーリング/アレレード期(図中B-A)と呼ばれる亜間氷期には温暖化が序々に進行していたが、急激に温度が低下し、それが1000年以上続いた(図中YD)ことがわかる。これがヤンガードリアス期と呼ばれる時期である。

この変化は数十年という時間スケールで生じており、この間に、北半球では5℃以上の気温低下が起こったと考えられている。IPCCのAR4では、1906年～2005年の

気温上昇幅は0.74℃であったとされている。数値モデルによる将来予測において、21世紀末までの温度上昇は、最悪シナリオ(高成長社会シナリオ化石エネルギー重視)で4℃前後、最善シナリオ(持続発展型社会シナリオ)で1.8℃前後である。これらに比べると、ヤンガードリアス期の変化は急激かつ大きな変化であったことがわかる。

また、プロトアクチニウム(^{231}Pa)とトリウム(^{230}Th)は、両者ともウラン系列の放射性核種で海水中の単位時間あたりの生成量は時代を超えて一定と考えることができる。粒子に対する吸着の性質の違いのため、海水中での滞留時間が異なり、 ^{231}Pa は200年程度、 ^{230}Th は40年程度である。滞留時間が長いほうが、移流により水平方向に輸送されやすいということを意味する。従って $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ が大きくなると移流の速度が遅くなることを意味し、速度そのものを算出することはできないが、この比率が循環速度の強弱を示す指標として使われている。図表3(b)のグラフはこの指標を利用して北大西洋底の堆積物を解析することで復元された深層循環の強さを示す⁵⁾。図表3(b)に示す通り、約1万2千

年前のヤンガードリアス期には深層循環が弱かった、ということがわかる。

深層循環が弱まった原因としては、カナダの大陸氷床が温暖化で

溶け、氷河湖(アガシー湖)が成長し、ついには決壊して、真水が大量に海洋に流れ込んだため、海水が軽くなって沈み込みが減ってしまったことが考えられている。こ

の高緯度地域への熱の供給を担っていた深層循環の弱化が高緯度域の気温の低下(図表3(a))を進めた、という説が有力である。

3 海洋観測から得られた深層の変化

IPCC の AR4 では「深層循環の変化についての信頼できる予測はまだない」と指摘されているものの、近年、大西洋オーバーターンにおいても、南極オーバーターンにおいても、深層循環の弱化を示唆するような観測結果が得られている。本章ではそれらのうち代表的な観測結果を概説する。

3-1

大西洋オーバーターン弱化

Bryden らは、後述の世界海洋大循環観測計画や気候変動および予測可能性研究計画などにおいて過去に行われた、大西洋北緯 25 度における 1957 年・1981 年・1992 年・1998 年・2004 年の 5 回の船舶観測の結果を解析し、大西洋におけるオーバーターンがこの 50 年間で約 30% 弱まった可能性について Nature 誌³⁾に発表した。

図表 4 は、北緯 25 度における流量の変化を示しており、正の値が北向きを示す。大西洋北緯 25 度は図表 1 で大西洋を北から南まで 3 等分した時の北極側から 3 分の 1 の位置にあたる。図表 1 に示す通り、深度 1000m より浅い所で大西洋オーバーターンの一部である北向きの流れがあり、一方、5000m より深い所では南極オーバーターンの一部として海底付近を北上する流れがあり、1000-5000m 間ではこれらを補償するように南向きに流れるという循環をしている。

例えば 1957 年には、1000m 以浅の北向きの流量は $22.9 \text{ m}^3/\text{s}$ であったのに対し、2004 年には $14.8 \text{ m}^3/\text{s}$ となって循環が弱まっていることがわかる。この結果には異論もあり、さらなる検証が必要だ、とされたことから、第 4 節において述べるような欧米における研究に発展した。

3-2

南極オーバーターン弱化

太平洋においては、深澤らによって 2004 年に北太平洋深層で昇温が発見され⁷⁾、その後、この深層における水温上昇が、太平洋全域にわたっていることが判明した⁸⁾。図表 5 は、深度 5000m から海底までの層の熱量の変化を示している。後述の我が国における「海洋大循環の実態解明と総合観測システムに関する国際共同研究」や「北太平洋亜寒帯循環と気候変動に関する国

際共同研究」、「各研究機関による独自の研究」などのデータ、また「世界海洋大循環観測計画」や気候変動および予測可能性研究計画などの枠組みの下で世界各国において行われた 1990 年以降の船舶観測によるデータを解析した結果である。

図表 5 は、観測線と陸によって太平洋を区分けし、その区分けの中での 10 年間の変化として規格化された貯熱量の変化の見積もりである⁹⁾。色が濃いほど増加量が大いことを示している。この図によると、太平洋の最深部は、ほぼ全域で貯熱量が増加していることがわかる。貯熱量が減少した海域は北部北太平洋東部にあるが、減少量はごくわずかである。特に深層水が形成される南極周辺海域での貯熱量増加が顕著で、太平洋の最深部を北上する周極深層水の経路(矢印)にそって貯熱量の増加が顕著である。数値モデルを使った解析の結果、この大規模な貯熱量増加、すなわち水温上昇は、南極周辺での深層水形成量の減少によ

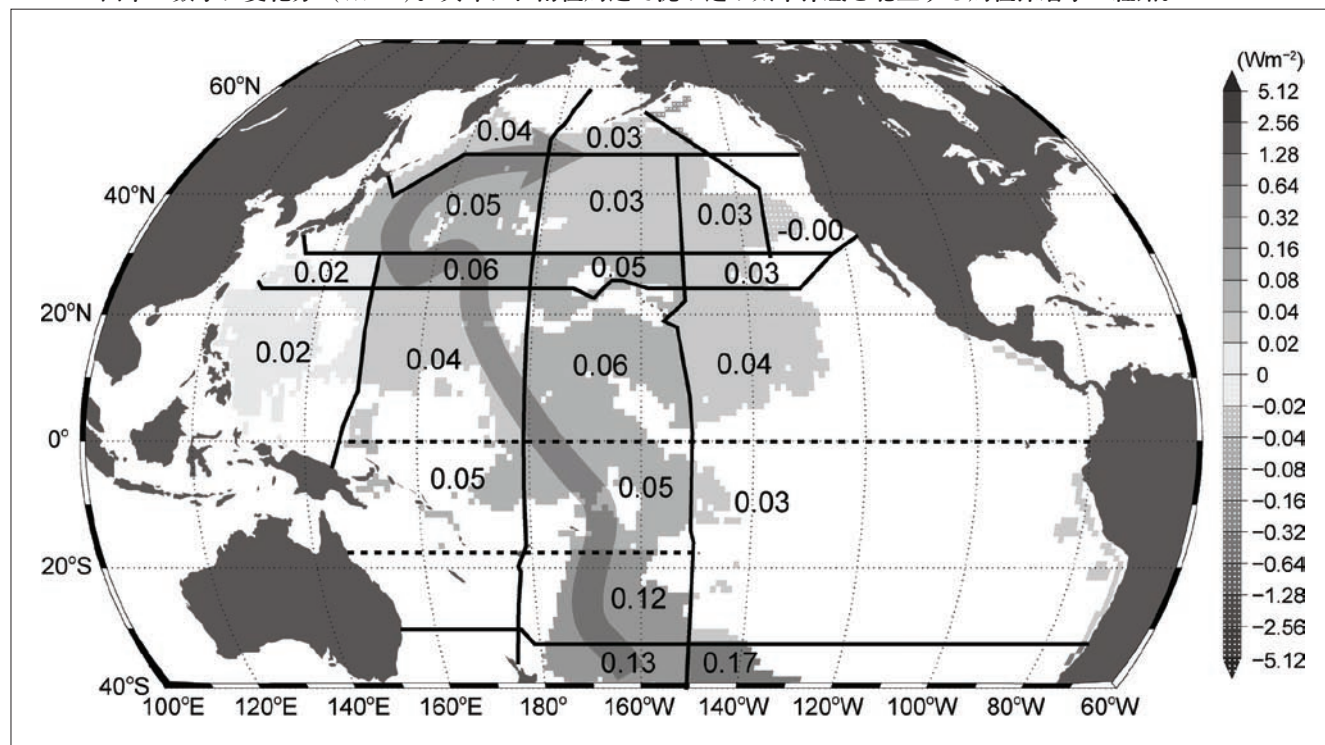
図表 4 大西洋北緯 25 度における流量の観測結果

深度 \ 年	1957	1981	1992	1998	2004
1000m以浅	+22.9	+18.7	+19.4	+16.1	+14.8
1000 - 3000 m	-10.5	-9.0	-10.2	-12.2	-10.4
3000 - 5000 m	-14.8	-11.8	-10.4	- 6.1	- 6.9
5000m以深	+ 2.4	+ 2.1	+ 1.2	+ 2.2	+ 2.5

+が北向き、-が南向き。単位は m^3/s 。

参考文献³⁾を基に科学技術動向研究センターで作成

図表5 5000m から海底までの間に 1990 年代から 2000 年代の間に蓄積した熱を 10 年間の変化として正規化した値
図中の数字は変化分 (W/m^2)。矢印は、南極周辺で沈み込み太平洋底を北上する周極深層水の経路。



参考文献⁹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

るものと判明した。さらには、その深層水形成量の減少は、南極大陸アデリーコースト(東経140度-150度)沖での大気海洋間の熱の交換が変化し、海水の冷却が減少し、すなわち大気加熱も減少したことによるものと推定されている。図表5の観測結果は、南極周辺での深層水形成の減少の影響が40年程度で伝わった様子を捉えたと考え

られるている¹⁰⁾。このような深層の貯熱量増加は、太平洋以外に、南大西洋、インド洋でも発見されていて^{11、12)}、太平洋同様、その変化は南極周辺で大きいことから、これは、南極オーバートーン全体の弱化を示唆する、と考えられている。

なお、IPCCのAR4では、深層の貯熱量変化については定量的に

評価されていないが、最新の観測結果では深層まで含めて全球規模ですべて統合して見積もられている。その結果、深度3000m以深でも全球規模で貯熱量が増加しており、その貯熱量増加は、IPCCのAR4で言及されている深度700-800m以浅の貯熱量増加の5%-30%程度に及ぶ可能性があると言われている¹³⁾。

4 海洋深層観測研究の動向

4-1

国際的な観測研究

1) 世界海洋大循環観測計画

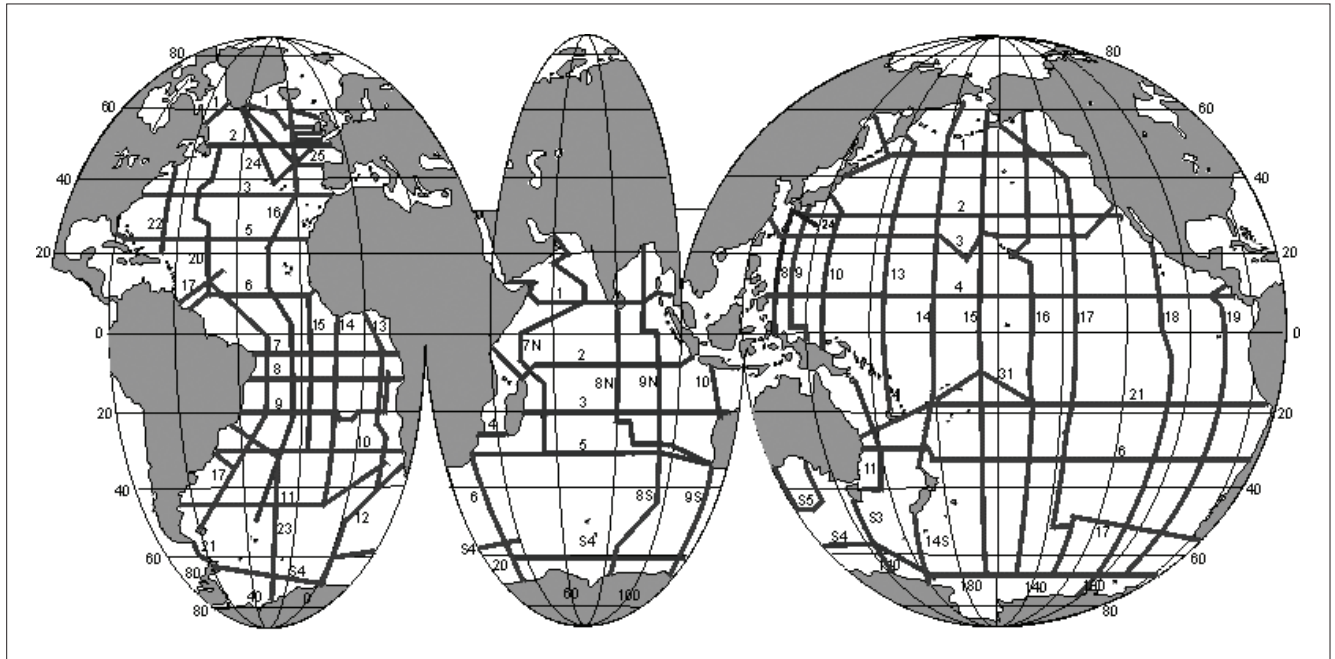
1990年から1998年には、世界気候変動研究計画(WCRP)の一環として、気候変動予測に使える海洋大循環モデルの開発、海洋循環の実体把握、モデルを検証するために必要なデータ収集を目的とし

て、世界海洋大循環観測研究計画(World Ocean Circulation Experiment: WOCE)が実施された。このプロジェクトには、日本、米国、英国などのいわゆる先進国のほかに30カ国以上が参加した。1990年から1998年の間に海洋の東西および南北に縦横に観測線を設け(図表6)、海洋の表面から海底までの詳細な海洋観測が実施された。観測線には、太平洋ではP、大西洋ではA、インド洋ではI、南大洋

ではSというアルファベットと数字からなる名称が付けられており、これらの観測線が以降の大規模海洋観測計画立案に際して基準線として用いられるようになった。

WOCEでは、水温・塩分・溶存酸素・栄養塩類(リン酸塩、硝酸塩、ケイ酸塩)などが必須の計測項目とされ、各観測項目ごとにその時点で最良と思われる観測精度を目標として設定し、その精度を得るための手法について指針を示すマ

図表6 世界で基準とされている WOCE の観測線



参考文献¹⁴⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

ニユアルが作成された¹⁵⁾。レポートの記述内容についても方針が示され、各観測項目の責任者は観測および分析手法を明記して観測精度を明らかにし、かつ観測精度をどのように見積もったかも記述するよう求められた。

2) 気候変動および予測可能性研究計画

1998年には、観測データや気候システムモデルを通じて、季節・年々・10年・100年という時間スケールでの気候変動や予測可能性を研究することを目的とした気候変動および予測可能性研究計画 (Climate Variability and Predictability Project: CLIVAR) の研究実施計画が策定され、2013年までの15年計画で推進された。

この計画の中で、WOCEで得られた海洋の熱や真水の輸送量の知見をさらに高精度化すること、海洋の変化をモニターし、10年あるいはそれより短い時間スケールでの変化を調べること、気候システムモデルの評価のためのデータを提供すること、など、WOCEの研究成果の拡張が求められている。そのため、図表6のWOCEの観測

線の再観測が提案され、その一部が実施された。その観測結果を解析することで、第3節で述べた大西洋オーバーターン弱化の可能性や各大洋における深層の水温上昇が発見された。

CLIVARの研究活動の対象には人為起源の気候変化も含まれているため、WOCE観測線の再観測時には、海洋中の二酸化炭素も観測することが重要視されている。観測を重複なく実行し、データを収集・公開して研究の促進に寄与するため、国際海洋炭素観測プロジェクト (International Ocean Carbon Coordination Project: IOCCP) が組織され、CLIVARと密接に協力しながら主にインターネット上で観測計画の情報交換やデータ公開が行われている。

3) 全球を対象とした船舶観測に関する国際的パネル

CLIVARおよびIOCCPの中で船舶観測を実施しているグループが中心となって2007年に、全球を対象とした船舶観測に関する国際的パネル (Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Panel: GO-SHIP) が構成された。GO-

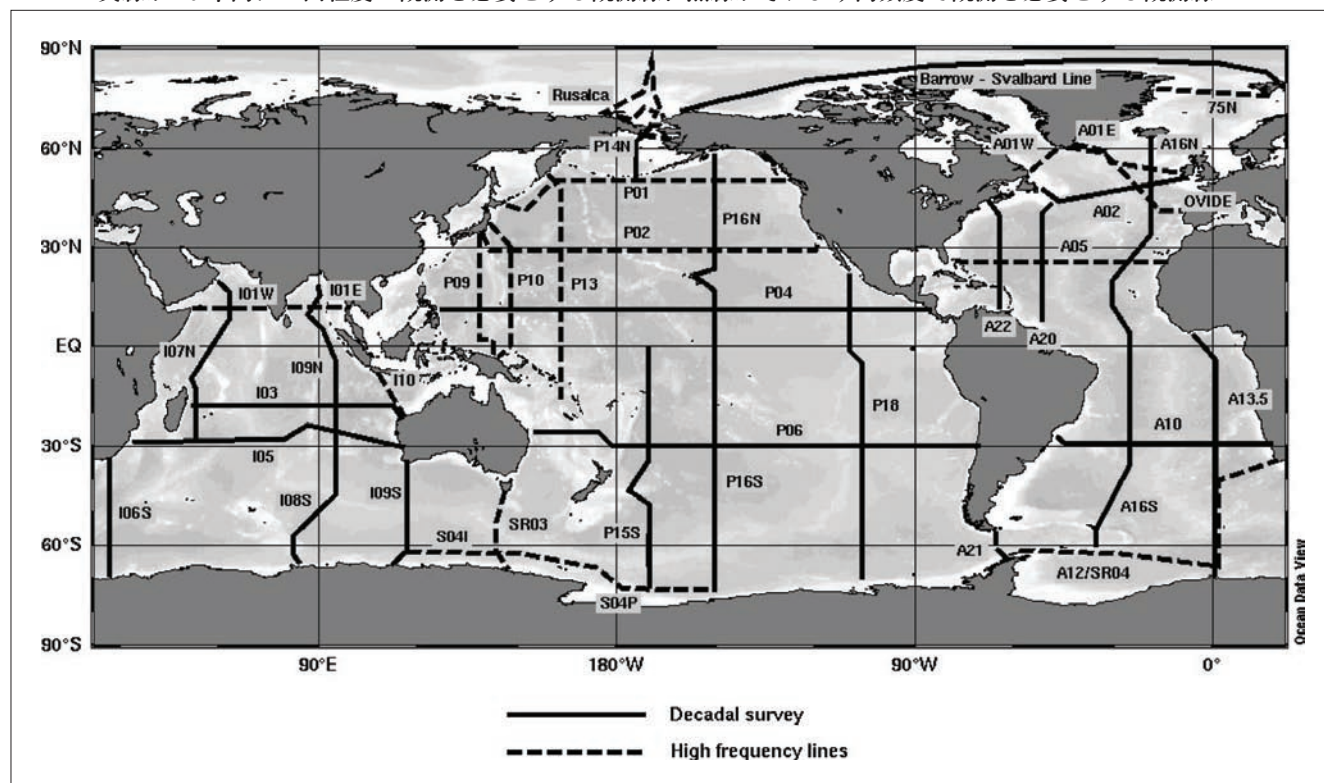
SHIPでは下記のような目標を設定している。

- ・自然起源ならびに人為起源二酸化炭素の分布とその制御因子ならびに海洋内部の生物化学を理解すること
- ・2000m以深の海洋の変化と全球規模の熱や海面上昇への寄与を理解すること
- ・水塊や海面での熱や物質のやりとり、水塊の移動経路の変動を理解すること
- ・海洋中の物質輸送の定量化
- ・数値モデルの評価

GO-SHIPでは、WOCE観測線の中からこの目標を達成するために必要な観測線を抽出し、さらにそれらを10年間に1回程度の精密観測を必要とする観測線、および、それより高頻度で観測する必要がある観測線に分類した (図表7)。また、WOCE同様、必要な観測項目を定め、さらに測定方法に関するマニュアルも改訂し、これらを合わせてGO-SHIPの観測戦略とした。この観測戦略が海洋観測の包括的戦略の一部となるようにOcean Observations Panel for Climate (OOPC) と国際海洋炭素観測調整計画 (IOCCP) が協力すること

図表7 GO-SHIPにより策定された観測線

実線が 10 年間に 1 回程度の観測を必要とする観測線、点線がそれより高頻度で観測を必要とする観測線¹⁶⁾



出典：参考文献 16)

が2009年9月の第3回世界気象機関/政府間海洋学委員会合同海洋・海上気象専門委員会(The Joint WMO^①-IOC^② Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology : JCOMM)において決議された。さらに、2010年6月に実施されたIOC第43回執行理事会においてこの議決が紹介され、執行理事国から支持されている。

4) 大西洋における子午面循環に関する研究

2007年1月に、米国科学技術委員会(National Science and Technology Council : NTSC)の海洋科学技術に関する共同小委員会(NSTC Joint Subcommittee on Ocean Science and Technology : JSOST)が、海洋に関する優先研究計画と実施戦略(Ocean Research Priorities Plan : ORPP)を策定した。この戦

略の中で大西洋オーバーターンと突然の気候変動の関係の研究が、4つの優先研究の1つとして取り上げられている。これを受けて米国では、実行中のCLIVARの事務局を通じて、実行計画の策定チームが編成され、観測・影響・データ統合・予測の面からの研究 Atlantic Meridional Overturn Circulation Science (AMOC)が実施されている。

一方、英国でも、2001 年から環境研究委員会(National Environment Research Council) によって Rapid Climate Change (RAPID) と呼ばれる大西洋オーバートーンに焦点をあてた海洋と気候変動との関係を調べる調査研究がなされている。2008 年以降は、ハドレーセンターとの共同によって 2004 年から 2014 年までの大西洋オーバートーンに関する時系列の観測データを収集することを目的とした

RAPID-WATCH という計画に変更され研究が推進されている。

5) 南極海における観測研究

2006年に南極研究科学委員会 (Scientific Committee on Arctic Research : SCAR) の支援の下、南極海における海洋観測システム構築に関するワークショップが開催され、南極海観測の重要性が認知された。そして、英・米・豪の研究者が中心となり、2010年に南極海に関する包括的な観測研究計画が、The Southern Ocean Observing System (SOOS) Plan として纏められた。この観測研究計画では (a)～(f) の6つの目標を掲げている。

- (a) 全球の熱・水収支に対する南極海の役割の解明
- (b) 南極オーバーターンの安定性の解明
- (c) 南極の氷床の安定性に対する海洋の役割と海面上昇への寄与の解明
- (d) 南極海における二酸化炭素吸収の将来像の解明

① **WMO** : World Meteorological Organization

② **IOC** : Intergovernmental Oceanographic Commission

- (e)南極海の海水の将来像の解明
(f)気候変動が南極の生態系に与える影響の解明

これらの中で、(a) (b) (d)はオーバーターンの観測研究に密接に関わるものである。SOOSでは、上記6つの目標に必要な観測項目や観測に最適なプラットフォーム(船舶・フロートなど)が何かを提案している。特に船舶観測については上述の WOCE 観測線の再観測を想定しており、今後、GO-SHIP などと協力しつつ観測研究を進めていくと予想される。

4-2

日本における海洋深層観測

1) 海洋大循環の実態解明と総合観測システムに関する国際共同研究

1990 年から 1994 年には、科学技術振興調整費事業「海洋大循環の実態解明と総合観測システムに関する国際共同研究」が当時の東京大学・東海大学・気象庁・水産庁・海上保安庁水路部・海洋科学技術センターなどが参加して行われた。この事業の枠組みの下で、オールジャパン体制により WOCE に参画した。WOCE の観測線のうち日本は、P2 (太平洋北緯 30 度線)、P9 (東経 137 度線)、P13 (東経 165 度線) および P24 (九州沖) の各観測線を観測した。

さらに 1996 年には、振興調整費事業は終了していたが、当時の水産庁・海上保安庁・海洋科学技術センターが経常研究費により P8 (東経 130 度線) の観測を実施した。

2) 北太平洋亜寒帯循環と気候変動に関する国際共同研究

1997 から 2001 年には前述の CLIVAR に貢献することを目的とした科学技術振興調整費事業「北太

平洋亜寒帯循環と気候変動に関する国際共同研究」が行われた。この事業の参加機関のうち、当時の水産庁・海洋科学技術センター・東海大学が、CLIVAR の一環として WOCE 観測線 P1 (太平洋北緯 47 度線) および P17 (アラスカ沖) の再観測を実施した。

3) 各研究機関による独自の研究

2002 年以降、日本には特に大型の研究費はなく、各研究機関が経常研究費にて継続している。この間、海洋研究開発機構や気象庁が、WOCE 観測線のうち、P6 (太平洋南緯 32 度線)、A10 (大西洋南緯 32 度線)、I3/4 (インド洋南緯 20 度線)、P10 (東経 149 度線)、P3 (太平洋北緯 24 度線)、P1 (太平洋北緯 47 度)、P9 (東経 137 度線)、P14 (東経 179 度線)、P21 (南緯 17 度線) の再観測を実施してきた。また、振興調整費事業などにより 1990 年以来行われてきた観測結果をさらに解析することで、日本の研究者を中心に第 3 節で述べた太平洋における深層における水温上昇の発見とオーバーターン弱化の可能性を示す成果が 2004 年、2006 年、2010 年に発表されている^{7~10)}。

4-3

日本における海洋深層観測体制の問題点

深層循環の変化を監視するような研究は、大規模かつ長期にわたるもので、国際的な連携のもと、船舶による海面表面から海底までの観測が有効な手段である。しかし船舶観測に関しては世界的に見ても十分な推進状況とは言えない。

持続可能な気候観測システム構築を目的とした様々な海洋観測に関する実行計画が、政府間海洋学委員会(IOC)、世界気象機関(WMO)、国連環境計画(UNEP)、

国連学術連合会議(ICSU)の傘下で組織されている国際協力観測網 Global Climate Observing System (GCOS) によって策定されているが¹⁷⁾、2009 年に示された船舶による繰り返し海洋観測の達成度¹⁸⁾は 62% にとどまっている。我が国においては、海洋観測を実施する船舶は、大学・独立行政法人・気象庁・水産総合研究センターなどが保有している。第 4 章で述べた通り、1990 年代には科学技術振興調整費事業などによって国内の体制を整備し、これらの機関が役割を分担し、オールジャパン体制で WOCE などの国際的な観測研究に対応してきた経緯がある。しかし、現在の日本には、そのような枠組みは存在しない。そのため、現在、我が国における深層循環研究は、学術研究あるいは個々の試験研究機関の経常的な研究として実施されているのみである。個別の機関では、観測船を有効に利用し国際的な研究計画に対応していくのは困難である。2009 年には、前述の GO-SHIP に対応するため、有志による連絡会(Japan Repeat Hydrography Implementation Group) が設立されたものの、このような体制は規模と継続性という観点からは脆弱である。このような問題点は、平成 22 年 3 月 17 日付けの日本学術会議科学者委員会による提言「学術の大型施設計画・大規模研究計画－企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について－」¹⁹⁾でも、「生命科学、地球環境科学など広範な学術の諸分野において、多くの研究者を長期にわたって組織する計画によって、長期定点観測・研究、大規模データ収集、広範なデータベースや大規模資料ライブラリーなどの大分野を支え、我が国の学術の将来的発展を実現する「大規模研究計画」と呼ぶべき研究計画の実施が、国際的視点も加えて緊急の課題」と指摘されている。深層循環研究は、このマスター

ランの中で重要と指摘されている「未来予測を目指した統合的な地球環境の観測・実験・モデル研究計画」の重要な構成要素である。

日本における現在の船舶観測は、厳しい状況にあると言える。例えば、気象庁では、5隻あった観測

船のうち3隻を2010年に引退させている。また、それ以外の機関においても、厳しい財政状況から、今後の船舶の稼働日数を下げざるを得ないという事態も予想される。このような状況下で、深層循環研究のような全球規模の気候変動の

解明と適切な適応策・軽減策策定に必須な大規模研究の実現のためには、まずオールジャパン体制をとれるような枠組みを整えることが必要であり。その上で、国際的な連携によって、研究を推進することが必要である。

5 おわりに

深層循環の変化は比較的急激な気候変動と強く関連している可能性がある。欧米などでは、大西洋オーバーターンの弱化的可能性が指摘されたため、急激な寒冷化に結びつく可能性を懸念し、オーバーンの変化を把握する事を目的とする国際的な研究計画が続けられている。一方、南極オーバーターンに関しても、オーバーターン弱化的可能性を指摘する研究結果がで

てきている。気候変動問題は、適応策・軽減策のみに注目が集まりつつあるが、現状をモニターするための観測研究は重要性が減じたわけではなく、むしろこのようなモニター型観測研究から得られる知見は、気候変動に対する適応策・軽減策の策定に必須である。世界的にみても、このような変化を捉える観測研究は不十分な状態である。特に日本では国内の体制を見

直し、国際連携による研究を推進していくことが求められる。

謝辞

本稿を執筆するにあたり、(独)海洋研究開発機構の深澤理郎領域長、原田尚美チームリーダー、瀬瀬慎也研究員、土居知将技術主任の協力を得ました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) IPCC 編、気候変動 2007 IPCC 第4次評価報告書－政策決定者向け要約－ 邦訳版
- 2) 毎日新聞 2010年9月14日 朝刊 26面 「日本海深部 酸欠」
- 3) H. L. Bryden et al., Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N, *Nature* 438, 655-657, 2005
- 4) W. J. Schmitz, Jr., On the World Ocean Circulation: Volume II, Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report, WHOI-96-08, 238pp, 1996
- 5) P. M. Grootes et al., Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores, *Nature* 366, 552-554, 1993
- 6) J. F. McManus et al., Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes, *Nature* 428, 834-837, 2004
- 7) M. Fukasawa et al., Bottom water warming in the North Pacific ocean, *Nature*, 427, 825-827, 2004
- 8) T. Kawano et al., Bottom water warming along the pathway of lower circumpolar deep water in the Pacific Ocean, *Geophysical Research Letters*, 33, L23613, doi:10.1029/2006GL027933, 2006
- 9) T. Kawano et al., Heat content change in the Pacific Ocean between the 1990s and 2000s, *Deep-Sea Res. Part II*, 57, 1141-1151, 2010
- 10) S. Masuda, et al., Simulated rapid warming of abyssal North Pacific waters, *Science* 329, 319-322, 2010
- 11) G. C. Johnson and S. C. Doney, Recent western South Atlantic bottom water warming, *Geophysical Research Letters*, 33(14), L14614, doi:10.1029/2006GL026769, 2006
- 12) G. C. Johnson et al., Warming and freshening in the abyssal southeastern Indian Ocean, *J. Climate*, 21(20), 5351-5363, 2008
- 13) S. Kouketsu et al., Deep ocean heat-content changes estimated from observation and reanalysis data and their influence on sea level change, submitted

- 14) http://www.clivar.org/carbon_hydro/hydro_table.php
- 15) WOCE Operations Manual, <http://whpo.ucsd.edu/manuals.html>
- 16) <http://www.go-ship.org/Docs/cwp2A09.pdf>
- 17) Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in support of the UNFCCC, GCOS – 92, WMO/TD No. 1219, 2004
- 18) http://www.earthobservations.org/documents/committees/stc/200909_11thSTC/07.2_Taskrpt_Dexter.pdf
- 19) <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-t90-2.pdf>

執筆者プロフィール



河野 健

客員研究官

海洋研究開発機構 地球環境変動領域 プログラムディレクター

<http://www.jamstec.go.jp/rigc/j/occrp/index.html>

専門は海洋学。観測を通じて海洋環境の変動を明らかにする研究に従事。海洋底層の水温上昇と南極オーバーターンの変化を研究している。

東京大学大学院新領域創成科学研究科客員教授。