

人工海底山脈による水塊の混合と二酸化炭素の固定

鈴木達雄*・本田陽一**

人工海底山脈は水塊を鉛直混合することにより、真光層に低層の栄養塩類を添加し基礎生産を増加させることを目的としている。1995～2000年度に水産庁の補助金で実施された実証事業により基礎生産の増加、漁獲量の増加、岩礁性生態系の形成が確認され、水産公共事業の目玉として人工海底山脈事業が実施されている。基礎生産の増加は光合成による二酸化炭素の固定の増加によってもたらされるが、人工海底山脈による二酸化炭素の固定については、議論があり二酸化炭素固定の有効性には疑問があった。本文では、これらの反論に対して気候変動に関する政府間パネル（IPCC）における最新の評価報告書を基に二酸化炭素固定の可能性を明らかにした。

キーワード：人工海底山脈、基礎生産、二酸化炭素固定、二酸化炭素海洋貯留、IPCC

1. はじめに

2008年3月に閣議決定された第1次海洋基本計画は、施策の一つとして「沖合海域においても、基礎生産力の向上、…等の漁場整備を推進する」としている。しかし、海洋の表層では、栄養塩類の不足だけが基礎生産を制限する要因となっている場合が多い¹⁾。このような背景で人工海底山脈²⁾などによる湧昇効果を活用して栄養塩類を真光層（光合成生物の補償深度（海面の1/10²くらいの光強度）以浅の層を指す）に添加し、海域を肥沃化し、基礎生産を増強する革新的な技術が考案された。この人工海底山脈の実証事業は、1995年から国の補助金で実施され、対象海域において植物プランクトンの増加と、それらを餌とする動物プランクトンや魚介類の増殖が確認された³⁾。このように、人工海底山脈は海洋表層における植物プランクトンを起源とする食物連鎖による高い生産性の持続が確認された。さらに、海底山脈素材に付着する生物を餌とし、ブロック間に形成される空間を棲家や拠り所とする岩礁性魚、底魚を中心とする岩礁生態系の形成により生物多様性を確保する機能を併せ持つ有効な施策と考えられるに至った。水産庁はこれを受けて世界に先駆けて、海洋での水産資源の向上を図るため広域漁場整備事業の中で人工海底山脈の整備を進めている。

海洋の植物プランクトンは、陸上の樹木が大気中の二酸化炭素を固定するのと同じように、光合成を行うことで海水中の二酸化炭素を固定する。人工海底山脈などによる海洋における食糧増産は、植物プランクトンによる光合成の増加を起源としているが、人工海底山脈と二酸化炭素の固定に関する定量的な評価は、未だ十分に定まっ

ていない。

一方、地球温暖化抑制は世界の喫緊の課題であり、この分野の研究の進展は著しい。気候変動に関する政府間パネル（以下、IPCCと呼ぶ）は、世界中の関係分野の一流の研究者や専門家による膨大な観測や研究成果をまとめ、1995年の第2次報告書で海洋と陸上植物が二酸化炭素の吸収源であるとし、全球の炭素循環において海洋は非常に重要な役割を果たしており、地球温暖化の研究に欠くことができないとした。次いで、2007年にIPCCは第4次評価報告書⁴⁾を公表し、このなかで人為的な二酸化炭素の放出量を明示している。また、炭素循環における総合的なフラックス量は、一般に±20%以上の不確かさがあり、河川輸送、風化作用、深海固定などを含めた全体の収支バランスが保てるように端数を調整したとしながら、全球の基本的な炭素循環を示した。

現時点では、この炭素循環が世界的に最も信頼性が高いと考えられる。本稿は、最新のIPCC報告書の炭素循環の考え方を基に人工海底山脈による二酸化炭素固定の可能性について考察した。前提として、二酸化炭素を固定することによる京都議定書への貢献も期待して、数十～数百年の比較的短い時間スケールを対象とした。

2. 課題

IPCCは1990年代の大気、陸域、海洋、河川を含む全球の炭素貯蔵量、および炭素の循環量などの観測結果をまとめ、図-1⁴⁾のような炭素循環を示した。この報告書では産業革命以降の人為的な二酸化炭素の放出と吸収量を定量化し、人類による化石燃料の燃焼が大気中の二酸化炭素増加の主な要因であることを明確に示してい

* 環境事業部 ** ジオスケープ

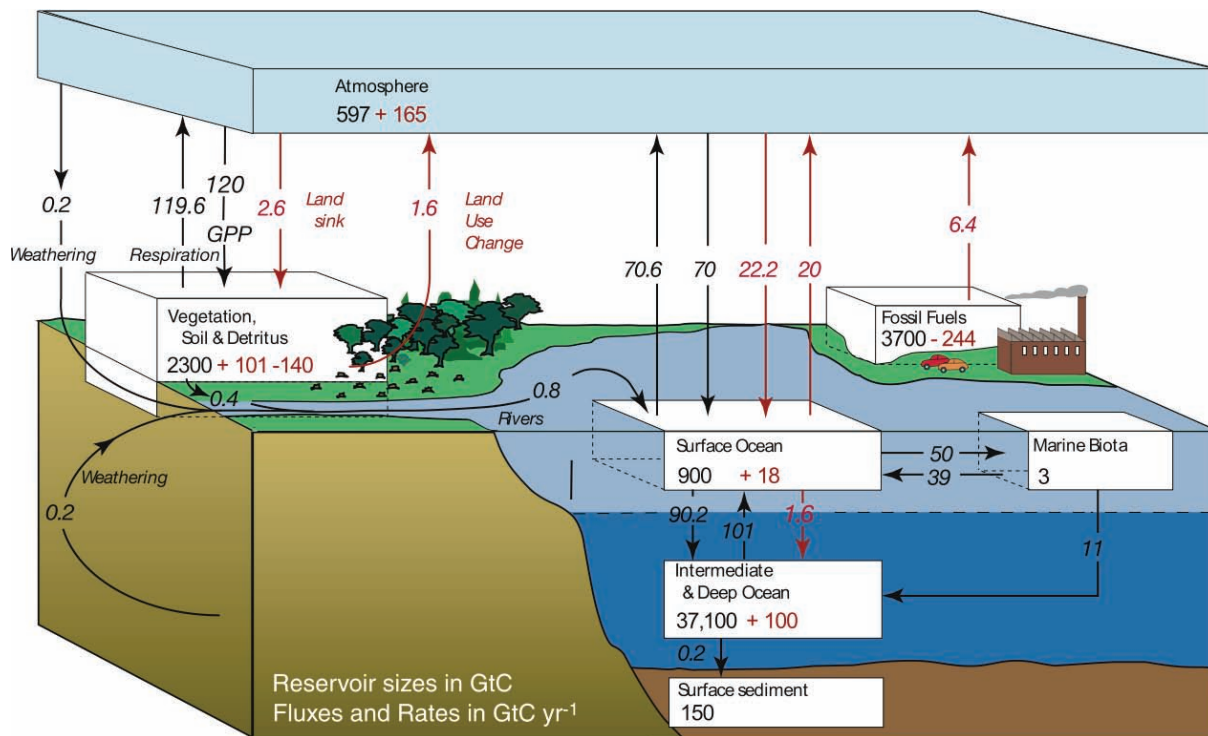


図-1 IPCC 第4次評価報告書による炭素循環⁴⁾

る。図中の赤で示されたフローが産業革命以降のものを示しているが、この報告書の炭素循環は以下に示す a. ~g. のように要約できる。

- 陸域と大気との炭素収支は、差引き 4.8GtC/y (1GtC/y=年間炭素換算量が10億t)を大気に放出する。
- 海域は大気から差引き 1.6GtC/y、河川から 0.8GtC/yの合計 2.4GtC/yを吸収する。
- したがって、大気中の炭素は 3.2GtC/yの速度で増加し、海洋は 2.4GtC/yの速度で炭素を蓄積する。
- 全球の炭素の貯蔵量は、大気が 762GtC、海洋ではその50倍に当たる 38,121GtCである。
- 3GtCの海洋生物相が 50GtC/yの光合成を行い、生物学的に炭素を海洋表層から深層に輸送する生物ポンプで 11GtC/yを中・深層に沈降させる。
- 海洋の表層には中・深層から差引き 9.2GtC/yが物理的な循環で湧昇する。
- したがって、全球の物理循環による湧昇と生物ポンプによる沈降の差引で、表層には 0.6GtC/y、中・深層には 1.6GtC/yが蓄積し、海底には毎年 0.2GtC/yが堆積するとしている。

また、人工海底山脈に係わる基礎的な知見として、植物プランクトンの基礎生産には太陽光、栄養塩類、水温等々に適当な条件が必要となるが、地球上の大部分の海域では特に栄養塩類の欠乏が植物プランクトン生産の律速要因となっている。実際わずかな湧昇海域では湧昇流により深層から栄養塩類が供給されることで、植物プラ

ンクトンによる基礎生産が一般の海域に比べ著しく大きいことが知られている。

海域における湧昇には大きく二つの種類がある。ひとつは風性湧昇であり、陸岸近くで岸と並行に吹く風(地球自転の効果により、北半球では岸を左にみる風)により沿岸の表層水が沖合に運ばれ、その補償として深層の海水が湧昇するものである。ペルー沖などが有名で、風況パターンの変動により長期間にわたり風が弱まると湧昇が少なくなり、全地球的な気候変動をもたらすエルニーニョ現象となる。

もうひとつの湧昇は地形に起因するものである。島、半島、海底の堆や礁に海流や潮流が作用することで、深層の水が表層付近に湧き昇るものである。その過程は、島影に生じる双子渦、堆等の斜面にそった這い上がりなどいくつかの機構がある。

人工海底山脈はこの地形性湧昇を模すものとして開発がすすめられたものであり、海底に造成された構造物に流れが作用することにより湧昇効果を得ようとするものである。しかし、自然地形のような大規模な構造物を作ることは容易ではなく、しかも海底に設置した構造物により表層付近に栄養塩を供給しなければならないことから、効果を得るためには注意深い検討が必要となる。

大気や海洋、湖沼水等の地球を取り巻く流体は水平方向・鉛直方向ともに決して均一ではない。上空からの太陽輻射等による熱エネルギーの偏在から、特に鉛直方向には大きな温度の変化がみられ、これが流れの状態に多大な影響を与える。また、海域では河川水や雨水による

塩分濃度の変化もあり、温度条件とあいまって、下層の重い水の上に表層の軽い水が乗るといった密度成層が形成されることが一般的である。さらに、人工海底山脈の効果発現に必要な要素である流れも決して均一ではなく、海底から表層まで、地形や密度の効果により複雑な流速パターンを持つことが多く、成層や流況は時間とともに大きく変動することが知られている。

前述した地球規模の炭素循環だけでなく、人工海底山脈のような局所的な炭素循環を含む検討をする必要があるが、二酸化炭素の固定に関して、以下の4つに代表される否定的な意見がある。この他に、基礎生産が増加したと仮定した場合の炭素循環の変化、および栄養塩類循環の持続可能性について IPCC の炭素循環を基に考察する。

1) 植物プランクトンによる基礎生産と炭素固定

樹木は二酸化炭素を吸収し、幹などの非同化器官に炭素を固定するが、植物プランクトンにはこれがなく光合成しても短期間に分解され二酸化炭素を放出するので、長期的に二酸化炭素を固定する効果はない。

2) 人工海底山脈による湧昇と CO₂ 収支

基礎生産を増加するために必要な栄養塩類を真光層に湧昇させることは、同時に二酸化炭素分圧の高い深層水を表層に持ち上げることになるので、湧昇とともに海水中の二酸化炭素は大気に放出される。

3) 生物ポンプと大気 CO₂ 収支の関係

海水中の栄養塩類と二酸化炭素は、元は有機物が分解されて生じたものが主であるため、それが再び光合成されるときに大気中の二酸化炭素は必要とされない。したがって、生物ポンプは、海洋全体では大気から海洋への二酸化炭素の取り込みに寄与しない。

4) 人工海底山脈による効果の発現機構の明確化

自然地形に比べスケールオーダーが微小な人工構造物で十分な湧昇効果を発揮することができるか。

3. 結果

3.1 植物プランクトンによる基礎生産と炭素固定

植物プランクトンの増殖、分解、再生産のサイクルは短く、分解された二酸化炭素、栄養塩類などは繰り返し光合成で利用される。IPCC では 3GtC の生物相が平均 3 週間程度のサイクルで年間に 17 回転し、50GtC/y の光合成を行い、その内 11GtC/y は生物ポンプで中・深層に沈降するとしている。これは 1 年間に光合成された炭

素の 22% が、表層から中・深層に沈降することを意味する。同様に Berger⁵⁾ は、全海洋の平均で基礎生産の 13.6% に当たる炭素が、表層から 200m 以深の中・深層に沈降するとしている。生産された植物プランクトンは枯死し、上位生物の餌となり、死骸、分泌物、排泄物などの微粒子態有機物 (POM) となって沈降する。これらはバクテリアに分解されながら 10~数 100m/day の速度で海底に向かって沈降し深層水に取込まれる。

物理循環で表層から沈降する流れの中には深層大循環流を作るものがある。これは沈降して再び湧昇するまでに約 2000 年かかるという研究がある。深層水は表層水より低水温、高密度なので、循環の間表層と中・深層は混合しにくい。したがって、深海に沈降した微粒子有機態炭素を含む高密度の水塊は深海に留まり、有機物や炭酸殻が分解されても数十~数千年は、湧昇して大気とガス交換することはないと考えられる。また、一部の有機物や炭酸殻は海底に堆積、固定される。したがって、深海に貯留されている間、炭素は固定されたと見なすことができる。クリーン開発メカニズム (CDM) では、植林した陸上樹木の炭素固定期間を 20~60 年としており、人工海底山脈によって新たに光合成され、深海に貯蔵される炭素は、これより長く固定されると考えられる。

大古の地球の大気成分は 95% が二酸化炭素であった。20 億年前に海中で光合成を行う藍藻類 (シアノバクテリア) が誕生し、海水中の二酸化炭素を吸収し酸素を放出し始めた。生産された酸素は当時の海水中の鉄イオンと化合し鉄鉱脈を作り、この反応が終わると残った酸素は大気中に放出され、オゾン層を作り陸上生物が息可能な環境をつくった。シアノバクテリアの死骸は海底に堆積し黒色頁岩層を作り、同時代に植物プランクトン由来の膨大な多孔質石灰岩層を作った。このように大気中の二酸化炭素を深海に固定し、大気中の二酸化炭素濃度を現在の 0.03% に低下させたのは、主に光合成を行う海洋の生物であった。

3.2 人工海底山脈による湧昇と CO₂ 収支

海洋における全炭酸の鉛直分布は、有機物の分解により非生産層以深で次第に増大し、水深 1,000m 程度で最大となる。人工海底山脈は水深 60~200m の大陸棚に設置され、潮流、潮汐流、内部波などの自然エネルギーによって真光層の上下数 10m の水塊を鉛直混合する構造物である⁶⁾。真光層内の栄養塩類濃度はゼロに近いが、その直下から水深とともに顕著に増加する。一方、全炭酸濃度は真光層内でもその直下でも大きく変わらない。したがって、真光層直下と直上の水塊が混合しても二酸

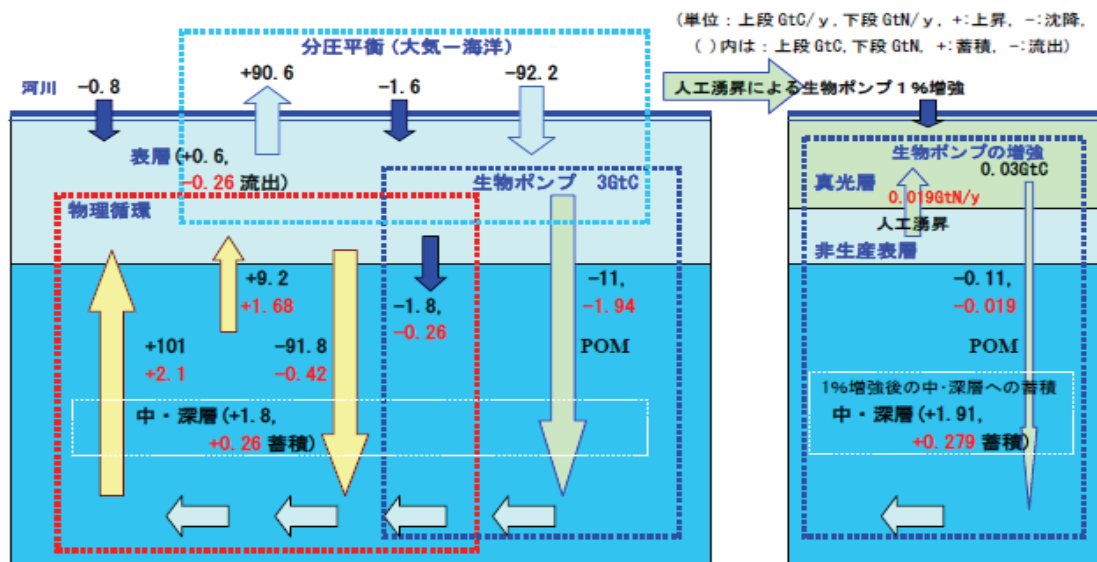


図-2 生物ポンプが炭素循環に果たす役割 (左：IPCC, 右：生物ポンプが1%増強した場合)

化炭素分圧は変わらず、湧昇した水塊が二酸化炭素を放出する可能性は少ない。これに加えて、人工海底山脈により真光層に湧昇した栄養塩類と二酸化炭素は、光合成で有機物に固定されるので、海洋表層の海水の二酸化炭素分圧を下げることで大気中の二酸化炭素の吸収を促すと考えられる。

一方、全球規模では、1990年代の大気中二酸化炭素は人類の化石燃料燃焼などが主因で 3.2GtC/y の速度で急増している。大気中の二酸化炭素分圧が上昇すると、海洋は分圧平衡を保つように海表面で二酸化炭素を吸収する。さらに、全球の物理循環により湧昇、沈降の差引きで 9.2GtC/y が中・深層から表層に湧昇し、表層の全炭酸分圧は上昇している。このように海洋表層の二酸化炭素分圧が上昇しており、全球で平均すると海洋は大気に 90.6GtC/y の速度で炭素を放出している。

しかし、海洋はこれを上回る 92.2GtC/y の速度で大気から二酸化炭素を吸収するとしている。こうして全球の二酸化炭素収支では、海洋が大気から 1.6GtC/y 吸収して分圧平衡する。すなわち、IPCC は物理循環の湧昇速度を上回る 11GtC/y の速度で、生物相が炭素を深海に沈降させ表層の全炭酸分圧を下げ、大気中の二酸化炭素の海洋への溶入を可能にすると考えている。

大気と海洋のガス交換は、以下に示す分圧平衡によって行われる。海洋に溶け込んだ二酸化炭素 (CO₂) は、①水和した CO₂ (CO₂aq)、②イオン化した炭酸水素イオン (HCO₃⁻)、③炭酸イオン (CO₃²⁻) として存在する。唯一大気と交換可能な化学形は CO₂ であり、植物プランクトンが利用する水和した CO₂ (CO₂aq) の存在比は 1%に満たない。この水和した CO₂ の大気と海洋間の交換量は次式で示される。

$$F(\text{CO}_2) = E \cdot \Delta p \text{CO}_2 = k \cdot S \cdot \Delta p \text{CO}_2$$

ここで、F(CO₂)は大気・海洋間の CO₂ 交換量、E はガス移動係数、k はガス交換係数、S は CO₂ 溶解度、Δp CO₂は大気海洋間の CO₂ 分圧差である。CO₂ 交換量はガス移動係数や CO₂ 分圧差に依存する。このうち、ガス移動係数は主に風速の関数である。この海洋中の二酸化炭素分圧を変動させる主要な因子としては、①水温の変化、②大気と海洋間の二酸化炭素の移動、③生物活動(有機物生産と分解、炭酸カルシウム殻の形成と溶解)、④海水の希釈、濃縮、⑤異なる炭酸系の海水の混合の5つが挙げられる⁷⁾。

地球温暖化による海水温の上昇は、海洋から大気への二酸化炭素の放出を促進する。一方、大気中の二酸化炭素分圧の変化率を海水中の全炭酸の変化率で割った値であるルベール係数は、低緯度で 8.5、高緯度で 12~14、平均では 10 前後である⁸⁾。したがって、基礎生産の増加に伴って減少する真光層の二酸化炭素分圧を観測できれば、大気中の二酸化炭素分圧はその 10 倍減少していることになる。

全球では中・深層から表層に湧昇する全炭酸が、表層の二酸化炭素分圧を上昇させるが、生物ポンプが分圧を下げる役割をしており、上昇する大気中の二酸化炭素を吸収していることになる。したがって、人工海底山脈は、生物ポンプを増強することで間接的に大気中の二酸化炭素の吸収を支援するといえる。

3.3 生物ポンプと CO₂ 収支の関係

海洋が大気中の二酸化炭素を吸収するためには、大気と接する真光層の二酸化炭素分圧が大気より低い必要がある。しかし、IPCC は海洋の物理循環は表層の全炭酸分圧を上昇させるとしている。一方、海洋生物は海水中の

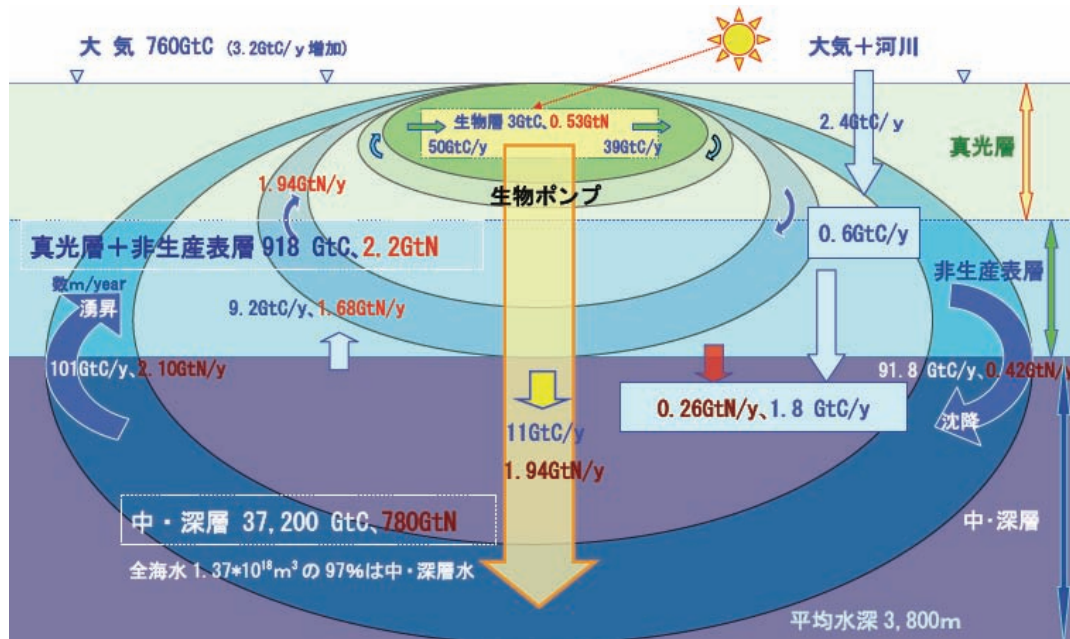


図-3 海洋の物理循環と生物ポンプによる炭素および窒素の循環と貯蔵量

炭素、栄養塩類を光合成で固定するが、すぐに分解され元の元素に戻る。光合成に必要な元素は水中に存在するので大気からの吸収は必要ないという意見がある。

しかし、IPCC の炭素循環では、唯一生物ポンプに表層の全炭酸分圧を下げる機能を期待している。生物生産が炭素循環に与える影響をみるため、各層の栄養塩類の貯蔵量と循環量に着目する。IPCC の炭素循環モデルにおける表層を、上下層に2分割し栄養塩類が不足する真光層の平均水深を 50m とし、その下層に非生産表層を考えた。表-1 に IPCC の炭素循環図を基に真光層、非生産表層、中・深層の水深、体積、炭素貯蔵量(炭酸水素イオン濃度から計算)、窒素貯蔵量(硝酸イオン濃度から計算)、光合成速度(炭素換算)、概略の物理循環速度を示した。ここで、炭素の平均濃度としては海水中の炭素の 99% 以上を占める炭酸水素イオン濃度である 0.1397g/(海水 1kg)、すなわち 28mg/(海水 1 リットル)を採用した。この濃度に真光層では 0.89、表層では 0.93、中・深層では 0.997 の係数を乗じ、真光層と非生産表層の合計炭素貯蔵量を IPCC の 918GtC に、中・深層の炭素貯蔵量を 37,200GtC に近付けた。

栄養塩類では窒素に注目し、硝酸イオン (NO_3^-) の平均濃度を $42 \mu\text{M} = 0.59 \text{gN}/\text{m}^3$ として各層の貯蔵量を推定した。係数は真光層を 0.01 とし、表層を 0.2、中・深層を 1.0 と仮定した。海洋の平均炭酸水素イオン (HCO_3^-) 濃度と硝酸イオン (NO_3^-) 濃度を比較すると海水の炭素：窒素の濃度比は、約 $28 : 0.59 = 48 : 1$ となり、レッドフィールド比(重量比)の 8.5 倍という十分な炭素が海水中に溶存するので基礎生産が全炭酸濃度に律速されることはない。

図-2 の左側に IPCC の炭素循環を 3つの機能に分解し、大気と海洋の分圧平衡、海洋内での物理的な循環、生物ポンプによる沈降、の夫々独立した循環として示した。IPCC の炭素循環では、生物ポンプがなければ、大気から海洋への分圧平衡による 1.6GtC/y の溶入、河川から海洋への 0.8GtC/y の流入、表層と中・深層の全炭酸濃度の差によって生ずると考えられる物理循環による差引き 9.2GtC/y の湧昇、により海洋表層の二酸化炭素分圧は上昇することになる。

しかし、海洋生物は物理循環で湧昇する炭素を有機物に濃縮固定し、急速に自由落下させる。有機物の深海へ

表-1 真光層、非生産表層、中・深層の諸元

	真光層	非生産表層	中・深層
水深 m	0~50	50~100	100~以深
体積 10^7Gm^3	1.8	1.8	133.4
炭素量 GtC	450	470	37,200
栄養塩類量 (NO_3^-) GtN	0.1	2.1	780
光合成速度 GtC/y	50	0	0
物理循環速度	数日~数ヶ月/回	数ヶ月~数年/回	数年~数千年/回

の沈降により、生物に固定された炭素は表層から中・深層に除去される。生物ポンプは大気との二酸化炭素の収支に直接関係しないが、表層の全炭酸分圧を下げることで大気中の二酸化炭素の海への溶入を可能にする。生物ポンプは、真光層の溶存無機炭素を光合成で固定し、深海に移送するエンジンに例えられる。

3.4 人工海底山脈の鉛直混合機構の明確化

人工海底山脈としてはじめて設置された長崎県生月島北方約5kmの構造物周辺について詳細な観測を実施した。この海域は水深およそ80mの比較的平坦な海域であるが、周辺地形が複雑なこともあり、複雑な流況を持つ海域である。

観測は2003年～2005年の成層期を中心に実施した。主要な観測項目は、構造物長手方向直角（当該海域潮流の主流向）に設けた測線にそった超音波流速計による水平流速および音響反射強度の測定、測線端点におけるCTDによる水温・塩分観測である（図-4参照）。

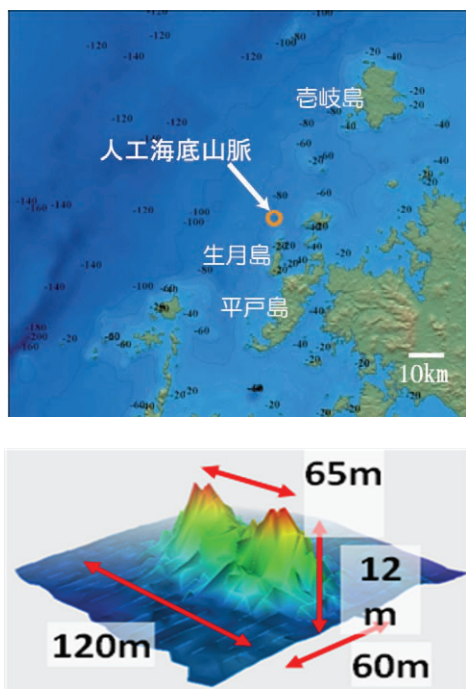


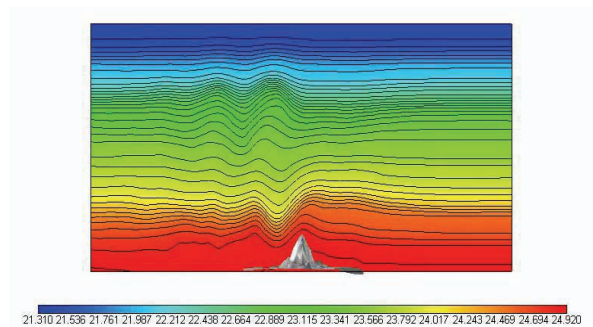
図-4 生月島沖人工海底山脈

観測から得られた多様な流況、成層条件に基づく再現計算およびモデル計算を実施した結果、人工海底山脈の湧昇効果発現機構として以下の現象を抽出することができた。

① 風下波によるシアー拡散

風下波は成層が発達し、鉛直方向に密度勾配がある時に、構造物背後に地形性の内部波（風下波）が生じるものである（図-5）。この内部波は流速が内部波の伝搬

速度よりも遅い場合、すなわち $Fr < 1$ ($Fr = U \pi / (ND)$) の条件下で発生する。ここで Fr は内部フルード数、 N は浮力振動数、 D は水深である。風下波は密度勾配があれば鉛直方向にも伝搬する性質を持つ。このことにより、海底に設置された構造物が海面付近の流況にまで影響を及ぼす可能性がある。また、内部波は流速のシアーを生じるために、これが鉛直混合を促進するものと考えられる。ただし、密度勾配の存在が必要条件であり、構造物深さ付近に密度勾配がない場合（たとえば躍層が構造物天端よりも上方にある2成層の場合など）に内部波は発生しにくい。

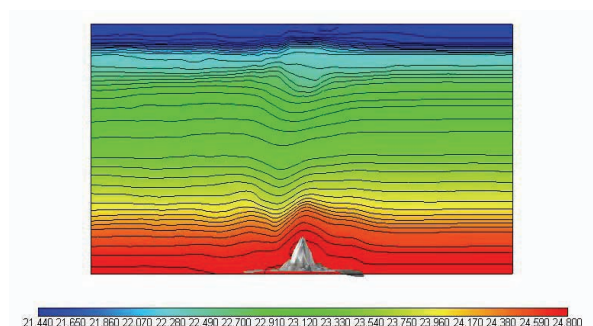


計算領域：水平750m×750m、鉛直82m

図-5 内部波の再現計算 (σ_t)

② 風下波の砕波

風下波は波動現象であり、表面波の砕波に類する現象により急激にエネルギーが逸散する可能性がある。そのような場合、大規模なスケールで混合することが想定される。図-6の計算結果ではマウンド直上の表層混合層下で砕波が生じている可能性がある。



計算領域：水平750m×750m、鉛直82m

図-6 内部波砕波の再現計算 (σ_t)

③ 風下波と流入流速シアーの相互作用

一般の海域の流れは必ずしも鉛直方向に一様ではなく、表層から下層にわたり流向流速が変化する。鉛直方向の流向流速の勾配はシアーを生じ、鉛直方向の不安定さを高める。そのような部分に風下波が作用することで、不安定さが増大し、比較的大きなスケールの混合が生じるものと考えられる。

④連行

連行は下層水と上層で流向が大きく異なる場合に、下層の海水が構造物斜面にそって上昇した後に上層に連行されていく現象である。これは、海底付近とその上層で流れの向きが大きく異なる場合にのみ観られた。

⑤内部跳水

下層の密度の高い海水が構造物に乗り上げた後に下流側を下り落ちることにより内部跳水が生じる。これは、構造物の高さスケールまでの海底付近に高密度の海水が存在するときにだけ観られた。

⑥湧昇渦

湧昇渦は密度成層が形成されていない場合に発生するもので、構造物に流れが作用したとき、下流側に間欠的な大規模渦が生じ、これが自己誘導速度により上昇することで大規模な鉛直混合を生じる。

観測は成層期に実施したことから、上記のうち、湧昇渦(⑥)を除く現象を確認することができた。ただし、連行(④)および内部跳水(⑤)は、限られた条件でのみ発生することから、観測で確認されたケースはわずかであった。

一方、風下波の発生頻度は比較的高く、観測においても多数の事例を確認することができた。風下波による鉛直混合効果としては、先に示したように、内部波で形成される流速シアーによる混合拡散(①)と内部波そのものが碎波すること(②)、およびもともとその海域に存在したシアーによる鉛直不安定性が内部波により高められること(③)による混合が考えられる。①および②は内部波スケールよりも小さな拡散混合であり、③は内部波の波高スケールの大規模な混合である。

以上に示した成層・流速条件と人工海底山脈の湧昇機構の関係を図-7にまとめた。このように様々な混合機構があり、実証事業で実施されたような比較的小規模の人工構造物であっても、真光層以深の栄養塩類に富む海水を真光層以浅に混合することは物理的に可能であり、

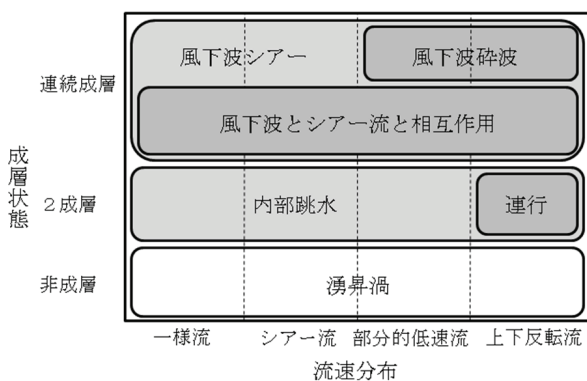


図-7 成層・流速条件と湧昇機構

実際にもこれらの混合効果によると解釈できる真光層での基礎生産の増加や漁獲の増加が確認されている。

3.5 基礎生産増加による炭素循環の変化

IPCCの炭素循環を基に、植物プランクトンの現存量が1%増加した場合の炭素循環の変化について考える。図-2の右側では、人工海底山脈が非生産表層の栄養塩類を真光層に湧昇させることで、生物相の現存量が1990年代の3GtCより1%(0.03GtC)増加した状態を想定した。中・深層に沈降する有機態炭素の割合をIPCCと同じ22%とすれば、炭素の沈降水量も1%(0.11GtC/y)増加する。したがって、増加前に0.6GtC/yであった表層への炭素蓄積速度は0.5GtC/yに減速する。この表層の全炭酸濃度の低下が表層の二酸化炭素分圧を下げ、これが大気二酸化炭素の溶入を可能にする。加えて、光合成の活性化は真光層のpHを上昇させるので、さらに二酸化炭素を海洋に溶入し易くする。また、表層から中・深層に沈降する炭素の鉛直フラックスは6.1%増加し、1.8から1.91GtC/yになる。このように、基礎生産の増加は深海への炭素移送を加速すると考えられる。

今、表層から深海に沈降する微粒子有機態炭素を増加させると、その炭素が再び表層に湧昇し、大気とガス交換するのは来世紀以降になる。したがって、その間は炭素が深海に固定されることになる。このように僅かな基礎生産の増加が炭素循環に大きく影響するのは、有機物の炭素含有率が海水自体より高いため炭素を効率よく沈降させること、有機物の沈降速度が深層の循環速度より桁違いに速いことによる。しかし、数百~数千年後には、現在より僅かに全炭酸濃度が高い深層水が表層に湧昇する。そして未来の大気と湧昇した水塊の間に新たな分圧平衡が生まれる。人類の今後の行動は、その未来の大気二酸化炭素濃度に大きく係わってくる。ただし、現状では大気中の二酸化炭素濃度の上昇が速すぎるので、海洋の表層では大気と分圧平衡するが、中・深層水は分圧平衡に至っていない。平衡するには深層海水が表層に湧昇するまで待たなければならない。人工海底山脈による生物ポンプの加速は、中・深層を含む二酸化炭素の分圧平衡を早める効果を持つ。

3.6 炭素循環の変化と栄養塩循環の持続性

全球の全炭酸と栄養塩類は、海洋内部で物理的に循環している。真光層、非生産表層、中・深層、および各層間には様々な循環があり、夫々の循環速度は表-1のよ

うに海面に近いほど大気の影響を受けるので速い。

人工海底山脈は、この物理循環の中で全海洋の平均水深の1%程度に過ぎない真光層と、その直下の非生産表層を鉛直混合し、真光層に栄養塩類を添加する機能を持つ。真光層への栄養塩類の添加効率が生物ポンプ(エンジン)の性能を支配することになる。

IPCCの炭素循環図の表層を真光層と非生産表層に分け、中・深層を含めた3層構造と考え、図-2にIPCCの炭素循環から推定した炭素と窒素の循環、および蓄積速度を示した。大気との二酸化炭素収支は栄養塩類濃度とは無関係とした。図中で物質循環を鉛直方向の矢印で示し、上段、下段に炭素、窒素の循環速度を、±の表示は+を上昇とした。()内の上段、下段に炭素、窒素の蓄積速度を示し、+を蓄積、-を流出速度とした。

IPCCの循環を栄養塩類で持続可能とするには、図-3に示す生物ポンプで中・深層に沈降する11GtC/yと共に除去される1.94GtN/yの栄養塩類を真光層に供給する必要がある。この栄養塩類は物理循環速度の比較的速い非生産表層から真光層に湧昇すると考えるのが自然である。湧昇する栄養塩類の原資は物理循環で中・深層から表層に湧昇する9.2GtC/yと同時に添加される1.68GtN/y、および表層に貯蔵された2.2GtNの栄養塩類が考えられる。この栄養塩類の循環に着目すると差引き0.26GtN/yが表層から中・深層に流出する。

炭素および栄養塩類の循環の持続可能性を、IPCCの炭素循環を基に循環量と貯蔵量の関係からみる。炭素に着目すると中・深層に沈降する1.8GtC/yは、表層に貯蔵された918GtCの0.2%であり、IPCCの循環は炭素については持続可能と考えられる。一方、栄養塩類を見ると中・深層から表層に物理循環で湧昇する2.1GtN/yは、中・深層に貯蔵された780GtNの0.3%である。しかし、表層から中・深層に除去される差引き0.26GtN/yの栄養塩類は、表層に貯蔵されると仮定した2.2GtNの11%に当たる。したがって、物理循環で中・深層から供給されるとした1.68GtN/yでは不足するため、仮定した循環は長期間持続できない可能性がある。栄養塩類の供給に依存する生物ポンプの性能が炭素循環に大きく影響するので、全球の物質循環を矛盾なく説明できる値とするには、河川や大気からの供給を含む真光層への栄養塩類添加速度や、基礎生産速度、表層、中・深層海水の炭素、窒素濃度、および循環速度の把握も重要である。

生月島沖の人工海底山脈の実証事業では、炭素の沈降による固定量は1,000 tC/y程度と試算された。この試算ではBergerの沿岸域の有機物沈降速度に倣い、基礎生産の25%が200m以深に沈降し固定されるとした。本稿で仮定した全球での基礎生産の1%増加は、深海への

炭素固定速度を0.1GtC/y増加させるが、これは生月島沖における炭素固定速度の100,000倍に当たる。

これらの考察から、全球の基礎生産速度50GtC/yの1%未満の加速は、誤差の範囲と考えられる。しかし、持続可能性を議論するには、栄養塩類の循環をより詳細に把握する必要がある。本稿ではIPCCによってまとめられた1990年代の知識水準に基づく描像にフラックスの値を精緻化して得られたモデルを前提としたが、生態系自体の振る舞いなど地球温暖化により海水温が上昇すれば、海洋から大気に二酸化炭素が放出し、大循環などにも悪影響を与える危険性が挙げられている。

4. まとめ

全球、特に海洋における炭素循環の研究の重要性が叫ばれながら、その詳細は明らかにされておらず、依然、世界的な重要な研究課題になっている。人工海底山脈による基礎生産の増加と、これに伴う海洋での二酸化炭素固定の可能性は、開発当初から提案されてきたが、議論が不足していた。

2007年に発表されたIPCCの最新の報告を基に数十～数百年の炭素循環を前提に考えると、人工海底山脈により自然エネルギーを利用して真光層に栄養塩類を湧昇させ基礎生産を増加できれば、自然の食糧を持続的に増産できると同時に、二酸化炭素を深海に固定できる可能性が明らかになった。しかし、栄養塩類の濃度、循環量、貯蔵量に関するデータが不足しているため、栄養塩類の持続可能性には課題が残った。さらに議論を進めるためには、基礎生産速度を含む栄養塩類の循環についての知見の収集、これを基にした人工海底山脈による基礎生産増加量の科学的な定量化が必要である。そのためには、複数海域で次に示すような調査・研究・開発を続ける必要がある。

- ①人工海底山脈事業による基礎生産の増加量と炭素固定量を事業前に高精度に予測する技術。
- ②事業後の基礎生産増加量、深海に固定される炭素量、大気および海洋表層の二酸化炭素分圧などを高精度に評価する技術。
- ③建設時に発生する二酸化炭素量と、建設後に深海に固定される炭素量の技術面、経済面、政策面での評価技術。

5. おわりに

わが国の海洋基本法第二条には、「海洋環境の保全を図りつつ海洋の持続的な開発及び利用を可能とすることを旨として、その積極的な開発及び利用が行われなければならない」と謳われている。革新的な重要技術として総合科学技術会議に提案された人工海底山脈を、整備・活用することにより、食糧自給率の低い我が国の重要課題である海洋での食糧生産が図れる。同時に、これが二酸化炭素の固定につながり、逆に二酸化炭素の放出にはつながらない可能性を示した。

古代文明が陸上で農業の技術と生産基盤を営々と築いてきたように、人類に残されたフロンティアである海洋を、新たな技術により、食糧生産、二酸化炭素固定、環境保全、リサイクルの場として活用すべきと考える。環境に配慮し、細心の注意を払い海洋の自然エネルギーと生態系を利用して、海洋での食糧生産基盤を国民が真に求める社会資本として整備することが求められている。本稿が海洋における新たな食糧生産と二酸化炭素固定の議論の発端になれば幸いである。

謝辞：本論文は第 33 回海洋開発シンポジウムで発表された内容に大水深における水塊の鉛直混合の解析結果を加筆したもので、原著では共著者である橋本牧、間木道政、中村充、高橋正征氏の他、大隈多加志、井関和夫、岡安章夫氏のご指導を頂きました。ここに深く感謝の意を表するものであります。

参 考 文 献

- 1) 高橋正征, 古谷研, 石丸隆: 粒状物質の一次生成, 生物海洋学 2, 東海大学出版会, pp. 31-42, 1996。
- 2) 鈴木達雄: 生物生産に係る礁による湧昇の研究, 東京大学大学院工学系学位論文, 1994。
- 3) (社) マリノフォーラム 21: マウンド漁場造成事業に係わる技術資料, 2001。
- 4) IPCC-WG1, Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry Chapter 7, pp. 530, 2007。
- 5) Berger, W.H., V.S. Smetacek and G. Wefer: Ocean productivity and paleoproductivity - An overview. in Productivity of the Ocean: present and past pp. 1-34, John Wiley & Sons Limited, pp. 1-6, 1989。
- 6) 本田陽一, 間木道政, 鈴木達雄: 人工マウンド構造物による鉛直混合現象の観測と混合量の試算, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 1151-1155, 2004。
- 7) 石井雅男: 海洋の二酸化炭素分圧に影響を及ぼす種々の因子, 月刊海洋号外, No11, pp. 10-15, 1996。
- 8) 野崎義之: 地球温暖化と海, 東京大学出版会, pp. 72-74, 1998。

Possibility of Fixation of Carbon Dioxide by a Man-Made Sea Mount

Tatsuo SUZUKI and Yoichi HONDA

The Fisheries Agency of Japan is undertaking a man-made sea mount enterprise in order to increase the fishing resources in offshore area. It is thought that this enterprise leads to fixation of carbon dioxide by photosynthesis of phytoplankton. However, any detail evaluation has not been made on this subject..

Based on the carbon cycle model published in the Intergovernmental Panel on Climate Change report on 2007, this paper considered the possibility of carbon dioxide fixation by the man-made sea mount. It was concluded that the man-made sea mount could contribute to sequester carbon dioxide by delivering from surface to deep sea.