

人工湧昇流域における二酸化炭素吸収量の 評価技術の開発

DEVELOPMENT OF EVALUATION METHODS FOR FIXATION OF CARBON DIOXIDE AT THE ARTIFICIAL UPWELLING AREA

間木道政¹

Michimasa MAGI

¹非会員 理博 財団法人地球環境産業技術研究機構 CO₂貯留研究グループ
(〒619-0292 京都府木津川市木津川台2-9)

The increasing of CO₂ sinks in the ocean is studied for the mitigation of global warming. In the present research, we studied the application of an artificial marine structure to generate an upwelling. The purpose of this research was to develop an evaluation technology of CO₂ fixation around an artificial upwelling area. In order to clarify the limiting factors of the CO₂ fixation in the area, field observations, laboratory experiments, and model calculation were carried out for the Ikitsuki artificial upwelling site, Japan. The fixation of 900-5000 ton-CO₂/yr was estimated from the biological processes and the physical processes of the Ikitsuki site by preliminary analysis. The total amount of the CO₂ emission for artificial marine structure in Ikitsuki site was 4,100 ton. It was shown that cumulative CO₂ fixation exceeded the CO₂ emission after few years. Our results suggested that artificial upwelling system has a possibility of enhancement of CO₂ fixation in the ocean.

Key Words : CO₂ fixation, artificial upwelling system, tidal energy, primary production,
CO₂ ocean sequestration

1. はじめに

海洋深層水が表層に湧き上がる湧昇域では、豊富な栄養塩を基にした大型植物プランクトンによる活発な一次生産が行われている。この海域では大気中から海洋表層に溶け込んだCO₂が、植物プランクトンの光合成により吸収されている。一方、湧昇域以外では有光層中の栄養塩等の不足によって植物プランクトンの生物量が制限されており、栄養塩の供給量が改善されれば海洋の一次生産量を増加させることができる。もし何らかの方法で下層に豊富に存在する栄養塩を有光層に供給することができれば、貧栄養海域においても活発な一次生産を生じさせることができ、引いてはCO₂の吸収を促進することができる。また、適切な方法が確立されれば大気中のCO₂を長期的に海洋に隔離することができると期待される。

下層の栄養塩を有光層に供給する技術には、主に動力を利用する方法と海底構造物を利用する方法がある。前者はポンプ等を利用するために確実に海水を汲み上げることができ、海水量を変えることで表層の一次生産をコントロールすることもできるであろう。しかし、動力機

器の稼動にエネルギーを必要とするため維持コストに課題がある。後者は海流・潮流などの水平方向の海水流動を鉛直上向き方向の流動に変換させる技術である。海水の湧昇量は自然まかせであるため表層の一次生産を直接コントロールすることは難しいが、その反面、機械的動力を必要としないため維持費用は不要であり、また半永久的に海水の湧昇を起こすことができると期待される。湧昇効果を高めるための海底構造物の研究は、水産庁の補助金を受けて社団法人マリノフォーラム21により、食糧増産のための沿岸漁場造成を目指した研究開発（平成7～11年度）の中で実施された。この研究開発においてさまざまな構造物の形状が検討され、その中で石炭灰を主原料とするアッシュクリートブロックを沈積させた人工海底山脈を対象とした実証事業により、漁場造成の効果が確認された¹⁾。

財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)は、海底構造物を利用した人工湧昇による植物プランクトン増殖効果に着目し、海洋におけるCO₂吸収源拡大策のひとつとして人工湧昇技術の可能性を検討するために、平成15～17年度にCO₂吸収量の評価技術開発を実施した²⁾。このプ

プロジェクトでは、実際の人工湧昇海域を対象にした観測や各種実験、モデル開発を通して人工湧昇構造物によるCO₂吸収量の評価技術の開発を行った。

2. 人工湧昇流システムとCO₂吸収

人工湧昇流システムは、海流や潮流が卓越する海域の海底に構造物を設置し、湧昇流、乱流、内部波などを発生させ下層水を上層に輸送する技術である。この時、下層水に含まれる成分も海水とともに上層に運ばれる。つまり、人工構造物は、潮流や海流の水平方向の運動エネルギーを鉛直方向の運動エネルギーに変換させる役割を担っている。

海洋におけるCO₂吸収源の拡大のためには、下層の栄養塩が輸送されなければならない。栄養塩が上層、特に有光層に供給されることで、栄養塩の枯渇により抑制されていた植物プランクトンの光合成が活発になる(図-1)。光合成の促進は植物プランクトンの増殖を意味しており、別の見方をすれば水中に解けているCO₂(無機炭素)を自分の体を構成する有機物の中に閉じ込めているのである。そして、表層でのCO₂が減少すれば、大気中のCO₂が海洋へ吸収されやすくなる。この現象を広範囲で発生させれば、海洋におけるCO₂吸収源の拡大方策としての効果が期待される。

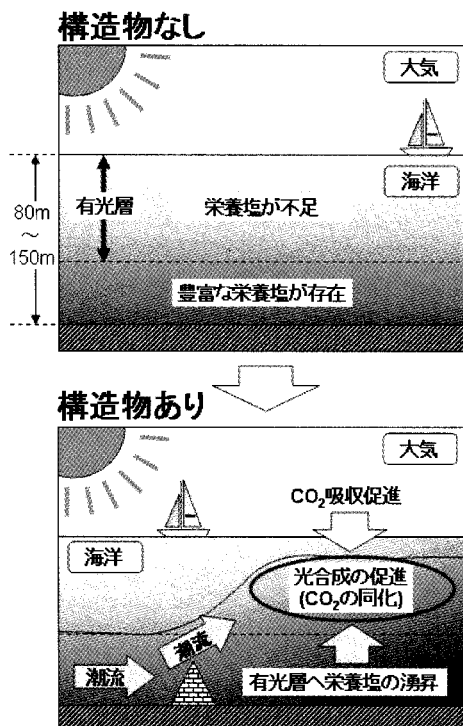


図-1 人工湧昇流システムによるCO₂吸収促進効果の概念

3. CO₂吸収量評価手法の概要

(1) 人工湧昇流システムのCO₂吸収量の定義

人工湧昇流システムのCO₂吸収量を推定する上で、CO₂吸収量をどのように定義するかが重要である。本研究では、植物プランクトンによる純一次生産を対象とし、同一の水系とみなされる範囲の海域において、人工湧昇の影響が見られない領域に対して人工湧昇の影響のある領域の純一次生産量の増加分をCO₂吸収量として定義した。また、一次生産で作られた有機物(植物プランクトン)の一部は深層へと沈降し海底に堆積する。このように大気から隔離されたものをCO₂固定量とした。

本来は、人工湧昇流海域のバイオマス全体を対象にするべきであろうが、生態系の全貌を把握することは容易ではない。また、図-1に示したように構造物を設置する前の状態と構造物を設置した後の状態のそれぞれの純一次生産量の差をCO₂吸収量として定義すべきであるが、ブロック式の人工湧昇流発生構造物の完成には数年を要することから気候、栄養塩、生物構成などの環境が大きく異なることが想定されるため、推定されたCO₂吸収量の信頼性は低いと考えられる。一方、人工湧昇構造物の設置海域とその周辺海域での純一次生産量の差を人工湧昇流システムのCO₂吸収量と定義する場合は、環境条件は同じと見なすことができること、同一条件で海水や生物試料の分析ができることから、推定値の信頼性は高まると考えられる。

一方、理想的ではあるが、数値シミュレーションを用いれば構造物のある状態とない状態を容易に比較することができる。しかしながら、モデルの流動場や生態系が現実の海域を正しく再現できているのか、計算結果をどのように検証するかなど課題は多い。

本研究の目的は、人工湧昇流システムが地球温暖化対策として有効であるかどうか、その可能性を見極めるための評価技術を開発することである。そのため、前述したように実際の人工湧昇海域で観測されたデータに基づく定義を採用した。

(2) CO₂吸収量の計算パラメータ

観測・実験に基づくCO₂吸収量の計算には、純一次生産速度の差、湧昇範囲(面積)、日照率、年間湧昇発生回数、植物プランクトンによる栄養塩の消費日数を考慮した算出方法を用いた。また、最終的に深海底に沈降して大気から隔離されるCO₂固定量の算出には、CO₂吸収量に固定割合を乗じて算出した。

CO₂収支の評価には、上記のCO₂固定量に加えて、海底に設置された構造物の製造工程や設置作業などで発生するCO₂量(CO₂排出量)を考慮した。

(3) 物理パラメータの測定手法

潮流により発生する湧昇流は、定常流の場合と異なり、時々刻々変動する流向・流速、成層強度や密度躍層の位置等の影響を受けて、湧昇の水平範囲や下層海水の湧昇高さ、湧昇の発生時期などが大きく変動する。これらの湧昇現象は、構造物からの相対位置により異なる。つまり空間的に一様ではない。また、有光層に供給された栄

養塩は、潮流により広く運ばれるため、一定の場所にとどまることはない。

第3節(2)で述べたようにCO₂吸収量の算定には湧昇範囲と湧昇発生の頻度が必要であるため、これらを的確に測定するためには観測時刻、観測位置、観測方法の選択が重要となる。そこで、湧昇発生条件や湧昇範囲などの把握のために様々な物理観測手法を試みた(表-1)。これらの方法は一長一短があり優劣をつけにくいだが、観測時期・測定点・測定手法を的確に選択することで湧昇現象を捉えることができる方法である。特に、人工湧昇流システムは潮流から湧昇流のエネルギーを得ているため、観測に際して潮汐の諸元、例えば流向、潮時、大潮・小潮などを正確に把握することが必要である。本研究では、事前に測定した長期間の流速データや表-1の手法で得られた観測データを用いて流動モデルを調整し予測精度を向上させるとともに、モデルの予測結果を次期観測計画に反映させることで観測精度を向上させるという方法を用いた。これを複数回繰り返すことで、構造物による湧昇現象の予測と測定が的確に行えるようになった。

表-1 物理観測手法の比較

	測定手法	対象現象
点	係留(流速計, 温度計)	長期間の流況(潮流, 海流, 調和定数, 内部波), 拡散係数, 湧昇の発生頻度
	ADCP(海底)	
線	CTD	潮時毎の密度構造, 湧昇現象の確認, 湧昇効果範囲の確認
	TurboMap	拡散係数, 密度構造, 内部波, 湧昇現象の確認
	漂流ブイ(温度)	内部波および湧昇現象の確認
	ADCP(船体)	潮時毎の流況, 内部波および湧昇現象の確認
	EPCS	湧昇の効果範囲の確認(表層到達時のみ)
	MVP	内部波, 湧昇現象の確認, 湧昇効果範囲の確認
面	衛星画像	湧昇効果(一次生産)範囲の確認

(4) 生物パラメータの測定手法

栄養塩や植物プランクトン等の分布を把握するために水質調査や生物調査を実施し、湧昇海域の一次生産速度の測定のために炭素の同位体を用いた生物培養実験^{3), 4)}を実施した。この実験は、夜間に海水を採取し、採水深度の照度に調整されたボトルを用いて、24時間の培養を行った。

4. CO₂吸収量評価手法の人工湧昇流海域への適用

(1) モデル海域

人工湧昇流システムの構築に伴うCO₂発生量を評価するために、図-2に示した生月島(長崎県北松浦郡生月町)北方4km沖合に設置されている人工湧昇構造物(以後、この海域を生月サイトと呼ぶ、図-2)を対象にして、海域調査やパラメータ取得のための室内実験や数値実験を実施した。

人工湧昇流発生構造物は長崎県生月島の海域に設置されている。この人工湧昇構造物はマリノフォーラム21において食糧増産のための人工魚礁として開発された。一辺1.6mのブロックが積み上げられ、幅120m、高さ12mの構造物である。食糧増産効果については、構造物の設置前後における標本まき網調査等により漁獲量や魚種組成の変化から有効性が検証されている。

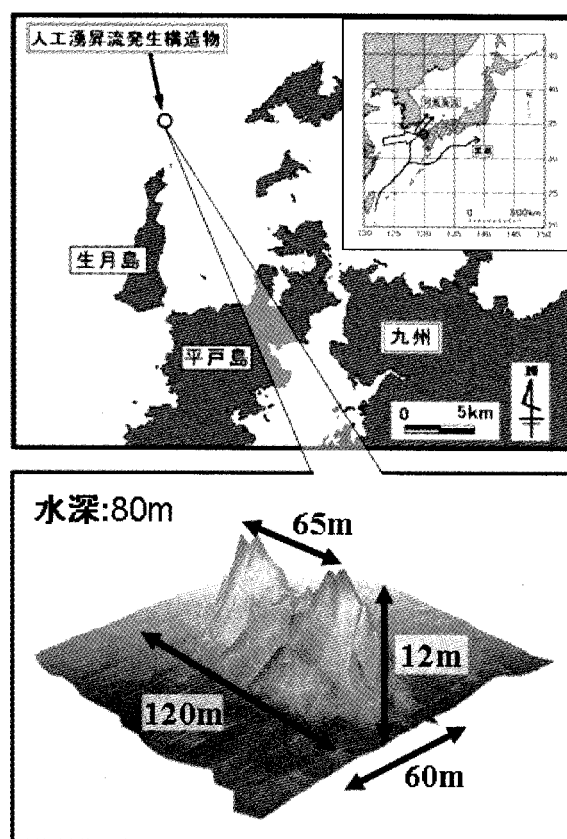


図-2 人工湧昇構造物

(2) 海域調査

海域調査は、長崎大学鶴洋丸、長崎県総合水産試験場鶴丸、東京水産大学青鷹丸ならびに生月漁業共同組合の協力のもとで実施した。観測結果の一例として、図-3にADCP鉛直断面観測の音波反射強度分布を示した。図によれば海底構造物により内部波が発生し、構造物の上流側の低反射強度の海水が下流側で上昇している様子が見られる。観測で得られた流速や密度分布等から人工湧昇流の発生メカニズムを検討したところ下層の海水が湧き上がる「湧昇渦」が発生することは少なく、むしろ内部波や跳水、連行などで生じる流速シアや乱流の発生により、鉛直混合が促進されることが人工湧昇を発生させる主要なメカニズムであった^{5), 6), 7)}。

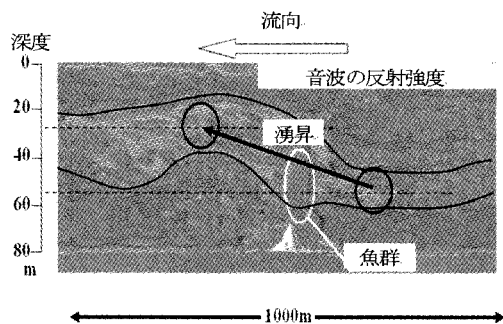


図-3 構造物により発生した湧昇(内部波)の観測例

(3) 人工湧昇海域の範囲推定

人工湧昇流の影響が及ぶ海域の範囲を推定するために、栄養塩を粒子に見立て、粒子追跡法による広域拡散予測計算を行った(図-4)^{7), 8)}。計算は3次元のLESモデルを用い、現場海域で測定した流速や密度分布を入力条件とした。また、粒子は構造物位置の表層に一定の時間間隔で供給した。粒子分散計算結果から粒子分布面積の時間変化を求めた(図-5)。これに植物プランクトンは供給された栄養塩を4日程度で摂取しつくすことから、湧昇の影響範囲を約 10^9km^2 に設定した。詳細は文献⁷⁾および⁸⁾を参照されたい。

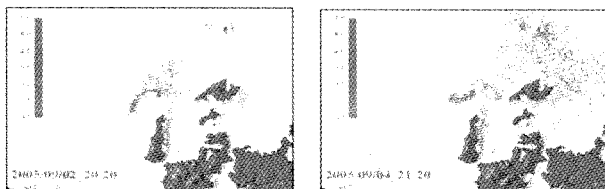


図-4 粒子追跡計算結果の例

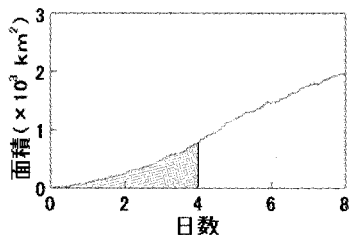


図-5 湧昇の影響範囲

(4) 一次生産速度

人工湧昇海域の海水を用いて13C法による生物培養実験を2003年9月、2004年5月、2005年10月の合計3回実施し、単位面積あたりの純一次生産速度を測定した^{3), 8), 9), 10)}。使用した海水は湧昇が発生しやすい最強流時の構造物近傍の海水であり、事前に測定した水中照度分布から設定した複数の深度で採水している。また、人工湧昇海域の効果を把握するために、湧昇の影響が及ばないと推定される地点の純一次生産速度も同様の方法で同時に測定しており、これらの速度の差を人工湧昇流海域の純一次生産速度の増加量とした。解析の結果、周辺海域に比べて人工湧昇海域の純一次生産速度は32～

184 $\text{mgC}/\text{m}^2/\text{日}$ の増加が測定された。このときの天候は、最低値が曇であり、最大値の場合が晴天であった。培養実験の結果は、太陽光の少ない曇天であっても周辺海域に比べ人工湧昇海域では CO_2 が吸収される可能性を示しており、周辺海域に比べて構造物周辺の海域は潜在的な CO_2 の吸収域であることが示唆された。

(5) 生月サイトの CO_2 吸収量と CO_2 固定量

生月サイトの CO_2 吸収量を第3節(2)に示したパラメータを用いて算出した(表-2)。日照率は平戸の過去十年間の日照時間から1日の平均時間より算出したものである。年間の湧昇発生回数は年間の潮流の最強流の発生回数とした。ただし、通常は1日4回発生するが、この海域は日潮不等が見られるため強流の発生は半分の1日2回とした。

計算された CO_2 吸収量は周辺海域に対する人工湧昇流海域の一次生産の増分の総量である。実際の海域では、この全てが植物プランクトンとして存在しているわけではない。したがって、固定量の推定には有機物が分解されずに深海底に堆積することで大気から隔離される割合を考慮する必要がある。しかしながら、この割合は明確になっていないため、次のように仮定した。有機物分解実験では約2ヵ月後に有機物が約15%まで減少することが示されており³⁾、さらに減少傾向にあることから、近似式により1年後の有機物の残存率を推定したところ、約1%程度まで減少する結果が得られた。そこで CO_2 固定割合を0.01と仮定した。先に述べた各種のパラメータを用いて CO_2 の固定量を推定した結果、表-2に示した数千トンのオーダーになると推定される。今後、正確な CO_2 固定量の推定には CO_2 固定割合の確定が重要である。

表-2 生月サイトの CO_2 吸収量と CO_2 固定量

パラメータ	数値	単位
純一次生産速度の差	32～184	$\text{mgC}/\text{m}^2/\text{日}$
湧昇の効果が及ぶ範囲	1.0×10^9	m^2
日照率	0.25	
栄養塩の消費期間	4	日/回
年間の湧昇発生回数	730	回/年
年間の CO_2 吸収量	100,000～500,000	$\text{ton-CO}_2/\text{年}$
CO_2 固定割合(深海へ沈積)	0.01	
年間の CO_2 固定量	1,000～5,000	$\text{ton-CO}_2/\text{年}$

(6) 構造物製造に伴う CO_2 発生量

LCA評価手法にならない人工湧昇流システムを構築するためのプロセスを抽出し、人工湧昇流システムの CO_2 排出量を推定した¹¹⁾。図-6は、人工湧昇流システム構築のプロセスと、主な投入エネルギーおよび CO_2 排出を示している。人工湧昇流システムの特徴は、湧昇流を発生させるために化石燃料等の必要な動力源を用いず、潮流等の自然エネルギーを利用していることと、構造物のメンテナンスが不要なことである。また、構造物は浸食による崩壊や砂泥の堆積による埋没により湧昇流の発生機能が損なわれると考えられるが、水中カメラによる調査で

は生月サイトの構造物の浸食や埋没は起きておらず、数十年以上の利用が可能である。したがって、構造物のメンテナンスおよび廃棄処理工程は不要とした。したがって、CO₂の発生プロセスは図-6の1～5の工程を評価対象にした。

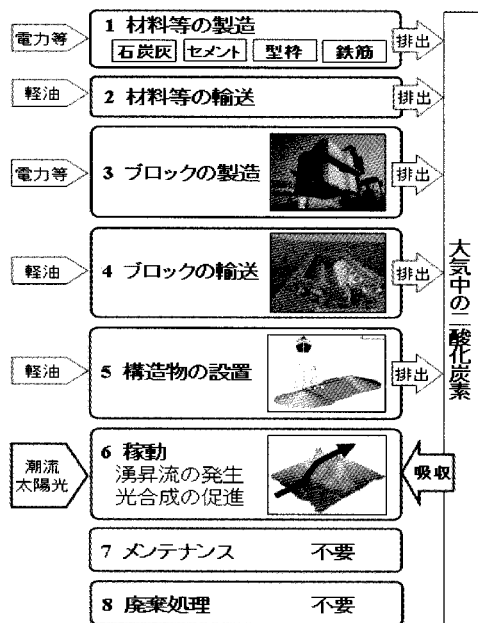


図-6 構造物のライフサイクル

各工程のCO₂発生量を表-3に整理した。生月サイト(4860ブロック)の人工湧昇流システムの構築に際して、5年間の製造期間に発生したCO₂総量は約4100トンと積算された。ブロック1個当たりのCO₂発生量は0.84トンであり、ブロック重量の約1/2に相当する量であった。

表-3 生月サイトの人工湧昇構造物のCO₂発生量

行程	CO ₂ 発生量 (ton)
原材料等製造	2,933
原材料等輸送	38
ブロック製造	722
ブロック運搬・設置	397
合計	4,090

(7) 生月サイトのCO₂収支評価

生月サイトのCO₂固定量は年間1,000～5,000トンと試算された。一方、生月サイトの構造物の造成により5年間の総量として約4,000トンのCO₂が排出される。これは、少なくとも4年以内、早ければ1年以内に構造物の造成による排出分を相殺し、正味のCO₂固定効果が発揮されることを示している。

これを模式的に表現したものが図-7である。構造物の造成期間中はCO₂が排出されるが、湧昇効果が生じないためCO₂固定はゼロである。構造物が完成した後は、CO₂の排出はゼロとなり、一方、湧昇で供給された栄養塩を利用して一次生産が活発になるためCO₂固定が始まる。そして数年の後には、総CO₂固定量が造成によるCO₂排出

量を上回り、正味のCO₂固定が始まる。

人工湧昇流システムのCO₂固定能力を高めるためには、第1に構造物の造成によるCO₂発生量を減らすこと、第2に工期を短縮してより早くCO₂吸収機能を発揮させること、第3に一次生産速度を促進させるために湧昇効果を高める構造物を開発することである。

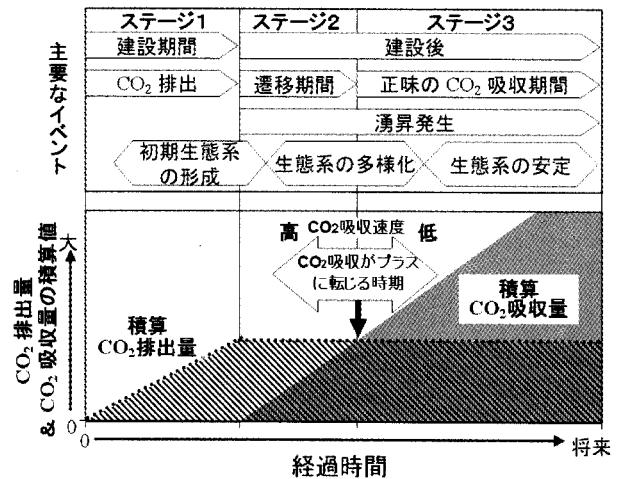


図-7 人工湧昇流システムのCO₂収支

5. 評価技術の実適用の課題

本研究開発では、生月サイトの人工湧昇流海域を対象にして、各種の観測や実験を実施した。このデータを解析した結果、構造物により湧昇が発生していること、構造物近傍では周辺海域に比べて一次生産速度が大きいことが確認された。そして、これらの結果を元にして、人工湧昇流海域のCO₂吸収量(固定量)の推定を試みた。しかしながら、この推定には多くの不確定要素が含まれている。特に人工湧昇海域の範囲とCO₂の固定割合である。評価手法には数値モデルを用いたシミュレーションも考えられる。だが、現段階では生態系の再現性などに課題があるため、CO₂固定量の絶対値の評価は難しい。とはいえ、観測や実験データを蓄積し、モデルの予測精度を向上できれば、将来的に有望な技術である。

次に、湧昇流を発生させる構造物に着目する。本研究以前は、構造物による湧昇発生メカニズムが十分把握されていなかった。そのため、ターゲットとなる海域の環境を考慮して、効率的に湧昇を発生できる構造物の形状やサイズを設計する手法が確立されていない。そして、CO₂排出の低い構造物製造技術も重要な課題である。さらに、低コストで高効率の人工湧昇流システムに発展させることが必要であろう。

最近では、大気中のCO₂の増加が地球温暖化のみならず海洋の酸性化を引き起こすことが指摘されている¹²⁾。海洋表層では二酸化炭素濃度が増加するため海水のpHが低下するのである。pHの低下が生物にどの程度影響するかは未定であるが、深刻な影響をこうむる可能性もある¹³⁾。しかし、生物にとって海水中の二酸化炭素の増加

は植物プランクトンの一次生産の促進にもつながり、海中のCO₂を取り込むためpHの変動を抑制する可能性もある。人工湧昇流技術は海洋酸性化問題の対策としても有効なツールとなるかもしれない。

本研究開発の結果、人工湧昇流技術の第1の目的としてCO₂吸収・固定機能を取り上げることは難しいと感じるが、付加価値としての可能性は十分あると思われる。その場合であっても、CO₂削減技術として認められるためには、科学的な検証と工学的な技術開発を引き続き推進せねばならない。

6. おわりに

海洋におけるCO₂吸収源拡大策のひとつとして海底構造物を利用した人工湧昇による植物プランクトン増殖効果に着目し、人工湧昇技術のCO₂固定の可能性を検討するためのCO₂吸収量の評価技術開発を実施した。この研究開発により以下の結論を得た。

①海底構造物による湧昇流発生能力の検証

長崎県生月島沖の人工湧昇流海域において物理観測を実施し、構造物による湧昇流の発生が確認できた。湧昇流の規模は潮流の変動に伴い時々刻々変化する。大潮期には鉛直混合が卓越し、小潮期には内部波等が発生して下層栄養塩を上層に供給する。

②植物プランクトンによる一次生産の促進効果の検証

生物培養実験等により純一次生産速度を比較したところ、周辺海域に比べて構造物周辺の海域は潜在的なCO₂の吸収域であることが示唆された。

③人工湧昇流システムによるCO₂吸収能力の検証

生月島沖の人工湧昇流海域の構造物は約5千個のブロックで構成される。この海域のCO₂吸収量は約10万～50万tonCO₂/年と推定され、その1%が固定されると仮定するとCO₂固定量は約1千～5千tonCO₂/年と試算された。また、構造物の製造設置に伴うCO₂発生量は約4千ton-CO₂であった。人工湧昇流システムのCO₂収支は少なくとも数年以内に吸収(固定)になると推定された。

④評価技術の実適用の課題

海洋炭素循環の中での人工湧昇流システムのCO₂削減効果の検証、高効率・低コストの人工構造物の開発などを通して認知度向上が必要である。また、地球温暖化や海洋酸性化の影響は技術開発によるプラス効果を相殺させる可能性もあり、これらを考慮した総合的検証が必要である。

謝辞：本研究は経済産業省の補助金で運営される財団法人地球環境産業技術研究機構のプログラム方式研究「人

工湧昇流海域におけるCO₂吸収量の評価技術の開発(平成15～17年度)」において実施された。観測および実験は長崎大学鶴洋丸、長崎県総合水産試験場鶴丸ならびに実験施設、東京海洋大学青鷹丸、生月漁業協同組合の協力により実施された。関係機関、関係者に感謝する。

参考文献

- 1) Suzuki T.: Development of high-volume fly ash concrete and application to marine structures, *Fisheries Engineering*, Vol. 36 (1), pp.61-69, 1999.
- 2) Magi M., B.E.Casareto, T.Suzuki, Y.Honda, Y.Suzuki and M.P.Niraula : Evaluating the effectiveness of artificial marine structures as Upwelling -generators to enhance oceanic CO₂ sinks, *GHGT 7*, 2005.
- 3) Casareto B.E., M.Magi, M.Niraula, K.Kurosawa and Y. Suzuki : Role of marine ecosystem for increasing CO₂ sinks. *GHGT8 book of abstract Poster*, pp.187-188, 2006.
- 4) Casareto B.E., Y.Suzuki, M.P.Niraula, M.Magi and K.Yamada.: International standard for CO₂ sequestration using marine biological system: effect and influence of fertilization. *GHGT-8 book of abstract Poster*, pp.189-190, 2006.
- 5) 本田陽一, 間木道政, 鈴木達雄: 人工海底構造物による鉛直混合現象の数値シミュレーションによる再現, 平成16年度日本水産学会学術講演会講演論文集, pp. 79-80, 2004.
- 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51巻, pp. 1151-1155, 2004.
- 7) Magi M., Y.Honda K.Azuma, T.Suzuki, B.E.Casareto and Y.Suzuki: Role of physical process for increasing of CO₂ sinks using artificial upwelling system, *GHGT8 book of abstract Poster*, pp.184-185, 2006.
- 8) 地球環境産業技術研究機構: 人工湧昇流海域におけるCO₂吸収量の評価技術の開発 平成17年度報告書, 地球環境産業技術研究機構, 2006.
- 9) 地球環境産業技術研究機構: 人工湧昇流海域におけるCO₂吸収量の評価技術の開発 平成15年度報告書, 地球環境産業技術研究機構, 2004.
- 10) 地球環境産業技術研究機構: 人工湧昇流海域におけるCO₂吸収量の評価技術の開発 平成16年度報告書, 地球環境産業技術研究機構, 2005.
- 11) Magi M., K.Azuma, T.Suzuki, B.E.Casareto, Y.Suzuki: Evaluation of CO₂ budgets to increase of oceanic CO₂ sink using an Artificial Upwelling System. *GHGT-8 book of abstract Poster*, pp.185-186, 2006.
- 12) Caldeira K. and M.Wickett: Anthropogenic carbon and ocean pH, *Nature*, 425, pp325-325, 2003.
- 13) Kurihara H., S. Shimode and Y. Shirayama, Sub-Lethal Effects of Elevated Concentration of CO₂ on Planktonic Copepods and Sea Urchins, *Journal of Oceanography*, pp.743-750, 2004.