

海洋砂漠の緑化 (I) その方法論^{*1}

中山 龍夫^{*2} 村井 重夫^{*3}

はじめに

海洋表層水は沿岸部を除けば、その大部分は貧栄養である。この不毛水域を藤永は海洋砂漠と指摘し、その緑化を提案^{*4}、その後種々の検討が加えられてきている。本稿は、藤永の提案を超大型エンジニアリングの観点から検討した結果の概要である。

海洋緑化の構想の要点を工学的な側面から見ると、次のような点が技術的な解決の糸口になる。

- (1) 海洋の海面は1リットル中のプランクトンが数百匹と少なく、砂漠状態である。
- (2) 大陸棚や寒い海では、海水は深い所より湧昇水流が起こって富栄養化している。
- (3) プランクトンの栄養成分であるN、P、Siは数百mの深さに多い。
- (4) プランクトンの光合成に必要な光は海面には透入するが、深い所へは届かない。

藤永の提案でも既に大きな障壁ネットを設置して海流の力で人工的に湧昇水流を越し海洋緑化する方法が紹介されているが、本稿では、このような海洋緑化計画が大型開発プロジェクトとして可能性があるかを検討した。プロジェクト開発の考え方としては、

(1) 問題点を技術処理のシステムとして整理する。

(2) 建設費や運転費のコストを試算する。

(3) 立地条件や安全や安定操業等の条件を確認する。

等の手順がある。今回は、これらについて大づかみな検討を試みたので、紹介する。

1. 海洋緑化の方法

海洋を緑化する方法を考えると、栄養分を多く含む海水を光がある所まで持ってくる方法と、栄養分を多く含む海水がある所へ光を照射する方法とが考えられる。前者には、A案：藤永が提案している海流を利用して深層水を表面層へ持ってくる方法と、B案：深層水をポンプアップする方法が考えられる。後者には、C案：光ファイバーで太陽光を深層水まで送り込む方法と、D案：太陽光発電した電力を用いて水中ライトで深層水を照射する方法が考えられる。これら四つの方法がどの程度の規模を必要とするか以下に試算した。

2. 海洋緑化の目標値

海洋緑化の最終的な目的は、大気圏で増え続けていると云われているCO₂

^{*1} 第86回京都化学者クラブ例会 [1997年8月12日] 講演、^{*2} 川崎製鉄(株)顧問、^{*3} 住友電気工業(株)特性評価センター長、^{*4} 藤永太一郎：近畿化学工業界、16、NO. 7 (1993) その他京大新聞12月5日(1993)、読売新聞8月5日(1998)など

を海洋中の生物増産で減らすことである。地球上の炭素循環に関しては種々のデータが報告されているが、藤永の報告によれば、大気圏のCO₂は炭素換算で毎年3GTづつ増えている。海洋緑化計画は、海水中生物の光合成を42GT/年から45GT/年に、3GT増やすことである。そうすれば、大気中のCO₂を3GT減らすことが出来る。すなわち、海洋中の生物が3GTから6GTに増え、食料増産にもなる。

海洋緑化は何時までにやらなければならない課題かということになる。CO₂の増加予測次第ということになる。CO₂問題は産業構造審議会の地球環境部会で最近報告が出ていて、大雑把に言って、現在360ppmのCO₂が2100年には約700ppmになり、気温が2度上がって、海面が50cm上がる。50cmも上がれば、ことは遅いので、10cmも上がったところで、パニックが起こると心配される。時間に正比例して増えるとすれば、2025年頃までに海洋緑化計画実現の可能性を実証する必要がある。

さて、海洋緑化に必要な海水量は、炭素換算で3GTの生物増産を産む海水量であり、それは海水の生物生産速度から推定することができる。海水の生物生産速度は、海が生物生産に関してどのような特性を持っているとするかによって異なる。本報告では、静岡大学の鈴木款教授編の「海洋生物と炭素循環」(東京大学出版、1997)を参考にした。海洋の炭素循環は、大気中のCO₂の溶存、植物プランクトンなどの生物生産、動物プランクトンの増殖、排泄や死滅、可溶性の有機物の生成、パー

ティクル状の有機カーボンや無機カーボンの生成などによって構成される。炭素は、表層水と中深層水と大気とでやり取りがあり、それが、沿岸海域と外洋海域で異なる。この本では、それぞれの生産量と現存量が炭素換算でまとめられている。沿岸海域での生物生産速度は693gC/m²/年であると報告されている。条件によってはもっと早いケースも期待できるが、本報告では沿岸海域と同程度の生物生産速度で海洋緑化を検討する。また、本報告では、沿岸海域と外洋海域の面積が示されているので、沿岸海域での1m²当たりの生物生産速度から、生物生産が活発な表層水の水深が計算できる。沿岸海域の生物生産の深さは平均して60mと計算される。それは、取りも直さず、光照射の可能な海水の層厚といえる。

さて、3GT/年の生物生産に必要な海水量は、3GT/年を沿岸海域の生物生産速度である693gC/m²/年で割り、60mを掛けることによって求まる。それは、 $2.6 \times 10^5 \text{ km}^3$ である。これが、海洋緑化が目標とする海水量である。

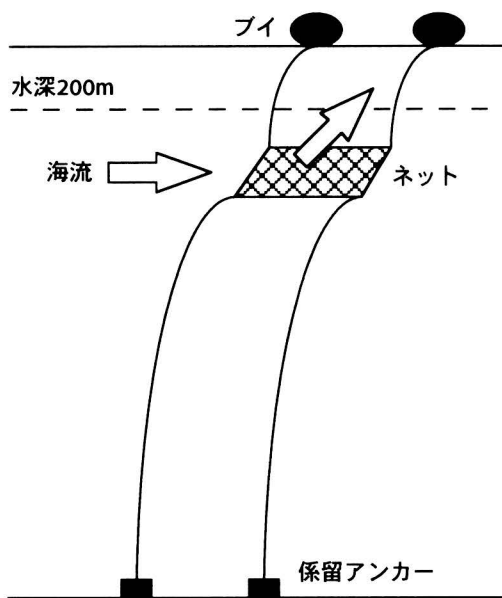
3. 海洋緑化設備の規模試算

前記の4つの方法について、3GTの光合成を行うにはどれだけの規模の設備が必要かを試算した。

3.1. A案：海流利用の方法

前提：(1) 深層水を表層へ持ってくれば、沿岸海域と同じ効率で植物プランクトンが生産されるとする。

(2) 沿岸での植物プランクトンの1次生産量は693gC/m²・年と見積も



<前提>

- ・海流：1 m/秒
- ・ネット：100 m × 1000 m
- ・揚水量： $3.3 \times 10^3 \text{ km}^3/\text{年}$

<必要海水量>

$$2.6 \times 10^5 \text{ km}^3$$

<ネット必要数>

79基

図1. 海流利用案の検討

る。

- (3) 沿岸相当の光合成がおこる水深は60mとする。
- (4) 100m × 1000mのネットで揚水できるとする。
- (5) 利用できる海流の速度は、1m/秒とする。

必要海水量：

$$V = 3 \text{ GT} / \text{年} \div 693 \text{ gC} / \text{m}^2 \cdot \text{年} \times 60 \text{ m} \\ = 2.6 \times 10^5 \text{ km}^3$$

海流利用の揚水量：

$$v = 100 \text{ m} \times 1000 \text{ m} \\ \times 1 \text{ m/秒} \times 1 \text{ 年} \\ = 3.3 \times 10^3 \text{ km}^3 / \text{年}$$

揚水ネットの必要台数：

$$N = V \div v = 79 \text{ 基}$$

補足説明：海流の速度は黒潮で約数m/秒である。ここでは、水深200mでも

1m/秒の速度があるとする。係留ブイの建設は、1000m級のビル建築の技術が設計上可能になってきているので、可能と推定できる。また、これだけの数のフェンスを作ることは、なんとか実現の可能性がある。

3.2. B案：海水をポンプアップする方法

前提：(1) 深層水をタンクへ汲み上げれば、タンク内で、沿岸海域と同じ効率で植物プランクトンが生産されるとする。

(2) 沿岸での植物プランクトンの1次生産量は $693 \text{ gC}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ と見積もる。2.2日で生産されるとする。

(3) タンクの大きさは、 $200 \text{ m} \times 1000 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ とする。

(4) ポンプアップ速度を $100,000 \text{ m}^3/\text{日}/\text{システム}$ とする。オイルタンカーの荷積み速度が10万トン級

で1日と云われているためである。

(5) 建造費は100億円 / 80m × 500m × 30m ≒ 1億円 / 万 m³ とする。

必要揚水量 : A案と同じ

$$V = 2.6 \times 10^5 \text{ km}^3$$

タンク容量 :

$$v_1 = 200\text{m} \times 1000\text{m} \times 50\text{m} = 1 \times 10^7 \text{ m}^3$$

年間タンク保水量 :

$$v_2 = 1 \times 10^7 \text{ m}^3 \times 365 \text{日} \div (2.2 + 1) \text{日} = 1.7 \times 10^9 \text{ m}^3$$

タンク必要数 :

$$N = V \div v_2 = 1.5 \times 10^5 \text{ 基}$$

ポンプ必要数 :

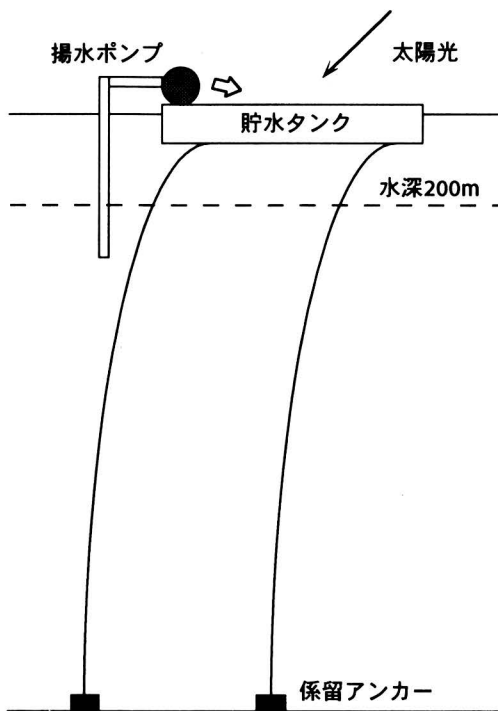
$$n = v_1 \text{ m}^3 \div 100,000 \text{ m}^3/\text{日}/\text{システム} = 100 \text{ システム}$$

タンクの建造費 :

$$M = 1000 \text{ 億円}/\text{基} \times 1.5 \times 10^5 \text{ 基} = 15,000 \text{ 兆円}$$

その他の費用 : 係留施設、ポンプ、維持管理

補足説明 : この案は、建設費がかかりそうである。ただし、汲み上げた水は留めることができるので、受益者負担の所在を明らかにするには有利である。また、海水を汲み上げる電力は海水の温度差発電で可能である。



<前提>

- ・貯水量 : $1 \times 10^7 \text{ m}^3$
= $200 \text{ m} \times 1,000 \text{ m} \times 50 \text{ m}$
- ・取水速度 : $100,000 \text{ m}^3 / \text{日} / \text{ポンプ}$

<タンク必要数>

150,000 基

<ポンプ必要数>

100 台 / 基

<タンク建造費>

1,000 億円 / 基

図2. ポンプアップ案の検討

3.3. C案：光ファイバを利用する方法

前提：(1) 深層水へ光を照射すれば、沿岸海域と同じ効率で植物プランクトンが生産されるとする。

(2) 沿岸での植物プランクトンの1次生産量は693gC/m²・年と見積もる。2.2日で生産されるとする。

(3) 沿岸相当の光合成がおこる水深は60mとする。

(4) 光ファイバは太陽の集光面積と同等の照射面積を持つものとする。

(5) 光ファイバシステムはブイのような浮遊体上で太陽光を集光し、光ファイバで200m以上の深層水へ光を送り照射するシステム。1基の面積は、200m×1000mとする。

必要海水量：A案と同じ

$$V = 2.6 \times 10^5 \text{ km}^3$$

光照射海水量：

$$v = 200 \text{ m} \times 1000 \text{ m} \times 60 \text{ m} \\ = 1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$$

光ファイバシステムの必要数：

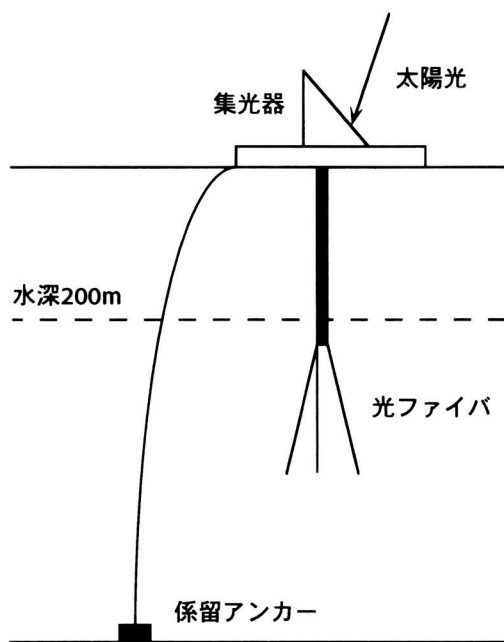
$$N = V \div v \\ = 2.2 \times 10^7 \text{ 基}$$

(参照) 必要照射面積：

$$S = V \div 60 \text{ m} \\ = 4.3 \times 10^6 \text{ km}^2$$

(外洋の面積 = $334 \times 10^6 \text{ km}^2$ の1.3%に相当する)

補足説明：これは、光を100%、損失することなく送り込めたらの試算である。ポンプアップの方法より1基当たりの建設費は安い、数が多くなる点が短所である。残念ながら、上記の前提ではあまり良い案とは言えない。



<前提>

- ・集光面積：200 m × 1,000 m/基
- ・照射面積 = 集光面積
- ・照射水深：60 m

<必要照射面積>

$$4.3 \times 10^6 \text{ Km}^2 \\ (\text{外洋の面積} : 334 \times 10^6 \text{ Km}^2)$$

<光システムの必要数>

$$2.2 \times 10^7 \text{ 基}$$

図3. 光ファイバー案の検討

3.4. D案：水中ライトによる方法

- 前提：(1) 深層水へ光を照射すれば、沿岸海域と同じ効率で植物プランクトンが生産されるとする。
- (2) 沿岸での植物プランクトンの1次生産量は693gC/m²・年と見積もる。2.2日で生産されるとする。
- (3) 沿岸相当の光合成がおこる水深は60mとする。
- (4) 水中ライトは、それを釣り下げるブイのような浮遊体の基地面積と同等の照射面積を持つものとする。
- (5) 水中ライトシステム1基の面積は、200m×1000mとする。
- (6) 電源としては、宇宙で太陽光発電した電力をマイクロ波送電で水中ライトシステムの基地へ送

る。基地から釣り下げる光源としては発光ダイオードを用いる。

水中ライトシステム：昼夜の照射が可能のため、光ファイバ方式の半分
必要照射面積：

$$4.3 \times 10^6 \text{ Km}^2 / 2 = 2.2 \times 10^6 \text{ Km}^2$$

水中ライトシステム数：

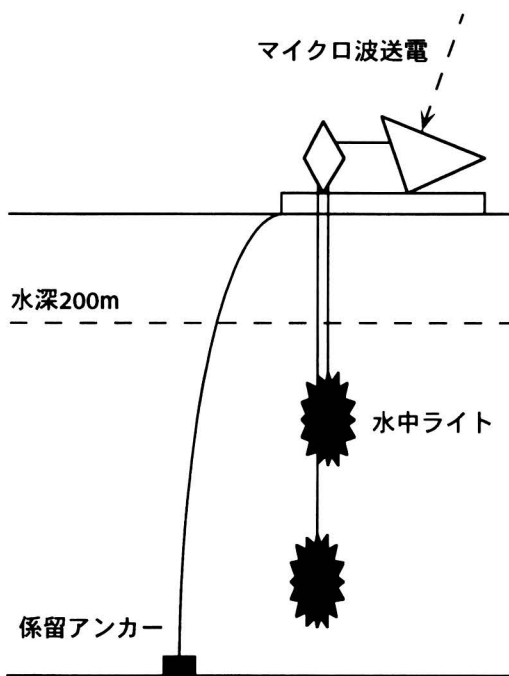
$$2.2 \times 10^7 \text{ 基} / 2 = 1.1 \times 10^7 \text{ 基}$$

水中ライトを20段に多層化することが可能とすると、

水中ライトシステム数：

$$1.1 \times 10^7 \text{ 基} / 20 = 55 \text{ 万基}$$

1基地当たりの水中ライト数：水中ライト1台で50m×50mの面積を水深60mまで照射できるとすると、



<前提>

- ・宇宙太陽光発電
- ・マイクロ波送電
- ・発光ダイオード：
 - AlGaInP : 660 nm
 - GaN : 430 nm
- ・多層照射：20層
- ・光合成波長幅：3 nm

<必要電力>

- ・8 × 10⁸ kW

<光システムの必要性>

- ・55万基

図4. 水中ライト案の検討

$$\begin{aligned} \text{水中ライトの台数} &= 200 \times 1000 \\ & \quad / (50 \times 50) \times 20 \\ & = 1600 \text{ 台} \end{aligned}$$

光合成に必要な光エネルギー：水中でも太陽光と同等の光量が必要とする。太陽光の全波長域の光エネルギーは $1000 \text{ W/m}^2/\text{日}$ 、太陽光の可視光領域 $400 \sim 700 \text{ nm}$ はその約 50%、

$$\begin{aligned} 1000 \text{ W/m}^2 \times 50 / 100 \\ = 500 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

クロロフィル a の吸収波長 430 nm と 660 nm では、半値幅 3 nm の波長域 2ヶ所が光合成に有効と仮定すると、

1 m^2 当たり光合成に必要なエネルギーは、

$$\begin{aligned} 500 \text{ W/m}^2 \times 3 / (700 - \\ 400) \times 2 = 10 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

発光ダイオードの必要電力：照射面積 1 m^2 当たり 1 mW の光エネルギー照射に必要な消費電力は、

AlGaInP系発光ダイオード (660 nm 、半値幅 3 nm)： 25 mW

GaN系発光ダイオード (430 nm 、半値幅 3 nm)： 50 mW とする。

2つの発光ダイオードをペアで使えば、 2 mW/m^2 の光エネルギー照射ができ、それに必要な発光ダイオードの消費電力は 75 mW 。

太陽光相当の光エネルギーを確保するのに必要な発光ダイオードの消費電力は、

$$\begin{aligned} 10 \text{ W/m}^2 / 2 \text{ mW/m}^2 \times \\ 75 \text{ mW} = 375 \text{ mW/m}^2 \end{aligned}$$

水中ライト1台の必要電力：

$$375 \text{ mW/m}^2 \times (50 \text{ m} \times 50 \text{ m}) = 938 \text{ W}$$

水中ライト基地の必要電力：

$$938 \text{ W} \times 1600 = 1500 \text{ KW}$$

全水中ライトシステムの必要電力：

$$\begin{aligned} 1500 \text{ KW} \times 5.5 \times 10^5 \\ = 8.25 \times 10^8 \text{ KW} \end{aligned}$$

補足説明：この案は仮定が多いので今後さらに詳細な検討が必要である。また、光源のコストなども考慮されていないので、総合的な評価が必要である。

4. 海洋緑化施設実現の課題

4.1. 大型施設の建造について

上記のいずれの方法でも、なんらかの大型浮遊体の施設を建造する必要がある。日本では戦艦大和が長さ 256 m 、最大幅 37 m 、吃水 10 m であり、初めての本格的な鉄鋼建造物であった。最近では、平成 8 年に完成した九州北部にある白鳥原油貯蔵基地が長さ 397 m 、幅 82 m 、深さ 25 m の大型貯蔵油槽を 8 基備えており、建造費用は $1,480$ 億円である。現在では、海上浮遊体のヘリポートが造られ、メガフロートの建造技術が研究されている。また、これらを係留するアンカーとしては、高層建築の技術が必要になる。現在の高層建築は約 400 m であるが、鹿島建設の設計によると縦横 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ 、高さ $1,000 \text{ m}$ が可能とのことである。こうした建造技術は、鉄鋼の材質開発や製造プロセスの改善なども必要とする総合技術であり、超大型エンジニアリ

ングの開発が課題になる。もちろん、こういった建造物が船の航行の邪魔にならないかアセスメントが必要なことはいうまでもない。

4.2. 運転エネルギーの確保について

海水をポンプアップする方法と水中ライトの方法では、大きなクリーンエネルギーを必要とする。海水温度差発電は有力な候補の一つになる。表面海水温度30℃、深層水温度5℃の場合、25℃の温度差が取れ、300 kWの発電が可能であり、発電のための電力を差し引くと30 kWぐらいが使える。ただし、ポンプアップする方法では発電そのものが、深層水を汲み上げることになるので、これで十分な運転エネルギーになる。ただし、1年を通じて30℃以上の表面海水温度を確保できる海域が必要になる。もちろん、発電のための熱媒体であるフレオンの材料開発によって条件は緩和される可能性がある。第2の有力な候補は、宇宙で太陽光発電し、マイクロウェーブで海洋緑化基地へ送電する方法である。そのほか、波浪エネルギーの利用や、風力発電の利用などが考えられる。

4.3. 海洋緑化基地の立地について

海流利用の方法では、1 m/秒の海流速度を水深200 mで得られる海域が必要なる。海水をポンプアップする方法は、生物生産が活発な沿岸海域に基地を設けても本来の生物生産を犠牲にするので、設置場所は外洋海域になる。光ファイバーを利用する方法や水中ライトの方法は、海上基地の面積が大き

い場合は沿岸海域では本来の生物生産を犠牲にするので、やはり外洋海域になる。海図を見ると、数百mから2,000 mの海域は意外に少なく、船の航行などを考えると、海洋緑化に適した外洋選択は大きな課題である。したがって、外洋の大半を占める水深4,000 m以上平均6,000 mの外洋海域は十分に広いので、この海域の活用方法を開発することが課題である。マンガン団塊採掘計画では水深6,000 mまで採掘機を降ろして実験をしているので、大型基地の係留は可能である。

4.4 光照射方式の技術開発余地について

現在市販されている光ファイバで海洋緑化に利用できるものは、バンドルファイバーと呼ばれるもので、クロロフィルの吸収波長427 nmの光は200 m送られると、約40%に光量が減衰する。材質開発をすれば約1桁の向上は期待できると期待されているが、品質向上は大きな課題である。光照射の方法では、光を分散させて照射する方式の採用や、パルス照射の方式や、光合成に有利な波長選択と混合照射の方式など、種々のシステム開発に大きな可能性が秘められている。

海洋牧場計画など既存の計画でも種々の光照射方式の研究が行われているが、太陽光の集光技術や、光照射面積拡大技術、照射光量の最適化技術などに進歩が見られる。大分県の海洋牧場計画、高知県の深層水利用、慶応大学の集光装置「ひまわり」、大阪大学と川崎重工のバイオリアクター開発など

は注目される研究開発である。本報告で仮定した生物生産速度を上回る条件が見い出されると、海洋緑化施設の規模もより小さくなり、実現の可能性が高まる。したがって、今後、これらの研究分野と大いに連携を保ちながら研究開発することが期待される。

おわりに

本報告では、深層水に光を照射して生物生産を高める4つの方法について検討したが、この他に、砂漠化した外洋へ栄養分を供給する方法など種々の方法論があると思われる。たとえば、栄養分供給の方法としては、ゴミや放置されている資源の利用が考えられる。家庭のゴミの中には食べ物のカスが重量で42%も入っているとの報告があるし、荒廃が進む国有林では安い間伐材が放置されているので、これらの資源を利用できる。

最後に、海洋緑化は国家の事業として行うことであり、技術的に可能であっても、国民の理解を如何に得るかが大きな課題になる。科学技術庁がおこなった創造技術立国日本のイメージ調査の中では、海洋緑化は「最適な環境管理が行われる海洋牧場の普及実現は2015年」となっている。したがって、海洋緑化計画も国民からの支援が得られる方向にある。また、国民の理解が得られ易い事業とするには、新産業の創造として位置づけられることである。通産省の産業政策局の報告によると、海洋分野では、メガフロートや海洋牧場や海洋リクリエーションなどが新産業として期待されている。本報告の海洋緑化計画についても、その市場規模を明らかにし、国民生活にどのような影響を与えるかといった観点からの検討が必要である。第三者からの評価が良い得られれば、2025年までには、海洋緑化計画は実現すると期待される。