



## 波力を利用した人工湧昇による魚類資源増強の人工湧昇

Brian Kirke\* (ブライアン・カーク)

School of Engineering, Griffith University Gold Coast Campus, PMB 50, Gold Coast Mail Centre,  
Queensland 9726, Australia

### 概要

海洋漁業は、乱獲により世界的に衰退している。世界で最も生産性の高い海洋漁場を支えている自然の湧昇流を模倣することで、栄養価の高い海洋深層水 (DOW) を表層に送り込み、食物連鎖の最下層にある植物プランクトンを養うことで、問題を解決することができる。様々なこの目的のために、様々なタイプのポンプと動力源が提案されている。この記事では、プロトタイプスケールでコスト効率よくコンセプトを実証するために、シンプルな波力ポンプを提案します。濃厚な栄養分を含んだ DOW の希釈と濃密なプランジングの問題に対する可能な解決策が議論されている。さらに、この提案の 2 つの利点についても議論する。

波のエネルギーを利用することで、市場の近くに比較的穏やかな漁場を作ることができる。非常に大量の冷たい DOW を汲み上げることで、表面温度を下げ、グレートバリアリーフの一部でサンゴの白化を抑えることができるかもしれません。

©2003 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. はじめに

最近、世界の商業魚資源の 75% が平均持続可能レベル以上で漁獲されていると推定されています [1]。この状況は、世界の人口増加に伴ってさらに悪化する可能性があり、次の 2 つのいずれかが起こらなければならない。不可能ではないにしても、消費を規制するか、生産性を向上させるか。

略語の説明 DOW : 海洋深層水、FRP : 繊維強化プラスチック。

炭素繊維などの総称で、高強度の繊維がプラスチックのマトリックスに埋め込まれている。

海洋温度差発電 : 冷たい海洋深層水と暖かい熱帯の表層水の温度差を利用して熱機関を駆動するプロセス

OWC (Oscillating Water Column) : 波のエネルギーを利用する技術。

狩猟・採集から耕作・牧畜へと変化したことで、この数千年の間に地球の人口は大幅に増しましたが、海洋ではそのような変化はあまり見られません

農業技術の中には、土地に悪影響を及ぼすものもありますが、持続可能であることが証明されています。これらの成功した技術は、自然のプロセスを模倣しています。例えば、Yeomans [2]は、チゼルプラウと灌漑によって生物学的に活性な土壌の深さを増やすことができることを示し、また Grocock [3] は、栄養豊富な粘土質の下層土と貧弱な砂質の表層土を混合することで、生産性を向上させる方法を示しています。海洋漁業は、まだ狩猟採集の段階にあります。限りある資源をさらに乱獲するための効果的な方法を開発するのではなく、資源を増加させるために持続可能な方法で生産性を向上させる技術を開発し、資源を増やす方法を見つけるべきです。

ほとんどの海洋動物や植物は、水柱の上部 40m に生息しています[4]。彼らが死ぬと底に沈みます。浅い沿岸水域では、栄養分がリサイクルされ、これらの地域は高い生産性を持つことができます。しかし、水深が約 40-100m よりも深くなると、栄養塩は海面下に沈んでしまいます。100m 以上の深海になると、栄養塩は腐食帯の下に沈み、海洋深層水 (DOW) を豊かにします。海洋食物連鎖の最下層を形成し、光を必要とする植物プランクトンが利用できなくなります。植物プランクトンは成長するために光を必要とし、海洋食物連鎖の最下層を形成します。栄養素が再び食物連鎖に加わるのは、この栄養豊富な DOW が表層に出てきて初めて成立する。これは温暖な海洋では、温かい表層水と冷たい DOW との間には密度差があるため、一般にこれは起こりません。その結果、ほとんどの熱帯・温帯の海の生産性は低いものとなります[4]。しかし、高緯度の冷たい海や、高緯度から冷たい極地水が流れてくる地域では、海面温度は約 4°C まで下がり、密度は海底と同じになります。そして、栄養豊富な DOW は乱流混合によって容易に表層へと運ばれる。DOW の上昇流はいくつかの海岸付近でも発生し、特にアフリカ南部や南米の西海岸では、海洋循環により DOW の上昇流が発生します。これらの自然湧昇域は、世界で最も生産性の高い海洋漁場の一部に対応しており、世界の海洋自然生産量の 90% を占めています[5]。

## 2. 自然の湧昇を模倣する

現在、この自然の湧昇プロセスを模倣して、自然の湧昇がない地域で海の魚の生産量を増やすことができるのではないかと期待が高まっています。数百メートルの深さから、栄養豊富な DOW を大量に噴出させることで表層部と深層部の密度差は 2~3kg/m<sup>3</sup> 程度しかなく、これでは自然界の養分が自然混合によって表層に到達するのを妨げるには十分であるが、これを克服するために必要な機械的エネルギーは、後述するように比較的小さいものです。大量の養分の豊富な海洋深層水を、比較的小さな力で汲み上げることができる。過剰な希釈をせずに光帯内に維持するための低コスト・低メンテナンス技術が見つければ、市場に近い場所を選んで人工的に湧き上がらせ、それによって収穫コストを削減することができる。波のエネルギーを利用して揚水すれば、波のエネルギーが減り、比較的穏やか

で快適な漁場になります。これは、オーストラリアの中西部沿岸のように、「年間を通して続く強い南風のために多くの漁獲日数が失われる」、「かなり大きな海（2m 以上）のために漁業や調査活動が困難になる」地域では有益なことです[6]。また、波エネルギーの採取場を慎重に選択することで、海岸浸食を減らすことができるかもしれない。

魚の生産量が増える可能性があるだけでなく、次のような可能性も示唆されている[7]。台風が発生する海域で非常に大規模な人工湧昇が行われれば、海面を十分に冷やして台風を防ぐことができる、あるいは少なくとも台風の規模を小さくすることができる」と提案されている[7]。この先見性のある提案は、一見すると自然のプロセスに対する危険な干渉のように見えるかもしれませんが、森林伐採や砂漠化などの人間の介入による他の影響とは異なり、簡単に元に戻すことができます。アップウェリングは、徐々に規模を拡大して実験し、予期せぬ有害な影響が生じた場合には中止または規模を縮小することができる。大量の冷たい水を地表に汲み上げることで得られる。

もう一つの利点は、珊瑚の白化現象が起きているグレートバリアリーフの水温を下げる効果も期待できます。台風やサイクロンと同じように、ごくわずかな温度変化が決定的な違いを生むことがあります。水温の変化は非常に小さいものですが、台風対策とは異なり、サンゴの白化を防ぐことができます。成功すれば拡大することができます。

### 3. 人工湧昇の実施に対する障壁

コンセプトの新しさと、設計のベースとなるプロトタイプの運用経験がないことが人工湧昇の実施の障壁となっている。民間投資家は政府は実績のない技術に資源を投入することに慎重になる傾向があり、次のような疑問が解消されるまで多額のベンチャーキャピタルを提供することは難しい。

- \*海面近くに放出された冷たい高密度の深層水は、再び、植物プランクトンが利用できないような栄養分を含んだ噴出ゾーン以下のレベルまで沈んでしまうのだろうか？
- \* 栄養塩類は混合によって希釈され、その濃度は植物プランクトンの生産性に大きな影響を与えないほど低くなるだろうか？
- \* コンセプトを証明するには、どのくらいの流量が必要か？
- \* 必要な深さから必要な量の水を持ち上げることができる非常に大きなポンプを、嵐の影響を受け、メンテナンスがほとんどない外洋に建設し、配置し、動力を与えるにはどれくらいの費用がかかるでしょうか？
- \* 創出された生産性の高い地域で魚を獲る権利を誰が持つのか：誰が支払い、誰が利益を得るのか？

しかし、潜在的な利益は非常に大きいため、これらの障壁を克服し、プロトタイプ開発のための可能なコンセプトデザインを検討する価値は十分にあると思われます。

模型では、簡単な波力装置を使って水を汲み上げることができる」と実証されていますが、これらの模型は、魚の数を測定的に増やすには小さすぎます。また、海洋温度差発電 (OTEC)

を利用した野心的な大規模プロジェクトを提案するには、まだまだ遠い道のりです。今必要とされているのは、低コストで大流量のシステムであり、人工的な湧昇によって魚類資源が実際に経済的に増加することを実証することである。上記のこの記事では、上記の懸念事項を取り上げ、波力を利用した慣性ポンプコンセプトの設計変更を提案する。これは、この技術の開発において、これまでテストされてきた小型モデルを超えて、経済的に実現可能な次の段階を提供すると著者は考えている。

#### 4. プランジングとダイリューション

冷たくて濃い栄養分を含んだ水は、単純にポンプで水面に上げて放流することができます。しかし、冷たい高密度の深層水と暖かい表層水が出会うサーモクラインでは、中性浮力レベルまで「急降下」または「沈下」する傾向があります。Tait と Dipper[8]によると、サーモクラインは通常、低緯度地域では 100~500m の深さにあります。光合成が可能なユーフォティックゾーンは、夏季には中緯度で 40~50m、澄んだ水であれば、低緯度地域では 100m 以上になります。200m 以下は無栄養状態、つまり光合成ができない状態です。そのため、ほとんどの場合、サーモクラインに突入した水は、すぐに植物プランクトンが利用できなくなり、ほとんど成果が得られません。

暖かい表層水に排出された冷たい栄養豊富な水は、混合によって希釈され、密度差が減少するため、急降下する傾向があります。これは、密度差を小さくして急降下させるのですが、同時に栄養分も希釈されます。希釈度が高すぎると栄養塩濃度の増加は拡散しすぎて明らかな測定可能な効果をもたらさないかもしれない。また、効果があったとしても、それを定量化することは困難である。

密度の異なる周囲の流体に入る流体の「プルーム」と「ファウンテン」の混合について多くのことが書かれている（例えば[9, 10]参照）。混合の程度は多くの要因に依存するが、そのうちのいくつかは制御可能である。例えば、吐出速度、吐出口の位置や向きなど、制御可能な要素もある。Liu [11] は人工的な湧昇の文脈でプランジングと希釈の問題を考察しています。Liu のモデリングでは、 $0.95\text{m}^3/\text{s}$  の流量を様々な深さでモデル化したところ、初期の希釈度は、地表からの流出では 47:1、550m の深さの放流では約 10:1 まで低下し、平衡水深は地表の放流では 50m、深さ 50m では 75m となる。混合の度合いは、波の影響により、表面近くでより大きくなります。前述の[8]の図から、これらの平衡水深に沈んだ希釈された栄養塩を含む海洋深層水は、低緯度地域の中緯度ではなく、低緯度では藻場にとどまることとなります。この程度に希釈された DOW が有用な栄養塩濃度を提供するかどうかを評価するためには、栄養塩濃度を知る必要がある。生産性を高めるために必要な濃度と生産性を高めるために必要な濃度を知る必要がある。Gauthier[5]や McKinley and Takahashi[12]によるいくつかのデータを表 1 に示す。表 1 には Gauthier[5]と McKinley and Takahashi[12]のデータを、表 2 には、Liu[11]が予測したように、DOW が沈降帯に汲み上げられ、混合によって希釈される地表付近の栄養塩濃度の予測値である。

表 1 と表 2 の比較は非常に限られたデータに基づいていますが希釈は DOW ポンプの利点を十分に打ち消す可能性があることを示唆している。したがって、少なくとも概念実証の初期段階では、希釈を最小限に抑えるべきである。この問題を解決するために、Gauthier [5] は栄養豊富な水を環礁のラグーンに送り込み、そこでは分散して希釈されないようにすることを提案している。外洋のように分散して希釈されることはありません。限られた量の栄養豊富な水であっても、すぐに測定可能な大きな効果を得ることができます。

栄養不足の浅い沿岸水域の近くに深層水が存在する場合、ポンプを使って生産性を向上させることができるかもしれません。DOW を浅い沿岸水に送り込むことで生産性を向上させることができるかもしれない。より密度の高い DOW は、やはり底面に沿って重力流を形成し、深みに戻っていく傾向がある。しかし、外洋のように垂直に落ちていくほど急速には失われない。自然に閉じ込められるような底質がない場合は大きな膜をフロートで水面下に吊り下げ、そこに DOW をポンプで送り込むことができる。しかし、これではコストが大幅に上昇してしまうため、ゴーティエの環礁案が初期の概念実証には最適な選択肢と思われる。

Table 1  
Measured nutrient concentrations and productivity in deep ocean water and surface water, after Gauthier [5] and Mc Kinley and Takahashi [12]

Location	Water	NO <sub>3</sub> (mmol/m <sup>3</sup> )	PO <sub>4</sub> (mmol/m <sup>3</sup> )	Productivity (gC/m <sup>2</sup> /yr)
Coastal upwelling	Natural upwelling, surface	20	?	High: 250–2000
Open ocean	Surface	<1	?	Low: 50
NELHA	Surface	0.24	0.15	?
Papeete	Surface	0.1–1	0.4–0.5	?
NELHA	600 m depth	39	2.89	Low (below photic zone)
Papeete	700 m depth	12–18	0.7–2.5	Low (below photic zone)

Table 2  
Diluted nutrient concentrations in deep ocean water pumped to the euphotic zone and mixed with surface water as predicted by Liu[11]

Location	Water	NO <sub>3</sub> (mmol/m <sup>3</sup> )	PO <sub>4</sub> (mmol/m <sup>3</sup> )	Productivity (gC/m <sup>2</sup> /yr)
NELHA	From 600 m depth, diluted 10:1	3.9	0.29	?
Papeete	From 700 m depth, diluted 10:1	1.2–1.8	0.07–0.25	?
NELHA	From 600 m depth, diluted 40:1	1	0.07	?
Papeete	From 700 m depth, diluted 40:1	0.3–0.45	0.018–0.06	?

## 5. どのくらいの流量が必要で、どのくらいの深さから必要なのか？

有用な量の栄養分を供給するためには、かなりの深さから大きな流れが必要です。水深や流量の明確な最小値は存在しない。Matsuda ら[13]は、10 MW の OTEC プラントを用いて、50 m<sup>3</sup>/s を 5~600m の深さから汲み上げることを提案した。彼らは、この量の海洋深層水は、

年間 330 万ドルの魚類収入をもたらし、経済的に成り立つと見積もっている。これは妥当な出発点だと思います。

Gauthier[5]は、環礁のラグーンの大きさは数平方 km から数千数十メートルの深さに及びます。10 平方キロメートル、深さは平均 40 メートルで、水の量は  $4 \times 10^8 \text{m}^3$ 。ポンプで 1 日に  $50 \text{m}^3/\text{s} = 4.32 \times 10^6 \text{m}^3$  で汲み上げると、完全に水を交換するには約 100 日かかります。ラグーンと海との間で多少の希釈はあるでしょうが、概念実証のためには  $50 \text{m}^3/\text{s}$  の流量が妥当であることを示しています。非常に小さなラグーンを試験的に使用できる場合は、より低い流量で十分です。

100~300m 程度の深さで栄養豊富な水が得られるとする著者もいるが、これは Matsuda ら [13] で用いられたものよりもかなり低い。これにより揚水に必要なエネルギーを削減することができる。例えば、Hanson[14]は、硝酸塩とリン酸塩のプロットを示しています。硝酸塩とリン酸塩のプロットは、表層から着実に増加し、深海の最大濃度の約半分に達する。Tait and Dipper [8]は、深さ 300m 付近で深海の最大濃度の約半分に達すると述べています。

「この湧昇水は、おそらく水深 100~200m 以上では上昇しないが、カナリア海流、ベンゲラ海流、ペルー海流、カリフォルニア海流、西オーストラリア海流に栄養分を供給するのに十分な深さで、これらの地域はすべて多産地帯である。」

しかし、これらの自然システムは、ほとんど、あるいは全く希釈することなく、大量の DOW を持ち込む。

人工的な上昇流では、希釈後に必要な濃度を得るために、深さと濃度の間でトレードオフを行わなければならない。したがって、水深 5~600m の深さが、試算の出発点としては妥当だと思われる。

## 6. ポンプとエネルギー源

人工湧昇の概念は単純であるが、人工湧昇を実現するのに、大きな影響を与えるほどの大きさのポンプシステムの実設計については、これまでほとんど発表されていない。以下のような様々な形式のポンプが提案されている。振動慣性スパーチューブポンプ [11, 15]、エアリフトポンプ [16]、ベローズポンプ [17]。提案されているエネルギー源には、風力発電、太陽光発電、海流 [17]。波力 [11, 15, 17]、OTEC [7, 13] などがある。

より野心的な提案は、一般的に海洋温度差発電をベースにしており、上昇流はそれ自体が目的ではなく、海洋温度差発電の副産物であり、その開発をさらに正当化するものとして扱われることが多い。エネルギー源としての海洋温度差発電は、多くの常温エネルギー源とは異なり、一定の電力を供給できるという利点があります。これは、栄養分が光合成帯の下の高密度の水に沈んで失われ続け、DOW を常に流す必要がある場合、重要な考慮事項となる。しかし、浅い環礁のラグーンに揚水するシステムでは、一定の電力は大きな利点にはならないかもしれない。そこでは、栄養分は滲出帯に蓄積され、エネルギーの利用可

能性が低い時、すなわち波エネルギーの場合は穏やかな天候の時に植物プランクトンによって利用される可能性がある。

OTEC は、Liu[11]や Vershinsky ら[15]が実証した単純な慣性ポンプよりもはるかに高度なエネルギー抽出方法です。OTEC には海洋環境では腐食やファウリングの問題が発生しやすい熱交換器と、また、低温熱機関では、フレオンやアンモニアなどの揮発性の作動流体を必要とし、シールが良好な状態に保たれていないと漏れてしまう傾向があります。熟練した技術者を必要とする大規模かつ多額の予算を要する「小規模な概念実証」プロジェクトにより適しています。

Dunn ら[7]は、数百個の OTEC 発電エネルギーポッドを提案している。

1 日に 17 億  $m^3$  (約 200,000  $m^3/s$ ) を汲み上げて台風を防ぐことを提案しています。

この方式は技術的には可能かもしれませんが、シンプルな技術と小さなサイズから、大規模でより洗練された設備へと徐々に進歩させることで、湧昇装置の設計、建設、設置、運用、環境への影響などの経験を積むことが賢明だと思われる。もし環境に悪影響を与えることなく、魚の生産性を向上させる費用対効果の高い証拠が中規模のユニットで実証されれば、より大規模で野心的なプロジェクト、すなわち これにより、最も費用対効果の高いオプションであると思われる場合には、OTEC を動力源とした、より大規模で野心的なプロジェクトのケースが強化されます。

## 7. 波力を利用した慣性ポンプ

実用的な人工湧昇システムの詳細な設計は乏しい。Liang [16]は Roels ら[18]に記載された 1968 年の湧昇プロジェクトを引用していますが水がどのように汲み上げられたかについての詳細はない。人工的な湧昇を実証するために設計された、実際に作動するポンプについての記述は 2 つしかない。人工的な湧昇を実証するために設計された実際のポンプの記述は、文献上では Liu [11]と Vershinsky et al.と Vershinsky ら[15]のものです。これらはどちらも小型のモデルであり、実際に必要とされるものよりも桁違いに小さい。このシステムがフルスケールで実用的かどうかを評価する必要があります。

1983 年、Vershinsky[15]は、**エレガントでシンプルな上昇流装置を実証した。この装置は、上端にフロートを備えた垂直管からなり、逆流防止弁を備えている。**この装置では、図 1 に模式的に示されているように、全体のアセンブリがうねりに合わせて上下に移動する。DOW の密度は表層の水よりも約 0.2% 大きいだけなので、その重力加速度は大幅に減少しチューブ内の DOW の慣性により、チューブが下降しても DOW は上に移動し続ける。

Vershinsky らの装置の断面積は 0.071 平方メートル (直径 0.3m) で、0.35m のうねりの中で 30m の深さから 4 秒周期で 10 l/s を汲み上げることができた。Liu[11]は、Vershinsky らのモデルと同じ原理で動作する直径 0.1m の「スパー・ブイ」を用いて、周期 4 秒の 3 フィート (0.9m) のうねりの中で行った模型実験を紹介している。彼は、慣性ポンプの理想的な吐出量  $Q$  について次のような式を与えている。

$$Q = \pi AH/T,$$

(1)

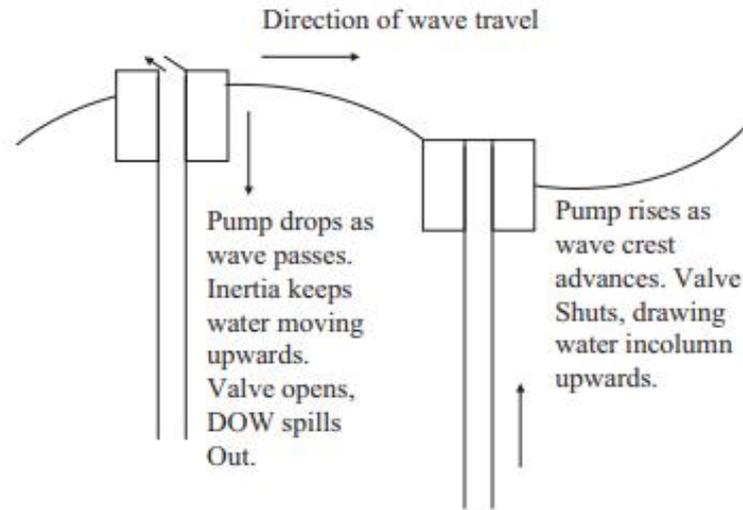


Fig. 1. Inertia pump action.

ここで、 $A$  はチューブの面積、 $H$  は谷から頂上までの波の高さ、 $T$  は波の周期を表す。

これは、 $Q = v_{\max} A = \omega r A = (2\pi/T)(H/2)A = \pi AH/T$ に基づいている；こ

こで  $v_{\max}$  は

ポンプの最大上昇速度であり、水面の最大上昇速度と等しいと仮定する。

水面の最大上昇速度と等しいと仮定する。

$$(2\pi/T)(H/2) = \pi H/T.$$

この式は、以下の要素を無視して、吐出量の上限を与えるものである。

1. チューブ内の水柱の上昇に対する重力の抑制効果。

水柱は、波に乗って上昇するフロートの最大上昇速度  $v_{\max}$  に等しい最大速度で上昇します。

しかし、波が過ぎると、逆流防止弁はバルブは水柱に力を与えなくなり、水柱の上昇速度  $v$

は重力によって遅れます。前述の Liu 氏のモデルでは、付録 A に示されていますが、この要因により吐出量が約 3%減少するだけです。しかし、試作機ではプロトタイプでは、 $T=12$  秒、 $H=1.9\text{m}$ 、 $\Delta\rho=2\text{kg/m}^3$  と仮定すると、23%の削減されることとなります。

2. フロートが水柱を持ち上げる際に沈み込む量が増えることによるストロークの減少。  
これは、付録 A に示されているように、 $50\text{m}^3/\text{s}$  を汲み上げる鋼管の場合、ストロークが 12% 減少します。

3. 波の波長に比べてフロートの水域面積が大きい場合、ストロークの切り捨てが発生する。  
これは、中程度の大きさのポンプで長波長の場合には大きな問題にはなりません。しかし、波長に対するフロートの大きさ、ひいてはポンプの大きさには上限があります。

式(1)は、Liu 氏のモデルの理想的な吐出量を  $5.61/\text{s}$  と予測しています。dye がチューブ内で上昇する時間を測定することで、Liu 氏は  $3.8\text{ l/s}$  の吐出量を計算しました。dye の上昇時間を測定してより正確な方法であると思われる袋詰め時間を測定すると、流量は約  $2.11/\text{s}$  と計算されました。これらのデータをもとに、 $0.45\text{m}^3/\text{s}$  の深さからの流量を予測しました。

図 1. 慣性ポンプの動作。

高さ  $1.9\text{m}$  の規則的な波の中で、直径  $1.2\text{m}$  のチューブを使って  $0.95\text{m}^3/\text{s}$  の水量を確保している。 $0.45\text{m}^3/\text{s}$  は、 $1.9\text{m}$  の規則的な波の場合の理想的な放流方程式で与えられる値ですが、彼の実験結果からすると楽観的に思えます。

松田氏ら[13]が提案した  $50\text{m}^3/\text{s}$  の流量は、Vershinsky のモデルが達成した流量よりも 3~4 桁大きく、Liu の提案したプロトタイプよりも 2 桁大きい。これは非常に大きなサイズアップであり、 $50\text{m}^3/\text{s}$  全体を 1 つのユニットで送ろうとすると、非常に大きなチューブが必要になります。Liu の式  $Q \propto \sqrt{pAH}T$  ( $H \propto 1:9\text{ m}$ ,  $T \propto 12\text{ s}$ ) を用いて、実際のポンプが理想的な吐出量の 50%を達成すると仮定すると、 $A \propto 201\text{ m}^2$  つまり、つまり、チューブの直径は  $16\text{m}$  でなければなりません。その長さは、栄養価の高い水が得られる深さに応じて、 $300\sim 600\text{m}$  程度でなければなりません。

構造物全体が嵐に耐えられるように頑丈でなければなりません。また、風や海流に流されないように繋がっていなければなりません。深層水と表層水の密度差が  $2\text{kg/m}^3$ 、水柱の直径が  $16\text{m}$ 、サーモクラインが  $300\text{m}$  と仮定すると水柱を持ち上げるには約  $1.2\text{MN}$  ( $120\text{ トン}$ ) の力が必要である。付録 B の計算結果によると、このような装置は、従来の炭素鋼や鉄筋コンクリートで作られた場合、非常に重く、高価なものになります。また、直径  $30\sim 40\text{m}$  のフロートが必要となる。その他のエキゾチックな素材 ステンレス鋼や FRP (繊維強化プラスチック、グラスファイバー) などの他のエキゾチックな素材は、はるかに高価です。

もうひとつの可能性は、張力をかけた膜構造を採用することです。軽くて比較的安価な柔軟性のある布を、剛性のあるフレームが張力で形を保つというものです。テンション 高さ  $180\text{m}$ 、最大直径  $140\text{m}$  の円形断面のケーブルネット構造が、ドイツで冷却塔として使用されている[19]。これはアップウェリングに必要なサイズのこのような構造が実現可能であ

ることを示している。また、直径 30~40m のフロートが必要となる。その他のエキゾチックな素材 ステンレス鋼や FRP (繊維強化プラスチック、グラスファイバー) などは、はるかに高価です。

## 8. イナーシャポンプの設計改善

慣性ポンプの設計上の改善点を 4 つ提案します。1 つ目は、逆止弁をチューブの上部ではなく、そのため、チューブ内の圧力が外よりも大きくなり、チューブの形状を維持するために、チューブを硬くする必要がありません。形状を維持するための剛性が不要になります。第 2 の改良点は、3 本のチューブを三脚のように配置することです。各チューブの底部は、弾性ケーブルを介してアンカーに取り付けられています。これにより これには 3 つの利点があります。1) 海流や風で全体が漂うのを防ぐことができる。2) フロートが谷に入るときに逆流防止弁の入ったチューブの底が確実に沈む。従来の慣性ポンプが波の水平成分のみを利用していただけのことに比べ、波の水平成分のエネルギーを変換することができる。従来の慣性ポンプは垂直方向のエネルギーのみを利用していました。

1 つ目の改良で可能になった 3 つ目の改良は、光のチューブを作ることです。

貯水池の水を循環させるためのドラフトチューブとしてオーストラリアで使用されているものと同様に、軽くて低コストの柔軟な布でチューブを構成することです。

[20, 21]。平均温度 20°C の地表水を想定して水深 500m のサーモクライン上の平均温度 20°C の表層水と、5°C の DOW を想定すると密度差は約 2kg/m<sup>3</sup>。この場合、チューブ内外の最大静圧差は約 10kPa、水深 1m となり、通常のポンプの基準では非常に低い圧力となる。必要であれば、ステンレス鋼や炭素繊維のテンドンで長手方向に補強することも可能である。剛性のないチューブを使用すれば、資本コストと展開コストを大幅に削減できる。例えば、650g/m<sup>2</sup> (グラム・パー・スクウェア・メートル) の PVC ファブリックは、厚さは約 0.5mm、価格は約 10 豪ドル/m<sup>2</sup> (6 米ドル/m<sup>2</sup>) で、約 90MPa の引張強度があります。これは、直径 4m のチューブに 10kPa までの圧力をかけるのに十分な強度である。直径 4m の 500m の長さのチューブは、供給のみで約 36,000 ドル、製造するとその 2 倍になるだろう。より大きな直径の場合は、より強い大口径の場合は、より丈夫で厚い生地が必要ですが、浅い深度の場合は、より軽い生地を使うことができます。輸送の際には、チューブを平らにして、消防ホースのように折りたたんだり、巻いたりすることができる。

4 つ目の改善案は、動力源として単純なフロートではなく、効率的な波力エネルギー変換装置を使用することです (下記参照)。これにはいくつかの利点がある。

Vershinsky らが使用したスパー・ブイ慣性ポンプはシンプルで小型に適していると思われるが、必ずしも利用可能なポンプ装置の中で最も適切で費用対効果の高いものではない。Liang[17]によれば、スパー・ブイは入射波エネルギーの 6%しか変換しないというが、どのようにしてこの数字を導き出したのかは不明である。Liu[11]や Vershinsky ら[15]が引用している数値は、さらに低い効率を示唆している。エネルギー変換の効率は、エネルギー源が無限で変換コストが低ければ、必ずしも重要ではありません。しかし、1 つのユニ

ットの大きさと材料費が相当なものであることは上述のとおりです。

効率的な波動エネルギー変換器が提案されている。例えば、「ターミネーター」と呼ばれる波動エネルギー変換器のクラスが説明されている[22]。これらは一般的に、入射波の方向に対して垂直に配置された広い構造物である。波に反応して減衰しながら動く。この減衰力は、原理的には、減衰力を機械的な動力、つまり電氣的な動力に変換することができる。最もよく知られているターミネーターは、サルター・ダック[23]と呼ばれるものである。実験室でのテストでは、入射波エネルギーの 80%を取り出すことができた。エバンス[24]は、波エネルギーの最大 50%を、入射波に対して正しく調整された横方向または縦方向に動く浮動または沈降円筒が入射波に対して正しく同調すれば、浮いているか沈んでいる円柱が横か縦に動くことで最大 50%、軌道運動をする円柱では最大 100%の波エネルギーを抽出できることを理論的に示した。軌道上を移動する円筒では 100%のエネルギーが得られ、その後流には穏やかな水が生まれる。デイビス[25]は、そのコンセプトをさらに発展させ、「ブリストル・シリンダー」と名付け、垂直に対して 45 度の位置にある一対のケーブルによるエネルギー抽出を提案した。図 2)。円筒が円周上を移動する際に、テザーリングケーブルが交互に引っ張られたり、解放されたりして、ほぼ単純調和的な動きをする。波の方向に対して垂直に配置された幅広のターミネーターの難点は波が同じ方向から来るとは限らないことです。この問題を解決するために、デイビスは、球体に直交する方向に 3本のテザーケーブルを設置して、2本または3本のケーブルの組み合わせで、波の方向に関係なく動作することを提案しています。また、波頭に平行に配置された長い円筒の両端に一対のケーブルを配置し、両端の位相がずれないようにするという方法もあります。

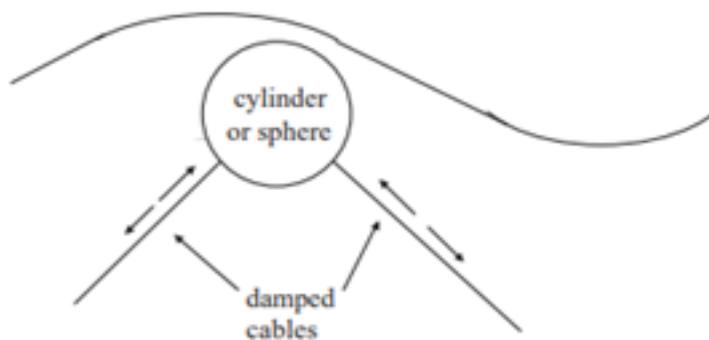


Fig. 2. The "Bristol cylinder" wave energy device.

ほとんどの波力エネルギー変換装置の欠点は（例外的に空気タービンを駆動する OWC（'Oscillating Water Column'）システムやタービンを駆動するタブチャンシステムを除く）の欠点は、ゆっくりとした周期 8~12 秒の往復運動や公転運動を、高速の回転運動に変換して発電機を駆動する必要がある。しかし、本願発明ではこの点は問題になりません。

慣性ポンプを使って水を効率的に汲み上げることができるので、今回の用途では問題ありません。湧昇装置は風や海流に流されないように、ケーブルで海底に固定する必要があります。風や海流に流されないようにするためです。ケーブルのコストを最小限に抑えるためにも、市場の近くにデバイスを設置するためにも豊富な栄養分を含む底層水と大きなうねりがある最も浅い海に設置するのが合理的です。今回の提案では、テザーケーブルは、ターミネーターからポンプへの電力供給も兼ねています。これにより、コストを削減することができます。沈んだ円筒や球体は、次のような利点があります。沈んだ円筒や球体は、従来のように水面に大きなフロートを設置するよりも、嵐や船の衝突の影響を受けにくいという利点があります。従来の慣性ポンプのように水面に大きなフロートを設置するのではなく、小さなフロートを設置することで水面に浮いているだけなので、簡単に位置を確認することができます。

## 9. $50\text{m}^3/\text{s}$ の汲み上げが可能かどうか

「小振幅」の波の場合、波頂 1メートルあたりのエネルギー  $E$  とパワー  $P$  は、Sorensen[26] によってはそれぞれ  $E = \rho g H^2 L / 8$  and  $P = nE/T$  として与えられている。ここで、 $\rho$  = 密度 (海水の場合は約  $1020\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $H$  = 波高、 $L$  = 波長 (単位 : m)、深海では  $n = 0.5$ 、深海では  $L = \text{波長} = gT^2 / 2\pi$ 、深海では  $1:56T^2$  です。

したがって、[11]で引用されているように、波高  $H = 1:9$  m、周期  $T = 12$  s の場合。

$L = 225$  m、波面 1m あたりのパワー  $P = 41.5$  kW/m となる。

Berge[27]によると、ノルウェーの海岸沿いには波のエネルギー密度が高い地域が存在し、いくつかのサイトでは頂上の平均密度が  $50\text{kW}/\text{m}$  以上を記録しています。したがって、Liu が選んだ波は、世界基準では高エネルギーとみなされます。

Evans[24, Fig. 14]によると、無次元波数  $n$  が 100%に近い最大効率が得られることが示されています。無次元波数  $\nu = 2\pi a/L$  が約 0.3 から 0.8 の間であれば、100%に近い最大効率が得られることが Evans[24, Fig. 0.8]、ここで  $a$  は  $1/4$ 円柱の半径である。したがって、直径  $2a = \nu L/\pi = 21.5\text{m}$  のシリンダーは  $L = 225$  m、円筒の長さが例えば 40m で、捕捉効率が例えば 80%の場合、 $41.5 \times 40 \times 0.8 = 1328\text{kW}$  の電力を捕捉することができる。効率が 80%とすると、 $41.5 \times 40 \times 0.8 = 1328\text{kW}$  の電力を取り込むことができる。

水深 500m から  $50\text{m}^3/\text{s}$  の水を汲み上げるのに必要な電力は密度差  $2\text{kg}/\text{m}^3$  に対して必要な電力は  $500\text{kW}$  です。したがって、このようなシリンダーは十分すぎるほど適切である。

## 10. 結論

人工湧昇は、海洋の食糧生産量を増加させる有望な方法である。他にも、サンゴの白化現象や台風の減少など、さまざまな効果が期待できます。(サイクロン)の減少などの効果が期待できる。海洋温度差発電 (OTEC) は非常に大規模で洗練された設備に適しているかもしれませんが、波力を利用した慣性ポンプははるかにシンプルです。コンセプトを実証す

るために使用することができます。これには次のような利点があります。新たな漁場の海が穏やかになるという利点もあります。慣性ポンプの設計上の改良点として、デリバリ・チューブに柔軟な布を使用することやポンプの駆動にはブリストル型シリンダー波力エネルギー変換器を使用することなどが提案されている。結論としては直径 21.5m、長さ 40m の円筒 1 本で、ハワイのうねりの中で効率的に機能し、水深 1.9m から 50m<sup>3</sup>/s を汲み上げるのに十分すぎるほどであると結論づけた。

## 付録 A. 慣性ポンプの性能を低下させる要因

### 1. 重力によるチューブ内の水柱上昇の抑制効果。

水柱は、フロートが波に乗って上昇するときの最大上昇速度 $=\pi H/T$  に等しい最大速度  $v_{\max}$  で上昇しますが、フロートが水没して上昇する効果は無視します。

しかし、波が去ってフロートが下がると、逆流防止弁は上向きの力を出さなくなり水柱の上昇速度  $v$  は、重力の影響によりは重力によって次のように抑制されます。

$$v = v_{\max} - g't, \quad (2)$$

ここで、 $g' = g\Delta\rho/\rho$ 、深層水の密度と表層水の密度  $\rho$  の差  $\Delta\rho$  による重力加速度の減少。

図 3 に示すように；

ただし、 $v_{\max} - g'T > 0$  の場合、上向きの最小速度は

$$v_{\min} = v_{\max} - g'T = \pi H/T - g'T \quad (3)$$

また、第一近似として、平均上昇速度は次のようになる。

$$v_{\text{mean}} \approx \pi H/T - g'T/2. \quad (4)$$

$H = 2\text{ m}$ ,  $T = 12\text{ s}$  and  $\Delta\rho = 2\text{ kg/m}^3$ ,  $v_{\text{mean}} \approx 0.524 - 0.115 = 0.408$ , a 22%

平均流速が 22%低下し、その結果、ポンプの吐出量が減少する。

この吐出量の減少は、波の周期が長いほど、また DOW と地表水の密度差が大きいほど大きくなる。したがって、Liu のモデルでは記事は、 $T=4$  秒、 $\Delta\rho$  はおそらく  $1\text{ kg/m}^3$  以下である。

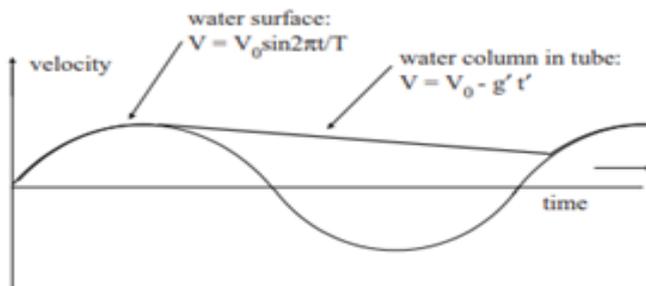


Fig. 3. Vertical velocity of water surface and water in tube.

$g' = 9.8 \times 1/1020 = 0.0096$ .  $V_{\max} = \pi H/T = 0.707\text{ m/s}$ , and  $V_{\text{mean}} = 0.707 - 0.0096 \times 4/2 = 0.688\text{ m/s}$ , only 3% less than  $V_{\max}$ .

となり、 $V_{\max}$ よりも 3%だけ低い値となりました。しかし、提案するプロトタイプでは、 $T = 12\text{ s}$ ,  $H = 1.9\text{ m}$  and  $\Delta\rho = 2\text{ kg/m}^3$ と仮定すると、 $n_{\text{mean}} = \frac{1}{4} \pi H T g_0$

$v_{\text{mean}} = \pi H/T - g'T/2 = 0.497 - 0.115 = 0.382\text{ m/s}$ となり、23%削減されます。

もし  $v_{\text{mean}} = 0.382\text{ m/s}$ , and  $Q = 50\text{ m}^3/\text{s}$ とすると、 $A = Q/V = 131\text{ m}^2$ なので、直径  $D = 12.9\text{ m}$ 。したがって、水の質量は  $131 \times 500 \times 1020\text{ kg} = 66,800,000\text{ kg}$ です。

1回のアップストロークで生じる速度変化 $=g'T = 0.23\text{ m/s}$ とすると、行われた仕事は、運動量の変化に等しい $mv = m\Delta v = 65.5 \times 10^6 \times 0.23 = 15\text{ MJ}$ です。これは12秒ごとに起こるので、平均電力 $= 15/12\text{ MW} = 1.225\text{ MW}$ となる。

つまり水の位置エネルギーを増加させるために必要な仕事は $Q\Delta\rho gh = 500\text{ kW}$ です。

この差は、水がポンプで持ち上げられていないときの重力加速度による水の運動量の減少によるものです。すなわち、振幅、周期、密度の差に対するこのポンプの最大効率は約  $0.5/1.225 = 40\%$ となります。

2. ストロークの減少は、必要な力に対してフロートの喫水線の面積を大きくすることによってのみ小さくすることができる。水柱を持ち上げるのに必要な力に比べてフロートの喫水面積を大きくすることによってのみ、この減少を小さくすることができる。例えば、付録Bでは例えば、付録Bに示すように、外径約30m、深さ約8mのフロートで、 $50\text{ m}^3$ の水柱を揚げるには水深500mから鋼管で持ち上げるためには、外径約30m、深さ8mのフロートが必要であることを示している。このように水の重さによる沈下量の増加は0.24mとなり、ストロークは12.6%減少します。

3. 波の波長に対してフロートの喫水線の面積が大きい場合、ストロークが切り捨てられる。波長の長い波では大きな問題にはなりません。

## 付録B. 慣性ポンプのスチール、コンクリート、布製チューブの重量とコスト

直径12.9m、深さ500m、水中密度 $2\text{ kg/m}^3$ の水柱を持ち上げるには、1.3MN、130トンの力が必要になります。

通常の構造用炭素鋼で作られた慣性ポンプの場合、プレートの厚さは少なくとも10mm必要です。腐食を考慮して板厚は10mm以上とし、2枚のスキンで補強する必要があります。局所的な座屈を防ぐのに十分な剛性を持たせるためには、ウェブが必要となる。

チューブの長さが500m、内径が12.9mの場合、これには約 $400\text{ m}^3$ 、3120トンの鋼鉄が必要になります。1本のチューブの沈下重量は約2700トン、フロートの容積は $2700\text{ m}^3$ に加えて、チューブを持ち上げる力を考慮して $130\text{ m}^3$ が必要となる。フロートの自重を考慮すると、最低でも $3000\text{ m}^3$ の容積が必要となる。

そのためには最大の波の振幅が発生する上部数メートルの水域に浮かぶ必要があります。必要な容積を持つ環状フロートは、水深6m、喫水線面積 $500\text{ m}^2$ 、チューブの内部空間直径12.9mの場合、外径は28mとなる。

製作された鉄材が1トンあたり3,000豪ドルまたは1,800米ドルだとすると、チューブだ

けで 4.68 米ドルかかる。管フロート、アンカー、係留ケーブルの供給コストと設置コストを加えると総設置コストは 1,000 万米ドルを下回らないと思われます。

1,000 万ドル以下になる可能性は低く、(楽観的に) 年間 3,000 ドルの営業利益を想定した場合、投資回収期間は 3~4 年となる。Matsuda ら[13]の 330 万ドルの年間収益に基づく 300 万ドルの年間営業利益を想定している。これらの数字はあくまでも検討用であり、より正確な構造のコスト計算と、任意のサイトにおける魚類資源の強化による潜在的な収益の評価が必要である。

大規模な実証実験を正当化するためには、より正確な構造のコスト計算と、任意のサイトでの強化された魚群からの潜在的な収益の評価が必要である。

従来の鉄筋コンクリート管は、鉄筋を腐食から守るために少なくとも 0.2m の壁の厚さが必要で、4000m<sup>3</sup>のコンクリートと 6000 トンの水中重量が必要となり、7000m<sup>3</sup>、直径約 40m。チューブ自体のコストはもっと安く、約 US\$50 万ですが、その分、巨大なフロートが必要になります。しかし、チューブの大きさと重さを考えると、この選択肢は魅力的ではありません。布製のチューブの場合、水中での重量はほとんどありません。

したがって、フロート 131m<sup>3</sup> をわずかに超える容積が必要となる。しかし、喫水線の面積はストロークの過度な減少を防ぐためには、500m<sup>2</sup> 程度の広い水域が必要です。水を持ち上げる 1.3MN の力は、上昇するうねりによって加えられ、頂上が通過すると解放されるので紋章が通過するときに解放されるからです。したがって、非常に大きな面積が必要となる。