

波浪ポンプ技術を用いたアップウェリング制御の外洋実験

ANGELICQUE WHITE

オレゴン州立大学、オレゴン州コーバリスの海洋大気科学部

KARINBJÖRKMANN と ERICGRABOWSKI

ハワイ大学マノア校、ホノルル、ハワイの海洋地球科学技術学部

RICARDO LETELIER

オレゴン州立大学オレゴン州コーバリスの海洋大気科学部

STEVE POULOS、BLAKE WATKINS、および DAVID KARL

ハワイ大学マノア校、ホノルル、ハワイの海洋地球科学技術学部

(原稿は 2008 年 11 月 25 日、最終形式は 2009 年 9 月 23 日に受領されました)

概要

1976 年、John D. Isaacs は、波のエネルギーを利用して海の密度構造を反転させ、太陽の光を浴びた表層に栄養豊富な深層水を送り込むことを提案した。基本的な原理は単純で、チューブ上部を表層のブイに取り付け、一方通行のバルブ下部を浸透帯の下に延ばして深層水の導管として機能させる。海の上下運動により、波の下降時には付属のバルブが開き、上昇時にはバルブが閉じることで、深層水を表層海へと上昇させることができる。アイザックの波力発電ポンプは、エネルギー生産から水産養殖、さらには人工的な湧昇を利用して一次生産力や炭素隔離を促進するという最近の提案に至るまで、さまざまな形で利用されてきたが、シンプルな工学的コンセプトは変わらない。2008 年 6 月、著者らは、ハワイのオアフ島北部で市販の波浪ポンプ (Atmocean) の試験を行い、海上での展開のロジスティックスと、外洋条件での機器の耐久性を評価した。この試験は、窒素 (N) に対して過剰なリン酸 (P) を含む水の上昇流が、「レッドフィールド」の定説である 16N : 1P のモル比に比べて、2 段階の植物プランクトンブルームを発生させるという、最近発表された仮説を評価するための実験の一環として行われた。このフィールド実験の最終結果は、深層水の表層海洋への迅速な送水 (300m のトランジットで 2 時間) と、海洋環境のダイナミックなストレスによるポンプ材料の壊滅的な破損であった。波による冷水の湧昇は 17 時間にわたって記録され、湧昇速度は $\sim 45\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ で、栄養塩を含む深層水の総流入量は 765m^3 と推定された。著者らは、300m 波浪ポンプの配備、生物地球化学的反応のサンプリング戦略、直面した工学的課題、植物プランクトンの成長を促進することを目的とした将来の実験に対するこれらの結果の影響について述べている。

1. 導入

波の垂直方向の変位を利用して、Isaacs ら(1976)が考案した極めて単純なポンプ設計により、深海の栄養豊富な水を海面に送り出すことができる。このコンセプトの現代版を図1に示す。これは、垂直方向に設置された自由に浮遊する水面ブイに取り付けられたパイプ。パイプの下端には、波の周期の逆位相で開閉するバルブが設置されている。ブイが波の表面を下るときにバルブが開き、パイプに水が巻き込まれる。続くアップスロープでは、巻き込んだ水が慣性力で上方に移動し、最終的に深層水が水面に移動する。これらのポンプが生成する上昇流の速度と総体積入力は、波の振幅と周波数、および個々のポンプの寸法と効率の関数である(Liu and Jin 1995; Vershinsky et al. 1987)。

波浪ポンプは、小規模な発電手段としてしか成功していないが (Isaacs et al.1976)、最近では、一次生産性の向上や魚の生産量の増加 (Kenyon 2007; Kirke 2003)、水産養殖への燃料供給 (Liu and Jin 1995)、海洋の炭素隔離の強化による気候変動の緩和 (Lovelock and Rapley 2007) など、さまざまな用途が提案されている。これらの提案はいずれも、植物プランクトンのブルームを発生させ、維持するのに十分な期間、外洋で稼働し続けるポンプを必要とする。必要とされる最短の稼働時間は、ポンプの効率、設置するポンプの数、対象地域の物理的・化学的特性によって異なる。植物プランクトンのブルームの動態に関する現在の理解からすると、この時間スケールは数週間から数ヶ月のオーダーになると思われる。さらに、これらの提案は、深層水への添加に対する上層海の生物学的反応が事前に決定可能であることを前提としている。このため、これらの提案の基礎となる原理を確認するためには、海洋生物の反応を注意深く測定した上で、人工的な上昇流の実現可能性について小規模なリスク評価を行う必要がある。これらの計画の基礎となる原理を確認するためには、波浪ポンプが一次生産性の向上を促し、維持するのに十分な時間機能することが必要である。そこで、乏しい栄養状態の外洋で植物プランクトンのブルームを誘発する可能性を評価するために、海洋生産性摂動実験 (OPPEX) を計画・実施した。

OPPEX 実験の仮説と目的

北太平洋亜熱帯ジャイア (Gyre) (NPSG) は、生物を脅かす栄養塩 (特に硝酸塩とリン酸塩) の濃度が低く、バイオマスが少なく、一般に新規生産量やエクスポート量が少ないことが特徴である。上部水柱は強く成層しており、混合層は、沈降する有機物を微生物が分解することで深部に蓄積する栄養塩の貯蔵庫から垂直に分離している (Karl and Letelier 2008)。ほとんどの場合、乏栄養性のジャイアでは、ニュートラックライン以下の水が明るい表層の海に導入されると、植物プランクトンのブルームが発生する (Dore et al.2008; McAndrew et al.2007; Wilson and Qiu 2008)。この生物学的反応は、一次生産性を高め、サーモクラインを超える深さまで有機炭素を輸送する手段として、波浪による上昇流を利用する根拠となっている。海洋の生産性と炭素貯留を操作できる可能性があることが、これらのポンプを地球工学のツールとして使用する動機となっている (Kirke 2003; Lovelock and Rapley 2007)。しかし、最近の外洋における摂動実験では、多くの意図しない生態学

的反応が示されている (Watson et al.2008)。さらに、炭素のエクスポートが実際に促進されたとしても、動的な流体環境でその大きさを検証することは困難である (Powell 2008; Zeebe and Archer 2005)。Karl と Letelier (2008) は、制御された人工湧昇に対する表層海洋の潜在的な反応を慎重に検討することを概説し、適切な試験場、水源水深、およびこれらのポンプによって発生した人工湧昇が生産性を測定可能に刺激するかどうかを検証するための実験の詳細を推奨している。このように、源水の化学的性質を考慮し、現存する植物プランクトン群集を把握することは、深層水への栄養塩の添加が、C 投入量(the C inputs)を上回る生産性を刺激するのに十分であることを保証するために重要である (Yool et al.2009)。そこで、2008 年の初夏に、NPSG の貧栄養水域で OPPEX を実施した。

OPPEX は、波浪による上昇流の実現性を工学的に検証するとともに、Karl and Letelier の仮説をフィールドで検証するために設計されました(2008)。この仮説は、人工的な湧昇により、レッドフィールド比 106:16N:1P に比べて過剰なリン (P) を含む深層から水を持続的に供給することで、無機炭素の投入量を上回る有機炭素のエクスポートを促すことができるというものである。fixation-supported bloom (Dore et al. 2008; Karl et al.1997; White et al. 2007; Wilson and Qiu 2008) を説明する可能性があると考えられた。これらのブルームは、22 度 45 分 N, 158 度 00 分 W の時系列観測点である ALOHA (A Long-term Oligotrophic Habitat Assessment) 付近で夏季に定期的に観測される。

これらのブルームは通常、コロニーを形成する N2 フィクサーの *Trichodesmium* や、ヘテロシストの N2 フィクサーである *Richelia* とそのダイオキシンの共生体で構成されている。フィクサーである *Richelia* とその宿主である珪藻類の共生体であることが多い (Dore et al. この仮説の基本原理は この仮説の基本原理は N:P, 16 の深層水の上昇流は、1)無機物である N と P の光合成による同化が急速に進み、約 16N : 1P の割合で急速に同化させ、N を枯渇させて未利用の P を残留させ、2) この残留した P は、水柱が十分に成層していれば、N2 ベース (すなわち、ジアゾ栄養) の成長を促す (図 2)。提案されている実験場では、NPSG では、上昇流の源水の地平線 (300m) では、理論的には両方のブルームステージが必要であると考えられる。この仮説をもとに、OPPEX では OPPEX の主な目的は 3 つあります。

- 1) 市販されている波浪ポンプの構造的な健全性を確認し、その性能を評価すること、2) ハワイ諸島北方海域での展開期間中、ポンプと湧き上がる水を追跡するのに適したモニタリングおよびサンプリング戦略を開発すること、

- 3) システムの生物学的反応を調査することです。後者の 2 つの目的を達成するために、自律型グライダー、衛星画像、船上サンプリングを組み合わせて使用した。

このプロジェクトは、イギリスのインポッシブル・ピクチャーズ社が、ディスカバリーチャンネルの「プロジェクト・アース」シリーズの 1 エピソード (「ハングリー・オーシャンズ」) として撮影したものです (オンラインでご覧いただけます :

<http://www.discovery.com>)。ハングリーオーシャンズ」や「プロジェクト・アース」な

どの番組は、世界 170 カ国、15 億人以上の視聴者に配信されています。

2. 方法

a. ポンプの組み立て

長さ 300m の波動ポンプ 3 台の部品は、それぞれ **Atmocean Inc.** ポンプは、**Atmocean Inc.**から入手した。各ポンプキットは、両端にアイボルトが付いた円筒形のアイオノマーフォーム製表面フロート（直径 1m、長さ 1.83m）、直径 0.75m、長さ 150m のポリエチレン製チューブ 2 本、長さ 150m の 3/8 インチのビニール被覆ケーブル、2 本をつなぐカプラー、ナイロン製ラチェットストラップ 5 本、チューブをフロートに固定するためのキールや底部のバルブなどの関連ハードウェアで構成されていた（図 1）。

バルブ、カプラー、キールは、**Atmocean** 社製のステンレススチール製。ビニールコーティングされたケーブルが、水面のフロートとチューブの根元のバルブをつなぐ。それぞれのポンプはハワイ大学で組み立てられました。ハワイ大学では、150m のチューブを 2 本、カプラーで接続してポンプを組み立てた。この 300m の長さをロール状に巻いたものが展開しやすいようにカプラーを中心に巻いた。

シングルポンプとデュアルポンプの両方が組み立てたが、デュアルポンプのアレイは 2 台のシングルポンプを直径 1.5 インチのポリプロピレン製ラインで 100m に渡って繋いだものです。このテザー(tether)は、各ブイの一端にブイの片方の端に取り付けられていました。注目すべきは、シングルポンプとデュアルポンプの一方に水面でカプラーが取り付けられていたが、2 台目のデュアルポンプはフロートリングに固定されていた。実験を成功させるために、ポンプにいくつかの改良が加えられました。光、無線、衛星ビーコンを各ポンプシステムに設置した 各ポンプシステムに光、無線、衛星ビーコンを設置し、カスタムメイドのカプセルを発泡スチロールの表面ブイに開けられた穴にしっかりと固定した。メーカーから提供されたキールを補強してブイの安定性を保つために そのために、より伝統的な半インチのチェーンでキールを作って、ブイの片方の目からもう片方の目まで、ブイ上部のビーコンラインの真下に鎖はブイの片方の目からもう片方の目まで、ブイの上のビーコンの下に張った。鎖はシャックルとターンバックルを使ってアイに固定されていた。ブイを強く締め付けて、角をへこませてブイの角をへこませ、回転しないようにするためです。最後にスイベルシャックルは、ポンプまでのケーブル内部の各接続点にスイベルシャックルを設置した。これは、海流やリカバリーライン、さらにはポンプの操作によって生じたこれは、海流や回収ライン、あるいはポンプの動作によって生じるねじれをポンプがケーブルの垂直軸を中心に回転することで、海流や回収ライン、ポンプの動作によるねじれを制御できるようにした。ポンプがケーブルの垂直軸を中心に回転することで、海流や回収ラインによるねじれ、さらにはポンプの動作を制御できるようにするためです。各ポンプには、上部のカプラーまたはフロートリング（15m）、中間部のカプラー（165m）、下部のバ

ルブ (315m) にそれぞれ 2 つの温度センサーが取り付けられている。(315 m)。最後に、NOBSKA 社の 3 軸モジュラー音響速度センサ (MAVS 3) を、上部カプラーのすぐ下にあるシングルポンプのケーブルに接続した。この計測器は、上向きの純流量を記録する手段としてセンサー群に加えた。

b. 展開

シングルポンプとデュアルポンプは、2008 年 5 月 31 日、北緯 22.2 度、西経 157.38 度の地点で、R/V Kilo Moana より展開されました。この場所を選んだのは、この地域の偏流 (0.25m s⁻¹) が比較的緩やかなため (Firing et al. 1999)、ポンプが船の時間的余裕のない場所を移動しないようにするためです。また、展開時の高度計データでは、持続的なサイクロン (反時計回り) の渦の存在は示されていませんでした。また、展開時の高度計データからは、上昇流の可能性の解釈を妨げるような持続的なサイクロン (反時計回り) の渦の存在は確認できませんでした (データ未提示)。最後に、この地域の波のエネルギーは、一般的に人工的な湧昇には十分に好ましいと考えられている (Liu and Jin 1995)。この地域の平均この地域の年間平均有義波高は 2.4m である。(National Data Buoy Center station 51001) である。各ポンプシステムの主な構成要素は次の 4 つである：表面ブイ、ケーブルを内蔵したチューブシステム中にケーブルが入っていて、中間点と上部にカプラーが付いているチューブシステム、下部のバルブ、そしてフロートの付いた回収ラインの 4 つです。海上では、展開前にすべてのコンポーネントが完全に接続されました。ブイの両端にはタイポイントとリリースリンクが取り付けられており、ポンプとの接続には 15m の延長ケーブルでポンプに取り付けられました。ボトムバルブをポンプチューブに固定しポンプのチューブに固定しました。その後、366m の回収ラインが船のウインチに巻き取り、ボトムバルブに取り付けました。システムが接続され、すべてのセンサーが設置された状態で、船の速度を 2kt に保って展開を行いました。ブイは最初に持ち上げられ、水中に放出されました。続いて、温度センサーと電流センサーを搭載したカプラーを慎重に下ろしました。チューブの上部とブイが船の後ろに流れたところでチューブの傷ついた塊を押して甲板から押し出す。各ポンプチューブは、真ん中のカプラーに上下のチューブが巻かれている。これは、船の前進と水中の素材の抵抗によって水中でチューブがほぐれるようにするためです。Fig.3)。ポンプのバルブ側と回収ラインは、チューブが完全に広がるまでデッキの端に固定されていた。チューブが完全に繰り出された後、バルブを水中に下ろし、回収ラインの末端にフロートを取り付け、システム全体を解放した。

デュアルポンプの 1 台目はバルブが先に展開され、ブイとテザーはチューブの巻き戻し後にリリースされた。デュアルポンプの 2 台目には回収ラインがありました。ブイが放出されてからリカバリーラインに到達するまでの経過時間はシングルポンプでは 16 分、デュアルポンプでは 35 分でした。(ポンプ展開の詳細および画像は、オンラインで <http://hahana.soest.hawaii.edu/oppex/>) に掲載されています。)

c. サンプルング戦略

展開から回収までの期間（2007年5月31日～6月14日）にポンプが周囲の環境に与える影響を監視するため、3機の自律型 Seaglider (IRobot社, マサチューセッツ州ベッドフォード) を打ち上げ、漂流するシングルポンプおよびデュアルポンプの周囲の水の環境特性をマッピングしました。300mのポンプの抗力により、この地域の一般的な表層流はポンプよりも速く移動し、湧き上がった水は上部のカプラーを超えて平衡水深まで流出し、その後下流に運ばれると想定した。このため、「シーグライダー」の任務は、ポンプの下流側の経路を調査することでした。垂直プロファイル 各グライダーが交互に下降と上昇を繰り返しながら 鋸歯状のパターンで水深 500m まで降下と上昇を交互に繰り返しながら、垂直プロファイルを取得しました。個々のダイビング（水面から 500m までの往復）では 水平距離 1.6km、飛行時間 3 時間程度であった。各シーグライダーには、以下の測定機能が搭載されている。粒子散乱、クロロフィル蛍光、溶存酸素、圧力、温度、塩分などの測定を行った。上昇流に応じてこれらの特性の多くが予想される兆候を Fig.2 に示す。溶存酸素のデータについて、ブルームの分析にはダウンキャストデータのみを使用した。アップキャストでは変動が大きかったため、ダウンキャストデータのみを解析に使用した。グライダーグライダーには、音響トランスポンダと GPS/イリジウムアンテナ/システム（位置情報と通信）が搭載された。地理位置情報と生化学データはハワイ大学の基地局に送信される。グライダーが海面にある間に 遠隔地から中分解能画像分光放射計 (MODIS) のクロロフィル a と海面温度 (1km 分解能) を遠隔地からリアルタイムで取得。海面温度 (1km 分解能)、海面高度偏差、波浪予報データなどを海面高度の偏差や波浪予報データなどをモニターした。この実験の期間中にポンプ周辺海域の生物化学を直接測定したのは、ポンプ投入前とポンプ回収前の 12 時間以内。ポンプ周辺海域の生物化学を直接測定しました。温度、塩分、溶存酸素、生体内クロロフィルのプロファイルは、Sea-Bird CTD (導電率-温度-水深)、蛍光光度計酸素センサーを搭載したロゼットパッケージを展開して 複数の水深から個別のサンプルを採取し抽出されたクロロフィル a を分析するために、複数の水深から個別にサンプルを採取しました。抽出されたクロロフィル a、溶存無機炭素、溶存酸素濃度、栄養素を分析しました。(すべてのプロトコルは <http://hahana.soest.hawaii.edu/hot/protocols>)。最後に、リカバリークルーズ中に曳航式ビデオプランクトンレコーダー (VPR : WHOI) を用いてポンプ周辺の上部水柱をマッピングし、ポンプに由来すると思われる低温、低酸素、高クロロフィルの特徴 (図 2b) を探しました。

3. 結果

a. 展開後のモニタリング段階

シップタイム、スケジュール、資金の制約により、展開期間中、船上でポンプを直接モニタリングすることはできませんでした。このため、グライダーとリモートセンシングデータを使用して海洋特性を追跡しました。展開してからポンプを回収するまでの2週間、グライダーとリモートセンシングデータを用いて海洋の特性を追跡しました。当初、グライダーはポンプの北西に向けて設置されました。ポンプが船舶の運航によって損傷を受けないようにするためです。ポンプの展開が成功した後、それぞれ3機のグライダーは、ポンプの上流と下流の経路を横切るように動かされました。そのためにはグライダーがポンプに移動するのに約4日かかりました。図4)。この最初の数日間で、3機のうち1機のグライダーにピッチコントロールの異常が発生し、プロファイリング機器として使用できなくなりました。そのためには地表に置かれ、その後は流れの軌跡と速度を推定するためのサーフェス・ドリフターとして使用しました。グライダーに搭載されたセンサーから得られたリアルタイムデータは、溶存酸素などの表面特性に大きな変化を示すものではなかった。溶存酸素量 Fig.(Fig.4c)、温度、クロロフィル、散乱などの表面特性に大きな変化は見られなかった(データ省略示されていない)、予想される変化の軌跡(図2)から、人工的な湧昇に起因すると思われるものはなかった。当時、私たちは、この無効な結果が次のような理由によるものかどうか確信できませんでした。当時は、無効な結果が、潜在的なブルームの適切な時期にサンプリングしていなかったのか、あるいはポンプがポンプの近くでサンプリングしていなかったのか、あるいはポンプが作動していなかったのかは、当時は定かではありませんでした。地表のクロロフィルのリモートセンシング(オンラインで

<http://picasso.oce.orst.edu/ORSOO/hawaii/pump/>)でも、局所的なブルームに由来するアップウェリングに由来すると思われる持続的な特徴は見られませんでした。

b. ポンプの回収

キロモアナ号の第2回クルーズは、2008年6月12日にポンプを再訪するために乗船しました。6月13日にはダイバーが入水し、各ポンプの上部カプラーに設置された温度それぞれのポンプ(シングルおよびデュアル)の温度センサーを回収しました。これらの水中作業中、ダイバーは、シングルとデュアルの両ポンプのチューブ材の上部が大きく破れているのを確認しました。この時点では、ポンプがどの程度損傷したかは不明でした。深層水がまだミッドカプラー(165m)に送られているかどうかを評価するために、あるいは深層水が送られていることを示す生化学的な信号が明らかになっているかどうかを評価するために図2)、シングルポンプとデュアルポンプの周辺で3-4回のCTDキャストを行いました。船長が安全と判断したポンプの近くでキャストを行った。船長が安全と判断した範囲内で実施した(;1海里)。シングルポンプとデュアルポンプの周辺領域では、温度、塩分、溶存酸素、クロロフィルaのプロファイルが比較的变化しないだけでなく(Fig.展開前の状態から大き

な変化はありませんでした。VPR は、単一のポンプの下流 (20km) にある上部混合層 (20~60m) のクロロフィルフィールドをマッピングするために設置されました。その結果、クロロフィルの分布が等温面に沿ったクロロフィル分布を示している。このトランセクトでは、表面のブルームは観測されなかった (データは示されていない)。すべての CTD 調査と VPR の展開が完了した後、シングルポンプの全長を回収し、残りのセンサー (サーミスタ、MAV3 電流計) をすべて回収した。この回収作業では、材料の壊滅的な破損が見られ、明らかになりました。シャックルをブイに固定していたストラップのいくつかは、明らかに**摩擦力で切断**されていました。

Atmocean が設計した金属製のキールは部分的に分離していた。チューブ素材は広範囲に渡って引き裂かれ、擦り切れ、中間点のカプラー上部から完全に分離していた。ミッドポイントカプラー自体は、カプラーの内部サポートロッドがシリンダー壁から剥がれていたため、ミッドポイントカプラー自体がセントラルケーブルから外れていた。

ボトム部に接続されていたチューブ材とともに、中途半端なカプラーの壁がバルブの深さまで落ちていました。

この引き裂かれたチューブとねじれた金属の塊を回収するのに要した時間では、結局、同様に損傷したデュアル・ポンプ・アレイをすぐに回収することはできませんでした。この作業は、このエリアで予定されている後のクルーズに変更されました。しかし、デュアルポンプの上部カプラーに取り付けられていたセンサーは、ダイビングチームによって回収されました。

c. 温度記録

シングルポンプから得られた温度記録を調べたところ、最終的に材料が故障したにもかかわらず、ポンプは 315m の高さからトップカプラーに冷水を 17 時間ほど送水は成功であった (図 6)。サーミスタのデータと CTD 温度プロファイルを用いて、このポンプのイベントのタイムラインを再構築することができた。CTD の温度データを水深のプロキシとして用いると (11 度 C = 315m, 18.7 度 C = 165m, 25.3 度 C = 15m) を用いて、バルブが 30 分以内に 315m まで沈んだことを確認しました。ポンプが目標に到達してから 1 時間以内にミッドカプラーに取り付けられたサーミスタ (thermistors) の温度はさらに 2 時間後には、トップカプラーの温度が 165m の水に比べて 2 度°C 低くなりました。さらに 2 時間後には、トップカプラーの温度が周囲の水に比べて 1 度°C 以上も低下した (Fig. 図 6)。315m 地点の水源の温度 (11 度°C。図 6) であることを考えると、湧昇の過程で、ポンプの壁を介して大きな伝導性の熱交換が行われたことが明らかになった。この損失の大きさ (13 度°C) は、ポリエチレンの熱伝導率 (k) を $0.33 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (厚さ = 0.0032m、Leinhard and Leinhard 2000) と仮定した計算と一致している。具体的には、CTD プロファイルの温度記録を用いて、Fournier の法則と比熱の式から水深 1m ごとの温度変化 (DT)

を繰り返し計算すると、300mのトランジットで11.4度°Cの温暖化が予測される。 $[DT = Qtmc^{-1}$ ここで、 $Q = (\text{ポンプ面積 } 3 \times k \times \text{材料厚さ}^{-1}) \times (T_{\text{outside}} - T_{\text{inside}})$; 比熱 $(c) = 3850 \text{ J (kg 度 C)}^{-1}$ とし、水の質量 (m) は、1m 間隔で時間をかけて計算する。水の質量 (m) は、測定された通過時間 0.028 m s^{-1} に相当する時間ステップ (t) で、1m 間隔で計算される。これは、15m 地点の温度が 24.5 度°Cであることに対応しており、実際の 15m 地点の温度記録 (~24 度°C) とほぼ同じである。この効果、すなわち温度の拡散 (塩分は含まない) は、Stommel ら (1956) によって「永遠の塩の泉」として数学的に説明されている。この最初の 17 時間の人工湧昇の後トップカプラーの温度は 15m での典型的な値に戻ったことから、チューブの中間点カプラーより上の部分で材料が破損したことが示された。中間点のカプラーより上の管の部分で材料が破損したことを示している。165m カプラーへの冷水供給は 53 時間続いたが、その後、この深度でのセンサー記録は分岐し、一方の温度センサーはカプラーの自由落下をバルブの深さまで記録し、もう一方のセンサーは上昇流の停止を記録していた (図 6)。これらの記録は、各センサーの取り付け位置と一致している。

デュアルポンプの上部カプラーのサーミスタのみが回収されました。これらのデータは、短時間の冷水パルスがフロートリング付きのポンプの表面に到達したことを示しており、一方、カプラーに取り付けられたポンプは機能しなかった (データは示されていない)。冷水パルスには周期性がなく、2 時間以上続くこともありませんでした。これらのポンプが完全に故障した原因と時期については、この配列のすべてのセンサーがないため推測するしかありません。航海中に船の空き時間を利用してデュアルポンプの回収を試みましたが残っていたのはブイ、電子機器、キール、チェーン、ストラップの一部だけでした。

d. 上昇流速の推定

単一ポンプの体積 (136 m³) とポンプ 1 台の容積 (136m³) と、冷水がカプラー上部に到達するまでの時間 (3 時間, 図 6) を用いて、展開の運用段階における人工湧昇率は約 45m³ h⁻¹。上記の仮定とは関係なく、MAV3 の電流計はポンプの中心で記録された垂直方向の速度を測定することができる。このメーターは 2 週間の展開中に大きな損傷を受けましたがデータの保存は可能でした。MAV3 は、シングルポンプの上部カプラーのすぐ下に設置されました。このメーターの向きは、上向き (下向き) の流れを正 (負) として記録するようになっていました。正 (負) として記録されました。このメーターは 21.5 分間隔で 8.5 分ずつサンプリングするようにプログラムした。波周期 (;6 秒, 最寄りのナショナル・データ・ブイ・センター 51001 からの 1.5 m = 波高) つまりこのセンサーを通過する水は、最終的にチューブの壁に拘束されることから、水平方向の流れ (センサーヘッドと同じ平面を横切る) や、角度のずれは無視することができる。各サンプリングバーストにおいて、垂直方向

の流速は、負から正の値の範囲で正規分布していた。各バースト期間のデータは、標準偏差 3 以上の異常な記録を取り除くためにフィルタリングされた (3 パス)。その後、各サンプリングバーストの平均垂直速度を算出した。

この期間においてトップカプラーに冷水が記録されていた期間(展開後6~23時間)は、平均鉛直速度は 2 cm s^{-1} (1728 m day^{-1} 図 7) であった。この鉛直速度は、太平洋流域の自然な上昇鉛直速度の推定値 0.012 m day^{-1} (Munk 1966) よりも桁違いに大きい。カプラーの面積 (0.45 m^2) と正味の上向き速度 2 cm s^{-1} を用いてを用いると、MAV3 のデータは、約 $32\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ の体積上昇率を示している。しかし、この流量から導かれるレイノルズ数が 100 であることを考えると、流れの状態は層流であった可能性がある。この場合、管内の速度分布は放物線状となり、MAV3 がチューブの中心で計測した速度は断面全体の平均速度の 2 倍となる。したがって、観測された湧昇速度の下限値は $16\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ となる。これらの独立した指標 (温度と純上昇速度) から得られる上昇率の範囲は、 $16\sim 45\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ となる。

e. 推定栄養塩供給量

今回の実験では、深層水の湧昇は最大で $45\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ の速度で 17 時間持続した。混合層で観測された値と比較して、これらの原水の栄養塩濃度が既知であることから Karl and Letelier (2008)による), $76\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ の溶存無機炭素 (DIC), $9.93\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ の硝酸塩 (NO_3)、 $0.695\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ のリン酸塩 (PO_4) と推定最大湧出水量 (17 時間 $345\text{ m}^3\text{ h}^{-1} = 765\text{ m}^3$) から、この試験で発生した可能性のある栄養塩濃縮量を推定することができる。適度な濃縮領域を 100 m^2 とし、表層混合層の深さを考慮すると表層混合層の深さ (45 m) を考慮すると生物学的ドローダウンを行わなかった場合の NO_3 と PO_4 の濃縮量は、それぞれ 17 と 1 nmol L^{-1} であったと考えられる。これらの予測される NO_3 の値は、この地域で観測された夏季の地表平均値 (3 nmol L^{-1}) よりも大きく予測される。 PO_4 の予測値は検出限界 (1 nmol L^{-1}) である。もし我々が湧き上がる可能性のある DIC の全量 ($0.13\text{ }\mu\text{M}$) を植物プランクトンのバイオマス量に変換するには、平均 C:クロロフィル比 50 g:g (MacIntyre et al. 2002) を用いて植物プランクトンバイオマスに換算するとそのオーダーで chl の増加を期待することになる。 $0.0002\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$ の増加が予想されるが、この値は、この地域の蛍光クロロフィル分析の標準誤差の範囲内である (ALOHA 観測所における地表面クロロフィルの典型的な標準偏差 ALOHA = 0.008 mg L^{-1})。栄養素の平均濃度と分析精度は、ハワイ海の時系列データから得られたものです。

4. 結論

今回のフィールド実験では、2 つの主要な成果が得られた。

- 1) 外洋での使用には、既存の波動ポンプ技術を大幅に改良する必要がある。
- 2) 生化学的に進化している水塊を追跡することに固有の困難さ。

生化学的に進化している水の塊を追跡することには大きな困難が伴う。生化学的に進化している水の塊を追跡することに特有の困難さは大きく、過小評価することはできません。侮ることはできません。これらの問題に加えて、生物学的反応の規模と期間は季節や地域、その他の無数の要因によって確実に異なる。その意味で 私たちは、人工的な湧昇流を利用して海洋生態系を意図的に海洋生態系に影響を与えようとする戦略は時期尚早であり、特定の生息地における潜在的な結果のシナリオの符号と大きさが検証されるまでは避けるべきであると考えている (Buesseler et al. 2008)

OPPEX の最も顕著で修復可能な結果は材料の失敗であった。どのように見ても、チューブの材料、溶接部、キール管材は、外洋での展開で発生する力に耐えるには構造的に不十分でした。展開前に市販品を強化する努力をしたが、3 台のポンプのうち 2 台では、短時間 (17 時間) の深層水の供給を記録することしかできませんでした。その後、材料の不具合が連鎖的に発生し 2 台のポンプの損失に至りました。今後の波浪ポンプの耐久性を向上させる必要があります、より耐久性のあるチューブ素材が必要で、今後の実験を行う前に、キールのデザインを再設計する必要があります。これらのポンプで生成された点源鉛直流速は (1728 m day^{-1}) 自然の湧昇速度 (0.012 m day^{-1})。波浪ポンプの組み合わせによって上昇した水の沈降深度や水平分布を把握することはできませんでした。この情報の確率を決定する上で重要な情報となる。この情報は、生物学的反応の可能性を判断するために不可欠なものです。十分な深層水の濃縮物を朱色のゾーンに取り込まなければならない。ブルームの発生に十分な光を確保するためには、十分な深層水の濃縮物を朱鷺洲に巻き込む必要がある (Fennel 2008; Letelier et al. 2008)。) 入手可能なすべての計算 (I. Ginis 2008, personal communication) は、これが事実であることを示唆している。それにもかかわらず、深層水の沈降深度と水平方向の浸透性については、今後のフィールド実験で検証する必要がある。

グライダー、曳航式 VPR、リモートセンシングによるデータでは、この地域の自然変動と明確に区別できる特徴は検出されなかった (例えば、図 4c, 5)。このような不確実性は、オペレーションの規模 (1~2 台のポンプが数日にわたって稼働) を考えれば、まったく予想できないことではありませんが、不均質で流動的な環境で生物学的反応を特定しようとする際に直面する困難さを浮き彫りにしている。

さらに、数理モデル (Liu and Jin 1995; Vershinsky et al 1987) で予測されているほど効率的に波浪ポンプが機能するかどうかは明らかではありません。湧昇に成功した期間の測定された上昇流の速度 ($0.013 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) は、Liu and Jin (1995) が予測した値 ($0.45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) よりも一桁小さい。同じような寸法 ($d = 1.2 \text{ m}$, $\text{length} = 300 \text{ m}$) で、同じような波高 (1.9 m) を経験したウェーブポンプの場合である。さらに、今回の展開における平均波高は 1.5 m 、主要な波の周期が 6 秒 であることから、垂直方向

の速度が 25cm s^{-1} であれば、地域の波動エネルギーを完全に効率よく利用していることになる。観測された上昇流の速度 ($2\text{-}3\text{ cm s}^{-1}$)は、ポンプの効率は 10% 程度であった。この矛盾が展開時の波高が不規則であったこと、材料が急速に破損したこと、あるいはその他の不確定な要因によるものであるかは別として展開時の波高が不規則であったためかどうかは別にして、物理的環境の変動（波高と頻度、嵐など）が果たす役割は大きい。物理的環境の変化（波の高さや頻度、嵐など）がポンプの性能や生存性に影響を与えることを、長期試験の前に慎重に検討する必要がある。波浪ポンプを設置する際の物理的・機械的要因が不確かであることを考慮すると、生体内生物反応を研究するための別のアプローチが必要です。

海洋温度差発電（OTEC：Avery）などの実績のある技術を利用することで、深海施肥に対する表層海洋の生体内生物反応を研究することができる。Energy Conversion (OTEC; Avery and Wu 1994)などの実績のある技術を利用することができる。この方法では、湧昇量を厳密に制御することができるだけでなく、海洋温度差発電技術につき込まれたより広範な研究開発を活用することができる。

OTEC 技術(Avery and Wu 1994; Takahashi and Trenka 1996)は、波浪ポンプの設計と効率の最大化に向けた比較的初期の取り組みと比較して、より直接的なアプローチです。エネルギー効率が悪いとはいえ、より直接的なアプローチとしては、エネルギーで動くポンプを使って、次のような一過性のトレーサーを播いた水域を肥やすことが考えられる。五フッ化トリフルオロメチル硫黄などの一過性のトレーサーを播いた水にエネルギーポンプを使って肥料を与えるというものです。後者も技術的な課題はあるが、

水源の深さを容易に変化させることができ、攪乱された水塊をより容易に特定して、長期的に監視することができる。

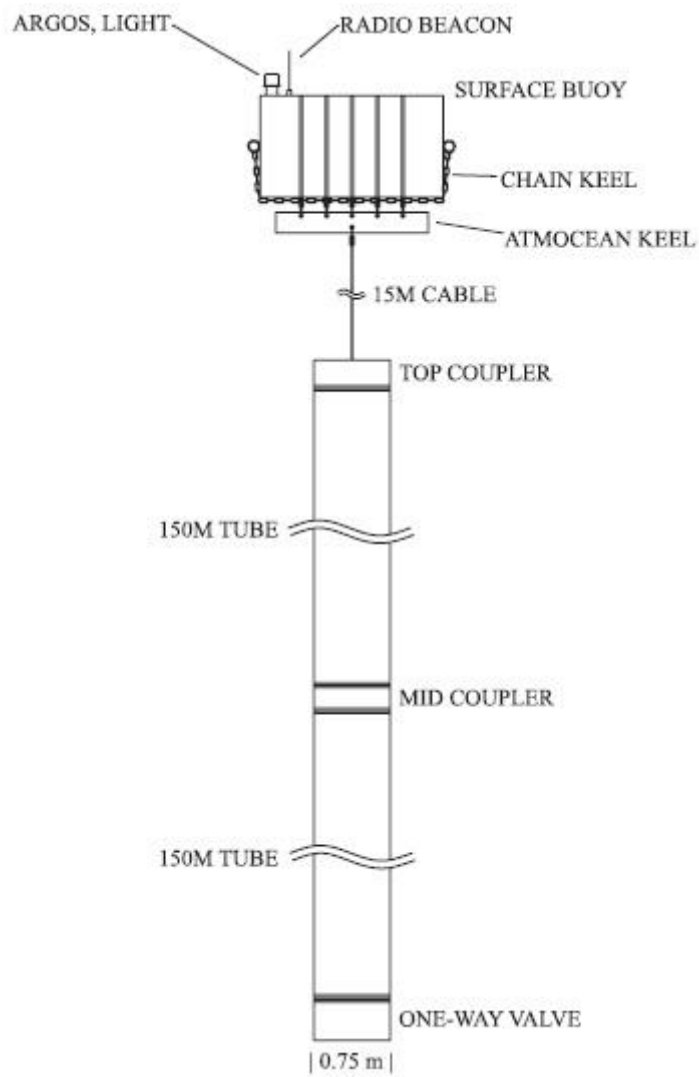
OPPEX は、技術的な挑戦というよりも、不均質で乱れた海洋で擾乱を識別し追跡する能力を試すものでした。重要な課題は OPPEX では、ポンプの経路を予測し、ポンプの下流にある潜在的なプルームに向けてグライダーをうまく操縦することが重要な課題となりました。この課題は、ポンプとグライダーから送信されるジオロケーションデータの中継に時間的なずれがあったことと、Argos データに関連する空間的な不確実性 ($61/4\text{ n mi}$) により、さらに高まりました。シーグライダーの最新の位置が判明してからポンプの位置が伝達されるまでに、最悪でも 11 時間のギャップがありました。このため、ポンプの予想される経路を追跡するためにグライダーを効率的に利用しようとしても、なかなかうまくいきませんでした。今後、このような実験を行うことで、より複雑で適応性のある遠隔操作・自律型プラットフォームのネットワークを構築し、シノプシス領域をカバーできるようになることが理想的です (Dickey et al.2008)。この点については、グライダーの群れがサンプリングされた生化学的特徴を認識・識別することができる「スマート」グライダー技術の開発

に大きな力を注いでいる (Abbott and Sears 2006; Dickey et al. 2008)。さらに、環境や地理的なフィードバック制御則をプログラミングすることで、グライダーが生化学的特徴を見つけて追跡しながら、協調した車両軌道やサンプリングパターンを維持できるようにすることが提案されている (Bhatta et al. 2005)。この取り組みは、海洋学者、エンジニア、プログラマーが協力して、海洋力学の知識を大きく変えるきっかけとなった代表的な例です。以上のように、今回の実験では測定可能な生物学的反応を得ることができませんでした。この技術の基本的な原理は健全であることが示されました。波浪ポンプは、深海の栄養豊富な水を表層の海に運ぶことができる。今回の貴重な経験から、この技術が海洋の炭素隔離を促進する能力があるかどうかを評価するための次の重要な試験に向けて、いくつかの推奨事項を策定することができました。主な改善点としては、ポンプを配備してから炭素貯留量を測定できるようになるまでの間、ポンプを監視するために必要なコストと方法を何よりも考慮する必要があります。今回の実験では、ポンプに搭載された Argos 追跡システムの時間的オフセットや、グライダーの方向を変えて、乱される可能性のある水塊の予想される位置を捕捉することの難しさという課題に直面しました。この問題は、ほぼリアルタイムの通信機能を備えた市販製品 (Iridium、Global Star、Orbcomm など) に投資することで部分的には解決できるかもしれない。しかし、この方法では、波による上昇流の物理的な動きが本質的に予測不可能であることを解決することはできません。湧き上がった水の水平方向の軌跡と沈降深度を追跡する必要があります。次のラウンドの鉄分施肥試験で提案されているように鉄分補給実験で提案されているように、第二世代のウェーブポンプ実験では、今回実施できなかったよりも、より包括的なモニタリングスキームを採用することを勧める。これには、グライダー、遠隔操作車両、表面および地下の漂流物の配備、そしてより長期にわたる船の存在が必要である。また、ポンプの大きさや間隔についても再考する必要があるかもしれません。技術的に可能であれば、より大きな直径のポンプ、または複数のポンプを組み合わせた構成にすることで、上昇する水と栄養分の総量が増え、より大きなブルームが発生する可能性がある。攪乱されたパッチの規模が大きくなればなるほど、ブルームの検出確率が高くなるため、この点が重要となる。鉄の施肥実験では、目標とするパッチサイズは数百平方キロメートルのオーダーである (Watson et al. 2008)。このような目標を達成するためには、ポンプの構成を大幅に変更する必要がある。これらの提言に従えば、コストが大幅に増加し、人員、追跡・監視技術、および必要な物流調整の規模に応じた追加投資が必要になる。私たちの実験は、遠洋生態系の遷移反応に関する最近の仮説を小規模に検証することを目的としている。今回の実験は、遠洋生態系の変化に対する最近の仮説を小規模に検証することを目的としている。今回の実験では、自然環境を操作しようとする、どうしても不確実性がつきまとうため、サンプリングやエンジニアリングの課題に直面しました。

生態系の最終的な反応は、場所、季節、水源の組成、湧昇の速度と段階によって異なることが予想される。さらに、湧昇前の微生物群集の初期状態、湧昇によって供給される多量栄養素と微量栄養素の組成と濃度、一般的な物理的体制が相互に影響し合い、このような実験の結果を決定する。これらのポンプは、海洋環境の理解を検証するツールとして利用できると考えている。しかし、外洋性生息地には固有の複雑さがある。人工湧昇に対する生態系の反応の多様性を無視することはできません。変化する気候の中では、よく考えられた現場実験を開発して自然を研究することがこれまで以上に重要になっている。この大胆なフィールド実験の結果は、私たちが直面している困難を思い起こさせてくれる。

アメリカ国立科学財団 (C-MORE; Award EF-0424599) と Gordon and Betty Moore Foundation に感謝します。ゴードン・アンド・ベティ・ムーア財団からの寛大な資金提供に感謝します。さらに、ディスカバリーチャンネルとインポッシブル・ピクチャーズにも感謝しています。この実験のためにポンプを数台提供してくれた Discovery Channel と Impossible Pictures に感謝します。また、私たちの努力を記録し、科学を一般の人々と共有してくれた Discovery Channel と Impossible Pictures にも感謝しています。この研究は、以下の方々のサポートと専門知識なしには実施できませんでした。今回の研究は R/V Kilo Moana の船長と乗組員、そして UH Diving の安全担当者のサポートと専門知識がなければ、この研究は実施できませんでした。私たちはまた、VPR に多大な貢献をしてくださった Cabell Davis 氏と Josh Eaton 氏、そして Phil Kithil 氏と Brian von Herzen に感謝します。Yvette Spitz 氏と 2 人の匿名の査読者 Yvette Spitz 氏と 2 名の匿名の査読者から、本稿をより良くするための貴重なコメントをいただきました。

関連画像、グラフ、表



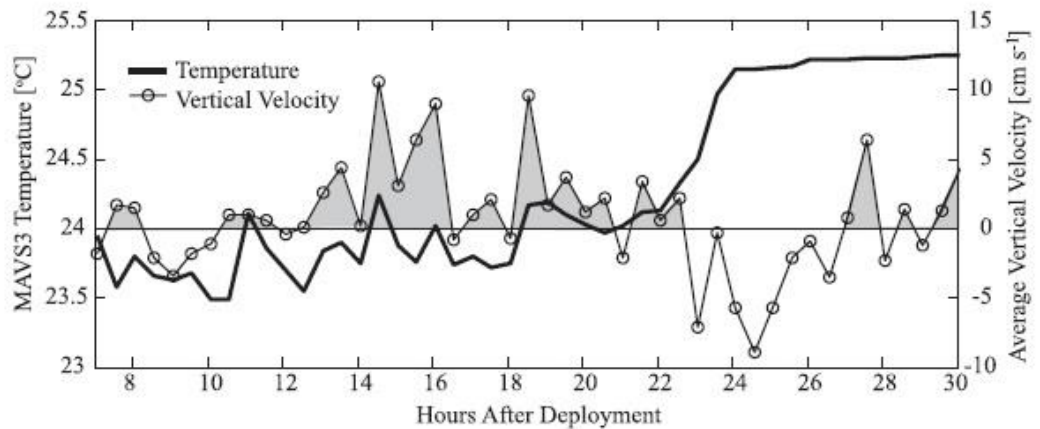


FIG. 7. Time series of vertical velocity recorded by the MAV3 sensor in the top coupler of the single pump relative to this sensor's temperature record. Shaded regions represent phases of net upwelling (positive vertical velocity). The mean flow for the period prior to cessation of cold water delivery was $+2 \text{ cm s}^{-1}$.

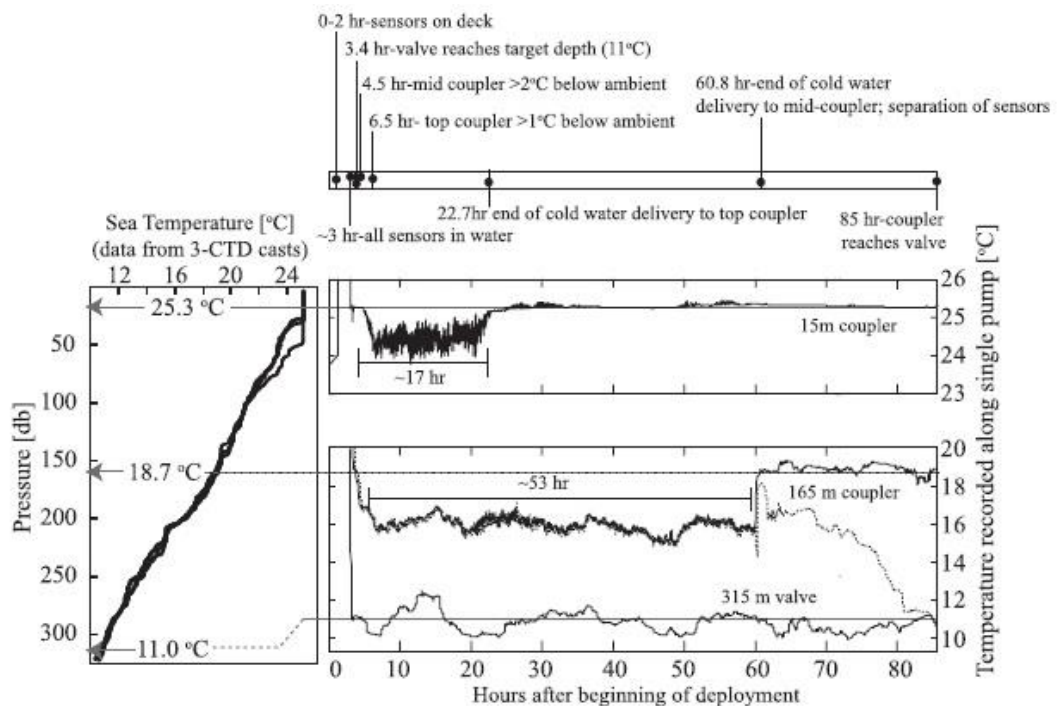


FIG. 6. (left) Profile of water column temperature from three concurrent casts using a rosette-mounted SeaBird CTD collected just prior to the deployment of the single pump. (top right) Timeline of events for the single pump. Values denote the hour that each event was recorded. (middle right) Time series of temperature recorded the top coupler, 15 m; (bottom right) the midcoupler, 165 m; and the bottom valve, 315 m.

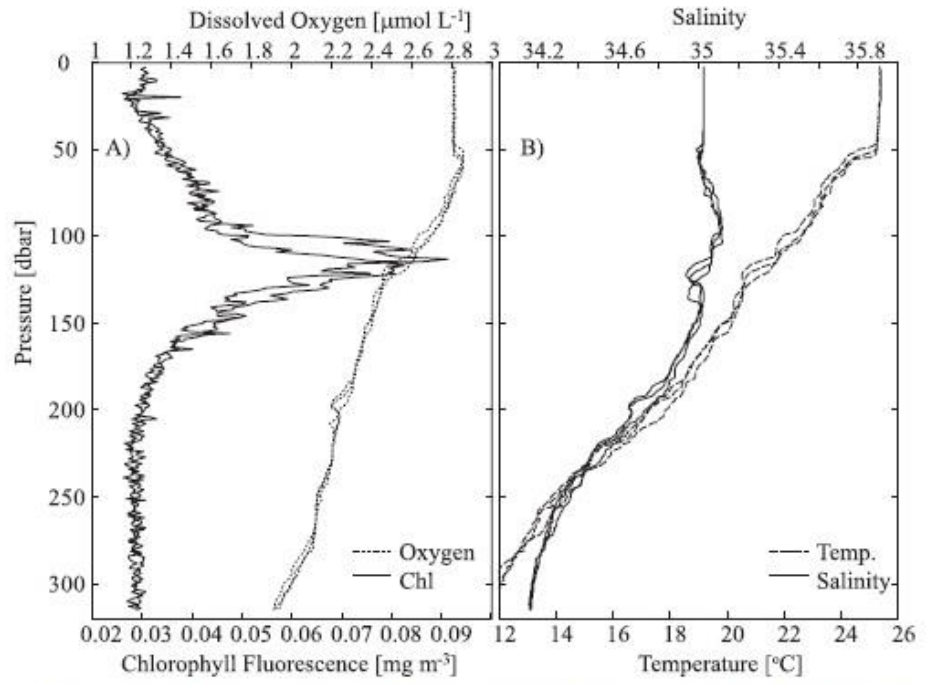
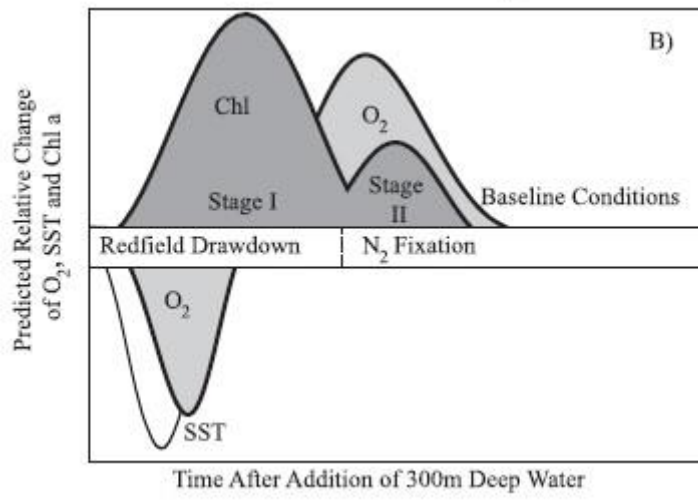
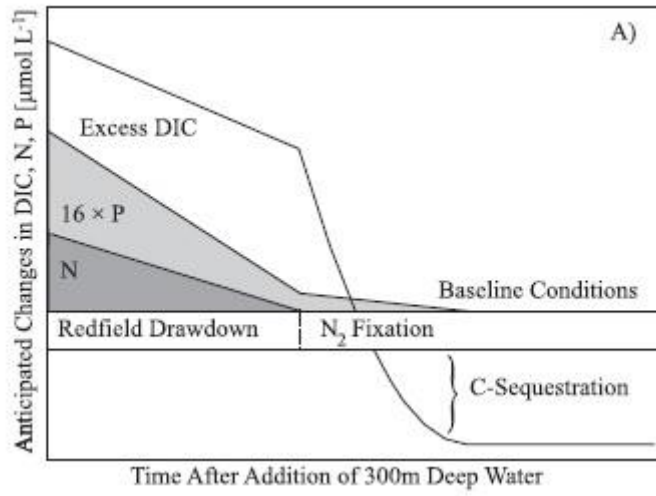
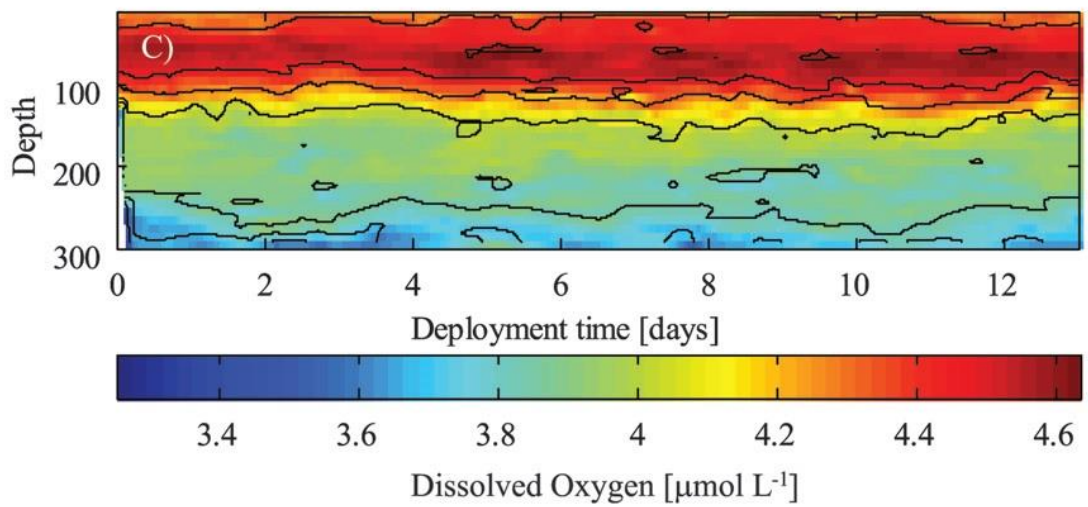
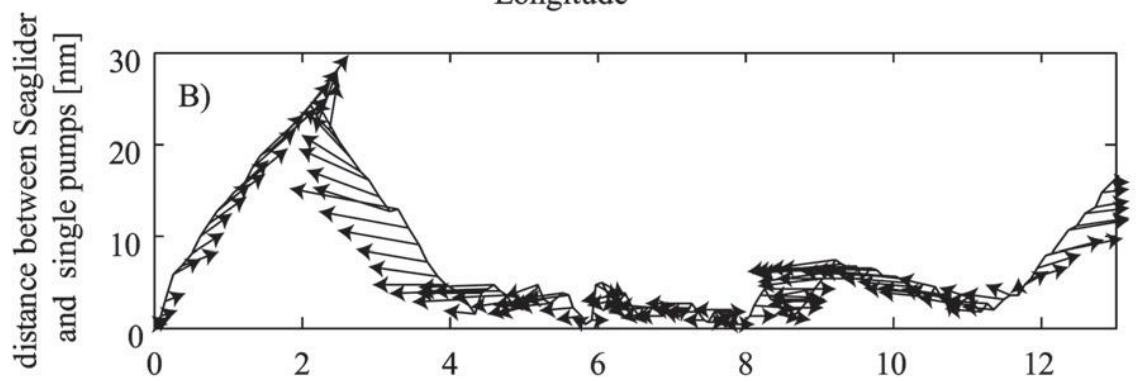
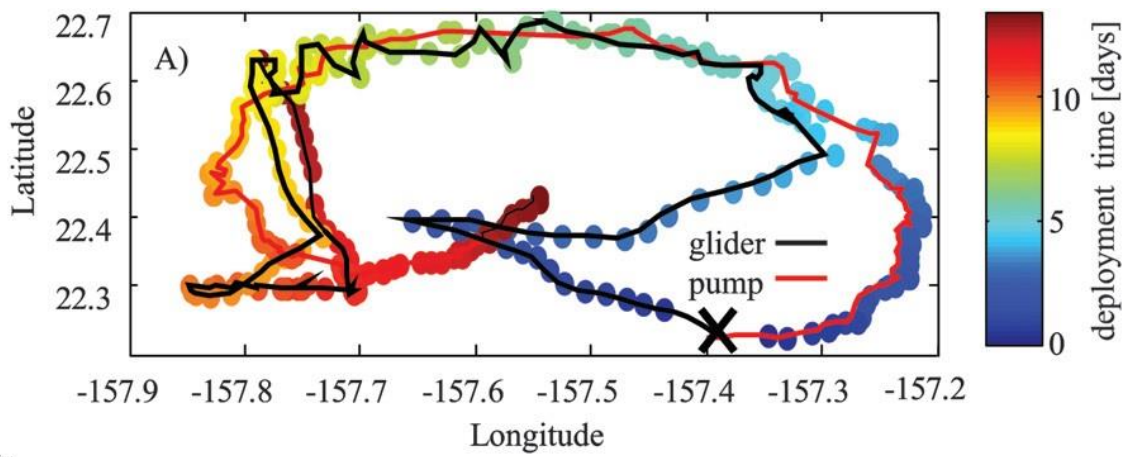
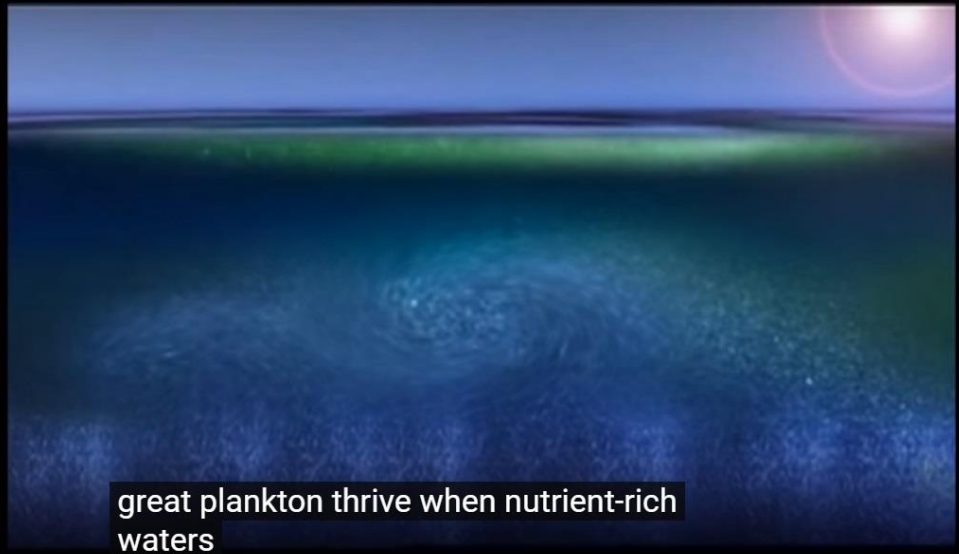


FIG. 5. (a) Dissolved oxygen, chlorophyll fluorescence and (b) temperature and salinity derived from multiple CTD casts around the single pump just prior to recovery.

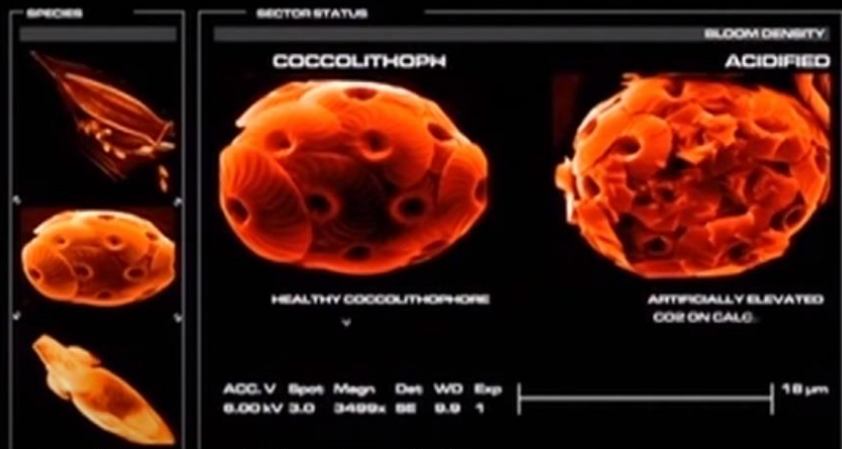




CO2 Ocean Recycling Using Wave-Driven Ocean Pumps

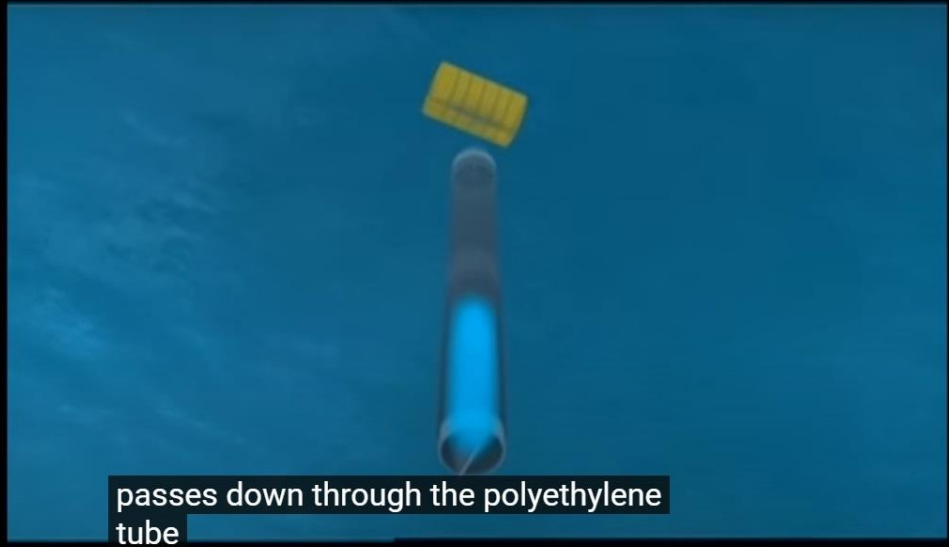


CO2 Ocean Recycling Using Wave-Driven Ocean Pumps



carbon dioxide for three billion years
they are recycling that carbon dioxide

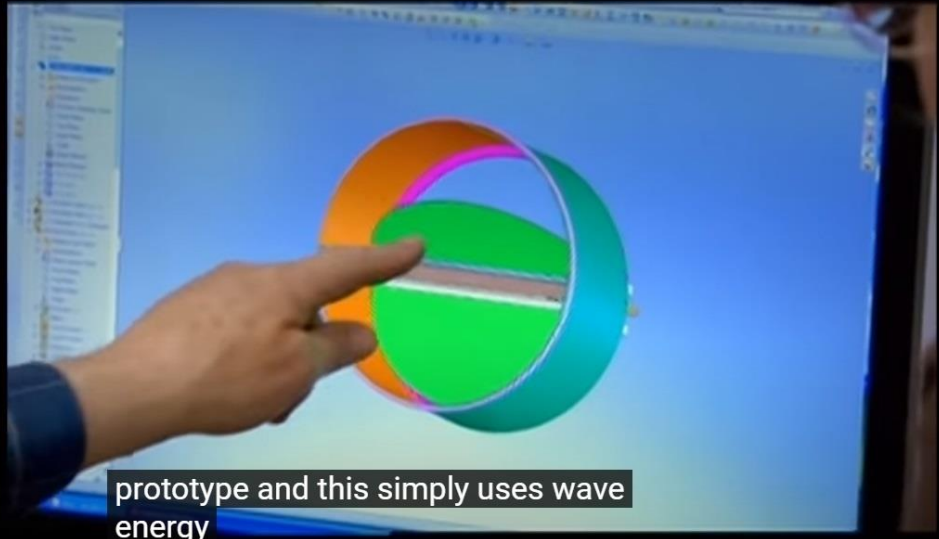
CO2 Ocean Recycling Using Wave-Driven Ocean Pumps



CO2 Ocean Recycling Using Wave-Driven Ocean Pumps



CO2 Ocean Recycling Using Wave-Driven Ocean Pumps



prototype and this simply uses wave energy