

## I 調査課題名

# 人工湧昇流による磯焼け改善手法確立調査

## II 実施機関及び担当者名

(社) 社団法人 水産土木建設技術センター 調査研究部  
上席研究員 安藤 亘  
(独) 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 生物環境グループ  
グループ長 桑原久実  
(株) アルファ水工コンサルタンツ 技術部  
部長 綿貫 啓

## III 実施年度

平成 20 年度～24 年度

## IV 緒言（まえがき）

磯焼けの要因には、食害のほか、水温上昇や貧栄養などが関係しているとされている。一方、湧昇流を人工的に発生させる技術が確立し、深層水など栄養塩豊富で低温な海水を、温度躍層を越えて上昇させることが可能となっている。そこで、本調査は、両者の研究成果の分析やシミュレーションの実施等により、人工湧昇流を活用した磯焼け改善の可能性について検討することを目的とする。

本年度は最終年度であり、昨年度までの調査結果である衛星画像の解析による海面水温(SST; Sea surface temperature)が恒常的に低い領域(以下、低 SST 域)<sup>1)2)</sup>と藻場の分布域の関係から、どのような機構により低 SST 域が発生し磯焼けが起こっていないのか解明<sup>3)4)</sup>することが重要と考え、数値解析を用いて低 SST 域発生の物理的解釈(現況再現)を検討した上で、天然で湧昇が起こる場所の地形を参考に模倣した人工構造物の設置位置、規模及び形状を計算条件に加え、藻場が形成する浅海域まで、効率良く湧昇させる構造物に必要な構造緒元、さらには、事業化に向けた検討を行った。

## V 方法

### ● 湧昇流構造物の規模や配置に関する技術開発

平成 22 年度までの結果を受けて、大分県米水津海域をモデル海域とし、鞍状地形の構造緒元(寸法)と湧昇効果(強制的な上下混合)の関係を水理実験や数値解析して検証した。

### ● 現地の環境データを用いた構造物の基本設計や効果範囲に関する技術開発

上記の結果を踏まえ、効率良く湧昇させる構造物に必要な構造緒元をあきらかにするため、大分県の佐賀関と佐田岬から佐伯市に近い鶴御崎周辺の海域をモデルに検討した。

### ● 人工湧昇流による磯焼け改善手法の確立

4 か年の調査結果をもとに、人工湧昇流を活用した磯焼けの改善手法を確立し、人工湧昇流による磯焼け対策を検討する際の基本的な考え方を取りまとめた。

## VI 結果

### (1) 湧昇流構造物の規模や配置に関する技術開発（模型実験）

#### 【調査概要】

鞍状地形に流れが当たると凸部で流速が大きくなり、となりあう凹部で流速が小さくなる。この結果隣り合う凹凸部で圧力差が生じ、凹部から凸部に向かって二次流が発生する。この二次流を補完するために湧昇流が生じる。この運動を密度成層下で再現させることを試み、冷水を表層に送り込む可能性を探るため、水理実験を行い、どのような地形条件、流れの状態ならば湧昇の発生が可能か調査した。水理実験は現地に対し 1/400 の縮尺で行い、温度差 5 度(密度差 0.001)で行った。流れはフルード則にしたがって縮尺し、流速、温度分布を測定した。地形は鞍状地形とし、水深に対する地形の高さ、凹凸の間隔を変えてそれらが温度分布（密度分布）にどのように影響するかを調べた。

#### 【調査結果】

鞍状地形下流側では水温の低下する場合と昇温する場合が見られた。これは、Hill らによって示された成層強度と成層の中心深度で、その発生を調べると低下する場合は成層強度が昇温する場合に比べ弱いこと、中心深度が高いことがわかった(図-1)。そこで、湧昇効果を上流側の鉛直密度勾配と下流側との比で示し、上流側の運動エネルギーの無次元数で、その変化を検討した。その結果、運動エネルギーの増加とともに湧昇効果は増大した。しかし、その大きさは一定となる(図-2)。この結果を用いて水温の低下する条件について、どのような鞍状地形が効果的であるかを、水温の低下率を混合効果と定義して運動エネルギーの変化に対する比較を行った(図-3)。鞍状地形の堤頂間隔は堤高の 3 倍と 4 倍で比較したところ、3 倍にしたほうが混合効果は運動エネルギーの小さい段階で効果が高くなりことがわかった。一方、堤高は、効果に対して影響は小さいことがわかった。

#### 【考察】

運動エネルギーの無次元化には地形の高さである位置エネルギーを用いた結果、密度フルード数と同義となった。湧昇を導出させるためには位置エネルギーの 10 倍以上の運動エネルギーが必要で、リチャードソン数で表される上下混合の 0.25 の逆数、4 よりかなり大きなエネルギーが必要であることが明らかになった。すなわち有効に湧昇流を利用するためには、流速の大きい海域が望ましい。また、地形の構造は凹凸部の間隔が狭い場合で湧昇効果の発現が見られたが、凹凸間隔の流速差が発現しやすい構造であることが推察される。一方、構造物の高さは湧昇効果に影響が小さい。これは、上記したように位置エネルギーを越える運動エネルギーが必要であり、地形が高いほど必要な運動エネルギーが得られないためと考えられる。

#### 【今後の課題】

成層を破壊するための施設として用いる場合、既存の地形を利用することが欠かせない。鞍状地形を用いる場合、運動エネルギーを狭窄のような形で付加的な施設の導入が必要であろう。

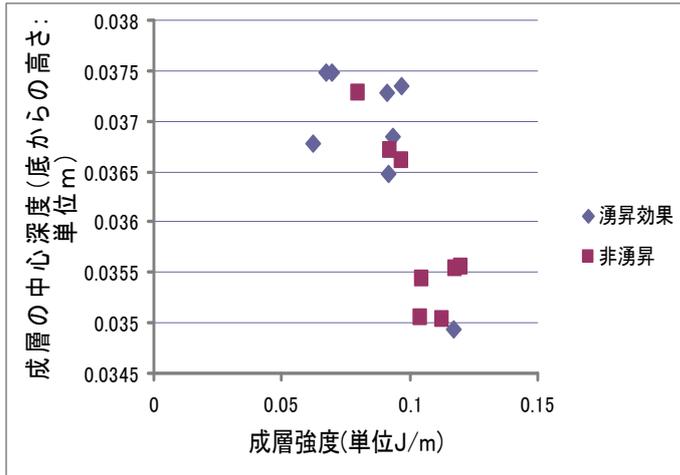


図-1 成層強度と成層の中心深度の関係（深度は底からの高さ）  
 成層強度は Hill らによって示された位置エネルギーと平均位置エネルギーの差を用いた。

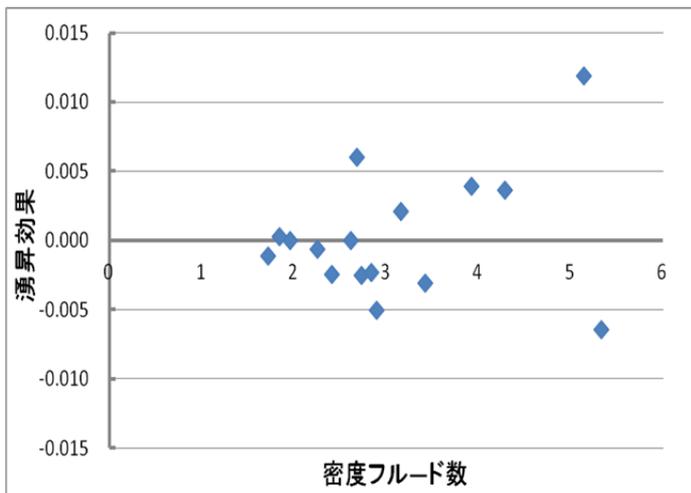


図-2 運動エネルギーの無次元数(密度フルード数)と湧昇効果の関係  
 湧昇効果は、上流側と下流側の同一水深における密度変化で、プラス側は下層水の上層への湧昇、マイナス側は上層水が下層に回り込まれた。

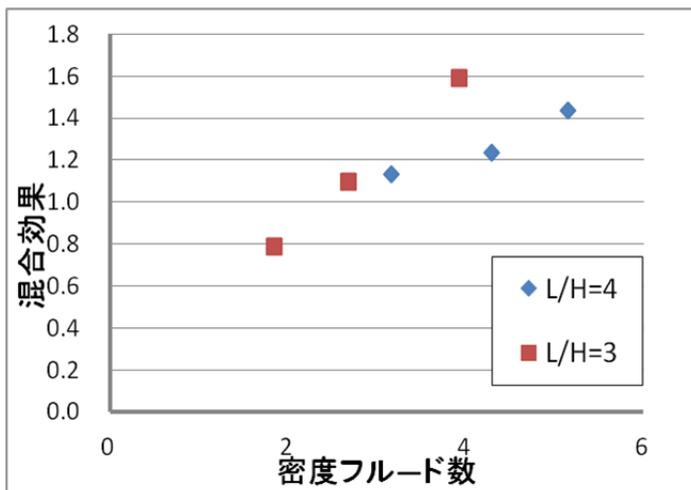


図-3 密度フルード数と混合効果の関係  
 L:凹凸部の頂点の間隔、H:構造物高さ

## (2) 湧昇流構造物の規模や配置に関する技術開発（数値シミュレーション）

### 【調査概要】

沖からの密度成層流が水深 40m の海底のマウンドを通過する際の流況変化、周辺水温の低下を予測する流動解析を行った。先に実施された水理模型実験と同スケールのモデルでは実験で計測されたデータを基に入力条件を決定した。計算に用いたモデルの格子数は 30 万程度とした。差分法を用い圧力解法は SMAC 法、移流項精度は CIP 法、乱流モデルには LES モデルを採用し実験との比較を試みた。また、マウンド周辺で発生する混合効果を密度フルード数、流速の関数で表し構造物種類による違いによるモノグラフを作成した。

### 【調査結果】

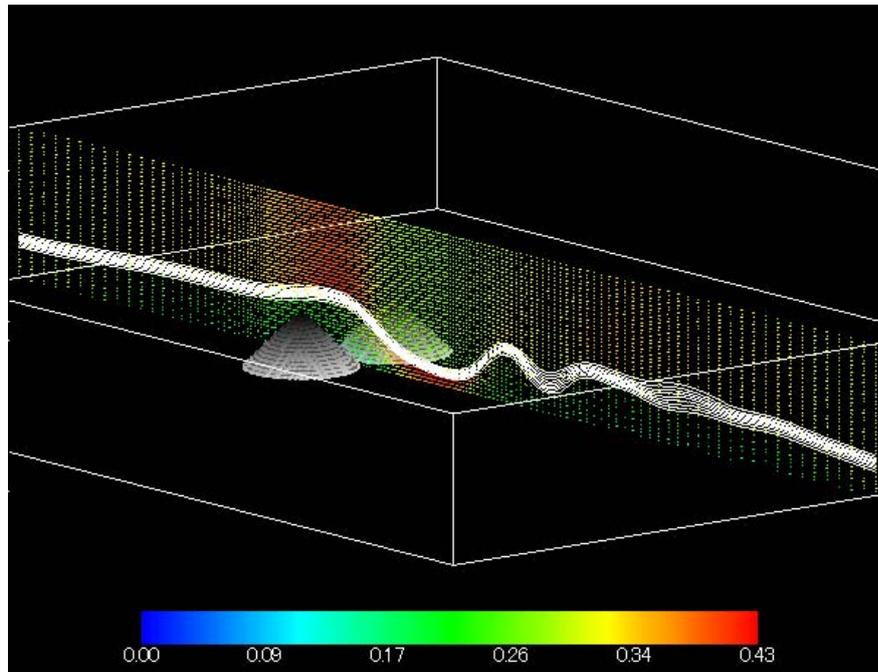
実験では詳細なデータを得ることができなかつたため正確な比較はできなかつたが、マウンド構造物の極近傍の流動現象についてある程度の類似が認められた。マウンド周辺で発生する混合効果のモノグラフにより、次工程で湧昇効果を算定する予測計算に寄与することができた。

### 【考察】

今回の実験では底層水の流速、流量、密度分布等を観測することができなかつたため、現在可能な高レベルのモデルによる数値計算との十分な比較ができなかつた。解析精度向上には詳細な比較ができるデータを取得できるレベルの実験が必要である。

### 【今後の課題】

数値解析により構造物の背後に明確な内部波が発生することが分かつたので、この内部波が浅海の岩礁性生態系、特に食植性魚や藻類に与える影響などを検討するためにも解析が有効であることが示唆された。



左からマウンドを通過する 2 層流で発生する内部波と中心断面における等水温線（白線）

### (3) 現地の環境データを用いた構造物の基本設計や効果範囲に関する技術開発

#### 【調査概要】

人工湧昇流発生構造物(以下、構造物)の効果や影響範囲を明らかにすることを目的とし、昨年度に適地候補として選定された大分県鶴御先周辺海域を対象とした数値解析を実施した。数値モデルの構築では昨年度に実施された現地観測による流速・水温変動を利用した。また、前述の構造物の規模や配置に関する技術開発にて作成されたモノグラフをモデルに反映し、構造物の効果及び影響範囲を評価した。

#### 【調査結果】

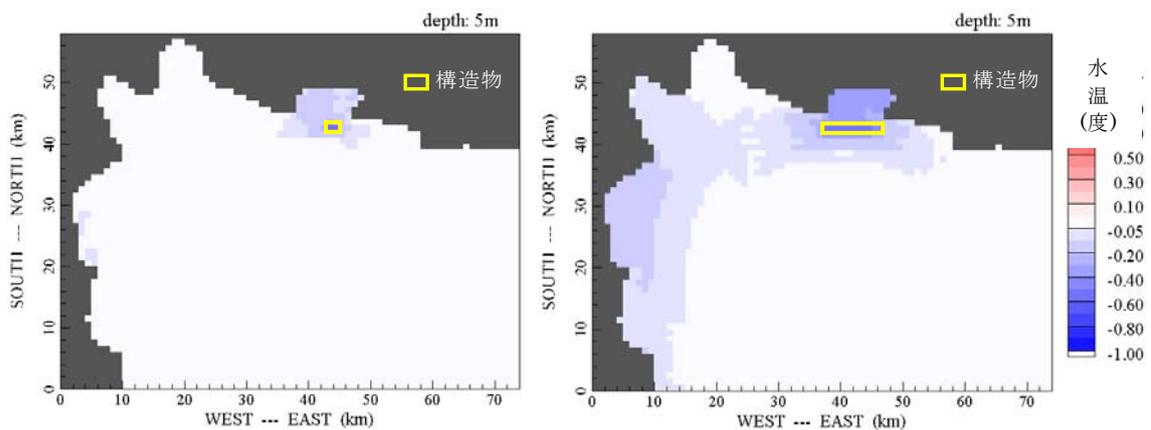
現地の特性である潮流が卓越する流動環境及び最大で5度程度の鉛直水温差が生じる状況、小潮期に成層が発達する状況を概ね再現できるモデルを構築した。本モデルにより構造物の効果検証計算を実施し、設置場所は岸からある程度近い距離が良いこと、規模は大きいほど効果が強く、影響範囲が広がることが示された。

#### 【考察】

深い地点に構造物を設置する方が、底層に冷水塊が有るため構造物周辺では水温低下効果が高いと思われるが、岸に向かうに連れて水平的に拡散するため効果が薄まる結果を得た。このことから、最適な構造物の位置は、湧昇効果の駆動力となる流れの強さに加え、水深(底層と上層の水温差)と岸との距離などを総合的に検討する必要があることがわかった。

#### 【今後の課題】

湧昇した水塊は周囲の水と混合するため、構造物で湧昇・混合した冷水塊を如何にして藻場域に運ぶかが課題である。一定以上の効果を得るためには、規模は大きい方が良いが、コストが嵩むデメリットがあるため、現地の微細地形を利用した比較的安価となる構造物の配置手法を検討することが必要である。



構造物を2基配置(左図)及び10基(右図)配置した場合の水温低下効果  
(青色が水温低下範囲)

## VII 考察

1. 衛星データを用いた低 SST 域の抽出は、今後、磯焼け対策や藻場造成を行うにあたって、適地選定などに利用できるものとする。
2. これまでの水産基盤整備事業では、磯焼け海域にブロックや石などの基質を提供することで、海藻の着生機会を増やす対策が実施されてきた。本事業が提案する手法は、ブロックや石を円錐状に積み上げ、これを複数設置することで湧昇流を発生させ、流動混合を促進させるもので、水温の低下により食害動物の食圧抑制や海藻にとってより良い栄養塩の供給など、着生できる場所の提供以外の別な側面での効果も期待できるのが特徴である。
3. 水産庁では、環境生態系保全活動支援事業など、漁業者が主体となった藻場保全の取り組みが進められている。この活動内容のほとんどが食害動物の除去が主であることから、いつ来て食べられているかわからない植食性魚類の食圧を抑制し、海藻の生産力を高める方法として、本事業の成果は活用できるものである。

## VIII 摘要

1. 本提案施設を用いて、効果が大きく発揮する適地選定手法を、低 SST だけでなく、海域流動や水温・塩分鉛直プロファイルから評価する手法開発が必要である。
2. 本事業で提案した円錐状構造物の複数配置は、実海域でどの程度の効果が発揮できるか不明確である。是非、現場で実施する必要がある。

## IX 引用文献

- 1) Matsuoka, Y. · H. Kawamura · F. Sakaida · K. Hosoda, 2011, Retrieval of high-resolution sea surface temperature data for Sendai Bay, Japan, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)、Remote Sens. Environ.、115、pp.205-213.
- 2) Sakaida, F. · J. Kudoh · H. Kawamura, 2000, A-HIGHERS - The system to produce the high spatial resolution sea surface temperature maps of the western North Pacific using AVHRR/NOAA、J. Oceanogr、56、pp. 707-716.
- 3) 富沢伸樹・綿貫啓・桑原久実・梅津啓史、2009、JODC の水温データを用いた沿岸湧昇域の探索と既往知見、平成 21 年度日本水産工学会学術講演会論文集、pp. 15-18.
- 4) 桑原久実・安藤 亘・綿貫 啓・富沢伸樹・境田太樹・川村 宏、2009、衛星画像を用いた低 SST 高頻度分布域と藻場の関係、水産海洋学会講演会論文集、p. 23.