

海洋深層への熱入力による湧昇に関する基礎的検討

A fundamental study on upwelling due to heat input into deep sea

佐藤慎一^{1*}・多部田 茂¹・加藤孝義¹・尾崎雅彦¹

Shinnichi SATO, Shigeru TABETA, Takayoshi KATO and Masahiko OZAKI

Abstract

A new cooling system for power plant is proposed in which the cooling medium circulates in the closed duct system between the condenser and the heat exchanger installed at deep sea. This cooling system could improve power generation efficiency since deep sea water has lower temperature than surface water. On the other hand, the influences of heat brought to the deep ocean have to be investigated. In the present study, the upwelling phenomena due to heat input in the bottom layer of the ocean with stratification and background current are investigated by hydraulic model experiments and numerical simulations. The upwelling height can be expressed by using non-dimensional parameters regarding the thermal input rate, the stratification gradient, and the velocity of background current.

Key Words: Cooling system for power plant, Upwelling, Thermal discharge, Stratified circulation water tank, MEC-NEST

要 旨

海の深層に設置した熱交換器と発電所の復水器の間で冷却用媒体を閉鎖的に循環させ、取排水なく深層の冷熱を蒸気冷却に利用する新たな発電所冷却システムが提案されている。海洋深層は表層に比べて低温であるため、その冷熱を利用することで発電出力の向上が期待される。一方で、発電所の排熱を冷却する代わりに温められた海洋深層水が湧昇し有光層に栄養塩を供給することによって、海域肥沃化の効果が顕れる可能性がある。本研究では、成層、一様流下での熱入力による湧昇現象を検討するために水理実験と数値シミュレーションを行った。実験と計算により、流れのある成層海域における湧昇高さは、熱入力 (Q_i) が大きく、温度成層勾配 (G_T) が小さく、流れ (U) が小さいほど大きくなり、 $U \cdot G_T / Q_i$ とリチャードソン数に依存することを明らかにした。

キーワード: 発電所冷却システム, 湧昇, 成層回流水槽, MEC-NEST

1. 緒 言

海の深層に設置した熱交換器と発電所の復水器の間で冷却用媒体を閉鎖的に循環させ、取排水なく深層の冷熱を蒸気冷却に利用する新たな発電所冷却システム (図1) が提案されている (尾崎・大内,

2011)。海洋深層は表層に比べて低温であるため、その冷熱を利用することで発電出力の向上が期待される。このシステムでは、温排水がないため海洋表層への環境影響は大幅に緩和されることが期待されるが、一方で深層へ持ち込まれる熱の影響が課題である。一般に海洋深層水は、表層水に比べて窒素や

*現所属：環境省

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

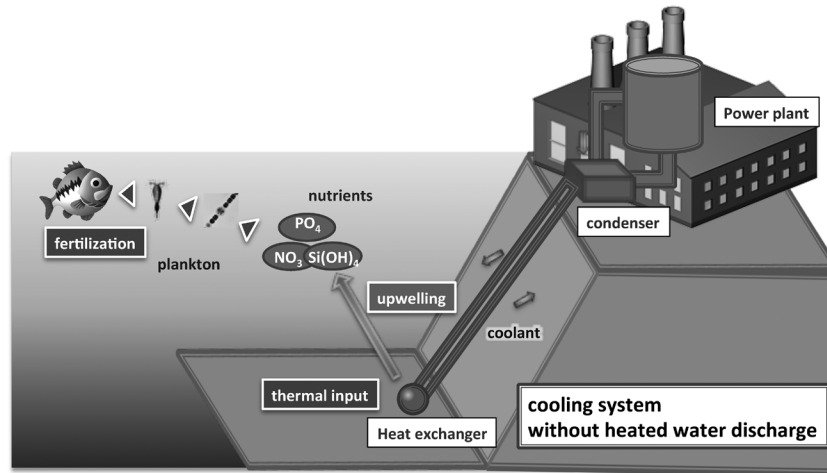


図1 取排水のない発電所冷却水システムと深層への熱入力による湧昇

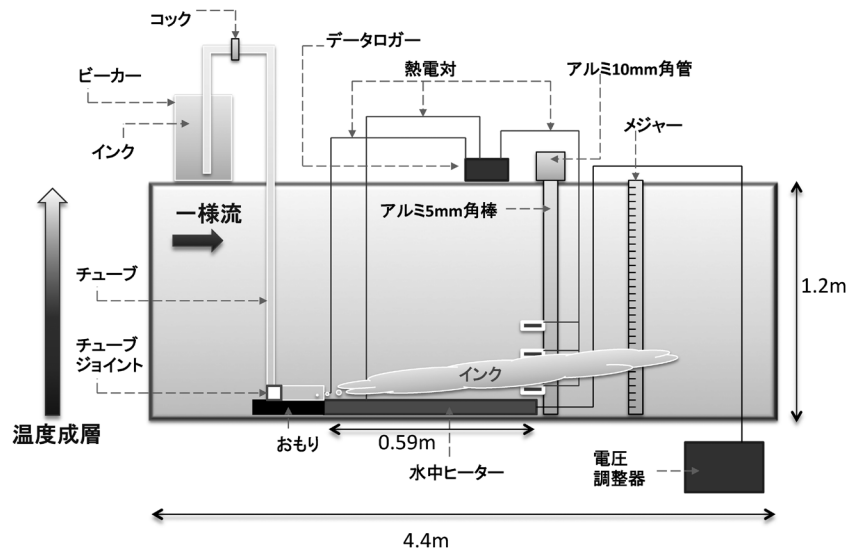


図2 成層回流水槽での湧昇実験

リン等の栄養塩を豊富に含んでいる。栄養塩は植物プランクトンの増殖を促すため、発電所の排熱を冷却する代わりに温められた海洋深層水が浮力で湧昇して有光層に栄養塩を供給することによって、海域肥沃化の効果が顕れる可能性がある(井関, 2000など)。

実際にこのシステムによって肥沃化効果が見込まれるかどうかを検討するためには、まず海域の流動や成層の条件および熱入力条件による湧昇について調べる必要がある。そこで本研究では、成層と流れのある場における熱入力による湧昇現象について、水理模型実験と数値シミュレーションによって検討を行った。

2. 水理模型実験

2.1 実験方法

水理模型実験には、佐賀大学海洋エネルギー研究センターの成層回流水槽を使用した。この水槽では、鉛直5層の温度勾配と一様流によって、海洋の成層と海流を模擬することができる。図2に実験の概要を示す。長さ10m(観測部4.4m)、幅1.0m、水深1.2mの成層回流水槽の底面付近に、冷却システムの中熱交換器を模擬した平板型(長さ0.59m、幅0.24m、消費電力100V-1kW)の水中ヒーターを設置した。水槽内の流体の挙動の計測は、多部田ら(2008)を参考にして水中ヒーター直上にチューブからインクで色づけした液体を流すことで、熱入力

による流体の挙動を可視化した。また、水中ヒーターの下流端付近でアルミ角管を水槽上部に渡してアルミ角棒を鉛直に設置し、それに熱電対（データは本論文では使用していない）を取り付けた。

ヒーターの電圧 (0, 55, 100 V)、温度成層の勾配 (5, 10°C/m)、水平流速 (0.01, 0.02, 0.03 m/s) を変えてインクの挙動を観察した。水槽内の温度は、最下層を5°Cとし、目標とする温度勾配になるように上方の層の温度を設定した。湧昇高さはビデオで撮影した画像からインク色の範囲を読み取ることによって決定した。

2.2 結果

図3に結果の一例として、ヒーターありとなしの場合におけるインクで可視化した底層水の挙動を示す。底層水がヒーターによって温められると、湧昇が起きていることが確認できる。インクによる可視化画像から読み取った種々の実験条件下における湧昇高さを表1に示す。湧昇高さは、ヒーターの電圧が大きく、成層が弱く、バックグラウンドの一樣流速が小さいほど高くなっている。

3. 数値シミュレーション

3.1 モデルと計算条件

流れ場のモデルには、MEC-NEST (Tabeta *et al.*, 2005; Muzumukai *et al.*, 2008) を使用した。MEC-NESTは3次元の海洋モデルで、ネスティング格子を用いることにより空間解像度の異なる領域を接合した計算が可能であるとともに、各格子系において静水圧近似と非静水圧近似 (Full-3D) 計算を選択で

表1 インクによる可視化画像から読み取った種々の実験条件下における湧昇高さ

Voltage of the heater [V]	Thermal stratification [K/m]	Background horizontal velocity [m/s]	Upwelling height [m]
100	5	0.01	0.40
55	5	0.01	0.30
0	5	0.01	0.18
100	5	0.02	0.28
100	5	0.03	0.10
100	10	0.01	0.30

きる。計算領域は単純な直方体とし、長手方向に海流を模擬した一樣流ができるように、上流側と下流側の境界に流速を与えた。また、温度成層を再現するために、設定した温度条件を上流側の境界条件として与え、下流側は等値外挿した。熱源の近傍では、湧昇効果を正確に計算するために、静水圧近似を用いないFull-3D計算を行った。それ以外の部分では、計算時間がより短い静水圧近似の計算を行った。

3.2 実験スケールの計算

まず、計算の検証のために実験の再現計算を行った。水槽実験に基づいて、境界における温度勾配と水平流速を与えた。底面における熱入力は、ヒーター電圧100 V時に1.0 W/cm²をヒーター面に相当する範囲で与えた。実験での着色した水の挙動と比較するために、ヒーター直上のグリッドにトレーサーを連続的に供給した。水平方向の計算格子幅はFull-3D領域で6 cm、静水圧領域で18 cmとし、鉛直方向格子幅は2.5 (底面付近) ~10 cm (上面付近) とした。

図4に計算と実験の比較の一例 (熱入力1.0 W/cm², 鉛直温度勾配5 K/m, 水平流速0.01 m/sの場合) を示す。ヒーターで温められた水の湧昇高さがほぼ再現されている。

3.3 実海域スケールの計算

次に、実海域スケール (水深200 m) のシミュレーションを行い、発電所の規模、成層の強さ、海流の流速の影響を調べた。水平方向の計算格子幅はFull-3D領域で12 m、静水圧領域で36 mとし、鉛直方向格子幅は5 (底面付近) ~20 m (海面付近) とした。実海域計算では、熱交換器による海水への熱供給 Q_T を以下のモデルで与えた。

$$Q_T = \frac{q}{V} (T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

$$T_{out} = (1 - F) \times T_{in} + F \times T_w \quad (2)$$

ここで、 q は冷媒の体積流量、 T_{in} は熱交換器の入口温度、 T_{out} は熱交換器の出口温度、 V は熱交換器が置かれているグリッドの体積 (12 m × 12 m × 5 m)、

F は熱交換器の性能を表すパラメータである。温められた底層水の湧昇高さは、実験スケール計算と同様に熱交換器を置いたグリッドにトレーサーを連続的に投入することで可視化した。

温度成層勾配が3.1 K/200 m, 水平一様流速5 cm/sの条件で、発電出力を変えたときの湧昇の様子を図5に示す。発電出力が大きくなると、熱交換による海洋底層への熱入力が大きくなるので、海水はより

大きな浮力を得て湧昇高さが高くなる。また、発電出力が10万kWのときに、温度成層勾配と水平流速を変化させた場合の結果を図6に示す。温度成層勾配が大きくなると、暖められた水が湧昇するためにより多くの仕事を要するようになるため、湧昇高さは抑えられる。また、水平流速が大きくなると、温められた海水の上方への移動より水平への移動が相対的に大きくなり、結果的に湧昇高さが小さくなっている。

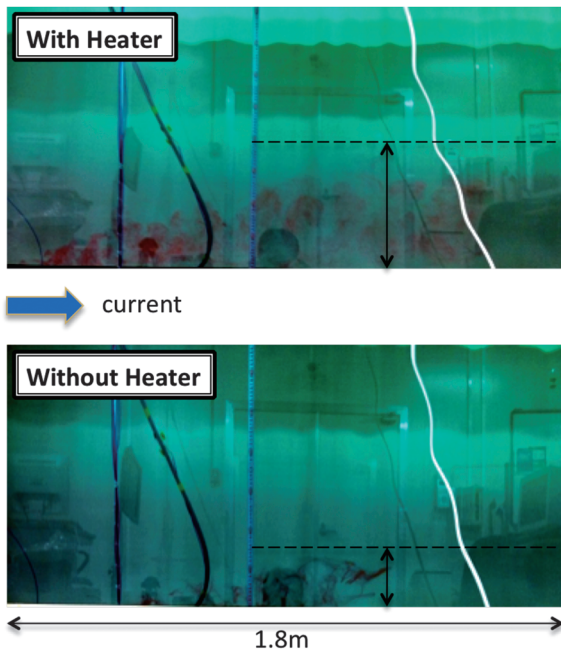


図3 水理模型実験におけるヒーターありとヒーターなしの場合の底層水の挙動。図中の黒と白の曲がったラインは機器のケーブルである。

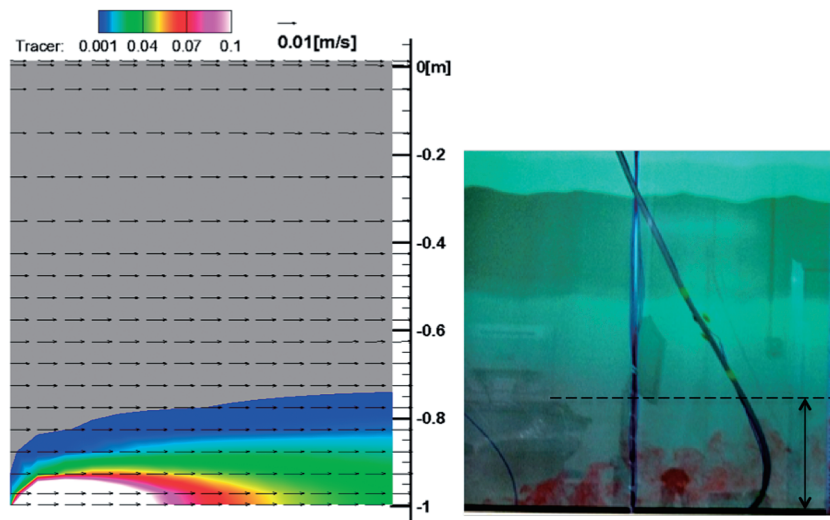


図4 計算(左)と実験(右)の比較。右図中の黒い曲がったラインはヒーターのケーブル、青い鉛直のラインはセンサー取り付け用の治具である。(熱入力: 1.0 W/cm², 温度勾配: 5 K/m, 一様流速: 0.01 m/s)

4. 無次元数による整理

さまざまな条件における水槽実験と数値計算の結果を、次元解析によって湧昇高さの観点から整理した。海洋深層への熱入力による湧昇現象に関連する物理パラメータとして、単位時間当たり熱入力 Q_T [K s⁻¹], バックグラウンドの流速 U [m s⁻¹], 温度成層の勾配 Q_T [K m⁻¹], Brunt-Vaisala周波数 N [s⁻¹], 水深 H [m] を選んだ。湧昇高さ h [m] はこれらのパラメータを用いて以下のように表される。

$$h = a \cdot Q_T^a U^b G_T^c N^d H^e \quad (3)$$

ここで次元解析により

$$a + c = 0; a + b + d = 0; b - c + e = 1 \quad (4)$$

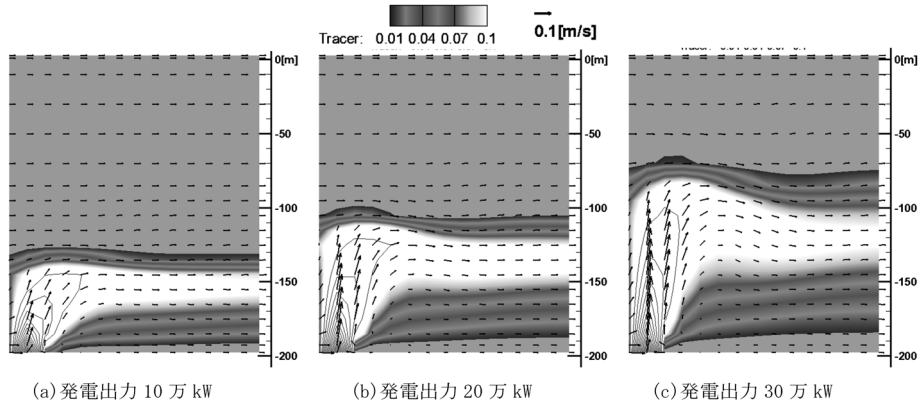


図5 実海域スケールでの計算による鉛直断面のトレーサー分布 (温度勾配3.1 K/m, 水平流速5 cm/s)

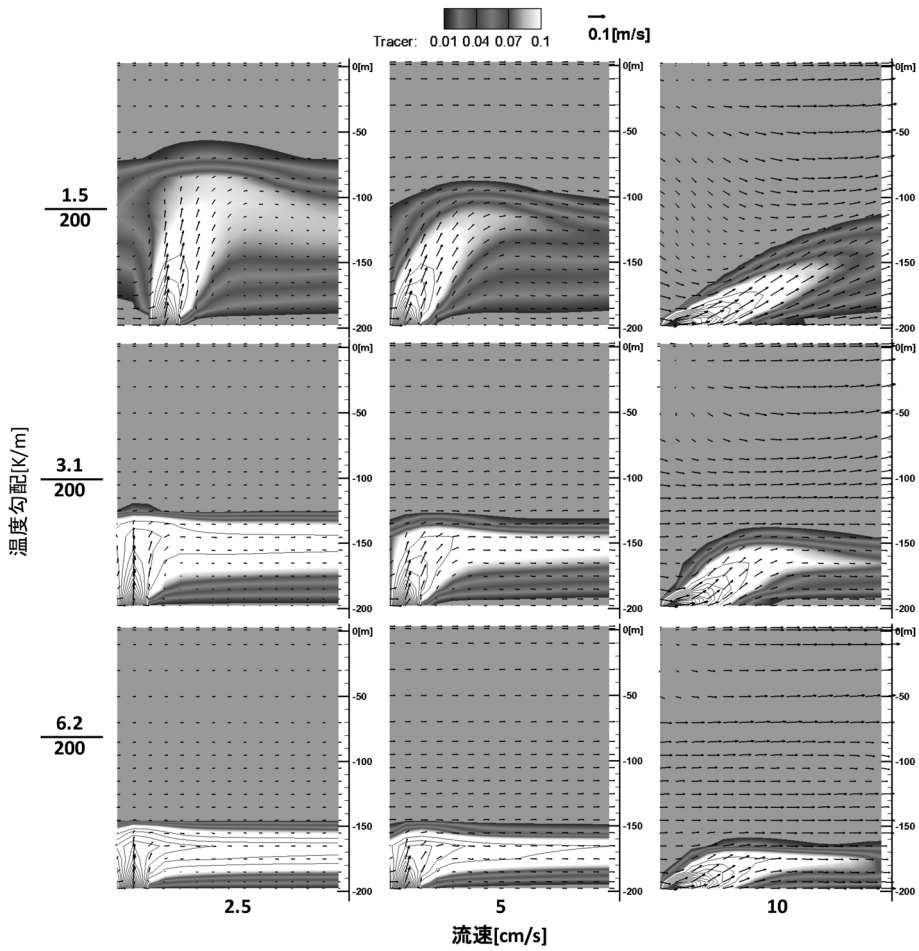


図6 実海域スケールでの計算による鉛直断面のトレーサー分布 (発電出力10 kW)

であるから,

$$\frac{h}{H} = a \left(\frac{UG_T}{Q_T} \right)^c \left(\frac{NH}{U} \right)^d \quad (5)$$

を得る. そこで, 湧昇現象を表現する無次元数として,

$$H^* = \frac{h}{H} \quad W = \frac{Q_t}{UG_T} \quad Ri = \left(\frac{NH}{U} \right)^2 \quad (6)$$

を選定することができる. これらを用いて式 (5) を書き直すと,

$$H^* = aW^\beta Ri^\gamma \quad (7)$$

となる.

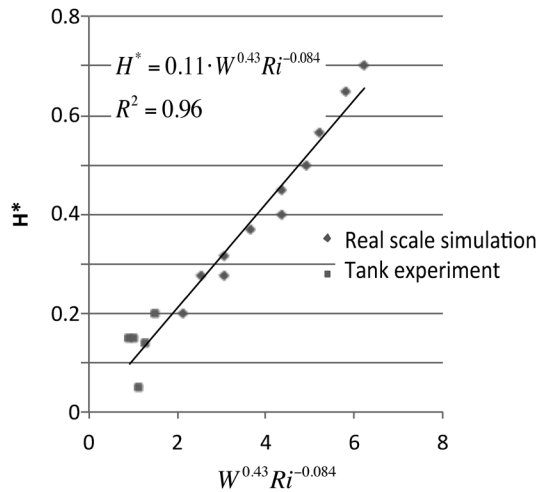


図7 無次元数 W, Ri と無次元湧昇高さ H^* の関係

次に、実験と計算結果を用いて無次元湧昇高さ H^* の W および Ri への依存性を回帰分析によって求め、以下の関係を得た。

$$H^* = 0.11 \cdot W^{0.43} Ri^{-0.084} \quad (8)$$

図7に示すように、この関係は水槽実験から実海域シミュレーションまでの広い範囲でおおよそ成り立っている。

5. 結 言

成層、一様流下での熱入力による湧昇現象を検討するために水理実験と数値シミュレーションを行った。実験と計算により、流れのある成層海域における湧昇高さは、熱入力 (Q_t) が大きく、温度成層勾配 (G_T) が小さく、流れ (U) が小さいほど大きくなることを確認した。また、次元解析により湧昇高さ

が、 $U \cdot G_T / Q_t$ とリチャードソン数を用いて整理できることを示し、その関係を定量的に求めた。

謝 辞

実験に際して便宜を図っていただいた今井康貴氏 (佐賀大) に感謝する。また本研究の一部は科学研究費補助金 (課題番号 20360389, 22360364) の助成を受けて実施された。

引用文献

- 井関和夫 (2000) 海洋深層水による洋上肥沃化—持続生産・環境保全型の海洋牧場構想, 月刊海洋/号外, 22, 170–178.
- Mizumukai, K., T. Sato, S. Tabeta and D. Kitazawa (2008) Numerical studies on ecological effects of artificial mixing of surface and bottom waters in density stratification in semi-enclosed bay and open sea. *Ecological Modelling*, 214, 251–270.
- 尾崎雅彦・大内一之 (2011)：取排水の無い発電所冷却システムに関する基礎研究第一報；全体構想および発電効率への影響。日本船舶海洋工学会講演会論文集, 12, 359–362.
- Tabeta, S., T. Kinoshita and Y. Shimizu (2005) Numerical simulation of tidal current in the coastal region with an artificial seabed mound for upwelling. *Proc. 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2, pp. 419–423.
- 多部田 茂・田辺 直・河島洋平・木下嗣基 (2008) 沿岸海域における海底湧出地下水の挙動に関する基礎的検討。沿岸域学会誌, 20, 31–38.
- (2015年11月19日受付；2015年8月1日受理)