

# 大規模深層水利用システムにおける複合的利用形態とその成立性について

長谷部雅伸\*・森野仁夫\*\*・大内一之\*\*\*・大山 巧\*\*\*\*

発電用冷却水への利用を軸とする大規模・複合的な深層水利用システムについて、北海道日本海側での立地を想定したケーススタディを行った。発電用冷却水として深層水を利用することで、表層取水に比べ発電効率の向上と、燃料消費量・CO<sub>2</sub>放出量の大幅な削減が可能であることを定量的に評価した。また、養殖業への活用を念頭に置いた深層水放流について拡散解析を行った結果、防波堤配置を利用することで年間を通じて放流水を漁港区画内に滞留させることが可能であることがわかった。特に発電所で暖められた放流深層水を活用する場合、冬期の海水温低下が抑制されるため、ヒラメなどの養殖可能期間を長くすることが可能であることが示された。

## 1. はじめに

海洋深層水については、これまでに様々な利用分野で基本的な有効性が示されるとともに、各種深層水利用商品・サービスについても社会的認知が得られるようになってきた。このような社会動向のもと、深層水利用の事業化が地域活性化を図る地方自治体に注目されるようになり、最近では自治体主導型の深層水利用事業が全国的に展開されつつある。現状では養殖業など地域特性を生かした比較的小規模な利用形態が主流であるものの、将来的な発展性として、冷熱エネルギー利用も含めた大規模で複合的な深層水利用システムの実現化も期待されている。同時に、事業としての深層水利用システムの成立性に関する議論も活発に行われるようになってきた。

新エネルギー・産業技術総合開発機構からの受託により(社)日本海洋産業開発協会で実施された「エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発」では、発電用冷却水としての利用を軸とする大規模かつ多段階・複合的な利用形態に基づき、包括的な資源活用システムとしての事業成立性が検討されている(日本海洋開発産業協会, 2001, 2002, 2003)。具体的には、国内の代表的な立地条

件別に、地域特性を考慮したシステム構成の提案を行うとともに、発電所への適用効果や利用済み深層水の海域利用に関する検討などが行われている。本研究では、この成果の一部を踏まえ、北海道日本海側を立地条件と設定した深層水の複合的利用システムについて、発電用冷却水としての有効性と放流水を活用した養殖業の可能性について検討する。

## 2. システム構成

モデル地域として想定した北海道日本海側のI地区では、現状で日量3,000tの深層水を取水し、そのうち1,300tをヒラメ蓄養など水産目的に利用している。本研究では、5万kW級火力発電所が図-1に示すI漁港工業港区に建設されるという設定のもと、既存施設が含まれる形の大規模・多段階深層水利用システムを考案した。図-2の構成図に示されるように、取水量の大部分を占める日量10万トンの深層水が発電用冷却水として使用され、その後養殖業を中心とする各種用途へ2次利用されるシステムとなっている。本システム構成では、現状のヒラメ養殖生産量の増大の他、エゾアワビの種苗育成など新たな水産事業も考慮した。また、利用済の深層水は将来的な養殖業への活用も視野に入れ、図-1に示す海中蓄養場の既存放水口に加え、工業港区放水口から

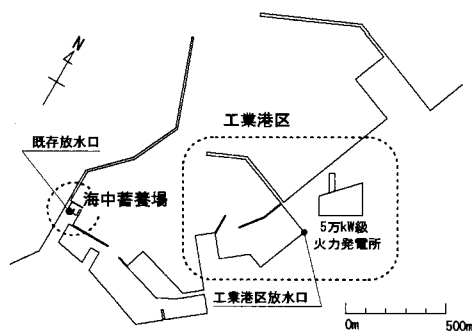


図-1 本検討で想定したモデル港湾

- \* 正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所
- \*\* 工博 清水建設(株) 技術研究所
- \*\*\* 工博 (株)大内海洋コンサルタント
- \*\*\*\* 正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所

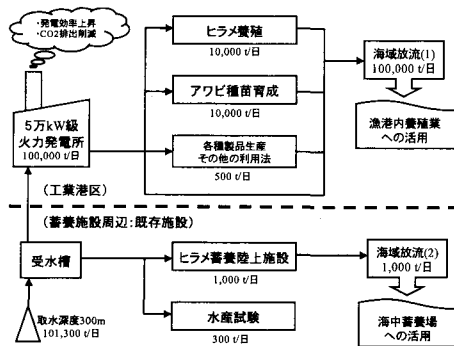


図-2 システム構成案

も放流されるものとした。なお、既存放水口および工業港区放水口からの放流量は、それぞれ日量1,000トン、10万トンとした。

### 3. 発電用冷却水としての有効性について

#### (1) 発電効率

図-3は、本検討で想定した定格出力5万kWの蒸気タービンにおける、取水冷却水温と発電効率の関係を示したものである。この図に示されるように、一般に取水水温が低いほど蒸気タービンでの発電効率は高くなるため、表層水を用いる場合、冬期に比べ取水水温の高くなる夏期において発電効率が低下することになる。例えば図-4には、北海道I地区近海における表層水および深層水の観測データ(1997.2~1998.1)に基づく水温の年間推移と、図-3により見積もられる月別の発電効率の変化を示すが、表層水を冷却水として使用する場合、取水水温が約22°Cと最も高くなる8月において発電効率が34.4%となり、3月での値37.4%に比べ約3%程低下することがわかる。一方、深層水を復水器冷却水として使用するケースでは、取水水温の季節変動による影響が作用しないため、年間を通して約37.4%の安定した発電効率を確保することが可能となる。これは、表層水を用いた場合では、最も取水水温の低くなる3月の発電効率に相当することがわかる。

#### (2) 燃料消費量

図-5には、発電所の稼働率を100%としたときの燃料消費量(原油換算量)を示す。なお、原油消費量は蒸気

タービンの定格出力と発電効率から試算した(環境省, 2003)。表層水を冷却水として用いる場合、発電効率が低下する夏期において燃料消費量も増加しているが、深層水を用いる場合には季節によらずほぼ一定となる。従って、特に夏期における燃料消費量の削減効果が顕著となり、8月では表層水を用いるケースに比べおよそ7%にあたる700キロリットルの削減量が期待できる。この結果、年間では約3,580キロリットルの原油消費を削減できることがわかった。

#### (3) CO<sub>2</sub>収支

深層水を発電用冷却水として使用することによる燃料消費量の低減に伴って、発電所からのCO<sub>2</sub>放出量も削減されることになる。先の検討で得られた年間3,580キロリットルの原油削減量をCO<sub>2</sub>削減量に換算すると(環境省, 2003)、年間2,549t-C(炭素量換算トン)となる。一方、深海における高圧条件下で深層水中に溶存するCO<sub>2</sub>は放流時に沿岸域へと放出されるため、CO<sub>2</sub>収支としては増分として働く要因となりうることも指摘されている(原田, 2000)。北海道日本海側で実施された観測(日本海洋開発産業協会, 2003)によれば、水深300mの深層水を表層へと汲み上げた場合に発生するCO<sub>2</sub>は深層水1kgあたり342 $\mu$ molであるが、沿岸域での植物プランクトンによる取り込み(生物固定)を考慮すると、放出されるCO<sub>2</sub>は差し引き193 $\mu$ molになると予想されている。しかしこれらの値は、本研究で対象とする取水規模日量10万トンの施設における年間CO<sub>2</sub>放出量としては、それぞれ炭素換算量で約152トン、約86トンと、いずれにしても燃料消費量削減に伴うCO<sub>2</sub>放出量削減効果に比べて極めて小さな値である。表-1に深層水を発電用冷却水として利用した場合のCO<sub>2</sub>削減量をまとめるが、トータルでは表層水を用いる場合に比べ大幅なCO<sub>2</sub>削減効果が期待できることがわかる。

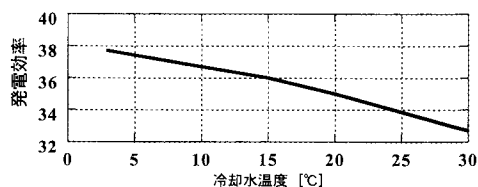


図-3 冷却水温度と発電効率の関係

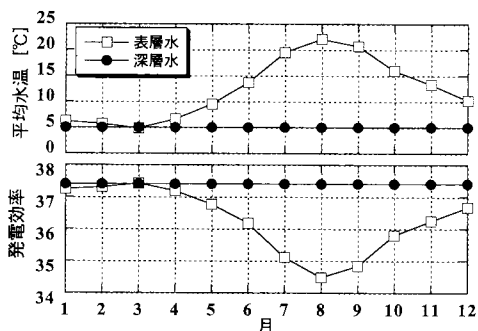


図-4 平均水温と発電効率の年間推移

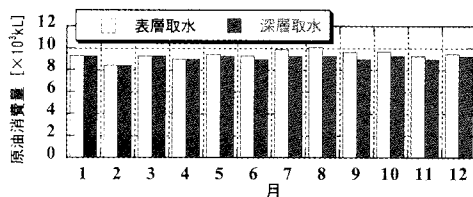


図-5 原油消費量の年間推移予測

表-1 深層水利用時のCO<sub>2</sub>削減量

| A. 発電所から放出されるCO <sub>2</sub> の削減量 [t-C/年] | B. 深層水汲上げによるCO <sub>2</sub> 放出量 [t-C/年] | C. 深層水利用によるCO <sub>2</sub> 削減量 (A-B) [t-C/年] |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2,549                                     | 生物固定なし:                                 | 152                                          |
|                                           | 生物固定あり:                                 | 86                                           |
|                                           |                                         | 2,397                                        |
|                                           |                                         | 2,463                                        |

#### 4. 放流深層水を用いた養殖業の可能性について

一般に海洋深層水は、年間を通じてほぼ一定の低い水温を保ち、かつ含まれる細菌数が表層水に比べて極めて少ないという特徴を有する。従って放流により漁港内にある程度の深層水濃度を確保することができれば、水温の季節変動の緩和と、病害発生抑制効果が期待でき、水産養殖業において生産量および品質の安定化を図ることができるものと考えられている(渡辺, 2000)。そこで放流深層水の基本的な拡散特性を把握するため、夏期および冬期を対象とした数値シミュレーションを実施した。

##### (1) 数値モデルの概略

本研究で対象としたI漁港は、図-1にも示すように防波堤が複雑に入り組んだ形状となっており、放流される深層水の拡散形態を支配する主要な要因であることが推察される。そこで本数値解析では、より実際に近い地形を再現するために、非構造格子系による離散化(有限体積法)を適用した3次元非定常N-S方程式モデルを用いることとした。支配方程式は連続式、運動方程式、熱輸送に関する方程式、塩分など溶存物質に関する移流拡散方程式であり、運動方程式については静水圧近似を適用していない。なお、乱流場の表現には渦動粘性モデルを採用し、渦動粘性係数および渦動拡散係数の値として水平方向・鉛直方向ともに $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

##### (2) 計算条件の設定

本研究では、図-1に示したI漁港について、西側と北側に位置する防波堤に囲まれた部分を計算領域として設定した。放水口は図-1に示した海中蓄養場周辺と工業港区周辺の2箇所とし、海中蓄養場の放水口からは陸上蓄養施設での利用済み深層水が日量1,000トン、工業港区放水口からは発電用冷却水として用いられた日量10

万トンの深層水がそれぞれ放流されるものと想定した。表-2には放流水および環境水の水温・塩分等に関する計算条件を示す。工業港区放水口からの放流水については発電機の冷却による $18^\circ\text{C}$ の温度上昇を考慮したため、放流水温が $23^\circ\text{C}$ となっている。また、環境水の条件については、北海道日本海側の冬期・夏期における代表的な観測値に基づき設定した。なお、当該地域の観測からは、夏期においても顕著な成層化が見られなかったため、いずれのケースにおいても非成層場とした。

図-6には、実地形を元に設定した計算領域内の深度分布を示す。開境界となる北西開口部において水深13mと最も深くなっており、漁港のほぼ中央部には水深8mの航路が北西方向に伸びている。また、放水口周辺の工業港区周辺と海中蓄養場周辺はそれぞれ水深5m、水深4mで一様な水深が確保されているものとした。境界条件として、海底面と海面および岸壁面は壁面境界、北西開口部に相当する鉛直面を開境界(静水圧に相当する圧力値を規定)とした。また、海中蓄養場周辺および工業港区周辺海域には、放水口に相当する正方形の流入境界を海面上に設け、規定の流量を与えた。海底面・岸壁側面では壁関数によって摩擦の影響を評価しており、海面のみfree-slipの条件を課している。本検討で対象とするI漁港では潮位変動が少なく、潮汐による海水交換は微弱であるため、簡単のため平均海水面の変動は考慮せず、海面境界の位置は固定されているものとした。なお、水温・塩分については、海面を含む壁面境界での流入を考慮せず、北西開口部で表-2に示す一定の値を与えた。

##### (3) 計算結果と考察

ここでは深層水の拡散状況を示す指標として“希釈倍率”を定義した。数値計算を実行する際、放流水には仮想的な溶存物質が混入しているものとし、運動方程式などと同時にこの仮想物質の移流拡散方程式も解いている。以降に示す希釈倍率分布図は、この仮想物質の濃度に基づき算定したものである。なお、希釈倍率 $D$ の定義は以下のとおりである。

$$D = \frac{S_0}{S} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $S_0$ :放流水に含まれる仮想物質濃度、 $S$ :任意の

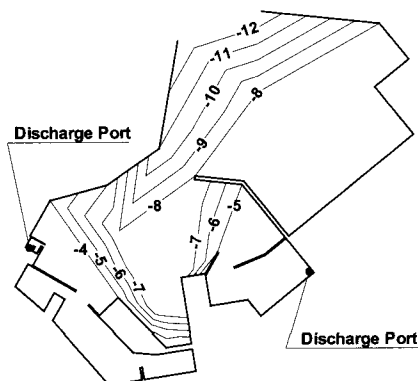


図-6 計算領域内の深度分布

表-2 計算条件

| 季節 | 項目                      | 放水条件  |         | 環境条件  |
|----|-------------------------|-------|---------|-------|
|    |                         | 海中蓄養場 | 工業港区    |       |
| 冬  | 水温 [ $^\circ\text{C}$ ] | 5.0   | 23.0    | 5.0   |
|    | 塩分 [PSU]                | 34.3  |         | 34.0  |
|    | 密度 [ $\sigma_t$ ]       | 27.12 | 23.40   | 26.88 |
|    | 流量 [t/日]                | 1,000 | 100,000 | —     |
| 夏  | 水温 [ $^\circ\text{C}$ ] | 5.0   | 23.0    | 22.0  |
|    | 塩分 [PSU]                | 34.3  |         | 33.8  |
|    | 密度 [ $\sigma_t$ ]       | 27.12 | 23.40   | 23.31 |
|    | 流量 [t/日]                | 1,000 | 100,000 | —     |

地点における仮想物質濃度，である。なお，計算とともに漁港内への放流が開始されるとしたうえで時間発展解法による計算を実行したところ，4日目以降は放流水の拡散形態に大きな変化が見られなくなることが確認できた。従って，以下に示す計算結果はいずれも放流開始4日後のものとした。

#### a) 放流深層水の拡散形態

18°Cの水温上昇を考慮した工業港区での放流については，夏期では環境水とほぼ等しい密度の放水となるため，海面上を舌状に広がる温排水のケースに比べて鉛直方向の移流拡散が促進される。従って図-7に示すように，防波堤区画内の表層から底層にわたり希釈倍率2倍以下の高濃度の放流水塊が形成される。一方，冬期を対象とした計算ケースでは，表-2にも示したように軽密度排水となっているため，放流水は表層から区画外へ流出することになると予想される。本解析結果においても，図-8に示す冬期のケースにおける希釈倍率分布では，高い放流水濃度を表す低い値の等高線が底層よりも表層で大きく広がっている。しかしながら，希釈倍率の値に着目すると，底層においても防波堤区画内のほぼ全域が5倍以下となっていることから，放流水が鉛直方向にもある程度輸送されることがわかる。図-9には冬期ケースにおける，放水区画の出口付近での流れ場を示す。図中の流速ベクトルは深度に応じて灰色が濃くなるように表示しているが，表層では放流水の影響によって区画外への顕著な流出が見られるのと同時に，底層では流出分を補うように外部の海水が流入している様子が確認できる。このような表層と底層での逆方向の流れに伴って，区画内部には図-10（図-8中のA-B断面における流れ場）に示すように大規模な鉛直循環流が形成される。この結果，区画内の海水は鉛直に混合され，図-8に示すように底層付近にも高濃度の深層水が維持されることがわかった。

なお，深層水が低温のまま放流される海中蓄養場周辺では，工業港区周辺とは異なり，冬期で等密度排水，夏期に重密度排水となる。このため，夏期のケースにおいては放流水が直ちに沈降し，底層を這うように区画外へと流出することになる。図-11には，夏期ケースにおける小区画出口付近での流れ場を示すが，図-9とは対照的に底層で流出，表層で流入となる流れ場が形成される。海中蓄養場小区画内部ではこの流れに伴い，図-10とは逆に底層において放水口から遠ざかる向きの鉛直循環流が形成され，小区画内部の海水が鉛直方向に混合されることになる。この結果，図-12に示す夏期のケースでの希釈倍率分布のように，海中蓄養場区画内部では底層で20倍程度となるのに対し，表層でも50倍以下の希釈倍率となることがわかった。

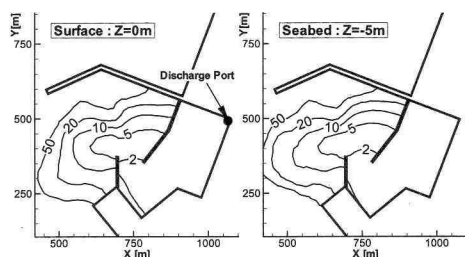


図-7 工業港区周辺の希釈倍率分布 (夏期)

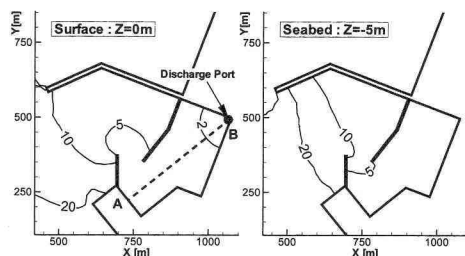


図-8 工業港区周辺の希釈倍率分布 (冬期)

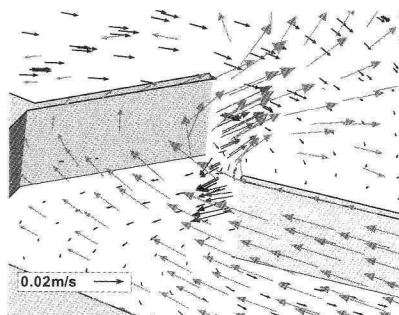


図-9 防波堤区画出口付近の流況 (冬期：工業港区周辺)

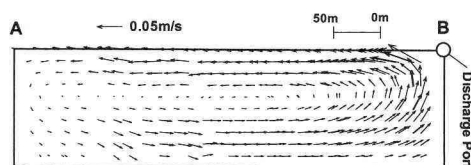


図-10 工業港区区画内のA-B鉛直断面での流れ場 (冬期)

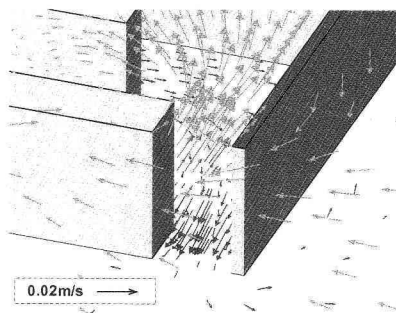


図-11 防波堤区画出口付近の流況 (夏期：海中蓄養場周辺)

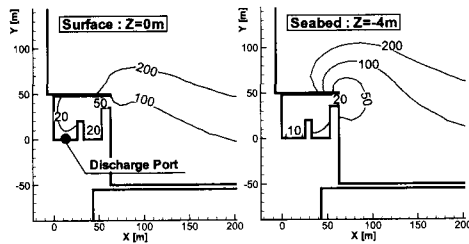


図-12 海中蓄養場周辺の希釈倍率分布（夏期）

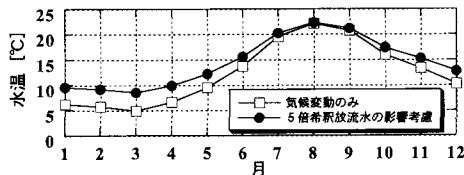


図-13 工業港区周辺での温排水による水温変化

表-3 各種魚介類の育成適温と養殖可能期間

| 魚介類     | 水温[℃] |    |    |    |    | 養殖可能期間  |         |
|---------|-------|----|----|----|----|---------|---------|
|         | 5     | 10 | 15 | 20 | 25 | 放流なし    | 放流あり    |
| ヒラメ     |       |    |    |    |    | 7～10月   | 6～11月   |
| マダイ     |       |    |    |    |    | 7～10月   | 6～11月   |
| マガレイ    |       |    |    |    |    | 6～11月   | 5～12月   |
| ニシン     |       |    |    |    |    | 10月～翌5月 | 1月～4月   |
| エゾアワビ   |       |    |    |    |    | 6～11月   | 5～12月   |
| エゾバフンウニ |       |    |    |    |    | 8月を除く   | 7～8月を除く |

## b) 養殖業への適用性の検討

以上の解析結果は、漁港内の防波堤配置により半閉鎖的となっている区画を利用することで、海域の季節変動によらず放流深層水を滞留させ、漁港内での養殖業に対して有効な活用ができる可能性を示すものであると考えることができる。図-13は、工業港区防波堤区画内部の年間水温変動について、図-4に示した季節変動のみの場合と、発電所からの深層水放流を考慮した場合との比較を示したものである。ただし深層水放流の影響については、工業港区防波堤内部の放流水濃度が年間を通して同じ値が保たれるものと仮定した上で、先のシミュレーション結果を踏まえ、23℃の温排水が環境水により5倍に希釈されたものとして考えた。図-13より、夏期のように環境水温が放流水温とほぼ等しくなる期間を除き漁港区画内の水温は上昇しており、特に環境水温の低くなる冬期ほど水温上昇が顕著になることがわかる。表-3には代表的な魚類の育成適温（日本海洋開発産業協会、

2002）と、本検討における放流水の有無による養殖可能期間を示す。ニシンなど冷水性魚類の養殖可能期間が短くなる反面、ヒラメやマダイなど暖水性魚類やエゾアワビについては飼育可能期間が約2ヶ月長くなることがわかる。

## 5. まとめ

大規模かつ複合的な利用形態を念頭に置いた深層水利用システムについて、北海道日本海側での立地を想定し、発電用冷却水としての有効性と放流水を活用した養殖業の可能性に関する検討を行った。発電用冷却水としての深層水利用については、表層水の利用に比べ発電効率の向上が期待でき、5万kW級火力発電所を想定した場合、燃料消費量について年間約3,600キロリットル削減できること、さらにCO<sub>2</sub>放出量についても炭素換算量で年間約2,400トンの削減が可能であることが示された。

また、養殖業への活用を念頭に置いた深層水放流については、発電所からの温排水が放流される工業港区周辺の防波堤配置を活用することで、半閉鎖的となっている区画内におよそ5倍希釈の深層水濃度が確保できることが数値シミュレーションにより示された。この結果、ヒラメなど主に暖水性魚類の養殖可能期間を2ヶ月程度拡げることが可能であることがわかった。なお本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構から（社）日本海洋開発産業協会が受託した、エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発の基礎研究である、環境影響評価技術等研究の一部成果を用いている。

## 参考文献

- 環境省地球環境局（2003）：事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン（試案 ver 1.4）第2部，pp. 72-77.
- 日本海洋開発産業協会（2001）：エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発成果報告書，平成12年度エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発事業，1116 p.
- 日本海洋開発産業協会（2002）：エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発成果報告書，平成13年度エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発事業，794 p.
- 日本海洋開発産業協会（2003）：エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発成果報告書，平成14年度エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発事業，1095 p.
- 原田 晃（2000）：海洋深層水利用で考えられる二酸化炭素の問題，月刊海洋/号外 No. 22，pp. 229-233.
- 渡辺 貢（2000）：海洋深層水利用を利用した魚類飼育，月刊海洋/号外 No. 22，pp. 62-68.