

海洋深層水の放流に伴う沿岸環境特性の検討

岸 靖之* ・ 林 正敏** ・ 池田知司*** ・ 田中昌宏****
角湯正剛***** ・ 原田 晃***** ・ 田中博通***** ・ 高橋正征*****

水深 300 m 層から汲み上げた海洋深層水を火力発電所の冷却水として利用後に表層放流した場合の環境変化を、深層水の取放水に伴う CO_2 収支と、放流域の水温、pH 変化および栄養塩拡散特性から検討した。深層水を取水すると CO_2 を大気に放出する可能性がある。しかし、深層水を火力発電所の冷却水に利用することで発電効率が向上し、発電所からの排出 CO_2 量を削減できると推定された。放流域の水温、pH 変化および栄養塩拡散の検討では、pH、水温、栄養塩の順に変化域が広がることが明らかとなった。放流域の温度変化域は既存の表層取水型発電所に比べて狭くできることが明らかとなった。

1. はじめに

水深 300 m 付近の海水（通称、海洋深層水）を汲み上げ、産業的に利用する試みが自治体を中心に推進されている。これらの取水規模は $10^3 \sim 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$ のスケールであり、取・放水量が少ないことから、これまで環境変化に関する検討は行われてこなかった。

しかし、深層水の低温性に着目した火力発電所の発電効率の向上に利用する試みや、深層水の富栄養特性を利用した海域肥沃化のための検討が進められており、これらの取水規模は $10^5 \sim 10^6 \text{ m}^3/\text{日}$ のスケールに広がられている。また、深層水は低温特性や富栄養性を有するとともに無機炭酸濃度が高いことが知られており、このような特徴を有する深層水を大量放流した場合の環境影響を、事前検討する必要がある。

本研究では、 $10^6 \text{ m}^3/\text{日}$ スケールで深層水を取水し、火力発電所（60 万 kW 級 LNG 発電所）冷却水として利用した場合の環境変化について、 CO_2 収支と、放流域における水温、栄養塩および pH の変化を中心に検討した。

本研究は 1999～2003 年度に実施した NEDO 共同研究「エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発」の成果の一部を使用したものである。

2. 深層水の取水に伴う CO_2 収支の検討

(1) 汲み上げ深層水の測定方法

高知県室戸市（高知県海洋深層水研究所、取水水深 320～340 m）と富山県滑川市（富山県水産試験場、取水水深 320 m）で取水された深層水について、1 年間（2000 年 10 月～2001 年 9 月）にわたってサンプリング調査を実施した。深層水の採水は概ね 1 回/月の頻度とし、全炭酸、全アルカリ度、無機態窒素、リン酸、珪酸、塩分を

測定した。全炭酸と全アルカリ度用試水は大気との接触が起こらないように採水し、水銀を添加後密封した。また、栄養塩用試水は採水後直ちに凍結した。全炭酸の測定には電量滴定法（25℃）を用い、全アルカリ度の測定は酸塩基滴定法（25℃）を用いた。栄養塩の分析は TRAACS 2000 を用い、塩分の測定には Autosal を用いて分析を行った。

(2) 深層水の取水による CO_2 収支の検討

深層水中には高濃度の栄養塩と溶存無機炭酸物質が存在している (Millero, 1996)。深層水を大量に取水し海表面に放流した場合、 CO_2 を大気中に放出する可能性がある。しかし、同時に高濃度の栄養塩が供給され海藻や植物プランクトンによる生物固定が行われ、一度大気中に放出された CO_2 を再び海洋に吸収させる可能性もある。本検討では汲み上げ深層水の放流に伴う CO_2 収支を、生物固定の有無に分けて推定した。 CO_2 収支の計算方法は、原田 (2000) に準じて行なった。すなわち、化学平衡計算は Lewis・Wallace (1998) にしたがひ、平衡定数は Roy ら (1993) を適用した。

生物固定が無い場合の CO_2 収支は、深層水中の全炭酸濃度と大気平衡後の全炭酸濃度の差から計算した。深層水中の全アルカリ度は変化しないと仮定し、大気平衡後の全炭酸濃度は、深層水中の全アルカリ度と大気平衡後の CO_2 分圧より計算した。大気平衡後の CO_2 分圧は、大気中の CO_2 分圧と等しくなるとし、 $360 \mu\text{atm}$ とした。

生物固定を考慮した場合の CO_2 収支は、深層水中の全炭酸濃度から、生物固定された全炭酸量と大気平衡後の全炭酸濃度を差し引いて求めた。光合成による CO_2 固定量は、無機態窒素濃度と Redfield 比（海洋における有機物の一般的モル比、 $\text{C:N:P}=106:16:1$ ）から計算した。生物固定が起こると深層水中の硝酸態窒素が消費されるため、アルカリ度が変化するとともに、リン酸濃度が減少する。そこで、大気平衡後の全炭酸濃度は、深層水中のアルカリ度およびリン酸濃度の変化を考慮して計算した。

(3) 深層水の汲み上げによる CO_2 収支の検討

深層水中の全炭酸、全アルカリ度の測定結果を図一1

* 正会員	工修	(株)関西総合環境センター技術開発部
**	農修	(株)関西総合環境センター技術開発部
***	農博	(株)関西総合環境センター技術開発部
**** 正会員	工博	鹿島建設(株)技術研究所
***** フェロー	工博	(財)電力中央研究所環境科学研究所
*****	水博	(独)産業技術総合研究所環境管理研究部門
***** 正会員	工博	東海大学海洋学部海洋土木工学科
*****	理博	高知大学大学院黒潮圏海洋科学研究科

に示した。深層水中の全炭酸濃度は、高知では $2,244 \sim 2,319 \mu\text{mol/kg}$ 、全アルカリ度では $2,272 \sim 2,303 \mu\text{eq/kg}$ の範囲にあった。富山では、全炭酸は $2,305 \sim 2,326 \mu\text{mol/kg}$ 、全アルカリ度は $2,251 \sim 2,260 \mu\text{eq/kg}$ の範囲であった。全炭酸濃度は富山がやや高く、全アルカリ度は高知がやや高くなったが、両地点で極端な違いは認められなかった。高知および富山の汲み上げ深層水のデータを基に二酸化炭素フガシティー ($f\text{CO}_2$ 、海水中での CO_2 活量) を計算し、図-2 に示した。高知では $1,607 \sim 3,319 \mu\text{atm}$ 、富山では $2,400 \sim 4,291 \mu\text{atm}$ であり、両地点とも $f\text{CO}_2$ は夏に高く、冬に相対的に低くなる傾向を示した。現在の大気中の CO_2 分圧を $360 \mu\text{atm}$ とすると、高知および富山で推定された海水中の $f\text{CO}_2$ はともに $360 \mu\text{atm}$ を大きく超えるため、深層水の汲み上げによって大気中に CO_2 が放出される可能性があることが示された。

深層水を放流した場合の大気-海洋間における CO_2 収支の推定結果を図-3 に示した。高知では生物固定を考慮しない場合で $238 \sim 385 \mu\text{mol/kg}$ 、生物固定を考慮した場合は $74 \sim 178 \mu\text{mol/kg}$ が大気中に放出されると推定された。富山では生物固定を考慮しない場合で $261 \sim 412 \mu\text{mol/kg}$ 、生物固定を考慮した場合は $81 \sim 230 \mu\text{mol/kg}$ が大気中に放出され、両地点はほぼ同程度の放出量と推定された。1,000 $\text{m}^3/\text{日}$ のスケールで1年間取放水し続けた場合での CO_2 収支を表-1 に示した。高知では生物固定を考慮しない場合では年間に 5.3 ton、生物固

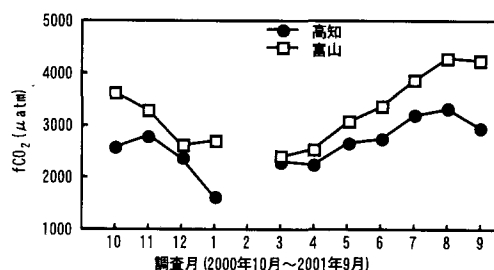
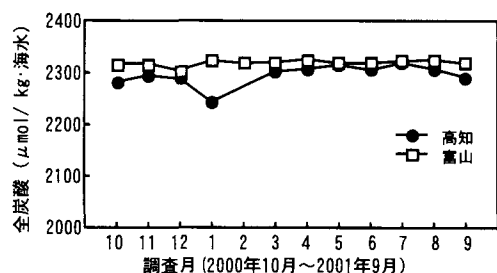


図-2 汲み上げ直後の深層水の $f\text{CO}_2$ 計算結果

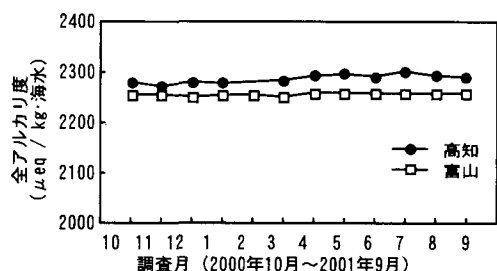
定を考慮した場合では年間に 2.1 ton の CO_2 が大気中に放出されると推定された。また、富山では生物固定を考慮しない場合では年間に 5.5 ton、生物固定を考慮した場合では年間に 2.6 ton の CO_2 が大気中に放出されると推定された。日本人 1 人当たりの CO_2 放出量は $9.8 \text{ ton} \cdot \text{CO}_2/\text{年}$ と見積もられている (環境省, 2003)。このため、深層水の汲み上げによる大気への CO_2 放出量は、現状の我が国における取水スケール (数千 $\sim 1 \text{ 万 m}^3/\text{日}$) では、温暖化に及ぼす影響は、小さいと考えられた。

(4) 深層水の発電所冷却水への適用

角湯 (2000) は深層水の低温安定特性を火力発電所の冷却水に利用することで、既設の火力発電所では概ね 1.4%、新設では 2.9% の発電効率が向上すると推定した。この結果を基に、出力 60 万 kW 級 LNG 火力発電所で、100 万 $\text{m}^3/\text{日}$ の取水を行った場合の CO_2 収支の推定結果を表-2 に示した。ここでは、LNG 火力発電所の

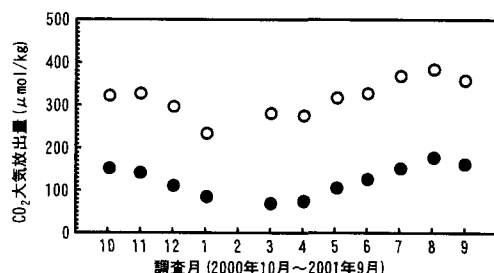


(a) 全炭酸の季節変化

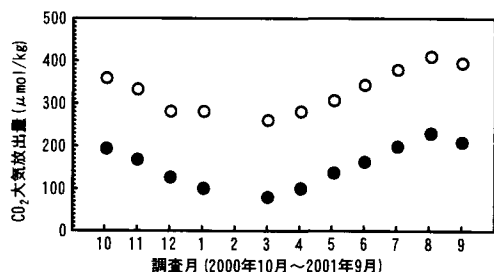


(b) 全アルカリ度の季節変化

図-1 深層水中の全炭酸濃度と全アルカリ度の系時変化



(a) 高知



(b) 富山

図-3 深層水の汲み上げに伴う CO_2 放出量 (○: 生物固定なし, ●: 生物固定考慮)

表一 深層水を 1,000 m³/日で取水した場合の CO₂ 放出量の推定

地 点	全炭酸濃度 μmol/kg	生物固定がない場合			生物固定を考慮した場合			
		大気平衡後 μmol/kg	収 支 μmol/kg	年間収支* CO ₂ ton/y	生物固定後 μmol/kg	大気平衡後 μmol/kg	収 支 μmol/kg	年間収支* CO ₂ ton/y
高 知	2,244-2,319 (2,296)	1,923-2,027 (1,976)	238-385 (321)	5.3	2,112-2,133 (2,123)	1,944-2,049 (1,997)	74-178 (126)	2.1
富 山	2,326-2,304 (2,320)	1,914-2,060 (1,987)	261-412 (333)	5.5	2,154-1,171 (2,164)	1,933-2,080 (2,006)	81-230 (157)	2.6

(), 平均値; *, 1000 m³/日で 365 日深層水を汲み上げたとして計算 (平均値使用)。

CO₂ 排出量を 137 gC/kWH (燃料相当分) とし、発電所利用率を 50%、深層水利用による発電効率の向上を 1.0% とした。

深層水を冷却水に利用することで、発電所からの CO₂ 排出量は約 13,000 ton・CO₂/年を削減できると推定された。一方、深層水の汲み上げによって大気中に放出される CO₂ 量は、約 2,600 ton・CO₂/年であった。この結果、生物固定を考慮しない条件では、深層水の冷却水利用によって約 10,400 ton・CO₂/年の放出量が削減できると推定された。また、生物固定を考慮した条件では約 1,600 ton・CO₂/年が生物固定されることになり、約 12,000 ton・CO₂/年の放出量が削減できると推定された。

3. 深層水の放流に伴う環境変化の検討

(1) 放流域の環境変化の検討方法

深層水を火力発電所の冷却水に利用した後に表層放流した場合、放流域では周囲水と異なる水塊が形成される可能性がある。この水塊は周囲水に比べて、水温が異なり、高栄養塩濃度であり、低 pH となる可能性がある。また、放流された深層水は、季節的な水塊構造と昇温条件に応じて、放流海域の周囲水と密度差が生じ、拡散特性が異なる。このため、汲み上げ深層水を大量に放流する場合の環境変化の様相を把握する必要がある。

本検討では、高知県室戸市高岡地区の前面海域をモデル海域とし、先に示した汲み上げ深層水の水質データと本研究で取得した対象海域の水質データを用いて検討を行った。取水後の昇温は 15°C として計算した。表層海水

を冷却水として利用する既存発電所と比較するため、表層海水を 7°C 昇温後に放流した場合の計算も併せて行った。対象海域の流れ場は、DELFT3D・鹿島モデルを用いて計算した。本モデルは、鉛直方向に静水圧近似を仮定した三次元流動モデルである。座標系は水平方向に直交曲線座標、鉛直方向に σ 座標を用いており、海岸地形および海底地形を高精度に表現できるものである。計算領域は、岸沖方向が 3,800 m、沿岸方向が 8,700 m とし、計算格子は水平 50 m×50 m、鉛直は 14 層 (不等間隔) とした。(計算方法の詳細は田中ら (2004) 参照。)

放流域の pH 計算は、Lewis・Wallace (1998) のプログラムにしたがった。pH 計算で必要となる、深層水の放流に伴う各計算格子での全炭酸濃度変化、全アルカリ度変化および栄養塩濃度変化は、深層水の実測データと流動計算から得られた希釈率から計算した。

(2) 放流域の環境変化

深層水の放流に伴う水温変化、栄養塩希釈率および pH の海表面分布および放水口位置での岸沖断面分布を図-4 に示し、海表面における 1°C 以上の水温上昇面積、希釈率 20 倍以下の面積および pH 7.8 未満の面積を表-3 に示した。

深層水を 15°C 昇温後に表層放流した場合、夏季は表層水とほぼ等密度の海水となるのに対し、冬季は軽密度排水となる。このため夏季に放流された深層水は表層から底層にかけて拡散するのに対し、冬季に放流された深層水は表層を中心に拡散する。環境水温に対して 1°C 以上の温度変化域は、冬季は広く、夏季は狭くなり、夏季は

表二 深層水の発電所利用による CO₂ 削減効果

項 目		高 知	富 山
発電利用時の CO ₂ 削減期待値* A, (ton/y)		13,201	
生物固定無し	深層水取水 CO ₂ 放出量 B, (ton/y)	2,633	2,733
	発電利用による CO ₂ 収支 A-B (ton/y)	10,568	10,468
生物固定考慮	深層水取水 CO ₂ 放出量 B, (ton/y)	1,037	1,291
	発電利用による CO ₂ 収支 A-B (ton/y)	12,165	11,910

*60 万 kW LNG 発電所を想定 (取水量 100 万 m³/日)。発電所利用率を 50% とし、発電効率の向上を 1% で計算。

冬季の約 1/250 となった。栄養塩は、夏季および冬季ともに広範囲に拡散し、夏季および冬季の海表面の 20 倍希釈面積は、それぞれ約 $1.1 \times 10^6 \text{ m}^2$ 、約 $7.0 \times 10^6 \text{ m}^2$ となった。pH の変化は高炭酸を含む深層水特有の現象である

が、環境基準値の 7.8 未満で判断すると、夏季および冬季ともに影響範囲は放水口のごく近傍に限られ、これによる放流域の変化は $1.1 \times 10^4 \text{ m}^2 \sim 1.1 \times 10^5 \text{ m}^2$ でありごく狭域であった。

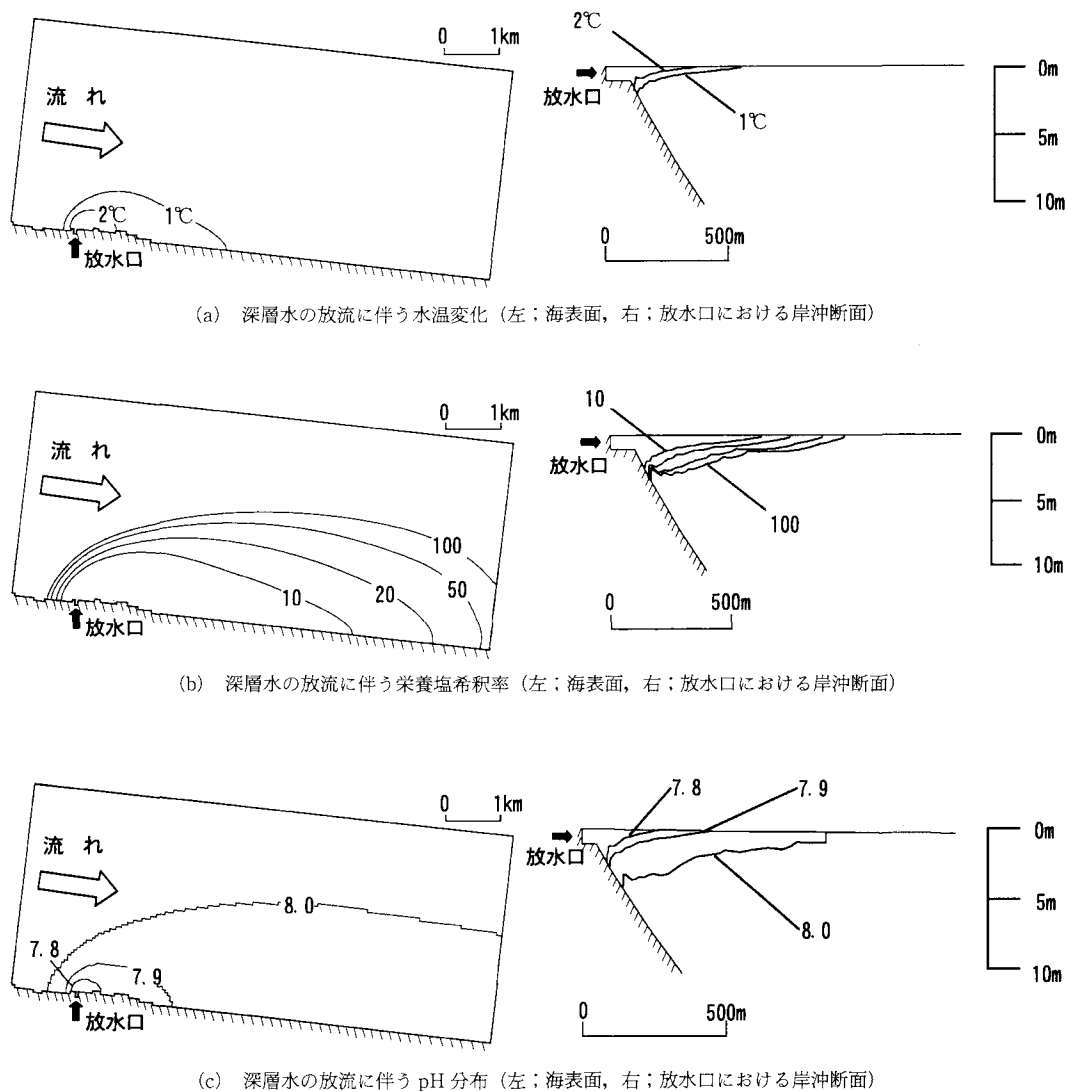


図-4 深層水の放流に伴う環境変化 (冬季)

表-3 深層水放流域の各項目の面積と、表層水利用時の比較

計 算 条 件		水温変化域 ^{*1}	pH 変化域 ^{*2}	栄養塩濃度拡散域 ^{*3}
深層水利用 $\Delta t = 15^\circ\text{C}$	夏 期	6,282	11,341	1,119,095
	冬 期	1,645,845	114,230	6,956,736
表層水利用 $\Delta t = 7^\circ\text{C}$	夏 期	1,230,158	—	—
	冬 期	1,660,687	—	—

^{*1}, 1°C 以上の変化域面積 (m^2) ; ^{*2}, pH 7.8 未満面積 (m^2) ; ^{*3}, 20 倍希釈域面積 (m^2)

表-3 に表層水を取水し、7°C昇温して放流した場合（通常の発電所）の1°C以上水温変化面積の計算結果を示した。冬季の水温変化域は深層水取水のケースとほぼ同等であるが、夏季の水温変化面積は深層取水のケースに比べて、約200倍と極めて大きくなる結果となった。このため年間を通じた深層水の冷却水利用は、表層取水を行う既存発電所に比べ格段に拡散範囲を狭くすることが可能であると推定された。

4. 考 察

深層水を大量に取水し、放流した場合の環境への作用として、CO₂の放出の可能性と放流域の水温、pH、栄養塩濃度変化について検討した。このうち、CO₂収支、pHおよび栄養塩濃度の変化は、深層水の放流によって特徴的に起こる変化である。

CO₂放出の可能性については、深層水の低温安定特性を発電所冷却水として利用することにより、発電所から大気中へ放出されるCO₂を削減できることが明らかとなった。また、放流域の環境変化は、深層水を15°C昇温後に放流した場合、従来型の表層水取水型発電所に比べて、水温変化域を狭くすることができることが明らかとなった。一方で、ごく狭い領域であるが低pH域が形成されること、また広範囲において高栄養塩濃度域が形成されることが明らかとなった。深層水を放流した場合、植物プランクトンの増殖が促進されることが明らかとなっている（池谷ら、2001；Hayashiら、2002）。また、赤潮生物の増殖を抑制し、珪藻を増殖させる効果（Ichimiら、in press）や、海藻の成長促進効果も期待されている（日本海洋開発産業協会、2003）。これらの知見は深層水の放流により、場所によっては富栄養化を促進させる可能性を有するものの、海域の一次生産を促進し、また海藻の生育を促進させるプラス効果が期待できることを示唆す

るものである。

現在、本研究の中で、深層水の放流による富栄養化の検討、藻場への作用を検討中である。今後、これらの成果も加え、深層水の発電所冷却水利用による環境変化に及ぼす作用を明らかにする。

参 考 文 献

- 池谷 透・中谷誠治・深堀芳雄・西岡 純・武田重信・川延京子・高橋正征（2001）： 海洋深層水による亜熱帯表層水の肥沃化効果の屋外メソコスム実験による検証，海洋深層水研究，第2巻第1号，pp. 73-86.
- 角湯正剛（2000）： 火力・原子力発電所での海洋深層水の冷却水としての利用の可能性，海洋深層水，月刊海洋（総特集），pp. 229-233.
- 環境省編（2003）： 平成15年版環境白書，p. 92.
- 社団法人日本海洋開発産業協会（2003）： 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成果報告書，1123 p.
- 田中昌宏・岸 靖之・池田知司・高月邦夫・乾 悦郎（2004）： 海洋深層水の発電所冷却水利用後の沿岸放流拡散特性に関する検討，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1276-1280.
- 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，海洋深層水，月刊海洋（総特集），pp. 56-61.
- Hayashi, M., T. Ikeda, K. Otsuka and M. Takahashi（2002）： Assessment on environmental effects of deep ocean water discharged into coastal sea, Recent advances in marine science and technology, pp. 535-546.
- Ichimi, K., T. Ikeda, K. Tada and S. Montani（2004）： Growth characteristics of noxious flagellates and diatoms in deep seawater, Journal of Applied Phycology (in press)
- Lewis, E. and D. W. R. Wallace（1998）： Program Developed for CO₂ System Calculations, ORNL/CDIAC-105, Carbon Dioxide Information Analysis Center.
- Millero, F. J（1996）： Chemical Oceanography, CRC Press LLC, 469 p.
- Roy, R. N., L. N. Roy, K. M. Vogel, C. Porter-Moore, T. Pearson, C. E. Good, F. J. Millero and D. M. Campbell（1993）： The dissociation constants of carbonic acid in seawater at salinities 5 to 45 and temperatures 0 to 45°C, Marine Chemistry, Vol. 44, pp. 249-267.