

成層水域における下層への土砂投入に伴う濁りの拡散特性

Characteristics of Turbidity Dispersion due to Disposal of Dredged Sediments into the Bottom of Stratified Water Column

武田将英¹・松澤圭祐²・佐々木 淳³・津田宗男⁴・松田信彦⁵

Masahide TAKEDA, Keisuke MATSUZAWA, Jun SASAKI, Muneo TSUDA and Nobuhiko MATSUDA

Although backfilling of a dredged trench is an effective environmental restoration measure in many of bays, its efficient methodology has not been established so far. Thus, we considered an appropriate sediment disposal methodology to suppress dispersion of turbidity in the surrounding environment on the basis of experimental and numerical analyses. We adopted a tremie pipe, disposing sediments into the bottom of the trench, and considered the effects of the solvent and sediment densities, and the density of the lower water as well as the intensity of stratification. We clarified the characteristics of turbidity dispersion behaviors and found that a special care should be made when the density of the solvent lower than that of the bottom water in the trench, which might lead to rising and dispersion of turbid waters.

1. はじめに

我が国では、明治以降の沿岸域開発の埋立材料として、海底土砂が大量に採取された。その結果、これらの採取場所であった海底には、周辺の実地地盤よりも深く掘り下げられた浚渫窪地が、全国各地に点在している。このような浚渫窪地は、内藤ら (2006) により「局所的な窪地タイプ」と定義され、ここでは夏季に貧酸素水塊が発生し、生物生息環境に悪影響を及ぼすことがよく知られている。そのため、浚渫窪地の埋戻し事業が各地で検討され、東京湾、三河湾などの一部の地域では既に実施されている。

内藤ら (2008) は、三河湾窪地の底開式土運船による埋戻し時に、濁りの現地観測を実施し、成層発達期の夏季には濁りが底層に留まり、成層が弱まった秋季には濁りが中層にも拡がることを報告している。このように、水域における土砂投入では、成層の微小な密度差が濁りの拡散に影響を及ぼすことが知られている。しかし、成層の状態が、濁りの拡散現象にどのような影響を及ぼすかは明らかになっていない。

そこで、本研究では、局所的な窪地タイプの窪地などで見られる二層や三層の密度構造を対象に、トレミー管による下層への土砂投入に伴う濁りの拡散特性を明らかにすることを目的とした。始めに小規模な水理実験によって、濁りの拡散現象を把握し、次に水理実験を再現す

る数値計算によって、濁りの拡散機構について検討を行った。また、トレミー管を用いた土砂投入時に、留意すべき密度構造について検討を行った。

2. 下層への土砂投入に伴う濁りの拡散特性

(1) 水理実験による濁りの拡散現象の把握

a) 実験目的・方法

成層の有無によってどのような濁りの拡散現象が見られるかを把握するため、小規模な水理実験を行った。小規模な実験であることから、土砂を直接投入すると微妙な条件の違いによって濁り発生量が大きく変化することが見込まれたため、実験の再現性が高い濁水を投入した。実験には、図-1に示す上下2層 (各層厚10cm) の密度構造を模擬できる矩形の実験装置を用いた。下層に濁水を直接投入できるように、トレミー管を模擬した鉛直管 (内径24mm) を用いて投入を行った。密度成層の最大密度差は、内藤ら (2008) の研究を参考に 2kg/m^3 とし、実験中の水温変化は微小なものとして塩分で水槽水の密度を調整した。濁水の濁り粒子にはカオリン (最大粒径 0.0750mm , 粘土分 77.6% , シルト分 22.4% , 土粒子密度 $\rho_s = 2690\text{kg/m}^3$) を、濁水の溶媒に水槽水用の密度調整水を用いて、密度 1010kg/m^3 となるよう濁水を作成した。濁水の投入条件をほぼ一定とするため、濁水供給バルブを瞬時に開放することにより、4秒間で 100cm^3 の濁水を連続的に投入した。実施した実験条件を表-1に示す。

b) 実験結果

投入開始10秒後と同5分後の濁りの拡散現象を図-2に示す。いずれも投入初期には底面と衝突し、濁りが 5cm 程度上昇した後、底層を這うように濁りが拡がった。濁水の溶媒が投入地点の水塊と同じ密度であるケース①で

1 正会員	東亜建設工業(株) 技術研究開発センター
2	横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻
3 正会員	博(工) 横浜国立大学教授 大学院工学研究院
4 正会員	博(工) 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター
5 正会員	博(工) 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター

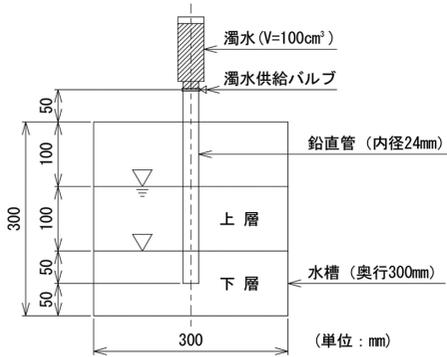


図-1 実験装置

表-1 実験条件

ケース	成層の有無	水槽水		濁水	
		上層密度 (kg/m ³)	下層密度 (kg/m ³)	溶媒密度 (kg/m ³)	濁水密度 (kg/m ³)
①	なし	1002	1002	1002	1010
②				1000	
③	あり	1000	1002	1000	

は、濁りは底面直上部に限定された。一方、濁水の溶媒密度が投入地点の水塊の密度よりも小さいケース②、ケース③では、濁りは時間の経過とともに徐々に上昇する様子が観察された。密度成層のないケース②の場合には、濁りの上昇は上層にまで達したが、密度成層があるケース③の場合には、濁りは下層の水塊内に留まった。このように、投入する濁水の溶媒と投入地点の水塊との密度差や密度成層の有無によって、濁りの拡散現象は大きく異なることが分かった。

(2) 数値計算による濁りの拡散機構

a) 計算方法

前述の小規模な水理実験では、計測器の設置が困難などの理由により、濁度、流速、流体密度などの物理量の取得を行うことができなかった。そのため、何が原因で

濁りの拡散現象が異なるのかという濁りの拡散機構を解明するには至らなかった。そこで、水理実験を再現する数値計算を実施し、計算によって得られた物理量から濁りの拡散機構について検討することにした。

本検討では、デンマーク水理研究所 (DHI) が開発した自由水面モデルを持つ準3次元流体解析プログラム MIKE3 を使用した。MIKE3 で用いられる支配方程式は、式 (1) の非圧縮流体の連続式、式 (2) の非静水圧近似の運動方程式、式 (3)～式 (5) に示す塩分・水温・濁り (質量濃度) の移流拡散方程式、UNESCO (1981) の海水の状態方程式である。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial (u_j S)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_s \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial \{ (u_j + w_{sj}) C \}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_c \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + SS \dots\dots (5)$$

ここに、 ρ : 流体密度、 P : 圧力、 t : 時間、 u_i : x_i 方向の流速、 g_i : 重力、 ν_T : 渦動粘性係数、 δ_{ij} : クロネッカーのデルタ、 k : 乱流エネルギー、 S : 塩分、 T : 水温、 C : 濁りの質量濃度、 D_s 、 D_T 、 D_c : 塩分、水温、濁りの拡散係数、 w_s : 濁りの沈降速度、 SS : 濁りのソース項である。渦動粘性係数、拡散係数は、水平方向には Smagorinsky モデル、鉛直方向には k - ϵ モデルを適用した。MIKE3 では、これらの式を直角座標のスタッガード格子を用いて、差分法により離散化を行い、陰解法の一つである ADI 法などを用いて連立計算を行う。

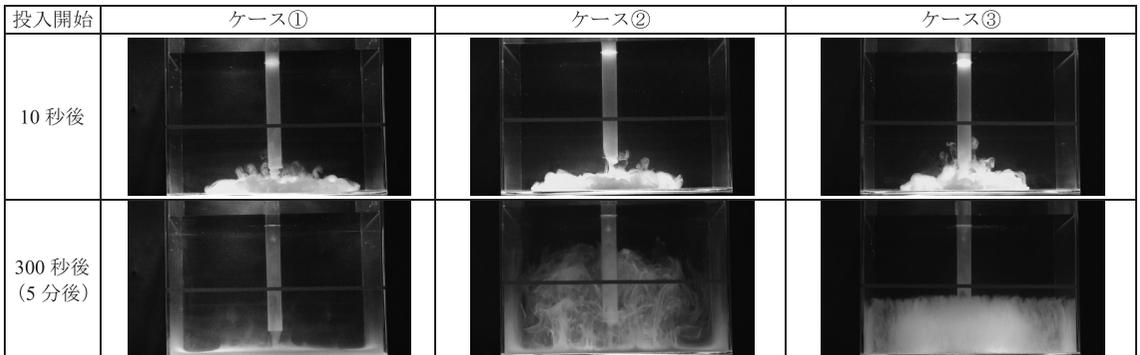


図-2 濁りの拡散現象 (水理実験)

MIKE3には、z方向の最小格子間隔の制限があるため、今回の検討では、密度フルード相似を用いて水理実験の60倍縮尺とした。水理実験で用いた表-1に示す条件について、図-3に示す計算モデルを用いて、奥行1格子の断面2次元計算を行った。ただし、図-3には以降の章で用いるため、中層を描いている。

今回の計算では、上層6m、下層6mの層厚を持つ2層で計算を行った。なお、濁り粒子のフロック化は考慮せず、笠西ら(2002)を参考に感度分析を行って、濁りの沈降速度を $w_s=0.0023\text{m/s}$ に設定した。濁水は、上層にある計算セルからの下方向への湧出しとして、流量 $0.01613\text{m}^3/\text{s}$ 、初速度 30m/s 、発生原単位 $2.67 \times 10^{-3}\text{ton}/\text{m}^3$ の一定条件で32秒間与えた。

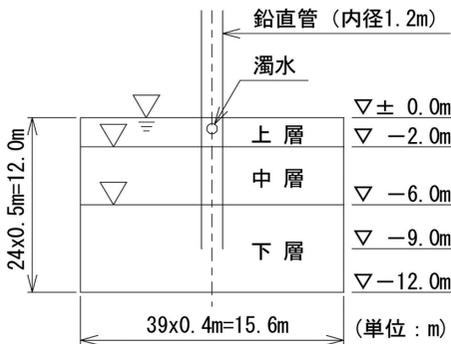


図-3 計算モデル

b) 計算結果

投入開始20分後と同38分50秒後における濁りの分布を図-4に、同じく密度分布を図-5に示す。実験では濁水100ccを4秒間で投入したが、流量を一定に投入することはできなかった。一方、今回の計算では、濁水の流量や落下による初速度を一定に与えているため、実験と数値計算では、投入初期の底層を言う状態の時刻は合っていない。しかし、その後に見られる図-2の300秒後における拡散現象は、今回の数値計算で再現することができた。具体的には、下層と濁水の溶媒密度が等しいケース①では、図-4のように濁りは底面直上部に限定された。図-5を見ると、水槽水の密度はほぼ均質で、濁り粒子が沈降した底面直上部のみ密度が上昇していることが理解できる。一方、濁水の溶媒密度が投入地点の水塊の密度よりも小さいケース②、ケース③では、濁りは時間の経過とともに徐々に上昇する状況が観察された。密度成層のないケース②の場合には、図-4のように濁りの上昇は上層にまで達した。図-5を見ると、水槽水の密度よりも密度の小さい水塊が発生していることが分かる。これは、溶媒密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ の濁水が、濁り粒子の沈降によって、下層の密度 $1002\text{kg}/\text{m}^3$ よりも密度が小さくなり、浮力によって上昇したものと考えられる。密度成層があるケース③の場合には、図-4のように濁りは下層の水塊内に留まった。図-5を見ると、ケース②と同様に下層の密度 $1002\text{kg}/\text{m}^3$ よりも密度の小さい水塊が発生していること

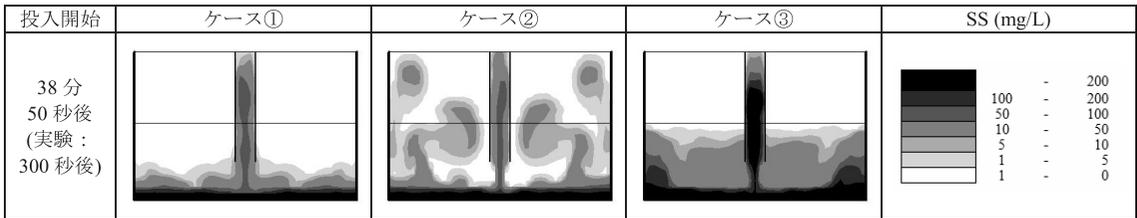


図-4 濁りの分布 (数値計算)

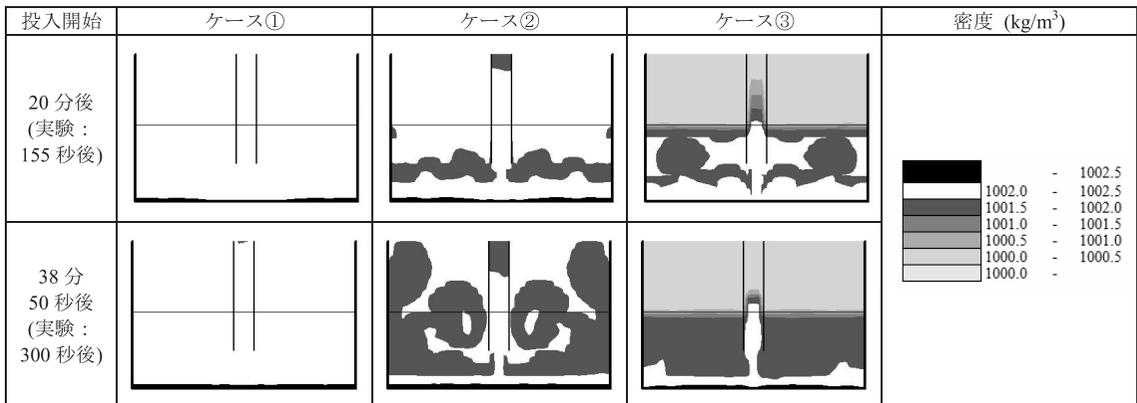


図-5 密度分布 (数値計算)

が分かる。しかし、上層の密度 1000kg/m^3 までは小さくならず、浮力が得られないため、密度成層が濁り粒子の輸送の障壁となり、濁りは下層に留まったと理解できる。

以上より、これらの濁りの拡散機構は、粒子の沈降に伴って発生する浮力に起因していることが分かった。また、濁りの上昇の程度は、濁水の溶媒と投入地点の水塊との密度差と濁りの沈降速度によって変化するものと考えられる。

3. トレミー管による土砂投入時に留意すべき密度構造

砂撒船などのトレミー管による土砂投入工事では、土砂閉塞防止のためにポンプで汲み上げた海水をトレミー管内に供給することがよく行われている。前章までの検討の結果、トレミー管内に供給される水（溶媒）の密度によって濁りの拡散現象は大きく異なり、ある密度構造となる条件において濁りが浮上する可能性があることが分かった。

そこで、本章では、トレミー管による土砂投入時に留意すべき密度構造について、前章と同様に数値実験によって検討を行った。

(1) 実験条件

図-3に示す上層2m、中層4m、下層6mと設定した三層構造の計算モデルを用いた。実施した計算条件を表-2に示す。計算条件は、上層と中層の密度が等しい二層の密度構造と上層、中層、下層の密度がそれぞれ異なる三層の密度構造に大別される。

今回の検討では、トレミー管による土砂投入時に上層から取水した水をトレミー管内に供給することを想定し、上層密度と溶媒密度を等しく設定した。また、濁水密度は、国土交通省港湾局（2004）の手引きを参考に、

砂撒船の汚濁発生量を算出し、溶媒密度に 9.15kg/m^3 を加えて設定した。

(2) 二層の密度構造の場合

表-2に示すケースi~vのように、窪地に見られる二層の密度構造を対象とし、夏季の成層が強い条件から、秋季から冬季にかけて成層が弱まる条件において、濁りの拡散現象がどう変化するのかを検討した。ここでは、現場海域の条件に近づけるため、塩分を33.5psuで一定とし、水温で密度を調整した。

ケースi, iii, vにおける38分50秒後の濁りの分布を図-6に示す。成層の密度差が 0.4kg/m^3 と最も大きいケースiでは、表-2に示すケース③の水力実験や数値計算の結果と同様、密度成層が濁り粒子の輸送の障壁となり、濁りは下層に留まった。次に、成層の密度差を 0.2kg/m^3 と小さくしたケースiiiでは、下層内での濁りの上昇は小さくなった。成層の無いケースvでは、水力実験や数値計算のケース①と同様に濁りは底層に限定された。つまり、完全な二層の密度構造では、成層の有無や密度差の

表-2 計算条件

ケース	成層の有無	水槽水			濁水		
		上層密度 (kg/m^3)	中層密度 (kg/m^3)	下層密度 (kg/m^3)	溶媒密度 (kg/m^3)	濁水密度 (kg/m^3)	
i	あり	1023.6			1024.0	1023.6	1032.75
ii		1023.7				1023.7	1032.85
iii		1023.8				1023.8	1032.95
iv		1023.9				1023.9	1033.05
v	なし	1024.0			1024.0	1033.15	
I	あり	1017	1023	1024.0	1017	1026.15	
II			1023.95				
III			1024				

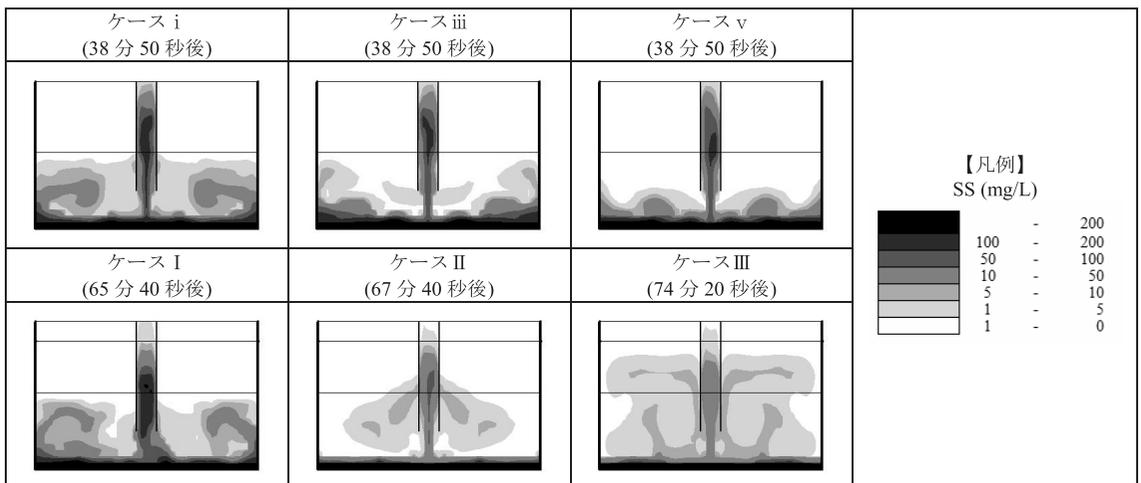


図-6 濁りの分布（二層を対象とした数値実験）

大小に係わらず濁りは下層内に留まりやすいと理解できる。

(3) 三層の密度構造の場合

博多湾室見川河口沖(山崎ら, 2007)や, 大阪湾堺泉北港北泊地などのように, 比較的大きな河川の河口付近に位置する窪地では, 上層に河川水, 中層に海水, 下層に窪地内の低温な高密度水といった三層構造が夏季に形成されやすいと考えられる。一方, 成層が弱まった秋季から春季にかけては, 上層に河川水, 中下層に海水の二層構造になると考えられる。そこで, 表-2のケースⅠ~Ⅲに示す条件で検討を行った。ケースⅠは成層の発達する夏季, ケースⅡは成層の弱まった秋季, さらにケースⅢは中層と下層がよく混合した冬季(二層)を想定している。今回は, 河川水が上層に存在する状況を考慮して, 水温と塩分によって各層の密度を調整した。

最も濁りが上昇した時刻における濁りの拡散現象と密度分布を図-6に示す。下層と中層の密度差が 1kg/m^3 と大きいケースⅠでは, 溶媒密度と下層密度の差が 7kg/m^3 と大きいために, 浮力を受けて濁りが徐々に上昇する。しかし, 下層と中層の躍層が濁り粒子の輸送の障壁となつて, 濁りは下層に留まった。下層と中層の密度差が 0.05kg/m^3 と極めて小さいケースⅡでは, 下層と中層の躍層の輸送の障壁としての機能が弱まり, 中層下部にまで濁りが上昇している。また, 下層と中層の密度差のないケースⅢでは, 上層と中層の躍層付近まで濁りが上昇し, この躍層が濁り粒子の輸送の障壁として働き, 中層上部に達している。

このように, 河口付近に位置する窪地へのトレミー管による土砂投入では, 窪地内に成層が発達していない時期(秋季~春季)に, 上層から取水した水を管内に供給した結果, 濁りが浮上して窪地の外に拡がる可能性がある。そのため, 底層から取水するなどの配慮が必要になると考えられる。

4. まとめ

本研究では, 局所的な窪地タイプの窪地などで見られる二層や三層の密度構造を対象に, トレミー管による下層への土砂投入に伴う濁りの拡散特性を明らかにすることを目的として, 水理実験と数値計算を実施した。その

結果, 以下の結論が得られた。

- 1) 濁水密度と投入速度が同じであっても, 濁水の溶媒密度と投入位置の水塊密度の密度差によって, 濁りの拡散特性は大きく異なることが分かった。
- 2) これらの濁りの拡散機構は, 粒子の沈降に伴って発生する浮力に起因することを明らかにした。
- 3) 河口付近に位置する窪地へのトレミー管による土砂投入では, 窪地内に成層が発達していない時期(秋季~春季)に, 上層から取水した水を管内に供給した結果, 濁りが浮上して窪地の外に拡がる可能性がある。そのため, 底層から取水するなどの配慮が必要になると考えられる。

なお, 本研究は, 水理実験とその再現計算に基づく基礎的研究であり, 現段階では定性的な理解に留まっている。また, 室内実験では現地 비해, 乱流の影響が小さいなどの課題が残っており, 実海域へ適用するに際しては, 現地スケールでの検討を進めていく必要があることを付記する。

謝辞: 本研究の一部は, 2007年度~2010年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)課題番号19360220によるものである。ここに記し, 謝意を表する。

参考文献

- 笠西孝行・鈴木素之・山本哲朗(2002): pHが異なる懸濁液の沈降・堆積特性, 山口大学工学部研究報告, pp. 133-142.
- 国土交通省港湾局(2004): 「港湾工事における濁り影響予測の手引き」, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nigori/index.html>, 参照2009-05-01.
- 内藤了二・井上徹教・中村由行・浦瀬太郎・久野賢二(2008): 三河湾窪地の埋め戻し土砂投入時における濁りの拡散特性と密度成層の効果, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1251-1255.
- 内藤了二・中村由行・今村均・佐藤昌宏(2006): 浚渫跡地の修復に関する施工上の影響と研究開発課題の抽出, 海洋開発論文集第22巻, pp.649-654.
- 山崎惟義・渡辺亮一・北野義則・馬場崎正博・熊谷博史(2007): 博多湾室見川河口沖窪地の貧酸素水塊の挙動に関する研究, 海岸工学論文集第54巻, pp.1001-1005.
- UNESCO(1981), The practical salinity scale 1978 and the international equation of state of seawater 1980, Unesco technical papers in marine science, 36pp.