

D-4 ペルシャ湾岸の原油汚染等が海洋環境に及ぼす影響の評価に関する研究

(1) ペルシャ湾沿岸域における流動と物質移動過程に関する研究

運輸省 海上保安庁水路部 沿岸調査課 桑木野 文章・佐藤 敏

平成3-5年度合計予算額 12,493千円
(平成5年度予算額 4,321千円)

〔要旨〕ペルシャ湾における既存海洋観測資料を収集・解析することにより海況変動の特性を把握するとともに、数値計算により比較的時間スケールの短い流れについて再現を行った。海洋観測資料解析からは、ペルシャ湾の海洋構造の季節変化を的確にとらえることができ、ペルシャ湾における循環流についての従来からの知見に合致する水塊移動を見いだすことができた。また、特異な特性を持つ潮汐・潮流を数値計算により再現するとともに、ペルシャ湾の海上風及び海洋構造の季節変動に対応した吹送流の計算を行った。さらに潮流と吹送流の数値計算の結果を利用して、海面を浮遊する物質の漂流移動経路を携帯型パソコンにより簡易に計算できる漂流計算システムの開発を行った。

〔キーワード〕ペルシャ湾、水塊分析、潮流、吹送流、漂流計算

1. 序

1991年1月、湾岸戦争に際して発生した原油流出は400万バレル程度と見積もられている¹⁾。これは、世界の原油流出において最大のものであり、1974年の三菱石油水島製油所の事故の約75倍、1989年のアラスカ湾におけるエクソン・バルディス号事故の約14倍と見積もられている。ペルシャ湾は全世界の原油の海上輸送の約6割の積み出しが行われるという重要性に比して、その海象に対する知見に乏しい海域であると指摘されてきた海域であり、今後の災害対策に資するため海洋の特性に関する調査を進めていく必要がある。また、ペルシャ湾はホルムズ海峡のみが外洋とつながる閉鎖性の非常に強い海域であると考えられているが、潮差が2mを超え、湾内に無潮点を持つなど特異な潮汐特性を有しており²⁾、さらに、亜熱帯乾燥地帯に位置するため海面からの蒸発が非常に盛んであり、世界でも希な高塩分の海水が存在する海域となっており、この高塩分水がホルムズ海峡を通して流れ出て、インド洋の高塩分水の供給源の一つとなっている³⁾。したがって、このような特徴を持つペルシャ湾について、その流動特性と全地球的な海洋環境との関わりについて評価しておくことは重要な課題である。

2. 研究目的

本研究は既存海洋観測資料の解析によりペルシャ湾及び周辺海域の海洋構造の把握を行うとともに、ペルシャ湾の流動のうち、潮流及び吹送流を中心として調査を行い、かつ、その流動による物質移動に関して検討することにより、原油流出の対策立案及び影響評価等に資することを目的とする。

3. 海洋観測資料解析

(1) 海洋観測資料

図1に示すペルシャ湾、オマーン湾並びにアラビア海の海洋観測資料を収集し、解析を行った。季節変動を見る際には、12～2月(冬)、3～5月(春)、6～8月(夏)、9～11月(秋)という季節区分を行った。なお、水温については約3万点の資料を収集することができたが、塩分のデータ数はその1割にも満たない。

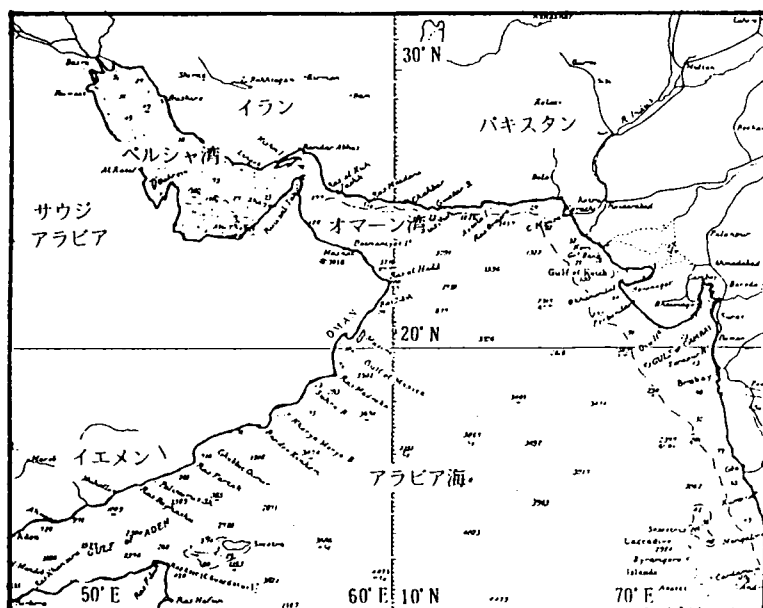


図1

(2) 水温、塩分の季節変動

図2に冬季(12～2月)と夏季(6～8月)の海面下10m層の水温・塩分の水平分布を示す。収集した資料を $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ の大きさのメッシュ内での全観測値を平均した値(各メッシュの下段の数値)を表している(各メッシュの上段の数値はデータ数)。冬季の水温は湾奥で 15°C 以下で湾口に向かうにしたがい高温となっている。夏季にはイラン沿岸中央部及びアブダビ付近に高温域が現れる。春季は冬季と、秋季は夏季とその分布は似通っている。また、表面の値は各季節とも10m層とほぼ同じである。なお、夏季の水温値は既存文献⁴⁾⁵⁾に比べてかなり低い値となっている。塩分については各季節とも湾奥部からアラビア半島側が40を超える非常な高塩分となり、イラン沿岸から湾口部が40未満の比較的低塩分の海域となっている。塩分についても表面塩分は10m層と各季節ともほぼ同様の分布となっている。下層においてもイラン側の塩分値はやや低いがアラビア半島側との差は10m層に比べると非常に小さくなっている。ペルシャ湾とホルムズ海峡によりつながるオマーン湾からアラビア海にかけては、水温 $24\sim 26^{\circ}\text{C}$ 、塩分 $36\sim 36.5$ となっており、季節による大きな変動は認められない。ペルシャ湾内の水温・塩分から表層の密度の水平分布を見ると、ホルムズ海峡からペルシャ湾に流入する比較的低塩分の外洋水がイラン沿岸を北上しているように見てとれる。

次に図3に2月と7～8月の水温塩分鉛直断面図を示す。なお、この断面図は系統的に実施された観測に基づき作成したものではなく、幾多の各層観測資料から抽出した資料に基づき作成した

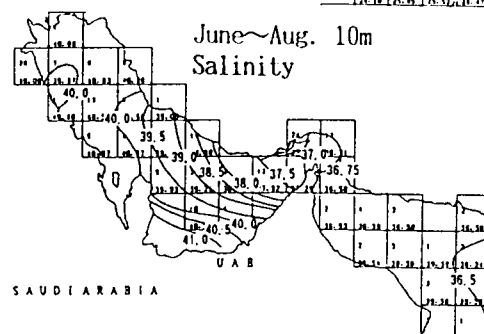
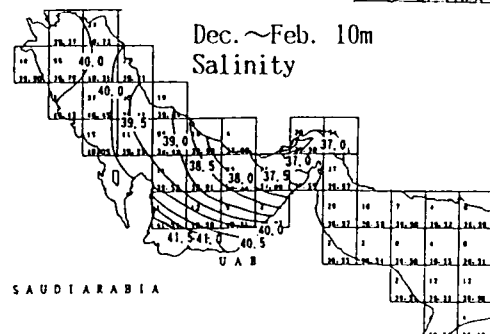
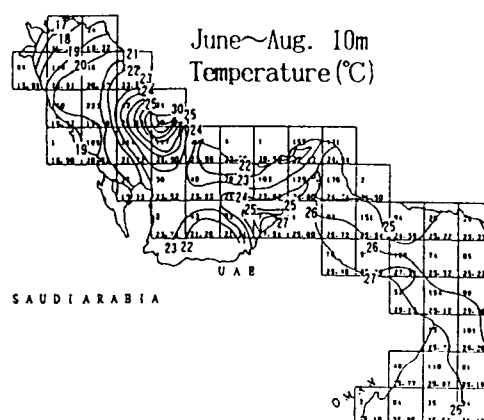
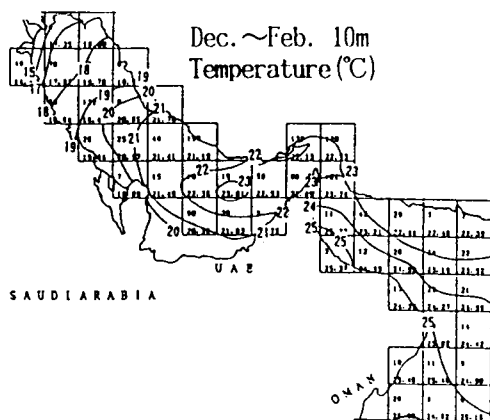


图2

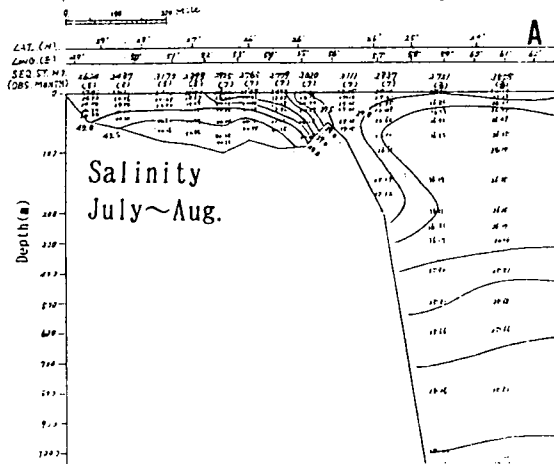
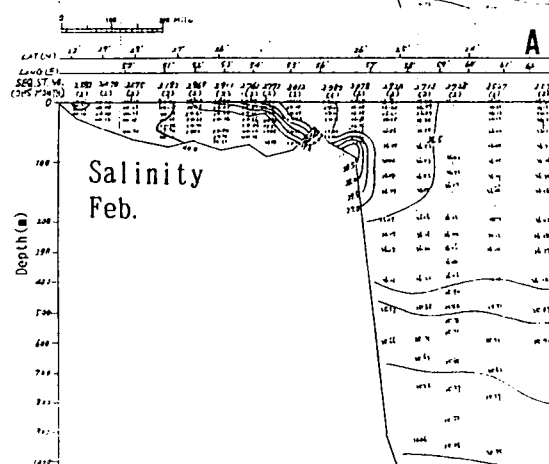
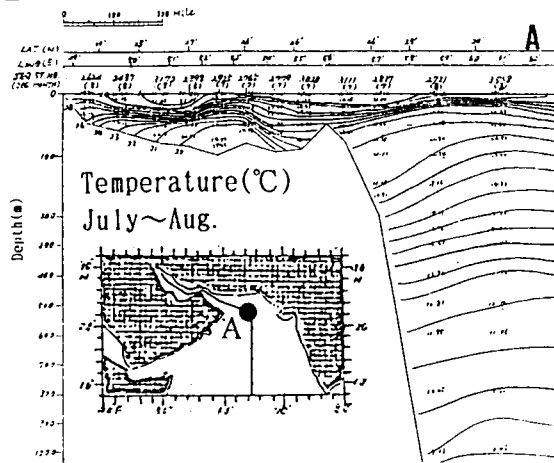
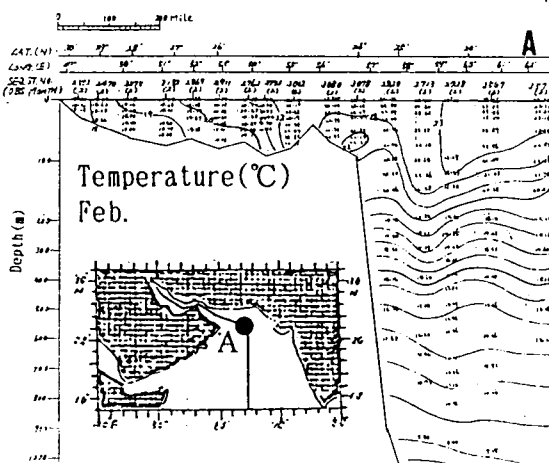


图3

断面図であるが、各季節の状況を表現しているものと考えられる。2月は水温の鉛直較差は小さく、ホルムズ海峡の内側に水温フロントが形成されているように見える。塩分についても湾内は鉛直的にほぼ一様であり、冬季の湾内の海水が鉛直によく混合していることがわかる。また、ホルムズ海峡の内側には塩分にもフロント構造が見える。7~8月になると様相は一変し、水温、塩分ともに明瞭な成層が形成される。水温についてはホルムズ海峡の内側にフロントは見られなくなっているが、塩分については湾内が非常に高塩分であるのでフロントが形成されている。このフロントは年間を通じて表層で湾奥側に傾いており、外洋水が上層から流入し、湾内水が下層から流出していることを示唆している。さらに海峡外側の中底層にはペルシャ湾起源の高塩分水が見られる。これは地中海で形成されジブラルタル海峡を通して大西洋に供給される中層高塩分水と同様の機構で形成され、インド洋の中層高塩分水となる海水である。

(3) 水塊分析

冬季及び夏季の10m層と50m層について海洋観測資料を湾奥部、湾央部、湾口部、湾外部の4区域に分けて作成したT（水温）－S（塩分）分布図を図4に示す。図では各資料ごとに水温塩分値の点をプロットするのではなく、湾奥部等の各区域毎に水温塩分の分布範囲を示しており、実線で囲った範囲が冬季の分布範囲を、点線で囲った範囲が夏季の分布範囲をそれぞれ示している。なお、表層の分布には10m層と際違った相違点はなかった。10m層については冬季と夏季との間で大きな水温差が見られるとともに、塩分についても湾奥部と湾央部では冬季に高塩分となっている。一方、50m層における特徴としては、湾央部と湾口部の夏季の塩分が冬季の塩分よりも高くなっていることが挙げられる。この夏季の底層の高塩分水については、他の区域の水温塩分の分布から考えると、湾奥部を中心として冬季に形成された高塩分水が徐々に湾口の方角に移動することによって形成されていると見ることができる。Hunter⁶⁾によるペルシャ湾の循環機構に関する模式図を図5に示す。

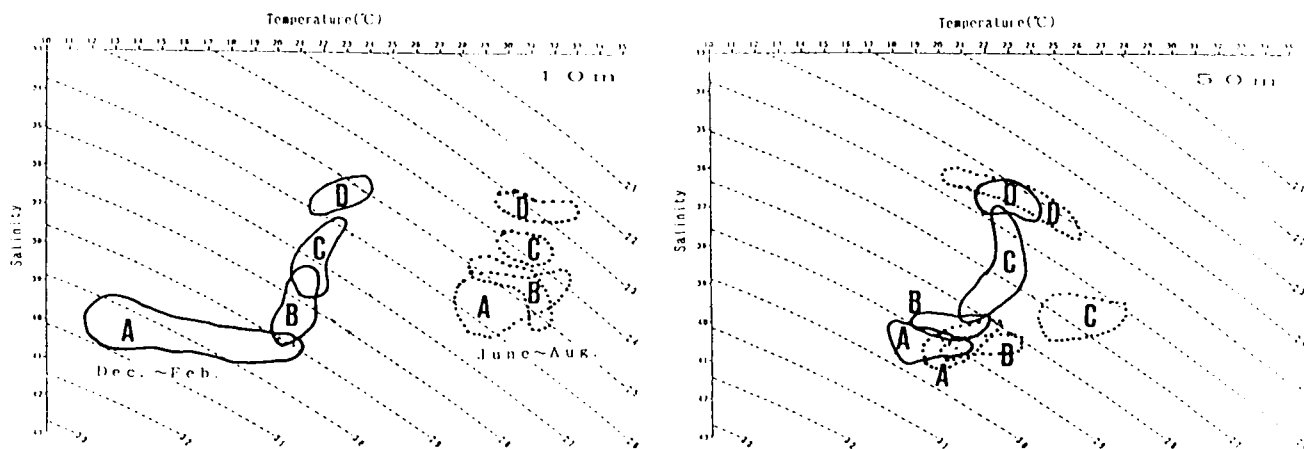
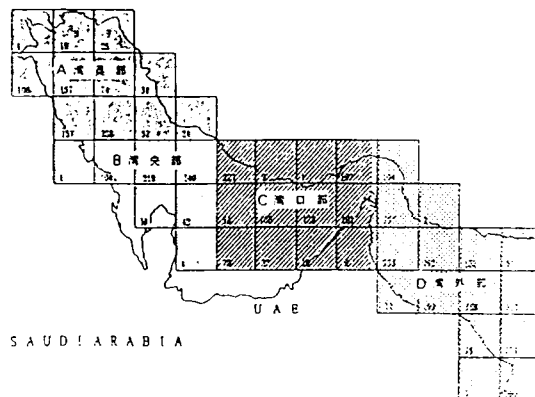


図4

図のようにペルシャ湾ではホルムズ海峡を通して流入した海水がイラン沿岸に沿って北上し、この間蒸発により高塩分となり、沈降して下層を湾口に向かうという循環があると考えられているが、ここで行った海洋観測資料の解析結果もその循環の存在を裏付ける結果となった。

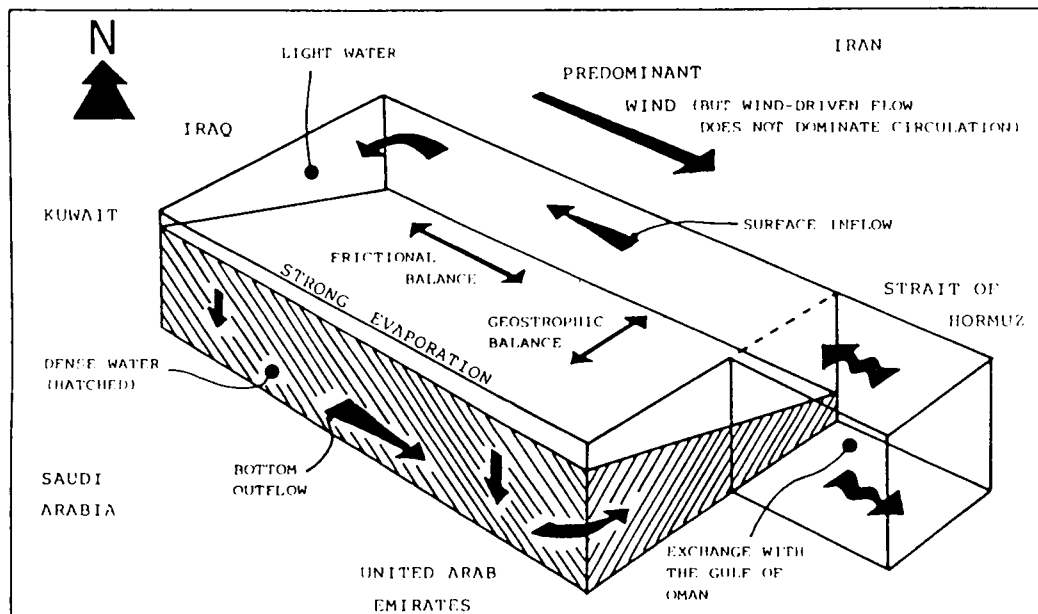


図5

4. 流動数値計算

(1) 数値計算の概要

前節に示した通りペルシャ湾には密度に起因する時間スケールの長い循環が存在するが、その循環流とともに湾内の物質輸送に大きな影響を及ぼすと考えられる時間スケールの短い、潮流と吹送流について数値計算により検討を行った。潮流については鉛直的な流れの差が小さいので、水平2次元のモデルで主要4分潮（M2、S2、K1、O1）について計算を行った。吹送流については前節に示したように夏季には強い密度成層、冬季には鉛直混合というペルシャ湾の海洋構造を考慮して、3次元モデルを用い密度成層の場合と成層していない場合の定常風に対する応答を調べた。

(2) 潮流

ペルシャ湾を10' 格子に区切り、沿岸の浅海域については水深を一律5mとし、オマーン湾の湾口付近を開境界として各分潮の潮汐に対応する水位変動を与えて計算を実施した。起潮力の直接作用である独立潮汐は入っていない。図6にM2潮とK1潮の潮汐図を示す。半日周潮のM2潮とS2潮には、湾の北部と南部にそれぞれ1つずつ無潮点ができおり、潮汐はその無潮点のまわりを反時計まわりに進行している。湾中央部は振動の腹となり、潮時が均一で潮差の大きな極大潮汐域となっている。一方、1日周潮のK1潮とO1潮では、湾中央部に1つ無潮点ができ、潮汐はそのまわりを反時計まわりに進行し、湾奥部と湾口部の潮差が大きくなっている。したがって、半日周潮と1日周潮の分布から、湾奥部は潮差の大きい混合潮型、湾中央部が半日周潮型、湾口部が混合潮型～日周潮型となっており、従来の知見²⁾と合致している。

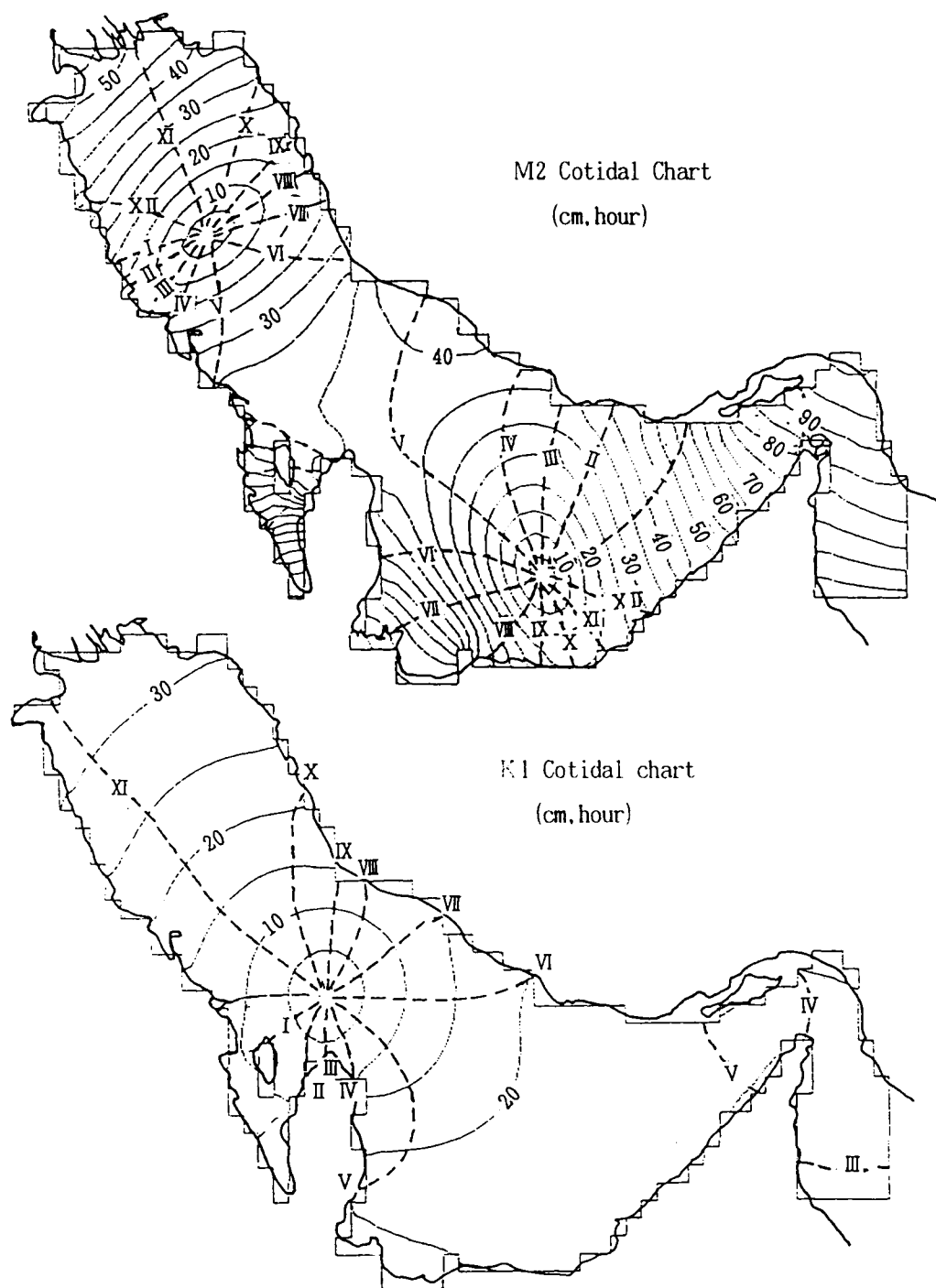


図6

一般に潮流は、振動の節となる無潮点において強くなり、振動の腹である極大潮汐域では弱くなる。図7にM2潮流及びK1潮流の潮流楕円の長軸流速分布を示した。M2潮流では、流速はおよそ0.3~0.5kn程度であり、大局的には無潮点付近で強くなり、さらに水深が浅くなる効果により無潮点の両側の沿岸域に流速の極大域がある。潮流の潮時については湾の北側では高潮時に湾奥に向かう流れが最強、低潮時に湾口に向かう流れが最強となり、南側では逆に高潮時に湾口に向かう流れが最強、低潮時に湾奥に向かう流れが最強となる。したがって、湾央部では北からと

南からの流れがぶつかることとなり、海水の集散が起こって潮差が大きくなる。一方、1日周潮では湾中央付近に強流域ができる。

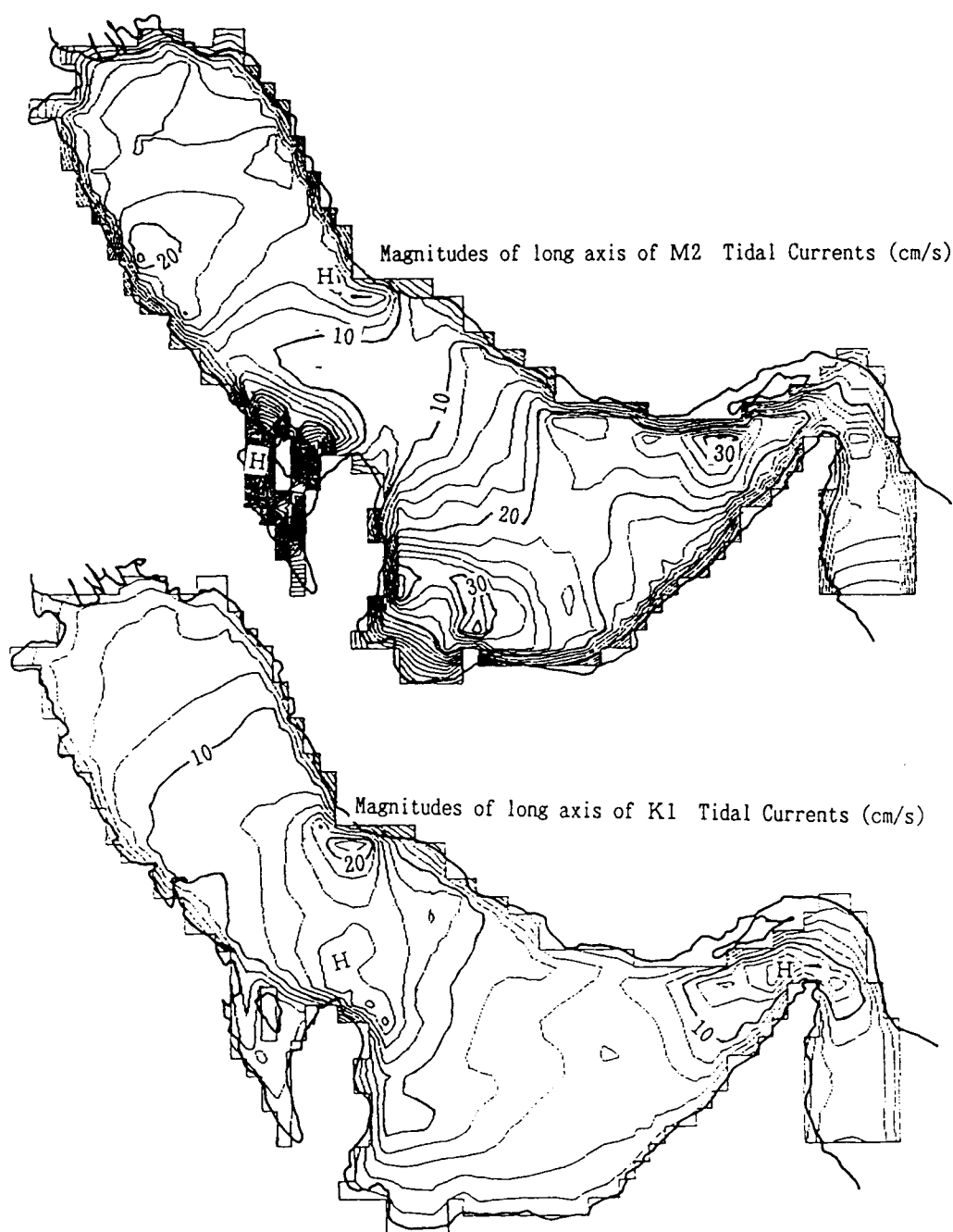


図 7

(3) 吹送流

前記の通り、ペルシャ湾の海洋構造は夏季に強い密度成層が形成され、冬季には密度的に鉛直混合の状態となる。また、ペルシャ湾の海上を吹く風は1年を通して北西風が卓越している。このようなことを考慮し、夏季及び冬季に相当するケースとして密度成層したペルシャ湾の海上に北西風6m/sが吹く場合と、密度一様で北西風7m/sが吹く場合について計算を行った。計算上のペ

ルシャ湾はオマーン湾の湾口付近を閉じて閉領域とし、水平に10km×10kmの格子、鉛直には6層に区切り、層厚は2, 8, 10, 10, 20m及び海底までとした。時間積分については、ほぼ定常に達したと考えられる24時間まで行った。

それぞれのケースの24時間後の第1層の結果を図8に示す。密度成層がある場合もない場合もほぼ同様の流れとなっており、流出油の漂流に影響を及ぼす表層の流れは陸岸付近では岸沿いに南東向きの流れとなるが、陸岸近辺以外ではコリオリ力の影響で風向きから右に向き南西～南向きの流れとなっている。

北西風の次に卓越する南東風がペルシャ湾の海上を吹く場合についても計算を行ったが、この場合の表層の流れは、風向きの変化に対応して、陸岸付近では北西向きの流れ、陸岸付近以外は北～北東向きの流れとなった。

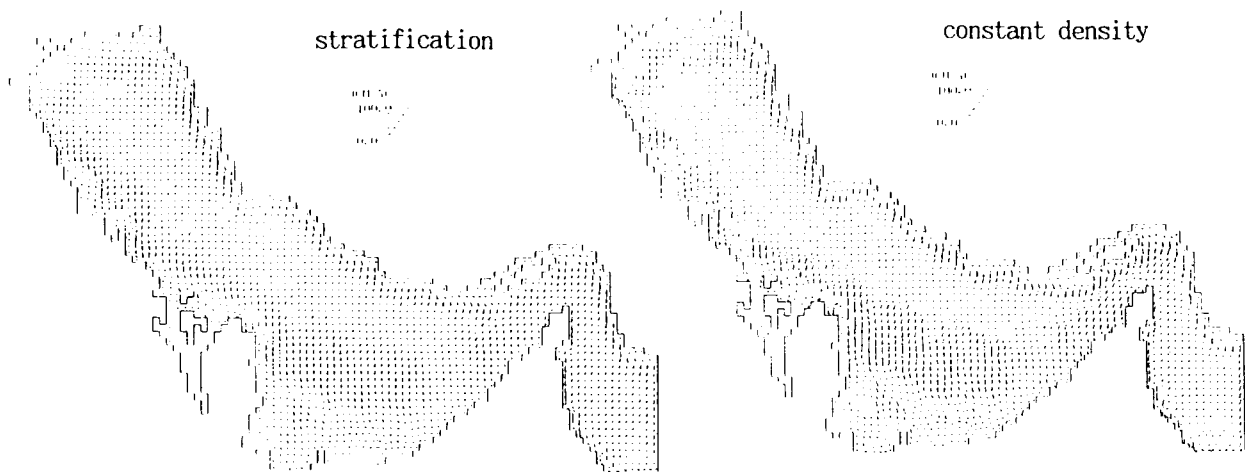


図8

5. パソコンによる漂流計算システム

(1) システムの概要

前節において計算した潮流と吹送流により油等の表層を漂流する物質の移動経路を携帯型のノートパソコンで計算するシステムを構築した。この漂流計算においては、潮流は前節の計算結果から得られた主要4分潮の調和定数を用いて任意時の推算を行うことができるようになっており、吹送流は北西風が連吹した場合あるいは南東風が連吹した場合の吹送流パターンを選べるように設計している。システムでは潮流の調和定数と吹送流の定常流向流速値が10km×10kmのメッシュ毎にデータとして与えてあり、任意点における流向流速値は、その点を囲む潮流・吹送流のデータ定義点4点における流向流速値を内挿することにより求めている。また、拡散の効果については、適当な拡散係数を与えて多数の物質粒子を同時に追跡することにより検討できるようにしている。

原油の流出の際にはこの潮流と吹送流の他に、物体そのものに働く風圧流及び海水の密度差に起因する密度流が大きな影響を及ぼすと考えられるが、ここでは、第1近似的な漂流経路計算を行うシステムとして物質粒子の移動経路を簡易に計算できるシステムを開発した。また、このシステムは緊急の場合に何処でも対応できるように携帯型のノートパソコンで計算できるように

設計している。

(2) 漂流シミュレーション

パソコンによる漂流計算システムを用いて計算した結果の例を図9に示す。この図は夏季に北西風が連吹した場合に15日間漂流経路を計算したものであり、漂流開始地点は図に①～⑥で示した地点である。この場合、各地点から漂流を開始したものとも潮流による往復移動が多少は見られるが、主として図8に示した吹送流により移動しており、イラン側から流れるものはほぼ南の方向へ流れ、湾奥部あるいはアラビア半島側で流れ出た物質は陸岸に沿って南東方向に移動していくことがわかる。

また、逆に南東風が連吹するケースでは、アラビア半島側から流れ出た物質は、吹送流によってペルシャ湾を北上する。

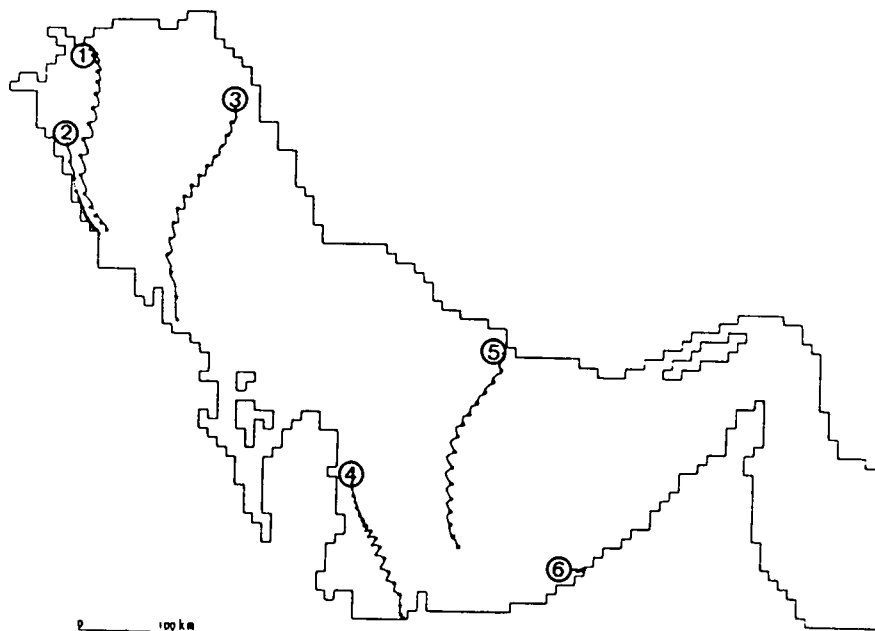


図9

6. まとめ

ペルシャ湾における海況及び流動の特性を把握するため、既存海洋観測資料の解析と潮流及び吹送流の数値計算を実施した。水塊分析等の資料解析においてはペルシャ湾の循環に関して従来からの知見を裏付けるような海洋構造の変動を把握し、また、数値計算でも、従来からの知見に合致する潮汐特性を再現と、ペルシャ湾の卓越風による吹送流の再現を行うことができた。また、それらを基にして表層浮遊物質に関して簡易に漂流計算を行うシステムを開発することができ、ペルシャ湾の一応の基本的な流動特性をとらえることができたと言えるだろう。しかし、その流動特性の把握も未だ第一段階に過ぎないものであり、湾岸戦争後のNOAAのMt. Mitchell号による集中的な海洋観測の最終レポート⁷⁾でも、さらなる観測、とりわけ流れの観測の必要性が強調されているように、ペルシャ湾の海況及び流動を詳細に把握し、海水交換等についての的確な評価をするためには観測データの収集が望まれる。

最後に、ペルシャ湾に関する貴重な資料を紹介していただいた東京水産大学松山優治助教授、データ整理やプログラム構築等の作業を受託された（株）東京久栄と（株）パスコなど、本研究に協力していただいた関係者の皆様に感謝します。

7. 参考文献

- 1)佐々木邦明(1991)：ペルシャ湾原油流出の「国際緊急援助隊」に参加して, 海上防災, 70, 23-33.
- 2)Defant A. (1961)：Physical Oceanography, vol.2, Pergamon Press.
- 3)増沢譲太郎・蓮沼啓一(1977)：世界の水系, 海洋科学基礎講座4, 海洋物理Ⅳ, 東海大学出版会.
- 4)Emery K. O. (1956)：Sediments and water of the Persian Gulf, Bull. Am. Assoc. Pet. Geol., 40, 2354-2383.
- 5)Brewer P. G. et al. (1978)：Report A: Chemical oceanographic data from the Persian Gulf and Gulf of Oman, Rep. WHOI-78-37, Woods Hole Oceanogr. Inst.
- 6)Hunter(1984)：A review of the residual circulation and mixing processes in the Kuwait Action Plan region, with reference to applicable modelling techniques, Unesco reports in marine science 28.
- 7)ROPME/IOC(UNESCO)/UNEP/NOAA/EPC(Kuzait)(1993)：Final report of the scientific workshop on results of the R/V Mt. Mitchell cruise in the ROPME sea area.

〔研究発表の状況〕

なし。