

1. はじめに

閉鎖性内湾は、周囲を陸域で囲まれ、外海と繋がる開口部は比較的狭い水域である。その地形的な特性から、外海から侵入する波は小さく、湾内吹送距離も短く波浪条件は比較的静穏である。そのため、内湾の沿岸域は産業、漁業等の面からの利用価値は高く、その背後地には大きな都市が発展してきた。しかしながらその一方で、都市の発展に伴い都市から排出される負荷は増大し、内湾水質の悪化(富栄養化)が顕著に現れるようになってきた。

マクロな視点で考えると、陸域から内湾に流入した負荷の一部は湾外水との海水交換によって湾外へ排出され、一部は海域の自然浄化能力によって分解され、残りは内湾に貯留する。この内湾に貯留された負荷が内湾の富栄養化の原因であり、海水交換能力、自然浄化能力および流入負荷量のバランスが内湾の富栄養化の程度を決定する。したがって、海水交換能力、自然浄化能力および流入負荷量を評価することは、水質の視点からの内湾の特性を把握し、管理施策を検討する上で極めて重要である。本研究では、この中の海水交換能力に着目する。

ある湾の海水交換能力は時間的な概念を取り入れて滞留時間として表される。海水交換能力が高い湾の滞留時間は小さく、逆に海水交換能力が低い湾の滞留時間は大きい。滞留時間の求め方には大きく分けて3つの手法がある。(1)水理模型実験を用いた実験的な手法、(2)数値モデルを用いた数値実験的な手法、および(3)観測値に基づいて算出する手法である。(1)の水理実験を用いた実験的な手法では、対象とする水域を形どった水理模型に、相似則に基づいた潮位振幅を与え、実際の湾の流動を模型上に再現する。そして、湾内に投入した染料や粒子の濃度の時系列変化から、湾の滞留時間を算定する(Takeoka, 1984; 上嶋ら, 1984, 1986; 堀江ら, 1977; 村上ら, 1986; 村上, 1998)。この手法は、傾圧成分による鉛直循環を考慮する必要がない水域では適用可能であるが、その効果を考慮しなければならない水域では不向きである。(2)の数値モデルを用いた数値実験的な手法では、パソコン上に湾内流動を再現し、前述の水理実験をパソコン上で行おうとするものである(Imasato et al., 1980; Murakami et al., 1994; 村上, 1998)。3次元の傾圧成分を考慮した数値モデルを用いれば、密度の効果を考慮することができ、水理模型実験の短所を克服できる手法である。この手法によって得られる値の精度は、モデル性能および境界条件に大きく依存する。近年のモデルは高精度の乱流モデルや非静水圧項の取り込みによって高精度化が図られているものの(中山・佐藤, 1999)、時間的および空間的

に変動が大きい境界条件を忠実に与えることは困難であり、1年に及ぶ再現性の高い計算は難しい。したがって、数値モデルによる検討は、各々の物理過程(例えば、風、潮汐、淡水流入量等)が滞留時間にどの程度の影響を与えるかと言った感度解析に向いている。(3)の観測値に基づいた算出手法では、観測された塩分から湾口でのフラックスもしくは湾内の淡水存在量を算出し、そして滞留時間を算出する(宇野木・岸野, 1977a, 1977b; 宇野木, 1998; 柳・高橋, 1988)。この手法では、物理モデルは用いていない反面、観測結果を用いることによって、全ての物理過程が陰的に取り込まれているという利点がある。また、時間的に頻度が高く、空間的に密度の高いデータを使用すれば、高精度の滞留時間を算定することが可能である。一方、塩分の水平分布および鉛直分布が一様ではない水域において観測点が少ない場合や、時間変動が大きな水域において観測頻度が少ない場合は、水域内の平均塩分や平均塩分の時間変化が精度良く求められず、算出された滞留時間の精度の高さは望めないと言う短所を持つ。したがって、この手法に対しては観測データの空間密度および時間頻度が肝要であり、高密度かつ高頻度のデータセットがある場合には実際の滞留時間を算定する手法として手法(3)が現状においても優れていると言える。

宇野木・岸野(1977a, 1977b)は東京湾に対し手法(3)を適用し、塩分の保存式から海水の交換量を求め、それから海水の滞留時間を算出した。この海水の滞留時間は大局的に見た場合の外洋水との海水交換能力を意味している。また、柳・高橋(1988)は大阪湾に、宇野木(1998)は東京湾に手法(3)を適用し、湾内外の塩分から湾内の淡水存在量を調べ、これと淡水流入量との関係から淡水(河川水)の平均滞留時間を算出した。この淡水の平均滞留時間は淡水の湾内に滞留する平均的な時間を意味している。これらの滞留時間は異なる定義ではあるが、共に内湾の海水交換能力を示す指標の一つである。海水の滞留時間および淡水の平均滞留時間の定義に対する詳細は付録Aに示す。定義より定常状態と完全混合を仮定すると空間平均塩分と淡水流入量のデータが必要となる。定義式より、それぞれのパラメータの滞留時間への感度(寄与)は同じオーダーであり、各パラメータが同じレベルの精度を持っていることが要請される。東京湾では季節的な湾奥から湾口にかけての塩分の水平方向の強い濃度勾配や表層から底層にかけての塩分の鉛直方向の強い成層が特徴的であるため、季節や月別の滞留時間の評価には、高い頻度、高密度で鉛直分布も含めた測定が望まれる。

東京湾の滞留時間は1947年-1974年の観測値に基づい

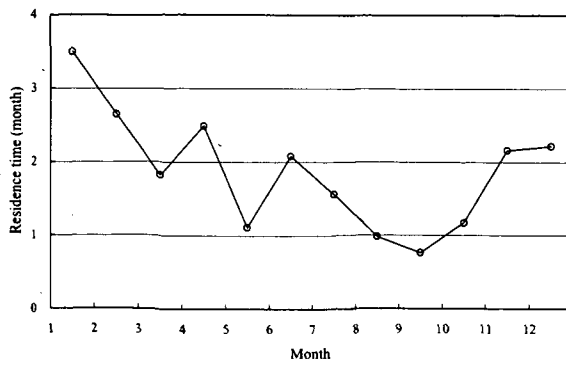


図-1 海水の滞留時間の月平均値の季節変化
(宇野木・岸野, 1977a, 1977b)

た宇野木・岸野 (1977a, 1977b), 同じく1961年-1970年の観測値に基づいた宇野木(1998)によって定量的に示されている。宇野木・岸野(1977a, 1977b)によると, 東京湾の海水の滞留時間は季節変動が大きく, 夏季は約1ヶ月, 冬季は約3ヶ月であることを示している (図-1参照)。また, 宇野木 (1998) は河川水の湾内における平均滞留時間は冬は2.7ヶ月, 夏は1.0ヶ月であって, 夏の方が短いことを指摘している。そして, この理由は, 東京湾の海水交換は主に河川水の流入に伴って生じる鉛直循環流に支配されており, 夏季の方が冬季に比べて河川水の流入が多いためこの鉛直循環流が発達することにあると述べている。海水交換が主に河川水の流入に伴って生じる鉛直循環流に支配されているという同様な知見は宇野木 (1998) による三河湾の研究でも述べられている。このように滞留時間と河川水量は密接な関連があることから, 河川流量の変化に伴って滞留時間は変化する可能性がある。東京湾に関しては, 1960年以降において沿岸域の都市化に伴う人口の増加や工業化によって, 湾に流入する淡水流入量は変化していることが十分考えられ, その結果, 東京湾の滞留時間は前述した宇野木・岸野 (1977a, 1977b) の値から変化している可能性がある。

そこで本研究では, 2002年7月から2003年6月に高密度 (湾内27地点)・高頻度 (22回) に実施された観測データと東京湾へ流入する河川の流域への降水量および流域外からの取水量から推定された淡水流入量を用いて, 同期間の海水の滞留時間の算定を行った (以後, この2002年7月から2003年6月のデータを用いた結果を2002年の結果と呼ぶ)。また, 宇野木・岸野 (1977a, 1977b) の塩分データと2002年の海水の滞留時間の算出に際して用いた同様の方法によって推定された淡水流入量を用いて, 1947年-1974年の海水の滞留時間をあらためて算出した。

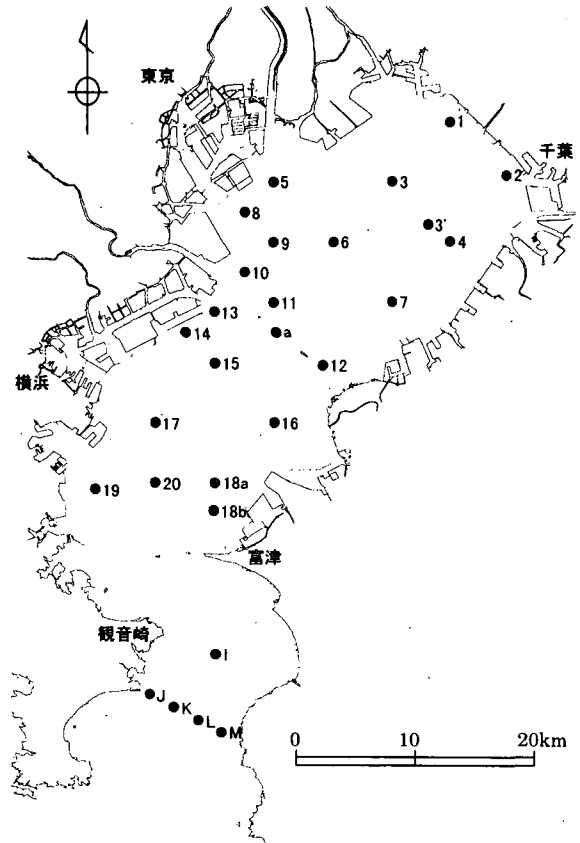


図-2 東京湾広域環境調査の観測地点の配置図

海水の滞留時間の算出には宇野木・岸野 (1977a, 1977b) と同様の手法(3)を用いた。そして, 両者の結果を比較することによって, 2002年の海水の滞留時間の特徴について検討を行った。

本稿の章構成は以下のとおりである。2章では, 検討データの基となる東京湾広域環境調査について紹介する。3章では検討に用いた時期の東京湾の塩分の概要について示す。4章では, その観測データを用いて, 海水の滞留時間の計算に必要な湾内の平均塩分の算出結果について示す。5章では, 同じく海水の滞留時間の計算に必要な同時期に流入した淡水流入量の推算結果について示す。6章では, 4章で求めた平均塩分と5章で求めた淡水流入量を用いて海水の滞留時間を算出する。7章では, 得られた2002年の海水の滞留時間と過去の海水の滞留時間を比較し, 2002年の海水の滞留時間の特徴を示す。

2. 東京湾広域環境調査

本研究では, 平成14年度に実施した東京湾広域環境調査で得られたデータのうち主に塩分のデータを用いて解析を実施した。以下に調査の概要を示す。

表-1 東京湾広域環境調査の構成および調査頻度

調査内容	調査名	調査地点数	調査地点	調査頻度	H14	8月	9月	10月	11月	12月	H15	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	
					7月	1月													
流況調査	設置式流向・流速計調査	4地点	St.3*, 15, 20, I	四季毎30 昼夜連続 観測		←→	←→		←→	←→		←→	←→		←→	←→			
	設置式水温・塩分調査	7地点	St.3*, 5, 10, 12, 15, 18, 19			←→	←→		←→	←→		←→	←→		←→	←→			
	水温塩分観測	23地点	St.1, 2, 3*, 5-20, J, K, L, M	毎月	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	湾内流動調査	3測線	Line a, b, c	四季		○			○			○			○				
水質調査	毎月採水調査	22地点	St.1-20, 3*, I	毎月	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	出水時採水調査	7地点	St.3, 4, 10, 12, 15, 18, 19	年2回(出 水時、平)				○											
	四季採水調査	7地点	St.3, 4, 10, 12, 15, 18, 19	四季		○			○			○			○				
	河川流量調査	5河川	St. R1-R5	四季		←→			←→			←→							
	河川水質調査	5河川	St. R1-R5	四季		○			○			○			○				
	遠洲水質調査	1地点	St. 10	連続		←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	←→	
	底質・ベントス調査	底質調査	20地点	St.1-20	毎月	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ベントス調査	20地点	St.1-20	毎月	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
溶出実験	栄養塩溶出実験	7地点	St.3, 4, 10, 12, 15, 18, 19	四季		○			○			○			○				
	DO消費実験	7地点	St.3, 4, 10, 12, 15, 18, 19	四季		○			○			○			○				
水生生物調査	魚卵・稚子魚調査	12地点	St.3, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 13,	毎月	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	底引き調査	12地点	St.3, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 13,	四季		○			○			○			○				

表-2 水温塩分観測の実施日および調査場所

調査No.	調査日	調査地点
1	2002/07/25	3,4,18a,Iを除く23地点
2	2002/07/29	18b,J,K,L,Mを除く22地点
3	2002/08/21	3,4,18a,Iを除く23地点
4	2002/08/26	18b,J,K,L,Mを除く22地点
5	2002/09/26	18b,J,K,L,Mを除く22地点
6	2002/09/26	3,4,18a,Iを除く23地点
7	2002/10/03	18b,J,K,L,Mを除く22地点
8	2002/10/24	18b,J,K,L,Mを除く22地点
9	2002/10/30	3,4,18a,Iを除く23地点
10	2002/11/21	18b,J,K,L,Mを除く22地点
11	2002/11/26	3,4,18a,Iを除く23地点
12	2002/12/18	3,4,18a,Iを除く23地点
13	2002/12/19	18b,J,K,L,Mを除く22地点
14	2003/01/23	3,4,18a,Iを除く23地点
15	2003/01/30	18b,J,K,L,Mを除く22地点
16	2003/02/22	18b,J,K,L,Mを除く22地点
17	2003/02/25	3,4,18a,Iを除く23地点
18	2003/03/19	18b,J,K,L,Mを除く22地点
19	2003/03/26	3,4,18a,Iを除く23地点
20	2003/05/02	3,4,18a,Iを除く23地点
21	2003/05/26	3,4,18a,Iを除く23地点
22	2003/06/25	3,4,18a,Iを除く23地点

2.1 調査地点

観測は図-2に示すst.aを除く27地点で実施した。富津岬一観音崎を結んだ内側の東京湾（以後、東京内湾（小倉，1993）もしくは内湾と呼ぶ）に対しては22点の観測地点を配置した。荒川および多摩川の影響が及ぶ東京内湾西側の海域に対しては観測点を相対的に密に配置した。富津岬一観音崎を結んだ外側の東京湾（以後、東京外湾（小倉，1993）もしくは外湾と呼ぶ）に対しては久里浜一金谷を結ぶ線上に主に観測地点を配置した。

2.2 調査項目

調査内容は流況調査、水質調査、底質・ベントス調査、溶出実験および水生生物調査に大きく分類できる。各調査は表-1に示すように構成されている。本研究では水温塩分観測のデータおよび毎月採水調査の際にバックグラウンド値として取得した水温塩分データを用いている。それぞれの調査の実施頻度は表-1に示すとおりである。水温塩分観測および採水調査はそれぞれ月1回の実施であるが、異なった日時に実施しているため、水温塩分データは実質上月2回のデータ取得となっている。水温塩分データに関する調査実施日と調査地点を表-2に示す。

水温塩分の調査にはアレック電子社製のACL1183-PDKを用いた。船上からACL1183-PDKを投入し、表層から底層（水深50mを超える地点は最大50m）まで鉛直方向に1m毎に塩分および水温が測定された。その他の調査の方

法および結果は国土交通省国土技術政策総合研究所のホームページ (<http://www.nilim.go.jp/>) から入るかもしくは直接 <http://www.ysk.nilim.go.jp/kankyo/main.html> にデータを示しているので参照して頂きたい。

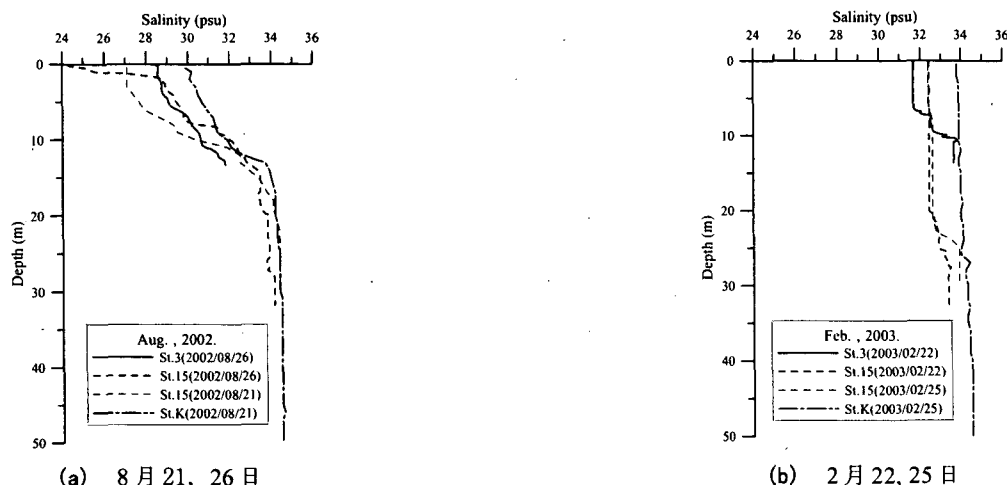


図-3 塩分の鉛直分布

3. 2002年の塩分分布の概要

2002年の東京湾における塩分分布の概要を鉛直分布、平面分布および湾の縦断面分布を用いて示す。それぞれの詳細については付録Bにて別途示す。

3.1 鉛直分布

図-3(a), (b)は8月21, 26日および2月22, 25日の塩分のst.3, 15, K地点における鉛直分布を示す。8月の内湾(st.3, 15)では、表層の塩分は低く24-29程度の値であったのに対して、水深10m付近で30以上になり、水深15m以深では33に及んでいた。強い塩分成層は表層から水深15m辺りに形成されていた。

一方、2月の鉛直分布は8月と比べて表層と底層には大きな差はなかった。st.3, 15共に底層から5m位の水深に躍層がみられ、表層よりも1-2高くなっていた。表層の値は8月よりも高く32前後であり、底層の値は8月と同じ位かまたは低かった。

3.2 平面分布

東京湾内湾22点の観測データを水平方向に補間して内湾塩分の平面分布を作成した。海図(海上保安庁, 2000)をもとに作成した東京湾内湾の1kmメッシュの地形データを水平方向に1km×1km、鉛直方向に1m間隔にグリッドを設定し、距離に関する重み付きの空間補間を用いて各格子に対する塩分を算出した。この空間補間には次式で示されるガウス関数を用いた(柳, 1993)。

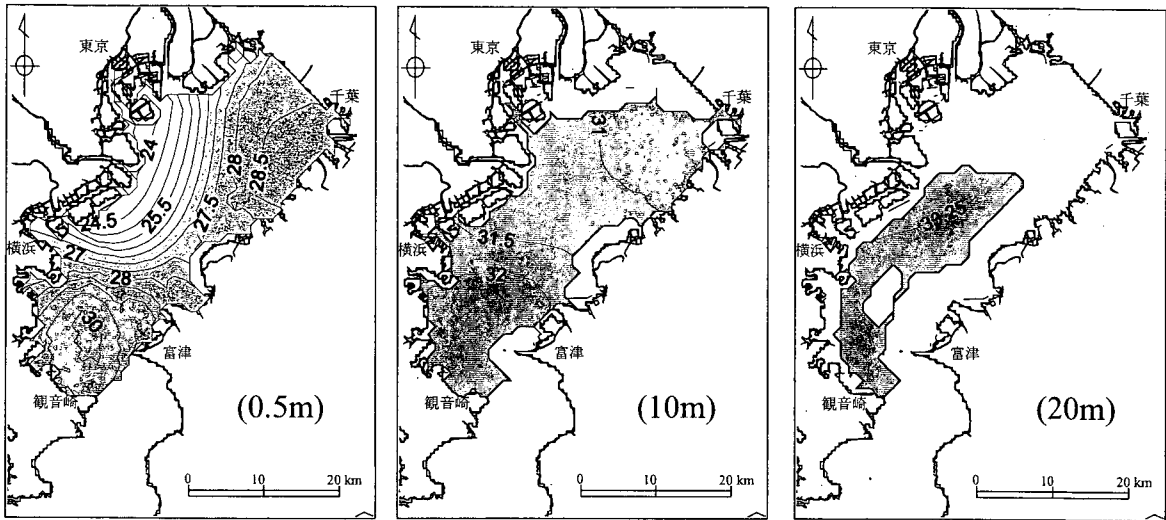
$$S_{i,j} = \frac{\sum_n S_n \cdot \exp\left\{-\left(\frac{r_{i,j,n}}{L}\right)^2\right\}}{\sum_n \exp\left\{-\left(\frac{r_{i,j,n}}{L}\right)^2\right\}} \quad (1)$$

ここで、 i, j は格子点の座標、 n は影響範囲に入る観測地点の番号、 $S_{i,j}$ は格子点(i, j)の塩分、 S_n は観測点 n での塩分、 $r_{i,j,n}$ は格子点(i, j)から観測点 n までの距離および L は相関距離である。東京内湾に位置する各観測点間の距離は2kmから8kmであるので、初期の相関距離は7kmとした。また、影響半径は相関距離と同一とした。影響範囲内の観測地点が2点以下の場合は相関距離をさらに1km増やした。

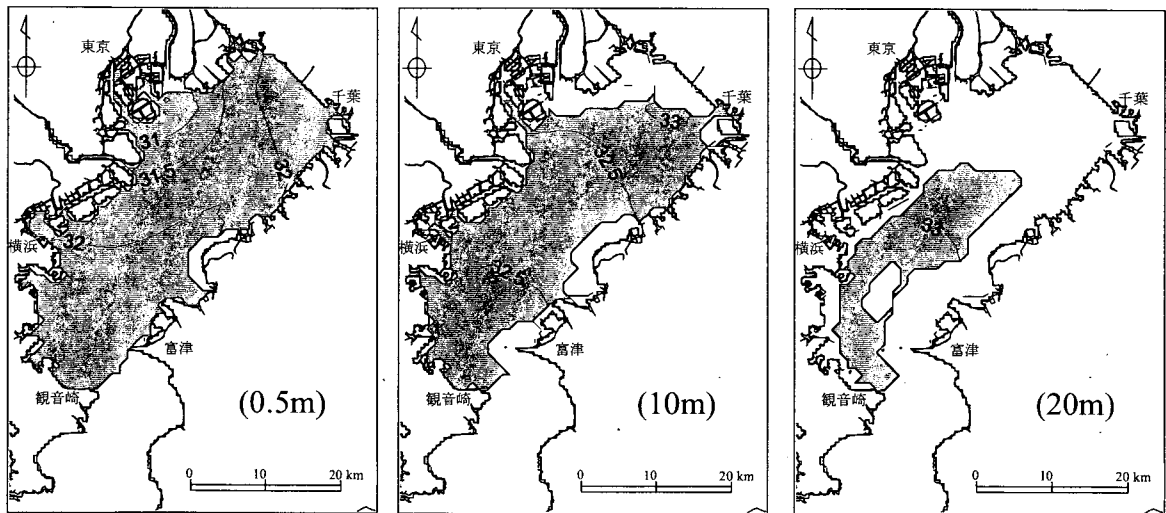
得られた平面分布のうち、水深0.5m, 10mおよび20m対する8月26日と2月22日の平面分布を図-4(a), (b)に示す。8月の表層の分布は東京、川崎沖に塩分25以下の低濃度の水塊が広がっていたのに対して、千葉沖に28以上の相対的に高濃度の水塊が広がっており、東西方向の塩分勾配を示していた。10m水深になると塩分勾配は南北方向になっており、富津沖でおよそ32、湾奥でおよそ31であった。2月の表層の塩分分布も東西方向の塩分勾配であるものの8月に比べて勾配は弱く西側がおよそ31、東側がおよそ32である。10m水深ではほぼ32.5で一様であった。

3.3 縦断面分布

図-5(a), (b)に8月26日と2月22日に対する湾奥-湾



(a) 8月26日



(b) 2月22日

図-4 塩分の平面分布

口の縦断面分布を示す。縦断面分布は図-6に示すような縦断線に沿うように作成した。

8月と2月の縦断面分布を比較すると、図-3(a)の断面分布で指摘したように内湾の水深10-15m付近の8月の成層化は顕著であった。また図-3(b)で指摘した2月における底層上5m付近での躍層は、高塩分の湾外水が底層から強く入り込んでいるのが要因であることが判る。

4. 2002年の湾内の塩分

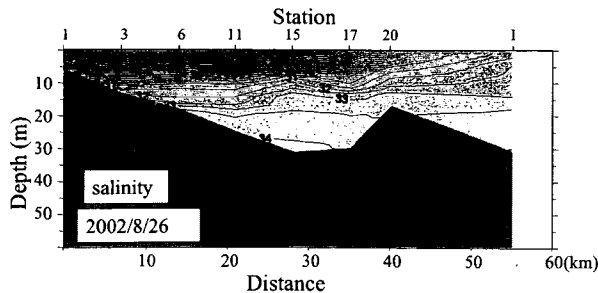
4.1 空間平均塩分

東京内湾に対して内湾平均塩分の算出を行った。空間

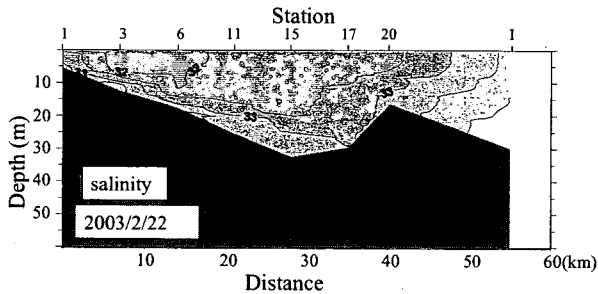
平均塩分の算出は3.2節で求めた水平方向に1km×1km、鉛直方向に1m間隔の各格子の塩分を式(2)を用いて空間平均して求めた。

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i,j,k} S_{i,j,k} \cdot (DX \cdot DY \cdot DZ)}{\sum_{i,j,k} DX \cdot DY \cdot DZ} \quad (2)$$

ここで、 \bar{S} は空間平均塩分、 i,j,k は格子点の座標、 $S_{i,j,k}$ は座標 (i,j,k) の塩分、 DX, DY, DZ は i,j,k 方向の格子間距離、 I,J,K は空間平均のための積分範囲における添え



(a) 8月26日



(b) 2月22日

図-5 塩分の縦断面分布

字を示す。

内湾を上層(表層から水深5 mまで)と下層(水深5 m以深)に分割して、それぞれの空間平均塩分を求めた。上層と下層の空間平均塩分を図-7に示す。上層の空間平均塩分は夏季に低く7月には27以下まで低下するが、12月から2月まではおよそ32である。それに対して、下層の塩分は年間を通じてそれほど大きな変化は示さず32から33の間の値を示す。図-3で示した塩分の鉛直分布でも指摘したように冬季の表層と下層の差は小さく、空間平均塩分に対しても、12月から2月の期間の上層と下層の塩分差は1程度にすぎない。

上層の平均塩分の変動は、降水量の増加に伴う淡水流量の増加が要因として考えられる。そこで、降水量の代表として多摩川上流域に位置する青梅における日降水量の時系列を図-8に示す。空間平均塩分の変動と降水量の変動を比較すると、降水量の多い7月から10月に内湾上層塩分は低く、降水量の少ない11月から2月に内湾表層塩分は高くなる傾向を示している。また、10月上旬に観測された塩分の急激な減少は9月末～10月1日の降雨による影響と考えられる。

次に、東京外湾に位置するSt. J, K, L, Mの塩分から外湾の上層(表層から水深5 mまで)と下層(水深5 m以深)それぞれの空間平均塩分を算出する。外湾塩分は同一水深において各観測地点の塩分値を単純に平均して各水

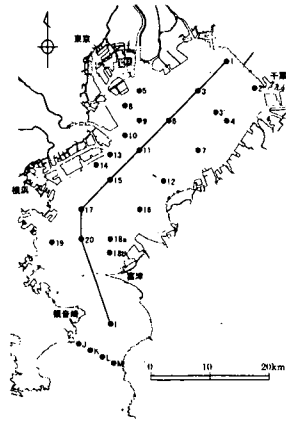


図-6 塩分の縦断面分布の観測線

深の塩分を求め、これを鉛直方向に面積による重み付平均することで空間平均値を求めた(式(3)参照)。なお、水深50 m以深の塩分は、水深50 mの塩分の値を採用した。

$$\bar{S} = \frac{\sum_k^K S_k \cdot (A_k \cdot DZ)}{\sum_k^K A_k \cdot DZ} \quad (3)$$

ここで、 \bar{S} は空間平均塩分、 k は鉛直方向の座標、 S_k は座標 k の塩分、 A_k は座標 k の水深の海域面積、 DZ は k 方向の格子間距離を示す。

上層と下層の空間平均塩分の時系列を図-9に示す。外湾においても上層の塩分は夏季に低く冬季に高い傾向を示す。下層塩分は34.0-34.5の間ではほぼ一定であるが、8月のみは34を下回っている。

上述のデータは観測日時における値であり、各月を代表した値ではない。そこで、内湾上層空間平均塩分、内湾下層空間平均塩分、外湾上層空間平均塩分および外湾下層空間平均塩分の1日毎の変動を線形内挿し、1ヶ月で算術平均した。東京内湾および外湾の空間平均値の月平均値を図-10に示す。後述する海水の滞留時間の算出は完全混合を仮定する。そこで、上層と下層の体積比から空間平均値に換算した値を求めた(図-11参照)。

4.2 淡水存在量

前節で求めた東京内湾空間平均塩分月平均値および東京外湾空間平均塩分月平均値から内湾の淡水存在量を算出した。算出には次式を用いた。

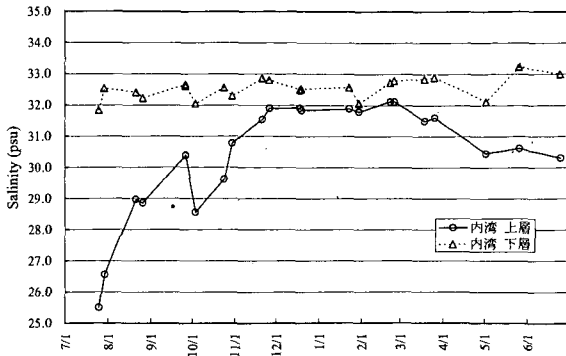


図-7 内湾塩分の上層と下層の時系列

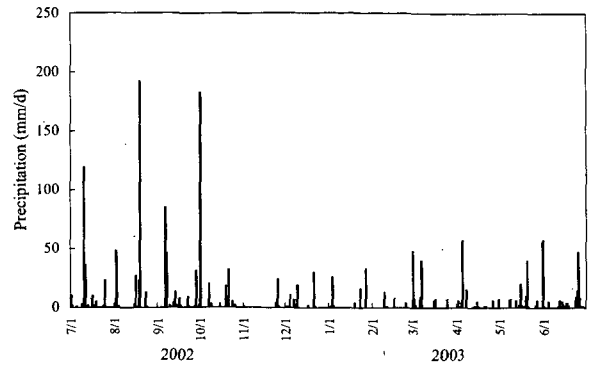


図-8 青森における日降水量の時系列

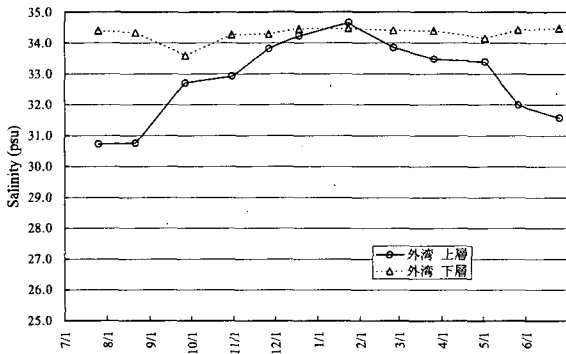


図-9 外湾塩分の上層と下層の時系列

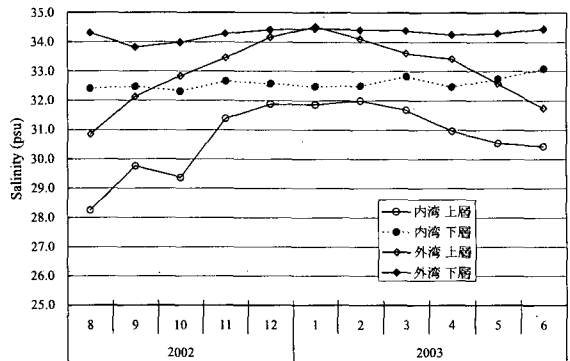


図-10 内湾塩分および外湾塩分の上層と下層の月平均値の季節変化

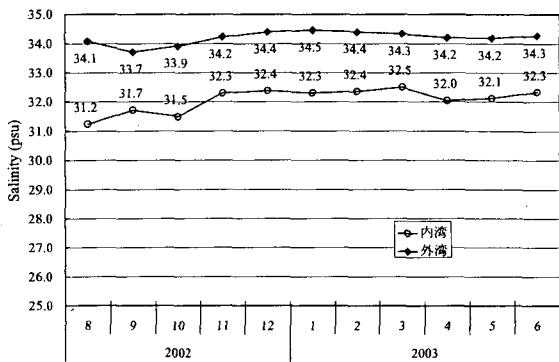


図-11 内湾塩分および外湾塩分の月平均値の季節変化

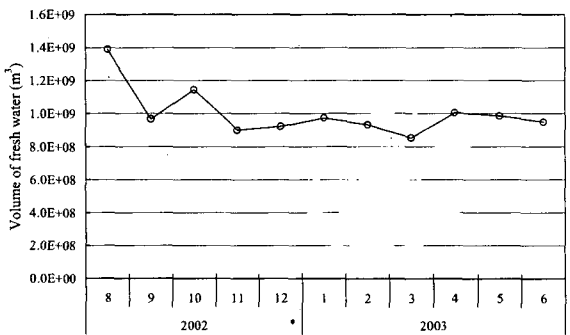


図-12 内湾の淡水存在量の月平均値の季節変化

$$Q_f = \frac{S_o - S_i}{S_o} V_i \quad (4)$$

ここで、 Q_f は内湾淡水存在量の月平均値 (m^3)、 S_o は外湾塩分の月平均値、 S_i は内湾空間平均塩分の月平均値、 V_i は内湾の体積 ($1.56 \times 10^{10} m^3$)である。本研究では外洋塩分として図-10に示す外湾下層塩分を外洋塩分とした。

図-12に内湾淡水存在量の月平均値の季節変化を示す。内湾の淡水存在量は8月に最も多く $1.4 \times 10^9 m^3$ に及ぶ。

これは内湾体積の約10%である。11月から6月にかけては淡水量は約 $9.0 \times 10^8 m^3$ (内湾体積の約6%)であり8月と比べて相対的に少ない。

5. 2002年の淡水流入量

東京湾への淡水流入量についてはこれまで宇野木・岸野(1977a), 東京湾研究会(1978)および松村・石丸(2004)らが報告している。宇野木・岸野(1977a)は河川流量が測

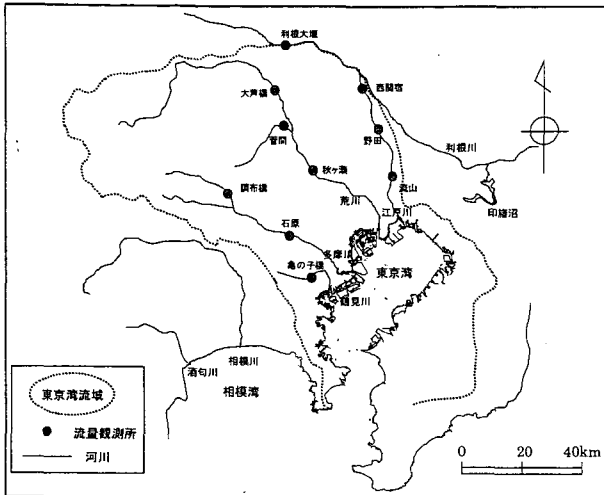


図-13 東京湾に流入する一級河川の流量測定地点

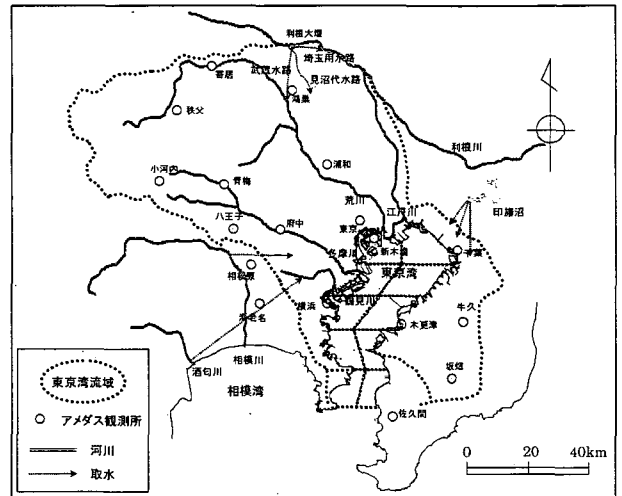


図-14 流域図およびアメガス観測地点. 図中の矢印は流域外からの取水を示す.

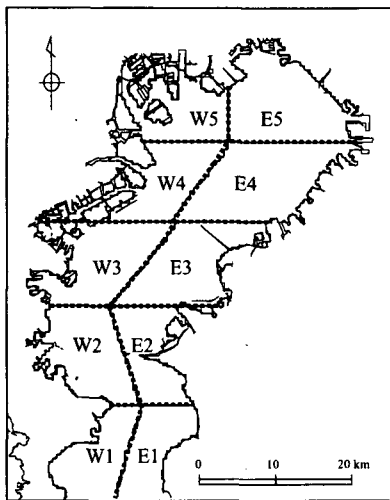


図-15 淡水流入量の算出に用いた海域区分

定されている江戸川水系, 荒川水系, 多摩川および鶴見川は直接流量を算出し, それらの河川水系に属さない流域の河川については流域面積, 降水量および流出率から流量を推定している. これに, 海面への降水量-蒸発量を加えて東京湾への淡水流入量を算出している. これによると, 年間淡水流入量は75億 m^3 /年(約238 m^3/s)である. 東京湾研究会(1978)は流域面積, その流域の降水量および流出率を掛けて降雨由来の淡水流入量を算出している. この淡水流入量に江戸川流量を加えて, 東京湾に流入する年間淡水流入量を示している. その値は101億 m^3 /年(約320 m^3/s)である. 松村・石丸(2004)は1997年4月から2年間の淡水流入量を各河川の流量, 下水処理場および工場からの排水量, 海面の降水量-蒸発量から算出している. これによると, 年平均の淡水流入量は河川352 m^3/s ,

下水処理場 50 m^3/s , 工場 31 m^3/s , 降雨 39 m^3/s , 蒸発量 39 m^3/s となり, 合計433 m^3/s の淡水が東京湾に流入すると見積もっている.

港内へ流入する淡水量など, 特定範囲の供給量を調べるには松村・石丸(2004)の様に沿岸線での流量を把握する方法が簡単かつ精度が高い手法と思われる. しかし, 高度に都市化した地域では, 淡水の移動経路は極めて複雑である. その為, 松村・石丸(2004)の手法は非常に手間を要し, 慎重に加算を行わないと漏れが生じたり, 2回以上加算する可能性を生じてしまう. 河川流量が高精度かつ高頻度に測定されているような地域の淡水流入量を調べる場合には宇野木・岸野(1977a)による手法が簡単である. しかし, 東京湾は約7000 km^2 もの流域面積を持ち, 荒川, 多摩川, 江戸川, 鶴見川の様な一級河川に加え多くの一級河川外の河川が存在する. 一級河川には流量観測所が存在するがその殆どは河川中流および上流に位置している(図-13参照). また, 一級河川外の河川では年に数回程度平常時の河川流量が観測されているのみである. このため, 東京湾に流入する河川流量のデータが不十分であり淡水流入量の推算は難しい. それに対し, 東京湾研究会(1978)の手法は降水量, 流出率, 流域面積を設定することで, 広域の淡水流入量を高い精度かつ容易に推算することができる. また, この手法は降水量がわかると, 河川流量が測定されていないような過去の淡水流入量についても推算することが可能である(付録C参照). そこで, 本研究では東京湾研究会(1978)の手法を適用し, 流域への降水量に流出率と流域面積をかけて降雨由来の

表-3 各海域区分の流域における降水量推定に用いたアメダス観測地点

BOX	観測地点	BOX	観測地点
W5	相模原, 海老名, 横浜	E3,E4,E5	木更津, 坂畑, 佐久間
W4	小河内, 青梅, 八王子, 府中	E1,E2	千葉, 木更津, 牛久
W1,W2,W3	秩父, 寄居, 鴻巣, 浦和, 東京	海域	横浜, 新木場, 千葉, 木更津

表-5 各海域区分に流入する淡水の流出率

BOX	流出率	BOX	流出率
W5	0.60	E5	0.65
W4	0.60	E4	0.65
W3	0.65	E3	0.65
W2	0.65	E2	0.65
W1	0.65	E1	0.65

淡水流入量を算定した。この際に流域を5つの領域に分割し、それぞれの領域で降水量、流域面積を調べた。これに江戸川流量を加算した。さらに、東京湾研究会(1978)では考慮されていない、都市化による流域外から流域内への取水量および海域への直接降雨量についても算定し、加算した。

5.1 淡水流入量算出手法

東京湾の主な淡水供給源である①流域への降雨、②流域外からの流入水および取水、③海域への直接降雨について、その算出手法を解説する。

(1) 流域への降雨による淡水供給量

流域への降雨による淡水供給量は「降水量×流域面積×流出率」により算出した(図-14参照)。各要素は図-15に示す海域区分に従い、各海域の流域毎に降水量、流域面積、流出率を設定した。降水量はアメダスデータ(気象庁, 2002, 2003)を用いた。図-14に降水量の設定に用いたアメダス観測地点を示す。図-15に示す各海域の流域毎に、表-3に示すように、荒川が流入するW5は秩父・寄居・鴻巣・浦和・東京の降水量を月毎にアンサンブル平均して各月の代表降水量を設定した。多摩川が流入するW4は小河内・青梅・八王子・府中の降水量をアンサンブル平均して各月の代表降水量を設定した。W1, W2, W3は大きな降水量の差はないと考え相模原・海老名・横浜の降水量をアンサンブル平均して各月の代表降水量を設定した。東側の地域は南北二つに分割し、千葉県北側に該当するE3, E4, E5は千葉・木更津・牛久の降水量をアンサンブル平均して代表降水量を設定し、南側に該当

表-4 市町村面積に基づいて算出した各海域区分の流域面積

BOX	面積(km ²)	BOX	面積(km ²)
W5	4372.9	E5	399.8
W4	1415.4	E4	368.2
W3	324.3	E3	233.6
W2	50.0	E2	421.4
W1	60.0	E1	102.6

するE1, E2は木更津・坂畑・佐久間の降水量をアンサンブル平均して代表降水量を設定した。

流域面積は国土地理院ホームページ (<http://www.gsi.go.jp>) より平成15年4月の市区町村面積を参考に求めた(表-4参照)。

流出率は東京湾研究会報告(1978)にならい、荒川・多摩川流域に該当するW4, W5を0.6に、その他の流域を0.65に設定した(表-5参照)。

(2) 流域外から流域内へ供給される淡水量

江戸川は利根川から分派流として東京湾へ流入している河川である。そのため、東京湾へ流入する淡水流量を流域への降水量から算定する場合、江戸川流量を別途考慮する必要がある。

また、東京湾流域の都市化に伴う人口増大等による各種用水の需要から、流域外からの取水が行われてきている。その主なものとして、利根川の利根大堰からの都市用水、農業用水、浄化用水としての取水、印旛沼からの工業用水、都市用水などとしての取水と出水時の排水、相模川や酒匂川からの川崎市・横浜市・横須賀市へ供給される工業用水・都市用水があげられる。それぞれの取水経路の略図を図-14に矢印で示す。

(3) 海域への直接降雨

東京内湾の表面積は約1,000km²であり、これは多摩川の流域面積の約8割に匹敵する。そのため、東京湾への直接降雨も無視することはできない。ここでは、海域への降水量から蒸発量を差し引いた量を海域への直接降雨とした。海域への降水量は東京湾に隣接する横浜、新木場、千葉、木更津のアメダスデータを用いて算出した。蒸発量は柳(1994)に記されるバルク式によって算出した。

$$q_e = \frac{Q_e}{L} \tag{5}$$

$$Q_e = 0.622 \rho_a L C_E (E_s - E_a) \frac{W}{P} \tag{6}$$

表-6 各海域区分の海域面積

BOX	面積(km ²)	BOX	面積(km ²)
W5	94.0	E5	157.0
W4	103.8	E4	165.8
W3	132.3	E3	132.3
W2	118.3	E2	86.0
W1	88.0	E1	82.3

表-7 流域外から流入する淡水量

項目	淡水流入量(m ³ /s)	流入海域
江戸川	図-19参照	W5
利根大堰	61.8	W5
印旛沼	7.9	E4(3.1),E5(4.8)
川崎市・横浜市・横須賀市	28.3	W1(1.4),W2(1.1),W3(17.3),W4(8.4)

ここで、 q_e は蒸発量(kg/m²/s)、 Q_e は海水の蒸発による潜熱輸送(kcal/m²/s)、 L は蒸発の潜熱(=586kcal/kg)、 ρ_a は空気の密度(kg/m³)、 C_e は潜熱輸送係数($C_e=1.1 \times 10^{-3}$)、 E_s は飽和海面蒸気圧(hPa)、 E_a は大気の水蒸気圧(hPa)、 W は風速(m/s)、 P は海面気圧(hPa)をそれぞれ示す。空気の密度は

$$\rho_a = \frac{1.293}{1 + 0.00367 \cdot T_a} \cdot \frac{P}{1013.25} \quad (7)$$

により求めた(国立天文台,1998)。ここで、 T_a は気温(°C)を示す。

気温、海水面の水温、蒸気圧、風速、大気圧のうち、気温と風速は横浜、新木場、千葉、木更津の気象データを用い、蒸気圧、大気圧は横浜および千葉の気象データの平均値を用いた。表面水温は東京湾広域環境調査の観測値を用いた。

算出される単位面積当たりの海面淡水収支に海域面積を掛けて、海域ごとの淡水供給量を見積もった。海域面積は海図(海上保安庁,2000)をもとに作成した500mメッシュの地形データから算出した(表-6参照)。

5.2 淡水流入量算出結果

(1) 流域への降雨

2002年7月から2003年6月にかけての各海域に対するそれぞれの気象観測地点の月平均降水量と各海域毎の平均の月平均降水量を図-16に示す。図-17には各海域の平均の月平均降水量に流域面積と流出率をかけて得られる流量をまとめて示している。W5に流入する降水量が一番多く、次はW4である。東京湾には西側の湾奥からの淡水流入が大きな割合を占めていることが判る。降水量の季節変動に伴い、淡水流入量は7月から10月にかけての流量が多く、11月から2月にかけての流量は非常に少なくなっている。

(2) 流域外から流域内へ供給される淡水量

2002年の江戸川の流量観測値は現時点(2003年10月時点)ではまだ公開されていないので、江戸川の本流で

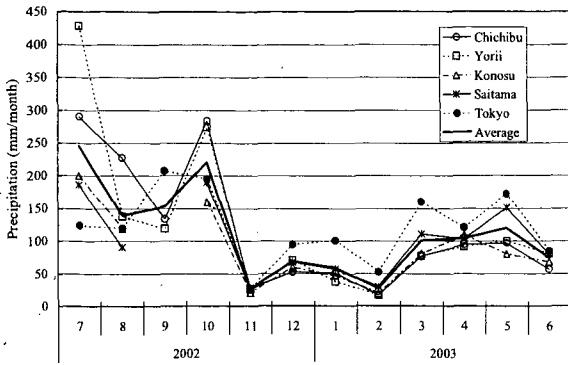
ある利根川上流に位置する前橋の1995年1月から2000年12月の月降水量(気象庁,1996-2001)から推定する。1995年1月から2000年12月における前橋の月降水量と江戸川上流に位置する西関宿の月平均流量(国土交通省,1997-2002)との回帰分析結果を図-18に示す。二乗相関0.65であり、西関宿流量は前橋の降水量に比例すると言える。そこで、この回帰直線の関係を用いて2002年7月から2003年6にかけての西関宿の月平均流量を前橋の月降水量から推算した(図-19参照)。

利根大堰からの取水量の経年変化を図-20に示す(水資源開発公団,2001)。取水は1964年に開始され、1980年頃まで徐々に増加しているが、その後は約60 m³/sでほぼ横ばいである。印旛沼からの取水量および東京湾への排水量を図-21に示す(水資源開発公団,2003)。1970年代前半に急激に増加し約4.5 m³/sに達したが、1970年代後半に減少し1980年頃からは約3 m³/sで横ばいである。川崎、横浜、横須賀への工業用水、水道用水として流域外からの取水量を図-22に示す((川崎市,1963,1973,1989,2001,2003),(横浜市,1954,1971,1979,1987,2000,2001)(横須賀市,1974),(厚生省,1970,1971,1972,1980,1981,1982,1990,1991,1992,2000,2001),(経済産業省,2001,2002)をもとに作成)。1900年から1990年まで増加傾向を続けたが、近年は横這い傾向を保っている。近年の利根大堰流量、印旛沼流量、川崎・横浜・横須賀の用水流量共にほぼ横ばいに推移しているため、2002年の取水量として2000年の取水量を与えることにした。取水量として用いた値を表-7に示す。なお、それぞれの取水量の季節変動は無いものとした。

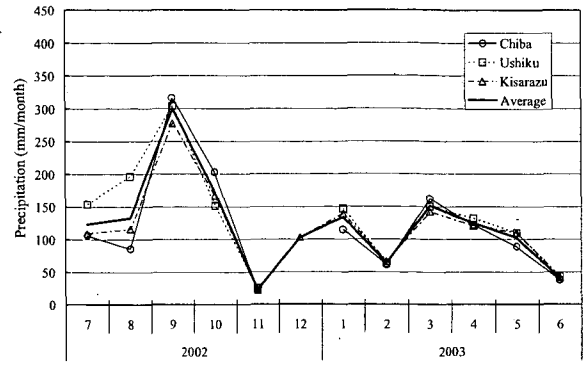
(3) 海域への直接降雨

図-23に東京湾沿岸に位置する気象観測地点である横浜、新木場、千葉、木更津の月降水量を示す。海域への降水量はこれら4地点のアンサンブル平均値を全域一様に与えた。

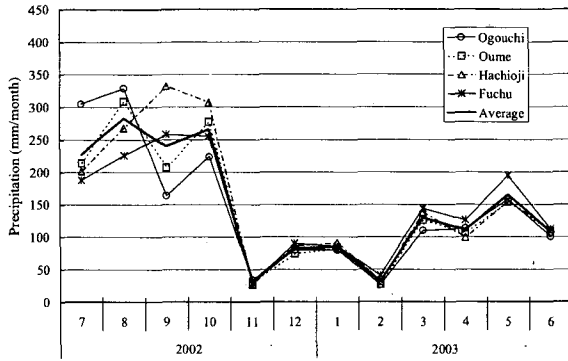
図-24に海面蒸発量の算出に用いた各項目の月平均値を示す。これらを用いて算出される降水量、蒸発量およびその収支(降水量-蒸発量)の季節変化を図-25に示す。



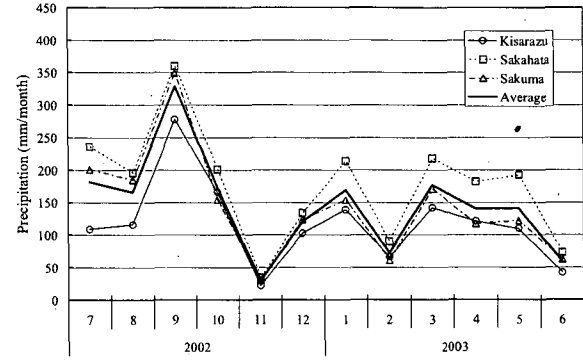
(a) W5



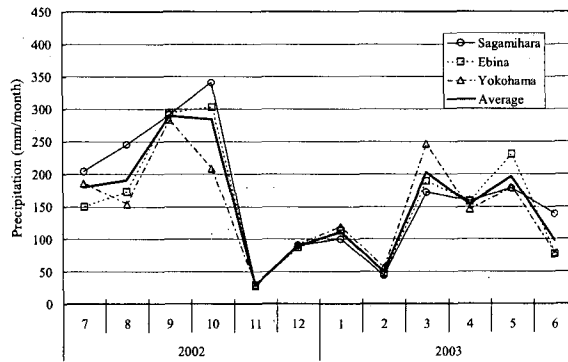
(b) E3, E4, E5



(c) W4



(d) E1, E2



(e) W1, W2, W3

図-16 各海域区分に流入する淡水の流域における月降水量の季節変化

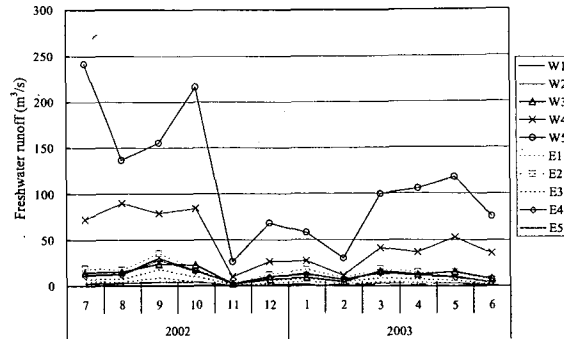


図-17 各海域区分に流入する降雨による淡水流入量の月平均値の季節変化

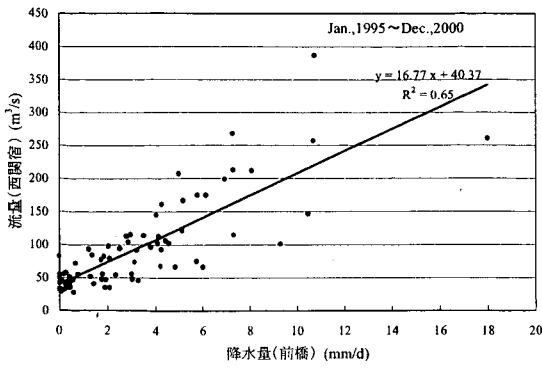


図-18 1995年1月から2000年12月の前橋の月降水量と西関宿の月平均流量の回帰分析結果

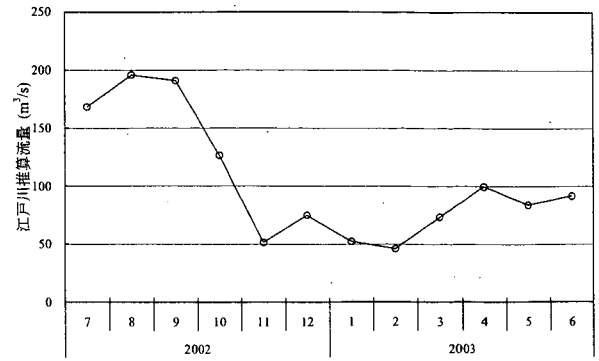


図-19 前橋の月降水量から推算された江戸川月平均流量の季節変化

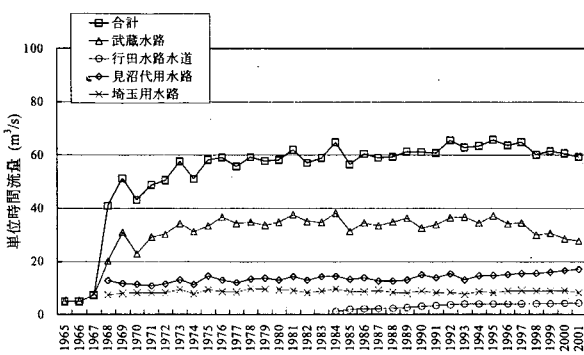


図-20 利根大堰からの取水量の経年変化

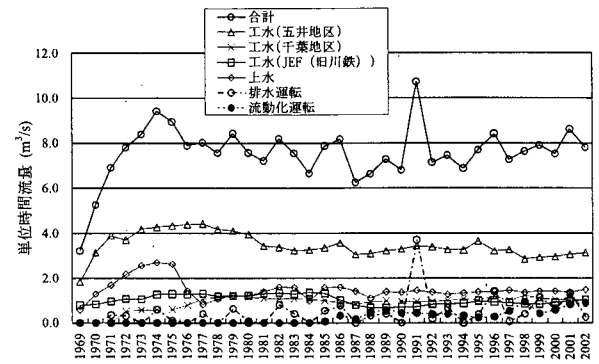


図-21 印旛沼からの取水量と出水時排水量の経年変化

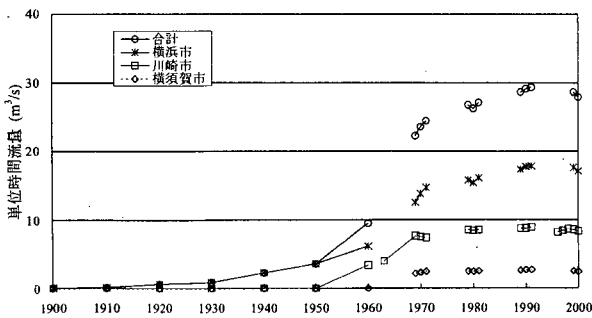


図-22 川崎市・横浜市・横須賀市の流域外からの取水量の経年変化

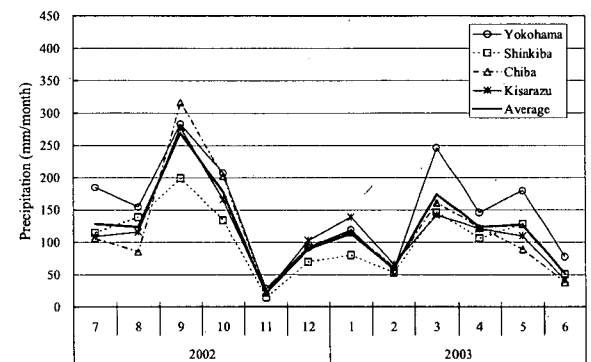


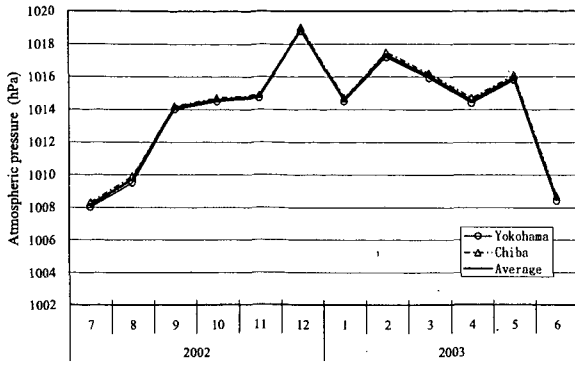
図-23 東京湾沿岸に位置する観測所における月降水量の季節変化

降水量の少ない11月と2月で蒸発量の方が降水量よりも多い。その他の月は降水量の方が多。また、これに各海域の海域面積を掛け合わせて得られる各海域毎の淡水供給量の季節変化を図-26に示す。年平均降水量、年平均蒸発量はそれぞれ45.8m³/s, 30.1m³/sに相当する。

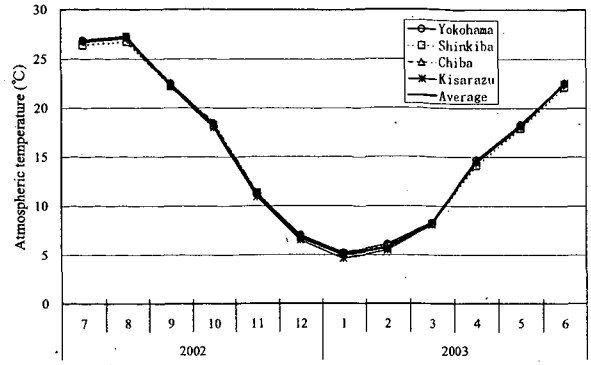
(4) 淡水供給量

以上述べた陸域への降雨による淡水供給, 流域外から

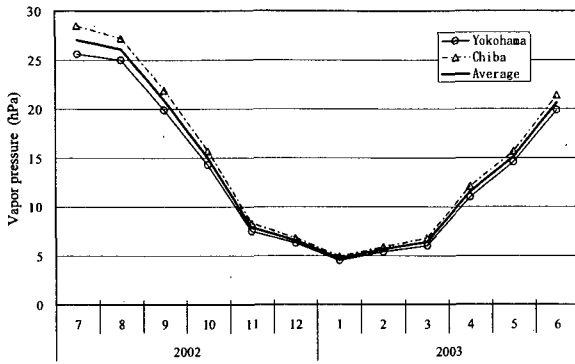
流入する淡水供給, 海面への淡水供給を加えて東京内湾(EIおよびW1を除く海域)に流入する淡水供給量を求めた(図-27参照)。2002年7月から10月にかけての淡水流入量は600m³/s以上であるが、11月から2月にかけては300m³/s程度に減少する。そして、3月から5月にかけて再び400m³/sを超える流量となる。年平均の淡水流入量は441m³/sであり、松村・石丸(2004)が各河川の下流における流量および下水処理排水量等を考慮して算出し



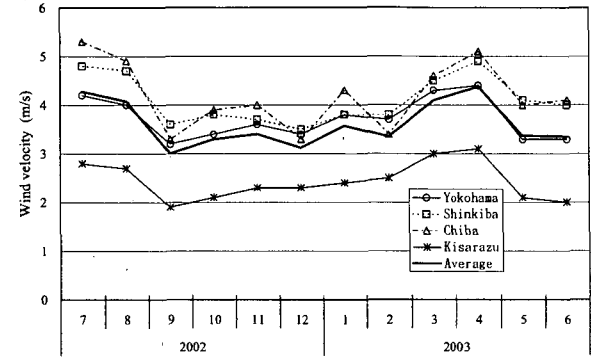
(a) 海面気圧



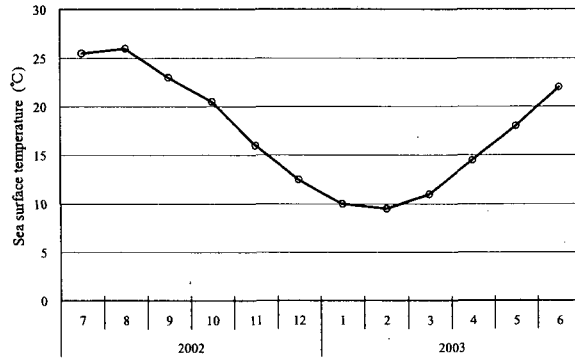
(b) 気温



(c) 蒸気圧



(d) 平均風速



(e) 海面水温

図-24 海面蒸発量に必要な各要素の月平均値の季節変化

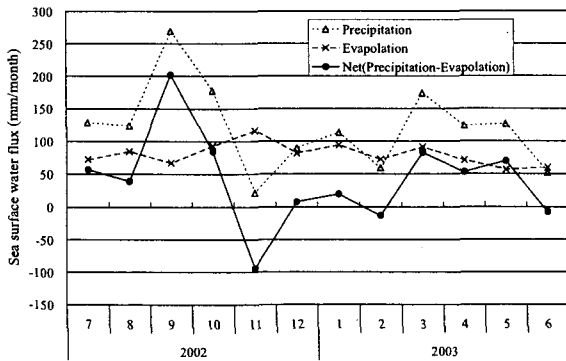


図-25 海面の月降水量, 月蒸発量およびその収支の季節変化

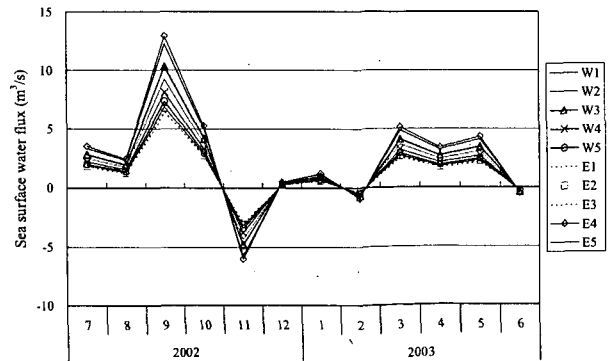


図-26 各海域に対する海面への直接降雨による淡水供給量の月平均値の季節変化

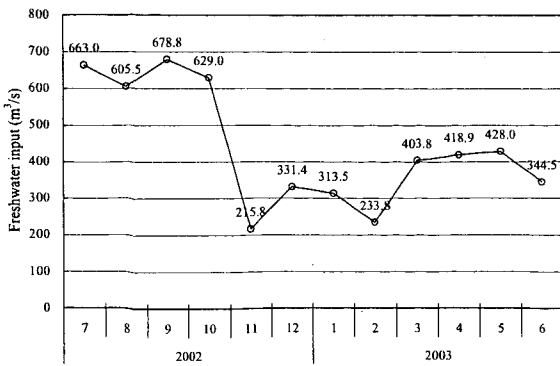


図-27 淡水流入量の合計値の月平均値の季節変化

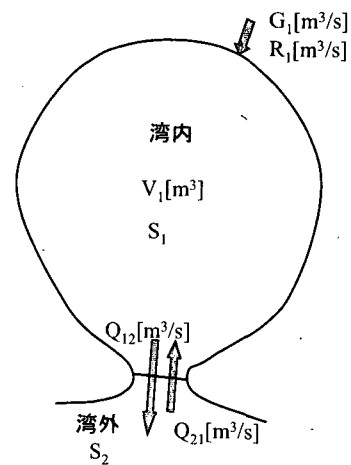


図-28 ボックスモデルの模式図

た1997年4月から2年間の東京湾の淡水流入量の年平均値433 m³/sと極めて近い値となっている。

6. 2002年の海水の滞留時間

海域全体を対象とした海水交換を定量的に示す方法として、観測値に基づいて湾口でのフラックスを算定する方法(宇野木・岸野, 1977a, 1977b)を用いた。これは対象とする海域を適当なボックスに分け、海水と指標物質に関して成り立つ連続条件を基に、ボックス間の交換の強さを推定する方法である。例えば、指標物質を塩分とする場合、海水の保存式と塩分の保存式に関して成り立つ連立方程式を解いて、ボックス間の交換量を推定するというものである。

図-28に示すように湾内、湾外の二つのボックスを考えると塩分の保存式と海水の保存式はそれぞれ式(8)、(9)のように表すことができる。

$$V_1 \frac{\partial S_1}{\partial t} = Q_{21} S_2 - Q_{12} S_1 + G_1 \quad (8)$$

$$Q_{12} = Q_{21} + R_1 \quad (9)$$

ここで、添え字の1および2はそれぞれ湾内と湾外のボックスを表し、 V : ボックス体積 (m³), S : 塩分, Q : ボックス間の交換量 (Q_{12} はボックス1から2への, Q_{21} はボックス2から1への輸送量), G : 負荷量(陸域からの塩分負荷量(通常は $G=0$))をそれぞれ示す。式中の未知数に該当するこの海水交換量 Q_{12} , Q_{21} は拡散も含んだ湾内と湾外の間海水交換量であり輸送係数と呼ばれる(宇野木・岸野, 1977a, 1977b)。移流と交換の機能は全て輸送係数の中に含まれている。ここで、 V , S , G , R がわかっていると、両式から Q_{12} および Q_{21} は次のように展開される。

$$Q_{12} = \frac{V_1 \frac{\partial S_1}{\partial t} + R_1 S_2}{S_2 - S_1} \quad (10)$$

$$Q_{21} = \frac{V_1 \frac{\partial S_1}{\partial t} + R_1 S_1}{S_2 - S_1} \quad (11)$$

塩分の場合、これらの輸送係数は湾内体積 V_1 , 湾内塩分 S_1 , 湾外塩分 S_2 , 湾内への淡水流入量 R_1 から求められる。

この式を東京湾の内湾に適用した。内湾のボックス体積(V_1)は $1.56 \times 10^{10} \text{m}^3$ とした(海図(海上保安庁, 2000))をもとに作成した500mメッシュの地形データから算出)。内湾塩分と外湾塩分は図-11で示した内湾空間平均塩分と外湾空間平均塩分の月平均値を、内湾への淡水流入量は図-27で示した淡水流入量の月平均値を用いることとした。式(8)左辺の時間変化項に対しては、月平均値を用いて勾配をとると時間誤差が大きいため、半月分ずらした月平均値を新たに算出して、その勾配を求めた。例えば、8月の時間変化項に用いた月平均値は7月16日から8月15日までの平均値と8月16日から9月15日までの平均値である。

海水の滞留時間 τ は次式で定義され、湾内の体積を海域から流出する輸送係数 Q_{12} で割ることで求められる。

$$\tau = \frac{V_1}{Q_{12}} \quad (12)$$

得られる海水の滞留時間の季節変化を図-29に示す。海水の滞留時間は夏季に最も短く20日程度であり、秋季から長くなり、冬季に最も長く40日程度である。そして、春季にかけて再び短くなる。海水の滞留時間の年平均値

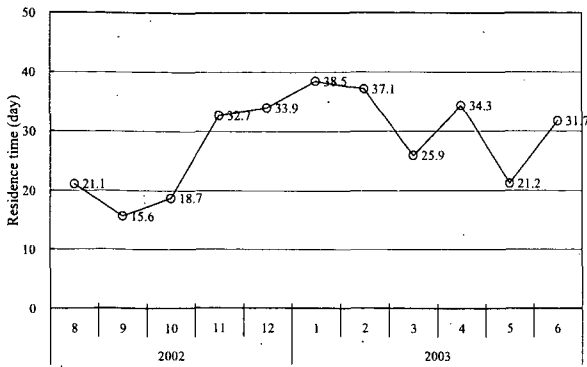


図-29 海水の滞留時間の月平均値の季節変化

は28日であった。

7. 過去と2002年の海水の滞留時間の比較

前章までにおいて、2002年の淡水流入量、淡水存在量および海水の滞留時間の算出を行い、2002年のそれぞれの特徴について示した。本章ではその結果を過去の値と比較して、2002年の特徴を相対的に示す。本研究では、比較対照として宇野木・岸野(1977a)の空間平均塩分の月平均値を用いる。これは1947年-1974年に観測された塩分の期間平均値の月平均値である(表-8参照)。以後、この塩分の月平均値を用いた結果を1947-1974年として記す。

7.1 過去と2002年の淡水流入量の比較

過去の淡水流入量として1956年-1965年の期間平均値の月平均値を求めた。この1956年-1965年の淡水流入量の平均値の算出手法は2002年の淡水流入量と同様に流域への降雨、流域外からの流入水および取水、海域への直接降雨をそれぞれ見積もり、それぞれを足し合わせて求めた(付録C参照)。以後、この1956年-1965年の期間平均淡水流入量のことを1956-1965年として記す。2002年と1956-1965年の淡水流入量の季節変化を図-30に示す。月平均値を比較するため、2002年の値は2003年1月から6月を前に、2002年8月から12月を後ろに並べた。淡水流入量の年平均値は2002年が441 m³/sであるのに対して1956-1965年は315 m³/sであった。2002年の淡水流入量は1956-1965年よりも各月共に100m³/s程度多い。特に冬季(1-3月)においてその差は大きく1956-1965年の冬季の平均淡水流入量は161 m³/sであるのに対し、2002年の冬季の平均淡水流入量は317 m³/sであった。2002年の冬季

表-8 1947-1974年(宇野木・岸野, 1977a,1977b)と2002年の観測塩分の整理条件の比較

	1947-1974年 (宇野木・岸野,1977)	2002年
観測期間	1947年から1974年の 平均値	2002年7月から2003年6月
観測密度	収集された上記期間の 約51000個の資料*	27地点(鉛直方向に 1m間隔)×22回
時間整理 方法	月毎に整理して 月平均値を算出	観測日毎に整理し、 それから月平均値を 算出
空間整理 方法	東京湾内外を3分(約 5km)間隔に分割し、 鉛直方向に7層**に 分割	東京湾内外を1km間隔 (約0.5分)に分割し、 鉛直方向に1m間隔に 分割
外洋塩分の 設定方法	外湾の塩分	外湾の塩分

* 千葉県・神奈川県水産試験場、運輸省、建設省、環境庁、一都三県公害防止協議会資料

** 0~2m, 3~7m, 8~15m, 16~25m, 26~40m, 41~70m, 71~130mの7層

の淡水流入量の方が約155m³/s多く、相対的な比は約2倍になる。

この淡水流入量の差の要因は、系外からの取水の増加と降雨の増加である。1956-1965年の淡水流入量に対する流域外からの取水量は10m³/sであるのに対して、2002年の流域外からの取水量は約95m³/sである。これから、約155m³/sの冬季の淡水流入量の差に対してその約5割が流域外からの取水量の増加分である。

図-31に1976年から2003年にかけての青梅の冬季(1-3月)の一月あたりの降水量の経年変化を示す。我々は2002年7月から2003年6月の期間を2002年と表現することにした。このため、2002年冬季は図中の2003年に該当する。2003年1-3月の降水量(78mm/month)は平均値(61mm/month)に標準偏差(19mm/month)を加えた値に近く、例年に比べて降水量の多い期間だったと言える。

7.2 過去と2002年の内湾平均塩分の比較

図-32は2002年の内湾平均塩分の月平均値の季節変化と1947-1974年(宇野木・岸野,1977a)の内湾平均塩分の月平均値の季節変化を示したものである。月平均値を比較するため、2002年の値は2003年1月から6月を前に、2002年8月から12月を後ろに並べた。夏季は2002年の方が高い傾向がある。前述したように2002年の冬季の淡水流入量は1956-1965年の冬季の2倍の淡水流入量に相当しているにも関わらず冬季はほぼ同じ値である。

そこで、1947-1974年の2月の平均塩分の湾奥から湾口にかけての縦断面分布図(宇野木・岸野, 1977a)を図-

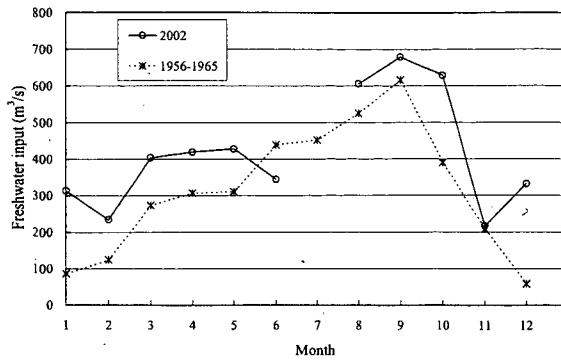


図-30 2002年と1956-1965年の淡水流入量の月平均値の季節変化の比較

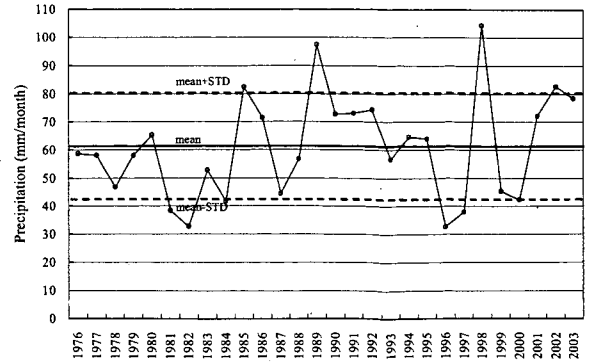


図-31 青梅における冬季(1-3月)の一月あたりの降水量の経年変化。平均値(61mm/month)を太い実線で、平均値±標準偏差(19mm/month)を太い破線でそれぞれ示す。本解析の2002年冬季は図中の2003年に該当する。

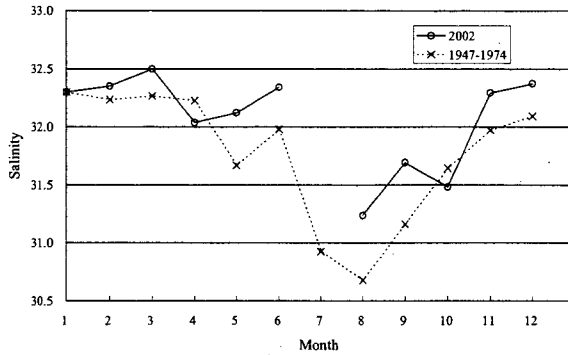


図-32 1947-1974年の期間平均内湾塩分(宇野木・岸野, 1977a)と2002年の内湾塩分の月平均値の季節変化の比較

33に、2003年2月22日の観測による湾奥から湾口にかけての塩分の縦断面分布図を図-34に示す。2003年2月の方が強い塩分層が現れており、底層塩分が高い。また、湾外から湾底層に流入した高塩分水は底層を通じて湾奥まで達している。このことが、1956-1965年よりも2002年の冬季の方が淡水流入量が多いにもかかわらず内湾の平均塩分を高くしている要因と考えられる。

しかし、宇野木・岸野(1977a)の分布は30年に及ぶ期間の平均像であるのに対して、2003年2月のデータはある日時の現象(スナップショット)である。そのため、2003年2月の縦断面分布は大潮・小潮の影響や、急潮等の短期的な変動成分は取り除かれていない。そこで、2003年2月22日前後のst. a(図-2参照)における底層塩分の時系列変化を図-35に示す。図中の矢印は観測日時を示す。湾内底層の塩分はおよそ15日の周期で32psuから34psuの間を変動しているが、観測日はこの塩分変動の中で特に高い場合を観測したのもでも低い場合を観測した

ものでもない。したがって、今回の結果は小潮時の湾外水の底層侵入や突発的な湾外水の侵入によって湾内の塩分量が増した短期的な状態をたまたま捉えたものではないと言える。

7.3 過去と2002年の海水の滞留時間の比較

1947-1974年と2002年の海水の滞留時間を図-36に示す。月平均値を比較するため、2002年の値は2003年1月から6月を前に、2002年8月から12月を後ろに並べた。1947-1974年の海水の滞留時間は、宇野木・岸野(1977a)の塩分データと前述の1956-1965年の淡水流入量から算出した。

両者を比較すると、8月から10月は約20日で同じであるが、12月から2月にかけては差が大きい。12月から2月にかけて、1947-1974年の海水の滞留時間が約90日であるのに対して、2002年の海水の滞留時間は約40日である。冬季に関しては、2002年の海水の滞留時間は1947-1974年の1/2でしかない。

式(10)、(12)を用いると、海水の滞留時間を次式の様に表示することができる。

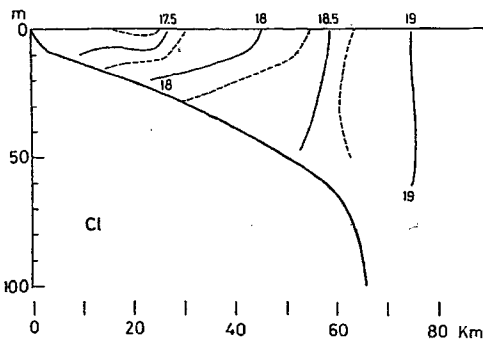


図-33 1947-1977年の2月の平均的な塩素量(‰)の縦断面分布 (宇野木・岸野, 1977a)

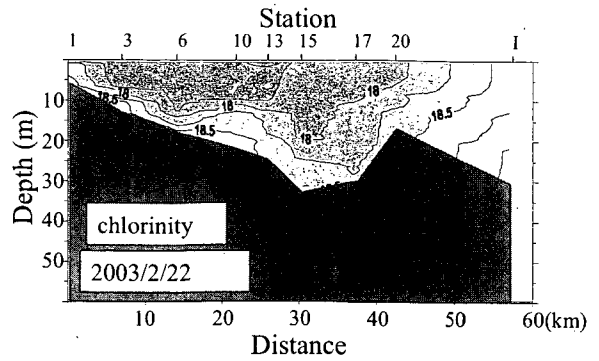


図-34 2003年2月22日の塩素量(‰)の縦断面分布

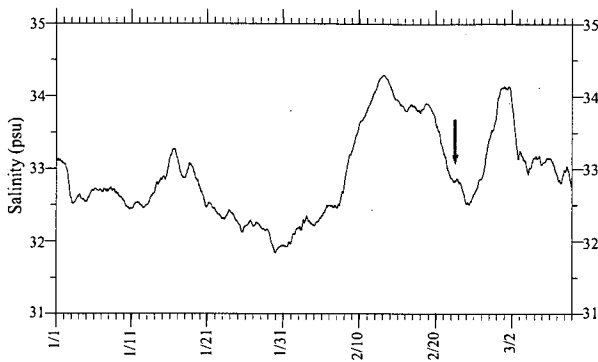


図-35 2003年1月-3月のst.aにおける塩分の時系列. 図中の矢印は観測日(2月22日)の塩分を示す.

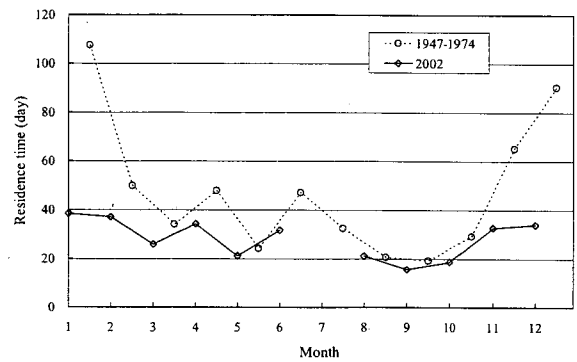


図-36 1947-1974年と2002年の海水の滞留時間の月平均値の季節変化の比較

$$\tau = \frac{V_1}{Q_2} = \frac{S_2 - S_1}{V_1 \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} + S_2 \cdot R} \cdot V_1 \cong \frac{S_2 - S_1 \cdot V_1}{S_2 \cdot R} \quad (13)$$

内湾塩分の冬季の時間変化項は小さいので無視すると、海水の滞留時間は河川流量Rに反比例し、湾内外の塩分差($S_2 - S_1$)に比例する。宇野木・岸野(1977a)の用いた外湾塩分 S_2 の冬季の平均は34.4((宇野木・岸野, 1977a)の図を基に導出)であり、本研究での冬季の外湾塩分も34.4で同じある。したがって、内湾塩分 S_1 が1947-1974年の平均値と2002年でほぼ同じと言う前述の結果は、1947-1974年と2002年の海水の滞留時間の差は淡水流入量のみ大きく依存することを意味する。つまり、2002年は1947-1974年と比べて、淡水流入量は2倍であるが、内湾塩分は類似なので、海水の滞留時間は1/2倍の値になったとモデル上は説明できる。

しかしながら今回の検討では、淡水流入量の増加のみが内湾塩分が同じになる程度に成層を強めたのか、それとも他の要因が成層化に強く寄与しているのかについて

までは判らない。滞留時間の変化に関する検討として、柳・阿部(2003)は有明海の滞留時間の減少を報告している。観測データに基づき1990年から11年間の有明海の海水交換について検討した結果、有明海は基本的には河川流量の多い年に河川水の平均滞留時間は短く、河川流量の少ない年に河川水の平均滞留時間は長くなる河口循環流に支配されていることを示している。その上で、河川流量が同じ条件では1990年初めより1990年後半の方が鉛直方向の塩分勾配が大きく、高塩分水が有明海奥部の底層まで侵入しやすくなっていることを指摘している。そして、この要因の一つに潮流振幅の減少により鉛直混合が弱められその結果成層化が強くなり、河口循環流が強化されていることをあげている。東京湾の潮流振幅の変化については、宇野木・小西(1998)は東京湾において1960年以降の埋立てにより湾口部の M_2 分潮流の振幅は11%減少したことを、また、柳・大西(1999)は東京湾の M_2 分潮の数値計算により1923年を基準にすると湾口部の潮流振幅は1968年に81%に、1983年に65%にまで減少していることを示した。このように、有明海と同様に東京湾においても潮流振幅の減少が生じているため、同

様なメカニズムによって塩分成層化が強められ、滞留時間の減少を促している可能性がある。

一方、2層化モデル(付録D参照)を用いて冬季の鉛直循環流を算出したところ、1960年代は2952m³/s、2002年は3898m³/sであり、鉛直循環流も約2倍に大きくなっていることが示された。2002年の鉛直循環流 Q_{oi} と河川流量 R の比 $\lambda = Q_{oi}/R$ は1960年代と同じく夏季は約12、冬季は約6であった。この λ の値は、湾によって異なった値をとる。例えば大阪湾では、湯浅ら(1993)の観測結果に基づいた宇野木(1998)の計算では9月で37.7、藤原ら(1994)の観測結果に基づいた宇野木(1998)の計算では8月で25.4である。また、三河湾に対しては、冬季は21.1、夏季は8.5である(宇野木, 1998)。このように湾および成層状態(季節)に応じて大きく異なる値をとる λ が、1960年と2002年の夏季と冬季で一致することは非常に興味深く、本研究で得られた東京湾の冬季の海水の滞留時間の減少の要因は潮流振幅の減少よりも淡水流入量の増加に支配的に依存している可能性も否定できない。この点については、数値モデルを用いた各物理過程の感度解析による検討が必要であると考えられる。

8. おわりに

2002年7月から2003年6月の東京湾の海水の滞留時間の算定を行った。算定には同期間に高密度(湾内27地点)・高頻度(22回)に実施された観測データを用いた。また、流域への降水量、流域外からの流入量と取水量、海域への降水量-蒸発量から推定された淡水流入量を用いた。さらに、宇野木・岸野(1977a, 1977b)の淡水流入量を見直し、1947年-1974年の海水の滞留時間をあらためて算出した。淡水流入量の見直しは2002年と同様の手法を用いた。両者の結果を比較することによって、2002年の海水の滞留時間の特徴について検討を行った。得られた主要な結果を以下に示す。

- (1) 2002年の東京湾の海水の滞留時間は、夏季:約20日、冬季:約40日であった。
- (2) 2002年と1947-1974年の東京湾の海水の滞留時間を比較すると、海水の滞留時間は夏季に短く、冬季に長いという季節的な特徴は一致した。
- (3) 2002年と1947-1974年の夏季の海水の滞留時間はほぼ一致した。しかし冬季の海水の滞留時間は1947-1974年が約90日に対して、2002年は半分の約40日であった。
- (4) 2002年と1956-1965年の冬季の淡水流入量はそれぞれ

317m³/s、161m³/sであり、2002年の冬季の淡水流入量は1956-1965年のその倍であった。この差の内、85m³/sが流域外からの取水量に相当していた。一方、2002年と1947-1974年の冬季の内湾平均塩分はほぼ同じであった。

本研究によって、2002年8月から2003年6月の海水の滞留時間を定量的に示すことができた。また、2002年の冬季の海水の滞留時間は1947-1974年の海水の滞留時間よりも非常に短かったことが明らかとなった。したがって、2002年に実施した東京湾広域環境調査の他のデータを考察する際には、この点に留意して解析・検討を行う必要があると考える。

(2004年2月16日受付)

謝辞

本研究にあたり愛媛大学沿岸環境科学研究センター武岡英隆教授には滞留時間について有益なコメントを頂きました。また、国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部細川恭史部長、日向博文主任研究官には有益な議論を頂きました。水資源開発公団利根導水総合管理所、水資源開発公団千葉用水総合事業所、神奈川県内広域水道企業団、関東地方整備局河川部、関東地方整備局荒川上流河川事務所、関東地方整備局江戸川河川事務所の各担当者には資料の収集にご協力していただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 宇野木早苗, 岸野元彰(1977a): 東京湾の平均的海況と海水交流, 理化学研究所海洋物理学研究室技術報告, Vol.1, pp.1-89.
- 宇野木早苗, 岸野元彰(1977b): 大局的に見た内湾の海水交流, 海岸工学講演会論文集, Vol.24, pp.486-490.
- 宇野木早苗(1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, 673p.
- 宇野木早苗(1998): 内湾の鉛直循環流量と河川流量の関係, 海の研究, Vol.7, No.5, pp.283-292.
- 宇野木早苗, 小西達男(1998): 埋立てに伴う潮汐・潮流の減少とそれが物質分布に及ぼす影響, 海の研究, Vol.7, No.1, pp.1-9.
- 小倉紀雄(1993): 東京湾 -100年の環境変遷-, 恒星社厚生閣, 195p.
- 海上保安庁(2000): 海図, 世界測地系 W90号.

- 上嶋英機, 橋本英資, 山崎宗弘, 宝田盛康(1984): 瀬戸内海の海水交換機構-ラグランジュの手法による水理模型実験-, 海岸工学講演会論文集, Vol.31, pp.665-669.
- 上嶋英機, 橋本英資, 山崎宗弘, 宝田盛康(1986): 湾内水塊の海水交換性-広島湾を対象とした海水交換実験より-, 海岸工学講演会論文集, Vol.33, pp.571-575.
- 川崎市水道局(1963): 昭和38年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報.
- 川崎市水道局(1973): 昭和48年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報.
- 川崎市水道局(1989): 昭和53年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報.
- 川崎市水道局(2001): 平成12年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報.
- 川崎市水道局(2003): 川崎市水道八十年史.
- 気象庁(1996-2003): アメダスCD-ROM.
- 気象庁(1996-2003): 年報CD-ROM.
- 気象庁(2004): 降水量, WWW 公開データ, <http://www.jma.go.jp/>.
- 経済産業省経済産業政策局(2001): 平成11年 工業統計表 用地・用水編.
- 経済産業省経済産業政策局(2002): 平成12年 工業統計表 用地・用水編.
- 国土交通省(1997-2002): 流量年表.
- 国土地理院(2004): 全国都道府県市区町村別面積調(平成15年4月1日), WWW 公開データ, <http://www.gsi.go.jp/>.
- 国立天文台(1998): 理科年表平成11年, 丸善.
- 厚生省環境衛生局(1970): 昭和44年度 水道統計, Vol.52.
- 厚生省環境衛生局(1971): 昭和45年度 水道統計, Vol.53.
- 厚生省環境衛生局(1972): 昭和46年度 水道統計, Vol.54.
- 厚生省環境衛生局(1980): 昭和54年度 水道統計, Vol.62.
- 厚生省環境衛生局(1981): 昭和55年度 水道統計, Vol.63.
- 厚生省環境衛生局(1982): 昭和56年度 水道統計, Vol.64.
- 厚生省生活衛生局(1990): 平成元年度 水道統計 施設・業務編, Vol.72-1.
- 厚生省生活衛生局(1991): 平成2年度 水道統計 施設・業務編, Vol.73-1.
- 厚生省生活衛生局(1992): 平成3年度 水道統計 施設・業務編, Vol.74-1.
- 厚生労働省健康局(2000): 平成11年度 水道統計 施設・業務編, Vol.82-1.
- 厚生労働省健康局(2001): 平成12年度 水道統計 施設・業務編, Vol.83-1.
- 水資源開発公団(2001): 平成13年 水資源開発施設管理年報.
- 水資源開発公団千葉用水総合事業所(2003): 印旛沼開発施設の管理, 平成15年4月.
- 東京湾研究会(1978): 東京湾を診断する(特集), さかな, Vol.21, pp.1-55.
- 中山恵介, 佐藤圭洋(1999): LESモデルによる水平面上張り出しブルームの解析, 土木学会論文集, No.628, II-48, pp.97-114.
- 藤原建紀, 沢田好史, 中辻啓二, 倉本茂樹(1994): 大阪湾東部上層水の交換時間と流動特性 -内湾奥部にみられる高気圧性渦-, 沿岸海洋研究ノート, Vol.31, pp.227-238.
- 堀江毅, 村上和男, 亀山豊, 入尾野幸雄(1977): 東京湾の海水交換に関する水理模型実験, 港湾技術研究所報告, Vol.16, No.3, pp.69-99.
- 松村剛, 石丸隆(2004): 東京湾への淡水流入量と窒素・リンの流入負荷量(1997,98年度), 海の研究, Vol.13, No.1, pp.25-36.
- 村上和男, 森川雅行, 白井正生, 佐藤英治(1986): 強制循環流による海水交換促進の水理模型実験-鹿児島湾モデルによる検討-, 港湾技術研究所資料, No.544, 31p.
- 村上和男(1998): 閉鎖性内湾域の海水浄化に係わる水理・水質環境に関する研究, 港湾技研資料, No.900, 運輸省港湾技術研究所, 142p.
- 柳哲雄(1993): 海洋観測データの処理法, 恒星社厚生閣, 115p.
- 柳哲雄(1994): 沿岸海洋学 -海の中でもものはどう動くか-, 恒星社厚生閣, 154p.
- 柳哲雄, 大西和徳(1999): 埋め立てに伴う東京湾の潮汐・潮流と底質の変化, 海の研究, Vol.8, No.6, pp.411-415.
- 柳哲雄, 阿部良平(2003): 有明海の塩分と河川流量から見た海水交換の経年変動, 海の研究, Vol.12, No.3, pp.269-275.
- 湯浅一郎, 上嶋英機, 橋本英資, 山崎宗弘(1993): 大阪湾奥部の循環流とリンの循環, 沿岸海洋研究ノート, Vol.31, pp.93-107.
- 横須賀市水道局(1974): 昭和48年度 水道事業 統計年報.
- 横浜市水道局(1954): 昭和28年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報.
- 横浜市水道局(1971): 昭和45年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報.

横浜市水道局(1979):昭和53年度 水道事業・工業用水道
事業 統計年報.

横浜市水道局(1987):横浜水道百年の歩み, 昭和62年10
月.

横浜市水道局(2000):平成11年度 水道事業・工業用水道
事業 統計年報.

横浜市水道局(2001):平成12年度 水道事業・工業用水道
事業 統計年報.

Imasato, N., T. Awaji, and H. Kunishi(1980): Tidal exchange
through Naruto, Akashi and Kitan Straits, *Journal of the
Oceanographical Society of Japan*, Vol.36 , pp.151-162.

Murakami, K., K. Shimizu and K. Yamada(1994): Water ex-
change mechanisms in enclosed coastal seas influenced
by marine structures, *HYDRO-PORT '94*, Yokosuka,
pp.921-940.

Takeoka, H.(1984): Exchange and transport time scales in
the Seto Inland Sea, *Cont. Shelf Res.*, Vol.3 , No.4 ,
pp.327-341.

付録 A 平均滞留時間

湾の海水交換能力を表す量として、海水交換率と平均滞留時間がある(村上,1998;柳,1993)。海水交換率は主として潮汐作用によって湾内水が外海水とどのくらい交換しているかを示す係数である(堀江ら,1977;柏井,1984;村上,1998)。平均滞留時間は湾内水がどれくらいの期間で湾外水と入れ替わるかを示す時間である(村上,1998;Takeoka,1984)。海水交換率は湾口周辺の海水の交換を表すものであるが、湾全体の交換を表すものではない。後述するように、後者の平均滞留時間はその対象の設定によっては湾全体の交換を表す。ここでは平均滞留時間に注目し、Takeoka(1984)が整理した平均滞留時間の概念を用いて宇野木・岸野(1977)が東京湾で求めた湾全体の大局的な滞留時間である海水の滞留時間の物理的な意味について整理を行う。

平均滞留時間はその主体によって定義が異なる。しかしながら、それらは仮定次第では同じことを意味する。それ故、その意味を混同することがしばしばある。したがって、それらの違いについてまとめる。

宇野木・岸野(1977)による海水の滞留時間 τ は湾内体積 V_1 を湾口における大局的に見積もった海水交換量 Q で割ったものである。つまり、内湾水は湾口における海水交換量によってどのくらいの時間で更新することができるかを示す指標である。海水交換量はボックスモデルを用いたボックス内の海水および塩分の保存式から導くことができる。例えば、図-A.1に示すように湾内、湾外の二つのボックスを考えると湾内の塩分の保存式と海水の保存式はそれぞれ式(A1)、(A2)のように表すことができる。

$$V_1 \frac{\partial S_1}{\partial t} = Q_{21}S_2 - Q_{12}S_1 + G_1 \quad (A1)$$

$$Q_{12} = Q_{21} + R_1 \quad (A2)$$

ここで、添え字の1および2はそれぞれ湾内と湾外のボックスを表し、 V : ボックス体積 (m^3)、 S : 塩分、 Q : ボックス間の交換量 (Q_{12} はボックス1から2への、 Q_{21} はボックス2から1への輸送量)、 G : 負荷量(陸域からの塩分負荷量(通常は $G=0$))をそれぞれ示す。式中の未知数に該当するこの海水交換量 Q_{12} 、 Q_{21} は拡散も含んだ湾内と湾外間の海水交換量であり輸送係数と呼ばれる(宇野木・岸野,1977)。ここで、 V 、 S 、 G 、 R がわかっていると、両式から Q_{12} および Q_{21} は次のように展開される。

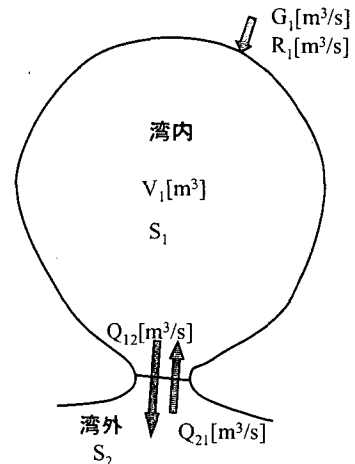


図-A.1 ボックスモデルの模式図

$$Q_{12} = \frac{V_1 \frac{\partial S_1}{\partial t} + R_1 S_2}{S_2 - S_1} \quad (A3)$$

$$Q_{21} = \frac{V_1 \frac{\partial S_1}{\partial t} + R_1 S_1}{S_2 - S_1} \quad (A4)$$

これらの輸送係数は湾内体積 V_1 、湾内塩分 S_1 、湾外塩分 S_2 、湾内への淡水流入量 R_1 から求められる。

海水の滞留時間 τ は次式で定義され、湾内の体積を海域から流出する輸送係数 Q_{12} で割ることで求められる。

$$\tau = \frac{V_1}{Q_{12}} \quad (A5)$$

このため、海水の滞留時間 τ はボックス内に対して完全混合、つまり、濃度は一様であるという仮定を用いている。

式(A3)、(A5)を用いると、海水の滞留時間を次式のように表すことができ、湾内塩分の時間変化が小さく無視できるような場合は、次式右辺のように近似できる。

$$\tau = \frac{V_1}{Q_{12}} = \frac{S_2 - S_1}{V_1 \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} + S_2 \cdot R} \cdot V_1 \cong \frac{S_2 - S_1}{R} \quad (A6)$$

Takeoka(1984)は平均滞留時間の概念をまとめ、沿岸域への適用性について検討している。これによると、例えば図-A.2に示すような湖を考えると、時刻 $t=0$ である粒子が入口から入って経過した時間のことを年齢(age)、出口に到達するまでの時間のことを滞留時間(residence

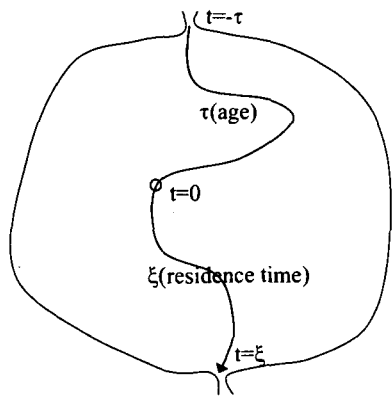


図-A.2 年齢と滞留時間の概念図. Takeoka(1984)を参考に作成.

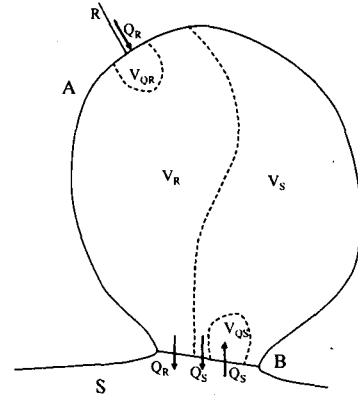


図-A.3 閉鎖性内湾の簡単な概念図. 湾奥に一つの河川が流入し, 外湾と接続する開口部は一つ. Takeoka(1984)を参考に作成.

time)と呼ぶ.これを各粒子で平均したものがそれぞれ平均年齢(average age), 平均滞留時間(average residence time)に該当する. $M(\tau)$ を年齢が τ 以下の物質質量, M_0 を全体の物質質量とすると, 平均年齢(τ_a)は

$$\psi(\tau) = \frac{1}{M_0} \frac{dM(\tau)}{d\tau} \quad (A7)$$

$$\tau_a = \int_0^{\infty} \tau \cdot \psi(\tau) d\tau \quad (A8)$$

と表される. また, $M^*(\xi)$ を滞留時間 ξ 以下の物質質量とすると平均滞留時間(τ_r)は

$$\psi^*(\xi) = \frac{1}{M_0} \frac{dM^*(\xi)}{d\xi} \quad (A9)$$

$$\tau_r = \int_0^{\infty} \xi \cdot \psi^*(\xi) d\xi \quad (A10)$$

と表される. 定常状態では流出した量だけ同じ時刻に流入するため, 平均年齢(τ_a)と平均滞留時間(τ_r)は等しくなる.

平均滞留時間(τ_r)は残余関数 $r(\tau)$ (時刻 $t=0$ に存在する物質質量 R_0 に対する時刻 $t=\tau$ での残存量 $R(\tau)$ の割合)を用いると

$$\tau_r = \int_0^{\infty} r(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} \frac{R(\tau)}{R_0} d\tau \quad (A11)$$

と表すこともできる.

湾のように入口が陸域と外洋の二つの場合, 湾内の水塊はその主体によって5つに大別できる. ここで, モデル

湾として図-A.3に示すような, 湾奥に一つのみの河川が流入し, 外湾と接続する開口部は一つのみの海域を想定する. ここで, V_T : 海域の全体積, V_R : 河川由来の水塊の体積, V_S : 外洋由来の水塊の体積, V_{OR} : 河川から新しく流入した水塊の単位時間当たりの体積(= Q_R), V_{OS} : 外洋から新しく流入した水塊の単位時間当たりの体積である(= Q_S). これらの水塊に対して, それぞれの平均年齢または平均通過時間をそれぞれ τ_T , τ_R , τ_S , τ_{OR} , τ_{OS} と定義する. ここで, τ_R : 河川水の平均年齢, τ_S : 外洋水の平均年齢, τ_{OR} : 河川水の平均通過時間, τ_{OS} : 外洋水の平均通過時間である. ここで, 平均年齢とは湾内に存在する対象とする個々の物質粒子が湾内に入ってから経過した時間の平均値を意味し, 平均通過時間とは対象とする個々の物質粒子が湾内に入ってから出るまでに要する時間の平均値を意味する.

これらに対して定常状態を仮定すると, 前述したように平均年齢と平均滞留時間は等しくなるので, 海域全体の平均年齢, 河川水の平均年齢, 外洋水の平均年齢, 河川水の平均通過時間, 外洋水の平均通過時間はそれぞれ τ_T : 海域全体の平均滞留時間, τ_R : 海域に存在する河川水の平均滞留時間, τ_S : 海域に存在する外洋水の平均滞留時間, τ_{OR} : 加入した河川水の平均滞留時間, τ_{OS} : 加入した外洋水の平均滞留時間となる.

例えば図-A.3に示すような河川水が湾奥に流入するような場合には, これらの相対的な関係は次式のように示される.

$$\tau_{OR} > \tau_R > \tau_T > \tau_S > \tau_{OS} \quad (A12)$$

これらの平均滞留時間は完全混合を仮定すると,

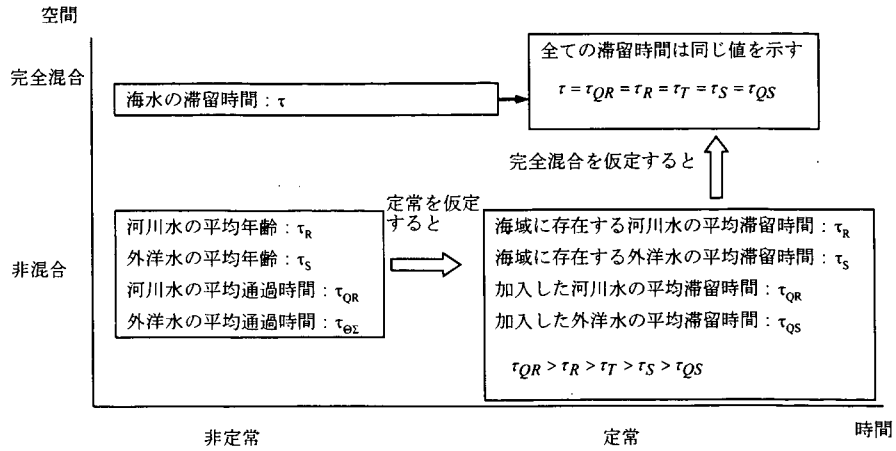


図-A.4 海水の交換時間と種々の平均滞留時間の関係. 大小関係は例えば河川水が湾奥に流入するような場合である. 完全混合および定常を仮定すると, 海水の滞留時間と平均滞留時間は結果的に同じ式で表現することができるが, 両者に対して用いる概念は同じでないことに注意を要する.

$$\tau_{QR} = \tau_R = \tau_T = \tau_S = \tau_{QS} \quad (A13)$$

となる.

加入した河川水の平均滞留時間, 加入した外洋水の平均滞留時間に対しては

$$\tau_{QR} = \frac{V_R}{Q_R} \quad (A14)$$

$$\tau_{QS} = \frac{V_S}{Q_S} \quad (A15)$$

として表すことができる. また, τ_R , τ_S はそれぞれ加入した河川水の残余関数(r_{QR}), 加入した外洋水の残余関数(r_{QS})から算出することができる. τ_T はこれらを用いると次式で表現することができる.

$$\tau_T = \frac{V_R \tau_R + V_S \tau_S}{V_T} \quad (A16)$$

一方, 宇野木・岸野(1977)による海水の滞留時間を図-A.3の概念図を用いて表現すると,

$$\tau = \frac{V_T}{Q} = \frac{V_S + V_R}{Q_S + Q_R} \quad (A17)$$

のように表すことができる. 湾内塩分の時間変化を考えない場合は $Q_S^* = Q_S$, $Q_R^* = Q_R$ となり, 前述の加入した河川水の平均滞留時間と加入した外洋水の平均滞留時間をひとつにまとめて表現したものに一致する.

つまり, 定常性が仮定できるような状況に対して, ボックスモデルを用いて解析した場合には, 式(A13), (A14), (A15)の関係から加入した河川水の平均滞留時間は加入し

た外洋水の平均滞留時間と等しくなる. このため, 式(A17)より加入した河川水の平均滞留時間は定常状態を仮定した海水の滞留時間と一致することを示している. このことは前述した海水の滞留時間を式展開した式(A6)も示しているように海水の滞留時間は定常状態のもとでは湾内に流入する河川由来の水塊の体積を河川から新しく流入した水塊の単位時間当たりの体積で割ったものに一致することからもわかる.

しかしながら, だからと言って完全混合を仮定しないでそれぞれの値を観測値から算出するのは非常に困難である. なぜなら, 例えば海域に存在する河川水の平均滞留時間の値を定義に従って算定する為には, 湾内の河川水成分に対して, 河川からいつ流入したかの情報が必要となる. この情報は通常の塩分観測では得ることはできない. 河川から時刻付きの浮標を流す方法も考えられるが, 浮標の数, 数ヶ月に及ぶ時間および密度(浮力)の調整等を考えると, この手法は非現実に近い. したがって, 湾内における塩分の水平分布および鉛直分布から完全混合はありえない(完全混合は仮定できない)としても, ボックスモデルを用いる場合は解析の都合上完全混合を仮定せざるを得ない. 完全混合を仮定しないで, それぞれを定義に従って算出するには, 数値モデル上で粒子追跡する手法が妥当と考える.

塩分の時間変化を考えないとき, 海水の滞留時間と河川水の平均滞留時間は同じ値になる. しかし, 海水の滞留時間と個別の平均滞留時間の定義に用いる概念は同じではないことに注意を要する. 図-A.4に上記の関係をまとめる.

参考文献

- 宇野木早苗, 岸野元彰(1977): 大局的に見た内湾の海水交流, 海岸工学講演会論文集, Vol.24, pp.486 - 490.
- 柏井誠(1984): 海水交換概念と海水交換率, 日本海洋学会誌, Vol.40, No.2, pp.135-147.
- 村上和男(1998): 閉鎖性内湾域の海水浄化に係わる水理・水質環境に関する研究, 港湾技研資料, No.900, 運輸省港湾技術研究所, 142p.
- 堀江毅, 村上和男, 亀山豊, 入尾野幸雄(1977): 東京湾の海水交換に関する水理模型実験, 港湾技術研究所報告, Vol.16, No.3, pp.69-99.
- 柳哲雄(1993): 海水交換と水質変化, 沿岸海洋研究ノート, 30周年記念特別号, pp.139-145.
- Takeoka, H.(1984): Fundamental concepts of exchange and transport time scale in a coastal sea, Cont. Shelf Res., Vol.3, No.4, pp.311 - 326.

付録 B 塩分の観測結果

東京湾広域環境調査による2002年7月から2003年6月にかけての東京湾の塩分分布を鉛直分布, 平面分布および湾の縦断面分布を用いて示す。

鉛直分布は観測により得られた各観測地点, 各観測日の鉛直プロファイルを地点ごとに月別に示す。

平面分布は東京湾内湾22点の観測データを観測日ごとに水深0.5m, 10m, 20mにおいて水平方向に補間して内湾塩分の平面分布を作成した。海図(海上保安庁, 2000)をもとに作成した東京湾内湾の1kmメッシュの地形データを水平方向に1km×1kmの格子に分割し, 距離に関する重み付きの空間補間を用いて各格子に対する塩分を算出した。この空間補間には次式で示されるガウス関数を用いた(柳, 1993)。

$$S_{i,j} = \frac{\sum_n S_n \cdot \exp\left\{-\left(\frac{r_{i,j,n}}{L}\right)^2\right\}}{\sum_n \exp\left\{-\left(\frac{r_{i,j,n}}{L}\right)^2\right\}} \quad (B1)$$

ここで, i, j は格子点の座標, n は影響範囲に入る観測地点の番号, $S_{i,j}$ は格子点 (i, j) の塩分, S_n は観測点 n での塩分, $r_{i,j,n}$ は格子点 (i, j) から観測点 n までの距離および L は相関距離である。東京内湾に位置する各観測点間の距離は2kmから8kmであるので, 初期の相関距離は7kmとした。また, 影響半径は相関距離と同一とした。影響範囲内の観測地点が2点以下の場合は相関距離をさらに1km増やした。

縦断面分布は観測により得られた各観測日の湾奥から湾口にかけての各観測地点の鉛直プロファイルを線形内挿により描いた。

参考文献(再掲)

海上保安庁(2000): 海図, 世界測地系 W90号。

柳哲雄(1993): 海洋観測データの処理法, 恒星社厚生閣, 115p.

B.1 地点ごとに分けた月別の鉛直プロファイル

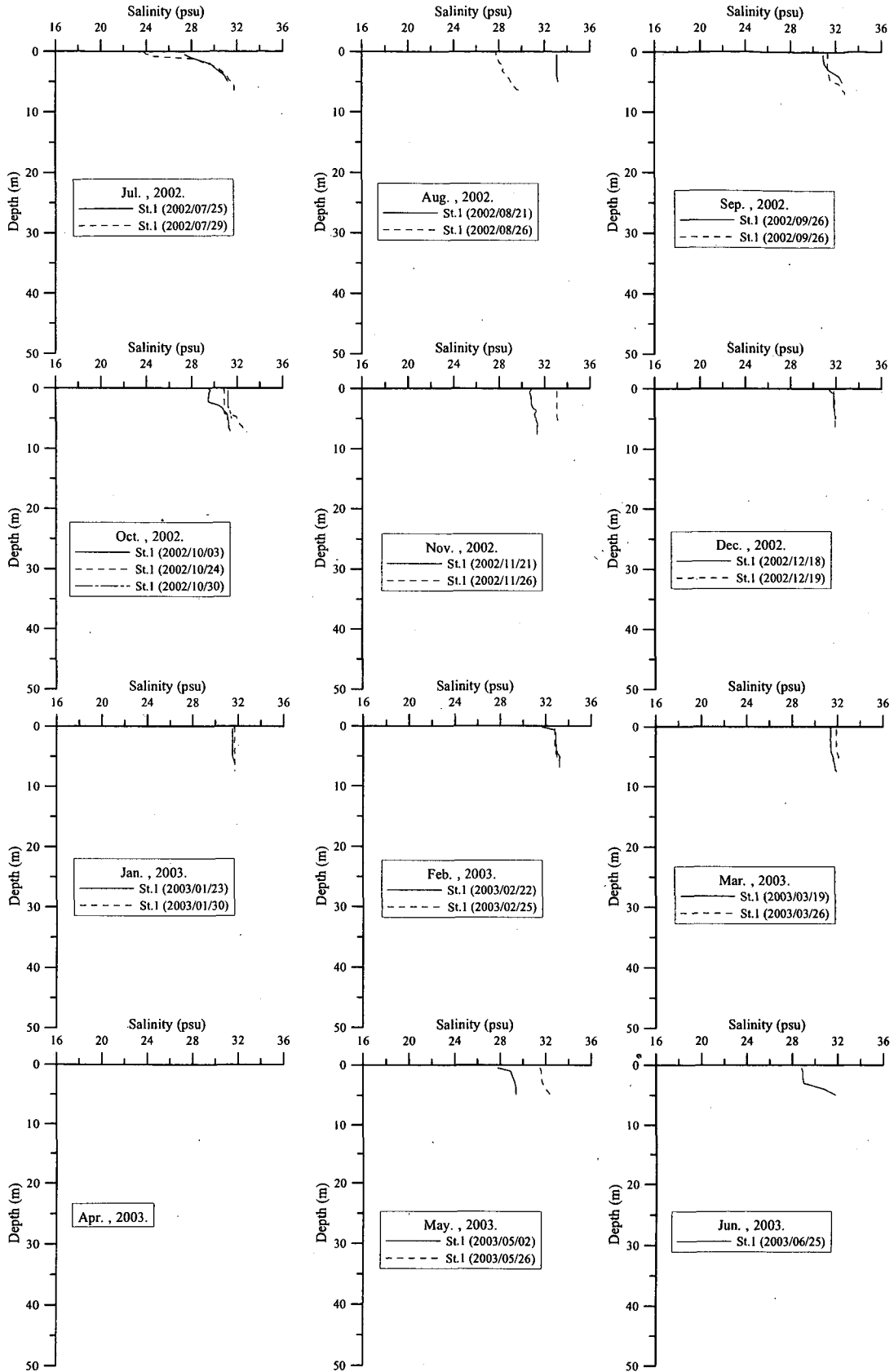


図-B.1 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.1)

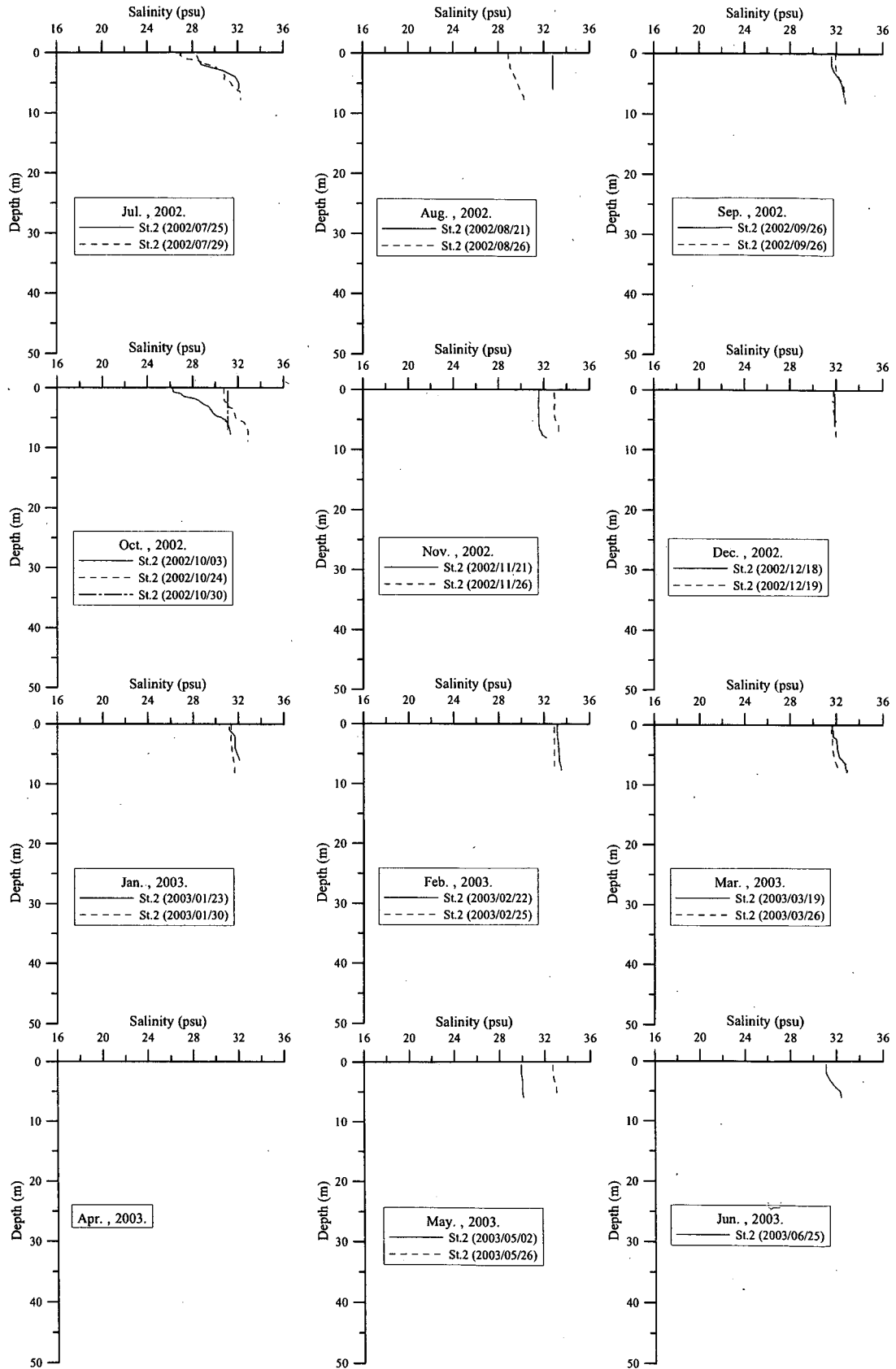


図-B.2 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.2)

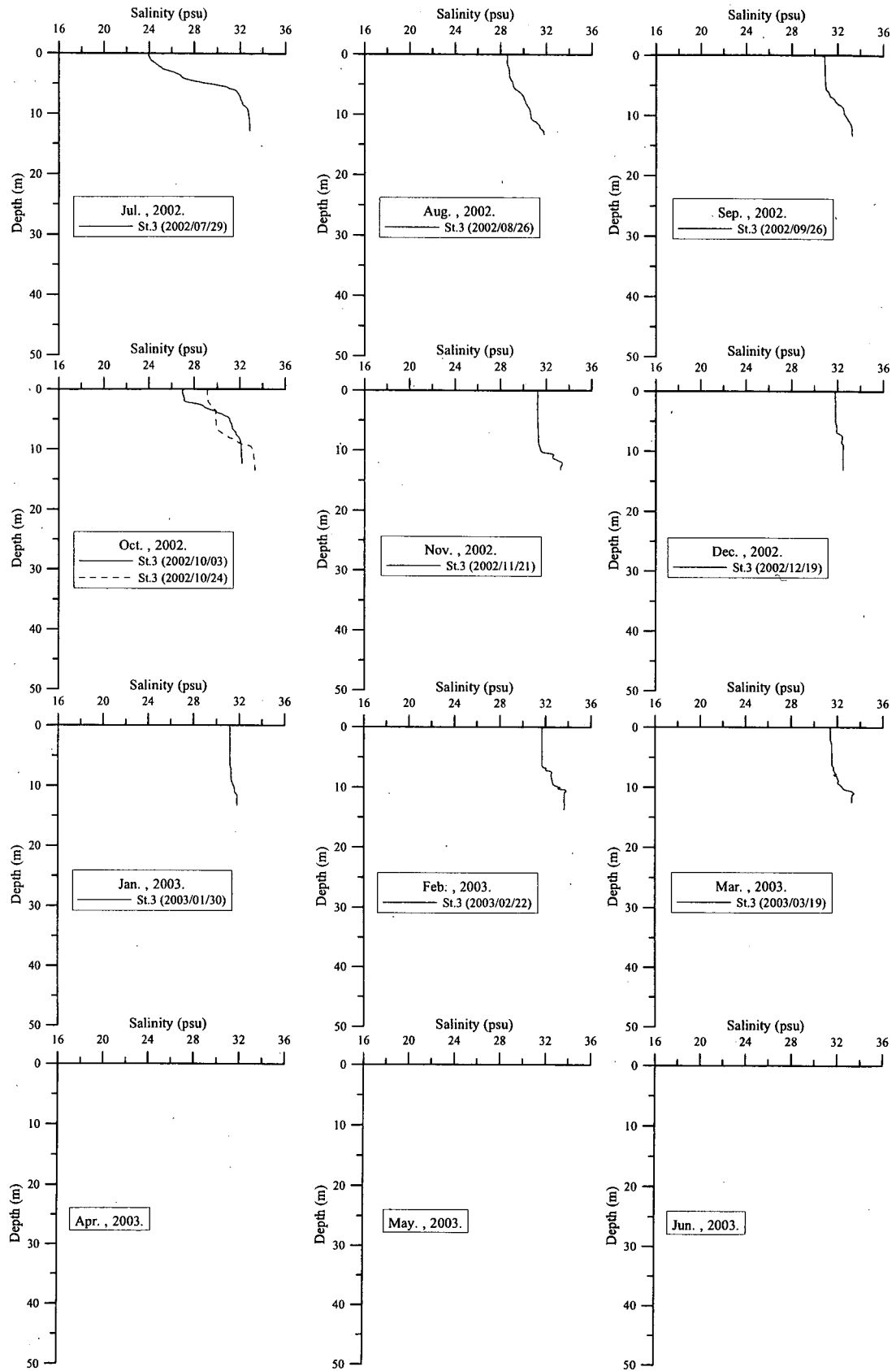


図-B.3 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.3)

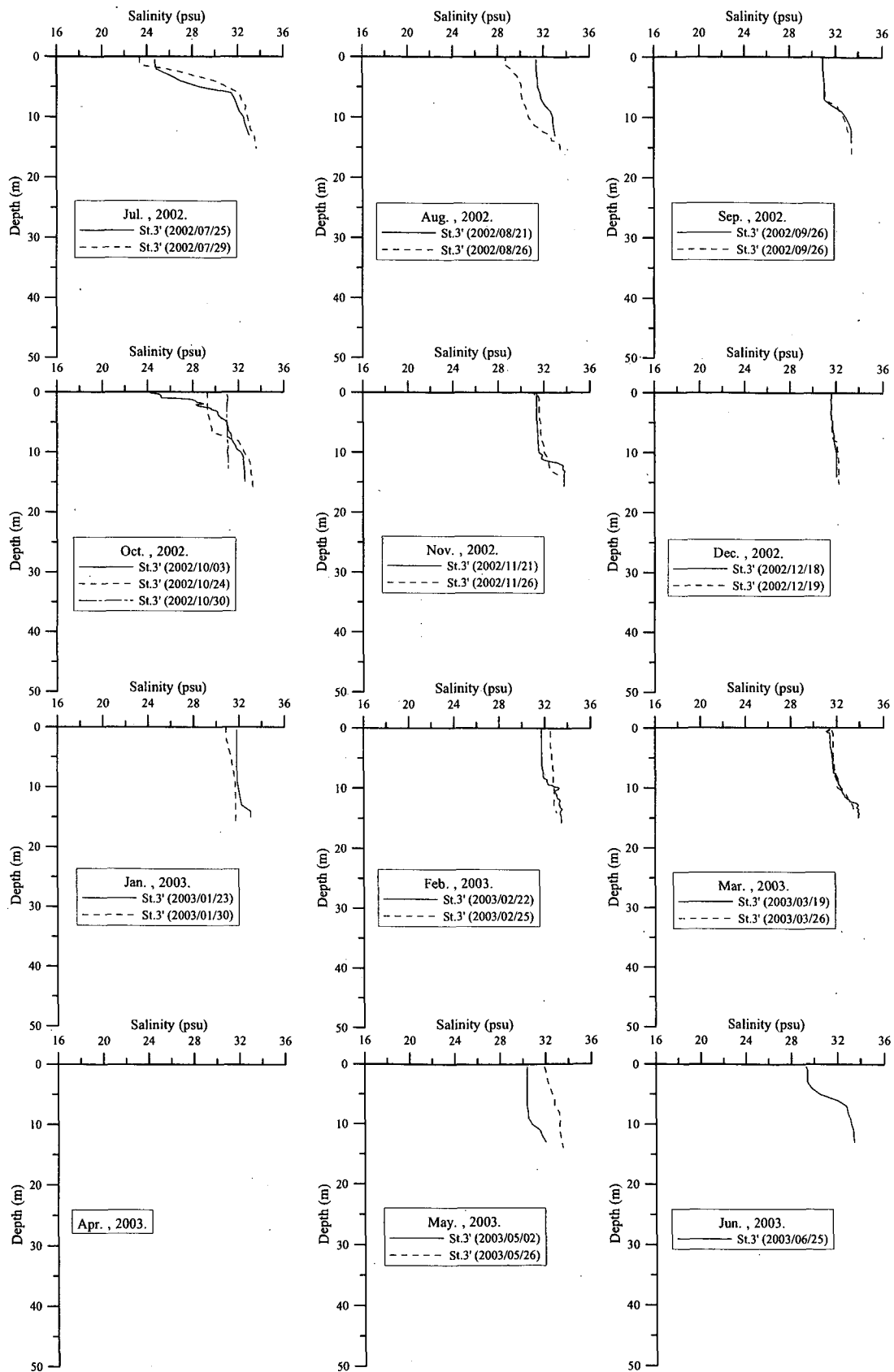


図-B.4 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.3')

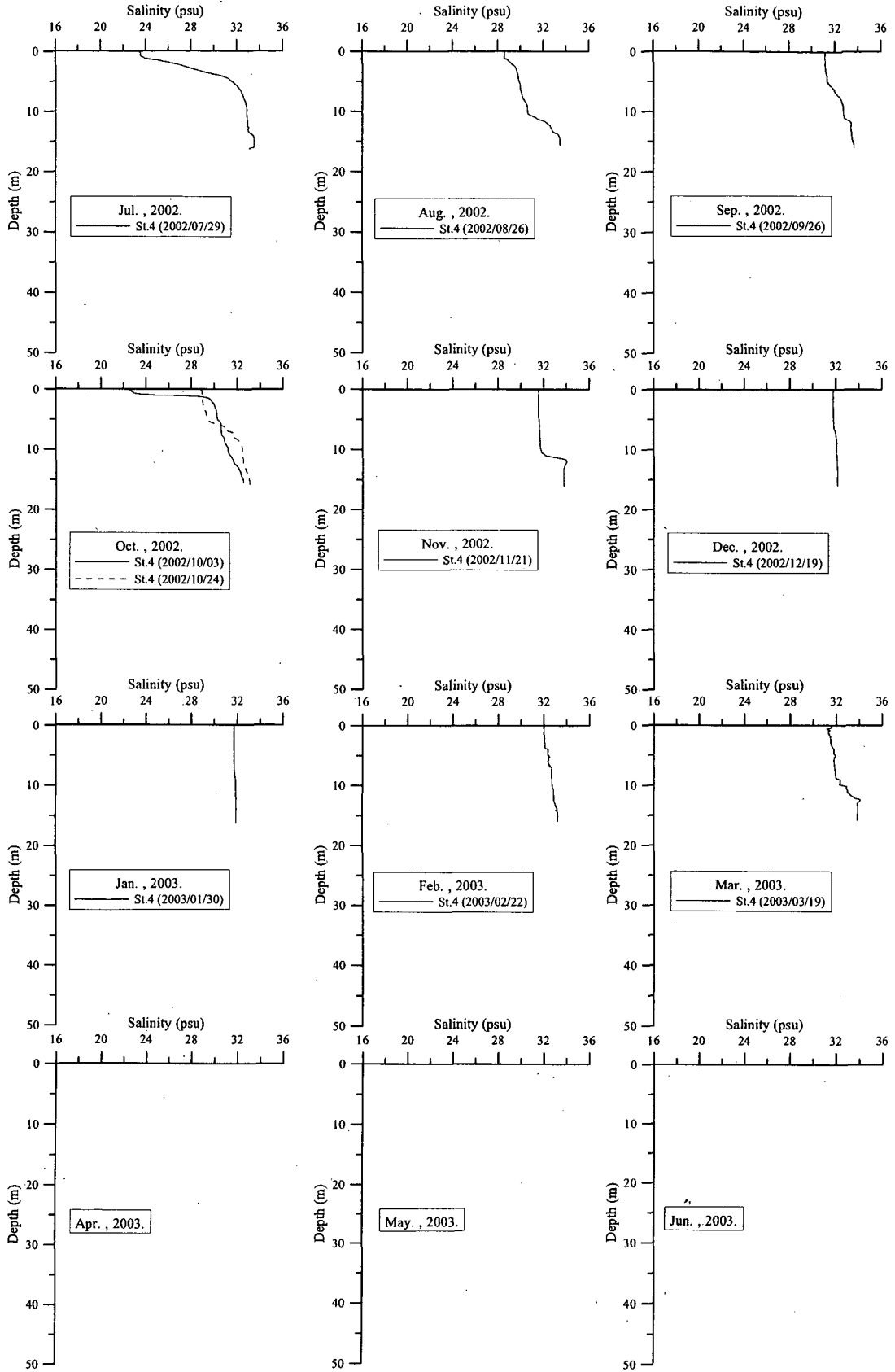


図-B.5 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.4)

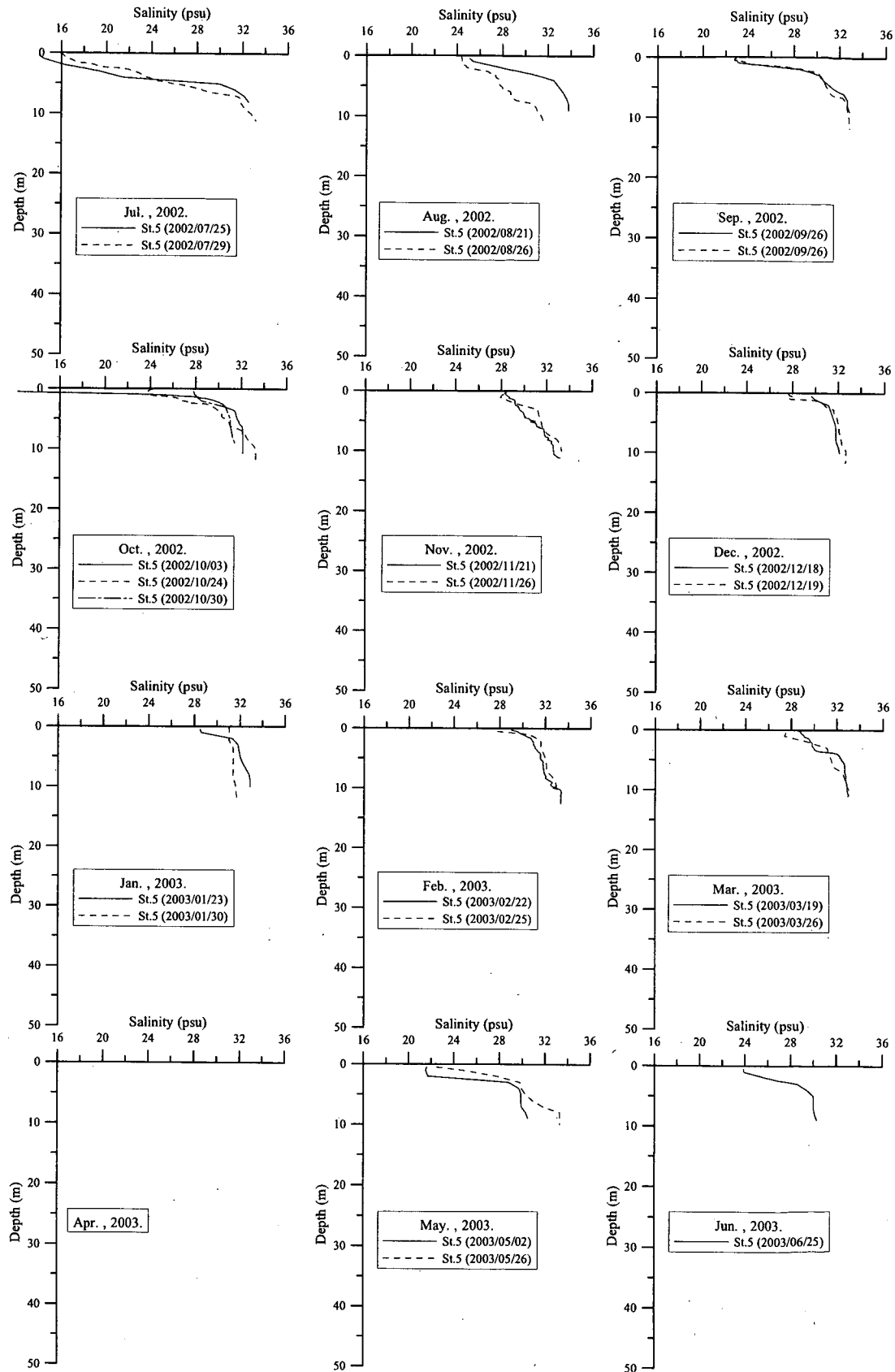


図-B. 6 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.5)

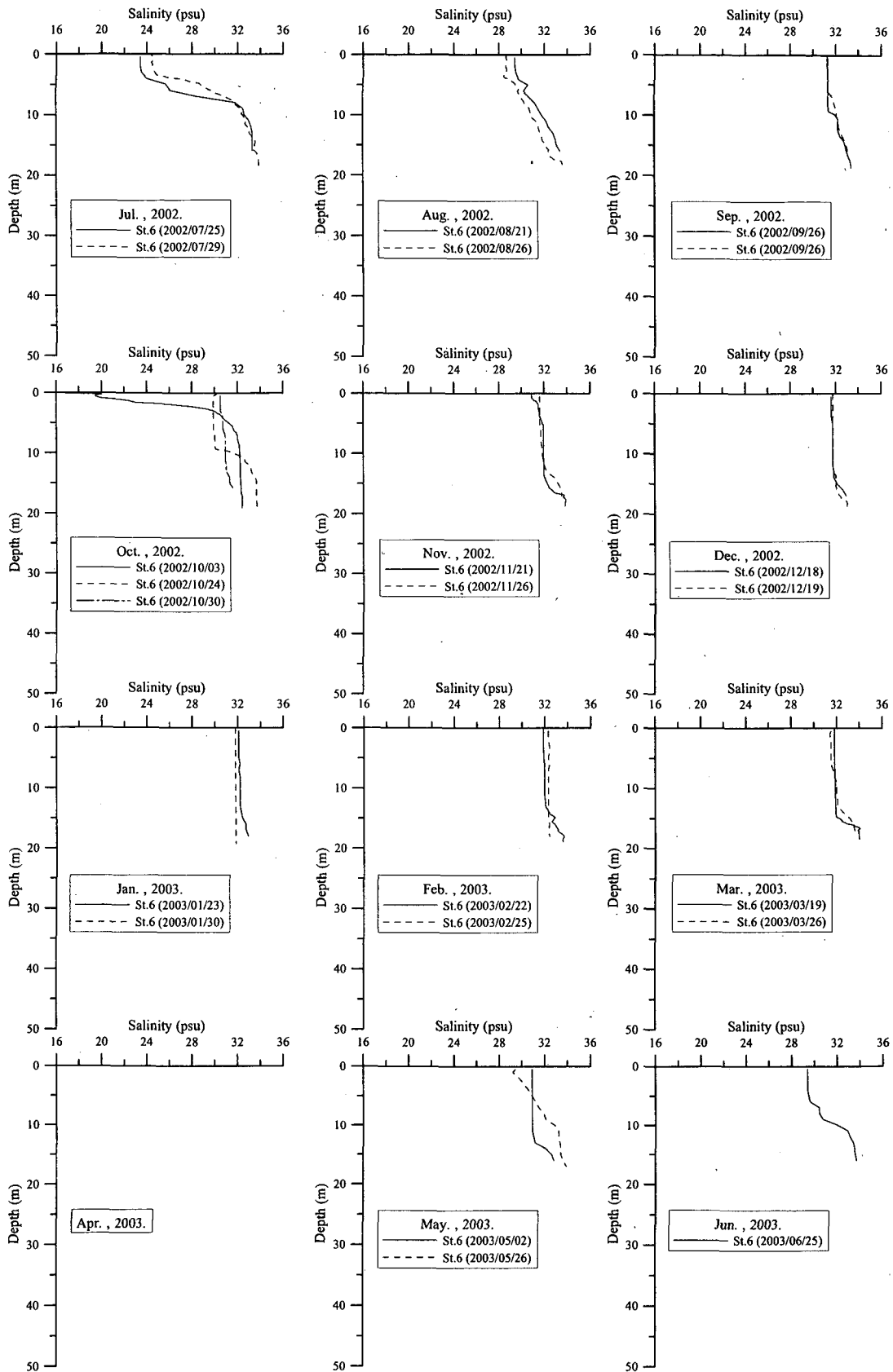


図-B.7 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.6)

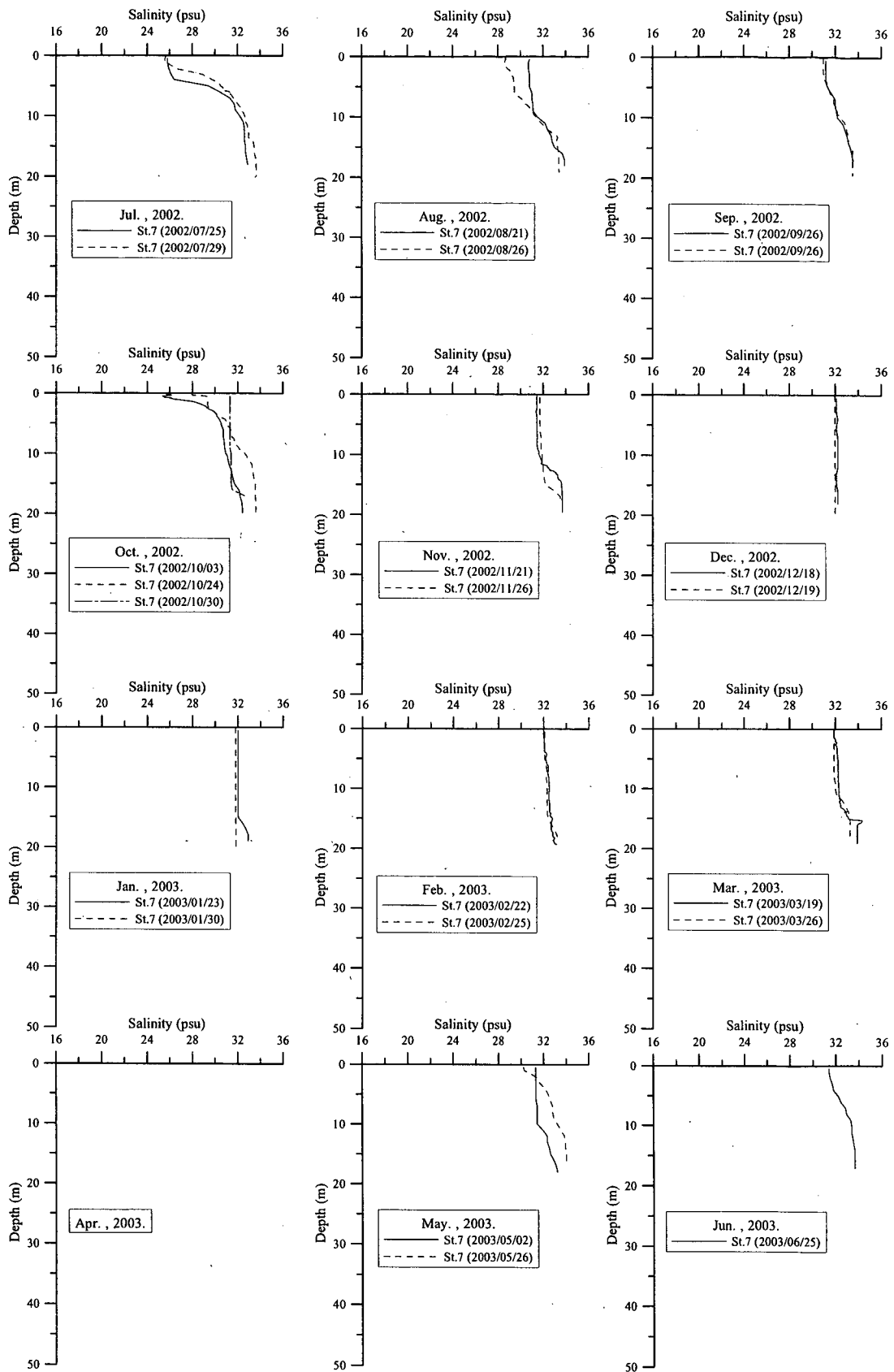


図-B. 8 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.7)

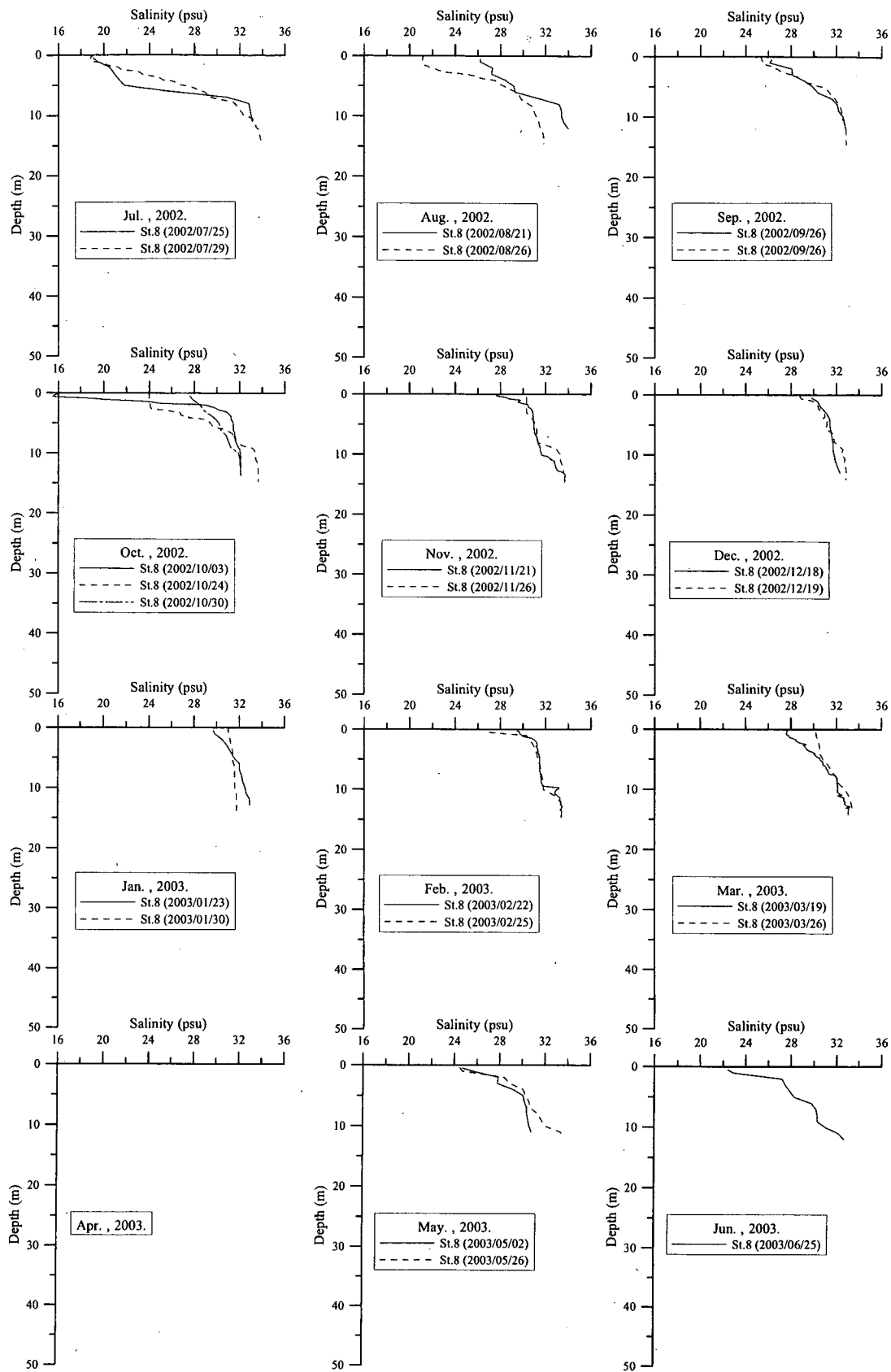


図-B.9 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.8)

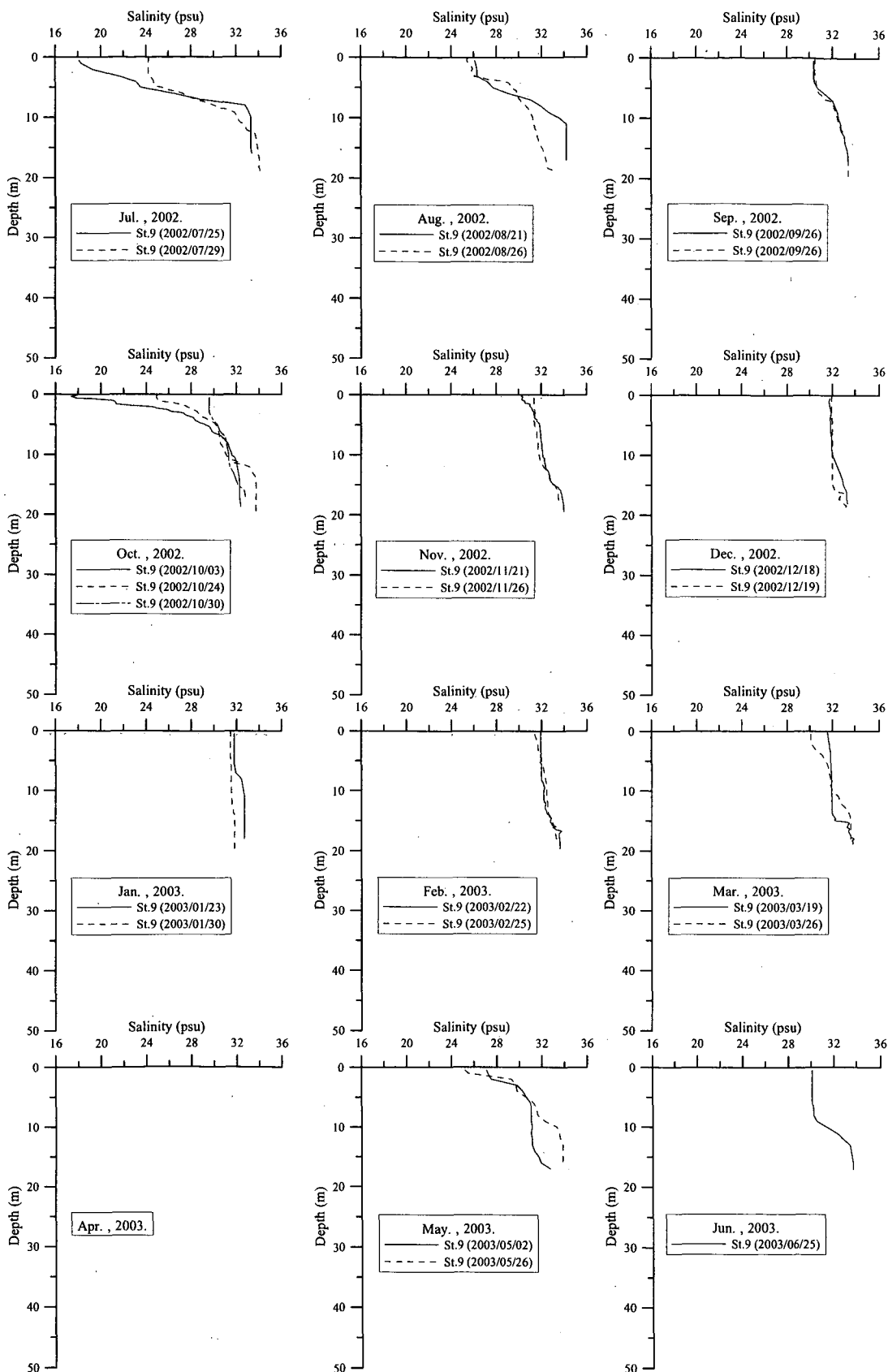


図-B.10 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.9)

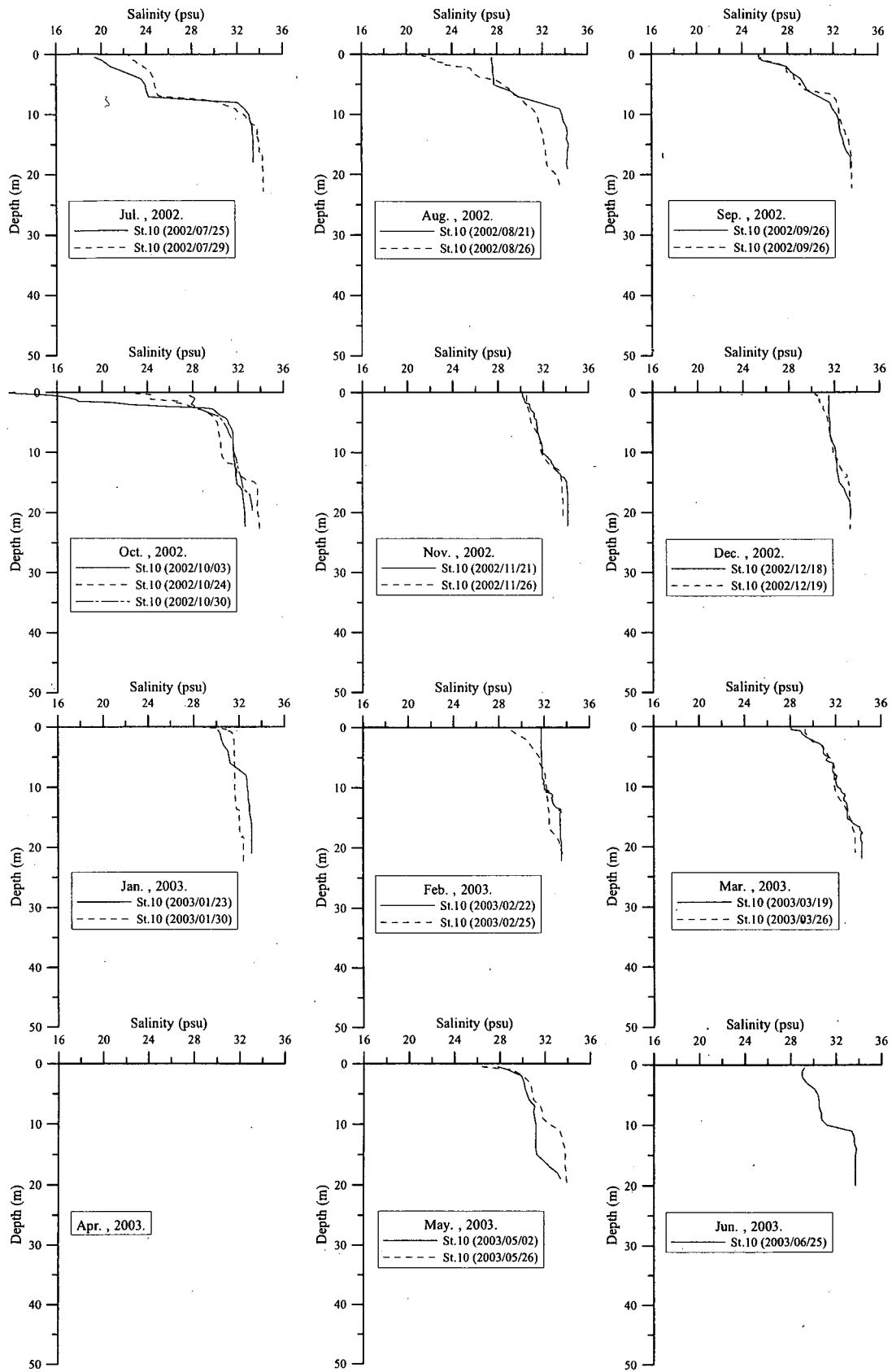


図-B. 11 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.10)

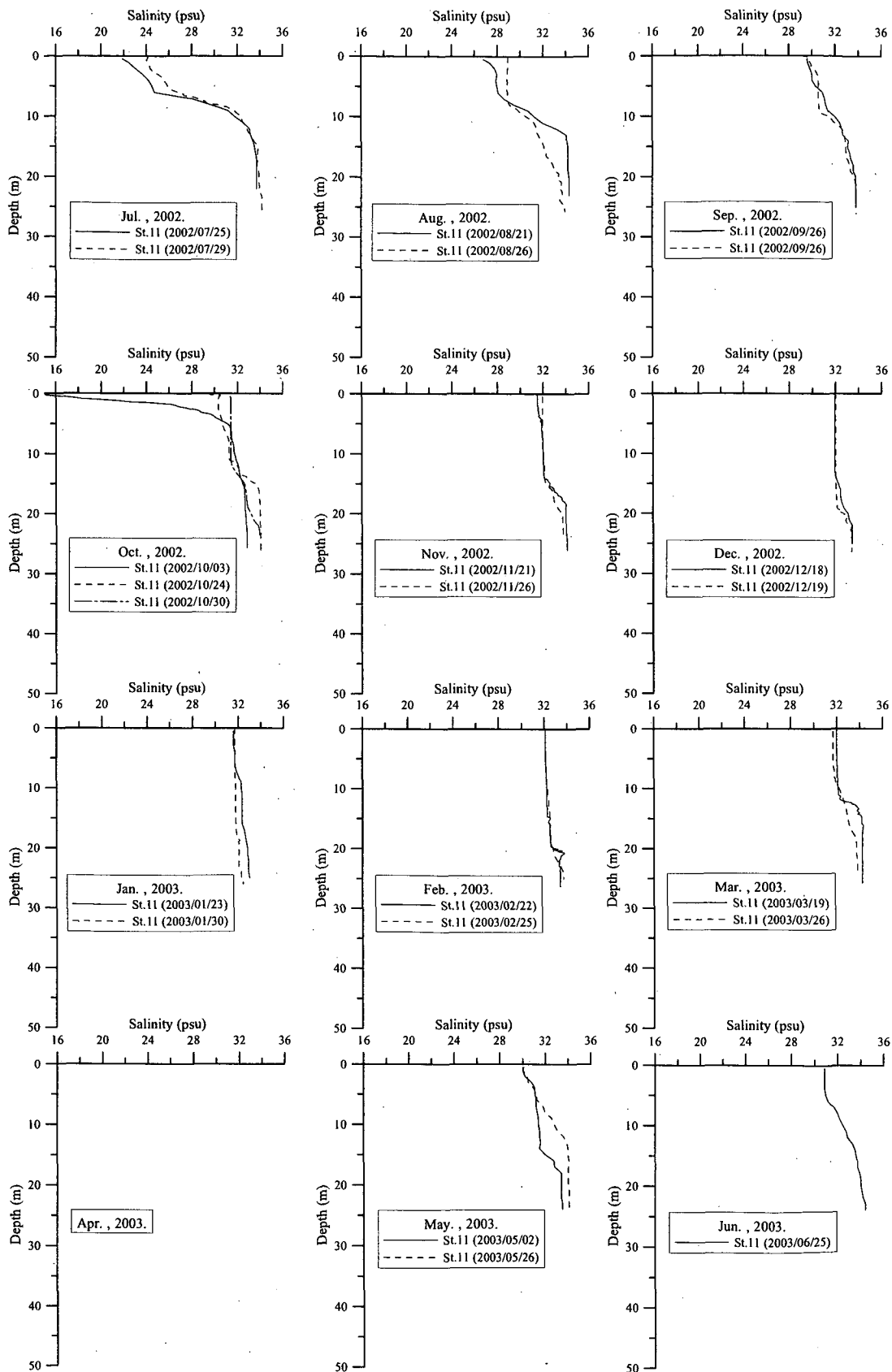


図-B. 12 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.11)

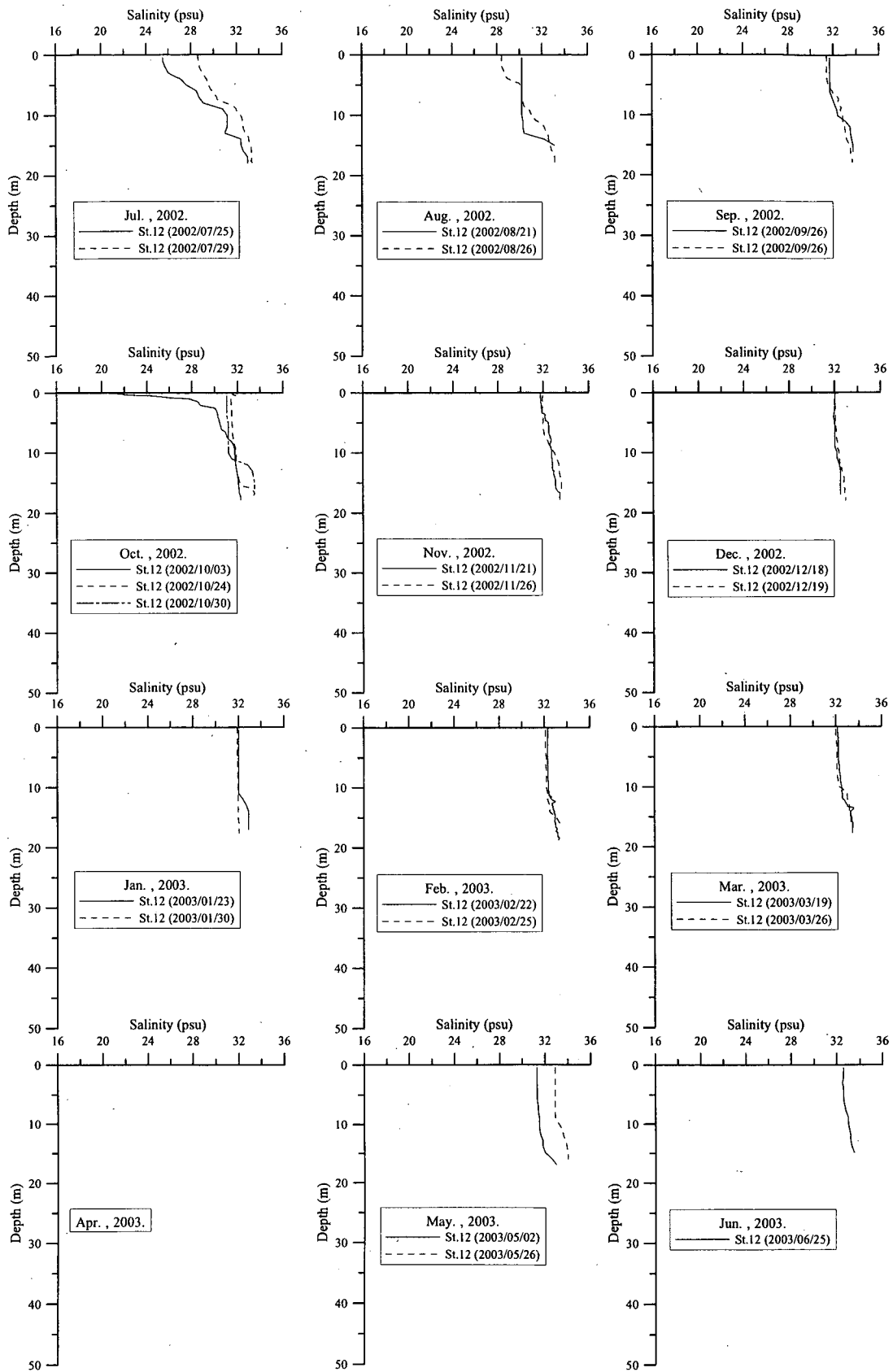


図-B.13 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.12)

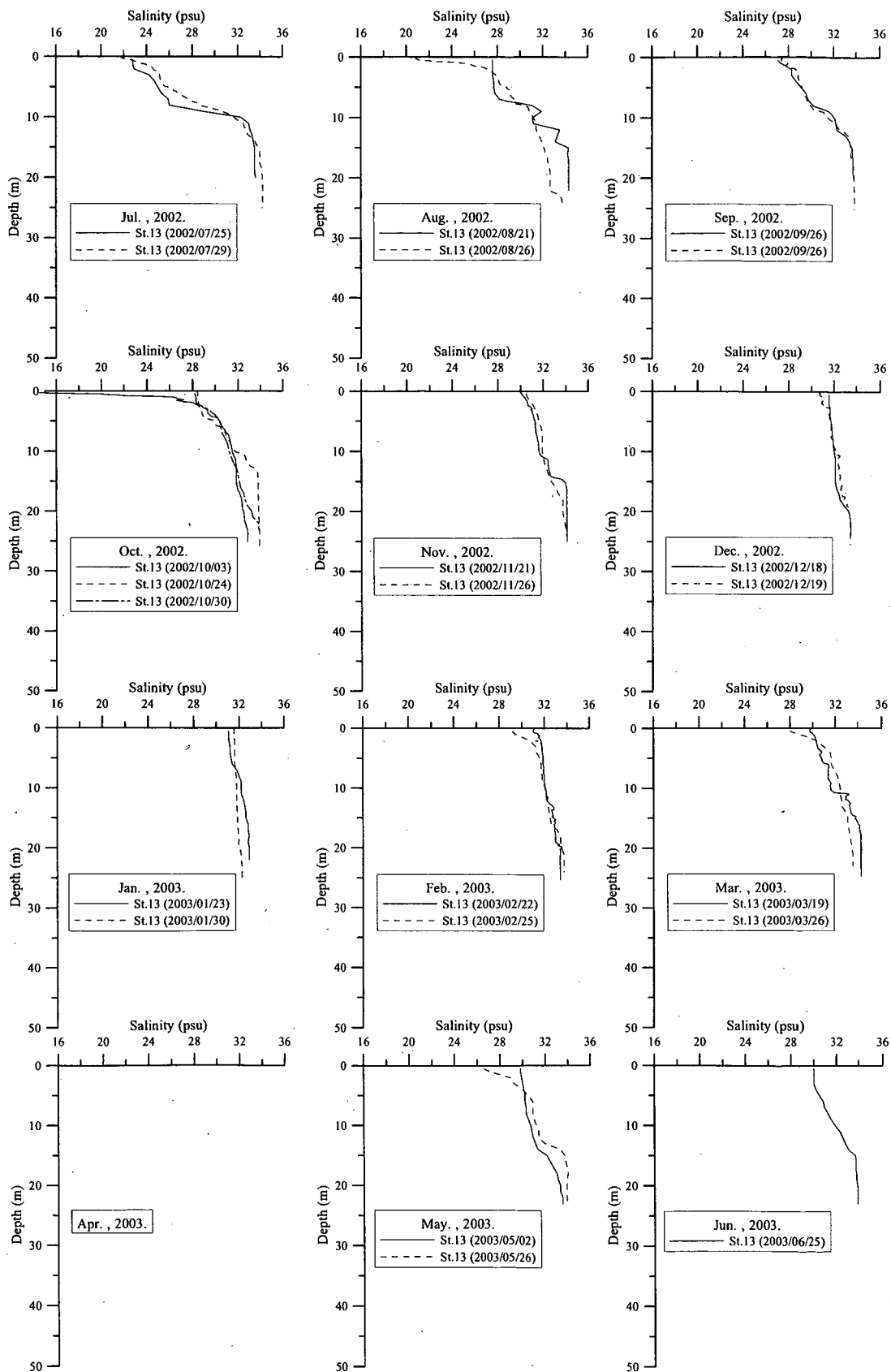


図-B. 14 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.13)

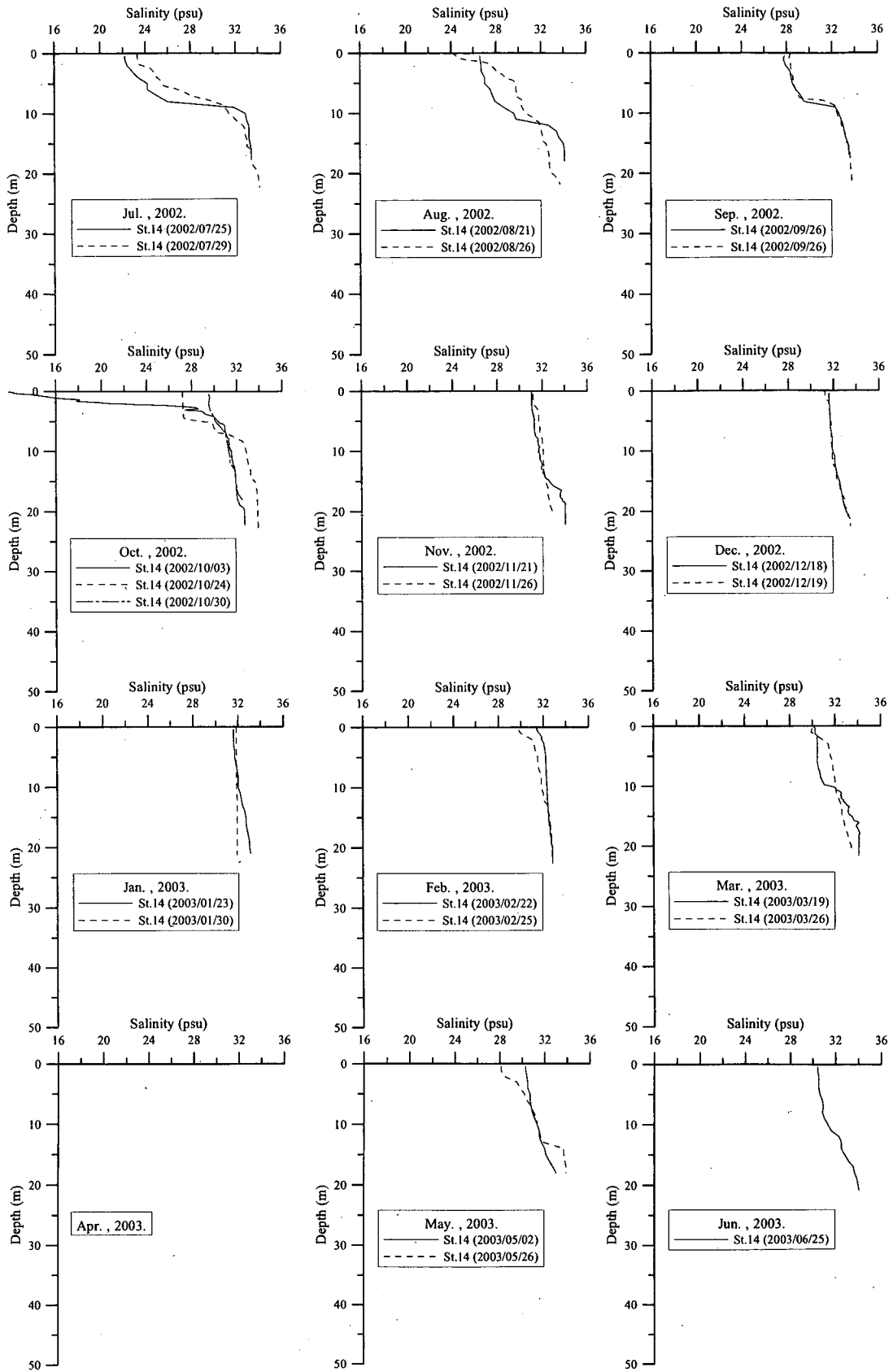


図-B.15 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.14)

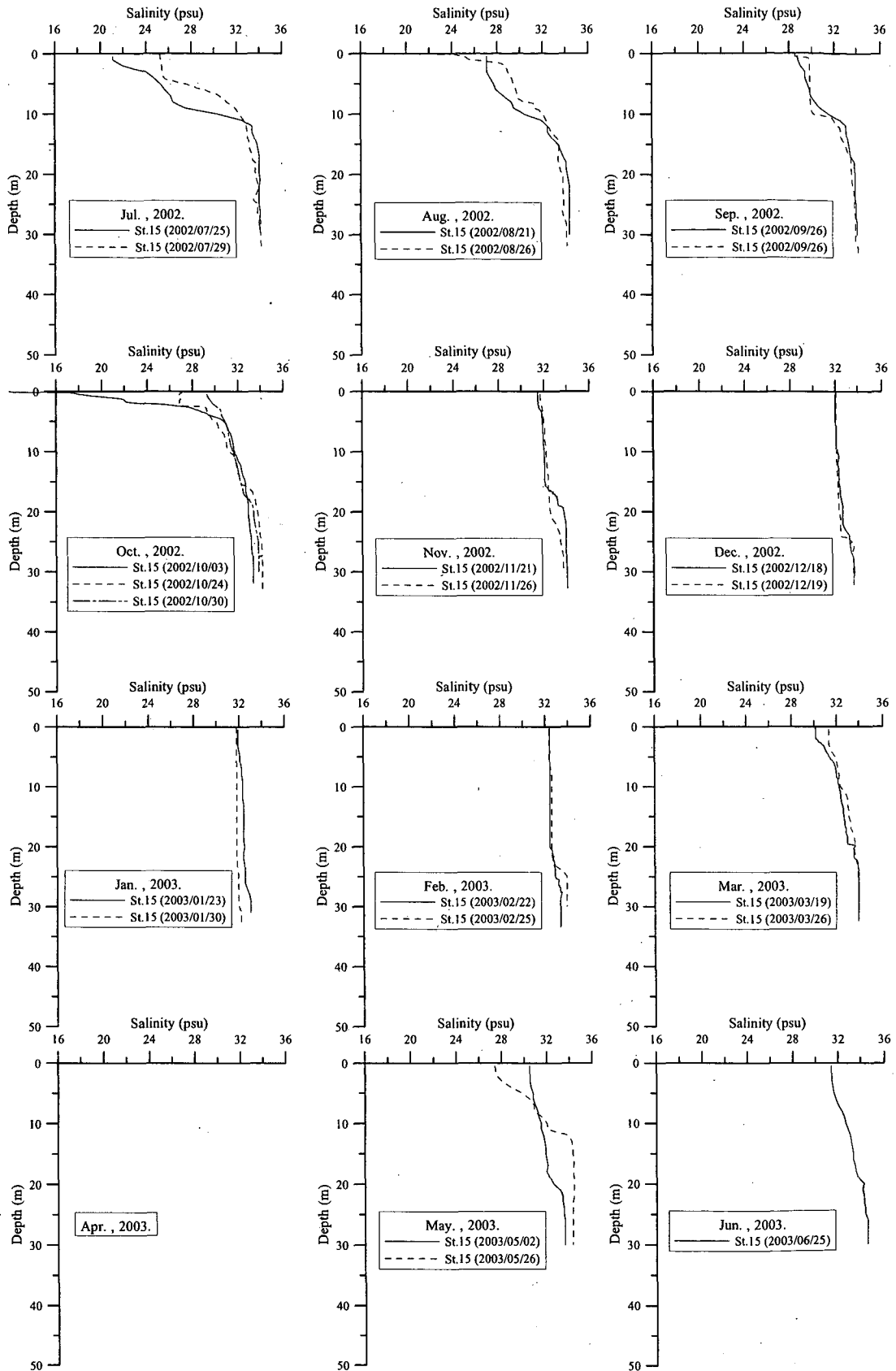


図-B.16 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.15)

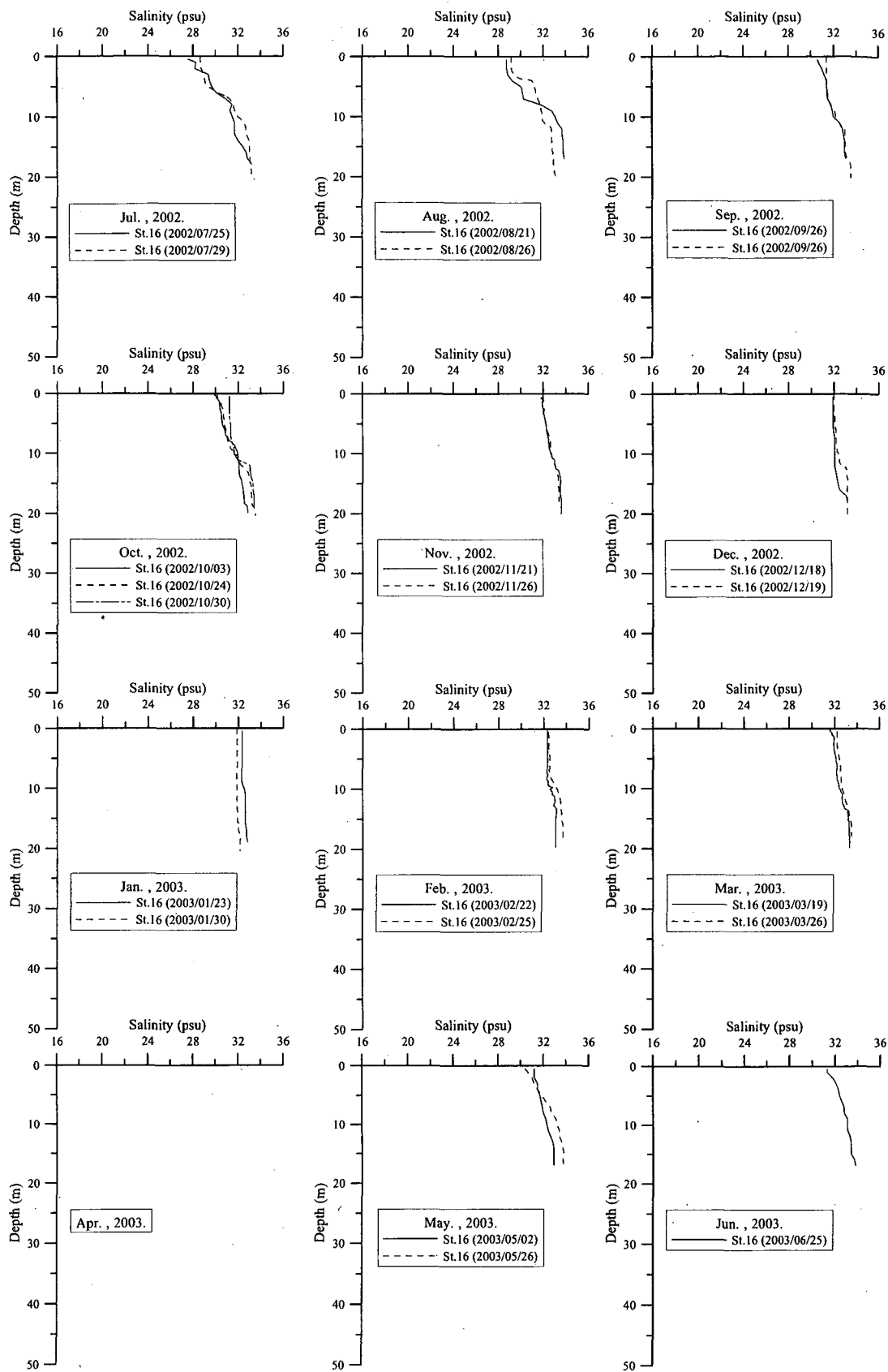


図-B. 17 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.16)

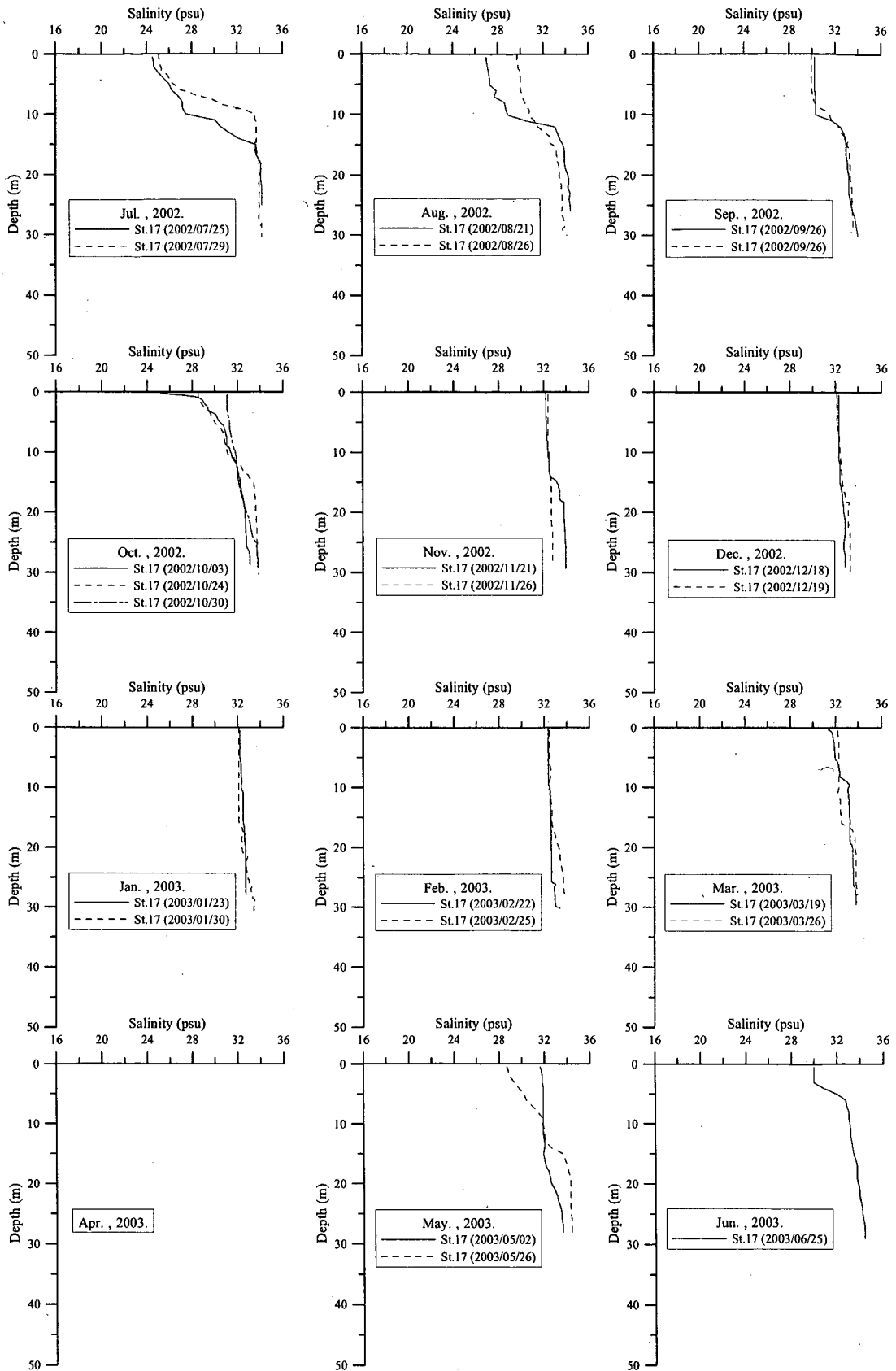


図-B.18 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.17)

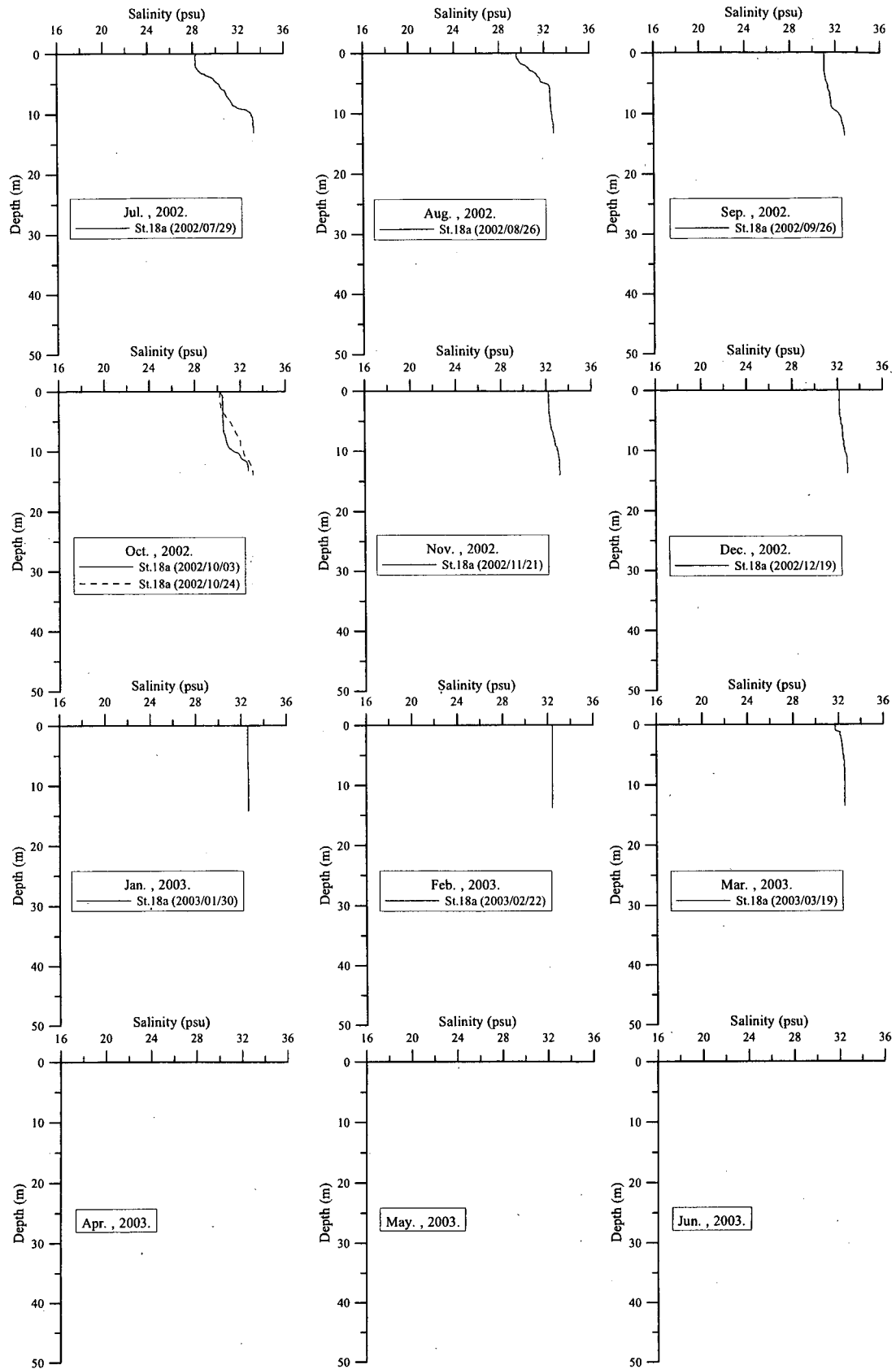


図-B. 19 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.18a)

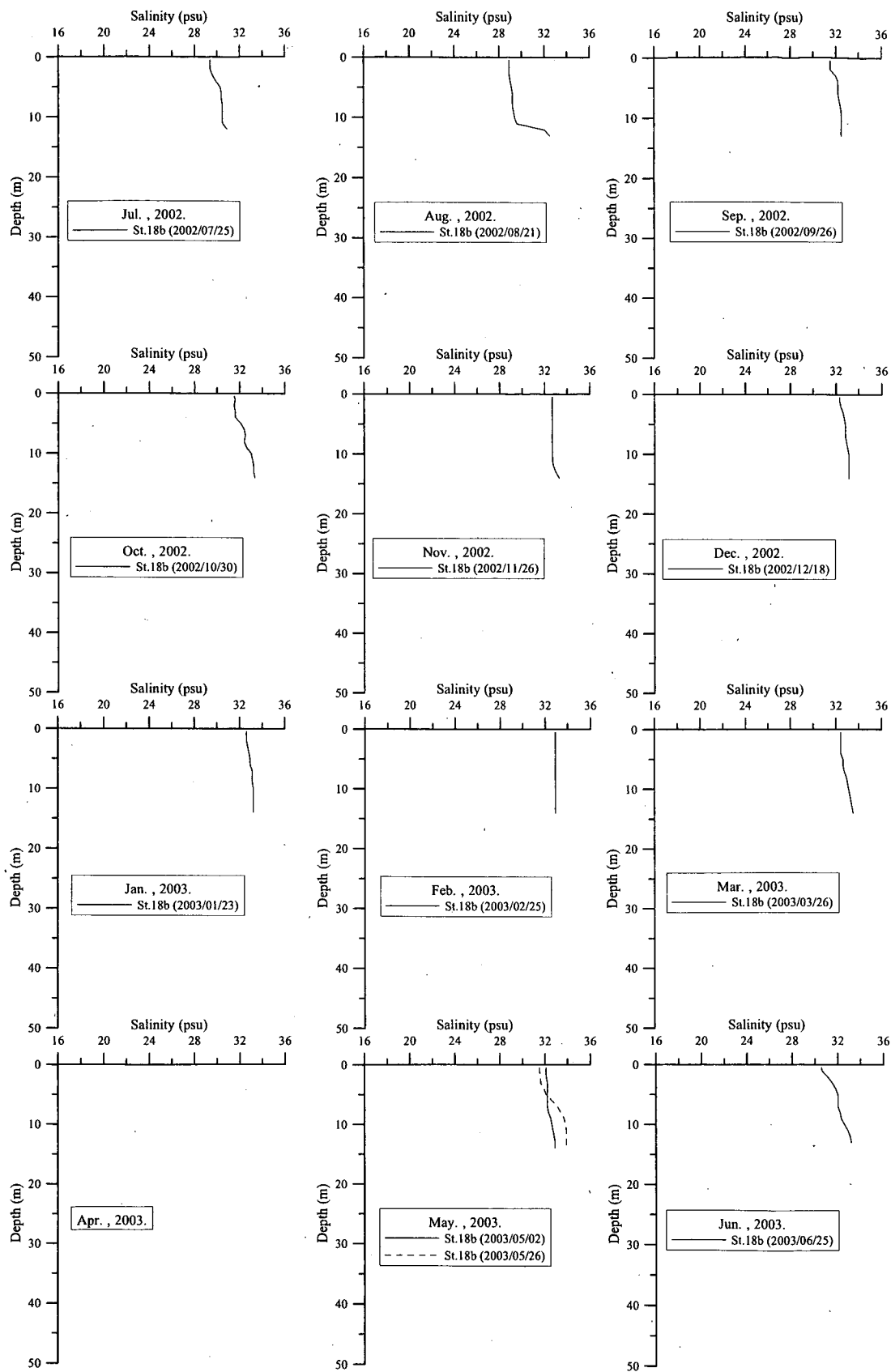


図-B. 20 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.18b)

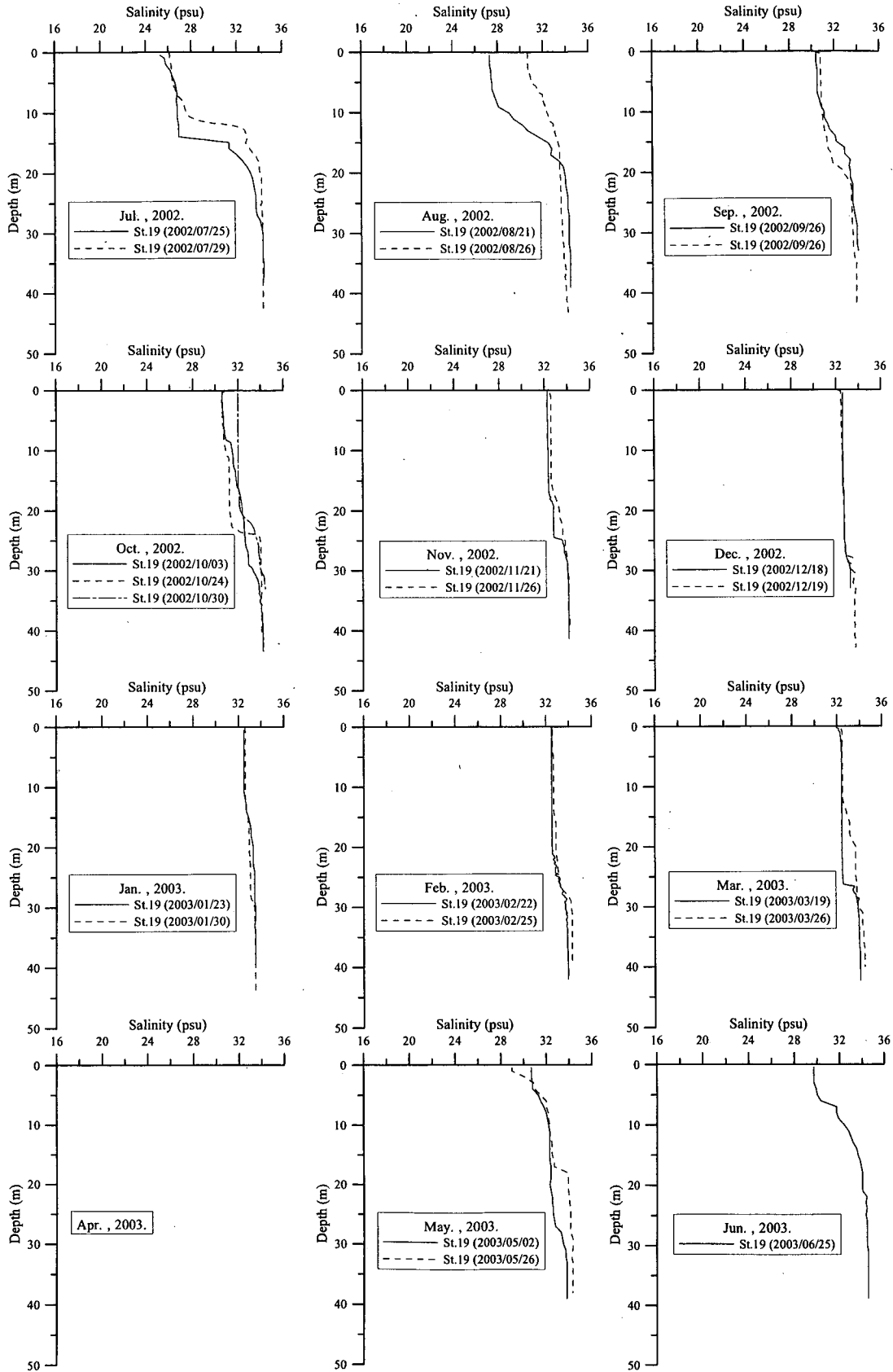


図-B. 21 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.19)

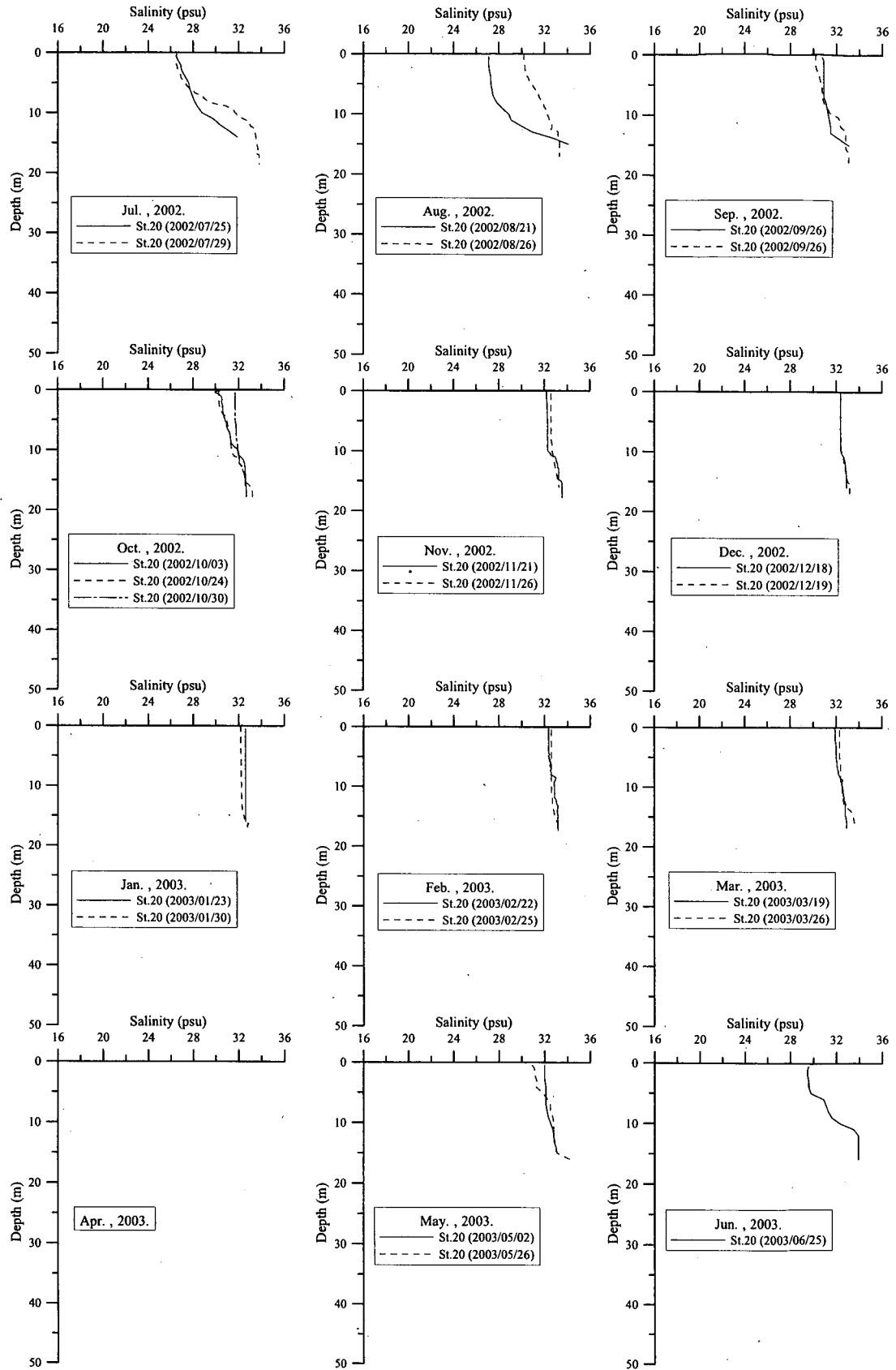


図-B.22 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.20)

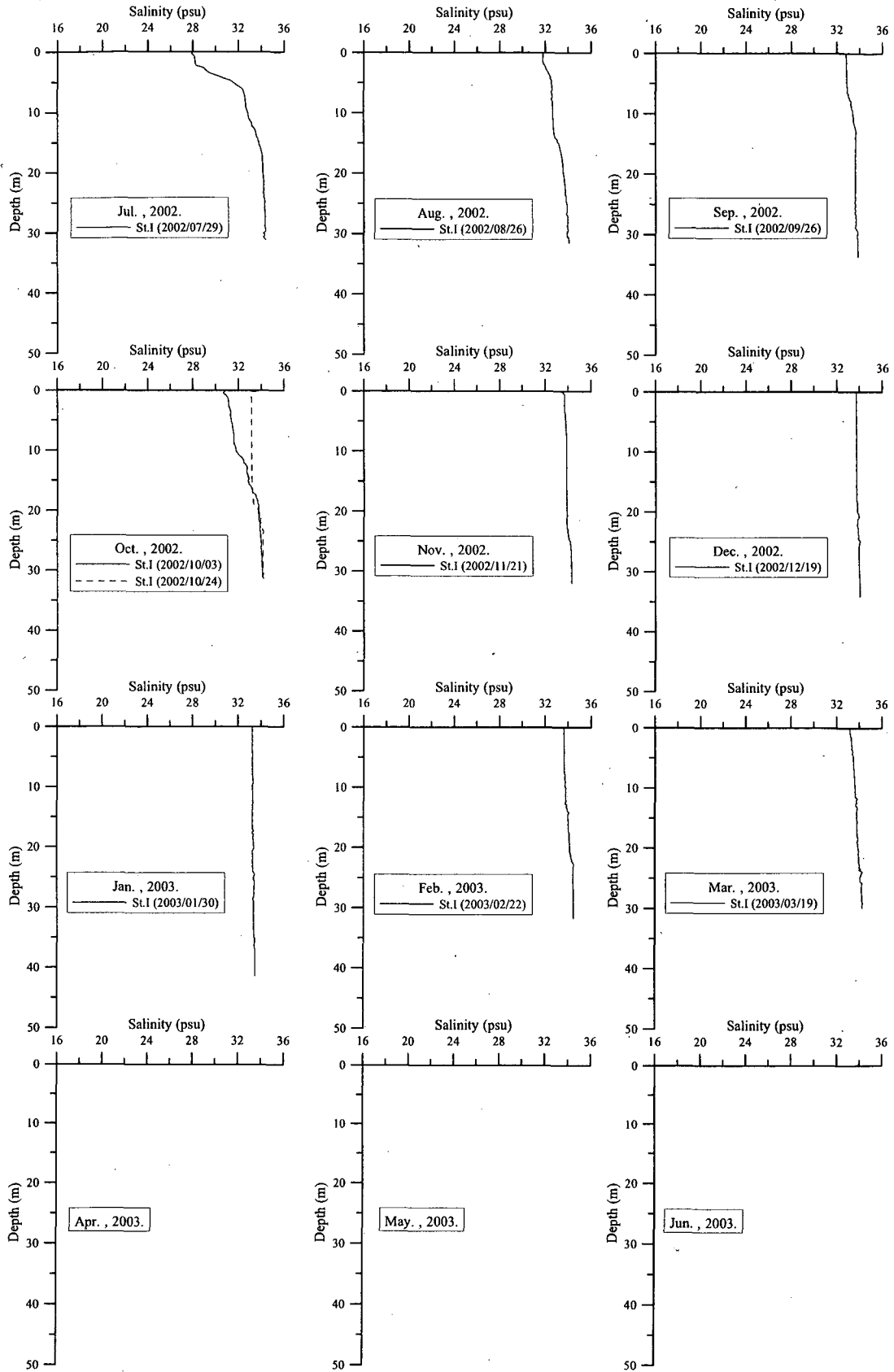


図-B. 23 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.I)

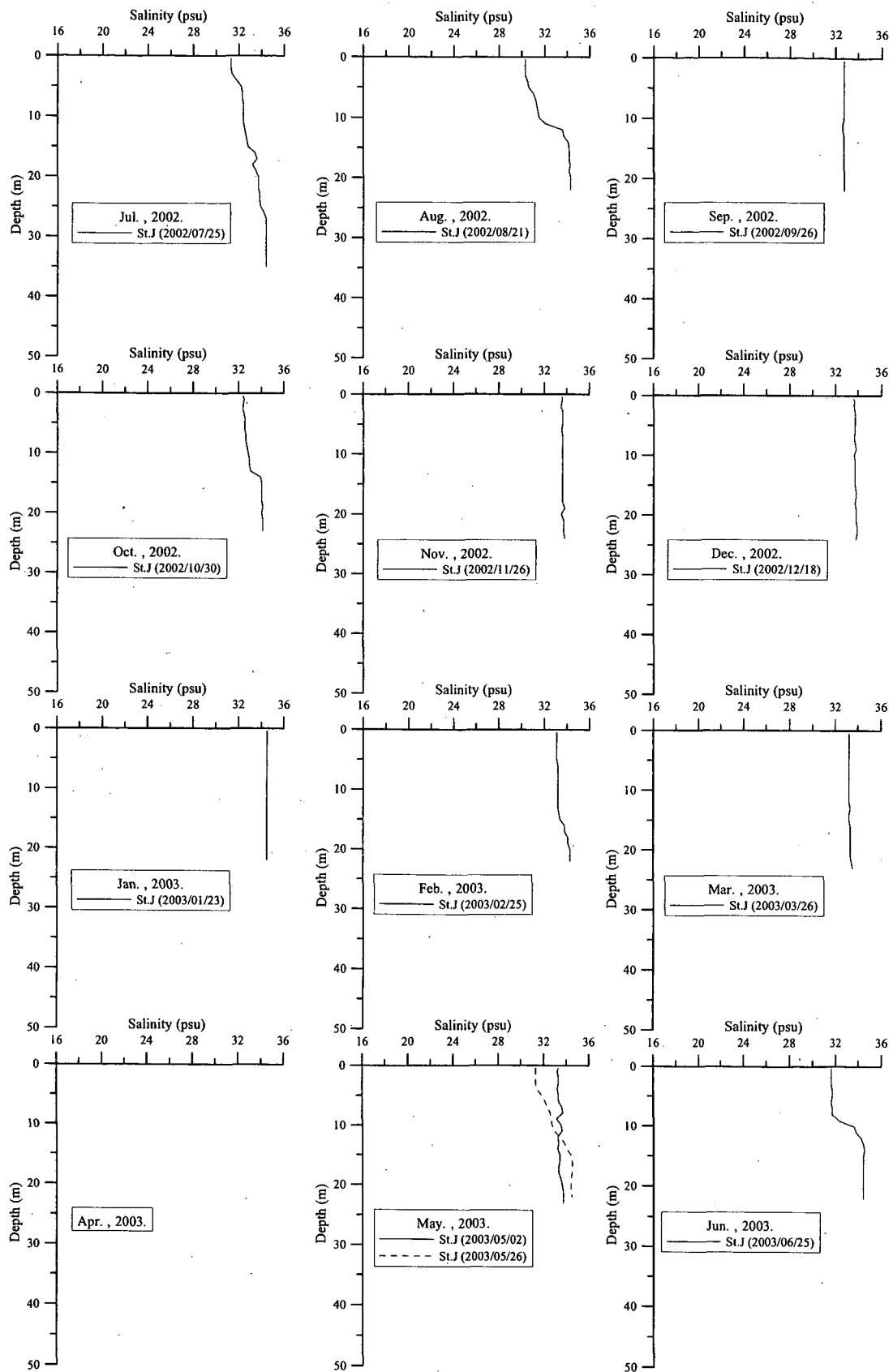


図-B. 24 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.J)

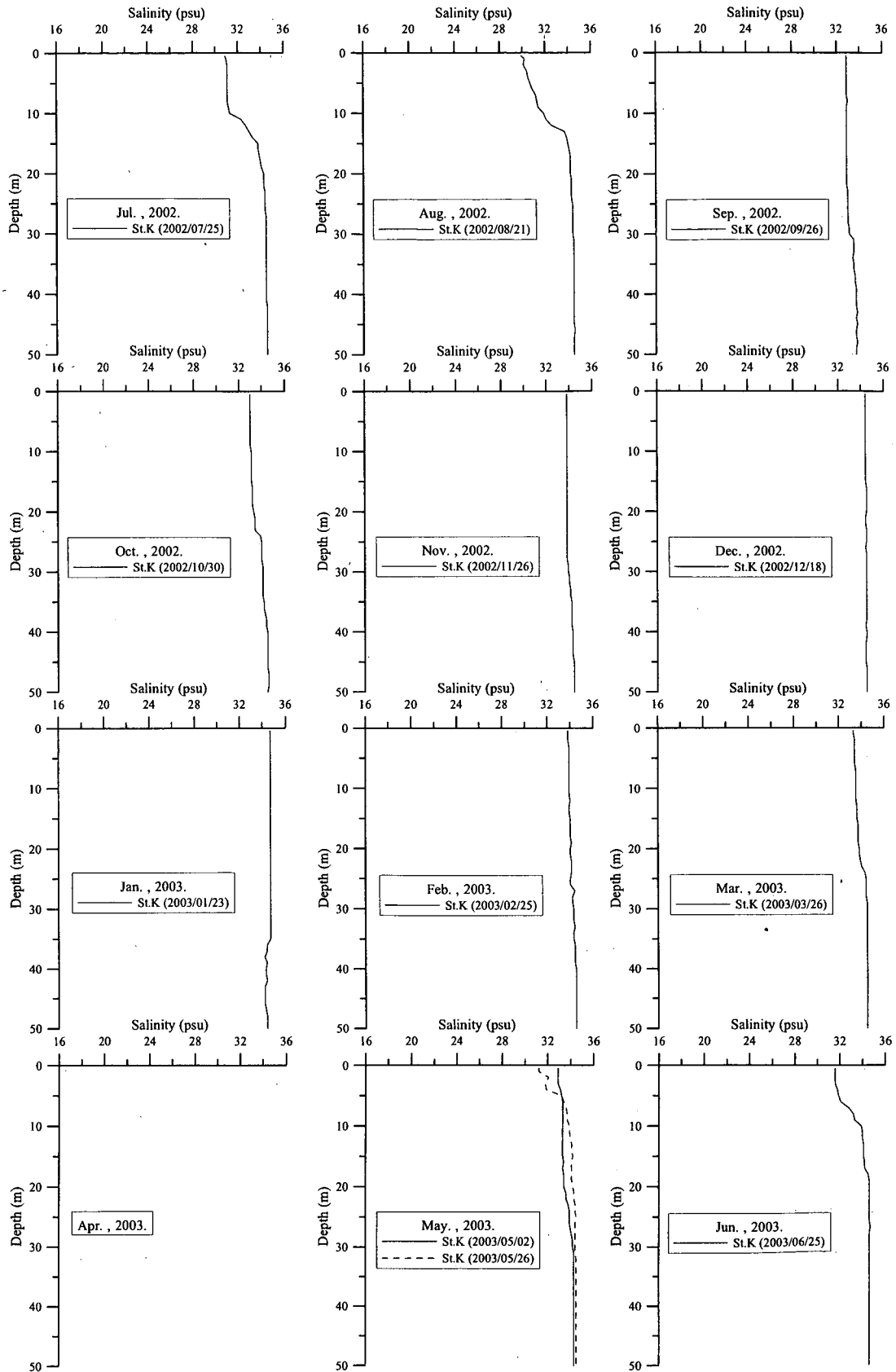


図-B. 25 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.K)

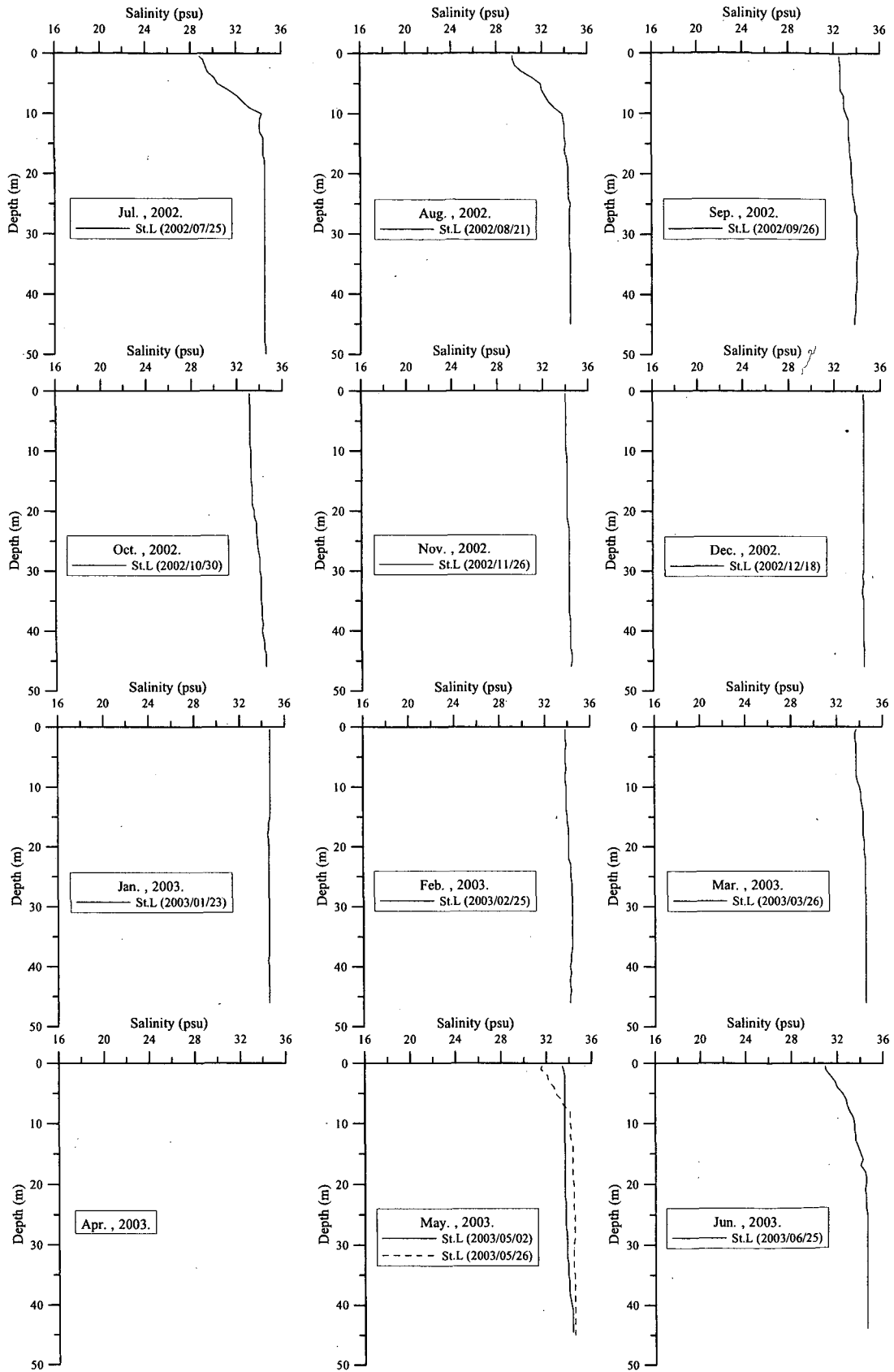


図-B. 26 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.L)

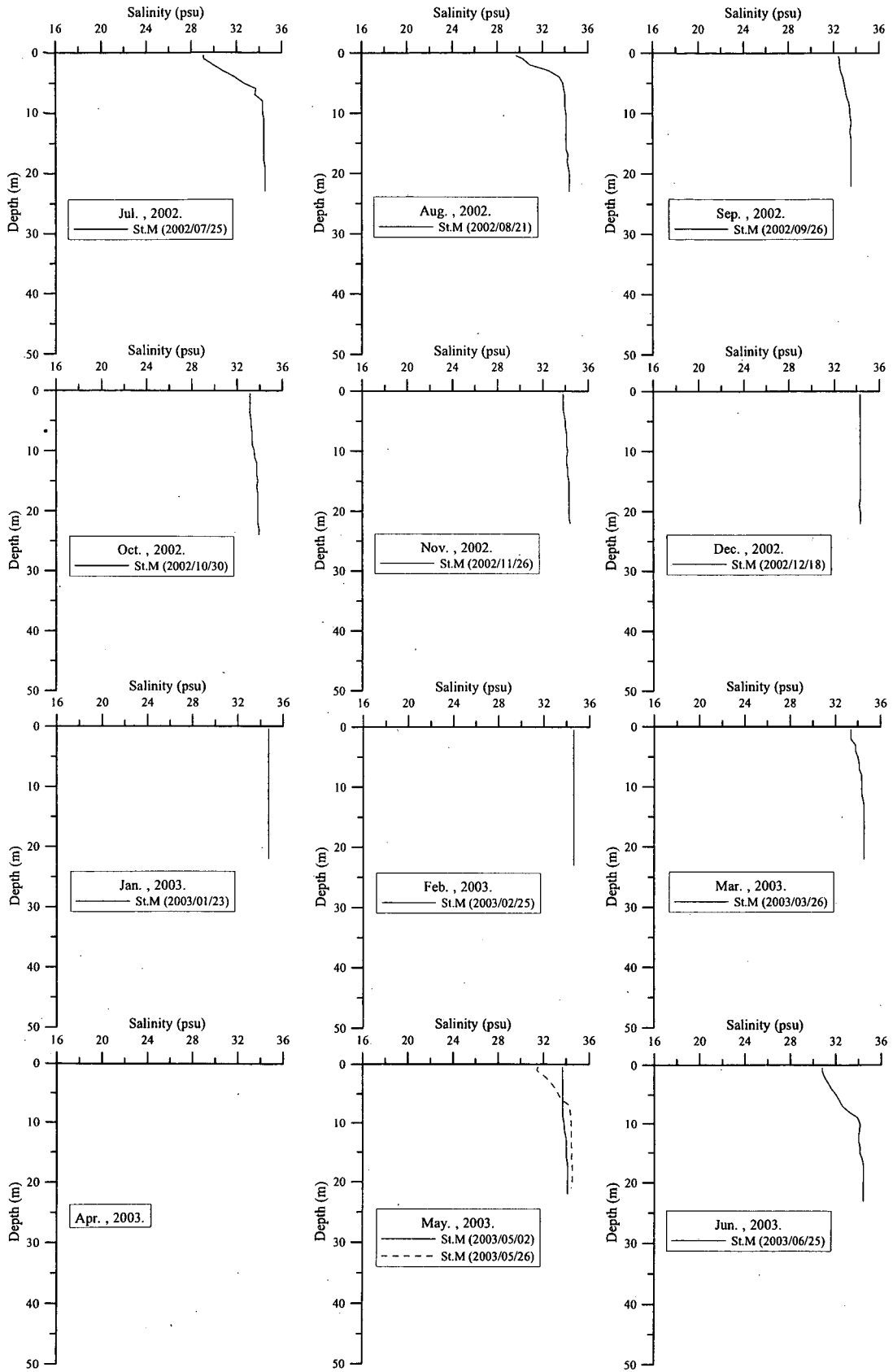


図-B. 27 月毎の塩分の鉛直プロファイル(st.M)

B.2 観測日毎に付けた水深0.5m, 10m, 20mの平面分布図

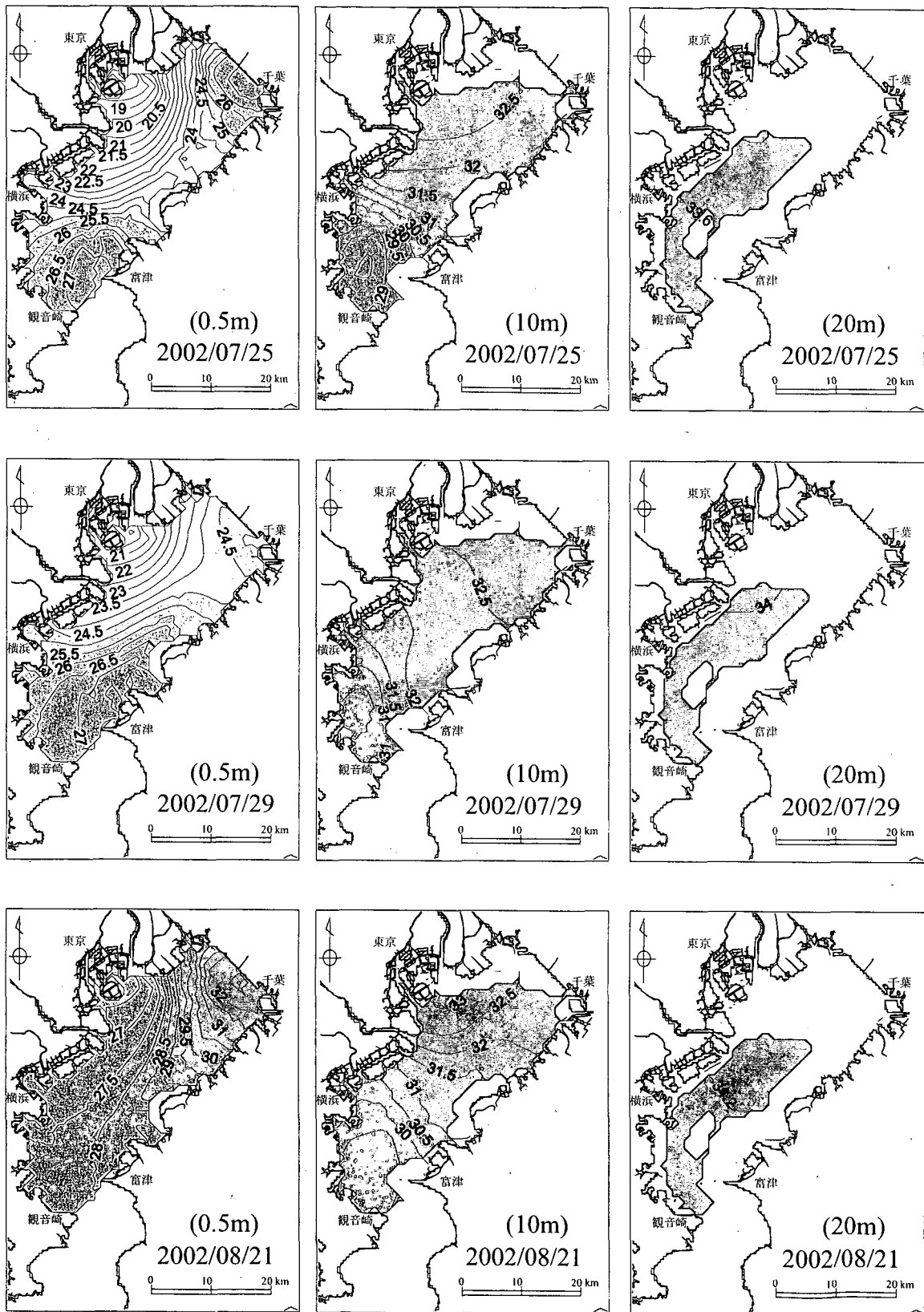


図-B.28 塩分の平面分布図

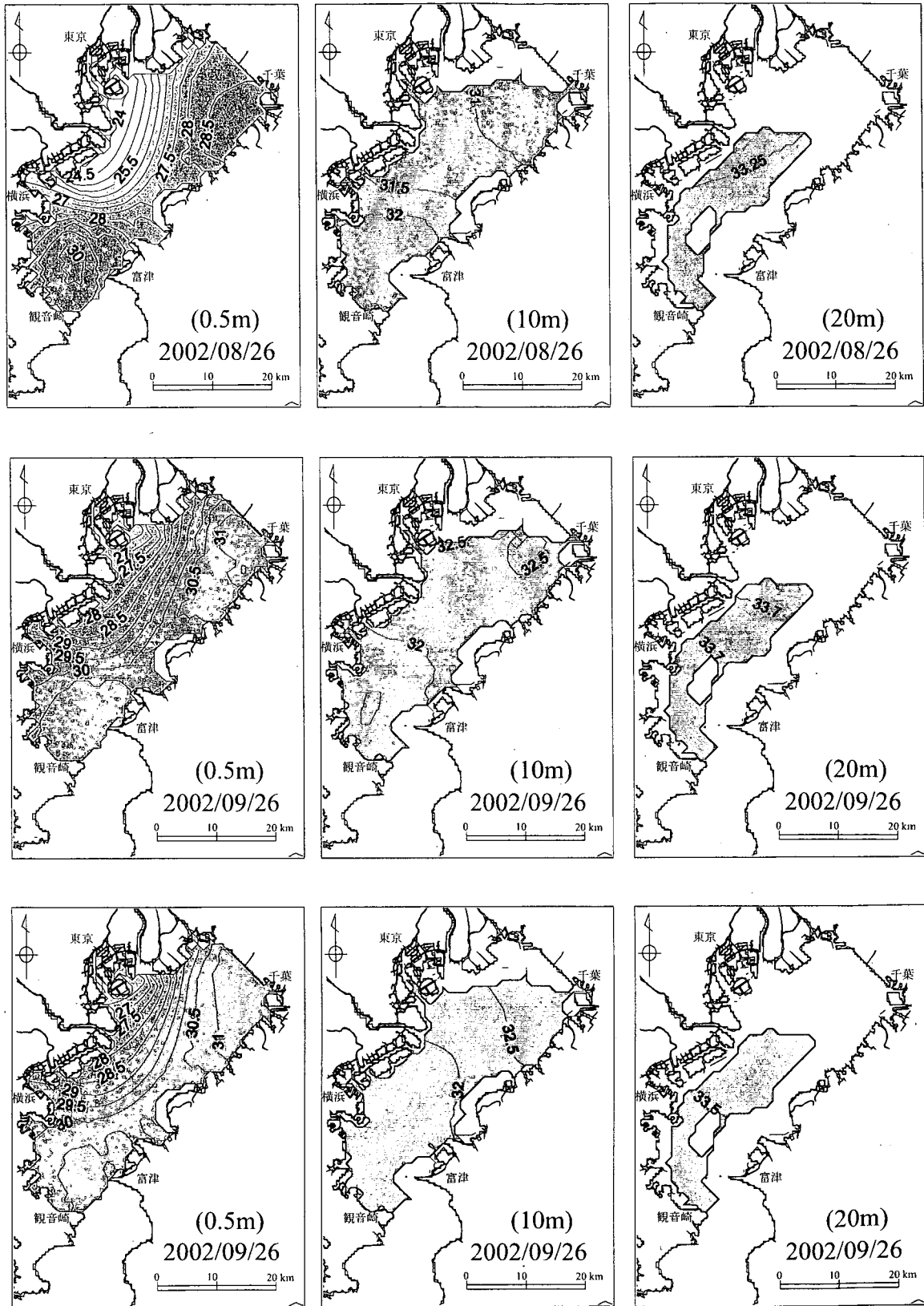


図-B. 29 塩分の平面分布図

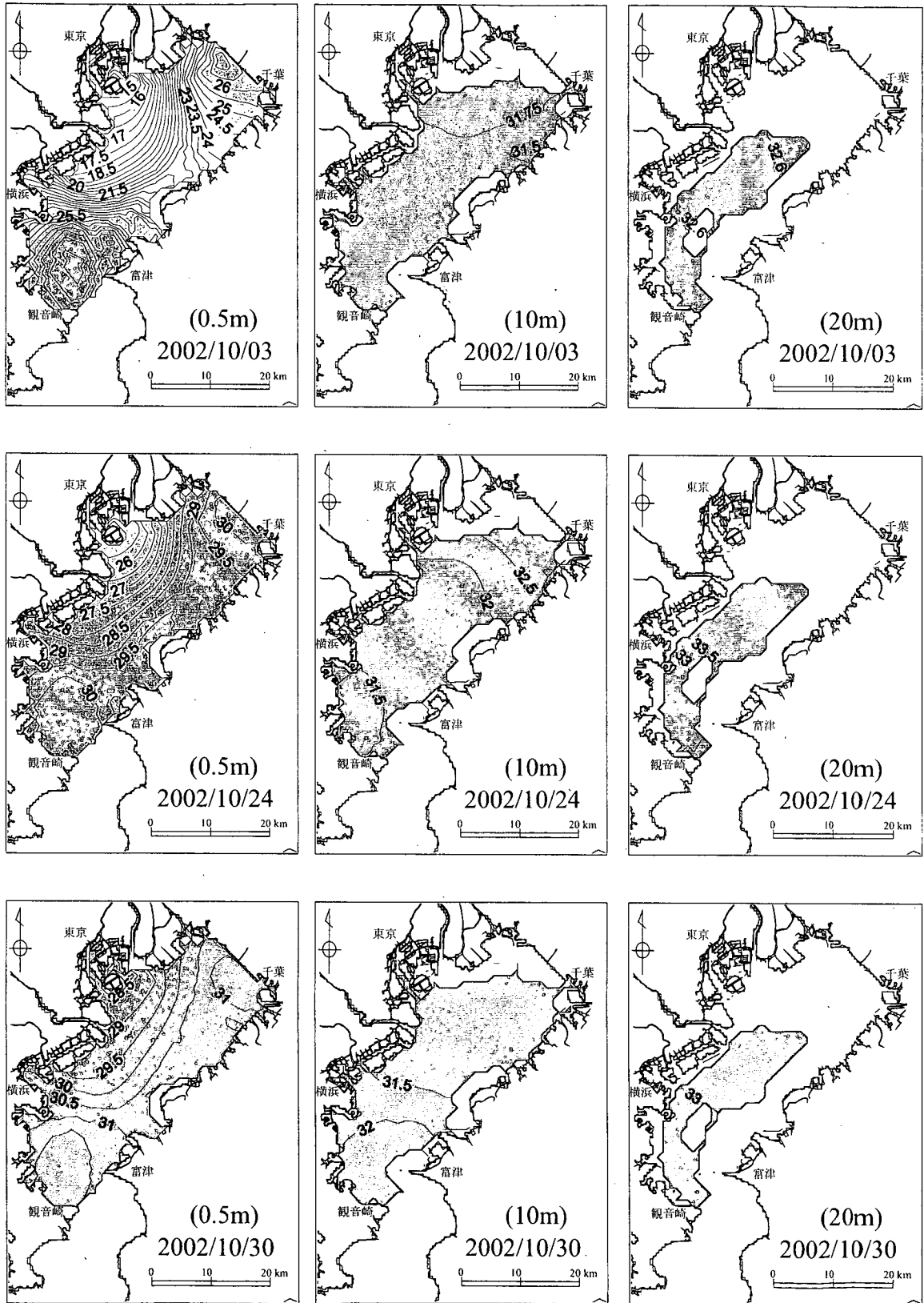


図-B. 30 塩分の平面分布図

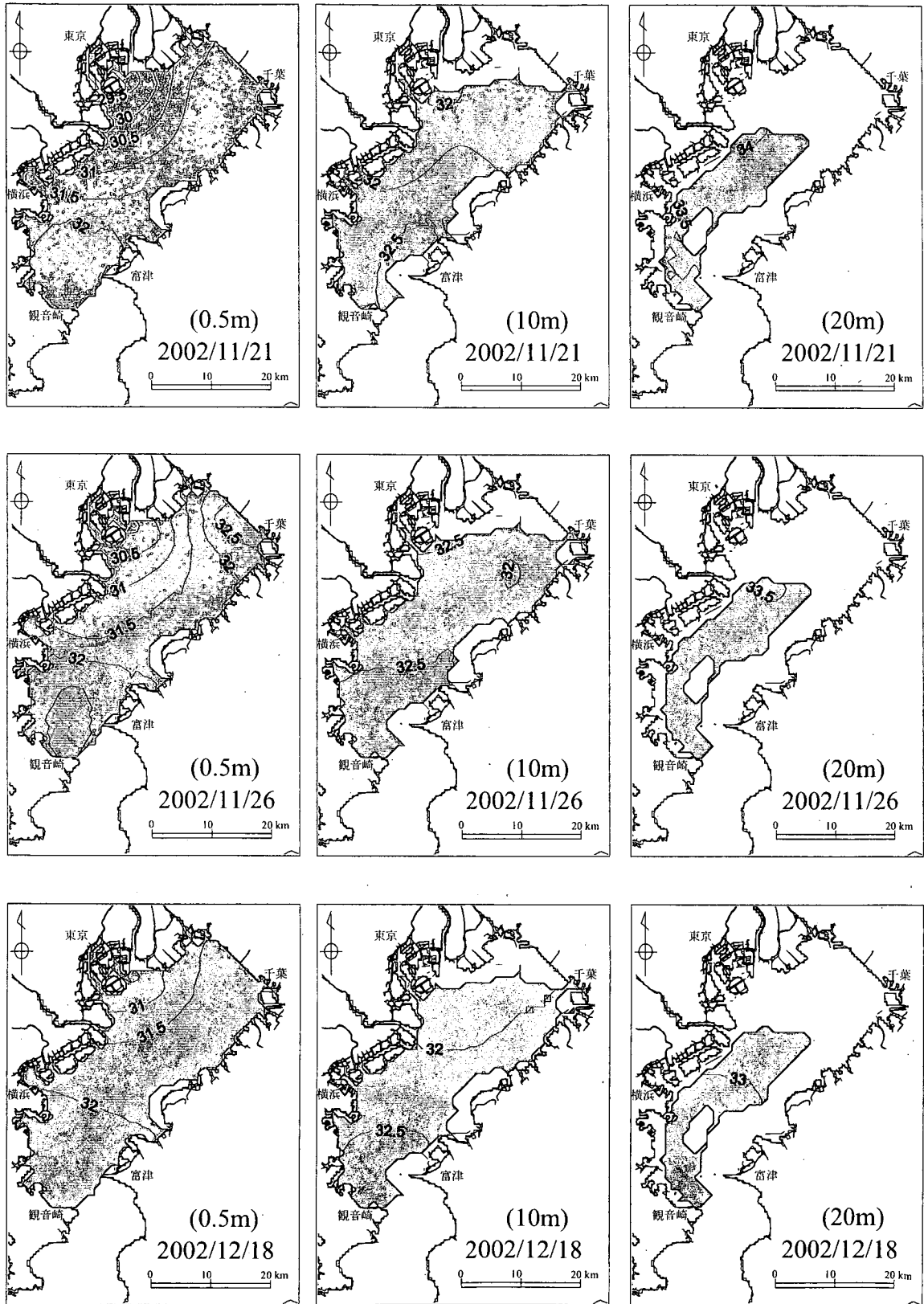


図-B.31 塩分の平面分布図

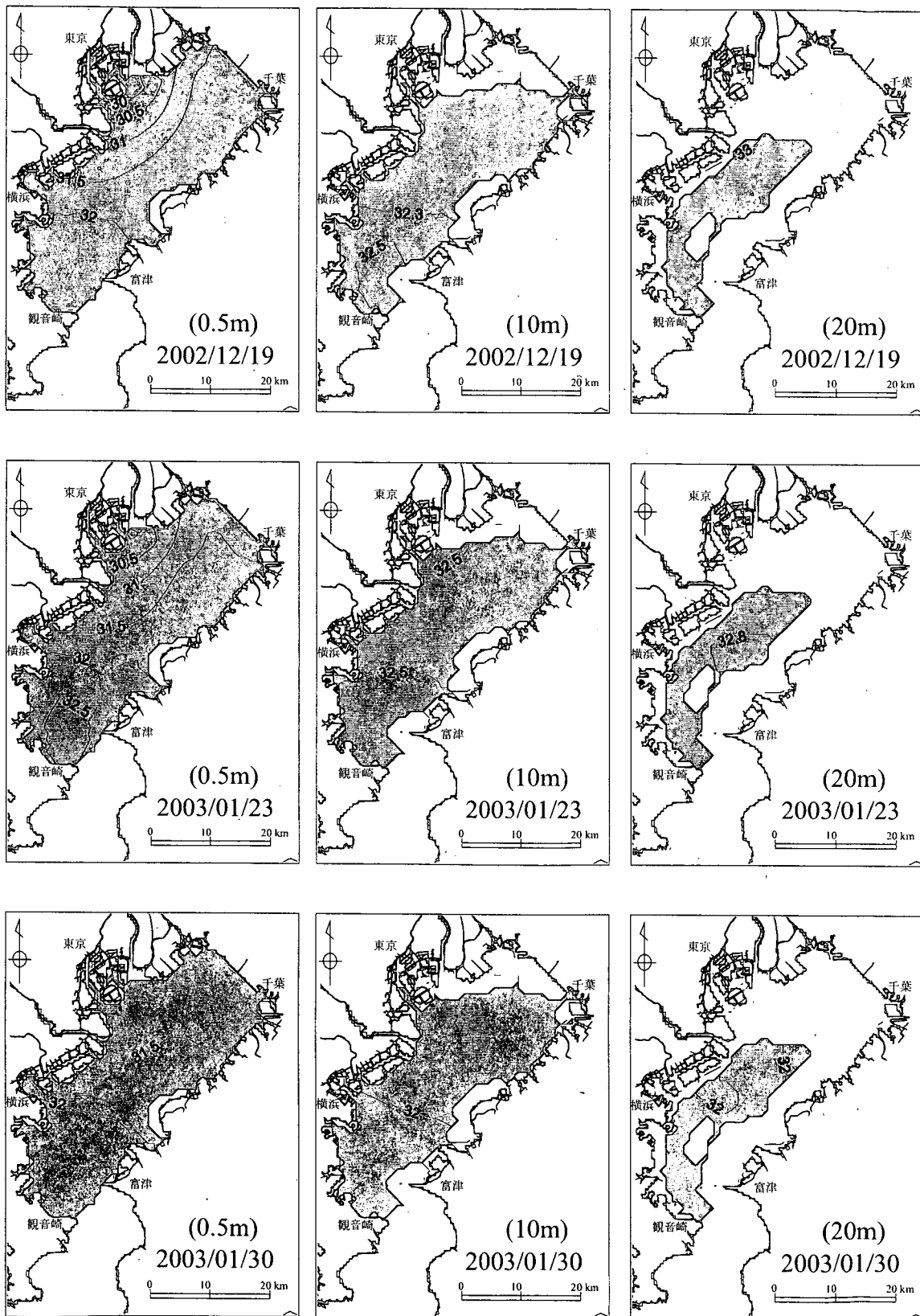


図-B.32 塩分の平面分布図

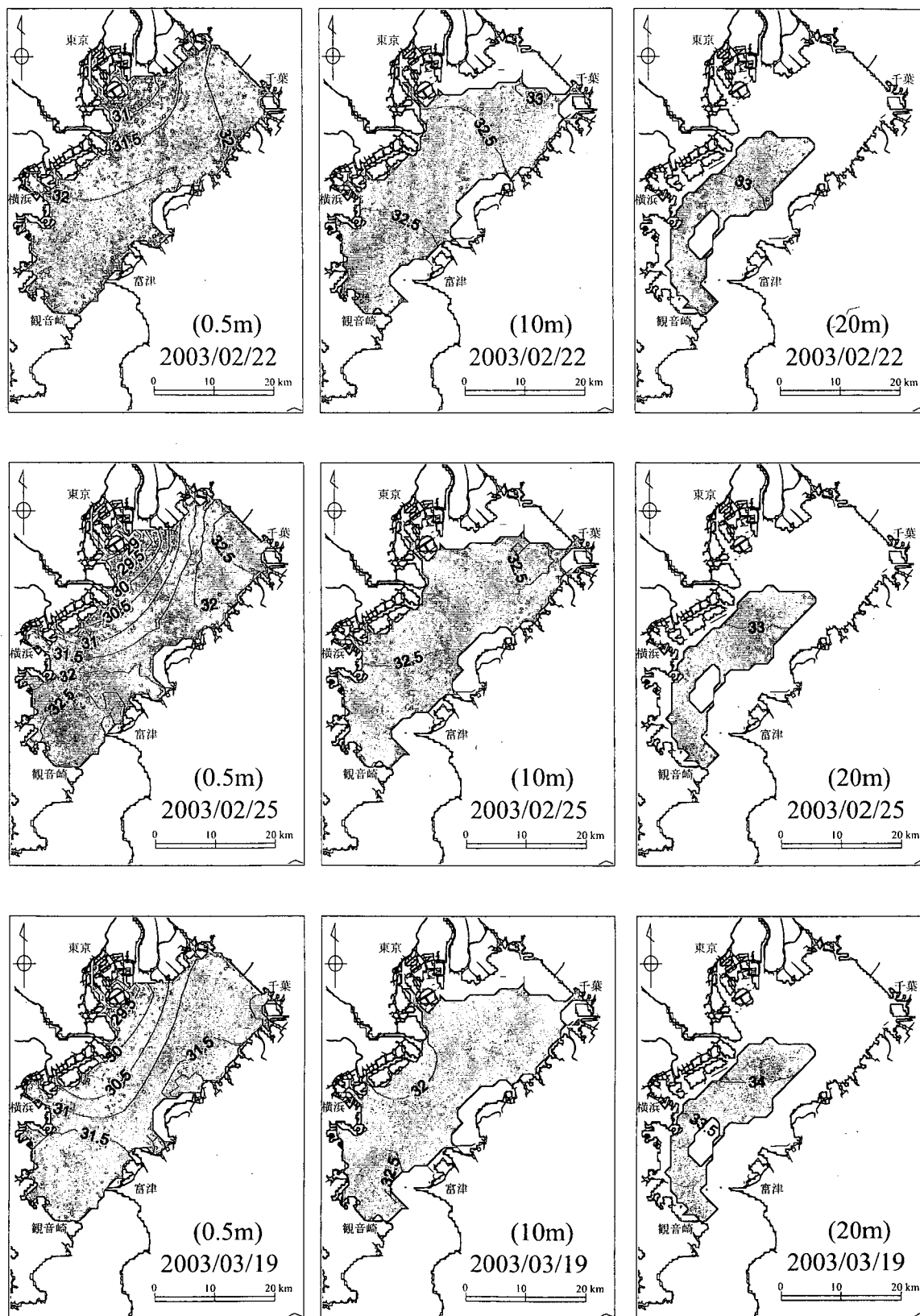


図-B.33 塩分の平面分布図

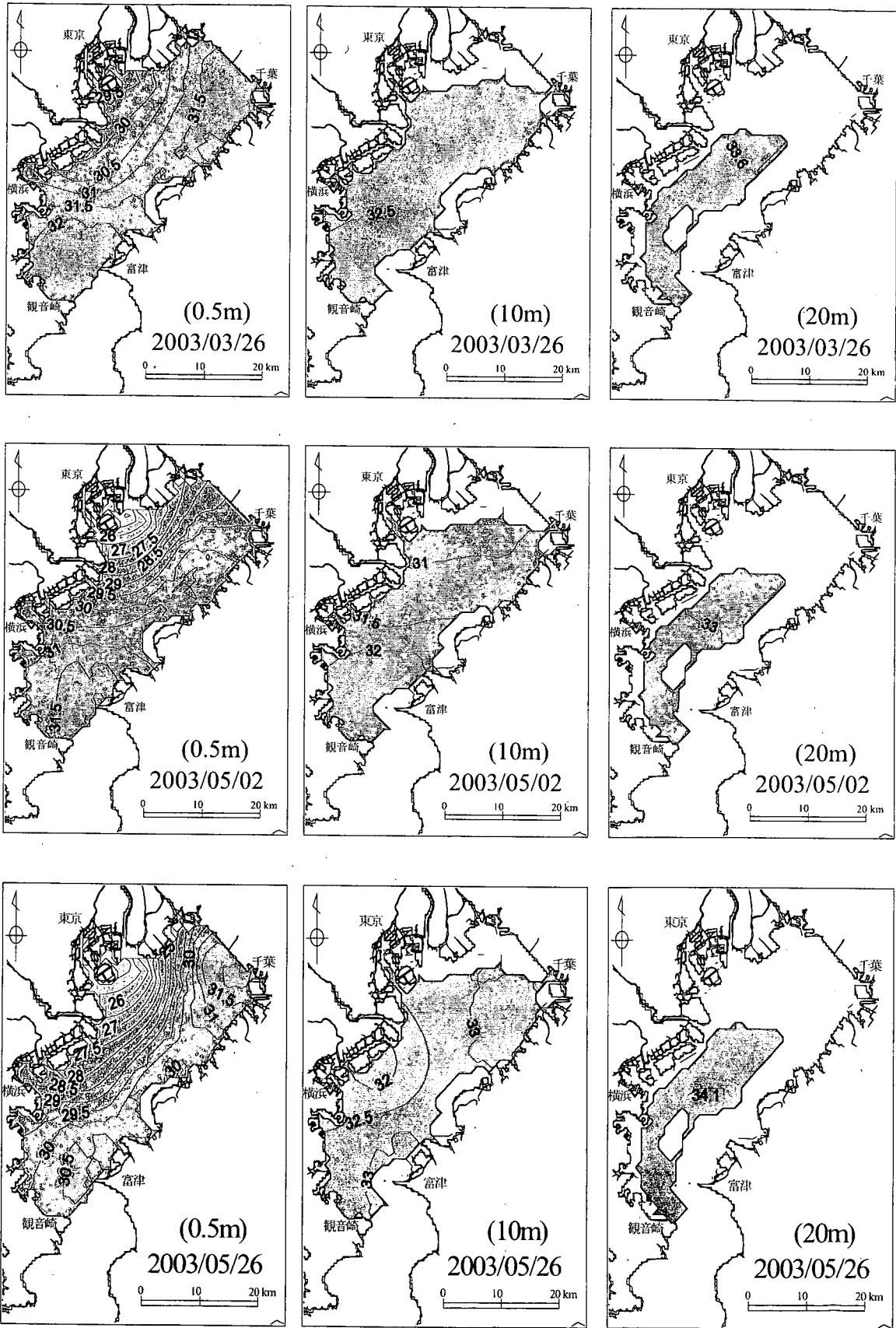


図-B.34 塩分の平面分布図

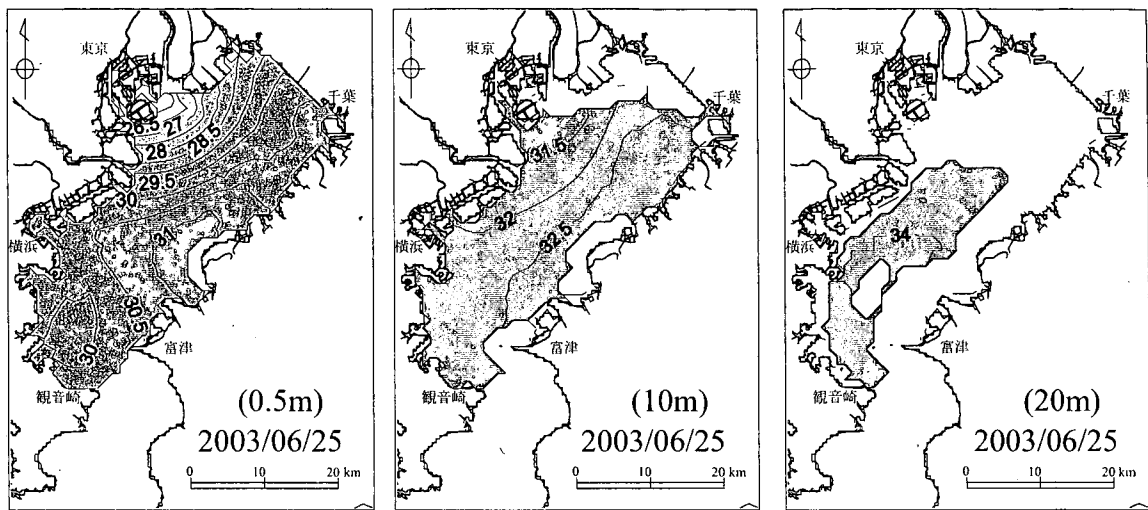


図-B. 35 塩分の平面分布図

B.3 観測日毎に分けた湾奥から湾口にかけての縦断面図

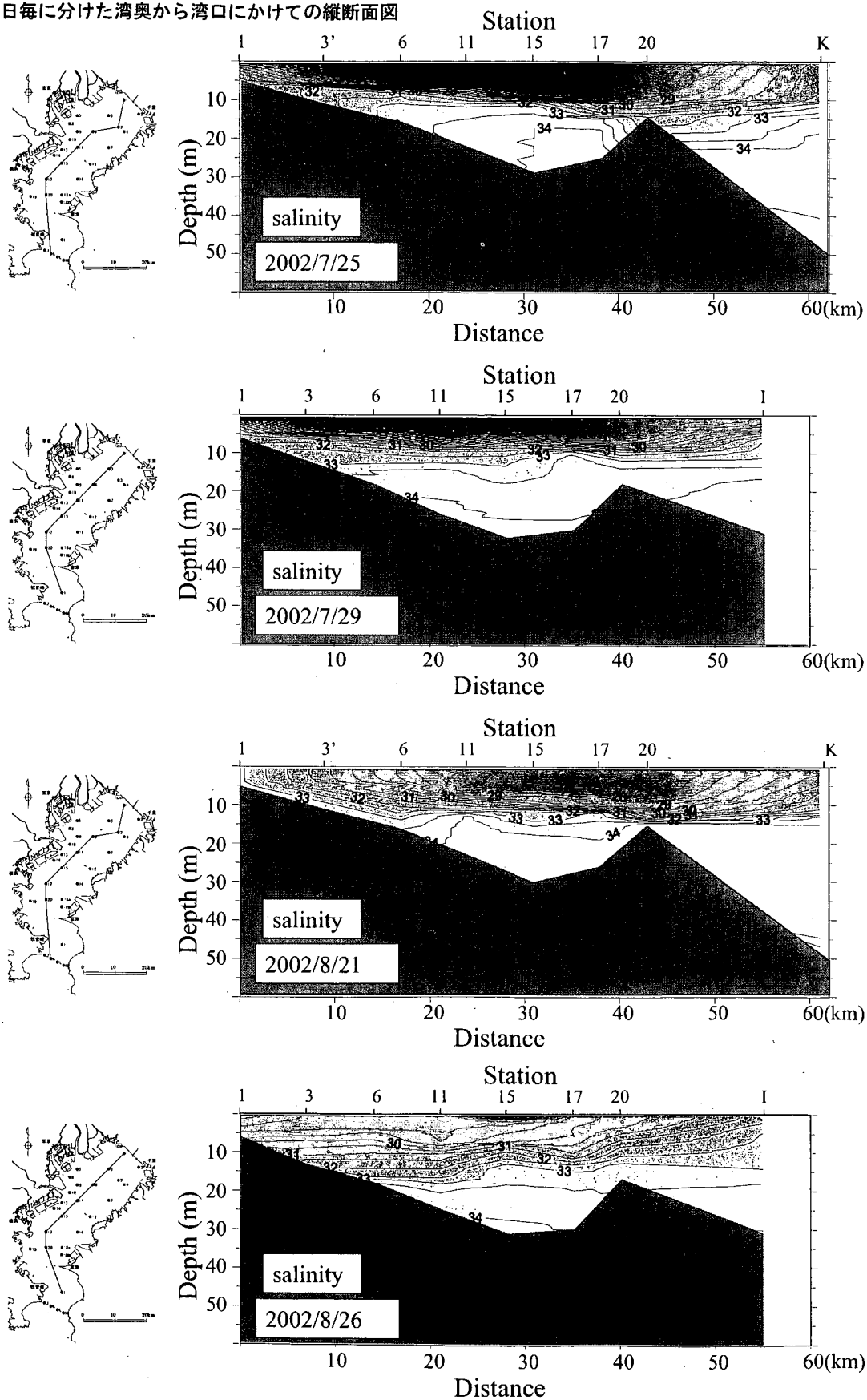


図-B.36 塩分の縦断面分布図

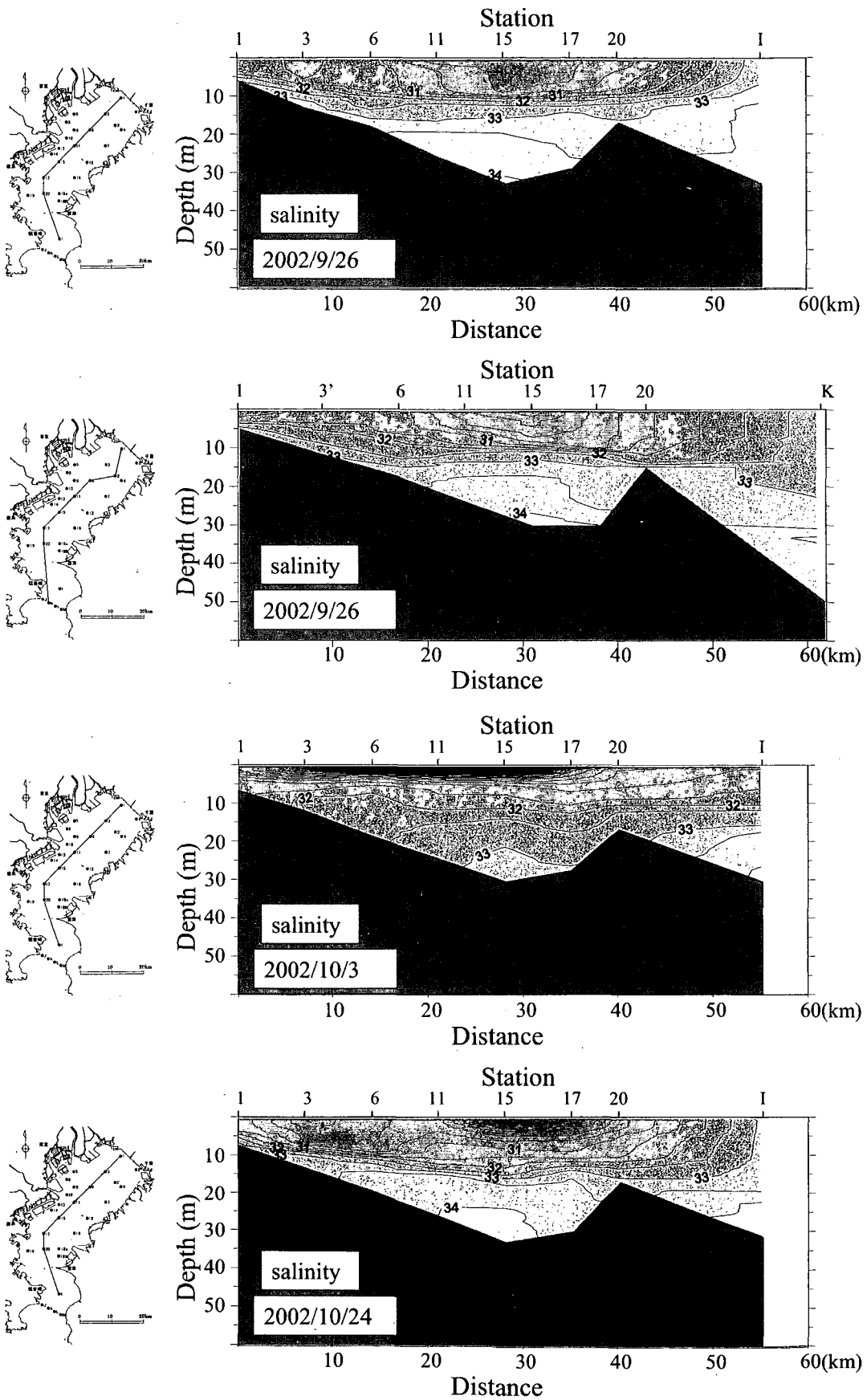


図-B. 37 塩分の縦断面分布図

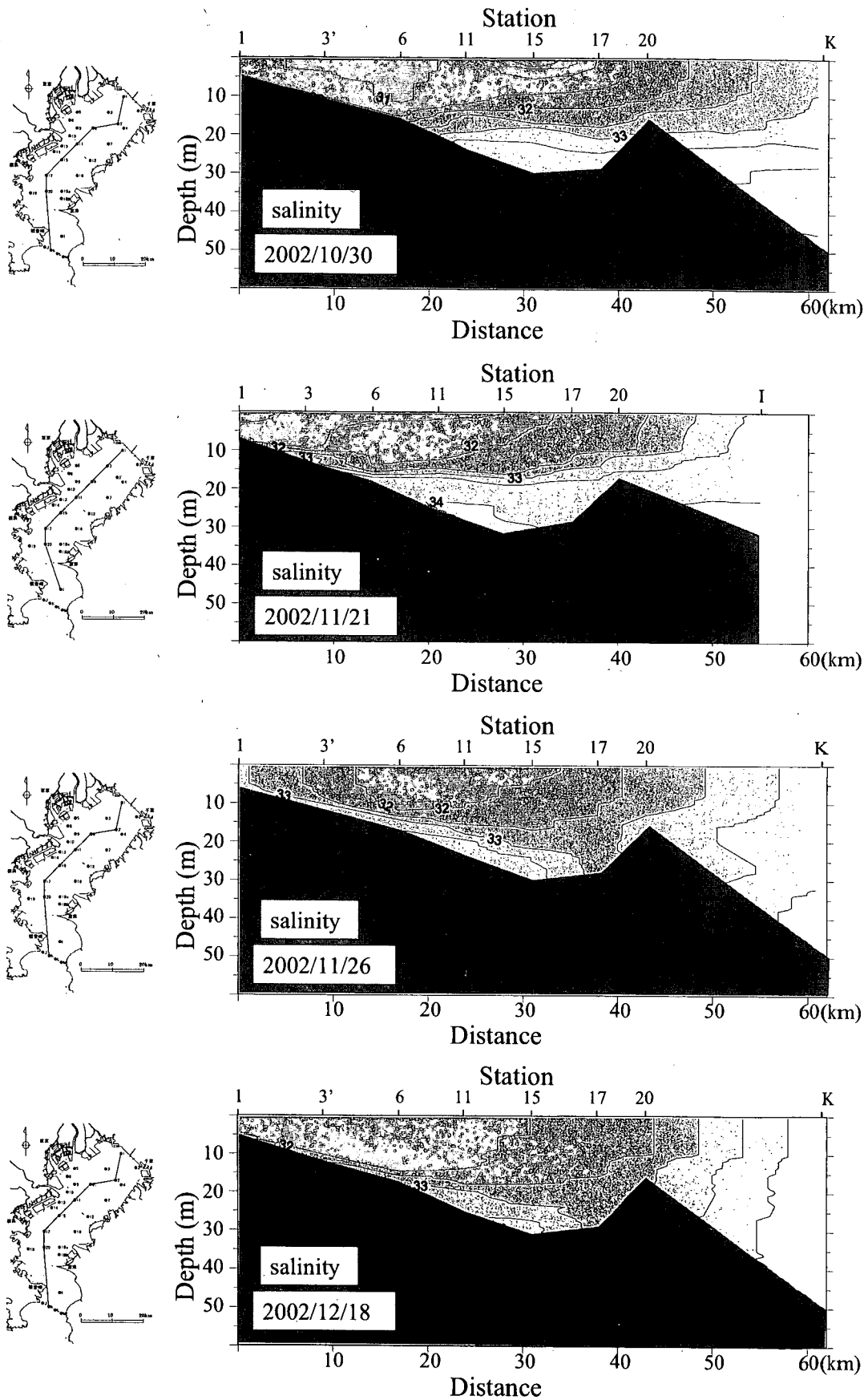


図-B. 38 塩分の縦断面分布図

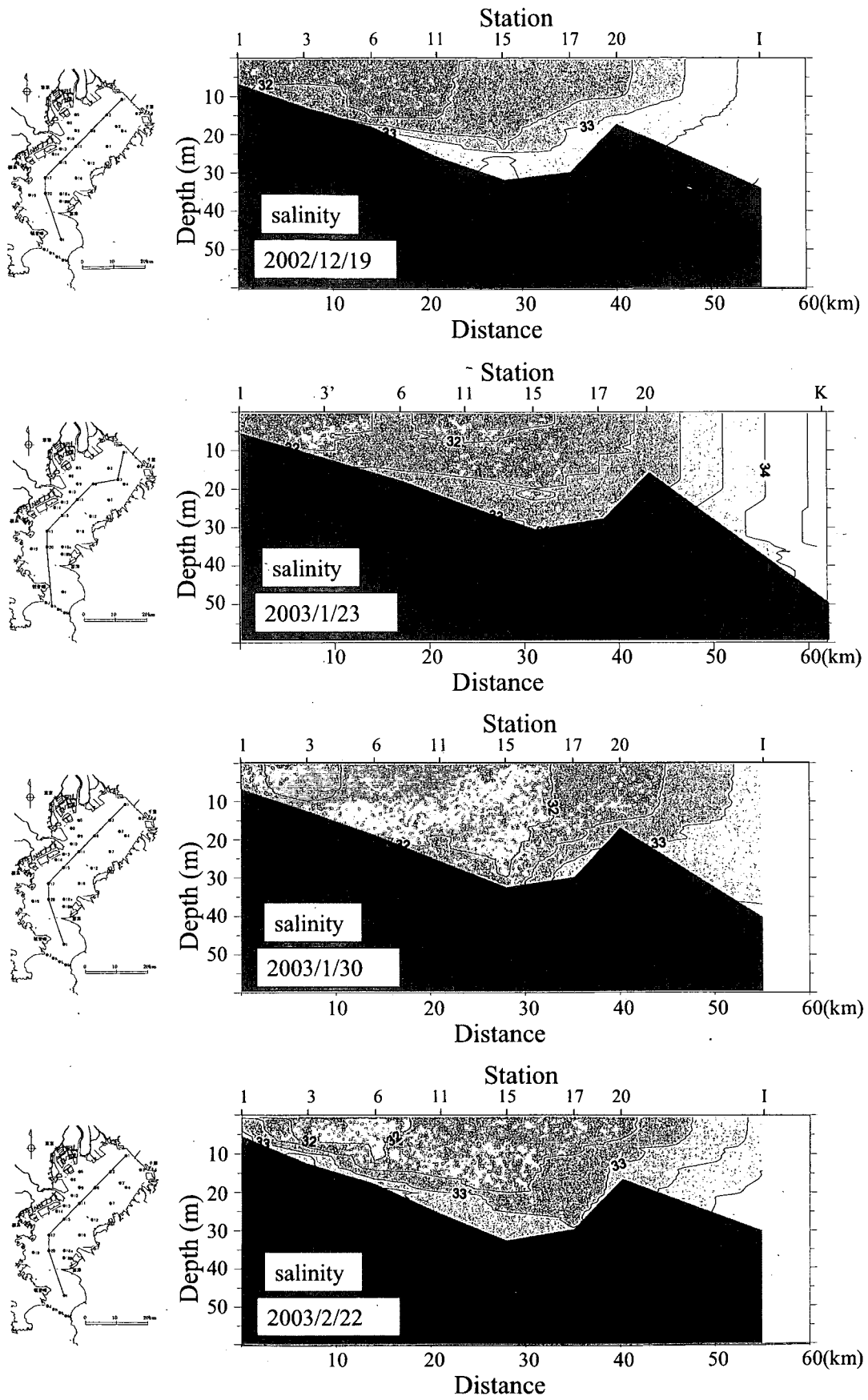


図-B. 39 塩分の縦断面分布図

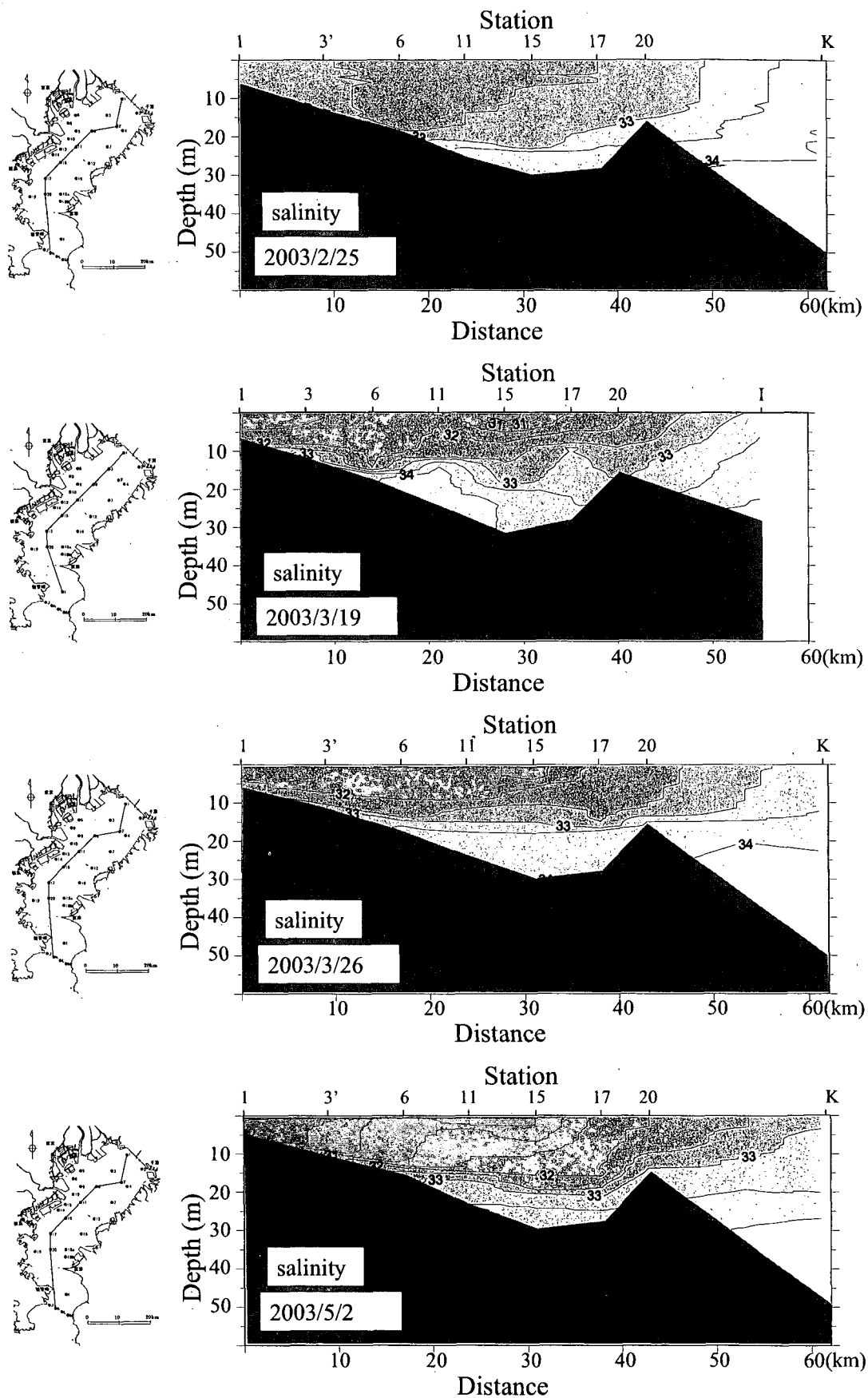


図-B.40 塩分の縦断面分布図

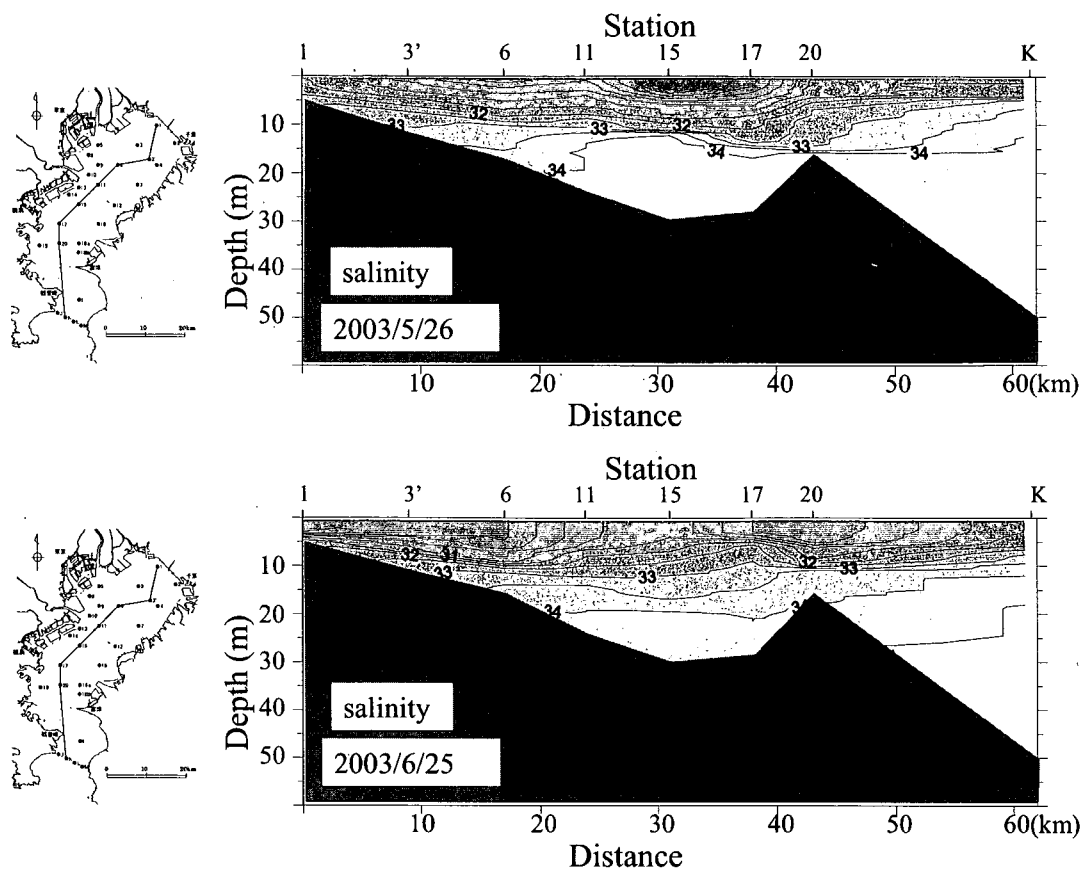


図-B. 41 塩分の縦断面分布図

付録C 過去100年間の淡水流入量の変遷

C.1 淡水流入量算出手法

ここでは過去100年間に渡る長期の淡水流入量の変遷についてまとめる。

東京湾の流域図を図-C.1に示す。東京湾の主な淡水供給源は①流域への降雨、②流域外からの流入水および取水、③海域への直接降雨とした。

(1) 流域への降雨による淡水供給量

流域への降雨による淡水供給量は「降水量×流域面積×流出率」により算出した。

各要素は図-C.2に示す海域区分に従い、海域ごとに降水量、流域面積、流出率を設定した。

各海域の流域における年降水量の算出手順は次のとおりである。図-C.2に示すアメダス観測地点の1976年から2000年の期間の年降水量(気象庁, 1977a-2001a)を表-C.1に示す海域区分毎に整理した。つまり、荒川が流入するW5は秩父・寄居・鴻巣・浦和・東京の年降水量をアンサンブル平均した値, 多摩川が流入するW4は小河内・青梅・八王子・府中の年降水量をアンサンブル平均した値, W1, W2, W3は大きな降水量の差はないと考え相模原・海老名・横浜の年降水量をアンサンブル平均した値, 千葉県北側に該当するE3, E4, E5の代表降水量を千葉・木更津・牛久の年降水量をアンサンブル平均した値, 南側に該当するE1, E2の代表降水量を木更津・坂畑・佐久間の年降水量をアンサンブル平均した値をそれぞれ求めた。1976年-2000年において求めた各海域区分の年降水量と東京, 横浜, 千葉の測候所の年降水量(気象庁, 1983, 中央気象台, 1985, 横浜地方気象台, 1996)とで回帰分析を行い, 各海域区分の年降水量と東京, 横浜または千葉の年降水量との関係について整理した。これはこれらの測候所で1900年頃から降水量を観測しているためである。得られる回帰直線を用いて東京, 横浜, 千葉の測候所の年降水量からそれぞれの海域区分の代表降水量を推定した。

各海域区分の流域面積は国土地理院ホームページ(<http://www.gsi.go.jp>)より平成15年4月の市区町村面積を参考に求め、表-C.2に示すように設定した。

流出率は東京湾研究会報告(1978)にならう、荒川・多摩川流域に該当するW4, W5を0.6に、その他の流域を0.65に設定した(表-C.3参照)。

(2) 流域外から流域内へ供給される淡水量

江戸川は利根川の分流として東京湾へ流入している河

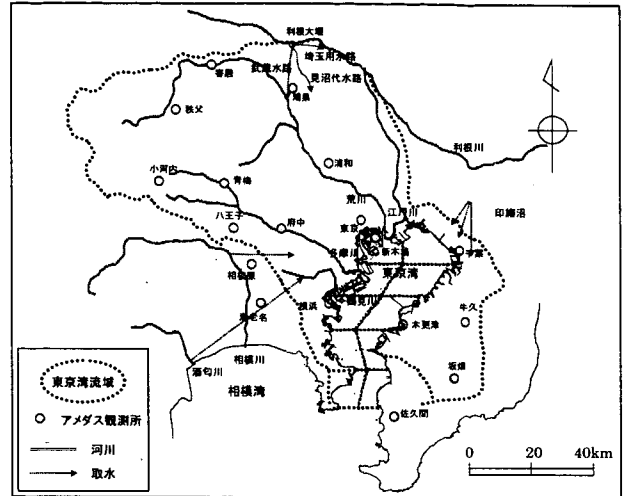


図-C.1 流域図およびアメダス観測地点図

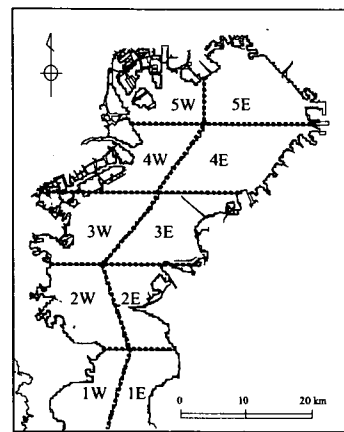


図-C.2 海域区分

川である。そのため、上記の流域内降水量から東京湾へ流入する淡水流量を考える場合、江戸川流量を別途考慮する必要がある。江戸川流量は1950年代から観測されているが、それ以前の観測流量は存在しない。そこで、利根川分岐点から1km下流に位置する西関宿の年平均流量と東京の年降水量の関係を回帰分析により調べ、東京の年降水量から江戸川の年平均流量を推定することとした。

この他に、東京湾流域圏の都市化による各種用水の需要から、流域外の取水が行われてきている。その主なものとして、利根川から利根大堰より都市用水、農業用水、浄化用水としての取水、印旛沼から工業用水、都市用水などとしての取水、相模川や酒匂川から川崎・横浜・横須賀へ供給される工業用水・都市用水があげられる。これらはいずれ下水道などを経て東京湾へ流入する。それぞれの取水を図-C.1に矢印で示す。

表-C.1 降水量の整理地点

BOX	観測地点	BOX	観測地点
W5	相模原, 海老名, 横浜	E3,E4,E5	木更津, 坂畑, 佐久間
W4	小河内, 青梅, 八王子, 府中	E1,E2	千葉, 木更津, 牛久
W1,W2,W3	秩父, 寄居, 鴻巣, 浦和, 東京	海域	横浜, 新木場, 千葉, 木更津

表-C.3 流出率

BOX	流出率	BOX	流出率
W5	0.60	E5	0.65
W4	0.60	E4	0.65
W3	0.65	E3	0.65
W2	0.65	E2	0.65
W1	0.65	E1	0.65

(3) 海域への直接降雨

海域への降水量から蒸発量を差し引いた量を海域への直接降雨とした。これに表-C.4に示す海域面積をかけて海域への直接降雨による淡水供給量を算出した。

海域への降水量は1976年-2000年の東京湾に隣接する横浜, 新木場, 千葉, 木更津(図-C.1参照)のアメダスデータを用いて算出した。蒸発量はバルク式による

$$q_e = \frac{Q_e}{L} \quad (C1)$$

$$Q_e = 0.622 \rho_a L C_E (E_s - E_a) \frac{W}{P} \quad (C2)$$

により算出した。

ここで, q_e : 蒸発量(kg/m²/s), Q_e : 海水の蒸発による潜熱輸送(kcal/m²/s), L : 蒸発の潜熱(L=586kcal/kg), ρ_a : 空気の密度(kg/m³), C_E : 潜熱輸送係数($C_E=1.1 \times 10^{-3}$), E_s : 飽和海面蒸気圧(hPa), E_a : 大気の水蒸気圧(hPa), W : 風速(m/s), P : 海面気圧(hPa)を示す。

また, 空気の密度は

$$\rho_a = \frac{1.293}{1 + 0.00367 \cdot T_a} \cdot \frac{P}{1013.25} \quad (C3)$$

により求めた(国立天文台, 1998)。ここで, T_a は気温(°C)を示す。

気温, 海面の水温, 蒸気圧, 風速, 気圧のうち, 気温と風速は1976年-2000年の横浜, 新木場, 千葉, 木更津の気象データ(気象庁, 1977a-2001a)を用い, 蒸気圧, 気圧は1976-2000年の横浜, 千葉の気象データ(気象庁, 1977b-2001b)を用いた。表面水温は1979年4月-1999年3月の表層水温データ(環境省, 1999)を用いた。

表-C.2 流域面積(合計7,748km²)

BOX	面積(km ²)	BOX	面積(km ²)
W5	4372.9	E5	399.8
W4	1415.4	E4	368.2
W3	324.3	E3	233.6
W2	50.0	E2	421.4
W1	60.0	E1	102.6

表-C.4 海域面積(合計1,160km²)

BOX	面積(km ²)	BOX	面積(km ²)
W5	94.0	E5	157.0
W4	103.8	E4	165.8
W3	132.3	E3	132.3
W2	118.3	E2	86.0
W1	88.0	E1	82.3

算出される単位面積あたりの海面淡水収支に海域面積をかけて, 海域ごとの淡水供給量を見積もった。海域面積は海図W90号(海上保安庁, 2000)をもとに作成した500mメッシュの地形データから算出した。

(4) 月平均淡水流入量の季節変化

前述の流域外から流域内へ供給される淡水量のうち, 江戸川流量を除いた利根大堰からの取水量, 印旛沼からの取水量, 川崎市・横浜市・横須賀市への取水量は季節変化は考慮しなかった。これはこれらの取水は主に工業化・都市化によるものであるため季節変化は小さいと考えたからである。

その他の流域への降雨による淡水供給量, 江戸川流量, 海域への直接降雨について季節変化を考慮した。

図-C.1に示すアメダス観測地点全ての地点で1976年-2000年の月平均降水量を算出し, これを表-C.1に示す海域区分毎にアンサンブル平均し各海域区分の月平均降水量を求めた。なお, 海域についてはこれに蒸発量を差し引いた値で月平均降水量を求めた。得られた各海域区分における各月の平均降水量を各海域区分における1976年-2000年の年降水量の平均値で割ることで, 各海域区分の各月降水量の年降水量に占める割合を算出した。得られた各月の降水量の割合に各海域区分の流域への降雨による淡水供給量の年平均値, 江戸川流量の年平均値, 海域への直接降雨の年平均値をかけることで, 各海域区分の各月のこれら季節変化をもつ淡水供給量を求め, これに利根大堰からの取水量, 印旛沼からの取水量, 川崎市・横浜市・横須賀市への流域外取水量を加算することで各月の淡水供給量を算出した。季節変化は変わらないとして, この作業を約100年分のデータに関し

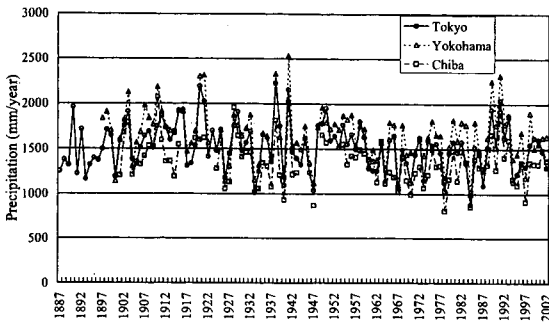


図-C.3 東京, 横浜, 千葉における約100年間の降水量の経年変化

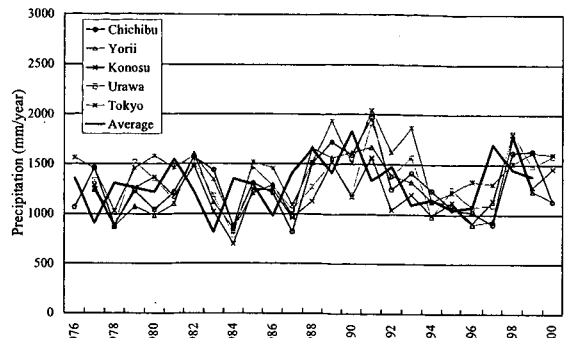


図-C.4 地域W5の代表地点の降水量の経年変化

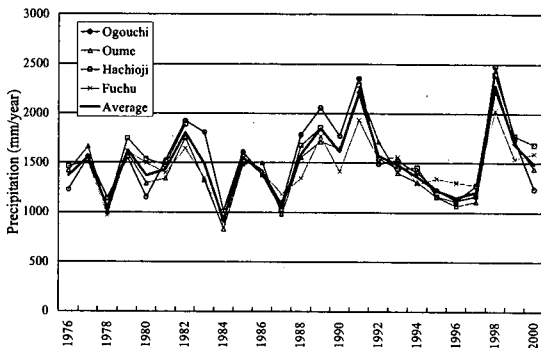


図-C.5 地域W4の代表地点の降水量の経年変化

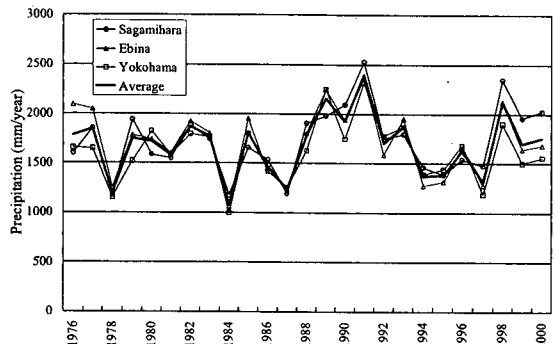


図-C.6 地域W1,W2,W3の代表地点の降水量の経年変化

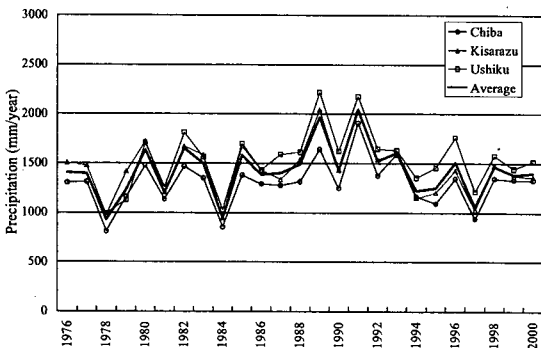


図-C.7 地域E3,E4,E5の代表地点の降水量の経年変化

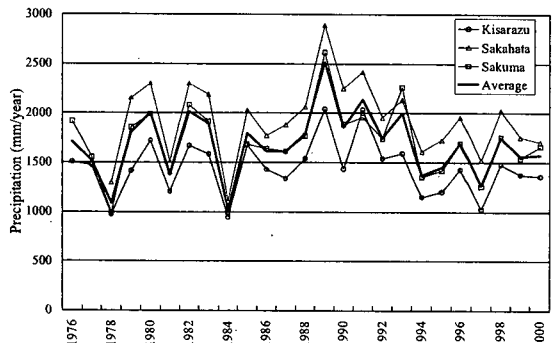


図-C.8 地域E1,E2の代表地点の降水量の経年変化

て実施した。

C.2 淡水流入量算出結果

(1) 流域への降雨

図-C.3に東京, 横浜, 千葉における1887年-2002年の年降水量(気象庁,1983, 中央气象台,1985, 横浜地方气象台,1996)を示す。

1976年-2000年の期間における降水量(気象庁,1977a-2001a)の経年変化を表-C.1に示す海城区分毎に整理した。W5を図-C.4に, W4を図-C.5に, W1・W2・

W3を図-C.6に, E3・E4・E5を図-C.7に, E1・E2を図-C.8にそれぞれ示す。図にはアンサンブル平均を取った平均値も示す。

1976年-2000年における各海城区分の年降水量(地点平均)と測候所(東京, 横浜, 千葉)の年降水量の回帰分析結果を示す。回帰分析はW5およびW4は東京を, W1・W2・W3は横浜および東京を, E3・E4・E5とE1・E2は千葉および東京の年降水量とで実施した。W4とW5以外で2地点で回帰分析を行う理由は横浜および千葉の年降水量は不明な年が存在するためである。W5の年降水量と東京の年降水量の比較結果を図-C.9に, W4

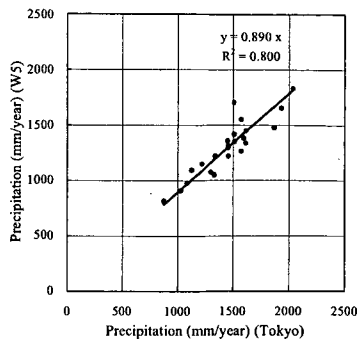


図-C. 9 地域W5の降水量と東京の降水量との回帰分析

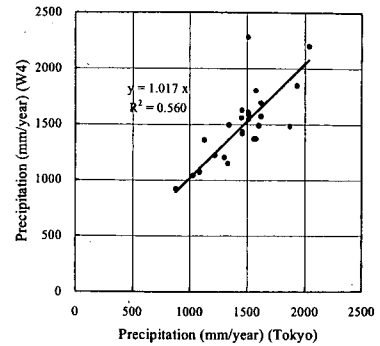


図-C. 10 地域W4の降水量と東京の降水量との回帰分析

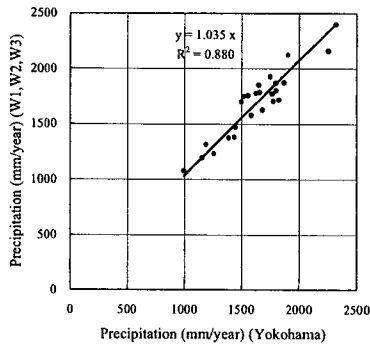


図-C. 11 地域W1,W2,W3の降水量と横浜の降水量との回帰分析

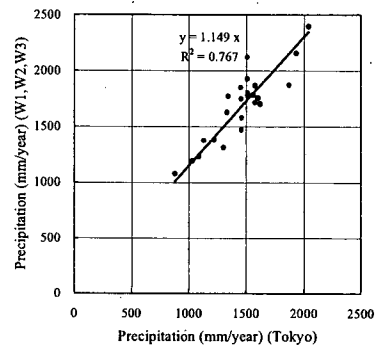


図-C. 12 地域W1,W2,W3の降水量と東京の降水量との回帰分析

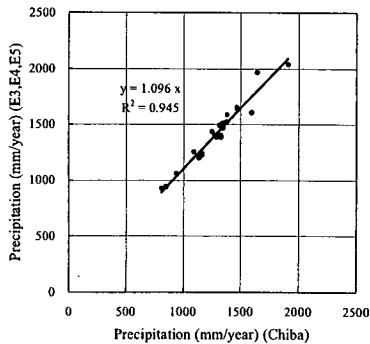


図-C. 13 地域E3,E4,E5の降水量と千葉の降水量との回帰分析

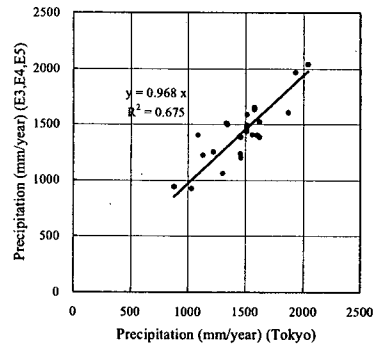


図-C. 14 地域E3,E4,E5の降水量と東京の降水量との回帰分析

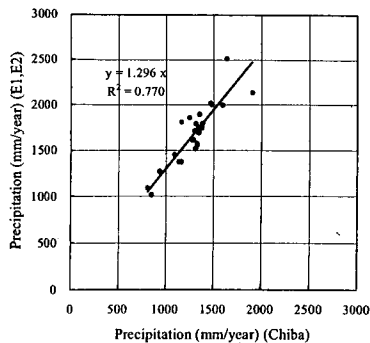


図-C. 15 地域E1,E2の降水量と千葉の降水量との回帰分析

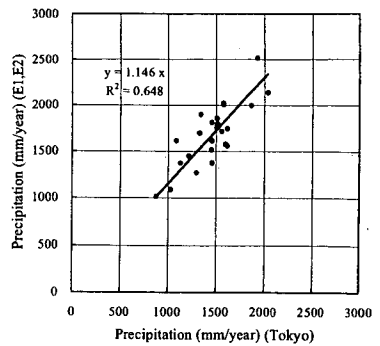


図-C. 16 地域E1,E2の降水量と東京の降水量との回帰分析

表-C.5 各海域の代表降水量の推算式

海域区分	回帰直線	備考
W5	$q=0.889 \times q_{\text{tokyo}}$	通常年
W4	$q=1.017 \times q_{\text{tokyo}}$	通常年
W1,W2,W3	$q=1.035 \times q_{\text{yokohama}}$	通常年
	$q=1.149 \times q_{\text{tokyo}}$	横浜の年降水量が不明な年 (1896, 1923)
E3,E4,E5	$q=1.097 \times q_{\text{chiba}}$	通常年
	$q=0.968 \times q_{\text{tokyo}}$	千葉の年降水量が不明な年 (1896-1900, 1916-1918, 1922-1923, 1944-1946, 1948, 1951-1953)
E1,E2	$q=1.296 \times q_{\text{chiba}}$	通常年
	$q=1.146 \times q_{\text{tokyo}}$	千葉の年降水量が不明な年 (〃)

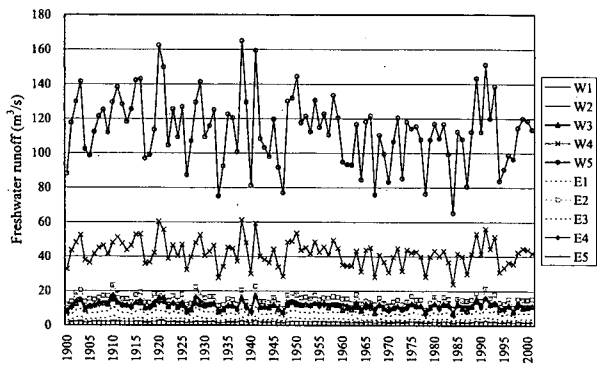


図-C.18 降雨による区域毎の淡水流入量

の年降水量と東京の年降水量の比較結果を図-C.10に、W1・W2・W3の年降水量と横浜の年降水量の比較結果を図-C.11に、W1・W2・W3の年降水量と東京の年降水量の比較結果を図-C.12に、E3・E4・E5の年降水量と千葉の年降水量の比較結果を図-C.13に、E3・E4・E5の年降水量と東京の年降水量の比較結果を図-C.14に、E1・E2の年降水量と千葉の年降水量の比較結果を図-C.15に、E1・E2の年降水量と東京の年降水量の比較結果を図-C.16にそれぞれ示す。W4で二乗相関0.56を示すものの、他は0.75以上であり、全体的に相関は高い。よって、以後は各区域の代表降水量はW4およびW5は東京、W1・W2・W3は横浜（横浜の年降水量が不明な年は東京）、E1・E2およびE3・E4・E5は千葉（千葉の年降水量が不明な年は東京）の年降水量を用いることとし、推定式は表-C.5に示す回帰直線を用いることとした。

推算式より推定される各海域区分の降水量の経年変化を図-C.17に示す。また、降水量に表-C.2に示す各海域区分の流域面積と表-C.3に示す流出率をかけて得られる降雨による淡水流入量を図-C.18に示す。

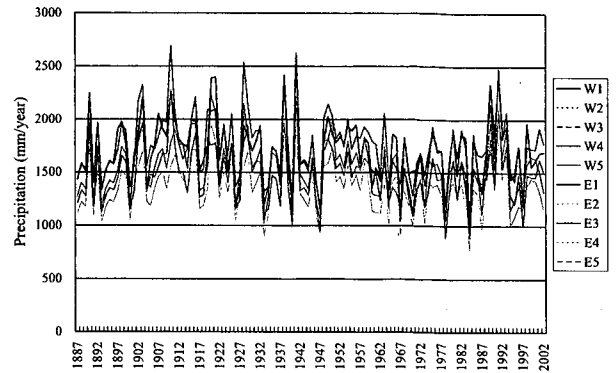


図-C.17 海域区分毎の過去100年間の降水量の経年変化

(2) 流域外から流域内へ供給される淡水量

江戸川流量は1950年代から観測が実施されているが、それ以前の流量は定かでない。そこで、年降水量から年平均流量の算出を行うこととする。図-C.19は江戸川の西関宿と野田の年平均流量(国土交通省)と東京の年降水量(気象庁,1983)の経年変化である。西関宿と野田の流量に大きな差はない。そこで、江戸川の最上流部(利根川分岐点から1km下流)に位置する西関宿の流量に注目する。西関宿の年平均流量が多い年は東京の年降水量も多く、逆に西関宿の年平均流量が少ない年は東京の年降水量も少なく、正の関係が見られる。そこで、西関宿の流量と東京の降水量で回帰分析を行った。図-C.20にその結果を示す。二乗相関0.46で正の相関が見られた。この回帰直線を使って1900年から西関宿の年平均流量の推算を行い、観測流量との比較を行ったものが図-C.21である。

利根大堰からの取水量の経年変化(水資源開発公団,2001)を図示したものが図-C.22である。取水は1964年に開始され、1980年にかけて増加している。その後はほぼ横ばいに推移している。

印旛沼からの取水量および東京湾への排水量の経年変化(水資源開発公団,2003)を図示したものが図-C.23である。1970年代前半に急激に増加し、1970年代後半に減少し1980年ごろからはほぼ横ばいに推移している。

川崎、横浜、横須賀への工業用水、水道用水として流域外からの取水量の経年変化(川崎市,1963,1973,1989,2001,2003),(横浜市,1954,1971,1979,1987,2000,2001)(横須賀市,1974),(厚生省,1970,1971,1972,1980,1981,1982,1990,1991,1992,2000,2001),(経済産業省,2001,2002)をもとに作成)を図示したものが図-C.24である。

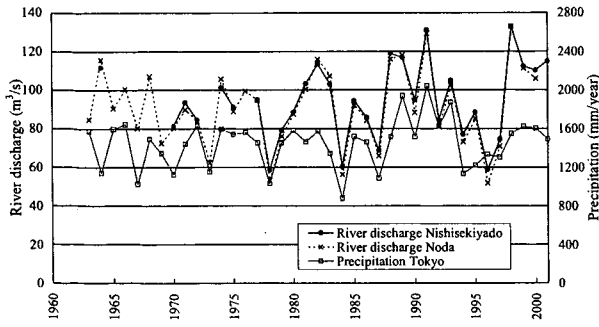


図-C.19 東京の年降水量と西関宿の年平均流量の経年変化の比較

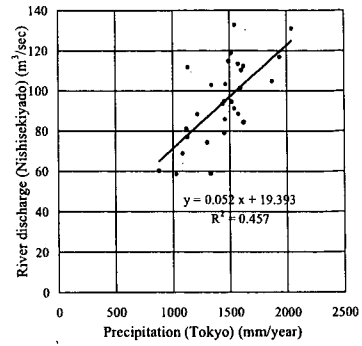


図-C.20 東京の年降水量と西関宿の年平均流量の回帰分析

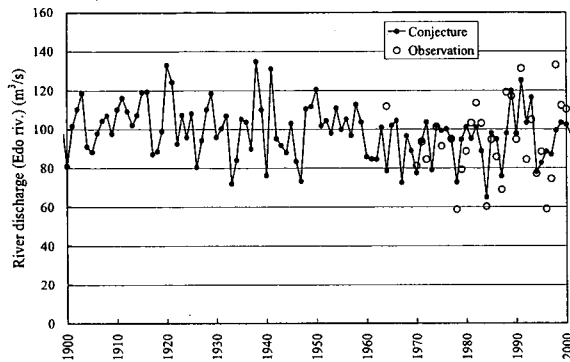


図-C.21 西関宿の推算流量と観測流量の比較

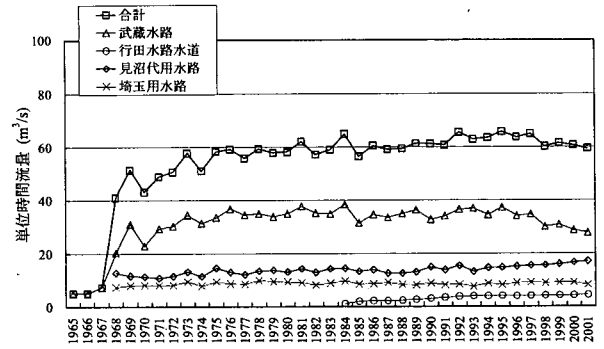


図-C.22 利根大堰からの取水量の経年変化

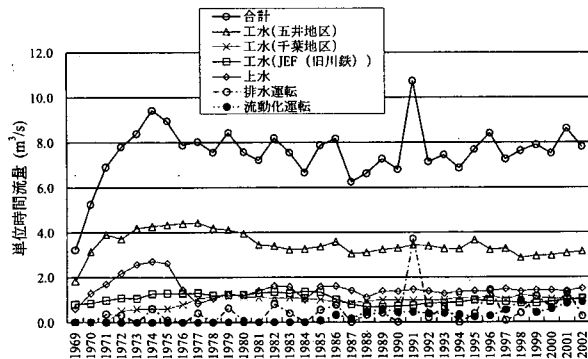


図-C.23 印旛沼からの取水量の経年変化

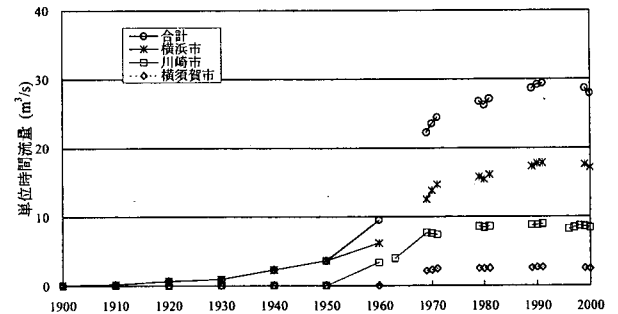


図-C.24 神奈川県流域外取水量の経年変化

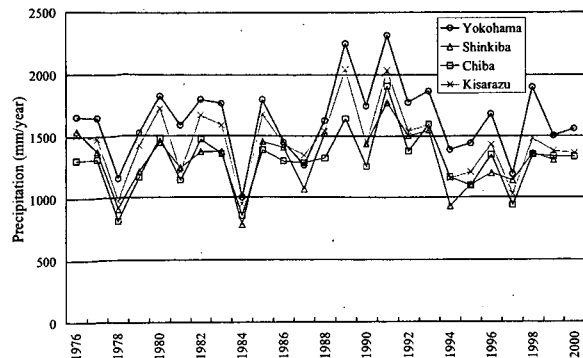


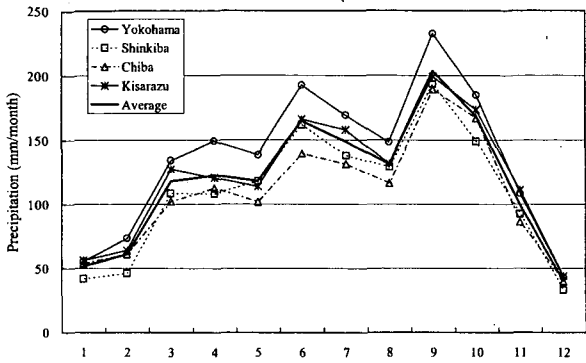
図-C.25 横浜、新木場、千葉、木更津の降水量の経年変化

上記のほかに多摩川から都内へ向かう水路である玉川上水分として東村山での処理水量として10m³/sを考慮した。すなわちW4からW5への移動を考慮した。

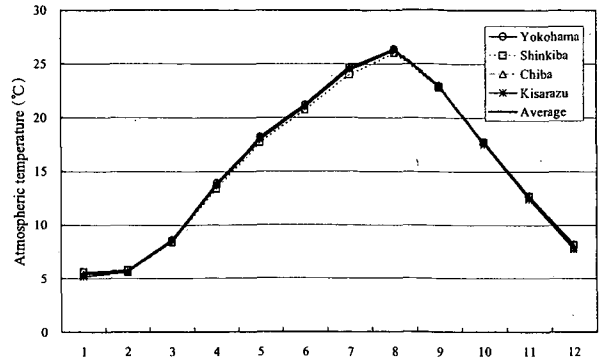
(3) 海域への直接降雨

海域への淡水供給量は降水量－蒸発量を調べ、これに表-C.4に示す海域面積をかけて算出した。

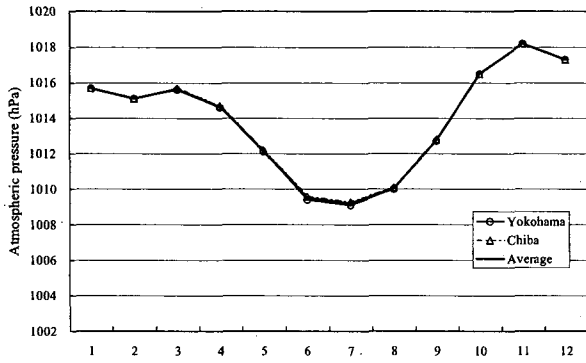
図-C.25に横浜、新木場、千葉、木更津の年降水量の1976年から2000年までの約20年間の経年変化(気象庁, 1977a-2001a)を示す。期間平均の年降水量は



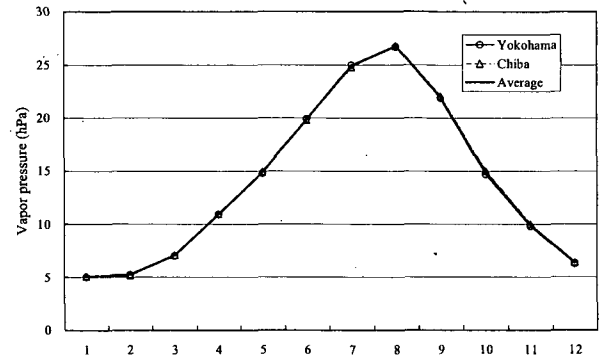
(a) 降水量



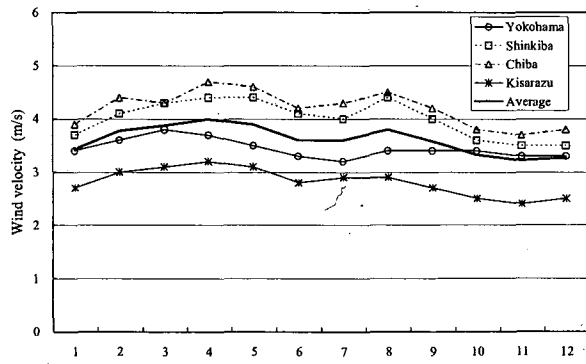
(b) 海面気圧



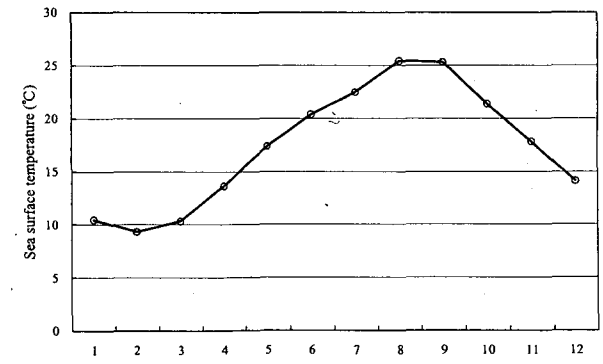
(c) 気温



(d) 蒸気圧



(e) 平均風速



(f) 海面水温

図-C.26 各要素の季節平均値

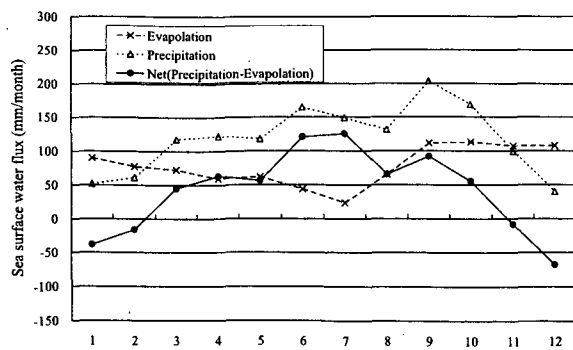


図-C.27 海面蒸発量の季節変化

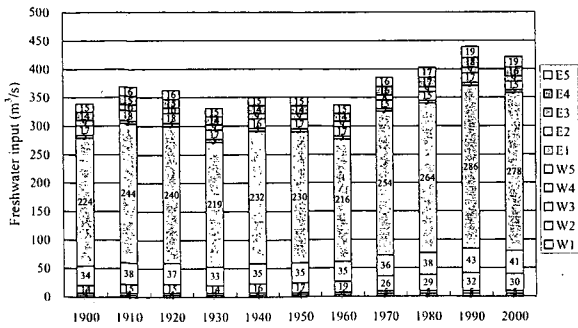


図-C.28 領域別淡水流入量の変遷

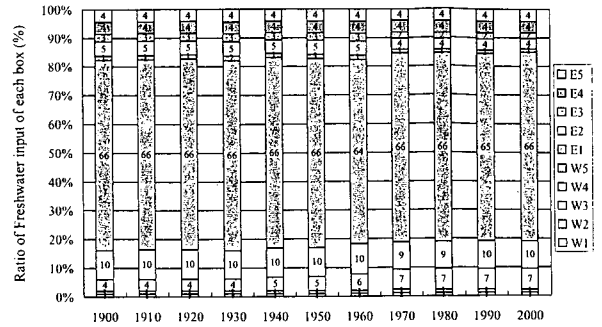


図-C.29 領域別淡水流入量の割合の変遷

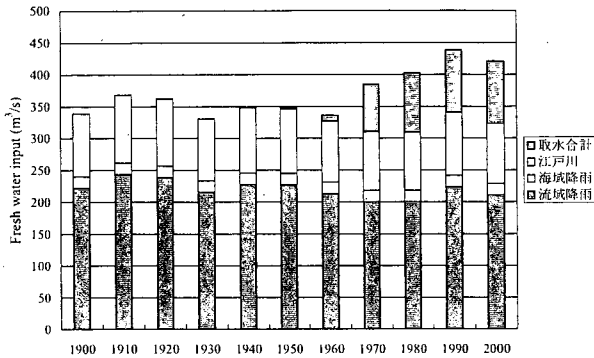


図-C.30 項目別淡水流入量の変遷

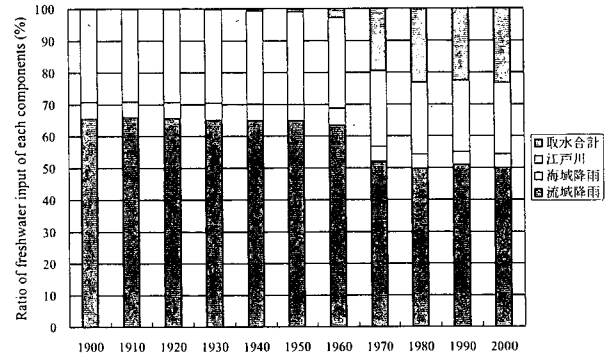


図-C.31 項目別淡水流入量の割合の変遷

1427mm/yであった。

図-C.26は同様に気象庁(1977b-2001b)による降水量,海面気圧,気温,蒸気圧,平均風速について,1976年1月-2000年12月で月平均値を求め,環境省による海面水温について,1979年4月-1999年3月までの月平均値を図示したものである。海面気圧,気温,蒸気圧については長期間では地点別にほぼ同一であった。降水量,風速は地点毎に異なっていた。降水量は横浜で多く,新木場と千葉で少ない傾向があった。風速は千葉,新木場で強く,木更津が弱い傾向にあった。海面水温は8月,9月に高く25℃を超えている。また,2月に最も低く10℃以下を示す。これらの要素から蒸発量の推算を行った。結果を図-C.27に示す。年蒸発量は934mm,年間の海面淡水収支は493mmと見積もられた。冬季の11月-2月は降水量よりも蒸発量の方が多く,海面の淡水収支は負の値を示した。

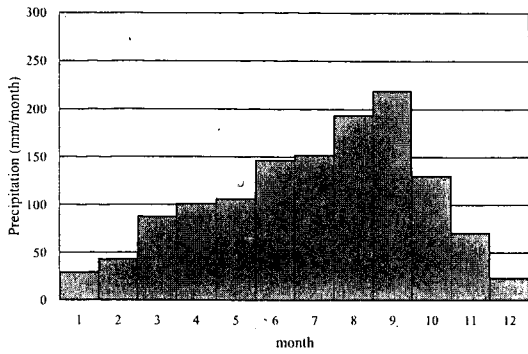
この気象要素を伴う海面淡水収支は全体の淡水流入量の寄与として小さいことや長期の気象・海象要素の入手が困難なため,得られた約20年平均の海面淡水収支を100年間の変遷では一定として扱うこととした。

(4) 淡水供給量

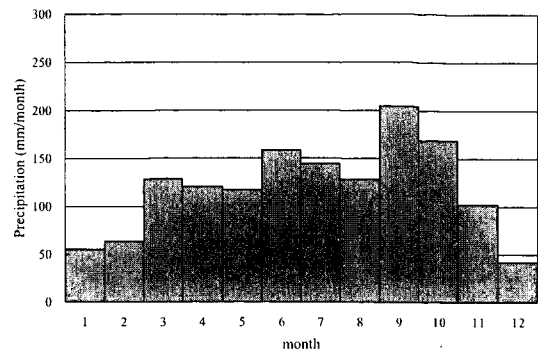
以上に述べた陸域への降雨による淡水供給,流域外から流入する淡水供給,海面への淡水供給を加えて東京湾に流入する淡水供給量を求めた。

得られた結果を前後10年間平均を行い,10年ごとの平均淡水供給量として整理した。各海域区分の淡水供給量の変遷を図-C.28に示す。同様に,淡水供給量全体に対する各海域区分への淡水供給量の割合を図-C.29に示す。1960年代から1970年代にかけてW5へ供給される淡水流入量が増加しており,全体の淡水供給量も増加している。これに加えW3, W4へ供給される淡水流入量も増加しているため,1960年から1990年にかけて約100m³/sの増加を示している。割合が大きく変化しているのはW3の地域であり,1930年頃までは4%にとどまっていたものが,1940年以降増加して1970年頃に7%にまで達している。最も淡水流入量の多いW5はほとんど変化なく常に約66%である。

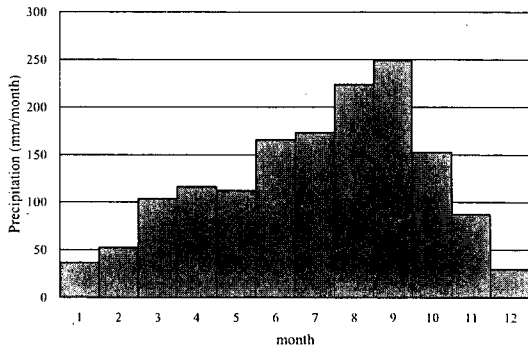
また,項目ごとの淡水供給量の変遷を図-C.30に示し,全体の淡水供給量に対する項目ごとの淡水供給量の割合の変遷を図-C.31に示す。1960年から1970年にかけて流域外からの取水による淡水供給量が約100m³/s増加した。このため,淡水供給量の項目別の割合は1960年



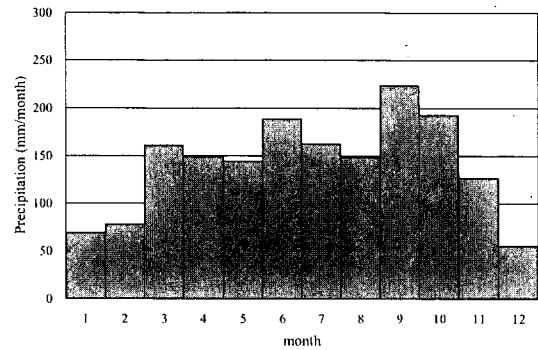
(a) W5



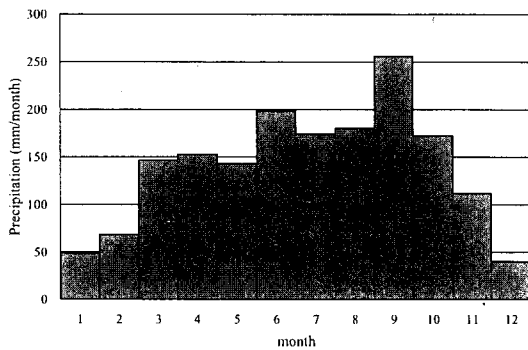
(b) E3,E4,E5



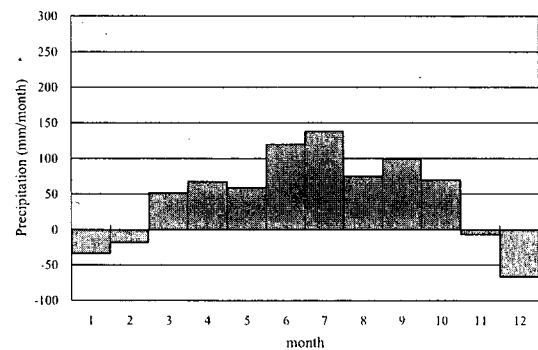
(c) W4



(d) E1,E2



(e) W1,W2,W3



(f) 海域

図-C.32 海域区分別の月降水量の季節変化

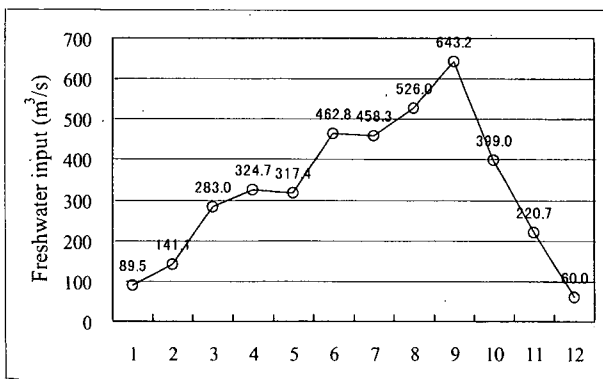


図-C.33 W1とE1を除く海域の1956年-1965年の平均淡水流入量の月平均値の季節変化

以降江戸川と取水を足した量が流域降雨による淡水供給に匹敵するくらいにまで増加している。

(5) 季節変化

降雨由来の淡水供給量、江戸川流量および海域への直接降雨に関しては季節変化を考慮した。1976年-2000年の各海域区分における月平均降水量の季節変化を図-C.32に示す。(a)-(e)の流域降水量は月降水量を、(f)の海域降水量は月降水量-月蒸発量を示す。この各海域の各月の降水量を月平均降水量で割り、月平均値に対する各月の降水量の比率を求める。この月平均降水量に対する各月の降水量の比率は経年的に変化しないと仮定を行い、それぞれの年で降雨由来の淡水流入量と江戸川流量および海域への直接降雨に関する淡水流入量に各月の比率を直接かけることで季節変化を表現した。流域外からの取水(利根大堰、印旛沼、川崎市・横浜市・横須賀市への取水)については季節変化をしないと仮定して、上記の各月の淡水流入量に加算した。

このようにして求めた各月の淡水流入量のうち、W1とE1を除く海域の1956年-1965の平均淡水流入量の月平均値の季節変化を図-C.33に示す。

参考文献(再掲)

- 海上保安庁(2000):海図,世界測地系 W90号。
- 川崎市水道局(1963):昭和38年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報。
- 川崎市水道局(1973):昭和48年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報。
- 川崎市水道局(1989):昭和53年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報。
- 川崎市水道局(2001):平成12年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報。
- 川崎市水道局(2003):川崎市水道八十年史。
- 環境省水質保全局(1999):公共用水域水質データ(1999年度版)。
- 気象庁(1977a-2001a):アメダスCD-ROM。
- 気象庁(1977b-2001b):気象年報CD-ROM。
- 気象庁(1983):日本気象総覧 上巻,東洋経済新報社。
- 経済産業省経済産業政策局(2001):平成11年 工業統計表 用地・用水編。
- 経済産業省経済産業政策局(2002):平成12年 工業統計表 用地・用水編。
- 国立天文台(1998):理科年表平成11年,丸善。
- 厚生省環境衛生局(1970):昭和44年度 水道統計, Vol.52。
- 厚生省環境衛生局(1971):昭和45年度 水道統計, Vol.53。
- 厚生省環境衛生局(1972):昭和46年度 水道統計, Vol.54。
- 厚生省環境衛生局(1980):昭和54年度 水道統計, Vol.62。
- 厚生省環境衛生局(1981):昭和55年度 水道統計, Vol.63。
- 厚生省環境衛生局(1982):昭和56年度 水道統計, Vol.64。
- 厚生省生活衛生局(1990):平成元年度 水道統計 施設・業務編, Vol.72-1。
- 厚生省生活衛生局(1991):平成2年度 水道統計 施設・業務編, Vol.73-1。
- 厚生省生活衛生局(1992):平成3年度 水道統計 施設・業務編, Vol.74-1。
- 厚生労働省健康局(2000):平成11年度 水道統計 施設・業務編, Vol.82-1。
- 厚生労働省健康局(2001):平成12年度 水道統計 施設・業務編, Vol.83-1。
- 国土地理院(2004):全国都道府県市区町村別面積調(平成15年4月1日),WWW公開データ, <http://www.gsi.go.jp/>。
- 水資源開発公団(2001):平成13年 水資源開発施設管理年報。
- 水資源開発公団千葉洋水総合事業所(2003):印旛沼開発施設の管理,平成15年4月。
- 中央气象台(1985):雨量報告,第一書房。
- 横浜地方气象台(1996):神奈川の気象百年。
- 横須賀市水道局(1974):昭和48年度 水道事業 統計年報。
- 横浜市水道局(1954):昭和28年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報。
- 横浜市水道局(1971):昭和45年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報。
- 横浜市水道局(1979):昭和53年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報。
- 横浜市水道局(1987):横浜水道百年の歩み,昭和62年10月。
- 横浜市水道局(2000):平成11年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報。
- 横浜市水道局(2001):平成12年度 水道事業・工業用水道事業 統計年報。

付録D 2層化モデルによる計算

D.1 2層化モデルの計算

ここでは、宇野木(1998)にまとめられている2層化モデルの計算手法とその手法による過去と2002年の輸送係数、鉛直循環流量に対する河川流量の比、淡水の平均滞留時間について示す。

(1) 計算手法

2層化モデルのボックス分割を図-D.1に示す。湾内と湾外に分割し、湾内と湾外をそれぞれ2層に分割し成層した状態を考える。湾内では上層と下層で海水の交換が行われており、移流と拡散を含めた量として輸送係数 Q_{UL} と Q_{LU} を考える。湾口部においては上層で流出(Q_{oi})、下層で流入(Q_{oi})という移流のみを考える。これは湾口部の拡散は移流に対して1桁小さいこと(宇野木,1998)および湾口部の拡散も考えると方程式に対して未知数の数が多くなり、未知数を直接求めることができなくなるからである。

以上の場で定常状態を仮定した質量の保存式と塩分の保存式を考えると

[内湾上層]

$$R + Q_{LU} = Q_{io} + Q_{UL} \quad (D1)$$

$$S_{iL} \cdot Q_{LU} = S_{iU} \cdot (Q_{UL} + Q_{oi}) \quad (D2)$$

[内湾下層]

$$Q_{oi} + Q_{UL} = Q_{LU} \quad (D3)$$

$$S_{iU} \cdot Q_{UL} + S_{oL} \cdot Q_{oi} = S_{iL} \cdot Q_{LU} \quad (D4)$$

が得られる。ここで、 R : 淡水流入量(m^3/s)、 Q_{LU} : 湾内下層から湾内上層への輸送係数(m^3/s)、 Q_{UL} : 湾内上層から湾内下層への輸送係数(m^3/s)、 Q_{io} : 湾内上層から湾外上層への輸送係数(m^3/s)、 Q_{oi} : 湾外下層から湾内下層への輸送係数(m^3/s)、 S_{iU} : 湾内上層塩分、 S_{iL} : 湾内下層塩分、 S_{oU} : 湾外上層塩分、 S_{oL} : 湾外下層塩分をそれぞれ示す。

ここで、式(D1),(D2),(D3),(D4)を変形すると各輸送係数は

$$Q_{oi} = \frac{R \cdot S_{iU}}{S_{oL} - S_{iU}} \quad (D5)$$

$$Q_{io} = \frac{R \cdot S_{oL}}{S_{oL} - S_{iU}} \quad (D6)$$

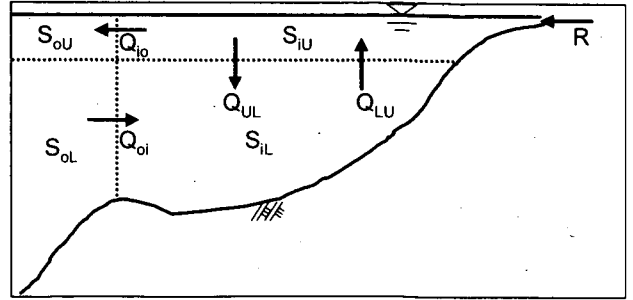


図-D.1 2層化モデルの模式図

表-D.1 1961-1970年(宇野木,1998)と2002年の観測塩分の整理条件の比較

	1961-1970年 宇野木(1998)	2002年
塩分の観測期間	1961年から1970年の 平均値	2002年7月から2003年6月
塩分の観測密度	上記期間の千葉県・ 神奈川県水産試験場の 観測資料	27地点(鉛直方向に 1m間隔)×22回
塩分の時間整理方法	月毎に整理して 月平均値を算出	観測日毎に整理し、 それから月平均値 を算出

$$Q_{LU} = \frac{R \cdot S_{iU}}{S_{iL} - S_{iU}} \quad (D7)$$

$$Q_{UL} = Q_{LU} - Q_{oi} \quad (D8)$$

のように表すことができ、淡水流入量と各ボックスの塩分が設定できれば輸送係数を求めることができる。

また、鉛直循環流量(湾外下層から湾内下層への輸送係数)と淡水流入量の比(λ)は

$$\lambda = \frac{Q_{oi}}{R} = \frac{S_{iU}}{S_{oL} - S_{iU}} \quad (D9)$$

で表される。

淡水の平均滞留時間(τ_f)は内湾塩分を S_i 、外洋塩分を S_o 、内湾体積を V_i とすると、

$$\tau_f = \frac{Q_f}{R} = \frac{S_o - S_i}{S_o} \cdot \frac{V_i}{R} \quad (D10)$$

と表される。

(2) 過去と2002年の計算結果の比較

夏季と冬季について過去と2002年それぞれの計算を行い、輸送係数、鉛直循環流量と淡水流入量の比、淡水の平均滞留時間を比較した。宇野木(1998)にならない夏季は

表-D.2 1961-1970年(宇野木,1998)と2002年の観測塩分の比較

	季節	1961-1970年 (宇野木,1998)	2002年
S _{IU}	冬季	32.03	31.84
	夏季	28.63	29.00
S _{IL}	冬季	32.81	32.60
	夏季	32.73	32.44
S _{OU}	冬季	34.39	34.08
	夏季	32.70	31.48
S _{OL}	冬季	34.45	34.42
	夏季	33.78	34.06

表-D.3 過去と2002年の2層化モデルによる検討結果の比較

	単位	季節	1961-1970年	2002年
R	m ³ /s	冬季	161	317
		夏季	531	642
Q _{io}	m ³ /s	冬季	2,292	4,189
		夏季	3,483	4,540
Q _{oi}	m ³ /s	冬季	2,131	3,871
		夏季	2,952	3,898
Q _{LU}	m ³ /s	冬季	6,611	13,955
		夏季	3,708	5,776
Q _{UL}	m ³ /s	冬季	4,480	10,084
		夏季	756	1,879
λ	-	冬季	13.2	12.3
		夏季	5.6	6.0
τ _f	month	冬季	2.1	1.2
		夏季	0.8	0.7

7,8,9月を、冬季は1,2,3月とすることとし、7月の値が欠けている2002年については8月と9月の値を夏季とした。

湾内と湾外の境界は本編と同様に富津と観音崎を結んだラインにとり、東京湾内湾と東京湾外湾に分割した。また、上層と下層の境界面は躍層が現れやすい水深として水深5mにとった。

過去の塩分には宇野木(1998)に示される1961年-1970年の塩分の期間平均値を用いた(表-D.1参照)。この1961年-1970年の夏季と冬季の各ボックスの塩分と2002年の夏季と冬季の各ボックスの塩分を表-D.2に示す。

過去の淡水流入量には付録Bで示した1956年-1965年の期間平均した各月の淡水流入量を用い、2002年の淡水流入量には本編で示した2002年の各月の淡水流入量を用いた。

淡水流入量と式(D5),(D6),(D7),(D8)より得られる輸送係数、式(D9)より得られる鉛直循環流量と淡水流入量の比、式(D10)より得られる淡水の平均滞留時間を表-D.3にまとめる。淡水の平均滞留時間を求める際に内湾体積は $1.56 \times 10^{10} \text{m}^3$ とし、外洋塩分は宇野木(1998)にならいう外湾下層塩分を使用した。

参考文献

宇野木早苗(1998): 内湾の鉛直循環流量と河川流量の関係, 海の研究, Vol.7, No.5, pp.283-292.