

東京湾における諸空港構想に伴う物理環境変化の予測

佐々木 淳*・萩原 崇之**・磯部 雅彦***

東京湾においては羽田空港の再拡張が予定され、将来的には首都圏第3空港等の建設も構想されていることを踏まえ、これら諸空港構想について埋立式で建設した場合の物理環境影響を検討した。まず、周年にわたる流動場を精密に再現し、同時に有機物に見立てた浮子を上層に連続的かつ一様に投入し、時々刻々周年の間にどのように堆積あるいは湾外へ流出していくかといった積分量に着目することで、物理環境の指標化を行った。これを用いて空港周辺における局所的な流動場の変化による堆積域の局所化や、空港の位置によっては湾内の流系を阻害したり、新たな渦領域を生じさせることで湾奥域や空港周辺の閉鎖性を高めてしまう可能性のあることを示した。

1. はじめに

東京国際空港（羽田空港）は2000年に5200万人であった年間利用者数が2010年には7000万人、2020年には8000万人に到達するとみられ、航空需要に対する供給不足が深刻化している。国土交通省は1991年から調査を行い、差し迫った首都圏空港の容量不足を解消するためのプロジェクトとして羽田再拡張案で対応することを既に決定しているが、2015年ごろにはなお容量の頭打ちが想定されるため首都圏第3空港構想が検討されている。首都圏第3空港調査検討会の候補地募集に対しては各団体から16提案が寄せられた。提案の中で西多摩地区と栃木市北西部が陸上案であるが、騒音の環境基準を超える世帯数が多いため実現は非常に困難である。そこで同会は海上案の候補地を区域ごとにまとめ、羽田再拡張を含めた9提案（図-1および表-1に対して利用・運用・建設・環境などの項目について比較検討を行っている。

ところで、近年、干潟・浅瀬の環境機能が重要視され、それらの埋立は回避される傾向にあるが、水深10mを越える内湾の沖合に関しては環境影響の定量化が困難なこともあって十分な検討がなされていない。一方、内湾流動場の数値予測はnowcastingという概念が取り入れられたことにより、時々刻々の現象を精密に再現することがある程度可能な段階に入り、環境影響評価が盛んになされるようになってきた(田中ら, 1999)。しかし、物理環境の本質的な部分をわかりやすく表現する方法が確立されていないため、予測結果を国民の前に示し議論を喚起するまでは至っていない。そこで本研究ではまず、内湾物理環境の本質を表現可能な一般性のある指標化を試み、これを用いて首都圏第3空港等を埋立形式で建設した場合の物理環境の予測を行うことを目的とする。

2. 物理環境予測モデル

内湾の流動場は潮汐流、吹送流および密度流によって決定づけられるが、吹送流や密度流は季節的な風系や成層による影響が大きく、また強風や河川出水等の短時間変動による影響も無視できない。物理環境の現実的な予測のためにはこれらの非定常性を十分に考慮した予測が必要であり、混合期の真冬を初期条件として周年にわたる時々刻々の現象をできるだけ忠実に再現する。

一方、流動場の表現には流速のベクトル表示が一般に行われるが、その解釈は必ずしも容易ではない。空港建設による懸念の多くは滞留域の発生や局所的な海水交換率の低減による有機物堆積量の増大、およびそれに起因する貧酸素化の促進であると考えられ、この点をわかりやすく表現できることが望ましい。有機物は陸域負荷や藻類の光合成による内部生産によって主に上層に供給されること、およびその沈降速度は大きく変動するものの、およそ1m/dayのオーダーである。このことを踏まえ、湾内全域の表層に定常的にこのような有機物に見立てた浮子を投入し、その堆積過程や湾外への流出過程を追跡することによって物理環境の評価を試みる。浮子の

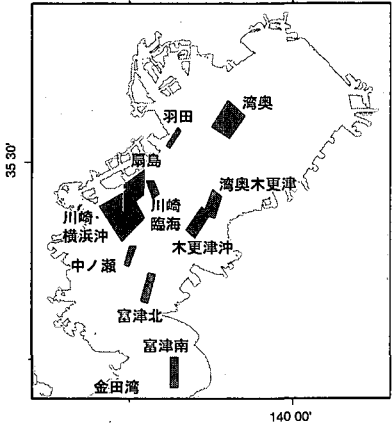


図-1 東京湾における諸空港構想

* 正 会 員 博(工) 横浜国立大学助教授 大学院工学研究院システムの創生部門
** 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
*** フェロー 工 博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境工学専攻

表-1 空港建設候補地調査の概要

候補地域	候補地名称	団体名	滑走路	水深	形式
羽田	羽田再拡張 (2)		2500 m×1	18 m	埋立・棧橋・浮体
東京湾奥	東京湾奥 (3)	首都圏湾奥空港研究会	3500 m×4	16 m	埋立
川崎沖	扇島地区 (4)	東京湾水系空間研究会	4000 m×2, 3500 m×2	29 m	埋立
	川崎・横浜沖 (5)	ワイ・ワットグループ	5500 m×3		
	川崎臨港	川崎商工会議所	3000 m×1		
木更津沖	木更津沖 (6)	空港都市研究会	3500 m×2	24 m	埋立
	湾奥木更津沖案	マリフフロント推進機構	3500 m×2	24 m	埋立
中ノ瀬	中ノ瀬 (7)	横浜商工会議所	3000 m×1	18 m	埋立
富津北	富津北 (8)	千葉県富津市	3500 m×1	12 m	埋立
富津南	富津南 (9)	千葉県富津市	3500 m×1	13 m	埋立
金田湾	横須賀金田湾	三浦半島地域空港研究会	3500 m×1	50 m	浮体+防波堤
		横須賀金田湾海上空港研究会	3500 m×1	50 m	浮体+防波堤
九十九里沖	千葉県九十九里沖	九十九里沖空港誘致懇話会	5000 m×3	17 m	埋立

追跡計算は格子を用いた濃度計算と比較すると、多数の浮子を用いる必要性から計算時間が著しく増大するといった欠点があるが、数値拡散が生じないため空港建設に伴うその周辺での局所的な滞留域の予測が可能となる等、本研究の趣旨に合致した手法と考えられる。

(1) 流動モデル

基礎方程式は静水圧近似と Boussinesq 近似を仮定した、 σ 座標系における運動量式と連続式、および水温、塩分の拡散方程式、密度の状態方程式から構成される。数値解法には鉛直粘性・拡散項、鉛直移流項、および水位を陰にとる半陰解法に基づく差分法を採用した (佐々木ら, 1996)。

初期条件は湾内の水温・塩分場の空間分布の一様性が高い1月初めとし、境界条件としては気象庁 SDP データ (東京, 千葉) による風速等の毎時の気象データ、および気象庁潮位表から求めた湾口における予測潮位を与えた。河川流量に関しては国土交通省 (旧建設省) による多摩川および江戸川の毎日の流量推定値を用いた。これらを用いて周年にわたる時間積分を実施し、時々刻々の物理環境の再現を行った (佐々木, 1998)。

(2) 浮子追跡モデル

空港建設による物理環境予測には既述のようにオイラー・ラグランジュ法 (たとえば, 柳, 2001) に基づく浮子追跡モデルが有効である。積分時間間隔を Δt 、タイムステップ n におけるある浮子の位置を (x^n, y^n, σ^n) 、その位置における流速成分をそれぞれ $u(x^n, y^n, \sigma^n)$, $v(x^n, y^n, \sigma^n)$, $\dot{\sigma}(x^n, y^n, \sigma^n)$ 、水平渦動拡散係数を K_h , α_x および α_y をそれぞれ -1 から 1 の値をとる乱数とすると、次のタイムステップにおける浮子の位置 $(x^{n+1}, y^{n+1}, \sigma^{n+1})$ は Δt のオーダーまでをとると次式のようになる。

$$x^{n+1} = x^n + u(x^n, y^n, \sigma^n)\Delta t + \alpha_x \sqrt{2K_h \Delta t}$$

$$y^{n+1} = y^n + v(x^n, y^n, \sigma^n)\Delta t + \alpha_y \sqrt{2K_h \Delta t}$$

$$\sigma^{n+1} = \sigma^n + \dot{\sigma}(x^n, y^n, \sigma^n)\Delta t$$

ただし $u(x^n, y^n, \sigma^n)$, $v(x^n, y^n, \sigma^n)$, $\dot{\sigma}(x^n, y^n, \sigma^n)$ はそれぞれ流動場の計算で得られる格子点上の流速場から各時間

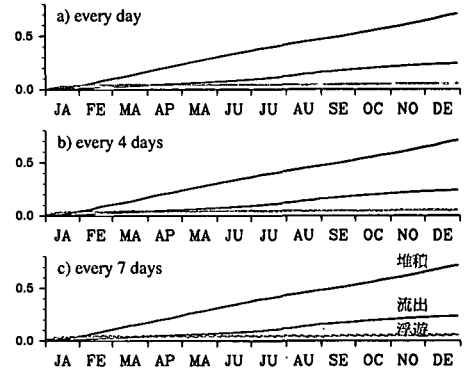


図-2 浮子の投入時間間隔と流出, 堆積, 浮遊浮子数の時系列変化

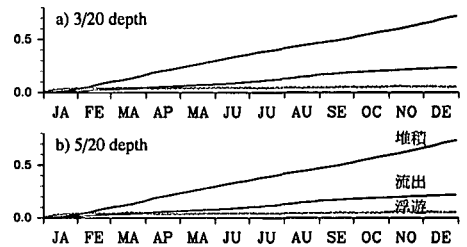


図-3 浮子の投入深度と流出, 堆積, 浮遊浮子数の時系列変化

ステップごとに内挿して求める。さらに浮子が沈降速度を持ちそれがデカルト座標系で w_s と表される場合は上で求めた σ^{n+1} をデカルト座標系の z^{n+1} に変換して $w_s \Delta t$ を引き、その結果を再度 σ 座標系に変換することで簡単に考慮することができる。同様に鉛直拡散による効果 $\alpha_z \sqrt{2K_v \Delta t}$ を考慮する。ここに、 α_z は α_x , α_y と同様の乱数、 K_v は鉛直渦動拡散係数である。

(3) 浮子追跡モデルの適用方法

浮子追跡モデルでは浮子投入の方法が問題となる。特に浮子の個数が増えると計算時間もそれに比例してかかるようになり、通常のオイラー的な流れ場の計算に比べて計算負荷が著しく増大してくるため、可能な限り浮子

表-2 計算条件

水平格子	500 m
鉛直層数	20
積分時間間隔	150 s
計算期間	1996年1月1日～12月31日
気象条件	気象庁SDPデータ東京・千葉(毎時)
潮位条件	気象庁予報潮位
浮子投入方法	4日間隔, 水平一様, 最上層に投入

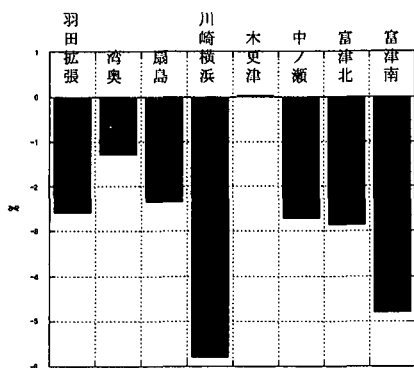


図-4 現状地形を基準とした浮子の湾外への相対流出率

数を抑える工夫が必要となる。そこで本研究では周年にわたる長期の浮子追跡計算を行うこと、および浮子の堆積率や浮子の湾外への流出率といったマクロな指標に着目することから、これらの指標の再現性を見ながら投入方法を決定することとした。

まず、浮子是有機物に見立てていることから上層に投入するのが自然である。また、内湾全体の場合を見るために水平方向には一様に浮子を投入することとする。図-2は浮子を最上層(水面から1/20水深の深度)に投入した時の投入時間間隔が浮子の堆積数、流出数、および浮遊数の時間変化に与える影響を見たものである。投入時間間隔を1日、4日、および7日としたときのそれぞれの時系列変化にはほとんど差が見られないことがわかる。ただし投入間隔を大きくするほど時系列変化に投入周期に相当する振動が目立ってくることから、ここでは4日おきの投入を採用する。一方、投入間隔を4日のままとし、投入深度を水面から3/20水深、5/20水深としたときの同様の時系列変化を図-3に示す。このように投入深度を上層内で多少変化させても結果にはほとんど差が見られない。

3. 物理環境変化の予測

以上の流動および浮子追跡モデルを現状地形および諸空港構想下における各種地形に適用し、物理環境変化の予測を行う。諸空港構想には様々なものがあり位置や形状も確定したものではないため、ここでは仮の位置、形状を仮定し、羽田再拡張、湾奥、扇島、川崎横浜、木更

津、中ノ瀬、富津北、および富津南の8ケースを採用した。ただし、湾奥から富津南までの7ケースについては羽田再拡張も含めてある。計算条件を表-2に示す。

(1) 湾外への流出率の変化

図-4に現状地形における年間の湾外への浮子流出率に対する各空港構想下での流出率の相対値(%)を示す。木更津沖を除くすべてのケースで数%の湾外流出率の低下が見られる。これは有機物が潜在的に湾内にとどまりやすくなることを意味している。特にここで想定した羽田再拡張はその規模の割に影響が大きいことがわかる。これは河口付近に位置していて河川密度流に大きな影響を与えること、および湾奥の循環流をやや遮る位置にあることが原因と考えられ、その設置位置および建設形式には十分な配慮が必要といえる。一方、羽田再拡張のみに比べて湾奥、扇島、木更津のケースではむしろ影響が小さいことがわかる。このように地形が流動場および潜在的な有機物の堆積過程に与える影響はかなり微妙な問題であり、さらなる検討が必要である。

(2) 空間分布特性の変化

そこで、空間的な堆積過程の変化を見るためにまず、各水平格子点ごとに次のような堆積指数 S_d を定義する。

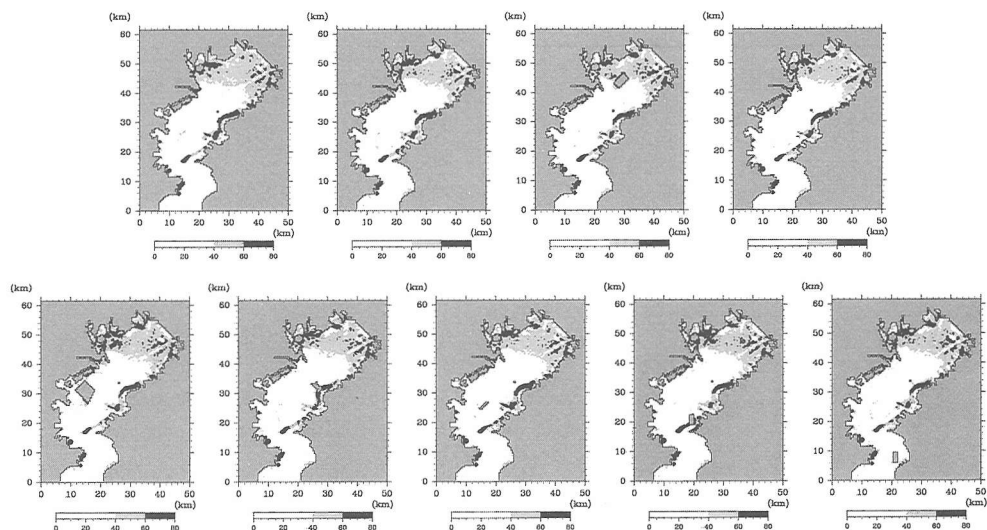
$$S_d = (\text{浮子堆積数}) / (\text{浮子総投入数}) \times 100 \quad \cdots (1)$$

これは各水平格子点ごとに、その格子点に堆積した浮子の個数をその格子点に投入したすべての浮子の個数で基準化し百分率で表したもので、浮子の投入時間間隔等によらず一般性があると同時に、その値は潜在的な有機物の堆積しやすさを表しているものと考えられ、異なる海域間での比較にも直接用いることができるものと期待される。さらに次式のように現状および諸空港構想下での堆積指数の差 (δS_d) を取ることで、空間的な堆積過程の変化をより明確化することができる。

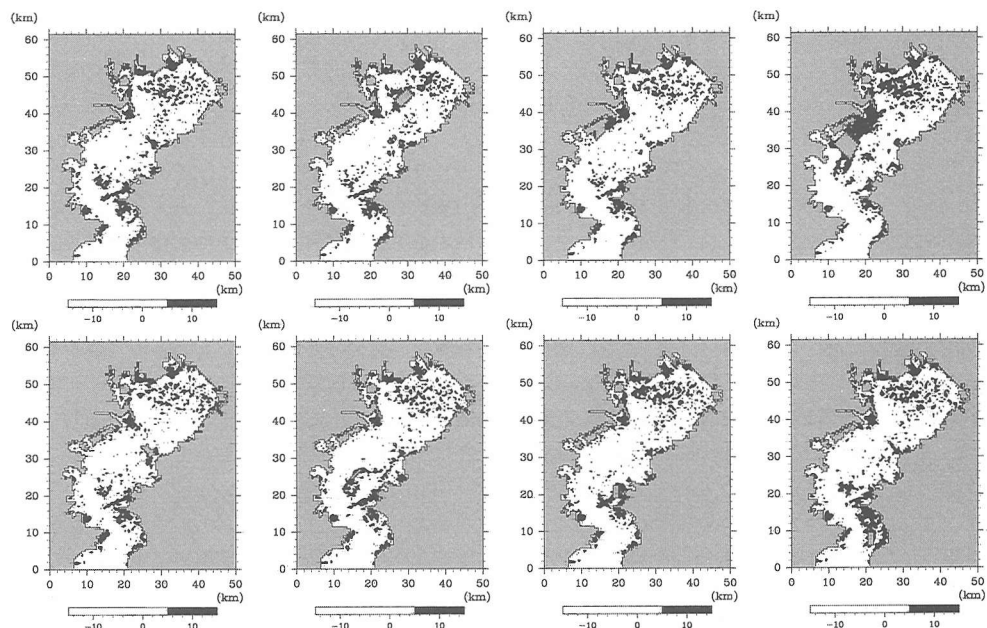
$$\delta S_d = S_{d \text{ 諸空港構想}} - S_{d \text{ 現状}} \quad \cdots (2)$$

このようにして求めた S_d および δS_d を図-5、図-6に示し、さらに現状地形、羽田再拡張、および川崎横浜沖については上層および下層における周年平均した残差流ベクトルを図-7に示す。

まず羽田再拡張について見ると図-6からわかる通り、羽田拡張域の南側および北側で堆積が多くなっている一方、東側および多摩川河口域における堆積の減少が見られる。これらは局所的な滞留域の発生による堆積位置の移動と集中化によること、および本研究で採用した拡張地形が内湾に見られる時計回りの循環流(例えば、小倉, 1993)を遮るように働くためと考えられる。これは図-7に明瞭に見られ、羽田再拡張域の南西側に空港に向かう収束域が生じ、一方、北東側には時計回りの環流が形成され、これが湾奥と湾央との海水交換を妨げるように働いている。その結果、図-6に示されるように、



図—5 堆積指数 S_d の予測 (上段左から現状, 羽田再拡張, 湾奥, 扇島, 下段左から川崎横浜, 木更津, 中ノ瀬, 富津北, 富津南)



図—6 堆積指数 δS_d の予測 (上段左から羽田再拡張, 湾奥, 扇島, 川崎横浜, 下段左から木更津, 中ノ瀬, 富津北, 富津南)

湾奥中央における堆積域がやや集中化する傾向が見られる。このように湾奥部と湾奥部とをつなぐ流路を部分的にでも遮るような埋立式の拡張は、局所的な影響のみならず、湾奥における堆積の増大を招き、湾奥における貧酸素化を助長することが懸念される。

一方、この羽田再拡張に加えた諸空港構想における予測結果を見ると、いずれの場合にも空港周辺における堆積域の局所集中化が見てとれる。特に川崎横浜の場合は川崎横浜および羽田再拡張とが共に収束域となって浮子

が堆積すること、および川崎横浜の規模が大きくかつ湾軸に沿った強流域を遮る位置にあるため、その南東側において強い渦領域が発生し、これによってトラップされた浮子が川崎横浜と羽田再拡張間の滞留域に堆積することから、影響が極めて大きいことがわかる。また、湾口に近い中ノ瀬、富津等では湾奥への影響は羽田再拡張分による影響に比べて小さいが、湾口付近での堆積を増大させ、結果として浮子の湾内から湾外への流出率がかなり下がるといった結果が得られた。

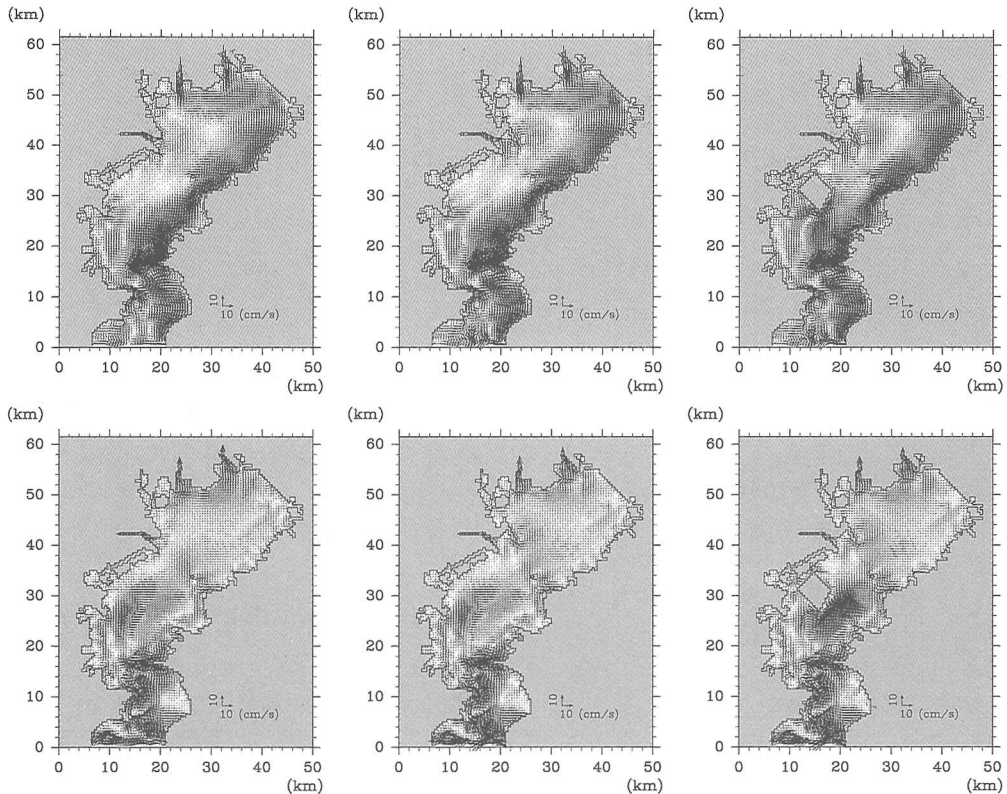


図-7 左から現状、羽田再拡張、川崎横浜の周年平均した残差流ベクトル（上：上層 1/5 水深，下：下層 4/5 水深）

4. ま と め

本研究では内湾における埋立式の空港建設が内湾の物理環境に与える影響を検討した。まず、上層に連続的に投入された有機物に見立てた浮子が時々刻々1年間間にどのように堆積あるいは湾外へ流出していくかという積分量を見ることで、物理環境のわかりやすい指標化を行った。また浮子を用いたことで内湾に比べて空間スケールの小さい空港建設による局所的な物理環境の変化を表現した。その結果、周年平均した残差流の強い領域を遮蔽する形での空港建設はきわめて影響が大きいこと、および空港周辺での局所的な堆積の増加がどのケースでも認められた。特に本研究で仮定した羽田再拡張案は湾奥と湾中央の境に位置し、残差流を遮る形状となっていることから、その規模の割に湾奥への影響が大きくなった。

しかし、浮子の投入数の不足によるばらつきや浅海域における再浮上を考慮していない点等改善の余地が多々あり、さらに季節的な変動や、時空間的に一様としている浮子の投入方法を有機物生産速度と関連づける等、よ

り実的な予測を行っていく必要がある。

謝辞：国土交通省（旧建設省）江戸川工事事務所には河川流量データを提供していただいた。本研究は日本学術振興会科学研究費若手研究 B（佐々木 淳）の補助によるものである。

参 考 文 献

- 小倉紀雄編（1993）：東京湾—100年の環境変遷—，恒星社厚生閣，193 p.
- 気象庁（1996）：SDP・地上気象観測データ（千葉管区気象台，東京管区気象台）。
- 気象庁（1996）：潮位表。
- 佐々木淳（1998）：3次元密度流としての内湾の流れのモデリング，1998年度（第34回）水工学に関する夏期研修会講義集，B-3，20 p.
- 佐々木淳・磯部雅彦・渡辺 晃・五明美智男（1996）：東京湾における青潮の発生規模に関する考察，海岸工学論文集，Vol. 43，pp. 1111-1115.
- 田中昌宏・J. van Kester・池谷 毅・滝本邦彦（1999）：大規模海洋構造物の環境影響評価モデルの開発，海洋開発論文集，Vol. 15，pp. 113-118.
- 千葉県水産試験場（2000，2001）：東京湾海況速報。
- 柳 哲雄（2001）：沿岸海洋学，第二版，恒星社厚生閣，153 p.