

伊勢湾における気温・風速の長期変動傾向とそれに伴う流動・水質の変化

Impacts of Air Temperature and Wind Pattern Changes on Hydrodynamic Flow and Water Quality in Ise Bay

東 博紀¹・越川 海²・木幡 邦男³・村上 正吾⁴・水落 元之⁵

Hironori HIGASHI, Hiroshi KOSHIKAWA, Kunio KOHATA,
Shogo MURAKAMI and Motoyuki MIZUOCHI

We describe impacts of air-temperature and wind-pattern changes from 1981 to 2004 on hydrodynamic flow and water quality in Ise Bay. Trend analyses for the air temperature and the strong wind were carried out. The results indicated that the annual average of the air temperature was a significant warming trend, and that the frequency of strong-wind events from February to March decreased remarkably. The influences of these meteorological changes on the hydrodynamic flow in Ise Bay were evaluated using numerical simulations. It was clarified that the changes in the air temperature and the wind pattern have an impact upon the circulation flow in the middle and the bottom layers, and that the region of the increase in the flow velocity in February agreed with that of the decrease in COD in the bottom layer and vice versa.

1. はじめに

中長期的に閉鎖性海域における健全な水環境・生態系を保全・形成するためには、過去に生じた水・生態系環境の変遷の原因を明らかにするとともに、流域の都市化や気候変動など将来起こりうる外的変化が水質・生態系に及ぼす影響を的確に予測し、有効な環境改善施策・事業を実施する必要がある。

伊勢湾は東京湾、大阪湾と並ぶ我が国の代表的な閉鎖性海域であり、高度経済成長期に臨海部開発や流域都市化によって著しく環境が悪化した。その後、水質汚濁防止法等に基づく水質規制や下水道整備等の環境保全施設の整備などによって一定の改善効果は見られたものの、依然として現在でも毎年のように赤潮・貧酸素水塊が発生している(国土交通省中部地方整備局, 2008)。また、近年では生態系の劣化が深刻な問題となっており、三重県沿岸域におけるアサリ漁獲量の減少、ハマグリとの激減など水産業への被害が多数報告されている(樋渡ら, 2007)。こうした状況のもと、現在では干潟・浅場の造成や浮遊・漂着ゴミの回収など伊勢湾の良好な水質・生態系環境を再生することを目的とした取り組みが伊勢湾再生推進会議を中心に進められている。

伊勢湾における流動構造の把握や水質・生態系環境劣化の原因究明に関する研究は、川崎ら(2006)がまとめているように、これまでも多数行われている。また近年では、地球温暖化やエルニーニョ現象など広域スケールの気候変動が地域の環境に及ぼす影響についての研究が活発に進められ、伊勢湾についても黒潮の蛇行や外洋COD上昇などの外的要因の変化と湾内流動・水質・生態系の関連が検討されている(久野ら, 2003; 環境省, 2005)。しかし、1980年代以降に水質・生態系環境が一向に改善されない理由についてはいまだ究明されていない。

本研究では、1981~2004年における伊勢湾およびその周辺地域の気温・風速の長期変動傾向を調べるとともに、それが内湾の流動場に及ぼす影響を数値シミュレーションで明らかにする。流動特性の経年変化と水質の長期変動傾向の関連性を議論する。

2. 伊勢湾における気温・風速の長期変動傾向

(1) 気温の経年変化

湾内の流動、とくに鉛直混合を支配する気象要素である気温と風速について、1981~2004年における名古屋、伊良湖、津、四日市の地上観測時日別データ(気象庁提供)を用いて長期変動傾向を調べた。図-1に伊勢湾と各観測地点の位置関係を示す。

気温については各観測地点の日平均気温データを用いて月平均、年平均気温を算出し、それぞれ24年間の平均値との偏差を統計資料とした。図-2に4地点で平均した年平均気温偏差の経年変化及びその5ヵ年移動平均を示す。1980年代後半から90年代前半にかけて気温が急激に上昇し、それ以降はほぼ横ばいの状態になっていること、

| | | |
|-------|------|-------------------------------------------|
| 1 正会員 | 博(工) | (独法)国立環境研究所 アジア自然共生研究グループ アジア水環境研究室 研究員 |
| 2 | 博(工) | (独法)国立環境研究所 アジア自然共生研究グループ アジア水環境研究室 主任研究員 |
| 3 正会員 | 理博 | (独法)国立環境研究所 水土壤環境研究領域長 |
| 4 正会員 | 工博 | (独法)国立環境研究所 アジア自然共生研究グループ 副グループ長 |
| 5 | 博(農) | (独法)国立環境研究所 アジア自然共生研究グループ アジア水環境研究室 主任研究員 |

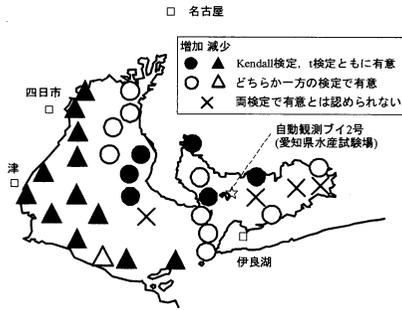


図-1 伊勢湾の概要と底層 COD のトレンド

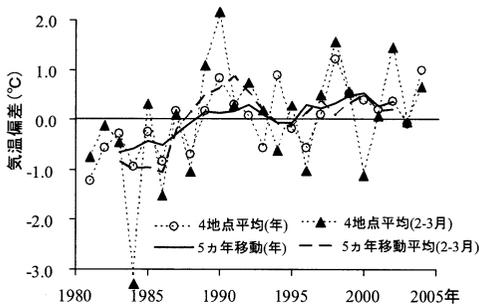


図-2 気温偏差の経年変化

1990年代後半以降は1980年代前半と比較すると約 1°C 気温が上昇していることが分かる。この時系列データに対して Mann-Kendall 検定及び t 検定を適用したところ、両検定で有意な昇温傾向が認められた (有意水準5%)。なお、各地点の変動傾向は概ね同じであり、地点ごとの大きな違いは見出せなかった。

月別に気温の長期変動を調べたところ、冬から春先の2~3月で上記の変動傾向が特に顕著に見られた。図-2に2~3月平均気温の偏差とその5か年移動平均を併示する。なお、1980年代以降、とくに冬季に見られる急激な昇温傾向は、伊勢湾周辺に限定されたものではなく、日本各地で生じている (気象庁, 2002)。

(2) 風速の経年変化

風は成層の形成・消滅、貧酸素水塊の湧昇・解消など閉鎖性海域の流動・水質を支配する重要な要素である。一般に地上観測点の風速データは地表面粗度の影響を受けているため海上における風速よりも小さいことが知られている。本研究では、後述の流動シミュレーションで必要となる高さ10mの風データを既往の研究 (例えば、灘岡ら, 1997) を参考にして次のように求めた。まず、地表面粗度を名古屋, 四日市, 津では1.0m (建物用地を想定), 伊良湖では0.01m (農業用地) とし, 4地点の風速の観測データを中立を仮定した対数則で地上100mの値に変換した。その値から同じく対数則で海面の粗度を0.001mとした高さ10mの値を算定した。なお、風向

は観測結果と同じとした。

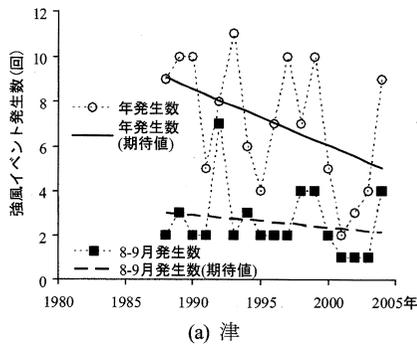
本研究ではとくに流動・水質に大きな影響を及ぼす強風イベントを対象とし、その発生頻度について長期変動傾向を調べた。強風イベントは、東京湾における中山ら (2008) の研究を参考にして、24時間平均の風速自乗値が $100\text{m}^2/\text{s}^2$ を超えるものとし、強風イベントの年発生回数を統計資料として時系列データを作成した。

津では1987年9月1日の測点の移動に伴い、観測高度に大きな変更があったため、1988~2004年の観測値を、他の3地点は1981~2004年の観測値を用いて強風イベントを抽出したところ、名古屋, 伊良湖, 津, 四日市の平均年発生回数ではそれぞれ1.5, 6.2, 7.1, 3.1回であった。図-3に強風が多い津, 伊良湖, 四日市の強風イベント年発生回数の経年変化を示す。また、同図に一般化線形モデル (Generalized Linier Model, GLM) を用いて算定した年発生回数の期待値を併示する。いずれの地点も強風イベントの年発生回数は減少傾向にあることが分かる。Mann-Kendall 検定及び GLM によるトレンドの検定を行ったところ、3地点では両検定ともに有意性 (有意水準5%) が認められた。

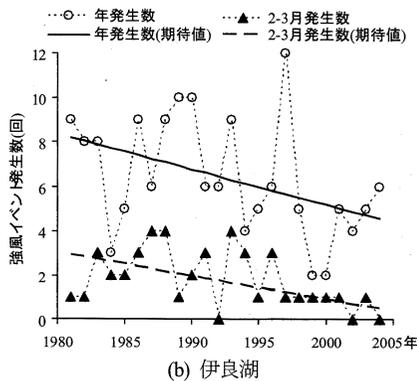
3地点の強風イベントの発生回数を月別に調べたところ、津では8~9月が全体の34%で突出して多く、伊良湖と四日市では1~3月がそれぞれ42, 44%を占めていることが分かった。津の8~9月の強風イベントは東~南東風が卓越しており、発生時の気象条件を調べてみると主に熱帯低気圧・台風の接近によるものであった。一方、伊良湖と四日市の1~3月の強風イベントは概ね西~北風、いわゆる「伊吹おろし」であると考えられる。

図-3(a)には津の8~9月の、(b)の伊良湖及び(c)の四日市には2~3月の強風イベント発生回数とその期待値を併示する。まず、図-3(a)を見ると、津の8~9月の強風イベント発生回数は微減傾向ではあるが、その有意性は Mann-Kendall 検定, GLM のトレンド検定ともに認められなかった。8~9月における東~南東風の強風イベントの発生頻度はあまり変化していないと言える。次に図-3(b)(c)を見ると、伊良湖及び四日市の2~3月の強風イベント数は明らかに減少傾向であり、その有意性についても両検定で認められた。伊勢湾及びその周辺地域では冬から春先にかけての西~北風の強風イベントの発生頻度が少なくなっていることが分かる。

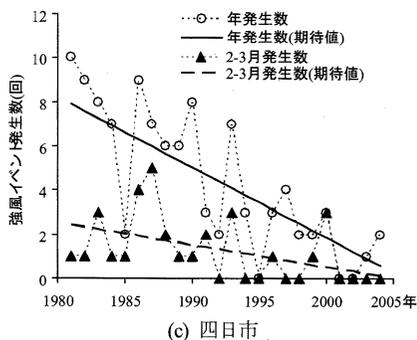
2~3月の強風イベントの発生回数と図-2の2~3月の気温偏差には、それほど強くはないが、負の相関がある。伊勢湾周辺地域の2~3月の気温の低高は、西~北から吹き込む冷風の強弱と関連しているものと考えられる。



(a) 津



(b) 伊良湖



(c) 四日市

図-3 強風イベント発生数の経年変化

3. 気温・風速の変化が伊勢湾の流動・水質に及ぼす影響評価

(1) 湾内流動モデル

気温・風速の長期変動傾向が湾内の流動に及ぼす影響を数値シミュレーションで検討する。本研究で用いる湾内流動モデルは、著者ら(2008)の σ 座標系準3次元FEMモデルである。本モデルでは移流スキームにはCIP法(矢部ら, 2003)、鉛直混合スキームにはMellor(2001)、海面フラックスの算定にはKondo(1975)を採用している。計算領域は伊勢・三河湾全域とし、水平方向は重構造の四角形要素を用いて分割し、鉛直方向は20

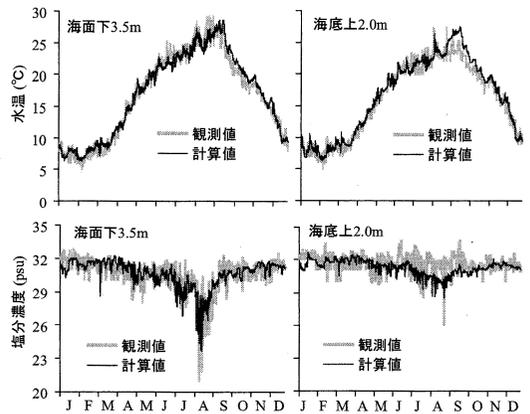


図-4 水温と塩分濃度の計算値と観測値(自動観測ブイ2号, 愛知県水産試験場提供)との比較

層とした。水深データは日本海洋データセンターのデータに基づいて与えた。

境界条件として各格子点に与える海面から高さ10mの風速については、まず格子点における高さ100mの風速を格子点と観測地点の距離の逆自乗値を重みとして4観測地点における地上100mの風速で補間した後、対数則で変換したものを与えた。気温、湿度、降水量についても同様に4地点の観測値を計算節点と各観測地点の距離の逆自乗値で重み付け平均したものを与えた。河川については一級河川(宮川、雲出川、櫛田川、鈴鹿川、揖斐川、長良川、木曾川、庄内川、矢作川、豊川)からの流入量を考慮し、流量年表(国土交通省河川局提供)に記載されている最下流の観測地点の日平均流量に(全流域面積)/(観測地点より上流の流域面積)を乗じた値を河口に最も近い節点の表層に流入させた。流入水の塩分濃度は0.01psuとし、水温は水質年表(国土交通省河川局提供)の観測値より作成した気温と水温の線形回帰式を用いて推定した。湾口における潮位は鳥羽の観測値(気象庁提供)を、水温・塩分濃度は日本海洋データセンターの月別統計値を与えた。

本モデルの妥当性については愛知県水産試験場の自動観測ブイデータや第四管区海上保安本部の調査結果等と比較して検証した。図-4に2003年の海面下3.5mと海底上2mにおける水温・塩分濃度の観測値(図-1の自動観測ブイ2号)と計算値の比較を示す。8~9月にかけて海底上2mの水温は観測値よりやや高め、塩分濃度は観測値より低めに評価される傾向にはあるが、全体的に計算値は観測値をうまく再現している。

(2) 気温・風速の変化が流動に及ぼす影響

1988, 1990, 1993, 1998, 2003年の流動シミュレーションを行い、気温と風速の経年変化が流動に及ぼす影響に

ついて調べた。表-1に各年2月の気温偏差，強風イベント数（四日市と伊良湖の総数）及び伊勢湾に流入する河川流量を示す。

図-5に2003年2月の平均流速を示す。また，同図に2003年を基準とした1998，1993，1990，1988年2月平均流速の偏差（偏差ベクトルが2003年の2月平均流速と同方向であれば加速，逆方向であれば減速）を併示する。なお，図中に示してある中・底層はそれぞれ海面から9～12層，17～20層（最下層）の平均を示している。

まず，2003年の平均流速を見ると，中層では伊勢湾北部において三重県東側で北上，知多半島西側で南下する時計回りの流れ，底層ではエスチュアリー循環による湾口から湾奥に向かう流れがあり，既存の研究（例えば，杉山ら，1995）でも指摘されているものと同様な流動特性が見られる。

次に1988年の偏差ベクトルを見ると，伊勢湾北部の中層では2003年の流速ベクトルと同方向であり，時計回りの流れが2003年よりも強くなっていることが分かる。また，底層では北上流が2003年よりも大きくなっており，知多半島西側では2003年に見られなかった南下流が発生している。三重県東側の中層に見られる北上流については，1988年の偏差ベクトルは2003年の流速ベクトルと逆になっており，1988年は2003年よりも弱くなっていることが分かる。表-1の1988年と2003年の気温偏差と強風イベント数を比較すると，1988年は2003年よりも気温が低く，強風イベント数が多くになっており，両条件の違いが流動特性に現れたものと考えられる。なお，両年に限らず，解析を行った年はいずれも河川流量に差が見られるが，その影響について2003年の気象条件でそれぞれの年の河川流量を与えた数値シミュレーションを行って検討したところ，中・底層においては気象場による影響ほど流速の変化が顕著に現れないことを確認している。

1990年の結果を見ると，底層では1988年ほど大きな偏差は見られないが，中層の伊勢湾奥部では1988年とは逆向きの偏差ベクトルが見られる。1990年は2003年よりも気温が高く，2003年よりも気温が低い1988年とは逆の影響が現れたと考えられる。

1993，1998年は2003年より気温は高いが，強風イベント数はそれぞれ2，1回多く発生している。それぞれの年の偏差ベクトルを見ると，1988年ほど強くはないが，中・底層とも1988年と同方向の変化となっていることが分かる。このことは，気温よりも風速の方が上述のような湾内流動への影響が大きいことを示唆している。近年冬から春先にかけて昇温，西～北から吹き込む強風イベント数が減少傾向にあることを踏まえると，三重県東側の中層の北上流が加速し，湾奥部中層の時計回りの流れ，外洋から湾奥に向かう底層の北上流及び知多半島西側の中・

表-1 各年2月の気温偏差，強風イベント数（四日市と伊良湖の総数）及び伊勢湾に流入する河川流量

| | 2003 | 1998 | 1993 | 1990 | 1988 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|
| 気温偏差 (°C) | 0.7 | 1.7 | 1.0 | 3.1 | -1.2 |
| 強風イベント (回) | 0 | 1 | 2 | 0 | 3 |
| 平均河川流量 (m ³ /s) | 374 | 523 | 540 | 886 | 194 |

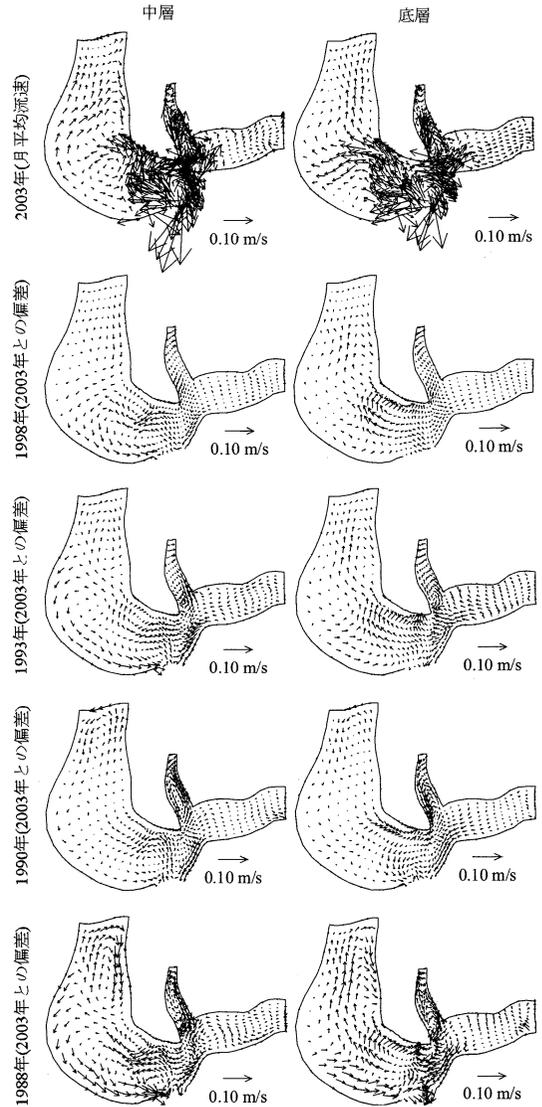


図-5 2003年2月の中・底層の平均流速及びそれを基準とした1998，1993，1990，1988年の偏差ベクトル

下層の南下流が減速していると考えられる。

東～南東風が卓越する8月についても同様の検討を行ったところ，気温・強風イベント数の変化による月平均流

速への影響は表層では大きく見られたが、中・底層は2月と比較して小さく、特徴的な経年変化も見出せなかった。夏季は成層が発達しているため、気温や風による影響が下層の月平均の流動には現れにくいと考えられる。

(3) 水質の経年変化との関連性

最後に、中・底層の流動特性の経年変化が湾内の水質に及ぼしている影響について考察する。1981～2004年の主に1, 5, 7, 10月の年4回、伊勢・三河湾内33点で実施された広域総合水質調査のデータ（環境省提供）を解析して得られた底層 COD のトレンドを図-1に併示する。伊勢湾の底層 COD は三重県東側で減少、知多半島西側で増加傾向にあり、明瞭な空間分布特性が見られることが分かる。なお、トレンドの検定には Mann-Kendall 検定と t 検定（いずれも有意水準5%）を用いた。

閉鎖性海域の水質が問題とされるのは主に夏季であるが、底層 COD については伊勢湾全体における1, 5, 7, 10月平均値には有意な差がなく、トレンドの傾きについても月ごとの特徴は見出せなかった。底層 COD は有機物の内部生産・分解や上層からの沈降、海水交換など様々な過程の影響を受けて変動するが、上層に比べて内部生産量は小さく、海水交換速度も遅いため、上層のような大きな季節変動が生じず、比較的安定した値となっていると考えられる。

以上を踏まえて図-1の底層 COD のトレンド要因を考察すると、その一つに前述した冬季の流動特性の経年変化が関与しているのではないかと推察される。つまり、三重県東側の中層では岸に沿って北上する冬季の流れが近年加速したため海水交換速度が早くなった、知多半島西側では中・下層の南下流が減速し、海水交換速度が遅くなったことが底層 COD の年間値の長期増加・減少傾向となって現れたのではないかと考えられる。現在のところ陸域からの負荷量や内部生産量の経年変化に関する検討が十分ではないため断定はできないが、今後水質・生態系モデルを組み込んだ数値シミュレーション等を実施して詳細に検討する予定である。

4. おわりに

本研究では、1981～2004年における伊勢湾の気温・風速の経年変化を調べ、それが湾内の流動・水質に及ぼす影響を検討した。得られた結論をまとめると次のとおりである。

- 名古屋、伊良湖、津、四日市の年平均気温は近年昇温傾向であり、とくに冬から春先にかけてその傾向が強くなる現れている。
- 津、四日市、伊良湖の強風イベント発生数は近年減少傾向にある。夏季に多く発生する東～南東風についてはあまり変化していないが、冬から春先にかけての西

～北風の強風イベント数は顕著に減少している。

- 2月における伊勢湾の流動は気温が上昇・強風イベント数が減少するにつれて三重県東側の中層の北上流が加速し、湾奥部中層の時計回りの流れ、外洋から湾奥に向かう底層の北上流及び知多半島西側の中・下層の南下流が減速する。
- 冬から春先にかけての昇温傾向、西～北から吹き込む強風イベント数の減少傾向を踏まえると、伊勢湾の流動はc)で述べた長期変動傾向にある。このことは底層 COD に見られるトレンドの原因となっている可能性がある。

謝辞：本研究は科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」（研究代表者:辻本哲郎）の成果である。また、本研究を遂行するにあたり環境省、国土交通省河川局、日本海洋データセンター、気象庁、第四管区海上保安部、愛知県水産試験場の貴重なデータを使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 川崎浩司・村上智一・大久保陽介（2006）：長期現地観測データに基づく伊勢湾の密度・水質構造の季節変動特性，海岸工学論文集，第53巻，pp. 946-950.
- 環境省（2005）：中央環境審議会水環境部会，総量規制専門委員会（第7回）議事次第・資料，<http://www.env.go.jp/council/09water/y097-07b.html>，参照2008-05-20.
- 気象庁（2002）：20世紀の日本の気候，財務省印刷局，116p.
- 久野正博・藤田弘一（2003）：熊野灘および伊勢湾における潮位変動と海況変動，海と空，第79巻，第1号，pp. 31-37.
- 国土交通省中部地方整備局（2008）：伊勢湾再生推進会議，http://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/isewan_saisei/index.htm，参照2008-05-20.
- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真悟（1995）：ADCPによる伊勢湾の流動構造調査，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1096-1100.
- 中山恵介・中尾隆志・Sivapalan, M.・武村圭史朗・佐藤千鶴・古川恵太（2008）：東京湾の湾奥底層 DO 濃度に対する強風イベントの統計的解析，水工学論文集，第52巻，pp. 193-198.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・吉野忠和（1997）：東京湾における風系の時空間変動と湾内海水流動への影響，海岸工学論文集，第44巻，pp.396-400.
- 東博紀・牧秀明（2008）：CIP-FEMを用いた準3次元内湾流動モデルによる東京湾の循環流に関する基礎研究，水工学論文集，第52巻，pp. 1405-1410.
- 樋渡武彦・森鐘一・東博紀・村上正吾・出口一郎・木幡邦男（2007）：網張り試験による流速減衰と二枚貝浮遊幼生着底促進効果について，環境工学論文集，第44巻，pp. 555-561.
- 矢部孝・内海隆行・尾形陽一（2003）：CIP 法，森北出版株式会社，222p.
- Mellor, G.L. (2001): One-dimensional, ocean surface layer modeling: a problem and a solution, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 31, pp. 790-809.
- Kondo, J. (1975): Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Bound.-Layer Meteor.*, Vol. 9, pp. 91-112.