

瀬戸内海における漂流予測モデルによる海洋ごみ分布域の推定

Estimation of the Distribution of Marine Litter by using the Drift Simulation Model in the Seto Inland Sea

橋本英資¹・谷本照己²・星加 章³・高杉由夫⁴

Eisuke HASHIMOTO, Terumi TANIMOTO, Akira HOSHIKA and Yoshio TAKASUGI

The drift numerical simulation model of the Seto Inland Sea with 0.5' mesh was constructed to search for problem of marine litter in the sea. The particles assumed to the floating litter were released from 13 rivers in these models and were traced for 30 days. As a result, the drift route, the arrival place, and the arrival time of the floating litter became clear. Moreover, the distribution of the amount of litter assuming proportion to the river discharge was calculated. A lot of amounts of the floating litter were distributed around the Okinose in the Osaka bay. They were discharged from Yodo River. Also, the dispersion area of the floating litter was not proportional to the river discharge. This result was shown that the extension of the litter depended on the flow in the sea and the close of topography.

1. はじめに

瀬戸内海では岸辺の漂着ごみによる景観の悪化や浮游ごみ・海底ごみによる漁業への悪影響, さらには不法投棄等も発生し, これらの海洋ごみは社会問題となっている. このため海洋ごみに関する総合的な調査・研究を進め, 問題解決に取り組むことが求められているが, そのためには, まず, 海洋ごみの現状の的確な把握とごみ分布・漂着等に関する機構の解明が急務であり, これらの成果を基にごみの影響の未然防止を図る必要がある.

海洋ごみに関しては, ディスポーザブルライターの漂着状況の解析からごみの移動状況を推定した報告(藤枝, 2003)や瀬戸内海におけるカキ養殖用パイプの海岸漂着から海洋ごみの地域特性を明らかにした報告(藤枝・佐々木, 2005)などがある. しかしながら, これらの研究はまだ緒に就いたばかりであり, 瀬戸内海におけるごみ分布の全体像や漂流・漂着等の機構については全く不明のまま残されており, ごみの輸送・漂流経路や発生・漂着場所等についての科学的根拠のある情報が求められている.

本報では, 海洋ごみの中でも海面を浮游する「浮游ごみ」に注目し, 漂流予測モデル実験により浮游ごみの漂流経路と漂着場所について明らかにする. また, 浮游ごみの相対量および発生地域の推定も行う.

2. 漂流予測モデル

(1) 数値モデル

瀬戸内海を浮游するごみの漂流・漂着状況を調べるため, ごみの移動を追跡する数値モデルを構築した. 使用した数値モデルは藤原ら(1998)が開発した3次元粒子追跡モデルに粒子の沈降速度を導入したもの(高杉ら, 2001)で, 流動場を計算するための流体力学モデルと, その流動場において粒子を追跡する粒子追跡モデル(オイラー・ラグランジュ法)から構成されている. 流動場の計算には静水圧近似を仮定したマルチレベルモデルを用い, 運動方程式, 連続式, 自由水面の式, 水温および塩分の拡散方程式および状態方程式に基づいた基礎方程式をスタガードメッシュ系の有限差分法により計算した. 一方, 粒子の輸送は以下の式にしたがうものとして計算した.

$$X^{(n+1)} = X^{(n)} + \frac{F^{(n)} + F^{(n+1)*}}{2} \Delta t + \gamma \sqrt{2D\Delta t} \quad \cdots(1)$$

$$F^{(n)} = V^{(n)} + \{ (V^{(n)} \cdot \nabla) V^{(n)} \} \Delta t \quad \cdots(2)$$

$$F^{(n+1)*} = V^{(n+1)*} + \{ (V^{(n+1)*} \cdot \nabla) V^{(n+1)*} \} \Delta t \quad \cdots(3)$$

$$X^{(n+1)*} = X^{(n)} + F^{(n)} \Delta t \quad \cdots(4)$$

ここで X は粒子の3次元位置ベクトル, V は粒子位置での流速ベクトルに粒子の沈降速度 S_p を加えた値, ∇ は微分演算子, Δt は時間ステップ, D は分散係数, γ は平均がゼロで標準偏差が1の正規乱数, 上付き添字は時間レベルを表す. また, 上付き添字の*はその時間レベルでの仮の値を表す. 計算に必要な粒子位置での流速やシアについては粒子を囲む流速成分から距離に反比例させた重みをつけて内挿した. なお, 本計算では, 粒子の分散係数 ($D = 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$) は水平方向のみを考慮し, また, 陸岸境界ではフリースリップおよび全反射条件とした.

1 正 会 員	(独法)産業技術総合研究所
2 理博	(独法)産業技術総合研究所
3 理博	(独法)産業技術総合研究所
4 農博	(独法)産業技術総合研究所

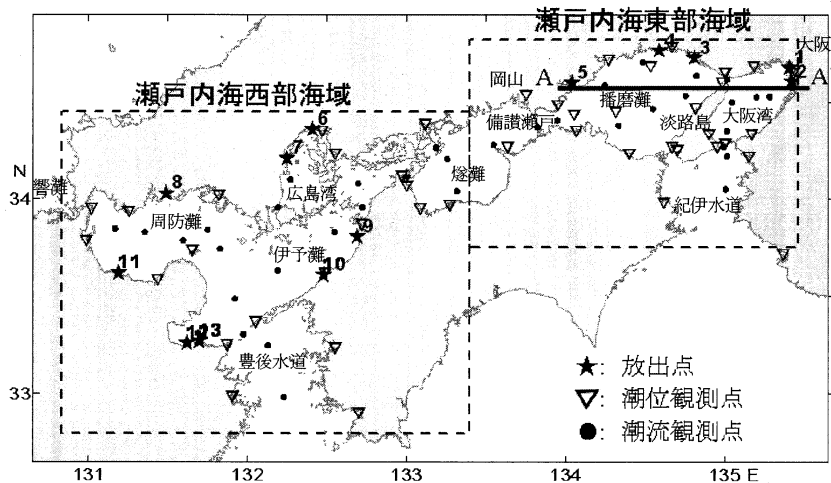


図-1 瀬戸内海数値モデル実験海域。▽、●印は、現地の再現性検証のための潮位および潮流観測点，★印は、河口での粒子の放出点で、番号は以下の河川名に対応。1：淀川，2：大和川，3：加古川，4：揖保川，5：旭川・吉井川，6：太田川，7：小瀬川，8：佐波川，9：重信川，10：肱川，11：山国川，12：大分川，13：大野川。

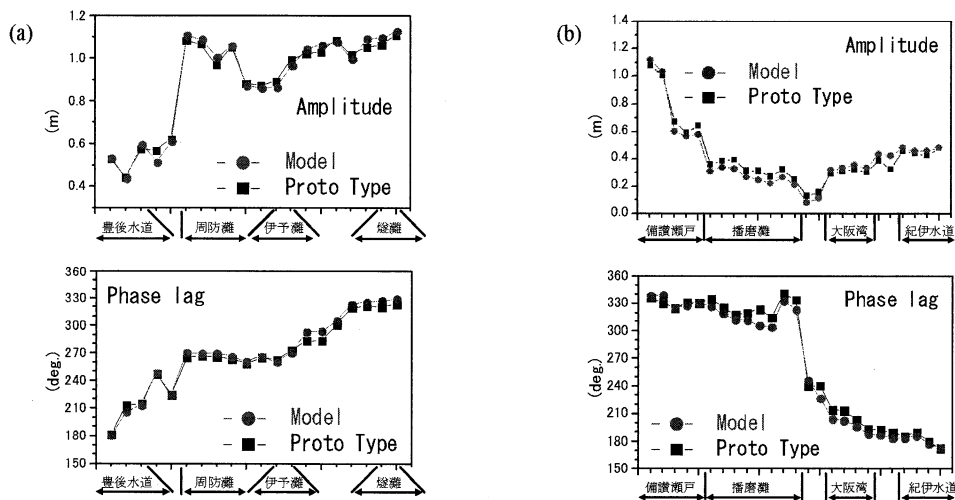


図-2 瀬戸内海の M_2 潮汐の振幅と位相。(a)：西部瀬戸内海，(b)：東部瀬戸内海，●：計算値，■：実測値。

数値モデル実験海域を図-1に示す。本報では、瀬戸内海中央部の東経133°24'Eを境に瀬戸内海を東の東部海域と西の西部海域の二つに分割して計算を行った。格子幅は、水平方向に0.5' (925m) 正方形メッシュとし、水深データは、日本海洋データセンター (2005) から提供されている500mメッシュの水深データを平均して、0.5'メッシュ水深値に変換した。鉛直方向には、表層から70mまで2.5, 2.5, 5, 10, 10, 20, 20mの7層と70m以深から400mまでの計8層とした。東部および西部の両海域とも開境界部 (東部海域は紀伊水道と燧灘，西部海域は豊後水道、燧灘，響灘) で潮汐を与え、図-1に示す地点での潮汐

(肥後，1979) および潮流 (肥後ら，1980) の現地との再現性を確認した。図-2に M_2 潮汐の振幅と位相の分布を示す。

(2) 漂流予測実験

浮游ごみの多くは河川から海域に流入してくるものと考え、浮游ごみに見立てた粒子を河口に初期配置し、その移動を追跡する数値モデル実験を行った。本計算では、潮汐条件として開境界で M_2+S_2 潮を与えた。また、密度成層の影響を避けて平均的な流動場での粒子の移動を調べるため、冬季の水温塩分値を使用した。河川は一級河川を対象とし、年平均流量の淡水を流入させた (日本河

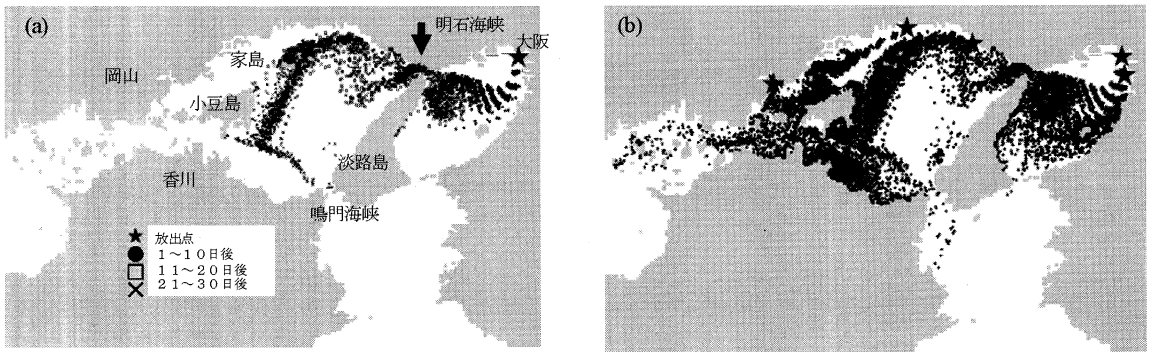


図-3 東部瀬戸内海における粒子の30日間の分布図。(a): 淀川河口のみから流入した粒子の分布, (b): 東部海域の全5河川の河口から流入した粒子の分布, 粒子位置は1日間隔で表示。

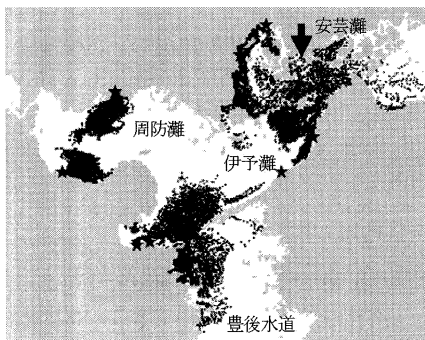


図-4 西部瀬戸内海の全8河川の河口から流入した粒子の30日間の分布図, 粒子位置は1日間隔で表示。

表-1 年平均河川流量 (m³/s)

東部瀬戸内海			西部瀬戸内海		
番号	河川名	年平均流量	番号	河川名	年平均流量
1	淀川	267.51	6	太田川	78.81
2	大和川	23.94	7	小瀬川	12.05
3	加古川	45.89	8	佐波川	18.69
4	揖保川	25.87	9	重信川	9.96
5	旭川・吉井川	118.25	10	脇川	37.61
			11	山国川	20.81
			12	大分川	27.43
			13	大野川	61.08

川協会, 2005)。実験時の河川流量を表-1に示す。浮游ごみは瀬戸内海の13河川から放出されるものとし、図-1の★印で示す河川の河口に各100個の粒子を配置し、放出後、30日間連続追跡した。なお、浮游ごみを対象とするため、粒子が海面上を浮游するように浮力(沈降速度 $Sp = -0.0001 \text{ m/s}$)を与えた。

3. 実験結果

(1) 粒子追跡実験結果

図-3(a)は淀川河口に初期配置した粒子(100個)を30日間連続追跡し、これを1日間隔でプロットした粒子の分布図である。淀川からの粒子は、10日後に明石海峡を通過した後、家島諸島から小豆島東岸沖を通り鳴門海峡に向かっているのがわかる。図-3(b)は東部瀬戸内海の淀川・大和川・加古川・揖保川・旭川と吉井川の5ヶ所の河口から流入した粒子の30日間の分布図である。粒子の分布には偏りが見られ、淡路島東岸には多くの粒子が存在するが、西岸にはその数は少ない。また香川県沿岸に多数の粒子が見受けられる。同様に図-4に西部瀬戸内海の8河川から流入した粒子の30日間の分布図を示す。瀬戸や海峡のある安芸灘、伊予灘、豊後水道では、流れの速い海峡部を挟んで広範囲に広がった粒子の分布が見られる。一方、周防灘では河口から沖合に広がった団子状の分布を形成している。この30日間の分布図を基に以降の解析を行った。

(2) 浮遊ごみ量の相対分布

瀬戸内海での浮遊ごみの回収は、国土交通省の近畿・中国・四国および九州地方整備局において、海洋環境整備船により実施され、その回収量が明らかにされている。このうち1980-2001年のごみ回収量の年平均値から各担当海域面積あたりのごみ回収量への換算値と、担当海域に流入する1級河川流量の年間平均値との関係では、両者に良い相関が見られている。さらに大阪湾での月別のごみ回収量と大阪湾に流入する月別の1級河川流量との関係においても、河川流量が増大する6-9月にごみ回収量が多くなることが示されており(環境省, 2007)、浮遊ごみは河川起源のものが多く、河川流量に比例すると考えられる。そこで、浮遊ごみの全体の分布状況を調べるため、河川流量1m³/sに対応する浮遊ごみ量を1と換算し、河口より流入後、30日間にわたり海域に浮遊する相対的なごみ量の分布を計算した。図-5(a)は、東部瀬戸内海の各2海里格子内に5河川から、それぞれ到達した粒子数

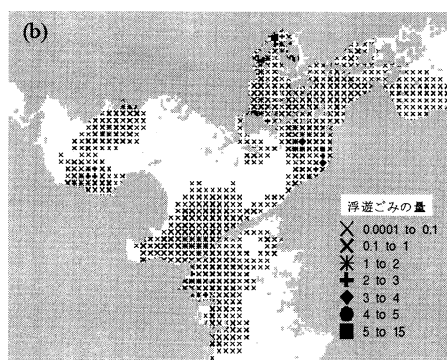
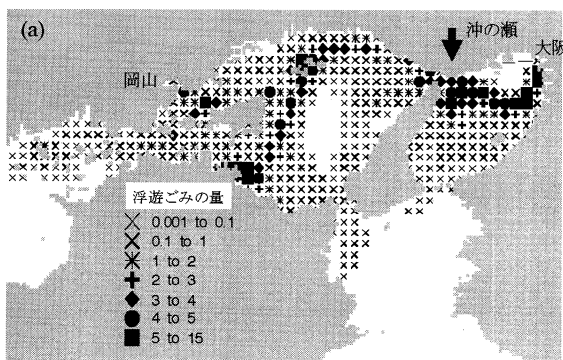


図-5 浮遊ごみ量の相対分布。(a): 東部瀬戸内海, (b): 西部瀬戸内海, 河川流量 $1\text{m}^3/\text{s}$ を浮遊ごみ量 1 と換算。

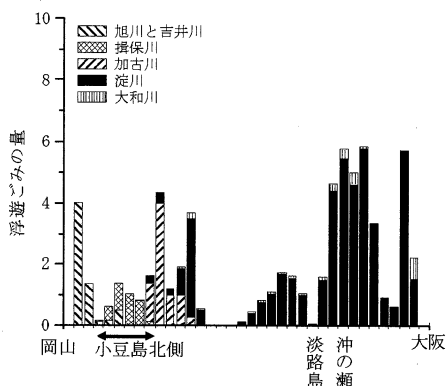


図-6 ライン A-A' (図-1) での河川別の浮遊ごみ量。
河川流量 $1\text{m}^3/\text{s}$ を浮遊ごみ量 1 と換算。

に, おおのの河川流量に対する重みをつけて換算した相対的な浮遊ごみ量の分布である。浮遊ごみは明石海峡東側 (沖の瀬) に多く存在し, また家島諸島と小豆島東岸沖および香川県沿岸に多く分布している。同じく図-5 (b) に西部瀬戸内海の浮遊ごみの相対分布を示す。西部瀬戸内海では河口沖合に広く分布するが, 東部瀬戸内海に見られるような多くの浮遊ごみが密に分布する場所は見られない。次に河川別の影響度を詳しく見ると, 例えば,

図-1 のライン A-A' (岡山-小豆島北側-淡路島-沖の瀬-大阪) での各河川からの浮遊ごみの量の内訳では (図-6), 大阪湾で沖の瀬付近に淀川からの浮遊ごみが多く存在しているが, これは明石海峡の東に形成される沖の瀬循環流 (藤原, 1981) の影響を強く受けていると考えられる。また小豆島北側では加古川と揖保川からの浮遊ごみが多くなっていることがわかる。

4. 発生地域の推定

ごみ対策のためには発生地域を推定する必要がある, 海域にどの河川からの浮遊ごみが最も多く存在するのか, すなわち, どの河川が強く影響するのかについて調べた。図-7 は, 最も多くのごみが存在する河川名を示した分布図で, 図-7(a) が東部瀬戸内海, 図-7(b) が西部瀬戸内海である。東部瀬戸内海では, ■印は淀川からの浮遊ごみが最も多い範囲を示しており, 明石海峡から家島諸島にかけての海域では淀川から流入する浮遊ごみが多く, 強く影響していることがわかる。また, 香川県沿岸には旭川・吉井川からの浮遊ごみが最も多く, 広い範囲で影響している。一方, 西部瀬戸内海 (図-7(b)) について見ると, 広島湾では太田川, 伊予灘では肱川, 別府湾・豊後水道では大野川からの影響が大きいことがわかる。

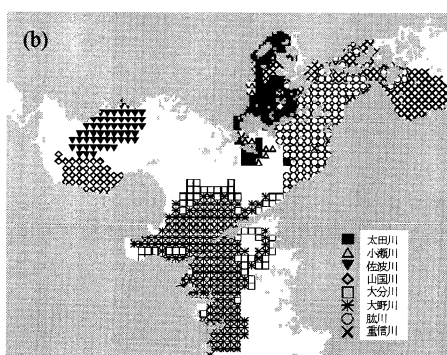
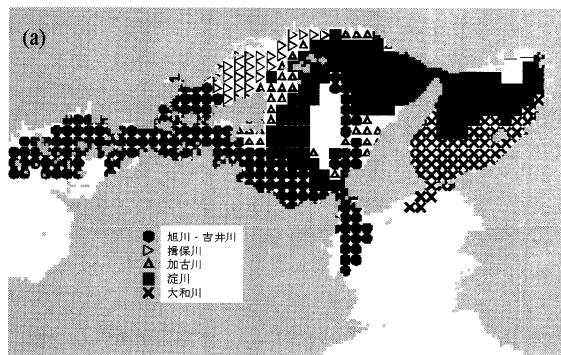


図-7 2海里格子内で浮遊ごみの量が最も卓越する河川の分布。(a): 東部瀬戸内海, (b): 西部瀬戸内海。

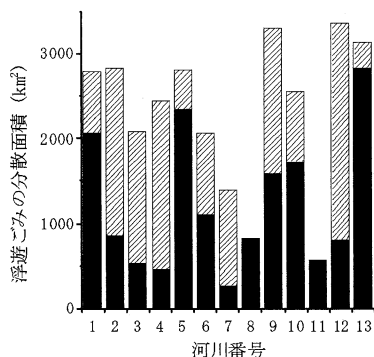


図-8 浮遊ごみの河川別の分散面積(■). ■印は自河川からの浮遊ごみが卓越する面積, 河川番号は図-1を参照.

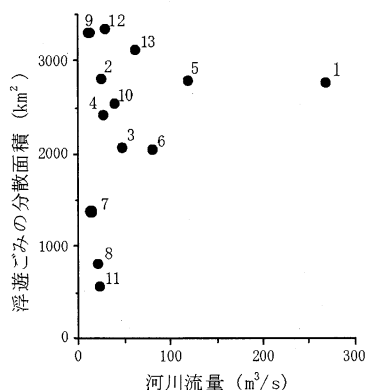


図-9 河川流量と河川別の分散面積との関係. 数字は河川番号(図-1を参照).

ごみ対策には, ごみ処分費用の負担割合の検討が必要であり, 海域内において自河川からの浮遊ごみ量が他の河川から流入してきたごみ量よりも多く存在する(卓越)する面積はどの程度なのかを調べた. 図-8に河川別の浮遊ごみの分散面積を示す. これは, 各河川からの粒子が存在している2海里格子の面積を積算したものであり, 河川名は図-1で示した河川番号で表してある. 分散面積は575-3368km²であり, 淀川(1), 大和川(2), 旭川・吉井川(5), 重信川(9), 肱川(10), 大分川(12), 大野川(13)のように海峡等を超えて隣接する湾・灘へ浮遊ごみが流出する河川ではその広がり面積は大きい. また, その分散範囲の中で自河川からの浮遊ごみ量が最大となっている面積を■印の棒グラフで示す. 淀川(1), 旭川・吉井川(5), 大野川(13)では, 自河川からの浮遊ごみが卓越する面積が広いことが分かる. これ以外の河川では自河川からの浮遊ごみの占める面積が狭く, 他の河川から流入する浮遊ごみの影響の方が大きいことを示している. さらに, 河川からの浮遊ごみの分散面積と河川流量との関係を調

べた(図-9). 両者には正の相関が期待できるが, 図-9の分布では, 明瞭な相関は見られない. これは, 浮遊ごみの広がり放出海域の流動特性と地形の閉鎖性にも依存しているためである. 河川流量の最も多い淀川(1)の分散面積が最大となっていないのは, 淀川から流入した浮遊ごみが淀川河口から近距離の範囲にその多くが滞留していることを示しており, この結果は図-5および図-6において明石海峡(沖の瀬)に淀川からの浮遊ごみが多いことと一致している.

5. まとめ

海洋ごみ分布域の推定のため, 瀬戸内海の13河川から流入した粒子を30日間追跡する漂流予測モデル実験を行い, 浮遊ごみの漂流経路と漂着場所を明らかにした. 浮遊ごみ量は河川流量に比例すると仮定して, 瀬戸内海に流入した浮遊ごみは, 沖の瀬に最も多く集積した. これは淀川の影響によるものである. また香川県沿岸には旭川・吉井川からの浮遊ごみが多く, 広島湾では太田川, 伊予灘では肱川, 別府湾・豊後水道では大野川からの影響が大きかった. 河川流量と浮遊ごみの分散面積は比例関係にならなかった. なお, 本計算においては潮流条件だけによる浮遊ごみの漂流輸送実験結果に基づいたが, 浮遊ごみは風の影響を強く受けることが報告されている(環境省, 2007). 今後は季節風などを取り入れた計算を行い, それらの影響について検討する必要がある. 本研究は環境省地球環境保全等試験研究費「海洋ごみ対策の確立に向けた情報支援システムの構築に関する研究」(研究代表者: 星加章)の一部である.

参考文献

- 環境省総合環境政策局 (2007): 環境保全研究成果集, 海洋ごみ対策の確立に向けた情報支援システムの構築に関する研究, 平成19年度CD, pp.36(1)-36(17), 作成中.
- 高杉由夫・橋本英資・長尾正之・埜口英昭(2001): 海域攪乱が内湾生物環境に与える影響評価技術に関する研究, (独法)産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門報告, 1号, 200 p.
- 日本海洋データセンター: 500m メッシュ水深 (オンライン), http://www.jodc.go.jp/index_j.html, 参照2005-05-11.
- 日本河川協会 (2005): 流量年表 (平成14年), 474 p.
- 肥後竹彦 (1979): 現地潮汐資料と調和定数, 中国工業技術試験所報告, 6号, pp.8-30.
- 肥後竹彦・高杉由夫・田辺弘道 (1980): 瀬戸内海全域の潮流について, 中国工業技術試験所報告, 12号, pp.81-120.
- 藤枝繁 (2003): ディスボーズプラライターを指標とした海岸漂着散乱ゴミの流出地推定, 漂着物学会誌, 1巻, pp.13-20.
- 藤枝繁・佐々木和也 (2005): 広島湾江田島・倉橋島海岸における微小プラスチック漂着物, 漂着物学会誌, 3巻, pp.1-6.
- 藤原建紀 (1981): 瀬戸内海における海水交流, 海の気象, Vol.27, No.2, pp.1-19.
- 藤原正幸・末永慶寛・中田英昭・永澤亨 (1998): 風の日々変動がマガレイ卵・仔魚の沿岸海域への滞留に及ぼす影響に関する数値シミュレーション, 水産工学, 35巻, pp.93-99.