

底質分析による広域の漂砂特性調査法について

李 在 炯*・入 江 功**・小野 信幸***・村上 啓介****

1. ま え が き

近年, 河川流域の開発に伴い, 河川から沿岸域への排出土砂の量が大きく減少している。さらに沿岸域開発の拡大などによって沿岸域の漂砂環境が大きく変わって来た。都市や空港の用地を海上に求める場合, これらの施設は一般に広大な用地を必要とし, 水深も 20 m~30 m に及んでいる。海上施設が大規模になればなるほど, 周辺環境への影響も大きくなるものと予想され, 特に海岸及び海底地形への影響について十分留意することが今後のミティゲーションの観点からも極めて重要である。

河川からの排出土砂の減少や沿岸域開発の拡大化を考えると, 河口流域から大水深域までを含む広域での漂砂を明らかにする必要がある。しかし, 対象域が広大となるため綿密な深淺測量による地形変化追跡など, 通常限られた浅海域で行なわれる調査試験の方法をとることが困難である。そこで, 地質学的な研究など (例えば, 岡田ら, 1996) で多く用いられる重鉱物分析の手法を用い, さらにその統計的処理を通して漂砂特性の把握を試みる手法で行った (李ら, 1997)。

本研究では, 広域の宮崎海岸を対象に行った鉱物組成の分析から多くの情報を得た。これらについて主成分分析 (経験的固有関数法) を実施することにより浅海域から沖合に至るまでの底質特性の相互関係を調べ, 統計的な手法による広域の漂砂特性の把握を試みた。さらに長年にかけて蓄積されてきた宮崎海岸周辺の広域の深淺測量図を用いて海底地形の変動特性を求めることにより本調査法で求めた漂砂特性の検証を行った。

2. 底質分析による漂砂特性

漂砂特性を明らかにするため, 採取された底質を用いた分析方法が数多く試みられてきた。本研究では底質分析を用いた漂砂特性の調査をより統計的に把握するために, その処理法として採取された底質の各重鉱物含有量に経験的固有関数法を適用し, 漂砂特性の把握を試みた。

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部漂砂研究室
** 正会員 工博 九州大学教授 大学院工学研究科
*** 正会員 工博 九州大学助手 大学院工学研究科
**** 正会員 工博 宮崎大学助教授 工学部環境土木工学科

2.1 底質分析結果の統計的処理法

a) 定義

分析された重鉱物の種類が全部で n_x 種あるとし, 鉱物種を $x=1, 2, 3, \dots, n_x$ と番号を付する。採取された各底質資料について, 底質採取個所の全数を n_i 個所とし, 採取点を, $I=1, 2, 3, \dots, n_i$ とする。I 番目の採取点の, x 番目の鉱物種の含有量を $V(x, I)$ とし, その偏差を

$$\Delta V(x, I) = V(x, I) - \bar{V}(x) \dots \dots \dots (1)$$

とする。ここに, $\bar{V}(x)$ は, 鉱物 x の含有量の全測定点に関する平均値である。

経験的固有関数法では,

$$\Delta V(x, I) = \sum Sc_n(I) \cdot Cc_n(x) \dots \dots \dots (2)$$

というように, 任意の種類, 任意の場所について鉱物種の含有量の偏差 $\Delta V(x, I)$ が第 n 次主成分 (第 n 次モード) の空間係数 $Sc_n(I)$ と組成係数 $Cc_n(x)$ との積和で表示できるものとする。ここで, $Cc_n(x)$ は固有ベクトルであり, 全サンプルを代表する第 n 次主成分の鉱物組成を示し, 場所に依らない共通の鉱物組成である。逆に $Sc_n(I)$ は個々の底質の鉱物組成の種類には依らない場所 I の関数である。

b) 計算法

漂砂の広域特性を把握するため主成分分析の理論を利用し, 経験的固有関数法を適用する。主要重鉱物 n_x 種類において全域の各鉱物の平均含有量と場所ごとの各鉱物含有量との差 (変化量 ΔV) を第 n 次主成分の空間関数 ($Sc_n(I)$) と組成関数 ($Cc_n(x)$) の積の重ね合わせで表わす。

$$\Delta V(x, I) = \sum Sc_n(I) \cdot Cc_n(x) \dots \dots \dots (3)$$

ここで I は場所, x は鉱物種類を示す。

具体的には, まず式 (1) により ΔV を求めた後,

$$a_{ij} = \frac{1}{n_x \cdot n_i} \sum_{i=1}^{n_i} \Delta V(i, I) \cdot \Delta V(j, I) \dots \dots \dots (4)$$

を要素とする実対称相関マトリックス A を作る。

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & \cdot & \dots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (5)$$

続いて, $Cc_n(x)$ をマトリックス A の固有ベクトルと

して求める。固有方程式

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & \cdot & \cdots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} \end{pmatrix} - \lambda_n \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} = 0, \quad 1 \leq n \leq n_x$$

..... (6)

から、第 n 次主成分の固有値 λ_n を求め、 λ_n の解のうち最も大きい λ_n を第 1 次主成分の固有値とし、以下同様に $\lambda_2, \lambda_3, \dots$ とする。次に連立方程式 $ACc_n = \lambda_n Cc_n (1 \leq n \leq n_x)$ より、第 n 次主成分に相当する固有ベクトル $Cc_n(x)$ を求める。

空間係数 $Sc_n(I)$ は、組成係数 $Cc_n(x)$ の直交性を利用して求める。

$$Sc_n(I) = \sum_{x=1}^{n_x} \Delta V(x, I) \cdot Cc_n(x) \quad \text{..... (7)}$$

また、各 $Sc_n(I)$ の重要度を示すパラメータとしてそれに対応する固有値により寄与率が次のように定義される。

$$\text{寄与率} = \lambda_n / \sum_{i=1}^{n_x} \lambda_i \quad \text{..... (8)}$$

2.2 宮崎海岸の漂砂特性

a) 調査海域および底質採取

前節の調査法を用い、宮崎海岸の漂砂特性の調査を行った。底質採取は、中等潮位時に汀線付近で 23 箇所 (s1~s23)、海岸の砂丘で 4 箇所 (ss1, ss2, ss3, ss4)、河川流域 11 箇所 (R1~R11)、沖合の水深 10 m, 20 m, 30 m のところで 31 箇所 (1~31) で行なった (図-1)。

b) 海象条件

1974 年から 1993 年の間観測された波浪データによると、宮崎港での波の年間発生頻度 (運輸省第四港湾建設局資料) は、E からの波が最も多く (約 65%)、次いで ESE からが約 20%、ENE と SE からが 10% 未満である。この結果から見る限り、宮崎海岸の沿岸漂砂の卓越方向はやや南向きということになる。しかし、波高 2 m 以上である高波時の波の発生頻度は ESE と SE からの波に多く発生しているため、北向きの漂砂も充分考えられる。

c) 地質学的な背景

宮崎海岸の隣接陸地の地質は、砂岩、頁岩、泥岩及び礫岩を含む古第 3 紀の四万十層群が広い範囲で、特に研究対象地域の北部の一ツ瀬川流域に広く分布している。また、大淀川流域には新第 3 紀の宮崎層群が、その上流には古第 3 紀から新第 3 紀にかけての四万十帯の堆積岩コンプレックスである日向層群と日南層群が広く分布し

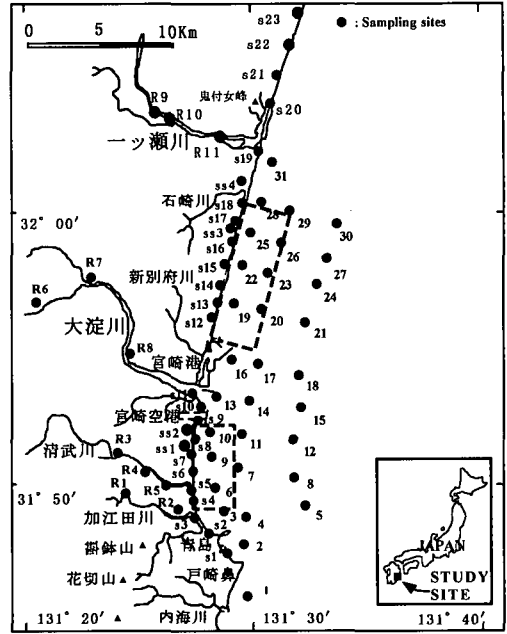


図-1 宮崎海岸の底質採取地点と深浅測量海域 (点線)

ている。さらに研究対象地域の南部には大淀川流域に継続して宮崎層群が分布している。

d) 底質分析結果の統計処理による漂砂特性

採集された 69ヶ所の底質を対象に粒度分析を行い、粒径 0.125 mm~0.25 mm の底質を用いて重鉱物分析を行った (Mange ら, 1992)。各重鉱物は鉱物種によってはある程度空間的な特徴を示すものの、そのばらつきが非常に多く総合的な漂砂特性を把握するには困難であった。そこで 19 種類の鉱物に関する統計的解析を、経験的固有関数法により行い、統計的な解析を試みた。図-2 は第 2 次モードまでの組成係数 $Cc_1(x), Cc_2(x)$ を示したものである。組成係数を有意に特徴づける鉱物成分は、普通輝石、紫蘇輝石、不透明鉱物、岩片、変質粒子の 5 種類であり、その他の成分は有意な鉱物組成を特徴づけるものではないことが分かる。第 1 次モードと第 2 次モードの寄与率は、それぞれ 40% 及び 36% である。これに対する第 1, 2 次モードの空間係数 $Sc_1(I)$ と $Sc_2(I)$ を示したのが図-3 及び図-4 である。

第 1 次モードの空間係数をみると (図-3)、北の一ツ瀬川流域では 2ヶ所が正、1ヶ所が負の値となっているのに対し、南の大淀川、清武川及び加江田川流域の空間係数は、負の値をとっている。この負の値を示す底質は、加江田、清武川から大淀川の海域に大水深に至るまで広く分布し、さらに大淀川から北側の海域に汀線域を含め広く分布している。一方、大淀川の南側汀線沿いには、空間係数が正の値を示す区域があることは、注目すべき

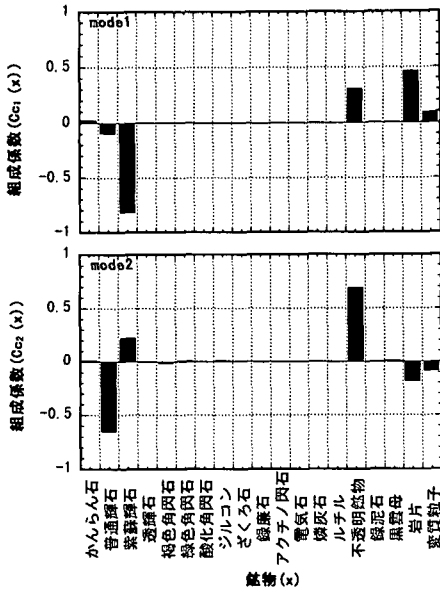


図-2 各鉱物成分に対する第1次モードの組成係数 ($C_{c1}(x)$)と第2次モードの組成係数 ($C_{c2}(x)$)

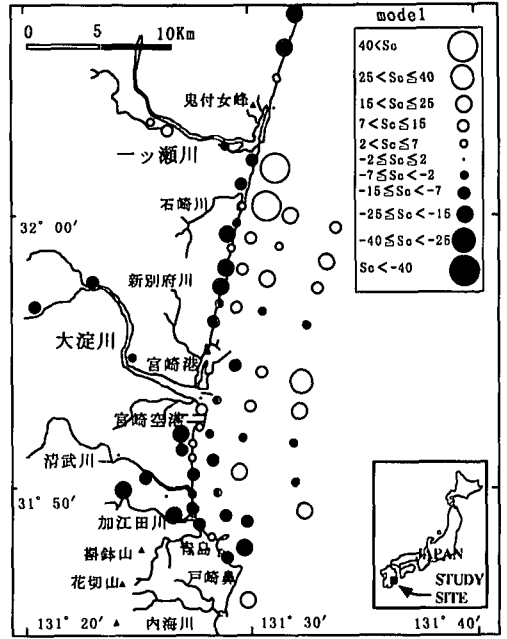


図-3 第1次モードの空間係数 $Sc_1(I)$

である。一ツ瀬川の流域の底質は、正の符号で示される空間係数の方が強く海域で河口北側の汀線沿い及び南側の海域に広く分布している。地質学的な観点によれば、大淀川、清武川及び加江田川は、3つとも宮崎層群という共通の地層を通じて流下している。これに対し、一ツ瀬川は、四万十層群という異なった地層を流下しており、流域の底質はこれら3つの川とは異なることが十分に考えられる。

図-4の第2次モードの空間係数を見ると、今度は河川流域の空間係数が大淀川の1ヶ所を除きすべて正の値を示している。これに対し大淀川右岸側の汀線沿いでは明確な負の値を示しており、大淀川流域の底質とは類似性が低いことを示している。大淀川の北側海域では、ある範囲までは必ずしも負の値を示さず、類似性が低いとは言いつれないようである。また、一ツ瀬川寄りの北側海域には負の値を示す底質が広く沖合にまで分布しており、この限りでは一ツ瀬川との関連性は低いものとなっている。また、大淀川から南海域に至る大水深域には、河川流域の底質と同じ空間係数が正の値を持つ領域が存在する。

以上のことから、宮崎層群を主要層とする大淀川、清武川及び加江田川は、第1次モードの空間係数は負の値を示し、第2次モードの空間係数は正の値を示した。一方、四万十層群を主要な地層とする一ツ瀬川は、第1次モード、第2次モード共に正の値を示すことから、これら2つの河川グループの空間係数の組み合わせの違いを利用して、各河川の海域に対する寄与をさらに評価して

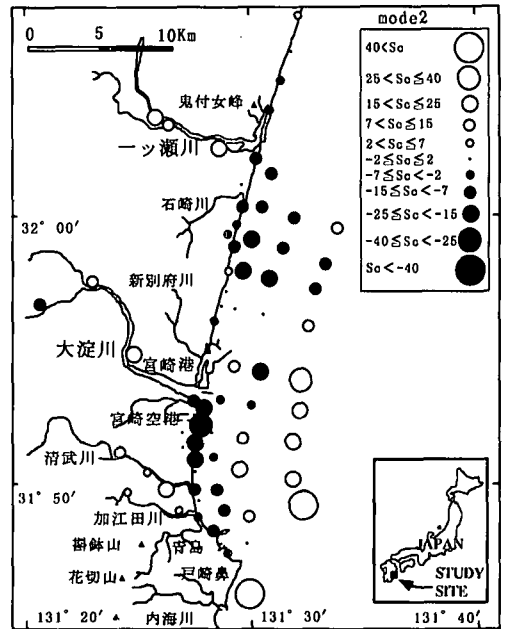
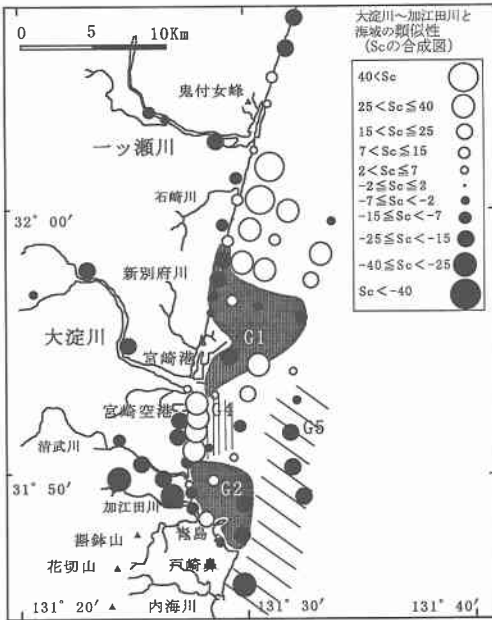
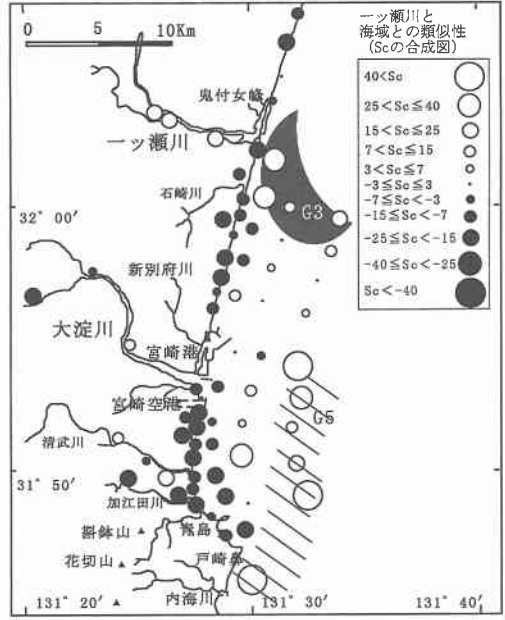


図-4 第2次モードの空間係数 $Sc_2(I)$

見る。すなわち、海域の底質の空間係数が第1次モードで負、かつ第2モードで正であり、しかも後者の空間係数の符号を負に変えて前者との和をとったとき、その負の数値が大きければ大きいほど大淀川～加江田川との類似度が高いものと判定する。逆にもし第1次モードで正、



図一五 大淀川～加江田川流域と海域との空間係数の類似性；大淀川～加江田川流域の空間係数を基準にして第1, 2次モードの空間係数を合成して表示



図一六 一ツ瀬川流域と海域との空間係数の類似性；一ツ瀬川流域の空間係数を基準にして第1, 2次モードの空間係数を合成して表示

第2次モードで負であれば、後者の符号を変え前者に加えると大きな正の値を持つことになり、類似度は極端に低いものになる。こうすることにより、大淀川～加江田川の底質に類似度の高い海域の範囲を求めることが出来る。

同様に一ツ瀬川については、第1次モードが正かつ第2次モードが正の場合、今度は符号を変えることなく2つの空間係数を加え、その合計が正の値で大きいほど一ツ瀬川との類似度が高いとする。このようにして、2つの河川グループによる海域への寄与を分離できる。

図一五は、大淀川～加江田川流域の底質と海域の底質との空間係数の類似性を第1次モードと第2次モードとを合成して示したものである。これによると、大淀川流域の底質は、右岸側の海岸とは関連が薄く、左岸側と関連が深い。しかもその範囲は、大淀川河口から7～8 kmに及ぶ。清武川、加江田川の底質と類似度が深いのは河口から相当の沖合にまで及んでいる。

次に、一ツ瀬川を中心に海域との関係を第1次モード、第2次モードを合成して示したのが図一六である。これによると、一ツ瀬川と類似度が高い領域が、河口より南～5 kmの範囲の沖合にかけて存在する。大淀川から南にかけての沖合海域に、一ツ瀬川と類似度の高い領域が存在する。

以上の結果から、河川流域の底質と海域の底質との関

係は、領域[G1]：大淀川の影響を大きく受け、河口から北側に展開している領域、領域[G2]：清武川と加江田川の影響を受け、河口よりある範囲に止まっている領域、領域[G3]：一ツ瀬川の影響を受けている領域、領域[G4]：何れの河川の影響もあまり受けていないと思われる領域、領域[G5]：何れの河川とも類似度が高い領域という4グループにまとめることが出来る。ただし、南側沖合のG5の領域については、水深30 mの領域であり、当海域の波浪に対する底質の移動限界水深から見て、底質があまり移動しているとは考えられない。そのため、比較的古い堆積が存在し、全域に共通の特性をもった底質が堆積しているものと想像される。

3. 深浅測量図による海底地形の変動解析

海底地形変化を3次元的に把握するために、図一1で示された宮崎港の南北の海域で実施されている深浅測量の成果を基に、3次元の経験的固有関数解析を実施した(加藤ら, 1984)。この解析では、デジタル化されたデータをもとに、平均水深からの地形変化量 $\Delta h(x, y, t)$ を、次式のように時間成分と空間成分の積で表現するものである。

$$\Delta h(x, y, t) = \sum_{n=1} C_n(t) \cdot e_n(x, y) \dots\dots\dots (9)$$

このような解析法は、前述の底質分析結果の統計処理法

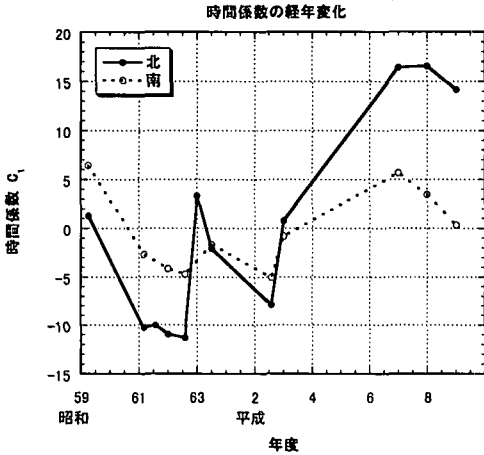


図-7 経験的固有関数法による海底地形変動の第1モードの時間係数；宮崎港の南北の海域

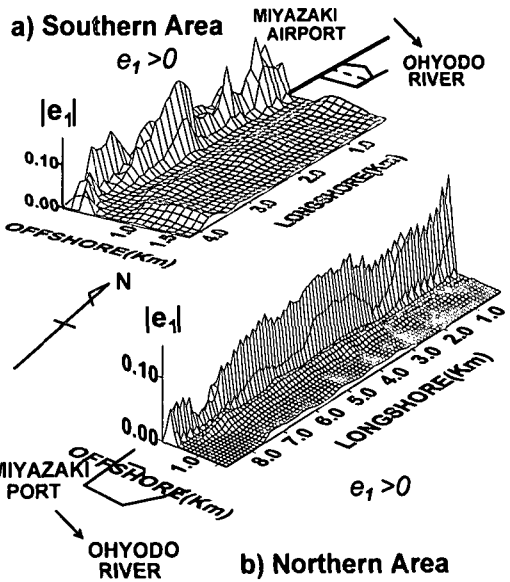


図-8 経験的固有関数法による海底地形変動特性第1モードの固有関数；宮崎港の南側と北側海域

と同様である。

図-7は宮崎港の南北の両海域での第1モードの時間係数 $C_1(t)$ であり、それぞれの寄与率は57%と35%でもっとも地形変動要因に寄与しているモードである。これによると、北側海域の時間係数の変動幅が大きいため、経年的な地形変動の幅が大きいたことが分かる。経験的固有関数法で求めた第1モードの固有関数をみると(図-8)、時間係数が増加傾向である時に侵食領域であることを示す正の記号の領域が広く分布していることから、近年宮崎海岸が全般的に侵食傾向であることが考えられる。この時期の地形変化の全般的な傾向は、河川からの排出土砂量の減少等によるものと考えられる。特に侵食傾向が宮崎港の北側海域でより強くみられていることは、この海域の主要な土砂の供給源である大淀川からの排出土砂の減少に加え、宮崎港の影響が一部出ているものと考えられる。前述の底質分析結果では、大淀川と侵食を受けた海域との底質の性質が類似しており、大淀川からの排出土砂の影響を強く受けている範囲が排出土砂の減少および一部沿岸の開発により、侵食として現れたことが推定される。また、図-7で南側、北側海岸ともに平成3年以降侵食傾向にあるのは台風9119号など大型台風の影響によるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、大水深を含む広域漂砂に関して底質分析という地質学的な手法を用いて調査を行なった。特に、

重鉱物分析結果から求められた重鉱物含有量データを経験的固有関数法に適用し、統計的に分析する手法を提案した。本研究で示した解析法を用いて、宮崎海岸で、漂砂の空間的な特徴を明らかにし、広域漂砂の特性を把握した。その結果、河川の底質特性と海域の底質特性の類似性から、大淀川から宮崎港の北側沿岸に漂砂が供給されていることが確認されるなど本海域でいくつかの漂砂特性が把握できた。ついで、宮崎海域での長期にわたる深淺測量図を用いて海底地形変動を解析し海底地形の変動の様子を通して、底質分析を用い、統計的な解析法で求められた漂砂特性の検証を行い、その有効性が確認できた。

参考文献

李 在炯・入江 功・村上啓介・佐藤慎司 (1998): 大水深域を含めた広域漂砂特性-底質特性情報の分析に着目して一, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 486-490.
 岡田博有・郭 曉利・大木公彦・早坂祥三 (1996): 鹿児島湾海底堆積物中の重鉱物分布特性, 九大理研報(地球惑星), 第19巻, 第2号, pp. 141-152.
 加藤一正・吉松 晃 (1984): 3次元の経験的固有関数法による深淺図解析法, 港研報告, 第23巻, 第2号, pp. 27-47.
 Mange, M. A. and H. F. W. Maurer (1992): Heavy minerals in colour, Chapman & Hall, 147 p.