

地球化学元素を用いた砂移動方向調査法に関する研究

熊谷 幸博*・水村 和正**・館 崇 晃***

1. 概 要

海岸構造物の設置による海浜変形, つまり, 漂砂による侵食や堆積の問題が多く発生しており, 海岸工学において, 漂砂は重要な研究課題の1つである。漂砂の調査手法については数値解析, 過去と現在の深浅測量図や航空写真の比較, 蛍光砂の流れの解析など種々の方法はあるが, 構造物周辺での局所的な流れもあり, その移動方向を客観的に決定することは容易なことではない。

これに対して, 地球化学の分野では, 砂試料を構成する地球化学元素の比を求め, 2つの試料の相関度を計算する方法が, 相関行列法により行われている (Anders, 1972; 木羽ら, 1980)。この方法を海岸や河川に適用すると, それらの間の相関度の計算から砂の間の親近度が求められ, 移動してきた砂の源が決定できる。筆者らは, これまでに地球化学元素を用いたこの調査手法を実際の河川, 海岸および港に適用し, 研究を重ねてきた (水村ら, 1994a, b, 1995, 1996, 1997)。

本研究は, 砂の移動による侵食や堆積の問題を抱える海岸と港の2カ所を調査・研究の対象とし, これまでより広い範囲で砂試料を採取し, 相関行列法を適用して, この漂砂の移動方向調査法の精度について検討を行ったものである。研究で用いた地球化学元素は, 珪素 (Si), アルミニウム (Al), カリウム (K), カルシウム (Ca), 鉄 (Fe), 鉛 (Pb), 砒素 (As), チタン (Ti), マグネシウム (Mg), マンガン (Mn), 亜鉛 (Zn), 銅 (Cu), アンチモン (Sb), ニッケル (Ni), コバルト (Co), クロム (Cr) である。

なお, 地球化学元素を用いた環境関係の研究として, Crecelius (1975) らの重金属移動の議論および Dams (1970) の大気汚染分布の研究がある。また, Hopke ら (1976) の湖における人間の影響の研究の他, 日本では, 公害問題にからんで, 多くの問題が議論されている (渋谷, 1979)。

2. 研究の方法

海域から採取した砂試料を乾燥炉で十分に乾燥後, 粉砕機で粉末にし, 専用アルミリングに詰め圧縮し, 円筒形の供試体 (直径約 5 cm, 高さ約 3 mm) を作製する。

次に, この供試体を蛍光 X 線装置により分析し, 砂試料を構成する元素とその成分比を決定する。測定した元素の数は, KCNPS (Kilo Count Number Per Second) で表示する。この値は, 同じ重量の同一砂試料の異なる元素同志は比較できないが, 異なる砂試料の同一元素では, 含有量の大小を比較することは可能である。

ここで, 砂試料の濃度比 x_{ij} を各々濃度を各濃度で割って求め, 対称行列 (濃度比行列) を得る。例えば, 蛍光 X 線分析結果より, A 点の砂試料について, 次式のような対称行列 (濃度比行列) を計算する。(この場合は, Si, Al, K, Ca, Fe の 5 元素である。)

$$\{x_{ij}\} = \begin{bmatrix} (Si/Si)_A & (Al/Si)_A (Al/Al)_A & (K/Si)_A (K/Al)_A (K/K)_A & (Ca/Si)_A (Ca/Al)_A (Ca/Ca)_A & (Fe/Si)_A (Fe/Al)_A (Fe/K)_A (Fe/Ca)_A (Fe/Fe)_A \\ (Al/Si)_A (Al/Al)_A & (K/Si)_A (K/Al)_A (K/K)_A & (Ca/Si)_A (Ca/Al)_A (Ca/Ca)_A & (Fe/Si)_A (Fe/Al)_A (Fe/K)_A (Fe/Ca)_A (Fe/Fe)_A \\ (K/Si)_A (K/Al)_A (K/K)_A & (Ca/Si)_A (Ca/Al)_A (Ca/Ca)_A & (Fe/Si)_A (Fe/Al)_A (Fe/K)_A (Fe/Ca)_A (Fe/Fe)_A \\ (Ca/Si)_A (Ca/Al)_A (Ca/Ca)_A & (Fe/Si)_A (Fe/Al)_A (Fe/K)_A (Fe/Ca)_A (Fe/Fe)_A \\ (Fe/Si)_A (Fe/Al)_A (Fe/K)_A (Fe/Ca)_A (Fe/Fe)_A \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

A 点と B 点の試料の比較には, 式 (1) の行列を 2 砂試料について計算して $\{x_{ij}(AB)\}$ を求める。これは, 2 点間の濃度比行列の各要素について, その比をとったものである。そうすると, 次式 (2) が求められる。

$$\{x_{ij}(AB)\} = \begin{bmatrix} \frac{(Si/Si)_A}{(Si/Si)_B} & \frac{(Al/Si)_A (Al/Al)_A}{(Al/Si)_B (Al/Al)_B} & \frac{(K/Si)_A (K/Al)_A (K/K)_A}{(K/Si)_B (K/Al)_B (K/K)_B} & \frac{(Ca/Si)_A (Ca/Al)_A (Ca/Ca)_A}{(Ca/Si)_B (Ca/Al)_B (Ca/Ca)_B} & \frac{(Fe/Si)_A (Fe/Al)_A (Fe/K)_A (Fe/Ca)_A (Fe/Fe)_A}{(Fe/Si)_B (Fe/Al)_B (Fe/K)_B (Fe/Ca)_B (Fe/Fe)_B} \\ \frac{(Al/Si)_A (Al/Al)_A}{(Al/Si)_B (Al/Al)_B} & \frac{(K/Si)_A (K/Al)_A (K/K)_A}{(K/Si)_B (K/Al)_B (K/K)_B} & \frac{(Ca/Si)_A (Ca/Al)_A (Ca/Ca)_A}{(Ca/Si)_B (Ca/Al)_B (Ca/Ca)_B} & \frac{(Fe/Si)_A (Fe/Al)_A (Fe/K)_A (Fe/Ca)_A (Fe/Fe)_A}{(Fe/Si)_B (Fe/Al)_B (Fe/K)_B (Fe/Ca)_B (Fe/Fe)_B} \\ \frac{(K/Si)_A (K/Al)_A (K/K)_A}{(K/Si)_B (K/Al)_B (K/K)_B} & \frac{(Ca/Si)_A (Ca/Al)_A (Ca/Ca)_A}{(Ca/Si)_B (Ca/Al)_B (Ca/Ca)_B} & \frac{(Fe/Si)_A (Fe/Al)_A (Fe/K)_A (Fe/Ca)_A (Fe/Fe)_A}{(Fe/Si)_B (Fe/Al)_B (Fe/K)_B (Fe/Ca)_B (Fe/Fe)_B} \\ \frac{(Ca/Si)_A (Ca/Al)_A (Ca/Ca)_A}{(Ca/Si)_B (Ca/Al)_B (Ca/Ca)_B} & \frac{(Fe/Si)_A (Fe/Al)_A (Fe/K)_A (Fe/Ca)_A (Fe/Fe)_A}{(Fe/Si)_B (Fe/Al)_B (Fe/K)_B (Fe/Ca)_B (Fe/Fe)_B} \\ \frac{(Fe/Si)_A (Fe/Al)_A (Fe/K)_A (Fe/Ca)_A (Fe/Fe)_A}{(Fe/Si)_B (Fe/Al)_B (Fe/K)_B (Fe/Ca)_B (Fe/Fe)_B} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

この行列の各要素について, 次の条件

* 正会員 真柄建設(株)技術研究所 副課長
** 正会員 Ph.D. 金沢工業大学教授 土木工学科
*** 正会員 金沢工業大学大学院 工学研究科

$$1/M \leq x_{ij}(AB) \leq M \quad \dots\dots\dots (3)$$

を満たす要素の数を対角成分を除いた行列要素の数で除した値 Z_{AB} とし、与えられた試料が、A, B, C, D, E ならば、相関行列は次のようになる。

$$\{Z_{ij}\} = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ Z_{AB} & 1 & & & \\ Z_{AC} & Z_{BC} & 1 & & \\ Z_{AD} & Z_{BD} & Z_{CD} & 1 & \\ Z_{AE} & Z_{BE} & Z_{CE} & Z_{DE} & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、この行列の各要素すなわち相関数は1と0の間である。ただし、 M の値は一般的に、1.3または1.5が推奨されている。また、 M の値を選定する基準として、相関数が0.33より大きいものの数が、10%以上になるように設定する。なお、濃度とKCNPSを試料重量で除したものはほぼ比例関係であることから、本研究ではKCNPSを試料重量で除したものをを用いている。

この行列は、各試料の適合度を表しており、式(2)の行列が Z_{AB} に帰着する。2つの試料が全く同じならば、相関数は1となる。以上の方法を砂試料に適用することによって、各2点間の相関数が求められる。

3. 現地への適用

研究対象とした地域は、石川県の名舟漁港と安宅海岸である。名舟漁港では防波堤建設後、安宅海岸では導流堤と離岸堤建設後、それぞれ砂の堆積・侵食の問題が発生している。研究では、まず調査区域の約100ポイントから採取した砂試料の蛍光X線分析と各試料間の相関数を計算し、砂の区分を行った。

図-1に、安宅海岸周辺の砂採取位置と蛍光X線分析と相関行列の計算で得られた各試料間の相関数から決定される海域の砂の地球化学的区分を示す。同様に、図-2が名舟漁港周辺での採取位置と砂の区分である。これらの図から海域の近いポイントを移動する砂でも、地球化学元素の構成比では、大きく異なったものであることがわかる。

図-3に1985年4月と1995年5月に行われた安宅海岸の深浅測量結果を基にしたコンター比較図を示す。図中の点は堆積を、斜線は侵食を表している。河口の左岸側の離岸堤を建設後、離岸堤の沖側と右岸側の海岸線で侵食が発生し、海岸線が後退している。また、右岸側の沖では堆積が進行している。さらに、左岸側の離岸堤背後ではトンボロ形成されている。しかし、このコンター

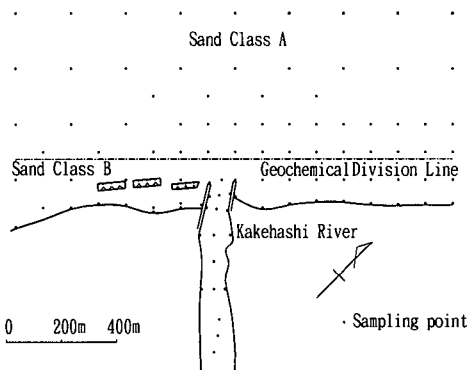


図-1 安宅海岸の砂採取位置と砂区分

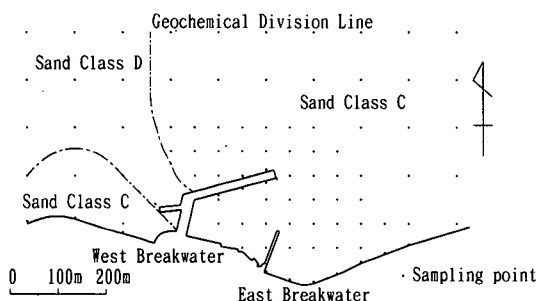


図-2 名舟漁港の砂採取位置と砂区分

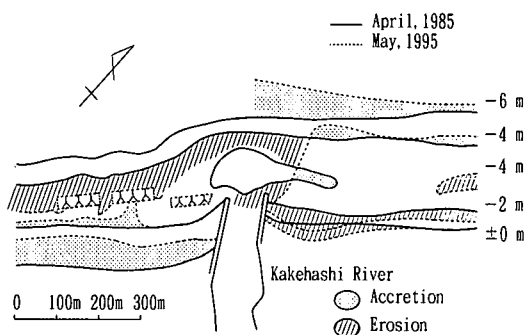


図-3 安宅海岸のコンター比較図

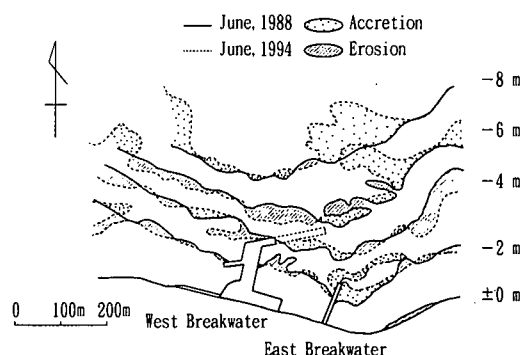


図-4 名舟漁港のコンター比較図

比較図だけでは砂の移動方向は見い出せない。

同様に、図-4に1988年6月と1994年6月に行われた名舟漁港の深浅測量結果を基にしたコンター比較図を示す。この図によれば、西防波堤を延長後、この防波堤背後と東防波堤周辺、つまり、港の入り口部に堆積が発生している。また、沖合いは堆積と侵食が不規則に、かつ複雑に発生している。このコンター比較図からも漁港入り口に堆積してくる砂の移動方向を推定することは困難である。

4. 漂砂の移動方向と海底の地形変化

図-5は、蛍光X線分析で測定された単位重量あたりのKCNPSの値が移動の上流から下流に向かうに連れて減少するものとして予測した安宅海岸の移動方向である。なお、この図は試料間の相関数が0.8以上のものを対象とし、各試料間の単位重量あたりのKCNPSの値が16元素のうち14元素以上が減少もしくは増加しているもののみ示している。矢印は、単位重量あたりのKCNPSの減少する方向である。

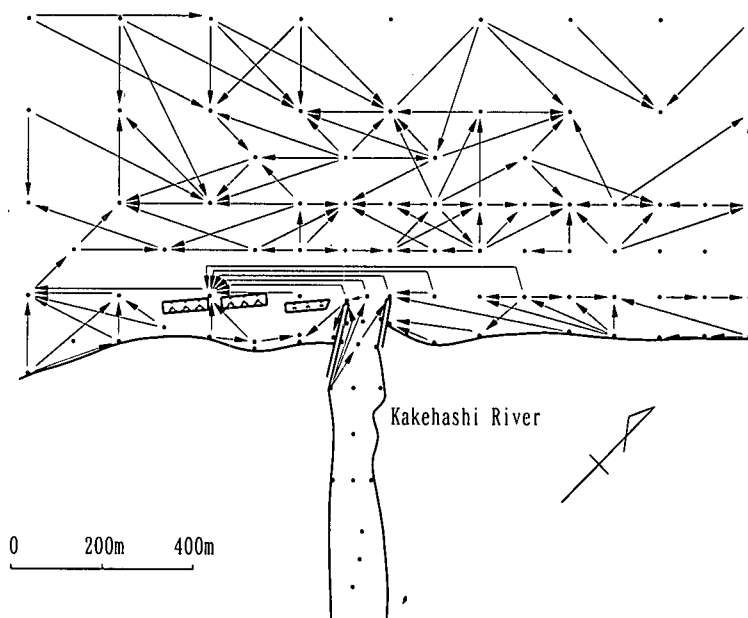


図-5 安宅海岸の砂移動方向

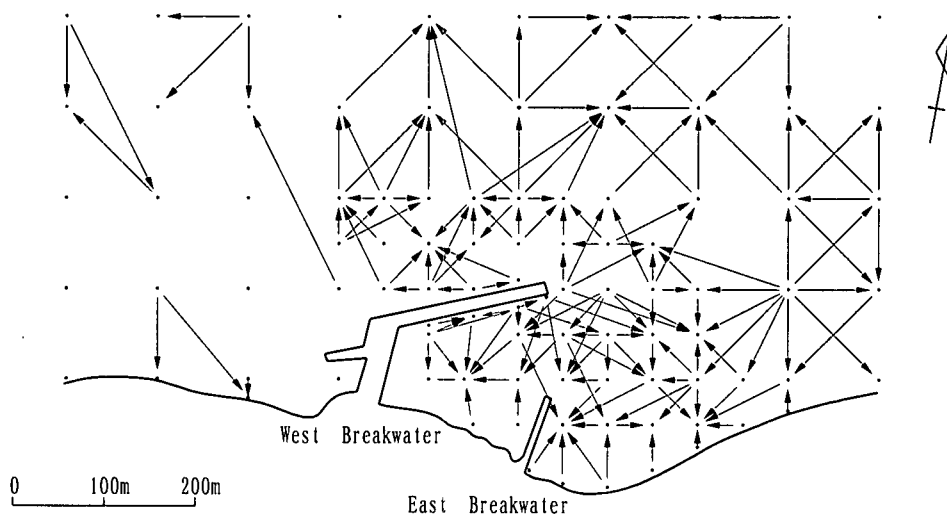


図-6 名舟漁港の砂移動方向

これによると、海岸部分(図-1のClass Bの砂)の矢印は、その大半が河口の右岸側から左岸側へ向かっており、沖合い(図-1のClass Aの砂)ではその向きは不規則である。図-1に示したように沖合いと海岸部分では砂が異なったものであることから、離岸堤および導流堤の建設後、河口の右岸側から左岸側へ砂が移動を始めたことがわかる。また、沖合いでも矢印が多く集まるポイントは、図-3で示したコンター比較図の堆積区域もしくは堆積区域の近くであるので、現在、堆積が進行していると推定される。

図-6は、図-5と同様にして予測した名舟漁港周辺の砂の移動方向である。漁港付近で矢印の集中するポイントは、東防波堤背後と港の入り口と中央部であり、堆積の進行がうかがえる。また、これらの砂は、漁港の東側の海岸および沖合いから移動してきていることがわかる。

さらに、沖合いで矢印が多く集まるポイントは、安宅海岸の場合と同様に、図-4で示したコンター比較図の堆積地域、もしくは、その付近である。この位置のずれは、コンター比較図が長期間で侵食・堆積の判断を行っているのに対し、地球化学元素を用いる本調査法は、調査時の砂の動きを示すためと考えられる。

図-7および図-8は、砂を採取した各ポイントの地球化学元素の単位重量あたりのKCNPSの値の減少および増加から推定した安宅海岸および名舟漁港の海底地形の変化状況である。これらの図は砂の区分を行わずに示しているが、図-7では、河口の右岸側と左岸側でその状況が全く異なること、図-8では、港の東側沖合いと東防波堤周辺へ堆積が集中していることがわかる。

これら2つの地域の調査結果は、地球化学元素を用いる本調査法で、その海域の調査時点での漂砂の移動方向が求められることを示している。

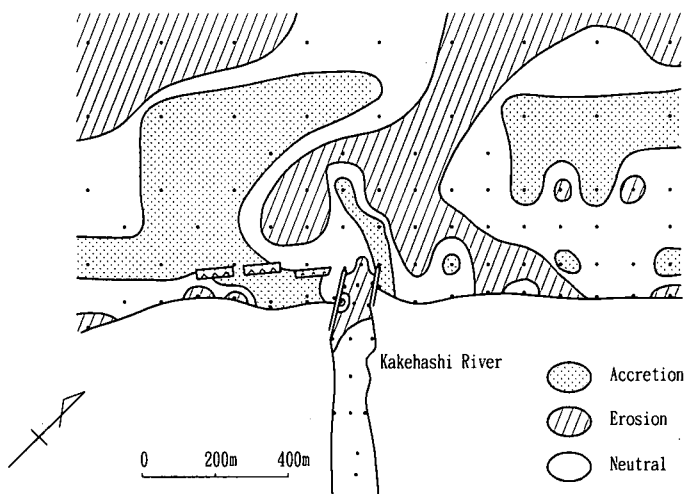


図-7 安宅海岸の海底地形変化

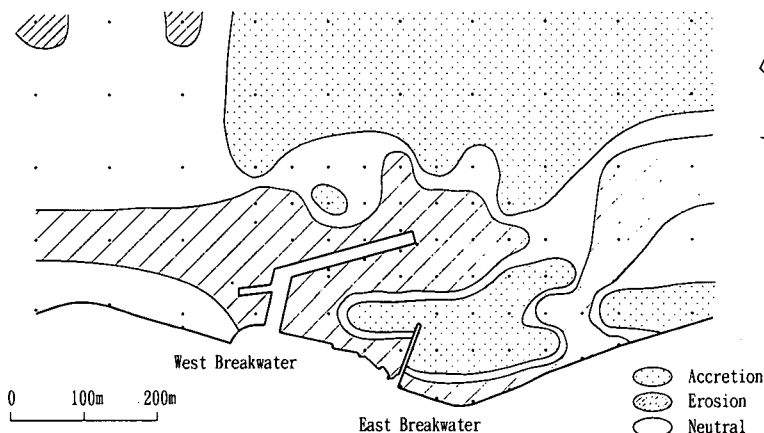


図-8 名舟漁港の海底地形変化

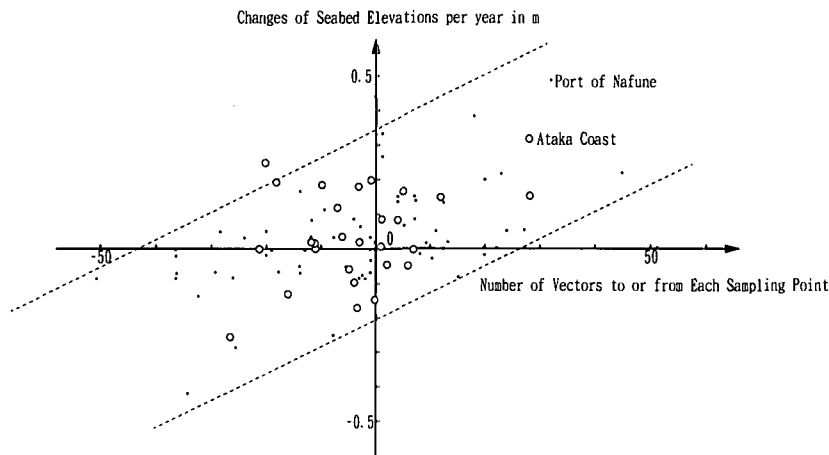


図-9 砂移動方向の矢印との地形変化量の関係

図-9に、安宅海岸および名舟漁港の相関数0.8以上のポイントにおいて、そのポイントから出ている、もしくは、集まっている矢印(方向ベクトル)の総本数と深浅測量結果を基にしたそのポイントの地形変動量の関係を示す。横軸が矢印の数、縦軸が深浅測量図より読み取った地形の変化量である。矢印がそのポイントから出ていくものを-、そのポイントに集まってきているものを+としている。この図から、海底地形の変化量と矢印の数は、ほぼ比例関係にあると考えることができ、言い換えれば、堆積・侵食量そのものも予測できることを示している。

5. ま と め

地球化学元素を用いた漂砂調査手法を2つの海域に適用した結果、漂砂の移動方向を表現できることが確認された。また、求められた砂の移動方向とその矢印の数により、海底の侵食・堆積を表現すると、最新の海底地形変動を示すことが、同地域の深浅測量に基づく地形変化との比較により確認できた。

現在、調査の主体となっている数値解析では、現状の海域に適用する際に、境界条件の設定、パラメータの決定などに多くの問題を抱えている。本調査法は、海岸構造物を計画する海域の調査の際に砂を採取すれば、簡単に短時間な解析をすることで砂の移動状況を表現できることから、有効に活用できると考えられる。今後、さらに多くの海域に適用し、その精度を高めていきたいと考えている。

最後に、本研究にあたり2つの海域での砂採取については、テトラ株式会社および喜多組(株)に御協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 木羽俊泰・松本 健 (1980): 水質汚染の機構と解析, 日本地球化学学会編, 産業図書, pp. 53-83.
- 渋谷政夫 (1979): 土壌汚染の機構と解析, 日本地球化学学会編, 産業図書, pp. 38-71.
- Anders, O. U. (1972): Ratio matching—a statistical aid for discovering generic relationship among samples, *Analytical Chem.*, 44 (12), pp. 1930-1933.
- Cullity, B. D. (1978): *Elements of x-ray diffraction*, Mat-sutranslator, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Mass., pp. 87-188.
- Crecelius E. A., Bothner M. H., Carpenter R. (1975): Geochemistries of arsenic, antimony, and related elements in sediments of Puget Sound, *Environ Sci Technol* 9 (4), pp. 325-333.
- Dams R., Robbins J. A., Rahn K. A., and Winchester J. W (1970): Quantitative relationships among trace elements over industrialized NW Indiana., *IAEA Symposium of Nuclear Techniques Environ, Pollution*, pp. 139-157.
- Hopke P. K., Ruppert D. F., Clute P. R., and Metzger W. (1976): Geochemical profile of Chautauqua Lake sediments, *J. Radioanal Chem* 29, pp. 39-59.
- Mizumura, K., Nishimoto, T., and Yamamoto, T. (1994a): Analysis of sand movement on Noto Coast by geochemical method, *Proc. of Hydr. Engrg., ASCE*, 2, pp. 923-927.
- Mizumura, K., Nishimoto, T., and Yamamoto, T. (1994b): Analysis and classification of coastal sand by geochemical method, *Proc., 9th Conge of APD-IAHR, Dept of Civ. Engrg., National Univ. of Singapore*, pp. 35-41.
- Mizumura, K., Nishimoto, T., Yamamoto, T., Tsutsui, H., (1995): Prediction method of sand-movement direction in the sea by geochemical elements, *J. Envir. Geol.*, 25, pp. 100-108.
- Mizumura, K., Nishimoto, T., Yamamoto, T., Kumagai, Y., (1996): Prediction method of sand-movement direction in rivers by geochemical elements, *J. Envir. Geol.*, 28 (2), pp. 88-98.
- Mizumura, K., Kumagai, Y., Yamamoto, T., Shimazaki, H., and Takumi, K., Nakanishi, T., (1997): Determination of Sedimentary Source in the Port of Hashidate by Using Geochemical elements, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE*, Vol. 123, No. 2, pp. 45-56.