

地球化学元素を用いた漂砂調査手法に関する研究

Study on Prediction method of sand-movement direction in sea by Geochemical Elements

熊谷幸博*・水村和正**

Yukihiro Kumagai, Kazumasa Mizumura

To estimate and find the sedimentary sources near and in the fishery port of Hashidate of which breakwater arrangement is very complex, the ratio of the geochemical elements to construct the sand is obtained by the X-ray fluorescent spectrcscopy (abbreviated by XRF). The method of ratio matching gives the correlation number which is different from the statistical meaning and shows the similarity between two sand samples in geochemical distribution. In a result, the sedimentary sand in the port is found to be similar to the sand on Hashidate swimming beach. So the sedimentary source of the port is considered to be sand from Hashidate swimming beach. The comparisons of shoreline changes at Hashidate swimming beach and contour lines near the port show that the result is very reasonable. This proves that the method of ratio matching using geochemical elements in the sand is very reliable for finding the sedimentary source.

keywords : sand-movement, ratio matching, geochemical elements

1. はじめに

自然海岸や複雑な海岸構造物の周辺では、砂の移動による侵食や堆積が問題となっている例が非常に多く見られる。現在、日本の海岸工学では、砂の移動方向の予測や汀線位置と水深変化の決定は重要な研究課題の1つである。特に、砂の移動方向の決定は最近、最も重要となっている。

石川県でもほとんどすべての漁港で漂砂問題が発生している。漂砂の移動方向は、普通、過去の航空写真や深浅測量図の比較、蛍光砂の流れの解析、相似則にもとずいた水理模型実験、現地の単純な構造物（例えば、突堤、防波堤）周辺の汀線変化等によって予測するなどの手法が上げられるが、資料が十分に整っていなかったり、仮に整っていても漂砂の移動方向を決定することは容易なことではない。

一方、地球化学や環境工学の分野では、汚染試料に含まれる地球化学元素や重金属元素の含有量を測定し、試料の相関度を相関行列法を用いて計算し、大気、河川、湖沼、海洋中の重金属元素の移動形態や汚染物質の源を調査する方法が用いられている。

本研究は、この地球化学元素による分析手法を漂砂に適用し、研究対象とした海域で採取した砂試料の蛍光X線分析と相関行列の計算により、移動する砂そのものをトレーサーとして漂砂の移動方向を決定することが可能かどうかを試み、より経済的で信頼性の高い漂砂解析手法の開発を目的としたものである。

2. 蛍光X線分析と相関行列

この手法を用いるためには、砂サンプルの採取および蛍光X線装置による砂サンプルの分析が必要となる。

まず、移動方向を知りたい海域から位置測量を実施して、1カ所 50g程度の砂サンプルを採取する。そして、この砂サンプルを乾燥炉で十分に乾燥後、粉碎機で粉末にし、専用アルミリングに詰め圧縮し、円筒形の供試体（直径約 5cm, 高さ約 3mm）を作製する。この供試体は蛍光X線装置のためのものである。蛍光X線装置では、この供試体にいろいろな角度からX線をあて、元素から飛びだしてくる電子の数をシンチレーション計で測定し、元素とその成分比を決定する。測定した元素の数は、K C N P S（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士は比較できないが、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。なお、今回使用した蛍光X線分析装置はSHIMAZU-320である。

次に、砂試料の濃度比 x_{ij} を各々濃度を各濃度で割って求め、対称行列を得る。これを地球化学の分野では濃度比行列と呼んでいる。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。（本研究では、Si, Al, K, Ca, Feの5元素を用いている。）

* 正会員 真柄建設株式会社技術研究所 (920 石川県金沢市彦三町1丁目13番43号)

** 正会員 金沢工業大学土木工学科

$$\{x_{ij}\} = \begin{pmatrix} (Si/Si)_A \\ (Al/Si)_A (Al/Al)_A \\ (K/Si)_A (K/Al)_A (K/K)_A \\ (Ca/Si)_A (Ca/Al)_A (Ca/K)_A (Ca/Ca)_A \\ (Fe/Si)_A (Fe/Al)_A (Fe/K)_A (Fe/Ca)_A (Fe/Fe)_A \end{pmatrix} \quad (1)$$

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、それらから、 $\{x_{ij}(AB)\}$ 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、次の式(2)が求められる。

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

この行列の各要素について、次の条件

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

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。

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

ここで、この行列の各要素すなわち相関度は1と0の間である。ただし、 M の値は一般的には、1.3または1.5が推奨されている。ここで、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ので、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、相関度は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点間の相関度が求められる。相関度が1または1に近ければ、その2点間の砂はほぼ同一成分よりなっており、同じものと解釈できる。逆に、0に近ければ、2点間の砂は全く異なるものである。相関度は M の値によって変化し、この値が小さければ減少し、大きければ増加する。 M の値を選定する基準として、相関度が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。

3. 海域への適用

本研究の対象としたのは、図-1に示す石川県金沢市南西に位置する橋立漁港である。橋立漁港は、日本海の冬期風浪が終了する春に砂が堆積し漁港が埋没するために、毎年、浚渫が行なわれており、漂砂を阻止するために防波堤が計画されている。このため、防波堤の計画では漂砂源を明確に特定することが必要となる。

橋立漁港は汀線の凸型の付近に建設されているうえ、沖を対馬海流が流れていることから、汀線に沿った流れが剥離し、複雑な流れを形成していると考えられる。また、本漁港は、波浪による漁船保護の理由により、図-2に示すように、非常に複雑な防波堤の港内配置となっている。したがって、港内及び周辺の砂の移動も非常に複雑となっていると考えられる。そのため、従来の波浪のみの解析では適格な漂砂の解析は困難である。

研究の目的は、地球化学元素を用いた調査手法をこの海域に適用し、漂砂源の特定、つまり漂砂の移動方向を明確に表現できるかどうかということである。蛍光X線分析を行う砂試料は、漁港付近の調査の際、ダイバーにより図-1および図-2の番号を付した46ポイントより採取されたものである。研究ではこの砂試料の蛍光X線分析と各砂試料間の相関数の計算を行った。

表-1 各ポイントのKCNPSと相関数

採取位置 (1)	Si (2)	Al (3)	Ca (4)	K (5)	Fe (6)	相関数 (7)
1	14.7114	1.4698	0.3298	0.5837	12.8443	0.4
2	15.8104	1.6174	0.5653	0.6485	16.5894	0.6
3	15.9139	1.4646	0.3150	0.5833	12.2250	0.2
4	14.9547	1.4005	0.3399	0.5394	12.7690	0.4
5	13.9746	1.4994	0.6752	0.6113	14.4449	0.4
6	13.3760	1.6346	0.6267	0.6218	15.2090	0.6
7	12.0359	1.3008	0.3548	0.5182	10.3323	0.9
8	11.6095	1.2859	0.7294	0.5591	10.6032	0.5
9	13.9721	1.6690	0.5272	0.6261	14.7846	0.6
10	9.7905	1.0179	0.3155	0.3683	7.9372	0.9
11	13.2773	1.2790	0.2953	0.4825	11.5992	0.4
12	13.9257	1.7827	0.6643	0.6698	16.3095	0.6
13	18.3920	1.6683	0.5723	0.6617	11.0046	0.8
14	11.2528	1.2825	0.6139	0.4850	11.6097	0.4
15	11.6453	1.2173	0.4176	0.4591	9.2758	1.0
16	14.0385	1.6300	0.5906	0.6376	17.4608	0.6
17	14.1783	1.7353	0.8368	0.6710	13.9111	0.7
18	13.7413	1.5322	0.4330	0.6163	14.0778	0.6
19	7.6914	1.2181	2.9830	0.5213	17.9106	0.2
20	8.8732	1.5949	2.2213	0.5565	18.5041	0.2
21	14.1888	1.4841	0.3870	0.5572	12.1231	0.7
22	9.7399	1.1353	0.3532	0.4187	8.4859	1.0
23	14.3577	1.6835	0.7959	0.6630	17.3887	0.4
24	13.0138	1.7177	0.8674	0.7018	18.7781	0.4
25	10.2079	1.5546	2.7445	0.6966	15.5704	0.2
26	14.0848	1.8318	0.7838	0.6860	18.6110	0.4
27	6.3380	0.9343	6.6608	0.4358	11.6945	0.2
28	6.5496	0.7046	2.3248	0.3192	7.0062	0.3
29	11.4749	1.6629	0.8202	0.6164	22.7888	0.3
30	7.8556	1.4548	0.9015	0.5377	24.9726	0.1
31	12.6859	1.2751	0.4974	0.5181	10.3986	1.0
32	14.2710	1.4625	0.4399	0.5350	9.2013	1.0
33	12.6563	1.3216	0.3821	0.5032	7.3803	0.9
34	15.4198	1.3742	0.4250	0.5919	8.5225	0.7
35	11.0056	1.2673	0.9815	0.5493	11.3967	0.4
36	9.1280	1.4718	4.0592	0.6060	20.2962	0.1
37	16.3838	1.5335	0.3961	0.5740	13.7472	0.4
38	13.3545	1.0232	1.2892	0.4393	7.9147	0.3
39	15.2321	1.5745	0.8269	0.5786	13.2082	0.4
40	14.3036	1.1264	0.3025	0.4257	10.6852	0.4
41	16.3690	1.4065	0.4289	0.6498	12.5656	0.6
42	11.1411	1.6293	0.9889	0.6240	20.0976	0.4
43	11.4778	1.4072	0.4238	0.5580	8.9217	1.0
44	13.4572	1.2785	0.2648	0.4790	10.3266	0.4
45	13.9274	1.6243	0.4237	0.6044	14.2042	0.6
46	12.8440	1.5288	0.4621	0.5735	12.4155	0.9

4. 蛍光X線分析および計算結果

表-1に、蛍光X線分析により得られた各ポイントにおける砂試料の単位重量当たりのKCNPSの値と計算により求められたポイント43との相関数を示す。計算に用いた元素は、珪素(Si)、アルミニウム(Al)、カルシウム(Ca)、カリウム(K)、鉄(Fe)である。

単位重量当たりのKCNPSの値に着目すれば、各砂試料の特徴は地球化学元素のカルシウム(Ca)と鉄(Fe)により表現できる。たとえば、ポイント19、20、25、27、28、36および38などはカルシウム(Ca)の値が非常に高く、海底の貝殻などの混入を示しており、また、砂試料の鉄(Fe)は海水の塩素に反応し溶脱していくと考えられるので、ポイント29、30、36および42のように、鉄(Fe)の多いものは河川水の多く供給される区域の砂を示していることになる。

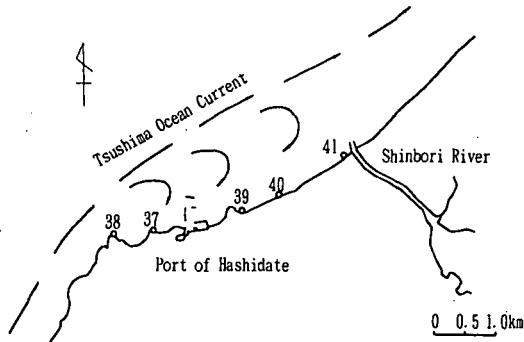


図-1 橋立漁港の周辺図と砂採取地点

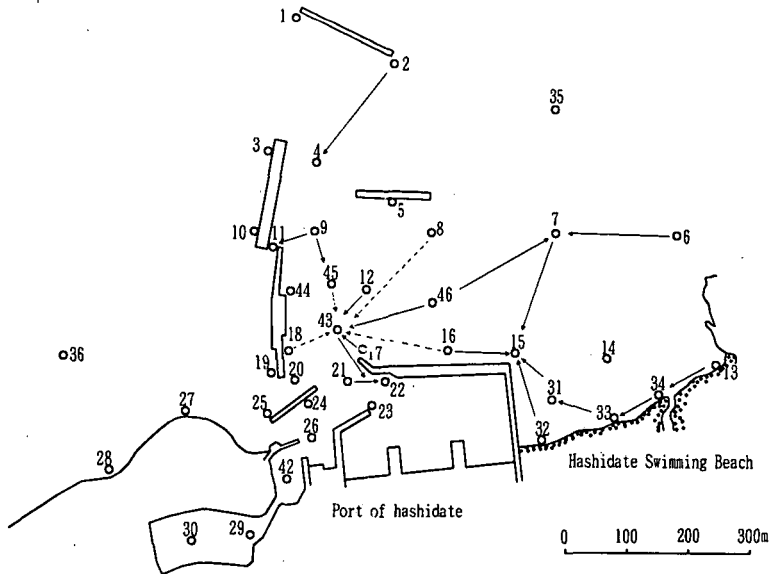


図-2 砂採取地点および予測した砂移動方向

5. 漂砂の移動方向の判定

港内漂砂が最も顕著に堆積する地域は図-2に示したポイント43付近である。ここで、表-1に示す相関行列の計算により求められた相関数から、漁港内のポイント43と相関性が高いポイントは、7、10、13、15、22、31、32、33および46である。このとき、これらの相関数はすべて0.9か1.0である。ここで、計算された相関数が1もしくは1に近いならばこれらは同一のものであり、同一であるにも関わらず海域で採取された位置が異なるならば、砂試料が移動している可能性があることになる。まず、ポイント43と漁港西側のポイント27、28および36の砂試料は相関性が0.2、0.3、0.1と低いことから、これらの間で砂の移動は行われておらず、漁港西側の砂は漂砂源ではないことが分かる。また、相関数がほぼ1であるポイント7、15、46の位置は漁港内であり、ポイント31、32、33は橋立海水浴場の砂であることから、これら漁港内と海水浴場の間で砂の移動があることを示している。さらに、ポイント22は漁港内の砂であり、他に供給するポイントが存在しないことから、ポイント43との間で砂の移動があると推定できる。

ここで、砂の移動方向を示唆するものとして蛍光X線分析によって得られた単位重量当たりのKCNPSの値に着目する。海域を移動する砂は、海水その他との反応によりそれを構成する地球化学元素に減少（もしくは増大）するといった一定の勾配をもった変化が生じるはずである。これは、空気中での岩石の風化で、地球化学元素の減少が認められることと同様である。図-2の各ポイント間の矢印は、砂の上流から下流への移動とともに蛍光X線分析で測定された5元素のKCNPSの値が減少するものとして予測した漁港及び周辺の砂の移動方向である。実線で示す矢印は蛍光X線分析のKCNPSの値が5元素とも減少しているものであり、点線で示す矢印はその大多数が減少しているものである。

これによると、矢印が集中するポイントは漂砂の堆積地点であるポイント43付近であり、港内および周辺から砂が移動してきていることがわかる。また、ポイント15にも、橋立海水浴場付近から砂が移動している。ポイント15と43で採取された砂の相関数は1であるので、両者は全く同じ砂である。すなわち、ポイント43の砂の源は、橋立海水浴場である。これが地球化学元素を用いた調査法により求められた港内への砂移動方向である。

6. 深浅測量および航空写真からの検証

この結論を検証するために、本研究では深浅測量図と航空写真を用いた。図-3に1964年と1979年の深浅測量結果から求められた ± 0 mおよび-5mの海底地形を示す。この図によれば、西防波堤の建設後、その背後にトンボロが形成されているのが確認できる。また、この砂は海水浴場の東側の汀線が大きく後退していることから、海水浴場およびその東側の海域から西側へ移動してきたものである。同様に、図-4に1979年と1994年の深浅測量結果から求められた ± 0 mおよび-5mの海底地形を示す。この図では時間経過とともに、前述したトンボロが北東防波堤の背後にまで到達していることがわかる。海水浴場の汀線は、ほぼ平衡状態になっているが、この沖では洗掘が進行している。

さらに、図-5に航空写真から求めた海水浴場付近の汀線変化を示す。汀線は防波堤建設に後を追うように東側が特に後退しており、このことは深浅測量図の比較結果とほぼ一致している。図-6は橋立漁港に近い福井港と輪島港での来襲波浪のエネルギーの方向分布である。橋立漁港とこれら2つの港の来襲波浪のエネルギー分布がほぼ等しいとすれば、橋立漁港は年間を通じて、NWからWNWが卓越しているものと考えられる。

これは西防波堤から東防波堤背後へと形成されるトンボロと符号することになる。これらのことは、すべて蛍光X線分析と相関行列の計算により得られた漂砂の移動方向が正しいことを裏付けている。

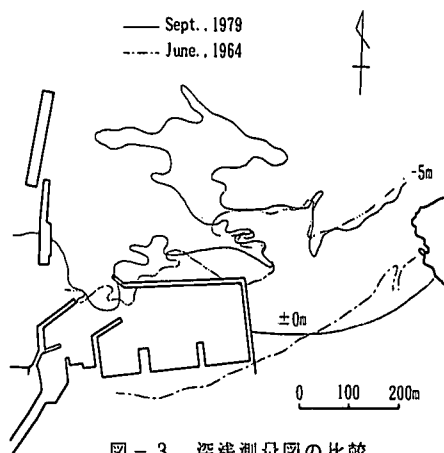


図-3 深浅測量図の比較

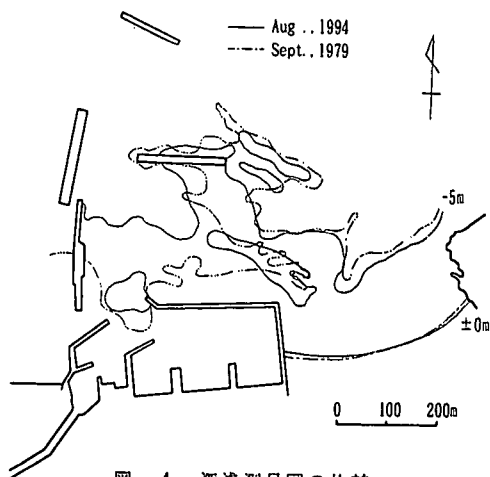


図-4 深浅測量図の比較

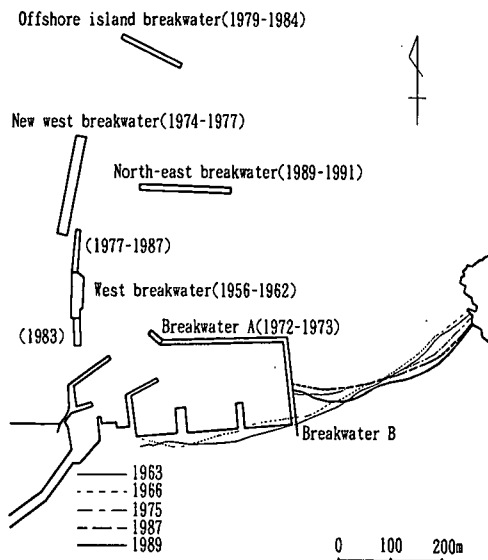


図-5 航空写真による汀線変化の比較と各防波堤建設時期

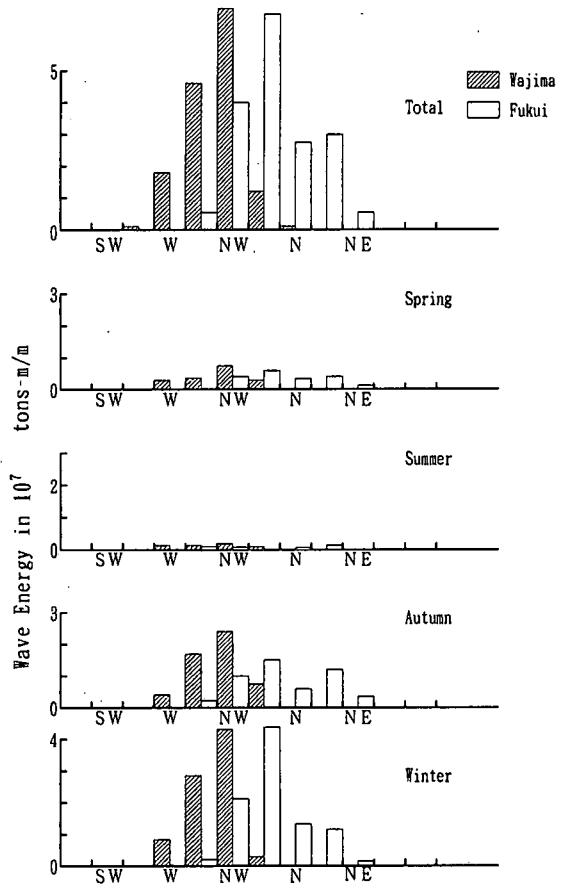


図-6 輪島港と福井港の方位別波浪エネルギー

7. まとめ

現地で採取した砂試料に地球化学元素を用いた漂砂調査手法を適用した結果、防波堤の港内配置が非常に複雑な本漁港においても最新の砂の移動方向を砂そのものをトレーサーとして推定することが可能であることがわかった。また、求められた砂の移動方向を深浅測量図や航空写真からの推定と比較した結果、ほぼ一致しており、漂砂調査法として利用できる可能性が高いと考えられる。

現在、海岸構造物の建設では、パーソナルコンピュータの発達により建設による影響を数値解析で求めることが主流となっている。しかし、解析する上での境界条件の設定などは設計者独自の判断であり、その結果が実際と一致しない不都合も生じている。本調査法は構造物を計画する海域の深浅測量の際に海域の砂を採取し、簡単な解析をすることで砂の移動方向が安価に推定できることから、解析精度を高める上で十分な効果を発揮できるものと期待できる。ただ、この調査法で得られる砂の移動方向はその時点のものであるため、波浪に大きな季節変動のある場合などは移動方向が変化するので測定回数を増やすこと等が必要となる。最後に、本研究における砂サンプルの採取についてはテトラ株式会社に協力していただいた。ここに記して深謝いたします。

〔参考文献〕

- 1)水村和正, 西本俊晴, 上田信二, 松岡明美: 鳴き砂の蛍光X線分析による分類と解析, 第49回土木学会年次学術講演概要集, pp868-869
- 2)水村和正, 西本俊晴, 筒井弘之, 松岡明美: 地球化学元素を利用した漂砂方向の決定方法, 第49回土木学会年次学術講演会概要集, pp734-735
- 3)Anders, O.U.: Ratio matching-Statistical aid for discovering generic relationships among samples. Analytical Chem., 44(12):pp1930-1933
- 4)Cullity, B.D.: Elements of x-ray diffraction, Addison-Wesley Pub.Comp., Inc., Ma, U.S.A. (Trans. by Matumura) pp187-188
- 5)Kiba, T., and Matsumoto, K.: Analysis of ratio Matching, Mechanics and analysis of water pollutions, Sangyou Tosho Co., Ltd. pp58-83
- 6)Mizumura, K., Nishimoto, T., Yamamoto, T., Kumagai, Y.: Prediction method of sand-movement direction in rivers by geochemical elements, J. Envir. Geol 28(2), pp88-98