

# 粒度分布形状に基づいた底泥分布図の提案 — 東京湾を例として —

PROPOSAL FOR SEABED SEDIMENT MAP BASED ON WHOLE SHAPE OF  
PARTICLE-SIZE DISTRIBUTIONS, IN TOKYO BAY

岡田知也<sup>1</sup>・グエン・ティエ・モンチン<sup>2</sup>・古川恵太<sup>1</sup>

Tomonari OKADA, Nguyen Thi Mong Trinh and Keita FURUKAWA

<sup>1</sup>正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部海洋環境研究室  
(〒238-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>2</sup>東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻  
(〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259番地)

We present a new map of seabed sediment types in Tokyo bay, Japan, based on the whole shape of particle-size distributions. Entropy analysis, which did not require the use of simplified measures of the shape of the distribution (such as the mean, skewness, standard deviation, etc), was used to group sediments according to particle-size distributions. We arrived at a result where the sediments could be divided into 6 sub-groups. The results showed that the sediments around the head of the bay, which had been classified as silts based on simplified measures, clearly indicated two size modes at 10  $\mu\text{m}$  (silt) and 70  $\mu\text{m}$  (very fine sand). In this respect, this method has a clear advantage over simplified measures. We propose the use of whole shape of particle-size distributions for the future map of sediments.

**Key Words :** *Sediments, Particle-size distribution, Entropy analysis, Tokyo bay*

## 1. はじめに

底泥の状況は、底生生物の生息条件、および溶存酸素濃度や栄養塩濃度等の水質指標の境界条件として、内湾域の環境に対して極めて重要な要素である。また、水域の環境状態、例えば富栄養化状態を蓄積し、水質変動と較べて短期的な時間変動が比較的小さい利点を持つため、底泥の状況は長期的モニタリング指標として非常に有用である。これらのことから、様々な底質指標が調査されているが、ここでは底質指標の中の一つの粒度に着目する。粒度は底生生物の生息条件として重要であるのに加えて、他の多くの底質指標（含水比、強熱減量、栄養塩含有量等）との相関が高いことから、代表的な底質指標の一つと言えよう。

自然界の底泥の粒度は単一粒度ではなく、少なくともある程度の分布を持つ。そのため、中央粒径、ソート度および歪度等の粒度分布を1つの指標に集約した値（以後、統計値と呼ぶ）を用いて粒

度分布は表現されてきた。ただし、これら統計値を使う前提は、粒度分布が1つのガウス関数で近似できることである。しかし、実際の海域において、粒度分布が1つガウス関数で常に近似できるとは限らない。むしろ近似には無理がある場合が多いと思われる。

一方、近年の技術発展により、これまで篩を用いて測定していた粒度分布が、レーザ回折・散乱式粒度分布測定装置によって、測定が容易になった。加えて、レーザ回折・散乱式粒度分布測定装置に必要とされる試料の量は、高々数g程度である。その結果、分析および採泥に対する労力は従来に較べて格段に軽減し、多地点の粒度分布を得ることが可能になってきている。しかし、その多地点の粒度分布データを解析・表現する手法が無いため、せっかく得られた粒度分布データの統計値のみしか使われていないのが現状である。

Forrest and Clark<sup>2)</sup>および Woolfe and Michibayashi<sup>3)</sup>らはこの問題を解決するために、情報理論分野で

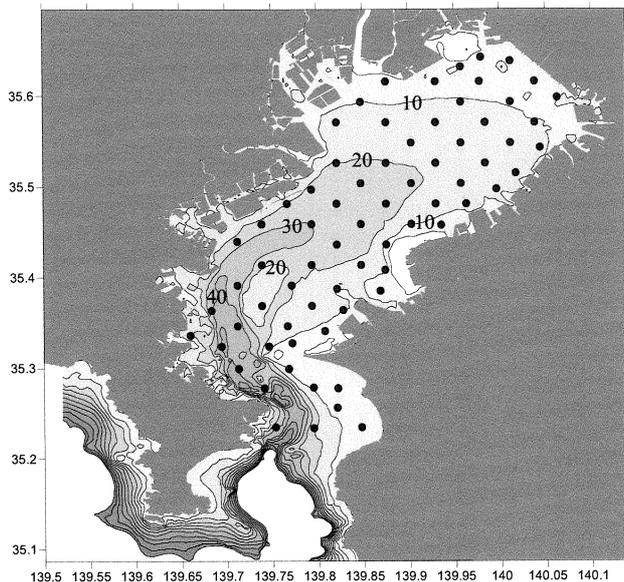


図-1 採泥地点および水深 (単位: m)

確立されたエントロピー法<sup>4)</sup>を粒度分布に適用する手法を提案した。この手法は、粒度分布の分布形状をエントロピー量を用いて解析し、多数の粒度分布を最適なグループに分割する手法である。グループ化において粒度分布の全体形状を直接使うため、統計値を使った解析と較べて粒度分布が持つ情報量の損失が小さい利点がある。これまでの適用事例は、Forrest and Johnston<sup>5)</sup>, Forrest and Clark<sup>2)</sup>, Woolfe and Michibayashi<sup>3)</sup>, Woolfe<sup>6)</sup>, Woolfe et al.<sup>7)</sup>, Woolfe et al.<sup>8)</sup>, Orpin and Kostylev<sup>9)</sup>, Mikkelsen et al.<sup>10)</sup>等がある。

そこで、本研究では、このエントロピー法を東京湾に適用して、様々な分布形状を持つ粒度分布データの情報を十分に反映させた底泥分布図を提案することを目的とする。

## 2. データおよび手法

### (1) データ

東京湾で2001年10月に採泥された71地点の底泥を用いた(図-1参照)。採泥地点はほぼ等間隔で東京湾全域に配置されている。泥質の地点ではエクマンバージ、砂質の地点ではスミスマッキンタイヤーを用いて、表層10 cm程度の底泥が採取された。

粒度分布はレーザー回折・散乱式粒度分布測定装置(LA-950、堀場製作所製)によって分析された。本装置の測定範囲は0.01 μm - 3000 μmなので、2 mm以上の砂が含まれない底泥に対しては、篩を用いることなく全ての粒度を本装置によって測定可能である。本研究では、全ての地点において1.0 μm以

表-1 レーザ回折・散乱式粒度分布測定装置による粒径区分

No	Grain size (μm)	log (Grain size)	No	Grain size (μm)	log (Grain size)	No	Grain size (μm)	log (Grain size)
1	1.0	0.00	21	15.2	1.18	41	229.1	2.36
2	1.2	0.06	22	17.4	1.24	42	262.4	2.42
3	1.3	0.12	23	19.9	1.30	43	300.5	2.48
4	1.5	0.18	24	22.8	1.36	44	344.2	2.54
5	1.7	0.24	25	26.1	1.42	45	394.2	2.60
6	2.0	0.30	26	29.9	1.48	46	451.6	2.65
7	2.3	0.36	27	34.3	1.53	47	517.2	2.71
8	2.6	0.41	28	39.2	1.59	48	592.4	2.77
9	3.0	0.47	29	44.9	1.65	49	678.5	2.83
10	3.4	0.53	30	51.5	1.71	50	777.1	2.89
11	3.9	0.59	31	59.0	1.77	51	890.1	2.95
12	4.5	0.65	32	67.5	1.83	52	1019.5	3.01
13	5.1	0.71	33	77.3	1.89	53	1167.7	3.07
14	5.9	0.77	34	88.6	1.95	54	1337.5	3.13
15	6.7	0.83	35	101.5	2.01	55	1531.9	3.19
16	7.7	0.89	36	116.2	2.07	56	1754.6	3.24
17	8.8	0.95	37	133.1	2.12	57	2009.7	3.30
18	10.1	1.00	38	152.5	2.18	58	2301.8	3.36
19	11.6	1.06	39	174.6	2.24	59	2636.5	3.42
20	13.2	1.12	40	200.0	2.30	60	3000.0	3.48

下の粒径は検出されなかったため、粒度分布は、0 μm - 1.0 μm, 1.0 μm - 1.2 μm, ..., 2636.5 μm - 3000.0 μm の60個の粒径区分の頻度分布を示すこととした(表-1参照)。

レーザー回折・散乱式粒度分布測定装置は、データの再現性が非常に高く、単一粒径や狭い幅の粒度分布に対しては精度良く測定するものの、幅広い分布を持つ粒度分布形状に対してはメーカー間の差がまだ多少あるようである。この点に関しては、今後、明確にする必要があるだろう。ここでは、この問題を認識しつつも、本測定装置で得られた結果に基づき解析を行った。

### (2) エントロピー法

粒度サイズがJ個に分割された1つの粒度分布のエントロピーEは

$$E = - \sum_{j=1}^J p_j \log p_j \quad (1)$$

と表現される(例えば、Forrest and Clark<sup>2)</sup>, Orpin and Kostylev<sup>9)</sup>)。ここで、 $p_j$ は粒度サイズj番目の粒度の頻度である。このエントロピーEは、全ての $p_j$ が1/Jの時に最大値 $\log J$ になり、1つの粒度サイズ $p_j$ が1で他の $p_j$ が0の時(均一粒度)に最小値0になる。この時、不等度合いIは次式で定義される。

$$I = (\log J) - E \quad (2)$$

Iは、Eが最大の時に0となり、Eが最小の時に $\log J$ となる。

次に粒度分布データが複数ある場合を考える。J個にサイズ分割されたN個の粒度分布( $Y_{ij} : i=1 \sim N, j=1 \sim J$ )に対する不等度合い $I_T$ は次式で表現される。

$$I_T = \sum_{j=1}^J Y_j \sum_{i=1}^N Y_i \log NY_i \quad (3)$$

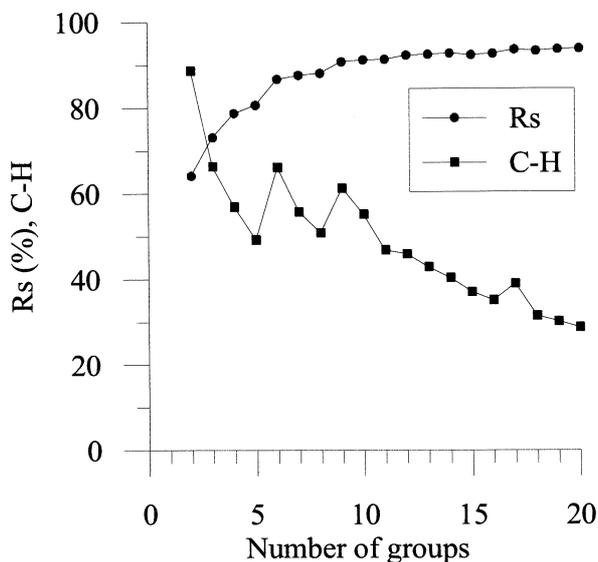


図-2 グループ数と  $R_s$  および C-H の関係

ここで、

$$Y_j = \sum_{i=1}^N Y_{ij}, Y_i = \frac{Y_{ij}}{Y_j} \quad (4)$$

である。

そして、 $N$  個のデータが  $R$  個のグループに分けられた時、グループ間の不等度合い  $I_B$  は次式で表される。

$$I_B = \sum_{j=1}^J Y_j \sum_{r=1}^R p_{jr} \log \left( \frac{p_{jr}}{N_r / N} \right) \quad (5)$$

$$p_{jr} = \frac{\sum_{i \in r} Y_{ij}}{Y_j} \quad (6)$$

ここで、 $N_r$  は  $R$  個のグループ中のグループ  $r$  のデータ数である。

グループ化の最適化過程では、各グループ内の不等度合いが小さく、グループ間の不等度合い  $I_B$  が大きくなるように、データはグループ化される。そして、グループ化された結果が、元の全データの特徴をどの程度説明しているかは、次式で示される  $R_s$  で表現される。

$$R_s = \frac{I_B}{I_T} \cdot 100 \quad (7)$$

グループ数が多くなれば、 $I_B$  は  $I_T$  に近づき、 $R_s$  は 100% に近づく傾向が一般的にあるが、多くのデータを少ないグループで説明するというグループ化本来のメリットは減少する。

最適なグループ数を推測する方法は幾つか提案されている。一つは、 $R_s$  の増加率が小さくなった付近のグループ数を選ぶ手法<sup>7)</sup> である。これは、 $R_s$  の増加率が小さいと言うことは、分割効率が小さいことを意味することに基づいている。次に、C-H の分散比基準を用いた方法である<sup>9), 11)</sup>。C-H の分散

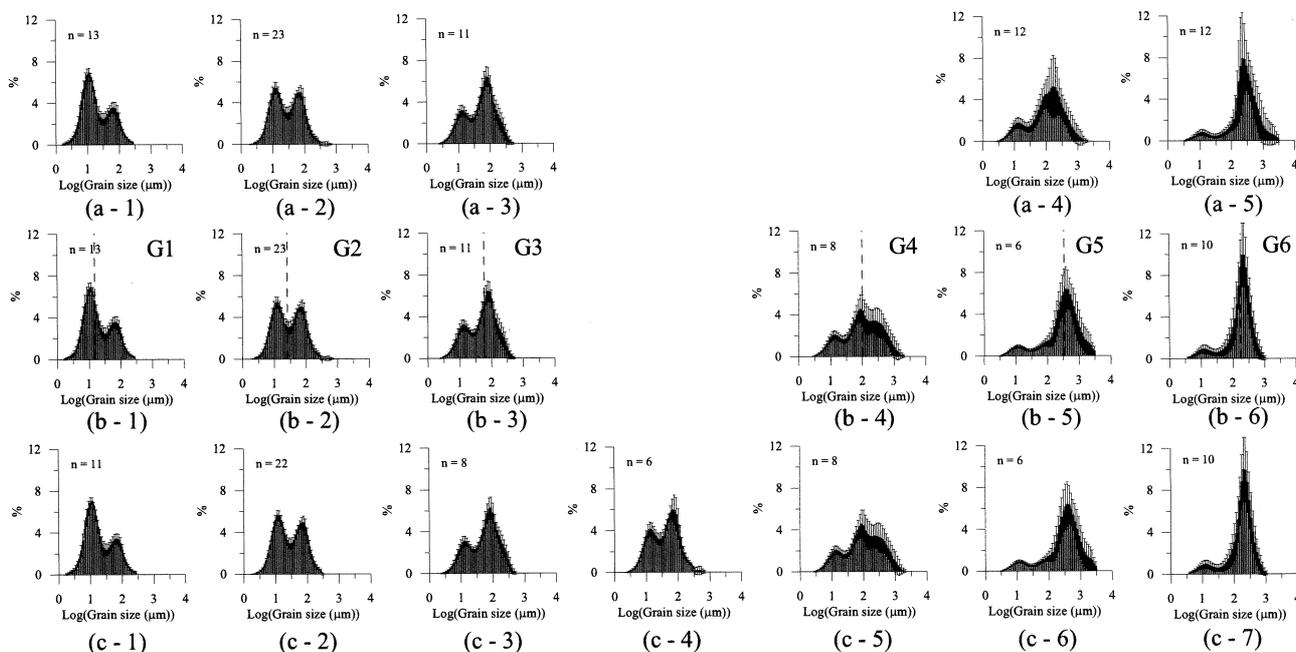


図-3 各グループの平均化された粒度分布。横軸は対数表示である (表-1 参照)。グループ数 : (a) 5 個, (b) 6 個, (c) 7 個。n は各グループ内のデータ数、縦線は土標準偏差を示す。(b-1) から (b-6) 中の破線は各グループの粒度分布に対する中央粒径を示す。

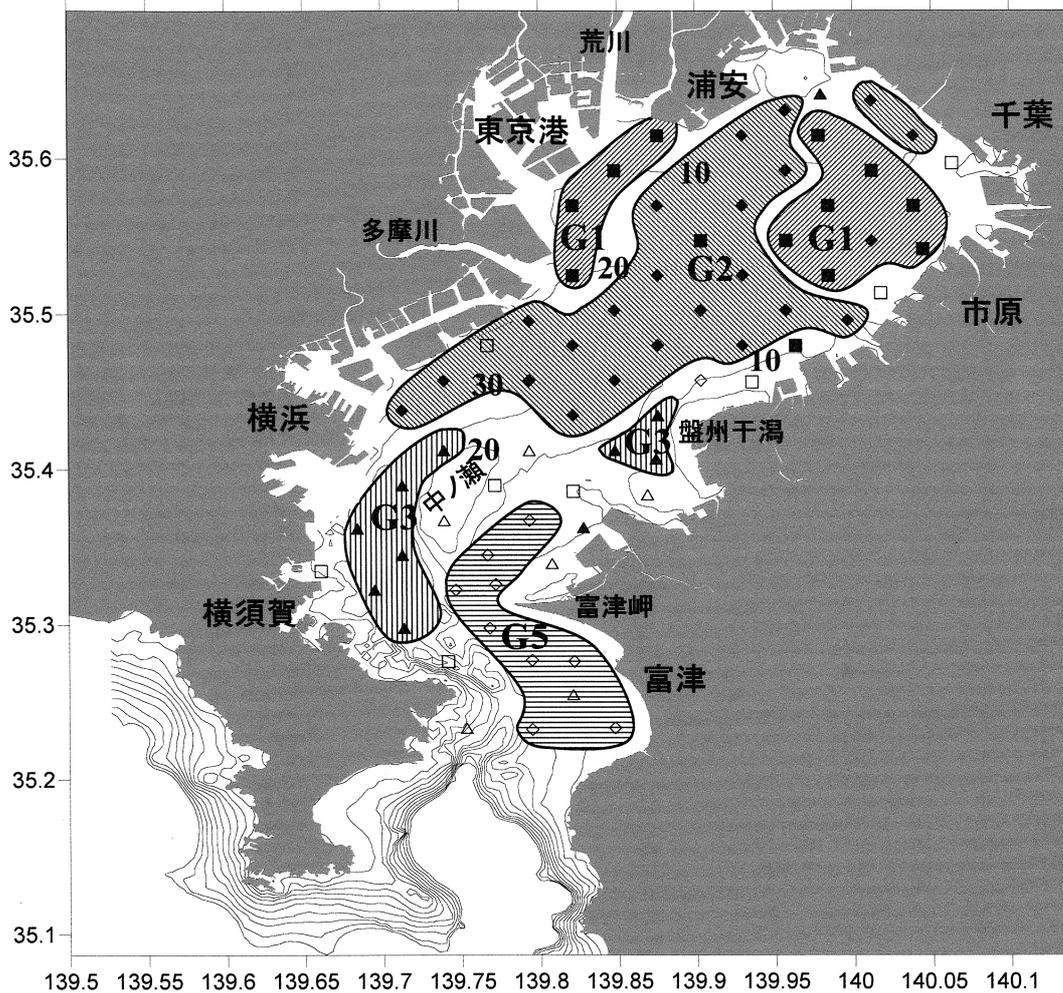


図-4 各採泥地点のグループ. G1 : ■, G2 : ◆, G3 : ▲, G4 : □, G5 : ◇, G6 : △. 背景の薄い実線は水深コンターを示す. 各グループの領域は水深コンターを参考にしてフリーハンドで作成した.

比基準が大きい程、最適に近いグループとみなされる。しかし、これらは絶対ではなく、これらを参考にして、実際のグループ化された分布を比較し、グループ化の目的にあったグループ数を最終的には判断するべきであると考え。

### 3. 結果

#### (1) グループ数

$R_s$  の値はグループ数が6から増加率が小さくなり、C-Hの値はグループ数が6, 9, 17の時に極大値をとった(図-2)。71個のデータ数に対して、10個以上のグループに分割してもグループ化の意味があまりないので、6個前後のグループ数が適していると判断し、グループ数5, 6, 7に対しての比較を行った(図-3)。比較の着目点は、グループ数が増加したことによって他と異なる特徴を持つ分布が新たに得られるか、またグループを減少したことによって他と異なる特徴を持つ分布が消えることが

ないか、である。

5グループから6グループに増加すると、シルト、極細砂および中砂混じりの分布(b-4)が現れた。この広い粒度に渡る粒度分布は、(a-4)に含まれていたものであり、(a-4)が(b-4)と(b-5)に分割されていた。(b-4)と(b-5)は明らかに異なる特徴をもつ分布であった。また(b-5)は(b-6)に類似した粒度分布であるが、両者のモードサイズは異なっていた。したがって、5グループから6グループへの増加は、意味ある増加であろう。次に、6グループから7グループに増加すると、シルトと極細砂からなる分布(c-4)が現れた。(c-4)は(c-3)と較べて、中砂領域の分布形状が若干異なるものの、特徴の大きな差はなかった。したがって、グループ数を6から7に増加させる意味は小さいだろう。以上のことから、最適なグループ数を6とした。

#### (2) 各グループの特徴

G1はシルトのモード(約10  $\mu\text{m}$ , log表示: 1.0)と極細砂のモード(約70  $\mu\text{m}$ , log表示: 1.9)が明瞭で、

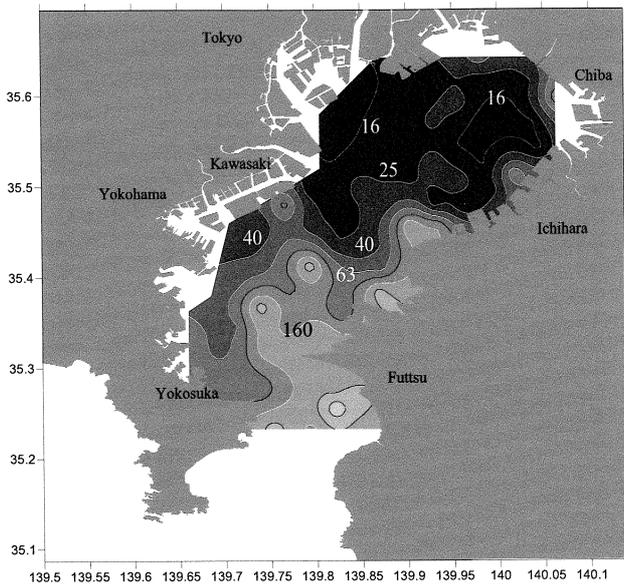


図-5 中央粒径の平面分布 (単位:  $\mu\text{m}$ )

シルトのモードが卓越する極細砂混じりのシルトだった(図-3)。G2はシルトと極細砂のモードが明瞭で、シルトのモードと極細砂のモードが同程度の大きさの極細砂混じりのシルトだった。G3はシルトと極細砂のモードが明瞭で極細砂のモードが卓越するシルト混じりの極細砂だった。G4は頻度が広範囲のサイズに分布し明瞭なモードがないシルトおよび中砂混じりの極細砂だった。G5は中砂のモード(約 $400\ \mu\text{m}$ , log表示: 2.6)が明瞭なシルト混じりの中砂、G6は細砂のモード(約 $200\ \mu\text{m}$ , log表示: 2.3)が明瞭な良くソートされた細砂だった。

G1, G2, G3は、共通して約 $10\ \mu\text{m}$ および約 $70\ \mu\text{m}$ のモードを示した。三者の違いは、それらモードの大きさの違いだった。一方、G5およびG6で卓越したモードサイズは、G1, G2, G3の極細砂のモードサイズと異なっていた。(G1, G2, G3)と(G5, G6)で砂のモードサイズが大きく異なることは、東京湾の一つの特徴であろう。また、この差は、砂成分の由来や分布する領域の流況等が大きく異なっていることを示すものと推測される。

本来、個々のデータに対して中央粒径を示すべきであるが、個々のデータを示すスペースがないので、ここではG1からG6の各グループの粒度分布に対して求められた中央粒径を示す(図-3)。図-3に示される様に、G2以外のグループの中央粒径は卓越したモードサイズ付近の値をとっていた。このような場合は、卓越する粒度のモードサイズと中央粒径は多少異なるという認識を持っておけば、中央粒径で底泥を評価しても大きな間違いは生じないだろう。しかし、G2のような場合は問題である。なぜなら、中央粒径(26  $\mu\text{m}$ , log表示: 1.4)に相当

する粒度は、モード間(約 $10\ \mu\text{m}$ と約 $70\ \mu\text{m}$ )の谷に当たり、その粒度分布の卓越する粒度を全く表現していないからである。

### (3) 平面分布

シルトが卓越するG1の主な分布範囲は、荒川河口沖から多摩川河口沖にかけての東京港沖、および湾奥東側にあたる千葉・市原沖だった(図-4)。

シルトと極細砂のモードがほぼ同程度のG2の主な分布範囲は、浦安沖から湾奥東側、湾中央そして横浜沖までの水深が30 m以浅に相当する広域な範囲だった。また千葉の西側沿岸域にもG2は分布していた。市原および千葉の沿岸近くの数点を除くと、湾奥は全てG1もしくはG2だった。

極細砂のモードが卓越するG3は、盤州干潟沖の水深が10 m - 20 mの範囲および横浜沖から横須賀沖の水深が30 m - 50 mに相当する範囲(湾中央南西側)にかけて分布していた。

富津岬周辺および富津沖では、水深が10 m以浅から40 mの広範の水深帯において、中砂のモードが卓越するG5が主に分布していた。

広範囲の粒度に分布しモードが不明瞭なG4および良くソートされた細砂のモードが卓越するG6は、まとまった領域はなかった。G6は湾中央部から湾口側にかけて点在したが、G4は湾奥東側や湾中央部の沿岸近くに広域に点在した。

図-5に、レーザ回折・散乱式粒度分布測定装置で測定された中央粒径の平面分布を示す。湾奥から湾央西側(横浜沖)にかけての広域において(川崎沖は除く)、中央粒径は $40\ \mu\text{m}$ 以下だった。そして、中央粒径が $16\ \mu\text{m}$ 以下の範囲がG1に相当し、 $16\ \mu\text{m}$  -  $40\ \mu\text{m}$ の範囲がG2に範囲に相当した。

## 4. 考察

東京湾において最も広範囲に分布するグループはG2だった(図-4)。そのG2の特徴は、シルトと極細砂のモードが同程度に卓越することだった(図-3)。ところが、そのG2の中央粒径は、両モードの谷に相当し、粒度分布の卓越する粒度を全く表現していなかった(図-3)。粒度分布および中央粒径の特性に慣れていない者は、その中央粒径付近にピークを持つような粒度分布を想像し、その付近の粒度の底泥が最も多いと考えてしまうかもしれない。また、中央粒径の平面分布図(図-5)から、湾奥から湾央西側(横浜沖)にかけての広域において、 $40\ \mu\text{m}$ 以下のシルトが卓越している(ヘドロばかりである)というイメージを受けるかもしれない。

これらのことは、東京湾の底泥の特徴を表現す

るのに、また環境情報として市民に提示するのに、中央粒径のみでは不十分であり、モード情報が必要であることを示す。粒度分布のフルデータを用いて作成された底泥分布図は、そのモード情報を取り込んでいる点で優れていると言えよう。

この様なモード情報を取り込んだ底泥分布図は、底泥条件に大きな影響を受ける底生生物生育条件や魚類の巣穴条件を探る際等において、有用な参考情報となるだろう。例えば、産卵場所が近年減少し危機的な状況になりつつあるハゼの巣穴に適した条件は、シルトに若干の砂が混じった底泥と言われている。どのモードサイズのシルトと砂が、どの程度の比率で混合しているのが適しているのかは、これから検討課題であるが、統計量ではなく、この様な解析をして初めて検討可能になるものと考えている。

また、モードサイズの空間分布は、底泥の輸送や由来を推定する際に有益な参考情報になる<sup>12)</sup>。加えて、水質改善が進み有機物成分、つまりシルト成分が減少した場合の底泥状況の変化を推測したりする際でも、粒度分布全体の情報は粒度分布の変化の推測を容易にするだろう。

さらに、近年の数値モデルの発展により、底泥輸送は各粒度毎に対して行われるようになりつつある。その計算の検証においても、この様な粒度分布全体を用いた結果は益々貴重になるだろう。

## 5. 結論

東京湾の底泥分布図を、粒度分布データの中央粒径等の粒度分布を1つの値に集約した統計値ではなく、粒度分布のフルデータおよびエントロピー法と言うグループ化手法を用いて作成した。エントロピー法により東京湾の71地点の底泥はそれぞれ特徴ある粒度分布を持つ6つのグループに分割され、新しい東京湾の底泥分布図が作成された。

その結果、これまでシルトと分類されていた東京湾湾奥から湾央にかけての広域の底泥は、粒度分布のモード情報に着目すると、シルトのモードと同程度の大きさの極細砂のモードを含む底泥だったことが明らかとなった。このことは、これまでの統計値による評価では、見落とされがちな点であり、これらの情報を失うことなく容易に取り込める点が、本手法の最大の利点である。

今後は、多くの海域において、粒度分布を用いた底質分布の作成による粒度分布のフルデータの

活用が重要であると提言する。

**謝辞**：本研究を進めるにあたり、東京工業大学大学院総合理工学研究科石川忠晴教授には有益な助言を頂いた。また、本研究の一部は、科学研究費基盤研究(C)(課題番号：20560483, 研究代表者：岡田知也)の支援によって実施された。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 岡田知也, 古川恵太: 東京湾沿岸域における音響装置を用いた詳細な底質分布図の作成とベントス生息状況, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1431-1435, 2005.
- 2) Forrest, J., Clark, N.R.: Characterizing grain size distribution: evaluation of a new approach using a multivariate extension of entropy analysis. *Sedimentology* 36, 711-722, 1989.
- 3) Woolfe, K.J., Michibayashi, K.: "Basic" entropy grouping of laser-derived grain-size data: an example from the great barrier reef. *Computers and geosciences* 21 (4), 447-462, 1995.
- 4) Shannon, C.E.: The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana, 1963.
- 5) Forrest, J., Johnston, R.J.: On the characterization of urban sub-areas according to age structure. *Urban Geography* 2 (1), 31-40, 1981.
- 6) Woolfe, K.J.: Textural entropy groupings from a modern lake-lagoon system and its ancient analogue. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 38, 256-262, 1995.
- 7) Woolfe, K.J., Larcombe, P., Orpin, A.R., Purdon, R.G., Michaelsen, P., McIntyre, C.M., Amjad, N.: Controls upon inner-shelf sedimentation, Cape York Peninsula, in the region of 12S. *Australia Journal of Earth Sciences* 45, 611-621, 1998.
- 8) Woolfe, K.J., Larcombe, P., Stewart, L.K.: Shelf sediments adjacent to the Herbert River delta, Great Barrier Reef, Australia. *Australia Journal of Earth Sciences* 47, 301-308, 2000.
- 9) Orpin, A.R., Kostylev, V.E.: Towards a statistically valid method of textural sea floor characterization of benthic habitats. *Marine Geology* 225, 209-222, 2006.
- 10) Mikkelsen, O.A., Curran, K.J., Hill, P.S., Milligan, T.G.: Entropy analysis of in situ particle size spectra. *Estuary. Coastal and Shelf Science*, 72 (4), 615-625, 2007.
- 11) Calinski, T., Harabasz, J.: A dendrite method for cluster analysis. *Commun. Stat.* 3, 1-27, 1974.
- 12) Okada, T., Larcombe, P., Mason, C.: Estimation of the spatial distribution of dredged material disposed of at sea by using particle-size distributions and metal concentrations. *Marine Pollution Bulletin*. (in press), 2009.