内湾域における底質粒度推定法の検討

AN ESTIMATION METHOD OF EQUILIBRIUM GRAIN SIZE DISTRIBUTION IN INNER BAY

安芸浩資[1]・中野晋[2]・盛治夫[3]・岡田直也[4]

Hiroshi AKI, Susumu NAKANO, Haruo MORI and Naoya OKADA

[1] 正会員　工修　ニタコンサルタント㈱ 環境部次長（〒771-0122 徳島県徳島市川内町鈴江西 38-2）
[2] 正会員　博(工)　徳島大学准教授　環境防災研究センター（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1）
[3] 徳島県県民環境部環境局　主査兼係長（〒770-8570 徳島県徳島市万代町 1 丁目 1 番地）
[4] ニタコンサルタント㈱ 環境部（〒771-0122 徳島県徳島市川内町鈴江西 38-2）

A grain size distribution of suspended solids or sediment in a closed basin is closely related to habitat suitability of aquatic benthic animals such as coral or a shellfish. However, it is very difficult to get correct information about an equilibrium grain size distribution because it always changes spatially and temporally. We investigated a method to estimate grain size distributions both of bed load material and suspended one by using bottom friction velocities which were calculated by wave analysis based on statistical wave data. And then, we assume that the equilibrium grain size distribution of sediment can be approximated with the mean value of bed load material and suspended load material. We applied this method to estimate the grain size distributions of sediment in the Takegashima Marine Park which is located the southern end of Tokushima and the estimated grain size distributions coincide with the field data.

***Key Words**: equilibrium grain size distribution, wave analysis, statistical wave data, suspended solid, sediment, inner bay*

１．はじめに

著者らは，徳島県海陽町に位置する竹ヶ島海中公園(**図-1**)においてサンゴを対象とした自然再生に取り組んでいるおり，これまで，指標種としたサンゴの生息適性度評価に関する研究などを行っている[1),2)]．しかし，波浪等により巻き上げられ,浮遊する土砂の滞留による受光環境の変化や，土砂堆積の要因となる海底表層土砂についての定量的な把握には至っていない．その理由のひとつは，波浪や潮流等の作用により常に変化する底質の平均的な粒度組成を，面的に把握することが極めて困難なことである．

波浪や流れによる漂砂量に関する研究の多くは均一砂に関するもので，特に波浪場では混合砂の移動機構に関する研究は十分ではない．これまでに伊福ら[3)]や田中ら[4)]のものがあるが，主として粒径別の移動限界と漂砂量に関するものである．田中らは，波による混合砂移動限界特性のうち，粒径別移動限界および粒径別漂砂量について実験式を提案し，流砂に対する Egiazaroff の粒径別移動限界式と比較している．田中らの研究結果によると混合粒径でも均一粒径の場合の移動限界を準用することが示唆される．しかし，これらはいずれも形成された混合砂海浜での砂の移動メカニズムを評価し，海浜変形を解析することを目的としたものであり，そもそも繰り返し襲来する波浪の影響下で形成される底質粒度分布の推

図-1　対象海域

定を目指した研究ではない．こうした点を考慮すると本研究が目的とする平衡粒度分布を推定する取り組みは希有なものである．

本研究では，襲来波浪の頻度分布を考慮した平面波浪解析の結果から，浮遊土砂および海底の表層堆積土砂（以下，堆積土砂と称する）の粒度分布の概略推定手法を提案するとともに，推定粒度と現地粒度を比較し，本手法の適用性について検討する．

2． 現地調査の概要

(1) 浮遊土砂・堆積土砂の粒度特性

当湾は，島嶼や防波堤により半閉鎖されており，湾口や湾奥部など様々な波浪場を有している．そのため，湾内の浮遊土砂や堆積土砂の粒度組成が異なる．これらの違いを把握するために，**図-2** に示す 6 地点にセジメントトラップ（以下，トラップと称する）を設置した．設置水深は**表-1** に示す通りであり，いずれも各種モニタリングのため，同海域 8 箇所に沈設している高さ約 1m のコンクリート製の基盤上（以下，モニタリング基盤と称する）に固定した．したがって設置位置は海底から約 1m である．設置地点の主な底質は，W4，WA，a，b，c が砂礫，W6，WB，Tk が砂泥である．設置期間は夏季：2006 年 7 月 1 日～2006 年 8 月 12 日の 43 日間及び，冬季：2006 年 11 月 1 日～12 月 18 日の 48 日間である．設置期間中，トラップ近縁において表層 5cm 程度までに堆積する土砂を採取した．ここでは，比較的波浪・潮流の大きさや向きに変動が少ない冬季を対象に検討する．**図-3** に，各地点の浮遊土砂と堆積土砂の粒度分布を示した．図中には浮遊土砂の質量も併記した．基盤付近に堆積している表層土砂を，計量容器に採集し，海中で慎重に密閉した．その後，室内に搬入し 2mm 以下のものに対してレーザー粒度分析装置（COULTER LS-230）で粒度分布を測定した．この装置は 0.4～2000μm の粉粒体の粒度分布を一度に測定することが可能である．各地点の浮遊土砂の量的指標として，乾燥質量を比較した．浮遊土砂量は，Tk>W6>WB>b>c>a の順に多いことがわかる．底質が主に砂礫である a，b，c に比べ，砂泥質である W6，WB，Tk での捕砂量が多く，浮遊土砂量は海底の地質条件と強い関連性を示した．また，後述する捕砂期間中の流向・流速観測結果（**図-8**）から，南向き流れが卓越していたこと，および Tk,W6,WB の位置と捕砂量の関係から，浮遊土砂は Tk から湾内に侵入し，潮流・沿岸流により湾内に拡がっているものと推測される．

浮遊・堆積土砂について，各地点の粒度分布を比較すると，浮遊土砂では，Tk を除く 5 地点ではほぼ同様の粒度を示した．これは Tk が他に比べて波浪より流れの影響を強く受けていることに起因すると考えられる．一方，堆積土砂は地点毎で大きな違いが見られた．これらのことは,堆積土砂は波浪による擾乱程度により地点毎に変化するが，浮遊土砂の粒度特性は，浮遊土砂の粒径に起因する沈降速度に依存しているものと推察される．また，**図-4** は 2005 年 9 月に，W6 地点周辺で注射器により採取したサンゴ表面の土砂(2 地点)と堆積土砂の粒度分布を示したものである．サンゴ上の土砂，堆積土砂ともに 10～100μm の粒子が卓越しており，**図-3** に示す浮遊土砂の粒度分布と概ね一致する.ここで，**図-3** の堆積土砂と**図-4** に示すサンゴ下の海底で採取した土砂の粒度分布が異なる理由は，採取方法の違いであり，注射器

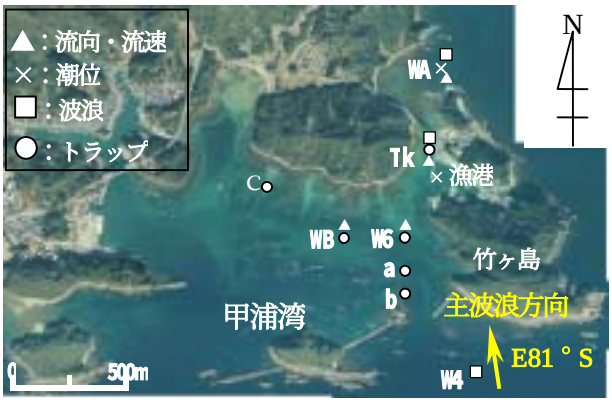

図-2 トラップ設置および各種計測器設置位置

表-1 各観測点の設置水深(L.W.L.時)

観測点	水深(m)	観測点	水深(m)
Tk	3.2	b	3.6
W6	4.6	c	1.5
WB	5.5	W4	9.6
a	5.0	WA	4.6

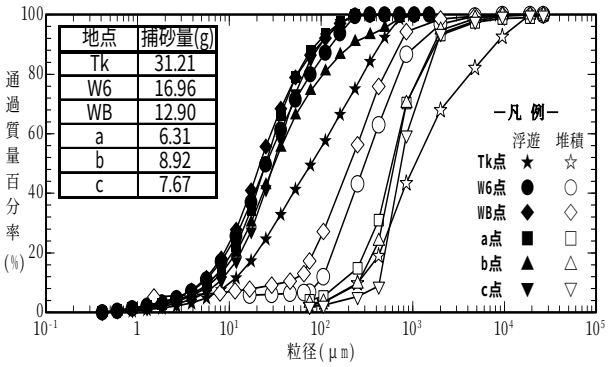

図-3 各地点の浮遊土砂・表層堆積土砂の粒度分布

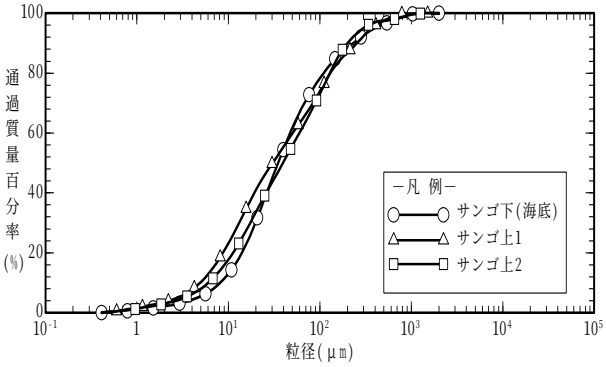

図-4 海底とサンゴ上の堆積土砂の比較

で採取する場合には，分級作用により，細粒分が選択的に採取されたと考えられる．注射器で採取したサンゴ上の粒度分布は，いずれも**図-3** 中に示す浮遊土砂のそれと近いものであることがわかる．このことは，擾乱作用により巻き上げられた堆積土砂は，粒径の大きいものからサンゴ上を含む海底に沈降し，後に沈降堆積する微細粒子と併せて堆積土砂を形成していることを示唆するものである．

(2) 波浪

トラップ設置期間に襲来する波浪特性を把握するために，**図-2** に示す 3 地点(W4,WA,Tk)で水圧検知式波高計(ALEC 社：COMPACT-WH)を用いて，波浪観測（偶数正時毎，サンプリング 0.5s，10 分観測）を行った．観測期間は平成 18 年 11 月 1 日～平成 18 年 12 月 18 日である．W4 地点の沖合には島嶼や構造物などの波浪遮蔽物は存在しない．W4 地点での波高および周期の出現頻度分布を**図-5** と**図-6** に示す．波高は 0.6～0.8m，周期は 10 秒前後が最も卓越している．また，**図-7** に W4，WA，Tk 地点での有義波高の経時変化を示した．図より沖波が直接入射する W4 地点において，冬季観測波高の最大値は 4.27m であった．また，WA では波浪主方向に対して竹ヶ島の背面に位置することから回折効果により W4 に比べ波高が減衰している．さらに，WA からの湾内への波浪侵入口にあたる Tk では防波堤等の影響により観測期間を通じて 1m 未満の波高となっている．このことから，湾内では高波浪による擾乱の影響は減じられ，むしろ常時波浪による擾乱を受けるものと推察される．

(3) 潮汐流

トラップ設置期間中の竹ヶ島・甲浦湾内の局部的な海水流動を把握するために，電磁流向流速計(ALEC 社：COMPACT-EM)を用いた連続観測を行った．観測期間は平成 18 年 11 月 1 日～12 月 12 日である．

設置地点は**図-2** に示すように，湾外に 1 地点(WA)，湾内に 3 点(Tk,W6,WB)とし，いずれもモニタリング基盤上に固定した．

各観測期間の流向・流速値を**図-8** に示した．なお，図中には同時に観測した潮位も示している．外海域に位置する WA では，流速 10cm/s 程度であることが多いが，荒天時には 50cm/s 以上の値を示す．流向は概ね南向きであり，竹ヶ島北側からの湾内への流入口となっていることがわかる．一方，北側からの流入に着目した場合，湾内最初の観測地点である Tk では WA に比べて流速は減速するが，流向は WA と同方向を保っている．また，荒天時には縮流の影響からか WA の流速を上回る場合も見受けられる．

Tk に続く W6 では，さらに減速し W6 の流速は概ね 5cm/s 以下である．湾奥中央部に位置する WB の流速値は，W6 に比べてさらに小さく，概ね 2～3cm/s である．WB 付近になると，湾内への流入口である WA や W6 の影響は殆ど受けておらず水の動きが少ないことがわかる．

また，WA と漁港内で観測した水位（潮位換算）を比較すると，WA の方がわずかに高くなっている．期間最大波高が観測された **11** 月 **26** 日での水位差は，約 25mm である．この水位差による水面勾配から求まる平均流速は Tk で約 90cm/s に相当し，WA と漁港内の中間に位置する Tk での同時点の流向および流速値とほぼ等しい(**図-8**)．このことは，流向流速観測での南向き流速が卓越する一因と考えられる．

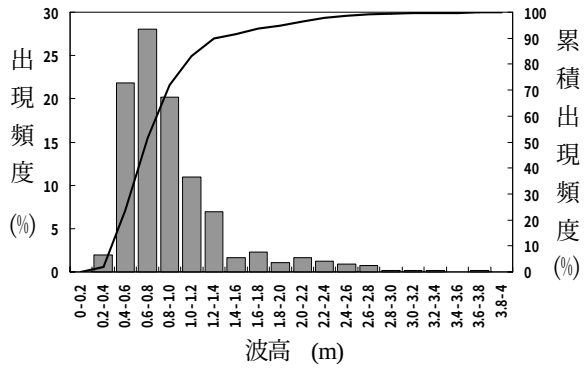

図-5 波高出現頻度（冬季）

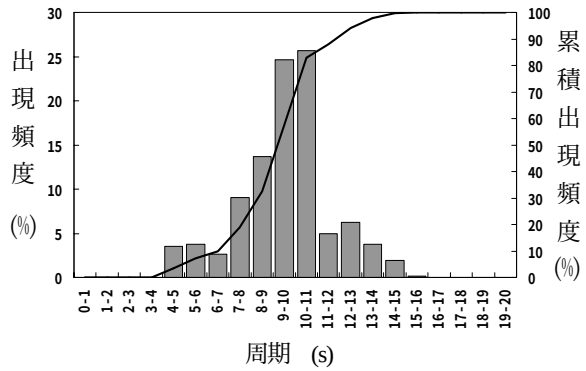

図-6 周期出現頻度（冬季）

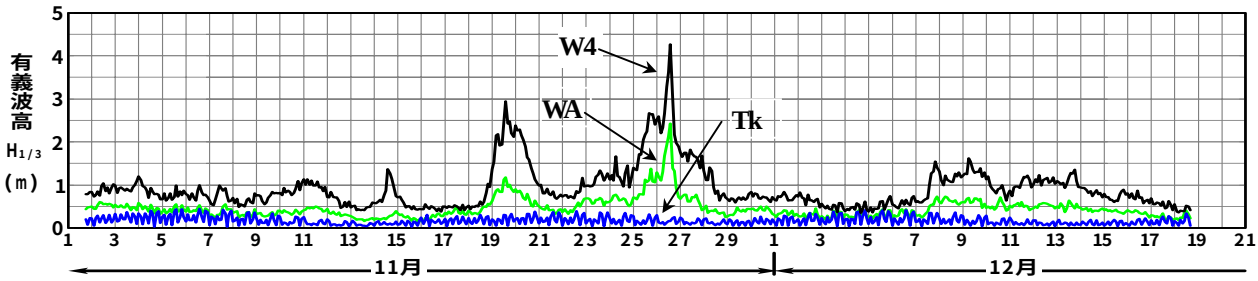

図-7 波浪観測結果(平成 18 年 11 月 1 日～平成 18 年 12 月 18 日)

３．内湾域における粒度推定手法

(1)　粒度推定手法

本粒度推定手法で対象としているのは，新たな土砂供給が少なく，年間を通して粒子が頻繁に移動している表層部である．表層部は，年に 2～3 回，大きな擾乱（高波浪）により一旦海底全体が混合攪拌されるが，その間の，月に 3～4 回の比較的小さな擾乱（常時波浪）により，堆積土砂は巻き上げられる．巻き上がらない比較的大きな粒子は掃流漂砂として海底を移動し，徐々に埋没する．これにより表層部内で深さ方向に分級が生じ，表層に近い部分ほど微細な粒子が卓越し，小規模な波浪でも巻き上げが生じるようになる．

図-9 は平均的な浮遊土砂と堆積土砂の粒度形成過程を模式的に示したものである．図中には 5 つの粒度分布が記されている．一般にこれらの粒度はいずれも未知である．

ある地点の堆積土砂は波浪時の擾乱作用を受け，巻き上がり浮遊土砂となる．一方，堆積土砂からは細粒分が除かれるため，粒度は粗くなる．これら浮遊土砂や表層堆積土砂の粒度分布は，擾乱の程度により浮遊土砂は粒度 a，b に，また，堆積土砂は粒度 1，2 となり，静穏な状態が長期間続けば，粒度 x に収れんする．こうした擾乱による巻き上げと沈降堆積の繰り返し過程は，その海域における波浪履歴に左右されると考えられる．そこで，任意期間の平均的な堆積土砂の粒度分布は，その期間の波浪履歴に対応した移動限界粒径で表わされると仮定した．一方，浮遊土砂についても，各地点での海底の水平軌道流速に対する摩擦速度 u_*が沈降速度 w_0 を上回った場合に浮遊状態が維持されると仮定することにより，堆積土砂と同じように粒度分布の推定が可能となる．

対象期間の波浪観測データから波高と周期の累積出現頻度分布を求めた後，累積出現頻度に対応する波高を入力波とする平面場波浪解析を行う．次に各地点の波高に対する最大摩擦速度を求め，堆積土砂には掃流砂に対する移動限界速度算定式を表す岩垣式を，また，浮泥土砂には，Rubey の沈降速度算定式を用いることにより粒径を推定する．推定した粒径に対して，波高の累積出現頻度を縦軸にプロットすることにより粒度分布を得る(**図-10**)．ここで，浮遊土砂の推定においては，Engelund の基準 [5),6)]を用いた．Engelund の基準によると $u_* < w_0$ では掃流漂砂が卓越するが，$w_0 < u_* < 1.7w_0$ では掃流漂砂と浮遊漂砂が共存するようになる．したがって，$w_0 = u_*$ として求まる粒径は浮遊漂砂が生じる限界の粒径となる．

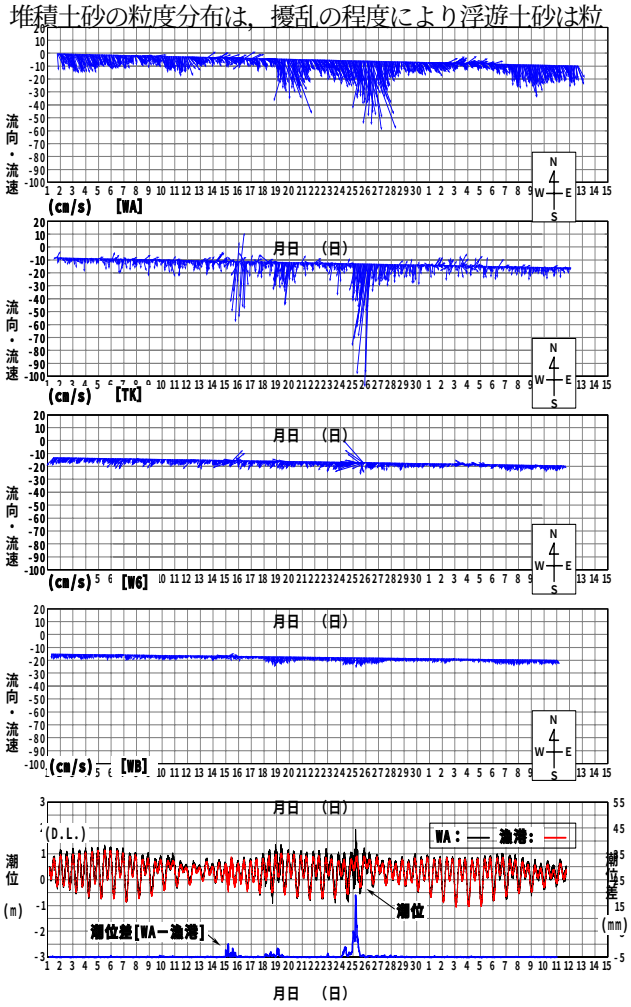

図-8　流向・流速・潮位観測結果
(平成 18 年 11 月 1 日～平成 18 年 12 月 12 日)

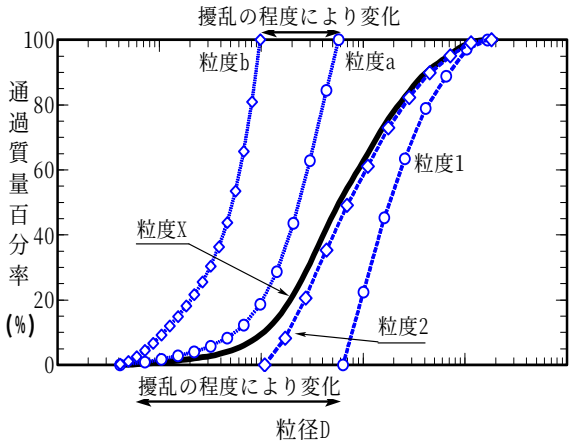

図-9　平均的な浮遊土砂と堆積土砂の粒度形成模式図

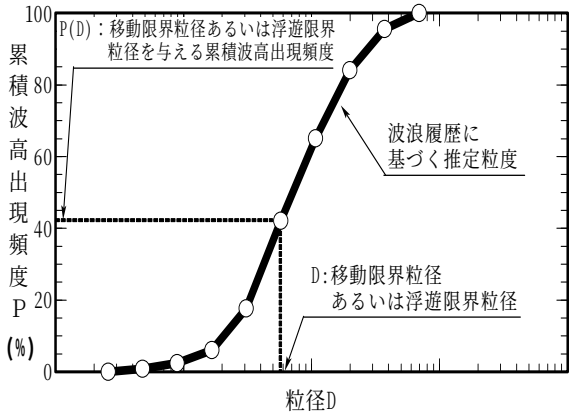

図-10　平均的な浮遊土砂・堆積土砂の粒度推定概念図

具体的には，トラップ設置期間中の波浪観測結果から，有義波高を0.2mごとに階級分けし，各階級の平均値を平面場波浪解析[7]の入力波浪条件とした．粒度推定ケースの入力波浪条件と累積波高出現頻度を**表-2**に示した．なお周期については各階級の平均周期を用いた．これらの結果を用いて，波浪による最大摩擦速度u_{*max}を算出し，岩垣式による移動限界粒径と，Rubeyの沈降速度式による浮遊限界粒径を求めた．それぞれを波高累積出現確率に対してプロットし，堆積土砂と浮遊土砂に対する推定粒度分布とした．なお，摩擦速度の算定にはJonsson式に基づく摩擦係数 f_w を用いている．ただし f_w の上限値は0.3とした[8),9)]．

(2) 推定粒度と現地粒度の比較

図-11 は浮遊土砂・堆積土砂について，推定粒度と現地粒度をそれぞれ比較したものである．流れが卓越し，新たな土砂供給のある Tk 点を除いては，現地粒度は,堆積土砂と,浮遊土砂の推定値の概ね中間の粒度となっていることがわかる．また,Rubey の沈降速度式を用いて推定した浮遊土砂粒度の最大粒径は,現地粒度と概ね一致している．これは,Rubey 式から求めた浮遊土砂粒度が,巻き上げ時のものを示すためと考えられる．すなわち,実際に浮遊する土砂の粒度は，Rubey 式から求めたものより小さいものと推察される．

底質粒度は，掃流漂砂が停止して，浮遊漂砂が堆積する過程で形成される．掃流漂砂と浮遊漂砂のいずれが卓越するかは波浪条件などによって異なる．ここでは，簡単のため中間になると仮定し，堆積土砂粒径D_iと浮遊土砂粒径w_i から中間粒度［$0.5\times(D_i+w_i)$］を求め,現地の堆積粒度と比較した（**図-12**）．**図-12**には,夏季の結果もあわせて示している．図より，夏季のW6と冬季のTkにおいて幾分違いが見られるが,全体的に中間粒度は,現地の堆積粒度を概ね表していることがわかる．**図-13** には25%,50%,および 75%粒径における中間粒度と現地堆積粒度の粒径比を示した．図より粒径比は，概ね 0.3～3.0 の範囲であり，現地堆積土砂の採取箇所や時期等による，粒度そのものの値の精度を考慮すると,掃流漂砂と浮遊漂砂の中間とした仮定を裏付ける結果となっていることがわかる．

表-2　入力波浪条件と累積波高頻度

CASE	波高階級(m)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	累積頻度
1	0.2-0.4	0.376	10.232	2.0%
2	0.4-0.6	0.501	9.886	23.8%
3	0.6-0.8	0.698	9.691	51.8%
4	0.8-1.0	0.890	9.536	72.0%
5	1.0-1.2	1.097	9.537	83.0%
6	1.2-1.4	1.293	8.514	89.9%
7	2.0-2.2	2.137	8.720	96.5%
8	2.6-2.8	2.657	9.620	99.3%

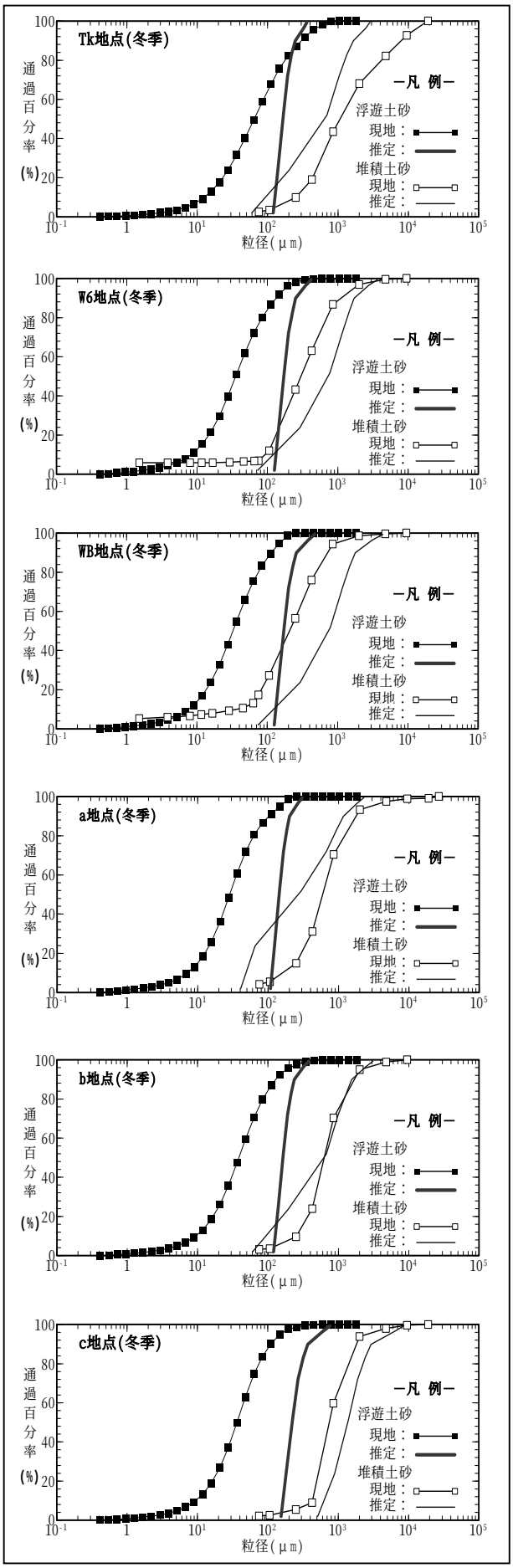

図-11　　現地粒度と推定粒度の比較

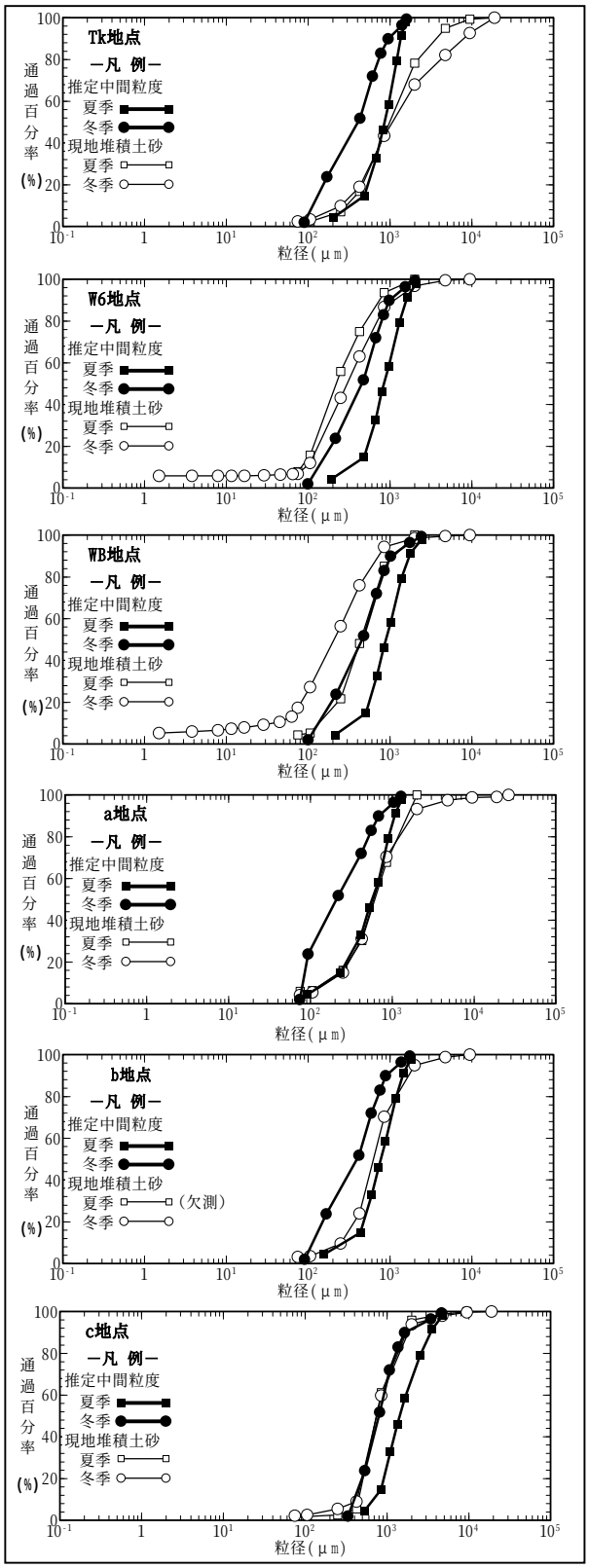

図-12　現地粒度と中間粒度の比較(夏季・冬季)

4．おわりに

内湾部での堆積土砂と浮遊土砂の粒度推定手法を提案し，現地粒度と比較することから，その適用性について検討した．その結果，以下の主要な結論を得た．

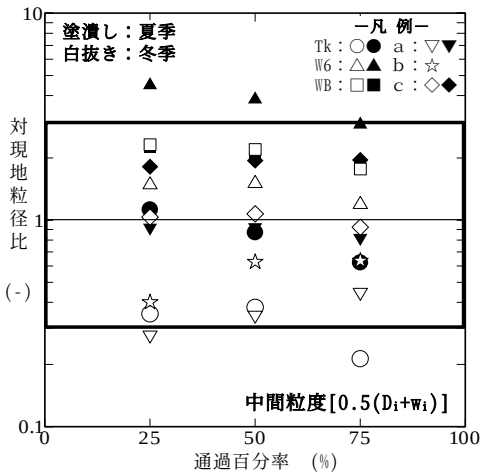

図-13　現地粒度と中間粒度の粒径比（夏季・冬季）

1)　Rubey 式による推定粒度の最大粒径は,現地の浮遊土砂のそれと概ね一致する．実際に浮遊する土砂は,時間経過に伴い徐々に小さくなると考えられる．一方,Rubey 式による推定粒度は,巻き上げ時のものを示していることに起因していると考えられる．

2)　推定粒度と現地堆積粒度を比較した結果，新たな土砂供給が少なく，かつ波浪の卓越する箇所で，堆積粒度は,岩垣式と Rubey 式による推定粒度の概ね中間の粒度となる．

これらのことから，当粒度推定手法は内湾域での浮遊・堆積土砂の平均的な粒度分布を面的に把握する場合に有効であり，生態系に対する漂砂の影響評価等において有益な基礎情報を与えると考えられる．

参考文献

1)中野晋,安芸浩資,内田紘臣,御前洋,川口始,小笠義照：四国東部のサンゴ生息海域における環境改善方針についての検討,海洋開発論文集，第 20 巻，pp.293-298, 2004.

2)安芸浩資,中野晋,内田紘臣,岩瀬文人,御前洋：沿岸域の自然再生計画における順応的管理への HSI モデルの適用性，海洋開発論文集，第 23 巻，pp.501-506, 2007.

3)伊福誠，住井勝彦：波による底質の移動に及ぼす粒径の影響,海岸工学論文集，第 40 巻，pp.307-311, 1993.

4)田中仁，片山裕貴，加賀正之，須賀尭三：混合砂海浜における漂砂量則，第 35 回海岸工学講演会論文集,pp.301-311, 1988.

5)岩垣雄一，椹木亨：海岸工学,共立出版，p.317, 1979.

6)Engelund,F. : Turbulent Energy and Suspended Load, Coastal Eng. Lab., Tech. Univ. of Denmark, Rep. No.10, 1965.

7)間瀬肇,高山知司,国富将嗣,三島豊秋:波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究,土木学会論文集,第 628 号,Ⅱ-48,pp.177-187, 1999.

8)椹木亨：波と漂砂と構造物，技報堂出版，pp.150-151, 1991.

9)Jonsson,I.G: Measurements in the turbulent wave boundary layer. Proc. 10th Congr. IAHR, pp.85-92, 1963.

(2007.9.30 受付)