

漂砂流砂系における地形変化災害—とくに海岸侵食研究の展望

関口秀雄

要 旨

本稿は、平成21年度の京都大学防災研究所研究発表講演会における特別講演の内容を増補、再構成したものである。筆者は定年退職に至る2010年3月までの13年間、流域災害研究センターにおいて沿岸域土砂環境の研究に従事した。海岸は陸と海のインターフェースである。本稿のねらいは、流域環境の変遷と海岸の地形環境の変容との関わりを海岸侵食研究の展望を通じて俯瞰的にとらえることにある。海岸侵食は地形変化の一様式である。漂砂セルの堆積物収支に着目することにより、漂砂系と流砂系の連関の重要性を浮彫りにできる。現実の流砂漂砂系は、多様な地形環境によって特徴づけられる。比較流域学の視点から、概念モデルである漂砂セルの主要構成要素の働きと今後の課題に焦点を当てている。

キーワード：海崖侵食、海浜変形、砂浜侵食、堆積物収支、堆積物輸送、漂砂セル、流砂漂砂系

1. 序論

1.1 本稿の構成

筆者は、平成9年度から定年退職に至る平成21年度までの13年間、流域災害研究センター（前身の災害観測実験センターを含む）において沿岸域土砂環境（coastal sedimentary environment）の研究に従事した。流体—堆積物系の複雑な相互作用を核として、水際域の地形変化と災害過程に取り組んできた。液状化（liquefaction）や流動化（fluidization）をとまなうマスマーブメントの研究や、水文サイクルにおいて地下水流動や圧密（consolidation）が重要な役割を果たす広域の地盤沈下（land subsidence）の研究である（関口、2001; 2007）。山地から海岸域に至る物質フラックス、とくに水・土砂災害のリスク軽減に関する共同研究に参画する中で、災害の素因すなわち地形のなりたちを読み解き、土地利用のあり方を分析することの重要性を再認識した。その過程で、砂防学、河川工学、海岸工学、地球物理学分野の諸氏との交流はもとより、堆積学や地質工学、自然地理学のアプローチに啓発されるところが多かった。水害地形（天井川や過去の破堤・流路変動等の痕跡）や、イベント堆積物を手がかりに流域環境の変遷を解読できれば、日常の生活圏の視界からは消え去っているような災害脆弱性を浮き彫りにできる可能性がある。将来の

社会のあり方を論ずるリスク・コミュニケーションの基盤醸成にも寄与できるように感じた。

以下の1.2節では、沿岸域の土砂環境に関して最近取り組んできた課題について概述する。第2章以降では、これらの課題に通底するテーマとして海岸侵食（coastal erosion）を取り上げる。海岸は陸と海のインターフェースである。自然条件と社会条件が濃厚かつ多様に関わりあう（Fig. 1）。第2章～4章では、海岸地形の多様性と流体—堆積物系の複雑な働きを参照しつつ、漂砂系と流砂系の連関（Allen, 1997）に焦点を当てる。第5章は、海岸侵食研究の潮流を模索した文献案内である。ただし、体系的網羅には程遠いことを予めお断りしておく。第6章はまとめである。

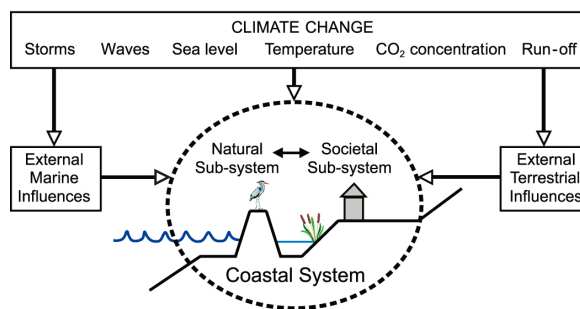


Fig. 1 Features of coastal system, with consideration of climate change (Nicholls et al., 2007)

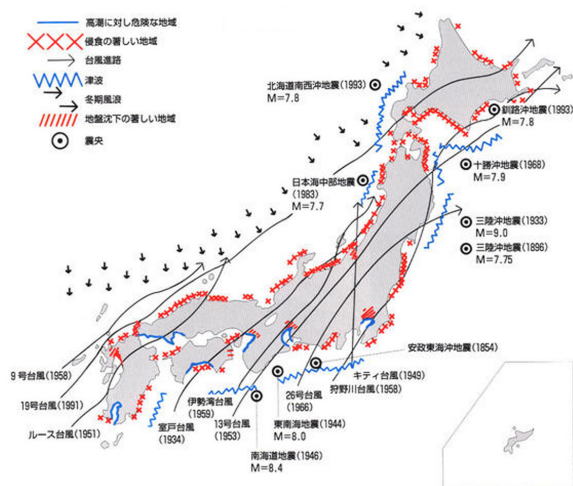


Fig. 2 Coastal hazards in Japan (MLIT, 2003)

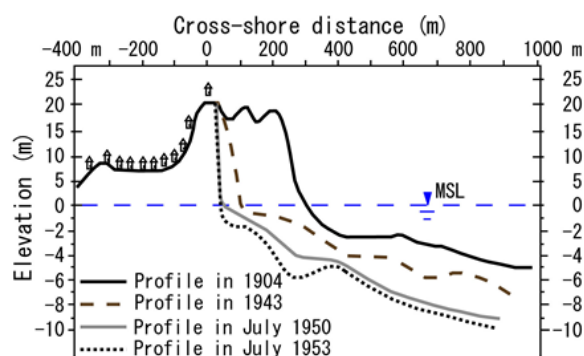


Fig. 3 Erosion of beach and dune system, West Coast of Niigata (adapted from MLIT report)

1.2 沿岸域土砂環境とは：最近の研究課題より

日本の国土は山地が多く、人口、資産および社会資本は、都市域の発達史を反映して、沖積平野や海岸平野に集中している。これらの沖積低地は、地形の特徴からして、洪水や高潮・高波等による氾濫浸水災害のリスクが高い。環太平洋地震帯に位置する弧状列島の日本は、複雑に入り組んだ長大な海岸線に縁取られている。したがって、津波災害リスクへの備えも重要である。沿岸域における災害環境のイメージをFig. 2に示す（国土交通省, 2003）。同図において、海岸侵食の全国的な拡がりにも注目したい。

地域の防災力の向上に資することを目標に、以下のような研究課題に取り組んできた。

- ① 埋没水害地形の同定—土地のなりたちをふまえた氾濫原マネジメントへの適用
- ② イベント過程を織り込んだ海岸地形環境のダイナミクスに関する研究
- ③ イベント過程を織り込んだ海岸地下水環境の



Photo. 1 Sea cliff with shore-protecting dyke, Byobu-ga-ura, Chiba (photograph 16 December 2009)

研究

課題①の背景には、次のような認識がある。従来、一級河川では水害地形分類図が作成され、有用な情報を提供している。しかし、土地利用の推移（時間の要素）を取り入れることが難しい。想定浸水範囲図（静的なイメージ）に基づいて、イベント時に刻々と展開していく氾濫ダイナミクスを想像することは、必ずしも容易ではない。このような隘路を解消するには、複雑流体（水と土砂が混然一体となった、移動境界と相変化をともしう流れ）の物理をふまえて、水害地形（自然堤防や後背湿地）のなりたちについて理解を深め、高解像度の地形計測法および景観表現を活用して、次世代型の（動的）ハザードマップに反映させていくようなアプローチが有効であろう。

課題②では、沿岸域のbarrier地形（砂州、砂嘴、海岸砂丘等）が有する自然の防災機能（地形の高まり効果）および内包リスク（極端現象にともなう防災機能の急激な喪失）の評価を目標にしている。海岸侵食との関わりも本質的な課題である（Fig. 3）。海岸侵食は、海岸構成物質の流失による地形変化（陸地の減少）を意味し、社会資本、生活基盤、海岸環境、歴史・文化景観等の劣化をもたらす。水際域の土地の減少を引き起こす広域地盤沈下との関わりも重要である（Morton, 2003; Saito et al., 2007; Mimura, 2008; Syvitski, 2008a）。たとえば、アジア・メガデルタの遠浅泥質海岸（Chao Phrayaデルタ等）では、地盤沈下にともしう水深の増加により、潮間帯環境であった海岸が潮下帯環境に遷移し波浪負荷が強まる結果、海岸侵食（beach erosion）が激しくなったと報じられている（Saito et al, 2007）。

海崖侵食（sea-cliff erosion）も基本的な海岸地形変化の様式である（Sunamura, 1973）。海崖の侵食により

海に供給された碎屑物が沿岸漂砂として系統的に輸送されると、下手の砂質海岸を涵養することも可能である(Sunamura and Horikawa, 1977; Chapman, 1981)。たとえば、九十九里浜海岸における雄大な砂浜景観の形成には、太東岬と屏風ヶ浦の侵食による碎屑物供給の寄与が無視し得ない(Sunamura and Horikawa, 1977)。しかし、近年、斜面防災の視点からこれらの海崖の基部周りには消波堤が設置され、崖から海への碎屑物供給は激減している(Photo. 1)。その影響も受けて、九十九里浜の北部や南部の海岸域では砂浜侵食が顕在化し、海岸保全対策(離岸堤やヘッドランドの設置等)が講じられるようになってきた(宇多, 1997)。海岸環境保全の複雑さを示す重要な事例である(宇多, 1997; 2004)。

津波は低頻度ではあるが、いったん発生すると甚大な被害をもたらす極端現象の一つである。したがって、津波堆積物を活用することにより、巨大津波の発生頻度を推定する研究への期待も大きい。海岸域では、津波の遡上による氾濫浸水リスクはもとより、津波流動による護岸脚部の洗掘や海底地形変化のリスク評価も重要になる(Yeh and Li, 2008)。過去に繰返し津波流動の洗礼を受けてきた現世内湾(田辺湾内之浦)の海底下に、10枚に及ぶイベント堆積層が同定された(吉永ら, 2009)。今後、さらに実海底geo-archiveを目指した展開を期待したい。

課題③は、沿岸域の物質循環とも繋がる研究テーマである。たとえば、東播海岸の場合、海崖と前面砂浜の侵食対策として養浜工(beach nourishment)が実施されてきた。養浜により、海浜地形が回復したのみならず、砂浜域の不圧地下水の再生に繋がったことは、海浜生態環境の視点からも好ましい成果といえよう(関口・東・クリヨ, 2007)。宮津湾の天橋立(砂嘴地形)においては、クロマツ林と砂浜が織りなす景観に、磯清水がエコトーンを加えている。海水域の砂嘴下に形成された淡水レンズが浅井戸の水源として長年機能していることは、海岸域の生存基盤のヒントを与えている。実際、離島や島嶼国においては、海岸地下水は貴重な淡水資源である。

以下では、課題①～③の全てに通奏するテーマとして、海岸侵食の特質を浮き彫りにすることを試みる。

2. 漂砂環境と流砂環境の連関

2.1 堆積物の特徴

堆積物(sediment)は、大気および水と同様に、地球表層の最も基本的な環境要素である。砂や泥は身近な物質というにとどまらず、現代的な科学の視点からも多くの興味深い特性を有している(Jaeger et al.,

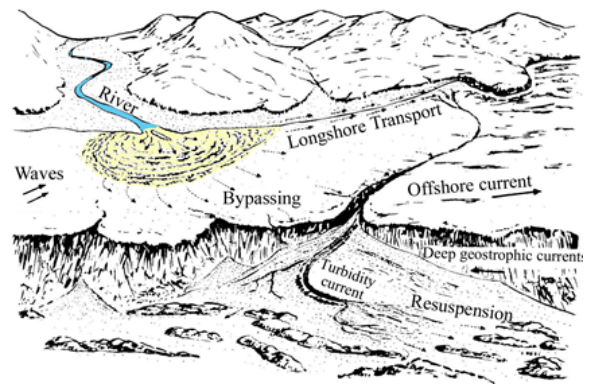


Fig. 4 Schematic of sediment dispersal system (adapted from Seibold and Berger, 1993)

1996; Siever, 1995)。地表を構成している堆積物の特徴を列挙すると、次のようになる。

- ◎particulate (粒々の集まり)
- ◎porous (多孔質)
- ◎multi-phased (多相系)
- ◎interfacial (界面が重要な役割を果たす)
- ◎multi-scaled (マルチスケール)。

これらの特徴は、風や流水による堆積物粒子の運動や、堆積物集合体の破壊や流動(マスマーブメント)、そして地形変化をとらえるうえに重要な手がかりを与える。

さて、漂砂の舞台となる海岸地形は多様性に富んでいる。プレートテクトクスに着目した大地形分類(Inman and Nordstrom, 1971)を参照すると、変動帯の海岸と非活動的大陸の海岸に大別できよう。前者は、米国西海岸や日本の駿河湾や相模湾等の海岸によく当てはまる分類である。大陸棚の幅が狭く、沖合には海溝が存在する。変動帯の海岸地形のイメージをFig. 4に示す。同図によると、河川から河口を通じて海域に運び込まれた堆積物が波や流れの作用によって分散、移動する様子(漂砂過程)をイメージしやすい。波向は海岸線に対して斜めに描かれており、浅海域(主として碎波帯内)における沿岸流や沿岸漂砂(alongshore sediment transport)の発生を示唆している(Putnam et al., 1949; Komar and Inman, 1970)。変動帯の海岸では、海岸近くにまで海底谷が迫っていることも少なくない。このような場合、暴風浪によって漂砂の一部が海底谷に流出する可能性がある。さらには、混濁流(turbidity current)となって大陸斜面を流下することも起こり得る。混濁流は堆積物重力流(sediment gravity flow)の様式であり、陸源性物質を深海に運び込む重要な働きをしている(Siever, 1995; Parsons et al., 2007)。洪水時には、浮遊運搬物質(suspended load)の一部は陸棚を超えて、直接、大陸斜面や深海域へ流出してしまう可能性がある。こ



Photo. 2 Sea cliff and fronting pebble beach, Etretat, France (photograph 27 September 2009)

のような場合には、Fig. 4中に記載のとおり，“bypassing”という表現が当てはまる。

浅海域の砂粒は、波や流れの作用により常に動いている。そのような砂粒が集積し、個々には移動しつつ砂浜地形が持続し得ているのは、自然の妙といえよう。岬にはさまれたポケットビーチ (pocket beach) の場合、特にその感を強くする (白良浜、琴引浜等)。ポケットビーチは砂浜とは限らない。波浪環境や地質環境によっては、砂礫浜や玉石浜になることもある。北フランスのEtretat海岸の場合には、海食崖を構成するチョーク層中のフリント (flint) 団塊が洗い出されて、海食台の上に薄く堆積し、玉石浜を形成している (Photo. 2)。当海岸域では、海食崖 (台地縁辺) —海食台—玉石浜が漂砂環境を形成していると見る事ができよう。

2.2 漂砂と海浜変形

波浪や流れによる砂粒の移動 (漂砂) が、直ちに海浜変形 (beach profile change) をもたらすわけではない。論点を明確にするため、直線海岸を例にとって考える。汀線と直交する方向に x 軸、汀線に沿って y 軸をとる。基準面より鉛直上向きに測った、任意点 (x, y) における海底面の高さを $z_s = F(x, y, t)$ と表す。静穏な海象条件のもとでは、海水 (water column) と海底床 (seabed) の境界面は、比較的明瞭である。高解像度の深浅測量によって、実用的な精度で水深、次いで海底面の標高を定めることができる。波や流れの作用のもとで、漂砂 (あるいはマスムーブメント) が生じる場合には、海底面は移動境界 (moving boundary) となる。ある瞬間 t に海底面に位置していた堆積物粒子が次の瞬間には海水中に巻き上げられ、別の堆積物粒子が海底面に露出したり (erosion)、浮遊堆積物粒子が海底面に沈着することもある (deposition)。したがって、力学的には、海底面は物質面ではない。言い換えると、海底面という場所を占有した粒子が、その後も継続的に海底面を占有するという保障はない。さて、海底床構成物質 (堆積物) の質量保存則

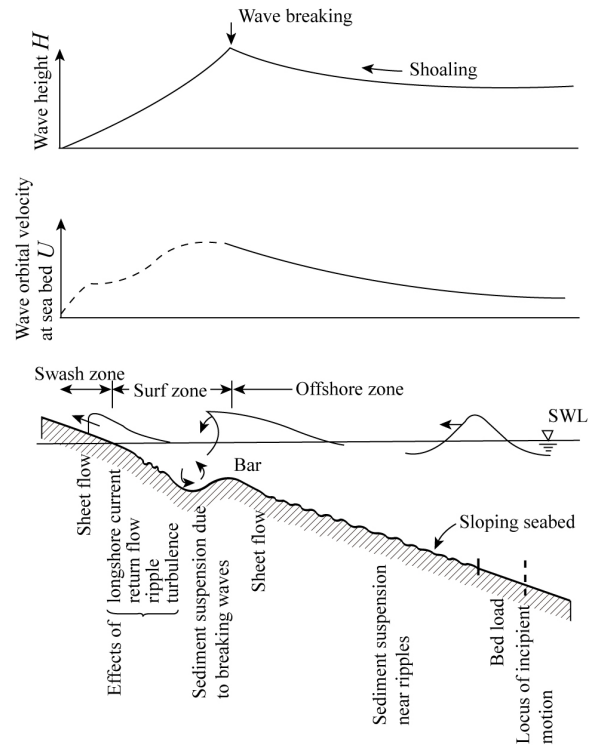


Fig. 5 Illustration of beach processes on cross-shore profile (adapted from Horikawa, 1988)

は次のように表示できる。

$$(1-n) \frac{\partial z_s}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) + D - E \quad (1)$$

ここに堆積物は非溶存性であり、海底床の空隙率 n は一定と仮定している。右辺中の $q_x(x, y, t)$ と $q_y(x, y, t)$ は、それぞれ、堆積物の実質体積表示の岸沖方向流束および沿岸方向流束を表す。海底面を横切る堆積物の流出入を $(D - E)$ 項で表す。一般に、汀線 (shoreline) の位置は潮位によって変動する。海浜変形にともなう汀線位置の変化を論ずるには、海底面 z_s と平均海面 ($z = z_{swl}$) とが交わる位置 x_{swl} の変化が問題になる。氷河性海面変動のような超長期のプロセスを考慮する場合には、平均海面の変動を考慮しなければならない。ここでは、平均海面は変化しない場合を考える。

波浪 (あるいは津波) が遡上し得る範囲の地表面は、通常は大気と地表構成物質の境界面であり、dry bedである (厳密には不飽和状態にあり、粒子間に毛管水を保持している)。しかし、波の遡上時には水面下に没し、流水の作用を受ける。このような遡上帯 (swash zone) における表面流や、地下水の浸潤・浸透、堆積物移動等の諸過程は、後浜の侵食や浜崖の形成をもたらす重要なプロセスである。高潮や津波のような超過外力のもとでは、水流が浜堤や海岸

砂丘を越流することも起こり得る。越流や越波に対する浜堤や海岸砂丘の粘り強さ(resilience)を評価するために、活発に研究が行われている(Donnelly et al., 2006; Kobayashi and Farhadzadeh, 2009)。

傾斜海底における波浪応答のイメージをFig. 5に示す(Horikawa, 1988)。波浪伝播にともない、海底面近傍には振動流が生じる(海底面には波圧変動も作用する)。これらの作用が十分に強くなると、海底面付近の堆積物は岸沖方向に運動する(一般には沿岸方向にも堆積物は移動する)。それにともない、海底面には小起伏(砂漣)が形成される。砂漣の峰付近では流れの剥離(flow separation)が起こり、渦(vortex)が生成されるため、砂粒子が巻き上げられ浮遊砂雲ができる。流れの反転のタイミングによっては、浮遊砂雲が選択的に岸側に移流・沈降したり、沖側に移流・沈降する(Yamaguchi and Sekiguchi, 2010)。流水による堆積物の輸送モードとして、掃流砂(bed load)と浮遊砂(suspended load)の概念はよく知られている。実際、河川流のような一方向流れ場における流砂量式の適用性については、膨大な蓄積がある(後藤, 2004)。しかし、波浪にともなう振動流下の堆積物輸送の物理過程は複雑であり、そのモデル化も一筋縄にはいかない(Camenen and Larson, 2005; Van der Werf et al., 2006; 2008; Nielsen, 2009)。ストーム時のように波浪負荷が厳しくなると、砂漣は消失し、海底付近では砂粒子を高濃度で含む振動流(sheet flow)が生じる。その結果、急激な海底地形が生じる可能性がある。シートフローは高濃度の混相流であり、液状化・流動化の物理とも通ずるところが多いように思われる。

実用的な海浜変形の解析(平面地形変化予測モデル)においては、漂砂量式(堆積物輸送流束 q と流体運動による底面せん断応力 τ を結びつける半経験式)を式(1)の右辺に代入し、対象海域の波浪場にに応じて、堆積物輸送流束の空間的分布とその時間的推移を求めていく(たとえば、栗山, 2006)。

2.3 漂砂系と流砂系の繋がり

海岸侵食は、物理的には、堆積物収支の不均衡を地形変化(海岸域の貯留量の変化)によって補償するプロセスである。河川から海域への堆積物の流出は、対象漂砂セル(littoral cell)にとっては流入、すなわち収入になる(Fig. 6; Komar, 1998)。したがって、河川からの堆積物供給が減少すると、それを補償するように漂砂系は応答する。

日本における海岸侵食の実態を概観しておこう。田中ら(1993)は、全国をカバーする異なる時期の地形図(縮尺: 5万分の1)を比較し、日本列島における海浜面積の推移を計量した。その結果、1973年から

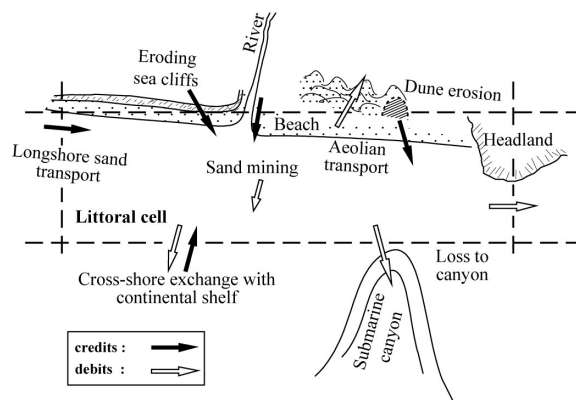


Fig. 6 Principal components involved in littoral sediment budget (adapted from Komar, 1998)

1986年に至る期間の海浜面積減少率(全国平均)は、160ha/yrに達することを明らかにした。ただし、それ以来、20年余が経過した。海岸侵食の実態を表す指標値の更新が望まれるところである。日本の一級河川に係る流砂系の現況については、藤田ら(2008)による流砂系現況マップがとりわけ興味深い(Fig. 7)。同図には以下のような情報が満載されている: (a) 河道変動状況; (b) 河道外への土砂搬出(砂利採取)の状況; (c) 流域内ダムの堆砂状況; (d) 汀線の後退が著しい海岸; (e) 荒廃地域の分布。

さて、流砂系の堆積物動態をふまえつつ、海岸域の地形変化を大局的にとらえるには、漂砂セルに基づく堆積物収支の検討が有効である。Fig. 6のような漂砂セルにおいて、堆積物の収入(credits)をもたらすのは、次のようなプロセスである。

- ・河川からの堆積物の流入
- ・海崖の侵食
- ・上手側からの沿岸漂砂の流入

堆積物の支出(debits)をもたらすのは、

- ・下手側への沿岸漂砂の流出
- ・海底谷への流出
- ・沖合への流出
- ・飛砂(砂浜から岸側への砂輸送)
- ・海底の砂礫の採取(sand mining)

実務では、深浅測量結果と式(1)の連続式に基づいて漂砂セルの堆積物収支を推定することが多い。その場合、漂砂セルの側方境界条件や沖合境界条件の設定は自明ではないことに留意したい。岬を回る漂砂フラックスの評価や沖合への堆積物流出の評価は、未解決な点が多い基本課題である。

飛砂(wind-blown sand)は砂浜の収支の面からは、一般に損失とみなされている。歴史的には、陸側の生活圏における飛砂対策(海岸防砂林等)に多大な関心と努力が払われてきた(たとえば、小田, 2003)。

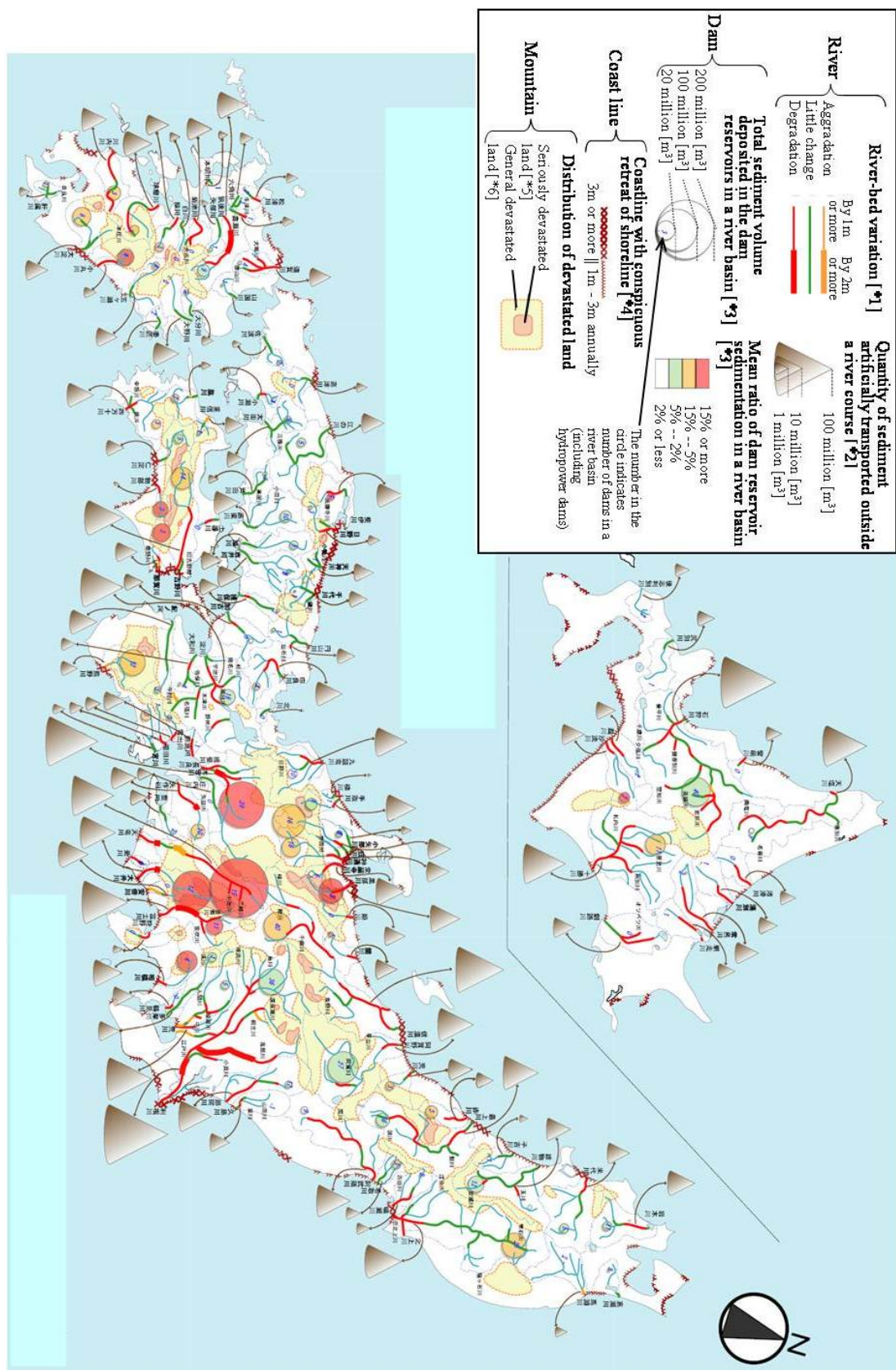


Fig. 7 Sediment transport system census map 2002 compiled by the River Bureau, MLIT, Japan (Fujita et al., 2008)

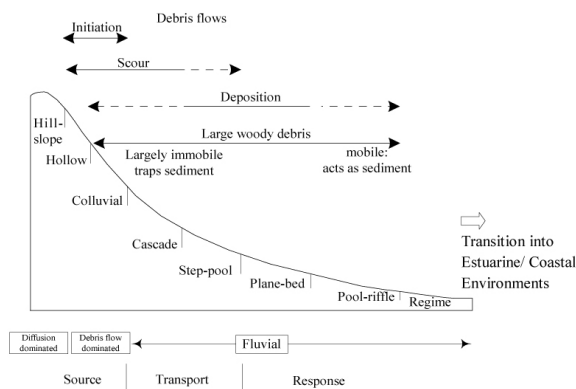


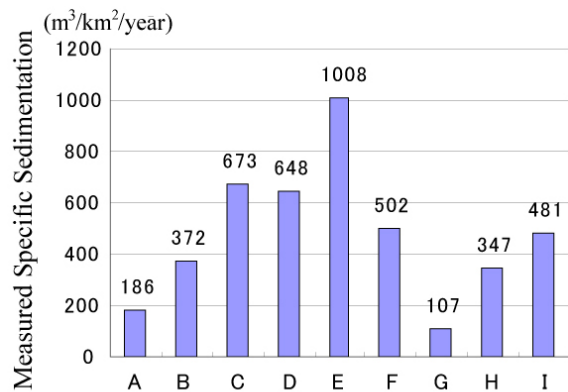
Fig. 8 Hillslope- and fluvial-process domains (adapted from Kondolf et al., 2003)

2.4 土砂生産と貯水池堆砂

河口海岸域への堆積物流出は、流砂系の最下流端のアウトプットとみることができる。したがって、その予測には、山地丘陵から扇状地を経て沖積河道系に至る一連の流砂プロセスを精確に評価する必要がある (Fig. 8)。具体的には、山地丘陵域における土砂生産 (sediment yield; sediment runoff) と、河道系における土砂流送 (fluvial sediment transport) の評価である。ここでは、土砂生産をとりあげる。

ダム貯水池は、ある意味では格好の sediment trap である。上流域で生産され貯水池まで流送されてきた堆積物を計量することができる。年当りの堆砂量 (変化量) を貯水池より上流の流域面積で除すと、比堆砂量 (specific sedimentation) が求められる。このようにして求められた比堆砂量は、当該流域における不安定土砂の生産ポテンシャルを表すとみてよい。

Suzuki (2000) は、日本における貯水容量 10^6 m^3 以上のダム貯水池 (729 個) の中から条件に合う 40 個の貯



Legend A: Hokkaido D: Kanto G: Chugoku
B: Tohoku E: Chubu H: Shikoku
C: Hokuriku F: Kinki I: Kyushu

Fig. 9 Specific sedimentation in Japan's nine regions (adapted from Suzuki, 2000)

水池を選び、比堆砂量を算定した (Fig. 9)。同図より、比堆砂量に地域性がみられることがよく分かる。最も土砂生産が活発なのは中部地域である。その比堆砂量は年間 $1008 \text{ m}^3/\text{km}^2$ に達する。削剥量に換算すると、毎年 1mm である。

大気-陸面過程を対象とした分布型流出モデルの進展は目覚ましい。精細なデジタル標高モデル (DEM) によると、50m グリッドで 1 cm オーダーの三次元座標表現は十分に可能である。たとえば、守利ら (2003) は、中部地方の矢作ダム流域 (風化花崗岩に富む; 流域面積 = 504.5 km^2) を対象として、2000 年 1 月から 12 月まで、1 年間における降雨流出および土砂流出を予測した。この期間には東海豪雨イベントも含まれる。予測結果は、矢作ダム貯水池における実測流入

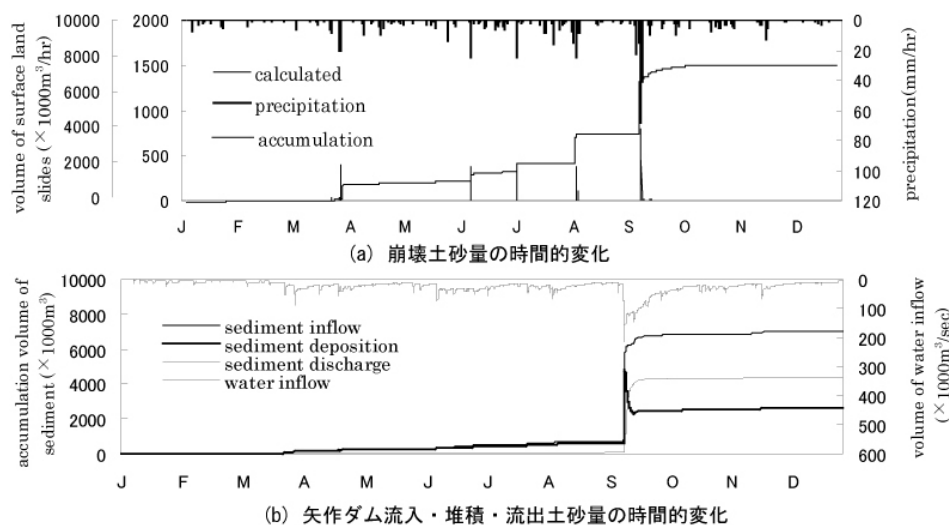


Fig. 10 Event-accentuated sediment-runoff performances for Yahagi dam basin (Mouri et al., 2003)

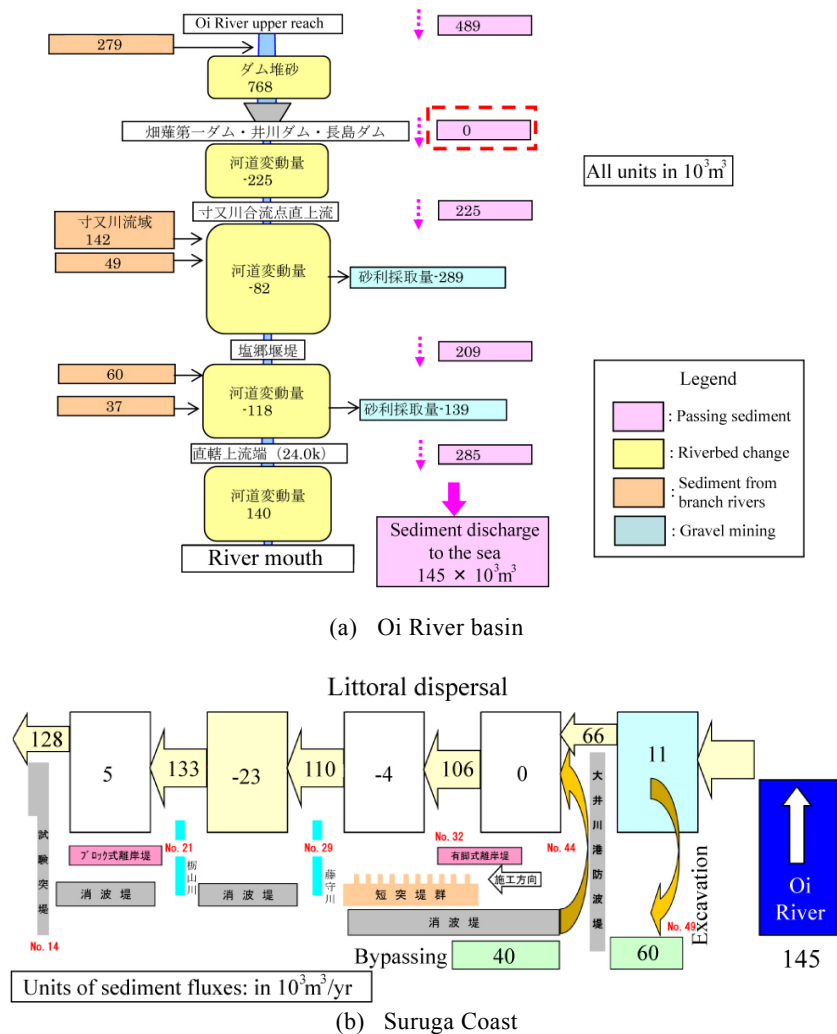


Fig. 11 Sediment routing system linking Oi River basin with Suruga coast (adapted from MLIT, 2009)

水量および実測堆砂量をよく再現している (Fig. 10)。適用された土砂生産モデルは浅層すべり破壊モデルである。飽和・不飽和降雨浸透モデルにより地下水位分布を求め、有効応力に基づく無限長斜面安定解析法により、各グリッドにおけるすべり安全率(factor of safety)を求める方法である。安全率の値が1.0を下回ったグリッドにおいては、土塊は“瞬時”に河道に流出する、との仮定が導入されている。河道部において考慮された土砂輸送形態は次のようである：土石流(debris flow); 掃流砂(bed load); 浮遊砂(suspended load); 微細砂(wash load)。それぞれに対して数理モデルが適用された。

ダム貯水池流域における流出解析結果によると、1年間当り次のようになる：

- ・貯水池への流入土砂量= $7.0 \times 10^6 \text{ m}^3$
- ・貯水池の堆砂量増加量= $2.6 \times 10^6 \text{ m}^3$
- ・貯水池からの流出土砂量（大部分は微細土砂）
= $4.4 \times 10^6 \text{ m}^3$

実測による貯水池の堆砂量増加量は、 $2.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ で

あった（予測値と整合）。

なお、貯水池からの流出土砂量(wash load)を計量することは現在でも技術課題であり、矢作川においても実測値は報告されていない。

2.5 流砂漂砂系の堆積物収支の検討例：大井川—駿河海岸系

砂礫海岸マネジメントには、漂砂セルに基づく堆積物収支の検討が見通しを与える。ここでは、変動帯における流砂漂砂系の連関の例として大井川—駿河海岸系をとりあげる (Fig. 11)。

大井川の源流域は標高3000mに達する南アルプスである。幹川流路延長は168km、流域面積は1280 km²である。山間部は平均年間降水量=2400~3000mmの多雨地帯であり、水力資源に恵まれている。そのため、電源開発が活発に進められてきた。ダム・河道領域における実績土砂収支図をFig. 11(a)に示す（国土交通省，2009）。ここに、河道変動量と砂利採取量は1996年~2002年の実績に基づいている。大

規模ダムとしては、本川の上流側から順に畑薙第一ダム、井川ダム、長島ダムがある。これらのダム貯水池への堆砂が進行中であるため(年間76万8千 m^3)、下流河道への土砂流出は実質的にゼロになっている。したがって、現在の大井川では、直轄上流端(河口より24 kmの地点)を通過する土砂流量は、同地点に至るまでの河道低下による土砂生産量と支川からの土砂流入量の和から、川砂利採取量を差し引いたものになる(すなわち、年間28万5千 m^3)。直轄上流端より河口までの区間では、流送土砂の一部は河道堆積をもたらす結果、河口に到達する流送土砂量は14万5千 m^3 となる。

その中、どれくらいの量の堆積物が河口両側に展開する海岸(駿河海岸)を涵養しているのか?そのヒントを与える資料をFig. 11(b)に示す(国交省, 2009)。同図では、大井川河口域と左岸側(北側)海岸域における堆積物収支を評価している。基本となる地形変化の数値モデルはone-lineモデル(汀線変化モデル)であり、検討対象となる漂砂帯は、T.P.+2m~T.P.-10.0mの範囲を設定している。1992年~2004年の間における定期深淺測量成果とone-lineモデルによる沿岸漂砂フラックスの評価を統合して得られた結果が図13(b)である。同図の結果を読み解くために、以下の3点に留意したい。(a) 河口左岸域における大井川港の存在による沿岸漂砂の分断化の程度、(b) 試験突堤(地点No.14)の北側の海域(焼津市田尻地先沖)における海底谷の存在、(c) 大井川河口テラス域における堆積物分配機構。

項目(a)については、大井川港防波堤の上手側への土砂堆積を利用した下手側へのsand bypassingに加えて、防波堤先端を周り込む沿岸漂砂フラックス(年間6万6千 m^3)の存在が興味深い。大井川北側海岸の平均沿岸漂砂フラックスは概ね年間10万 m^3 に達するので、不足分の年間4万 m^3 をsand bypassingにより補っている。現況では地点No. 21-29の区間の漂砂セルにおける貯留量は年間2万3千 m^3 の減少傾向にある(侵食)。その遠因としては、北向き沿岸漂砂のかんりの部分が海底谷に流出してしまうことが挙げられる。No.14地点における試験突堤は、海底谷への土砂損失の制御機構を明らかにする目的で設置されたものである。モニタリング結果によると、近年、試験突堤下手側が侵食傾向にあり、漂砂機構の検討が進められている(国土交通省静岡河川事務所, 2005)。

河川からの土砂流送(Fig. 11(a))と沿岸漂砂系を結びつけるのが、河口テラスにおける土砂分配機構である(Fig. 11(b)参照)。大井川の場合、ピーク流量3000 m^3/s 級の出水により、河口テラスには30万 m^3 程度の土砂堆積(貯留量Sの増加)が観測されている(西川ら, 2006)。洪水イベント性の土砂堆積が、その後

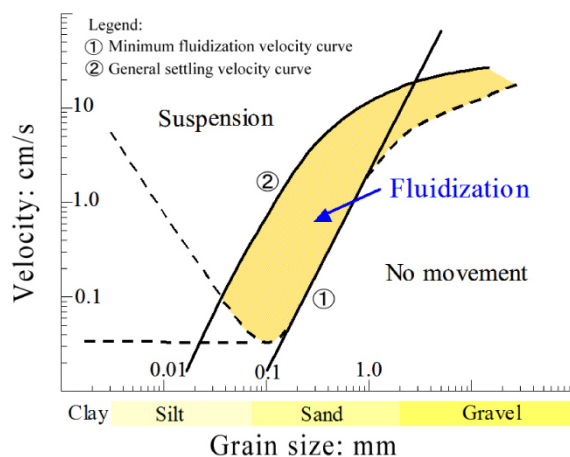


Fig. 12 Variations of critical velocities with grain size (adapted from Lowe, 1975)

どのようなプロセスを経て周辺海岸域に分配されていくのか、堆積物の粒度を考慮した時空間特性の解明を期待したい。

3. 複雑流体アプローチの話題

漂砂セルに基づく堆積物収支の検討の枠組(Fig. 6)において、未解明な点が多いのは沖合境界を横切る堆積物の流出入機構である。沖合への堆積物流出を全く無視すると、陸棚に未固結堆積物が厚く堆積している地質学的知見(shelf sedimentation)と相容れない。本節では、暴浪の作用により細砂やシルトが液状化あるいは流動化する可能性に着目し、流動化(fluidization)の物理の一端を紹介する。

3.1 流動化による堆積物の相変化

流動化すると、堆積物はあたかも流体のようになる。その意味で相変化が生じたとみることもできよう(Fig. 12; Lowe, 1975)。図中の曲線①はボイリング(boiling)の発生に対応する。ボイリング発生時の限界動水勾配(絶対値)を i_{cr} とおくと、Terzaghi et al. (1996)を参照して、以下のように表せる。

$$i_{cr} = \frac{\rho_s / \rho_w - 1}{1 + e} \quad (2)$$

ここに、 ρ_s と ρ_w は土粒子と間隙水の質量密度、 e は間隙比である。限界動水勾配に達するまで浸透流がDarcy則にしたがうとすると、ボイリング発生時の鉛直流速 $v_{cr}^{(1)}$ は次のように表せる。

$$v_{cr}^{(1)} = k \cdot i_{cr} \approx (1.0 \sim 0.7)k \quad (3)$$

ここに、 k は透水係数である。

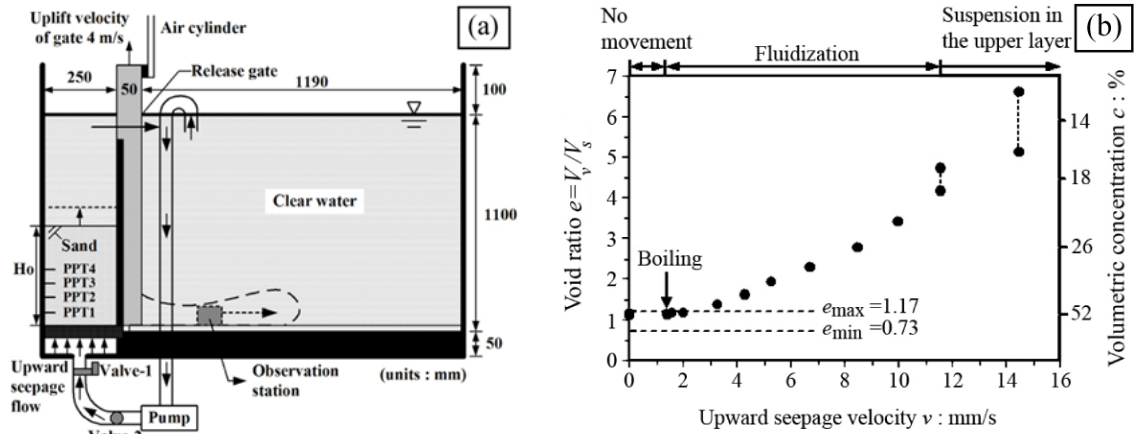


Fig. 13 Changes in states of soil with increasing upward seepage velocity (Amiruddin *et al.*, 2006)

したがって、Fig. 12中の曲線①は、堆積物（土粒子の集合体）における透水係数 k の値が代表粒径 d の値に応じて増加するようすを表していると解釈できる。粒径 d が概ね1mm以下では、透水係数 k は d^2 に比例する一方（層流域）、粒径 d が数mmを超えると流れの乱れの効果が顕著となり、透水係数 k は概ね $d^{1/2}$ に比例する（乱流域）。

Fig. 12中の曲線②にみられる粒径依存性(Lowe, 1975)は、干渉沈降(hindered settling)モードにおける沈降速度 w の粒径依存性を思い起こすと理解しやすい。ここに、沈降速度は土粒子(grain)または土粒子群(sediment grains)と周囲流体間の相対速度であることに留意したい。

干渉沈降速度を表す実験式としては、次式がよく知られている(Richardson and Zaki, 1954)。

$$w = w_0(1 - c)^n; \quad n = 4.65 \quad (4)$$

ここに、 c は土—水混合体(soil-water mixture)において土粒子群が占める体積濃度、 $w_0(d)$ は静水中の単一粒子の沈降速度（粒径 d に依存）を表す[式(4)において $c \rightarrow 0$ の場合に対応する]。

土—水混合体において、干渉沈降とバランスし得る上向き浸透流を作用させると、巨視的には定常的な懸濁状態(suspension)を実現することができる。そのときの限界流速（絶対値）が $v_{cr}^{(2)}$ に対応する。すなわち、 $v_{cr}^{(2)} \sim w$ となる(Amiruddin *et al.*, 2006)。このように解釈すると、掃流域では限界流速 $v_{cr}^{(2)}$ は d^2 に比例し、乱流域では $d^{1/2}$ に比例する傾向を理解しやすい。

砂質土の流動化特性を示す室内実験結果を簡潔に紹介する。ケイ砂No.6（中央粒径=0.32mm）を用いて上向き浸透流実験を行った(Amiruddin *et al.*, 2006)。この砂の最密充填に対応する間隙比(e_{min})は0.73、最も緩い充填状態に対応する間隙比(e_{max})は

1.17であった。使用した水槽をFig. 13(a)に示す。緩め状態の砂層内に上向き浸透流を生じさせ、徐々に流量速度 v の値を増やしていく。しばらくの間は動水勾配が大きくなるだけで、砂層の変形は無視できる程度である。しかし、動水勾配の値が限界値 $i_{cr}^{(1)}$ に近づくと砂層表面の膨れが顕著となる。そして、動水勾配が限界値に達すると、砂層表面はあたかも沸騰したように変動する。これがボイリングである(Fig. 13(b))。巨視的には、この状態においても砂層全体の間隙比（あるいは体積濃度）を評価することは可能である。さらに上向き浸透流速をあげていくと、流動化状態は継続し、対応する体積濃度 c の値は減少する。当実験では、流動化状態の土—水混合体の上面と、その上部の水柱の境界面が（巨視的に）シャープなのは、体積濃度 $c=0.2$ （20%）程度以上の場合であった。このときの流速 v の値は11-12mm/s程度であった($v_{cr}^{(2)}$ に相当)。この値は、ボイリング時の流速値 $[v_{cr}^{(1)}=1.5-2.0\text{mm/s}]$ の6~7倍である。浸透流速の値を $v_{cr}^{(2)}$ 以上に増加させると、土—水混合体と周囲流体の界面は拡散し、いわゆる懸濁状態(suspension)という形容がふさわしくなる(Fig. 13(b))。

以上のような砂質土の一連の状態変化の観察を通じて、Loweによる相変化の概念モデル(Fig. 12)の物理的な裏付けについて理解を深めることができる。

3.2 水中における堆積物重力流

流動化した後、砂質土がどのように流れ、減速し、そして再堆積するかは、サイエンスの視点からも興味深い課題である。

流動化によって発生した堆積物重力流の減速・停止過程には、流動体の内部に自律的に発達する凝固域(Miyamoto *et al.*, 2004)が重要な働きをしている

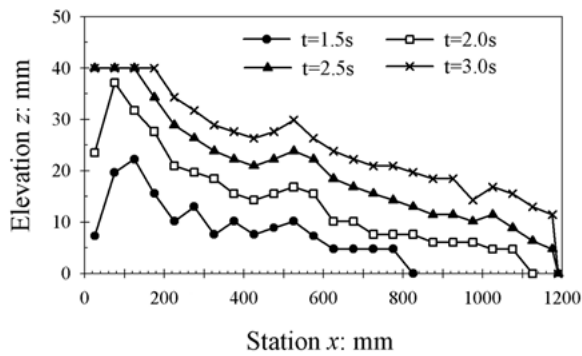


Fig. 14 Observed solidification fronts in subaqueous sediment gravity flow (Amiruddin et al., 2006)

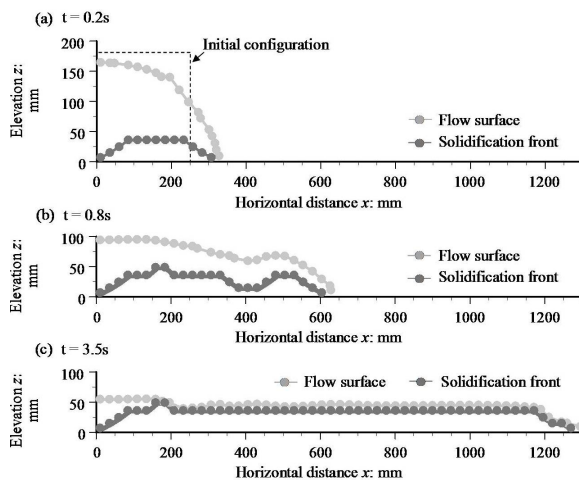


Fig. 15 Predicted performances of flow surface and solidification front, in terms of LIQSEDFLOW

(Amiruddin et al., 2006)。堆積物流動実験に用いた水槽をFig. 13(a)に示す。まず、リリースゲートを閉じた状態において、砂層を上向き浸透流によって流動化させる。引き続いて、ある瞬間($t=0$)にリリースゲートを急激に引き上げ堆積物重力流を発生させる。その後の流況を高速カメラで撮影し、PIV(particle image velocimetry)による画像解析を行った結果をFig. 14に示す(Amiruddin et al., 2006)。同図は体積濃度 $c=38\%$ の場合の実験結果であるが、流れの進行にとりも、堆積物重力流の下部域に凝固域が形成され、次第に発達していく様子がよく分かる。凝固域(固体状態)とその上位の流動域の境界面が凝固フロントである。凝固フロントが流動体の表面に到達(流動層の厚さはゼロに縮退)したときに、流れは停止し、流動化土は固体状態に戻る。このように再堆積した土塊の体積を実測し、平均的な間隙比 e の値を求めると、 $e=1.11$ であった。この値は用いた砂の $e_{\max}$ の値(1.17)よりわずかに小さい。したがって、この堆積物重力流実験では、体積濃度 $c=38\%$ の土-水系が重力流として流動する過程で、自律的に構造骨格

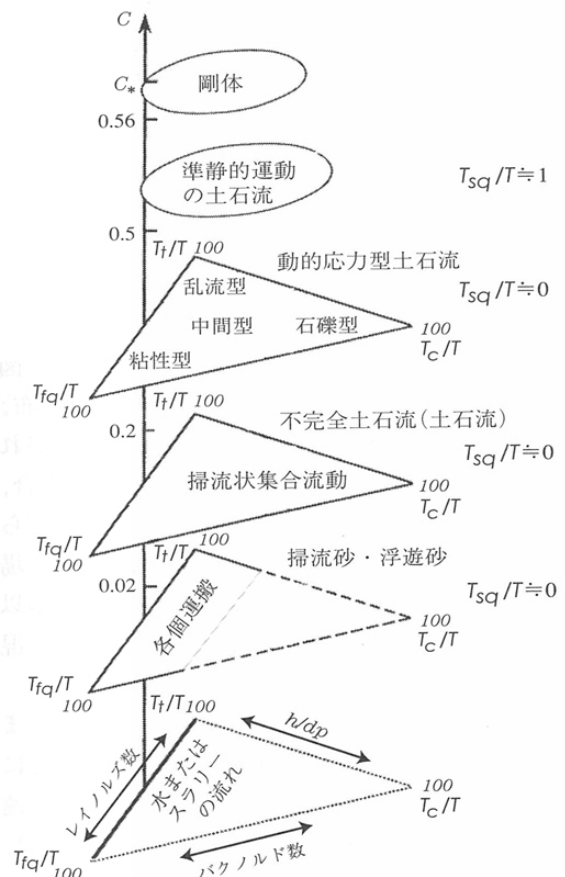


Fig. 16 Idealized flow regimes for water-sediment or slurry-sediment mixtures (Takahashi, 2004)

を再形成し、最終的には緩詰め状態の土(体積濃度 $c=46\%$ 強)に戻ったわけである。

上述のような流動化土の流況は、進行性凝固(progressive solidification)の物理過程を考慮した二次元非定常流動解析コードLIQSEDFLOW(佐々・関口, 2009)によって、概ね再現できる(Fig. 15)。興味深いことに、対象とした高濃度堆積物重力流では乱流の影響はほとんど見られない。

そのような流況は、高橋(2004)の分類(Fig. 16)を参照すると、概ね粘性土石流モードに対応している。

4. 地形環境アプローチの話題

4.1 孤立漂砂系に遷移した砂浜海岸：上越地域海岸を例にして

わが国の砂浜海岸の成り立ち、特に、日本海に面する砂浜の地形環境に着目すると、後背砂丘が果してきた自然の砂貯留機能の再評価が必要のように感じる。本節では、高田平野の北縁に位置する上越地域海岸を取りあげる(Fig. 17)。当海岸域では、関川河口右岸の直江津港の発展、とくに沖防波堤の建

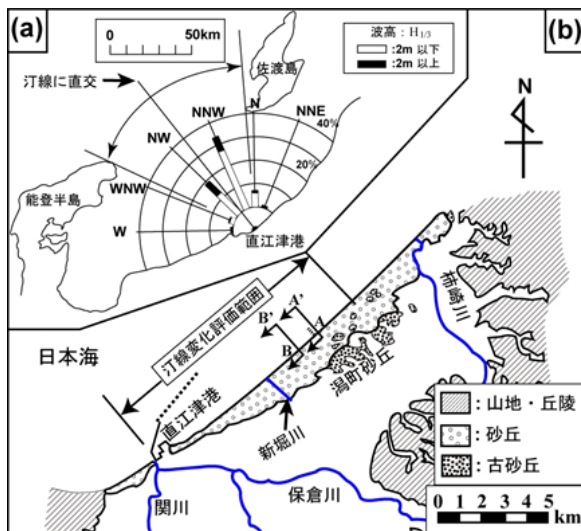


Fig. 17 Features of Joestu coast facing the Sea of Japan: (a) wave climate; (b) geomorphological setting

設と延伸により、河川流砂系から分断されている。海岸保全事業による汀線の固定化にともない、わが国有数規模の砂丘体（潟町砂丘）との堆積物循環も実質上、分断されている。

汀線位置の変遷 まず、過去90年間における汀線の変遷について調べた（東ら，2009）。地形図幅「潟町」（1/25,000）の1914年版から2002年版まで計8枚をデジタル化，GISを活用して，汀線位置の地理情報化を実施した（読取り誤差±8.2m）。関川河口右岸の直江津港拡大（埋立）による汀線変化の影響を直接には受けない海岸域（延長9.6km）を選定し，海浜面積および汀線位置の平均変化量を求めた（Fig. 18）。同図によると，1991年頃までは海浜面積が減少，汀線が後退している。しかし，1991年以降は汀線位置は概ね安定している。これは，侵食対策のため実施されてきた海岸保全事業の効果の表れとみることができる。

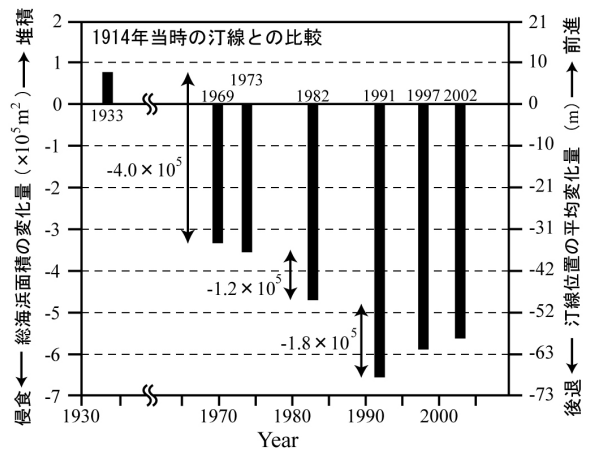


Fig. 18 Long-term changes of beach area

海底地形断面の変化 上越地域海岸では，近年，数度にわたって強大なストームが来襲していることもあり，直立防潮護岸等の海岸構造物の被災が目立つ。言い換えると，汀線は護岸や汀線消波堤等により固定化され安定しているように見えるが，海底地形はダイナミックに変動していることが推察される。

新潟県による深浅測量成果図（水深コンター図；1998，2001，2003，2005年の4年度）をデジタル化しGISに適用，空間補間を行うことにより，各年度における海底地形断面を作成した。代表的な岸沖断面として，断面A-A' およびB-B' における地形変化をFig. 19に示す。断面A-A' については，1961年当時の海底地形（帝国石油資料による）を併示した（Fig. 19(a)）。

高解像度の海底地形計測とその意義 従来の深浅測量では，シングルビームの音響測深によることが多く，測線間隔も100m～200m程度が普通である。したがって，人工リーフのような構造物周りの地形変化（洗掘や異常堆積）を高解像度でとらえることは難しい。最近では，その隘路を開する計測技術（Swath Bathymetry Sonar System等）が開発されており，

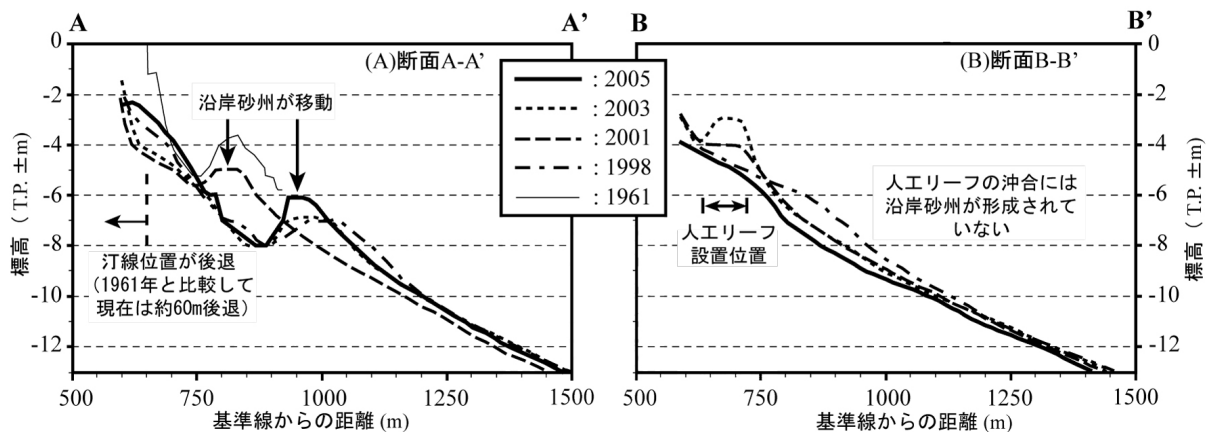


Fig. 19 Evolutions of cross-shore seabed profile: (A) along line A-A' ; (B) along line B-B'



Fig. 20 Snapshot of high-resolution bathymetry campaign on Ogata Beach using multi-angle swath side-scan sonar (photograph 29 July 2008)

海岸海洋地形学の新たな発展を促している(Hanes, 2009)。

大潟海岸において2008年7月27～30日、3次元マルチサイドスキャンソナー(C3D)による海底地形計測を行った。現地計測中の様子をFig. 20に示す。

上述の3次元マルチサイドスキャンソナー計測の成果は、2m格子の3次元座標データ群である(水深の計測精度は10cm程度)。その結果をもとに描いた水深0.5m間隔の等深線をFig. 21に示す(東ら, 2009)。同図によると、以下の特徴が明らかである。

- 1) 人工リーフ(天端水深2m)の沖合(水深8m線より沖)における湾入状の海底地形(侵食域を示す)
 - 2) 京大観測栈橋(K)の沖合に存在する大規模な弓形砂堆(頂部水深～7m)
 - 3) 人工リーフ周辺における顕著な局所変形。
- 従来、大潟海岸および直江津海岸における、波浪

による地形変化限界水深は約8mと評価されてきた(宇多, 1997; pp. 141-149)。しかし、Fig. 21に示めた観測結果によると、等深線8.5m, 9.0m, 9.5m, 10.0mのいずれも沖方向に凹な侵食地形を示唆しており、近年における海岸波浪場の変動(wave-forcing variability)を想起させる。

以下のような課題について、今後の検討を期待したい: (a) 直江津港沖防波堤延伸にともなう波浪場の変化, (b) 長大な人工リーフ(計4基)の存在による波浪場や流れ場(離岸流)の変化, (c) 近年における冬季暴風浪場の経年変化特性。

三次元マルチサイドスキャンソナー計測によると、高分解能の測深のみならず、精細な海底音響画像を得ることもできる。大潟海岸における2008年7月調査の成果の一例をFig. 22に示す。図中のマーク3は、人工リーフDS-1の東部をとらえたものである(天端ブロックを個別に識別することも可能)。図中のマーク2は、京大観測栈橋の基礎杭の設置位置(T字型配置)を明瞭にとらえている。ちなみに、沖合3本の基礎杭間の間隔はいずれも50mである。先に述べたように、観測栈橋と人工リーフDS-1の沖合には大規模な弓形砂堆(比高約2m)が存在する。それが見事に音響画像上でもとらえられている(図中のマーク1)。その岸側の暗色部は、凹地すなわち弓形砂堆のトラフ(trough; 水深9m)に対応している。これらの特徴ある海底地形は、強大なストームの来襲により形成された可能性が高い。

海底表層堆積物と漂砂系堆積物収支の関わり 上述の特徴ある海底地形のなりたちと漂砂動態の関わりを調べるために、2009年7月に観測栈橋と人工リーフDS-1の間の海域(水深20m～水深5m)において、計10本のパイロ・コアサンプリングを実施した(東

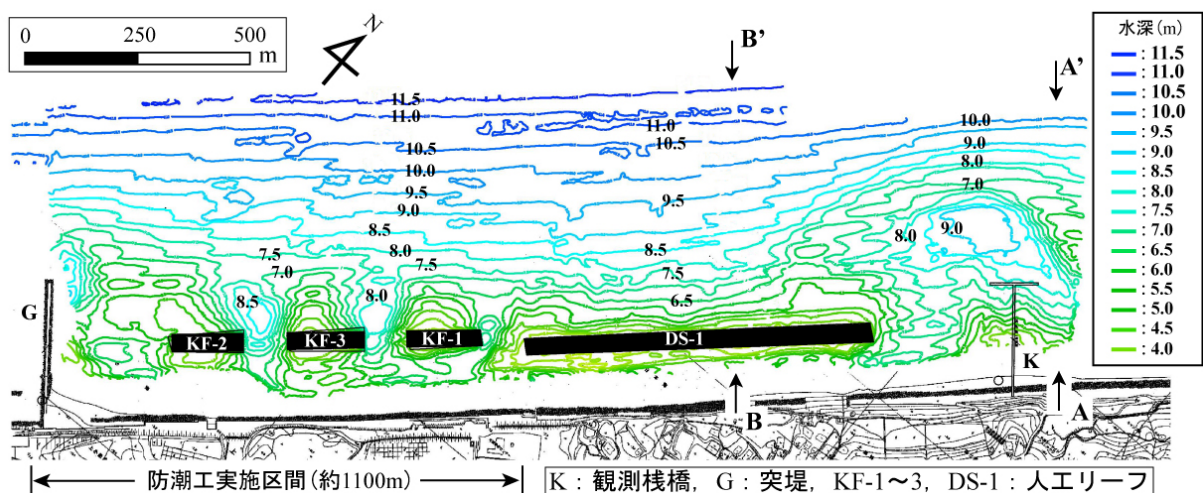


Fig. 21 Isobaths with 0.5m intervals obtained from the July 2008 high-resolution bathymetry on Ogata Beach

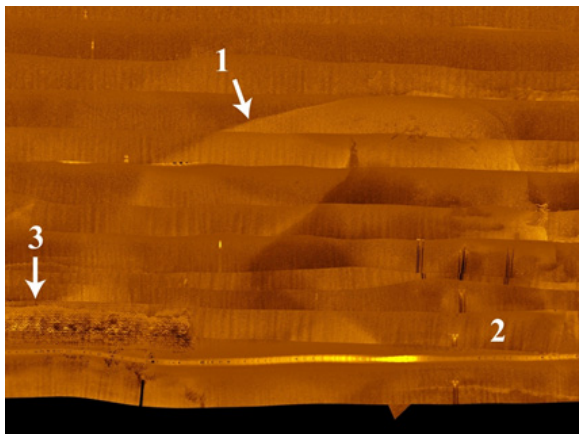


Fig. 22 Side-scan imagery depicting the bow-shaped, large sandbar (marked 1)

ら、2010)。その結果、弓形砂州周辺を境にして堆積物の粒径の変化が顕著であり、砂州より沖側のコアでは微細砂が卓越していることが明らかになった。

特筆されるのは、弓形砂州のトラフ位置のバイブロコアリング(VCS_06)により、標高T.P.-9.7m~-10.3 mの間に粘土塊とシルト層試料が採取されたことである。外洋に面する波浪環境の厳しい内側陸棚や下部外浜における泥層の形成は、従来は“paradoxical”とみなされてきた(Hill et al., 2007)。しかし、例えば、Eel陸棚堆積作用の調査研究の成果（後出のFig. 26参照）によると、高波浪環境の内側陸棚において洪水性堆積物（泥層）の分布が確認されている。今後の検討における重要な視点になることは間違いない。

さて、大潟海岸域では1960年頃に海底油田が発見され1980年代の半ば頃まで石油採取が行われていた。1960年当時に実施された海上調査ボーリング柱状図（帝国石油報告書、1961）を仔細に検討すると、2009年バイブロコアリングによる泥層出現深度と概ね対応する層準に、シルト粘土層の記載がある。1960年当時の海底面標高はT.P.-6.5mであったので、その後、約50年間の海岸侵食の進行により、海底面は約3m低下した。そのため、被覆層となる漂砂層が薄くなり、バイブロコアリング技術の進展とあいまって、はじめて現世外浜環境における泥層（および泥塊）の採取が可能になったと考えられる。

2009年バイブロコアリング、帝国石油海上調査ボーリングおよび潟町砂丘陸域部の既存長尺ボーリング結果を対比すると、大潟海岸の沖合（弓形砂州域を含む）の海底下に古砂丘体が埋没していることは確実である。大潟海岸では海底地形変化（侵食）が周辺海域よりも顕著であり、埋没古砂丘の存在が一つの要因(rock control)になっている可能性がある。



Photo. 3 Storm-induced damage to a stretch of retaining wall of the Seisho Bypass (photograph 16 September 2007)

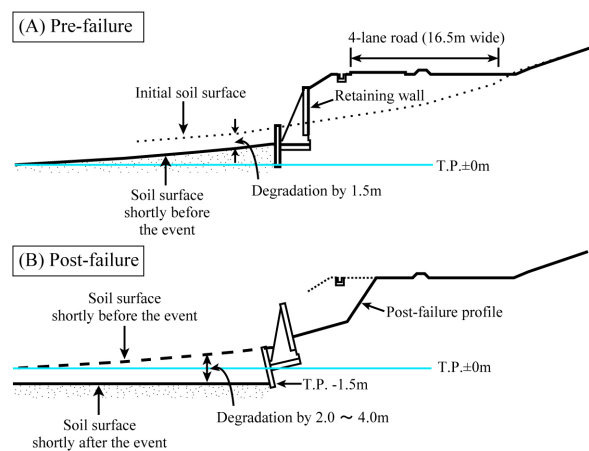


Fig. 23 Pre- and post-failure profiles of retaining-wall-supported seaside road, with stages of degradation of the fronting sandy beach (adapted from Yokohama Road Office, 2007)

4.2 変動帯における海岸環境保全：海底谷に面する砂礫海岸の課題

(1) 台風高波による西湘バイパスの被災

2007年9月6日から7日にかけて台風9号の来襲による高波のため、相模湾北縁岸の西湘海岸を中心に大規模な海岸侵食や海岸道路（西湘バイパス）の被災が生じた（国土交通省横浜国道事務所、2007）。大磯付近の西湘海岸に被害が集中した流体力学的機構については、西湘海岸保全対策検討委員会レポート（2008）や田島ら（2008）の分析に詳しい。

被災直後における西湘バイパス擁壁の変状と緊急復旧工事の様子をPhoto. 3に示す。被災前と被災後の道路擁壁—砂浜系の断面図を比較したのが、Fig. 23である（国土交通省横浜国道事務所、2007）。Fig. 23(a)によると、同区間では海岸道路は西湘海岸の後浜位置に建設されたことがうかがえる。建設当時とは、擁壁の基礎工は砂浜内に十分深く根入れされていたと考えられる。しかし、その後の長年の海岸侵食に

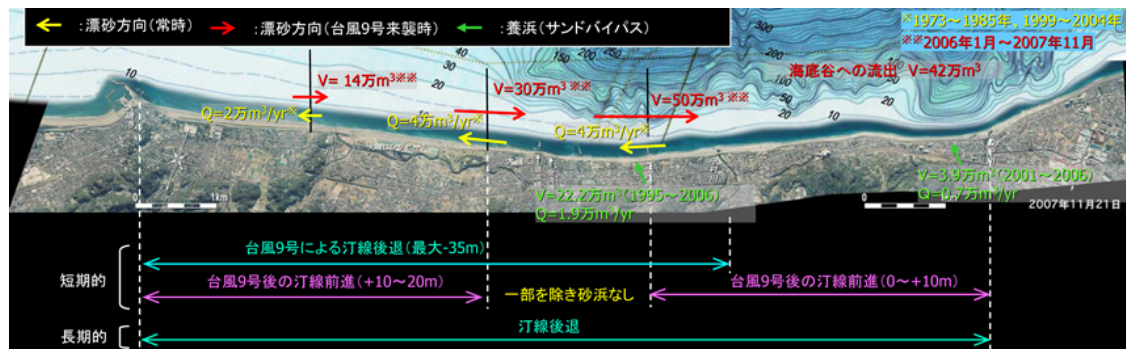


Fig. 24 Event-accentuated sediment dispersal with typhoon 9 in September 2007, emphasizing the importance of sediment loss into submarine canyons (Seisho Coast Research Committee, 2008)

より、2007年台風9号来襲時点までに砂浜は約1.5m、低下していた。このような状態になると、高波の作用により擁壁脚部では洗掘や吸出しが強調されやすい。それらにともなって擁壁脚部の水深増加や裏込土の流出が生じると、波の打上げ高さの増大や擁壁の支持力劣化に繋がる。その結果、海岸道路の被災拡大の一因になった可能性が高い。

西湘海岸における常時および台風高波イベント時の土砂動態が西湘海岸保全対策検討委員会(2008)によって比較、検討されている (Fig. 24参照)。西湘海岸においては、常時には東向きの沿岸漂砂が卓越し、酒匂川からの供給土砂が砂浜を涵養してきた経緯がある。しかし、近年では酒匂川からの土砂供給が減少し汀線後退の趨勢にあるため、養浜の実施により砂浜保全を図ってきた。二宮海岸域では、1995年から2006年の間に総量22万2千m³の養浜が行われている。しかるに、2007年台風9号の来襲時には、一

転して西向きの沿岸漂砂が卓越し、大規模な砂浜侵食をもたらした。2006年1月から2007年11月の間の海岸線変化の実測値と漂砂移動高さの推定値 (8.2m) に基づいて、大磯港より西側約8.5 kmの区間における地形変化量が推定された。その結果、2007年台風9号イベントによる土砂損失量が42万m³に達することが明らかになった。

この大量の土砂はどこに行ったのか？ Fig. 24から明らかなように、西湘海岸の沖合には海底谷が存在し、その谷頭が沿岸近くまで迫っている。台風イベントによる侵食土砂は最終的に海底谷に流出した、という西湘海岸保全対策検討委員会(2008)の推論には説得力がある。

(2) 南CaliforniaのSanta Barbara漂砂セル

California沿岸域には多数の海底谷が存在し、漂砂系のコンパートメント化をもたらす主要な要因の一

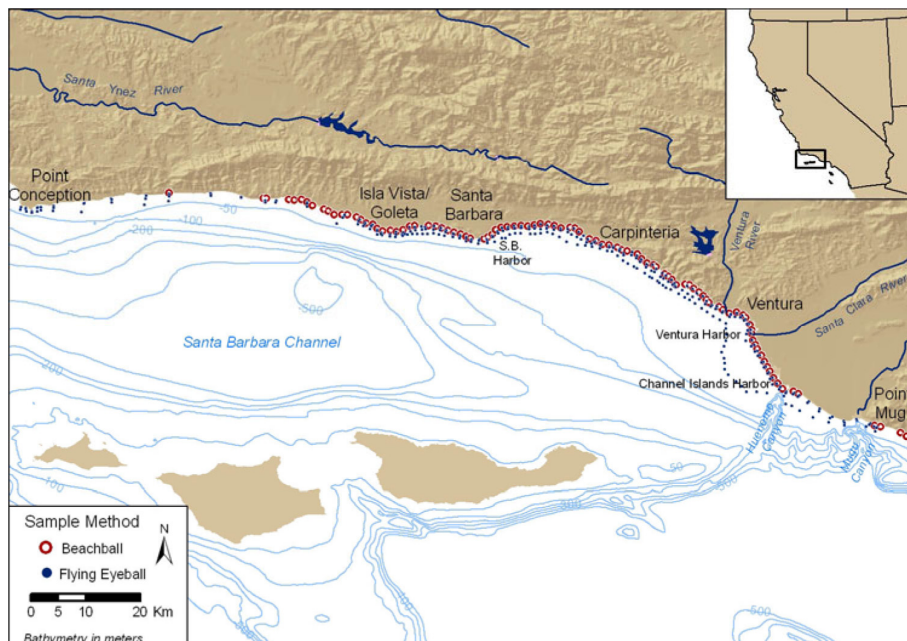


Fig. 25 Santa Barbara littoral cell from Point Conception to Mugu submarine canyon (Mustain et al., 2007)

つになっている。ここでは、沿岸漂砂が卓越する Santa Barbara 漂砂セルをとりあげ(Patsch and Griggs, 2008)、港湾施設におけるサンドバイパスの意義と、貴重な漂砂資源が定常的に最下流端の海底谷に流出している現実を紹介する。

Santa Barbara 漂砂セルの案内図(Conception 岬から Mugu 海底谷まで)を Fig. 25 に示す(Mustain et al., 2007)。Conception 岬の南側の海域(Santa Barbara Channel)では、概ね西から東に向かう沿岸漂砂が卓越している。Santa Barbara 流域では都市化が進んでおり、沿岸域には4つの港湾が整備されている(上手側から、Santa Barbara 港, Ventura 港, Channel Islands 港, Port Hueneme 港)。これらの港湾施設によって沿岸漂砂は一時的に阻止されるが、定期的に維持浚渫および下手側へのサンドバイパスが行われており、実質的に沿岸漂砂の連続性が確保されている。Patsch and Griggs(2008)は、それぞれの港湾における維持浚渫記録に着目し、漂砂セルの堆積物収支解析に組み込むことにより、年平均沿岸漂砂フラックスが上手側から下手側に向けて系統的に増大していることを見出した。すなわち、まず、Santa Barbara 港地点を通過する沿岸漂砂フラックスは 320×10^3 (cu yards/yr)であることを示した。隣接する下手側のサブ漂砂セルでは、砂浜侵食が生じており、流入河川も存在する(Ventura 川)。それらによる土砂供給を考慮すると、Ventura 港地点を通過する沿岸漂砂フラックスは、 600×10^3 (cu yards/yr)となる。この推定値は、Ventura 港における維持浚渫実績と概ね整合する。隣接のサブ漂砂セルには Santa Clara 川が流入しているため、下手側に向けて沿岸漂砂量がさらに増大することが予想される。実際、Channel Islands 港と Port Hueneme 港を合わせたサンドバイパス量は、年間 1000×10^3 (cu yards/yr)に達する。そのほぼ全量が下手側に存在する Mugu 海底谷に流出している(Patsch and Griggs, 2008)。

南 California では砂浜はきわめて重要な観光資源であり、地域経済への貢献も大きい。したがって、沿岸漂砂は貴重な資源であり、その保全策が注目を集める背景はよく理解できる。たとえば、海底谷の手前に漂砂をトラップする仕掛けをつくり、サンドバイパス(あるいはサンドリサイクル)に資するような構想である。その妥当性については、綿密な環境アセスメントが前提になることは論をまたない。

4.3 陸棚における洪水堆積層の形成

変動帯においては、山地が海に迫っており河口デルタの発達はほとんどみられない。したがって、洪水時には大量の土砂が直接、海域に流入する。近年、北 California の Eel 流域を観測フィールドとして、陸棚における洪水堆積層の形成機構が明らかになっ

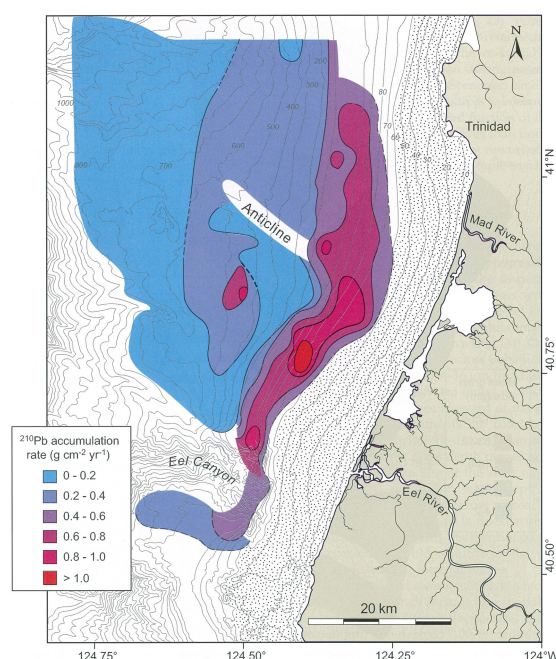


Fig. 26 Rates of sedimentation on Eel Shelf obtained in terms of ^{210}Pb activity (Sommerfield et al., 2007)

てきた(Nittrouer, C.A. et al., 2007ed)。1995年と1997年のEel河の洪水イベントの直後に一連の調査が行われた。その結果、水深70m前後の中部陸棚に、泥を主体とする洪水イベント堆積物が広範囲に分布していることが突きとめられた。堆積物の年代を決定するために、 ^7Be (半減期53.3日)、 ^{210}Pb (半減期22.3yr)、 ^{137}Cs (半減期30.1yr)等の放射性核種を利用した地質年代測定法が適用された。

ここでは、Eel流域の最近100年オーダの土砂収支に関する研究成果を紹介する(Sommerfield et al., 2007)。 ^{210}Pb 法に基づく海域での平均堆積速度の分布をFig. 26に示す。Eel海域への陸からの主たる土砂供給は、Eel河(流域面積=8638km²)とMad河(流域面積=1256km²)の洪水流出による。Eel河からの浮遊運搬土砂フラックスは、 16.5×10^6 tons/yr, Mad河からは 2.5×10^6 tons/yearと見積もられている。両河川からの浮遊運搬土砂フラックスの和をMと表記すると、 ^{210}Pb 法等の適用により推定された海域における土砂堆積量(年間当たり)は次のようになる：

- ・内側陸棚(水深20m~50m)への堆積量：0.1M
- ・中間および外側陸棚(水深50m~150m)への堆積量：0.2M
- ・Eel海底谷の谷頭付近への堆積量：0.12M
- ・残りは不明。

砂浜海岸環境の保全の視点からは、以下のような成果(および課題)が興味深い。

- (a)外浜に繋がる波浪環境の厳しい内側陸棚にも泥主体の洪水堆積物が保存されること

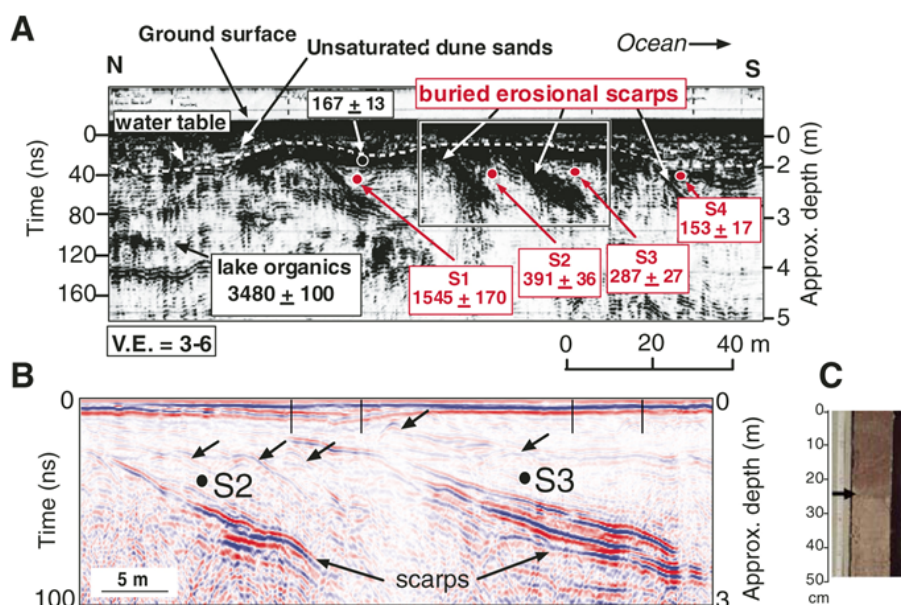


Fig. 27 Cross-shore imagery of ground-penetrating radar capturing buried erosional scarps (Buynevich et al., 2007)

(b)Eel海域の陸棚の幅は相対的に狭く、陸棚にとどまる洪水堆積物は、全洪水土砂流出量の30%程度と、他の縁海域（アメリカ西海岸）に比べて小さい。

(c)中部陸棚から外側陸棚にかけて分布する洪水堆積物は、河口付近で洪水プルームからいったん沈降した堆積物が、波浪作用を受けて密度成層(fluid mud)を形成し、重力流として海底面近傍を流動することにより形成された可能性が高い(Scully et al., 2002)。

4.4 埋没浜崖に着目した暴風浪環境の復原

砂浜海岸の中長期マネジメントには、暴風浪イベントの影響を適切に評価する必要がある。そのためには、暴風浪の規模と来襲頻度に関する客観的な情報が基礎資料として重要になる。

Buynevich et al. (2007)は、前進性の砂浜海岸では、暴風浪による侵食によって過去に形成された浜崖(scarp)が砂浜内に埋没、保存されていることを地中レーダ探査により明らかにした。汀線に直交する地中レーダ画像をFig. 27に示す。調査が行われたのは、アメリカ東海岸のMaine湾に面するHunnewell浜である。ここでは、1978年暴風浪('Nor'easter')によって形成された浜崖地形を今も目にすることができる(Buynevich et al., 2004)。砂浜探査には可搬式地中レーダ(送信周波数: 120MHz; 最大探査深度: 15m; 空間分解能: 0.2m-0.7m)が用いられた。Fig. 27(A)を参照すると、4つの埋没浜崖(S1~S4)の存在が明らかである。当砂浜海岸域では重鉾物(garnet等)の含有量が高く、浜崖部分には重鉾物が濃集しているた

め、レーダ画像のコントラストが強調され、埋没浜崖の同定を容易ならしめた(Buynevich et al., 2004)。

特筆されるのは、埋没浜崖の直上から砂試料を注意深く採取し、石英粒子に着目した光励起ルミネセンス法(optically stimulated luminescence, OSL)を適用することにより、各埋没浜崖の形成時期を推定したことである。すなわち、浜崖S1形成は現在より1545年前、浜崖S2形成は現在より391年前、浜崖S3は現在より287年前、浜崖S4形成は現在より153年前と同定された。

ルミネセンス年代測定法は、石英や長石が微弱な自然放射法や宇宙線を浴びて捕獲電子を蓄積していく特性に着目している(塚本・岩田, 2005)。したがって、その適用に当たっては、試料の石英(または長石)が最後にいつ太陽光への露光(ブリーチ)を経験したかが重要なポイントになる。暴風浪により浜崖が形成される場合には、砂(試料の石英)が地表に露出し完全にブリーチしたとみてよい。イベント後、砂浜には沿岸漂砂等による砂の供給が起こり、試料の石英は十分厚く被覆される。その状態がOSL計測時まで持続している前提のもとに、イベント後の年数に応じた蓄積線量を期待できる(蓄積線量を年間線量で除することによりイベント時から現在までの経過時間が求められる)。

さて、Buynevichら(2007)は大目標として、埋没浜崖の形成履歴に関する情報を活用して北大西洋における暴風浪環境(storminess)や広域の気候変動(北大西洋振動(North Atlantic Oscillation))との関わりを調べようとしている。極端現象の統計解析に資するアプローチといえよう。

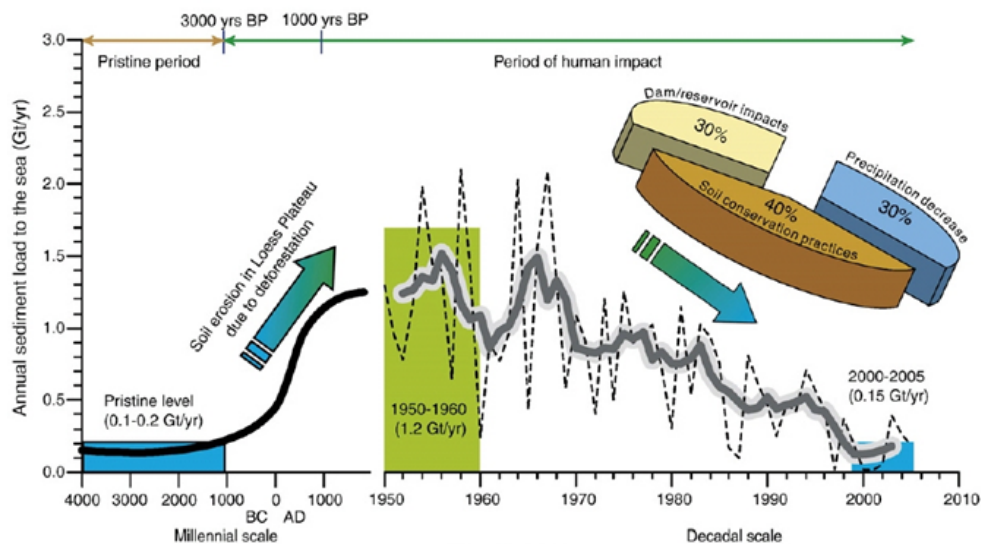


Fig. 28 Evolution of annual sediment discharge of the Huanghe to the sea (Wang et al., 2007)

4.5 流域環境の変遷にともなう土砂流出の変化：黄河流域を例にして

黄河は土砂含有量の多い大河として世界的に有名である（流路延長は5464km, 流域面積は750x10³km²を超える）。しかし、近年における黄河流域の変遷は著しく、年平均土砂流出量は劇的な減少を示している（Fig. 28; Wang et al., 2007）。ここに土砂流出量は、黄河の流量観測所の中、最も下流に当たるLijin流量観測所での計測値によっている。

Fig. 28を参照すると、1950年当時の年平均土砂流出量は1.2×10⁹tons/yrに達している。人為的な影響が無視できる原始時代（紀元前4千年～2千年）の年平均土砂流出量はその1/10～1/6である。農耕等の発達にともない黄土高原の森林荒廃が進行し、黄土の侵食による土砂生産が急増したためと考えられる（Wang et al, 2007）。1950年以降の年平均土砂流出の経年変化を仔細に見ると、1960年代半ばから一貫して土砂流出が減少し、2005年時点には1.5×10⁸ tons/yrのレベルにまで減少している。このような顕著な土砂流出フラックスの減少をもたらした要因として、Wangらは以下の三要因を指摘している。

- ・ 土壌保全の効果
- ・ ダム貯水池堆砂/水利用の変化
- ・ 気候変動（降雨量の減少）

1950年から2005年の水準までの土砂流出減少割合を100%と表示すると、その中、30%は気候変動（降雨量の減少）の影響であり、残り70%が人為的な要因による。土壌保全による効用は、土砂流出減少割合にして30%に達する。ダムの貯水池堆砂による土砂流出減少割合は約20%である。しかし、貯水池操

作や水利用形態の変化の結果、土砂流出が間接的に約10%、抑制されたと報告されている。

Wangらは、海域への土砂流出は将来とも減少傾向が続くと予想している。渤海（Bohai Sea）沿岸域にメガデルタを形成してきた黄河の沖積作用が急減する中、どのように沿岸環境が変容していくのか、国際的にも多大な関心が寄せられている。

5. 海岸侵食研究の潮流

日本列島において海岸侵食が全国的な課題になってきたのは、1950年代以降である(岩垣, 1954; 1966; Horikawa, 2000)。新潟海岸の大規模侵食に関する調査報告書（新潟県海岸対策委員会, 1951）によると、問題解決のために国内専門家の英知を結集しているのみならず、米国研究者との交流を通じて、当時最新の海岸工学や海洋学の知見を積極的に吸収している様子がうかがえる。ちなみに、第1回国際海岸工学会議(1st ICCE)は1950年に米国 Long Beachで開催された。

爾来、海岸侵食は海岸工学(Coastal Engineering)の中核テーマの地歩を占めているといって過言ではない(Kraus, N.C., 1996 ed.)。海岸侵食の物理過程に深く関わる海岸波浪場、漂砂過程、海浜変形等に関する理解が飛躍的に深まり、膨大な論文や成書が発表されている（たとえば、Komar and Inman, 1970; Horikawa, 1988; Fredsoe and Deigaard, 1992; Komar, 1998; Friend and Amos, 2007; Neumeier et al., 2008; Warner et al., 2008; 榎木, 1982; 土木学会海岸工学委員会, 1994; 佐藤, 1996; 宇多, 1997; 栗山, 2006; 間瀬ら, 2008）。

海岸の侵食制御や侵食対策への適用を図るために、多彩な海岸保全構造物（突堤，離岸堤，人工リーフ，汀線消波堤，傾斜堤等）の開発や設計法の提案がなされ，実務に供されてきた（たとえば，Bruun, 1972; Silvester and Hsu, 1993; Dean and Dalrymple, 2002; 土屋, 1987; 豊島, 1990; 鳥居・山本, 2003; 宇多, 2004）。

日本では海岸保全構造物は一般に公共財であり，海岸保全事業を実施するには法制度の裏付けが必要になる。1956年に，海岸防護を目的とする海岸法が制定された。1999年には，社会の多様なニーズに応えるべく，海岸防護に加えて海岸環境の保全および海岸利用の促進との調和を謳う改正海岸法が施行された。その経緯については，「海岸—50年のあゆみ(国土交通省河川局海岸室, 2008)」に詳しい。

従来，日本では海岸侵食対策は海岸保全構造物の設置を主とすることが多かったのに対して，欧米では養浜やサンド・バイパスのような“ソフトな対策(non-structural measures)”が活用されてきた(山下ら, 1997; 成瀬・大岡, 2000)。大規模な海岸における侵食対策を海岸保全構造物の設置によって行うことには，種々の制約がともなう(Bruun, 1972)。漂砂セルの土砂収支を満足させる養浜やサンド・バイパスは，自然環境へのインパクトを最小化し得る解決策といえよう。流砂系の総合土砂管理の考え方とも整合する方策である(磯部, 1998; 高橋, 2002; 佐藤ら, 2004)。

しかし養浜砂を持続的に確保することは，地域によっては必ずしも容易ではない。在来の海岸生態環境と適合する粒度の実現(Mustain et al., 2007)や，暴風浪イベント時の漂砂・海浜変形特性の把握(西湘海岸保全対策検討委員会, 2008)等，本質的な課題も残されている。

流域の環境すなわち流砂漂砂環境は，100年～1000年オーダーで顕著に変化してきた(たとえば，貞方, 1996; 井上ら, 2004; 佐藤ら, 2004; 斎藤, 2007; Wang et al., 2007)。近世以降では産業革命の影響が大きいように思われる。変容をとげてきた流砂漂砂環境のもと，長期の砂浜マネジメントや河川(貯水池堆砂)からの土砂還元を目標をどのように設定するのか？自然観ともいべきphilosophyが求められよう(河田, 1996; 1998)。

「沿岸域の砂や泥はどこから来てどこに行くのか？」かつては夢のような問かけであった。しかし，最近では，沿岸地形学，音響層序学，地質年代学等の進歩により，外浜と陸棚環境を繋ぐ堆積物輸送過程と堆積作用の研究が活発になっている。(たとえば，池原ら, 2006; Carter et al., 2010; Milligan and Cattaneo, 2007; Mimura, 2008; Nittrouer, 2007; Syvitski, 2008; Syvitski and Milliman, 2007; Tamura, T. et al.

2008; Wang et al., 2007)。

6. まとめ

- 1) 海岸侵食は地形変化の様式である。関与する領域(漂砂セル)の堆積物収支に着目することにより，流砂漂砂系の連関の重要性を再認識できる。
- 2) 第2章は，流砂漂砂系の具体的なイメージづくりを目指したものである。2.5節では，日本の代表的な流砂漂砂系モデルの一つとして，大井川—駿河海岸系をとりあげた。
- 3) 複雑流体アプローチと題する章(第3章)を設けた背景は，次のとおりである。力学的基礎としての堆積物の振舞い(漂砂)と地形変化(海浜変形)のモデル化については，とくに海岸工学分野において広範に研究されてきた(第5章参照)。しかし，砂浜や海底を構成する砂礫は粒状物質の集合体であり，環境流体(水あるいは空気)との境界面は，本質的に“loose boundary”となる。移動境界と相変化をとまなうために，その記述は依然challengingである。
- 4) 現実の流砂漂砂系は，多様な地形環境によって特徴づけられる。言い換えると，地域性を有する。そこで，地形環境アプローチと題する章(第4章)を設け，概念モデルとしての漂砂セルの主要地形要素の働きに(課題を含めて)，焦点を当てることを試みた。
- 5) 第5章は海岸侵食研究のレビューである。海岸侵食制御や海岸侵食対策の技術論については，本稿ではほとんどふれていない。それを補う方策として，海岸侵食の顕在化の時期から総合土砂管理の考え方に至る，大きな研究の流れを第5章でたどることができるように心がけた。
- 6) 本稿では総体として，流砂漂砂環境の成り立ちと変遷に関する知識を立体的に深めるための方向(素材提供)を模索した。「砂浜の来し方に学び将来のあり方を洞察する」ことは，決して迂遠・発散の途ではなく，課題の共通理解の醸成に繋がるように思われる。

謝 辞

本稿を結ぶにあたり，平成21年度研究発表講演会における特別講演の機会をいただきました京都大学防災研究所の関係各位に深甚なる感謝の意を表します。海岸侵食研究展望の動機づけをいただきました流域災害研究センターの皆様にも深く感謝いたします。本稿は，同センター主催国際シンポジウム招待論文(Sekiguchi, Azuma and Yamaguchi,

2010)の内容を、その後、増補・再構成したものです。ご協力いただいた東 良慶、山口直文両博士に感謝いたします。

参考文献

- 東 良慶・関口秀雄・蔡曙伍・渡邊康司 (2009) : 漂砂系土砂収支の把握に向けた浅海域高解像度海底地形計測の試み, 海岸工学論文集, 第 56 巻, 1431-1435.
- 東 良慶・関口秀雄・山口直文 (2010) : 砂浜-砂丘系における漂砂環境の連関を読み解く試み, 海岸工学論文集, 第 57 巻 (印刷中).
- 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会 (1994) : 海岸波動: 波・構造物・地盤の相互作用の解析法, 土木学会.
- 藤田光一・富田陽子・大沼克弘・小路剛志・伊藤嘉奈子・山原康嗣 (2008) : 日本におけるダムと下流河川の物理機構との関係についての整理・分析, 国土技術政策総合研究所資料, 第 445 号, 58pp.
- 後藤仁志 (2004) : 数値流砂水理学, 森北出版.
- 池原 研・片山 肇・嵯峨山 積・菅 和哉・辻野匠・入野 智久・大村亜希子 (2006) : 2003 年北海道日高洪水堆積物の海域における堆積様式, 月刊地球, Vol. 28, No. , 512-517.
- 井上卓彦・半田明德・原口 強・五十嵐厚夫・井内美郎 (2004) : 堆積物分布からみた日野川・皆生海岸流砂系における過去 400 年間の環境変遷, 海岸工学論文集, 第 51 巻, 586-590.
- 磯部雅彦 (1998) : ミティゲーションの調査分析と沿岸域環境管理の枠組みの提案, 海岸工学論文集, 第 45 巻, 1236-1240.
- 岩垣雄一 (1954) : 汀線浸食, 第 1 回海岸工学研究発表会論文集, 69-80.
- 岩垣雄一 (1966) : 海岸侵食論, 水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会, B-17, 1-16.
- 河田恵昭 (1996) : 自然観と海岸侵食, 水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会, B-2, , 1-15.
- 河田恵昭 (1998) : 序章 漂砂環境. In: 漂砂環境の創造に向けて, 土木学会, 3-13.
- 国土交通省 (2003) : 中期的な展望に立った新しい海岸保全の進め方報告書.
- 国土交通省河川局海岸室(2008 監修) : 「海岸の将来像」の実現に向けて. In: 海岸 50 年のあゆみ, 全国海岸協会, 436-443.
- 国土交通省 (2009) : 河川整備基本方針・河川整備計画, 一級水系の河川整備基本方針策定状況, 大井川水系, 土砂管理等に関する資料(PDF).
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyokeikaku/gaiyou/seibi/index.html/
- 栗山善昭(2006): 海浜変形, 技報堂出版.
- 間瀬 肇・安田誠宏・Tracey H. Tom・辻尾大樹 (2008) : 富山湾沿岸に災害をもたらした 2008 年 2 月冬季風浪の予測と追算シミュレーション, 海岸工学論文集, 55 巻, 156-160.
- 守利悟郎・椎葉充晴・堀 智晴・市川 温 (2003) : 流域規模での水・土砂動態のモデル化及び実流域への適用, 水工学論文集, 第 47 巻, 733-738.
- 成瀬 進・大岡秀哉 (2000) : 海岸管理の国際比較に関する研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, 1251-1255.
- 新潟県海岸対策委員会 (1951) : 新潟県海岸対策委員会報告書, 第 1 輯.
- 西川友幸・高橋正行・加藤善明・中戸真一・高木利光・浅野 剛・犬飼拓志 (2006) : 粒径を考慮した大井川河口域土砂移動機構の研究, 海岸工学論文集, 第 53 巻, 596-600.
- 小田隆則 (2003) : 海岸林をつくった人々—白砂青松の誕生, 北斗出版.
- 貞方 昇 (1996) : 中国地方における鉄穴流しによる地形環境変貌, 溪水社.
- 斎藤文紀 (2007) : アジアのメガデルタ: 完新世における成立と近年の崩壊, 地形, 第 28 巻, 第 4 号, 331-347.
- 佐々真志・関口秀雄 (2009) : LIQSEDFLOW: 水中堆積物重力流れに果たす二相系物理の役割, 海岸工学論文集, 第 56 巻, 536-540.
- 佐藤慎司 (1996) : 現地海岸における波・流れと漂砂機構, 水工学に関する夏期研修会講義集, B-04, 1-19.
- 佐藤慎司・宇多高明・岡安徹也・芹澤真澄 (2004) : 天竜川—遠州灘流砂系における土砂移動の変遷と土砂管理に関する検討, 海岸工学論文集, 第 51 巻, 571-574.
- 榎木 亨 (1982) : 漂砂と海岸侵食, 森北出版.
- 西湘海岸保全対策検討委員会(2008): 第 2 回委員会資料, 1-18 (WEB 公開).
- 関口秀雄 (2001) : 沿岸・海底マスマーブメント, In: 防災学ハンドブック, 朝倉書店, 224-230..
- 関口秀雄 (2007) : 広域の地盤沈下, In: 地盤環境工学ハンドブック, 248-258.

- 関口秀雄・東良慶・クリヨ サンボド (2007): 養砂浜海岸域における不圧地下水の動態観測とその意義. 海岸工学論文集, 土木学会, 第 54 巻, 721-725.
- 高橋 保 (2002): 局所的土砂管理から流砂系の総合土砂管理へ. 河川. No. 671, 6-11.
- 高橋 保 (2004): 土石流を分類することの力学的意義. In: 土石流の機構と対策, 近未来社, 36-41.
- 田島芳満・佐藤慎司・吉井拓也・細川順一・山田浩次・石川仁憲・三波俊郎 (2008): 西湘海岸における 2007 年台風 9 号による被害の集中機構, 海岸工学論文集, 第 55 巻, 1386-1390.
- 田中茂信・小荒井 衛・深沢 満 (1993): 地形図の比較による全国の海岸線変化, 海岸工学論文集, 第 40 巻, 416-420.
- 鳥居謙一・山本幸次 (2003): 海岸侵食対策の動向, 土木技術, Vol. 58, No. 3, 76-86.
- 豊島 修論文集 (1990): 実務者のための海岸工学 (建設省河川局海岸課監修), 山海堂.
- 土屋義人 (1987): 海岸侵食の制御, 土木学会論文集, 第 387 号, II-8, 11-23.
- 塚本すみ子・岩田修二 (2005): ルミネッセンス年代測定法の最近の進歩—適用年代の拡大と石英の OSL 成分について. 地質学雑誌, 第 111 巻, 第 11 号, 643-653.
- 宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, 山海堂.
- 宇多高明 (2004): 海岸侵食の実態と解決策, 山海堂.
- 山下隆男・土屋義人・D.R. Basco・M. Larson (1997): 日, 米, 欧の海岸保全の相互評価(1): 侵食要因と対策. 海岸工学論文集, 第 44 巻, 691-695.
- 吉永佑一・原口 強・関口秀雄・鳥居和樹・東 良慶 (2009): 内湾海底谷の堆積環境と津波洗掘リスク—和歌山県内之浦を例に, 海岸工学論文集, 第 56 巻, 746-750.
- Allen, P.A. (1997): Sediment routing systems. In: Earth Surface Processes, Blackwell Science, 114-128.
- Amiruddin, Sekiguchi, H. and Sassa, S. (2006): Subaqueous sediment gravity flows undergoing progressive solidification. Norwegian Journal of Geology, 86(3), 285-293.
- Bruun, P. (1972): The history and philosophy of coastal protection, Proc. 13th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, 33-74.
- Buynevich, I.V., FitzGerald, D.M. and Goble, R.J., (2007): A 1500 yr record of North Atlantic storm activity based on optically dated relict beach scarps. Geology, Vol. 35, No. 6, 543-546.
- Buynevich, I.V., FitzGerald, D.M. and van Heteren, S. (2004): Sedimentary records of intense storms in Holocene barrier sequences, Maine, USA. Marine Geology, Vol. 210, 135-148.
- Camenen, B. and Larson, M. (2005): A general formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 63, 249-260.
- Carter, L., Orpin, A. R. and Kuehl, S.A. (2010eds): From Mountain Source to Ocean Sink—the Passage of Sediment across an Active Margin, Waipaoa Sedimentary System, New Zealand. Marine Geology, Vol. 270, Special Issue.
- Chapman, D.M. (1981): Coastal erosion and the sediment budget, with special reference to the Gold Coast, Australia. Coastal Engineering, Vol. 4, 207-227.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (2002): Coastal processes with Engineering Applications. Cambridge University Press.
- Donnelly, C., Kraus, N. and Larson, M. (2006): State of knowledge on measurement and modeling of coastal overwash. J. Coastal Res., Vol. 22, No. 4, 965-991.
- Fredsoe, J. and Deigaard, R. (1992): Mechanics of Coastal Sediment Transport. World Scientific.
- Friend, P.L. and Amos, C.L. (2007): Natural coastal mechanisms—flume and field experiments on links between biology, sediments and flow. Continental Shelf Research, Vol. 27, Preface for Special Issue, 1017-1019.
- Hanes, D.M. (2009): Recent technologies usher in new era of coastal geomorphology research, EOS, 90, 23, 9 June 2009, p. 198.
- Hill, et al. (2007): Sediment delivery to the seabed on continental margins. In: Continental Margin Sedimentation (Nittrouer, C.A. et al. eds), 49-99.
- Horikawa, K. (1988ed): Nearshore Dynamics and Coastal Processes, University of Tokyo Press, 167-169.
- Horikawa, K. (2000): History of coastal engineering in Japan. In: Advances in Coastal and Ocean Engineering (Liu, P. L.-F., 2000ed), World Scientific, 1-56.
- Inman D.L. and Nordstrom, C.E. (1971): On the tectonic and morphologic classification of coasts. The Journal of Geology, Vol. 79, 1-21.
- Jaeger, H.M., Nagel, S. R. and Behringer, R.P. (1996): The physics of granular materials. Physics Today, April, 32-38.
- Kobayashi, N. and Farhadzadeh, A. (2009): Dune erosion and overwash. Proc. Int. Conf. Coastal Dynamics 2009, Tokyo, CD-ROM, Paper No. 64, 9pp.
- Komar, P.D. (1998): Beach Processes and Sedimentation,

- Second Edition, Prentice-Hall, Inc.
- Komar, P.D. and Inman, D.L., (1970): Longshore sand transport on beaches. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, No. 30, 5914-5927.
- Kondolf, G.M., Montgomery, D.R., Piegay, H. and Schmitt, L. (2003): Geomorphic classification of rivers and streams. In: *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, 171-204.
- Kraus, N.C. (1996ed): *History and Heritage of Coastal Engineering*, ASCE, 603pp.
- Lowe, D. R. (1975): Water escape structures in coarse-grained sediments, *Sedimentology*, 22, 157-204.
- Milligan, T.G. and Cattaneo, A. (2007): Sediment Dynamics in the Western Adriatic Sea: From Transport to Stratigraphy. *Continental Shelf Research*, Vol. 27, Special Issue.
- Mimura, N. (2008ed): *Asia-Pacific Coasts and Their Management: States of Environment*. Springer.
- Miyamoto, J., Sassa, S. and Sekiguchi, H. (2004): Progressive solidification of a liquefied sand layer during continued wave loading. *Geotechnique*, 54(10), 617-629.
- Morton, R.A. (2003): An overview of coastal land loss with emphasis on the Southeastern United States. *USGS Open File Report 03-337*, 29pp.
- Mustain, N., Griggs, G. and Barnard, P. (2007): A rapid compatibility analysis of potential offshore sand sources for beaches of the Santa Barbara littoral cell. *Coastal Sediments'07*, ASCE, 14pp.
- Neumeier, U., Ferrarin, C., Amos, C.L., Umgieser, G. and Li, M.Z. (2008): Sedtrans05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters with a new algorithm for cohesive sediments. *Computers & Geosciences*, Vol. 34, 1223-1242.
- Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V.R., Codignotto, J.O., Hay, J. E., McLean, R.F., Ragoonaden, S. and Woodroffe, C.D. (2007): Coastal systems and low-lying areas. In: *Climate Change 2007* (Parry et al., eds), Cambridge University Press, 315-356.
- Nielsen, P., (2009): *Coastal and Estuarine Processes*, World Scientific.
- Nittrouer, C.A., Austin, J.A., Field, M.E., Kravitz, J. H., Syvitski, J.P.M. and Wiberg, P.L. (2007 eds): *Continental Margin Sedimentation*, Blackwell Publishing.
- Parsons, J.D. et al. (2007): The mechanics of marine sediment gravity flows. In: *Continental Margin Sedimentation* (Nittrouer, C.A. et al. eds.), Blackwell Publishing, 275-337.
- Patsch, K. and Griggs, G. (2008): A sand budget for the Santa Barbara littoral cell. *Marine Geology*, Vol. 252, 50-61.
- Putnam, J.A., Munk, W.H. and Traylor, M.A. (1949): The prediction of longshore currents. *Trans. American Geophys. Union*, Vol. 30, 337-345.
- Richardson, J.F. and Zaki, W.N. (1954): Sedimentation and fluidization: Part 1. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 32, 35-53.
- Saito, Y., Chaimanee, N., Jarupongakul, T. and Syvitski, J.P.M. (2007): Shrinking megadeltas in Asia: Sea-level rise and sediment reduction impacts from case study of the Chao Phraya Delta. *LOICZ INPRINT*, No. 200/2, 3-9.
- Scully, M.E., Friedrichs, C. T. and Wright, L. D. (2002): Application of an analytical model of critically stratified gravity-driven sediment transport and deposition to observations from the Eel River continental shelf, Northern California. *Continental Shelf Research*, Vol. 22, 1951-1974.
- Seibold and Berger, W.H. (1993): *The Sea Floor*, Second Edition, Springer Verlag, 97.
- Sekiguchi, H., Azuma, R. and Yamaguchi, N. (2010): Coastal erosion – a suite of multi-scaled processes. *Proc. Int. Symp. on Water and Sediment Disasters in East Asia*, Kyoto, 1-23.
- Siever, R. 著・立石雅昭訳 (1995): *砂の科学*, 東京化学同人, 241pp.
- Silvester, R. and Hsu, J.R.C. (1993): *Coastal Stabilization: Innovative Concepts*. P T R Prentice Hall, Inc.
- Sommerfield, C.K. et al. (2007): Oceanic dispersal and accumulation of river sediment. In: *Continental Margin Sedimentation* (Nittrouer, C.A. et al. eds.), Blackwell Publishing, 157-212.
- Sunamura, T. (1973): Coastal cliff erosion due to waves-Field investigations and laboratory experiments, *Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B)*, Vol. 32, No. 1, 1-86.
- Sunamura, T. and Horikawa, K. (1977): Sediment budget in Kujukuri coastal area, Japan. *Coastal Sediments'77*, ASCE, 475-487.
- Suzuki, N. (2000): State of the art of reservoir sedimentation management in Japan, *Proc. Int. Workshop and Symp. on Reservoir Sedimentation Management*, Toyama, 1-17.
- Syvitski, J.P.M. (2008a): Deltas at risk. *Sustainability Science*, Vol. 3, 23-32.

- Syvitski, J.P.M. (2008b): Predictive modeling in sediment transport and stratigraphy, Guest editorial. *Computers & Geosciences*, Vol. 34, 1167-1169.
- Syvitski, J.P.M. and Milliman, J.D. (2007): Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *The Journal of Geology*, Vol. 115, 1-19.
- Tamura, T., Saito, Y. and Masuda, F. (2008): Variations in depositional architecture of Holocene modern prograding shorefaces along the Pacific Coast of Eastern Japan. In: *SEPM Special Publication No. 90*, 189-203.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996): *Soil Mechanics in Engineering practice*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., 84-86.
- Van der Werf, J.J., Ribberkink, J.S., O'Donoghue, T. and Doucette, J.S. (2006): Modelling and measurements of sand transport processes over full-scale ripples in oscillatory flow. *Coastal Engineering*, Vol. 53, 657-673.
- Van der Werf, J.J., Magar, V., Malarkey, J., Guizien, K. and O'Donoghue, T. (2008): 2DV modeling of sediment transport processes over full-scale ripples in regular asymmetric oscillatory flow. *Continental Shelf Research*, Vol. 28, 1040-1056.
- Wang, H.J., Yang, Z.S., Saito, Y., Liu, J.P., Sun, X.X. and Wang, Y. (2007): Stepwise decrease of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): Impacts of climate change and human activities. *Global and Planetary Change*, Vol. 57, 331-354.
- Warner, J.C., Sherwood, C.R., Signell, R.P., Harris, C.H. and Arango, H.G. (2008): Development of a three-dimensional regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers & Geosciences*, Vol. 34, 1284-1306.
- Yamaguchi, N. and Sekiguchi, H. (2010): Effect of velocity hiatuses in oscillatory flow on migration and geometry of ripples: wave-flume experiments. *Sedimentology*, Vol. 57, 720-733.
- Yeh, H. and Li, W. (2008): Tsunami scour and sedimentation, *Proc. 4th Int. Conf. Scour and Erosion (ICSE-4)*, Tokyo, 95-106.

Complex Fluid-Sediment Interactions in Coastal Systems: An Overview

Hideo SEKIGUCHI

Synopsis

The rather provocative title of this article arises from an invited lecture by the author which took place in February 2010 at the Disaster Prevention Research Institute, marking his retirement from Kyoto University as Professor of Coastal Sedimentary Environment. One of the issues raised by him was: "Why is the science of coastal erosion so elusive?" This overview starts with a description of the features of particulate sediment; this very fact alone implies the complex yet intriguing facets of sediment-transport processes and ensuing beach erosion. The review also highlights the multi-scaled nature of the beach morphological evolution subject to episodic storm events. The related and other case studies of coastal erosion lead to the perception that the erosion of sandy beaches is a consequence of the imbalance in sediment budget of the littoral cell concerned, warranting further concerted analyses of the sediment processes in the watershed-to-coast continuum.

Keywords: beach erosion, beach profile change, littoral cell, sea-cliff erosion, sediment budget, sediment routing system, sediment transport