

水工学シリーズ 05-B-6

浅場における流れと物質輸送

東京工業大学大学院 情報理工学研究科 情報環境学専攻 助教授

八木 宏

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2005 年 8 月

浅場の流れと物質輸送

Current system and transport processes in shallow water regions

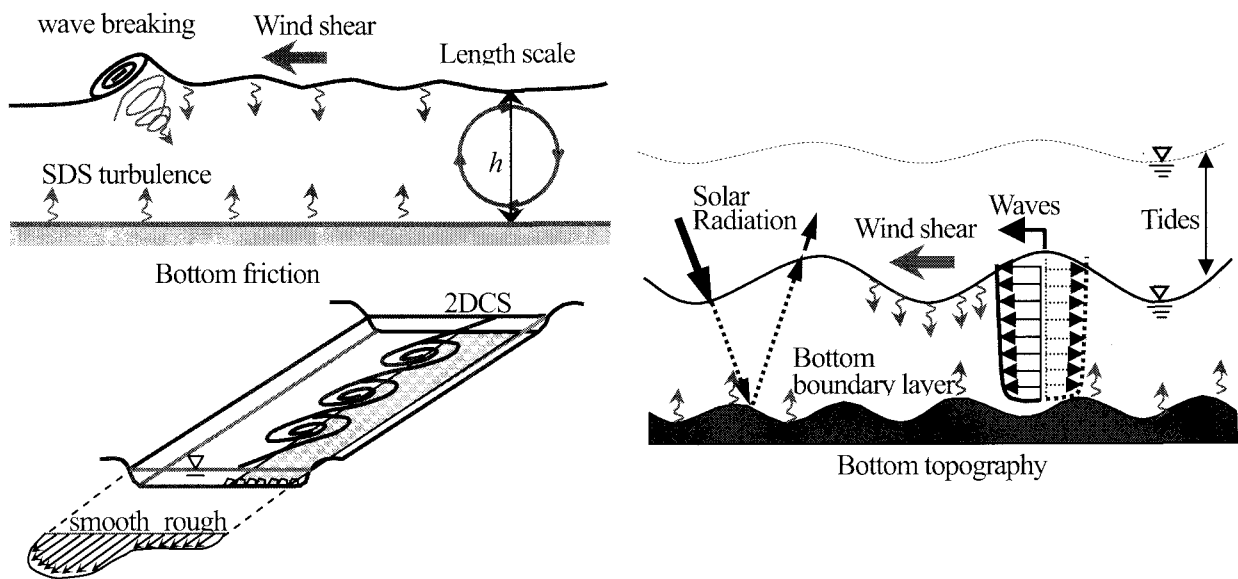
八木 宏

Hiroshi YAGI

1. はじめに

海岸工学は、海と陸の境界に位置する浅海域の環境の仕組みを解明することを主要な研究課題の一つと位置づけており、砂浜・岩礁海岸、干潟域、マングローブ域、サンゴ礁域などを具体的な対象としている。これらはそれぞれ、個性的でバラエティに富んだ水環境を形成しており、その特徴については教科書やレビューに詳しく解説されているが(例えば、Wolanski, 2000; Robertson and Alongi, 1992; Brown and McLachlan, 1990; Mann, 2000), これらに共通する『浅い』という特徴を切り口として流れや物質輸送の性質を論じたものはあまりないようである。そこで、ここでは『浅い』という本来海岸域の持っている本質的な特徴が、水域の環境形成にどのような形で影響を与えているかという視点から浅場の流れと物質輸送を捉えてみることにする。

浅水域の特徴として、まず挙げられるのは流れの水平・鉛直スケールが大きく異なることである。浅水域は、流れの水平スケールに比べ、鉛直スケール(水深)が極めて小さいために、水深という幾何学的な条件に流体運動が拘束され、水深よりも大きなスケールを持つ運動(流れ)は平面的な薄べったい構造を持ちやすく(平面二次元性)、それと水深スケール以下の三次元性が強い運動とで流れ場が構成されている(多重構造化、図-1(a))。もう一つの特徴は、水深が小さいために表面境界や底面境界の影響が全水深に波及し、それが浅場の流れや物質輸送に本質的な影響を与える点である。



(a) 多重構造化・平面二次元性

(b) 表・底面境界過程の重要性

図-1 浅い水域の流れの概念図

例えば、水深が浅いと吹送流や波浪などの海面過程の影響は海底まで到達し、海底地形や底面摩擦など底面過程は浅い流れ場全体を支配する重要な因子となる（表・底面境界過程の重要性、図-1(b)）。このように、浅場はそれぞれが個性的で多様な空間ではあるが、いずれも『浅い』という条件によって場が強く影響を受けており、それによってそれぞれの特徴的な環境を形成しているとも言える。

そこで本論では、浅場の特徴である『多重構造性・平面二次元性』、『表・底面境界過程の重要性』という二点に着目し、前者についてはそれが顕著な形で現れる水平せん断流を対象として、また後者については、干潟やサンゴ礁域といった具体的な浅場を対象とし、それぞれの特徴とその構造、そしてその影響の具体的な現れ方を解説する。

2. 浅い水域の水平せん断流

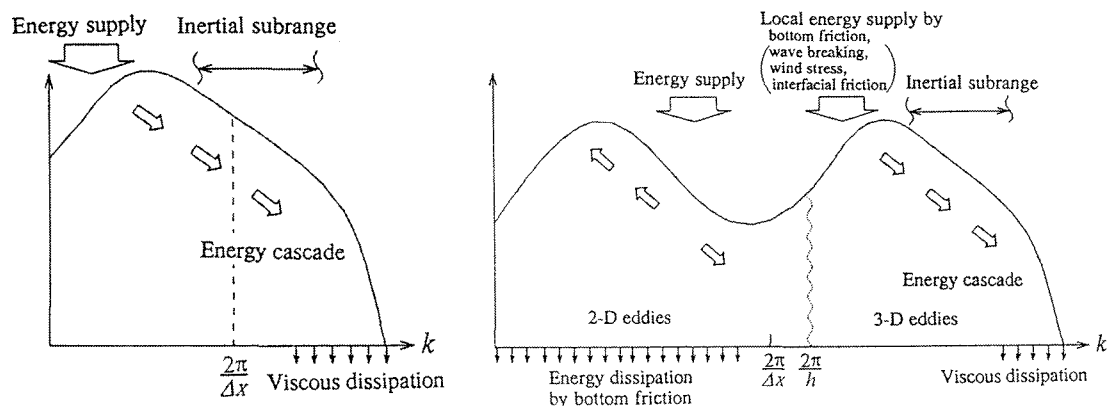
2.1 浅い水平せん断流の基本特性

(1) 流れ場の基本的な特徴

浅い水平せん断流とは、平面的な流速差（水平シア）がある浅い流れのことであり、程度の差こそあれ浅い水域ではいろいろな場面で発生している。代表的なものとしては、河川の複断面流れや沿岸流などが挙げられるが、例えば複断面流れの場合、洪水時には流体抵抗が大きい高水敷と抵抗の小さい低水路の間に生じる流速差によって水平せん断流が発生し、せん断層内に発達した大規模な組織渦によって水平的な運動量交換や物質輸送が行われている。

せん断流自体は、浅場に限らず多くの流れ場に見ることができ、流体力学における基本的な問題として、これまでに数多くの検討が行われており、室内実験や数値シミュレーションの結果から、せん断層に発達する大規模組織渦が流れのせん断特性に重要な役割を果たしていることが明らかにされている（例えば、Ho and Huerree, 1984）。ここで対象としている浅いせん断流も、せん断層内に組織渦構造が発生・発達するという点では一般的なせん断流と似ているが、異なる点はその『多重構造性・平面二次元性』にある。例えば、先に示した河川流の大規模組織渦の場合、水深が数 m 程度であるのに対し組織渦の水平サイズは 100m 以上であり、鉛直スケールと水平スケールが大きく異なる扁平な構造を持っている。一般的な自由せん断流の場合、主流のスパン方向（直角方向）にも渦構造が発達し、Roller-Riv モデルのような三次元的な組織渦構造へと成長していくが、浅い水平せん断流では水深が運動の制約条件となるため、一般的な自由せん断流の組織渦とは性質が異なった平面二次元性を有した組織渦（Two-dimensional Coherent Structures:以後 2DCS と呼ぶ）が発達し、それと水深スケール以下の三次元性の強い乱れ(Sub-depth Scale turbulence:以後 SDS 乱れと呼ぶ)が相互に影響しながら多重構造的に水平方向の運動量や物質の輸送を支配していると考えられる。

浅い水平せん断流やそこに形成される 2DCS の基本的な性質については、後流・噴流・自由せん断層という基礎的な流れ場を対象として、室内実験を中心にその解明が進められている(Jirka and Uijttewaai, 2004)。それによれば、浅い水平せん断乱流では、2DCS に相当する周波数付近で乱れのエネルギー・スペクトルが明確なピークを示し、それより高周波側へは一般的な乱流場で成立する $-5/3$ 乗則より大きく減少（ ~ -3 乗）することがその特徴として指摘されている（例えば、Drasc ら, 1992; Uijttewaai and Booij, 2000）。このことは、2DCS を主体とした浅い水平せん断流の乱流構造が、渦の三次元的なストレッチング作用によって大きい渦から小さい渦へエネルギーが移行する一般的な乱流場とはその構造が大きく異なっていることを裏付けている。さらに、浅い水平せん断流場では、そこで発生する 2DCS が底面摩擦の影響を強く受けていることも特徴であり、浅い水平せん断流場に発生した組織渦が、水深が小さく底面摩擦の影響が大きくなるとその運動を減衰させることも確認されている（von Carmer and Jirka, 2001）。



(a) 一般的な乱流場

(b) 浅い水平せん断流

図-2 一般的な乱流場と浅い水平せん断流の乱流構造の比較

以上の性質を踏まえ、一般的な乱流場と浅い水平せん断流の乱流構造の違いを乱れのエネルギー・スペクトルを用いて概念的に示したものが図-2 である。一般的な乱流場では、流れのシアによって発生した三次元的な組織渦（エネルギー保有渦）に平均流からエネルギーが供給され、渦の三次元的なストレッチング作用によってスケールの大きい渦からスケールの小さい渦へとエネルギーが移行し（乱れエネルギーのカスケードダウン）、最終的には粘性によって消散する。これに対して、浅い水平せん断流は、せん断層内で平面二次元性を有した組織渦構造(2DCS)が発生し、平均流のエネルギーはこれに移行する。2DCS は二次元的な性格を有しているので、組織渦のエネルギーの一部はより大きなスケールの渦に移行しながら（乱れエネルギーのカスケードアップ；Batchelor,1969）、また同時に底面摩擦によって SDS 乱れに 2DCS のエネルギーが移行していく。一方、水深スケール以下の運動については、主流や 2DCS の底面摩擦によって生産された乱れに、水面で生産された乱れ（碎波や風応力等がある場合）が加わり、全体として三次元性の強い乱流構造が形成され(SDS 乱れ)、これらが持つ局所的な混合効果は 2DCS の発生・発達に影響を与えていると考えられる。

(2) 浅い水平せん断流のモデリング

実際の水域における浅い水平せん断流の性質を紹介する前に、浅い水平せん断流のモデル化について先に触れておく。先述のように、浅い水平せん断流の特徴は、スケールの異なる乱れが多重構造を構成し、平面二次元的な組織渦（2DCS）が発達することで、一般的なせん断流の乱流構造とは異なった性質を持っていることである。したがって、浅い水平せん断流を正確に表現するためには、多重スケールでかつ明確な組織渦構造を持った乱流過程を表すことが可能な乱流モデルを導入する必要がある。通常、乱流シミュレーションにおいては、クロージャーモデル (k - ϵ モデル, Mellar and Yamada モデル等) が使われることが多いが、一般的なクロージャーモデルでは乱れの多重構造性を考慮できないために、浅い水平せん断流を適切に表現するための様々な試みが行われている(福岡ら, 1994; 木村ら, 1995, Hinterberger ら, 2004; Uittenbogaard and van Vossen, 2004)。ここでは、灘岡・八木(1993)による SDS & 2DH モデルに基づいて、浅いせん断乱流のモデリングの考え方を説明する。

SDS & 2DH モデルは、LES(Large Eddy Simulation)の考え方にに基づき、水深スケール以下の三次元性の強い乱れ(SDS 乱れ)はモデル化し、2DCS については運動方程式を解くことでその運動を直接評価するものである。このように考えれば、せん断構造にとって重要な 2DCS の挙動、例えば、2DCS 同士の干渉や底面摩擦の影響を直接反映させることができ、また水深スケール以下の乱れは水平渦動粘性係数を介して 2DCS の挙動や平均流場の構造に影響を与えることになる。SDS & 2DH モデルと通常の LES の違いは、乱れの分離スケールの考え方にある。通常の LES は、計算格子サイズを乱れの

分離スケールとし、格子サイズ以下のスケールの運動をモデル化し、格子サイズ以上の運動を運動方程式に基づいて直接その挙動を計算している (図-2(a) 参照)。これに対し、SDS & 2DH モデルでは、浅いせん断流場が水深によって運動が拘束されることで乱れが多重構造的性を持っている点に着目し、水深を乱れの分離スケールとして (図-2(b) 参照)、水深スケール以下の乱れ (SDS 乱れ) を次式のようにモデル化している。

SDS 乱れエネルギー k の式：

$$\frac{Dk}{Dt} = P_{kh} + P_{kv} + P_{kd} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial k}{\partial y} \right) \quad (1)$$

SDS 乱れの長さのスケール l の式：

$$l = \alpha \cdot h \quad \alpha < 1 \quad (2)$$

SDS 乱れの渦動粘性係数 ν_t の式：

$$\nu_t = C_d' \cdot k^{0.5} \cdot l \quad (3)$$

ここで、 P_{kh} ：水平シアによる SDS 乱れの生産率、 P_{kv} ：底面摩擦による SDS 乱れの生産率、 P_{kd} ：碎波などその他の要因による SDS 乱れの生産率、 ε ：SDS 乱れの消散率、 h ：水深、 α, C_d' ：乱流モデルパラメータをそれぞれ表しており、SDS 渦動粘性係数が運動方程式中の水平渦動粘性係数となることで SDS 乱れの影響が 2DCS を含む大きなスケールの運動に反映される形となっている。

SDS & 2DH モデルは、LES の枠組みであるが、2DCS が平面二次元的であるという性質を反映させて、運動方程式は水深平均型としているために 2DCS の挙動という現象の本質的な特徴は直接計算しつつも計算負荷は小さく押さえられている。なお、浅い水域の流れであっても流れが鉛直分布構造を持ち、それが運動量輸送などに影響する場合も考えられるため、流れの鉛直分布を複数の鉛直分布関数の重ね合わせとして表現する準三次元化も行われている (八木, 1994 ; 田村・灘岡, 2000)。

2.2 河川及び海域の浅い水平せん断流

ここでは、実際に水域で発生している浅い水平せん断流として、複断面水路および植生帯や水制を有する河川の流れ、海岸域における沿岸流のせん断不安定現象と取り上げ、それぞれの水域における水平方向の運動量・物質輸送の特徴やそれに与える 2DCS の役割を示す。

(1) 複断面水路及び植生・水制を有する河川の水平せん断流

河川は、その内部に複断面構造や植生帯、水制など有しており、それらが横断方向に流速差を引き起こすことで、浅い水平せん断流が形成されやすい構造になっている。河川流の水平せん断特性は、河川流全体の流体抵抗や河川横断方向の土砂・物質輸送に大きな影響を与えていることから、河川管理上重要な課題であり、これまでに様々な検討が行われてきたが、当初は鉛直渦動粘性係数に比例させた水平渦動粘性係数を用いるなど経験的な取り扱いにとどまっていた。その後、実験、現地計測、理論解析による検討が精力的に行われ (例えば、木下, 1984 ; 福岡・藤田, 1991 ; 池田ら, 1992)、複断面流れや植生帯による水平せん断流場においては、①せん断層内に平面二次元的な組織渦構造 (2DSC) が形成されること、②組織渦は河川横断方向の流速差に起因するせん断不安定現象によって発生したものであること、③運動量や物質の河川横断方向の輸送に 2DCS が支配的な役割を果たしていることなどが明らかにされた。

このように浅い水平せん断流場の特徴は、2DCS が運動量や物質の輸送に重要な役割を果たすこと

であり、したがって 2DCS の挙動が水平混合作用を大きく変化させる。例えば、複断面流れにおいては、高水敷や低水路の幅を変化させると、河川兩岸の高水敷-低水路境界に発生する 2DCS の発達や干渉が変化し、それらが最も強く干渉する条件で 2DCS の強度やそれによって引き起こされる運動量の水平混合作用が最大になるなど、組織渦同士の干渉が水平混合に大きく影響することが指摘されている（池田・空閑，1997）。また、側岸に不透過水制群がある水平せん断流では、水制背後に形成される 2DCS のサイズと水制間隔が重要な意味を持ち、2DCS のサイズに比べ水制間隔が小さいと 2DCS の発生・発達が抑制され、2DCS のサイズと水制の間隔が同程度の時に 2DCS が最も発達し、河川主流部と水制域間の運動量や浮遊砂の輸送が顕著になることが報告されており（池田ら，2000）、このことは構造物の形状によってダイナミックに変化する 2DCS の挙動が水平混合過程に与える重要性を示している。このように組織渦の複雑な挙動に強く依存した水平混合過程は、一般的なクロージャー

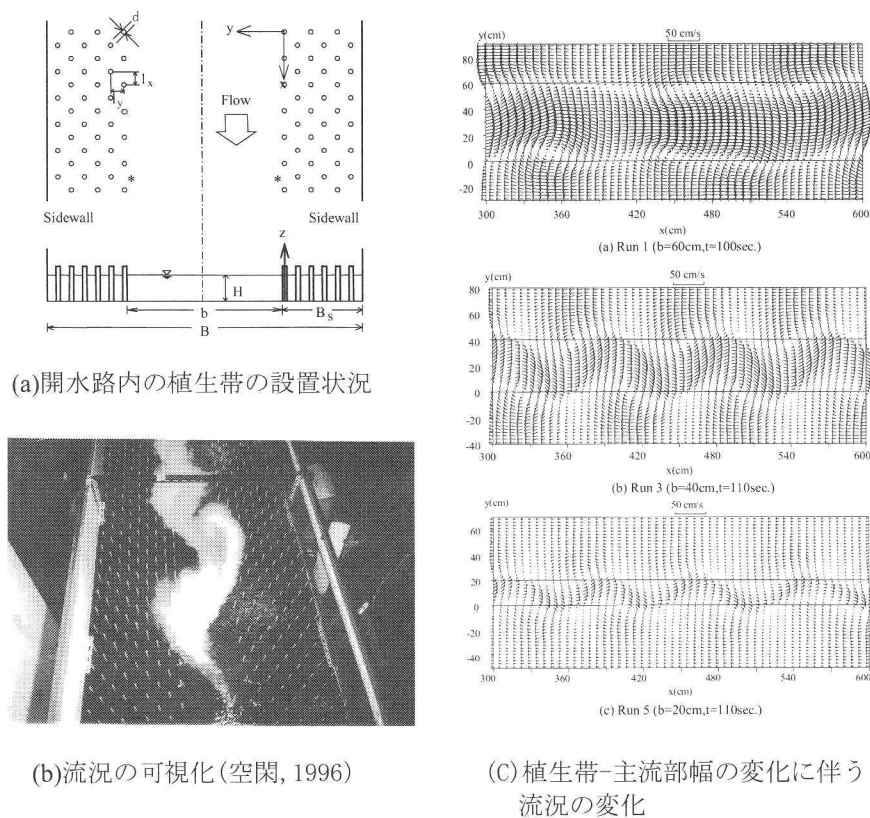


図-3 兩岸に植生帯を有した開水路の水平せん断流 (Chen, 1996)

乱流モデルでは再現することが難しく、2DCS を直接計算する SDS & 2DH モデルのような浅いせん断流に対する計算の枠組みが有効となる (図-3 参照, Chen,1996)。

(2) 沿岸流のせん断不安定と水平混合 (Shear waves)

沿岸流は、ラディエーション応力の岸沖勾配が駆動力となり、海岸線に平行に流れる代表的な海浜流であるが、ラディエーション応力による駆動力が砕波帯内のみに作用し、駆動力が作用しない砕波帯外との間に流速差を生じやすい構造となっているために、浅い水平せん断流としての性質を持っている。沿岸流の水平せん断構造 (水平混合) については、水平渦動粘性係数を用いた様々なモデルが提案されているが、その多くは物理過程の捉え方に曖昧な点があったり、また実際の沿岸流速分布を表現するには水平渦動粘性係数を大きめに修正しなければならないなど (Visser,1983)、水平混合のメカニズムの理解とその定量的な評価に問題を残していた。

一方、Oltman-shay ら (1989) は、沿岸方向に一様性が高い海岸において、砕波帯周辺の平面的な多点流速計測を行い、その結果からエッジ波としては説明することができない、沿岸流と同じ方向に伝播する特徴的な長周期波 (Far-infra-gravity waves) を見だし、Bowen and Inman (1989) は、それが沿岸流のせん断不安定現象 (Shear waves) である可能性を理論的に示している。Oltman-shay ら (1989) によって見いだされた Shear waves は、沿岸流の新しいダイナミックな側面を示したと同時に、メカニズムが十分に理解されていなかった水平混合の解明につながる可能性があることから、1990 年代にその解明が急速に進められた。Shear waves の検討の中心になったのは、安定解析及び数値シミュレーションであり、Bowen and Inman (1989) による単純な条件に対する線形安定解析 (一様水深、水平混合なし・底面摩擦なし、沿岸流は三角形分布) に始まり、底面摩擦や水平混合効果が導入され、より実際

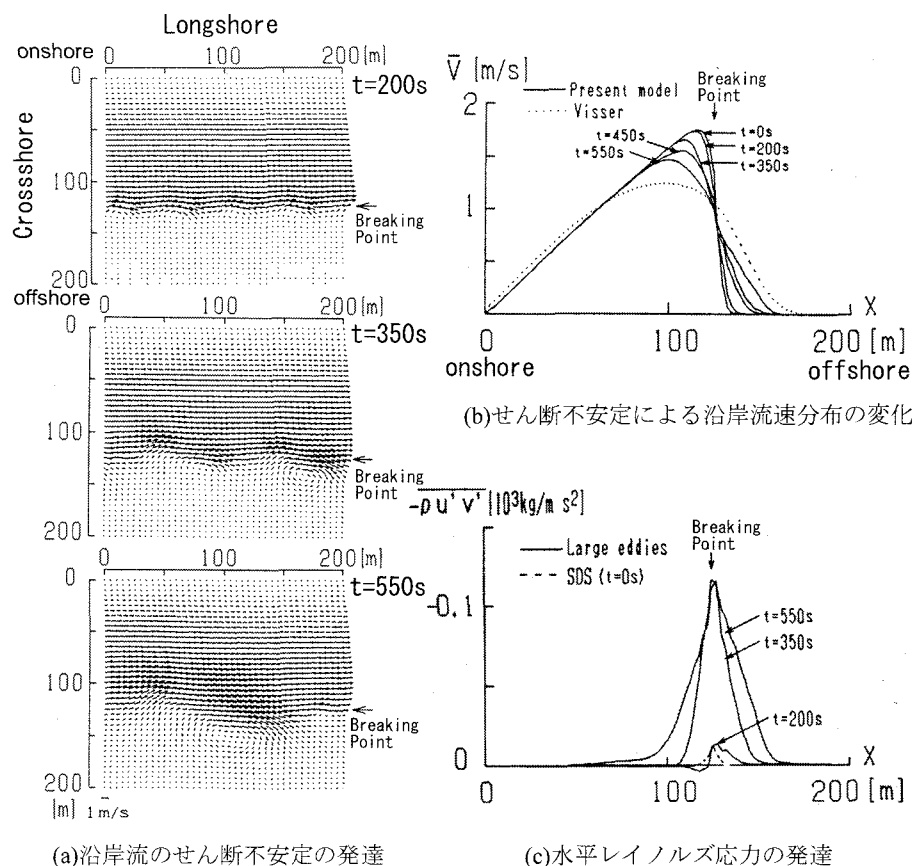


図-4 沿岸流のせん断不安定現象 (Shear waves) とそれに伴う沿岸流速分布・水平レイノルズ応力の変化 (灘岡・八木, 1993a)

に近い海底地形や沿岸流速分布を対象とする形へと発展し、解析法も初期の線形安定解析から非線形安定解析、そして運動方程式の数値シミュレーションへと進められた。その結果、安定解析から得られた卓越波の分散関係が現地計測によって得られた Shear waves のものと近いことが確認され(Dodd ら, 1992), Shear waves が沿岸流の水平混合へ重要な役割を果たしていることなどがわかってきた。例えば、図-4 は、Shear waves の数値シミュレーション例であるが(灘岡・八木, 1993a), これを見ると碎波点付近にせん断不安定によってまずはスケールの小さい 2DCS が発生し、それらが合体することでスケールの大きい 2DCS に発達、それと同時にレイノルズ応力も増大し沿岸流速分布が平滑化されていく様子がわかる。さらに、このような Shear waves の発生・発達や 2DCS の振る舞いには底面摩擦や水平混合効果の評価が重要であること(Allen ら, 1996; Slinn ら, 1998; Ozkan-haller and Kirby, 1999), 一様勾配斜面よりもバー型の海浜断面地形の方が Shear waves が発達しやすいこと(Dodd ら, 1992, Putrevu and Svendsen, 1992; Deigaard ら, 1994), 海底地形の沿岸方向の変動が Shear waves の発達に影響を与えること等が指摘されている(Deigaard ら, 1994; Sancho and Svendsen, 1999)。

Shear waves は、現地調査や室内実験でその詳細な構造を調べるのが難しいということもあり、理論解析や数値シミュレーションが先行している。今後は、現地計測や室内実験による理論解析等により詳細な検証が必要である。特に、碎波帯には Shear waves 以外にも、流速鉛直構造に起因した運動量の混合や不規則波の影響など、運動量を輸送し沿岸流を平滑化させる効果を持つ現象が存在しており、これらと Shear waves の関係を明らかにしていくことが重要な課題と考えられる。

3. 浅い水域における表・底面境界過程と熱・物質輸送構造

3-1 干潟域における底面抵抗則と流れの鉛直構造

干潟やその周辺の浅い沿岸域では、水深が浅いために底面せん断力や底面付近の流れの構造が、水域全体の流況や物質輸送に大きな影響を及ぼす可能性がある。干潟域の底面せん断力や流れの鉛直構造については、マニングの式、シェジューの式のような開水路の抵抗則や対数分布則によって評価が行われることが多いが、近年、現地干潟上での海底境界層の計測が行われるようになり、その性質が直接把握できるようになってきた。例えば、Collins ら(1998)は、英国の 3 地域 7 地点の泥質干潟における合計 192 の鉛直分布計測結果に基づき広範な条件に対して対数分布則の適用性、境界層パラメータ (z_0 : 粗度高さ, u_* : 摩擦速度等) の妥当性を検討している。その結果、計測された鉛直分布のうち対数分布型を示すものが全体の 50~60%, それから算出した粗度高さや底面せん断力まで妥当な値を与えるものは 40%以下であると指摘している。干潟域において、流速の鉛直構造や抵抗則が対数則からずれる原因としては、海上風や波浪の影響、地形性二次流の影響、運動量の移流効果、潮流の回転性などが指摘されているが(Collins ら, 1998; Wood ら, 1998), 具体的にそれらを考慮して底面せん断力を評価するには至っていない。底面抵抗則は浅い水域の流れを支配する重要な要素であることから、干潟上の微地形効果なども含め境界層の実態把握と抵抗則の確立が望まれる。

3-2 浅い水域の海底地形と流動特性

浅い水域では、それぞれの水域が持っている海底地形の構造的な特徴が流動場の形成に重要な役割を果たしている。ここでは、干潟域とサンゴ礁域を取り上げ、それぞれの水域において海底地形が流動場へ与える影響を紹介する

(1) 干潟域における潮流の非対称性

干潟のような浅い水域では、海底地形や底面摩擦の影響ために潮汐波が変形し、非対称な潮流速変動を示すことで、後述するように正味の物質輸送に大きな影響を与えている(Dronkers, 1986)。非対称

な潮流速変動のうち、上げ潮最大流速が下げ潮最大流速を上回るケース（上げ潮卓越型）は、浅いエスチュアリ（河口域）に潮汐波が遡上するような場合に顕著な形で現れ（宇野木, 1996）、これは運動量の移流による非線形効果に加え、水深が異なる干・満潮時の底面摩擦の非対称性によって潮汐波が前傾化することが主な原因と考えられている（Friedrichs and Aubrey, 1988）。一方、下げ潮最大流速が上げ潮最大流速を上回る下げ潮卓越型は、エスチュアリなどで流れの主流部（滞筋）周辺に干潟などの浅場が広がっている場合に生じることが多く、これは上げ潮時に滞筋から周辺の干潟へ海水が流入し周辺の干潟が海水を貯留する効果を持つことで下げ潮時の流速が大きくなるためと考えられている（Friedrichs and Aubrey, 1988）。熱帯～亜熱帯域の河口周辺に形成される R 型マンガルのマングローブ域は、この典型的な例であり、多くのマングローブ域で下げ潮卓越型の潮流変動が観測されている（表-1、金沢・松田, 1994）。

表-1 R 型マンガルの creek で測定された潮汐潮流の非対称性(金沢・松田, 1994)

	最大流速 (m/s)		swamp面積とcreek面積の比
	上げ潮	下げ潮	
Hinchinbrook Channel (Australia)	0.5	0.9	2.1
Tuff Crater (New Zealand)	0.4	0.6	44.0
Klong Ngao (Thailand)	0.4	0.8	2.7
Ross Creek (Australia)	0.4	0.8	
Dickson Inlet (Australia)	0.7	0.8	6.2
Chwaka Bay (Zanzibar)	0.3	0.5	
Coral Creek (Australia)	1.2	1.6	5.5
Wenlock River (Australia)	1.0	2.0	
Merbok Estuary (Malaysia)	1.0	1.5	2.5

(2)サンゴ礁海域の流動特性

サンゴ礁海域における流れも地形効果を受けた典型的な例である。サンゴ礁海域はサンゴ礁の発達のために海岸付近に特徴的な浅場を構成しており、例えば、裾礁型のサンゴ礁域の場合、岸沖方向には、水深の浅い礁池→サンゴが発達した内側礁原→干潮時に干出する礁嶺→外海に面する急勾配の礁斜面といった岸沖断面構造を持ち、局所的に礁嶺が裂けたクチと呼ばれる水路で礁池（サンゴ礁内）と外海が繋がれている。サンゴ礁海域の流れは、このような地形の影響を強く受け、①平均的には、礁嶺部分を通じて外海域からサンゴ礁内に海水が流入、水路（クチ）を通じてサンゴ礁内から外海域に流出する形の平面構造を示す、②流速変動には、潮汐波の変形による潮流速の非対称性や上げ潮時の急激な流向変動現象が現れる、などの特徴を持っている（灘岡ら, 2001; 田村ら, 2004）。このうち、前者の平均流の構造に大きな影響を与えているのは地形の影響を受けた波浪（海浜流）である。すなわち、外海域からサンゴ礁域に進入する波浪はその多くが水深の浅い礁嶺部分で砕波し、砕波による岸向きのラディエーション応力によってサンゴ礁内には水位のセットアップが生じる。一方、水深が大きい水路（クチ）の部分は砕波が起きにくく水位のセットアップが小さいため、結果としてサンゴ礁内には礁嶺背後の領域から水路（クチ）部分に向けて沿岸方向の水面勾配は生じ、礁嶺部分から流入、水路（クチ）から流出という平均流の空間構造が形成される（図-5 参照）。これに対して、潮流速変動の非対称性や上げ潮時の急激な流向変動現象には、潮位の影響が大きいことが指摘されている（田村ら, 2004）。潮位が高い時には、海浜流に加え潮流によっても礁嶺部分を通じて海水の流入・流出が行われるが、下げ潮時に潮位が低くなると礁嶺が干出し、サンゴ礁内から礁嶺を通した外海域への海水流出が遮断されることで、サンゴ礁内の海水は水路（クチ）でしか外海に流出できず、サンゴ礁内を水路（クチ）に向かって流下する間に流速波形が変形する。一方、上げ潮時には、礁嶺が干出している間は水路（クチ）のみから徐々にサンゴ礁内に海水が流入するが、礁嶺部が冠水するとサンゴ礁域と外海との潮位差及び砕波によるラディエーション応力によって、礁嶺を通じてサンゴ礁内に一気に海水が流入するために、結果としてサンゴ礁内には急激な流向変動現象が生じる。

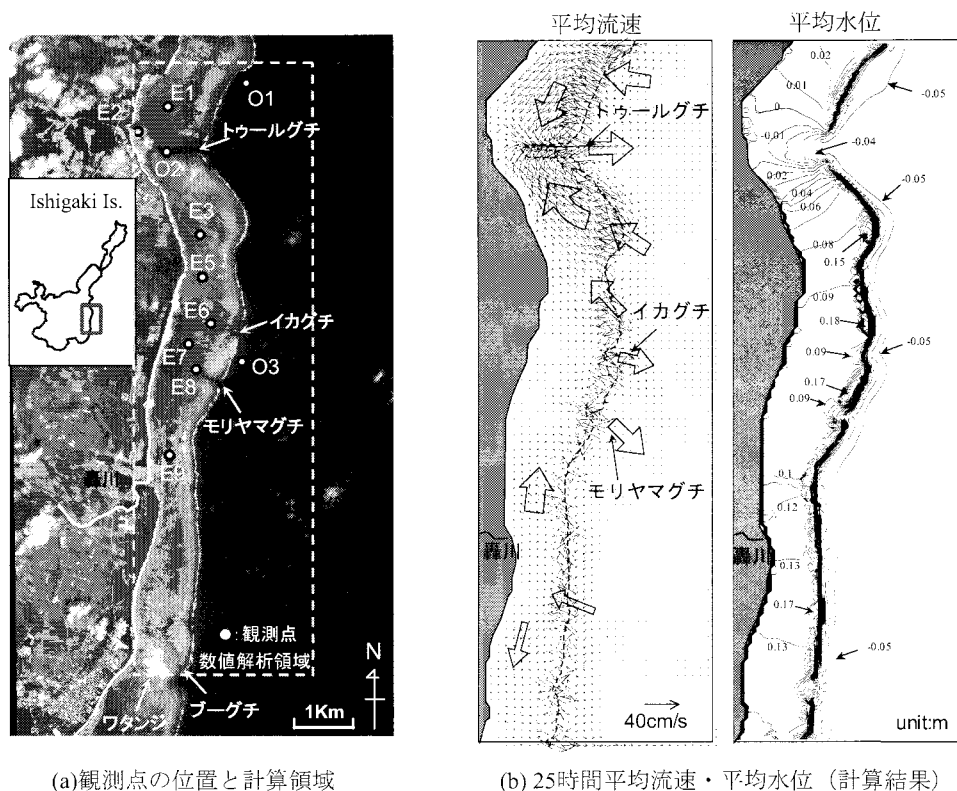


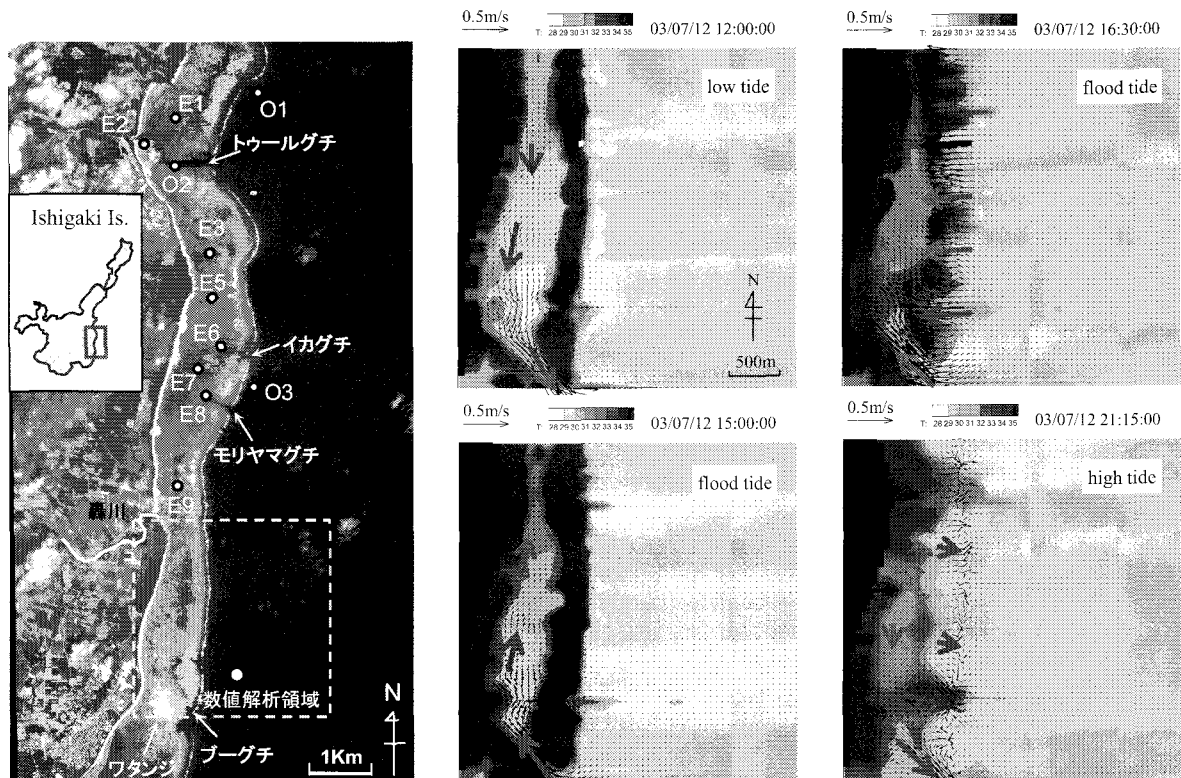
図-5 石垣島東岸裾礁域の流動特性 ((田村ら, 2004))

3-3 干潟域の底質浸食特性と底生生物の影響

干潟域を含め浅い沿岸域における物質輸送や地形変動を考える上で底質の浸食特性は重要な要素である。底質、特に泥分を含んだ底泥の浸食特性については、航路埋没など工学的に重要な課題と関連していることから、従来から検討が行われており底質の巻き上げ量 E は通常次式のような形で評価されている。

$$E = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right) \quad (\tau_b > \tau_e \text{ の時}) \quad (4)$$

ここで、 τ_b :底面せん断力、 τ_e :浸食限界せん断力、 M :係数である。浸食限界せん断力や係数 M は、対象とする底質の性状によって値が異なるため、これまでは現地底質試料を用いた室内実験によって底質粒径や含水比と関連付けて評価されることが多かった。最近では、これらを現地で直接計測可能な計測機器を開発し、それを用いて浸食限界せん断力や巻き上げ量を直接計測する試みが欧州の干潟域を中心として精力的に行われている(例えば、Lawler ら, 2001; Tolhurst ら, 1999; Amos ら, 1997)。さらに、このような現地計測を通じて底質浸食特性に与える生物の影響も明らかになってきている(Anderssen, 2001; Paterson ら, 2000; Riethmuller ら, 2000)。例えば、Dyer ら(2000)は、干潟域の表層に珪藻が発達する時期とそれ以外の時期で干潟から巻き上げられる懸濁物質の濃度レベルが大きく変化することを指摘している。また、Andersen(2001)は、干潟域における大型動物が多い場所ではバイオフィームが形成されず、同じ干潟でも水深帯によってバイオフィーム形成により耐浸食性が高い場所とバイオタベーション等によって浸食されやすい場所が存在することを指摘している。



(a) 計算領域 (b) 裾礁域における流速と水温の時空間変動特性 (計算結果)

図-6 石垣島東岸裾礁域における夏季の熱構造および熱輸送 (Tamura ら, 2005)

3-4 浅い水域の熱構造

一般に海域の水温構造は、海面及び海底での熱フラックス及び水平方向の移流効果のバランスによって支配されている。水深が大きい海域では、海面から入射した短波放射は海底に到達する前に海水に熱吸収されるが、干潟やサンゴ礁域といった水深が浅い海域では、短波放射が海底まで直接到達し、海底で反射した後、再び大気へ出て行くことが考えられる。したがって、浅い水域の熱構造・熱収支を考える上では、このような海面から進入した短波放射の海水への熱吸収や海底での反射を含めて評価することが必要となってくる (松永ら, 1998 ; 二瓶ら, 2001)。

また、干潟やサンゴ礁域のような浅水域は、水深が浅いために熱容量が小さく、潮位変化によって干出と冠水を繰り返すことで、水温変化の激しい特徴的な熱構造と熱輸送特性を持っている。例えば、夏季のサンゴ礁域ではサンゴ礁内という浅く狭い空間の中でも顕著な水温差が生じ、相対的に水深が大きい礁池で水温変動が小さく、水深が浅い礁嶺や汀線付近で水温の日変動が大きいという特徴がある (熊谷ら, 2004)。その結果、夏季のサンゴ礁域では、昼間の干潮時に水深の浅い礁嶺や汀線付近で大きな水温上昇が生じ、このうち礁嶺付近に生じた高水温水塊は上げ潮にサンゴ礁内に流入、サンゴ礁内を移流した後、下げ潮時に水路 (クチ) から外海に流出するといった熱の平面的な構造と輸送特性を示すことが知られている (図-6, Tamura ら, 2005)。

3-5 浅い水域の海面変動と底質輸送

浅水域は水深が浅いために、そこでの物質輸送には波浪、潮汐、長周期水位変動といった様々な時間スケールの海面変動が影響を与えている。ここでは、干潟域を例に、海面変動の影響を受けた底質輸送の特徴とその結果としての地形構造特性を紹介する。

(1) 干潟域における海面変動と底質輸送

潮汐：潮汐によって干出・冠水を繰り返す干潟域では、上・下げ潮流による底質の巻き上げとそれぞれの方向への輸送、憩流時の沈降が底質移動のベースとなっている。基本的には往復流である潮流場において、底質がある方向へ正味の輸送を生じるには、潮流変動の非対称性と **Scouring lag & Settling lag** 効果が重要であると考えられている。このうち前者は、前述のように潮汐波は海底地形や底面摩擦の影響によって変形し流速変動が一般に非対称になっているため、その非対称性の特徴（上げ潮卓越型、下げ潮卓越型）とその場に生じる潮汐残差流によって正味の輸送方向と輸送量が大きく影響を受ける (Dronkers, 1986)。一方、後者は、底質粒子が底面から巻き上げられる時、または沈降する時に、**Scouring lag**（底面せん断力が底質巻き上げ限界以上となってから実際に底質が巻き上げられるまでの時間差）、**Settling lag**（底面せん断力が底質の沈降限界以下となってから実際に底質が沈降するまでの時間差）という底面せん断力と底質粒子運動に時間遅れが生じ、干潟のように岸沖方向に潮流速振幅が減少するような場合には、たとえ流速波形が対称であっても、上げ潮時と下げ潮路に底質が移動する距離に差が生じ、結果として底質は岸向きに輸送される性質を持つことが知られている (Postma, 1961)。

また、干出・冠水を繰り返す干潟域では、干潟の冠水時直後に濁度が急激に上昇する性質 (**Turbid tidal edge**) があることも確認されている。これは潮汐波先端の大きな流速によって海底面上の浮遊しやすい物質（浮泥など）が巻き上げられることが原因であり、これも正味の底質輸送に影響することが指摘されている (Christie and Dyer, 1998)。

波浪：干潟域は、内湾などの比較的波浪が静穏な場所に形成されることが多く、また遠浅の地形上を波が伝播する間に波高が減衰するため干潟上の波高は一般的にはあまり大きくはないが、底質に細粒分を多く含む干潟では波浪が底質輸送に大きく影響すると考えられている。波浪が存在すると、一般に底質の巻き上げ量が増加し、また条件によっては海底付近に **Fluid Mud** と呼ばれる高濁度流動層が形成されるなど (Metha, 1996)、底面付近の底質運動が活発になる。先述のように、干潟上の底質輸送は潮流を中心に行われるが、これに波浪の影響が加わると、上げ潮時に巻き上げられ浮遊状態にある底質が、波浪影響により満潮時に沈降が妨げられ、それが下げ潮時に沖に輸送されることで正味の底質輸送は沖向きとなり、干潟上は浸食傾向が強まると考えられている (Christie ら, 1999)。なお、干潟域は水深が浅いために、海陸風等によって干潟上に励起された波高数 10cm 程度の局所的な風波でも底質の巻き上がりや輸送に重要であることも指摘されている (Uncles, 2002)。

平均海面変動：潮位よりも長い時間スケールの海面変動としては、海上風による水位上昇や季節的な海面水位変動がある。例えば、Janssen-Stelder(2000)は、北海に面したワッデン海の泥質干潟における現地計測から、海上風によって水位がセットアップされることで、沖合から波浪が進入しやすくなり、波浪影響によって沖向きの底質輸送量が増加するために干潟が浸食されることを指摘している。また、柿木ら(2003)は、有明海の白川河口干潟における地形変動特性から、海面水位の季節的な変動に伴って（夏季に上昇、冬季に低下）、干潟の海底地形が季節変動していることを指摘しており、季節的な平均水位の変化が干潟域の底質輸送や地形変形に与える影響を示している。

(2) 干潟域の地形構造特性

上記のような底質輸送の結果、干潟域全体がどのような地形構造を持つかというマクロな視点からも様々な検討が行われている。例えば、Kirby(1992)は、英国の代表的なエスチュアリ (**Humber, Severn, Wash, Medway**) の干潟域における 43 地点の地形データから断面形状の比較解析を行っており、干潟の断面形状は潮汐と波浪の相対的な影響の大きさに支配され、波浪影響が大きい干潟域では断面形状が凹型 (**Concave**, 浸食傾向)、潮汐影響が大きい場合には凸型 (**Concave**, 堆積傾向) になることを見出している。このような Kirby の検討結果を受け、干潟の断面地形が凹型 (**Concave**) もしくは凸型

(Convex)になるメカニズムの解明も進められている。例えば、Fredriches and Aubrey(1996)は、地形形状が安定な干潟域では底質輸送が平衡状態（正味の底質輸送ゼロ）に達していると仮定した上で、潮汐卓越型、波浪卓越型それぞれの干潟を対象とした解析的なモデルを構築し、底質輸送と地形形状の相互作用によって波浪卓越する場合に凹型断面地形(Concave)、潮汐が卓越する場合に凸型断面地形(Convex)になることを示している。また、Lee ら (1997)も、波浪による Fluidmud の形成とそれによる波高減衰効果を取り入れた平衡断面モデルを構築し、波高が高くなるほど干潟の断面形状は凹型(Concave)が顕著になることを示している。これらの解析モデルでは平衡断面を仮定しているため、これを仮定しない数値解析による取り組みも行われており (Roberts ら, 2000 ; Pritchard ら, 2002), 干潟が位置するエスチュアリや湾の平面形状 (湾のアスペクト比や、湾の幅の空間的な変化等) が干潟の断面地形に与える影響なども数値実験等によって検討がなされている (Schuttelaars and Swart, 2000; van Leeuwen ら, 2000; Lanzoni and Seminara, 2002)。

4. おわりに

砂浜・岩礁海岸、干潟域、マングローブ域、サンゴ礁域といった浅海域は、それぞれが個性的でバラエティに富んだ水環境を持ち、生態系というシステムをそれぞれ構成していることから、通常は個別に論じられるが多いが、本論ではあえて、それらが共通して持っている『浅い』という特徴に着目し、『浅い』という条件に強く影響を受けた流れや物質輸送の性質を取り上げてみた。具体的には、浅場の持っている特徴である『多重構造的性・平面二次元性』、『表・底面境界過程の重要性』という2点について、前者についてはそれが顕著な形で現れる水平せん断流を対象として、また後者については、干潟やサンゴ礁域といった具体的な浅場を通してその特徴と影響の具体的な現れ方を紹介した。ここで示したのは、浅場の環境の持つ一つの側面に過ぎないが、本論が浅場の環境特性、特に流れと物質輸送の性質を理解する上でお役に立てば幸いである。

参考文献

- 池田駿介・太田賢一・長谷川洋：側岸部植生境界の周期渦の発生機構，土木学会論文集，No.443, 47-54, 1992.
- 池田駿介・空閑 健：直線複断面開水路流れに発生する大規模水平渦列の安定性と運動量輸送に関する実験的研究，土木学会論文集，No.558, II-38, 91-102, 1997.
- 池田駿介・杉本 高・吉池智明：不透水制群を有する流れの水利特性に関する研究，土木学会論文集，No.656, II-52, 145-155, 2000.
- 宇野木早苗：感潮域の水面変動，河川感潮域－その自然と変貌－，西条八束・奥田節夫編，名古屋大学出版会，11-45, 1996.
- 柿木哲哉，木下栄一郎，滝川清，山田文彦，外村隆臣：平均水面の季節変動が干潟地形に及ぼす影響，海岸工学論文集，第50巻，471-475, 2003.
- 金沢延幸・松田義弘：マングローブ河川における潮汐流の非対称性，海の研究，Vol.3, 1-11, 1994.
- 木下 良作：航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題，土木学会論文集，No.345, 1-19, 1984.
- 木村一郎・細田 尚・友近文志：開水路流れ混合層におけるせん断不安定波動の空間的増幅特性，土木学会論文集，No.509, II-30, 99-109, 1995.
- 空閑 健：複断面開水路に発生する大規模水平渦に関する研究，東京工業大学修士論文，1996.
- 熊谷 航・田村 仁・灘岡和夫・波利井佐紀・三井 順・鈴木庸壺・茅根 創：石垣島白保海域における水温環境特性と造礁サンゴ群衆の分布，海岸工学論文集，第50巻，1066-1070, 2004.

- 灘岡和夫・八木 宏：浅い水域の乱流場に関する数値計算モデルの開発と沿岸流場への適用，土木学会論文
集，No.470，II-24，25-34，1993a.
- 灘岡和夫・八木宏：SDS & 2DH モデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション，土木学会
論文集，No.470，II-24，35-44，1993b.
- 二瓶泰雄・灘岡和夫・綱島康雄・丸田直美・青木康哲・若木研水：サンゴ礁海域の温熱環境特性に関する
多面的観測と解析，海岸工学論文集，第48巻，1146-1150，2001.
- 田村 仁・灘岡和夫・Paringit, E.C.：石垣島東岸裾礁域の流動特性に関する現地観測と数値解析，土木学会
論文集，No.768，II-68，147-166，2004.
- 田村 仁・灘岡和夫・熊谷 航：裾礁タイプサンゴ域における海水流動・温熱環境特性に関する数値シミュ
レーション，海岸工学論文集，第51巻，1061-1065，2004.
- 福岡捷二・藤田光一：複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用，土木学会論文集，No.411，II-12，63-72，1991.
- 福岡捷二・渡辺明英・津森貴行：樹木群を有する開水路における平面せん断流の構造とその解析，土木学
会論文集，No.491，II-27，41-50，1994.
- 松永信博・児玉真史・福田和代・杉原裕司：干潟における熱収支の観測，海岸工学論文集，第45巻，1056-1060，
1998.
- 八木 宏：新しい乱流モデル開発に基づく浅い水域での大規模複雑乱流場の解析，東京工業大学学位論文，
195p., 1993.
- Allen, J. S., Newberger, P. A., and Holman, R.A., Nonlinear shear instabilities of alongshore currents on plane beaches,
Journal of Fluid Mechanics, Vol.310, 181-213, 1996.
- Amos, C.L., Feeney, T. Sutherland, T.F. and Luternauer, J.L., The stability of fine-grained sediments from the Fraser
river delta, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.45, 507-524, 1997.
- Anderson, T.J., Seasonal variation in erodibility of two temperate, microtidal mudflats, Estuarine, Coastal and Shelf
Science, Vol.53, 1-12, 2001.
- Batchelor, G. K., Physics Fluids Supply II, 233-239, 1969.
- Bowen, A.J. and Holman, R.A., Shear instabilities of the mean longshore currents, 1, Theory, Journal of Geophysical
Research, Vol.94, 18023-18030, 1989.
- Chen Fei-Yong, Turbulent shear flows in shallow open channels with training structures, Doctor thesis, Tokyo Institute
of Technology, 196p., 1996.
- Brown, A.C. and McLachlan, A., Ecology of sandy shores, Elsevier, Amsterdam, 328p., 1990.
- Christie, M.C. and Dyer, K.R., Measurements of the turbid tidal edge over the Skeffling mudflats, Sedimentary
processes in the intertidal zone, Geological Society, London, Special Publications, Vol.139, 45-55, 1998.
- Christie, M.C., Dyer, K.R. and Turner, P.: Sediment flux and bed level measurements from a macro tidal mudflat, Estuarine,
Coastal and Shelf Science 49, 667-688, 1999.
- Collins, M.B., Ke, X. and Gao, S., Tidally-induced flow structure over intertidal flats, Estuarine, Coastal and Shelf
Science, 46, 233-250, 1998.
- Deigaard, R., Christensen, E.D., Damgaard, J.S. and Fredsoe, J., Numerical simulation of finite amplitude shear waves
and sediment transport, Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering, 1919-1933, 1994.
- Dodd, N., Oltman-Shay, J. and Thornton, E.B., Shear instabilities in the longshore current: A comparison of
observations and theory, Journal of Physical Oceanography, Vol.22, 62-82, 1992.
- Dracos, T., Giger, M. and Jirka, G.H., Plane turbulent jets in a bounded fluid layer, Journal Fluid Mechanics, Vol.241,
587-614, 1992.
- Dronkers, J., Tidal asymmetry and estuarine morphology, Netherlands Journal of Sea Research, Vol.20, 117-131, 1986.

- Dyer, K.R., Christie, M. C., Feates, N., Fennessy, M.J., Pejrup, M., and van der Lee, W., An investigation into processes influencing the morphodynamics of an intertidal mudflat, the Doolard estuary, the Netherlands: I. Hydrodynamics and suspended sediment, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.50, 607-625, 2000.
- Dyer, K.R., Christie, M.C. and Wright, E.W., The classification of intertidal mudflats, *Continental Shelf Research*, 20, 1039-1060, 2000.
- Friedrichs, C.T. and Aubrey, D.O., Uniform bottom shear stress and equilibrium hypometry of intertidal flats. In *Mixing in estuaries and coastal seas* (Pattiaratchi, C., ed.), *Coastal and estuarine studies* 50, American Geophysical Union, 405-429, 1996.
- Friedrichs, C.T. and Aubrey, D.G., Estuarine, Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: A synthesis, *Coastal and Shelf Science*, Vol.27, 521-545, 1988.
- Ho, C. M. and Huere, H., Perturbed free shear layers, *Annual review of fluid Mechanics*, Vol.16, 365-424, 1984.
- Hinterberger, C. and Frohlich, J. and Rodi, W.: Three-dimensional and depth-averaged Large Eddy Simulation of Shallow water flows, *Shallow Flows*, Taylor & Francis Group, London, 567-574, 2004.
- Janssen-Stelder, B., The effect of different hydrodynamic conditions on the morphodynamics of a tidal mudflat in the Dutch Wadden Sea, *Continental Shelf Research*, 20, 1461-1478, 2000.
- Jirka, G. H. and Uijttewaal: Shallow flows: a definition, *Shallow Flows*, Taylor & Francis Group, London, 3-11, 2004.
- Ke, X., Collins, M.B. and Poulos, P.E., Velocity structure and sea-bed roughness associated with intertidal (sand and mud) flats and saltmarsh of the Wash, U.K., *Journal of Coastal Research*, Vol.10, 702-715, 1994.
- Kirby, R., Effects of sea-level rise on muddy coastal margins, In *Dynamics and exchanges in estuaries and the coastal zone* (ed.D.Prandle), 313-334, 1992.
- Lanzoni, S. and Seminara, G., Long-term evolution and morphodynamic equilibrium of tidal channels, *Journal of Geophysical Research*, Vol.107, 1-13, 2002.
- Lee, S. and Mehta, A.J., Problems in characterizing dynamics of mud shore profiles, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.123, No.4, 351-361, 1997.
- Lawler, D.M., West, J.R., Couperthwaite, J.S. and Mitchell, S.B., Application of a novel automatic erosion and deposition monitoring system at a channel bank site on the tidal river Trent, U.K., *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.53, 237-247, 2001.
- Mann, K.H., *Ecology of coastal waters –with implications for management-*, Blackwell Science, 406p., 2000.
- Metha, A.J., Interaction between fluid mud and water waves, *Environmental Hydraulics*, Ch.5, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 153-187, 1996.
- Nadaoka, K. and Yagi, H., Shallow –water turbulence modeling and horizontal large-eddy computation of river flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.124, No.5, ASCE, 493-500, 1998.
- Oltman-Shay, Howd, P.A. and Birkemeier, Shear instabilities of the mean longshore currents, 2, Field observations, *Journal of Geophysical Research*, Vol.94, 18031-18942, 1989.
- Ozkan-Haller, H.T. and Kirby, J.T., Nonlinear evolution of shear instabilities of the longshore current: A comparison of observations and computations, *Journal of Geophysical Research*, Vol.104, 25953-25984, 1999.
- Paterson, D.M., Tolhurst, T.J., Kelly, J.A., Honeywill, C., de Deckere, E.M.G.T., Huet, V., Shayler, S.A., Black, K.S., de Brouwer, J. and Daidson, I., Variation in sediment properties, Skeffling mudflat, Humber estuary, UK, *Coastal and Shelf Science*, Vol.20, 1373-1396, 2000.
- Postma, H., Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea, *Netherlands Journal of Sea Research*, Vol. 1, 148-190, 1961.
- Pritchard, D., Hogg, A.J. and Roberts, W., Morphological modeling of intertidal mudflats: the role of cross-shore tidal

- currents, *Continental Shelf Research*, Vol.22, 1887-1895, 2002.
- Putrevu, U. and Svendsen, I.A., Shear instability of longshore currents, a numerical study, *Journal of Geophysical Research*, Vol.97, 7283-7303, 1992.
- Riethmuller, R., Heineke, M., Kuhl, H., keuker-Rudiger, R., Chlorophyll a concentration as an index of sediment surface stabilization by microphytobenthos?, *Coastal and Shelf Science*, Vol.20, 1351-1372, 2000.
- Sancho, F. E., and Svendsen, I.A., Shear waves over longshore nonuniform barred beaches, *Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering*, 230-243, 1999.
- Slinn, D.N. and Allen, J.S., Newberger, P.A. and Holman, R.A., Nonlinear shear instabilities of alongshore currents over barred beaches, *Journal of Geophysical Research*, Vol.103, 18357-18379, 1998.
- Tolhurst, T.J., Riethmuller, R., and Paterson, D.M., In situ versus laboratory analysis of sediment stability from intertidal mudflats, *Continental Shelf Research*, Vol.20, 1317-1334, 2000.
- Uncles, R.J., Estuarine physical processes research: some recent studies and progress, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55, 829-856, 2002.
- Roberts, W., Hir, P.L. and Whitehouse, R.J.S., Investigation using simple mathematical models of the effect of tidal currents and waves on the profile shape of intertidal mudflats, *Continental Shelf Research*, Vol.20, 1079-1097, 2000.
- Robertson, A.I. and Alongi, D.M., Tropical mangrove ecosystems, *Coastal and estuarine studies*, Vol.41, American Geophysical Union, 329p., 1992.
- Schuttelaars, H.M. and de Swart, H.E., Multiple morphodynamic equilibria in tidal embayments, *Journal of Geophysical Research*, Vol.105, 24105-24118, 2000.
- Tamura, H. and Nadaoka, K., Numerical simulation of current and thermal transport in a fringing-tye coral reef, *Asian and Pacific Coasts 2005*, 2005.
- Uittenbogaard, R. and van Vossen, B.: Subgrid-scale model for quasi-2D turbulence in shallow water, *Shallow Flows*, Taylor & Francis Group, London, 575-582, 2004.
- Uijttewaalt, W.S., Booij, R., Effects of shallowness on the development of free-surface mixing layers, *Physics of Fluids*, Vol.12, No.2, 392-402, 2000.
- Van Leeuwen, S.M., Schuttelaars, H.M. and de Swart, H.E., Tidal and morphologic properties of embayments: Effect of sediment deposition processes and length variation, *Journal of Physics and Chemistry of the Earth (B)*, Vol.25, 365-368, 2000.
- von Carmer, C.F. and Jirka, H., On turbulence and transport in shallow water wake flow, *Proc. 29th Congress IAHR*, Beijing, China, pp.B80-86, 2001.
- Visser, P. J., Uniform longshore current measurements and calculations, *Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering*, 2192-2207, 1984.
- Wolanski, E., *Oceanographic processes of coral reefs –Physical and biological links in the Great Barrier Reef-*, CRC Press, 356p., 2000.
- Wood, R.G., Black, K.S. and Jago, C.F., Measurements and preliminary modeling of current velocity over an intertidal mudflat, Humber estuary, UK. *Sedimentary processes in the intertidal zone*. Geological Society, London, Publications, 139, 169-175, 1998.