

波による底泥質量輸送速度に及ぼす海底勾配の影響

中 野 晋*

1. はじめに

波と底泥の相互干渉の結果として生じる底泥層の質量輸送は小さな速度でも大きな海浜変形をもたらす可能性があり、これまで柴山ら (1985~1993), 榊山・Bijker (1988), Trien ら (1991), 沈ら (1993) などの研究が進められてきた。熊本港では浮泥の移動を抑制するために設置された潜堤が航路埋没抑制に効果的であると報告されているが(小笹ら, 1992), 質量輸送による底泥移動が大きいとの証は今のところ得られていない。流動化した底泥の質量輸送を考える場合, 斜面形成により発生する圧力勾配による流動量を把握することが重要であるが, 沈らの研究で一部考慮された他はほとんど無視されてきた。そこで, この研究では底泥内部の圧力勾配の影響を考慮して質量輸送速度を評価し, 安定な平衡海底勾配の形成過程について検討する。

2. 質量輸送速度

底泥粒子のラグランジュ流速 \bar{u}_L はオイラー平均流速 \bar{u}_E とストークスドリフト \bar{u}_s の和として次のように表される。

$$\bar{u}_L = \bar{u}_E + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \int \bar{u} dt + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \int \bar{w} dt \dots\dots\dots (1)$$

なお, $\bar{\cdot}$ は 1 周期平均量を示し, \bar{u}, \bar{w} は波動流速成分である。底泥は深さ方向に降伏値や密度をはじめとした物性に変化するため, \bar{u}_L をできるだけ正確に評価するため, 底泥層を多層に分けて各層内では物性を一定とする多層モデルを用いる。

(1) レオロジーモデル

底泥層の流動限界は

$$\tau_{max} > \tau_y \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau_{max} = -P_0 k_r z \exp(k_r z) \dots\dots\dots (3)$$

で表される (中野ら, 1991)。ここで k_r は波数, P_0 は海底面での波圧振幅, τ_y は底泥の降伏値, z は海底面から測った高さである。ある深さで流動限界に達するとその上部の底泥は周期運動を始めるため, いずれ流動状態に

至ると考えられる。この流動状態に達した底泥層を n 層に分け, 第 i 層の代表粘度 μ_{*ei} を次のように評価する。

$$\mu_{*ei} = \mu_{ei} + iG_i/\sigma \dots\dots\dots (4)$$

$$\mu_{ei} = \mu_{Bi} + \tau_{yi}/D_{ei} \dots\dots\dots (5)$$

ここで, G は弾性係数, σ は角周波数, μ_B は塑性粘度, D_e は代表ずり速度で, 1 周期最大のずり速度 D_{max} を用いる。なお, 諸量の添字 i は第 i 層の量であることを示す。波と流れの相互干渉の計算には波のみの場, 波流れ共存場に対して著者ら (1989, 1990) の数値モデルを用い, 質量輸送速度の計算に必要な \bar{u}, \bar{w} を評価する。なお, 波流れ共存場を取り扱った 1989 年のモデルでは弾性を考慮していないが, (4) 式で粘性係数を与えることで容易に弾性を考慮できる。

(2) ストークスドリフト

\bar{u}_i, \bar{w}_i や z に関する導関数 \bar{u}'_i, \bar{w}'_i を

$$\bar{u}_i = |u_i| \exp(-k_i x) \cos(k_r x - \sigma t + \alpha_i) \dots\dots (6)$$

$$\bar{w}_i = |w_i| \exp(-k_i x) \cos(k_r x - \sigma t + \beta_i) \dots\dots (7)$$

$$\bar{u}'_i = |u'_i| \exp(-k_i x) \cos(k_r x - \sigma t + \alpha'_i) \dots\dots (8)$$

$$\bar{w}'_i = |w'_i| \exp(-k_i x) \cos(k_r x - \sigma t + \beta'_i) \dots\dots (9)$$

で表す。これを式(1)の右辺第 2 および第 3 項に代入して

$$\bar{u}_s = (1/2\sigma) \exp(-2k_i x) \{ \cos \theta_k |k| |u_i| - \sin(\beta_i - \alpha'_i) |u_i| |w_i| \} \dots\dots\dots (10)$$

によりストークスドリフト成分が計算できる。なお, k は複素波数で $k_r + ik_i$ (k_i は波高減衰係数) であり, α_i, β_i は u_i, w_i の偏角, $\alpha'_i, \beta'_i, \theta_k$ はそれぞれ $\bar{u}'_i, \bar{w}'_i, k$ の偏角である。

(3) オイラー平均流

オイラー平均流 \bar{u}_E は榊山・Bijker (1988) と同様,

$$\frac{\partial \bar{u}_E^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}_E \bar{w}_E}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_E}{\partial z} \right) \dots\dots (11)$$

から評価される。ここで, ρ_2 は底泥の密度, \bar{P} は底泥内部の 1 周期平均の圧力である。榊山らの理論では波の周期性から $d\bar{P}/dx=0$ であるとされたが, 図-1 のように海底勾配が生じている場合は

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{\eta}_2}{\partial x} (\rho_2 - \rho_1) g \dots\dots\dots (12)$$

と表される。なお, 水面勾配に比べ, 底泥表面勾配が十

* 正会員 工修 徳島大学講師 工学部建設工学科

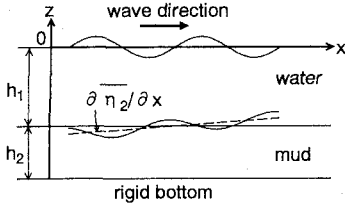


図-1 海底勾配が生じた底泥床

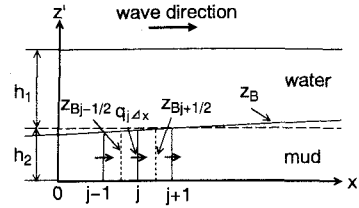


図-2 底泥床の変形過程計算の説明図

分大きいと考えられるので、水面勾配の影響は無視している。これより式(11)は

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial u_E}{\partial z} \right) = \frac{\partial u_E^2}{\partial x} + \frac{\partial u_E w_E}{\partial z} + \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) g \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \dots (13)$$

と変形される。この式を次の境界条件を満たすように z について数値積分することによってオイラー平均流速が計算できる。

まず、底面 $\left(z = -\sum_{j=1}^n h_j' \right)$ では

$$\bar{u}_{Ei} = 0 \dots (14)$$

各層間の境界面 $\left(z = -\sum_{j=1}^n h_j' + \bar{\eta}_{i+1} \right)$ で

$$\bar{u}_{Ei+1} = \bar{u}_{Ei} \dots (15)$$

$$\bar{\mu}_{ei+1} \frac{\partial \bar{u}_{Ei+1}}{\partial z} = \bar{\mu}_{ei} \frac{\partial \bar{u}_{Ei}}{\partial z} \dots (16)$$

底泥表面から十分離れた水槽内で

$$\bar{\mu}_{ei} \frac{\partial \bar{u}_{Ei}}{\partial z} \rightarrow 0 \dots (17)$$

である。

(3) 安定海底勾配

z' を基準面 (rigid bottom の位置) からの高さ、 z_B を底泥床面の高さ、 q_x は底質の x 方向への単位幅あたり底泥移動量とする。掃流砂などによる底質移動を考える場合、底質移動量から海底変化を求める際に移動する底質の体積と堆積した底質の体積とで堆積時の空隙の分だけ異なるが、質量輸送だけの移動を考える場合には移動する底質と堆積した底質とで体積は等しく、1次元の海浜変形が

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} = 0 \dots (18)$$

から計算される。図-2 のように水平方向に底泥床を区分して考えると

$$z_{Bj+1/2}^n = z_{Bj-1/2}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (q_{(j+1)\Delta x}^n - q_{j\Delta x}^n) \dots (19)$$

$$q_{i\Delta x} = \int_0^{z_B} \bar{u}_{i\Delta x} dz' \dots (20)$$

のように差分化して、底泥床の時間的变化が計算される。実験水槽で底泥を水平に敷設してから、波を作用させると、沖側の底泥が岸側に移動し、短時間でほぼ一定勾配

の斜面が形成され、その後はあまり変わらなくなる状況が観察される。この時式(18)で $\partial z_B / \partial t = 0$ が成立する。

実験水槽のように沖側端で $q_x = 0$ の時に $\partial z_B / \partial t = 0$ が成立するのは各位置で $q_x = 0$ が成立するはずである。したがって底泥床の安定勾配 $(\partial \eta_2 / \partial x)_\infty$ は各位置で q_x が 0 となる条件から求められる。質量輸送速度を求めるためには \bar{u}_L は底泥の見かけの粘度など数値モデルの計算の中で評価する量が含まれるため、解析的に安定勾配を計算することはできない。したがって、仮の底泥床勾配 $\partial \eta_2 / \partial x$ を与えて、式(20)から q_x を求め、これが 0 になるよう収束計算すれば良い。安定海浜形状だけを求める場合には、収束計算から求めた $x = j\Delta x$ の $(\partial \eta_2 / \partial x)_{\infty, j}$ から

$$z_{Bj+1/2} = z_{Bj-1/2} + \Delta x (\partial \eta_2 / \partial x)_{\infty, j} \dots (21)$$

で計算される。

3. 質量輸送量の測定結果との比較

(1) 表層泥の質量輸送の特徴

図-3 は波作用に伴う底泥表面の移動状況を表した 1 例である。水槽 (長さ 17 m, 幅 0.5 m) の中央に敷設した底泥床 (カオリナイト, 含水比 158%, 深さ 15.5 cm, 長さ 5 m) の表面 3 か所 (沖側端から 1.0, 2.5, 4.0 m) にメチレンブルーで 5 cm メッシュの格子を描き、波を作用させてその移動状況を写真に撮影した。波浪条件は $x = 0$ m での波高が 6 cm, 周期 1.0 s, 水深 30 cm である。岸側の $x = 4.0$ m では終始波の進行方向に移動し、60 分経過後には岸側に数 cm 移動している。これに対し沖側の $x = 1.0$ m では造波開始直後には波と同方向に移動を始めるが、10 分経過すると波とは逆の方向に進み始め、60 分後には約 10 cm 沖側に移動している。この傾向は含水比が高くなるとさらに大きくなる。また $x = 1$ m では側壁に近いほど波の進行方向へ進む傾向が見られ、側壁の影響が大きいことがわかる。榊山ら (1989) はガラス面に沿った移動量と水槽中央の移動量を比較し、両者の質量輸送量および分布形が異なることを報告している。つまりガラス面に沿った部分では移動量が表面からすぐ下で急に小さくなり、1 cm より深くなるとわずかなるのに対し、中央付近では表面から固定床 (深さ 9.5 cm) 付近まであまり変化していない。柴山ら (1985) も側壁から 2~3 cm の間では沖向きの戻り流れが集中し

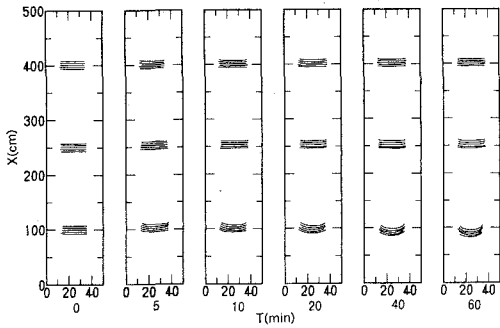


図-3 表層泥の移動状況

て現れるため、分布形が異なると述べている。表層泥の移動状況やこれまでの研究成果を総合して考えると、実験水槽での底泥の質量輸送が次のような過程で進行していると考えられる。水平な底泥床の上を波が作用し始めると $\tau_{max}/\tau_y > 1$ の流動限界を越える底泥部で底泥運動が発生し質量輸送が始まる。表面では周期運動が大きいが、その内でも壁面に近い部分ではずり速度が大きいため、見かけの粘度が小さくなり、表層部の中では移動量も大きくなる。一方、質量輸送が始まってから短時間で斜面勾配が生じると、式(13)の右辺第3項で表される圧力勾配による戻り流れが発生し、岸向きの質量輸送速度は減少するようになる。斜面が形成され、底泥層内部に戻り流れが生じる頃には岸向きに移動したとき以上にナクソトロピックな性質から粘性が低下し、最初の位置よりも沖側に移動するような状況が生じると考えられる。

このように実験水槽内で質量輸送速度は時間的、空間的に大きく変化しており、限られた場所で着色泥の移動だけからある瞬間の質量輸送速度を測定することはかなり困難と言える。

(2) 質量輸送速度と海底勾配

質量輸送速度に及ぼす海底勾配の影響について考察する。図-4は柴山ら(1989)が粘土内に埋め込んだトレー

サーの移動から評価した質量輸送速度の測定結果と比較したものである。それぞれの計算に用いた流動特性値は表-1(N-1~3)に示すとおりで、著者のカオリナイトに対する回転粘度計による測定結果から評価した。また柴山らが粘弾塑性体モデルで計算した結果を破線で示した。かれらの計算では水平床について計算した結果から断面平均流速を仮定し、それに対応する戻り流れ成分を差し引いて求めている。実験は5分程度波を作用させて、その間の移動量から質量移動速度を求めている。したがって、測定された \bar{u}_L は水平床からある斜面勾配を持つまでの平均的な速度であり、本計算で求めている瞬間的な質量輸送速度とは別のものである点は注意が必要で、測定結果と計算結果の定量的な比較はできない。いずれの実験も含水比が200%程度かそれ以上で、この実験条件下では底泥層全体が短時間に流動化し、波動運動状態に達したと考えられる。また実験終了時にはほぼ平衡安定勾配に達し、断面平均流速は0に近いものと推察できる。計算では海底勾配が0.008前後で断面平均流速が0となっており、この時の質量輸送速度分布の実測値と計算値が同様の分布形状を示している。海底勾配が1/1000変化しても、 \bar{u}_L の分布は大きく変化しており、いかに海底勾配の影響を受け易いかを示している。

図-5は一樣流が作用する場での波による質量輸送速度の計算例を示す。計算条件は柴山ら(1993)の実験に合わせている。この測定は榊山らと同じ着色した粘土の移動から質量輸送速度を測定しているが、図-4の場合とは異なり、造波後65~75秒間の移動量から求めている。水深は26.3cm、底泥厚さは8cm、試料は含水比158%のカオリナイト粘土である。測定は流れなしの条件も含め、流れの条件を5種類変化させ、波高減衰についても検討されているが、ここでは逆流 $U = -19.1$ cm/s、順流 $U = 18.64$ cm/s に対する計算結果を示した。なお、図中に示した柴山らの計算は粘弾塑性体多層モデルを改良し、粘弾性領域と粘塑性領域に分けて計算する方法を用

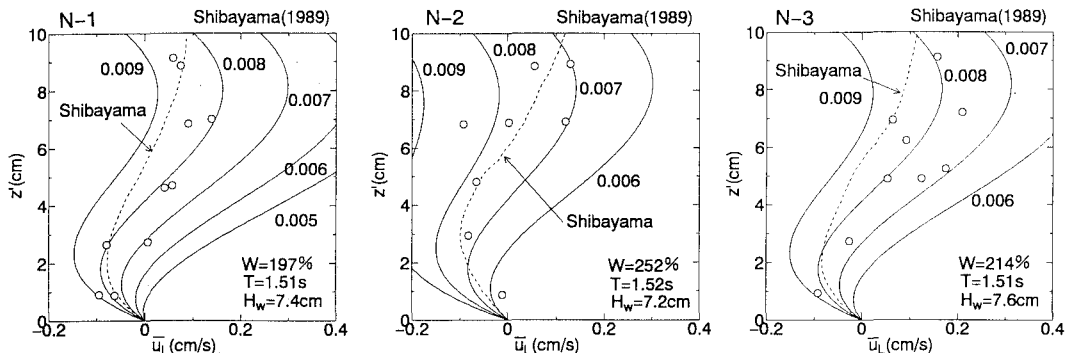


図-4 質量輸送速度分布 (柴山らの測定結果との比較)

表一 質量輸送速度分布の計算に用いた流動特性値

Run	W	τ_y	μ_B	G
	%	Pa	Pa·s	Pa
N-1	197	3.53	6.98	17.7
N-2	214	2.89	6.25	13.4
N-3	252	1.93	5.01	7.7
U	158	6.07	9.39	40

表二 安定海底勾配測定の実験と計算条件

$h_1=30\text{ cm}, h_2=7\text{ cm}, W=181\%$				
Run	T	τ_y	μ_B	G
	s	Pa	Pa·s	Pa
1	1.0	4.35	7.82	23.6
2	1.2			

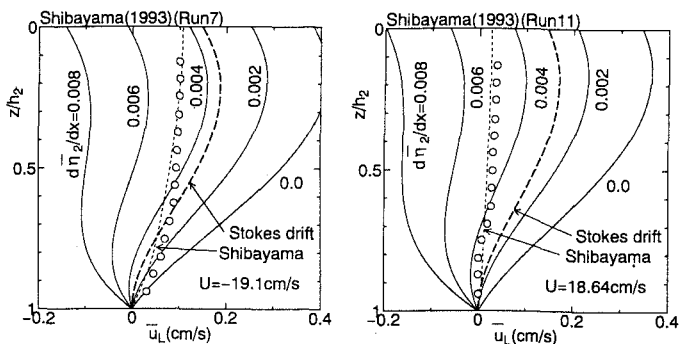
いている。計算に用いた降伏値は 17 Pa, 粘性係数は 4.5 Pa·s の一定値として与えている。計算に用いた流動特性値は表一の U の欄に示している。この計算条件で波高減衰係数の理論計算値と実験値を比較したものが図一六であり、両者が良く一致することが確認される。これに対し、柴山らの計算では波高減衰係数が実測の半分以下と小さな値を示す。なお、波高減衰係数の値は柴山らの原論文の値とは異なっているが、論文に示された波高変化図から求められる値に比べ過大になっており、改めて計算し直したものである。

逆流と順流の計算結果から、逆流の場合の質量輸送速度が順流の場合に比べて少し大きくなるのがわかる。しかし、その差は海底勾配が変化する影響に比べると軽微であり、ほとんど無視できる程度である。

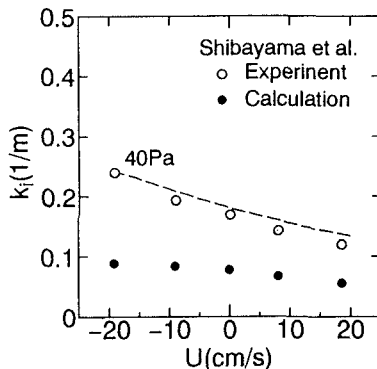
著者の計算結果に比べ、柴山らにより測定された質量輸送速度はかなり小さな値となっている。これは計算に比べて底泥運動が小さかったことを示している。含水比 150% 前後では図一三に示すような非定常的な運動が特に問題となる。波の作用開始直後 1, 2 分は底泥運動の発達途上であり、底泥波高は徐々に増大することがわかっている。この間に底泥粒子の構造が破壊し、回転粘度計で測定されるような定常的な流動特性に達するわけである。したがって造波直後の底泥運動量は平衡状態に比べかなり小さいはずである。著者の計算はあくまでも定常状態となった底泥の流動特性に基づいて解析しており、実験結果に比べ大きくなるのは当然といえる。

(3) 安定海底勾配

前項では底泥の質量輸送速度分布について計算結果と実験結果の比較を行ったが、ある瞬間の質量輸送速度分布の測定が不可能であり、定量的にモデルの妥当性を検



図一五 波流れ共存場での質量輸送速度分布



図一六 波流れ共存場での波高減衰係数

証するには至っていない。実験室内では数分以上経過するとほぼ安定な斜面が形成される。これは水平な場での質量輸送と圧力勾配にともなう戻り流れが釣り合った状態に対応する。こうした安定な斜面勾配は特殊な測定方法に頼ることなく正確に測定できる量である。そこでこの平衡状態に達した海底勾配を測定し、これを計算結果と比較することで質量輸送速度の計算手法を検証する。

実験は表二に示す 4 ケースでいずれも波高減衰の測定時の最終海底形状を測定したもので、造波開始後 1 時間以上経過し、完全に平衡状態に達したものである。

安定海底勾配の測定結果と計算結果を図一七に示す。水平な状態から式(19)を用いて底泥床変化計算を行った結果も併せて示している。この計算では 3 m の底泥床を水平方向に 30 等分 ($\Delta x=10\text{ cm}$), 鉛直方向に 10 等分, $\Delta t=0.1 T$ として毎ステップごとに質量輸送速度分布を求め、これから底泥床高さ変化を計算した。Run 1, Run 2 とともに $t=10\text{ min}$ では平衡状態に達し、式(21)から計算される $t=\infty$ の底泥床面形状と一致する。沖側端部で計算値と実測値が一致していないが、主に底泥と沖側端部の固定部の付着によるものであり、実質的には計算結果が質量輸送の状況を良く表している。

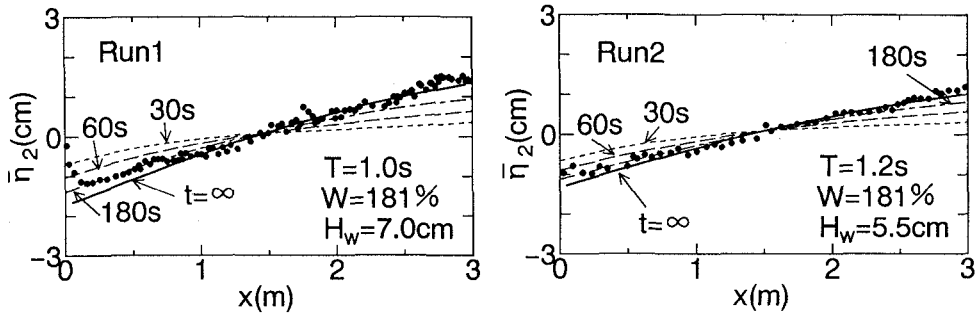


図-7 安定海底勾配の測定結果と計算結果の比較

4. おわりに

本研究では波による底泥の移動現象の内でも輸送量が大きく、重要と考えられている質量輸送速度について検討した。はじめに質量輸送速度の測定の困難性について底泥表面粒子の移動状況から検討した結果について述べた。ついで質量輸送の結果生じる戻り流れを考慮して、質量輸送速度を評価する手法について述べるとともに、造波開始後、短時間で形成される安定海底勾配の計算法を明らかにした。これは最も確実に測定でき、信頼性が高い量であり、理論の妥当性を示す上では特に重要である。ビンガム流体を基本とし、弾性を考慮する相当粘度法を用いた粘弾性流体多層モデルにより安定海底勾配が正確に予測できることが示された。

参考文献

小笹博昭・辻安治・大山大洋志・岸弘之・大瀬信一 (1992): 熊本港における航路埋没防止潜堤の実証試験について, 海岸論文集, 第39巻, pp. 471-475.
 榊山勉・E. W. Bijker (1988): 波による海底粘性土の質量輸送速度, 電中研報告, U 88043, pp. 1-37.
 柴山知也・滝川浩・堀川清司 (1985): 波による軟らかい底質粘土の質量輸送, 第32回海講論文集, pp. 258-262.
 柴山知也・佐藤慎司・平出和也・青木 徹 (1988): 波による底泥の質量輸送速度, 第35回海講論文集, pp. 347-351.

柴山知也・青木 徹・佐藤慎司 (1989): 粘弾塑性体モデルによる底泥移動量の評価法, 海岸論文集, 第36巻, pp. 334-338.
 柴山知也・奥野雅量・A. N. Nguyen・佐藤慎司 (1990): 底泥移動に関する粘弾塑性体モデルの波流れ場への適用, 海岸論文集, 第37巻, pp. 240-243.
 柴山知也・A. N. Nguyen (1992): 底泥特性の周期依存性に着目したモデルとその検証, 海岸論文集, 第39巻, pp. 511-515.
 柴山知也・A. N. Nguyen (1993): 波流れ共存下での底泥質量輸送, 海岸論文集, 第40巻, pp. 361-365.
 沈 道顕・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 波による底泥の質量輸送および泥浜の地形変化について, 海岸論文集, 第40巻, pp. 356-360.
 中野 晋・鶴谷広一・鷹濱 潤 (1987): 波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動について, 港研報告, 第26巻, 第2号, pp. 171-212.
 中野 晋・伊東信幸・藤平依彦 (1989): 流れの中での波と底泥の相互干渉, 海岸論文集, 第36巻, pp. 339-343.
 中野 晋・伊東信幸 (1990): 弾性を考慮した底泥床上への波高減衰計算手法と現地海域への適用, 海岸論文集, 第37巻, pp. 220-224.
 中野 晋・伊東信幸・井上 洋 (1991): 波による底泥の流動限界と巻き上げ限界, 海岸論文集, 第38巻, pp. 461-465.
 A. N. Nguyen・柴山知也・佐藤慎司・岡安章夫 (1991): 底泥の粘弾性特性の計測と数値モデルへの応用, 海岸論文集, 第38巻, pp. 471-475.
 Trien, H. N.・磯部雅彦・小林智尚・渡辺 晃 (1991): 波による底泥の質量輸送における底泥のレオロジー特性の影響, 海岸論文集, 第38巻, pp. 466-470.