

バー地形における底面上圧力勾配の岸沖分布特性の 把握とその統計的モデル化

Spatial Variation of a Pressure Gradient on a Barred Beach and its Statistical Modeling

鈴木崇之¹・Sungwon SHIN²・Daniel T. COX³・森 信人⁴

Takayuki SUZUKI, Sungwon SHIN, Daniel T. COX, Nobuhito MORI

This paper reports the cross-shore variations of a pressure gradient on a fixed barred beach. The data sets were obtained as part of large-scale laboratory experiments. The cross-shore variation of the pressure gradient showed that the maximum value of the pressure gradient appeared in the wave breaking area, and the pressure gradients were considered to be influenced by the fluctuation of water surface elevation. The spatial variation of pressure gradient and water surface elevation showed a good correlation from offshore to onshore in both regular and irregular wave cases. The exceedance probabilities of the pressure gradient were also analyzed and found that the distribution of the exceedance probability of the pressure gradient could be evaluated by the Weibull distribution.

1. はじめに

砕波帯では浅水変形や砕波により、底面上における流速や圧力は時空間的に変化する。底面上における流速については底質の移動に直接関わるため、これまで数々の研究が行われてきた。例えば、Shibayama・Horikawa (1982) は底面直上における流体運動とピックアップ関数についてのモデル化等を行っている。一方、底面上の圧力勾配も底質の巻き上げに関わると指摘され (Madsen, 1974), 砕波帯内の圧力場に関する研究はいくつか行われている。例えば、Stive (1980) は波形と圧力との関係について検討を行っている。また、Hsu・Ariyaratnam (2000) や Baldock・Hughes (2006) らは波打ち帯での圧力勾配と底質移動の関係について検討を行っている。しかし、砕波帯内外での波高、圧力勾配、鉛直流速の関係については未だ調べられた例はない。

本研究では、砕波帯内外における波高、底面近傍の圧力勾配および鉛直流速の計測結果から、それらの空間分布および変動特性を把握する。さらに、得られた圧力勾配の確率分布から、底質移動に関わる極大値の推定を行い、その統計的モデル化を試みた。

2. 室内実験の概要

実験は、オレゴン州立大学所有の長さ 104 m, 高さ 4.6 m, 幅 3.7 m の 2 次元造波水路にコンクリート床板でバー地形を作成して行った。地形は、アメリカ、ノー

スカロライナ州にある U.S. Army Corp 所有の観測栈橋で行われた現地観測 DUCK94 (例えば, Garcez Faria ら, 1998) において、1994 年 10 月 11 日に観測された地形の 1:3 スケールとほぼ同形状である。図-1 に水路断面と計測地点および波高計設置地点を示す。地形断面下に示した傾きは、その区画での底面勾配である。

計測地点はバー地形部分を中心に 9 測点設定し、各地点の造波板からの距離と水深は以下の通りである。
(Position, x [m], h [m]) = (L1, 32.7, 1.75), (L2, 40.0, 1.44), (L3, 47.3, 0.91), (L4, 51.0, 0.76), (L5, 54.7, 0.70), (L6, 58.3, 0.84), (L7, 62.0, 0.95), (L8, 69.3, 0.75), (L9, 76.6, 0.54)。

実験には圧力計 (Druck, PDCR 1000 series), 3 次元超

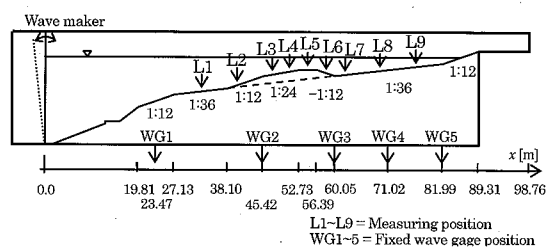


図-1 水路断面と計測地点 (L1 ~ L9)

音波流速計 (ADV, SonTek, 60 MHz Micro ADV), 容量式波高計を用いた。これら計測器を水路上、岸沖方向に移動可能な台車に各出力値に位相差が生じないように造波板から計測点までの距離が同一になるように設置して実験を行った。圧力計は図-2 に示すように設置板に 3 cm 間隔で固定し、この設置板を底面に接するまで台車から降下させ底面上 1 cm での圧力を測定した。また、流速値に関しても底面上 1 cm での流速 3 成分を測定した。

入射波は規則波 (3 ケース) と不規則波 (1 ケース)

- | | | | |
|-------|-------|-----------------|---|
| 1 正会員 | 工(博) | (独)港湾空港技術研究所研究官 | 海洋・水工部漂砂研究室 |
| 2 | Ph. D | オレゴン州立大学 | O.H.Hinsdale Wave Research Laboratory, Research Associate |
| 3 | Ph. D | オレゴン州立大学 | O.H.Hinsdale Wave Research Laboratory, Director |
| 4 正会員 | 工(博) | 大阪市立大学大学院講師 | 工学研究科 |

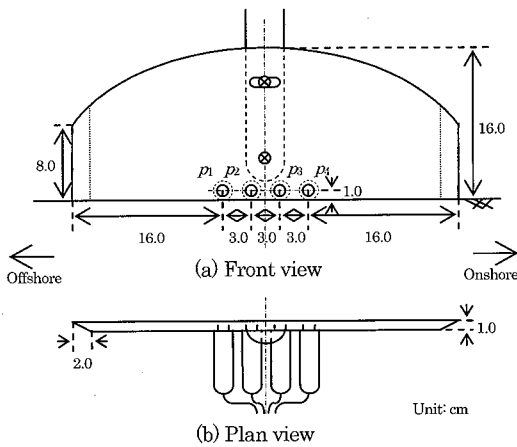


図-2 圧力計設置板

表-1 各ケースでの波の緒元

Case	Wave Type	T, T_s [s]	H, H_s [m]	H_0/L_0	ζ	t [min]	n_w
1	Reg.	2.7	0.50	0.057	0.23	10	212
2	Reg.	4.0	0.61	0.026	0.34	10	142
3	Reg.	5.0	0.49	0.013	0.49	10	114
4	Irreg.	3.9	0.56	0.026	0.34	20	341

とした。表-1に規則波および不規則波の諸元を示す。ここで、 T は周期、 H は波高、 ζ は surf similarity parameter、 t は計測時間、 n_w は波数である。下付きの s および 0 はそれぞれ有義波、換算沖波での値である。

実験データはセンサー毎の同期を取り、サンプリング周波数 50 Hz で記録した。解析するにあたり、データの低周波および高周波の振動はゼロクロス法を行う際に不利益を生じさせる。したがって、本研究ではスペクトル解析の結果より、0.1 Hz 以下の低周波およびピーク周波数の約 4 倍である 1.0 Hz 以上の高周波を分離して解析を行った。以下より、主に波高と周期がほぼ等しい規則波 (Case 2) と不規則波 (Case 4) の結果について述べる。

3. 圧力勾配の岸沖分布特性

(1) 圧力勾配の算出

圧力勾配は、各測点において岸沖方向に 3 cm 間隔で計測した 4 点の圧力の空間勾配から算出した (例えば、梶島, 1999)。

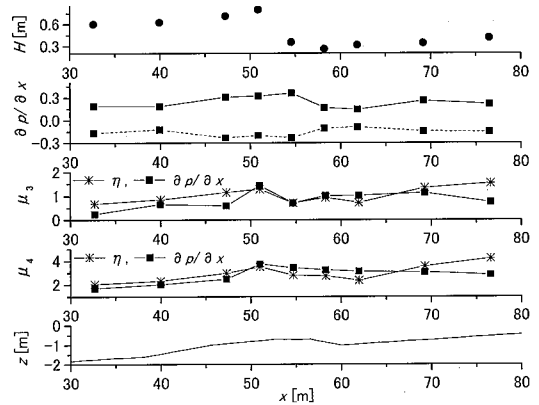
$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{p_1 - 27p_2 + 27p_3 - p_4}{24 \times \Delta x}, \dots (1)$$

ここに、 p は圧力、 Δx は圧力計間隔である。また、 p の下付数字は計測器の岸沖方向位置を示している (図-2 参照)。

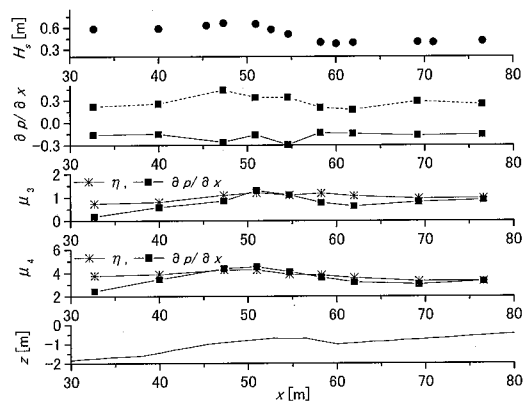
(2) 圧力勾配の岸沖分布

水深が沖波波長の半分よりも浅い領域に波が進入すると底面の影響を受け浅水変形を起こし、さらに浅くなると波は砕ける。その際、波高と共に圧力勾配も変化する。図-3 (a), (b) に規則波 (Case 2), 不規則波 (Case 4) での波高、圧力勾配の最大値 (実線) と最小値 (破線)、水面変動と圧力勾配の skewness (μ_3) および kurtosis (μ_4) の岸沖分布を示す。波高分布は規則波、不規則波共に想定された形状であった。圧力勾配の最大値は 1 次碎波が起こるバー上部と 2 次碎波が起こるバーよりも岸側の 2 箇所にピークを有していた。また、圧力勾配はバー上部において $\pm 0.3 \sim 0.5$ まで変化していた。水面変動、圧力勾配の skewness (μ_3) は共に岸側に進むにつれ増加し、バー上部においてピークを有していた。また、Kurtosis (μ_4) に関しても、水面変動・圧力勾配共にバー上部でピークを持つ変動を示していた。

次に、水面変動、圧力勾配、鉛直流速の関連性を把握



(a) 規則波, Case 2



(b) 不規則波, Case 4

図-3 波高、圧力勾配の最大・最小値、skewness (μ_3) kurtosis (μ_4) の空間分布 (タイムラグ無し、 $\tau=0$ の場合だけ表示)

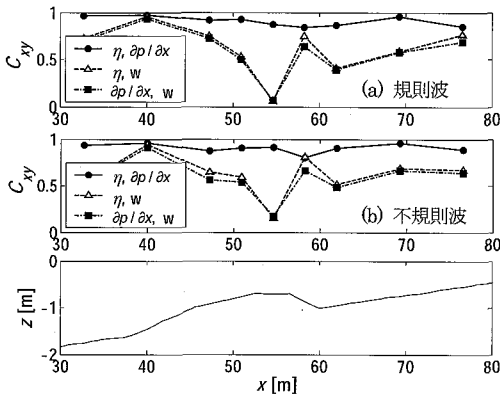


図-4 相互相関関数の最大値の空間分布
(a) 規則波, Case2, (b) 不規則波, Case4

するため、各ケースの水面変動と圧力勾配、水面変動と鉛直流速、圧力勾配と鉛直流速の相互相関関数の空間分布を検討した。それぞれの相互相関関数の最大値の岸沖分布を図-4に示す。図より、規則波、不規則波共にほぼ同一の空間分布であることがわかる。

水面変動と圧力勾配の相関関数は、碎波が発生するバー上部においてやや減少するけれども、規則波、不規則波に係わらず全地点で0.7以上の高い相関が見られた。一方、水面変動と鉛直流速および圧力勾配と鉛直流速の相互相関関数は、バー法先の測点(L2)を除き一様に低く、特に碎波が発生するバー頂部付近においては著しく低下していた。以上より、圧力勾配の変動は鉛直流速の影響をほとんど受けず、碎波帯も含めて水面変動が支配的要因であることがわかった。

4. 圧力勾配の統計的モデル化

(1) 統計モデル

底面上の圧力勾配も底質巻き上げに関わると指摘されており、圧力勾配による底質の巻き上げを考える際には、圧力勾配がある閾値を超えるかどうかが問題となる。前章での解析により、圧力勾配と水面変動の間には高い相関が見られたことから、不規則波のケースについて非線形波高分布の理論を圧力勾配の分布に書き換えて応用し、圧力勾配の出現確率を統計的にモデル化することを試みた。

波の非線形性に関する研究はLonguet-Higgins (1963) や Haung・Long (1980) らにより数多く行われ、いくつかの非線形モデルも提案されている(例えば、Tayfun, 1980; Haung ら, 1983)。また、波の超過確率分布モデルについても Ochi・Ahn (1994) や Al-Humoud ら (2002) などにより提案されている。

本研究の確率分布には Rayleigh 分布、2変数 Weibull

分布、Al-Humoud 分布、Edgeworth-Rayleigh (ER) 分布を用いた。2変数 Weibull 分布に関しては、実験結果より圧力勾配の正負極値についてそれぞれの形状母数を決定した。

圧力勾配の振幅(A)は圧力勾配のRMS値(A_{ms})を用いて無次元化した。圧力勾配の振幅(A)は降順に並べられ、無次元化された圧力勾配($\alpha = A/A_{ms}$)の超過確率は以下のように示される。

$$p_E = \frac{\alpha}{N+1}, \quad (2)$$

ここに、 α は無次元化された圧力勾配の降順データであり、 N は無次元化された圧力勾配のデータ数である。

以下より、それぞれの分布形状について簡易に示す。

a) Rayleigh 分布

$$p_E = \exp(-\alpha^2). \quad (3)$$

b) 2変数 Weibull 分布

$$p_E = \exp(-\alpha^b), \quad (4)$$

ここに、 a, b は形状母数であり、それぞれの値は最小二乗法により決定した。

c) Al-Humoud 分布

Al-Humoud ら (2002) が提案した分布形状であり、変数として skewness を用いている。

$$p_E^{\pm}(\alpha) = B \exp(-\alpha^2), \quad (5)$$

$$B = \frac{1 \pm c_1 \mu_3 \alpha \left(\alpha^2 - \frac{1}{2} \right) \mp c_0 \mu_3 \operatorname{erfc}(\alpha) \exp(\alpha^2)}{1 \mp c_0 \mu_3} \quad (6)$$

$$c_0 = \frac{1}{3\sqrt{2\pi}}, \quad (7)$$

$$c_1 = \frac{2\sqrt{2}}{3\pi}, \quad (8)$$

ここに、 μ_3 は skewness, $\operatorname{erfc}()$ は誤差関数であり、 p_E の上付きの正負は、それぞれ波峰、波谷時の超過確率である。

d) ER 分布

Mori・Yasuda (1996) により提案された、Gram-Charlier 分布を基とする確率分布である。ここでは、変数として kurtosis のみを残して簡略化した。ただし、この分布形状は深海域で得られたデータを基に開発された経験式である。

$$p_E = G(x) [1 + c\alpha^2(\alpha^2 - 4)], \quad (9)$$

$$c = \frac{(\mu_4 - 3)}{32}, \quad (10)$$

ここに、 $G(x)$ は Gaussian 分布であり、 μ_4 は kurtosis

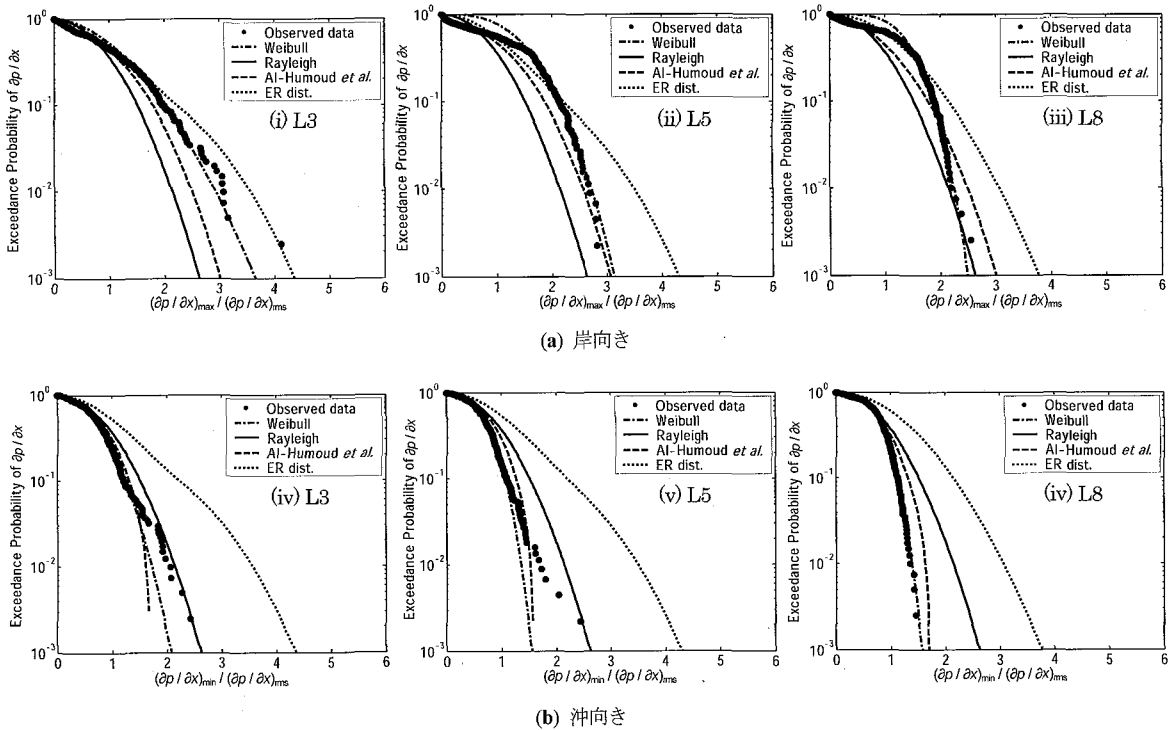


図-5 圧力勾配の超過確率分布

である。

(2) 超過確率分布の岸沖分布

前述した4つの分布形状を用いて圧力勾配の超過確率分布を算出した。図-5にバーの沖側(L3), 頂部(L5)および岸側(L8)における(a)岸向きおよび(b)沖向きの圧力勾配の超過確率分布を示す。全ての地点で圧力勾配のskewnessは正であり, 岸向きの圧力勾配が支配的であった。

2変数 Weibull 分布は2母数により実験値にフィットさせているため, 全計測地点において良く適合している。一方, Rayleigh 分布は体系的に岸向きでは過小評価, 沖向きでは過大評価をしている。Al-Humoud 分布は比較的良く適合しているけれども, 圧力勾配が大きくなるにつれ精度が低下する傾向にある。最も過大評価しているのはER分布であるけれども, これはこの分布が深海域でのデータを基に作成されているためであると考えられる。

Madsen (1974) は圧力勾配が0.5以上になると底質の安定性が失われることを示している。本実験での圧力勾配の値はすべて0.5以下であったことから, ここでは圧力勾配が0.25となる実験結果と理論値の超過確率を用いて推定誤差を算出した(式(11))。

$$p_{E_error} = |p_{E_theory} - p_{E_measured}|, \dots \dots \dots (11)$$

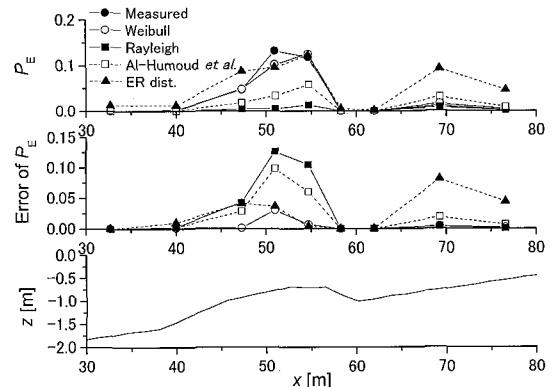


図-6 各統計モデルによる超過確率の空間分布および実験値からの誤差

ここで, p_{E_error} は推定誤差, p_{E_theory} と $p_{E_measured}$ はそれぞれ超過確率の理論値と実験値である。

図-6に圧力勾配の超過確率の実験値と理論値, および各分布形状の推定誤差の岸沖分布を示す。圧力勾配の超過確率は, バー上部で発生する1次碎波およびバーよりも岸側での2次碎波の地点で高くなっていることがわかる。各統計モデルによる推定誤差の空間分布をみると, 定量的に2変数でフィッティングさせる2変数 Weibull 分布が最もよく適合することがわかった。

(3) 超過確率分布の推定

前項より、2変数 Weibull 分布が最も良く圧力勾配の超過確率を示すことが分かった。しかし、2変数 Weibull 分布は2つの形状母数を必要とすることから、この2母数と波の統計値との関係を調べることで分布の一般化を試みた。

図-7に2変数 Weibull 分布の2母数と換算沖波で無次元化した各計測地点での有義波高との関係を示す。変数 b は無次元化有義波高の増加と共に減少する高い相関関係にあった ($R=-0.85$)。一方、変数 a は無次元化有義波高の増加と共に増加する関係にあった ($R=0.69$)。これより、圧力勾配の超過確率分布は有義波高の関数として推定できることがわかった。

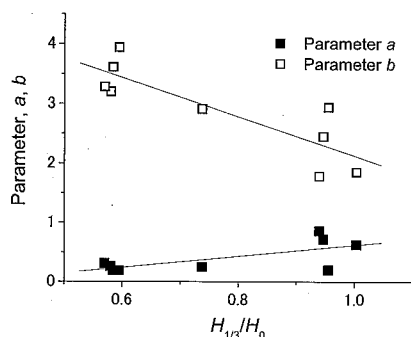


図-7 2変数 Weibull 分布の形状母数 a , b と有義波高との関係

5. ま と め

バー地形における波浪変形の実験により、砕波帯内外における波高、底面近傍の圧力勾配および鉛直流速の計測結果から、その岸沖分布および変動特性について検討を行った。さらに、得られた圧力勾配の超過確率分布から、底質移動に関わる極大値の推定を行い、その統計的モデル化を試みた。以下に主要な結論を示す。

- (1) 圧力勾配は水面変動と高い相関を持ち、両者の相関関数は砕波帯においてもあまり減少しない。
- (2) 砕波帯内の圧力勾配と鉛直流速および水面変動と鉛直流速にはほとんど相関が見られない。
- (3) 圧力勾配の超過確率は2変数 Weibull 分布を用いて推定でき、その母数は波高の関数として表される。

この結果を踏まえた具体的な底質巻き上げとの関係については、移動床実験および現地観測を行って関係を明らかにしていく予定である。

Foundation の援助の下でオレゴン州立大学 REU project (EEC-024405, 代表: Cox) に参加した William Boylston 君に協力頂いた。また、この研究の一部は National Science Foundation NEES program (CMS-0086571), 科学研究費補助金 (代表: 森) の援助を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 梶島岳夫(1999): 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂, p. 30.
- Al-Humond, J., M.A. Tayfun and H. Askar (2002): Distribution of nonlinear wave crests. *Ocean Engineering*, 29, pp. 1929-1943.
- Baldock, T.E. and M.G. Hughes (2006): Field observations of instantaneous water slopes and horizontal pressure gradient in the swash-zone, *Continental Shelf Res.*, Vol. 26, 5, pp. 574-588.
- Garcez Faria, A.F.G., E.B. Thornton, T.P. Stanton, C.V. Soares and T.C. Lippmann (1998): Vertical profiles of longshore currents and related bed shear stress and bottom roughness. *J. Geophys. Res.*, 103, C2, pp. 3217-3232.
- Hsu, J. R.-C. and J. Ariyaratnam (2000): Pressure fluctuation and a mechanism of sediment suspension in swash zone. *Proc. 27th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE*, pp. 610-623.
- Huang, N.E. and S. Long (1980): An experimental study of the surface elevation probability distribution and statistics of wind-generated waves. *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, 1, pp. 179-200.
- Huang, N.E., S.R. Long, C.C. Tung, Y. Yuen and L.F. Bliven (1983): A Non-Gaussian statistical model for surface elevation of nonlinear waves. *J. Geographical Res.*, Vol. 88, pp. 7597-7606.
- Longuet-Higgins, M.S. (1963): The effect of non-linearities on statistical distributions in the theory of sea waves. *J. Fluid Mech.*, 17, 3, pp. 459-480.
- Madsen, O.S. (1974): Stability of a sand bed under breaking waves. *Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE*, pp. 776-794.
- Mori, N. and T. Yasuda (1996): Weakly non-gaussian model of wave height distribution for random waves. *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE*, Vol. 1, pp. 850-863.
- Ochi, M.K. and K. Ahn (1994): Probability distribution applicable to non-Gaussian random processes. *Probabilistic engineering mechanics*, 9, pp. 255-264.
- Shibayama T. and K. Horikawa (1982): Sediment transport and beach transformation. *Proc. 18th Coastal Eng. Conf., ASCE*, pp. 1439-1458.
- Stive, M. J. F. (1980): Velocity and pressure field of spilling breakers. *Proc. 17th Coastal Eng. Conf., ASCE*, pp. 547-566.
- Tayfun, M.A. (1980): Narrow-band nonlinear sea waves. *J. Geographical Res.*, Vol. 85, 3, pp. 1548-1952.

謝辞: 本実験を遂行するにあたり、National Science