

Surface Roller の変動挙動

蛭田 啓久*・服部 昌太郎**

表-1 実験条件

実験	T(s)	H _i (cm)	h ₀ (cm)	H _i /L	ξ*	碎波形式
1	1.23	5.5	27	0.023	0.33	Spil-Plung.
2	1.23	3.0	29	0.013	0.44	Plunging
3	0.80	5.5	27	0.055	0.21	Plunging
4	1.00	5.5	31	0.035	0.27	Spilling
5	0.90	5.5	31	0.044	0.24	Spilling

*surf similarity parameter $\xi = \tan a / (H_i/L)^{1/2}$

1. はじめに

碎波波面の崩壊により形成される Surface Roller (以下, roller と略記)は, 波高減衰, 底質移動など碎波帯内での諸現象に強い影響を及ぼす。これらの現象を定量評価するため, roller による質量・運動量・エネルギーの輸送に関して, これまで多くの研究がなされている (Svendesen, 1984a, b; Basco and Yamashita, 1986; 岡安ら, 1987)。しかし, 空気連行を伴う複雑な碎波帯波動場の計測, 特に roller と波動部 (organized wave motion) との判定が難しいため, roller の変動挙動に対する基礎的な情報は非常に少ない。本研究では, 高速シャッター速度のビデオ画像より roller の変動過程を解明し, undertow 流速と平均水位上昇の算定結果との比較により, 計測結果の妥当性を検証する。

2. 実験装置と測定方法

両面ガラス張り二次元波動水槽 (20m×0.3m×0.5m) 内に設置した 1/20 勾配平滑斜面に, 規則波を入射させて実験を行った (図-1)。

roller 特性変化は, roller の発生・発達, 減衰・消滅過程を水槽側面から撮影したデジタルビデオ (シャッター速度 1/6000 s, 30 コマ/s) の静止画像から, 時空間格子間隔 $\Delta t = 1/30$ s と $\Delta x = 1.0$ cm で測定した。碎波帯波動場の水面変動と内部流速の計測は, 分圧式波高計と電磁流速計により行った。実験条件 (表-1) は, 碎波形

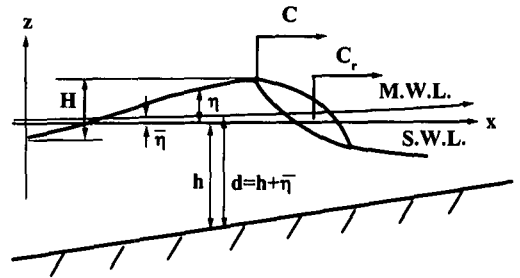


図-2 座標系と記号

式が崩れ・巻き・両者の中間の三形式となるように設定した。波高計データから波高最大となる地点を碎波点と判定し, 突っ込み点 (巻き碎波の場合) は, 波峰前面に飛び出した水塊が水面に突入する位置とし, ビデオ画像から判定した。また, 碎波帯を, transition zone と inner zone (以下, T-zone と I-zone と略記) とに分割し, これらの領域は波高変化から判定区分した。入射波特性は, 一様水深部 h₀ に設置した分圧式波高計アレーで水面変動を検出し, 入射波を分離して算出した。図-2 に, 本研究で用いる座標系と記号を示す。

3. Surface Roller の定義

本研究では, ビデオ画像より roller の特性諸量を測読することから, roller 領域を予め定義する必要がある。

写真-1 は, 波面崩壊により巻き碎波波峯から前方に飛び出した水塊が波面に突入して空気連行を伴う roller (水平渦) を形成し, これが波面を滑り降りながら発達する状況を, また写真-2 は, この roller の巻き込みにより

造波装置

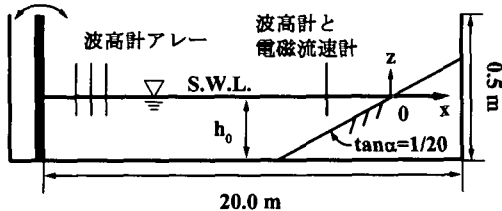


図-1 実験装置の配置概略図

* 正会員 工務 新技術計画(株)
** 正会員 工務 中央大学教授 理工学部土木工学科

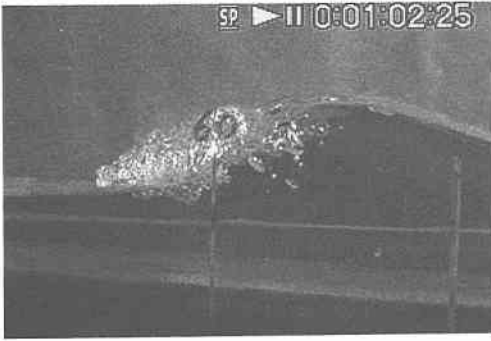


写真-1 rollerの発生と発達

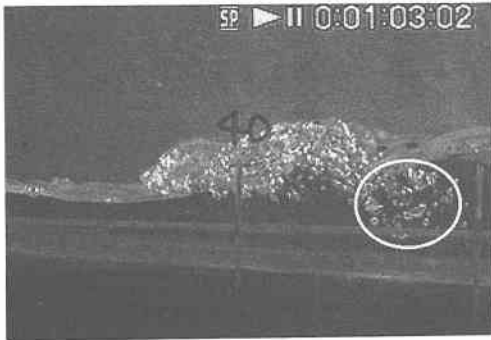


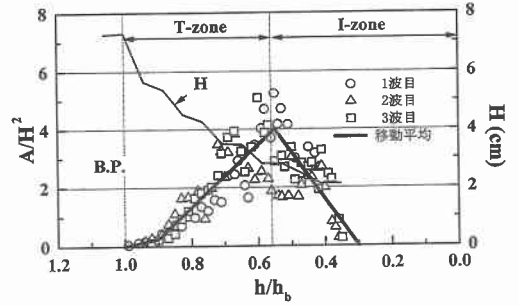
写真-2 roller下部波動性波面の崩壊と斜降渦

roller 下方の波動性波面が崩壊して roller の発達が促進される、T-zone で認められる状況を示したものである。この過程で、写真-2 中の実線で囲む斜降渦により、roller の一部が波動部に取り込まれ、波峰背後に移流する。したがって、roller を入射波と共に前方に移動する水平渦と定義し (Svendsen, 1984 a), ビデオ画像から移流部を除外した部分の roller 断面積とその図心位置を計測した。

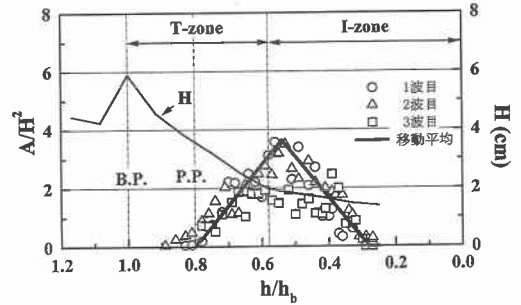
4. Surface Roller の断面積変化

図-3 に、三形式の碎波に対する波高 H (波高計測) と A/H^2 (A : roller 断面積) の変化を、静水汀線を基準とした碎波帯内位置 h/h_0 (h : 静水深, h_0 : 碎波水深) との関係で示す。図中の三種類の白抜き記号で示す測定値は、三波の個々の波に対するもので、実線はこの測定データの移動平均を基にしたモデル曲線である。

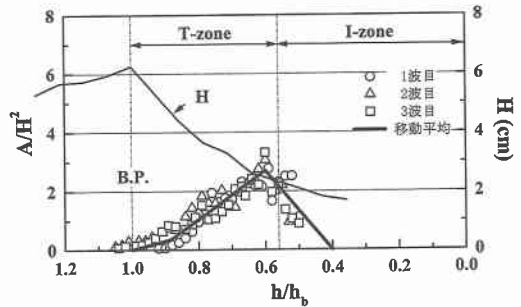
巻き碎波では、碎波の突っ込み点 (P.P.) で発生した roller は急速に発達し、崩れ碎波では、波峰前面に生じた微小な擾乱が波の進行に伴い roller へと発達するため、 A/H^2 の増大は巻き碎波の場合に較べて緩やかである。また S-P 中間形式での roller の発達過程は両者の中間である。 A/H^2 の最大値は碎波形式に関係するものの、碎波帯全域での A/H^2 の変化挙動は、碎波形式に関係なく



(a) 中間性碎波 (実験-1)



(b) 巻き碎波 (実験-2)



(c) 崩れ碎波 (実験-4)

図-3 H と A/H^2 の変化

ほぼ類似したものとなっている。碎波直後の T-zone では、 A/H^2 はほぼ直線的に増大し、I-zone との境界付近 ($h/h_0 \approx 0.6$) で最大となる。両者の境界位置は、岡安ら (1988) の実験式による算定位置とほぼ一致した。I-zone では A/H^2 は減少し、その消滅地点で再生波の形成が撮影画像から確認できた ($h/h_0 \approx 0.3$, $H/h \approx 0.5$)。

従来の研究では、roller 断面積を $A = aH^2$ の関係で与え、Svendsen (1984 b) は $a = 0.9$ 、佐藤ら (1987) は $a = 5.6$ 、また、岡安ら (1987) は $a = 2.0$ を提案している。これらは、I-zone で適用できる定常碎波 (Duncan, 1981) の測定結果や undertow 流速のモデル式 (1) (後出) から決定した値であり、碎波帯全域で進行碎波の roller 断面積を測定した結果から決定したものでない。エネルギー

ギー式から導いた Dally & Brown モデル (1995) 以外は、T-zone で A/H^2 が增大する本実験結果を記述できない。しかし、このモデルでも roller のエネルギー逸散係数などの決定に問題が残されている。

5. Surface Roller の進行速度と波速の変化

図-4 は、roller の進行速度 C_r (断面図心の移動速度：図中白抜き記号、図-3 と同一) と波速 C (●印) [0.10 m 間隔で配置した波高計からの 5~10 波の出力データからの波頂の移動速度、図中に変動幅がパー間隔で示される.] の変化を示す。多くの研究では、roller は長波の波速 $[gd]^{1/2}$ ($d=h+\bar{\eta}$, $\bar{\eta}$: 静水面を基準とした平均水面高さ) で移動すると仮定しているが、Okayasu ら (1988) は、 C_r を孤立波波速に相当する $[g(d+H)]^{1/2}$ を仮定している。しかし、実験結果は roller の進行速度が平均的に

太実線で示す非線型長波波速に相当する $[g(h+\eta_{crest})]^{1/2}$ (η_{crest} : 静水面からの波峰高さ) であることを示している。roller は T-zone で波速より早い速度で進行し、I-zone に達すると C_r と C はほぼ同程度となること、いずれの碎波形式の場合にも認められる。 $C_r > C$ であることは、roller 断面積 A が增大する要因となる。

A/H^2 (図-3) と C_r の測定結果に認められる変動は、碎波波面崩壊に加えて roller 下部の波動性波面の間欠的な崩壊により誘発されることが、撮影画面 (写真-2) から確認できた。この測定結果の変動は、roller の発達時に顕著に見られ、減衰時には変動規模も低減することから、碎波によるエネルギー逸散に roller 下面での水面崩壊が大きく関わっていることは明らかである。

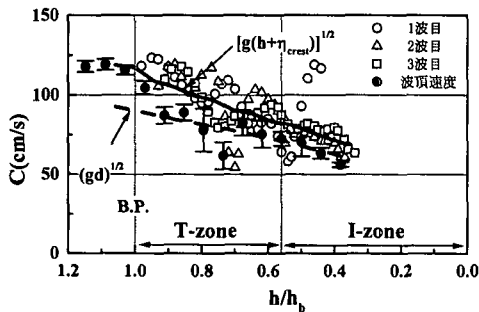
6. undertow 流速と平均水位上昇の算定

undertow の断面平均流速は、式 (1) の波動と roller とによる質量流束成分の和 ($U=U_s+U_r$) として与えられる (Svendsen, 1984 b)。

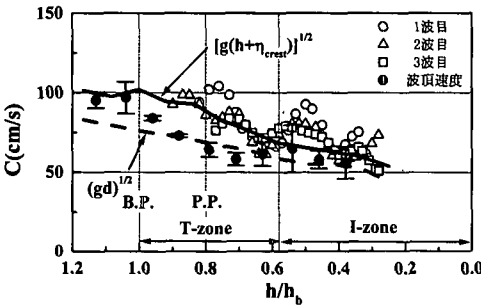
$$U=C_r\left(\frac{H}{d}\right)^2\left[B_0+\frac{A}{H^2}\frac{d}{L}\right]=U_s+U_r \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $L=C_rT$, $B_0=(\bar{\eta}-\bar{\eta}/H)^2$ は波形の尖り度を示す wave shape factor である。roller の碎波波形への効果を確認するため、図-5 に B_0 の変化を示す。巻き碎波の波形は、碎波後突っ込み点まで尖り度を増大する。一方、崩れ碎波は碎波点で尖り度が最大となり、碎波後は波形の扁平化が進むことが認められる。この様な碎波後の波形変化は、roller の発生と発達によるエネルギー逸散効果が関係している。図-5 の実験結果は、Svendsen (1984a) が示した B_0 の変化と類似の傾向を示している。しかし、Basco・Yamashita (1986) が示した碎波形式による違いは認められない。いずれの碎波形式でも、roller が成長しエネルギー逸散が活発となる、T-zone から I-zone にかけて波形の扁平化が進む結果をえた。

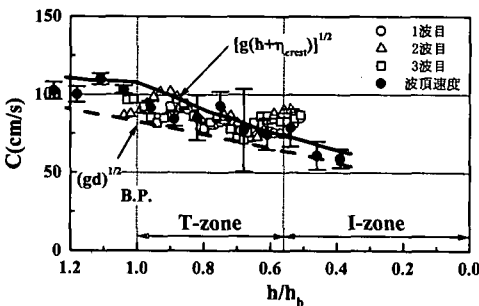
図-6 に、実験結果から $C_r=[g(h+\eta_{crest})]^{1/2}$ (図-4) とし、また A/H^2 に図-3 のモデル曲線を用いて、式 (1) で算定した undertow の断面平均流速の波動成分 U_s (点



(a) 中間性碎波 (実験-1)



(b) 巻き碎波 (実験-2)



(c) 崩れ碎波 (実験-4)

図-4 roller の進行速度 C_r と波速 C の変化

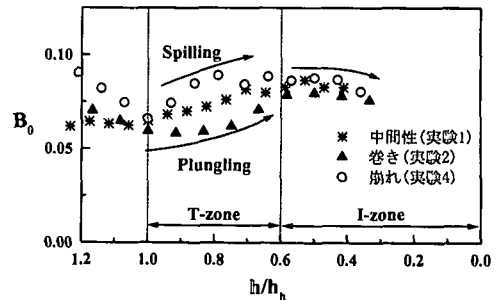
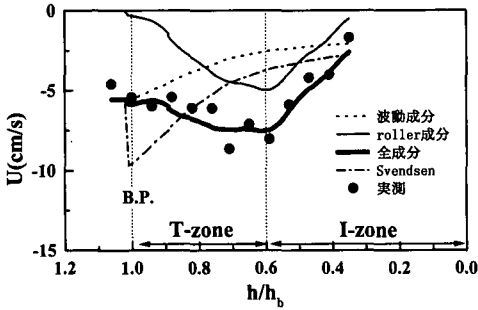
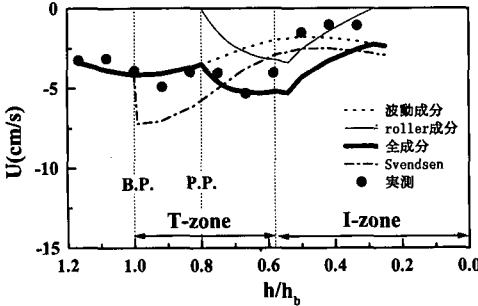


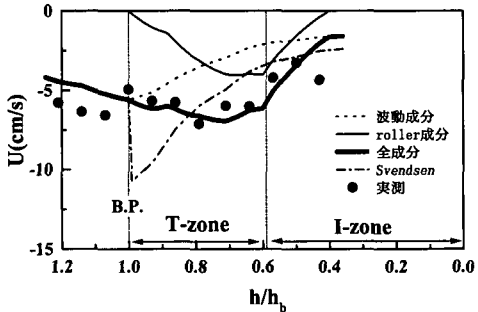
図-5 B_0 の碎波帯内での変化



(a) 中間性砕波 (実験-1)



(b) 巻き砕波 (実験-2)



(c) 崩れ砕波 (実験-4)

図-6 undertow 流速 U の変化

線), roller 成分 U_r (細実線), 全成分 U (太実線) と測定流速 U_m (●印) の変化を示す。なお、一点鎖線は Svendsen モデル (1984b) [$A/H^2=0.9$, $C_r=C$ (線形長波波速)] による算定流速を示す。図-6に見られる様に、砕波帯全域での roller の断面積変化 A/H^2 と進行速度の測定結果に基づく算定流速 U と測定流速 U_m との一致度は砕波帯全域にわたり非常に良好で、T-zone と I-zone の境界付近で undertow 流速が最大となる、本実験結果やこれまでの流速測定の傾向 (例えば岡安ら, 1986) を捉えることができた。一方、定常砕波の段波モードを仮定した Svendsen モデルは、undertow 流速を過小に評価している。しかし、本実験結果でえられた、砕波帯内での roller の変動挙動特性を式 (1) に取り込むことにより、砕波帯全域での undertow 流速を適切に算定できることが明

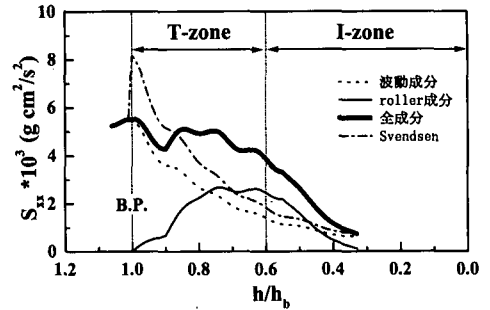


図-7 Radiation Stress の変化 (中間性砕波: 実験-1)

らかとなった。

平均水位の変化 $\bar{\eta}$ は、式 (2) の運動量輸送方程式と roller の効果を考慮した式 (3) の Radiation Stress S_{xx} により算定される。

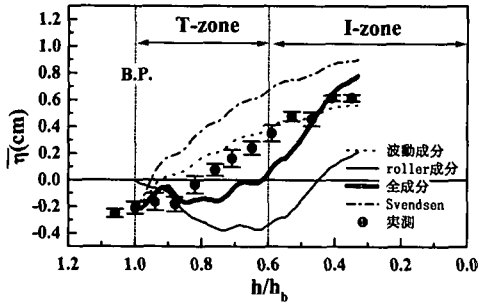
$$\frac{dS_{xx}}{dx} = -\rho g a \frac{d\bar{\eta}}{dx} \dots\dots\dots (2)$$

$$S_{xx} = \rho g H^2 \left(\frac{3}{2} B_0 + \frac{A}{H^2} \frac{d}{L} \right) \dots\dots\dots (3)$$

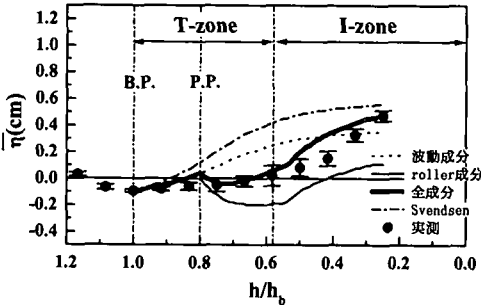
図-7に、roller の空気連行率は小さいと仮定し、実験結果を用いて式 (3) より算定した Radiation Stress の空間変化の一例 (中間性砕波) を示す。一点鎖線は Svendsen モデルである。波動成分 (点線) は、砕波位置から岸方向に単調に減少するが、roller 成分 (細実線) は A/H^2 と C_r の効果により T-zone ~ I-zone 区間で増大した後、減少に転ずる。したがって、式 (3) よりされる平均水位の変化は、砕波帯内で波動成分は常に平均水位上昇もたらし、roller 成分は T-zone で水位を低下、また I-zone で水位を上昇する効果をもたらすことが分かる。

図-8は、本実験結果から式 (2) により算定した平均水位変化と波高計による計測結果との比較を示す。平均水位変化に寄与する波動成分を点線で、roller 成分を細実線、また両成分の和を太実線で示す。一点鎖線は Svendsen モデルによる算定結果である。●印は、波高計出力から算出した平均水位で、その変動幅が2本のバー間隔で示される。

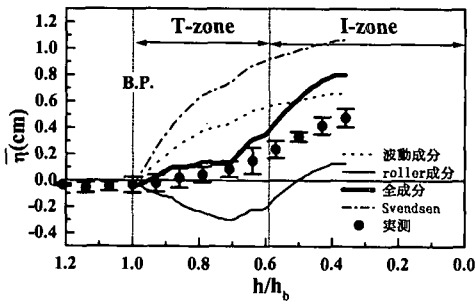
巻き砕波下では、平均水位上昇が突っ込み点付近から発生することを、これまで多くの研究者が指摘していた。図-5の巻き砕波と7の実験結果に見られる様に、砕波後の急速な波高低下は、エネルギー減衰によるものでなく、波形変形が主要因であることによって、上記のことが説明付けられる。これまで、急激な波高減衰が起こる T-zone で平均水位上昇が小さいことの説明が出来なかったが、roller の発達・減衰過程を考慮することによって、この現象についても説明できる事が分かった。測定結果精度に若干の問題があるが、roller の効果を考慮した算定結果との一致度は比較的良好であると言える。



(a) 中間性砕波 (実験-1)



(b) 巻き砕波 (実験-2)



(c) 崩れ砕波 (実験-4)

図-8 平均水位 $\bar{\eta}$ の変化

7. 結 論

砕波帯内波動場の解明に、砕波 roller の効果を考慮する必要があることが指摘され、これまで数多くの研究がなされているが、roller 自体の変動特性に関する知見を提供した研究は極めて少ない。本研究は、砕波帯内での roller 特性変化をビデオ画像解析により解明することを目的に行い、以下に示す roller の変動挙動特性に関する新たな知見をうることができた。

(1) roller の形成は、巻き砕波では波頂からの飛び出す水塊の突入、崩れ砕波では砕波波頂部に発生する水面擾乱の発達によることから、roller 形成の規模

と発達は、砕波形式に依存する。

(2) 形成後の roller は、非線型長波波速に相当する速度で波頂より早く進行し、T-zone と I-zone との境界付近で、両者の進行速度はほぼ同じとなる。

(3) roller の発達と減衰過程は波頂崩壊だけでなく、roller 下部の波面崩壊にも強く影響される。砕波後のエネルギー減衰、すなわち波高低下の評価に、この効果を考慮する必要がある。

(4) roller 断面積 A/H^2 は、T-zone でほぼ直線的に増大し、I-zone との境界付近で最大となった後減衰する。roller の消滅地点から砕波後の波の再生条件 ($H/h_0 \approx 0.5$, $h/h_0 \approx 0.3$) が確認できた。

(5) roller の変動挙動を考慮することにより、断面平均としての undertow 流速が T-zone と I-zone の境界で最大となること、また、T-zone での平均水位変動に対して roller は水位低下をもたらす、巻き砕波では平均水位上昇が砕波の突っ込み点近傍から発生する原因が説明付けられた。

本研究結果 (2) と (3) とから、T-zone と I-zone との境界が、砕波帯内波動場特性の重要な変化点であることが明らかにされた。今後の研究課題として、急勾配斜面と複合斜面上での砕波の surface roller に対する検討が必要である。

謝辞：本研究を行うにあたり、当時理工学部学生の崎田貴徳(三井不動産建設)、大学院生の倉田隆文、伊藤啓勝の三君の協力を得た。ここに記して謝意とする。

参 考 文 献

- 岡安章夫・柴山知也・堀川清司 (1986): 砕波帯内二次元定常流場の推算に関する考察, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 1-5.
- 岡安章夫・柴山知也・堀川清司 (1987): 砕波帯内定常流場場の鉛直分布に関する研究, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 31-35.
- 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺晃 (1988): ポア状砕波の形成点に関する実験的研究, 第 44 回年次論文集, pp. 614-615.
- Basco, D. R. and T. Yamashita (1986): Toward a simple model of the wave breaking transition region in surf zone, Proc. 12 th ICCE, pp. 955-970.
- Dally, W. R. and C. A. Brown (1995): A modeling investigation of the breaking wave roller with application to cross-shore current, JGR, Vol. 100, No. C12, pp. 24, 873-24,883.
- Duncan, J. H. (1981): An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, 377, pp. 331-348.
- Svendsen, I. A. (1984a): Wave heights and set-up in a surf zone, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 303-329.
- Svendsen, I. A. (1984b): Mass flux and undertow in a surf zone, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 347-365.