

Surface Roller の変動特性を考慮した砕波モデルに関する研究

倉 田 貴 文*・服 部 昌 太 郎**

1. は じ め に

砕波波面崩壊により形成される surface roller (以下 roller と略記) は, 砕波帯の諸現象に強い影響をもたらす, その質量, 運動量およびエネルギーの輸送に関して多くの研究 (Svendsen, 1984 a, b; Basco・Yamashita, 1986; 岡安ら, 1986 など) がなされている。しかし, 砕波の波動部 (organized wave motion) と空気連行を伴う roller 部との区分が困難であるため, roller の挙動特性に対する基礎的知見は非常に少ない (蛭田・服部, 1999)。そこで本研究は, 空間相関法 (PIV) で処理した高速ビデオ画像から定量的に roller 領域を判定し, その特性を評価して入射波緒量を入力条件とする砕波モデルを構築・提案することを目的として行ったものである。

砕波帯は波動場特性により, transition または outer zone (T-zone), inner zone (I-zone) および runup zone に区分され, これら領域内では, エネルギー逸散過程が異なる。

2. 実験装置と測定方法

実験は, 両面ガラス張り二次元波動水槽 (20 m×0.3 m×0.5 m) 内に設置した 1/20 勾配の平滑斜面に, 規則波を入射させて行った (図-1)。座標原点は静水汀線位置とし, 水平軸 (x) と鉛直軸 (z) は岸向きと鉛直上向きを正とする。

砕波帯内の水面変動は分圧式波高計, 流速測定は小型

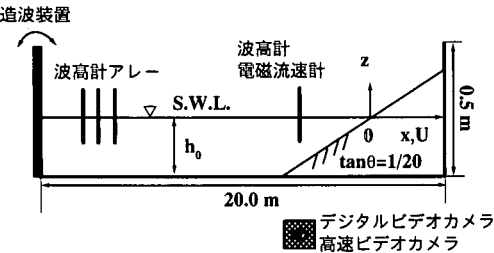


図-1 実験装置の配置概略

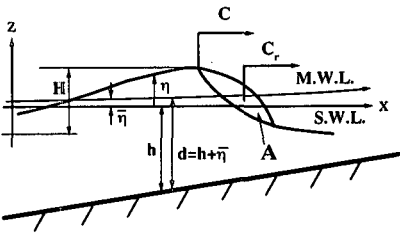


図-2 座標系と記号

表-1 実験条件

実験	T (s)	H _r (cm)	H _b /L ₀	ξ _s [*]	砕波形式
1	1.23	5.5	0.023	0.33	中間性
2	1.23	3.0	0.013	0.44	巻き
3	0.80	5.5	0.055	0.21	崩れ
4	1.00	5.5	0.035	0.27	崩れ
5	0.90	5.5	0.044	0.24	崩れ

^{*} surf similarity parameter $\xi_s = \tan \theta / (H_b/L_0)^{1/2}$

電磁流速計と PIV 法によるビデオ画像計測によって行った。入射波諸量は, 一様水深部 ($h_0=27\text{ cm}\sim31\text{ cm}$) に設置した波高計アレーの水面変動を入射波分離して算出した。

roller の水面形状と内部流速の測定には, 高速ビデオカメラ (HSC, 400 コマ/s) とデジタルビデオカメラ (DVC, シャッター速度 1/6000 s, 30 コマ/s) の撮影画像を使用した。PIV 用トレーサーには, 比重調整した粒径 0.3 mm のポリスチレン粒を使用した。ビデオ画像の測読時空間格子間隔は, HSC は $\Delta t=1/200\text{ s}$ と $\Delta x=0.5\text{ cm}$, DVC は $\Delta t=1/30\text{ s}$ と $\Delta x=0.5\text{ cm}$ である。

砕波点 (位置) に関して種々の定義が提案されているが, 本研究では波高最大地点を砕波点とした。図-2 に本研究で使用する座標系と主要な記号を, また表-1 に実験条件を示す。

3. Surface roller の変動挙動

3.1 roller 領域の決定

砕波波頂から飛出す水塊により形成される roller は, 波頂部の継続的な崩壊により空気泡を連行して波面を滑り落ちるように, 砕波後の波と共に T-zone を進行する。

* 正会員 工修 日本工営(株) 河川工部局
 ** 正会員 工博 (株)エコー 顧問 中央大学名誉教授

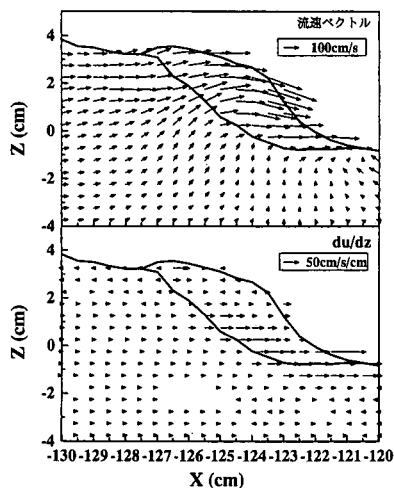


図-3 roller 周辺部の内部流速と du/dz (実験 3)
 $h/h_b = 0.83$, $H = 4.5$ cm, $C = 78.3$ cm/s

この過程で間欠的に誘起される roller 下面の波面崩壊により roller の成長が促進され、T-zone と I-zone の境界の transition point (T.P., 岡安ら, 1988) 付近まで発達する。その後、エネルギー逸散により roller の規模は波の再生点に向けて減少する (蛭田・服部, 1999)。

図-3 に、PIV によりえられた、T-zone を進行する roller 周辺部の流速ベクトルと水平流速の鉛直方向変化率 du/dz の空間分布を示す。砕波前面に波速以上の速度をもつ波動部と明らかに異なる速度場の、roller と想定される水塊が存在する。またこの水塊下部に、 du/dz が急激に変化する境界が認められる。この境界を roller と波動部との境界とし、roller 領域を決定した。

3.2 roller 断面積 A の変化特性

roller が輸送する物理諸量の算定に不可欠な roller 領域断面積 A は、roller の発生・発達過程と密接に関係していることから、砕波帯内の波高と関係付けた断面積係数 $\alpha (=A/H^2)$ によって検討されている (Svendsen, 1984)。これまで多くの研究では α を一定としているが、3.1 で示したように砕波によって波エネルギーの一部が roller に移行し、波高が低減し roller が発達する過程を考慮すると、 α は roller の進行と共に増加する (蛭田・服部, 1999)。また、Dally・Brown (1995) は、 α を一定にすると砕波点で A が最大となる不合理を指摘している。

図-4 は、上記の事柄を確かめる実験結果の一例で、白抜き記号が α の実験値、また図中には波高 (●印) と wave shape factor B_0 (■印, 3.4 参照) の変化も示されている。砕波直後に発生した roller の α 値は、T-zone ではほぼ直線的に増大し、T.P. で最大となり、I-zone では波の再生地点に向けて減少する。この α 値の変動特性はいずれの実験条件でも認められた。また、T.P. 地点での α 値

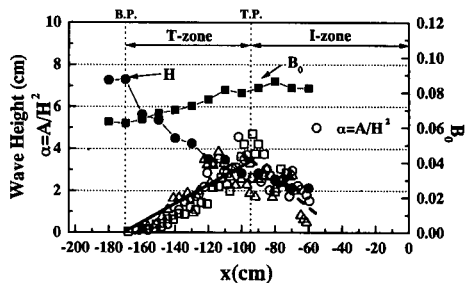


図-4 α , H , B_0 の変化 (実験 1 : 中間性砕波)

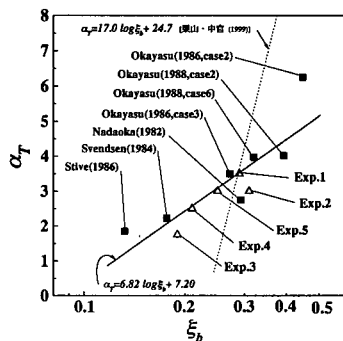


図-5 α_r と ξ_b との関係

α_r は、砕波条件に関係する。

図-5 は、 α_r と surf similarity パラメータ ξ_b ($=\tan \theta / (H_b/L_0)^{1/2}$) との関係を、本実験結果と他実験からの算定値 (後出 4. 参照) により示したものである。図中の点線は、現地データからの算定結果 (栗山・中官, 1999) で、室内実験と比較して α_r の ξ_b への依存度が非常に強いことが認められる。この事実は、roller の形成・発達過程に縮尺効果が存在することを意味している。

3.3 roller の進行速度 C_r

図-3 に見られるように、roller 内の水粒子速度は砕波波頂部付近の速度より大きく、roller の進行速度 C_r が波速 C より大きいことが分かる。roller 断面図心の移動速度を C_r (白抜き印)、また roller 背後の波頂速度 (●印)

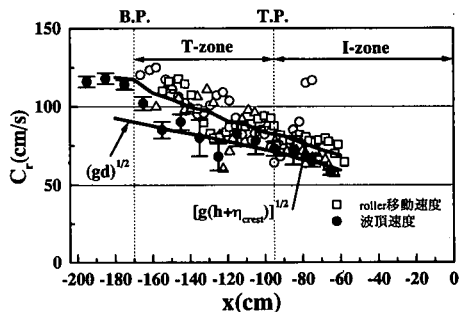
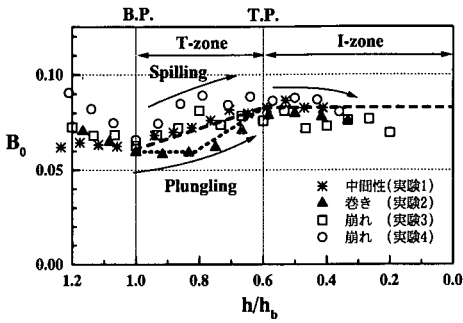


図-6 C_r と C の変化 (実験 1)

図-7 B_0 の変化と砕波形式

を波速 C として、これら速度の空間変化の一例を図-6に示す。

多くの研究では、roller の進行速度を線形長波波速 $(gd)^{1/2}$ (d : 平均水深), あるいは孤立波波速 $[g(d+H)]^{1/2}$ としているが, 図-6 より C_r は平均的に非線形長波波速 $[g+\eta_{crest}]^{1/2}$ であることが認められる。なお C_r の実験結果に見られる変動は, 3.1 で指摘した roller 下部の波面崩壊により誘起されたものである。I-zone では C_r が減少し, C とほぼ同程度となる。

3.4 wave shape factor B_0 の変化

roller を伴う砕波波動部の質量, 運動量などの輸送に関係する, wave shape factor B_0 [式 (1); Svendsen, 1984] の変化を検討する。

$$B_0 = 1/T \int_0^T [(\eta - \bar{\eta})/H]^2 dt \quad (1)$$

ここで, η は静水面からの水面高さで, $\bar{\eta}$ は一周期平均。図-7 は砕波形式と B_0 の変化を示したもので, Svendsen (1984) の結果と同様の傾向が認められるが, Basco・Yamasita (1986) が指摘しているほど明確な差はない。いずれの砕波形式でも, B_0 は砕波点で最低値 0.06 をとる。崩れと中間性砕波では, B_0 は T-zone 内を T.P. に向けて直線的に増加し, I-zone に入ると 0.08 程度の一定値となる。巻き砕波では砕波点から突っ込み点 (P.P.) まで B_0 は変化せず, その後 T.P. まで急増し I-zone では 0.08 となる。本実験結果と同様な B_0 の変化は, Hansen (1990) の実験結果にも認められる。砕波モデル計算に, 図中の破線と点線で示す関係を採用した。

3.5 Transition point (T.P.) の決定

これまで roller 特性量に関して検討を行ってきたが, T-zone と I-zone とで roller の変動特性が変化することが明らかにされ, 砕波領域の区分, すなわち T.P. 地点の決定が砕波モデルにとって重要となった。岡安ら (1988) は実験結果に基づいて, B.P.~T.P. 間距離 l_r の算定式 (2) を提案している。

$$l_r = \left(\frac{1}{\tan \theta} + 4 \right) h_b \quad (2)$$

式 (2) を T.P. の水深 h_T に書き直すと式 (3) をうる。

$$h_T/h_b = 4(1/5 - \tan \theta) \quad (3)$$

本実験条件での T.P. は $h_T/h_b = 0.6$ となり, 図-7 と蛭田・服部の実験結果 (1999) とより, T.P. の位置を式 (2) により算定できることが確認された。

4. 砕波帯内の波高減衰

前節までの検討により, roller と波動部の諸特性量を砕波帯内の波高により評価することを行った。Dally・Brown (1995) は, 砕波により波エネルギーの一部が継続して roller に移行し, このエネルギーが roller 内で消費・逸散する過程をモデル化している。

巻き砕波下では, 砕波点 (B.P.) から突っ込み点 (P.P.) までの区間で, エネルギー損失をほとんど伴わない波高低下が生ずるが, この区間を考慮したモデルは提案されていない。

4.1 巻き砕波による波高低下のモデル

水谷・安田 (1999) は, 砕波ジェットの飛出し速度は砕波点での波速 $C_b = (gd_b)^{1/2}$ の 1.5 倍, ジェット先端の落下加速度は 0.7 g 程度となることを報告している。ジェットの落下距離を砕波波高 H_b とすると, B.P.~P.P. 間距離 l_p は

$$l_p = 2.54(H_b d_b)^{1/2} \quad (5)$$

$H_b = d_b$ とすると式 (5) は $l_p = 2.54 d_b$ となり, 岡安ら (1988) の実験式 $l_p = 2.50 d_b$ と殆ど一致する。

砕波波動部とジェット部のエネルギー流束を F_w と F_{jet} とすると, エネルギー損失が無いことからエネルギー方程式は,

$$\frac{d\overline{F_w}}{dx} + \frac{d\overline{F_{jet}}}{dx} = 0 \quad (6)$$

— は一周期間の平均を表す。飛出しジェット形状を図-8 に示す三角形に単純化し, ジェット面積を $A_{jet} = l_{jet} \times d_{jet}/2$ と

し, $l_{jet} = 1.5 C_b \cdot \Delta t$ (Δt : 経過時間), d_{jet} は P.P. で $H_b/3$ となるよう B.P. から線形変化するとした。エネルギー流束の波動とジェット成分は, それぞれ式 (7) と (8) で与えられる。

$$\overline{F_w} = \rho g C H^2 B_0 \quad (7)$$

$$\overline{F_{jet}} = \frac{1}{2} \rho C_{jet} \frac{3 A_{jet}}{C T} \quad (8)$$

なお, 図-7 より式 (7) 中の B_0 は 0.06 とする。以上の検討結果から, 飛出しジェットのエネルギー増加に相当する, 砕波波高の減少が式 (6) から算定される。

4.2 roller 内のエネルギー逸散による波高減衰

Dally・Brown (1995) は, 波動と roller が共存する場

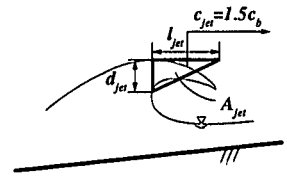


図-8 飛出しジェット

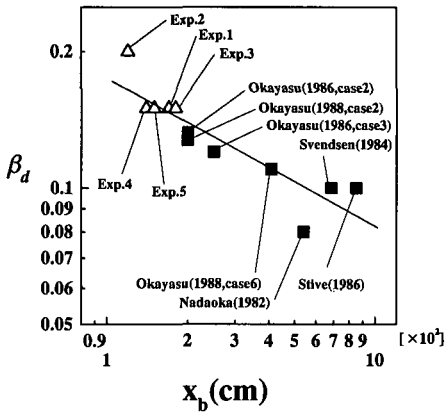


図-9 エネルギー逸散係数と砕波帯幅

合のエネルギー平衡式 (9) を提案している。

$$\frac{d\overline{F_w}}{dx} + \frac{d\overline{F_r}}{dx} = \overline{D} \quad (9)$$

ここで、 F_w と F_r は単位波峰幅当たりの波動部と roller のエネルギー流束、 D は単位面積当たりのエネルギー逸散率で、 $\overline{F_w}$ は式 (6)、 $\overline{F_r}$ と $\overline{D}$ は式 (10) と (11) で与えられる。

$$\overline{F_r} = \rho C_r^2 A / 2T \quad (10)$$

$$\overline{D} = \rho g \beta_d A / T \quad (11)$$

β_d はエネルギー逸散係数。Dally・Brown は $\beta_d = 0.10$ としているが、栗山・中官 (1999) は undertow 流速に着目して室内実験から決めた β_d を現地に適用すると、undertow 流速を過小評価することを報告している。このことは、roller の断面積係数 α_r (図-4) と同様に、 β_d にも縮尺効果が存在することを示唆している。そこで、砕波帯幅が広いことは、砕波によるエネルギー逸散が緩やかに進行すると考えて、 β_d と砕波帯幅 x_b との関係を図-9 に示す (△: 本実験, ■: 図-5 と同じ)。両者間には良好な相関が認められるが、現時点では無次元関係をうるまでに到らず、今後の検討課題としたい。

5. 砕波モデル

surface roller の発達とそれに伴う波動場の変動を組み込みこんだ、砕波モデルの構築を行う。

入射波特性量と地形条件から非線形浅水計算により算定される砕波諸量を入力量として、砕波と roller の共存場に対する時間平均化したエネルギー平衡式 (9)、巻き砕波には砕波の突っ込み点までに適用するエネルギー式 (6) の差分式に以下の諸条件を組み込み、砕波帯内の波高計算を行う。

- 1) roller の断面積係数 α (図-5) と進行速度 C_r (非線形長波波速)
- 2) wave shape factor B_0 (図-7) およびエネルギー逸

散係数 β_d の変化特性 (図-9),

- 3) T.P. の算定式 (2) (岡安ら, 1988),

- 4) 巻き砕波の突っ込み点 P.P. までの距離算定式 (5),

- 5) undertow 流速 U 式 (12) と wave setup $\bar{\eta}$ 式 (13) (Svendsen, 1984) により算定。

$$U = -C \left(\frac{H}{d} \right)^2 \left(B_0 + \frac{A}{H^2} \frac{d}{L} \right) \quad (12)$$

$$\frac{dS_{xx}}{dx} = -\rho g d \frac{d\bar{\eta}}{dx} \quad (13)$$

ここで、 $L = (gd)^{1/2} / T$ は波長、 S_{xx} は radiation stress で式 (14) で与えられる。

$$S_{xx} = \rho g H^2 \left(\frac{3}{2} B_0 + \frac{A}{H^2} \frac{d}{L} \right) \quad (14)$$

6. モデル計算と実験結果との比較

本研究で提案した roller の発達過程を考慮した砕波モデルの妥当性を、実験結果と計算結果との比較により確認する。

図-10～12 は、本研究の三種類の砕波形式に対するもので、波高 (●), wave setup (◆), undertow 流速 (▲) の岸沖方向変化が実験と計算結果 (実線) で示されている。なお、点線は Svendsen (1984) モデルの計算結果である。これらの結果に見られるように、砕波帯内での波高低下と wave setup (平均水位上昇) の計算と実験とはきわめて良好な一致を示している。特にこれまで指摘されてい

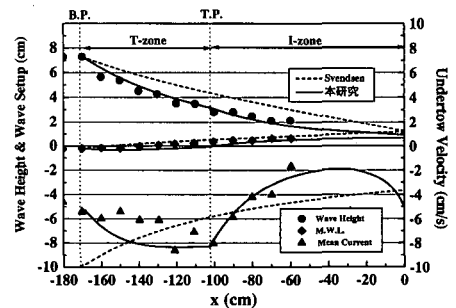


図-10 計算結果と実験結果との比較 (実験 1)

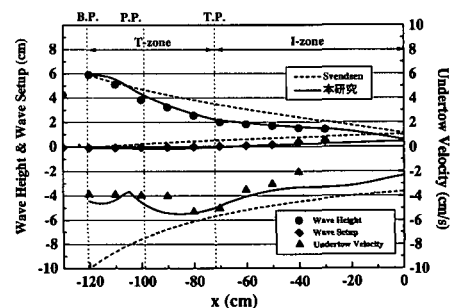
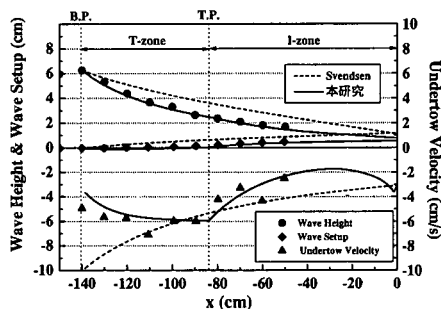


図-11 計算結果と実験結果との比較 (実験 2)



図—12 計算結果と実験結果との比較 (実験 4)

る、巻き砕波時 (図—11) に砕波の突っ込み点まで wave setup が殆ど発生しないことも計算で再現された。undertow 流速が T-zone と I-zone との境界 (T.P.) 近傍で最大となるのが計算にも認められ、砕波帯全域にわたって計算と実験との一致は良好である。しかし、undertow の計算結果に見られる T.P. 付近での不連続な変化は、図—4 のように α を折れ線近似したことが原因で、また波の再生地点付近から汀線までの区域での不一致は、roller と波動場に対する実験データの欠落による。今後の研究課題として残された。

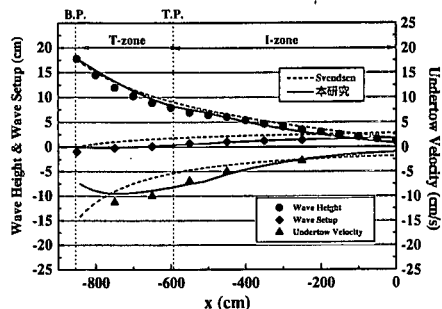
図—13 と 14 は、Stive・Wind (1986 : 崩れ砕波) および岡安ら (1986 : 巻き砕波) の実験と計算との比較で、計算は実験結果を良好に再現している。

7. 結 論

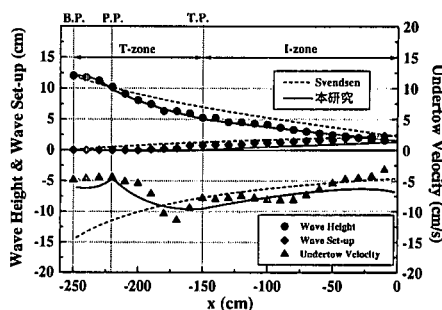
砕波諸量を入力条件とする、surface roller の発達過程を組み込んだ砕波帯モデルを、実験と既往の研究とに基づき構築した。roller の発生と発達には T-zone、減衰は I-zone で生じし、両領域の境界である T.P. での roller 特性が支配的役割を果たすことが認められた。roller の断面積係数 α は surf similarity parameter と、エネルギー逸散係数 β_d は砕波帯幅に関係し、ともに縮尺効果が存在する。roller は、波頂速度より早い非線形長波速で進行する。巻き砕波に対しては、突っ込み点までの波高低下のモデルを提案した。これらの結果を Dally・Brown モデル (1995) に組み込み、モデルの妥当性を検証するため砕波帯内の波高、wave setup, undertow 流速の計算を行った。計算結果は、これまでのモデルに較べ実験結果をよりよく再現することが認められた。

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定に関する考察, 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) : 砕波帯内定常流速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.



図—13 計算結果と実験結果との比較 (Stive・Wind, 崩れ砕波)



図—14 計算結果と実験結果との比較 (岡安ら, 巻き砕波)

31-35.

- 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺晃 (1988) : ポア状砕波の形成点に關する実験的研究, 第 44 回土木学会年次学術講演会概要集 II, pp. 614-615.
 栗山善昭・中官利之 (1999) : 沿岸砂州周辺の戻り流れ・沿岸流推定モデル, 土木学会論文集, No. 635/II-49, 97-111, 1999.
 蛭田啓久・服部昌太郎 (1999) : Surface Roller の変動挙動, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 126-130.
 水谷夏樹・安田孝志 (1999) : 水面波ジェットと突入後の砕波過程との関係について, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 121-125.
 Basco, D. R. and T. Yamashita (1986) : Toward a simple model of the wave breaking transition region in surf zone, Proc. 20th 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. 873-883.
 Hansen, J. B. (1990) : Periodic waves in the surf-zone: Analysis of experimental data, Coast. Eng., Vol. 14, No. 1, pp. 19-41.
 Nadaoka, K., and T. Kondoh (1982) : Laboratory measurements of velocity field structure in the surf zone by LDV, Coastal Eng. in Japan, 25, pp. 125-145, 1982.
 Steive, M. J. F and H. J. Wind (1986) : Cross-shore mean flow in the surf zone, Coastal Eng., Vol. 10, pp. 325-340.
 Svendsen, I. A. (1984a) : Wave height and set-up in a surf zone, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 303-329.
 Svendsen, I. A. (1984 b) : Mass flux and undertow in a surf zone, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 347-365.