

破波波面直下の縦渦遷移と熱・物質拡散率について

渡部靖憲*・森 信人**・秀島賢保***

この論文は、乱れスケール遷移を考慮した沿岸破波帯の物質混合輸送モデルを開発するための重要なパラメータとなる乱れ生成、輸送、拡散率を決定するために、水温制御され光学的に管理された環境の中で詳細な熱赤外線及び可視光線の同時計測を行い、破波後の縦渦形成に起因する表層水温パターン及び水温の時間変動から破波に伴う乱流混合の時間スケール及び水面近傍の乱流拡散率を特定すると共に水面変動と熱混合のスペクトル遷移の関係について議論するものである。

1. はじめに

碎波帯で現れる極めて強い乱流拡散は、海底土砂や碎波と同時に混入される気泡をはじめ沿岸域に存在する多様な物質の混合・輸送過程を決定する重要なファクターである。現在までこの領域の乱流統計量に関して多くの研究 (例えば Ting & Kirby 1995) が行われてきたが、碎波の発達と共に変化する渦・乱れスケール及び同様に変化する物質拡散率の特徴化及び一般化には至っていない。また、従来の研究は波のトラフレベル以下に限定され、最も動的な変動をもちかつ渦・乱れ生成のソースとなる碎波水面近傍の乱流構造に関しての定量的な計測結果の報告は極めて少ない。

Jessup (1997) は、水面の極近傍に現れる skin layer 内では水温が急変する特性を利用し、熱赤外線計測により、風波碎波波面の表層水温分布から碎波に伴う乱れ分布を推定した。著者らは、同様な赤外線計測を屋外大型造波水路 (2004 a) 及び実海域 (2004 b) にて行い、水面表層水温パターンが水面直下の渦構造の形成を示すサインとして出現するため、これにより碎波帯内に存在する渦スケールの特定が可能となること、また碎波後の気体混入後の再曝気領域の遷移を特徴化することが可能となることを表した。これらの研究は、赤外線反射及び放射の分離について検討を行っているが、何れもかなりの強度の赤外放射線を含む太陽光の下に熱赤外線計測を行っているため、計測結果が太陽光の水面での反射または水面からの熱放射線のどちらに強く影響を受けているのか厳密な意味で評価が困難である。

本研究は、乱れスケール遷移を考慮した沿岸碎波帯の物質混合輸送モデルを開発するための重要なパラメータとなる乱れ生成、輸送、拡散率を決定するために、水温制御され光学的に管理された環境の中で詳細な熱赤外線及び可視光線の同時計測を行い、表層水温パターン及び

水温の時間変動から碎波に伴う乱流混合の時間スケール及び水面近傍の乱流拡散率を特定すると共に水面変動と熱混合のスペクトル遷移の関係について議論するものである。

2. 実験方法

暗室に設置された延長 8 m, 幅 25 cm, 高さ 0.6 m の三面透明アクリル製 2 次元造波可視化可変勾配水槽において実験を行った (図-1 参照)。海底勾配 1/20 の一様勾配をもつ水槽の一端にピストン式造波機が設置されている。アピオニクス製赤外線サーモグラフィ (TVS8500, 解像度 235 × 250, 以降, IR と略記) と Kodak 製デジタルビデオカメラ (ES1.0, 解像度 1024 × 1024, 以降, DV) を水槽上部静水位置から 50 cm の高さに設置し、上方から碎波波面を撮影し、同時に側方から別の DV により波形を撮影した。これら 1 台の IR 及び 2 台の DV は、計測点から沖側に十分離れた位置に設置された波高計からのトリガーシグナルによって同期計測される。IR が 30 Hz, DV が 29 Hz の撮影周波数により計測された。高精度デジタル水温計によって計測された水中水温と IR によって計測された skin layer 内の水面表層温度との差が静水時に常に一定値 (1.3℃) となるように赤外線ライトにより水面温度を制御し、初期水温差条件を統一した。碎波帯内の岸沖方向に 4 点の計測点について巻き波と崩れ波碎波の両者に対して実験を行った (表-1 参照)。各計測点について、次の 2 種類の撮影角から碎波波面を計測した。(1) IR 及び DV を計測点が画像の中心となるように上方から鉛直下向きへ撮影する鉛直狭領域撮影 (撮影範囲 9 × 9 cm) (2) 岸側から沖側に向かって斜め 45 度の角度で上方から撮影する広領域撮影 (撮影領域 18 × 24 cm)。水位変動の計測は、容量式波高計を各計測点に設置し、DV 及び IR 計測と同一のトリガーシグナルを用いて計測した。

IR による計測結果は赤外線反射及び放射量の総和を反映するため、表面水温を正しく評価するためには赤外線反射と放射量の分離を行う必要がある。DV との同期撮影に必要な可視光光源に含まれる赤外線領域の放射線

* 正会員 工(博) 北海道大学大学院工学研究科環境フィールド工学専攻

** 正会員 工(博) 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻

*** 正会員 工(修) (株)鹿島建設札幌支店土木部

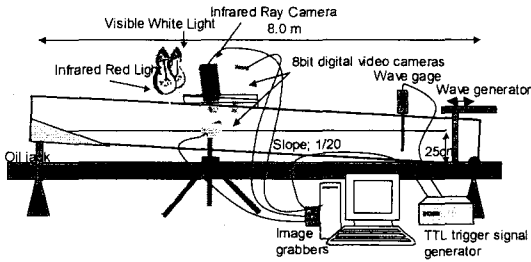


図-1 実験装置

表-1 実験波浪条件

 (計測点の水深: (a) $h=11.3$ cm, (b) $h=9.1$ cm, (c) $h=8.3$ cm, (d) $h=6.2$ cm)

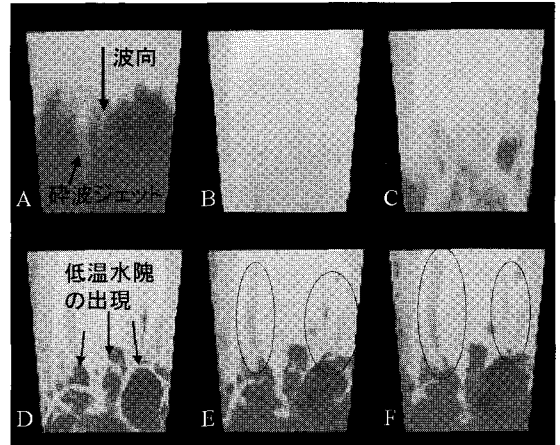
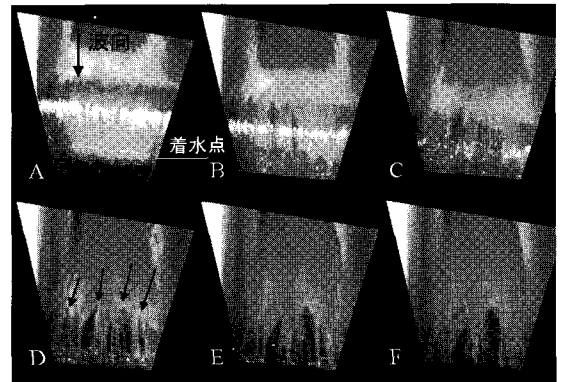
	碎波形態	周波数	碎波波高	碎波水深	着水水深
RUN1	巻き波	0.54 Hz	11.0 cm	13.7 cm	12.0 cm
RUN2	崩れ波	0.9 Hz	9.8 cm	12.8 cm	N/A

が波面で反射する影響を完全に除去し赤外線放射量のみ取得するために、光源のない IR のみによる計測も全てのケースについて行い、光源を有する計測結果と比較した。

全ての IR 及び DV 画像は、予め静水レベルに設置した較正グリッドを撮影して得られた実座標と画像座標との関係から算出した較正值をもとにした線形投影により実座標と対応した同一平面上の画像座標に変換され、Median フィルターによりノイズ処理された。

3. 結 果

図-2 は、RUN1 (広領域計測) の計測点 b (着水点) における碎波通過後の典型的な表層水温分布の変化を表している。赤外線ライトの照射により予め初期表層水温は水中水温より 1.3°C 高い状態にされているため、着水直後、波浪が連行してきた乱されていない skin layer により碎波表面全域は高温を示す (位相 A 及び B)。その後、明確なパッチ状低温領域が複数箇所に出現し、時間の経過と共にこれらの領域が拡大しながらさらに内部の水温が低下していくことが確認できる。この低温領域の一部は (○で囲んだ領域)、ゆっくりと沖向きに筋状に伸張されていく。これは、著者ら (2004 a) が行った大規模波浪実験により確認されている着水点背後に水面を巻き込んで発達する縦渦が水面表層 skin layer を崩壊し局所的な低温水塊が出現するパターンと類似しており (図-3 参照)、同一化可能と考えられる。この縦渦の波峰方向出現間隔は、大規模実験 (波速 2.87 m/s) では約 25 cm に対して本実験 (波速 1.30 m/s) では、約 $5 \sim 6$ cm であった。即ち、縦渦の発生を規定する相似則は、代表速度と代表長さが反比例する形で記述されることが考えられる。一方、前述した低温領域の沖方向への筋状の発


 図-2 RUN1 (広領域計測) の着水点 (計測点 b) における典型的な水表面温度分布の時間変化 (A は着水位相, 位相間隔: 0.2 s)

 図-3 屋外大型造波水路で行われた赤外計測結果。着水点における典型的な水表面温度分布の時間変化 (位相間隔: $1/16$ s, 渡部・森 (2004) より)

達、碎波後しばしば観察される斜行渦の形成領域と類似しており、着水点において形成される縦渦と何らかの関係があることを示唆している。

崩れ波碎波では、表層水温とパッチ領域内の水温の差は小さくその出現間隔も小さいが、同様な水表面温度の組織的波峰方向変動が確認できる (図-4 参照)。崩れ波碎波では一般に形成される渦スケールは小さく、これによる混合も弱いいため、巻き波碎波に対する出現パターンとの相違が生まれると考えられる。この筋状水温分布の波峰方向間隔は波峰背後で $1.7 \sim 3.8$ cm、さらに背後では巻き波碎波とほぼ同一間隔 ($5 \sim 6$ cm) の変動が支配的となる。なお、両碎波形態とも、碎波が十分に発達したボア領域では、乱れにより継続的に skin layer が破壊され新たな skin layer の供給もないため、前述のような明確な規則的水温分布は出現しない。

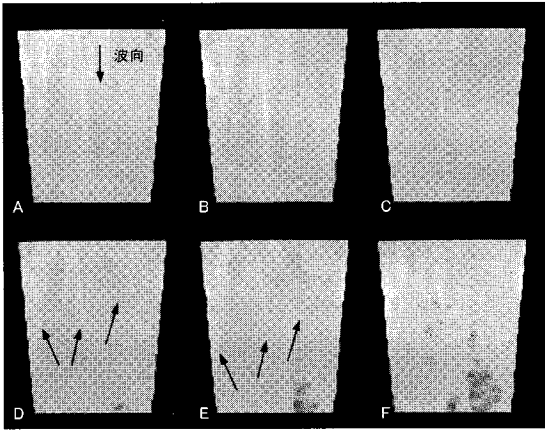


図-4 RUN2 (広領域計測) の計測点 b における典型的な水面温度分布の時間変化 (位相間隔: 0.1 s)

図-5 は, RUN1 (狭領域) の計測点 b における水位変動, 計測領域内の表層水温の平均値, 最大値, 最小値, 分散及び計測点 d (ボア領域) の同様な表層水温の (トリガーシグナル検出後の) 時系列を表したものである。なお, これら全ての水温は水中水温からの差として表されている。連続して到来する碎波の位相に応じて水温もまた調和変動し (即ち, 碎波通過直後平均水温が上昇し, 低温水塊の出現, 拡散により徐々に平均水温は低下する), 平均水温及び最大水温差は徐々に低下し準定常状態へと漸近する。また, 高い水温の分散は縦渦形成に伴う低温水塊の出現を示している (対応する水温分布図-2 を参照)。十分に発達した乱れが支配的となるボア領域では, 最初の碎波の通過と同時に急速に平均水温が低下し最大水温差も計測点 b の結果と比べると小さい。両地点の平均水温減衰率の差異は, 存在する乱れ強度の差異に起因して熱という受動的なスカラー量の流体混合率の差異を反映している。

図-6 は, それぞれ図-5 と同一地点における RUN2 (狭領域) の同様な水温変化を表している。崩れ波碎波の場合は, 巻き波碎波と比べ, 平均水温の減衰や波浪位相に対する水温変動について, 両地点に対して大きな差異はみられない。

DV と IR のそれぞれ画像濃度と表層水温の確率密度分布の時間変化を比較すると (図-7 参照), 前者が気泡の混入に伴う強い可視光反射に起因して碎波通過時のみ幅広い確率密度を示すのに対して, 後者は碎波通過直後に 2 つのピークが現れ次の波浪通過まで幅広い確率密度が存在する (○印参照)。連続して通過する碎波下の流体混合によって水中の低温水塊は高温化し逆に表層の高温水は低温化して準定常状態へと遷移する。なお, 本実験では可視光光源を使用したケースの水温確率密度と

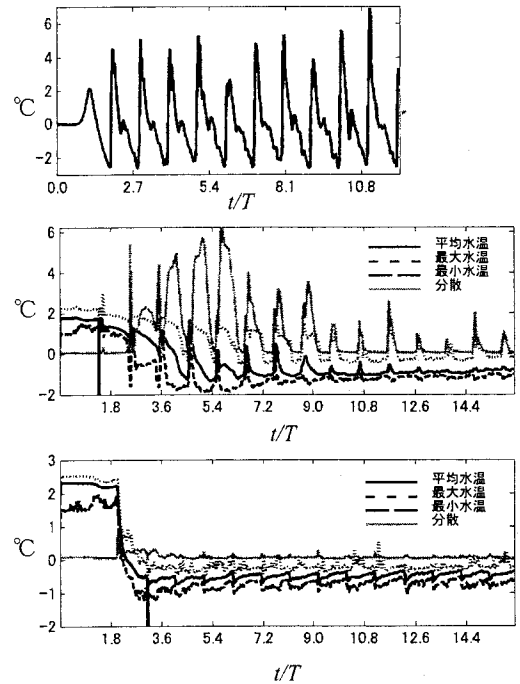


図-5 RUN1 の計測点 b における水位変動 (上) と水面温度の時系列 (中) と計測点 d における水面温度 (下)

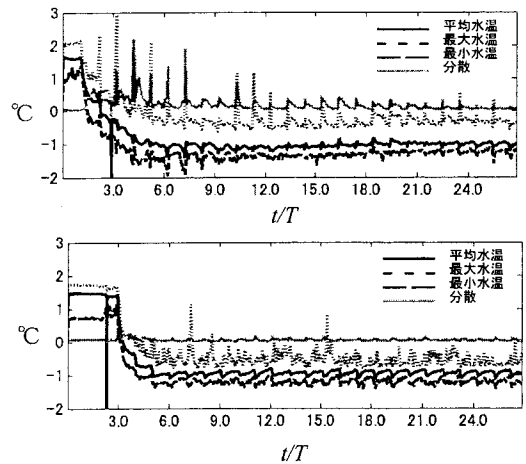


図-6 RUN2 の計測点 b (上) と計測点 d (下) における平均水面温度の時系列

無光源でのそれに明確な違いは観られなかった。即ち, 光源からの近赤外線の水面の反射は十分小さかったものと考えている。

図-8 は, 初期水温からの平均水温減衰 (図-5 及び図-6 参照) が指数減衰に従うと仮定し, その減衰率 (ε) の空間変化を表したものである。巻き波碎波では, 着水前の熱減衰率は非常に小さいが, その後, 急速に乱流拡散が進行し熱減衰が顕著になる。一方, 崩れ波碎波では碎

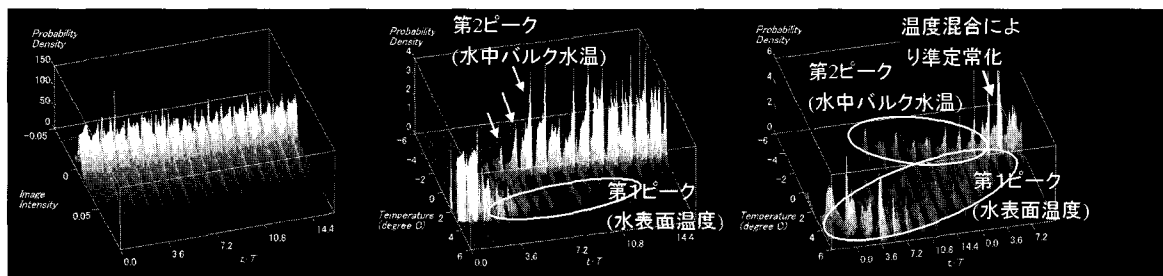


図-7 RUN1 (広領域) の計測点 b における可視光画像濃度 (左) と水表面温度 (中) の確立密度分布の時間変化と RUN1 (狭領域) の同様な時間変化 (右)

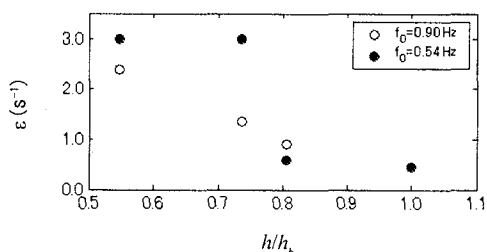


図-8 水表面の平均熱減衰率の岸沖変化

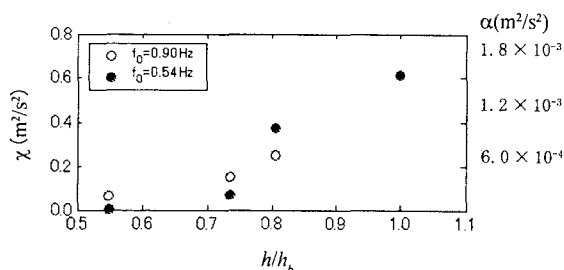


図-9 水表面の平均乱流熱拡散率 (χ) と平均乱流物質拡散率 (α) の岸沖変化

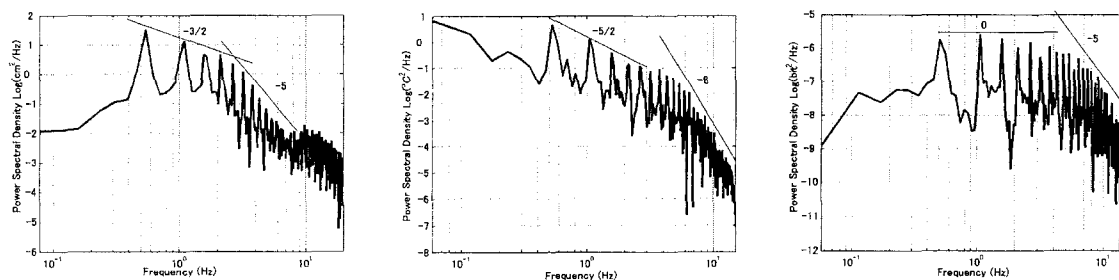


図-10 RUN1 (狭領域) の計測点 a における水位変動 (左), 水表面温度 (中), 可視光画像濃度 (右) の周波数スペクトル密度

波の進行に伴い減衰率がゆっくりと単調増加する。着水点を境に強い乱流混合が急激に発生しその後はほぼ一定値を示す巻き波砕波に対して、波の進行に伴い徐々に混合率を増加させる乱れの特徴が良く現れている。この時の乱流熱減衰の代表時間スケール ($\tau = 1/\varepsilon$) は、RUN1 の場合、着水点からボア領域に至るまで、約2.2秒から0.33秒まで、また RUN2 の場合、約2.2秒から0.41秒まで変化することになる。次に、この砕波後の乱流による熱減衰過程が、分子熱拡散と同様に拡散方程式によって規定されると仮定し、さらに代表速度を長波の波速 (gh)^{1/2} とした凍結乱流を仮定し時空間の変数を入れ替えると、乱流熱拡散率は次式で与えられる。

$$\chi = \frac{gh}{4\varepsilon} \dots \dots \dots (1)$$

完全に流れ場に受動的な物質を仮定し、Prandtl 数を

7.09 及び Schmidt 数 Sc を 2260 と仮定すると、乱流物質拡散率は、RUN1 の場合、 $1.93 \times 10^{-3} \sim 1.58 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ まで、RUN2 の場合、 $1.93 \times 10^{-3} \sim 1.98 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ まで変化すると算定できる (図-9 参照)。

図-10 は、RUN1 (狭領域) の計測点 a (砕波点) における波浪、計測領域平均水温及び平均可視光画像濃度の周波数スペクトルをそれぞれ表している。低周波領域 ($f/f_0 < 6$) において、非線形波浪に現れる基本周波数の高調成分に対応した周波数に水温及び画像濃度スペクトルにピークが現れる。さらに高周波域では、乱れに影響を受けるそれぞれ異なった支配因子の変動が反映され、異なるスペクトル勾配が現れる。それぞれの支配因子は、それぞれ圧力変動、流速変動そしてエアレーション (水面の局所曲率) と考えている。全てのケースに対する低周波数領域及び高周波領域のスペクトル勾配を表-2 に

表-2 水位変動, 水表面温度, 可視光画像濃度のスペクトル勾配

		a : h=11.3 cm		b : h=9.1 cm		c : h=8.3 cm		d : h=6.2 cm	
		$f/f_0 < 6$	$f/f_0 > 6$	$f/f_0 < 6$	$f/f_0 > 6$	$f/f_0 < 6$	$f/f_0 > 6$	$f/f_0 < 6$	$f/f_0 > 6$
RUN1(狭領域)	水位変動	-3/2	-5	-3/2	-5	-2	-4	-5/2	-4
	IR	-5/2	-8	-3/2	-5	-3/2	-4	-3/2	-4
	DV	-5		-5		-5		-4	
RUN1(広領域)	水位変動	-5/2	-8	-3/2	-5	-3/2	-4	-3/2	-4
	IR	-4		-4		-4		-	-
	DV	0	-5	0	-5	0	-5	-	-
RUN2(狭領域)	水位変動	-7/2		-7/2		-7/2		-3	
	IR	-7/3	-4	-7/3	-5	-7/3	-5	-7/3	-6
	DV	-5/2		-5/2	-6	-5/2	-4	-5/2	-4
RUN2(広領域)	水位変動	-7/2		-7/2		-7/2		-	-
	IR	-7/3		-7/3	-5	-7/3	-6	-	-
	DV	-5/2		-5/2		-5/2	-4	-	-

表す。これらは、それぞれの砕波形態に対して一貫した傾向をもち、特に高周波領域においてユニークな時間スケール特性が反映されている可能性がある。これについてはさらなるケーススタディが必要である。

4. 結 論

巻き波砕波では、着水点背後に水面を巻き込んで発達する縦渦が水面表層 skin layer を崩壊し局所的に低温水塊が出現することが確認された。この低温領域は、着水直後に出現し時間の経過と共に冲向きに筋状に伸張されていく。この縦渦の波峰方向出現間隔は、大規模実験(波速 2.87 m/s)では約 25 cm に対して本実験(波速 1.30 m/s)では、約 5～6 cm であった。崩れ波砕波では、波峰背後で 1.7～3.8 cm の波峰方向間隔の狭い同様な筋状水温分布が現れ、さらに背後では巻き波砕波とほぼ同一間隔のものが支配的となる。

表層水温の確率密度分布は砕波通過直後に 2 つのピークが現れ次の波浪通過まで幅広い確率密度が存在する。砕波の進行に伴い水温確率密度の 2 つのピーク水温差は減少し、ボア領域では 1 ピークの狭帯分布となる。

巻き波砕波では、遷移領域での熱減衰率は非常に小さいが、ボア領域に入ると急速に乱流混合による熱減衰が進行する。崩れ波砕波では砕波の進行に伴い一定の割合

で減衰率が増加する。乱流熱減衰の代表時間スケールは砕波点からボア領域に至るまで、約 2.2 秒から 0.33 秒まで遷移する。完全に流れ場にパッシブな物質を仮定し、また長波の波速を代表速度とする凍結乱流を仮定すると、この時の物質拡散率は $1.93 \times 10^{-3} \sim 1.58 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ まで変化すると算定できる。

水位変動, 水表面温度, 可視画像濃度の周波数スペクトルは、それぞれの砕波形態に対して一貫した傾向をもち、特に高周波領域においてユニークな時間スケール特性が反映されている可能性がある。

参 考 文 献

- 森信人, 渡部靖憲(2004b): 赤外線リモートセンシングによる再爆気領域の現地観測, 土木学会論文集, No. 768/II-68, pp. 101-111.
- 渡部靖憲, 森信人(2004a): 砕波に伴う熱放射線遷移と水面直下の縦渦構造の可視化, 土木学会論文集, No. 768/II-68, pp. 89-100.
- Jessup, A.T.(1993): The infrared signature of breaking wind waves in deep water, and their role in air-sea gas transfer, Phil. Trans. R. Soc. London, Vol. A304, pp. 665-670.
- Jessup, A., C. Zappa, M. Lowen, and V. Hesany(1997): Infrared remote sensing of breaking waves, Nature, Vol. 385, pp. 52-55.
- Ting, F.C.K. and J.T. Kirby (1995): Dynamics of surf-zone turbulence in a strong plunging breaker, Coastal Eng. Vol. 24, pp. 177-204.