

砕波の質量輸送について

土屋義人*・筒井茂明**・安田孝志***
山下隆男****・平口博丸*****

1. 緒 言

波の進行に伴う質量輸送については、沿岸での漂砂機構解明のため、従来一様水深域での進行波を対象として多くの研究が進められてきた。その中で、特に著者らは、定形進行波の質量輸送が常に波の進行方向に存在することを明らかにしてきた。一方、斜面上の波に対しては、従来より波形変化などの shoaling 特性について比較的多くの研究が発表されているが、砕波変形に伴う質量輸送に関する研究は、海岸工学上最も重要な課題の1つであるにもかかわらず、皆無に近い状況といえる。その理由として、従来の端部を閉じた波浪水槽による実験では、波の質量輸送を拘束するため、水位上昇やもどり流れなどの影響により、必ずしも進行波の実験に適していないことがあげられる。

また、最近のエネルギー問題を契機として自然のもつエネルギーの有効利用に関する研究が精力的に行われようとしており、その1つとして砕波のエネルギーを取り出すことが考えられている。

以上のような現状において、本研究では、特に砕波に伴う質量輸送をとりあげ、その基礎的な特性を調べるとともに、砕波時の質量流束の推算方法を提案し、実験との比較からその妥当性について検討する。

2. 砕波時の質量流束の推算法

従来の定形進行波の有限振幅波理論のうちで、質量輸送に関して矛盾がないと考えられるものは、波速の第1定義を用いたストークス波²⁾(S-3)、著者らの提案している通減摂動法による擬ストークス波³⁾(QS-4)およびクノイド波⁴⁾(NC-3)の各理論である。これらの理論結果によると、質量流束 Q および Lagrange 座標での質量輸送速度 U_m はともに、周期 T および波高 H が与えられると確定する。

一方、斜面上の波に対しては、一般に、周期が場所的

に変化しないという仮定の下にエネルギー・フラックスの保存則によって波高を求めることができるが、砕波波高は未知である。したがって、上述の理論を砕波点まで延長することが可能であるとすれば、砕波時の質量輸送を定める方法として、砕波波高の推算法に応じて次の3法が考えられる。

(1) Rankine-Stokes の砕波条件を用いる方法

(2) 砕波指標などによって砕波波高を付加条件とする方法で、斜面勾配の効果を入れることができるが、理論において $u_{\max} > c$ となる場合がある。

(3) 予め砕波水深が与えられた場合には、その地点まで計算を遂行し、そこでの波高を砕波波高とする方法で、このときも、必ずしも $u_{\max} = c$ とはならない。

本研究においては、以上の3法により砕波時の質量輸送速度および質量流束を求めるが、これらの方法は緩勾配斜面上の波に対しては有用であろうと考えられる。なお、砕波指標としては合田⁵⁾の近似式を用いることにする。

3. 斜面上での質量輸送に関する実験

3.1 実験装置および実験方法

実験に用いた水槽は、京都大学防災研究所附属宇治川水理実験所に設置されている二重床波浪水槽であり、図-1にその概略を示す。水槽中央部に鋼製の一様斜面(勾配 1/150)を設置し、その前・後部は一様水深部となっており、斜面末端部を砕波水深となるようにした。砕波に伴う質量流束は、一様水深部に設けられている循環口および下部水路床の暗きょ部を通して造波機側へ還流

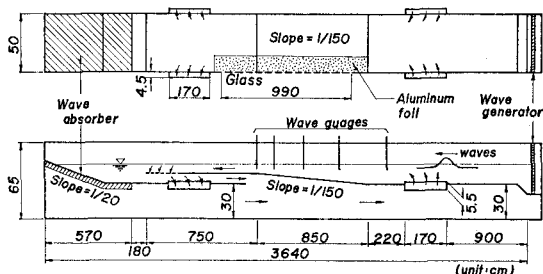


図-1 実験水槽

* 正 会 員 工 博 京都大学教授 防災研究所

** 正 会 員 工 修 琉球大学助手 工学部土木工学科

*** 正 会 員 工 博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

**** 正 会 員 工 修 京都大学助手 防災研究所

***** 学生会員 京都大学大学院工学研究科

されるようになっている。波の定常性は、斜面上に設置されている容量式波高計の記録に基づき、砕波点での波が定常になった時点より計測を開始した。この実験では、砕波点、砕波波形などの砕波特性および質量輸送を定常にすることができ、所要の目的に適用ものである。

実験に際しては、まず実験に用いた波の砕波特性を調べるため、砕波にいたるまでの時・空間波形、砕波時の波速、水平最大水粒子速度および波頂角をそれぞれ次のような方法で測定した。時間波形は容量式波高計を用いて図-2に示す位置で計測を行ない、空間波形は同一測点で水槽側壁のガラス面より写真撮影によって求めた。

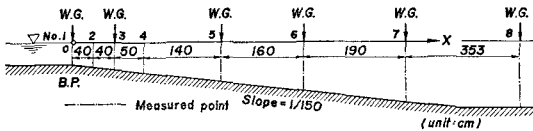


図-2 測点

斜面上での波速の直接計測は困難であるので、空間波形から相隣る2波峰間の距離として波長を求め、この2波峰間の中点における値とし、波速を間接的に求める方法を採用した。また、水粒子速度の測定は、水表面に浮子(発泡スチロール、直径約3mm)を投下し、スリットを通してストロボを照射してその挙動およびスリット光線内に設置された基準尺(2cm間隔、全幅10cm)を写真撮影し、これらを印画紙に原寸大に焼付けしたのち、浮子の水平移動に対する走時曲線を描き、その曲線の最大勾配を水平最大水粒子速度とした。砕波時の波頂角は、空間波形の撮影結果を印画紙に原寸大に焼付けして読みとった。

次に、質量輸送速度の測定は、中立粒子によるトレーサー法を採用した。用いた中立粒子は、比重1.093、平均粒径1.72mmの白色ポリスチレンを焼成し、水中選別により中立粒子として使用可能なものを選び出したものである。測定方法は次の通りである。エリスポットライトの幅を3~4cmに絞り照射し、測定断面前方にスポイトにより静かに投入された中立粒子を5~6波が通過する時間だけ写真撮影したのち、ネガフィルムをスライド映写機で約1.5倍に拡大投影し、中立粒子の軌跡の鉛直接線から次の鉛直接線までの水平移動距離を測定し、この値と周期との比で質量輸送速度を定めた。解析に当っては、数周期にわたり水平に移動している中立粒子のみを選ぶとともに、測点から±5cmの範囲にあるものを対象とした。表-1に砕波時の実験条件を示す。

表-1 砕波時の実験条件

Run	$T\sqrt{g/h_b}$	H_b/h_b
1	13.8	0.734
2	19.5	0.734
3	11.2	0.684

3.2 実験結果および考察

(1) 実験波の砕波特性

まず、図-3は斜面上の測点7における時間波形から得られる波高と周期を用いて深海波の諸量を定めたのち、その波が斜面上を伝播するときの波高変化曲線と実験結果の比較を示したものである。Run 1, 2, 3ともに沖側でわずかながらダンピングが発生しているが、全般的には理論曲線とよい対応を示していることがわかる。

図-4は、Rankine-Stokesの砕波条件を用いた場合の擬ストークス波とクノイド波の砕波波高曲線および砕波指標と実験値との比較を示している。両理論による砕波波高値よりも実験値は10%程度小さく、砕波指標よりもさらに4%程度小さい値であるが、砕波指標の精度から判断すれば両者はよく一致していると考えられる。

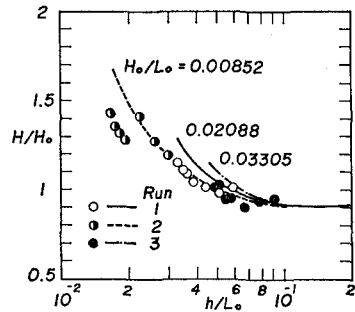


図-3 波高変化

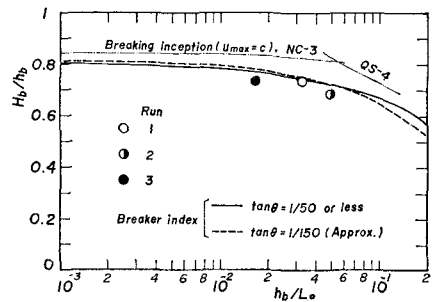


図-4 砕波波高

次に、Rankine-Stokesの砕波条件を検討する。図-5は砕波点からの水平距離を横軸に、各点での波長を縦軸にとり、波長の変化を示したものである。図中の実線は実験曲線であり、この曲線より波長を求めるときの誤差は約6%程度である。Run 2, 3についても同様の波長

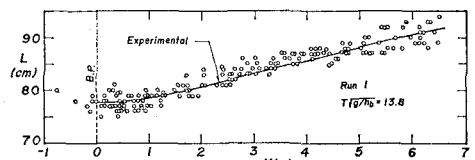


図-5 波長変化 (Run 1)

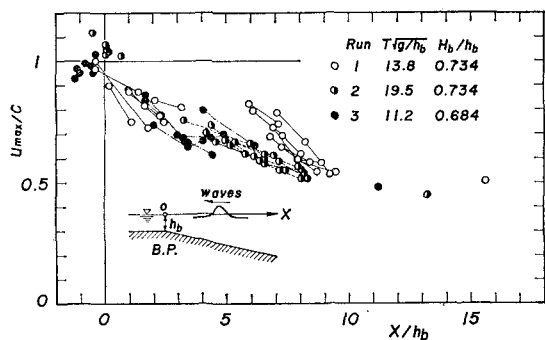


図-6 水平最大水粒子速度の変化

変化曲線を求め、各点での波速の換算に用いた。図-6は、水平最大水粒子速度と上述の方法で得られる波速との比の変化を示したものである。水平水粒子速度は沖側より順次増大し、砕波時には波速とほぼ等しくなることがわかる。Run 2 では $u_{max} > c$ となっており、砕波現象の本質との関係も考えられるが、波速の計算に用いた実測波長に 5% 程度の誤差を含んでいるので、この点の詳細な議論は不可能である。

なお、砕波型式はいわゆる Spilling breaker であり、砕波時の波頂角は $90^\circ \sim 93^\circ$ であった。

(2) 砕波に伴う質量輸送速度

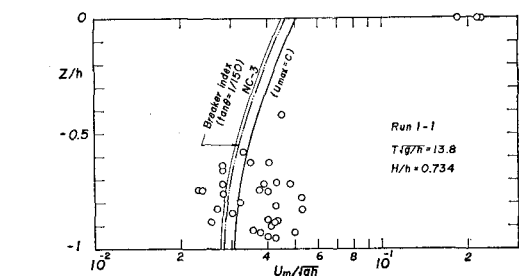
斜面上での質量輸送速度の鉛直分布を Run 1, 2 および 3 について示すと、それぞれ図-7, 8 および 9 となる。図中に示した曲線は、ストークス波、擬ストークス波およびクノイド波の各理論によるもので、それぞれ一点鎖

線、破線および実線で示してある。また、同種類の曲線の中、太線はエネルギー・フラックスの保存則に基づき測点 7 の波が斜面上を伝播するときの理論推算波高を用いた場合、細線は各測点での実測波高を用いた場合の質量輸送速度をそれぞれ表わしている。さらに、砕波点、測点 1 には 2. で述べた Rankine-Stokes の砕波条件を用いた場合を点線で、砕波指標を用いた場合を二点鎖線で示してある。同図の実験値の中で静水面における描点は、前述の水面での水粒子速度から算出したものである。

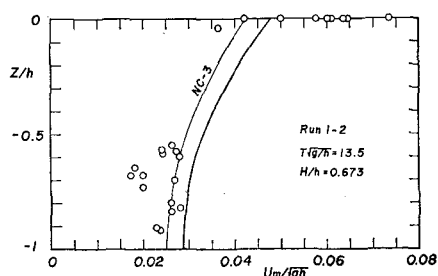
図-7 から次のことがわかる。水深の深い測点 5, 7 においては、静水面付近で実験値が理論値よりやや小さく、一様分布に近い分布形を示すが、全般的に両者の一致は良好である。しかし、水深が浅い測点 3 以浅においては、水底付近の実験値は理論値とほぼ一致するが、静水面付近の実験値は理論値よりもかなり大きく、砕波点においては前者は後者の約 5 倍の値にも達する。

波の非線形性の最も小さい Run 3 の場合にも、図-7 と同じ傾向を示し、しかも実験値のばらつきが小さく、砕波点付近を除いて両者はよく一致している。Run 2 の場合は、波の非線形性が特に強い浅水領域での実験値のばらつきが大きく、また、全領域にわたり実験値が理論値よりも大きな値を示している。

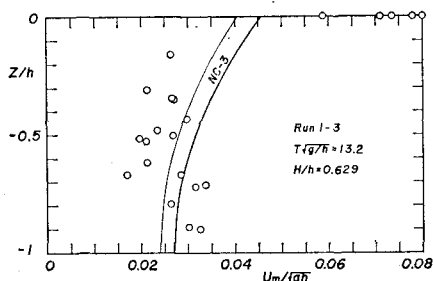
全体を通じて砕波点近くになると、水面変動部分の質量輸送速度が水底付近の値よりも極めて大きくなるのが特徴的である。



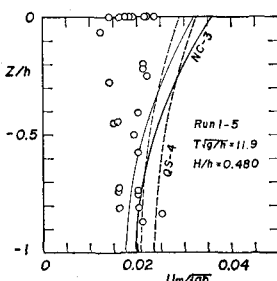
(1)



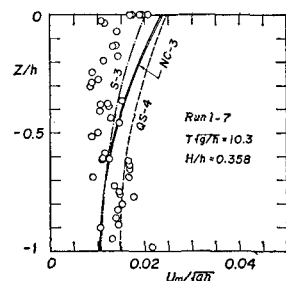
(2)



(3)



(4)



(5)

図-7 質量輸送速度の鉛直分布 (Run 1)

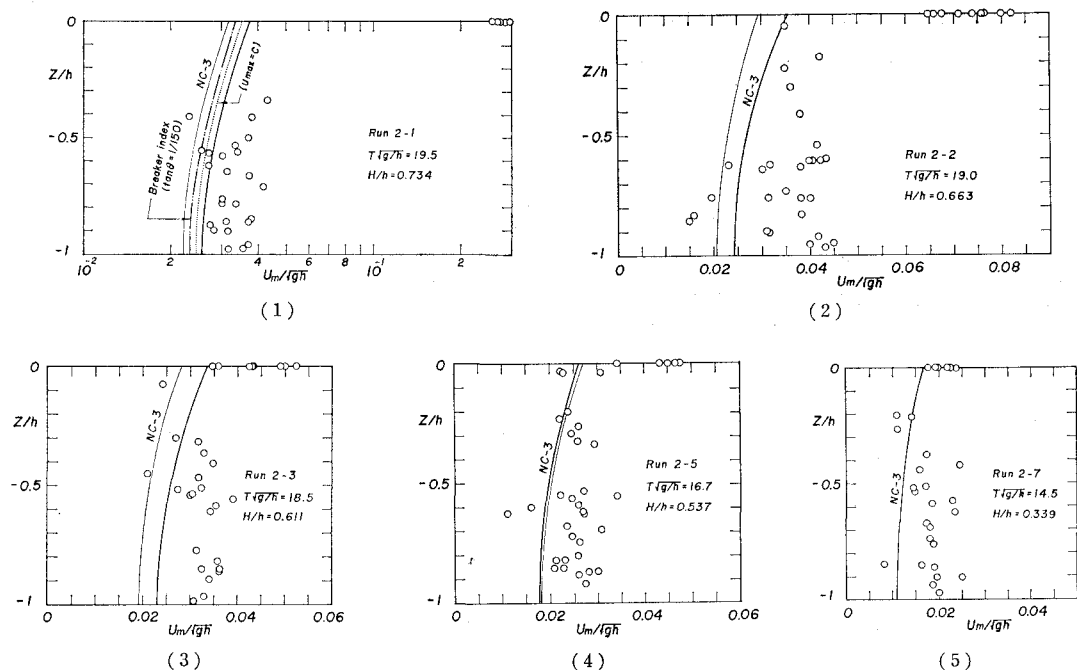


図-8 質量輸送速度の鉛直分布 (Run 2)

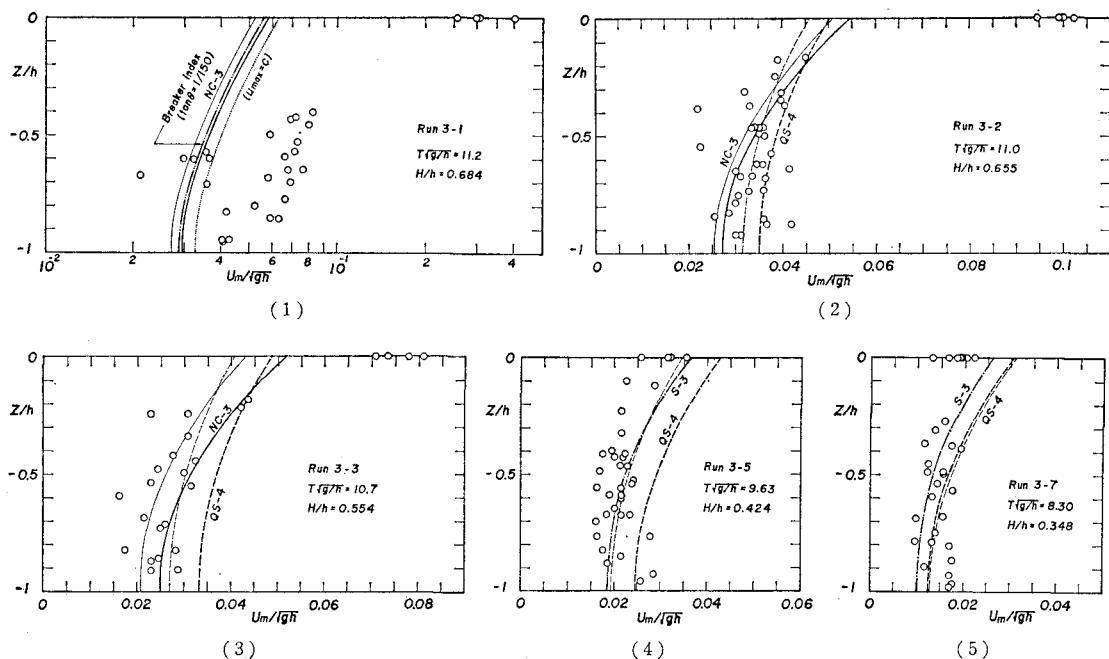


図-9 質量輸送速度の鉛直分布 (Run 3)

(3) 碎波に伴う質量流束

質量輸送速度の鉛直分布に対する実験結果から各測点での質量流束を求め、理論結果とともに示すと 図-10 が得られる。同図には全質量流束 Q および水平水粒子速度と水面変動との相互作用によって生じるいわゆる Stokes drift Q_2 の変化とともに、Rankine-Stokes の碎波

条件および碎波指標を用いた場合の Q の上限値が示されている。 Q と Q_2 との差が Euler 座標における平均速度成分に起因する質量流束である。擬ストークス波理論とクノイド波理論による Q の値は滑らかに接続し、Stokes drift のみを与えるストークス波理論による値には擬ストークス波およびクノイド波理論による Q_2 が対

応することがわかる。実験、理論の両結果は傾向的によく一致し、特に、図-9 に示したように Lagrange 座標での質量輸送速度の鉛直分布に対して良い一致の見られた Run 3 の結果は、Stokes drift Q_2 と極めて良く一致する。しかし、砕波点近くになり波の非線形性が強くなると、これらの理論値よりも 30% 程度大きな値を示し、理論による質量流束の推算値は必ずしも適当であるとは言えないが、その概略値を推算することは可能であろう。図-10 によると、砕波時の質量流束は $T\sqrt{g/h} \approx 10$

付近で最大となることがわかる。

4. 結 言

以上、緩勾配斜面（勾配 1/150）上で Spilling breaker を発生させ、その砕波特性、砕波にいたるまでの質量輸送速度および質量流束について実験的に調べるとともに、これらの推算方法を提案し、その妥当性を検討した。緩勾配斜面上においても砕波点近くでは、波形の非対称性、2 次波峯の発生などの波の非線形性に起因する問題が残されており、今後、それらを解明していく必要がある。

最後に、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究（研究代表者 岩垣雄一教授）および奨励研究（A）による成果の一部であることを付記する。また、本研究は、著者の筒井が文部省内地研究員（昭和 54 年度）として、京都大学防災研究所に滞在中に行った協同研究の成果の一部であって、関係各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 土屋義人・岡村 隆・安田孝志・山下隆男： 定形進行波の質量輸送，第 26 回海岸工学講演会論文集，pp. 36~40, 1979.
- 2) Skjelbreia, L.: Gravity Waves, Stokes' Third Order Approximation, Tables of Functions, Council on Wave Research, The Engineering Foundation, 337 pp., 1959.
- 3) 土屋義人・安田孝志： 遷滅せつ動法による擬 Stokes 波理論，第 25 回海岸工学講演会論文集，pp. 6~9, 1978.
- 4) 土屋義人・安田孝志： 新しいクノイド波理論の試み，第 21 回海岸工学講演会論文集，pp. 65~71, 1974.
- 5) 合田良実： 浅海域における波浪の砕波変形，港湾技術研究所報告，第 14 巻，第 3 号，pp. 59~107, 1975.

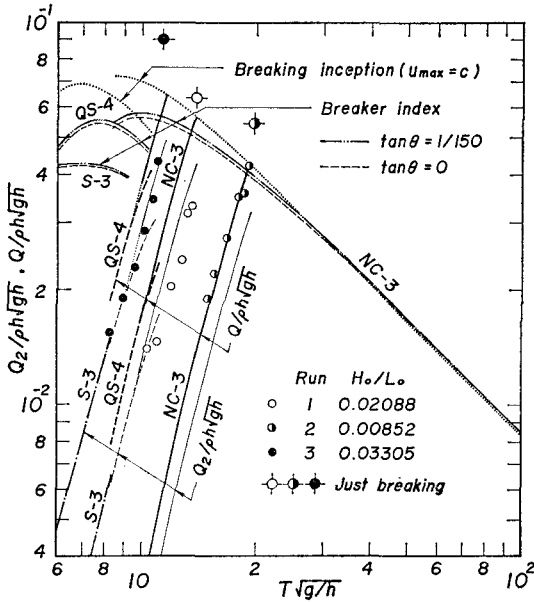


図-10 質量流束の変化