

## PSII-11 Bowenの離岸流モデルの疑問点

九州大学 工学部 正 員 松永信博  
 学生員 竹原幸生  
 正 員 粟谷陽一

**1. はじめに** 沿岸域に形成する定常流の1つに強く狭い冲向きの流れ、つまり離岸流がある。この流れはかなり古くから多くの人々によっても認識されていた。40年程前、shepard & Inmanは野外観測によって離岸流は水平循環流の一部を構成していることを明らかにした。1969年、Bowenは砕波線における入射波高の沿岸方向の規則的变化によって生ずるradiation stressの分布を外力とするモデルに基づいて、水平循環流の形成機構を説明した。さらに、Bowen & Inmanはこの入射波高の規則的变化の発生原因をedge waveの形成と結び付け、Bowenモデルの実験的検証を行い、モデルの妥当性を結論づけた。それ以後、多くの海岸工学者達は疑問も持たずradiation stress の概念を導入して循環流の流速を算定してきた。我々は、二次元重複波中に誘起される水平循環流と、Bowen & Inmanが行ったsynchronous edge waveやsubharmonic edge wave中に誘起される水平循環流について詳細な可視化実験を行った。その結果、Bowenモデルの多くの疑問点やBowen & Inmanの観察が不十分であることを見出した。本報告では、これまで約20年間海岸工学者達の間で広く信じられ、多くの教科書にまで紹介されてきたBowenの水平循環流発生機構モデルの破綻を指摘するものである。

**2. 実験方法および実験結果** 実験には、長さ2.0m、幅0.98m、深さ0.25mの全面透明なアクリル板で作られた水槽を用いた。水槽の一端にはフラッター・タイプの造波機を取り付けた。edge waveに関する実験では斜板を $17.7^\circ$ に設置し、二次元波を入射させた。表-1に、それぞれ二次元重複波、synchronous edge wave、subharmonic edge waveの振動数( $f$ )、波長( $l$ )および造波板振動数( $f_1$ )を示す。トレーサーとしてのこくずを水表面に様に散布することによって、これら3つのタイプの定在波中に誘起される水平循環流を可視化した。流れのパターンは水槽に対して固定された35mmカメラを用いて長時間露光によって撮影された。写真中の矢印は最大波高の位置を示す。

写真-1は、鉛直側壁に沿って二次元重複波が形成されている場合に誘起される水平循環流を示している。重複波の腹の所から冲向きの定常流（離岸流）が発生し、節の所では岸向き流れが形成される。循環流は1波長内に4個形成される。写真-2には、synchronous edge wave中に形成される

表-1 定在波の条件

|            | 二次元重複波 | Edge wave   |             |
|------------|--------|-------------|-------------|
|            |        | synchronous | subharmonic |
| $f$ (Hz)   | 1.19   | 1.45        | 1.11        |
| $l$ (cm)   | 95.0   | 39.2        | 24.5        |
| $f_1$ (Hz) | 1.19   | 1.45        | 2.22        |

水平循環流を示す。edge waveの1波長内に2個の循環流が形成されており、離岸流は最大run-upの所（4ヶ所）から発生している。写真-3には、subharmonic edge wave中に発生する水平循環流を示す。循環流はかなり歪められているが、1波長内に4個合計10個の循環流が認められる。また、離岸流は最大run-upの所から発生していることも明かである。

**3. Bowenモデルの疑問点** 前述した我々の実験結果に基づいてBowenモデルに関する決定的な疑問点について言及する。二次元重複波の波峰に直角な鉛直面内に定常循環流が誘起されることは、かなり古くから認められている。その形成機構はkundt's tubeにみられるacoustic cellular streamingの発生機構と同じであり、流体の往復運動によって生ずる振動境界層が本質的な役割を果たしている。我々が発見した二次元重複波中に水平循環流が形成することを見出したことはコロンブスの卵であり、その形成機構はacoustic streamingのそれと同じであることは誰も疑う余地のないものである。つまり、写真-1に示された水平循環流の形成機構は鉛直壁面近傍に生ずる振動境界層が本質的な役割を果たしており、流体を粘性流体として取り扱って初めて説明できる現象である。この水平循環流の発生をBowenの考え、つまりradiation

stressの勾配を外力として説明を試みるものは誰一人としていないであろう。なぜならば、二次元重複波のradiation stressの勾配は0となるからである。入射波が存在しているかどうかの違いはあるが、写真-2、3では、写真-1における鉛直壁が $17.7^\circ$ に傾いただけと考えることができる。従って、写真-2、3で示されたedge wave中の水平循環流の発生機構が写真-1で示されたものと同じであると考えれば何の抵抗もない。それらのことから、edge wave中に誘起される水平循環流もradiation stressによるものではなく、run-upの汀線方向の周期性のため振動境界層から周期的分布を持った渦度が放出されるためと考えるのが妥当であろう。

Bowenは、二次元規則波が入射した場合wave set-up量は砕波線における波高の2乗に比例して岸方向に直線的に増加することを実験により明らかにした。しかし、砕波帯内にedge waveが誘起された場合は、波高は岸方向にも、沿岸方向にも周期的に変化し、二次元規則波が入射する場合とは異なる。それにもかかわらず、沿岸方向のみ波高の周期性を仮定し、set-up量を算定したところ彼の巧みなごまかしがある。Bowenのモデルによると、砕波線における波高の最小のところで離岸流が生ずる。この結果を検証するため、Bowen & Inmanはsynchronous edge waveとsubharmonic edge wave中に誘起される水平循環流を可視化実験により調べた。その結果synchronous edge wave中には離岸流が形成され、subharmonic edge wave中には形成されないという結果を導いた。

彼らは我々の実験と同様、砕波を伴わない実験を行った。砕波を伴わないedge waveの場合、沖のどこを基準に波高の低いところで離岸流が発生していると判断できたのだろうか。多分、彼らは離岸流の発生位置と波高分布との関係を詳細に観察することなく、Bowenのモデルの妥当性を認めたに違いない。入射波とedge waveが重なり合った波動場において、波高は沿岸方向だけではなく、岸方向にも周期的に変化するため、ある基準となる位置が決まらなければ、波高の最大最小は確かめようもなく無意味である。さらに写真-3で示したようにsubharmonic edge waveにも明瞭な離岸流の発生が確かめられることから、Bowen & Inmanの実験および観察は誠に稚拙なものといわざるを得ない。

**4. 結論** 二次元重複波、synchronous edge wave、subharmonic edge waveにおいてすべて離岸流は汀線における最大波高のところから発生する。その発生機構はradiation stressモデルのような複雑な概念を用いなくても、境界層からの渦度の放出によって説明できる。

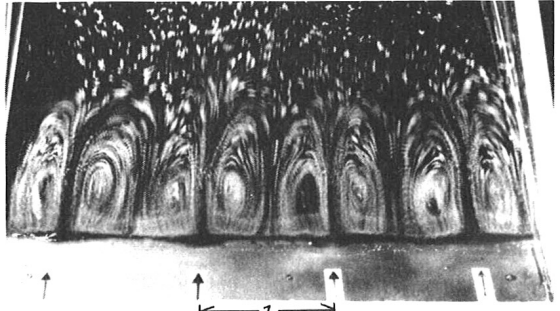
最後に、本研究を行うに当たり有意義な御助言を下された九州大学工学部助教授小松利光先生に感謝の意を表します。

**参考文献** Bowen, A.J., 1969, J.G.R., Vol.74, No.23, 5467-5478.

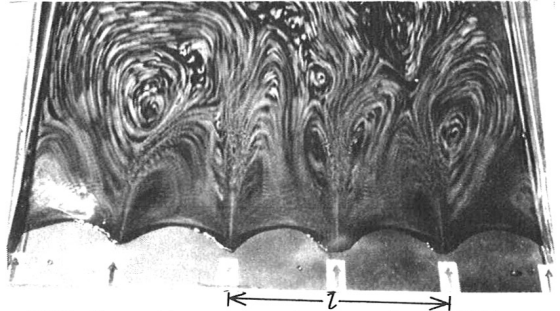
Bowen, A.J. & Inman D. L., 1969, J.G.R., Vol.74, No.23, 5479-5490.



↑  
←  $\frac{1}{2}$  →  
写真-1 重複波中の水平循環流



↑ ↑ ↑  
←  $\frac{1}{2}$  →  
写真-2 synchronous edge wave中の水平循環流



↑ ↑ ↑  
←  $\frac{1}{2}$  →  
写真-3 subharmonic edge wave中の水平循環流