

京都大学防災研究所 正員 芦田和男 ○田中祐一朗

1. 緒言 : 移動床水路に形成される Sand Waves は upper regime に属する Antidunes と Lower regime に属する dunes あるいは ripples に大別されるが, その発生の機構には大きな差異があると思われる。このうち前者は重力と横性力が支配的な影響を及ぼし, 後者は水流の不安定性と摩擦過程が重要な影響を及ぼすものと考えられる。したがって前者については水面波と河床波との相互作用を考慮した力学過程としての取り扱いが可能であろうし, 後者については水流の乱れと河床波との相互作用を考えた Stochastic な考察も必要とするであろう。

Antidunes については上述の立場からすでにポテンシャル理論による Anderson<sup>1)</sup>, Kennedy<sup>2)</sup>, 林<sup>3)</sup>らの研究が行われ, 領域区分, 水面波と河床波の波高比, 河床波の波長, 伝播速度などを予測することが可能となっている。しかし Antidunes に関する実験資料は比較的少なく, しかも波長, 波高, 伝播速度およびそれらの測定精度などについての詳細な情報が与えられておらず, その実態が十分明ろかにされているとは言えない。このため上記諸理論間の差異およびその適用性について十分に検討されていない。そこで本研究は実験的に Antidunes に関する種々の情報を得ることによって, その実態を明ろかにし, さらに従来の諸理論の適用性を検討することを目的とするものである。

2. 実験方法 : 実験に用いた水路は, 長さ 21 m, 中 0.5 m, 高さ 0.5 m の鋼製, 両面ガラス張りの楕環式水路である。水路床には図-1 に示す砂を約 12 cm の厚さに敷き, この砂を水と共に循環させた。まず河床面を所定のこう配に整形した後, 所定の流量で約 2~3 時間通水し, 平衡状態に達したと考えられるようになった後で測定が行われた。平衡状態での河床こう配は流量と, 流砂量および水路下流端に設けた砂止めせきの高さで自動的に定まるため, 多くの場合初期こう配と一致しなかった。実験の種類は表-1 に示す。ここで,  $Q$ : 流量,  $i$ : 平衡時の河床こう配,  $d$ : 平均水深,  $Q_s$ : 水路下流端での平均濃度から求め

表-1 実験の種類

た全流砂量,  $u$ ,  $u_*$  はそれぞれ水平流速および摩擦速度,  $F$ : Froude 数,  $n$ : マニングの粗度係数, であり河床形状の記号は A: Antidunes, F: Flat bed, cp: chute and pool,

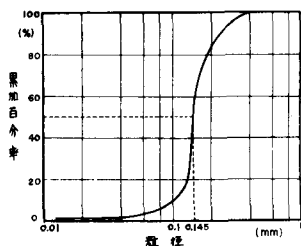


図-1 実験用砂の粒度分布

| Exp | $Q(l/s)$ | $i$   | $d(cm)$ | $Q_s(%)$ | $u(cm/s)$ | $u_*(cm/s)$ | $F$  | $n$    | 形態   |
|-----|----------|-------|---------|----------|-----------|-------------|------|--------|------|
| 1   | 20       | 1/250 | 6.08    | 178.3    | 65.8      | 4.38        | 0.85 | 0.0129 | A    |
| 2   | 20       | 1/333 | 6.70    | 218.0    | 59.7      | 3.94        | 0.74 | 0.0129 | F    |
| 3   | 20       | 1/417 | 6.45    |          | 62.0      | 3.47        | 0.78 | 0.0109 | F    |
| 4   | 20       | 1/108 | 4.43    | 822.8    | 90.3      | 5.84        | 1.37 | 0.0119 | A    |
| 5   | 20       | 1/91  | 4.33    | 1137.4   | 108.4     | 6.30        | 1.42 | 0.0098 | C. P |
| 6   | 40       | 1/383 | 9.77    | 401.1    | 81.8      | 4.24        | 0.84 | 0.0106 | F    |
| 7   | 40       | 1/439 | 9.84    | 373.5    | 81.3      | 3.97        | 0.83 | 0.0099 | F    |
| 8   | 40       | 1/185 | 8.21    | 706.6    | 97.4      | 5.77        | 1.09 | 0.0118 | A    |
| 9   | 40       | 1/150 | 7.00    | 1598.4   | 114.3     | 5.98        | 1.38 | 0.0103 | A    |
| 10  | 40       | 1/89  | 5.90    | 2626.3   | 135.7     | 8.06        | 1.78 | 0.0103 | C. P |
| 11  | 60       | 1/228 | 11.21   | 542.1    | 107.1     | 5.77        | 1.02 | 0.0105 | T    |
| 12  | 60       | 1/621 | 13.34   | 269.9    | 82.4      | 3.71        | 0.79 | 0.0096 | F    |
| 13  | 60       | 1/295 | 11.68   | 1020.9   | 102.6     | 5.14        | 0.96 | 0.0105 | F    |
| 14  | 60       | 1/231 | 10.96   |          | 109.5     | 5.65        | 1.06 | 0.0107 | A    |
| 15  | 20       | 1/418 | 10.68   | 26.0     | 37.5      | 4.19        | 0.37 | 0.0231 | D    |
| 16  | 40       | 1/546 | 11.27   | 104.2    | 71.0      | 3.73        | 0.68 | 0.0110 | F    |

T: Transition, D: Dunes である。水面波および河床波の形状と伝播速度の測定は、ガラス壁面に沿って並べた5台のカメラによる10~20秒間隔での同時撮影の写真により行なった。これによると壁面沿いの形状しか求められないが、Duneの場合を除いて、横断方向に波線がかなり揃い、十分二次元的であると考えられるため、この方法でも良いと判断した。2~3のケースについては、Antidunesの進行中での流速の時間的変動を、光電管パルス式小型プロペラ流速計を用いて測定し、水面変動、河床面変動および流速変動の関係を検討した。

3. 実験結果 : 水面波および河床波の波長を間隔5cmごとの範囲に含まれる測定値の度数分布で示したものが図-2である。水面波と河床波とはかなり良く対応しており、著るしく差異のあるものは少なかったため、両者を一括して整理した。写真の読み取りにかなりの誤差を伴うこと、および現象的にも水面波および河床波は生成、消滅、統合等を繰り返していることから、その波長はかなり広範囲に分布しているが、図-2に見られるように顕著な卓越波長を有し、しかもそれが水理条件によって変化している。さらに注目すべきことは、卓越波長のほぼ2倍、3倍の所に若干のピークが認められるが、これは写真の読み取りの際、波高が小さくなってくるとこれを飛び越して波長を読み取ることによるものであろう。

この実験では、粒径が非常に小さいため、わずかの掃流力の変化にも河床の変動が敏感に現われ、そのため現象が不規則になる傾向があると思われる。写真-1は現象に対する粒径効果を示すもので、(b)は予備実験のため水理条件は(a)と厳密には一致していないが、ほぼ同一で、平均粒径0.8mmの砂を用いた場合のものである。このように大粒径の場合にはきれいな波が形成さ

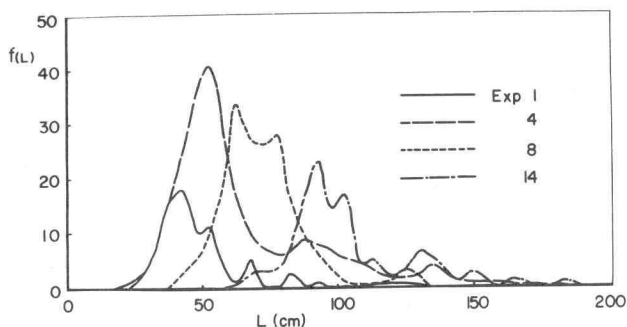
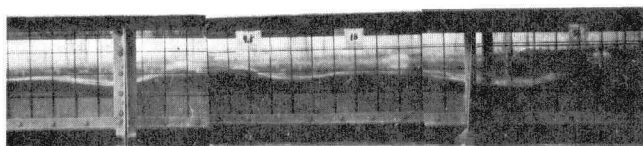
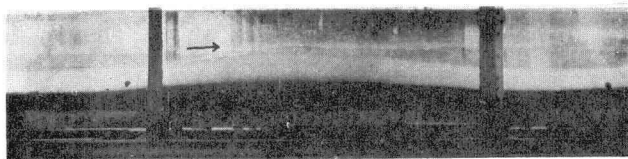


図-2 河床波および水面波の波長分布



写真(a) Exp. 9 ( $d_{50} = 0.145 \text{ mm}$ )



写真(b) 予備実験 ( $d_m = 0.8 \text{ mm}$ )

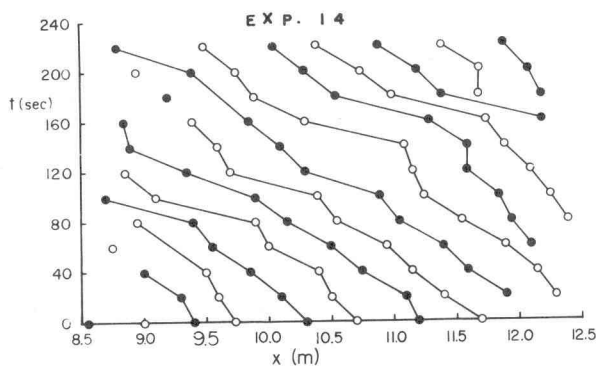


図-3 河床波の走時曲線

れるので、Antidunes に関する決定論的な学過程としての取り扱いの妥当性が伺えるが、まだ実験資料が少なく、粒径の影響を論ずるまでには至っていない。

連続写真の記録から谷線、山線の位置を追跡したもの一例が図-3である。伝播速度は場所によって大きく変化しており、また十分明確に追跡できない場合、ある一定時間消滅して(波高が小さくて写真でその存在が確認できない)また走時曲線上に現われる場合などあって非常に複雑であるが、平均的な伝播速度の程度を知ることは可能である。河床波の波高とこれに対応していると思われる水面波の波高との関係を示

したものが図-4である。水面波と河床波の位相差も絶えず変動しており、かつ両者共生成、発達、消滅を繰り返しているの、必ずしも対応が十分でない場合が多く、点は相当な散らばりを示す。図中の実線は Kennedy の理論値であるが、波長 $\lambda$ としては卓越波長を用い一定としているため個々のものとは合わないが、傾向としてかなり一致するものもある。

河床高 $Z$ 、水位 $H$ 、流速 $U$ 、水深 $d$ の時間的变化を測定した結果の一例を図-5に示す。河床波とは無関係に通過するものがあるため、水面波の周期にはかなり短いものが多

いことは注目すべきである。流速変動と水面変動とは周期の短いものまで、逆位相の関係で極めてよく対応している。また水深波と水面波はほぼ同じ動きを示している。以上の実験結果として得られた諸特性値を一括して示したものが表-2である。

4. 理論と実験結果との比較 : Kennedy によれば、Antidunes に関する卓越波長、伝播速度および水面波高と河床波高の比は  $S = 0$  において、

$$F^2 = \frac{2 + \frac{2\pi d}{L} \tanh \frac{2\pi d}{L}}{(\frac{2\pi d}{L})^2 + 3 \frac{2\pi d}{L} \tanh \frac{2\pi d}{L}} \dots (1)$$

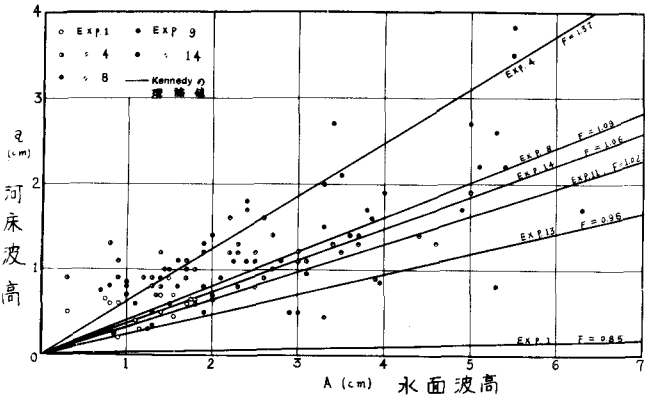


図-4 河床波と水面波の波高の関係

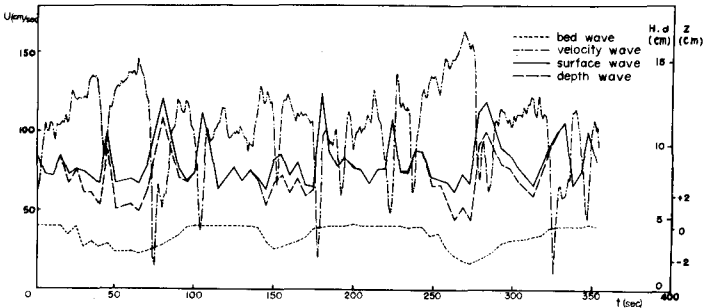


図-5 河床高、水位、流速、水深の時間的变化 (Exp. 8)

表-2 実験結果

| Exp | 卓越波長<br>$L_D$ (cm) | 平均波長<br>$L_m$ (cm) | 波高比<br>$A/a$ | 伝播速度<br>$U_b$ (cm/s) | 平均波高<br>$Q_m$ (cm) |
|-----|--------------------|--------------------|--------------|----------------------|--------------------|
| 1   | 42.5               | 46.5               | 2.29         |                      | 0.54               |
| 4   | 52.5               | 55.5               | 1.94         | 0.5                  | 1.02               |
| 5   |                    | 63.3               |              | 0.5                  |                    |
| 8   | 62.5               | 76.3               | 2.56         | 0.8                  | 0.73               |
| 9   | 52.5               | 81.0               | 2.18         | 0.4                  | 2.29               |
| 10  |                    | 104.0              |              |                      |                    |
| 11  |                    | 99.2               | 2.24         | 1.3                  | 1.20               |
| 13  |                    | 127.0              | 2.73         |                      | 0.45               |
| 14  | 92.5               | 102.0              | 2.58         | 1.5                  | 1.22               |

$$U_b = \frac{n g_B}{2(1-\lambda)} \frac{2\pi}{L} \left[ \frac{\sinh \frac{4\pi d}{L} + \frac{4\pi}{L} d}{\sinh^2 \frac{2\pi d}{L} - 2} \right] \quad \dots(2)$$

$$\frac{A}{a} = \frac{1}{\left(1 - \frac{g}{2\pi U^2} \tanh \frac{2\pi d}{L}\right) \cosh \frac{2\pi d}{L}} \quad \dots(3)$$

と与えられる。実験から得られた卓越波長と Kennedy の理論とを比較したものが図-6である。両者は極めて良く一致している。参考のために Anderson の理論結果を示しておいたが、これは実験値とかなりのずれを示している。また林博士らによる領域区分も同図に示したが、本実験の場合もかなり良く適合しており、これらことは従来のポテンシャル理論による取り扱いの妥当性を示すものと思われる。

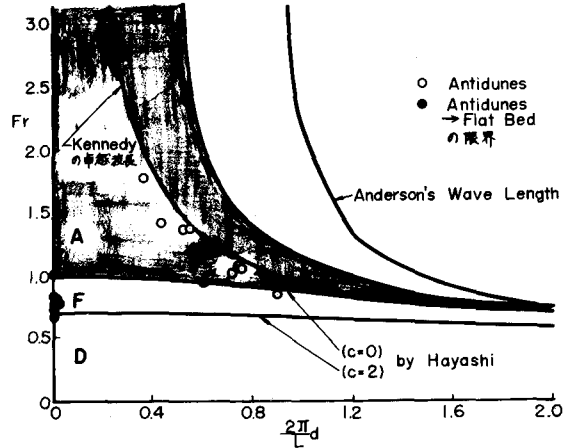


図-6 実験値と理論値の比較

つぎに(1)および(3)式より  $A/a$  は  $F_r$  の関数として与えられる。これの理論値と実験とを比較したものが図-7である。両者の一致がなうずしも十分でないが、実験値そのものがかなりばらついていることを考えると、詳細な論議を行なうことは困難である。伝播速度の(2)式についての比較が図-8である。 $U_b$  の実験値と  $g_B$  の計算値(土研式による)とを用いて求めた  $U_b/g_B$  と  $2\pi b/L$  との関係は図に見る如くほぼ同様な傾向を示す。 $U_b$  そのものがかなり変化すること、 $g_B$  の実験値を用いてないことから、この程度の差異は止むを得ないだろう。

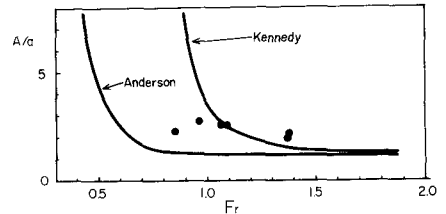


図-7  $A/a$  の実験と理論の比較

5. 結言 : Antidunes の諸特性について実験的に検討を行ない、これとポテンシャル流としての従来の理論との比較を行なった。その結果これらの理論は現象をかなり良く説明するものであることが分った。しかしまだ波高特性が十分明瞭にされていないこと、および現象に及ぼす粒径の影響がどの程度あるかなど、今後に残された問題も多く、更に検討を加えなければならぬ。

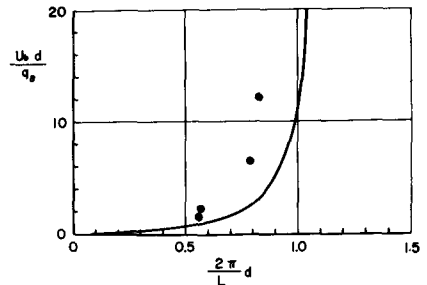


図-8  $U_b$  の実験と理論の比較

- 1) Anderson A.G : The characteristics of sediment waves formed by flow in open channels, Proc. 3rd, Midwestern Conference, F. M.
- 2) Kennedy J.F. : The mechanics of dunes and antidunes in erodible bed channels, Journ. of Fluid Mechanics, Vol. 16, Part 4, 1963.
- 3) 林泰造, 川上克己 : 移動河床に生ずる二つの不安定現象, 第13回水理講演会講演集, 1969.