

II-284

底面走行式水路により津波先端部を模擬した非定常実験

防衛大学校 正会員 ○ 藤間功司
東北大学 正会員 首藤伸夫

1. はじめに 著者らは、津波先端部の流れを調べるために底面走行式水路を用いた定常実験を行い、流れが水面近くの一様流速域と底面近くの境界層に分けられること、底面境界層の流速分布やレイノルズ応力分布に相似性があること、底面摩擦係数として平板境界層のものがほぼ当てはまることなどを明らかにした¹⁾。底面走行式水路で得られる定常流れは、非碎波で一定速度で進行する波に相当し、津波先端部の理想化されたモデルである。そこで本報では、非定常時の波の構造や境界層の発達を調べるため、定常流れに長周期変動を加えた非定常実験を行った。

2. 実験装置及び実験方法 実験に用いた底面走行式水路を図1に示す。底面のベルトは滑らかなポリウレタンゴムである。 U_b は底面の移動速度、 θ は底面勾配である。本実験ケースでは $U_b=184\text{cm/s}$ 、 $\tan\theta=0.109$ とした。 x :水が静止している時の先端位置を原点として底面に平行に取った座標、 z : x 軸に垂直上向きの座標である。長周期変動は、図1の水路右端の造波装置により発生させた。また、造波装置に変位計を取り付け、それに同期させてデータ処理を行った。周期 $T=6.1\text{sec}$ である。波形・流速の測定にはそれぞれサーボ式水位計・1成分LDVを用いた。LDVの出力は0.01秒間隔で210波に渡って抽出した。そして位相平均した後、さらに0.1秒間ごとに平均を取り、最終的に10Hzのデータとした。また、波先端位置 x_f を底面から約3mmの高さで底面に沿って設置した容量線式波高計で測定している。

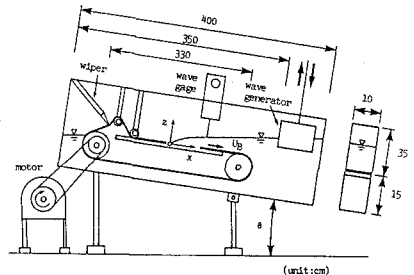


図1 底面走行式水路

3. 領域の分割 実験結果の一部を図2, 3に示す。図2は x_f の時間変化である。図3は代表的な位相での波形 $H(x; t)$ と流速分布 $U(x, z; t)$ である。非定常時においても、一様流速域と底面境界層に分割できることが分かる。図中の点線は、境界層の流速分布をlog曲線に当てはめ、その曲線の値が水表面流速 U_s になる高さとして求めた境界層厚 δ である。

4. 境界層の流速分布 境界層内の流速分布を図4に示す。図中の実線は定常時の流速分布で、次式で表される。

$$(U-U_s)/u_* = [U_e-(U_b-U)]/u_* = -6.8 \log_{10}(z/\delta) \quad (1)$$

ここで、 U_e :底面で流速がゼロになるよう座標変換したときの境界層外縁流速(U_b-U_s)である。 u_* は、流速分布から U_e と δ を求め、定常時の(すなわち平板境界層の)抵抗則により計算した。図から、本実験の流速分布も、 $z/\delta > 0.1$ ではほぼ定常時と同じであることが分かる。本実験の乱れの時間スケールが $\delta/u_* \lesssim 0.25\text{sec}$ で、

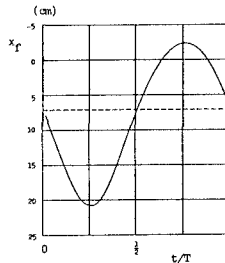
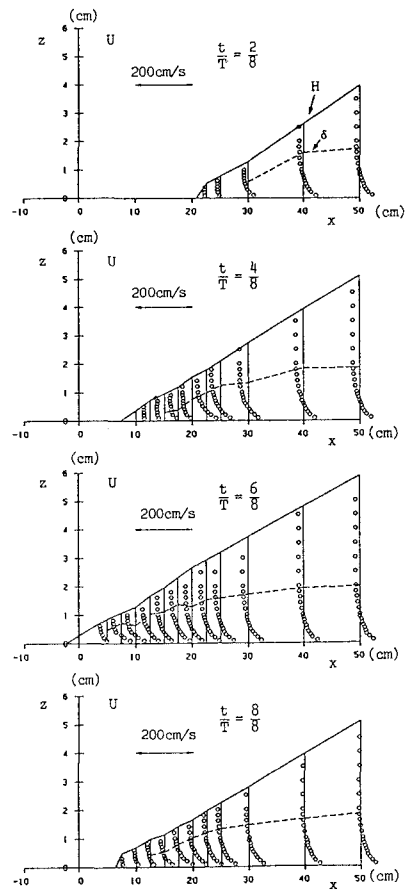
図2 x_f の変化

図3 実験結果

波の変動スケール $T=6.1\text{sec}$ に比べて小さく、乱れが十分に混合されているためであろう。（本実験で起こした変動を周期 T' のsin波の1部と見なすと、 $\delta/u_*'/T' \sim 0.002$ である。実現象でも δ, u_*, T' の代表値をそれぞれ $1\text{m}, 0.2\text{m/s}, 20\text{min}$ とすると、 $\delta/u_*'/T' \sim 0.004$ で、同じオーダーである。）従って、変動が特に急激でなければ、境界層内の構造は定常時とあまり変わらず、定常時の流速分布や摩擦係数で十分な近似になると言えよう。

5. 境界層の発達 (1) 乱流境界層への遷移点 図3を見ると、境界層厚 δ は先端から 3cm 位まではほとんど 1mm 以下で、先端から 3cm から 10cm の間で急激に増加し始めている。これは層流境界層から乱流境界層への遷移と考えられる。

δ と先端からの距離 $(x-x_f)$ の関係を図5に示す。ただし、 $Re=U_e \delta / \nu$, $Re_x=U_e(x-x_f)/\nu$ である。本実験では層流境界層での δ のデータが得られておらず、図5のデータにもばらつきが大きいので、遷移レイノルズ数を決定することは必ずしも容易ではないが、図から $Re_x \sim 5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ 程度であると推定できる。ただし本来は、遷移レイノルズ数は圧力勾配に大きく依存するものであるが、本実験の場合、圧力勾配が時間的・場所的に変化しており、圧力勾配による遷移レイノルズ数の変化まで詳細に議論することは困難である。

(2) 運動量積分 ここでは本実験の境界層の発達が、原理的に通常の運動量積分で表されるか否かを検討する。圧力分布に静水圧を仮定すると、運動量積分は次式で表される。これは本質的に境界層近似の運動量積分と同等である。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^H U dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^H U^2 dz + gH \cos \theta \frac{\partial H}{\partial x} = gH \sin \theta + u_*^2 \quad (2)$$

流速分布として式(1)を用いて積分を行えば、式(2)は次式に変形される。 u_* は平板境界層の抵抗則により評価できる。

$$\frac{\partial \delta}{\partial x} = \left[-\frac{\partial}{\partial t} (U_s H - S_1 u_* \delta) - \frac{\partial}{\partial x} (U_s^2 H) + 2S_1 \delta \frac{\partial}{\partial x} (U_s u_*) - S_2 \delta \frac{\partial}{\partial x} (u_*^2) - gH \cos \theta \frac{\partial H}{\partial x} + gH \sin \theta + u_*^2 \right] / (-2S_1 U_s u_* + S_2 u_*^2), \quad (3)$$

$$S_1 = \int_0^1 (-6.8 \log_{10} \xi) d\xi = 2.95, \quad S_2 = \int_0^1 (-6.8 \log_{10} \xi)^2 d\xi = 17.4$$

U_s, H に実験値を用いて δ を計算した結果を図6に示す。ただし、測定領域の右端で $\delta(\text{calculation}) = \delta(\text{experiment})$ として波先端方向へ計算を進めている。図から、式(3)を用いた計算では δ の勾配の x 方向変化があまり現れないものの、全体的にはほぼ実験値を再現していると言えよう。これから、本実験の境界層の発達も、通常の境界層理論と同様の運動量積分によって記述し得ることが分かった。

参考文献 1) 藤間・首藤：底面走行式水路を用いたサージフロントの底面摩擦，第33回海講。

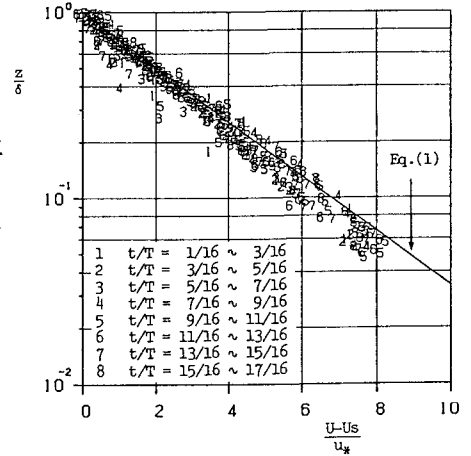


図4 流速分布

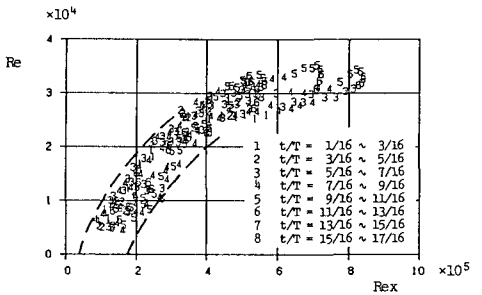


図5 δ と $(x-x_f)$ の関係

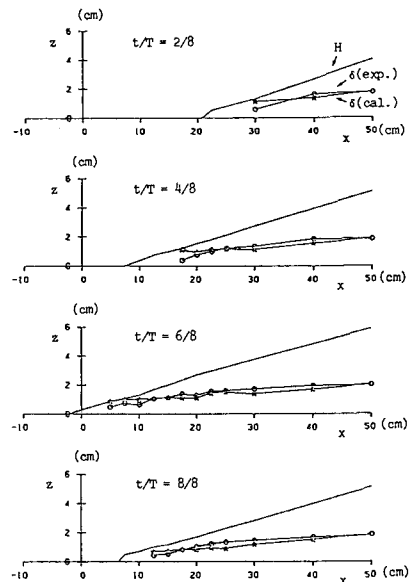


図6 運動量積分