

東京大学工学部 正会員 工博 堀川清司
 東京大学大学院 学生会員 ○渡辺 晃
 建設省中国地建 正会員 満岡英世

1. 緒言

波の作用下における水粒子移動速度は、簡単には微小振幅波理論から求まり、また質量輸送速度も有限振幅波理論等から理論的に算出することができる。しかしながら、これらの理論から求まる水粒子速度の妥当性については、これまでに十分な検討がなされてきたとはいえない。これは波のような非定常振動流れにおける流速測定の問題さによるところが極めて大である。

さて、最近発表された水素気泡を利用する流速測定法は、使用流体の水を電気分解して、その際に発生する水素気泡をトレーサとして用いるもので、流れの模様を直接目視することができ、また流れを乱すことも少なく、流れ現象の解明に非常に有効であることが報告されている。著者らはこの方法により若干の実験を試み、水素気泡式流速計が波運動下の流速分布測定や、底面に ripple がある時の渦の観察などに有効であるとの結論を得た。その大要を以下に報告する。

2. 水素気泡式流速計

陰極となる細い金属線から発生する水素の微気泡をトレーサとするわけであるが、電気伝導度や化学作用に対する抵抗力などを考慮して白金線を用いた。また、発生する水素気泡の浮力を小さくするためには、白金電極の線径はできるだけ細いことが望ましいが、 30μ と 50μ の二種の線径による水素気泡の浮上速度を測定した結果、両者の間に二割程度の差しか認められず、他方、 30μ の白金線は水圧で曲げられたり切れたりする可能性が大きいので、線径は 50μ を採用した。陽極としては、 $5\text{cm} \times 10\text{cm}$ の長方形の銅板を用いた。金属線に通ずる直流電流をパルスにすれば、一定時間間隔をもって発生する水素気泡列の間隔から流速分布が得られる。われわれの用いた直流パルス発生装置は出力約1kVで、マルチバイブレータをレポートトリガー発生器およびパルス制御用トリガー発生器として用いている。パルスの繰り返し周期は、 0.35msec から 700msec まで、通電時間は、 0.01msec から $2/\text{msec}$ まで連続的に変えられる。

3. 実験方法

実験は幅60cm、高さ90cm、長さ36mの二次元造波水路で行なった。水深は25.0cmとし、フラッター式造波板により周期1.20sec、波高4.2cmの波を起したが、得られた波形は正弦波からやや平水 trough が若干 flat になっている。白金線ローブと陽極銅板、光源ランプおよびカメラの位置関係は図1に示すとおりのである。発生する水素気泡列をより明瞭に観察するために、外部からの光は遮断し、スリット箱(幅5mm、長さ100mm

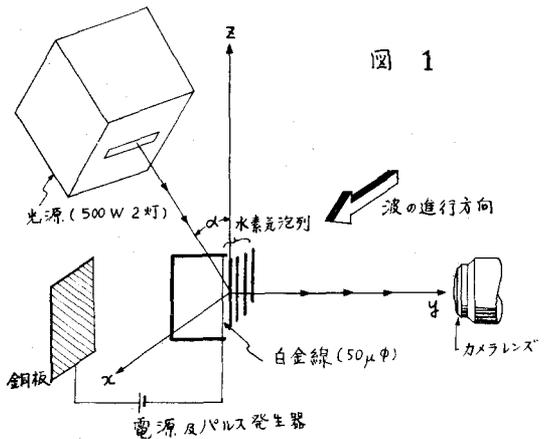


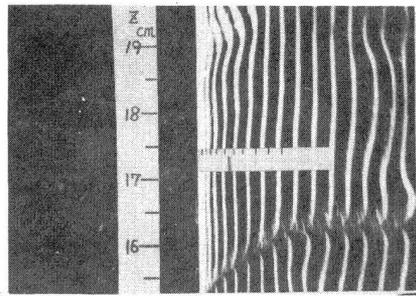
図 1

のスリットが直列に二段) に入れた 500 watt の写真用集光型ランプニ灯を光源として用いた。なおカメラのレンズは、水素気泡列が形成する平面に対して直角に向けるが、これに対する光束の方向は、レンズに直角(図 1 で $\alpha = 0$) よりも、約 25° まで傾け、気泡列のや、後方から照射した方が、より一層明瞭に観察できる。また水中の水素気泡以外の微粒子が光ると極めて見にくくなるので、水をできるだけ清浄に保つと同時に、スリット幅をできるだけ狭くする必要がある。陽極銅板とフローアの距離は、小さくするのは両極間の電気抵抗が減少し、水素気泡の発生量が増大するが、銅板による流れの攪乱がフローアの付近にまで及ぶのを防ぐため、極間距離は約 50 cm とした。

白金線支持体による流れの攪乱の影響を小さくするためには、白金線は長い方が望ましいが、一方、長くすると水圧によるフローアの変形が大きくなる。著者らは、5, 8, 20, 40 cm の四種の長さの白金線フローアによる予備実験の結果から、8 cm の長さを採用した。長さ 20 cm 以上のフローアを用いた場合は、気泡列が見えにくくなる欠点がある。これは、線が長くなることにより両極間の電気抵抗は低下するが、線端のエンド効果などのために厳密には逆比例しないため、白金線単位長さ当りの電流密度が減少することによると思われる。電圧を上げたり、極間距離を短かくするなどの改良を加える必要がある。また、水に 0.1 g/l 程度の NaOH あるいは Na_2SO_4 を添加することにより、水の電気抵抗が減少し、気泡発生量が増大することが報告されているが、本実験では同時に抵抗線式波高計により波高を記録する必要があったために、無添加の水を用いた。

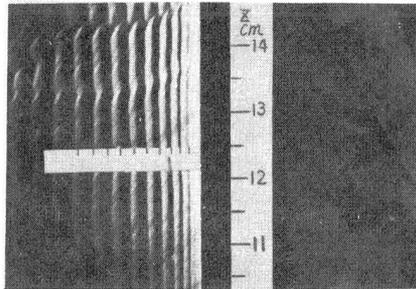
4. 結果と考察

波による実験では、水粒子が振動運動をするので、水素気泡列が前の周期において発生した気泡列と交錯し(水素気泡の半減期は数秒の order)、その正確な間隔が読みとりにくくなる。したがって、写真撮影時の 0.2~0.4 sec 前に通電を開始する方法をとった。こ



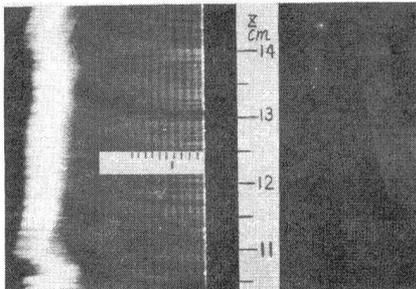
$\theta = 35^\circ$ $p = 20 \text{ msec}$ $d = 10 \text{ msec}$ $M \approx 1/1$

図 2 (a)



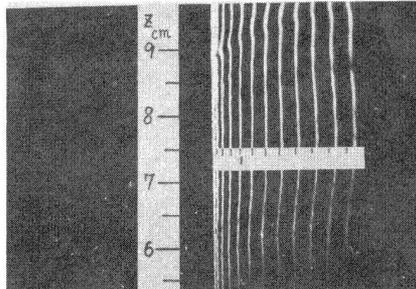
$\theta = 6^\circ$ $p = 20 \text{ msec}$ $d = 10 \text{ msec}$ $M \approx 1/1$

図 2 (b)



$\theta = 92^\circ$ $p = 10 \text{ msec}$ $d = 5 \text{ msec}$ $M \approx 1/1$

図 2 (c)



$\theta = 35^\circ$ $p = 25 \text{ msec}$ $d = 12 \text{ msec}$ $M \approx 1/1$

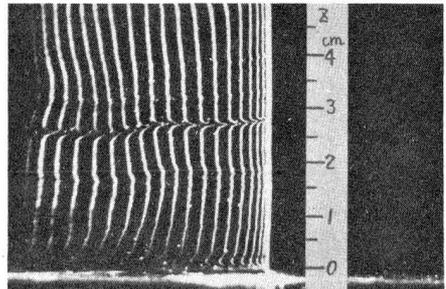
図 2. (d)

の時間は、流速の方向が反転する位相付近では、更に短かくする必要がある。このようにして撮影した結果が、図 2, 3, 5 に示してある。撮影条件はいずれも、絞り 1.8, シャッター速度 $1/30 \text{ sec}$ で、ASA 400 のモノクローム・フィルムを使用した。また、各写真の下には、シャッターが開いた瞬間の波の位相 θ (ただし、crest を $\theta = 90^\circ$ とする), パルス間隔 p , パルス幅 d , 倍率 M が示してあり、写真中には、フロー・フの位置が底面からの距離 z で示してある。(各写真で右側が沖側)

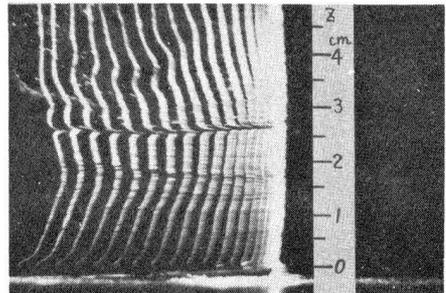
パルス間隔が既知であることから、水素気泡列の間隔を測定することにより、局所的な流速が求められる。しかしながら、波の運動が非定常であることからして、流速は時間的、場所的に変化しており、白金線フロー・フの位置における撮影時の流速を、直接読みとることはできない。そこで白金線からの距離による流速の求めを計算すると、距離 $L/360$ (L は波長) が波の位相で 1° の相違に相当し、この範囲内で間隔をよみとれば、それから求まる流速の誤差は、その位置における最大流速の 3.5% 以内におさえられることになる。一方、 $L/360$ の範囲内では、白金線の方から数えて n 本目と $(n-1)$ 本目の気泡列の間隔は、撮影時刻を $t = t_1$ とし、 $t = t_1 - np$ と $t = t_1 - (n-1)p$ における流速の平均と近似的におけることが簡単な考察によりわかる(ただし、 p はパルス間隔)。また、カメラのシャッター開放時間中の水素気泡列の和は、各気泡列において、白金線から最も隔たった点がシャッターの閉じた時刻に対応すると考えることにより解決できる。

さて、図 2 (a)~(d) は、それぞれ図に示された位置、位相における水素気泡列である。白金線支持体によると思われる乱れも若干認められる。また斜め横方向に円弧を描いて連なっている乱れは、白金線に付着したスケールによるが、このスケールは、時々電極に逆の電圧を印加したり、硝酸溶液で拭うなりして、かなり除去できるものと思われる。スケールによる乱れが水平に連なっていないのは、水素気泡の浮力によるずれと、流速の鉛直成分によるが、その profile からして後者による方が大きいと考えられる。前述の仮定と考察にもとづき、微小振幅波理論を用いて、水素気泡列の配置を計算した結果が各々の図中に示してある。各気泡列の白金線より最も隔たった点が、各目盛線に対応する。 $L/360 = 4.6 \text{ mm}$ (太線) の範囲内でかなり良い一致をみせている。

次に、図 3 (a), (b) は、底面付近の流速分布を示している。底面から 2.7 cm の付近に気泡列のくびれがあるのは、キャリブレーションのために白金線を局部的に



$\theta = 168^\circ$ $p = 20 \text{ msec}$ $d = 10 \text{ msec}$ $M \approx 5/6$
図 3 (a)



$\theta = 194^\circ$ $p = 20 \text{ msec}$ $d = 14 \text{ msec}$ $M \approx 5/6$
図 3 (b)

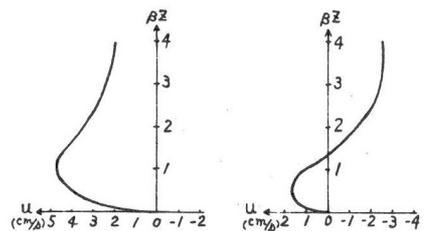


図 4 (a) $\theta = 168^\circ$ (b) $\theta = 194^\circ$

被覆したためのものである。底面のごく近傍の流速分布を知るために、この流速計が極めて有効であることがこれらの写真からわかる。Longuet-Higginsにより提案された層流境界層内の流速 u を求める式、

$$u = u_0 [\sin \theta - e^{-\beta z} \sin(\theta + \beta z)]$$

$$u_0 = \pi H / T \sinh \frac{2\pi R}{T}, \quad \beta = (\sigma / 2\nu)^{1/2}, \quad \sigma = 2\pi / T$$

から求まる流速分布を、参考までに図4に示す。

図5(a)~(c)は、底面として pitch 6.5cm, 高さ 1.8cm の ripple 状のスレート板を用いた時の流れの模様である。この方法によれば、底面が rough である時の渦の大きさ、攪乱の上昇距離などを、かなり正確に把握することが可能であることを示唆している。

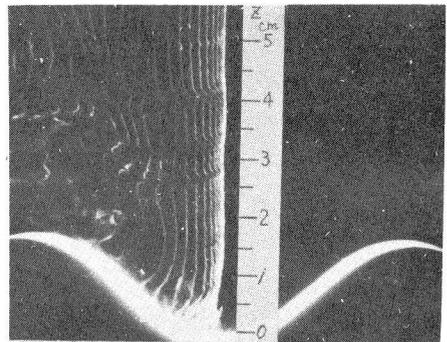
5. 結語

非定常振動流れである波運動下の水粒子速度の測定、ことに境界層内での流速分布の観察や、底面が rough である時の乱れの大きさを測定する上に、水素気泡式流速計が非常に有効であることがわかった。今後は、16m/m 撮影機を用いて流速分布の時間的変化を観察することや、白金線を一定間隔で絶縁被覆することにより、流跡線を観察することも試みる予定である。また、同様な方法で、同時に流速の鉛直成分を測定することも可能と思われるが、水素気泡の浮上速度が流速によっても変化することから、その補正方法などに、また検討を加えていく必要がある。照明方法や、フロッグの支持法、白金線に付着するスケールの除去、白金線の被覆の方法など、また問題は残っており、漸次改良を加えていきたいと思う。

本研究を行うにあたり、東京大学本間仁教授に終始御助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。また文部省科学研究費による研究であることを付告する。

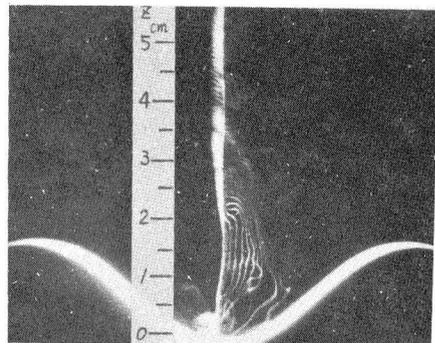
参考文献

- 1) Schnaub, F. A. 他: Use of Hydrogen Bubbles for Quantitative Determination of Time-Dependent Velocity Fields in Low-Speed Water Flows, *Trans. A.S.M.E., Jour. of Basic Eng.* Vol. 87, No. 2, 1965.
- 2) 浅沼徳・武田定彦: 水の電気分解による流れの可視化について, 日本機械学会論文集, 31巻, 222号, 1965.
- 3) 日野輝雄・四方浩・中井真行: 密度流の流速分布に関する実験, 第11回水理講演会, 1967.



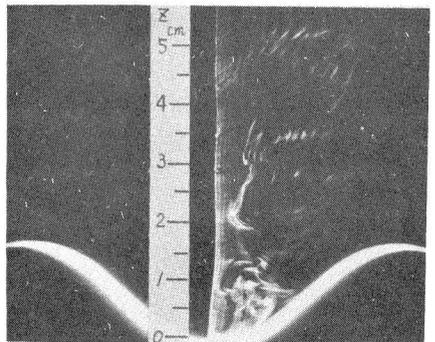
$\theta = 175^\circ$ $p = 20 \text{ msec}$ $d = 12 \text{ msec}$ $M \approx 4/5$

図 5 (a)



$\theta = 220^\circ$ $p = 20 \text{ msec}$ $d = 12 \text{ msec}$ $M \approx 4/5$

図 5 (b)



$\theta = 335^\circ$ $p = 20 \text{ msec}$ $d = 12 \text{ msec}$ $M \approx 4/5$

図 5 (c)