

開水路流れの乱れ特性について
——Froude 数の効果——

京都大学工学部 正員 工博 岩佐義朗
水資源開発公団 正員 工修 鷺見栄一

1. まえがき 開水路流れをせん断流れとみなすとき、現象を把握するアプローチとして、管路流れによく用いられる相似則がしばしば適用される。多くは開水路流れを管路の半断面の流れとみなし、管路流れで用いられる解析方法をそのまま適用するものである。しかしながら、もともと、自由表面を持つ開水路流れは管路流れと物理的には大きな差違がある。このことは、多くの人々によって指摘され、Froude 数の変化にともなう種々の水理量の変化が論じられている。このように、開水路流れのパターンを示すものとして、Reynolds 数ばかりでなく Froude 数も考えなければならない。本報告は、管路流れとの比較から、開水路流れにおける乱れ特性に対する Froude 数の効果を解明しようとするものである。

2. Euler 的乱れ特性 開水路流れにおける乱れに対して、Froude 数の効果をみようとするとき、顕著に現われる統計量は $\sqrt{U_E^2}/U_*$ 分布であるが、著者等の用いたホット・フィルム流速計では、その測定が困難なため、ここでは $\sqrt{U_E^2}/U_*$ 分布についてのみ述べることにする。

実験水路は、長さ 10m、幅 25cm、深さ 35cm の塩化ビニール製滑面水路であって、外側は鋼鉄製フレームで補剛されている。路床こう配は $1/500$ および $1/100$ に設置し、乱れはホット・フィルム流速計によって測定した。

相似則によれば、

$$\frac{\sqrt{U_E^2}}{U_*} = f(z/H) \quad (1)$$

となる。測定結果を示した図-1 によれば、 $Fr = 0.75 \sim 0.79$ という常流では、 $\sqrt{U_E^2}/U_*$ は Reynolds 数にかかわらずほぼ相対水深の関数になっているが

$Fr = 1.55 \sim 1.61$ の射流では、Reynolds 数の影響がみられる。しかしながら、ほぼ一定の Froude 数に対して $\sqrt{U_E^2}/U_*$ 分布は相対水深によるある関数形をもつと言える。その傾向として、Ljatkher の理論¹⁾の定性的な指摘のとおり、Froude 数の増加に対して $\sqrt{U_E^2}/U_*$ は増加している。このことは、管路流れにおいていわれるような十分に乱れた流れでは(1)の相似

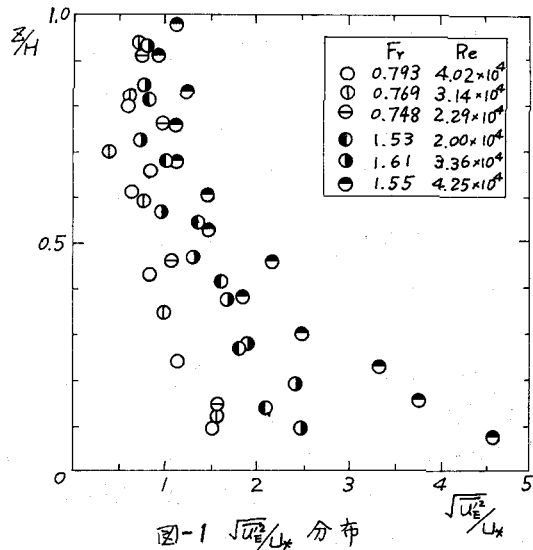


図-1 $\sqrt{U_E^2}/U_*$ 分布

則が成立するということが開水路流れでは厳密には成り立たないことを示す。

Ljatkher の理論との関係で述べれば、 $\sqrt{U_E^2}/U_*$ 分布に対する Froude 数の効果は、自由表面の波動によってのみ生じるということである。しかしながら、図-1 によれば、 $\sqrt{U_E^2}/U_*$ 分布に対する Froude 数の効果は自由表面附近よりも底面附近に近づくにしたがって、より顕著な効果がみられるが、このことは Ljatkher のモデルからは説明できない。

以上のように、 $\sqrt{U_E^2}/U_*$ 分布は相対水深の普遍関数になるのではなく、Froude 数によって変化することが確かめられた。

3. Lagrange 的乱れ特性

Lagrange 的運動特性を評価しようとするとき、他の分野にくらべて、開水路流れの自由表面における計測は比較的容易であるが、波動の存在は困難な問題を与える。図-2 は、自由表面上にパラフィン製の球（直径 1 cm）を浮流させ、水路上よりの写真撮影にもとづく Lagrange 的計測の結果を示したものである。Reynolds 数の増加にしたがって乱れの強さはやや増加しているが、一般的に

みて、常流の方が射流にくらべて $\frac{\sqrt{u^2}}{U_*}$ 大きい。自由表面における波動によるものか、構造的に射流の Lagrange 的乱れ特性が常流の場合にくらべて減少するのか、早急な判断はできないが、少なくとも常流、射流の両領域にわたって Lagrange 的乱れ特性である $\sqrt{u^2}/U_*$ が変化することが確かめられた。ここで

興味ある実験的事実は Euler 的乱れ特性である $\sqrt{U_E^2}/U_*$ が Froude 数によって増加し、Lagrange 的乱れ特性である $\sqrt{u^2}/U_*$ が反対に減少していることである。現在のところ、これらの実験的事実を明解に結びつける理論はないが、理論化の方向とともに、詳細で系統的な実験の集積が望まれる。

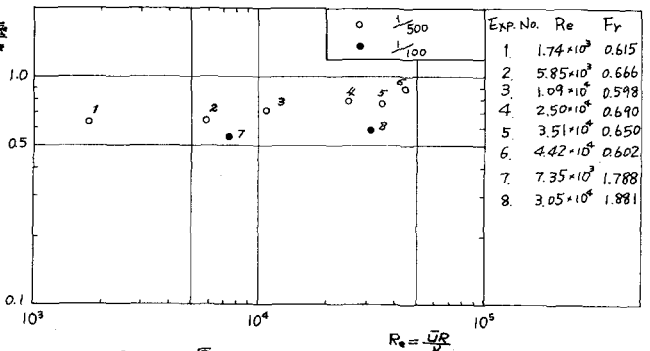


図-2 $\sqrt{u^2}/U_*$ 分布

4. まとめ 以上の実験的事実より明らかにされることは、開水路流れの乱れ特性のなかの $\sqrt{u^2}/U_*$ 分布は、それに対する Reynolds 数の効果も認められるが、一般的な傾向として Froude 数の効果が認められたということである。これは非常に微妙な問題であるだけに多大な労力を要するであろうが、開水路流れの乱れ特性を解明しようとするときに重要な課題の一つとなると思われる。

参考文献

- 1) Ljatkher, V. M. "Calculation of Spectra of Turbulent Pulsations in Uniform Flows" Proc. 12th Congress of I.A.H.R., vol. 2, p17~p.25 (1967)