

射流・常流が混在する円管開水路流れの満流化の数値解析に関する研究
 Study of solving pipe-flows and mixed free-surface-pressurized flows in the Circular Conduit

島田 正志 ○谷脇 健一
 SHIMADA Masashi TANIWAKI Kenichi.

1. まえがき

開水路流れからの満流化とその逆過程の現象は、農業用水システムに限らず都市排水網でも発生する。実務的な1次元水理解析法としては Preissmann 法が、満流化後の解析には仮想的なスロットを用いたスロットモデルが、最も良く使用される。しかし急勾配部では限界断面が生じるため、限界流の発生・消滅、跳水、および、開水路・管路の相互移行流れを扱うことができる実務的方法が必要である。これに応じ限界流の発生・消滅、跳水を扱える*1 Chang-Moll scheme(CMS)による円形断面での満流化解析について報告する。

2. 基礎方程式 (Saint Venant 方程式) および差分方程式

$$\partial U / \partial t + \partial G(U) / \partial x = S(U) \quad \text{Eq.(1)}$$

ただし、 $U = (A, Q)^T$, $G = (Q, Q^2/A + gI_1)^T$,

$S = (0, gA(i - i_f))^T$, $A =$ 断面積, $Q =$ 流量, $gI_1 =$ 断面に作用する静水圧, $i =$ 水路勾配, $i_f =$ エネルギー勾配。差分式は、Eq.(1)を四分の一格子(図1)で周回積分したChang-Moll scheme(CMS)を用いる。2段階陽差分CMSは変数として U とその空間微分 U_x を各格子点で有し、簡単な計算アルゴリズムの中に U_x を用いた数値振動抑制機能がある。

3. スロットモデル

本解析では満流化したとみなすまでの諸量全てを、近似を用いない θ の断面特性として厳密に表現した。また満流化したとみなせる区間においては水が仮想スロット内に浸入したと想定し、新たに諸量を与えて開水路として計算した。みなす、という表現を用いたのは、完全に満流化してしまう前に諸量を満流化時のものに切り替えたためである。

水路上端($\theta = \pi$)に近い位置で適当な θ_f という量を設定し、水面が θ_f に達した時点でスロット下端に水面が到達したと判断し、断面特性の諸量の表現を切り替えた。具体的な数値は $\theta_f = 3.10(\text{rad})$ である。

今回 Chang-Moll 法での計算にスロットモデルを適用したことは新しい試みである。

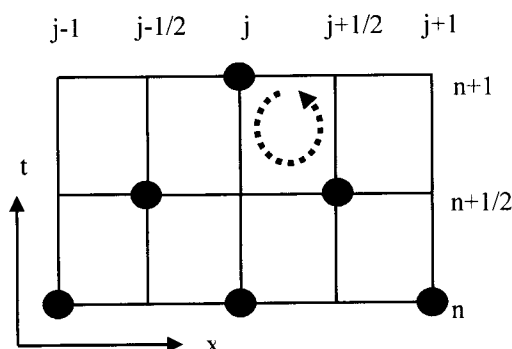


図1 格子における周回積分

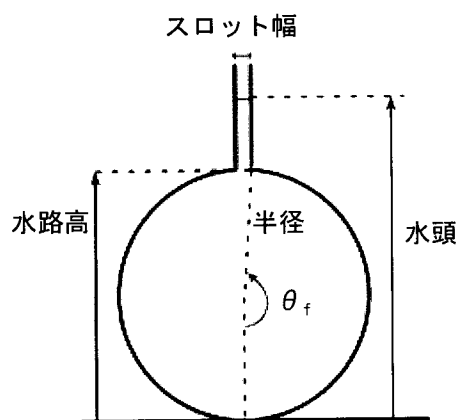


図2 スロットモデル概念図

4. 解析対象

対象水路は半径は 0.85m の円形断面で、結合された 3 水路では勾配が上流から 0、1/50、1/2000 と変化する(図 3)。初期条件は流量 0.2 トン毎秒の定常流水面、ここから 360 秒かけて 4.5 トンまで増加させた。境界条件は上流端で前述のように流量を与え、下流端は堰を設けて限界断面とした。単位時間格子は 0.05 秒、単位空間格子は 2m とした。

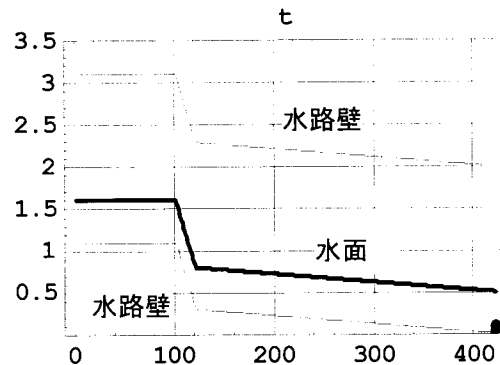


図 3 解析対象水路参考図

5. 限界断面の発生する勾配変化部における計算方法

勾配の不連続性を連続的に扱うために水路結合点を挟む内点格子に注目した。結合点境界における 2 段階計算の第 1 段階では両側水路の内点計算で、上流側では上流水路勾配、下流側では下流水路勾配を用いて計算する。次に第 2 段階では中間点の値を用いて、平均勾配、平均粗度を導入(図 4)すれば、4 つの差分方程式は、内点計算に帰着する。このことにより、複合流れ場の計算での限界断面計算が可能になった。

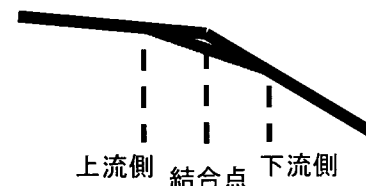


図 4 平均水路勾配の導入

6. 解析結果と考察

解析の結果は 3D グラフで表現した。図 5 は満流化後に非物理的な数値振動が発生した状態である。縦軸と横軸は図 3 と同じく水頭と格子点番号、紙面奥方向の軸は水路幅を表している。

u_x による数値振動抑制機能が満流化している格子では十分に機能していないことが振動の原因だと考えられる。このため満流化流れを剛性とみなし満流化区間では $u_x = 0$ として再び解析を行った(図 6)。結果、振動は発生せず、水路のほぼ全体に渡って満流化が見られるまで計算することができた。

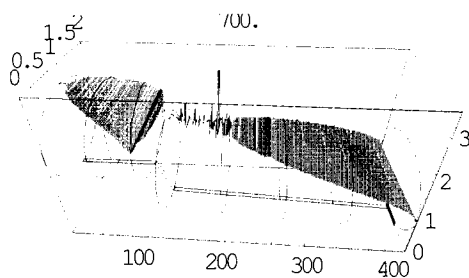


図 5 解析 case1: 数値振動の発生

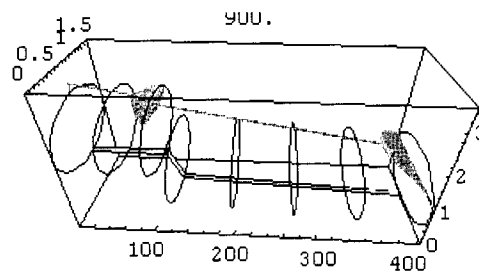


図 6 解析 case2: 剛性的扱いによる解析

射流・常流、跳水の混在する流れ場においても、開水路流れから満流化への変化を安定して計算した結果を示すことができた。また、 u_x の取り扱いについて新たな一案を提示した。

本研究が Chang-Moll 法の実用化に向けての有用な足がかりとなることを期待したい。

*1 M. Shimada, K. Togawa, H. Inagaki, Explicit Chang & Moll Scheme of Computing Unsteady Flows in Open Channels, Pressure Surges And Fluid Transients in Pipelines And Open Channels, Edited by J. Boldy, Bhrg Publications, 451-468, 2000