II-291　直接数値計算による二次元地形上の高レイノルズ数の流れの解析

東京工業大学大学院　学生員　奥村卓也
清水建設　正員　孟　岩
東京工業大学工学部　正員　日野幹雄

1　はじめに

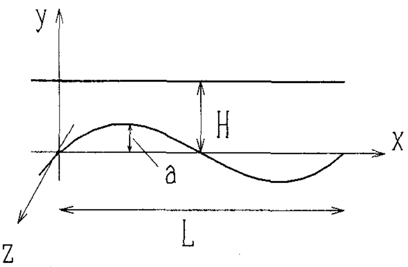
二次元地形上の流れの数値解析には従来摂動法がおもに用いられてきた。しかしそれが取り扱える領域には限りがある。また他の方法でも地形効果が考慮しにくいなどの理由により、高レイノルズ数の二次元地形を扱ったものは殆どみられない。しかし境界形状が遷移域や乱流域の流れに及ぼす影響は興味深い。そこで本研究では直接数値計算によりＲｅ＝５０００で二次元正弦境界をもつ流れの解析を試みた。

2　計算方法

基礎方程式は無次元化したナビエストークスの方程式、及びその両辺に発散をとり常に次の時間で連続式を満たすように補正項を加えた圧力に対するポアソン方程式である。

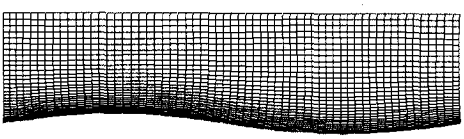
$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\cdot \mathrm{grad})\mathbf{v} = -\,\mathrm{grad}\ p + \frac{1}{R_e}\Delta \mathbf{v}$$

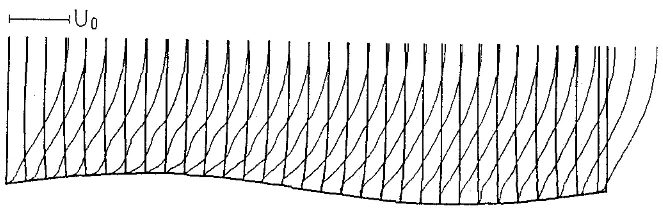
$$\Delta p = -\,\mathrm{div}(\mathbf{v}\cdot \mathrm{grad})\mathbf{v} + \frac{1}{\Delta t}\mathrm{div}\ \mathbf{v}$$



図－１　境界形状

時間微分についてはオイラーの前進差分表式を用いた。非線形項については河村スキームを用い、他の空間微分は中心差分を利用した。波状地形を扱う場合、境界に沿った直交座標系をとる必要がある。そのため本研究ではRyskinらの方法を用いた。
座標系を図－１に示す。今回は二次元波状境界として、正弦境界を与えた。
境界条件は流下方向及び横断方向には流速圧力共に周期境界条件を与え、また鉛直方向は低面で流速はノンスリップ条件圧力は一階微分ゼロとし、上面では共に一階微分ゼロとする。壁面上でのノンスリップ条件を厳密に満たすため、鉛直方向には不等間隔格子を用いた。またメッシュ数（ｘ，ｙ，ｚ）＝（６２、３１、２２）である。直交した後のグリッドを図－２に示す。


図－２　直交化したグリッド



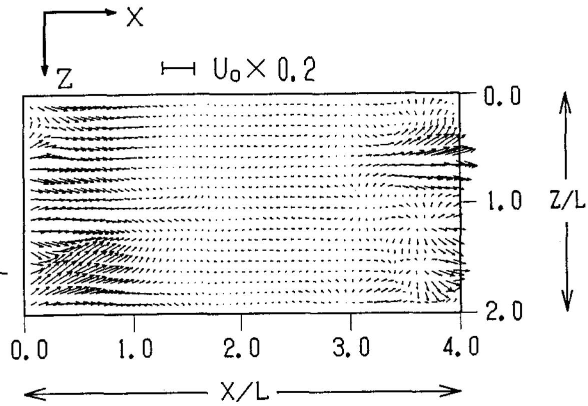
図－３　横断方向に平均した主流のプロファイル

平均水深	H (cm)	６．２
波長	L (cm)	２５．４
振幅	a (cm)	０．５６１
無次元量		
	Ｒｅ	５０００
	Ｑ	２／３

3　計算結果と考察

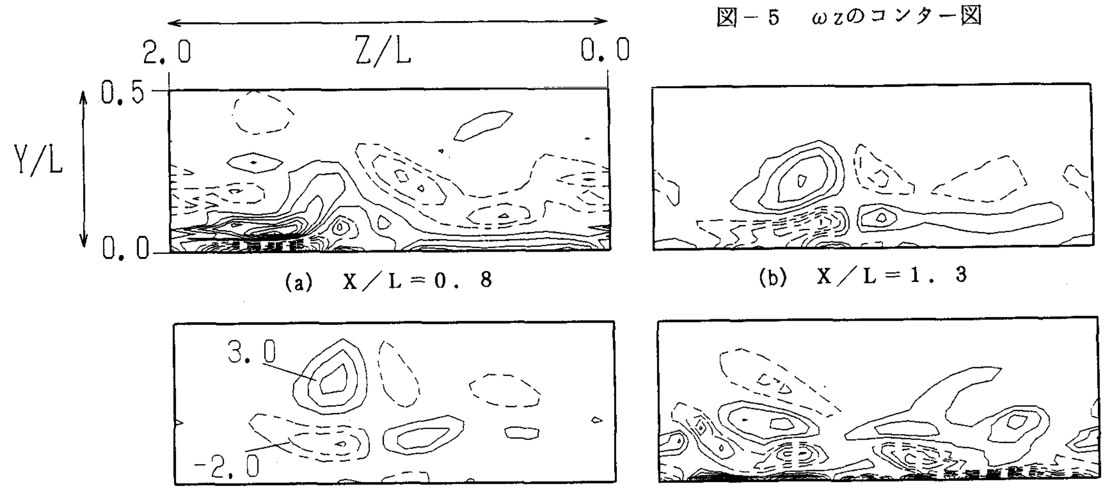
計算条件は表に示す通りである。主流の初期条件は二次曲線で与えた。また横断方向に主流の１パーセント程度のノイズを与えた。これから示す結果は無次元時間スケールでＴ＝４０の結果である。図－３に主流の平均プロファイルを示す。これは地形を考慮し横断方向に平均化を行ったものである。クレストの部分では迫り出し、谷の部分では痩せるという形になっている。部分的に弱い剥離が起きているがこれは完全に乱

流状態になっていないためだと考えられる。境界に沿ったｕｗベクトルを図－４に示す。これはｊ＝１の断面、つまり壁面のワンメッシュだけ上の断面であるが、ｘ／Ｌ＝０．１～０．８付近で中央付近に速度成分ｗ成分の集中がみられる。下りとなるｘ／Ｌ＝１．０～３．０まではｕ、ｗ共に強くは現れない。また上りとなるそれ以降はｕ、ｗ共にあらたに挙動を見せる。渦度成分ωｘのコンター図を図－５に示す。これでは実線が正を点線が負を表し、またコンターの間隔は共に１．０となっている。速度成分ｗの集中がみられた箇所(a)ではωｘが壁面上で正負が対になっている様子が分かる。これを流下方向に追って行くと(b)(c)の様になる。つまり下り勾配となった所で壁面より離れ(b)、上方に向かいながら弱まって行く(c)。そして上りとなっている箇所で壁面付近に新たに強い渦度を生成して行く(d)。このωｘによる横断方向の混合が２次元的な現象から３次元的な現象に変化させるものと考えられる。この挙動は壁乱流の遷移過程に於けるＴ－Ｓ波存在下でのωｘの発生に類似しており、境界形状がＴ－Ｓ波の役割を果たしていると考える事もできる。



図－４　ｕｗベクトル

図－５　ωｚのコンター図



(a)　Ｘ／Ｌ＝０．８

(b)　Ｘ／Ｌ＝１．３

(c)　Ｘ／Ｌ＝２．０

(d)　Ｘ／Ｌ＝４．０

４　おわりに

本来は流れの経時的変化や乱流統計量また瞬間像などの議論がしたかったのであるが、積分時間が十分でなかったために乱流としての議論ができなっかった。この方法を継続すればｆｕｌｌｙ　ｄｅｖｅｌｏｐの乱流の議論がなせると考えられる。

本研究を行うにあたり、Ｎ－Ｓコードを提供してくださった岸弘之氏（運輸省）神田学氏（東京工業大学）に深く感謝します。

参考文献　Direct Simulation of a Turbulent Inner Flow by Finit-Differnce Method
: Tetuya kawamura (1985)
直接数値計算による任意波状境界をもつ２次元及び３次元波状曲面上の流れ：　孟　岩(1992)