低速横移動下の船体に働く流体力に関する研究—IV.

— 3 次元CFD法を用いた浅水域の計算 —

李 允石*・戸田 保幸**・定兼 廣行***

Hydrodynamic Forces Acting on a Ship Hull under Lateral Low Speed Motion-IV. — Shallow Water Calculation Using CFD Method —

Yun-Sok LEE, Yasuyuki TODA and Hiroyuki SADAKANE

Abstract

In order to know the hydrodynamic forces acting on a ship hull undergoing lateral berthing maneuver, it is necessary to develop a reliable estimation method of hydrodynamic force for accurate time-domain simulation of berthing process. In our previous reports^{(1)~(3)}, we have demonstrated the feasibility and validations of CFD technique for time-domain simulation of transient flows induced by lateral ship motion. And we have been also proposed the simplified formulas for the added mass coefficients based on the potential flow theory⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

This paper deals with the influence of water depth on the hydrodynamic forces in shallow water. The CFD computation was made to investigate the hydrodynamic forces acting on a Wigley model moving laterally in the water depth/draft ratio H/d 2.0 and 1.5 respectively. The numerical solutions successfully captured not only the characteristics of hydrodynamic force but also some interesting features of transient flow for the shallow water. Also, these numerical results were in good agreement with experimental results by water tank model test.

Key words : berthing maneuver, shallow water, transitional hydrodynamic forces, CFD simulation, lateral drag force

キーワード : 接岸, 浅水, 過渡流体力, CFDシミュレーション, 横力

1. 緒 言

船舶の港内操船、特に離着栈のような横移動は停止と移動を組み合わせた非定常運動であると同時に運動距離が短いので過渡的に変化する流体力を無視できない。また港内の船体横移動は特に水深が比較的浅いため、水深による流体力の変化を正しく把握する必要がある。そのため、浅水域で横移動する船体に働く流体力を実用的で簡便に推定できる概算式

が求められている。

著者らはこれまでに、離着栈など低速横移動下の船体に働く複雑な流体力を慣性力と横力に分け、実験及びCFD法 (Computational Fluid Dynamics) を用いてこれらの流体力に関する研究を行ってきた^{(1)~(7)}。この内、慣性力については、3次元ポテンシャル計算法を用いて水深の変化と船種・船型の違いを考慮した付加質量の推定式を提案した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。横力については、模型実験を基とした推定式が提案さ

* 学生会員 神戸商船大学大学院 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

** 正 会 員 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

***正 会 員 神戸商船大学 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

れているが⁽⁶⁾⁽⁷⁾、実験精度に検討余地が残されており、また過渡横力の流体力学的説明が必要とされることからCFD手法を用いて解析を行ってきた^{(1)~(3)}。そこではまず3次元CFD法を用いて3次元平板が深水のオープン海域で真横に移動する運動について計算し、過渡流体力の発生機構や性質等の理解を得ることができた⁽¹⁾。次に数式船型であるWigley船型を対象に深水域におけるCFD法の有効性及び適応可能性を確認した⁽²⁾。また船体の横移動により発生する渦の運動と過渡横力との関連を説明し、船体周りの3次元非定常流れの特徴や過渡流体力に影響を及ぼす渦の運動等について考察・検討を行った⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、有限水深の浅水域の場合に流体力がどのような変化を示すかについては、これまで詳細に検討されていなかった。また本研究と関連が深いものとして離着岸時の船体周りの非定常運動を計算した研究⁽⁸⁾があるが、船体に働く流体力を直接示してはいない。また水深の違いによる流体力の差を数値計算法により検討した研究はあまり見当たらない。港湾内で行われる船舶の離着岸は水深の制限を受ける場合が多く、水深の違いによる流体力の相違を物理的に理解することが今後低速横移動下の船体に働く横力をモデル化する上で重要であると考えられる。

そこで本研究では、前報の深水域の計算法から周辺条件を変えて水深の違いによる流体力を3次元CFD法により解析し、計算例を基に比較・検討する。計算対象は比較的単純な数式船型のWigley船型であり、横移動の運動モードは定加速度試験法に対応させる。最後に数値計算結果の精度を確認するため水槽実験を実施し、比較・検討を行う。

2. 計算対象及び計算法の概要

港湾内でタグ操船の支援を受ける場合の船体横移動速度は通常0.3 m/s以下であり、船体の幅を採ったフルード数 F_n は非常に小さい値であることから計算上では自由表面の影響は無視した。また普段船舶の入出港時の余裕水深 (Under Keel Clearance) が喫水の0.5から1.0倍程度であることから、喫水水深比 H/d が1.5と2.0を計算対象とした。

2.1 計算対象及び計算格子

計算対象となる流場は大型タンカー等がオープン海域の浅橋に離着岸することを想定し、船体が静止状態 (無次元時間 $T=0.0$) から等加速運動 ($T=1.0$ まで)、等速運動 ($T=3.0$ まで)、減速運動 ($T=4.0$ まで) の後停止 ($T=5.0$ まで) させる一連の運動を模擬し計算を行った。計算及び実験の対象船型は

Fig. 1. Computational grid and coordinate system

Fig. 2. Computational grid of the surface water plane

Fig. 1のようなWigley船型を使用した。船幅で無次元化を行って表示した場合、長さ10、船幅1、喫水0.625である。従ってFig. 1に示すように座標軸は船体中央に原点をとり長さ方向に Y 、前から見て右方向に X 、鉛直下方に Z 軸を取った。計算格子のトポロジーはポアソン方程式を解いて作成したいわゆるHタイプである。計算格子数は H/d が2.0の場合 x, y, z 軸方向に $81 \times 95 \times 29$ で、 H/d が1.5の場合には $81 \times 95 \times 21$ である。Fig. 2に水線面上の計算格子を示す。計算領域は船体中心からまず移動方向 (x 方向) に流入・出境界まで $4L$ 、左右側方境界 (y 方向) まで $3L$ 、鉛直下方境界は H/d に応じて与えた。

2.2 計算法の概要

基礎方程式としてはNavier-Stokes方程式と連続の式であり、時々刻々速度が変化する船体周りの領域を取り扱うので船体とともに移動する非慣性系の座標系を設けた。また船幅 B 、移動速度 U_0 (ここでは等速になった時の速度)、流体密度 ρ 及びそれらの組み合わせで無次元化した。本研究では横移動する船体周りの非定常流場や比較的粗い計算格子で乱

流現状を捉えるための有効な方法であるSGS乱流モデル⁽⁸⁾⁽⁹⁾ (Sub Grid Scale turbulence) を採用した。SGS 乱流モデルの渦動粘性 ($\nu_t = 1/R_e + \nu_s$) は Smagorinsky による渦粘性係数 ν_s と Takakura の長さスケール⁽⁸⁾ を用いた。無次元化した方程式は独立変数 (ξ, η, ζ) を用いて物体適合座標系に座標変換すれば以下のような対流・拡散方程式の形に書くことができる。

$$\frac{1}{J} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial \xi^i} (b_i^j U_j) = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 g^{ij} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi^i \partial \xi^j} - 2 \sum_{j=1}^3 a^j \phi \frac{\partial \phi}{\partial \xi^j} = R_\phi \frac{\partial \phi}{\partial \tau} + S_\phi \quad (2)$$

離散化については、時間には1次後進差分、空間は Chen と Patel⁽¹⁰⁾ の12-Points Finite-Analytic (FA) 法を、速度と圧力の結合にはPISO法を用いた。従って1時刻ステップの計算ごとに数百回の繰り返しを要するが、FA法の係数は繰り返しごとに更新した。無次元加速度の項も1次後退差分で離散化したため現在と1ステップ前の無次元速度を用いて近似されている。FA係数やPISO法の詳細については文献を参考⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾されたい。

実際計算上では無次元移動速度 U_0 に1を、無次元加・減速度 dU_0/dt には ± 1 を入力して計算し、計算上での R_e 数は水槽実験と同程度のレイノルズ数を考え 10^5 とした。また1ステップの無次元時間隔は $\Delta t = 0.005$ (200ステップが無次元時間 $T = 1$ となる) であり、無次元時間 $T = 5.0$ まで計算を行った。

3. 数値計算結果

計算結果を無次元計算時間 T による時系列として力と移動速度 (力との混乱を避けるため負の値で示すことにする) を Fig. 3 に示す。Fig. 3 は水深の違いによる流体力の相異を比較・検討するため H/d が 2.0 と 1.5、それに深水の計算結果である H/d 7.0 の計算結果を加えて示した。また Fig. 3 の力 (F) と移動速度 (U_0) は無次元化されており、無次元加速度 1.0 の場合である。この力は実験で計測される模型等の装置の慣性力が含まれてない流体力のみである。また Fig. 3 に示した力の殆どが圧力成分であって、粘性応力成分は無視できる程小さかった。

3.1 水深の違いによる流体力の差違

3.1.1 加速運動下の流体力

計算結果から加速・等速・減速及び停止の運動モード変化の節目に現れる流体力のジャンプは付加質量に基づく流体力成分であり、その大きさは水深が一定であればほぼ加速度と減速度に比例した。これら

Fig. 3. The time history of hydrodynamic force

の流体力を深水域 H/d 7.0 の付加質量係数 m_y' 1.76 を基準とした倍数 (付加質量係数比 K_y) で示すと、 H/d が 1.5 と 2.0 の場合各々 1.49, 1.23 であった。著者らが提案した浅水域の付加質量に関する近似式から K_y を求めると、 H/d が 1.5 と 2.0 の場合各々 1.96, 1.38 で深水域の付加質量係数 m_y' は 1.94 であった。CFD 計算と近似式から K_y と m_y' を比較すると近似式の方が少し大きい結果であった。しかし、今回の Wigley 船型は方形係数 C_b が 0.4444、 d/B が 0.625 であって実際近似式の適用範囲 ($C_b: 0.6 \sim 0.8$, $d/B: 0.3 \sim 0.5$) を超える数式船型であるので比較に無理があるが、近似式によりおよその推定は可能である。加速開始直後から T が 1.0 になるまでの加速運動中の力は速度の増加に伴い徐々に大きくなり、水深が浅い H/d が 1.5, 2.0, 7.0 順で増加率が増していく。これは横力が水深に依存して異なることを示しており、浅い水深ほど横力が大きくなるためである。

3.1.2 等速運動下の流体力

加速運動後の流体力は、速度が一定になった瞬間に加速開始直後とほぼ同じ流体力が瞬時に落ち、その後減少していく。しかし、等速運動下の過渡流体力の減少傾向は水深によって少し異なり、水深が浅い H/d 1.5 の場合が H/d 2.0 と 7.0 に比べ減少率が大きくて早く減じていく。また浅くなるに連れて過渡流体力の性質も顕著に現れ、過渡横力が一番大きく現れる $T = 1.2$ 付近の数値は、 H/d 2.0 では深水 (H/d 7.0) の約 1.7 倍で、 H/d 1.5 では約 2.9 倍程度大きかった。しかし、減速運動直前である $T = 3.0$ での過渡横力は H/d 1.5 と 2.0 の場合が各々 H/d 7.0 の約 2.2 倍と 1.8 倍であって、 $T = 1.2$ に比べると H/d 1.5 の場合は小さくなり、 H/d 2.0 の場合はやや大きくなった。これらに関する流体力学的な検討を次節で流線や渦度分布等を用いて説明する。

3.1.3 減速運動下及び停止後の流体力

減速運動中 ($T = 3.0 \sim 4.0$) の流体力は、減速開始

Fig. 4. Pressure distribution on the surface hull

直後に付加質量分に起因する慣性力が逆方向に働くためにここで急に落ち、後は減速と共に減少していくが変曲点を持っている。水深により流体力の変化を比較すると、加速時の流体力と同じように減少量が一番大きかったのはH/dが1.5で、次にH/d 2.0、7.0の順であった。そして、T=4.0でのピーク値の負値はH/dが1.5、7.0、2.0の順であった。これは、まずH/dが1.5の場合には、浅水の影響が著しく現れるため減少量と付加質量（1.76倍）が大きいためT=4.0時の負値も当然大きくなる。一方、H/d 2.0の場合はH/d 7.0に比べ減少量と付加質量（1.23倍）は大きい、T=3.0時点での流体力がH/d 7.0より1.8倍大きかったのでT=4.0時点で負値がややH/d 7.0より下回る結果になった。

停止後の力は停止直後にまた力のジャンプが見られ、その後時間経過と共にゆっくり0に戻って行く。停止後の負の流体力もH/dが1.5、7.0、2.0順であって、これらの流体力は停止中の船体を横移動方向にさらに押す作用として働く。

3.2 船体周りにおける圧力・渦度等の分布

次に船体周りの圧力分布、渦度分布 ω (ω_x , ω_y , ω_z) 及び瞬時流線を可視化し、浅水域の影響と非定常流れの特徴等について述べる。以下の各Fig.には比較のため、H/d 2.0をFig. (a)に、H/d 1.5をFig. (b)に示す。

3.2.1 船体表面の圧力分布

Wigley船型の船体表面に働く圧力分布をFig. 4に示す。Fig. 4の圧力分布は喫水を4倍拡大したもの

であり、(a)、(b)の各上段には前面の圧力、下段には背面の圧力を示す。時間経過に伴う圧力分布の変化傾向は前報⁽¹⁾⁽²⁾の深水域とほぼ同様であるが、水深が浅くなるにつれて船体表面に働く圧力の大きさはいずれの時間においても大きかった。特に正・負の最大力が働くT=1.0と4.0の場合その大きさがH/d 2.0よりも1.5が相対的に大きくなっている。また船体表面に働く正・負圧は共にH/d 2.0よりは1.5の場合が比較的船首尾・喫水方向にかけて全体的に大きく広がっている様子が見られる。等速運動下の表面圧力をみると、H/d 2.0の場合深水域と同様に時間経過とともに前面の圧力はあまり変化せずに背面の負圧が下がる傾向であったが、H/d 1.5の場合には少し異なって船体前・背面圧力が共に下がる傾向を示した。そのため等速運動下の流体力(3.1.2節)の考察で、深水に対する過渡横力の比較がT=1.2よりT=3.0時点でH/d 2.0が大きかったと考えられる。

3.2.2 水線面の圧力分布

H/d=2.0と1.5の水線面上の圧力分布を比較してFig. 5に示す。船体は船首尾方向に関しては対称であることから原点を基準にして右半分のみを書いたものであり、船体は右から左に移動する。まず時系列により全体傾向は深水域の横移動のものと同様であるが、船体周りの圧力分布は深水域のものに比べかなり大きく作用している。特にH/d=1.5の場合には2.0に比べ、加速・等速運動中船体周りの正・負圧の領域が広がっており、またH/d=1.5の場合に

Fig. 5. Pressure distribution on the water surface plane

Fig. 6. Instantaneous streamlines on the water surface

は船首端から発達する渦の影響を強く受けるため船首尾付近の圧力分布が2.0とは顕著に相異なる。T=4.0と5.0の場合、船体背面周りの正圧の形が大きく異なっており、浅くなるにつれて圧力の強さや範囲が増していくことが分かる。また船体前面周りの負圧もH/d 1.5の方が2.0より幅広く広がっている。

3.2.3 水線面の瞬時流線

次に水面上の瞬時流線（模擬アルミ粉写真）をH/d=2.0と1.5を比較してFig. 6に示す。圧力分布と同様に船体は右方向から左に移動し、船首尾付近の流線数と写真の露出時間は各時刻によって異なってい

る。まず加速・等速運動中の船体前面の流線は船首尾両端から渦が発生し、発達する様子が見られるが、H/d 1.5の方が船首尾方向に回り込もうとする流れが強いため、H/d 2.0に比べ少し船体中央から船首尾方向に向かう流れが大きくなっている。また船体背面の後流の範囲もH/d 1.5の方が大きい。減速・停止後の流れは船体の後方から前方に向かう流れの存在により少し複雑であるが、浅水では船底を通る流れよりも船首尾を回る流れがより顕著となる。また船体の前面周りの流れをみると、H/d 1.5の方が船首尾を回った後、船体中央部分に向かう流れが支配

Fig. 7. The vorticity distribution at mid-section

Fig. 8. Transitional 3D vortex structure around the ship

的に多くなっていることが分かる。

3.2.4 中央断面の渦度分布

Fig. 7には船体中央断面の渦度 ω_y の分布を H/d 2.0と1.5を比較して示す。時計回りの渦度を負に、反時計回りの渦度を正にしたものである。船体の加速・等速運動に伴い船底の下から渦が発生、発達、放出され後方に流れて行く様子が見られる。また深水域との相異としては船体の横移動が水底に影響を与えるため水底にも船体周りの渦とは逆向きの渦が発生し発達している。渦の強さと及ぼす範囲は水深が浅い程大きくなり、また水底に制限されるため渦が船底下方よりも後流方向に伸びて行くことが分かる。減速・停止後の運動においては後方に流れた渦が前方に動き、船底には逆向きの渦が新たに発生し

前方に流れて行く様子がみられる。さらに水底にはこれに反して逆の渦が作られている。

3.2.5 3次元渦度分布

船体横移動下における船体周りの非定常流れの特徴や過渡的な3次元渦度分布等を考察するため、また X 軸方向が主な流れであることを考え $\sqrt{\omega_y^2 + \omega_z^2} = 7.0$ とした等渦面分布をFig. 8に示す。これらにより主流方向に対する3次元渦度分布を見ることができる。まず各時間における渦度分布をみると、加速・等速運動中には船底から剥離された渦が後方に放出され、また船首尾両端からも渦が放出され後方に流れて行く。しかし、 H/d 2.0よりは1.5の方が船首尾を回って後方に流れる渦が大きくなっている。さらに船体の横移動が水底に影響を与え、

水底にも船体や後流の周辺に渦が発生し後方に伸びて行く様子がみられる。特に H/d 1.5の場合、船首尾両端には幅広い領域にかけて分布している。減速・停止後の渦度は後方に流れた渦が船体に再び近付いて船底の下や船首尾を回り込んで前方に流れて行く。Fig. 8から低速横移動下の船体周りの非定常流れは過渡的な特質が強く、さらに3次元的な渦構造になっていることが分かる。

4. 計算と実験との比較・検討

Wigley船型に対する比較実験の計測は神戸商船大学浅長水槽で、水深喫水比 H/d に水深を合わせ、また水底の凹凸の影響をなくす為に水底に平面な鉄板を広く引いてその上で船体を横移動させた。実験で用いたWigley模型の形状及び実験様子をPhoto. 1に示す。実験は計算と同様の運動モードの定加速度試験を実施した。また今回使用した駆動装置は約1mの範囲内で船体を自由に移動させるパソコン制御方式のサーボモーターシステムである。この装置は速度・加速度等の設定を全てパソコンによって自由に制御することができる。流体力の計測には船体の上部に取り付けた3分力計で慣性力を含む力を計測し、AD変換器を通して記録し、計測された力をFFT解析により電気ノイズや外乱等を無くした。実験で使った横移動速度は0.1m/sであり、加速度は直接数値計算と比較するため移動速度と船幅を基にして無次元加速度が1.0になるように設定した。

実験ではWigley模型の質量(2.23 kg)を含んだ慣性力が混在して検出されるが、一方CFD計算結果では純粋な流体力のみであるから両者を比較するためには模型の質量による慣性力を無次元化して数値計算結果に補正する必要がある。模型の慣性力を計算結果に補正し、実験結果を計算と同様に無次元化した時系列データによる力(F)と速度(U_0)を比較してFig. 9に示す。実線が計算結果であり、点線が実験結果である。また速度は力との混乱を避けるためマイナス側に表した。

まずこれらの比較から計算結果と実験結果は全体的な傾向としては良好に一致しており、CFD法が十分な精度で実験に代わり得ると考えられる。ただし、加速・減速・停止後の流体力についてはやや計算と実験の相違が見える部分もある。これらの原因として、実験からは駆動装置や3分力計等の機械的な特徴に起因するものが考えられる。また計算法では計算格子の依存性や乱流モデル等今後若干の検討事項が残る。しかし、CFD法を用いて浅水域における低速横移動下の船体に働く流体力が十分推定可能である

Photo. 1. Configuration of experiments

Fig. 9. The comparison of hydrodynamic forces between computations and experiments

と思われる。

5. 結 言

深水域の数値計算から周辺条件を変えて浅水域にCFD法を適応させ、数式船型であるWigley船型を用いて静止、加速、等速、減速そして停止の一連の運動をさせた場合の船体に働く非定常流体力を求めた。次いで実験により計算結果を検証した。また船体周りの圧力分布と渦度分布及び流れ場を表示して、浅水域を横移動する場合に起こり得る非定常流体力の特徴等について知見を得た。本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- 1) 浅水域における流体力は計算結果と実験結果が良好に一致しており、本論で使用のCFD手法の有効性が確認された。
- 2) 浅水域の付加質量は、深水域に比べ水深・喫水比 H/d 2.0では約1.23倍、 H/d 1.5では1.49倍であり、最大過渡横力は H/d 2.0が約1.7倍、 H/d 1.5が2.9倍であった。水深が流体力に大きく影

響を与える重要な要素であることが確認でき、流体力の詳細な比較・検討が可能となった。

- 3) 水深の違いによる非定常流れの特徴や過渡流体力について圧力分布、渦度分布及び瞬時流線等の視覚的な情報を用い、浅水域に現れる流れの特徴等の浅水影響について流体力学的な理解を得た。

今後は、実船形状を対象にした計算を行うとともに周辺条件の拡大を図る必要がある。また計算から得られた流体力をできるだけ使いやすい形にモデル化していくことも大事である。最後に本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金による補助を受けたことを記し、関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 戸田保幸・李 允石・定兼廣行：低速横移動下の船体に働く流体力に関する研究—III., —3次元CFD法を用いた基礎的検討一, 日本航海学会論文集 第106号, pp. 87~95, 2002.
- (2) 戸田保幸・李 允石・定兼廣行：Numerical Investigations of Hydrodynamic Forces Acting on a Ship Hull under Lateral Low Speed Motion, 関西造船協会論文集 第238号, 掲載予定, 2002.
- (3) 戸田保幸・定兼廣行・柳谷昌信・李 允石：低速横移動下の船体に働く流体力に関する研究—I., —二次元CFDを用いた基礎的検討一, 日本航海学会論文集 第100号, pp. 103~111, 1999.
- (4) 定兼廣行・戸田保幸・李 允石：浅水域における船体付加質量係数と船首揺付加慣性モーメント係数の簡易推定式, 日本航海学会論文集 第105号, pp. 11~20, 2001.
- (5) 李 允石・戸田保幸・定兼廣行：低速横移動下の船体に働く流体力に関する研究—II., —非粘性流法を用いた浅水域付加質量の計算一, 日本航海学会論文集 第102号, pp. 87~95, 2000.
- (6) 定兼廣行：静止から横移動を開始する船体の横力係数に関する検討, 日本航海学会論文集 第95号, pp. 193~200, 1996.
- (7) 定兼廣行・戸田保幸・丹藏善治：減速横移動する船体の平均横力係数, 日本航海学会論文集 第98号, pp. 277~284, 1998.
- (8) Takakura, Y., S. Ogiwara and T. Isiguro : Turbulence Models for Transonic Viscous Flow, AIAA, paper 89-1952 CP, 1989.
- (9) 渡辺 修・朱 明・宮田秀明：有限体積法による自由表面を含む船体まわりの粘性流のシミュレーション, 日本造船学会論文集 第171号, pp. 27~39, 1992.
- (10) Patel, V. C., H. C. Chen and S. Ju : Solutions of the Fully-Elliptic Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations and Comparisons with Experiments, Journal of Computational Physics, Vol. 88 No 2, pp. 305~336, 1990.
- (11) Tahara, Y. : Computation of Viscous Flow around Series 60 Model and Comparison with Experiments, 関西造船協会誌 第220号, pp. 29~47, 1993.
- (12) Nakaoka, T. and Y. Toda : Laminar Flow Computation around Fish Like Motion Wing, Proc. of Inter. Offshore and Polar Eng. Conference, Osaka, Japan, Vol. 3, pp. 530~580, 1994.

質 疑 応 答

久保雅義 (神戸商船大学) :

- (1) 今後 $H/d \approx 1.1$ 等の計算結果を出して頂くと現実的な問題に対応できます。
- (2) 港湾の技術上の技術で評価している付加質量係数とここでの値の比較を期待します。

李 允石 : コメントを頂き有り難う御座います。以下のように考えております。

- (1) これまで深・浅水域におけるCFD法の有効性及び適応性が確認されましたので、今後はごく浅い領域に適応できるように計算格子等を検討した上で $H/d \approx 1.1$ の計算を行いたいと考えております。
- (2) 付加質量係数についてはすでに任意水深における簡易推定式⁽⁴⁾を提案しており、これが利用できますので機会を見て比較したいと思います。