

流れとの干渉を考慮した膜体の挙動 の簡易計算法

A SIMPLE NUMERICAL MODELING FOR BEHAVIOR OF FLEXIBLE CURTAIN STRUCTURE CONSIDERING INTERACTION WITH FLOW FIELD

金山 進¹・安野浩一朗²・琴浦 毅³
Susumu KANAYAMA, Koichirou ANNO, Tsuyoshi KOTOURA

¹正会員 博(工) 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

³正会員 工修 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

A time dependent 2DV numerical model for behavior of flexible curtain structure was proposed, which is composed of two-way coupling of fluid flow calculation by SMAC method and catenary model of curtain structure. The curtain structure is described as a chain of tracers traveling on flow field creating restoring force which is taken into account for flow field calculation. Trials of numerical applicability were made on behavior of curtain structure in uniform flow and sediment dumping driven flow.

Key Words : flexible curtain structure, silt protector, sediment dumping, SMAC method

1. はじめに

汚濁防止膜やオイルフェンスに代表されるように膜体は海上工事において重要な役割を担っている。膜体および係留物に作用する流体力や変形に関しては多くの調査・研究成果が蓄積され、流れや波を考慮した設計が可能となっているが、膜体の変形と周辺水の流れを互いの干渉を考慮して非定常的に取り扱う手法の研究はそれほど多くないように思われる。こういった手法は、浚渫時のグラブバケットの昇降や土砂投入に伴う励起流などを考慮して汚濁防止膜の効果を評価するような場合には有意義と考えられ、本研究では通常の流動モデルに簡単なアルゴリズムを組み込むことによる流体と膜体の連成計算方法を提案するものである。

2. 流動場と連成した膜体挙動モデル

(1) 膜体のモデル化

本モデルは現段階では鉛直2次元に限定され、膜体は図-1に示すように等間隔 Δs の点列で構成されるものとする。各点は両側に Δs の半分の長さを有するくの字形の要素を代表するものと考え、膜体法線方向の流体力（接線方向の力は無視）および膜体の水中重量（最下端点では重錘の水中重量）はここ

に集中して作用するものとする。膜体の慣性力を無視して水平方向および鉛直方向の力の釣り合いを考えると以下ようになる。

$$T_i \sin \theta_i - f_i \cos \frac{1}{2}(\theta_i + \theta_{i+1}) = T_{i+1} \sin \theta_{i+1} \quad (1)$$

$$T_i \cos \theta_i + f_i \sin \frac{1}{2}(\theta_i + \theta_{i+1}) = T_{i+1} \cos \theta_{i+1} + \gamma \Delta s \quad (2)$$

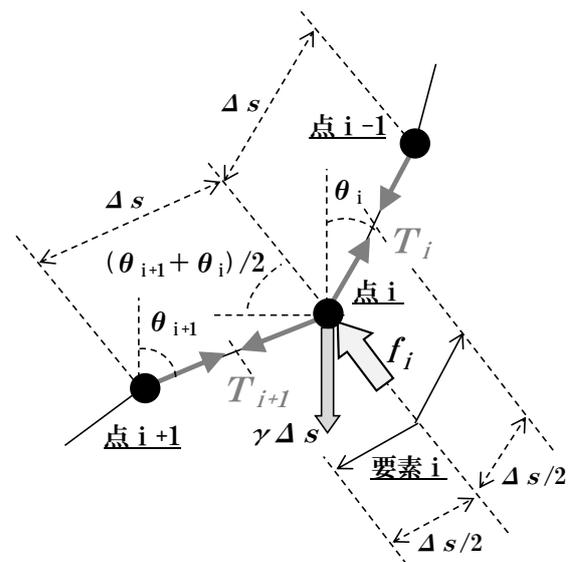


図-1 膜体のモデル化

ここで、 T_i および T_{i+1} は点 i の上と下に働く単位幅あたりの張力、 θ_i は点 i と点 $i-1$ を結ぶ線が鉛直線となす角度、 f_i は要素 i に作用する流体力、 γ は膜の単位面積当たりの水中重量である。要素番号 i は固定端（垂下式膜であれば水面、自立式膜であれば海底）を 1 とし開放端に向かって昇順に付され、開放端（要素番号 MAX）における張力および流体力は以下のように与えられる。

$$T_{MAX} = W \cos \theta_{MAX} \quad (3)$$

$$f_{MAX} = W \sin \theta_{MAX} \quad (4)$$

ここで、 W は膜先端の重錘の水中重量あるいはフローターの浮力である。

今回のモデルでは、ある時間ステップでの膜の形状が与えられた上での流体力の分布を求めて次ステップの流速計算に反映させるため、角度 θ_i は全て既知である。したがって、各要素の張力および流体力は式 (1) および式 (2) によって代数的に開放端から順次算定することができ、以下ようになる。

$$T_i = T_{i+1} + W \frac{\cos \frac{1}{2}(\theta_{i+1} + \theta_i)}{\cos \frac{1}{2}(\theta_{i+1} - \theta_i)} \quad (5)$$

$$f_i = \frac{-T_{i+1} \sin(\theta_{i+1} - \theta_i) + \gamma \Delta s \sin \theta_i}{\cos \frac{1}{2}(\theta_{i+1} - \theta_i)} \quad (6)$$

膜の各要素に作用する流体力の反力を流れの計算に反映させて流体・膜体簡易連成モデルが構築されるが、これに備えて流れの計算の各格子にこれらの流体力の反力を以下のように集約する。

$$F_{k,i} = -\frac{1}{\rho \Delta x \Delta z} \sum_{n=1}^N r_n f_n \cos \frac{\theta_{n+1} + \theta_n}{2} \quad (7)$$

$$G_{k,i} = -\frac{1}{\rho \Delta x \Delta z} \sum_{n=1}^N r_n f_n \sin \frac{\theta_{n+1} + \theta_n}{2} \quad (8)$$

ここで、 $F_{k,i}$ は鉛直方向 k 番目、水平方向 i 番目の格子内に作用する水平方向の付加項、 $G_{k,i}$ は同じく鉛直方向のものであり、加速度の次元を有し、正負は流れ場の計算における定義にしたがう。 ρ は流体密度、 Δx および Δz は水平方向および鉛直方向の格子間隔、 N は対象とする格子内に存在する要素の数、 r_n は n 番目の要素の対象格子内での存在率であり、要素全体が対象格子内に収まっている場合は 1 となる。

(2) 流れの計算との連成

今回は上記の膜体モデルを SMAC 法 (Amsden and Harllow¹⁾) に基づく流れの計算と連成させる。SMAC 法においては、前ステップの圧力場を用いて陽的に運動方程式を解いて暫定流速場を求めた後、

連続式を満たすように圧力場を補正して新ステップの圧力場と流速場を決定するが、上記の膜体モデルによる付加項は暫定流速場を算定する過程でのみ考慮し、運動方程式は以下ようになる。

$$u^* = u^n - \Delta t \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial x} + u^n \frac{\partial u^n}{\partial x} + w^n \frac{\partial u^n}{\partial z} \right) + \Delta t \sum F \quad (9)$$

$$w^* = w^n - \Delta t \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial z} + u^n \frac{\partial w^n}{\partial x} + w^n \frac{\partial w^n}{\partial z} + g \right) + \Delta t \sum G \quad (10)$$

ここで、 Δt は流れの計算の時間刻み、 (u^n, w^n) は時間ステップ n における水平および鉛直流速、 (u^*, w^*) は圧力補正前の暫定流速である。両式とも右辺の最後の項が膜体からの付加力の効果を表しており、 $\sum F$ および $\sum G$ は、対象とする流速の計算に寄与する格子、すなわち水平流速 u^* の計算であれば左右 2 格子、鉛直流速 w^* の計算であれば上下 2 格子について式 (7) および式 (8) の付加項を合計したものである。

圧力補正の過程においては膜体による付加項は考慮せず、通常通りに次式を陰的に解いて圧力補正量 δp^{n+1} が算定される。

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \delta p^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t} \left(\frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial w^*}{\partial z} \right) \quad (11)$$

$$\delta p^{n+1} = p^{n+1} - p^n \quad (12)$$

圧力補正量 δp^{n+1} を用いて、時間ステップ $n+1$ における流速場 (u^{n+1}, w^{n+1}) は以下のように算定される。

$$u^{n+1} = u^* - \Delta t \frac{1}{\rho} \frac{\partial \delta p^{n+1}}{\partial x} \quad (13)$$

$$w^{n+1} = w^* - \Delta t \frac{1}{\rho} \frac{\partial \delta p^{n+1}}{\partial z} \quad (14)$$

膜の変形によって発生する付加力を流れ場の計算に反映する方法はここまでに述べた通りであるが、膜の変形については、膜と水の間に空隙は発生せず、膜全体の長さは変化しないという前提に基づいて以下のように計算する。

まず、得られた流速場を用いて、番号 1 の固定端（垂下式膜であれば水面、自立式膜であれば海底）以外の点列をオイラー・ラグランジュ法（例えば橋本ら²⁾）によって移動させ、新ステップにおける膜体形状を決定する。しかし、膜体は水粒子と完全に一体として移流するわけではなく、膜の接線方向には相対的な滑りが許されるはずである。そこで、この段階で、膜体形状に沿って固定端から等間隔 Δs

毎に点列の位置を新しく定義しなおし、膜体の総延長が所定の値に達した時点で、それよりも先の部分を切り捨てるという処理を行う。この操作は、本アルゴリズムの遂行を容易にしている主たる要因である一方、今回のモデルにおける最も注意を要する仮定であり、その妥当性自体の検証も課題として残される。

以上の手順によって、水粒子が膜面を通過することなく膜体に変形するとともに変形した膜体を受ける流体力の反力を流れ場に反映される流体・膜体簡易連成モデルが構成される。また、膜体の効果を組み込んでもSMAC法の圧力緩和計算の負荷が増大することはない。

3. 数値計算

(1) 一様流下でのふかれの計算

図-2に、一様流の下での垂下式膜の変形計算結果を示す。水深 h が30m、膜丈長 d が18m、すなわち

膜長・水深比 $d/h=0.6$ の条件であり、重錘の単位幅水中重量 W は1.96kN/m (200kgf/m) とした。計算における離散化条件は、 Δx および Δz が1m、 Δs が0.5m、 Δt は0.02sである。垂下膜による縮流の影響を受ける前の一様流速 U として、10cm/s、30cm/s、40cm/s、50cm/s、60cm/s、70cm/s の6ケースを示した。流速発生から160s経過後の垂下膜の形状であるが、いずれのケースも変形が落ち着いた平衡的状態に達している。

流速ベクトルは膜体を横切ることなく縮流し、膜体の背後には流線剥離による時計回りの循環流を形成している。膜体は弧状に変形し、流速が大きいほど有効深さ d_e が減少しており、小田ら³⁾ が理論的に示したものと類似した傾向となっている。

こういった傾向を定量的に整理してモデルの妥当性を検証する目的で、計算結果から読み取った有効高さ d_e (流れを受けた状態での垂下膜下端の深度) を小田ら³⁾、青木ら⁴⁾、田端ら⁵⁾、安井ら⁶⁾ 等にならって次式と比較した。

$$d_e = \frac{W}{\sigma} \sin\left(\frac{\sigma d}{W}\right) \quad (14)$$

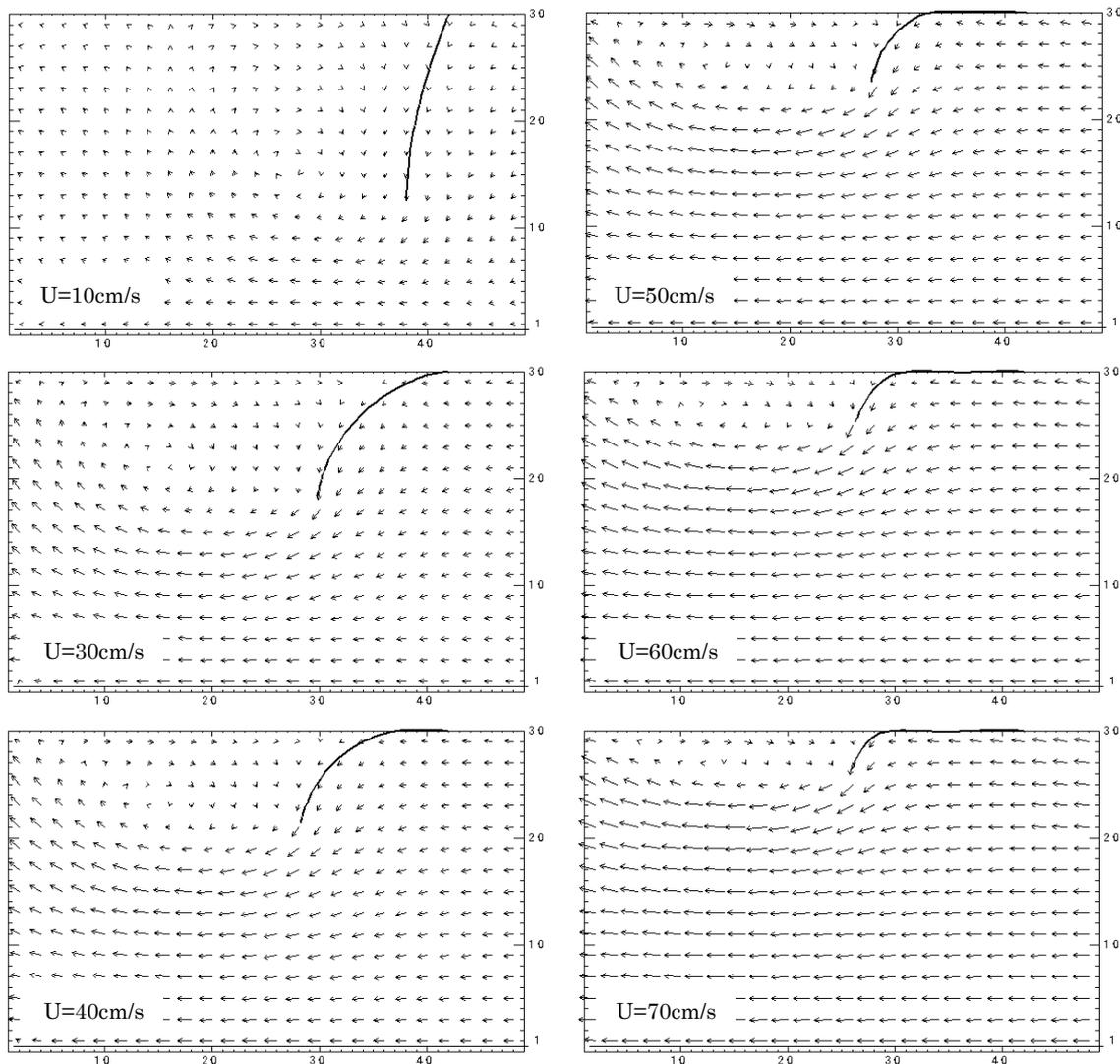


図-2 一様流下での垂下膜の変形計算の結果

$$\sigma = \beta \frac{1}{2} \rho U'^2 = \beta \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Uh}{h-d_e} \right)^2 \quad (15)$$

ここで、 d は膜丈長、 d_e は膜の有効深さ、 W は重錘の単位幅水中重量、 σ は膜の単位長さ当たりの流体力、 β は実験定数、 h は膜の設置位置での水深である。

なお、式(14)の適用範囲は $2d/\pi \leq d_e$ であるため、 d_e がこの範囲よりも小さくなった場合には、他の研究と同様、式(14)のsin項を1として取り扱う。

本モデルによる数値計算結果と式(14)による算定結果を比較したものが図-3である。田端ら⁵⁾および安井ら⁶⁾と同様に β を1.5とした場合に良好な整合を得ている。一様流下への適用における本モデルの妥当性を裏付ける結果となっている。

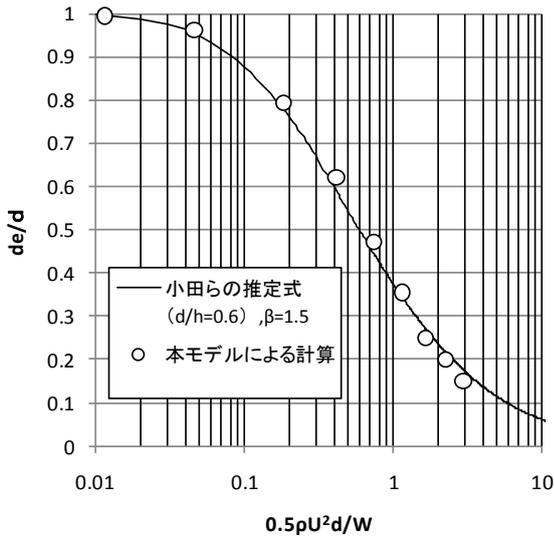


図-3 垂下膜のふかれ

(2) 土砂投入に対する試計算

膜体と流動場の干渉を考慮した非定常的な解析が本モデルの目指すところの一つであるが、こういった特徴を有する現象として励起流を伴う土砂投入の問題を対象として試計算を行った。

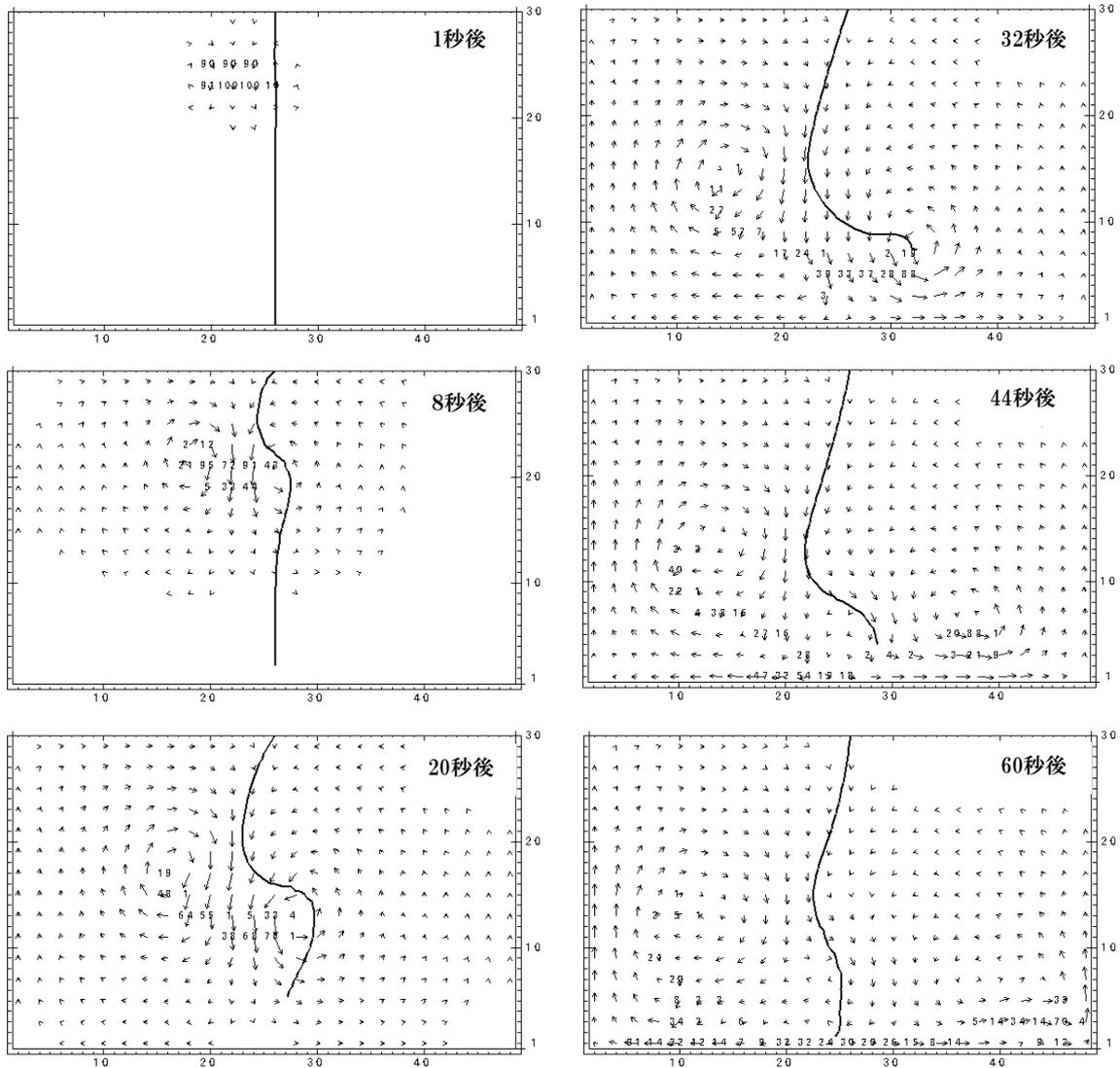


図-4 土砂投入による垂下膜の変形計算結果 (重錘重量0.98kN/m)

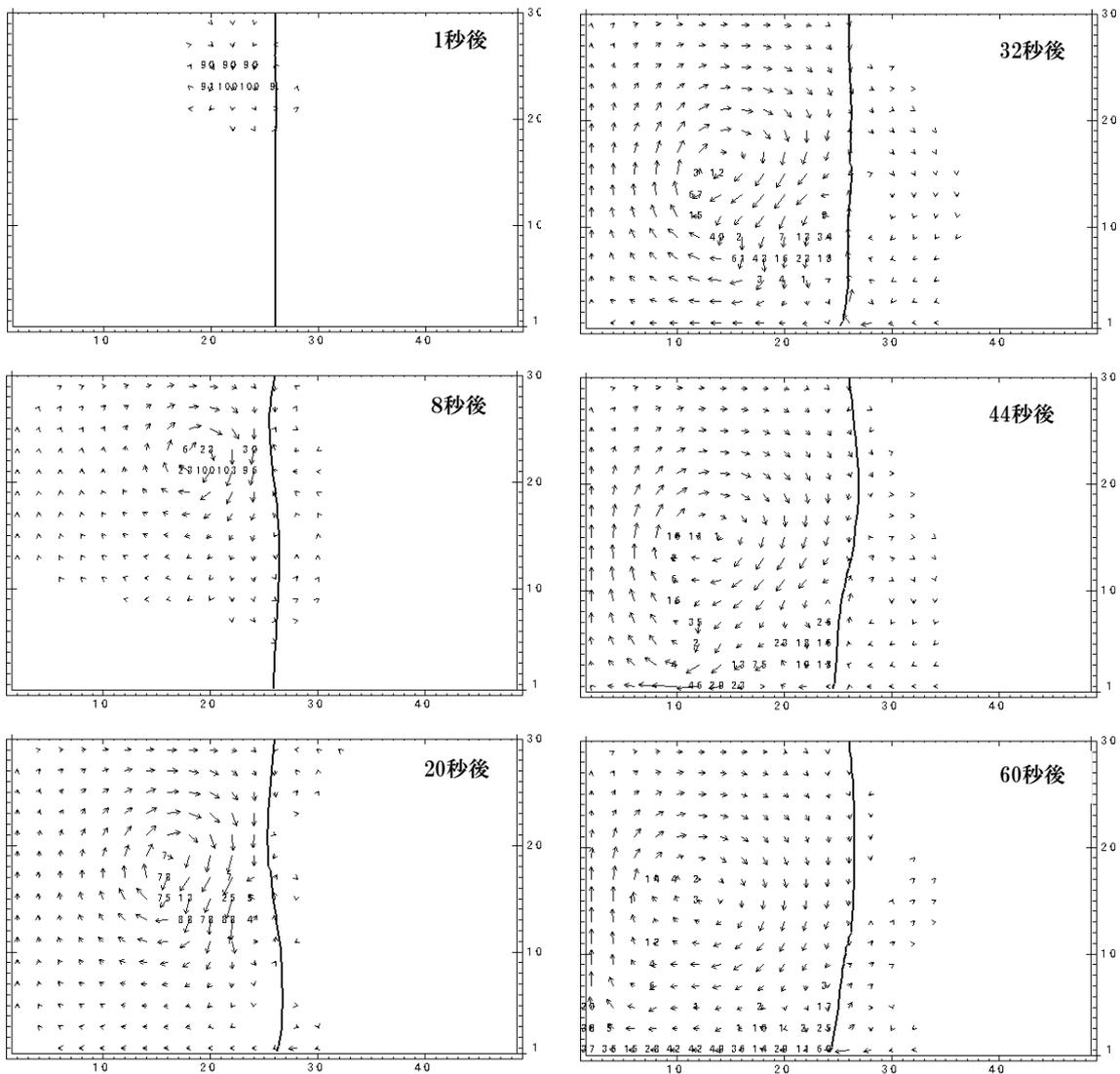


図-5 土砂投入による垂下膜の変形計算結果（重錘重量9.8kN/m）

密度流の計算と浮遊土砂濃度の移流拡散解析を伴う検討であるが、本モデルは水粒子が膜体を通ることがないように構成されているものの、現時点では、膜体が存在する格子内の浮遊土砂濃度を膜の内側・外側で分けて取り扱うことができないため、流れの計算と共通の離散格子設定の下で移流拡散解析を行った場合には数値的な漏出が生じてしまう。そこで、今回は、浮遊土砂濃度を粒子群として取り扱い、膜体モデルの節点と同様にオイラー・ラグランジュ法によって移流させ、拡散は考慮しないという手法をとった。

水深30mの水域を膜丈長30mの垂下膜で仕切り、一方にSS濃度100g/L（土粒子比重を2.65とすると含水比は約900%）のスラリーを瞬間投入した。離散化条件は一様流に対する図-2の計算と同じである。スラリー塊の寸法は水平方向6m、鉛直方向3mであり、上端が水面下5mとなる状態で解放した。垂下膜下端の重錘の単位幅水中重量 W として、0.98kN/m（100kgf/m）と9.8kN/m（1,000kgf/m）

の2ケースを設定し、図-4および図-5にそれぞれの結果を示す。濃度の単位はg/Lである。

W を0.98kN/mとした図-4によれば、スラリーの沈降に伴う励起流によって垂下膜が巻き上げられ、その下を浮遊土砂が流出している。一方、 W を9.8kN/mとした図-5では、垂下膜は多少は揺動するものの浮遊土砂の流出には至らないという結果となっている。実測結果等との比較による定量的な検証を得たものでこそないが、物理的な矛盾を伴わない蓋然性の高い結果といえることができ、膜体と流動場との非定常的な干渉が重要となるような現象への本モデルの適用に対する潜在的な可能性を示唆するものといえる。

4. おわりに

現時点では鉛直2次元問題に限定されるが、鎖状にモデル化した膜体の張力・流体力を流れの計算に

反映させることによる流体・膜体簡易連成モデルを提案した。

一様流の下での膜体のふかれについては、既往の研究成果との整合から妥当性の検証を得ることができた。また、垂下膜近傍での土砂投入に対する試計算により、膜体変形と流れの非定常的な干渉が重要となるような問題への適用に対する可能性も示唆された。

膜体の効果を組み込むことによる流体計算の圧力緩和演算への負荷の増大はなく、計算効率にほとんど影響を与えないことは簡易手法たる本モデルの特長として強調されるが、一方では、流れの計算と共通の離散格子設定の下で汚濁濃度の移流拡散解析を行った場合に一種の数値拡散によって汚濁濃度が膜体から漏出してしまおうという問題点も有している。今回は、汚濁濃度を離散粒子として扱う方法でこの問題に対処したが、この膜体モデルが通常汚濁拡散解析に広く用いられるためには離散格子上での有限差分による移流拡散解析との整合が望ましく、これはモデルの3次元化とともに今後の課題として位置づけられる。

謝辞：日本海洋コンサルタント株式会社の安井章雄

氏には一様流中での垂下膜のふかれの評価式について貴重な御指導を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Amsden, A. A. and Harlow, F. H.: The SMAC method: A numerical technique for calculating incompressible fluid flows, Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-4370, 1970.
- 2) 橋本英資, 谷本照己, 星加 章, 高杉由夫: 瀬戸内海における漂流予測モデルによる海洋ごみ分布域の推定, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 401-405, 2008.
- 3) 小田一紀, 重松孝昌, 野口達矢, 武田将英: 汚濁防止膜周辺の物質拡散の高精度予測手法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1151-1155, 1996.
- 4) 青木伸一, 岡野 聡, 榎木 亨: 自立式汚濁防止膜の有効高さ係留力の実用算定法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 796-800, 1998.
- 5) 田端竹千穂, 八尋明彦, 播本一正, 相澤幹男, 平石哲也, 永松宏一: 垂下型汚濁防止膜の係留力に関する模型実験, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 846-850, 1999.
- 6) 安井章雄, 宮本崇広, 幾田正一郎, 出口一郎: 網状浮体構造物のふかれ変形と作用する係留力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 881-885, 2001.