

数値流体解析による耐震性貯水槽の流況解析

Flow Regime Analysis of Aseismatic Water Storage Tank Using Computational Fluid Dynamics

畑中哲夫* 太田正博* 喜多川 真好**

Tetsuo Hatanaka, Masahiro Ota, Masayoshi Kitagawa

近年、コンピュータ上で流体現象をシミュレートできる数値流体解析が普及しつつある。数年前までは非常に限られた分野において大型のスーパーコンピュータを使用して行われていた流れの解析が、EWS(エンジニアリングワークステーション)や汎用的なパソコンで解析可能となってきた。

本稿では、地震などの災害時における飲料水、生活用水および消火用水の確保を目的とした耐震性貯水槽の槽内流況把握および性能評価を行うために模型貯水槽を用いた数値流体解析と水理実験を行ったので、その結果を報告する。

In recent year, Computational Fluid Dynamics, which simulates fluid phenomenon by computer, is being diffused. This numerical analysis was only performed for special field by super computer several years ago. But now, it's possible to perform by engineering workstation and general-purpose computer.

In this paper, we report the result of CFD (Computational Fluid Dynamics) and hydraulic model test of water storage model tank in order to keep track of flow regime inside of the tank and evaluate the performance for aseismatic water storage tank, which is made for the purpose of ensuring the drinking and extinguishing water toward disasters like earthquake.

1. はじめに

近年、世界各国で大規模な地震が多発しており、大きな災害をもたらしている。また、我が国においてもそれは例外ではなく、内陸性および近傍を震源とする大規模地震が連続して発生しており、ライフラインをはじめとする公共施設に甚大な被害をもたらしている。このような中で、災害時における飲料水、生活用水および消火用水の確保が非常に重要であり、これらの確実な確保および安定的な供給を目的とした貯水設備である耐震性貯水槽は非常に重要なものであるといえる。

耐震性貯水槽は、通常時には配水管路と接続され、その一部として機能しているが、災害時には遮断弁により配水管路から遮断され貯水設備となる。一般的に、耐震性貯水槽は貯水容量を大きくとるために、接続されている配水管路の口径に比べてかなり大口径であり、したがって、貯水槽内の流速は緩やかで、かつ複雑な流れ場を形成する。

一方、このような槽内流況を含めたさまざまな流体物の挙動を知るために、近年の急速なコンピュータの高性能化、低価格化とともに、コンピュータ上で流体現象をシミュレートできる数値流体解析が普及しつつある。数年前までは航空機や原子力など非常に限られた分野において、大型のスーパーコンピュータを使用して行われていた流れの解析が、EWSや汎用的なパソコンで解析可能となってきた。また、汎用熱流体解析コードにおいては、離散化手法、要素形状、マトリックス解法などが異なるさまざまなものが数多く市販されているが、その性能には一長一短があるため、目的に適合した解析コードを選択する必要がある。

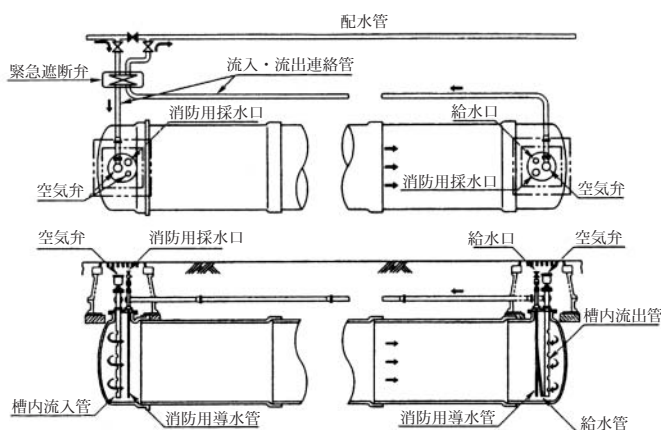


図1 分散型耐震性貯水槽構造
Fig. 1 Typical structure of aseismatic water storage tank of separate model

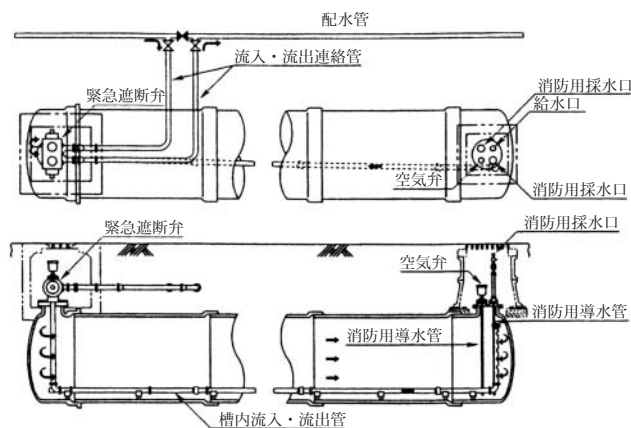


図2 集中Ⅱ型耐震性貯水槽構造
Fig. 2 Typical structure of aseismatic water storage tank of combination model II

* 鉄管事業部 鉄管研究部

** 鉄管事業部

本稿では、高置換性能(入れ替わり性能が高い)型の耐震性貯水槽開発のための基礎データ収集および数値流体解析の有効性の検証を目的として、水理模型実験および非構造格子系熱流体解析システム SCRYU/Tetraを用いた数値流体解析により、現行型耐震性貯水槽を模して作成した分散型形式模型(図1)および集中Ⅱ型形式模型(図2)の水の入れ替わり状況確認およびその性能評価を行ったので、その結果を報告する。

2. 数値流体解析による水の入れ替わり性能および槽内流況調査

2.1 基礎方程式

非圧縮粘性流体の基礎方程式である連続の式およびナビエ・ストークスの式は、直交座標系表示では下記のように表される¹⁾。

質量保存式(連続の式)：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

運動量保存式(ナビエ・ストークス方程式)：

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho g_i \beta (T - T_0)$$

ここで、

x_i ：位置座標	u_i ： x_i 方向の流速
t ：時間	ρ ：密度
p ：圧力	μ ：粘性係数
g_i ：重力加速度	β ：体膨張率
T ：温度	T_0 ：基準温度

また乱流の取り扱いについては、さまざまな乱流モデルが提案されているなかで、比較的低レイノルズ数(以下Re数と記す)の解析に向いているとされる RNG k- ε 方程式を使用した。工業的にかなり古くから使用されてきた標準 k- ε 方程式に現れる定数群は経験的、実験的に定められたものであるが、RNG k- ε 方程式では繰り込み群理論(Re-Normalization Group analysis)を基にして改良が加えられ、方程式中の定数群をフーリエ解析から理論的に決定したものである。運動方程式を変形してフーリエ変換を施し、波数空間における k- ε 方程式を求める。フーリエ変換後の式は低波数域は高波数域の影響を受け、高波数域はさらに高波数域の影響を受けることになる。しかし、k- ε 方程式は元々大きなスケールの渦域、つまり低波数域に対してのものであるから、高波数域の影響を低波数域に繰り込むことになる。下記に乱流特性量である乱流エネルギー k の輸送方程式、乱流エネルギー散逸率 ε の輸送方程式および RNG k- ε 方程式の定数群を示す²⁾³⁾。

乱流エネルギー k の輸送方程式：

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t \partial k}{\sigma_k \partial x_i} \right) + G_S + G_T - \rho \varepsilon$$

乱流エネルギー散逸率 ε の輸送方程式：

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_S + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$$

ここで、

$$G_S = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$G_T = g_i \beta \frac{\mu_t \partial T}{\sigma_t \partial x_i}$$

$$R_f = -\frac{G_T}{G_S + G_T}$$

k, ε と動粘性係数 μ_t の次元解析から、

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

RNG k- ε 方程式の定数群：

σ_k	σ_ε	C_1	C_2	C_μ
0.719	0.719	$C_1(\eta)$	1.68	0.085

ここで、

$$C_1(\eta) = 1.42 - \frac{\eta(1-\eta/4.38)}{1+0.012\eta^3}$$

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} S$$

$$S = \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

今回使用している SCRYU/Tetra では上記各方程式の離散化には有限体積法を用いている。対流項の離散化には2次精度の風上差分スキームである MUSCL (Monotone Upstream centered Scheme for Conservation Laws)、その他の空間微分項は1次精度の風上差分スキームを用いている。また、解析時間の大部分を占めるマトリックスの解法には、圧力補正式に収束性を向上させた AMG (Algebraic Multi Grid method) 法、その他の方程式に共役勾配法 (Conjugate Gradient method) を拡張し高速化、安定化を図った MILUCG (Modified Incompleted LU decomposited CG) 法を用いている。

2.2 解析モデルおよび解析条件

図3に分散型模型、図4に集中Ⅱ型模型の解析モデルを示す。解析モデルは、後述している水理模型実験で使

用した実機 ($\phi 2600 \times 100\text{m}^3$) を模した縮尺約1/10の模型貯水槽を基に3次元モデルで作成した。モデル構成要素は複雑形状表現に適しているTetra (4面体) 要素が大部分を占めているが、速度勾配が急激な壁近傍の解析精度を向上させるために、壁面にはPrismおよびPyramid (5面体) 要素を使用した。なお、分散型についてはその構造の対称性から1/2モデルで作成している。表1に解析モデル概要を示す。なお、ここでは明示していないが、流入管および流出管にそれぞれ6個ずつある穿孔部の位置は模型形式により異なっている。

次に、解析条件はモデル貯水槽内の理論Re数が実機の日流入量 100m^3 時における貯水槽内理論Re数 ($Re=567$) に一致する流入条件とした。流速条件を流入管端部に、圧力条件は流出管端部で零、壁面は滑りなしとして入力した。分散型については1/2切断面に対称境界条件を設定した。表2に解析条件を示す。

解析方法として、まず温度、重力を考慮しない定常解析により、定常な (十分に時間が経過した最終的な状態) 流れ場を求め、その流れ場を用いて非定常解析である水の入れ替わり解析 (拡散解析) を行い、貯水槽内の水の入れ替わり状況を解析した。

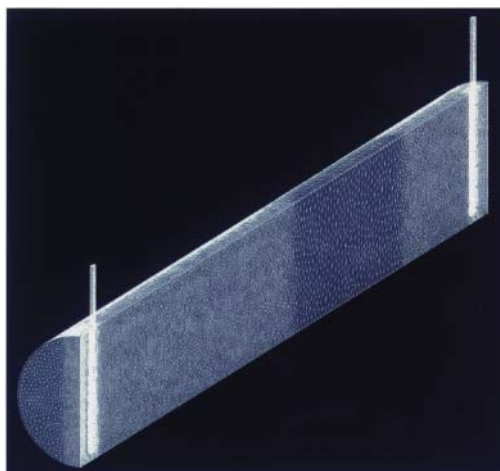


図3 解析モデル(分散型模型)
Fig. 3 Analysis model (separate model)

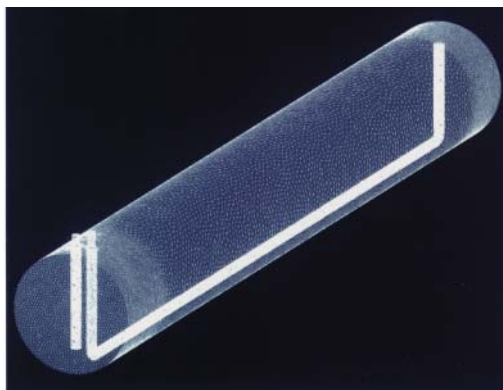


図4 解析モデル(集中Ⅱ型模型)
Fig. 4 Analysis model (combination model II)

表1 解析モデル概要
Table 1 Analysis model

形式	分散型模型	集中Ⅱ型模型
貯水部内径 mm	$\phi 257$	
全長 mm	1,910	
流入出管内径 mm	$\phi 15$	$\phi 16$
流入出穿孔部 mm	$\phi 6.9 \times 6$ 個	
要素数	894,241	1,626,220
節点数	187,378	410,832
構成要素形状	Tetra、Prism、Pyramid	

表2 解析条件
Table 2 Analysis condition

形式	分散型模型	集中Ⅱ型模型
流体物	水 20℃ / 一定	
密度 ρ	997.5 kg/m ³	
粘性係数 μ	9.8×10^{-4} Pa·s	
乱流モデル	RNG k- ϵ モデル	
流入口条件	0.73 m/s	0.63 m/s
	※流入量 6.9L/min となる	
流出口条件	0.0 Pa	
壁面条件	静止壁 (対数則条件)	
対称面条件	フリースリップ壁	—

2.3 解析結果

定常解析により計算された模型貯水槽内の流速ベクトルを、図5に分散型の結果を、図6に集中Ⅱ型の結果を示す。乱流から層流に移る下臨界Re数は約2,300であり、図5、図6に示す流入出管近傍では流速が大きく、Re数はこの値を大きく上回り乱流状態になっていると考えられるが、それ以外の領域では流速がかなり遅く層流状態に近い流れになっていると思われる。その様子を同様に示している流入管近傍の流線を、図7に分散型の結果を、図8に集中Ⅱ型の結果を示す。どちらの形式も貯水槽内での流速は大部分が遅いものの、流入出管近傍での流れの構造は複雑な様相を示し、小ささまざまな渦が形成されており、この渦が輸送される貯水部中央付近も流れ場は非常に不安定であると考えられる。

次に、非定常解析による水の入れ替わり解析結果より、図9に流体解析による水の入れ替わり度を、図10、図11に模型貯水槽内の水の入れ替わり状況コンター図を示す。

図9において、X軸は置換倍率 (累積流入量 / 貯水容量)、Y軸は新規流入水の濃度を示す。赤色、青色の線は各形式の流出口での濃度推移を示し、黄色、水色の線は貯水槽内の最小濃度推移を示す。図中の出口濃度の推移から、分散型の方が集中Ⅱ型に比べ新規流入水が早く出口に到達していることがわかる。新規流入水が出口に到達した後の濃度推移は、相対的に、分散型が緩やかな曲線を描きながら増加するのに対して、集中Ⅱ型の曲線は急勾配であり、置換倍率1倍程度で値が逆転してい

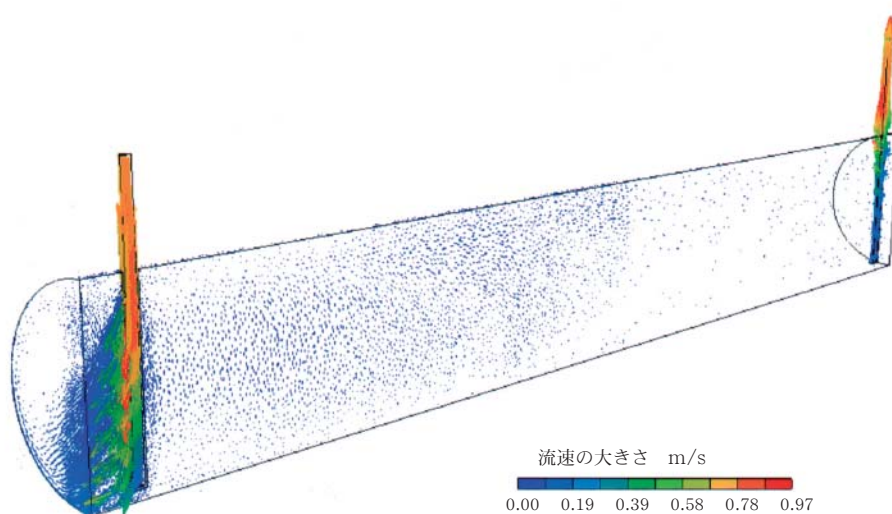


図5 速度ベクトル図(分散型模型)
Fig. 5 Velocity vector(separate model)

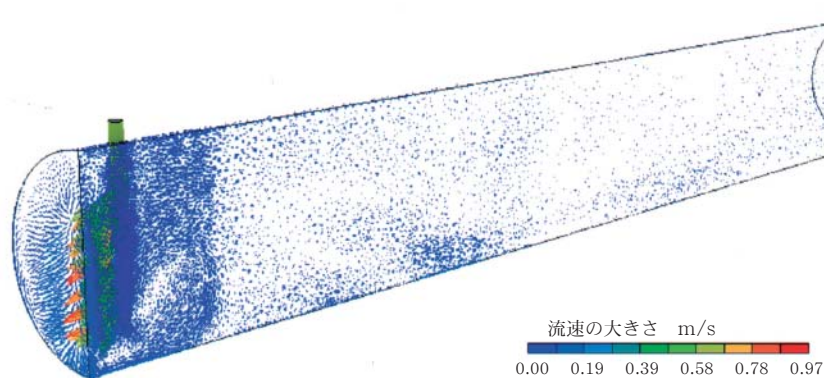


図6 速度ベクトル図(集中Ⅱ型模型)
Fig. 6 Velocity vector(combination model II)

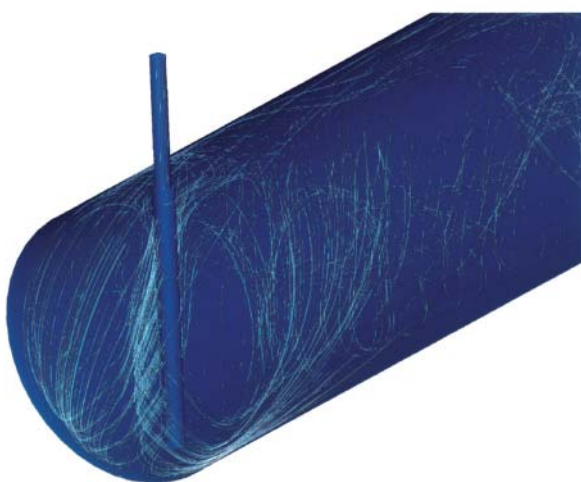


図7 流線図(分散型模型)
Fig. 7 Streamline(separate model)



図8 流線図(集中Ⅱ型模型)
Fig. 8 Streamline(combination model II)

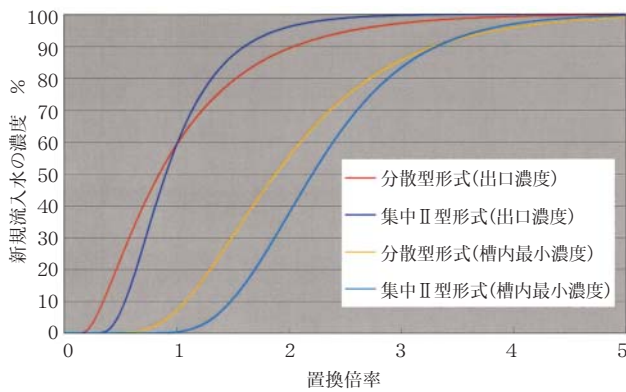


図9 流体解析による水の入れ替わり度
Fig. 9 Rate of water displacement by CFD

る。また、貯水槽内最小濃度の推移より、どちらの形式も新規流入水が到達しない点はなく、貯水槽内に死水域はなかった。置換倍率約3.5倍までは濃度推移に違いが見られ、そのグラフの立ち上がりから分散型の方が集中Ⅱ型に比べて新規流入水が貯水槽内全体に速く拡散していることがわかる。

表3に模型貯水槽の水の入れ替わり性能を示す。新規流入水の出口濃度が99%を超えた時の置換倍率は分散型で3.8倍、集中Ⅱ型で2.6倍であった。また、その時点で

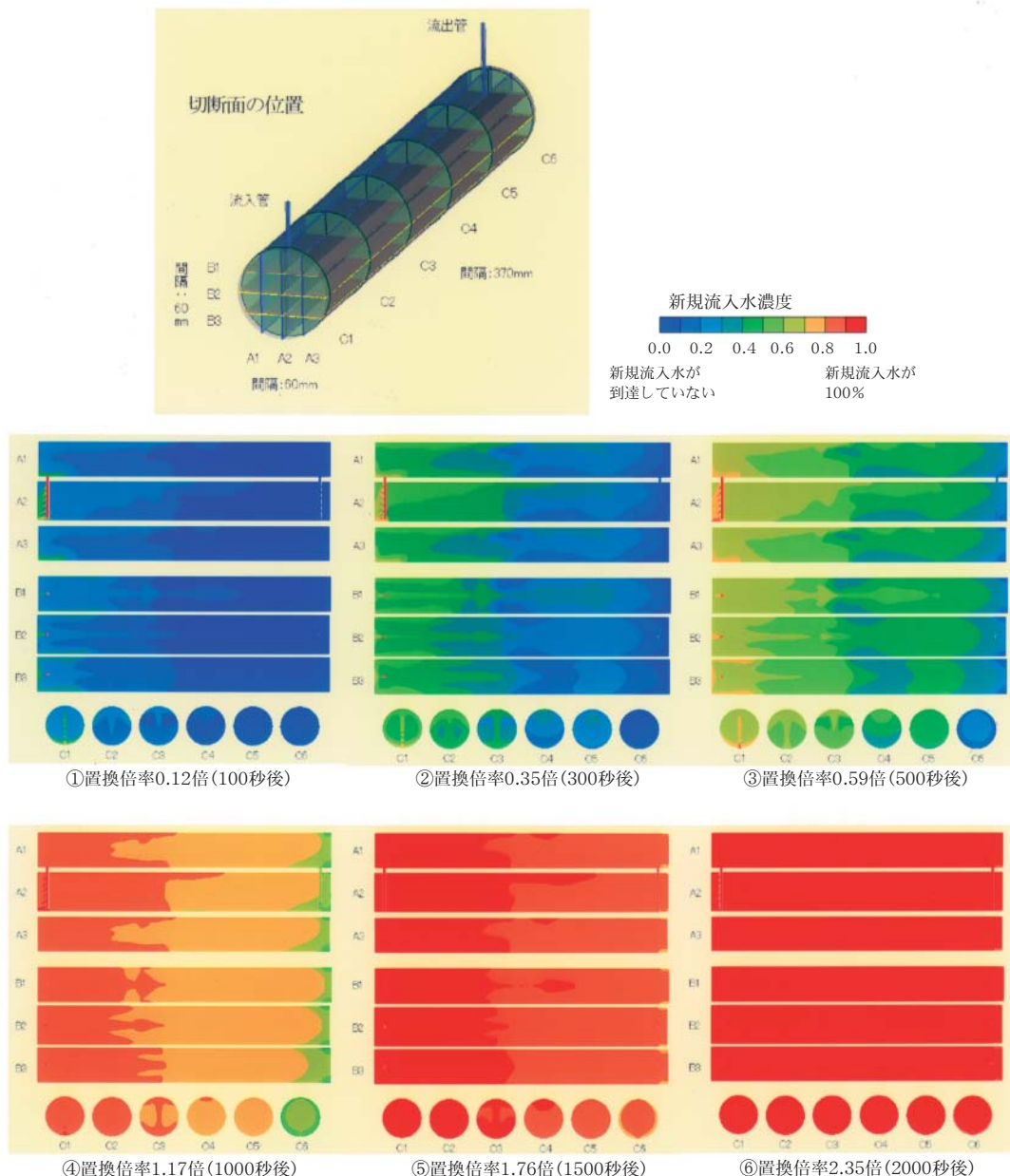


図10 模型貯水槽内の水の入替わり状況(分散型模型)
Fig. 10 Simulation of water displacement (separate model)

表 3 模型貯水槽の水の入れ替わり性能
Table 3 Water displacing efficiency of water storage model tank

形式	新規流入水の出口濃度が99%を超えた置換倍率	出口濃度 99%時の貯水槽内最小濃度
分散型模型	3.8 倍	94.4%
集中Ⅱ型模型	2.6 倍	68.4%

の貯水槽内最小濃度はそれぞれ94.4%、68.4%であった。

上述の結果は図10、図11に示すコンター図からもよく理解でき、流入側から流出側に向かって拡散する新規流入水は分散型の方が速いことがわかる。同様に、どちらの形式とも新規流入水の入替わり状況から死水域がないことがわかる。また、貯水槽内での水の入替わり方は断面内で均一に入れ替わるのではなく、偏った分布をもっているため、水の入替わりが比較的速い領域と遅い領域が存在していた。

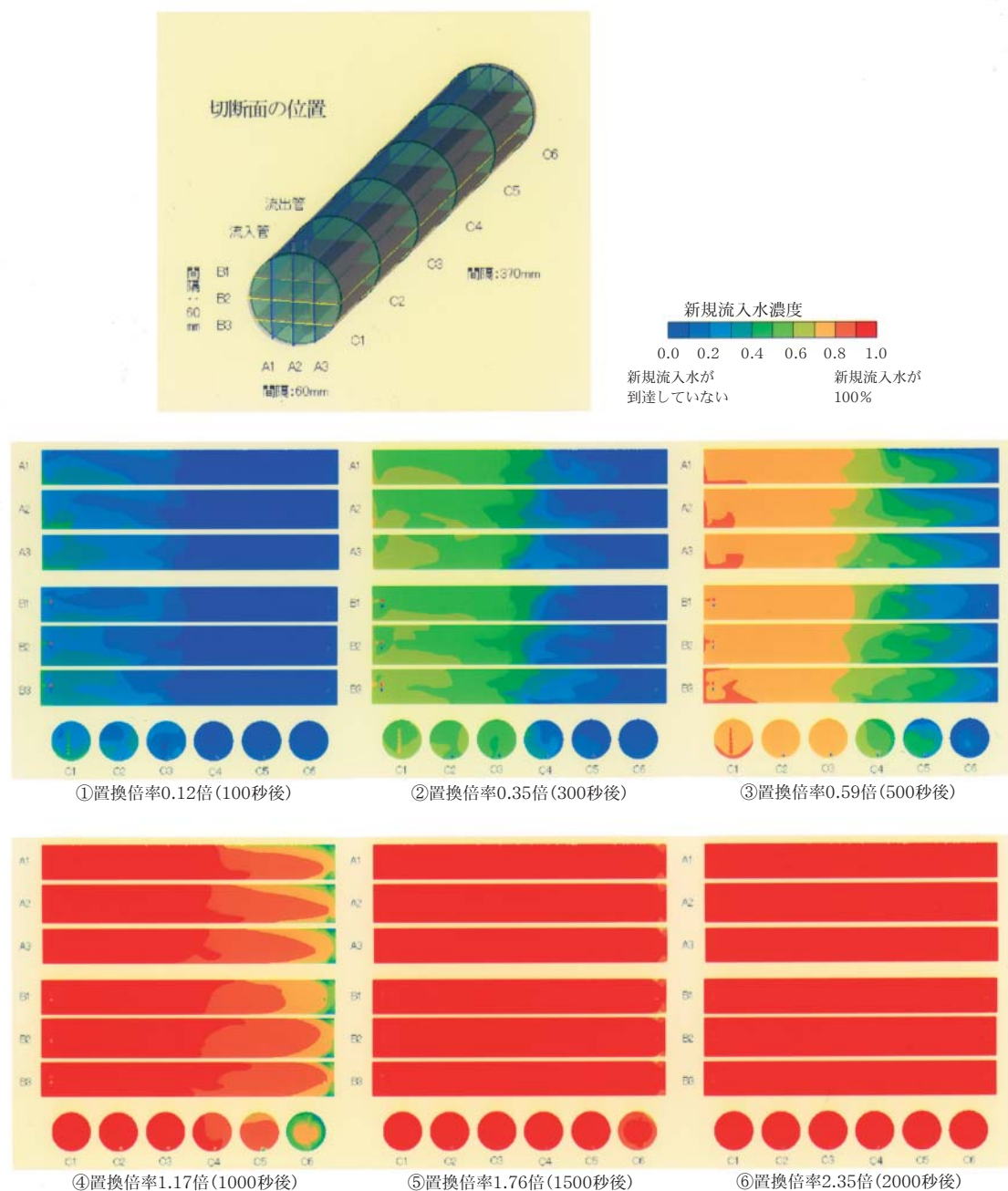


図11 模型貯水槽内の水の入替わり状況(集中Ⅱ型模型)
Fig. 11 Simulation of water displacement (combination model II)

3. 水理模型実験による水の入れ替わり状況の検証

3.1 試験装置および水理条件

実機の縮尺約1/10の透明アクリル管製の模型貯水槽を用いて、図12に示すヘッドタンク方式の試験装置により水の入れ替え性能試験を行った。試験方法として、メチレンブルー着色水で槽内を満たした後、透明水を新規に流入させ、その入れ替わり状況を目視および一定時間ごとに採取したサンプル水の吸光度測定による濃度推移で観察、分析した。また、水理条件として、模型貯水槽内の理論Re数が実機（ $\phi 2600 \times 100\text{m}^3$ ）の貯水槽内理論Re数と同じ値になるように流入量を設定した。表4に水理条件を示す。なお、模型貯水槽の各寸法は表1にある解析モデルと同一寸法のものである。

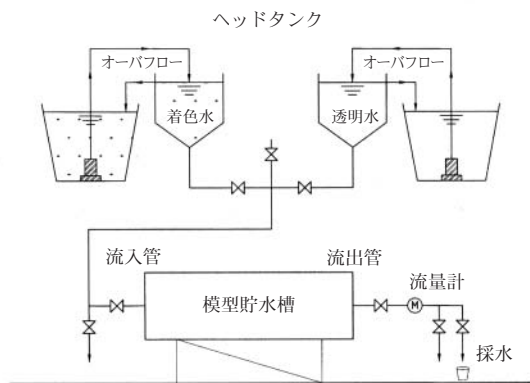


図12 試験装置概要
Fig. 12 Testing apparatus

表4 水理条件
Table 4 Hydraulic condition

	平均流入量	貯水槽内 平均流速	貯水槽内 理論Re数
模型貯水槽 (D = 257)	6.9 L/min	0.22×10^{-2} m/s	567
実機 (D = 2600)	100 m ³ /day	0.22×10^{-3} m/s	567

3.2 実験結果

サンプル水の吸光度測定による流出口の濃度推移を図9の解析結果と合わせて図13に示す。図13からわかるように、集中Ⅱ型においてグラフの立ち上がりに若干の相違が見られるものの、どちらの形式とも解析結果と実験結果がよく符合している。解析結果が示した、集中Ⅱ型は分散型に比べ曲線の立ち上がる時期が遅く、また急勾配であるという傾向が実験でも現れていた。新規流入水の濃度が99%になる置換倍率は分散型が3.9倍、集中Ⅱ型が3.0倍であった。表5に実験結果と解析結果の比較を示す。また、解析結果と同様、目視による確認からもどちらの形式においても死水域がないことがわかった。実験風景の一例として、図14に集中Ⅱ型の置換倍率1.75倍における貯水槽内状況を示す。

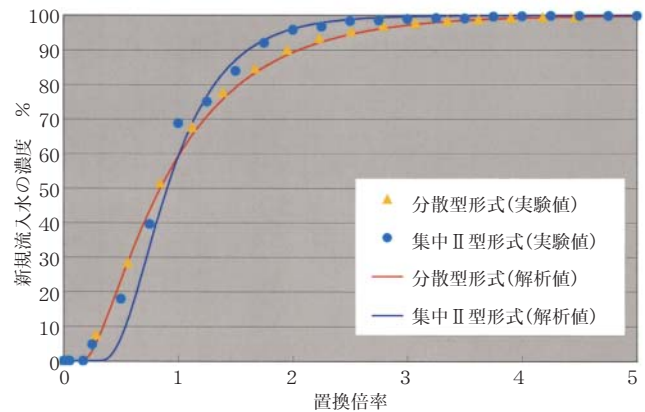


図13 水理模型実験による水の入れ替わり度
Fig. 13 Rate of water displacement by experiment

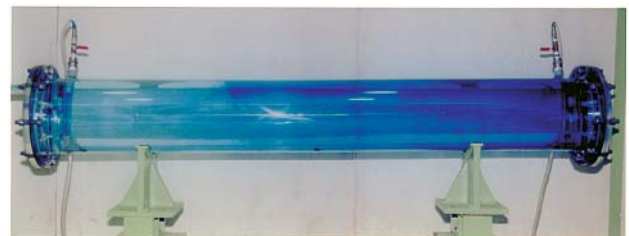


図14 実験風景の一例
Fig. 14 Example of hydraulic model test

表5 実験結果と解析結果の比較
Table 5 Comparison of experiment and analysis

形式		新規流入水の出口濃度が 99%を超える置換倍率	解析値と 実験値の差
分散型 模型	解析値	3.8倍	2.6%
	実験値	3.9倍	
集中Ⅱ型 模型	解析値	2.6倍	13.3%
	実験値	3.0倍	

4. 考察

数値流体解析および水理模型実験結果から、分散型は相対的に、新規流入水が貯水槽内でより拡散しながら入れ替わりが進行する拡散型、集中Ⅱ型はどちらかというあまり拡散せずに新規流入水が槽内水を順次押し出して入れ替わりが進行する押し出し型と考えられる。これは各形式による流入出管形状の違いに起因している槽内流況の差により生じている。したがって、このことから流入出管形状による貯水槽内の流況制御が可能であると考えられ、その構造の最適化により、貯水槽内の水の入れ替わりがより速く、より均一に進行するものが開発可能であるとする。ただ、その開発に当たっては、貯水槽内の乱流を促進させ、その強い掻き混ぜ、いわゆる強混合性を効果的に利用する拡散型が良いのか、強い拡散効果を用いずにシリンダ内のガスをピストンで排気するような押し出し型が良いのか検討する必要がある。

また、どちらの形式も貯水槽内の水の入れ替わり速度分布に偏りが存在し、新規流入水はその比較的内れ替わりが速い領域を優先的に通って出口に達していると思わ

れる。このことは新規流入水の出口濃度が99%を超えているが、貯水槽内の最小濃度はそれより低い値を示していることから理解できる。したがって、死水域は存在しないものの局所的ではあるが水の入れ替わりが緩やかに進行する領域が存在していると考えられるので、貯水槽の水の入れ替わり性能を判定する最適な基準を検討する必要があると考える。

次に、新規流入水の出口濃度推移における解析結果と実験結果の比較より、相違の大きい集中Ⅱ型でも10%程度であり、それらの結果はよく符号していた。また、実験では十分に行えない模型貯水槽内流況の可視化など、数値流体解析により多くの情報が得られた。このようなことから数値流体解析の有効性は十分に実証されたとと言える。今後は特に、流入出管形状の最適化を行うにあたり形状をパラメータ化し、パラメータ・スタディを実行する上で数値流体解析は、経済性、作業性などからその有効性を十分に発揮できると考える。しかしながら、数値流体解析には多くの仮説、近似、経験値が用いられているので、その結果のみを絶対的に信用するのではなく、実際の物理現象を十分に検証した上で用いる必要がある。

5. おわりに

以上の水理模型実験および数値流体解析により、本研究では以下のことがわかった。

- 1) 模型貯水槽の置換倍率は出口濃度 99%超で 3 倍弱～4 倍弱である。
- 2) 模型貯水槽に死水域はない。
- 3) 模型貯水槽内には水の入替わりが比較的速い領域と遅い領域が存在し、流入管から流入してきた新規流入水はその速い領域を優先的に通って流出口に達する。
- 4) 相対的に、分散型模型の水の入替わり進行は拡散型で、集中Ⅱ型模型は押し出し型である。
- 5) 数値流体解析は実用的に十分な精度がある。
- 6) 数値流体解析は流況評価ツールとして有効である。

今後は、実機についての数値流体解析と水理実験の整合性を確認、検証しながら研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 小竹進・土方邦夫・松本洋一郎：熱流体ハンドブック－現象と支配方程式－ 丸善(株)(1994)
- 2) 越塚誠一：数値流体力学 (株)培風館(1997)
- 3) 数値流体力学編集委員会：乱流解析 東京大学出版会(1995)

執筆者

畑中哲夫

Tetsuo Hatanaka

平成 8 年入社

ダクタイル管の研究・開発に従事



太田正博

Masahiro Ota

昭和46年入社

ダクタイル管の研究・開発に従事



喜多川 真好

Masayoshi Kitagawa

昭和42年入社

ダクタイル管の研究・開発を経て
鉄管事業部技師長

