



競泳用プールの水浄化に関する数値解析

Numerical Analysis of the Scavenging Flow in Swimming Pool Filtration

田中 廣 Hiroshi Tanaka
●研究開発 C. コア技術研究室 パワースソース G

Abstract

Using two different types of flow analysis codes, SCRYU/Tetra and AVL/FIRE, we conducted analysis to estimate the distance to which input flow of filtration water in a competition swimming pool would reach, estimates of the filtration scavenging flow patterns using a simple model, analysis of the effects of different filtration input and drain locations and a filtration analysis based on 1/3 section model. As a result of these numerical analyses we found the originally planned distribution of numerous input and drain mouths in the walls along the long sides of the pool would result only in circulation in the areas near hose walls and not accomplish effective filtration of the pool as a whole. It was also found that there was a dramatic improvement in filtration-related water scavenging (circulation) performance to when the input and drain mouths were placed at larger intervals while maintaining the same overall pumping capacity.

Bases on the result of these analyses, we changed the positioning of the input and drain mouths. When the pool was completed, it was found that the resulting filtration system performed its desired effect and the water of the pool achieved an unprecedented level of water purity.

要 旨

タイプの異なる流体数値解析コード、SCRYU/Tetra および AVL/FIRE を用い、競泳用プール給水噴流の到達距離予測、簡易モデルによる浄化流れ予測、給取水口配置変更の影響解析、1/3 区画モデルの浄化解析を実施した。これらの数値解析により、小規模多数の給水口と取水口をプール長辺に沿って分散配置する当初計画では、長辺壁面の近傍だけで循環流が形成されてしまい、プール全体の浄化は達成できないことが分かった。また合計ポンプ能力を維持したまま給水口と取水口の間隔を大きくすると、浄化に関わる水置換の促進に顕著な効果があることが認められた。

これらの解析結果を踏まえ、給水口と取水口の配置が変更された。完成した競泳用プールでは浄化装置が本来の機能を発揮することができ、前例のない高いレベルの清浄度が達成できた。

1 はじめに

近年あらゆるスポーツで記録向上のために科学的アプローチが盛んに行なわれるようになり、競泳においても水中映像を活用したフォーム研究が効果的なトレーニングに欠かせなくなっている。一方、オリンピックを初め大規模な競技大会では商業主義化傾向が一般化し、「見せるため」の映像を求める要求が高まっている。フィールド外周にレールを布設してカメラを走らせることも、水中カメラで競泳のターンシーンやシンクロ演技をテレビ放映することも今やごく当たり前の事になった。

ヤマハ発動機㈱が受注した 2001 年世界水泳選手権大会(7月・福岡)向け公認プールでは、既設展示会場の平床に据え置く工法を採るために取水口等をプール底に配置することができず、浄化のための水置換は側壁からの給取水によって形成される流れに頼らざるを得なかった。特にプール中央部では淀みが生じて浄化の障害となり、透明度が低下して水中撮影に支障がでる懸念があった。当該大会は汎用会場での開催であるためプール設置工事期間が限定されており、着工後の改修は事実上できないので、CFD (計算流体力学、流体数値解析) による予測に基づいて改良仕様の採否検討を実施した。

2 給水噴流の到達距離

プールの浄化を検討するとき、まず給水口から吐出する流れがどこまで到達するかに関心があった。壁面の穴から静止流体中に流れが吹き出す自由噴流に関しては H.Schlichting の著書 1) に記述があり、その理論モデルを参照して給水に伴う流れ場を推定した。

円形噴流を仮定し、壁面の噴口中心に原点、噴流軸に沿って x 軸、ラジアル方向に y 軸をとると、中心流速は x に反比例する。流速がその軸方向距離での中心流速の 1/2 に等しいラジアル距離を噴流の半幅 B と定義すると、B は x に比例する。

噴流の強さの指標として単位密度当たりの吐出運動量 $K[m^4/s^2]$ を導入すると、流速の x 成分 u は

$$u = (3/8 \pi) (K / \varepsilon x) (1 + \eta^2/4)^{-2} \quad (1)$$

$$\eta = (1/4) \sqrt{(3/\pi)(\sqrt{K/\varepsilon})(y/x)} \quad (2)$$

$y = B$ では $(1 + \eta^2/4)^{-2} = 1/2$ だから $\eta = 1.287$;

$$B = \eta x / \{(1/4) \sqrt{(3/\pi)(\sqrt{K/\varepsilon})}\} = 5.268x / (\sqrt{K/\varepsilon}) \quad (3)$$

H.Reichardt の実験によれば、

$$B = 0.0848x \quad (4)$$

ゆえに、

$$\varepsilon / \sqrt{K} = 0.01610 \quad (5)$$

$$\eta = 15.17(y/x) \quad (6)$$

浄化装置の流量 $90m^3/h$ のうち 1/3 を $\phi 80$ の給水口から注入するとき、出口平均流速 $1.66m/s$ として

$$K = 2 \pi \int (u uy) dy = 0.01385 \quad (7)$$

これを代入して、

$$u = 0.8725(1/x) (1 + \eta^2/4)^{-2} \quad (8)$$

理論モデルによる噴流の速度プロフィールを描くために、式 (6) を式 (8) に代入し、変形して下式を得る。

$$\{1+(15.17^2/4)(y/x)^2\}^2 = (0.8725/u)(1/x), x > 0 \quad (9)$$

$$57.53 y^2 = \{\sqrt{(0.8725/u x)} - 1\} x^2 \quad (10)$$

速度 u の到達距離 X は、式 (8) に $y = \eta = 0$ を代入して得る。

$$X = 0.8725 / u \quad (11)$$

流量 $90\text{m}^3/\text{h}$ のポンプを 12 基並列運転してプール ($50\text{m} \times 25\text{m} \times 3\text{m}$) 横断方向に様な流れをつくると仮定したとき、プール縦断面内の平均流速は 0.002m/s に過ぎない。これに対して、自由噴流の理論によれば給水噴流は 25m の距離でも 0.03m/s 以上の中心速度を有しており、十分な到達距離を有すると推定される。表1 に速度分布、表2 に流速毎の到達距離を示す。

表1 流速の分布

$x=$	0.50	1.00	2.00	4.00	6.25	12.50	25.00
$y=0.00$	(1.746)	0.873	0.437	0.218	0.140	0.070	0.035
0.25	0.007	0.041	0.121	0.146	0.117	0.067	0.035
0.50	0.001	0.004	0.021	0.061	0.075	0.059	0.033
1.00	0.000	0.000	0.002	0.010	0.023	0.037	0.029
2.00	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.011	0.019
3.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.010

表2 噴流の到達距離

流速 u [m]	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05
到達距離 x [m]	0.828	1.657	3.313	6.626	13.252

3 SCRYU/Tetra による自由噴流解析

3.1 SCRYU/Tetra モデル

SCRYU/Tetra (以下 SC/T と略す) は4面体解析格子自動生成機能を備え、個々のノードに流速などの物理量を定義する。ノードを囲むコントロールボリュームに有限体積法を適用し、Win-NT 上で比較的安定かつ高速に定常解析を実行できる特長を持っている。

自由噴流解析では、当該給水口の吐出流を囲む十分広い領域をとり、給水壁面以外の境界に Neumann 条件(境界面の内外で、流体のもつ物理量に差がないという仮定)を適用することが理想的であるが、SC/T では Neumann 条件が設定できない。そこで $5\text{m} \times 3\text{m}$ の壁の中央にプール給水口相当の吹出しをおき、壁から 12.5m までの領域で囲壁を圧力規定境界条件とした場合(図中、_press で区別)と、対称境界条件(=滑り壁、_restr)とした場合について数値解析を実行した。

解析結果を精査したところ、吐出流量が計画量(境界条件として入力した値)の約6割であった。SC/T で得られた吐出直後の運動量 K (単位密度当たりで表記)および速度分布の理論解は以下のようになる(図1)。

$$K = 0.007988 \quad (12)$$

$$u = 0.6626 (1/x) (1 + \eta^2/4)^{-2} \quad (13)$$

$$\{1+(15.17^2/4)(y/x)^2\}^2 = (0.6626/u)(1/x), x > 0 \quad (14)$$

$$57.53 y^2 = \{\sqrt{(0.6626/u x)} - 1\} x^2 \quad (15)$$

$$X = 0.6626 / u \quad (16)$$

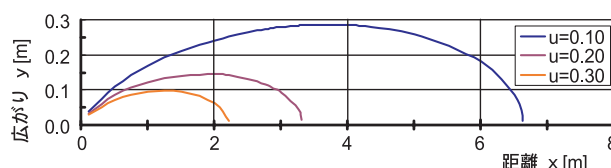


図1 噴流の到達距離

計算格子の、噴口を含む断面を図2に示す。領域はすべて4面体で構成し、要素数は1,328,041である。PC (Pen -633MHz)を用い、SC/Tの標準設定(収束判定残差 1.0×10^{-4} または反復計算200回で打ち切り)で定常解析した結果を圧力境界条件について図3(a)、対称境界条件について図3(b)に示す。

理論解(図1)と比較して、両境界条件とも、0.1m/sまでの流速では到達距離をよく再現しているが、圧力規定境界の場合、吐出距離4mを過ぎた辺りから、また対称境界の場合には同6mを過ぎた辺りから、流速分布に乱れが見られる。

3.2 解析領域と境界条件の考察

噴流軸を中心とした半径 r の円筒領域を考え、断面位置 x を通過する流量、およびその増分から算定される外周からの流入(連行:entrainment)を定量する。断面流量 Q は式(8)を $r=0$ から r まで積分して得る。

$$Q = \int [0.6626(1/x) \{1 + 57.53(r/x)^2\}^{-2} (2\pi r dr)] \quad (17)$$

$$= 0.6626(1/x) \pi \int [\{1 + 57.53(1/x^2)r^2\}^{-2} (2r dr)]$$

$$Q = (0.6626 \pi r^2) x / (x^2 + 57.53 r^2) \quad (18)$$

区間 Δ での流量の増分は $(dQ/dx) \Delta$;これが外周面 $2\pi r \Delta$ から平均的な流入で賄われると考えると、位置 (x, r) でのラジアル方向の流速 v は、

$$v = (dQ/dx) / (2\pi r) \quad (19)$$

$$v = (0.6626r/2)[1 - 2x^2/(x^2 + 57.53r^2)] / (x^2 + 57.53r^2) \quad (20)$$

自由噴流では、軸方向の運動量は保存される。噴流軸を中心とする有限径の円筒領域についてみれば、噴流の拡散により噴口から遠ざかるにつれて円筒断面内の運動量 M は減少する。

$$M = \iint u |u| dA$$

$$= \int [\{0.6626(1/x)\}^2 \{1 + 57.53(r/x)^2\}^{-4} (2\pi r dr)] \quad (21)$$

$$= \pi(0.6626)^2 \int [\{1 + 57.53(1/x^2)r^2\}^{-4} \{(1/x)^2\} (2r dr)]$$

$$M = (\pi/3)(0.6626^2 / 57.53)[1 - \{1 + 57.53(1/x^2)r^2\}^{-3}] \quad (22)$$

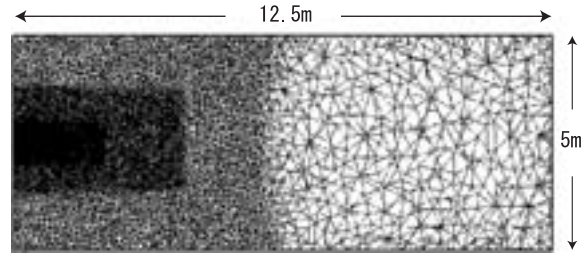


図2 解析格子

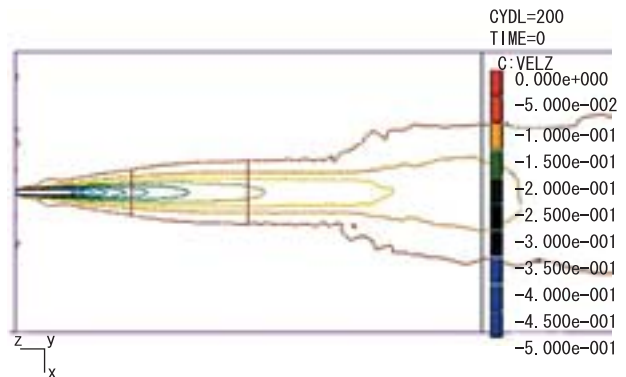


図3(a) 等流速線 (圧力境界条件)

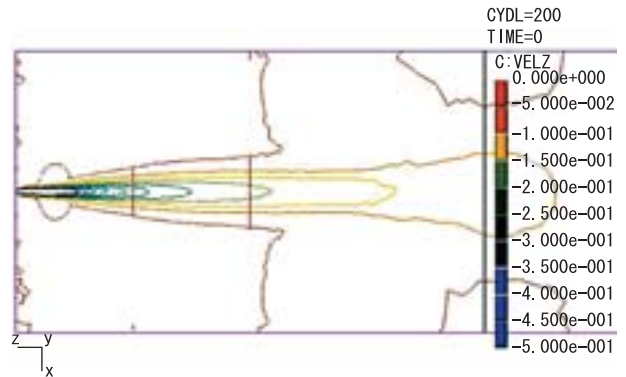


図3(b) 等流速線 (対称境界条件)

噴流の相似域での、Schlichting モデルによる断面流量[m³/s]と外周における軸直交方向流速[m/s]の算定値、断面運動量[m⁴/s²]を表3、表4、表5に示す。連行による流量の増加が大きいこと、それに伴い周囲から噴流軸方向に向かう流速も、横方向に数 m の距離ではまだ無視できない値(1時間に数 m 移動する速度)であることが分かる。

水の移動速度 1 × 10⁻³[m/s]での動圧は 5 × 10⁻⁴[Pa]に過ぎないが、微少な圧力分布を境界面で拘束する「圧力規定」、流体通過を許さない「対称」の境界条件適用は、いずれも厳密な『遠方境界』条件とは異なる。両境界条件による x 断面(3m × 5m)での流量と運動量の噴流軸に沿った変化を、Schlichting モデル(r=2；表3、表5)と比較して図4、図5に示す。

x= 2 ～ 8m における理論モデルとの乖離は、数値解析における連行の過小評価を意味している。側壁を滑り壁とみなす対称境界モデル(FJ2_restr)では領域外からの流入がなく、領域内の速度分布が平均化されていく過程で運動量も減少している。

x= 6 ～ 8.5m において、圧力規定モデル(FJ2_press)では流量、運動量とも約2倍に急増しており、この区間で領域外からの流入が大きいことが判る。対称境界モデルの運動量増加は、噴流軸付近への流量集中を示している。

表 3 流量[m³/s]

x \ r	1	2	3	5	10
2	0.06766	0.07113	0.07181	0.07217	0.07232
6	0.13354	0.18773	0.20299	0.21180	0.21575
10	0.13214	0.25223	0.30326	0.33831	0.35565
25	0.07625	0.24343	0.40985	0.63056	0.81594

表 4 直交流速[m]

x \ r	1	2	3	5	10
2	0.00468	0.00273	0.00188	0.00114	0.00057
6	0.00082	0.00182	0.00156	0.00107	0.00057
10	-	0.00079	0.00109	0.00094	0.00055
25	-	-	-	0.00032	0.00042

表 5 運動量[m⁴/s²]

x \ r	1	2	3	5	10
2	0.00799	0.00799	0.00799	0.00799	0.00799
6	0.00754	0.00797	0.00799	0.00799	0.00799
10	0.00595	0.00777	0.00796	0.00799	0.00799
25	0.00186	0.00487	0.00668	0.00777	0.00798

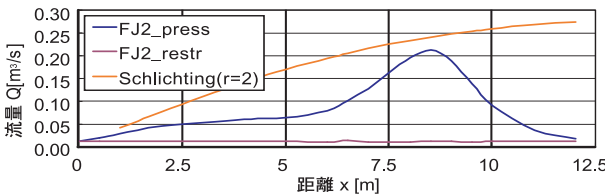


図 4 流量の分布

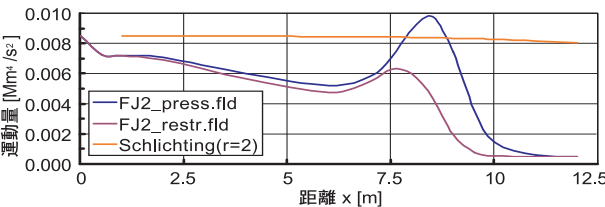


図 5 運動量の分布

4 FIRE による自由噴流解析

4.1 FIRE モデル

AVL/FIRE (以下、FIRE と略す) は主に 6 面体解析格子を対象として個々の要素中心に物理量を定義し、各要素をコントロールボリュームとして有限体積法を適用する解析コードで、unix 上で非定常解析を行う。

SC/T による解析結果と比較するため、同等の流入運動量 ($K=0.007988 \text{ m}^4/\text{s}^2$) になるように、給水口に相当する部分を一様流入速度規定した。したがって、噴流の拡散する状況は前章と同様になるものと考えられた。

計算格子の、噴口を含む断面を図 6 に示す。すべて 6 面体で構成し、要素数は 500,000 である。固定壁を除く境界を全圧規定し (図中_pr で区別) 10,000 回時間進行させた結果 (非定常解析で約 100s 経過に相当) を図 7 に示す。噴口正面のみ Neumann 条件に変更した場合 (同、_adpr) についても同様の結果を得ている。

噴流到達距離は、境界条件の異なる両者とも理論解 (図 1) のほぼ 70% 程度であった。解析の時間進行に伴い噴流の影響は少しずつ遠くまで及ぶようになっており、さらに計算を追加することでこの誤差が改善されることを後に示す。

図 8、図 9 に両者の流量と運動量の噴流軸に沿った変化を示すが、SC/T による解析結果 (図 4、図 5) とは様相が異なる。SC/T と比べ 連行の過小評価は改善されており、噴流先端部では流量急増や急減もなく緩やかに逓減している。これは、側面の境界からの流入に対して FIRE では全圧を規定することで外部エネルギーの流入抑制が行なわれているためであろう。運動量は約 5m の位置まで保存されているが、その前方では一度減少～増大し、SC/T 解析結果と同様に急激に減少している。この傾向は噴口正面の領域境界を Neumann 条件に変更しても、ほとんど変わらない。

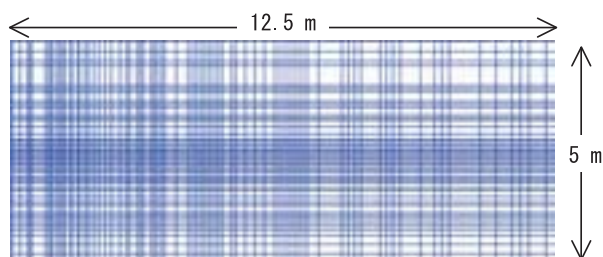


図 6 解析格子

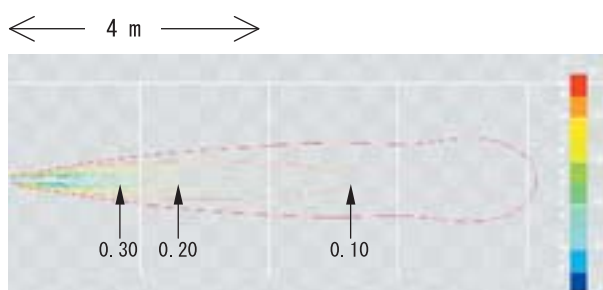


図 7 等流速線 (圧力境界条件)

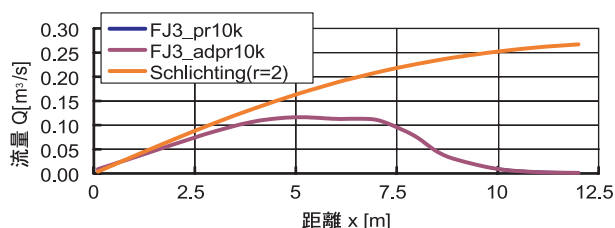


図 8 流量の分布

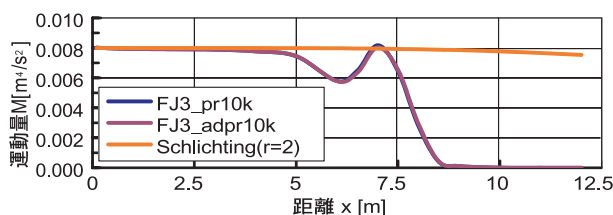


図 9 運動量の分布

4.2 時間進行による変化

連行の過小評価が解析時間の不足に起因していると考えられたため、反復時間進行 10,000 回時点の解析結果 (FJ3_adpr10k) から時間刻み 0.01s で非定常解析を再開した。

図 10、図 11 で判る通り、シミュレーション時間が延びるにしたがい流量、運動量とも、理論モデルから推定される分布に近づいていくのが分かる。

時間進行 4,000 回毎の噴流軸方向速度の分布及び渦度コンタを図 12 に示す。同図で 14,000 ステップ以降、噴流先端から渦輪 (Vortex Ring、以下 V.R. と略す) が放出される様子が窺える。噴流軸上で先端に孤立して高い流速域が見られるのは、分離しつつある V.R. によるものである。この V.R. の進行速度は、図 11 の運動量ピークの移動量から $2.8\text{m}/(8000 \times 0.01\text{s}) = 0.035\text{m/s}$ 程度と判る。噴流先端から放出される V.R. の循環強さ Γ は、平均渦度 $0.08/\text{s}$ と断面積 2m^2 の積から $0.16\text{m}^2/\text{s}$ 程度であった。断面直径 $2a=1\text{m}$ 、リング直径 $2R=2.5\text{m}$ とみなして Kelvin の公式を準用すると、この数値解析結果に近い V.R. の並進速度 $U[\text{m/s}]$ が得られる。

$$U = (\Gamma/4\pi R) * [\log(8R/a) - 1/4] = 0.03 \quad (23)$$

20,000 ステップ目の図では、既に第 2 V.R. が形成されているが、最初の V.R. より渦は弱いようである。最初の V.R. も、粘性による影響が適正に反映されたものかどうかは判断できないが、衰退していくように見える。ソフトウェア上の制約で 20,000 ステップ以降は計算していないが、さらに 160s 分ほど計算を継続すれば V.R. は解析領域の外まで移動し、理論モデルから予想される流場に近いものが得られると予想される。

V.R. による局所的な流場を除けば、10,000 ステップ (約 100s 分) の時間発展による解析で、自由噴流の構造が捉えられている。

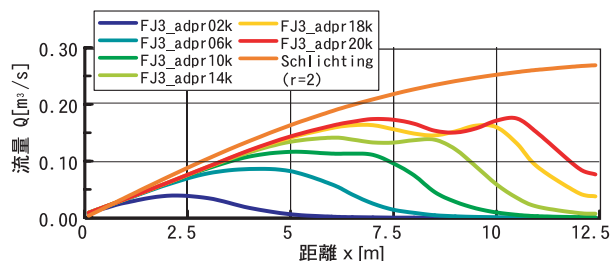


図 10 流量の変化

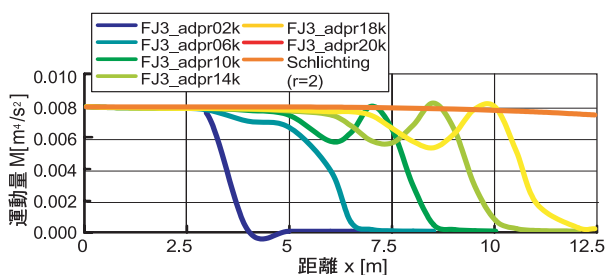


図 11 運動量の変化

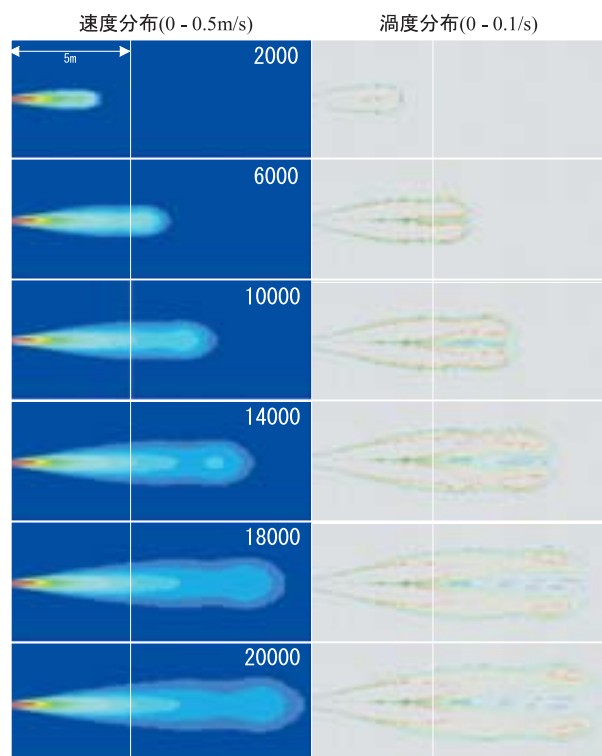


図 12 流速と渦度の発達

5 給水・取水口間隔の検討

5.1 解析モデル

水置換を行う領域の代表寸法(= プール幅) に対して、給水口と取水口の間隔が小さいことの浄化への影響を調査した。解析には、自由噴流の解析で信頼に足る結果が得られた FIRE を用いた。

全体を直方6面体で格子生成し、給水口と取水口は矩形要素面の集合で表現する。水深1m 及び2m に給水口、同 2.55m に取水口を設けることとし、取水口間の水平距離を5m、10m、20m とする。

給水口は対辺の取水口に正対させ、プールを横切る流れを促進するように配置する。このため、解析モデルの大きさは縦10m、横25m (プール幅) 深さ3m とする。

基本要素サイズはプール長辺方向125mm、短辺方向250mm、深さ方向62.5mm で、給水部細分割及び壁際の細分割、短辺方向中央部の間引きを行ない、全体の要素数は275,264 である。

解析モデルを境界条件と併せて図13 に示す。

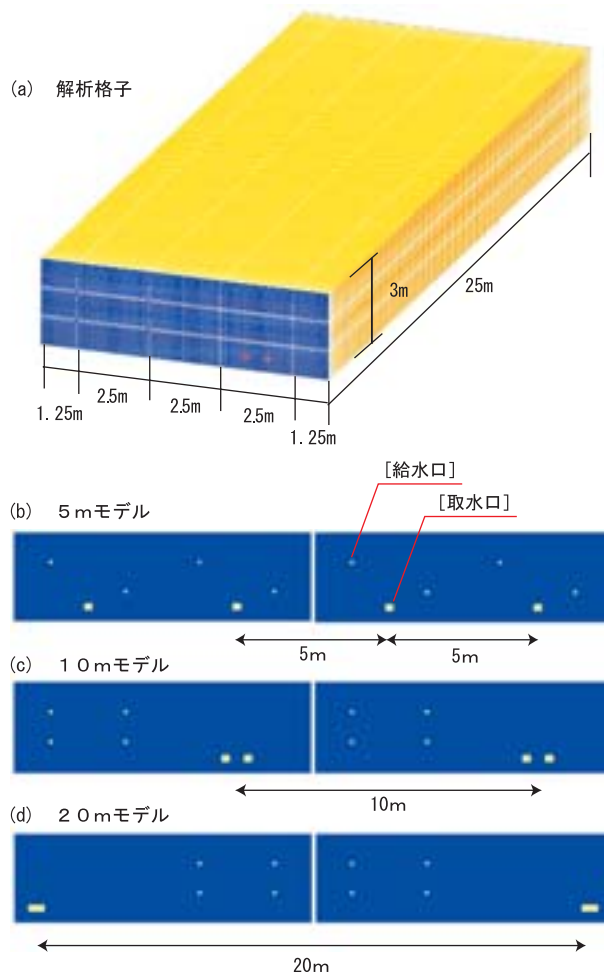


図13 給取水口間隔のモデル化

5.2 境界条件

計画ではプールの1長辺につき6基のポンプを設置し、合計18の給水口で $540\text{m}^3/\text{h}$ の循環流量を得ている。モデル壁面の要素「タイル」のうち適当な枚数を給水口および取水口に置き換えて、吐出および排出流速が不合理な値にならないように設定した。

解析モデルの長辺上に、給水口4ヶ所($83.3\text{mm} \times 62.5\text{mm} \times 1.575\text{m/s}$)と取水口2ヶ所($250\text{mm} \times 187.5\text{mm} \times 0.35\text{m/s}$)を配置した。対面の取水口1ヶ所は自由流境界条件として解析領域全体の流入流量と流出流量の一致を保証している。

プール短辺と平行な境界面は、5m 及び10m モデルでは周期境界条件; 20m モデルでは対称境界条件(鏡像効果)を利用して倍間隔・倍流量相当のモデルとしている。

自由表面は対称境界とした。

5.3 解析結果

$90\text{m}^3/\text{h}$ のポンプを12基運転してプール全域の水を置換するのに要する時間は、見掛け上、3.5時間である。即ち、浄化装置がプール内にあった汚水のみを吸い入れ、吐出された清浄な水は汚水と全く混ざり合わないと仮定するならば、3時間半でプールは完全に清浄な水で満たされることになる。

浄化ポンプ運転開始後1時間、2時間、3時間時点でプール内の水の置換の進行度を比較すると、吐

出口と取水口の間隔に依存して、浄化効果に顕著な差が認められた(図14)

水深を4等分し、水面から底までの各レベルの平均浄化率(=水の置換進度)を求めておいて、これを Simpson の方法で積分処理してプール全体の平均値として定量し、表6、図15 に示す。

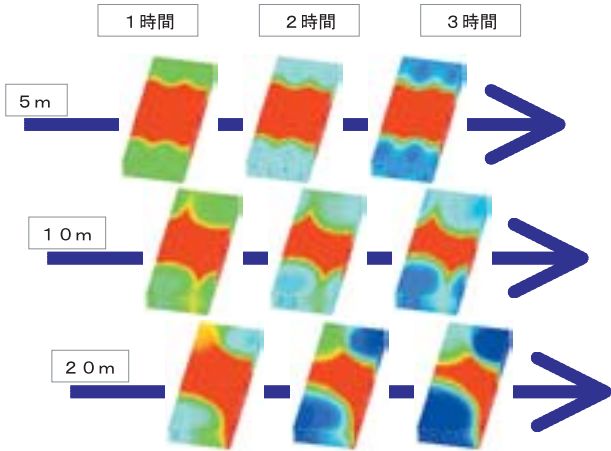


図14 給取水口間隔の浄化に与える影響

表6 平均浄化率の差異

	間隔 5m	間隔 10m	間隔 20m
1 時間経過	0.234	0.261	0.285
2 時間	0.354	0.416	0.473
3 時間	0.423	0.516	0.595

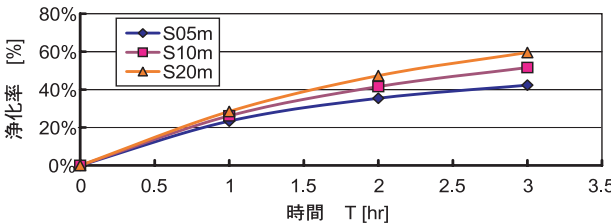


図15 浄化進捗の予測

6 プールモデルの浄化解析

6.1 解析モデル

前章の考察で給・取水口間隔がプール浄化性能に影響を与えることが確かめられた。これを設計に反映させるため、プール短辺寄りの約 1/3 について実際の給排水レイアウトに則したモデルを作成し、浄化運転 10 時間相当まで水置換の状況を数値解析して改善効果を比較検証した。

片側6基中2基の浄化ポンプを対象とし、ターン側短辺から 17.75m を模擬して両側の長辺に各々給水口6ヶ所と取水口2ヶ所を配置した。使用するモデルは、前章の6面体格子を長辺方向へ拡張して生成した。要素数は 447,304 で、解析は流体解析コード FIRE で行なった。

6.2 境界条件

プール長辺、短辺及び底面は固定壁、プール短辺と平行な境界面及び自由表面は対称境界条件とした。

前章と同様に、長辺上に給水口(83.3mm × 62.5mm × 1.575m/s : 12ヶ所)と取水口(250mm × 187.5mm × 0.533m/s : 3ヶ所)を組み合わせた流入境界条件を与えた。

残る取水口1ヶ所は自由流出条件とし、解析領域全体の流入流量と流出流量の一致を保証している。

原仕様と改良仕様について、給取水口配置を図16に示す。

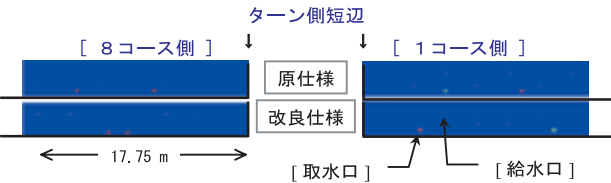


図16 プールの給取水口配置

6.3 解析結果

給水口および取水口を含む各水平面上で、定常に達したときの流速分布を図 17 に、また圧力分布を図 18 に示す。

流速では目立たないものの、圧力をみると当初仕様の対称性に対して改善案の非対称性が顕著であり、これが領域全域を攪拌する要因となっていることが分かる。

浄化開始後 10 時間までの浄化進度(水置換)を表 7、図 19 に示す(ORG:原仕様、MOD:改良仕様)。

6 時間経過時点の水置換の状況を図 20 に示す。

10 時間までの浄化の過程をアニメーションで図 21(a)、(b) に示す。

表 7 平均浄化率の差異

経過時間	1	2	3	4	6	8	10
原設計仕様	0.204	0.318	0.393	0.446	0.523	0.578	0.622
改良案	0.241	0.406	0.520	0.605	0.724	0.807	0.862
効果	118%	128%	132%	136%	138%	140%	139%



図 21 プール浄化の過程

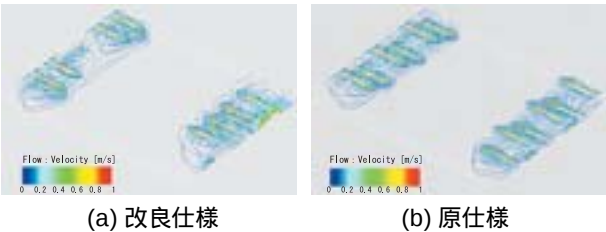


図 17 流速の分布

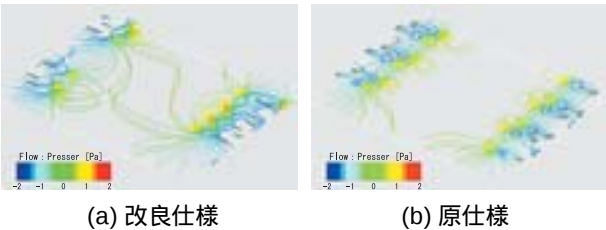


図 18 圧力の分布

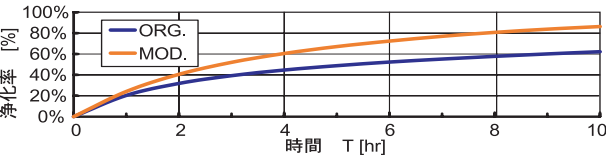


図 19 浄化進捗の予測

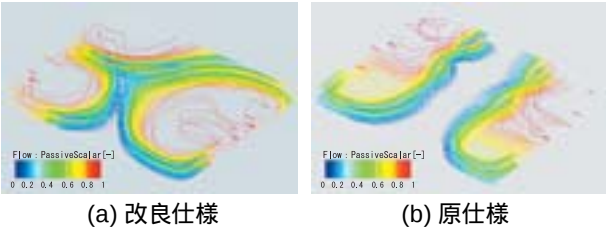


図 20 プール浄化の状況

7 おわりに

プール底面に給取水口を配置できない制約のもと、長辺上で給取水口配置を最適化するための循環流れの検討に数値解析を適用した結果、以下のような知見が得られた。

- ・吐出流は、自由噴流と仮定するとプール幅に及ぶ到達距離が予想され、また単独噴流の数値解析でも同様の結果が得られた。
- ・プール長辺に沿って給取水口を配置するとき、相対面する給水噴流は抑制しあって循環浄化流の発達を妨げる。この場合、流れは壁近傍の給水口と取水口の間で短絡し、プール中央部の浄化は達成できない。
- ・給水口(取水口)の正面には対辺の取水口(給水口)を配置することで、プールを幅方向に横切る流れを誘引することができる。給水口および取水口をそれぞれ集約して互いの間隔を広くとることで、この傾向はより顕著になる。
- ・給取水口配置の変更により4時間経過時点で 36%、8時間経過時点で 40%の浄化改善が予想される。

参考文献

- 1) Hermann Schlichting, Boundary-Layer Theory, Eng. 6th Ed., (1968)