

数値流体計算を利用した配管経路の自動設計

正会員 木村 元* 正会員 藤原 祐二**
鹿野 浩輝***

Automatic pipe-routing design making use of CFD
by Hajime Kimura, Member Yuji Fujiwara, Member
Hiroki Kano

Key Words: CFD, Piping Design, Routing, Boltzmann Lattice Method, Topology optimization

1. 緒 言

配管の設計は、設計対象となる空間に存在する機器の配置と、それらを接続する配管の製造コスト、施工性、メンテナンス性などを多面的に評価する必要のある複雑な問題である。現在は、熟練技術者の豊富な知見と経験に頼ることによって設計が行われているが、団塊世代の退職による熟練技術者の減少が続いている上、若手技術者も不足し技術継承問題が生じている。これを解決する試みとして、コンピュータによって配管を自動で設計する手法¹⁾が提案されている。この手法では、設計対象の空間を格子状に区切り、格子点を配管の経路する候補点として、ダイクストラ法で経路探索を行う。複数系統の配管を同時に設計することができるが、分岐を含む配管が考慮されていないという問題がある。また、焼きなまし法によって繰り返し計算するため、膨大な計算時間を要する。一方で、マイクロリアクタなどを扱う特殊な分野では、流れ場のトポロジー最適化という新しいアプローチに基づいた研究が行われている²⁾。

本研究では、上記の新技术を利用することで、文献¹⁾の配管自動設計プログラムにおける計算時間を短縮し、さらに分岐を含む配管についても自動で設計を行うことができる手法を提案する。また本研究において数値流体計算を行うために作成した格子ボルツマン法による流体シミュレータについても述べる。

2. 格子ボルツマン法による流体シミュレーション

格子ボルツマン法³⁾は、分子運動論に基づく数値流体計算手法であり、計算領域を規則的な格子で区切り、仮想的な粒子を格子に沿って運動させることで流体の運動を再現する手法である。格子ボルツマン法の特長として、単純なアルゴリズムで計算が高速であること、並列計算に適すること、水と油のように混ざり合わない複数の流体である多相流を扱うことができることが挙げられる。また、基礎方程式である BGK 方程式から流体力学における連続の式・Navier-Stokes 方程式を導出できる。本研究では、格子ボルツマン法を用いて 2 次元および 3 次元の単相流シミュレータを作成し、さらに文献⁴⁾の手法を用いて 2 次元多相流の流体シミュレータを作成した。単相

流のシミュレータでは、流入口・流出口・固体壁に、それぞれ以下のような境界条件を適用する：

- 流入口：流速 U ，下流側の隣接点との圧力勾配 0。
- 流出口：圧力 P ，上流側の隣接点との流速勾配 0。
- 固体壁：滑りなしとし、流速が 0 となるよう Bounce-Back 条件を適用。

多相流のシミュレータでは、流入口および流出口について、それぞれ指定した流体のみが流入・流出するように、以下のような境界条件を適用する：

- 流入口：流速 U ，指定流体の下流側の隣接点との圧力勾配 0，その他の流体は密度 0。
- 流出口：上流側の隣接点との速度勾配 0，指定した流体の圧力を P ，その他の流体は密度を 0 にしたうえで Bounce-Back 条件を適用。

3. 単相流における配管経路獲得手法の提案

3.1 数値流体計算による流路の獲得

一系統の配管については、それに対応する単相流の流れ場が配管のおおよその形状を表すと考えられる。そこで、単相流における流路を簡易的に獲得する手法を提案する。初めに、配管の設計対象の空間を数値流体計算における計算領域とする。配管の始点・終点の位置にそれぞれ流体の流入口・流出口、配管以外の機器が占める空間および計算領域の境界に固体壁を設定する。この流れ場について、シミュレーションによって繰り返し計算を行う。流れ場が定常状態になったとき計算を打ち切り、流速の小さい格子点、ここでは流速がある閾値以下の格子点を固体壁に置換え、再度 $t = 0$ から計算を行う。これを数回繰り返すと、妥当な流路を得ることができる。

Fig. 1 の左図は、領域の左端中央に 1 つの流入口、領域の右側に 3 つの流出口を設けた流れ場について十分時間が経過したときの流速分布を表す。Fig. 1 の右図は、流速の小さい格子点を壁に置き換えて再計算する処理を 10 回繰り返した後の流速を表しており、白い領域は、格子点が固体壁に置き換えられたことを表す。図のように 3 つに分岐するような流路が得られた。

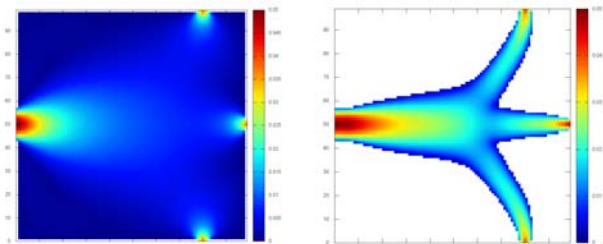


Fig.1 Two dimensional CFD and obtained flow path.

* 九州大学 大学院工学研究院

** 三菱重工船舶海洋株式会社

*** 九州大学 大学院総合理工学府

原稿受付（学会にて記入します）

秋季講演会において講演（学会にて記入します）

©日本船舶海洋工学会

Fig. 2 は、直方体の空間内に 1 つの流入口と 6 つの流出口を有する空間において流路を求める問題の例を示す。Fig. 3~Fig. 13 は上記シミュレータを用いて数値流体計算を行い、流速の小さい格子点を壁に置換えて再計算する処理を繰り返して得た流路を表している。図のように、3次元单相流についても同様に流路を得ることができる。

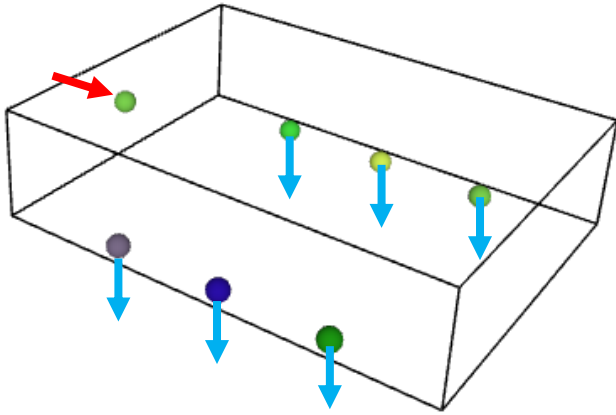


Fig.2 Flow source and drains in the design space.

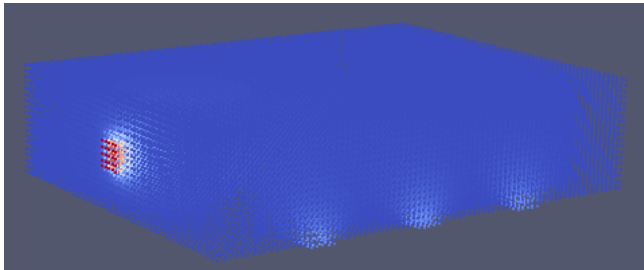


Fig.3 Obtained fluid flow by the CFD in the 1st stage.

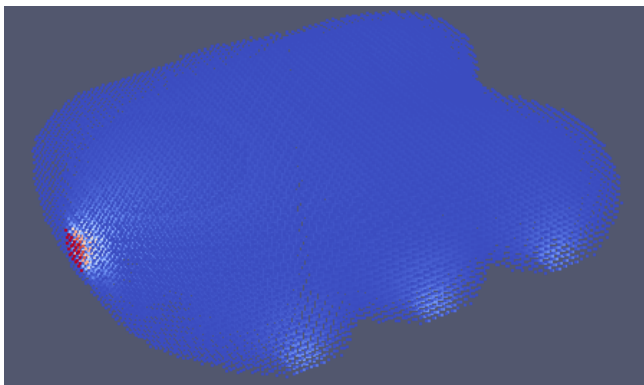


Fig.4 Obtained flow path where 30% of slower velocity cells in Fig.3 are substituted by obstacles.

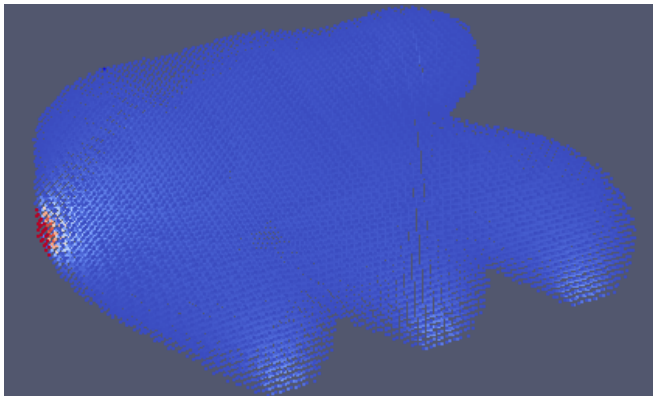


Fig.5 Obtained flow path after the operation 2 times.

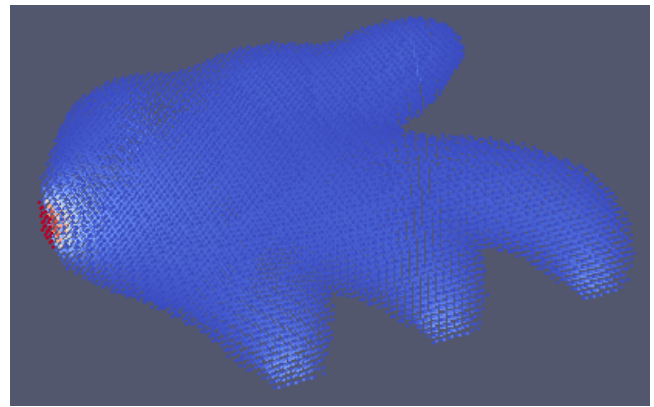


Fig.6 Obtained flow path after the operation 3 times.

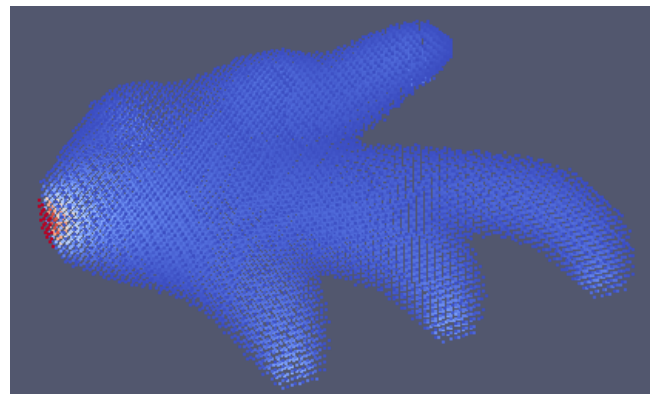


Fig.7 Obtained flow path after the operation 4 times.

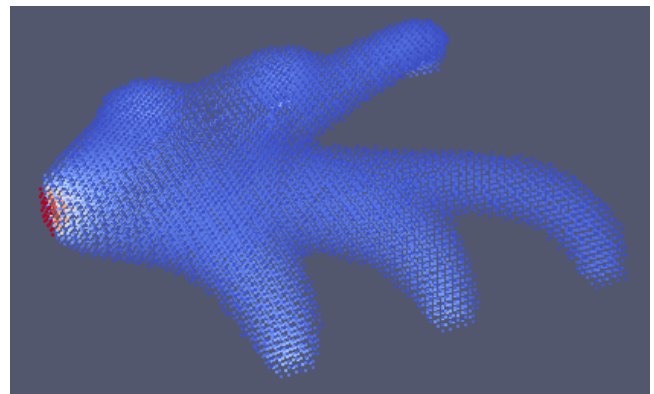


Fig.8 Obtained flow path after the operation 5 times.

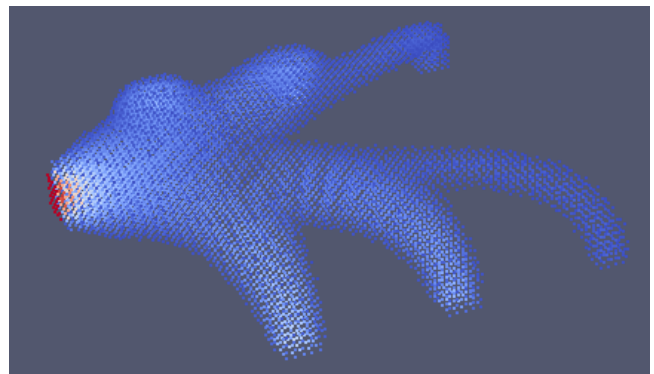


Fig.9 Obtained flow path after the operation 6 times.

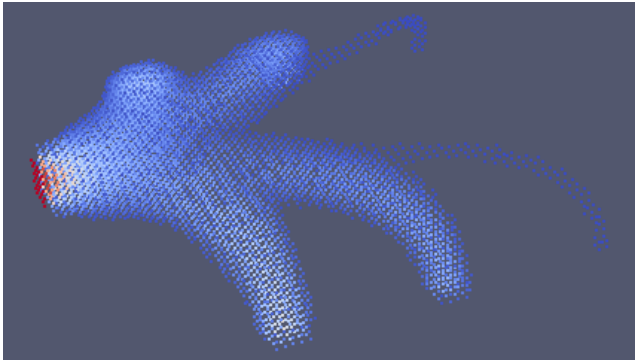


Fig.10 Obtained flow path after the operation 7 times.

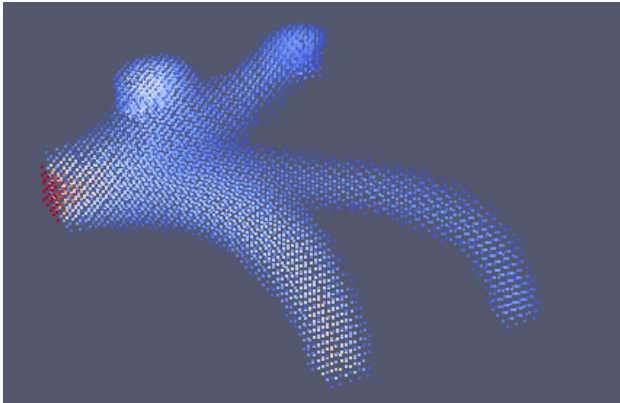


Fig.11 Obtained flow path after the operation 8 times.

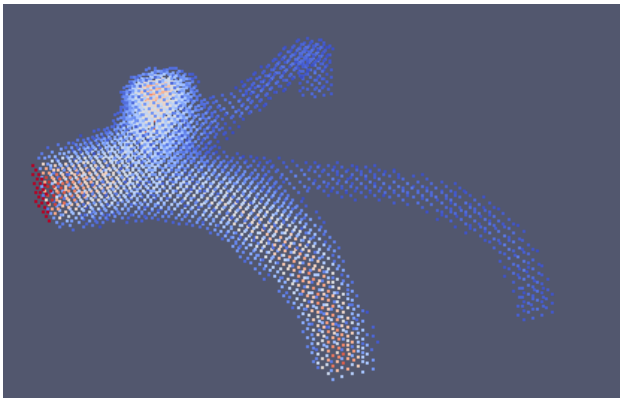


Fig.12 Obtained flow path after the operation 9 times.

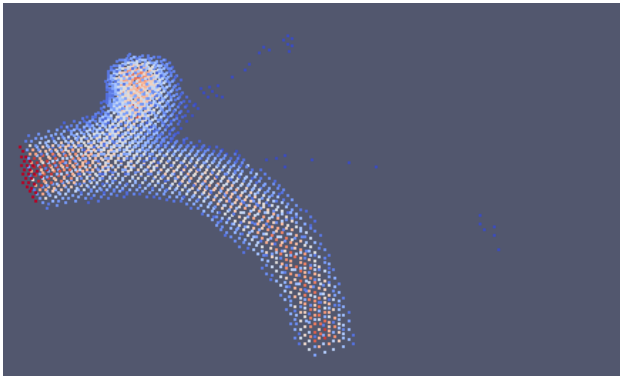
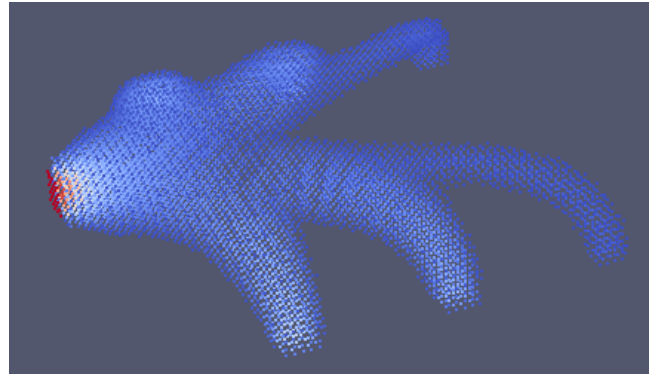


Fig.13 Obtained flow path after the operation 10 times.

数値流体計算と流速の小さい格子点を壁に置換える処理を繰り返すと、流出点として設定した位置から流出しなくなるので、その手前で処理を止める必要がある。

3.2 流路の細線化による配管経路獲得

3.1 節で説明した数値流体計算と流速の小さい格子点を壁に置き換える処理を繰り返して得た流路を細線化 (thinning)⁵⁾することにより、分岐の位置決定や系統図の獲得を行う。Fig. 14, 15 は Fig. 9 で示した流路を細線化して得た分岐の位置や系統図を示す。



Thinning

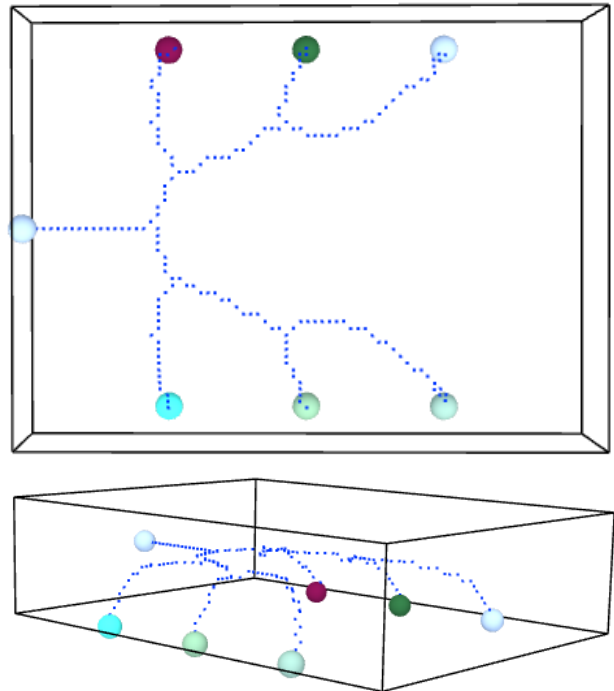


Fig.14 Thinning and the arrangement of branches.

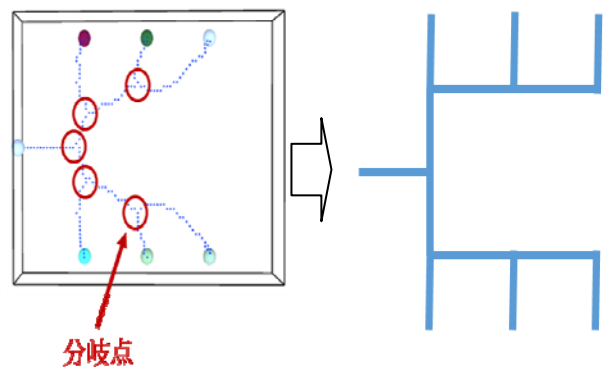


Fig.15 Obtained piping diagram by the thinning.

3.3 レイノルズ数による流路の違い

本研究では、パイプ長や分岐の個数など総合的な施工コストが最小となる配管経路を得ることが目的なので、流体シミュレーションで設定するレイノルズ数 (Re) は必ずしも実際に管内を流れる流体の物理的性質を反映させる必要は無い。Re を変えると流路は変化する。

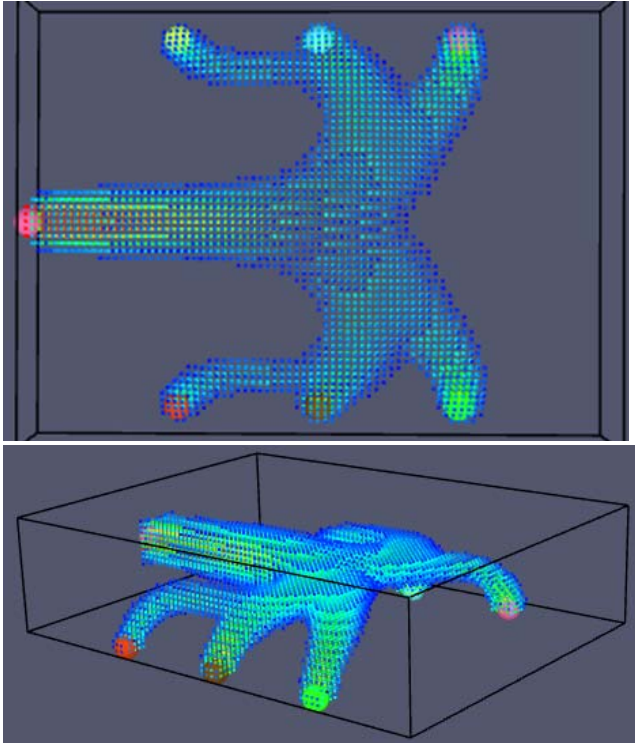


Fig. 16 Obtained flow path with 125 times Re.

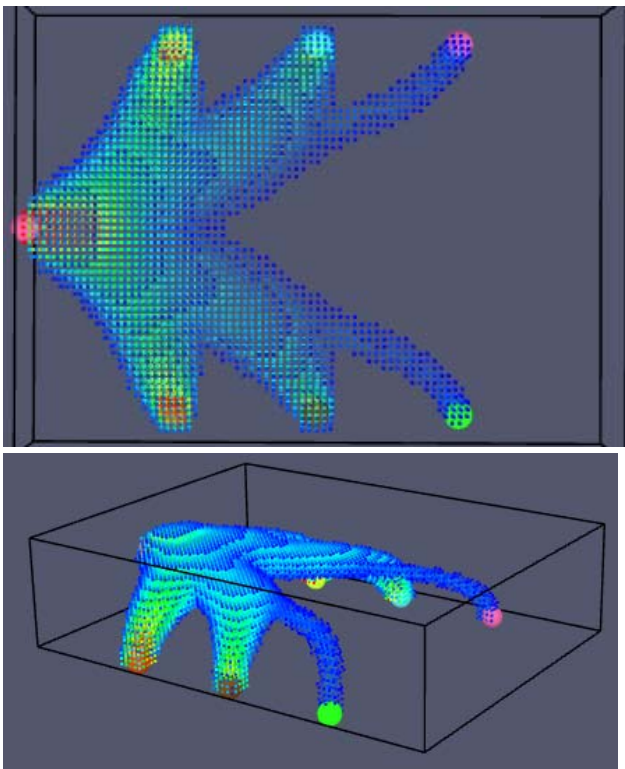


Fig. 17 Obtained flow path with 1/125 Re.

Fig. 16 は Fig. 2 で示した問題において Fig. 3 から 13 で行った数値流体計算の Re を 125 倍にして流体シミュレーションと低速流速域削減を 7 回繰り返した結果を示す。また Fig. 17 は逆に Re を $1/125$ に設定して同様の計算を行った結果を示す。Re が大きいと流体の持つ運動量の効果が大きく表れ、カーブの部分で行き過ぎて戻るとような流路となる傾向がみられる。さらに Re を大きくするとカルマン渦が発生し、安定した流路が得られない。

3.4 障害物を回避する流路の獲得

Fig. 2 の設計対象空間中に直方体の障害物を 2 つ配置し、流体シミュレーションと低速領域削減処理を 10 回繰り返した結果を Fig. 18 に示す。きちんと障害物を避け、妥当な形状の流路を得ている。Fig. 19 は Fig. 18 で得た流路を細線化して得た結果を示す。障害物の存在する設計対象空間において妥当な分岐配管の配置を得ている。

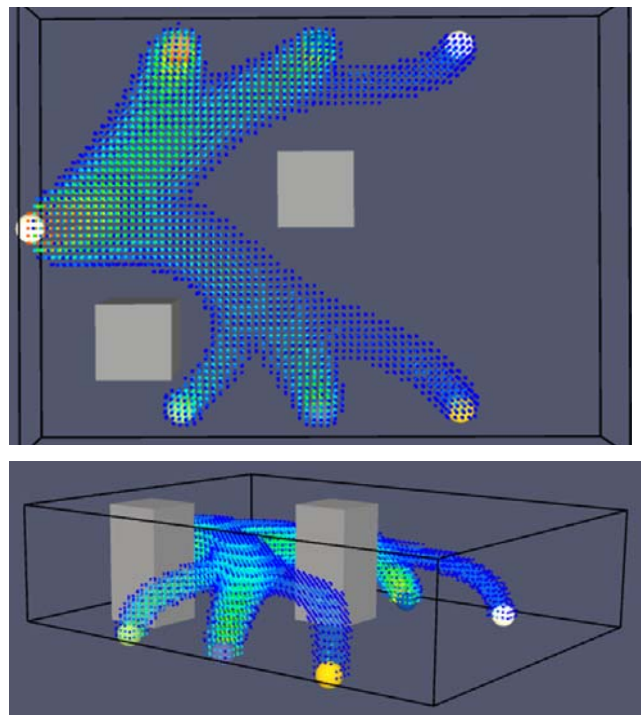


Fig. 18 Obtained flow path avoiding obstacles.

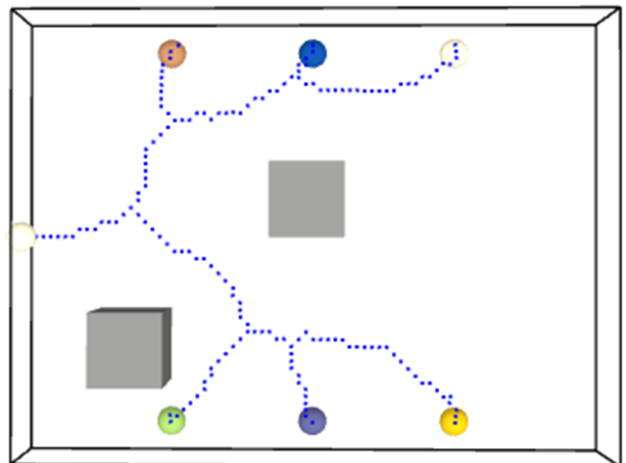


Fig. 19 Thinning and the arrangement of branches.

3.5 経路が複数存在する場合

Fig. 20 は図の左側 1 か所より流入して分岐し、右側の手前で合流して右側から流出する問題において流体シミュレーションと低速域削減を 5 回行って得た流路を示す。

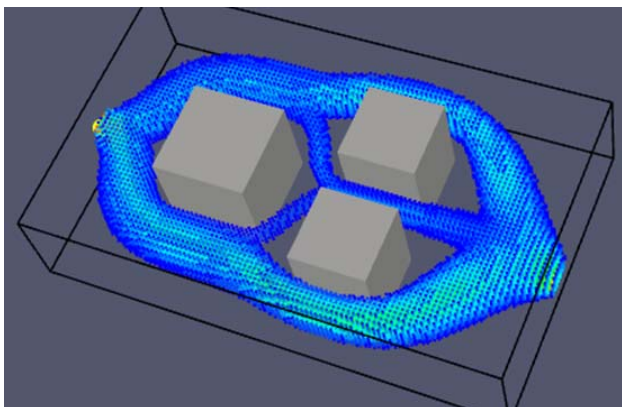


Fig. 20 Obtained flow after the operation 5 times.

設計対象空間中に障害物がまばらに存在する場合は分岐した後で合流するような流路が複数生成されるため、エアダクトのように経路の断面積確保が重要なケース以外ではこれをそのまま配管経路とするのは適切ではない。また、Fig. 21 は数値流体シミュレーションと低速域削減をさらに 2 回行った結果であるが、最短経路であるはずの内側の経路が消えてしまっている。流路中に複数経路が存在する場合の配管経路選択や最短経路が消滅する問題への対処は今後の課題である。

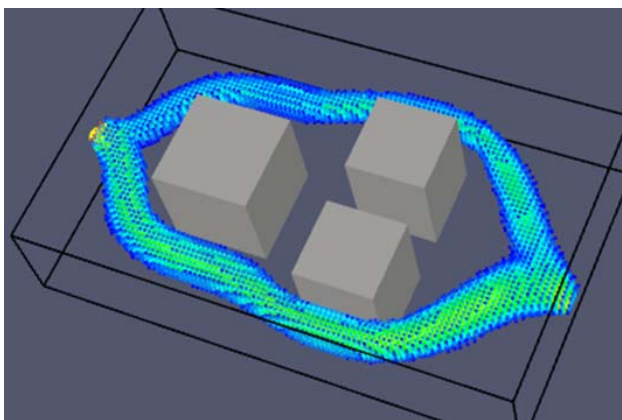


Fig. 21 Obtained flow after the operation 7 times.

4. 多相流による複数配管系統の経路獲得法

第 3 章で提案した方法は、分岐を含んだ 1 系統のみの配管経路を決めるための方法だった。しかし配管設計では、一般に複数系統の配管経路を互いに干渉させずに配置すること求められる。そこで水と油のように互いに混ざり合わない液体同士（多相流）の数値流体シミュレーション⁴⁾を利用して複数系統の流路を同時に得る方法について検討を行った。例えば設計対象空間内において機器配置に対応して流体 A および B がそれぞれ流入する箇所と、流出する箇所を設定する。ただし流体 A の流出箇所では流体 A のみ流出を許すが流体 B に対しては壁として機能するような境界条件を設ける。これは現実にはあり得ない設定であるが、シミュレーション上は可能である。初期状態として設計対象空間内で流体 A と B を市松

模様均一に配置し、流体 A および B が互いの流路を回避した妥当な流路が得られるかどうかシミュレーションを行い、配管設計への応用可能性について検討した。

Fig. 22 は左上方より赤、青、緑の流体が流入し、赤は右上へ、青は右下へ、緑は下方中央へ流出する場合の 3 相流シミュレーションで得た流路である。Fig. 23 は Fig. 22 の青い流体の流入口と流出口を逆に設定した場合の結果である。

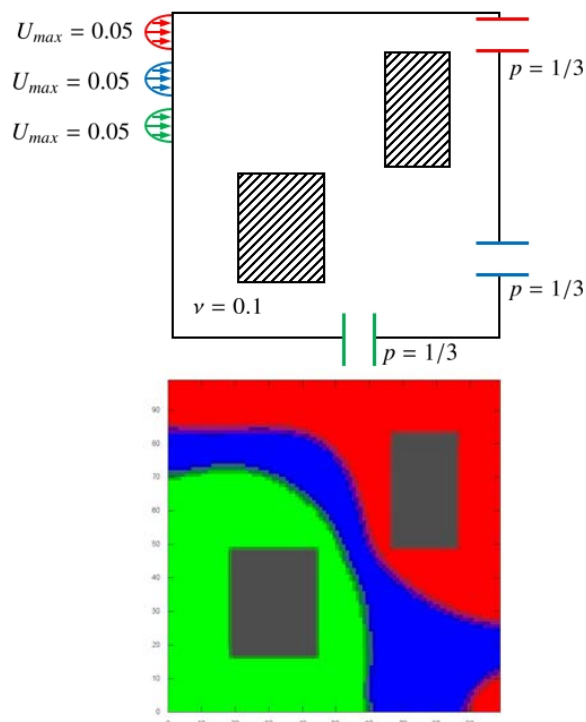


Fig. 22 A CFD result of 3-phase fluid simulation.

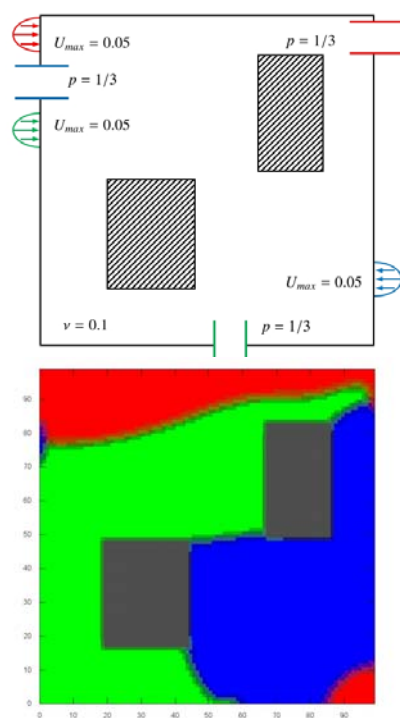


Fig. 23 A CFD result of 3-phase fluid simulation. (Direction of the blue fluid is inversed.)

Fig. 22 では3系統の流路を得たが、青色の流体の流入口と流出口を逆に設定したFig 23では、青色の流路が赤と緑の流体に塞がれて途切れている。以上の結果より、

- 流体の流出口周囲に流出できない別の流体が集まり、流れを阻害するため流路が形成されない。
- 流体の流路が別の流体の流れに押されて妥当な流路とならない。

等の問題が生じ、現状では多相流シミュレーションは配管設計にそのままでは応用できないと結論付けた。

5. 結 言

本論文では数値流体計算によるトポロジー最適化で得た流路に細線化処理を施して配管経路を得る方法を提案し、分岐を含むいくつかの例題へ適用し提案手法の妥当性について評価を行った。提案手法は計算コストが配管系統の流入点や流出点の個数に依存しない利点を有する。計算コストは設計対象空間で数値流体シミュレーションを行う時の格子数にのみ依存するが、正確な流体シミュレーションそのものは本研究では重要ではないため、格子数は流体の流入点や流出点、障害物などを表現可能な必要最小限の数とすれば良い。数値流体計算とトポロジー最適化で得た流路を細線化して得た分岐位置からパイプ配置図を求めたり、流路から複数の経路が得られる場合の配管経路決定方法は今後の課題である。

また本論文では複数系統のパイプ配置を同時に決めるため、多相流の数値流体シミュレーションを利用する方法について検討し、シミュレーション結果より、異なる流体同士が互いの流れを阻害する働きが大きすぎるため、現状では配管設計に使用できないとの結論を得た。

謝 辞

本研究はH28年度JST マッチングプランナープログラム「企業ニーズ解決試験」課題番号MP28116808445より補助を受けた。また須賀工業株式会社ならびに新菱冷熱工業株式会社よりご支援いただいた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 安藤悠人・木村元, 自動経路探索システムにおける複数本配管への対応, 日本船舶海洋工学会論文集, vol. 20, pp. 221-230, 2014.
- 2) K. Yonekura and Y. Kanno: A flow topology optimization method for steady state flow using transient information of flow field solved by lattice Boltzmann method, Struct. Multidiscip. Optim., vol. 51, no. 1, pp. 159-172, 2014.
- 3) 薦原道久・高田尚樹・片岡武: 格子気体法・格子ボルツマン法: 新しい数値流体力学の手法, コロナ社, 1999.
- 4) S. Leclaire, M. Reggio, and J. Trepanier: Progress and investigation on lattice Boltzmann modeling of multiple immiscible fluids or components with variable density and viscosity ratios, J. Comput. Phys., vol. 246, pp. 318-342, 2013.
- 5) 慶田航, 佐多広海: Voxel 図形の塗り潰しと細線化による配管自動設計に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 Vol.22, pp.377-381, 2016.

付 録

Fig. 2 で示した問題の領域の大きさは幅×高さ×奥行きがそれぞれ $4 \times 1 \times 3$ で、これを $80 \times 20 \times 60$ 個の格子に分割して計算を行った。流入口は高さ0.5の位置にあり、流出口は底面に側面から0.2離れた位置に間隔1で両側面付近に3個並んでいる。流入口・流出口共に形状は辺の長さ0.2の正方形で、流入口における流速は0.01で流速分布は均一、流体の動粘性係数を0.1としている。

Fig. 18 のシミュレーションでは、Fig. 2 と同じ幅×高さ×奥行きで、流入口と流出口の形状や流速分布および流速、流体の動粘性係数も共に同じだが、 $0.5 \times 1 \times 0.5$ の大きさの障害物が1つは流入口のある左側の壁から0.5、下方の壁から0.5離れた場所に置かれ、もう1つは流入口のある左側の壁から1.7、下方の壁から2離れた場所に置かれている。

Fig. 20 およびFig. 21 のシミュレーションでは、領域の大きさは幅×高さ×奥行きがそれぞれ $5 \times 1 \times 3$ で、これを $100 \times 20 \times 60$ 個の格子に分割して計算を行った。流入口に近い側の障害物は大きさが $1 \times 1 \times 1$ の直方体で左側の壁から距離1離れている。残りの2つの障害物は同じ大きさで $0.8 \times 1 \times 0.8$ の直方体であり、右側の壁から距離1.5、それぞれ上側の壁と下側の壁から0.5離れている。また、この2つの障害物は距離が0.4離れており、左側の障害物からは1.7離れている。流入口・流出口共に形状は辺の長さ0.2の正方形で、流入口における流速は0.01で流速分布は均一、流体の動粘性係数は0.1として計算した。

Fig. 22 およびFig. 23 の2次元3相流シミュレーションでは、領域の大きさは幅×高さがそれぞれ 100×100 で、これを 100×100 個の格子に分割して計算を行った。各流入口の大きさは5、流出口の大きさは5、各流入口の流速は0.05、各流出口の圧力 $1/32$ 、動粘性係数を0.1と設定した。赤・青・緑の流体は全て同じ密度や動粘性係数を設定した。この2次元3相流シミュレーションでは、流入口中央の最大流速 U で両端での流速が0になるように2次元関数の速度分布を与えている。