平成28年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

題目 微細空間域の各種畳織り金網の ろ過性能評価システムの開発

主専攻 知能情報メディア主専攻

著者 山倉 洸人

指導教員 三谷 純

要 旨

ろ過素材の一種である金網フィルタの中には、「畳織り」と呼ばれる構造をもつものがある。この 構造は、他の構造と比べてワイヤの密度が高く強度とろ過精度に優れている。しかしながら、畳 織り金網のろ過性能は計測に専用の機器が必要な上多大な労力がかかる。また、その測定方法も 業者ごとに異なるため、統一された指標が存在していない。これらの問題を解決するために金網 フィルタのろ過性能算出システムが提案されたが、粒子の堆積によるろ過性能の変化が考慮され ていないなどの問題がある。そこで本研究では、既存のシステムを改良し、より信頼性と汎用性 を向上させたシステムを作成する。本論文では、特定の分布に従った粒子の生成と断面形状の異 なるワイヤを用いた金網モデルの作成の手法を提案する。これによって、既存手法と比較して実 際のろ過作業に近いシミュレーションが可能になり、より正確な計測結果が得られることが期待 出来る。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究の目的	1
第2章	金網フィルタについての予備知識	2
2.1	金網の種類、構造	2
	2.1.1 平畳織り属性	2
	2.1.2 綾畳織り属性	3
2.2	金網の幾何的特性...................................	4
2.3	ろ過性能の評価法	5
第3章	関連研究	6
3.1	ろ過シミュレーション	6
	3.1.1 織物、編み物のろ過シミュレーション	6
	3.1.2 多孔質媒体のろ過シミュレーション	7
3.2	金網のモデリング....................................	7
	3.2.1 中心線の生成	8
	3.2.2 断面形状の追加	9
第4章	提案手法	11
4.1	粒子径分布に従った粒子の生成..................................	11
	4.1.1 粒子径の定義	11
	4.1.2 粒子径分布	11
	4.1.3 粒子径ごとの粒子数の計算方法	13
4.2	ワイヤの断面形状の変形とそれに伴う中心線の変形	16
第5章	結果と考察	19
5.1	金網モデル	19
5.2	提案手法を用いたろ過シミュレーションの比較実験	21
第6章	まとめと課題	25
6.1	まとめ	25
6.2	今後の課題	25

謝辞

参考文献

26

27

ii

図目次

2.1	SPW(Single Plain Dutch Weave)	2
2.2	DTW(Dutch Twilled Weave)	3
2.3	BMT(Broad Mesh Twilled Dutch Weave)	3
2.4	畳織り金網の幾何的特性の図解	4
3.1	フィルタを通過する粒子を示す ANSYS FLUENT の例	6
3.2	近似による織物構造の開孔部のモデル化	7
3.3	金網のモデリングの手順	8
3.4	横線の中心線の構造	9
3.5	断面形状生成の図解	10
4.1	粒子径分布に従った粒子群を用いたろ過シミュレーションの様子.......	14
4.2	使用した粒子径分布	15
4.3	粒子径ごとの粒子の通過数................................	16
4.4	生成した粒子が金網を通過するまでの時間...............	16
4.5	矩形断面を持つワイヤの中心線	17
4.6	矩形断面を持つワイヤで構成された金網モデルの例 (SPW)	18
5.1	矩形断面を持つワイヤの SPW	19
5.2	矩形断面を持つワイヤの DTW	20
5.3	矩形断面を持つワイヤの BMT	20
5.4	ろ過シミュレーションの様子.................................	22
5.5	SPW のろ過シミュレーションの結果	22
5.6	SPW の誤差の比	23
5.7	DTW のろ過シミュレーションの結果	23
5.8	DTW の誤差の比	24

第1章 序論

1.1 研究背景

我々の生活において、安全な水や空気は必要不可欠であるが、これらを得るためには異物を取り 除いて清澄化する必要がある。異物を取り除く方法の一つに、小さな隙間や穴の空いたもの(フィ ルタ)を通して異物を除去する「ろ過」がある。フィルタの素材は綿や砂利、紙など様々だが、そ の中でも金属のワイヤを編んで作られる金網フィルタは機械的強度や耐熱性に優れ、剥離や経時 変化が小さい。この金網フィルタのうち、「畳織り」と呼ばれる構造を持つものは金網フィルタの 中でも高い強度と流動性、低い圧力損失といった特性を持ち、微細なろ過粒度を得ることが可能 である。しかしながら、「畳織り」の構造上粒子が通過する穴(開孔部)が上部から確認できず光 学的に測量できないため、理論的なろ過性能の評価は困難であるという問題がある。そのため各 企業が独自にろ過性能を測定・評価しており、正確な統一評価指標が存在しない。

1.2 研究の目的

「畳織り」構造を持つ金網フィルタの評価指標を統一するため、「畳織り」構造を持つ金網のろ 過性能を算出するシステムが小林らによって提案された [1]。このシステムでは、「畳織り」構造 を持つ金網の理想的な近似 3D モデルを作成し、ろ過対象の粒子に見立てた仮想剛体球を落下さ せ、金網を通過した球の直径から性能指標を求めるシミュレーションを行う。これにより、実際 のろ過性能測定に比べてかかる時間と労力が削減でき、結果を新たな指標として使用できる。

しかし小林らのシステムでは、粒子径分布に従った粒子の生成ができないため、粒子の目詰ま りによるろ過性能の低下などが正確にシミュレーションできていなかった。粒子径分布および粒 子の目詰まりについては4章で説明する。また、ワイヤの断面形状の変形を考慮していないため、 測定できる金網の構造に制限があった。本研究の目的は、金網のろ過性能測定にかかる時間を削 減すると同時に、上記の点を改善することでシミュレーションの精度を向上させ、より実用的な ろ過性能の評価指標を得ることである。

第2章 金網フィルタについての予備知識

2.1 金網の種類、構造

本章では、本研究で対象とする「畳織り」構造を持つ金網フィルタの種類とその構造について説 明する。「畳織り」構造を持つ金網は、主に「平畳織り」と「綾畳織り」の二つに大別される。「平 畳織り」は、等間隔に並ぶまっすぐなワイヤ(縦線と呼ぶ)と、互いに隣接しながら縦線に対して 垂直に伸びるワイヤ(横線と呼ぶ)がそれぞれ1本ずつ交互に交わった織り方である。「綾畳織り」 は、縦線と横線が2本ずつ交互に交わった織り方である。本研究では、[1]にならって平畳織り構 造を持つものを「平畳織り属性」、綾畳織り構造を持つものを「綾畳織り属性」とそれぞれ定義す る。以降、2.1.1節では平畳織り属性、2.1.2節で綾畳織り属性の織り構造について説明する。

2.1.1 平畳織り属性

SPW(Single Plain Weave):

通常の平畳織りであり、図 2.1 に示すような構造を持つ。 横線が相接するように並んだ織り 方であり、高い強度が得られる。



図 2.1: SPW(Single Plain Dutch Weave). (左) SPW を上から見た実物写真. (右) SPW の構造の模式 図 (出典: [9])

2.1.2 綾畳織り属性

DTW(Dutch Twilled Weave):

図 2.2 に示すように、畳織りの構成を綾織りに適用した構造を持つ。横線の密度が SPW に 比べて 2 倍程度高く、粒子が通過する隙間 (開孔部) が小さいため、粒子が通過する織り金網 の中で最も微細なろ過粒度を得ることが可能である。また、表面が平滑であることも特徴の 一つである。単に綾畳織りという場合はこの構造を指す。





BMT(Broad Mesh Twilled Dutch Weave):

図 2.3 に示すような構造を持つ。DTW よりも横線の密度が低いため、 横線が隣接する横線 と重なっておらず、横線の間隔は SPW と同程度である。



図 2.3: BMT(Broad Mesh Twilled Dutch Weave)(出典: [9])

2.2 金網の幾何的特性

金網フィルタの構造や幾何的特性は複数のパラメータで決定される。2.1 節で示した畳織り構造 を持つ金網の場合、縦線と横線で線の構造が異なるため、以下に示すパラメータが異なる。それ ぞれのパラメータの図解を図 2.4 に示す。



図 2.4: 畳織り金網の幾何的特性の図解

メッシュ数:

メッシュ数とは通常 linch(25.4mm) あたりにある網目の数を指す。しかし、畳織りの場合は 通常の織り方と異なり開孔部を確認しにくいため、linch あたりの線の本数と定義される。

ピッチ長:

ピッチ長とは2本の線の中心間の距離を指す。金網のJIS 規格は通常メッシュ数を提示して おり、多くの企業も自社製品のカタログにはメッシュ数を掲載しているが、本研究ではピッ チ長をパラメータとする。

線径:

線径とは、線の直径を指す。畳織りの場合、製造時に横線が曲がるため一般に縦線より横線 の方が細く設計される。メッシュ数が等しい金網同士でも線径の違いにより開孔部の大きさ が異なるため、ろ過性能などに差が出る。

2.3 ろ過性能の評価法

金網のろ過性能評価は、金網の種類や求める値によって測定法が異なる。ここでは本システム とろ過性能測定の行程がよく似ているパーティクルカウンタを用いた測定法を説明する。

パーティクルカウンタとは、空気中や液体中にある塵や埃などをカウントする計測器であり、微 粒子計とも呼ばれる。パーティクルカウンタの測定原理は主にサンプル中の粒子によってセンサ の光が散乱した際の電圧上昇から粒子径と粒子数を算出する光散乱方式と、サンプル中の粒子に よりセンサの光が遮蔽された際の電圧降下から粒子径と粒子数を算出する光遮蔽方式に分けられ る。一般に、光散乱方式は0.1~数十µmの粒子に対して、光遮蔽方式は1~数百µmの粒子に対 して用いられる。

パーティクルカウンタによる測定の手順を説明する。まず純水にろ過する粒子を溶かしたサン プルを用意し、パーティクルカウンタで単位体積あたりの粒子径ごとの粒子数を測定する。次に サンプルをフィルタでろ過し、再度パーティクルカウンタでろ過後の粒子径ごとの粒子数を測定 する。二つの測定結果から、フィルタによってろ過された粒子径と粒子数を算出し、フィルタの ろ過性能を評価する。

第3章 関連研究

本章ではろ過シミュレーションに関する関連研究と、本研究で使用した金網のモデリング手法 について述べる。

3.1 ろ過シミュレーション

3.1.1 織物、編み物のろ過シミュレーション

金網フィルタに焦点を当てたろ過シミュレーションに関する研究は少ないが、金網の構造によく 似た織物や編み物に関するシミュレーションの研究は多く行なわれている[2][3][4]。Weigmann ら [2]は、構造生成・特性予測を行う材料工学ソフト GeoDivt[10]を用いて粒子の堆積挙動を考慮した 煤のろ過シミュレーションを行った。Lefevre ら [3]は、ろ過モデルと流れモデルを結合して繊維素 材と樹脂を用いた成形複合材 (molding conposites)の成形シミュレーションを行った。Nazarboland ら [4]は、B-Spline 曲線を用いた織物フィルタの3次元モデルと数値流体力学ツール、および様々な 形状やサイズを持つ粒子を導入したろ過作業のシミュレーションツールを提案した。Nazarboland は、数値流体力学を扱うツールとして ANSYS Fluent[11]というソフトを用いている。これは図 3.1 に示すように様々なタイプの流体の流れや物質の移動などのモデル化が可能であり、シミュレー ションのモデル化に大きく貢献している。



図 3.1: フィルタを通過する粒子を示す ANSYS FLUENT の例 (出典: [11])

3.1.2 多孔質媒体のろ過シミュレーション

多孔質物質を用いたろ過シミュレーションについて、Cox ら [5] は C-CP 繊維で構成されたフィ ルターによる空気ろ過のモデル化を行い、Rief ら [6] は、繊維状ろ材を用いた静電気による空気ろ 過のシミュレーションを行った。Angelova ら [7] は図 3.2 に示すように織物構造を持つ物体の開孔 部を複数の基本図形の集合に近似してモデル化することで、物体の通気性をシミュレーションに よって評価した。



図 3.2: 近似による織物構造の開孔部のモデル化(出典:[7])

3.1.1 節および 3.1.2 節で紹介した研究で用いられている数値流体力学は、流体の運動に関する 方程式を解くことで流体の動きを観察する数値解析・シミュレーション手法である。その手順は 一般に、計算格子を用いて対象物体の 2D または 3D モデルの周りの空間を離散化し、反復計算に よって各格子ごとに流体の運動に関する方程式の近似解を求めて圧力や流速などを決定する。し かし、一般にこの計算格子生成は時間と手間のかかる作業である。また、精度の高い 3 次元の流 体シミュレーションを行うためには計算格子の数 (格子点数)を増やす必要があり、流れ方程式の 計算にかかる時間が増大してしまう。例えば、Cox ら [5]の流体シミュレーションに要した時間は 一般的な計算機で約 20 分であり、リアルタイムでのシミュレーションは難しいことがわかる。金 網フィルタのろ過性能測定にかかる時間の短縮も本研究の目的の一つであるため、本研究では流 体シミュレーションではなく剛体シミュレーションで金網のろ過シミュレーションを行う。

3.2 金網のモデリング

小林ら[1]は金網のモデリングについて、任意の断面形状を金網の中心線に沿って連結すること で金網のポリゴンメッシュを生成した。小林らのモデリング手法は、図 3.3 に示す流れに沿って行 われる。縦線と横線の交差点は金網の種類と 2.2 節で示したパラメータから容易に算出できるた め、中心線の生成と断面形状の追加について説明する。



図 3.3: 金網のモデリングの手順(出典:[1])

3.2.1 中心線の生成

中心線の生成については、畳織り構造を持つ金網の縦線は直線であるため、詳しい説明は省略 する。本節では横線の中心線について説明する。横線の中心線は図 3.4 に示すように直線部分と、 その接線方向に接する二つの円弧部分で構成される。図 3.4 中の Dw、Df、Pw、θ はそれぞれ縦線 の線径、横線の線径、縦線のピッチ長、横線の中心線の傾きである。このような中心線を任意の 数で分割し、分割線上の中心線が直線部分と円弧部分のどちらに属するかを判定して中心線の位 置を計算する。これらの点列を連結して1 ピッチの中心線を作成する。金網の構造は周期的であ るため、この中心線を複数接続することで金網全体の中心線を作成することができる。



図 3.4: 横線の中心線の構造. 点線は分割線を表す(出典: [1])

3.2.2 断面形状の追加

次に、生成した中心線に断面形状を追加する方法について説明する。まず、断面形状を追加する中心線の点 P_i を選択し、前後の点 $P_{i-1} \ge P_{i+1}$ からベクトル $\overrightarrow{P_{i-1}P_i} \ge \overrightarrow{P_iP_{i+1}}$ の平均ベクトル T を生成する。また、 $T \ge XZ$ 平面に正射影したベクトル $T_{XZ} \ge X$ 軸方向の単位ベクトル $U_X \ge$ の角度を $\theta \ge$ して、Z 軸方向の単位ベクトル $U_Z \ge \theta$ だけ回転させたベクトルを N、 $T \ge N$ の外積を B とおくと、点 P_i 上の断面形状面は N-B 座標軸から計算される。N 軸方向とB 軸方向の単位ベクトルをそれぞれ n、b とおき、媒介変数 u と式 $g(u) = (g_1(u), g_2(u))$ を用いて以下のように表すベクトル $w \ge h_i$ に加えることで、点 P_i における断面形状曲線の点 E を作成する。

$$w = g_1(u) \cdot n + g_2(u) \cdot b \quad (0 \le u \le 2\pi)$$

ここで、断面形状の半径を任意にするため、媒介変数 u の式は N 軸方向の半径 R_N と B 軸方向の 半径 R_B を用いて以下のように表される。

$$g(u) = (g_1(u), g_2(u)) = (R_N \cos(u), R_B \sin(u))$$

本研究ではこのモデリング手法を用いて矩形断面の生成を行い、測定できる金網の構造を増や すことでシミュレーションの汎用性を向上させる。





第4章 提案手法

本章では小林ら [1] の手法をベースとして、1.2 節で述べた評価システムの問題点を解決するために提案する手法について述べる。4.1 節で粒子径分布に従った粒子の生成、4.2 節で矩形断面を持つワイヤを用いた場合の中心線の変形について述べる。

4.1 粒子径分布に従った粒子の生成

実際のろ過作業では、粒子径の大きな粒子がフィルタの開孔部を塞ぐことによって粒子が堆積 し、ろ過性能が変化する事象が発生する。Litchyら [8] は粒子径の大きい粒子の割合が高いほど粒 子がフィルタの表面で堆積しやすくなり、フィルタが詰まる速度が大きくなることを実験によっ て示した。この体積した粒子をケークと呼び、このケークの挙動を正確にシミュレーションする ことで目詰まりによるフィルタのろ過性能の変化を再現することが可能になる。また、ケークの 堆積挙動からフィルタの耐用年数を推測することも可能である。本研究では以下に示す粒子径分 布に従った球を生成することで、実際のろ過作業に近いろ過シミュレーションの実現を目指す。

4.1.1 粒子径の定義

現実のろ過作業で扱う粒子の形は球や立方体といった単純に表現できるものではなく、複雑か つ不規則な形をしており、直接的に粒子径を定義することはできない。そのため、球相当径とい う間接的な定義が用いられる。これは、沈降法やレーザー回折・散乱法などのある測定原理で特 定の粒子を測定した場合に同じ結果を示す球体の直径をもってその粒子の粒子径とするものであ る。本システムでは、この球相当径がすでに測定された粒子群を扱うものとし、シミュレーショ ンに用いる粒子はすべて球体とする。

4.1.2 粒子径分布

粒子径分布とは、測定対象となる粒子群のなかに含まれる粒子径とその存在比を示す指標であ る。割合の基準としては体積、面積、長さ、個数などがある。本研究で使用する粒子径分布は、表 4.1 に示す ISO 自動車用 Air Cleaner Test Dust(AC ダスト)である。AC ダストは自動車用部品など の磨耗・耐久試験に用いられるほか、気体・液体の清浄機器の性能試験にも用いられる。したがっ て、AC ダストについてろ過シミュレーションを行うことで清浄機器の性能を推測することが可能 となる。粒子径分布表4.1 は対象となる粒子群の粒子径をある特定の値で区切り、その値以下の粒 子の量が全体の何%であるかを表す積算分布になっている。この粒子径分布は本来質量基準であ るが、すべての粒子密度が一定であるため体積基準と同等である。また、より詳細な粒子径分布 についてシミュレーションする場合も考慮し、ユーザが粒子径とその存在比を任意に指定できる Spinbox を実装した。

粒子径 (um)	アンダーサイズ(質量基準)%					
(hiii)	Fine(A2)	Coarse(A4)				
352.00		100.0				
248.90		99.0-100.0				
176.00	100.0	97.2-98.2				
124.50	99.0-100.0	93.0-94.0				
88.00	97.6-98.9	85.0-86.5				
44.00	89.5-91.5	58.0-60.0				
22.00	73.5-76.0	36.0-38.5				
11.00	57.0-59.5	21.0-23.0				
5.50	39.5-42.5	11.5-12.5				
2.75	21.3-23.3	5.5-6.3				
1.38	7.0-10.0	1.8-2.1				
0.97	3.0-5.0	0.74-0.83				

表 4.1: ISO 自動車用 Air Cleaner Test Dust(出典: [12])

4.1.3 粒子径ごとの粒子数の計算方法

生成する粒子は、測定結果の簡略化のため対象となる粒子系分布表に記載されている粒子径を 持つもののみとし、それらの区間にある粒子径については考慮しない。それぞれの粒子径におけ る粒子の個数は以下のようにして求める。まず粒子系分布表にある粒子径、体積、割合(アンダー サイズ)と、それぞれの生成個数を次のようにおく。

粒子径: r_i ,体積: V_i ,割合: w_i ,生成個数: n_i

添字のiは粒子径の小さいものから順に割り当てる。粒子径 $r_k(k > 1)$ の質量の総和と粒子径 r_{k-1} までの各粒子径の質量の総和との比が粒子径 r_k の粒子と粒子径 r_{k-1} 以下の粒子との存在比に等しいため、以下の式が成り立つ。

$$n_k V_k : \sum_{i}^{k-1} n_i V_i = w_k - w_{k-1} : w_k$$

したがって、粒子径 rkの粒子の生成個数 nk は以下のように表せる。

$$n_k = \frac{(w_k - w_{k-1})\sum_{i=1}^{k-1} n_i V_i}{w_k V_k}$$

本システムでは、測定対象とする粒子系分布のうち最も小さい粒子径の生成個数をユーザが設 定し、それ以外の粒子径の粒子の生成個数を算出する。様々な粒子径の粒子を複数生成すること で、金網が粒子によって目詰まりし、ろ過性能が変化する様子をシミュレートすることができる。 実際に粒子系分布に従った粒子群を用いたシミュレーションの様子を図4.1に、それぞれに使用し た粒子径分布を図4.2に示す。粒子径ごとの存在比が変化するとそれぞれの粒子数の生成個数が変 化しており、生成されるケークにも違いがあることがわかる。



(a)



(b)

図 4.1: 粒子径分布に従った粒子群を用いたろ過シミュレーションの様子

Diameter	1:	600.00	microm	•	Distribution	1:	100.00 %	-
Diameter	2:	500.00	microm	÷	Distribution	2:	70.00 %	÷
Diameter	3:	250.00	microm	÷	Distribution	3:	50.00 %	÷
Diameter	4:	200.00	microm	÷	Distribution	4:	30.00 %	-
Diameter	5:	100.00	microm	÷	Distribution	5:	5.00 %	÷

				(a)				
Diameter	1:	600.00	microm	•	Distribution	1:	100.00 %	÷
Diameter	2:	500.00	microm	•	Distribution	2:	90.00 %	÷
Diameter	3:	250.00	microm	•	Distribution	3:	50.00 %	÷
Diameter	4:	200.00	microm	•	Distribution	4:	30.00 %	÷
Diameter	5:	100.00	microm	•	Distribution	5:	20.00 %	÷

(b)

図 4.2: 使用した粒子径分布

シミュレーションの際には、図4.3 に示すように粒子径ごとの金網を通過した粒子の個数と、図 4.4 に示すように生成した全体の粒子数に対して金網を通過した粒子の個数が10%増加するごとに 通過に要した時間をミリ秒単位で表示する。ユーザはこれらの結果を含めてろ過シミュレーショ ンを観測することで、金網の性能と実際のろ過の様子を直感的に理解することができる。

Result	t	×
1	Result Of One Diameter 100 Diameter 150 Diameter 200 Diameter 350 Diameter 500	Simulation : : 306 / 500 : 128 / 148 : 306 / 374 : 57 / 69 : 0 / 23
	ОК]

図 4.3: 粒子径ごとの粒子の通過数 (粒子径: 通過数/生成数)

-Time
10%): 3.315 ms
20%%: 3.88 m s
30%): 4.438 ms
40%): 4.955 ms
50%): 5.413 ms
60%): 6.051 ms
70%): 7.419 ms
80%): 12.383 ms
90%: 13.494 ms

図 4.4: 生成した粒子が金網を通過するまでの時間

4.2 ワイヤの断面形状の変形とそれに伴う中心線の変形

金網をプレス機などで押しつぶし、線同士の隙間を狭くすることによってろ過精度を上げること ができる。また、金網製造時に矩形断面を持つワイヤを使うことでも同様の効果が得られる。こ れらの方法によって作成される金網フィルタは、金網を構成するワイヤの断面形状が矩形となる ため、通常の楕円断面を持つワイヤで構成された金網とはモデルの生成方法が異なる。

ワイヤの断面形状が楕円の場合、横線の中心線は図 3.4 のようになる。この場合、横線は直線部 分とその接線方向に接する二つの円弧から成り、理想的な近似表現と考えられている。しかし圧 延などによって断面形状が変形すると、同時に横線の中心線の形状も変形すると考えられる。圧 延によるワイヤの細部の形状変化を定式化することは難しいため、ここでは矩形断面を持つワイ ヤを用いた場合の横線の中心線の変形について考える。矩形断面を持つワイヤで構成された金網 の横線の中心線は、図 4.5 のように縦線の上部で直進した後円弧を描くように曲がり、隣の縦線の 下部に向かって直進する。図 4.5 中の Dw, Df, Pw, L, d, およびθはそれぞれ縦線の線径、横線の線 径、縦線のピッチ長、横線の直線部分の距離、横線の直線部分の対角線の長さ、および横線の中 心部分の傾きである。θの値は図 4.5 中の二つの直角三角形から以下の式で求めることができる。

$$\theta\ = \cos^{-1}(\frac{P_w-D_w}{d}) + \cos^{-1}(\frac{L}{d})$$

この中心線を 3.2 節で説明した小林らのモデリング手法 [1] に適用することで矩形断面の金網モデルを生成する。このとき、断面形状の追加における媒介変数 u の式は以下のように表される。

$$g(u) = (g_1(u), g_2(u)) = \begin{cases} (R_N, R_B tan(u)) & (0 \le u \le \frac{\pi}{4}, \frac{7}{4}\pi \le u \le 2\pi) \\ (R_N tan(\frac{\pi}{2} - u), R_B) & (\frac{\pi}{4} < u < \frac{3}{4}\pi) \\ (-R_N, -R_B tan(u)) & (\frac{3}{4}\pi \le u \le \frac{5}{4}\pi) \\ (-R_N tan(\frac{\pi}{2} - u), -R_B) & (otherwise) \end{cases}$$

生成した金網の 3D モデルを図 4.6 に示す。本システムでは、ワイヤの断面形状を楕円と矩形の二 種類から選択できるものとし、矩形断面については同じ線径の楕円断面が内接するような矩形に なるように設定した。



図 4.5: 矩形断面を持つワイヤの中心線



図 4.6: 矩形断面を持つワイヤで構成された金網モデルの例 (SPW)

第5章 結果と考察

本章では4章で提案した手法を用いた結果について述べる。5.1節では新たに生成した矩形断面 を持つワイヤの金網モデルを示す。5.2節では実際の計測値と提案システムで計測したろ過性能の 値の比較実験の結果を示す。

5.1 金網モデル

本システムで作成した矩形断面を持つ金網モデルを以下に示す。図 5.1, 図 5.2, 図 5.3 はそれぞ れ SPW, DTW, BMT の生成結果である。矩形断面を持つワイヤを用いた金網フィルタや、プレス 機によって圧延した金網フィルタは通常のワイヤを用いた金網フィルタに比べて製造コストが高 くなることが予想される。したがって、このようなモデルを用いて計算機上でシミュレーション を行うことで計測にかかるコストを削減できる。また、3D プリンタでモデルを出力することで、 実際の金網の形状把握や新製品の開発に活用できると考えられる。



図 5.1: 矩形断面を持つワイヤの SPW



図 5.2: 矩形断面を持つワイヤの DTW



図 5.3: 矩形断面を持つワイヤの BMT

5.2 提案手法を用いたろ過シミュレーションの比較実験

提案手法を用いて改良した本システムの有用性を示すため、サンプルデータを用いて金網のろ過 性能の評価結果の精度の比較を行った。ろ過シミュレーションには八尾金網製作所(株)の製品カ タログの規格と同じ金網モデルを用いた。カタログには金網の規格ごとに公称ろ過粒度と絶対値 ろ過粒度が設けられており、その粒子径以上の粒子を95%以上除去できるような粒子径を公称ろ 過粒度、その粒子径以上の粒子を100%除去できるような粒子径を絶対ろ過粒度と設定している。 この二つの値は、金網の最大細孔径を求めるバブルポイント法という測定方法で得られる値と実 際に金網を通過した粒子の粒子径を測定することにより推定されたものである。

ろ過シミュレーションは、ある金網モデルに対して同じ粒子径を持つ粒子のみを複数落下させ、 粒子が1個以上金網を通過する粒子径の最大値より1大きい値をシミュレーションによる絶対ろ 過粒度(シミュレーション値)として求めた。物理シミュレーションには、衝突判定などの剛体シ ミュレーションを高速に行う物理エンジン PhysX[13]を用いた。シミュレーションの様子の例を 図 5.4 に示す。1回のろ過シミュレーションに要した時間は平均して1分ほどであり、バブルポイ ント法やパーティクルカウンタによる測定と比較して短時間でろ過性能を評価することができた。

SPW および DTW についてのろ過シミュレーションの結果を図 5.5 および図 5.7 に示す。縦軸は 測定値、横軸は金網の規格 (縦メッシュ数/横メッシュ数および縦線径/横線径) である。左から右に かけて線径が小さくメッシュ数が大きくなっており、金網の目が細かいことを意味している。図 5.5 および図 5.7 を見ると、全体を通してシミュレーション値が絶対ろ過粒度の付近に位置してい ることがわかる。加えて、シミュレーション値が一部の値を除いて公称ろ過粒度と絶対ろ過粒度 の間の値を取っていることから、シミュレーション値が理想的な金網の真の絶対ろ過粒度に近い 値になっていると推測できる。図 5.6 および図 5.8 は、SPW と DTW のそれぞれの規格での絶対ろ 過粒度とシミュレーション値の比を表したものである。SPW の比の平均は 0.91、最大値と最小値 はそれぞれ 1.0 と 0.85 であった。よって、三つの規格の金網に対する誤差は-10~-15%だと推定で きる。また、DTW の比の平均は 0.95、最大値と最小値はそれぞれ 1.10 と 0.75 であった。よって、 DTW のそれぞれの規格の金網に対する誤差は-25~10%だと推定できる。

以上の金網に対する誤差範囲は、金網製造時の金網の歪みやバブルポイント法の測定時の誤差 によって生じていると考えられる。金網の3Dモデルを生成する際に金網製造時の金網の歪みを再 現できれば、シミュレーション結果と実際のろ過粒度との誤差が小さくなると推測できる。



(a) SPW のろ過シミュレーション

(b) DTW のろ過シミュレーション

図 5.4: ろ過シミュレーションの様子



図 5.5: SPW のろ過シミュレーションの結果



図 5.6: SPW の誤差の比



図 5.7: DTW のろ過シミュレーションの結果



図 5.8: DTW の誤差の比

第6章 まとめと課題

6.1 まとめ

本研究では、過去に提案された「畳織り」構造をもつ金網フィルタをモデリングし、金網フィ ルタのろ過性能を物理シミュレーションによって推定するツールに改良を加え、より実用的な性 能測定が可能なツールを制作した。

ユーザの設定するパラメータによって金網の3Dモデルが生成され、粒子径分布に従った球を生成することで粒子による金網の目詰まりも考慮したろ過シミュレーションが可能になった。また、 金網を構成するワイヤの断面形状に矩形を追加したことで、矩形断面のワイヤを使用して製造された金網のろ過シミュレーションを行うことが可能になった。

提案手法によって改良されたシステムの実用性を示すため、提案システムで計測した金網の絶 対ろ過粒度と実際のろ過粒度で比較実験を行った。システムによる計測結果は、実際の測定結果 に近い値を示した。ろ過性能の測定には専用の機器を用いることなく、かつ短時間でろ過性能を 測定することができた。提案手法により、ケークによるろ過性能の変化や矩形断面のワイヤでの 金網を再現することが可能になり、より実用的かつ汎用性のあるろ過性能の評価指標を得ること ができた。また、「畳織り」構造を持たない金網フィルタにも同様にろ過シミュレーションを行う ことができるようシステムを拡張したため、金網フィルタの汎用的なろ過シミュレーションにも 利用することが可能である。

6.2 今後の課題

本システムの問題点として、まず実際の製造時に生じるばらつきや不規則な歪みと、ろ過作業 の際の金網や粒子の変形を考慮していないことが挙げられる。これらを考慮していないため、実 際の金網に対する測定値とシミュレーション結果の間に誤差が生じてしまう。また、液体にろ過 する粒子が分散しているような物質に対しては正確なシミュレーションが行えない、不織布など の不規則な形状をしたフィルタのろ過性能を測定できないなど、シミュレーションできるろ過作 業が限定されてしまっている。

より正確で汎用性の高いろ過シミュレーションを行うには、これらの問題を解決する必要があ る。加えて、生成する粒子の数を極端に多くするとシミュレーション速度が遅くなり、性能測定 に掛かる時間を短縮することが難しくなる。したがって、リアルタイムでのシミュレーションを 可能にするためには、シミュレータの高速化にも取り組む必要がある。その他、シミュレーショ ン結果を実際に製品の性能評価指標として使用するために、八尾金網製作所(株)と連携し実験・ 検証を繰り返すことで本システムによる性能指標の妥当性を向上させることができると考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くのご指導ご協力をいただきました本学大学院システム情報工学 研究科の三谷純教授に深く感謝を申し上げます。また、八尾金網製作所(株)様からは共同研究と して多くのアドバイスと、本研究の完成のために必要な資料を多数提供していただきましたこと を心から感謝いたします。そして、日頃から研究に関する有益なご意見を多くいただきました非 数値アルゴリズム研究室の皆様に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 小林嵩史, 三谷純, 石川幸男, 剛体物理シミュレーションを用いた 「畳織り」 金網のろ過性能 算出ツールの提案. 日本機械学会論文集 A 編 78.786 pp. 179-189. 2012
- [2] A. Wiegmann, S. Rief, A. Latz, Soot filtration simulation generation of porous media on the micro scale from soot deposition on the nano scale. Proceedings of the 2nd European Conference on Filtration and Separation, Compiegne, France. 2006.
- [3] D. Lefevre, S. Comas-Cordana, C. Binetruy, P. Krawczak, Coupling filtration and flow during liquid composite molding: Experimental investigation and simulation. Composites Science and Technology 69.13 pp. 2127-2134. 2009
- [4] M.A. Nazarboland, X. Chen, J.W.S. Hearle, R. Lydon, M. Moss, Modelling and simulation of filtration through woven media. International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 20 lss: 3, pp. 150 - 160, 2008.
- [5] C.L. Cox, P.J. Brown, J.C. Larzelere. Simulation of C-CP Fiber-Based Air Filtration. Journal of Engineered Fibers and Fabrics SPECIAL ISSUE 2008 – FILTRATION (2008).
- [6] S. Rief, A. Latz, A. Wiegmann, Computer simulation of Air Filtration including electric surface charges in three-dimensional fibrous micro structures. Filtration 6.2 pp. 169-172. 2006
- [7] R.A. Angelova, P. Stankov, I. Simova, I. Aragon Three dimensional simulation of air permeability of single layer woven structures. Open Engineering 1.4 pp. 430-435. 2011
- [8] M.R. Litchy, R. Schoeb, Effect of particle size distribution on filter lifetime in three slurry pump systems. MRS Proceedings. Vol. 867. Cambridge University Press, 2005.
- [9] Haver&Boecker. http://www.diedrahtweber.com/en/home/
- [10] Geodict http://www.geodict.com
- [11] アンシスジャパンhttp://www.ansys.com/
- [12] 一般社団法人日本粉体工業技術協会http://appie.or.jp/
- [13] PhysX. http://www.nvidia.co.jp/page/home.html