

# 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\*

小林 嵩史<sup>\*1</sup>, 三谷 純<sup>\*2</sup>, 石川 幸男<sup>\*3</sup>

## A Proposal of a Calculation Tool for Filtration Performance of Dutch Weave

Takafumi KOBAYASHI<sup>\*1</sup>, Jun MITANI and Yukio ISHIKAWA

<sup>\*1</sup>Univ. of Tsukuba, Dept. of Computer Science  
Tennoudai 1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8573 Japan

Measuring the maximum size of a particle which passes through wire cloth is important for evaluating the performance of its filtration. Although the Dutch Weave is a popular structure of wire cloth, it requires a special equipment to measure the size of spaces between wires since its structure is so complicated that optical measurement is not applicable. In this paper, we first propose a method for calculating the size analytically. Then we propose a new method which employs a physical simulation which runs on a PC based on the dynamics of rigid bodies to estimate the performance of filtration of a wire cloth. The wire cloth is represented with polygonal-mesh models, and the particles are represented with spherical models. The performance is presented as the maximum size of a sphere which passes through the polygonal-mesh models. The obtained values showed the proposed approach is applicable for estimating the performance of filtration. As our method is based on a physical simulation, it is possible to apply to non-existing wire cloths. This would be useful for developing new products.

**Key Words** : Structural Analysis, Analysis Model, Porous Material, Wire Cloth, Dutch Weave, Filtration, Physical Simulation

### 1. 緒 言

流体中の異物の除去や清澄化の過程における、ろ過及び分級作業にはフィルタが主に用いられる。中でも金網フィルタは耐久性や耐熱性に優れ、種々な分野で使用されている。しかし、金網フィルタに限らずフィルタの機能を十分に発揮するには、フィルタがもつろ過性能を正確に評価する必要がある。

ろ過性能の評価法にフィルタを通る最大硬質粒子径の測定が挙げられるが、金網フィルタの種類によって測定法が異なる。その中でも「畳織り」構造をもつ金網フィルタは構造の複雑さから顕微鏡などでの光学的測定が不可能であり、フィルタを気体が通過するときの圧力から性能を算出するバブルポイント法(図1)などが採用されている<sup>(1)</sup>。しかし、この手法は専用機器が必要な上、計測に時間を要する。また各メーカーによって、用いられる値が統一されていない。そのため、本稿では「畳織り」金網の性能評価を簡易化し労力を軽減するとともに、性能を表す基準となる指標を算出するためのツールを提案する。

金網に関する過去に行われた研究には、金網を通過する液体流れや抵抗に関するものが多い<sup>(2)~(3)</sup>。また、金網に類似した構造を持つ織り物に関する研究が数多くある<sup>(4)~(6)</sup>。これらの研究は織り物構造のモデリング、もしくはそれに流体や変形シミュレーションを追加した2つの段階をもつものが多い。また数値流体力学によるシミュレーションのモデル化を行う FLUENT と呼ばれるソフトウェアや、コンピュータ上で構造生成・特性予測が行える、コンピュータ支援の材料工学ソフト GeoDict<sup>(7)</sup>が存在する。GeoDict は不織布や金網、焼結された構造などをボクセル表現で生成し、熱伝導率や弾性係数、透過性などからろ過効率や孔分布分析などを評価できる。本研究

\* 原稿受付 2011年9月8日

<sup>\*1</sup> 学生員, 筑波大学大学院 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

<sup>\*2</sup> 筑波大学大学院 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

<sup>\*3</sup> 石川金網(株)

E-mail: kobayashi@npal.cs.tsukuba.ac.jp



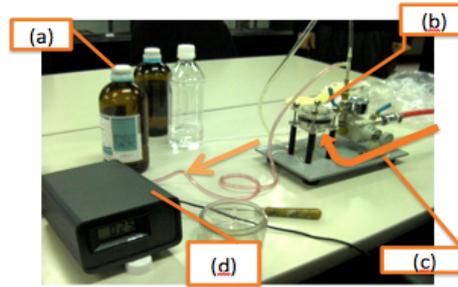


Fig.1 Equipments used for simple bubble point method. (a) Bottles of liquid. (b) A holder of a wire cloth filled with liquid. (c) Air flow. (d) A meter of gas pressure.

で扱う「畳織り」構造をもつものも、全部ではないが一部は生成可能である。しかし、パラメータによっては金網を構成する線同士が重なってしまい(これについては2,3節で述べる)、実際の金網を正確にシミュレートできないと考えられる。また、ボクセル表現を行っているため、精度はその解像度に依存し、正確なシミュレーションには、器具を用いて実測する以上に時間を要する。本稿では、畳織り金網に特化することで、各種モデルの性能を短時間で算出するシステムの構築を提案する。提案システムでは、金網のモデルをポリゴンメッシュで構築し、性能評価に剛体物理シミュレーションを用いた点に新規性がある。

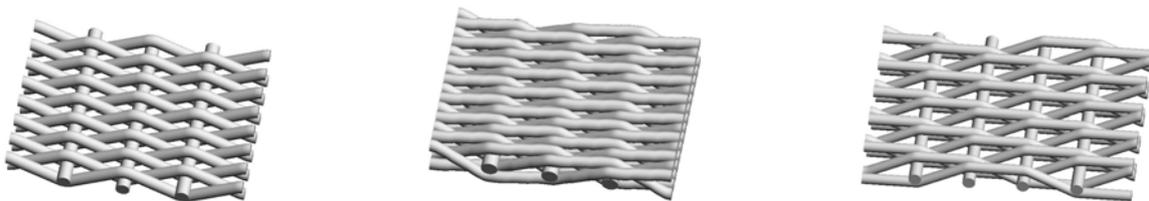
本研究では、構造が複雑な「畳織り」を対象とし、はじめに幾何形状に基づいた計算で最大硬質粒子径を幾何学的に求めることを試みた。しかし、結果や考察から幾何学的なアプローチでは難しいと判断したため、計算機上で対象の金網フィルタの3Dモデルを生成し、金網モデルと不純物を模した仮想剛体球を用いた物理シミュレーションを行うことで、その妥当性を評価した。これにより、ワイヤの変形を伴う場合や、より複雑な構造をした金網など、そのろ過性能を解析的に求めることが困難な場合でも、物理シミュレーションを行うことで柔軟に対応し、任意の金網フィルタの粒子径を求められることを示す。

本論文の構成は次のとおりである。2章では対象とする金網と、幾何学的なアプローチでの検証内容、その結果と考察を述べる。その後3章で提案手法であるろ過シミュレーションについて述べ、4章で提案システムでの結果と考察を示す。最後に5章で本手法の成果を結言としてまとめる。

## 2. 対象とする金網の幾何形状と幾何学的アプローチ

### 2.1 対象とする金網の構造

金網フィルタのろ過性能を評価するために、まず金網の構造をモデル化する。本研究では図2に示すような、平畳織り(SPW)、綾畳織り(DTW)、BMT織りの3種の構造を持つ金網フィルタを対象とする(図2は本稿で提案する手法で構築した3Dモデルである)。金網を構成するワイヤは、縦線と横線に分類され、それぞれ既定の太さと配置間隔を持つ。縦線はまっすぐであり、横線は縦線の上下を波打つように配置される。SPWは縦線の上下を交互に通るが、DTWおよびBMTは、縦線を2回通った後に上下が入れ替わる。さらにDTWはBMTよりもメッシュ数(1inch中に入る縦・横線の本数)が多いため、ワイヤが押し込まれてすき間がなくなった構造を持つ。結果的に、細孔の大きさはBMTと異なるため、異なる名称で呼び分けられている。このような構造の違いと、線径値(線の直径)およびメッシュ数のパラメータによって、金網の形状が決定される。



(a) Single Plain dutch Weave (SPW) (b) Dutch Twilled Weave (DTW) (c) Broad Mesh Twilled Weave (BMT)

Fig.2 3D Wire Models generated with our system

### 2.2 幾何学的計算による粒子径の算出

本稿ではまず金網の幾何構造に着目し、ワイヤ間の隙間を通過する最大硬質粒子径を幾何学的に求めることを試みる。図3にSPWとBMTのすき間を通る粒子径の算出に用いる模式図を示す(DTWは構造が複雑であるため、ここでは扱いの対象外とする)。 (a),(d)は各金網の立体モデル、(b),(e)は3次元での模式図、(c),(f)はXY平面での模式図をそれぞれ示す。図中の緑は縦線、青と黄色は横線、赤は線間を通過する最大球を示す。SPWを通る最大球Sは、横線および縦線に接し、その中心は横線の周期的対称性からX軸上に存在するものと見なすことができる。横線の中心線と球Sの中心Qとの距離が球Sの半径と横線の線径の和と等しいことから球の半径を算出できる。また、BMTはXY平面における球Sの中心座標を算出した上で、平畳織りと同様の計算手法により球の半径を算出できる。導出された、粒子径の算出式および導出の過程は末尾の付録に示す。

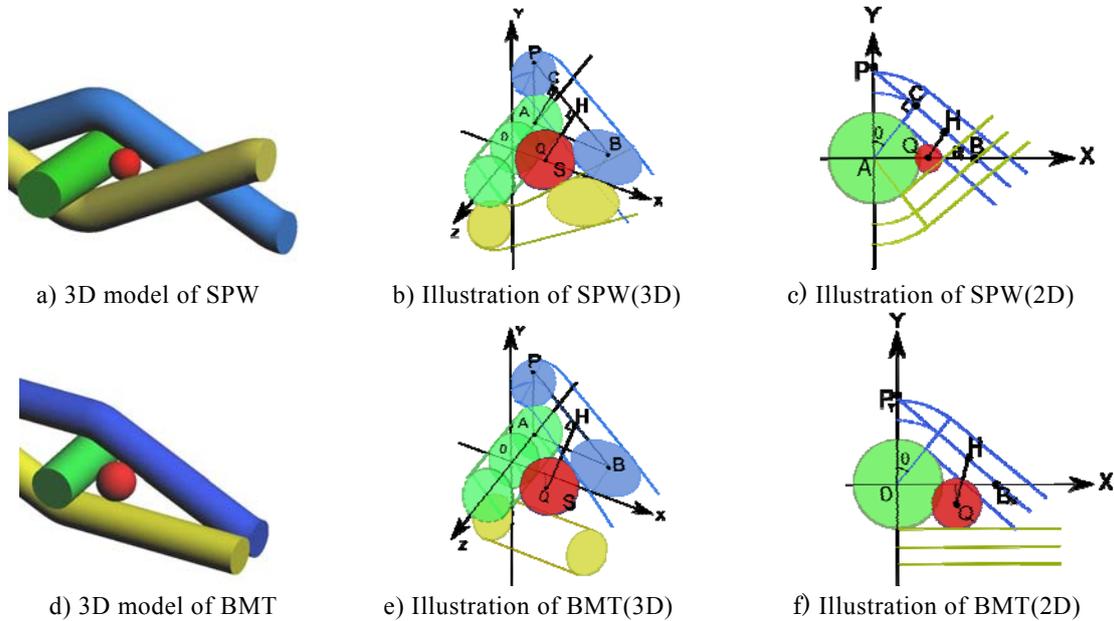


Fig.3 Illustrations of SPW and BMT models.

### 2.3 実験値との比較検証

2.2節で述べた手法で算出した各金網の最大硬質粒子径（以降では計算値と呼ぶ）の値と実験値を比較検証する。現在のところ、各企業で実験によって測定された粒子径は統一されておらず、真の値は不明である。そのため、公称値（海外のメーカーによりカタログに掲載されている値）、実測値（石川金網㈱でバブルポイント法で測定した値）と計算値を比較することで検証した。図4にSPW、BMTの計算値（calculated:緑線）、公称値（cataloged:赤線）、実測値（measured:青線）のグラフを示す。横軸の値は縦線/横線のメッシュ数で、製品カタログに記載の値を用いた。また、計算値と公称値、および計算値と実測値の相関と誤差率を求め表1にまとめた。なお、図4a)において公称値、実験値が鋸状を示している原因として、実験値は石川金網㈱がバブルポイント法で行った結果であり、必ずしも正確な値とは断言できず、誤差を含む可能性がある。また、製品に含まれる製造誤差も考えられる。したがって、この値は計算値との比較として使用している。

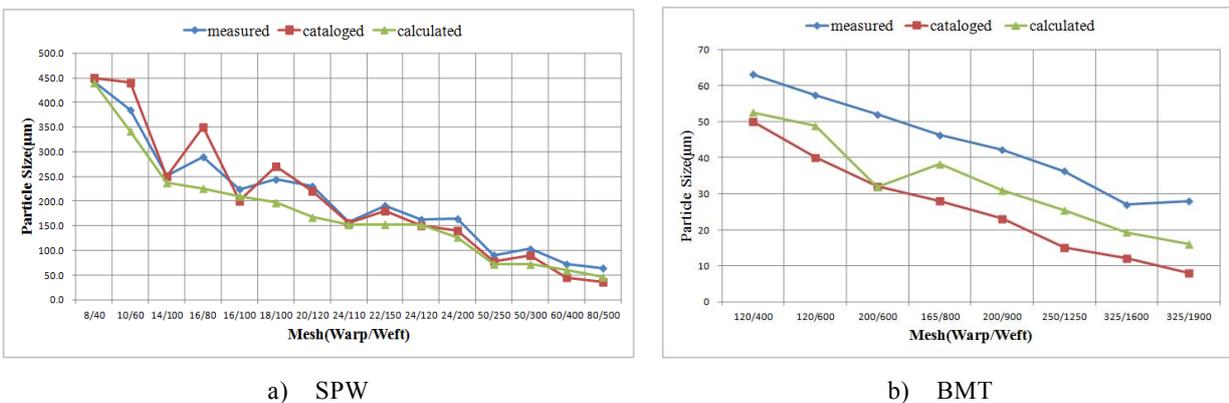


Fig.4 Comparison of values obtained by calculation with our method (green), measured by a bubble point method (blue) and cataloged (red).

Table 1 Error rates and coefficient of determination ( $R^2$ ) between calculated value, measured value, and cataloged value for SPW and BMT.

SPW				BMT			
	Cataloged and Measured	Cataloged and Calculated	Measured and Calculated		Cataloged and Measured	Cataloged and Calculated	Measured and Calculated
Error rate(%)	5	15	11	Error rate(%)	52	18	29
$R^2$	0.94	0.91	0.94	$R^2$	0.38	0.88	0.80

相関を求める際には、2つの値を X,Y 値とした散布図から切片 0 とした線形近似式を求め、決定係数を算出して相関の値とした。SPW に関しては元々実測値と公称値との相関が 0.94 と高いが、計算値と実測値、計算値と公称値のどちらでも両者に高い相関が得られていた。一方 BMT は、そもそも実測値と公称値の相関が 0.38 と著しく低いが、計算値と実測値、計算値と公称値との相関は 0.88 および 0.80 という、やや高めの数値を示した。2.2 節で示した計算式によって求めた値は、実測値および公称値と高い相関を持つことが示せたが、一方でデータの中には誤差率が大きいものが存在することもわかった。公称値および実測値に対する計算値の誤差の原因は、パラメータとして与えられる線径値とメッシュ数の間の不整合に起因すると考えられる。これはつまり、隣り合うワイヤの中心間の距離（ピッチ長）は 1inch をメッシュ数で割ることで求められるのだが、メッシュ数または線径が大きい場合にワイヤの直径の方がピッチ長よりも大きな値になってしまうことがある。理論的には入らないはずの空間にワイヤが入っていることになるが、ワイヤの圧延による変形などから実際には製造できてしまっている。例えば、Haver&Boecker のカタログに記載されている線径 0.3mm、メッシュ数 100 本/inch から算出されるピッチ長は 0.254mm であり、ピッチ長よりも線径の方が約 18% も大きい値になる。そのため、パラメータとして与えられる線径をそのまま用いてモデル化すると、図 5a のように線同士が重なってしまうが、この現象は本来ではありえない。実際には線の変形や湾曲がある程度存在すると考えられるが、左右の湾曲が大きいモデルである DTW に対して BMT、SPW は湾曲がないものとし、代わりに線径から導き出されたメッシュ数以上のワイヤ数が定義されている場合は、線が圧縮され図 5b のように断面が円から変形していると考えられる。しかし、このような変形を、幾何計算で考慮するのは困難である。また、2.2 節で述べたように DTW は、他の構造よりも複雑な構造であり、粒子径を幾何学的に求めることは難しい。従って、幾何学的なアプローチではなく、3次元幾何モデルを用いた物理シミュレーションを行うことで粒子径を算出する手法を次章で提案する。この手法では、今回扱う金網と構造が異なるものに対しても、同じ枠組みで対応することが可能である。



a) A model which has interferences between wires. b) A model which avoids interferences.

Fig.5 Wires have interferences when a model is generated based on the values of Mesh and Pitch. The shape of a crossection of a wire has to be modified from a circle to avoid the interferences.

### 3. 物理シミュレーションを用いた性能評価

#### 3.1 金網形状のモデリング

##### 3.1.1 交差点位置の算出

金網モデルを生成する際、縦線の構造は図 2 に見るように直線状であるため、横線の生成が重要となる。横線を生成するために、まずは横線と縦線との交差点位置を算出する。交差点位置は金網の構造を XZ 平面から見た時の位置を計算により求め、Chen<sup>(8)</sup>の手法における位置座標行列を式(1)の 2次元行列のように改良して位置座標を保持することとした。

$$H = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{Warp direction} \\ \vec{h}_{0,1} & \cdots & \vec{h}_{0,j} & \cdots & \vec{h}_{0,w} \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ \vec{h}_{1,0} \\ \vdots \\ \vec{h}_{i,0} \\ \vdots \\ \vec{h}_{f,0} \end{matrix} & \begin{matrix} \vec{h}_{0,1} & \cdots & \vec{h}_{0,j} & \cdots & \vec{h}_{0,w} \\ \vec{h}_{1,1} & \cdots & \vec{h}_{1,j} & \cdots & \vec{h}_{1,w} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vec{h}_{i,1} & \cdots & \vec{h}_{i,j} & \cdots & \vec{h}_{i,w} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vec{h}_{f,1} & \cdots & \vec{h}_{f,j} & \cdots & \vec{h}_{f,w} \end{matrix} \\ & \begin{matrix} \text{Weft direction} \end{matrix} \end{matrix} \tag{1}$$

ここで、 $i=0,1,2,\dots,w$ ,  $j=0,1,2,\dots,f$  であり、 $w$  は縦線の本数、 $f$  は横線の本数である。各要素ベクトルは以下のような 3 次元位置ベクトルで表される。

$$\vec{h}_{i,j} = \begin{pmatrix} h_{i,j}^x & h_{i,j}^y & h_{i,j}^z \end{pmatrix}^T \tag{2}$$

既存手法は各行・各列の要素数は各方向の線数と等しいが、金網の構造が周期的であることから、各線の最初の端点( $i=0$  or  $j=0$ )に式(1)の位置ベクトルを追加することで線の生成を容易にした。また縦線と横線の情報を 1 つの行列で表現した。

### 3.1.2 中心線の生成

交差点位置の算出後、前節で保持した行列内の交差点位置 2 点間を 1 区分とし、各区分にワイヤの中心線をあてはめる。SPW と他の織り方では用いる中心線の種類が異なるが、基本となる構造は、図 5 に示す直線部分とそれに接する 2 つの円弧から成る Peirce のモデル<sup>(9)</sup>のみである。今回は Peirce のモデルを忠実に再現するために、直線と円弧とに分けて生成した。図 6 に示す直線部分の傾き角度  $\theta$  は各方向の線径とピッチ長を用いて求めた。式を以下に示す。

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{D_w + D_f}{P_w} \right) \tag{3}$$

ここで  $D_w, D_f$  はそれぞれ縦線と横線の線径、 $P_w$  は縦線のピッチ長である。また Peirce のモデルを各区分ごとに規定数で分割する。今回はモデリングに十分な分割数として規定数を 30 とした。

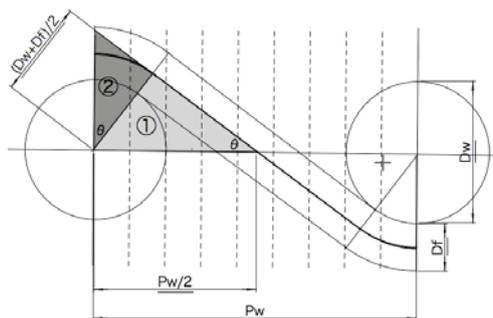


Fig.6 Peirce's model of a weft wire.

また金網の構造の周期性を生かすために、SPW に関しては 1 区分のみを生成し、他の区分はモデルの反転などを用いて金網モデル生成の単純化を図った。一方 DTW や BMT は、図 7 のように上記のモデルの他に直線状のモデルを追加し、各区分に Peirce のモデルと直線状のモデルを、反転を用いながら交互に配置した。しかし、DTW の構造はさらに複雑であり、上記の手法にさらに線同士の干渉を回避するための形状変形を追加する必要がある。線の干渉回避手法を図 8 に示す。まず、DTW の横線形状を 4 本分生成する。その後相接する 2 線の中心線の各分割点上の 2 点間距離  $R$  と  $XZ$  平面上での角度  $\theta$  を求める。また角度  $\theta$  から断面形状（ここでは楕円）面の半径  $r$  を求める。 $R < 2r$  の場合、 $R = 2r$  となるまで  $Z$  軸方向に 2 点を移動させる。これを各分割点、各相接する 2 線の中心線ごとに行うことで線の干渉を回避する。

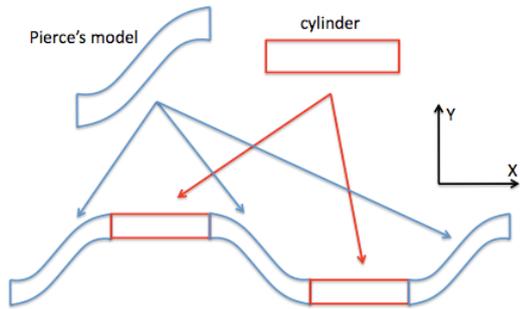


Fig.7 Model creation of BMT and DTW

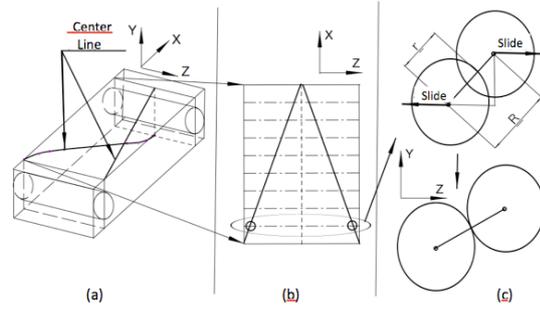


Fig.8 Illustration of the interference evasion of the centerline of DTW. (a) Center lines of two weft wires of DTW(3D). (b) Top view (X-Z plane) of (a). (c) A cross-section along Y-Z plane.

### 3.1.3 断面形状の生成

中心線の生成後、中心線の各分割点に既定の断面形状を配置する。断面形状の配置は Adanur と Liao の手法<sup>(10)</sup>をもとにした新たな手法を用いた。本手法はまず、断面形状を生成したい中心線上の点  $P_i$  を選択し、またその点の前後の点をそれぞれ  $P_{i-1}, P_{i+1}$  とする。3 点に対して  $\vec{P_{i-1}P_i}$ ,  $\vec{P_iP_{i+1}}$  を計算し、その平均をとることで、点  $P_i$  における接線ベクトル  $T$  を生成する。また、 $T$  を  $XZ$  平面に正射影したベクトル  $T_{xz}$  と  $X$  軸方向の単位ベクトル  $U_x$  との角度を  $\theta$  とし、 $Z$  軸方向の単位ベクトル  $U_z$  の始点を軸として、ベクトル  $U_z$  を  $\theta$  だけ回転させたものをベクトル  $N$  とする。そして、 $T$  と  $N$  との外積を  $B$  とし、 $T, N, B$  を単位基準ベクトルとする直交座標系を構築する(図9) 点  $P_i$  の断面形状面は  $N$ - $B$  座標軸によって計算される。  $N$  軸方向の単位ベクトルを  $n$ ,  $B$  軸方向の単位ベクトルを  $b$  とすると、点  $P$  の平面における断面形状曲線の点  $E$  は媒介変数  $u$  と式  $g(u) = (g_1(u), g_2(u))$  を用いて以下のように表される。

$$w = g_1(u) \cdot n + g_2(u) \cdot b \quad (0 \leq u \leq 2\pi) \quad (4)$$

断面形状の円の半径を任意にするため、媒介変数  $u$  の式は、

$$g(u) = (g_1(u), g_2(u)) = (R_N \cos(u), R_B \sin(u)) \quad (5)$$

となり、 $R_N$  は  $N$  軸方向の半径 (= 横線の線径の半分)、 $R_B$  は  $B$  軸方向の半径 (= 横線のピッチ長の半分) である。この式を式(4)に加えることでベクトル  $w$  が生成され、これを点  $P_i$  に加えることで断面形状を生成する。

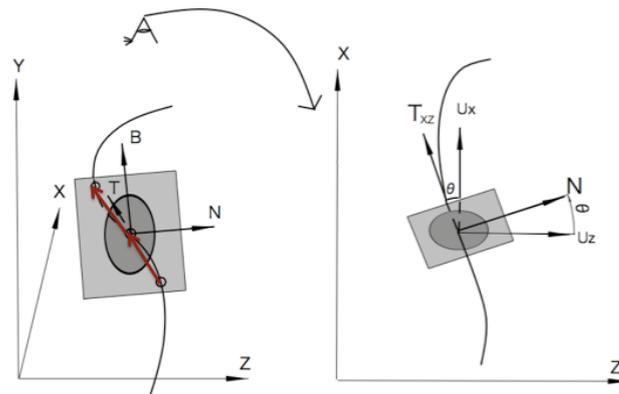


Fig.9 Generation of cross-sections of a wire.

## 3.2 ろ過シミュレーション環境の構築

### 3.2.1 ろ過現象のモデル化

本研究では、金網フィルタが粒子の通過時に粒子を補足するという単純な表面ろ過モデルを用いた。この際、粒子は球体であるとみなし、測定に伴うワイヤおよび粒子の変形は本システムの目的である「最大硬質粒子径の理論値の算出」から無視するものとした。つまり、シミュレーションにおいて金網や球を剛体として扱った。

ろ過現象のプロセスを次の3つに分け、ろ過モデルとした。(1)まず、計算機上の仮想空間内にユーザによって選択された金網フィルタを設置し、また球の飛散を防止するボックスで周囲を覆う。(2)次に、同一直径を持つ多数の球を金網の上から自然落下させる。(3)最後に、金網フィルタの細孔の目詰まりと球の通過を促進させるために金網フィルタを揺らし、一定時間内に通過した球数を測定し、通過の可否を判定する。

### 3.2.2 ろ過現象の物理シミュレーションと精度検証

上記のろ過プロセスの物理シミュレーションを行うとともに、その可視化を行った。物理シミュレーションにあたって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 を用いた。図 10 にろ過現象を可視化した図を示す。金網や球を PhysX で扱う場合、実寸法でモデルを構築すると、物理エンジンのサイズ指定により、定められた許容誤差で  $\mu\text{m}$  単位の精度が得られない。そのため金網や球をスケールさせることで、シミュレーションによって測定される粒子径の精度を上げる。スケール倍率は別実験で検証した。その結果、倍率は最低 50 倍とし、さらに 50 倍した上で PhysX 上での線径が 1m に満たない場合は、線径が 3m 以上となるように適宜倍率を大きくすることで精度を保証した。この倍率で金網と球、および金網を覆うボックスをスケールした。球の通過判定は金網の下に判定面を設置し、その面を通過したか否かで判断する。

金網を揺らす動作は、目詰まり防止、そして球の通過に時間を要する DTW に関して通過を促進させるような揺らし方を設定する必要がある。本研究では図 10 に示すように、X 軸と Z 軸を軸として傾きを与えるものとした。揺らす回数や傾ける角度を変えて、一定時間内に 100 個の球を落とし、通過する球の個数を求める別実験を行い、精度の良い回数や角度を求めた。その結果、どの織りに対しても X 軸では角度  $\pi/200\text{rad}$ 、回数 2 回、Z 軸では角度  $\pi/300\text{rad}$ 、回数 2 回が適当であることがわかった（ここで揺らす回数は左右どちらかに傾けることを 1 回と数える）ため、本研究ではこの結果を採用した。

### 3.2.3 ろ過性能の算出方法

本システムにおけるろ過性能の指標は、各金網に対してろ過シミュレーションを繰り返すことで得られる、金網を通過する最大球の直径とする。そのために、シミュレーションを繰り返すごとに球の直径を変化させる。本システムでは横線同士のピッチ長を最大値、最小値を 0 とした二分探索法を用いて、探索範囲の中間値を球の直径とし、シミュレーションを繰り返すこととした。100 個の球のうち通過した球の個数が一定値を超えれば中間値を最大値とし、そうでなければ中間値を最小値とする。なお、通過すると判断する基準となる個数は先に述べた揺らし方の実験結果から、SPW と BMT は全体の半分とした。DTW は通過するのに時間を要するが、1 個でも通ればその後も通過すると判断できたため、1 とした。探索範囲を徐々に狭めていき、最小値と最大値の差が実寸法に戻した時に  $1\mu\text{m}$  以下になった時点でシミュレーションを終了し、直前のシミュレーションで球が通過していた場合はその値を最大球の直径とし、通過していない場合はその値から  $1\mu\text{m}$  を引いた値を最大球の直径とした。

このシミュレーションで得られた値を解析手法で述べた検証法と同様に実測値および公称値と比較し、誤差範囲や傾向を調査する。以降ではこのシミュレーションによって得られた値を実験値と呼ぶこととする。

## 3.3 システムのユーザインタフェース

図 11 に本システムのユーザインタフェースを示す。左上の画面は金網フィルタの形状モデルに対するろ過シミュレーションを可視化して表示する。右上の領域はユーザがパラメータの設定やシミュレーションの開始、確認作業などを操作する。下の表は、過去に測定したことのあるデータ群とその結果を示し、この表のデータ群から選択して金網フィルタの生成とシミュレーションが行える。結果は、シミュレー



Fig.10 Visualized model of the virtual world in which a physical simulation runs.

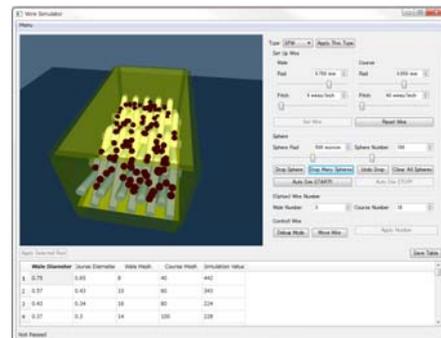


Fig.11 User interface of the proposed system. Spheres are dropped on a SPW model from the top of a yellow box.

シミュレーション終了時にウィンドウに表示され、その後表中にも追記される。ユーザはパラメータの設定を行うだけで、金網のモデリングからシミュレーションまでが自動で行われる。

#### 4. 結果と考察

本システムはライブラリとして OpenGL, PhysX, Qt を用いて C++ 言語で実装し、Intel Core i7 870 2.93Hz, GPU として NVIDIA GeForce GT 220, メモリ 4GByte が搭載された PC 上で実行した。

##### 4.1 金網モデル生成結果

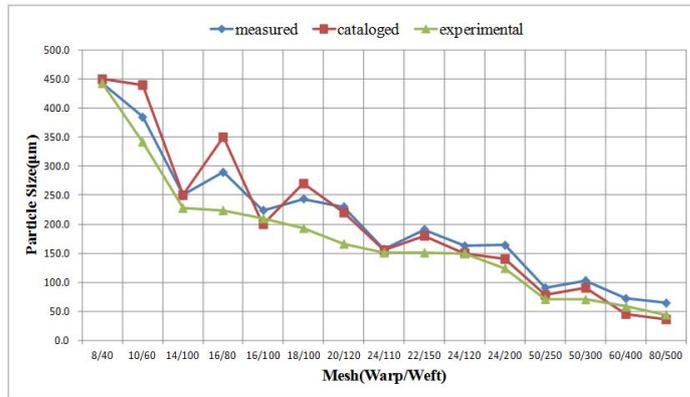
SPW, DTW, BMT の金網モデルの生成結果は図 2 に示すとおりである。どの金網モデルも実際の金網フィルタ形状と同等の形状を得ることができた。しかし、この形状は金網製造時にかかる力や変形などを考慮していない。より正確なモデル生成を試みるのが、実際の金網フィルタの測定で生じる粒子径のばらつきを考慮したろ過性能算出モデルに必要なと考えられる。

##### 4.2 実験結果

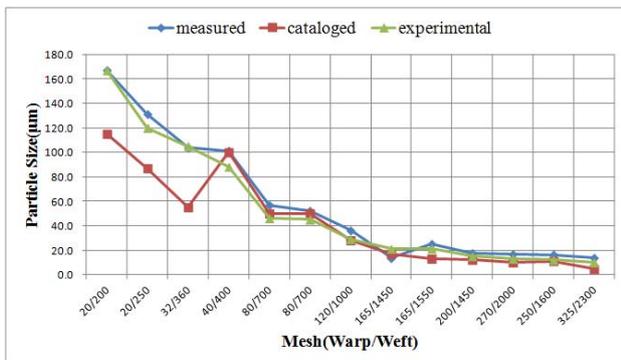
ろ過シミュレーションは石川金網㈱から提供された、JIS 規格に基づく各金網の線径値、メッシュ数のパラメータを用いた。以下にシミュレーションの様子と実験結果を示す。1つの金網の性能をシミュレートするのに要した時間は、平均4分程度であり、既存手法であるバブルポイント法に比べ、短時間で測定できた。

実験値の妥当性を評価するために、公称値、実測値との比較を行った。図 12 a は SPW に関して上記の3値をプロットした結果である。左から右にかけて実験値に対して降順にソートを行った。同様に DTW と BMT についても同様の作業を行った結果を図 12 b, 12 c に示す。

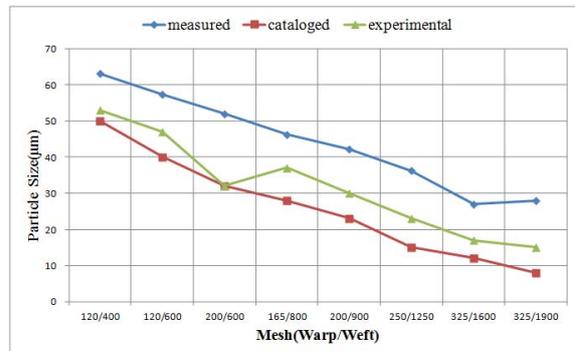
各金網に対して解析手法の検証と同様の検証を行い、そこからグラフの傾向と指標の推定を行った。表 2 に各金網の平均誤差率と相関値を示す。SPW に関しては実測値、公称値共に同等の誤差率、高い相関を示し、変形を考慮せずに求めた解析値と同等の結果を示している。これは図 12 a に示すグラフからも判断できる。しかし、解析値と実験値との間に生じる誤差は、パラメータの問題に対する断面形状の変形が影響していると考えられるが、解析値よりもわずかに大きくなっている。次に DTW に関して、公称値は図 12 b に見るように一部



a) SPW



b) DTW



c) BMT

Fig.12 Comparison of values obtained by simulated with our method (green), measured by a bubble point method (red) and cataloged (blue).

Table 2 Error rate and coefficient of determination for calculation value(each filter).  
 “cata” is a cataloged value, “meas” is a measured value, and “expe” is an experimental value.

SPW	cata- expe	meas- expe	BMT	cata- expe	meas- expe	DTW	cata- expe	meas- expe
Error rate(%)	15	12	Error rate(%)	26	32	Error rate(%)	25	5
R <sup>2</sup>	0.91	0.94	R <sup>2</sup>	0.92	0.75	R <sup>2</sup>	0.85	0.98

が突出して誤差が大きいため誤差率がやや高くなっているが、実測値と実験値との相関が 0.98 と非常に高い値を示すなど、両値ともに良い相関を示し、結果傾向は類似していると判断出来る。これは SPW 同様、DTW も図 12 b から見て取れる。一方、BMT は相関結果からすれば BMT も傾向は類似していると判断でき、解析手法での結果とほぼ同等の結果を示している。

これらの結果から解析手法で得られる結果と同等の結果を示しながら、構造の複雑さから解析での算出が困難な畳織りに関しても指標を推定することができた。しかし以上の 3 種の金網に対しての既存値との誤差は公称値と実測値自体が一致せず、この 2 値の差が大きいため、公称値と実測値の信頼性を考慮してどちらを選択するかでその値との誤差を提示することが要求されると考えられる。そして、金網や球を剛体として扱うことの制限もあるため、このことに対する改善が必要である。

## 5. 結 言

金網フィルタの最大硬質粒子径を、その幾何形状から幾何学的に求めることを試み、検証したうえで 3D モデルを生成し、剛体物理シミュレーションによる、ろ過性能の推定を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 実際の金網構造を模した 3D モデルを得た。
- (2) 剛体シミュレーションとしてろ過プロセスを構築し、計算機上で簡単な操作で測定可能なシステムを開発した。
- (3) 実験対象の金網の実験値が既存値と同様の傾向を示し、4・2 節で述べた差の比率内が粒子径値の範囲として評価することができた。
- (4) 新しい構造の金網が製造されたときも同じ枠組みの中で性能を評価できるシステムを構築した。

## 付 録

通過できる最大硬質粒子径を幾何学的に求める手法と計算式を以下に示す。

平畳織りの粒子径は図 3 (b) に示す 3 つの線に接する球 S の半径 r と定義できるため、これを求める。まず既知の値として、図 3 における縦線 (緑) と横線 (青) の半径をそれぞれ  $r_0$ ,  $r_1$  としたとき、XY 平面と平行な面上に存在する点 A, B をそれぞれ  $A(0, 0, r_1)$ ,  $B(B_x, 0, r_1)$  と定義できる。ここで  $B_x$  とは B の x 座標のことである。このとき球 S の中心は X 軸上に存在し、縦線と接しているため  $Q(r_0+r, 0, 0)$  と定義できる。また、 $P(0, P_y, r_1)$  として、PB を中心軸とする線に S が接するため、Q から PB に降ろした垂線 QH の長さは  $r+r_1$  と定義できる。

点 P の y 座標は  $\triangle ABP \sim \triangle CBA$  より

$$\begin{aligned}
 PB : PA &= BA : AC \\
 \Leftrightarrow \sqrt{P_y^2 + B_x^2} : P_y &= B_x : r_0 + r_1 \\
 \Leftrightarrow B_x^2 P_y^2 &= R^2 (P_y^2 + B_x^2) \\
 \Leftrightarrow P_y &= \frac{RB_x}{\sqrt{B_x^2 - R^2}} \tag{6}
 \end{aligned}$$

となるため、点 P を改めて定義する。ただし、 $R=r_0+r_1$  とする。

2 点 P, B を通る直線の方程式を式 (6) とパラメータ t を用いて以下のようなベクトル表現とすると、

$$\vec{OP} + t\vec{PB} = (tB_x, P_y - tP_y, r_1) \tag{7}$$

となる。このときの垂線 QH の長さは点 Q と直線 PB 上の点との最少距離  $l$  であるため、

$$\ell^2 = (tBx - (r_0 + r))^2 + (Py - tPy)^2 + r_1^2 \quad (8)$$

これを t に関して整理し, t で微分すると,

$$2t(Bx^2 + Py)^2 - 2(Bx(r_0 + r) + Py^2) = 0$$

$$\therefore t = \frac{Bx(r_0 + r) + Py^2}{Bx^2 + Py^2} \quad (9)$$

となる. これを式(8)に代入し,  $\ell^2 = (r+r_1)^2$  として半径 r を求める.

$$\ell^2 = \left( \frac{Bx(r_0 + r) + Py^2}{Bx^2 + Py^2} \right)^2 (Bx^2 + Py^2) + (-2Bx(r_0 + r) - 2Py^2) \frac{Bx(r_0 + r) + Py^2}{Bx^2 + Py^2} + \quad (10)$$

$$(r_0 + r)^2 + r_1^2 + Py^2 = (r + r_1)^2$$

これを r について整理すると以下のような式になる.

$$Bx^2 r^2 + 2r \{ Bx(Bxr_0 + Py^2) - (r_0 - r_1)(Bx^2 + Py^2) \} + (Bxr_0 + Py^2)^2 - (r_0^2 + Py^2)(Bx^2 + Py^2) = 0 \quad (11)$$

この r についての 2 次方程式の解のうち値が正のものが求める半径 r となる.

BMT 織りの場合の通過できる最大粒子径は上記と似た計算式になるが, 球 S の中心 Q の位置が X 軸上には存在しないため, 新たに Q の位置を 2 次元座標上で計算する (図 13)

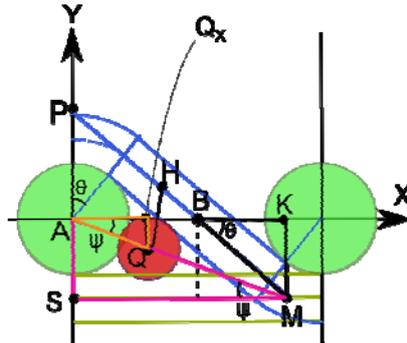


Fig.13 Specific figure of calculating sphere size(BMT)

まず, 既知として  $A(0, 0)$ ,  $B(Bx, 0)$ , 横線の円弧部分が縦線と接する角度  $\theta$  を定義する. また新たな既知として  $S(0, R)$  を定義する. ここで R は上記同様  $r_0+r_1$  の値を指す. このとき, 点  $M(M_x, R)$  として M の x 座標  $M_x$  は  $\triangle BKM$  より,

$$Mx = AB + BK$$

$$\Leftrightarrow Bx + \frac{R}{\tan \theta} \quad (12)$$

と表せる. そして  $\angle KAM = \angle AMS = \psi$  とすると,  $\triangle ASM$  より,

$$\tan \psi = \frac{AS}{SM} = \frac{R}{\left( Bx + \frac{R}{\tan \theta} \right)}$$

$$\Leftrightarrow \psi = \tan^{-1} \left( \frac{R}{\left( Bx + \frac{R}{\tan \theta} \right)} \right) \quad (13)$$

となる。

そして、球 S は縦線（緑）と接しているため、AQ は縦線と球の半径の和  $r_0+r$  なので、 $\psi$  と AQQx から点 Q を

$$Q((r_0+r)\cos\psi, -(r_0+r)\sin\psi, 0) \quad (14)$$

と定義できる。

その後は平畳織りと同様な計算となる。以下に最終的に整理した  $r$  に関する 2 次方程式を示す。

$$BP^2 r^2 + 2r \{ BP(BPr_0 + Py^2) - (r_0 - r_1 + Py \sin \psi)(Bx^2 + Py^2) \} + \{ (BPr_0 + Py^2)^2 - (r_0^2 + 2r_0 Py \sin \psi)(Bx^2 + Py^2) \} = 0 \quad (15)$$

ここで  $BP = (Bx \cos \psi + Py \sin \psi)$  である。

この解のうち値が正のものが求める半径  $r$  となる。

#### 参 考 文 献

- (1) 竹内擁, 多孔質体の性質とその応用技術 (1999) p911-912, フジテクノシステム
- (2) 大坂英雄, 山田英巳, 羽野茂浩, 影山芳郎, “平織り金網を通過する流れとその抵抗特性”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 52, No. 473 (1986), pp.312-317.
- (3) 汐崎徹, 円山重直, 毛利孝明, 穂積良和, “高温空気燃焼炉用ふく射変換体金網を通過する低レイノルズ数流れ場の解析”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 71, No. 709 (2005), pp.163-166.
- (4) Nazarboland, M.A., Chen, X., Hearle, J.W.S., Lydon, R., Moss, M., “Modelling and simulation of filtration through woven media”, *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 20 ,No. 3, (2008) , pp.150-160.
- (5) Kaldor, J., James, D., Marschner, S., “Simulating Knitted Cloth at the Yarn Level”, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 27, No. 3, (2008), p. 65.
- (6) Jiang, Y., Chen, X., “Geometric and algebraic algorithms for modelling yarn in woven fabrics”, *Journal of the Textile Institute*, Vol. 96, No. 4, (2005), pp.237-245.
- (7) ITWM, “Geodict”, Geodict, <http://www.geodict.com/index.php?lang=en> (参照日 2011 年 7 月 26 日)
- (8) CHEN, X., KNOX, R.T., MCKENNA, D.F., MATHER, R.R., “Automatic Generation of Weaves for CAD of 2D and 3D Woven Textiles Structures”, *Journal of the Textile Institute*, Vol.1, No.87, (1996) , p.356.
- (9) Peirce, F.T., ”The geometry of cloth structure”, *Journal of the Textile Institute*, Vol. 28, (1937), pp. T45-T97.
- (10) ADANUR, S., LIAO, T, “3D Modeling of Textile Composite Performs”, *Composites, Part B* 29B(6),(1998), pp. 787-793.