

画像処理による多重円板型脱水機の汚泥流動解析

Analysis on Fluid of Sludge in Multi-Disks Dehydrator by Using Image Processing

藤原健史*, 小野孝治**, 武田信生*, 形部豊数***

* 正会員 京都大学大学院工学研究科環境工学専攻/〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町
** 京都大学大学院工学研究科環境工学専攻/〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町
(現在、(株)東芝 電力システム社 火力産業・IPP 技術部/〒230-0051 横浜市鶴見区鶴見中央 4-36-5)
*** (株)テセラ分離/〒611-0041 京都府宇治市槇島町 16-42-11

Takeshi FUJIWARA*, Koji ONO**, Nobuo TAKEDA*, Toyokazu KATABE***

*Member of EICA, Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering,
Kyoto University/Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

**Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University
(Thermal Power Systems Industrial and IPP Engineering Dept., Toshiba Corporation Power Systems
& Service Company /4-36-5, Tsurumi-Chuou, Tsurumi, Yokohama, 230-0051, Japan)

***TERA Separator, 16-42-11, Makishima, Uji, Kyoto, 611-0041, Japan

Abstract

A multi-disks drum is a bundle of a number of thin stainless disks. In the multi-disks dehydrator sludge is transported through the space between upper and lower lines of multi-disks drums by slow rotation of the drums, and then water in the sludge is withdrawn through the thin spaces between the disks. The mechanism of dehydration for the multi-disks dehydrator is different from that of conventional dehydrators, such as belt press, vacuum and centrifugal dehydrators, because strong pressure is not used. In this paper, to analyze the dehydration mechanism of the multi-disks dehydrator, pressures and water contents at several points along the stream of the sludge in the dehydrator were measured when sludge sample 'okara' was dehydrated. Moreover, a side panel of the dehydrator was changed with an acrylic resin panel, and the scene that the sludge flew in the dehydrator was recorded by video camera. By regarding floating black particles in the sludge as tracers, flow vectors of the sludge were calculated by using image processing techniques. To estimate hidden flow vectors where can not be seen in the video image, computational fluid dynamics of the sludge was applied. From these results, the dehydration mechanism of the multi-disks dehydrator was discussed.

Key Words : Sludge Dehydration, Dehydration Mechanism, Multi-Disks Dehydrator, Image Processing, Computational Fluid Dynamics

1 はじめに

汚泥の脱水は加圧式、真空式、遠心式のように、汚泥を固定した状態で加圧、負圧あるいは慣性力によって脱水する方法が一般的である。一方、多重円

板型脱水機は円板型ろ材を重ねたドラム(ろ体)を回転させて汚泥を流動させ、汚泥がドラムに接触しながら移動する間に、ろ材の間隙から水が排出される新しいタイプの脱水方式である。この多重円板型脱水機は、これまでの脱水機では困難であった含油

汚泥なども、下水汚泥と変わらない程度に脱水できる。しかし、その脱水原理については、まだ詳しい研究がなされていないのが現状である。汚泥は装置内を流動する過程で脱水されることから、装置内の汚泥の流線や圧力分布、水分分布を明らかにすることが、脱水機構を解明するために必要である。そこで本研究では、多重円板型脱水機（テエラ分離製）を用いて、おからを模擬汚泥として装置内の圧力分布と水分分布を測定した。また、汚泥が流動する映像を画像処理することによって流速ベクトルを求め、映像に現れない部分については流速ベクトルを流体シミュレーションによって補間した。以上の解析の結果から、汚泥脱水の機構について考察した。

2 多重円板型脱水機について

多重円板型脱水機のろ体ドラム（以後、単にドラムと呼ぶ）の構造とドラムの脱水機中の配置をそれぞれ Fig.1、2 に示す。0.8~1.2mm 厚の円板状のろ

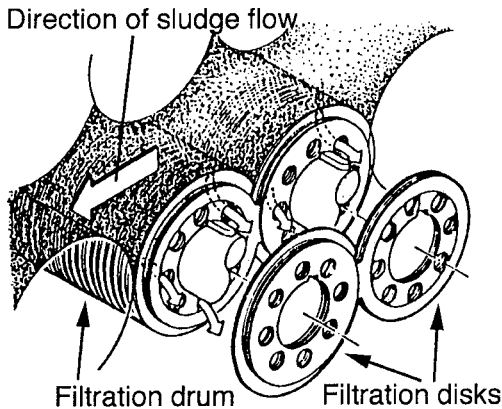


Fig.1 A filtration drum composed of stainless disks

体を 0.2mm 間隔で重ねあわせたドラムが上下 2 段に並び、そのドラムが低速で回転することによって汚泥が脱水ケーキ出口側へと運ばれ、その間にろ体の間隙から水が排出される。

この脱水機は、脱水ケーキ出口に向かって上下ドラムの間隔が狭くなるように設計されており、汚泥は出口に近づくにつれて圧縮されることになる。齊

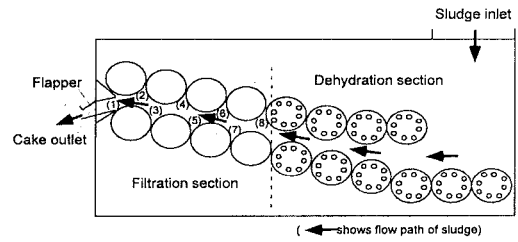


Fig.2 Positions of filtration drums and sampling points (1)~(8) in the multi-disks dehydrator

藤らは、多重円板型脱水機（ヘリオス社製）を用いて、脱水ケーキ出口にもっとも近い 2 つのドラムの回転速度を変化させて実験を行なったところ、ケーキ送り速度の減速比が大きくなるほどケーキ含水率が低くなったため、流入側の汚泥が脱水ケーキ出口側の汚泥を押し出すことにより圧力が高まって脱水が促進されるとした¹⁾。しかし、脱水ケーキは内部に空気を含んだスポンジ状であることから²⁾、出口付近での圧力はそれほど高くなく、むしろ汚泥流動時のろ材と汚泥の界面における水の移動がケーキ含水率に関与すると考えられる。

本研究では、実装置において汚泥含水率と圧力分布を測定することで装置内部での脱水の進み方を明らかにし、同時に汚泥の流動解析を行って、ドラム周辺部の汚泥の動きと脱水との関係を調べた。本実験で使用した脱水機では、片側側面をアクリル板に替えて、内部の汚泥の動きを確認しやすいようにした。模擬汚泥としては、白色の「おから」を用いた。おからは一度脱水されてはいるが、取り扱いが容易であること、試料が白色でトレーサが黒色であると流線がはっきりすること、圧力の測定では他の試料を用いる場合とそれほど傾向が変わらないと予想されることから、おからを用いた。なお、多重円板型脱水機は食品廃液の脱水にもよく用いられている。

3 圧力と含水率の測定

3.1 実験方法

1) 圧力分布

装置稼働時の汚泥の圧力分布を2通りの方法で測定した。1つは、汚泥の流れに沿ってサンプリング口を設け、圧力センサーを入れて測定する方法、もう1つはバルブの中にセンサーを入れ、汚泥とともに流しながら圧縮力により圧力を測定する方法である。いずれも、金属のひずみを利用して圧力を測定する圧力センサー PS-5KA (共和電業) を使用した。

まず前者の方法については、Fig.3に示すように、外径10mm、内径8mmのステンレスパイプの先端部10mmを半分に切り取り、正方形のプラスチック板を接着剤で固定し、その上に圧力センサーを取り付けた。測定時に汚泥が受圧面の脇に流れることを

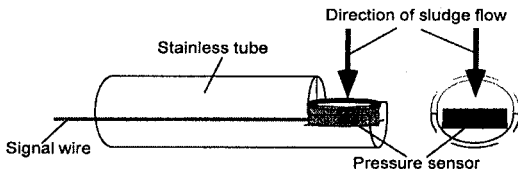


Fig.3 A pressure sensor on an edge of stainless tube to measure pressure of sludge flow

防ぐため、圧力センサーの周りをアラルダイトで固め、受圧面が窪みになるように調整した。

脱水部側面のアクリル板に、Fig.2に示す(1)~(8)の位置に直径15mmのサンプリング口を設け、圧力センサーを取り付けた上記のステンレスパイプを脱水機内に挿入し、受圧面が汚泥の流れに垂直になるように設置して、圧力(総圧)を測定した。サンプリング周期は100msで、2分間の平均値を求めた。

後者の方法については、駒込ピペット用のバルブ(乳豆)に圧力センサーを入れて水を封入した。このバルブを汚泥の流れに載せてケーキ出口まで流しながら圧力(静圧)を連続的に測定した。

2) 水分分布

水分分布の測定は圧力測定と同じように、8つのサンプリング口から汚泥サンプルを採取し、含水率を測定した。含水率は、サンプルを105°Cで恒量になるまで乾燥した後、質量減量から求めた。

また、脱水ケーキについても含水率を測定した。厚さ(高さ)約5cmの脱水ケーキを、厚さ方向に5分割し、それぞれの部分について含水率を測定した。

3.2 結果と考察

1) 圧力分布

測定点とサンプリング口で測定した圧力の関係をFig.4に示した。脱水機内の圧力は測定点(7)のサン

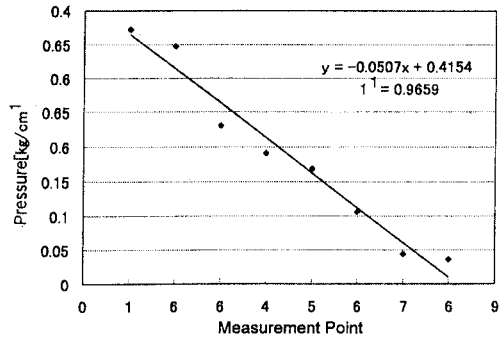


Fig.4 Pressure at measurement points

プリング口あたりから脱水ケーキ出口に向かって単調に増加した。測定点の間隔はほぼ同じであることから、圧力は距離に対して直線的に増加すると言える。圧縮力を測定した結果についても、脱水ケーキ出口に向かって高くなった。サンプリング口で測った総圧と、バルブを流して測った静圧のそれぞれの最大値は、0.37kgf/cm²、0.36 kgf/cm²であり、汚泥の流速が小さいためほぼ同じ値であった。なお、これらの圧力はドラム周辺部分の値ではなく、上下ドラム間のほぼ中央での値である。

圧力が出口に向かって高くなる理由として、上下のドラムが出口ほど間隔が狭くなるように配置されており、汚泥が出口に近づくにつれて圧縮されることがあげられる。文献によると、加圧脱水では濾過部と圧搾部がそれぞれ4~5kgf/cm²、15kgf/cm²であり³⁾、遠心脱水では高圧力部の脱水面圧力が1~2.7kgf/cm²であることから³⁾、多重円板型脱水機の汚泥にかかる圧力は、他の脱水機に比べて小さいことがわかる。

2) 水分分布

Fig.5に示すように、汚泥の含水率は脱水ケーキ出口付近の測定点(1)で最も低く、脱水部中央の測定点(4)で最も高くなった。また、上側に位置する測定点(2)(4)(6)での含水率が、下側に位置する測

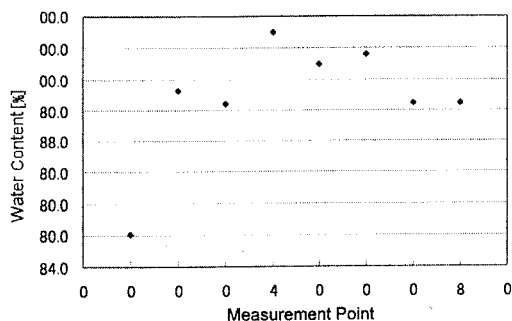


Fig.5 Water content at measurement points

定点 (3)(5)(7) での含水率に比べて高い値を示した。原因として次のことが考えられる。(Fig.6)

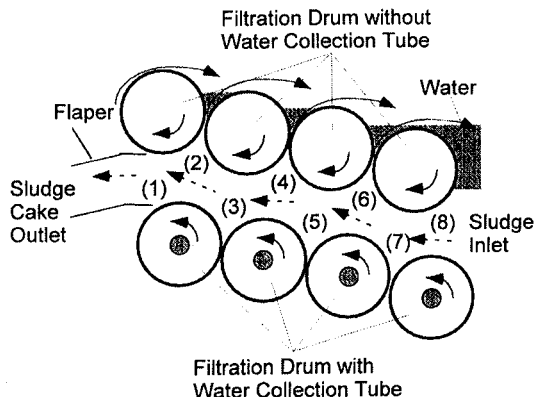


Fig.6 Behaviors of sludge and water around filtration drums

- ・ 脱水部のドラム回転速度が、ろ過部のドラム回転速度より小さく設定されているため、脱水部からろ過部へ汚泥が移動するときにドラムが汚泥を押し出す形となり、その圧力で脱水が促進され含水率が低くなる。(測定点 (8))
- ・ 脱水ケーキ出口付近で含水率が低い理由は、流出口が狭くなっているため(フラッパーで押し付けられている)、そこでの圧力が高くなり脱水されるからである。また、脱水された水が、上部・下部のドラムの回転とともにそれぞれ上側・下側に押しやられることが、アクリルの側板を通

し目視で確認することができた。(測定点 (1))

- ・ 上部ドラムの上側に押しやられた水は、実験用装置の上部ドラムに排水口が無いことから、ドラムの回転により投入口方向 (Fig.6 の右方向) へと送られる。上部ドラムの並びが右下がり傾いているため、水は右に移動すると考えられる。
- ・ 上部ドラムの隙間から水が下方に流下して、移動する汚泥に吸収されるため、上側のサンプルの含水率が高くなる。
- ・ こうして上部ドラムの周りで水が循環し、水の多くは軸部に排水口を持つ下部ドラムより排水される。水循環の結果、測定点 (4) の含水率が最も高くなる。
- ・ 測定点 (4)(5)(6) の含水率が高い理由は、脱水装置の濾過部の液面が高くなり、上部右側のドラムまで水が染み込んだためと考えられる。

3) 脱水ケーキの水分布

脱水ケーキを厚さ方向に 5 分割して各試料の含水率を測定し、それを 3 回行って各分割の平均含水率を求めた。結果は、上部から順番に 85.7、85.4、85.3、85.3、85.1% となり、中ほどの含水率はほぼ一定で、上部は高く下部は低いことが分かった。これらは、脱水機内部での汚泥の含水率分布を反映した形となった。

4 脱水機内部の流動解析

脱水機内部の汚泥の流動と脱水との関連性は高いと考えられる。そこで、アクリル板を通して見ることが出来る装置内の汚泥の流動をビデオカメラで撮影し、画像から汚泥の流れ方向と速度を求めた。また、画像では見ることができなかった円周付近の汚泥の流れを、流体シミュレーションによって推定した。

4.1 解析方法

1) 画像処理による速度ベクトルの計算

おからの中に含まれている黒色粒子および添加した黒色粒子をトレーサと考え、トレーサが汚泥とともに移動する映像をビデオカメラで収録した。解析では、フレーム差分画像から動点となるトレーサの位置および速度ベクトルを求めた。この動点抽出方

法は、Fig.7 に示すように連続した3つのフレーム画像の差分 (b)-(a) と (b)-(c) を求めてフレーム差分画像とし、さらにその2枚のフレーム差分画像の共通部分をとることにより、移動している物体を抽出する方法である⁴⁾。

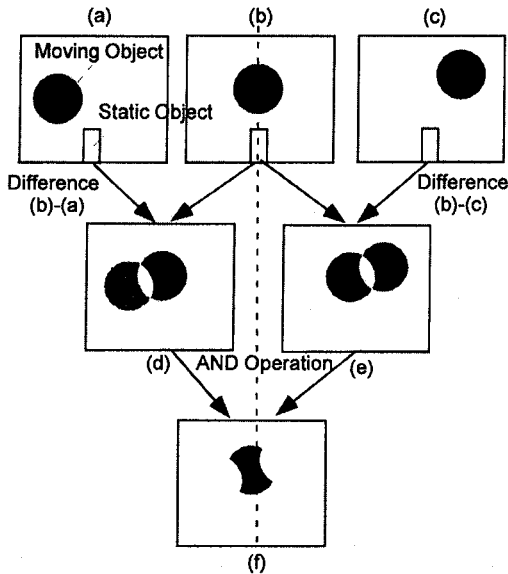


Fig.7 Procedure of image extraction from image frames for a moving object

本研究では2秒おきに取り出したカラーのフレーム画像を、まず256階調のグレースケールに置き換え、次におからの黒色粒子等を検出できるように2値化を行ってから差分をとった。フレーム差分画像の例をFig.8に示す。黒色部分は、ある2時刻の画像から抽出した移動点を、灰色部分はさらに20秒前における2時刻の画像から抽出した移動点を表す。さらに、軸受部のノイズを除去するために、流路以外の部分をマスク処理した。このようにして抽出した移動点について座標(黒点の中心の座標)を求め、2点間の座標の距離、移動方向を求めて流体の流速ベクトルとした。なお、画像処理ソフトのAVSを用いて、処理手続きをプログラミングした。

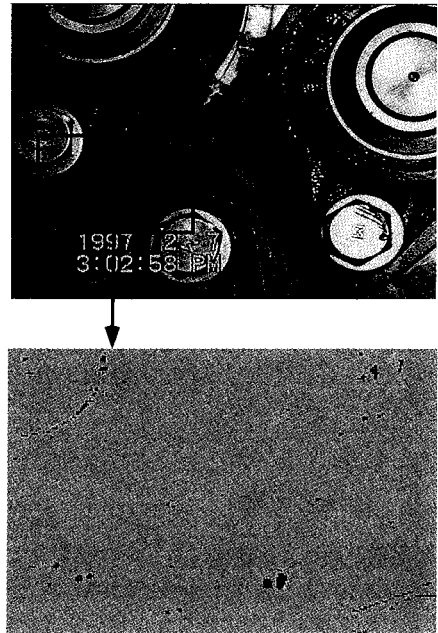


Fig.8 An original image and extracted moving points (a gray point moves to a black point in 20 seconds)

2) シミュレーションによる流速ベクトルの補間

アクリル側板を通して観察することができる部分は、上下のドラムに挟まれた空間の一部に限られ、ドラム周辺部分は軸受けが側板に固定されているため観察することができなかった。そこで、画像を解析して得られた流速ベクトルとドラムの周囲速度を用いて流体シミュレーションを行い、ドラムに挟まれた空間全体の流線を明らかにすることを試みた。この周囲速度は、ドラム回転速度から求まるドラム周囲の速度とした。

流体のシミュレーションに汎用の3次元熱流体解析用のコードであるPHOENICSを用いた。PHOENICSは物質収支式、運動方程式、エネルギー方程式、圧力補正式を自動的に解くソルバーであるが、本研究では熱の移動は考慮しないためエネルギー方程式は解かない。数値計算は差分法の一つであるコントロールボリューム法で計算される。流れ解析の対象とする部分を、Fig.2の測定点(6)を中心とした3つのドラムにはさまれた部分とした。計算条件は層流の2次元モデルで伝熱はないものとした。

次に、おからの特性値として動粘性係数と密度を、レオロジーの分野で用いられるレオメータで測定し、シミュレーションに用いた。おからの動粘性係数は含水率によって変化するほか、チクソトロピー性があるために剪断速度によっても変化する。含水率89.3%のおからの動粘性係数を、 $0.010[1/s]$ の剪断速度で測定したところ、平均値で $97.6[m^2/s^2]$ となった。また、密度は $1.010[kg/m^3]$ であった。

流入の境界部における速度ベクトルは、画像処理から得た速度ベクトルを用い、ドラムからの水の排出は考えないものとし、流出部の圧力は $0.100kgf/m^2$ とした。

4.2 結果と考察

1) 画像処理による速度ベクトルの計算

測定点(2)(3)(4)(7)付近の映像から求めた汚泥(おから)の流線を1枚に貼り合わせた写真をFig.9に示す。写真の流線は汚泥の流速ベクトルを連ねたものとして表わしている。汚泥は上下ドラムの回転によってドラムの間隙を流れてゆくが、このとき汚泥はうねるように蛇行しており、その間に圧縮と緩和を交互に繰り返している。このことと、脱水ケーキの中ほどで含水率がほぼ一定であったことから、脱水機構として次のことが考えられる。

蛇行して流れる汚泥に速度差が生じ、速度が速い側にできる粒子の間隙に水が流れ込み、その結果、中央の水が外側へと移動してゆく。加圧脱水のように、汚泥に力を加えて自由水や間隙水を押し出すのではなく、多重円板型脱水機の場合は汚泥の粒子を動かすことにより、水の移動が起こって水が排除されると考えられる。強い力を加えずに粒子の間隙から水を抜き出すことから、ブロック化しにくい汚泥に対しても脱水が可能と考えられる。

また、脱水ケーキ出口付近では流れ方向が一定でかつ速度も速くなっているが、これは出口付近で蛇行が終り、より狭くなった出口から汚泥が直線的に押し出されたことによる。

2) シミュレーションによる流速ベクトルの補間

Fig.9の三角形に囲った部分を横35、縦46のメッシュに区切り、画像処理で求められた速度を各格子(コントロールボリューム)で平均化してその点での流速とし、また、ドラム周囲速度と流入端での速

度を直接与えた。Fig.10の流速ベクトルが描かれている部分(白バックの格子)がこのようにして求めた既知の流速ベクトル、灰色の格子が未知の速度ベクトルである。

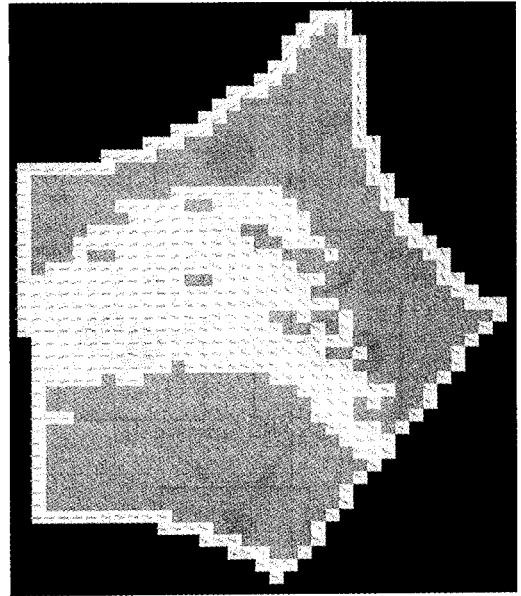


Fig.10 Flow vectors of sludge and a simulation area

既知の流速ベクトルを境界条件として、PHOENICSにより求めた格子ごとの流速ベクトルをFig.11に示す。図下を流れる汚泥は、下部ドラムに乗ってほぼ横方向に流れる。また、右上部の汚泥は右上のドラムに沿って一部が上方に押し上げられ、左上のドラムとの溝の部分で方向を変えて、左上のドラムの周辺に沿って左に流れている。このように、ドラム付近を流れる汚泥はドラムに沿って移動してゆきながら、水が円板の間隙に入り込み脱水されると考えられる。円板の間隙への水の流入は円板間の毛管効果によるものと推測されるが、明確ではないために排水部分は計算に加えなかった。今後、汚泥とろ体との界面におけるマイクロな排水機構を明らかにし、モデルに組み込んでいく必要があると考えられる。

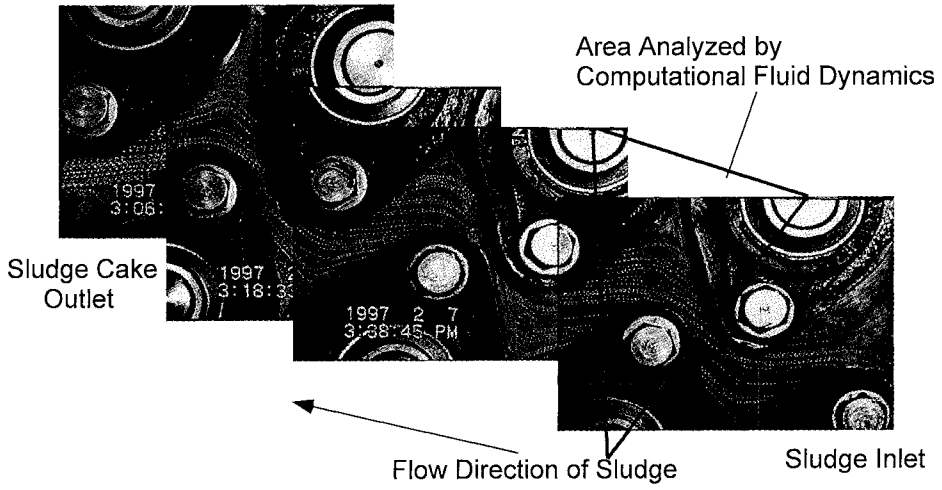


Fig.9 Calculated flow vectors of sludge in the hydrator

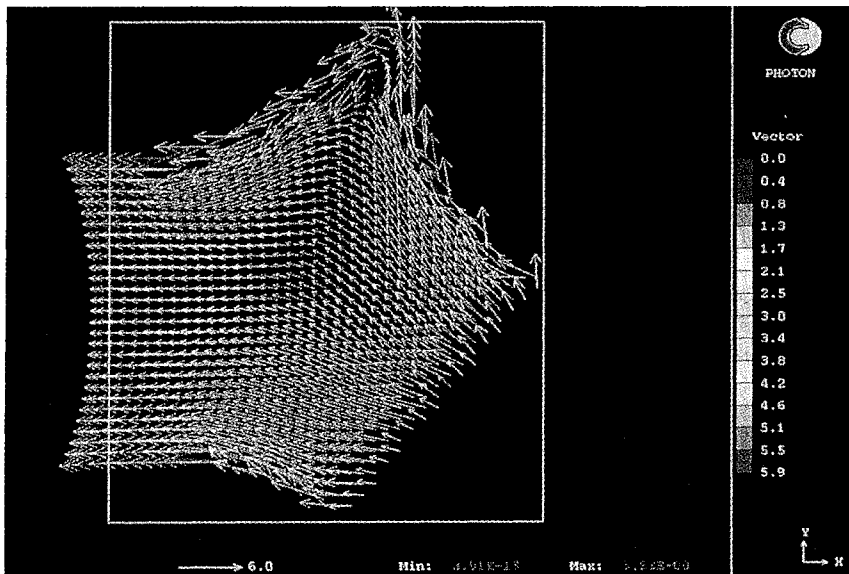


Fig.11 Interpolated flow vectors of sludge in the dehydrator

5 最後に

本研究では、多重円板型脱水機の脱水機構を解明するために、脱水機内部の圧力分布および水分分布を測定した。また、脱水機内の汚泥の流動を調べるために、おからを試料として脱水過程の映像を録画し、黒色粒子をトレーサとして画像処理することにより、汚泥の流速ベクトルを明らかにした。また、映像では得られなかったろ体ドラム付近の汚泥の流れを、流体シミュレーションによって明らかにした。これら実験と解析により以下の知見が得られた。

- 1) 多重円板型脱水機内を流動する汚泥に働く圧力は、加圧脱水等の圧力に比べて小さく、また脱水ケーキ出口に向かって直線的に増加する。
- 2) 含水率は並んでいるドラムのうち中央付近で高く、出口付近で低かった。また、ドラム間を流れる汚泥のうち上部は下部に比べて含水率が高かった。これは、上部ドラムの周辺で水が循環していたためと考えられる。
- 3) 汚泥は上下のドラム間を蛇行して流れることによって圧縮と緩和を交互に繰り返し、水が緩和時に生じる粒子の間隙に移動することによって、汚泥内部から外部へと水が移動すると推測される。

参考文献

- 1) 斎藤昇一、橋本 紘、石川道夫、石川次男：多重円板型脱水機による無機汚泥脱水について(その2)、清掃技報、No.17、pp.63 - 77 (1992)
- 2) 前澤工業(株)、(株)ヘリオス：多重円板型(ヘリオス)脱水機、月刊下水道、Vol.14、No.9、p34 (1991)
- 3) 平岡正勝編、汚泥処理・再資源化技術とシステム、環境システム計測制御学会 (1994)
- 4) 安居院猛、中嶋正之：画像情報処理、森北出版、pp.147 - 148 (1991)

(受付 2000. 7. 7)

(受理 2000. 8. 14)