

省エネ化を実現するデカンタ形遠心分離機における 動力削減機構の開発と効果実証

Development and Verification of the Power Reduction Mechanism of Decanter Centrifuge for Energy Savings

山本 充俊 技術開発本部技術基盤センター熱・流体グループ
磯 良行 技術開発本部技術基盤センター熱・流体グループ グループ長 博士（工学）
松見 優輝 株式会社 IHI 回転機械エンジニアリング 技術センター設計部
寺谷 直也 株式会社 IHI 回転機械エンジニアリング 技術センター設計部 部長
宮崎 祐輔 近藤鉄工株式会社 長岡工場

デカンタ形遠心分離機は、主に固体と液体の混合物を遠心力で分離する装置であり、IHI グループの主力製品の一つである。本分離機は省スペースかつ大量の処理物を連続的に分離できる利点があるものの、大きなエネルギーを必要とする。そこで、分離機の動力の削減を目的として、流体工学技術を駆使して流体现象を把握することによる傾斜排液機構の開発を試みた。本稿では、傾斜排液機構を適用した際の分離機内の流動現象の変化と動力削減のメカニズムの検討と、試験による動力削減効果の実証の結果を示す。

The decanter centrifuge is a device that mainly separates a mixture of liquids and solids by the centrifugal force and is one of the IHI Group's main products. Although this separator has the advantage of space-saving and continuous separation of large amount of processed material, it consumes large amounts of energy. In this study, the authors develop the "slope release mechanism" to reduce power consumption of the separator by understanding fluid phenomena using fluid engineering. In this paper, the authors show the change of flow phenomenon and the mechanism of power reduction when the slope release mechanism is applied. Finally, the power reduction effect is verified by experiment.

1. 緒 言

デカンタ形遠心分離機（以下、デカンタ）は、主に固体と液体の混合物（原液スラリー）を高速回転による遠心力で、固体（脱水ケーキ）と液体（分離液）に連続的に分離する装置である⁽¹⁾。デカンタは、下水処理場や工場排水の浄化⁽²⁾、食用油⁽³⁾・豆乳などの食品・飲料⁽⁴⁾や合成樹脂などの原料製造ラインで使用されている⁽⁵⁾。株式会社 IHI では 1949 年に初号機を食品製造プロセス用に開発した。その後、1970 年に公害関連の法律が整備されると、下水処理場、し尿処理場、そして各種工場の排水処理工程向けに適用されたことで、飛躍的に納入台数を伸ばし続けた。これまでに約 1 万 2 000 台の納入実績があり、IHI グループの主力製品の一つである。また近年では、系外に有価物を排出せずに回収したり、製造工程の効率向上に用いられたりすることも多く、循環型社会の実現にも貢献している。

デカンタは分離容器の回転により、原液スラリーに重力の数千倍の遠心力を発生させる。これにより、固体の沈降

速度を飛躍的に向上させ、固体と液体の分離を促進させている。この高い分離性能により、大量の処理物を省スペースかつ連続的に分離できることがデカンタの大きな利点である。固体と液体の比重差さえあれば分離可能なため、産業用分離装置の主流として広く用いられている。

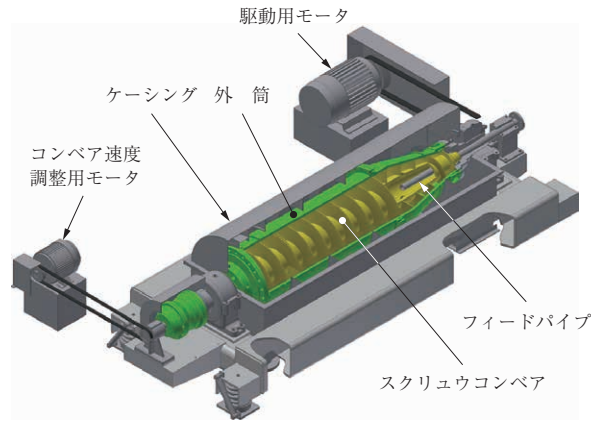
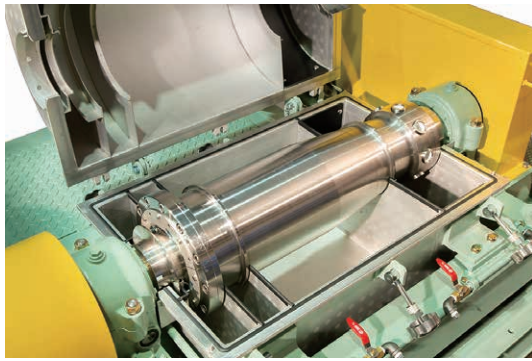
一方でデカンタは、分離容器を高速回転させるために大きなエネルギー（動力）を必要とする⁽⁶⁾。消費動力を削減することができれば、ランニングコスト削減という付加価値向上によるデカンタの販売競争力の強化はもちろんのこと、省エネルギー化により CO₂ 排出量の削減に貢献でき、脱 CO₂・循環型社会の実現につながると考える。

本稿では、流体工学技術を駆使して流体现象を把握した知見を活かし、デカンタ液体出口から液体の放出角度を変更することでデカンタ消費動力の削減に成功した事例を報告する⁽⁷⁾。

2. デカンタと傾斜排液機構

2.1 デカンタの概要

デカンタの一般的な構成を第 1 図に示す⁽⁷⁾。外胴とス



第 1 図 デカンタの一般的な構成⁽⁷⁾
 Fig. 1 Typical configuration of decanter centrifuge⁽⁷⁾

スクリュウコンベアは外部に備え付けられている駆動用モータにより高速回転する。回転体のサイズによるものの、重力の数千倍の遠心力が発生するような回転数を与えている。また、外胴とスクリュウコンベアでは数 rpm 程度の回転速度差（以下、差速）をもって回転できる機構となっている。

デカンタの内部構造を第 2 図に示す。原液スラリーはフィードパイプを通過してデカンタ内部へと流入する。流入した原液スラリーは内胴吐出室にて一時受けされた後に、吐出口から外胴へ放出される。外胴に到達した原液スラリーは、デカンタ回転による遠心力の効果を受け外胴に張り付き、円周上に液だまりを形成する。原液スラリーは液だまり中を吐出口から液体出口方向へ連続的に流れている。この際、原液スラリーは重力の数千倍の遠心力を受けているため、密度の低い液体と密度の高い固体に連続的に分離され、固体は外胴に張り付く。液体は液体出口から外部へと放出され、固体は外胴と差速のついているスクリュウコンベアにより固体出口方向へと運ばれ、固体出口から

放出される。

以上の原理により、デカンタでは原液スラリーを固体と液体に連続的に分離している。

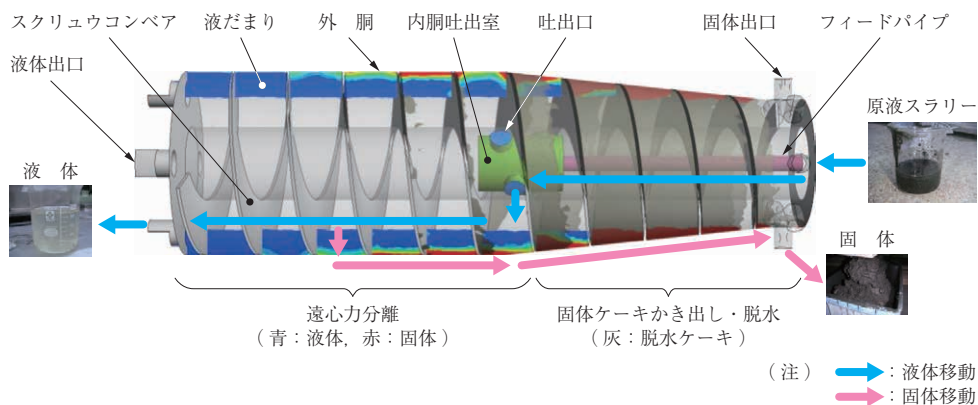
2.2 傾斜排液機構のメカニズム

デカンタの消費動力は、重い回転体を回転させる際に軸受などで生じる機械損失と、デカンタに供給された原液スラリーを回転体内で加速するために必要な排液動力とに大別される。運転条件によるが、従来型では排液動力が消費動力の 4 ～ 6 割を占めており、本稿ではこの排液動力に着目する。また、原液スラリー中の懸濁物質（Suspended Substance：SS）の質量濃度（SS 濃度）は運転条件にもよるが数%程度である。つまり、原液スラリー中の大部分を液体が占めているため、理論モデルは液体のみを対象として構築する。

デカンタに発生する排液動力 P は、デカンタに掛かるトルク T と回転角速度 ω を用いて下記ようになる。

$$P = T\omega \dots\dots\dots (1)$$

角運動量保存則によると、デカンタに掛かるトルクは単



第 2 図 デカンタの内部構造
 Fig. 2 Internal structure of decanter centrifuge

位時間当たりの液体流入角運動量の変化に等しいため下記のようなになる。

$$T = \dot{L}_{out} - \dot{L}_{in} \\ = \rho Q (r_{out} v_{\theta out} - r_{in} v_{\theta in}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 \dot{L} は単位時間当たりの液体の角運動量変化、 ρ は液体の密度、 Q は処理流量、 r はデカンタ回転軸からの半径、 v_{θ} は液体の回転方向速度を示し、添え字の *in* はデカンタへの流入、*out* はデカンタからの流出である。デカンタへの液体の流入は、2.1 節に記載したとおりフィードパイプ内を通過して流入するが、流入の際に回転方向の速度は発生しない。そのため、(2) 式の $v_{\theta in}$ は 0 となり、右辺第 2 項は消去できる。つまり、デカンタでの排液動力は単位時間当たりの流出角運動量変化のみ考慮すればよいこととなる。

デカンタ液体出口と液体の流れ方向を第 3 図に示す。従来型の液体出口穴は端面に垂直すなわち回転軸と平行に開けられている。このため、原液スラリーはデカンタ内で回転方向に加速され、液体出口から回転方向の速度をもつ

たままデカンタの外へ放出される（回転相対系で回転軸と平行に放出された場合は、絶対系で見るとデカンタ回転方向速度と同じ回転方向速度をもって放出されることとなる）。この放出時の回転方向速度を減らすことができれば流出角運動量が低下し、デカンタの排液動力の削減につなげることができる。そこで、液体出口の液体放出角度を回転軸に対して α ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) 傾け、液体を回転方向と逆に放出させる（第 3 図 - (b) 傾斜排液機構）ことを考えると (1) 式は下記のように変形できる。

$$P = \rho Q r_{out} v_{\theta out} \omega \\ = \rho Q r_{out} (r_{out} \omega - v \sin \alpha) \omega \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 v は回転相対系での液体放出の相対速度である。従来型は $\alpha = 0^\circ$ の場合に相当する。

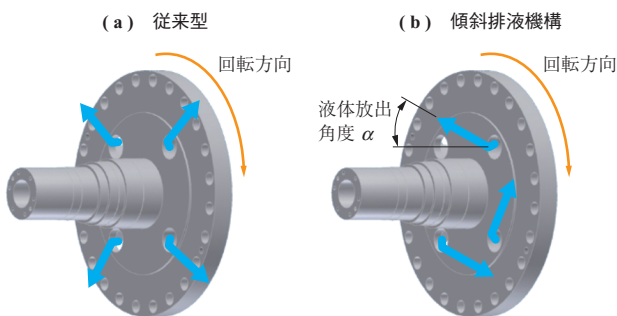
(3) 式より、液体の放出角度を変更することで放出時の角運動量が低下し、排液動力の削減を見込むことができる。これは、液体出口において液体を回転方向と逆に放出させることにより、液体の回転方向速度を低下できるためである。以上のことから、デカンタ液体出口の液体放出角度を工夫することで、排液動力が削減できると考えられる。

以降の章では、本節にて示した傾斜排液機構による排液動力の削減効果を、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics : CFD) 解析およびテスト機を用いた試験にて確認する。

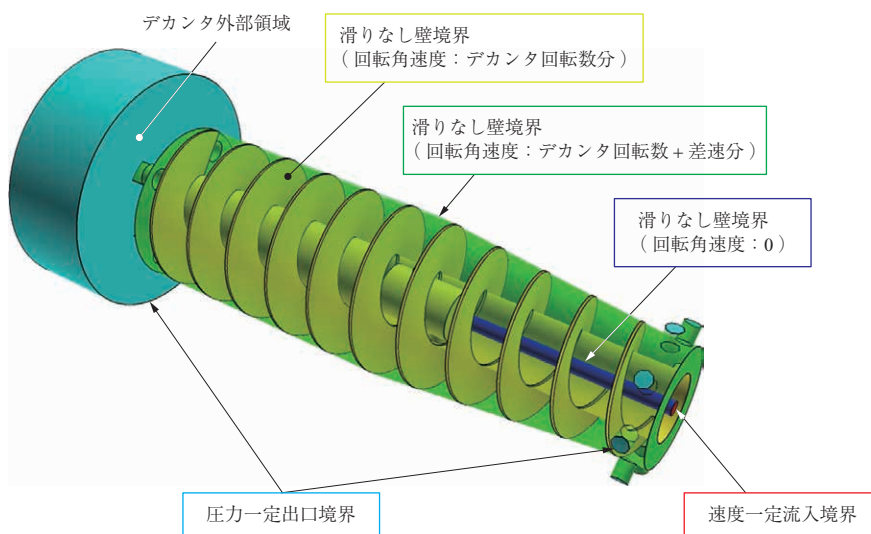
3. CFD 解析手法および試験方法

3.1 CFD 解析手法

解析対象は、デカンタ内部の液体流動である。CFD 解析対象および条件を第 4 図に示す。フィードパイプから



第 3 図 デカンタ液体出口と液体の流れ方向
Fig. 3 Liquid outlet of decanter centrifuge and liquid flow direction



第 4 図 CFD 解析対象および条件
Fig. 4 Computational area and boundary condition

液体が流入し、デカンタ液体出口から液体が放出されるまでの領域を対象とした。

Ansys 社製 CFD 解析ソフトウェア Fluent version 15.0 を使用して解析した。三次元非圧縮性乱流場を仮定し、乱流モデルは高レイノルズ数型 Realizable k- ϵ モデル⁽⁸⁾を採用した。離散化手法は有限体積法を採用し、回転基準座標系により解析した。本解析は、遠心力場による外胴への液体張付きが発生するため、単相流では流動現象の把握はできない。そのため、オイラー型混相流モデル⁽⁹⁾を採用し、気液混相流を考慮した解析を実施した。原液スラリー中は大部分を液体が占めており、排液動力への固体の影響は小さい。そのため、本解析では原液スラリー中の固体は無視し、気体・液体のみを対象とした。

流入はフィードパイプとし、速度一定の流入境界を採用した。デカンタ液体出口外側に外部領域を作成し、外部領域の側面を圧力一定の出口境界とした。また、固体出口側の流出孔についても圧力一定の出口境界を採用している。その他の壁面については、滑りなし壁条件を採用した。壁面の回転角速度はフィードパイプ壁面のみ 0 とし、残りの壁面はすべてデカンタ回転数に応じた角速度を与えている。ただし、外胴はスクリュウコンベアに対して差速の分増速した角速度を与えている。

3.2 試験方法

株式会社 IHI 回転機械エンジニアリング製のテスト機を用いて試験を実施した。傾斜排液機構のテスト機の外観を第 5 図に示す。

テスト機を用いた試験による動力の削減効果実証(4.3 節)では、固形分の含まれていない水を対象として動力計測を実施した。消費動力は、駆動用モータの 1 次側に取り付けた電力計により計測した。デカンタの運転が定常となつてから、5 分間計測した値の平均値を採用した。排液動力については、給水時の消費電力から無負荷時(給水を行わない場合)の消費電力を引くことで求めた。

傾斜排液機構適用による分離・脱水への影響確認



第 5 図 傾斜排液機構のテスト機の外観
Fig. 5 Test scene of slope release mechanism

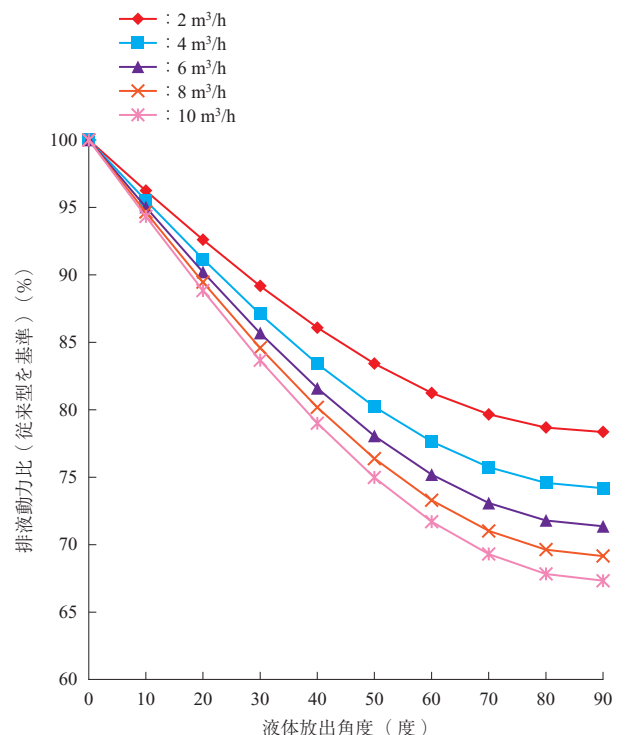
(4.4 節)では、下水汚泥を対象として試験を実施した。分離液の濃度とケーキ含水率は、デカンタから放出された分離液および固体ケーキの質量と水分を蒸発させた後の質量を計測することで求めた。

4. 結果および考察

4.1 傾斜排液機構のメカニズムに基づく検討

傾斜排液機構のメカニズム(2.2 節)に基づき、パラメータ変化による排液動力への影響を検討する。傾斜排液機構での液体放出角度によるパラメータスタディを第 6 図に示す。ここでは液体放出角度 α を変更した場合の排液動力を計算した結果を示す。また、図の縦軸は従来型($\alpha = 0^\circ$)を基準とした場合の排液動力比である。

液体放出角度を大きくするにつれて、排液動力が低下することが分かる。ただし、液体放出角度が小さい場合は角度変化による排液動力の低下効果は大きい、液体放出角度が大きい場合には角度変化による排液動力の低下効果は小さくなる。また、流量の多い方が排液動力の低下効果が大きいことが分かる。これは、流量の多い方が回転方向とは逆に放出される液体放出速度が大きくなり、デカンタから放出される液体の回転方向速度が小さくなる。その結果として、デカンタからの流出角運動量が低下し、排液動力削減へとつながるためである。

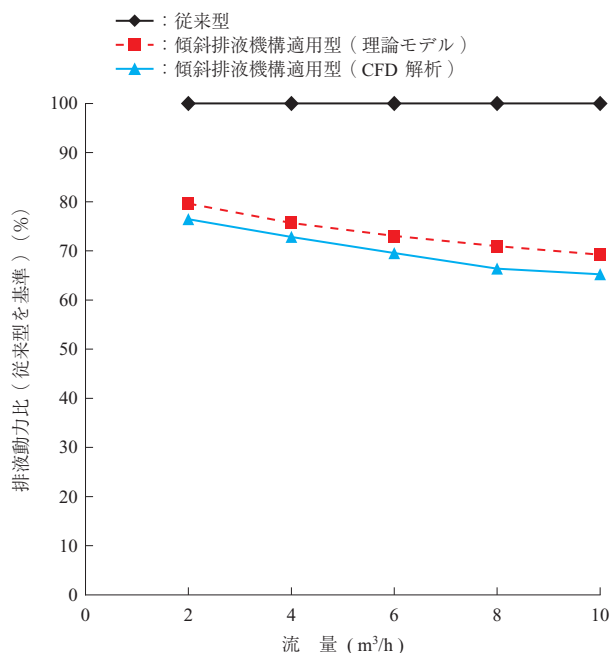


第 6 図 傾斜排液機構での液体放出角度によるパラメータスタディ
Fig. 6 Parameter study by liquid release angle at slope release mechanism

以上のことから、動力削減効果を大きく得るためには、なるべく大きな液体放出角度を選定することが望ましい。ただし選定の際には、デカンタの分離および脱水性能が維持できるかも検討する必要がある。

4.2 CFD 解析による排液動力の削減効果確認

CFD 解析により計算した排液動力比を第 7 図に示す。理論モデルと同様に CFD 解析の結果も、傾斜排液機構を適用すると流量によらず 20%以上の排液動力削減の見込みがあることを示した。以降では CFD 解析結果を用いて、従来型と傾斜排液機構適用型での流動現象の違いを考察する。



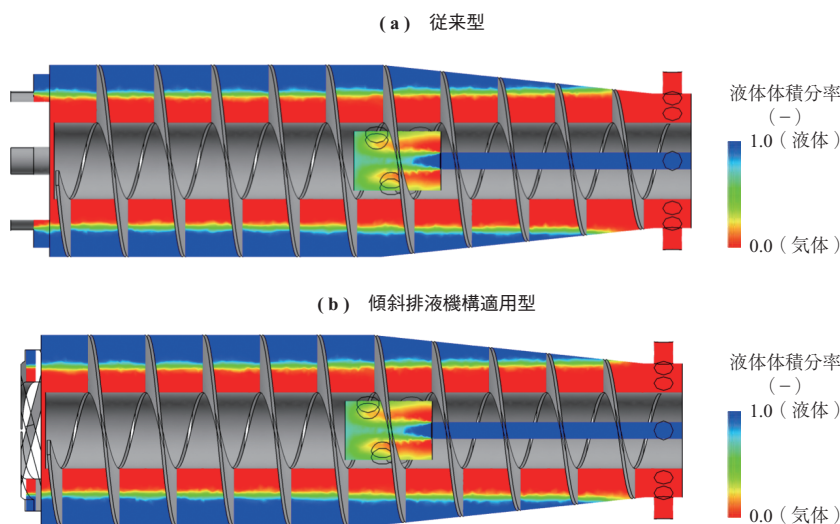
第 7 図 CFD 解析により計算した排液動力比
Fig. 7 Liquid release power comparison computed by CFD

CFD 解析により計算した液体体積分率分布を第 8 図に示す。従来型および傾斜排液機構適用型でのデカンタ内部の液体体積分率の結果を示す。なお、可視化断面は、デカンタ回転軸に垂直な断面である。

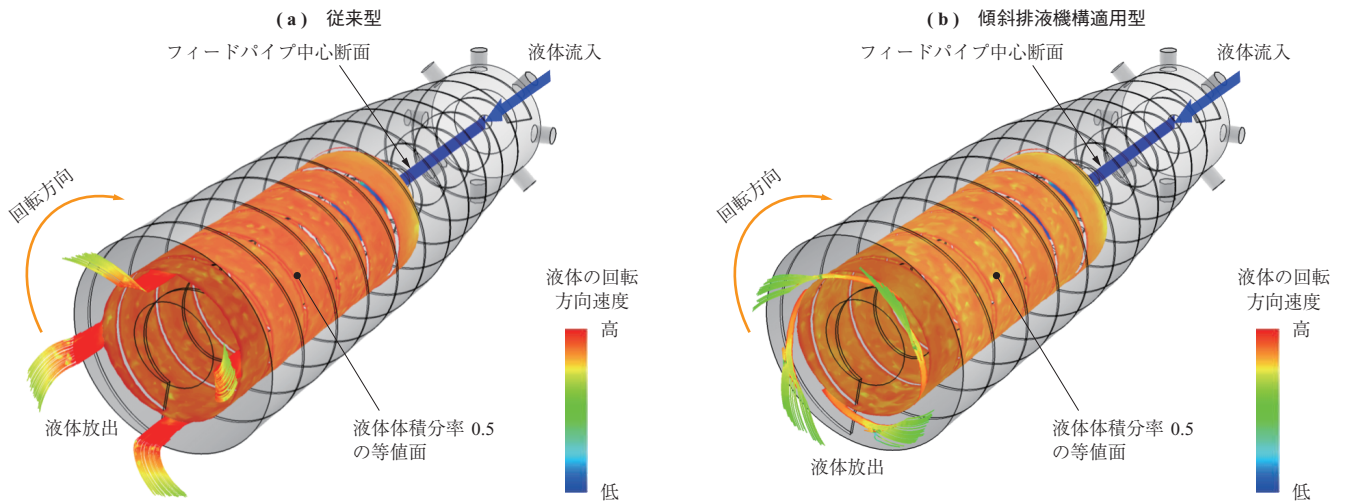
CFD 解析により、フィードパイプから流入した液体が内胴吐出室にて一時受けされた後に、遠心力の効果で外胴に張り付き、液だまりが発生する現象を再現できることが分かった。従来型と傾斜排液機構適用型の結果を比較すると、液体体積分率に大きな変化はないことが分かる。傾斜排液機構適用型では、液体出口での液体放出角度のみを変更している。そのため、フィードパイプ・内胴吐出室・スクリュウ部の流れに大きな変化を及ぼさなかったといえる。

第 9 図に CFD 解析により計算した回転方向速度分布を示す。液体放出の違いを見るため、液体出口から放出した流線を示している。フィードパイプ中心断面とスクリュウ領域での液体体積分率 0.5 の等値面も併せて示している。流線・断面・等値面は、絶対座標系での回転方向速度で色付けしている。

フィードパイプから流入した液体がデカンタの回転を受け、スクリュウ部で加速することが分かる。従来型と傾斜排液機構適用型では液体放出時の回転方向速度が大きく異なっており、傾斜排液機構適用型の方が低い回転方向速度をもってデカンタ外部へ放出されることが分かる。これは、従来型がデカンタと同じ回転方向速度をもって放出されるのに対して、傾斜排液機構適用型ではデカンタ回転と逆方向に放出することにより放出時の回転方向速度を低下させているためである。傾斜排液機構適用型ではこの放出回転方向速度の低下により、デカンタへの流入出角運動量



第 8 図 CFD 解析により計算した液体体積分率分布
Fig. 8 Liquid volume fraction computed by CFD



第 9 図 CFD 解析により計算した回転方向速度分布
 Fig. 9 Rotational velocity distribution computed by CFD

の差を小さくすることで排液動力を削減しているといえる。

4.3 テスト機を用いた試験による動力の削減効果実証

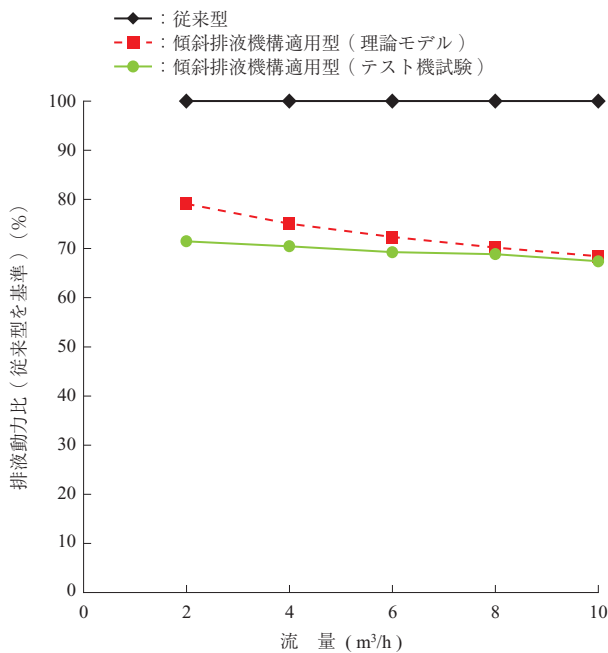
傾斜排液機構適用による動力削減効果を確認するために、テスト機を用いた試験を実施した。排液動力比の試験結果を第 10 図に示す。併せて、傾斜排液機構のメカニズム (2.2 節) に基づき計算した排液動力比の結果も載せている。

理論モデルでの計算結果と同様に、排液動力が 20% 以上削減できることを確認した。また、理論モデル計算結果とテスト機試験結果での排液動力比は 10 ポイント以内の

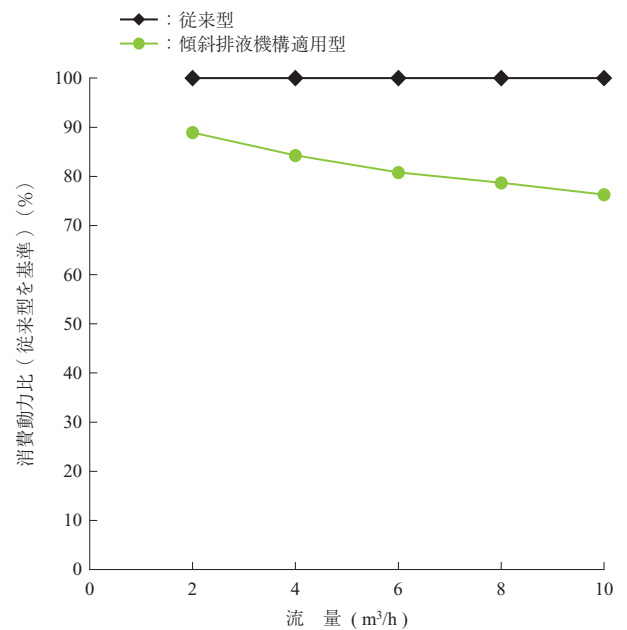
差であった。4.2 節で示した現象がテスト機内でも発生し、排液動力が削減できたと考えられる。

次に、テスト機を用いた試験により消費動力を計測し、従来型と比較した。消費動力比の試験結果を第 11 図に示す。なお、2.2 節で述べたように、消費動力は排液動力に機械損失を加えたものである。また、消費動力比は排液動力比と同様に、従来型 ($\alpha = 0^\circ$) を基準とした場合での消費動力の比である。

傾斜排液機構を適用することで、消費動力が 10% 以上削減できることが分かった。流量の多い方が傾斜排液機構適用による消費動力の削減効果が大きい。特に、流量



第 10 図 排液動力比の試験結果
 Fig. 10 Test result of liquid release power



第 11 図 消費動力比の試験結果
 Fig. 11 Test result of power consumption

8 m³/h 以上では 20% 以上の消費動力が削減できている。これは、高流量の方が消費動力中に占める排液動力の割合が大きく、傾斜排液機構適用により割合の大きい排液動力を削減したためである。以上のことから、傾斜排液機構は消費動力全体で見ても十分な削減効果があり、特に高流量域での効果が大きいといえる。

4.4 傾斜排液機構適用による分離・脱水への影響

最後に、傾斜排液機構の適用が分離・脱水性能へ及ぼす影響を確認するため分離試験を実施した。対象は下水汚泥である。分離液の濃度とケーキの含水率の試験結果を第 12 図に示す。

分離液の濃度・ケーキ含水率ともに、従来型と傾斜排液機構適用型で大きな差がないことが分かる。傾斜排液機構適用型では、液体出口での液体放出角度のみを変更しており、分離に影響を及ぼすスクリュウ部、脱水に影響を及ぼす固体出口付近は変更していない。そのため、分離・脱水性能には影響を及ぼさなかった。

5. 結 言

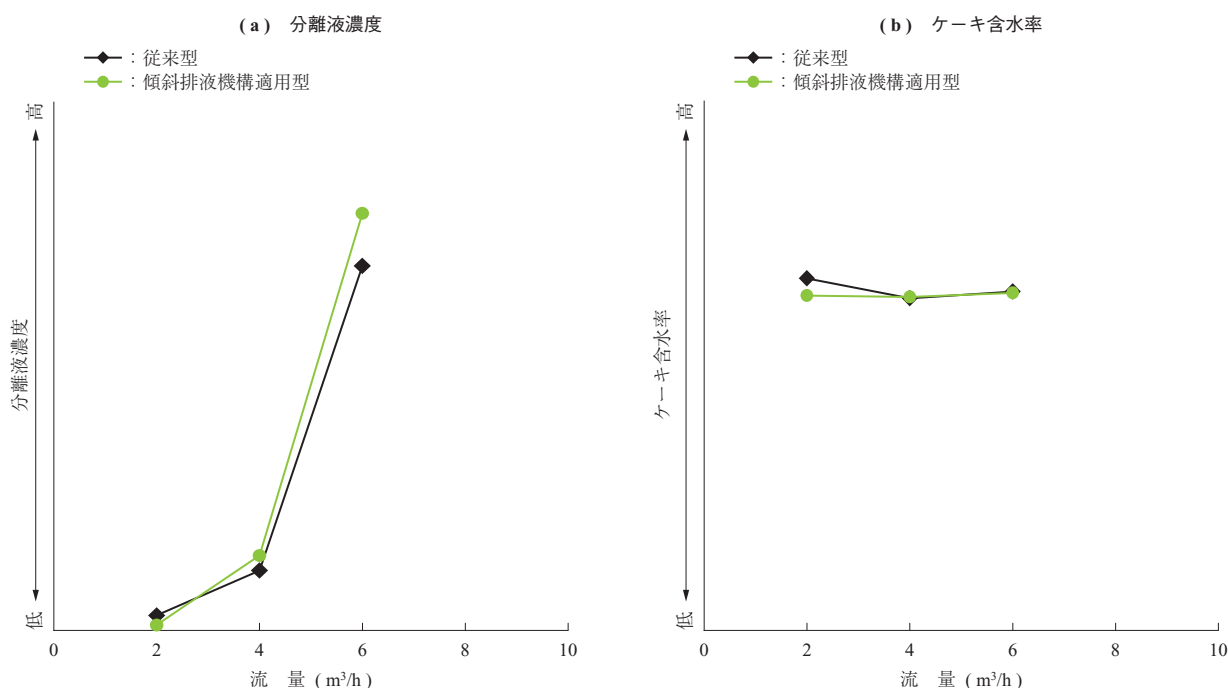
デカンタ形遠心分離機の消費動力削減を狙い、角運動量保存則の理論を基にした流動現象を検討し、傾斜排液機構を開発した。同機構では、回転方向とは逆方向に液体を放出する。これにより、デカンタから放出される液体の回転方向速度が低下し、デカンタ流入出角運動量差が小さくな

るため、排液動力の削減が見込める。傾斜排液機構の省エネ効果実証については、CFD 解析およびテスト機を用いた試験により、分離・脱水に影響を及ぼさずに動力の削減効果を得られることが分かった。

今後も、脱 CO₂・循環型社会の実現に向け、IHI グループの技術を駆使して、省エネ化による CO₂ 排出量の低減に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) A. Records and K. Sutherland : Decanter Centrifuge Handbook, Elsevier Science, 1st edition, (2001), pp. 1 - 5
- (2) L. S. Blake : Civil Engineer's Reference Book, CRC Press, 4th edition, (1994), pp. 29 - 24
- (3) D. C. Y. Foo and M. K. Tun : Green Technologies for the Oil Palm Industry, Springer, 1st edition, (2019), pp. 3 - 23
- (4) M. N. Riaz : Soy Applications in Food, CRC Press, 1st edition, (2005), pp. 123 - 124
- (5) D. W. Green and M. Z. Southard : Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw Hill, 9th edition, (2019), pp. 18-100 - 18-101
- (6) 川島 普 : 汚泥濃縮技術の展望, 環境技術, Vol. 11, No. 12, 1982 年 12 月, pp. 877 - 886



第 12 図 分離液の濃度とケーキ含水率の試験結果
Fig. 12 Test result of separated liquid concentration and cake water content

- (7) 株式会社 IHI 回転機械エンジニアリング：省エネ化「デカクタ」はレトロフィットにも対応, IHI 技報, Vol. 59, No. 4, 2019年12月, pp.14 - 17
- (8) T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang and J. Zhu. : A New $k-\varepsilon$ Eddy-Viscosity Model for High

- Reynolds Number Turbulent Flows – Model Development and Validation, Computers Fluids, Vol. 24, No. 3, (1995.3), pp.227 - 238
- (9) M. Ishii : Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow, Eyrolles, (1975), pp.142 - 201