

TEXEL 技報

Vol.4 2014.01

 **セイコー化工機株式会社**
技術開発研究所

「従来どおり」からの脱却

技術開発研究所 中川 祥示

＜「ものづくり」から「コトづくり」へ＞という言葉が聞かれます。半導体、TV、太陽電池産業を例にとり、日本のものづくり産業が、「良いものは売れる」という製造者の目線で製品を開発、従来製品から脱却できないで衰退しているということから、徹底的にお客さん目線で考え、お客さんが感動するくらいの付加価値をつけた製品をつくりだすという「コトづくり」に進化させようということです。製造コストも見逃せませんが、従来どおりの考え方で製品を開発・上市することは避けなければなりません。

弊社も、まずお客さんが困っていることに対し耳を傾け、ニーズとして取り込むこと、次に製品の問題点、技術的課題を分析し、これまでの蓄積した技術あるいは新規技術で製品開発や改善を行っていきたいと考えています。製品的にも、組織的にも従来どおりという考え方から脱却したいものです。

さて、去る 10/31～11/1 の期間、INCHEM TOKYO 2013 に「新製品・先端技術」をテーマに製品を出展しました。ご来場いただいた皆様方には厚く御礼申し上げます。

内容は、どうだったでしょうか。

今回は、新しい試みとして、「DC ブラシレスマグネットポンプ」「PP 製立形成形ポンプ」「高効率ターボファン、ターボブロウ」「大型ターボファン」等の製品の展示の他にブース内にプレゼンテーションの場所を設け、本技報で取りあげています「五軸制御型磁気浮上ポンプ」「回転体&荷電式白煙除去装置」「超音波による FRP 劣化診断」について製品&技術説明を行いました。

FRP 劣化診断は、廃サンプル評価データの積み重ねから、現状の FRP 製品の診断を行なおうというもので、3～5 年後の事業化を目指し、データを採取している段階です。廃サンプルをご提供いただければ、廃サンプルの劣化評価が可能です

また、磁気浮上ポンプ、白煙除去装置については、商品化実験もほぼ終了し、モニター機の貸出しを準備している段階です。

本報を読んでいただき、廃 FRP サンプルの提供ができる、一度モニター機の性能を確認してみたいとお考えの企業の皆様方には、弊社営業担当までご一報いただければ幸いです。

五軸制御型磁気浮上ポンプと磁気浮上原理について

技術開発研究所 平櫛 真男

1. はじめに

近年の半導体の高密度化に伴い、半導体工程に使用される薬液の高純度化が進み、薬液を搬送するマグネットポンプには、高純浄性が求められている。また、医薬品分野に使用されるマグネットポンプも同様である。

マグネットポンプとは、電動機の動力をリアケーシングと呼ばれる隔壁を隔てて、マグネットカップリングにより動力を伝達する構造を有するポンプであり完全無漏洩を実現することができる。

図1に代表的なマグネットポンプ構造を示す。

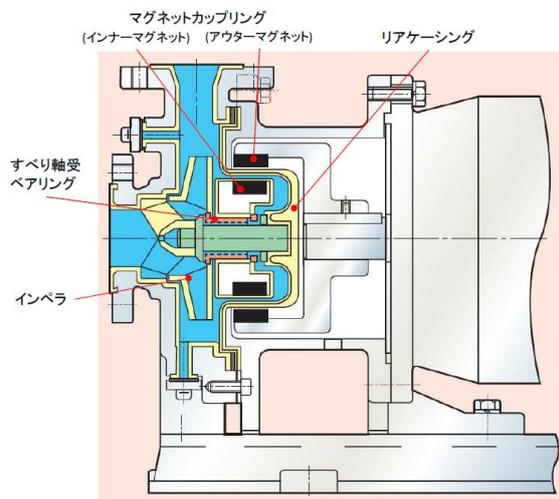


図1 マグネットポンプの構造

マグネットポンプでは、従動マグネット（インナーマグネット）を軸中心に保持し、円滑に回転させるため、すべり軸受が必要な構造となっている。すべり軸受の材質を磨耗の少ないSiCセラミック製にすることにより送液中への磨耗粉の混入を減らす取り組みを行ってきたが、完全に磨耗を

なくすことは困難であった。コンタミレスの高純浄性を実現するためには、摺動部の完全非接触化が必要である。そこで、磁気浮上ポンプの製品化に至った(特許 出願中)。

磁気浮上ポンプとは、電磁力により、インペラおよび回転子をポンプケーシング内に浮上させ、完全非接触支持を実現した、モーター一体型耐蝕ポンプである。コンタミレスの他に、機械的接触のあるベアリング等の摺動部材がなくなるため、消耗部品がなくなり、メンテナンスフリーを実現することができる。また、送液の循環により行っていたすべり軸受の冷却が、不要となるため、空気混入運転等の軸受部の冷却が困難な状況でも異常熱発生等の問題が発生しない等の特長を有する。

2. 五軸制御方式の機構

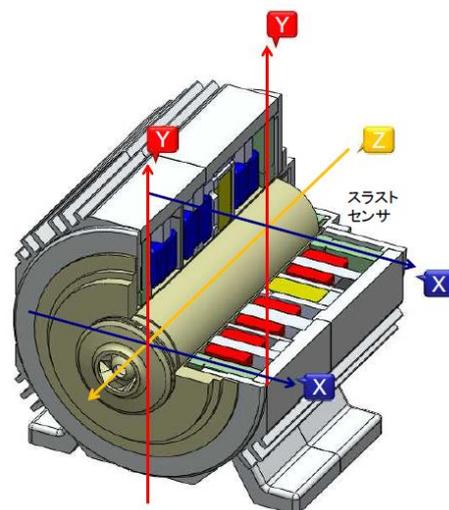


図2 五軸制御方式

図2に示すように五軸制御型磁気軸受は、回転軸の方向をZ軸とするとスラスト方向（Z方向）の1箇所とラジアル方向（XY方向）の前後2箇所（2×2）の計5軸にて回転子の位置検出を行い、フィードバック制御にて浮上制御を行う磁気軸受であり、安定した浮上制御を行うことができる。

3. 五軸制御方式の利点

XY方向の制御が前後2箇所にあることにより、大きなラジアル荷重が働き、回転子が移動した際にも十分な軸支持力を発生させ、対応することができる。また、前後の荷重バランスが崩れ、回転子が傾くような力が働いても前後の軸受を個別に制御することにより傾きを打ち消す方向に力を発生させ、安定制御を行うことが可能となる。(図3上)

ポンプ運転時には揚程に比例して大きなスラスト方向の力がインペラに発生するが、Z軸方向の制御により、この力に能動的に対応することが可能となる。さらに、空気混入等の急激な運転状況の変化が発生し、スラスト方向の力に急激な変化があった際にも対応可能であり、安定制御を実現できる。(図3下)

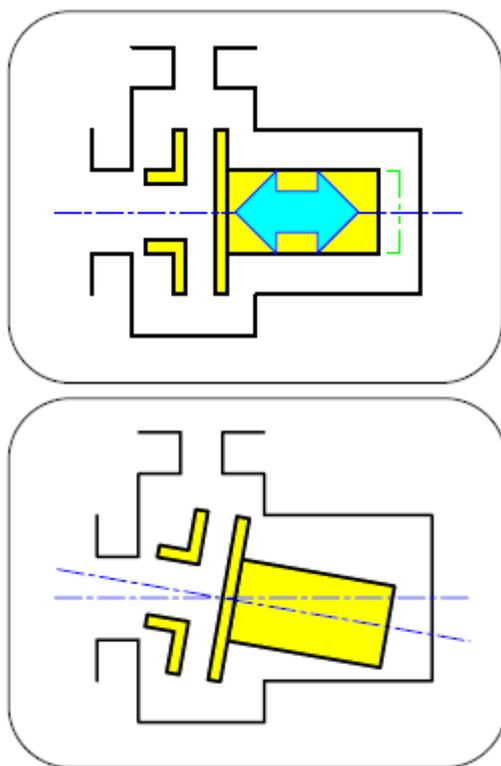


図3 ポンプの不安定現象
(上：ラジアル方向、下：スラスト方向)

4. 五軸制御型磁気浮上ポンプの構造

五軸制御型ポンプの構造を図4に示す。

図中の左側から、ラジアルXY方向の軸支持制御を行う磁気軸受となるユニット1、そして、回転トルクを発生させる電動機ユニット、さらに、スラスト軸方向の軸支持制御を行うスラスト磁気軸受とラジアルXY方向の軸支持制御を行うラジアル磁気軸受の2つの機能を併せ持ったユニット2を配置した構成となっている。さらに、後部に永久磁石によるスラスト磁気軸受としてユニット3が配置されている。

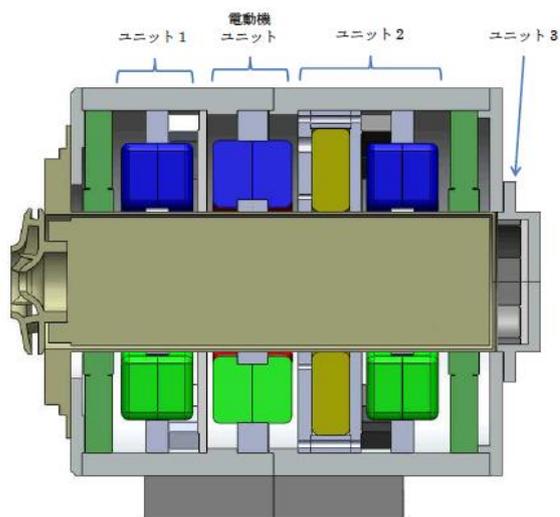


図4 磁気浮上ポンプ断面構造図

5. ラジアル方向の磁気浮上原理¹⁾

図5にラジアル軸支持力の発生原理を示す。ユニット1、2において、固定子と回転子にそれぞれ配置されているスラスト永久磁石から発生するバイアス磁束が回転子中心から放射状に固定子に流れ込んでいる。例えば、水平位置軸支持巻線に直流電流を流し、2極のラジアル軸支持磁束を発生させることで、ギャップ上部では磁束が強め合い、ギャップ下部では磁束の弱め合いが生じ、軸支持力がY軸正方向に発生する。軸支持巻線の直流電流の向きを反対にすれば、軸支持力の向きは反対になり、他の垂直方向の軸支持巻線に電流を流せば、X軸方向に軸支持力を発生させることもできる。

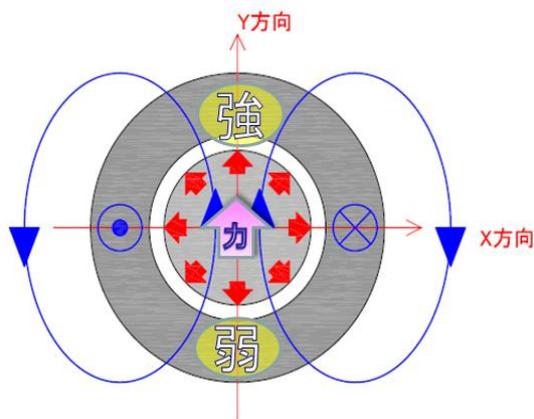


図5 ラジアル軸支持力発生原理

6. スラスト方向の磁気浮上原理¹⁾

スラスト軸支持力の発生原理を図6に示す。

ポンプ運転時には、揚程が高まるに従って回転子は図6のZ軸負方向に引っ張られる。したがって、必要とされる軸支持力の方向は、逆向きのZ軸正方向となる。ユニット1では、固定子側と回転子側に設置してあるスラスト永久磁石によって、バイアス磁束 Ψ_{s1} が発生している。そこで、図中に示すように、回転子と固定子の磁性体部材 $R1$ と $S1$ を軸方向にずらして配置することで、 Ψ_{s1} がギャップ部分で軸方向に傾いて流れるため、受動的なスラスト軸支持力 $F1p$ をZ軸正方向に発生させることができる。また、ユニット2では、コの字型の固定子磁性体部材 $S2$ において、バイアス磁束 Ψ_{s2} が二手に分流して、回転子磁性体部材 $R2$ に流れ込む。その際、 $S2$ 内の磁気抵抗の差により、 Ψ_{s2} はZ軸正方向側に多く分流して流れるため、受動的な軸支持力 $F2p$ が発生する。加えて、スラスト軸支持巻線 Ntz に直流電流を流すと、スラスト軸支持磁束 Ψ_{tz} が図中に示すように発生する。その結果、 Ψ_{s2} と Ψ_{tz} の重ね合わせにより、スラスト磁気軸受ユニット部分の右側ギャップ部分では磁束が強め合い、左側ギャップ部分では磁束が弱め合うため、Z軸正方向に制御可能な能動的スラスト軸支持力 $F2a$ が発生する。また、Z軸負方向にスラスト軸支持力 $F2a$ を発生させる場合は、スラスト軸支持巻線 Ntz に図とは逆向きの直流電流を流せば良い。ユニット3では、回転子右側に円筒形状とリング形状のスラスト永久磁石を配置し、磁性体であるセンサターゲットを利用することで、バイアス磁束 Ψ_{s3} が生じ、受動的なスラスト軸支持力 $F3p$ を発生させてい

る。従って、全体のスラスト軸支持力 Fz は、これらの $F1p$ と $F2p$ と $F2a$ と $F3p$ の合力となり、強力なスラスト軸支持力となる。

$$Fz = F1p + F2p + F2a + F3p$$

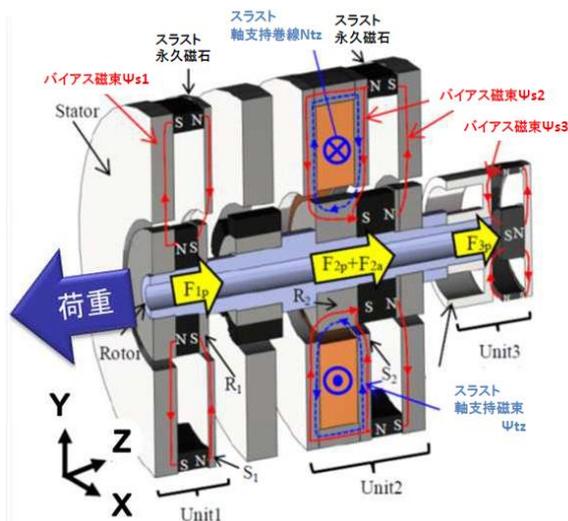


図6 スラスト磁気支持力発生原理

7. 磁気浮上ポンプのシステム構成

図7に磁気浮上ポンプのシステム構成を示す。

システムは、磁気浮上とシステム全体の制御を行うコントローラと、回転制御のみを行うインバータ、ポンプ本体の3つからなり、それぞれの働きは以下に示したものとなっている。

(1) コントローラ

磁気浮上のON/OFF、回転のON/OFFは、コントローラにより行われる。過電流・オーバーロード等の異常監視も本コントローラにより行われるが、回転制御に関しては、始動・停止信号や回転子指令値をインバータと通信するのみとなっている。

(2) インバータ

市販インバータのPMモータ¹⁾制御モードを利用して運転を行う。コントローラの制御信号に従って、インペラを回転させるための電流制御を行う。

(3) ポンプ本体

接液部材質は、インペラと回転子ライニングが、

PFA、リアケーシングが PTFE、ケーシングが、PTFE 製である。すべてフッ素樹脂であり、高耐蝕対応となっている。

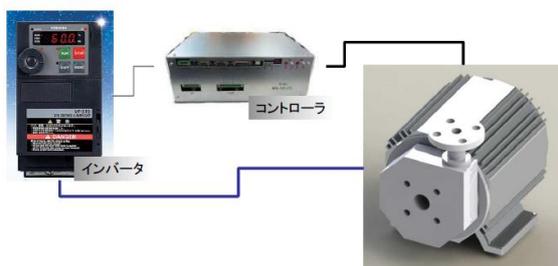


図7 磁気浮上ポンプのシステム構成

8. おわりに

五軸制御型磁気浮上ポンプの特長をまとめると、以下ようになる。

- ①高耐食性
- ②磁気軸受による非接触駆動によりコンタミレスを実現
- ③消耗部品がなく長寿命
- ④五軸制御による安定制御
- ⑤空気混入運転が可能
- ⑥高スラスト荷重に対応

現在、モニター機を準備している段階であるが、今後、本製品が、半導体産業や医薬品関連産業等のクリーンな送液を必要とされる分野や、完全無漏洩が必要で空気混入運転が避けられないような用途等、様々な産業分野で活用され、産業の一助となれば幸いである。

用語説明

* PM モーター

回転子導体部分に永久磁石（Permanent Magnet）を埋め込んだ構造をもつ同期モーター。

参考文献

- 1)山本、竹本、小笠原、平櫛：「五軸能動制御型ベアリングレスキャンドモーターポンプの高出力化の検討」電気学会 モータードライブ、リニアドライブ合同研究会 2011

回転体&荷電式白煙除去装置について

環境装置事業部設計課 西山 幸賞
技術開発研究所 中川 祥示

1. はじめに

酸性ガスと水分子が結合し液滴粒子が生成したり、ガス-ガス反応、燃焼、分解などにより固体粒子(ヒューム)が生成した場合、通常の湿式洗浄処理を行っても、排突から白い煙状で排出される。これは、気体中に固体あるいは液体が微細な粒子として浮遊懸濁している状態(Aerosol：煙霧体又は浮遊粒子状物質 SPM：Suspended Particulate Matter)となり、除去できなくなっているためである。これらの白煙を除去する装置として、ブラウン拡散作用*を利用したガラス繊維製フィルタがあるが、設置スペース、フィルタの交換や閉塞による圧力損失の増大等の課題がある。

当社は、従来より慣性衝突原理を利用した回転体白煙除去装置を販売してきたが、捕集粒子径に限界がある、消費電力が高いという課題があったため、新たに操作条件、送風機構造等を検討し、リニューアルした。

本報では、New 回転体白煙除去装置並びに現在開発中である、荷電式白煙除去装置について紹介する。

荷電式白煙除去装置は、クーロンカ*を利用したもので、酸ミスト白煙、水溶性ヒューム白煙除去に特化した装置である。高効率、低ランニングコスト、ノーメンテが大きな特徴である。

2. 白煙発生要因

図1にエアロゾルの粒子径による区分を示す。

(1)酸ミスト白煙

金属の洗浄や分解工程で酸溶液を加熱した場合、液相よりガスとして発生し、その一部が水分子と結合し白煙粒子化する(沸点近くまで加熱すると、白煙化しやすい)。

HNO_3 、 HCl ・・・90℃以上加熱で白煙化

平均2μm程度

H_2SO_4 ・・・280℃以上加熱で白煙化

平均2μm程度

発生周囲温度が低い状態、高湿度状態にすると粒子径が小さくなる傾向がある。

粒子化に至らない酸性ガスは、湿式洗浄塔で大半は除去されるが、一部水分子と結合して白煙として排出される。

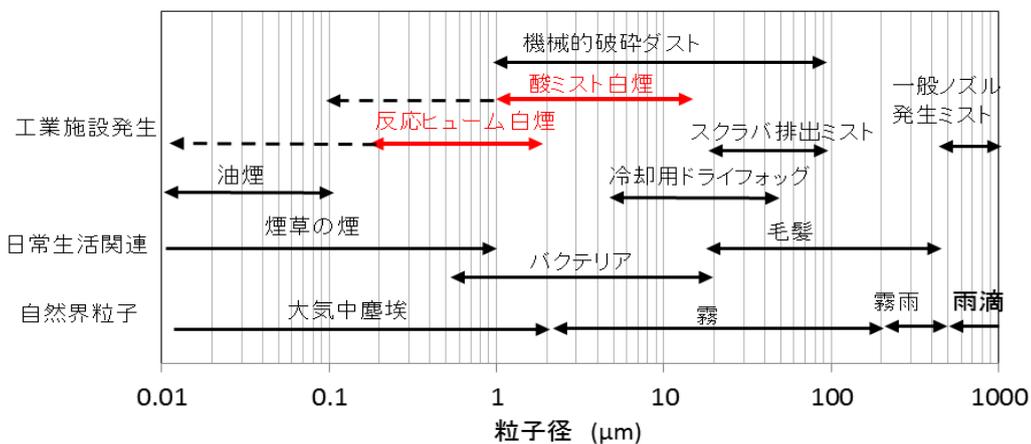


図1 エアロゾルの粒子径による区分

HF の場合、白煙の発生は少ない。

(2)反応ヒューム白煙

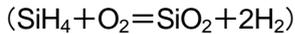
①ガスーガス反応

アンモニアと酸性ガスの反応により水溶性固体粒子が生成。(平均 $0.5\sim 0.8\mu\text{m}$ 程度)



②分解

SiO_2 (平均 $0.5\mu\text{m}$ 程度)



③金属ヒューム

燃焼により生じた金属蒸気が、冷却凝結により粒子が発生。

酸化鉄、酸化亜鉛

③その他水溶性ヒューム

SO_3 ・・・電気炉分解 平均 $0.8\mu\text{m}$ 程度

過塩素酸(HClO)・・・ 180°C 加熱 平均 $2\mu\text{m}$ 程度

(3)冷却凝縮によるミスト

湿式洗浄塔出口で高湿度ガス水分が冷却凝縮により白煙化。

今回の白煙除去装置の除去対象は、水溶性ヒューム及び酸ミストであり、 SiO_2 のようなゲル状物質、金属ヒュームのような水不溶性ヒュームは含まない。

3. 回転体白煙除去装置

(1)装置概要・構成

図-2、3にそれぞれ白煙除去装置フロー、回転体スクラバ外観を示す。

本装置は、FRP製の増湿塔、回転体スクラバ、ミストキャッチャータから構成され、硝酸、塩酸等酸加熱により発生する白煙を目視でやっど確認できる程度に低減する装置で風量 $25\sim 100\text{m}^3/\text{min}$ の範囲で使用できる。

標準フローでは、増湿塔(スプレー塔)を設置しているが、湿式洗浄塔を設置し高湿度となり白煙が発生している場合であれば、増湿塔は省くことができる。また、ミストキャッチャータ出口で水分凝縮等による白煙が顕著な場合には、塩洗浄塔(または熱風導入による減湿処理)で処理する。

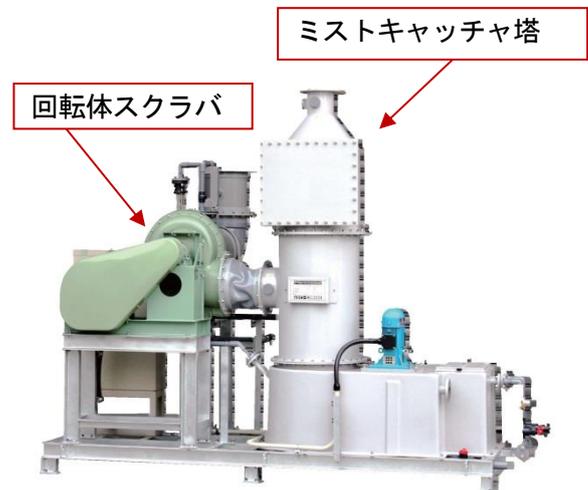


図3 回転体スクラバ外観

(2)特長

- ①送風機インペラに水噴霧することで、酸加熱により発生する酸ミスト白煙を大幅に低減。(弊社比5%ポイント性能アップ)
- ②排気ガス吸引、白煙除去を行うとともに同伴ガスも同時に処理。
- ③ファン内部構造の変更により高効率化。平均30%の消費動力低減(弊社比)
- ④ファンに常時散水しているため、粉塵混入によ

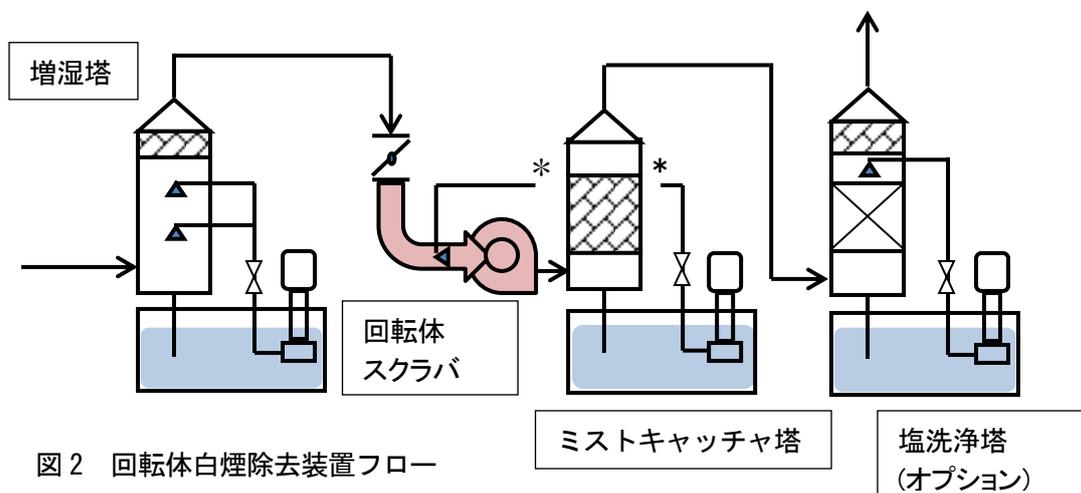


図2 回転体白煙除去装置フロー

る閉塞がない

⑤シンプルな構造なため、保守点検が容易。

(3)除去原理

増湿塔では発生源から導入された白煙を完全に白煙霧化(白煙粒子を大きくする)させ、回転体スクラバでは吸込コーン手前からインペラへ向かって散水することにより白煙粒子を除去する。ミストキャッチャータでは、散水液及び同伴ミストを捕集する。

回転体スクラバ内では、白煙は以下のプロセスで捕集される。捕集原理は、慣性作用である。

- ①インペラ手前で散水された水は、インペラに衝突し、主板に沿って移動し、インペラ外周にて微細な液滴が生成(一部主板衝突で微細化)。一方、白煙粒子は、ガス流れに沿って移動する。
- ②インペラから放出された微細液滴は、ケーシングに向かって移動するが、その間にガス流れに沿って移動する白煙粒子と衝突し、白煙粒子を捕捉する。
- ③白煙粒子を捕捉した液滴が、ケーシングに衝突し、ガスから除去される。

性能に最も影響する因子がインペラ周速度*(微細液滴径と液滴と白煙粒子の相対速度が除去効率に関与していると想定)であり、回転数を低くすると、性能も低下する。

また、オプションで設置する塩洗浄塔は、吸湿作用のある高濃度塩成分循環液と接触させ、微量な白煙粒子の廻りに付着している水分を除去するもので、さらに白煙は、目立たなくなる。

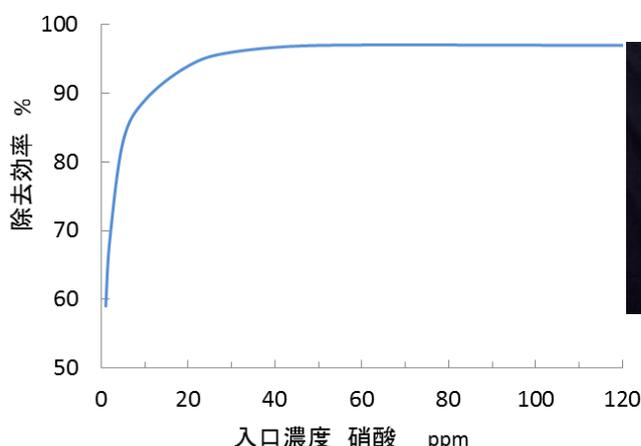


図 4 回転体スクラバにおける硝酸除去効率
測定法:等速吸引法+イオンクロマトグラフィ

(4)性能

硝酸白煙に対する回転体スクラバ性能傾向を図 4 に、白煙除去の状況を図 5 に示す。

白煙濃度が 30ppm 以下になると除去効率が低下する傾向がみられるが、30ppm 以上では 96~97%の高除去率を示す。また、硝酸出口白煙を目視確認した場合、発生源粒径、周囲の明るさや湿度等の環境因子によっても左右されるが、おおむね、2ppm 以上では白煙がはっきりと見え、1ppm 以下ではうっすらと見える、0.5ppm 以下では殆ど見えなくなる、という状況である。

次に、塩化アンモニウムの各粒径別の除去効率を測定し、回転体スクラバの限界粒子径を確認した(図 6)

塩化アンモニウムの平均粒子径は、 $0.7\mu\text{m}$ で全体の除去効率は 80%程度である。粒径が $1\mu\text{m}$ 以下になると除去効率も低くなる傾向がみられ、回転体白煙除去装置の限界除去粒径は $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度と推定される。

慣性衝突作用による捕集可能な粒子径は一般的に $1\sim 3\mu\text{m}$ が境界であることから、それ以下の粒子径に対しては捕集が困難である。このため、回転体にて処理可能な白煙は酸水溶液加熱蒸気白煙が対象となる。

ただし、水溶性のヒューム $1\mu\text{m}$ 程度に対しても 90%程度の除去が可能であること及び酸性ガスに対しても高除去率であることから、ガラス繊維製フィルタや 4 項の荷電式白煙除去のガス処理部としても有効である。

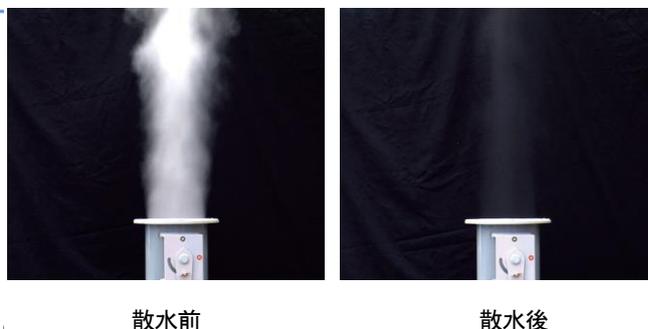


図 5 回転体スクラバ出口・散水前後比較例

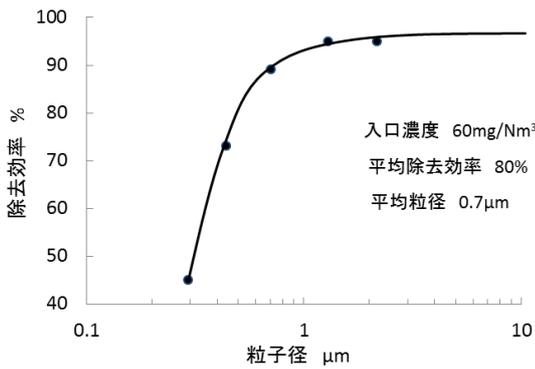


図6 塩化アンモニウムに対する粒径毎の除去効率
測定法：アンダーセンサンプラ

4. 荷電式白煙除去装置

回転体白煙除去装置が、酸ミスト白煙を大幅に低減するのに対し、完全に白煙を消失させる装置並びに水溶性ヒューム対応装置として、クーロン力*による白煙除去装置を開発中である。以下その装置の概要について紹介する。

(1)装置概要・構造

図7に装置フローを示す。

装置は、酸性ガスを除去するとともに増湿により白煙霧化するガス処理部と白煙粒子を荷電により捕集する荷電部から構成され、荷電部は①放電管②集塵極③整流器④シールファン⑤散水装置からなる。各部の働きは以下のとおりである。

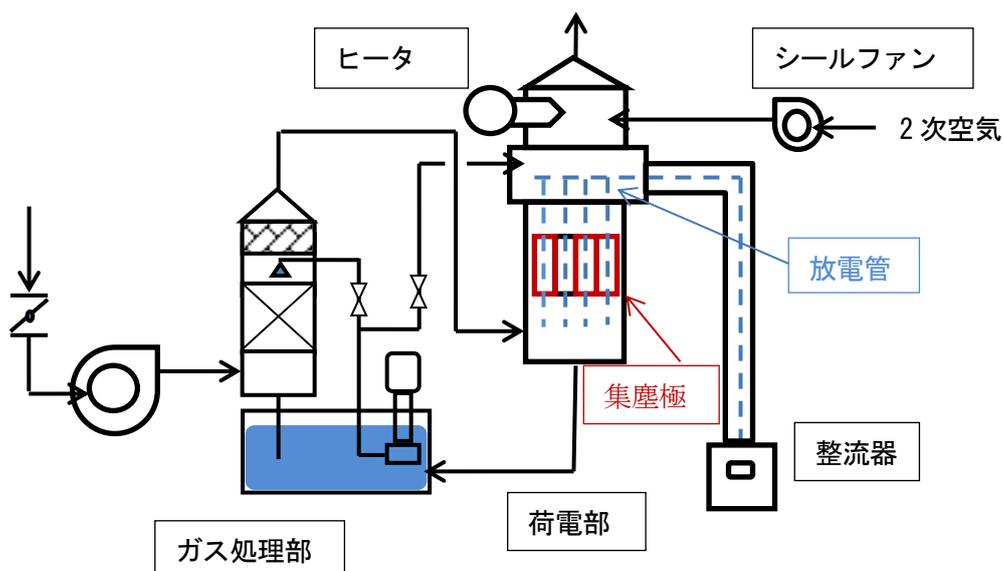


図7 荷電式白煙除去装置フロー

①放電管

パイプに針状の突起を有し強力なコロナ放電*を発生する。材質は、SUS316Lまたはチタン。

②集塵極

カーボン繊維により導電性を付与した FRP で製作した平板(抵抗率: $10^2 \sim 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$)。当社はセル構造を採用。負に帯電した白煙粒子を捕集する。

③整流器

交流電力を 30~40kV の直流高圧電圧に変換する装置。

④シールファン・ヒータ

放電管を支持する碍子を耐蝕的に保護するため、シールファンで空気を送り込む（ヒータは露点にならないように加熱する）。

⑤散水装置

集塵極内部を間欠的に散水し、白煙粒子を洗浄する。

(2)特長

①酸ミスト、水溶性ヒュームによる白煙を完全に消失させる。(高効率)

②低圧損

③消費電力が小さい。

④閉塞がないため、保守点検が容易。また、消耗品も特にならない。

⑤スクラバレブルの塔内風速を採用しているので設置スペースが小さい。

ランニングコストが低く、高性能であることが大きな特長である。

(3)原理

図8に白煙除去原理図を示す。

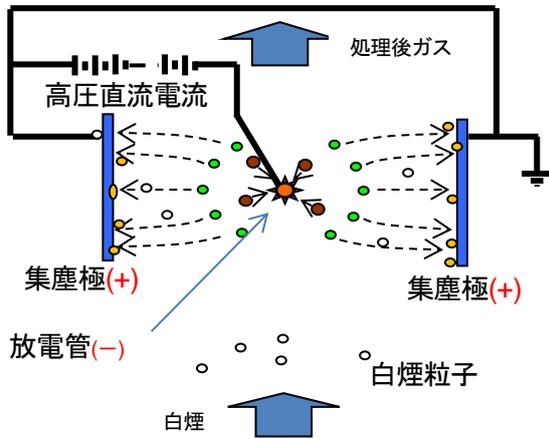


図8 荷電による白煙除去の原理図

白煙除去プロセスは以下のとおりである。

- ①放電管と集塵極間に3万~4万V高電圧をかけると放電極のまわりにコロナ放電*が起り正イオン(●)、負イオン(●)が発生。
- ②正イオンは、放電管側へ、負イオンは集塵極側に移動。
- ③集塵極間に白煙粒子が入ると、負イオンと衝突し荷電し(●)、集塵極側に分離捕集される。
- ④集塵極に捕集された白煙粒子は間欠散水により洗浄除去される。

一般的に除去効率 $\eta(\%)$ は、

$$\eta = 1 - e^{-VA/G} \quad (\text{Deutchの式})$$

V:分離速度(cm/s) A:有効集塵面積(cm^2/s)
G:処理風量(cm^3/sec)

で表される。

分離速度は、実質測定困難であるため、除去対象白煙に対して実験機で求める。対象白煙の見掛け電気抵抗率、比重、粒径分布、風速、荷電電圧等が関係する。

(4)性能

図9に荷電部における硝酸白煙の除去率を示す。低濃度になると、除去率が低下する傾向があるが、50ppm以上では除去率は96~98%を示し、いずれの場合も白煙は完全に消失した。

白煙粒子をイオン化し集塵するのが原理であるため、ガス処理は望めない。実際の装置では、ガス処理部と一体化する予定である。

一方、粒径毎の除去効率を確認するため、塩化アンモニウムの入口、出口の粒径分布を測定した(図10)。

0.4 μm 以上の白煙粒子は、出口側にほとんど検出されず、白煙も消失した。除去率は、98~99%を示し、水溶性ヒュームの除去も可能であることが分かった。

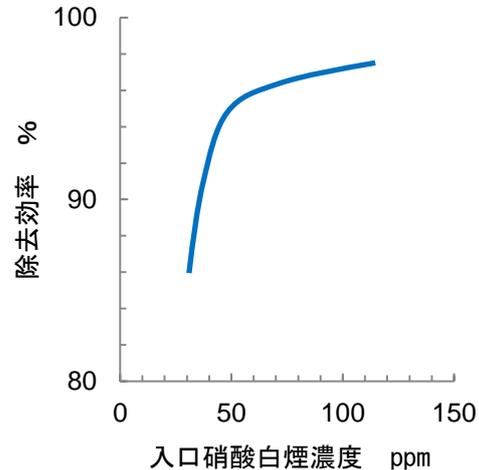


図9 荷電部による硝酸白煙除去率

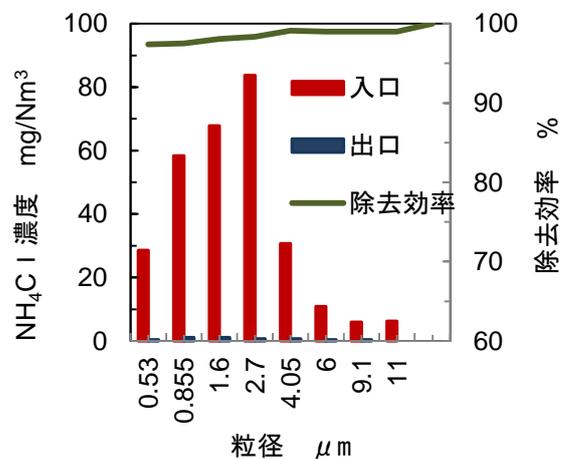


図10 塩化アンモニウム白煙の粒径分布と除去効率 C=320 mg/Nm^3
捕集法:カスケードインパクタ

5. おわりに

白煙除去は、企業にとって大気汚染していると誤解させないためにも必要な装置であるが、白煙粒子は微細なため、除去技術も特殊となり、コストが課題となっている。リーズナブルな装置、コストパフォーマンスの高い装置が望まれている。

当社は、今回紹介した回転体白煙除去装置と荷電式白煙除去装置の他にもガラス繊維製フィルタについても納入している（白煙の種類、発生源により、粒子径が異なるため、テスト機で白煙除去状況の確認をしていただくことも可能）。

白煙処理として最適な組み合わせを提供できれば幸いである。

用語説明

* ブラウン拡散作用

ブラウン運動とは、微粒子が流体の流線に沿った均質な運動を行わず、不規則に移動する現象をいうが、この程度に微粒子になると、高濃度域から低濃度域へ不規則に拡散していき、繊維等の障害物に付着捕集される。

* 周速度

回転している円板外周の速度

$$\text{周速度(m/s)} = \text{回転体円周(=直径(m)} \times 3.14) \\ \times \text{回転数 (min}^{-1}) \div 60$$

* クーロン力

電荷を帯びた二つの粒子間に働く力。＋，－同じ符号の電荷間には斥力、異符号間には引力。力は二つの粒子の電荷の積に比例し、粒子間の距離の二乗に反比例する。

* コロナ放電

尖った電極（針電極）の周りに不均一な電界が生じることにより起こる持続的な放電の総称。気体中にイオンを増加させる。この際、針電極周辺に認められる発光部をコロナと呼ぶ。

名称は放電で生じる発光が太陽のコロナと似ていることによる。コロナ放電によって流れる電流は小さく、数 μA 程度である。気体中にイオンを増加させる。（Wikipedia より）



高効率形ターボファンの大型化について

技術開発研究所 高梨 武

1. はじめに

近年の世界的な省エネルギー運動、CO₂ 排出量削減および 2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震による電力事情の切迫した事情などにより、省エネルギー活動は全世界で積極的に行われてきている。そのような社会情勢を受け、2011 年に高効率形ターボファン(以降 FTE 形と表記)を発売した。

FTE 形とは、インペラ形状を従来の等厚円弧形より翼形状に変更し、羽根出口高さ、吸い込み管長さの最適化により従来のターボファン(以降 FTF 形と表記)から 3~7%ポイント効率をアップしたもので、年々販売台数を増し、エンドユーザにも受け入れられつつある。要求される容量範囲で出荷台数が多い、#1.5~4 の大きさをカバーしているが、より大型の送風機をユーザが望んでいることも事実である。

図 1 に#1.5~#6 の FTE 形全体容量図を示す。

予想容量範囲ではあるが、#5 と#6 に相当する FTE501 と FTE601 を示している。風量が 1000m³/min 以下範囲は大部分カバーできるようになる。

本報では、製品大型化を踏まえて、比例則で #6 の高効率形送風機を試作し性能試験を行った結果について報告する。

2. CFD

高効率形ファンの開発で解析で使用した CFD ソルバー(プログラムソフト)は、ANSYS Inc. の Fluent 12.1 および 13.0 である。解析原理等は、他にも文献があるので本報では詳細な記載は行わないが、解析モデルの省略化についてのみ示す。目的は計算時間の短縮であり、ナットカバー、主軸、ケーシング部の詳細な面取り(R 部および C 部)などはメッシュが増加するだけで、マクロ量である静圧やトルク(軸動力)には大きな影響を与えないためである。計算は主

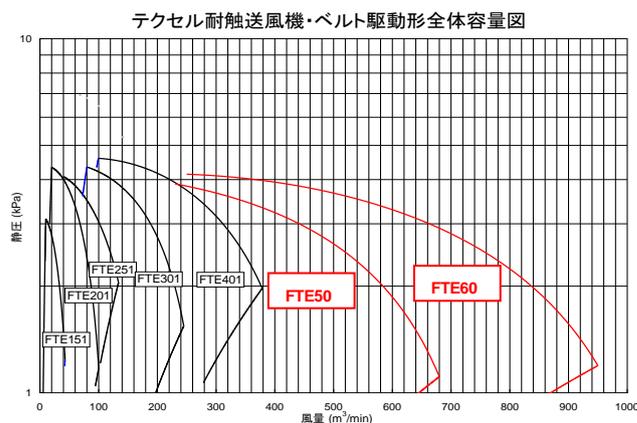


図 1 FTE 予想容量範囲

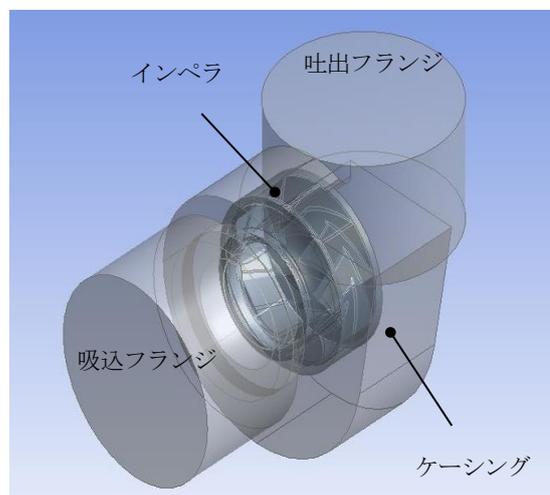


図 2 FTE601 形解析モデル

に定常(時間平均値)、境界層メッシュも作成していない。渦モデルは工業的解析で用いられる Standard k-ε モデルで、計算時間が必要な詳細なモデルは、形状決定後に行った。

三次元形状の生成は、ダッソーシステムズ社の 3D CAD SolidWorks にて作成し、中間ファイルは ISO 10303 による step ファイルを用いた。

中間ファイルは ANSYS Inc. の Design Modeler に読み込まれ、非常に短いエッジ（線）や面積の小さいフェイス（面）を他のエッジやフェイスとマージ(融合)することで、それらの微小エンティティを除外している。微小エンティティ(データのまとまり)が存在したままでメッシュを生成すると微小エンティティに基づくサイズでメッシュが生成されてしまい、メッシュ数と計算時間の増加につながるためである。

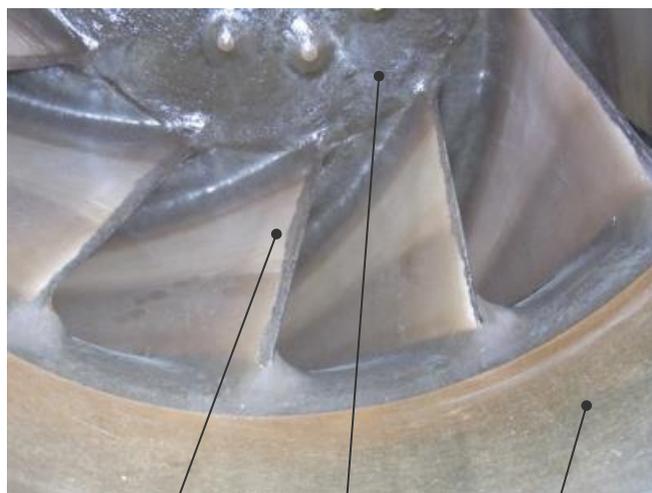
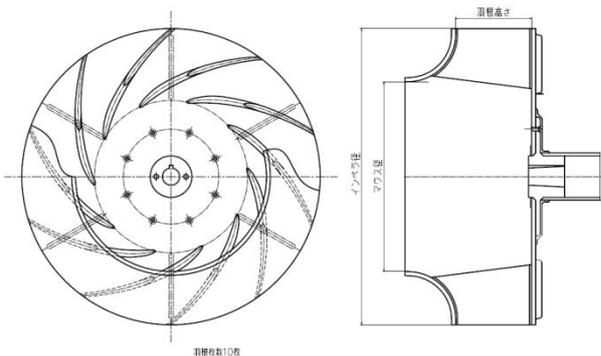
図 2 に FTE601 形の三次元モデルを示す。

ケーシングは形状を簡略化しており、境界面の逆流防止と自由流入に近い条件にするために本来の吸込と吐出フランジを大きくしたモデルを作成した。

3. 試作機

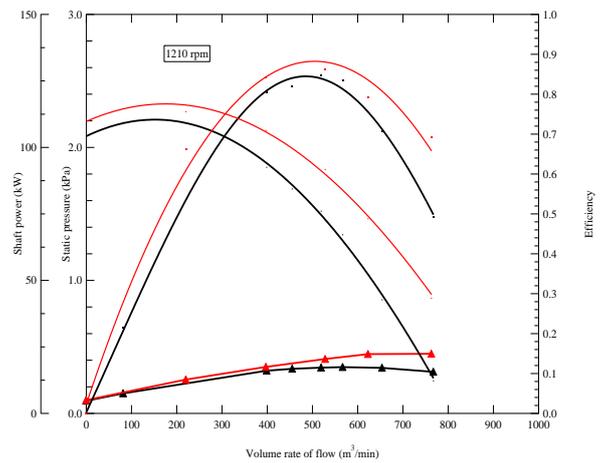
3.1 インペラ

現行の FTE 形の開発にてインペラブレードの基本形状は決定しているので、本試作機ではその形状を踏襲した。現行の FTE は #4 までであり、本開発の対象は #5~#8 となっているので、中間の #6 インペラを試作した。なお、インペラ写真を図 3 に示す。



インペラブレード 主板 側板

図 3 インペラ図面と近影



赤色 : FTE601 試作機
黒色 : FTF603 (現行機)

図 4 FTE601 試作機と現行機の性能比較



(a) 吸込側: 吸込ノズル (FRP 製)



(b) 吐出側 (モータ側から撮影)

図 5 性能測定風景

3.2 ケーシング

他のFTE形と同様にケーシングの渦室自体はFTFⅢ形と同一である。羽根高さがFTFⅢ形とは異なるので、ケーシングに関してもFTF603形の吸込管の細部寸法を調整して組み立てている。

4. 性能試験

本試作モデルの性能試験結果を図4に示す。

性能試験はJIS B8330の吸込ノズル性能試験に準拠した方法を用いた。図5に示す圧力計と差圧計はデジタル表示型、回転計は光電式回転検出器およびクランプ型デジタル電力計を用いた。気温による密度変化もJISに従い、換算している。グラフの横軸は風量、縦第1軸と第2軸はそれぞれ静圧と軸動力、右軸は全圧効率を示す。風量-静圧特性は、現行機と比べ、全風量域にわたって改善しており、全圧効率も3%ポイント程度向上し、約87%となった(最高効率点)。現行機FTF603の全圧効率が最高効率において80%を超えているため、大きな効率上昇が望めない領域になっているが、小型送風機と比較すると軸動力が非常に大きく、パーセントポイントでは小さな改善でも、実際の省エネ効果は非常に大きい。

5. 省エネ効果試算

5.1 電力消費量改善

送風機の効率差が最大になる、最高効率点において電力量を試算した。電力削減量の計算条件は8時間/日、20日/1ヶ月で1年間運転とし、電力量は¥17/kWh、モータ効率は90%(国内メーカー製22kW三相誘導電動機のテストレポートより)、力率は1.0と仮定し、仕様点を風量500m³/min×静圧1.5kPaとした場合である。

省エネ効果を試算した結果を図6に示す。横軸と縦軸はそれぞれ使用年数と電力料金の省エネ効果である。本試験で用いた大型送風機は軸動力の絶対値が大きいため、効率のポイント改善値は小さいが、軸動力の改善量が大きくなる。

また、現行機種種のFTF603形と本試験モデルのFTE601形では、回転数がそれぞれ1210rpmと1120rpm、軸動力が19.6kWと16.5kWになる。回転数低減に伴う、軸動力が低減する効果も非常に大きい。

計算の結果、一年あたり約¥112,000の省エネ効果が得られた。

5.2 CO₂ 排出削減効果

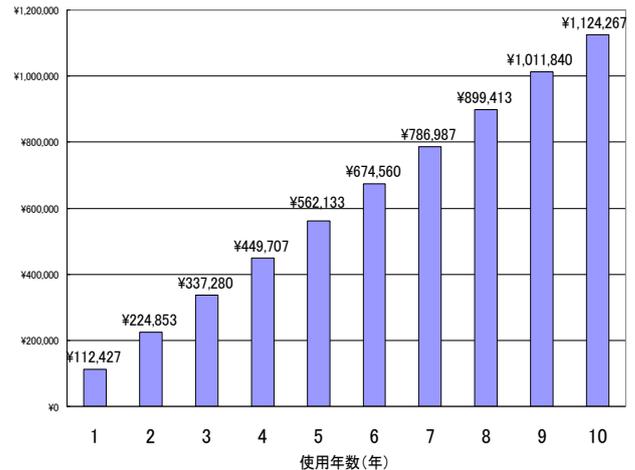


図6 使用年数と省エネ効果(現行機から高効率形ファンに変更した場合の電力コスト低減)

CO₂ 排出削減効果も試算した。算出に用いた係数を0.406kg-CO₂/kWh(全電源平均:2012年度東京電力環境指標実績報告より)とすると、削減は約45600kg/年となり、CO₂に関しても大きな削減効果が望める。

6. まとめ

本試作機の試験結果からえられた内容を列記する。

- ① 比例形状により、#6の試作インペラと吸込管を作成し、性能試験を行った。
- ② 大型の#6の試作インペラにおいても小・中型と同様に風量、静圧および効率特性が改善した。
- ③ 全圧効率の改善量は3%ポイント程度である。
- ④ 省エネおよびCO₂排出量削減効果が認められた。

相似形状ではあるが、当社製品としては大型の#6インペラおよびケーシングを改良することで特性を改善することができた。

今後の課題として本試作機程度の大きさのインペラブレードは生産技術的な問題があり、それらを克服して販売に結び付ける予定である。

超音波による FRP 劣化診断 第 2 報

廃塩酸タンクの診断事例

技術開発研究所 杉本 健一

1. 緒言

産業用途に使用されるすべての機器類は、収益性や安全性の観点からも適切な保守点検が実施されることが望ましい。製品や部品の使用期限、寿命が外観検査や機能検査において明確でない場合は、可能な限り客観的な該非判定により保守されなければならない。

酸やアルカリといった腐食性薬液にも耐え得る耐食機器は過酷な使用環境に曝されている。しかしながら、その腐食の進行が極めて緩慢であるが故に、腐食の程度や残存寿命を判定することが非常に困難である事が保全の観点において問題となっている。特に、大量の薬液を使用する化学工場や鉄鋼工場には膨大な数量の FRP 製薬液貯留タンクが設置されている。それらの一部は設置後 20 年以上が経過しているものが少なくなく、突発的な薬液の漏えい事故や天井を踏み抜いて転落死する事故¹⁾も少なからず生じている。したがって、耐食 FRP タンクの腐食の程度、残存強度等を客観的に評価できる手法に対する潜在的ニーズは強いと思われる。

既報²⁾においては、非破壊検査手法である超音波探傷の原理や廃棄された FRP 製羽根車、タンクに関する評価事例を紹介した。続報となる本報においては、3 種類の塩酸系タンクについてより詳細に検討したデータについて報告する。

2. 薬液貯留タンク仕様

表 1 に 3 基の薬液タンクの仕様を示す。2 基は 35%塩酸の貯蔵に供しており、23 年使用されたタンクを HCl-A、17 年使用されたタンクを HCl-B と称する。HCl-C は廃酸と考えられる塩化アルミを 40°C にて 25 年間貯蔵し続けたタンクである。

表 1 薬液貯留タンクの仕様

識別記号	薬液	温度	使用年数
HCl-A	塩酸	常温	23 年
HCl-B	塩酸	常温	17 年
HCl-C	塩化アルミ	約 40°C	25 年

薬液を貯蔵するタンクにおいては、日中は太陽光に曝される天井部、液面の変動によって接液条件が異なる側面上部、常時薬液に接触し、薬液重量が大きく作用する側面下部、常時接液のみとなる底部という具合に、部位によって腐食・荷重条件が大きく異なっている。そこで、代表的に 4 箇所のサンプルを切り出し、FRP 劣化診断を実施した。

3. 外観

図 1 に HCl-B における天板、側面上、側面下、底板の接液面側の外観写真を示す。接液面の外観は、底板が褐色化している以外、いずれも黒褐色を呈している。天板以外は表面の光沢が見られるが、天板は光沢が消失して無数のひび割れが生じている。常時接液となる側面下部においては、大小さまざまなブリスト（水ぶくれ）が多数生じている。

図 2 には HCl-C における天板、側面上、側面下、底板の接液面側の外観写真を示す。当タンクの使用期間は 25 年と非常に長い、廃酸であるために塩酸としての濃度は低いと考えられる。そのため、図 1 の HCl-B と比較すると劣化の程度は低いと推察される。常時接液である側面下や底面は鮮緑色を呈する塩酸特有の変色である。これは HCl-B のような外観の前駆段階として捉えることができる。

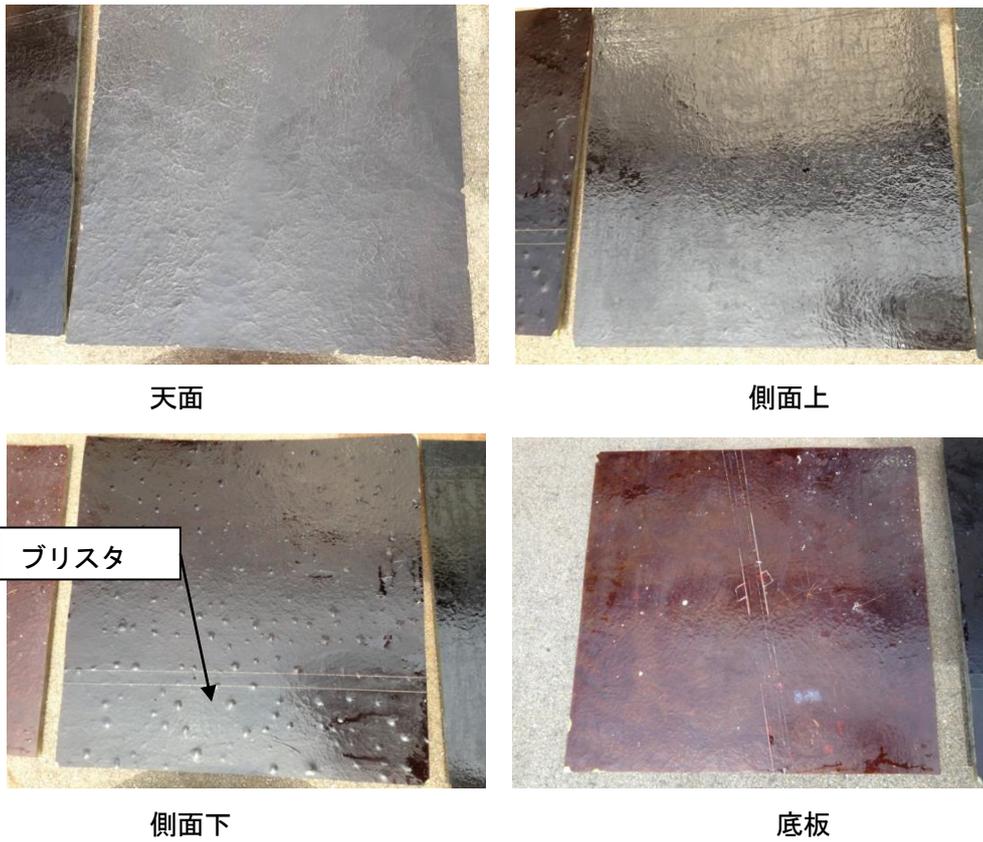


図1 HCl-B タンク接液面の外観写真

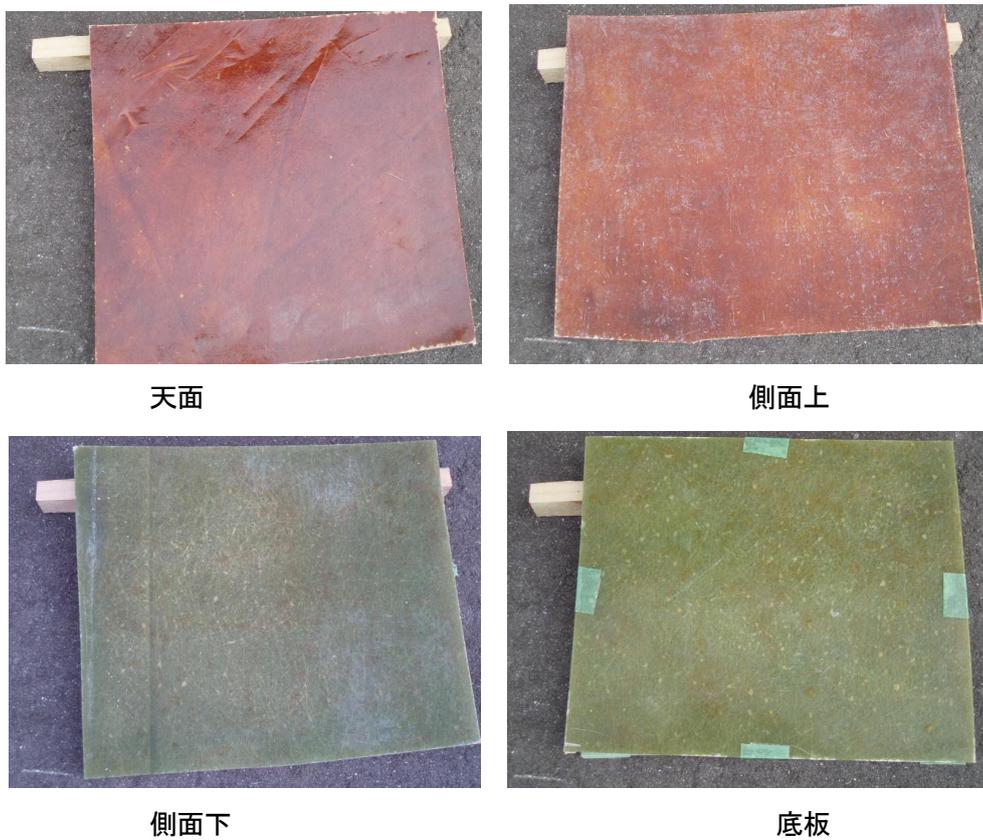


図2 HCl-C タンク接液面の外観写真

HCl-A、B については図 3 に示すように、カットサンプルの断面から、常時浸透した塩酸がしみ出しており、塩酸の強い浸透性が確認できる。

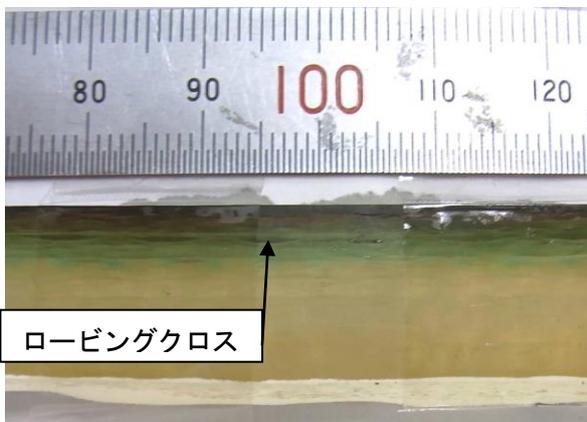
HCl-A カットサンプルの天板と側面下の断面写真を図 4 に示す。接液面から 2mm~5mm の範囲が黒褐色を示し、その直下領域は鮮緑色を示していることがわかる。これは図 2 中の側面下や底板で見られる様相と同様であり、FRP の劣化の初期段階として鮮緑色に変色することは経験的に知られている。その劣化の進行によって FRP は底板に見られるような褐色、他部位表面で見られる黒褐色への外観変化が追認できる事例である。



図 3 断面からしみ出す塩酸



天板断面



側面下断面

図 4 HCl-A カットサンプル断面

図 4 中に示す黒褐色の領域は、耐食 FRP における耐食層と対応しており、黒褐色層の直下には強化層を構成するロービングクロスが確認された。図 5 に示すカットサンプルは、HCl-B における天板である。耐食層と強化層がロービングクロス層を境界にして完全にはく離している。長期間のタンクの使用において、塩酸は徐々に FRP の表面から耐食層を板厚方向に浸透する。この塩酸の浸透がロービングクロス層で大きく遮断され、図 6 に示すように、主としてロービングクロスの連続ガラス繊維に沿って面内方向に浸透したことによる現象であると考えられる。



HCl-B 天板カットサンプル



ロービングクロスではく離した様子
(腐食で形状が保持出来ていないガラス繊維)

図 5 HCl-B 天板の状態

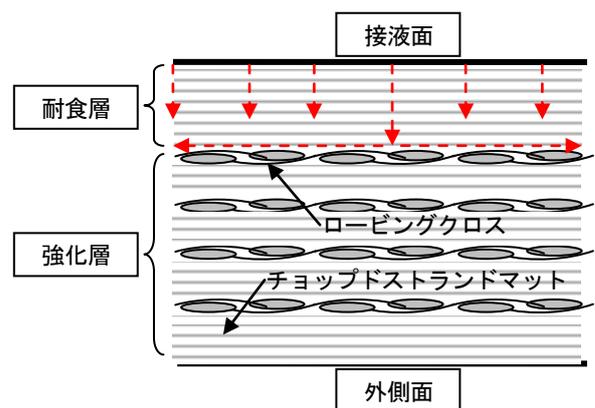


図 6 FRP 表面からの塩酸浸透の模式図

尚、図 5 に示すロービングクロスはガラス繊維が完全に腐食しており、はく離する際にガラス繊維が容易に破断していた。FRP 用の汎用ガラス繊維は大部分が E ガラスと呼ばれるものであるが、

E ガラスは酸に対して腐食する。したがって、本タンクに使用されていた（少なくともロービングクロスにおける）ガラス繊維はE ガラスであると考えられる。

ロービングクロスは FRP の機械的強度、剛性を発現するための必須基材であるが、この程度に腐食していれば、本来の機械的特性は期待できないと考えられる。

4. パーコル硬度³⁾

パーコル硬度とは FRP の物性値の一つであり、成形後の樹脂の硬化度合や健全性といった品質評価の一手法としても適用される。樹脂は分子が3次的に架橋した構造をしており、健全な状態から腐食によって分子結合が切断される事によって硬度が低下すると考えられている。JIS K7012³⁾においては、このパーコル硬度は 30 以上であることが求められている。因みに新品の FRP の場合、パーコル硬度は 40~50 を示す。

図 7 に HCl-B タンクのパーコル硬度を示す。比較のため、タンクの接液面側（型面）からの測定結果と外側（外面）からの測定結果を併せて示す。測定方法は、サンプル表面をランダムに 10 点抽出し、型式 A として測定した。全体の傾向として、外面は型面と比較して硬度が大きくなった。これは外面が型面と比較して劣化の度合いが小さいことを示唆するものである。

接液面側について、外観上からも劣化が著しい天板は、20~40 の範囲を示した。上板は最もばらつきが大きく、下限で 20 未満、上限で 40 以上を示した。下板は 40 前後の値を示し、底板は 30~40 の範囲を示した。部位ごとの傾向としては、天板や上板の硬度が低く、劣化が進行していると推定できる。

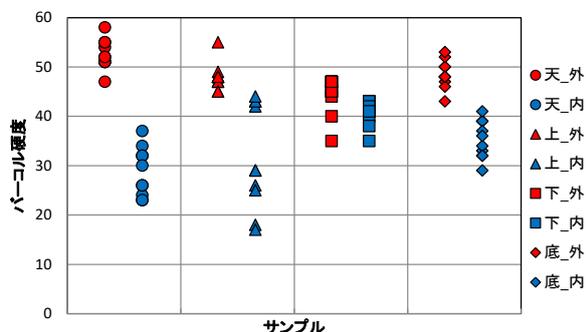


図 7 HCl-B のパーコル硬度

3. 超音波エコー

超音波エコーおよび引張強度を評価するには、

比較対象としてのブランク相当材が必要である。そこで、タンクから約 2 cm 四方に切り出したサンプルを 700°C~800°C の高温雰囲気中で樹脂を焼成した。次に残ったガラス繊維を 1 枚ずつ剥がす事により積層構成を同定し、タンク材と同等材料を製作した。

図 8 に HCl-A の側面上部サンプルにおいて超音波測定により得られた超音波エコーと測定面からの距離の関係を示す。超音波は材料中のロービングクロス層で反射することでピークを示し、板厚に相当距離（底面と称する）でもピークを示す。図 9~11 にそれぞれ HCl-A、B、C タンクにおける各サンプルの超音波エコーの底面ピーク強度と板厚の関係を示す。それぞれの部位についてランダムに 20 か所を測定した。

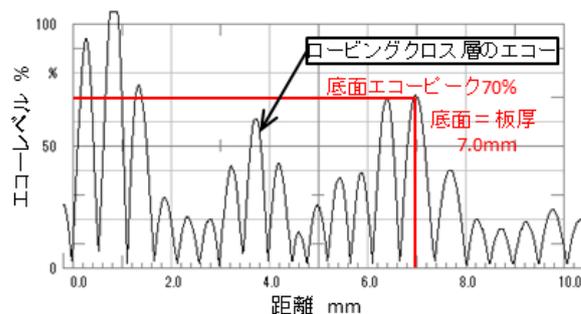


図 8 超音波エコー

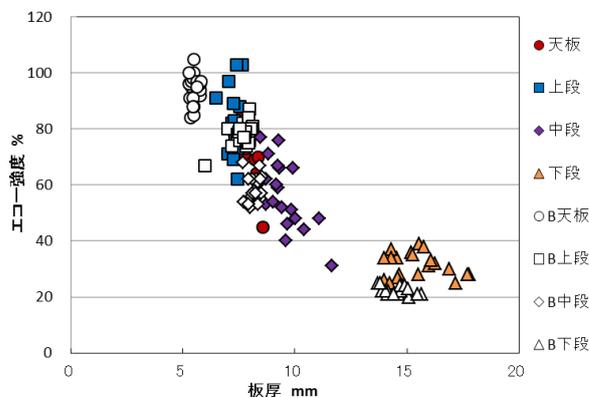


図 9 HCl-A のエコー強度と板厚の関係

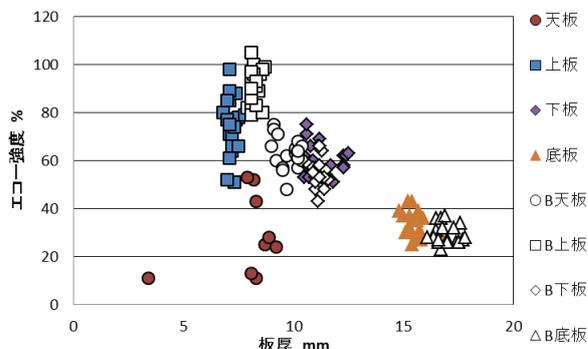


図 10 HCl-B のエコー強度と板厚の関係

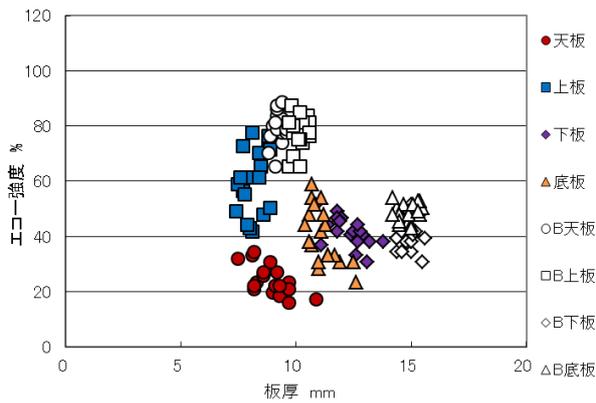


図 11 HCl-B のエコー強度と板厚の関係

超音波エコー、板厚はともに均一ではなく一定の分布を示した。特にエコーについてはタンク材、ブランク材ともばらつきが大きい傾向を示した。全体としては板厚が増加するほどエコーが低下するが、これは超音波が透過距離の増加にしたがって減衰するためである。

各タンクについてブランク材と比較すると、いずれのタンクにおいても天板についてはブランク材がタンク材と比較して高いエコーを示した。HCl-A について、天板以外はいずれもタンク材がブランク材よりも高いエコーを示した。一方、HCl-B については、側面上においてタンク材とブランク材がほぼ同等のエコーを示し、側面下と底板についてはタンク材の方が高いエコーを示した。HCl-C の場合、側面上においてもブランク材が高いエコーを示し、側面下と底板についてはタンク材の方が高いエコーを示した。

4. 引張強度

各タンクのそれぞれの部位における引張強度保持率（タンク材引張強度÷ブランク材引張強度×100）を図 12 に示す。強度保持率としては、いずれのタンクも天板が最も低く、ブランク材と比較して 40%～60%の値を示した。このことから、塩酸系タンクについては接液でない天板の強度低下が他の部位と比較して顕著に大きい事がわかった。

これまでの実験では、劣化の度合いに応じて超音波エコーは低下する傾向が得られているが、今回のサンプルの場合、引張強度は確実に低下しているのに、超音波エコーはタンク材が高くなる傾向を示した。塩酸による FRP の劣化は、図 2～5 に示すように、強い浸透性によって板厚方向における接液面近傍を緩やかに腐食させ、同時に表面樹脂を加水分解により劣化させているものと考え

られ、浸透した塩酸は、表面層の直下で滞留することで、特に常時接液となる部位においては局所的な内圧上昇によりブリスタを生じさせる。また、浸透した塩酸は繊維と樹脂の界面をはく離させながら、毛管現象的に界面に沿って浸透していくものと考えられる。この結果、FRP 内部では繊維と樹脂の接着性も損なわれることで微小な隙間を生じた状態となり、透過する超音波が散乱することによって、本来であればエコーは劣化度合いに比例して低下するのにも、浸透した塩酸がはく離した界面に存在することによって超音波の媒質として作用し、見かけのエコーが高くなったと考えられる。

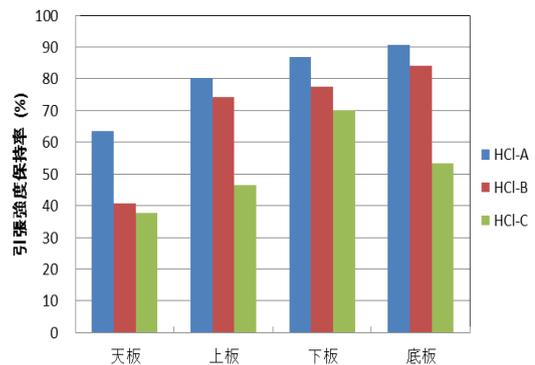


図 12 各タンクの引張強度保持率

5. 超音波エコーと引張強度の関係

超音波エコーと引張強度からそれぞれのタンク材に対するブランク材の比率を求めた、引張強度保持率とエコー強度比の関係を図 13 に示す。

タンクの部位によって引張強度や超音波エコーは様々な値を示すが、全体としては一定の相関性が示された。これは、超音波エコーを計測する事によって、引張強度が推定できることを示唆するものである。

現時点においてはタンク 3 基分のデータのみであるが、データが増加する程に信頼性の向上が期待される。

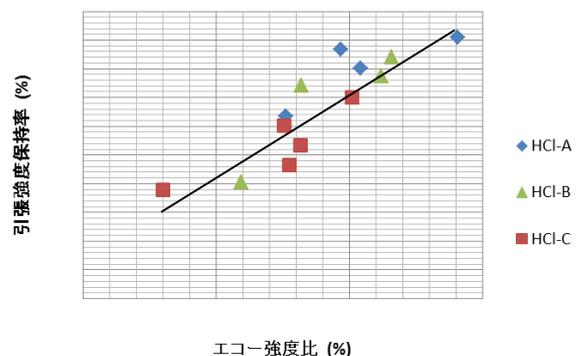


図 13 引張強度保持率とエコー強度比の関係

6. 結 言

本報では、長期間の使用に供した3種類の塩酸系タンクについて、部位毎の外観の目視観察、超音波エコーや引張強度等を評価した。その結果得られた知見を以下に示す。

- 常時接液でない天板の劣化の進行速度が他の部位と比較して速い。
- 常時接液、且つ薬液重量により負荷が大きい側面下部には接液面にブリスタが生じる。
- 長期間の使用により接液面は黒褐色に変化し、浸透した塩酸により板厚方向にも変色している。
- 超音波エコーは劣化が顕著である天板において低下するが、その他の部位はブランク材よりも高いエコーを示す。
- 引張強度はいずれの部位もブランク材と比較して低下しているが、特に天板の強度低下が著しい。
- 引張強度保持率と超音波エコー強度比の間には一定の相関関係が見られた。

(参考文献)

- 1)酒井哲也, 大野 茂, 久保内昌敏, 津田 健; FRP 製塩酸貯蔵用タンクの腐食事故解析, 第39回(平成18年度)日本大学生産工学部学術講演会マネジメント部会講演概要, pp.17-18 (2006.12.2@日大生産工学部)
- 2)杉本健一; 超音波を用いたFRPの劣化診断事例, TEXEL 技報, Vol.1 (2012) .
- 3)JIS K7060, ガラス繊維強化プラスチックのバーコル硬さ試験方法, 日本工業規格(1995) .