

TEXEL 技報

Vol.1 2012.05

 **セイコー化工機株式会社**
技術開発研究所

MER形ポンプの高効率化について

ポンプ事業部 設計課 岡田 守央

1. はじめに

我が国では、これまでポンプ、送風機等の産業回転機械は、主としてインバータ技術を活用して省エネが図られていたが、電動機、回転機械自体の高効率化はあまり進んでいなかった。しかし、地球温暖化、さらには原子力発電所の停止による電力不足が深刻な問題となった現状では、電動機、流体解析による回転機械自体の高効率化を図る動きが活発化している。

当社においても主力製品であるMER形マグネットポンプについて、インペラの緒元を変更し効率改善並びに吐出量改善を検討した。その結果、最高効率が18%アップ、吐出量は2倍に改善された。

本報は、効率、吐出量改善するための試験結果についてまとめたものである。

2. 実験方法

MER形ポンプは、当社の主力製品として年間約1000台の納入実績がある。1986年発売以来、この25年間、性能面での大きなマイナーチェンジを経ず、現在に至っている。



図-1 MER形ポンプ外観

今回、MER050のインペラの主に羽根出口角度を約20~30度で変化させたType-A~Dの4種の試作インペラで性能を測定し、その中で最も効率の高かった試作インペラをベースとし、インペラ径、入口高さ、出口高さを再検討したType-E~G3種の試作インペラでの性能測定で、不足している吐出量を改善する試みを行った。

現行のポンプ性能が、200L/min×25mであるのに対し、目標性能は、吐出量を2倍とした400L/min×25m(50Hz・2900min⁻¹)である。

3. 実験結果&考察

3.1 効率改善

Type-A~Dについての最高効率点における性能試験データを表-1に示す。

表-1 最高効率点 性能試験データ (1) 50Hz

Type	吐出量 L/min	全揚程 m	軸動力 kW	効率 %
MER-050	291.6	23.7	1.93	58.5
Type-A	282.5	25.6	1.96	60.2
Type-B	290.2	28.3	2.1	63.8
Type-C	285.4	27.5	1.97	65.0
Type-D	260.8	23.2	1.74	56.9

Type-C 試作インペラが最も効率が良く、羽根出口角度を最適化することにより58.5%から65%と一定の効率改善できることを確認した。これは、別途、CFD (Computational Fluid Dynamics : 数値流体力学)による性能予測結果とほぼ一致した。(図-2)

尚、“H”・“L”・“E”はそれぞれ吐出量に対する「全揚程」「軸動力」「効率」であり、青は実測値、赤はCFDによる解析結果である。

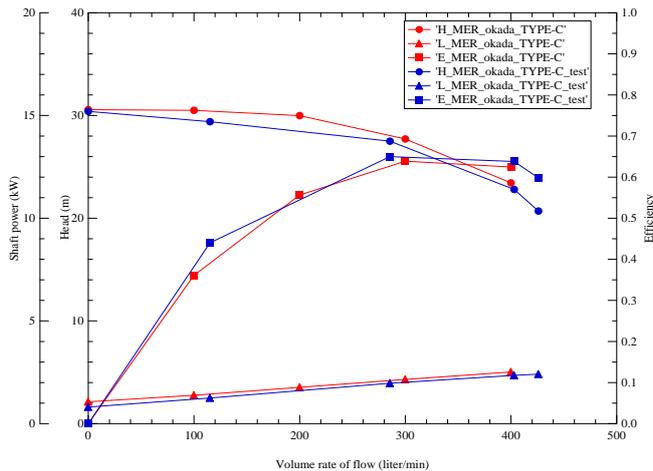


図-2 Type-C 実測値と CFD 性能予測結果比較

3.2 吐出量改善

最も効率の良かった Type-C をベースにインペラ径、入口高さ、出口高さを検討し吐出量の改善を試みた。Type-E~G は、従来 MER に対して、インペラ径(φ153)で 3%、出口高さを 50%大きくし、主に入口高さを約 20~40%変化させたものである。

表-2 最高効率点 性能試験データ (2) 50Hz

Type	吐出量 L/min	全揚程 m	軸動力 kW	効率 %
MER-050	291.6	23.7	1.93	58.5
Type-E	405.2	28.8	2.81	68.0
Type-F	405.0	28.9	2.84	67.3
Type-G	404.2	28.6	2.79	67.7

3種の試作インペラとも吐出量は2倍となり、目標性能(400L/min × 25m)を満足した。またさらに最高効率も 58.5 から 68%とアップし約 16% (9.5ポイント)効率改善した。出口高さも効率アップにかなり寄与していると考えられる。

Type-F での実測値と CFD 性能予測結果の比較を図-3に示す。

実測値と性能予測結果には、若干の差が認められるが、傾向は一致している。試作機による最終検証は必要であるが、その過程において CFD を用いた性能予測を用いることは、今後の効率改善検討に有用であることが確認できた。

3.3 インペラカット時の性能・効率

インペラカットを行った場合、ケーシングの形状は変化しないので、本来の設計条件から外れる

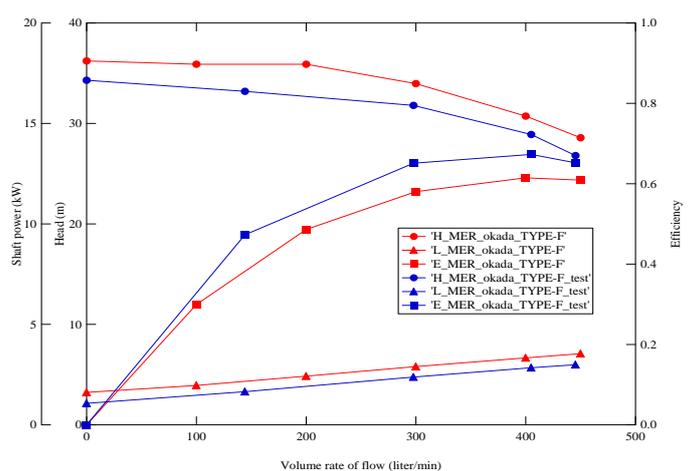


図-3 Type-F 実測値と CFD 性能予測結果比較

ことになり、これによってポンプの効率も低下する。インペラ径による性能・効率変化を製品化インペラで実測した。

インペラ径は、50Hz : φ153・φ140・φ130・φ120・φ110・φ100・φ90 の7種類、60Hz : φ140・φ130・φ120・φ110・φ100・φ90・φ80 の7種類である。50Hzの結果をまとめたものを図-4に、60Hzの結果をまとめたものを図-5に示す。

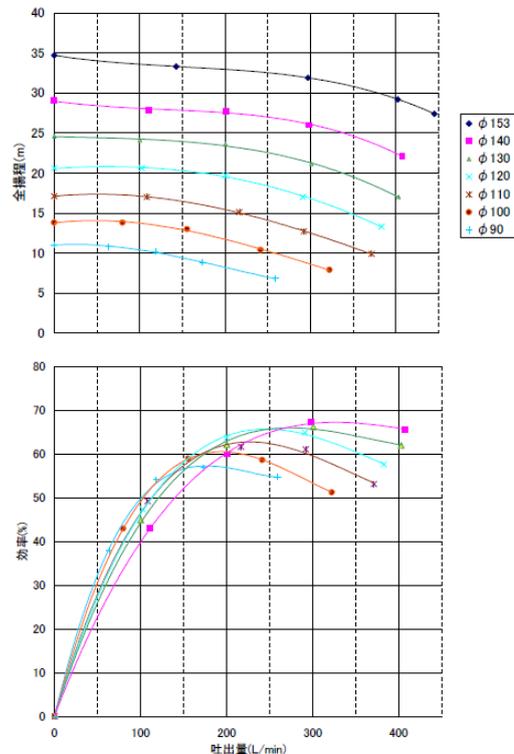


図-4 インペラカット時の性能・効率 50Hz

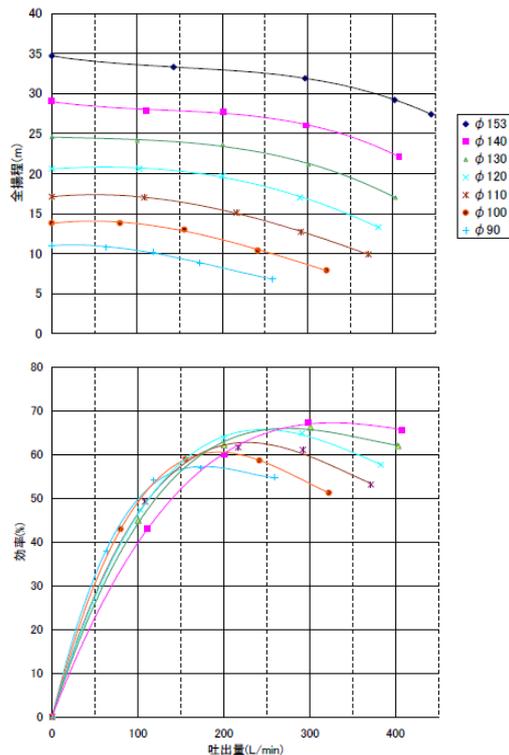


図-5 インペラカット時の性能・効率 60Hz

製品化インペラの効率は、最終的に従来の18%アップであることを確認した。また、インペラカットにより効率は低下するが、最小のインペラ径でも最高効率は53%を維持した。

4. 高効率 MER 形の特徴

実験結果を基に高効率MER形として上市した。

本製品は、主要材質が、ケーシング/PVDF(又はETFE)+FCD450、インペラ/PVDF (又はETFE) の完全無漏洩マグネットポンプである。

図-6 に高効率 MER 形容量表を示す。

従来の MER 形と完全互換性を有し、インペラ交換のみで省エネ化が実現できるのが、大きな特徴であり、従来より性能範囲が拡大、最大3.7kWまでの電動機を搭載できる。

5. おわりに

MER 形の羽根出口角度、出口高さを最適化をすることによって、18%の効率改善が可能であることが確認できた。本高効率MER形は、従来のMERのインペラを交換するだけで省エネ化が実現できる。

今後、他機種についても CFD 解析を用いた流

れの改善(インペラ形状の変更)、三次元翼一体成形インペラの導入により高効率化を検討していく予定である。当社の製品が省エネ化の推進に貢献できれば、幸いである。

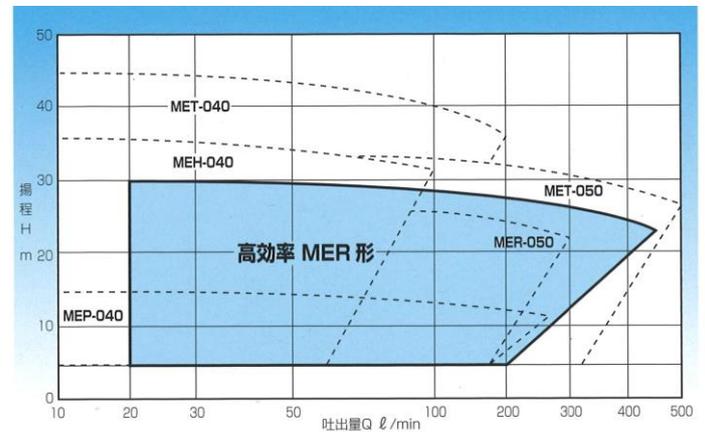


図-6 高効率 MER 形 容量図

高効率 FTE 形ターボファンの開発

技術開発研究所

高梨 武

1. はじめに

今日では世界的に CO₂ 排出量削減および省エネルギー運動がさげばれ、大部分の民生用家電製品や乗用車などで省エネルギー製品の購買が一般消費者の間でも進んでいる。これは一般消費者だけの傾向ではなく、工業用製品でもモータなどの分野では、規格なども制定され、高効率製品への切替が進んでいる。送風機に関しては高効率化に関する規格などは制定されていないが、付加価値として顧客へのアピールが可能である。

本報告で説明する FTE 形ターボファンはインペラブレード形状を翼形状に変更し、羽根出口高さを変え、吸込管長さの最適化により、機種によって異なるが従来の FTF 形ターボファンと比較して 3~7 ポイント程度 (約 5~10%) の効率上昇が得られた。インペラ以外のほとんどの部品は互換性があり、コストアップも最小限に抑えている。

一般に高効率化の手法はインペラおよびケーシングなどの流体力学的効率の改善、機械的損失の減少等がある。これらの中では、送風機本体に関連する流体力学的形状の最適化による高効率化を検討する。現在は CFD と呼ばれる流体解析ソフトが使用でき、試作回数と試作機製作にかかる時間を大幅に削減できる。

本報は、高効率化の概要について報告する。

2. CFD について

解析で使用した CFD ソルバーは商用の汎用ソルバーで、三次元形状の生成は 3D CAD にて作成し、中間ファイルは iges もしくは step ファイルを用いている。中間ファイルはメッシュャーに読み込まれ、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 (データのまとまり) を除外している。計算例として、図 1 にメッシュとインペラ表面の静圧分布を示す。

メッシュとは、コンピューターで数値計算する際にデータをとる最小単位のことである。

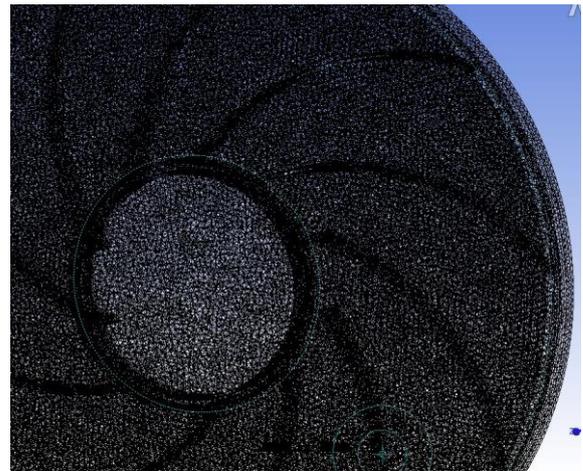


図 1 インペラメッシュ

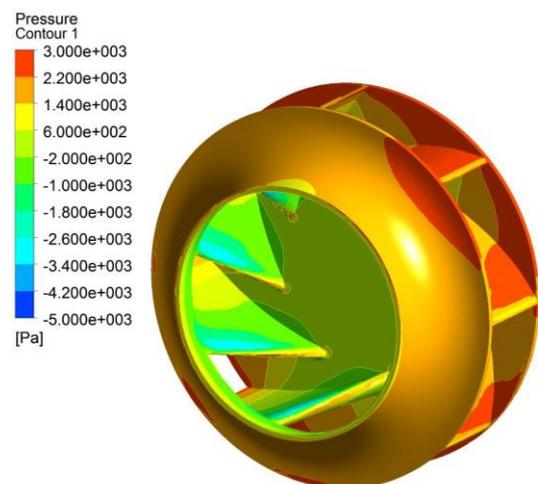


図 2 インペラ表面の静圧分布

3. 形状の最適化

3.1 翼形状(Airfoil)ブレード

羽根形状が曲率を持った等厚の形状より性能面で有利なエアフォイルブレードの検討を行った。古典的なエアフォイルは NACA (現 NASA)、Göttingen および Clark Y などがあり、開発においては NACA と Clark Y 翼形状を参考に当該送風機に最適になるよう、形状を調整した。

図 3 に翼形状インペラの一例を示す。断面の形状が翼形状をしていることが確認できる。羽根中心線を基準として用いた速度三角形を考慮し、最適化を進めた。

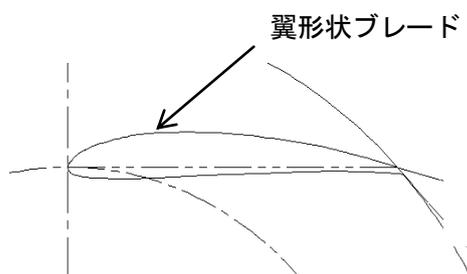


図 3 翼形状インペラ断面 (概念図)

3.2 ケーシング吸込管

ケーシングはインペラと同様に、性能に大きな影響を与える。高効率 FTE 形送風機では従来 FTF 形との互換性などを保持するために、渦室形状・容量の変更は行わなかった。互換性を維持したまま性能を向上させる方法として、吸込管長さの最適化を行った。最適化はインペラブレードと同様に CFD を用いた。

4. 性能測定結果

インペラブレードとケーシング吸込管を最適化したエアフォイルファン試作機と従来 FTF 形の比較を図 4 に示す。共にインペラ径は $\phi 315$ である。

風量-静圧特性は締切風量以外の領域で大きく改善されている。また、効率も全域で改善され、最高効率点で約 6 ポイントの改善(10%アップ)を達成した。実際に本開発の高効率ファンを使用する際には、風量-静圧特性が改善されているので、同一の風量と静圧仕様の場合は回転数を低下させることができるので、消費電力のみではなく、騒音も減少させることができる。

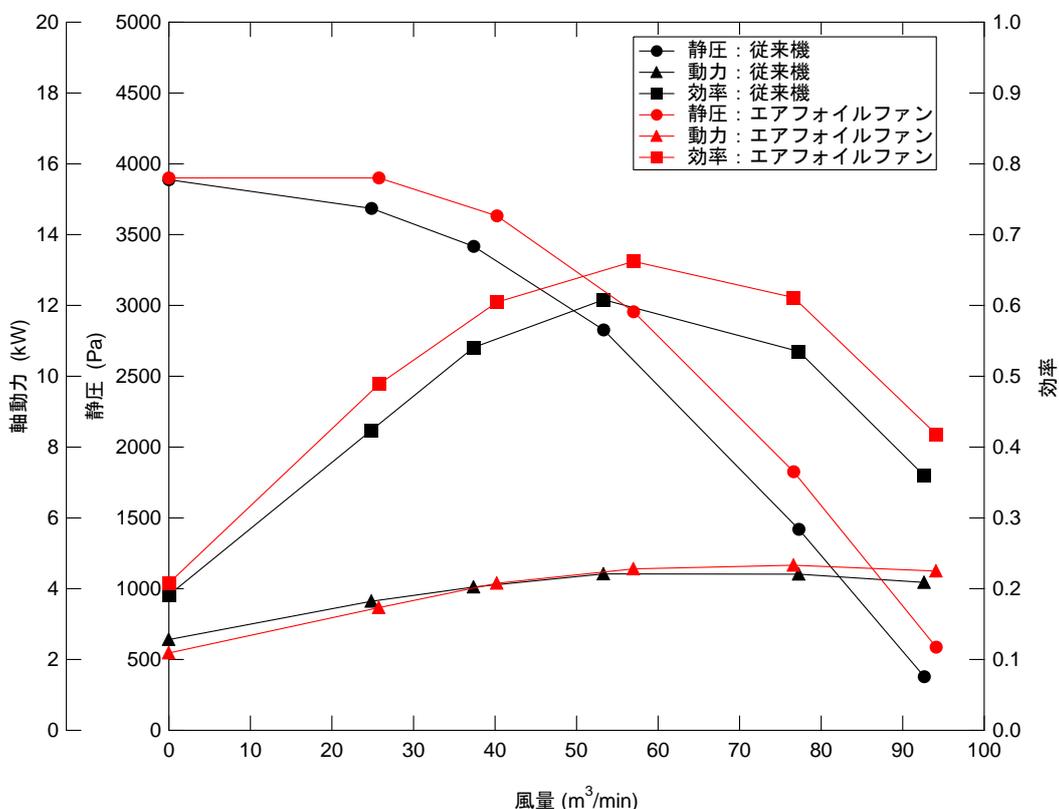


図 4 従来 FTF 形と FTE 試作機 (エアフォイルファン) の性能試験結果

6. まとめ

FTE 形(図 5)は、2011 年 2 月に販売開始した。インペラ径はφ□250~630 で、全 5 機種である。

現在、適用機種的大型化を行うとともに、同じ高効率形送風機として、高静圧機種であるターボブロアの高効率化にも着手している。

今後とも迅速な開発により顧客が要求する効率向上や環境性能向上に貢献していきたい。



図 5 FTE 形ターボファンの外観

NOx 除去装置の高速化

技術開発研究所 中川 祥示

1. はじめに

酸性雨、光化学スモッグの原因物質である窒素酸化物(NOx)発生の大部分は、自動車、ボイラ、加熱燃焼炉等、燃焼によるものであるが、半導体シリコンウエハ洗浄工程、金属酸洗、貴金属(レアメタル)回収溶解等、金属と硝酸の反応による発生量も無視できなくなっている。

前者の処理方式が、触媒(自動車排ガス)または、アンモニア選択接触還元法(ボイラ、加熱燃焼炉)であるのに対し、後者は充填塔による酸化—還元薬液洗浄方式が一般的である。

当社では、従来、塔内風速 0.3~0.5m/sec、充填高さ 2m で設計していたが、設置面積が大きくなるのが課題であった。そこで、従来より比表面積をアップした充填物を採用することにより、高速化できないか検討した。その結果、塔内風速 0.5~0.8m/sec、充填高さ 2m の高速条件で同性能が得られ、循環液量低下により動力低減も可能となった。

以下、NOx 除去装置の高速化の概要について報告する。

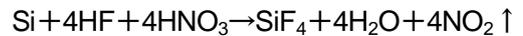
2. 当社の NOx 処理システム

NOx には、NO、NO₂、N₂O₃、N₂O₄、N₂O、N₂O₅ 等種々のものがあるが、大気環境ではほとんど NO、NO₂ として存在する。NO は、無色気体で水に溶解せず、空気酸化により NO₂ となる。NO₂ は赤褐色の気体で、低温下で二量体になりやすく、その二量体 N₂O₄ が水と反応し硝酸、亜硝酸を生成し、酸性雨の原因となる。

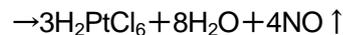
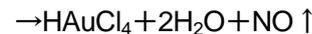
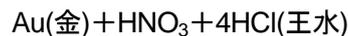
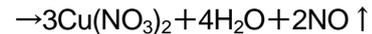
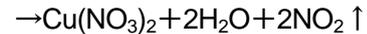
空気中の酸素と窒素が燃焼により反応して生成する燃焼系 NOx は、発生直後ほとんどが一酸化窒素(NO)で、空気中の酸化により二酸化窒素(NO₂)となるが、硝酸と金属の反応では、金属の種類、硝酸濃度、温度により NO₂/NOx の比率 (R_{NO2}) が異なってくる。濃硝酸で NO₂、希硝酸で NO を発

生しやすく、また液温度が高くなると NO₂ が発生しやすくなる。代表的発生源と反応を以下に示す。

①シリコンウエハ硝酸表面処理



②貴金属(銅、銀、金、白金)回収時の溶解



③金属(Al,SUS)の表面処理(酸洗い)

硝酸で金属表面の錆、溶接スケール、溶解スケール、不動態被膜(酸化膜)を除去する時に発生。酸洗効率を上げるため、HF 等を添加、不動態被膜を除去する。



図1 還元—酸化—還元 一体型 NOx 除去装置

シリコンウエハ表面処理の場合、発生 NOx 濃度は 2000~3000ppm、 $R_{NO_2} > 0.8$ 程度であり、金属溶解工程の場合、発生 NOx 濃度は 5000~10000ppm、 $R_{NO_2} > 0.6$ 程度になる場合もある。

当社の処理システムは、基本的に充填塔 2 塔による酸化—還元方式であるが、発生源の R_{NO_2} の値によりフローも異なってくる。図 2 に NOx 除去装置基本フローシートとフロー目安を示す。

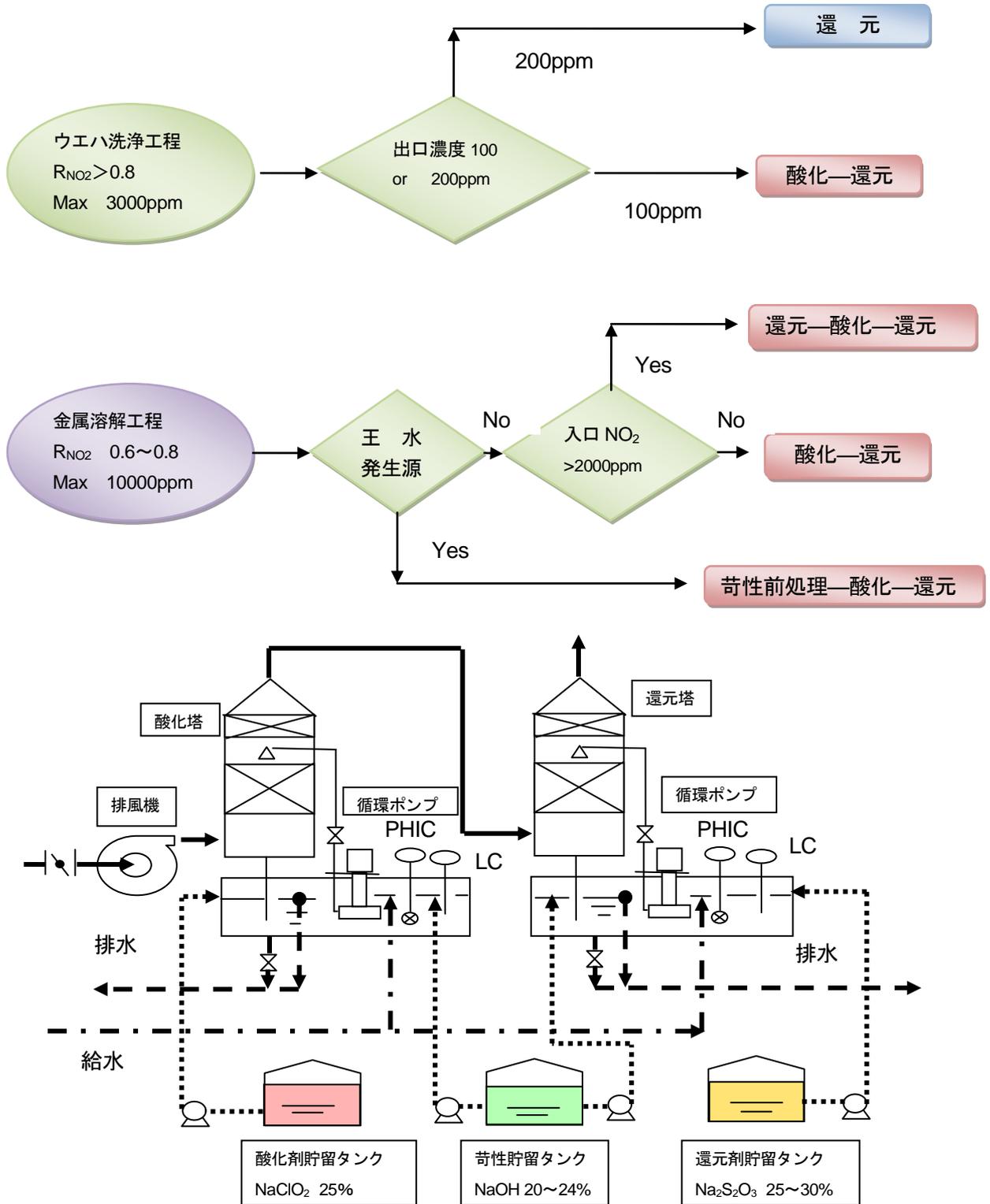
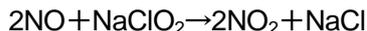


図 2 NOx 除去装置基本フローシートとフローの目安

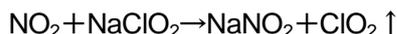
酸化塔では、アルカリ制御下、亜塩素酸ソーダ (NaClO₂) 溶液で洗浄し NO₂ まで酸化する。



NO₂ は、アルカリとの反応により除去する。

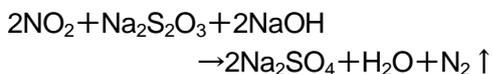


NO₂ または酸性ガスと NaClO₂ の反応により二酸化塩素ガス (ClO₂) がストリッピングするため、NO₂ または酸性ガス濃度が高い場合は、前処理として還元塔またはアルカリ洗浄塔を設置する。



ストリッピングした ClO₂ は、還元塔で処理する。

一方、還元塔では、アルカリ制御下、チオ硫酸ソーダ (Na₂S₂O₃) 又は水硫化ソーダ (NaSH) 溶液で洗浄し NO₂ を窒素ガス (N₂) まで還元する。



一部 NO は、NO₂ と二量体をつくり、アルカリと反応する。



還元剤が水硫化ソーダの場合、硫化水素が発生するので、臭気対策が必要な場合がある。

NO₂ は、200ppm 以上で着色し、NO_x 規制値の最も厳しいところで 100ppm であるため出口濃度は、概ね 100~200ppm まで処理するが、シリコンウエハ洗浄工程等の NO₂ ガスが主体である場合、還元塔だけで処理できる。

NO₂ は、200ppm 以上で着色し、NO_x 規制値の最も厳しいところで 100ppm であるため出口濃度は、概ね 100~200ppm まで処理するが、シリコンウエハ洗浄工程等の NO₂ ガスが主体である場合、還元塔だけで処理できる。

3. NO_x 処理の高速化

これまでは、塔内風速 0.3~0.5m/s、充填高さ 2m 液速度 300L/min・m² を設計条件としていたが、比表面積が、従来の 2.6 倍(当社比)の充填物を採用することにより、高速化できないかを検討した。

図 3.4 に従来充填物、比表面積アップ充填物による NO_x 性能の一例を示す。

塔内風速 0.3, 0.5, 0.8m/s 条件変化、液速度 300L/min・m² 充填高さ 2m R_{NO₂} > 0.85 での還元塔の性能である。測定は、化学発光法により測定した。

従来充填物と比表面積アップ充填物との性能を比較すると、比表面積アップ充填物の方が NO_x 除去率が 10~15 ポイントアップしていることがわかる。

従来充填物の塔内風速 0.3~0.5m/s での性能は、比表面積アップ充填物 0.5~0.8m/s の性能よりも低く、塔内風速 0.5~0.8m/s まで高速化することができることになる。

また、塔径が小さくなった分、散水量も低減され、循環ポンプ動力が 25% 低下、従来より省動力、コンパクトな装置にすることができた。

4. おわりに

レアメタル、貴金属回収は、今後も発展が望める分野であり、溶解工程での NO_x 排出量は、無視できない。今回、NO_x 処理充填塔の欠点である塔内風速が遅い点に関して、比表面積アップ充填物により高速化が可能であることを報告した。また、酸化剤のコストが高い等の課題があり、改善していきたいと考えている

表 1 従来装置と高速化装置比較(当社比)

条件 Q=100m³/min NO_x 2000ppm(NO₂/NO_x ≒ 0.6) ⇒ 200ppm

設置面積比率、動力比率は、従来充填物を 1 とした場合。

比較項目	従来装置	高速化装置
塔外径寸法	酸化塔 φ2000×5000H 還元塔 φ2000×5000H	酸化塔 φ1600×5000H 還元塔 φ1600×5000H
塔設置面積比率	1	0.64
装置圧損	150Pa/塔	300Pa/塔
動力	排風機 3.7kW 循環ポンプ 5.5 kW×2 合計 14.7kW	排風機 3.7kW 循環ポンプ 3.7 kW×2 合計 11.1kW
動力比率	1	0.76

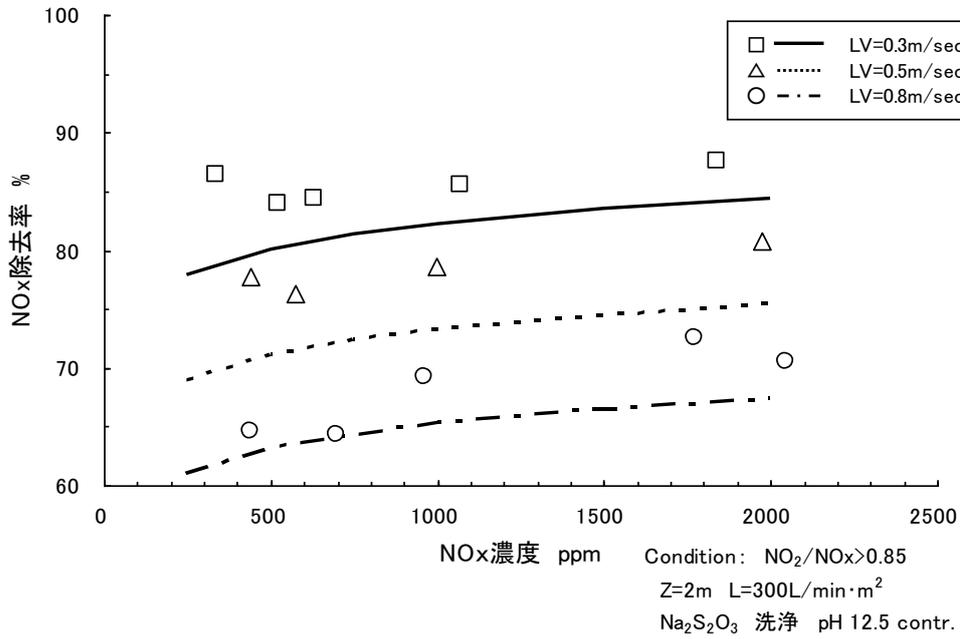


図3 従来充填物(比表面積 100m²/m³)での NO_x 性能実測例と設計ライン

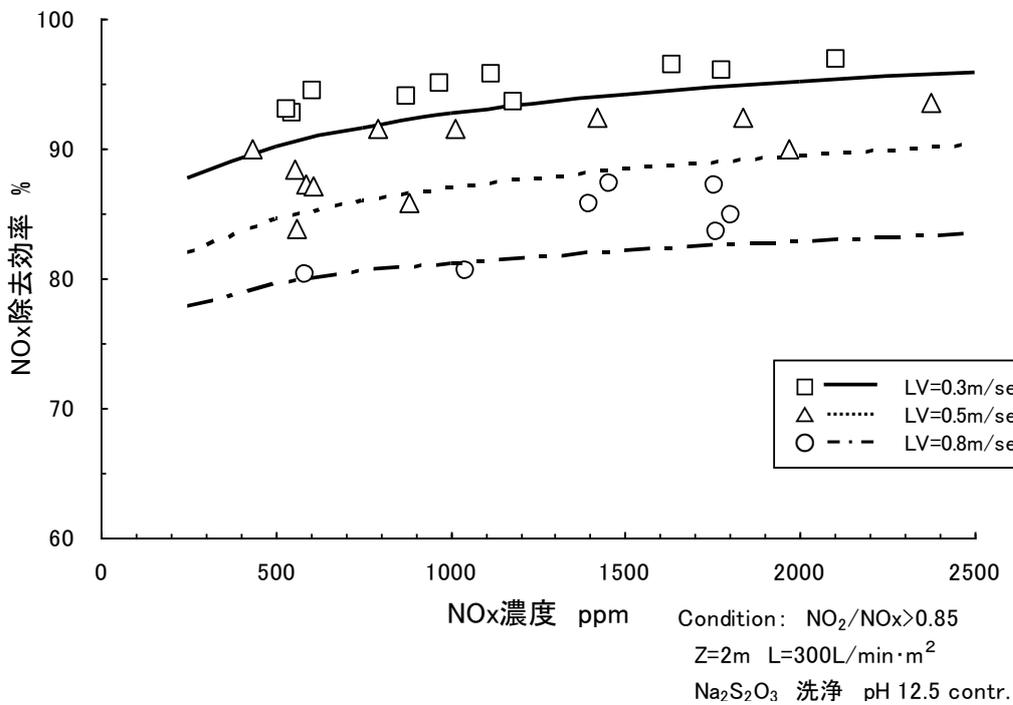


図4 比表面積アップ充填物(比表面積 260m²/m³)での NO_x 性能実測例と設計ライン

超音波を用いた FRP の劣化診断事例

技術開発研究所 杉本 健一

1. はじめに

産業用機械から建築物に至るまで、その機能が十分に発揮されるためには適切な保守点検（メンテナンス）が必要である。このメンテナンスの内容は、定期的な消耗部品の交換や清掃・注油といった保守作業が大部分である。いかなる構造体であっても、使用する以上は、いずれ寿命を迎えるものである。その寿命判定は、可能な限り客観的であることが望ましいが、その判定が極めて困難なケースも存在する。

その一例が当社でも扱っている耐食 FRP 製品である。腐食の進行が極めて早いケースでは、寿命の終焉が比較的判断しやすい場合が多い。しかしながら、腐食が極めて緩慢に進行する場合には、寿命の終焉を的確に捉えることが容易でない。現実には、高度経済成長期に大量に設置された耐食機器の大半は、数十年を経た現在でも稼働している。その一方で、それぞれの健全性について確実な判断を下す手法は確立できていない。したがって、いつ破損するかが定かでないものが少なくとも含まれている可能性が高いにも関わらず、

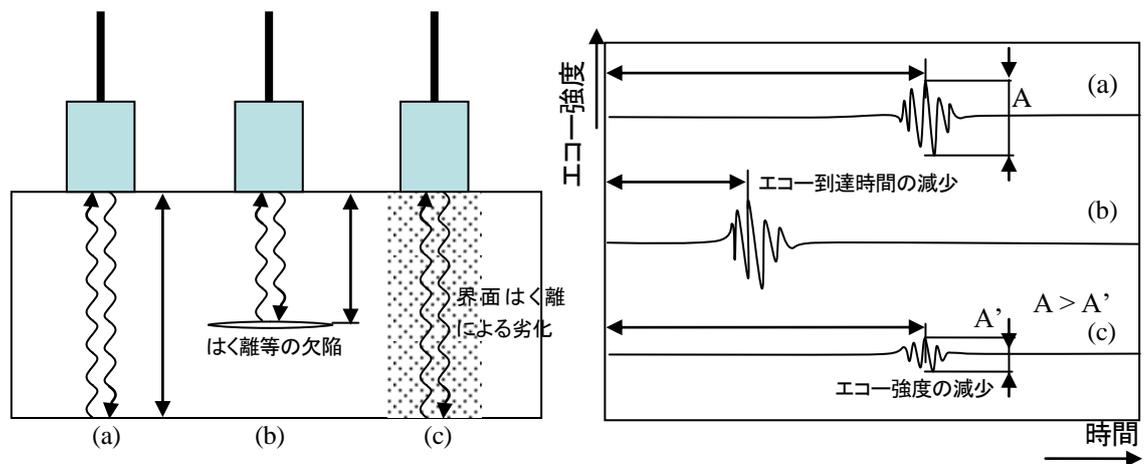
更新の優先順位を付与することもできないのが現状である。

本報は、開発途上にある超音波技術を用いた FRP の破壊的劣化診断について、その概要とこれまでの評価事例を述べるものである。

2. 非破壊診断技術としての超音波¹⁾

人間の可聴周波数帯には固体差があるが、約 15Hz～約 20000Hz とされており、この帯域から外れた音を認識することはできない。超音波とは、工業的には 20000Hz を超える高周波数帯の音波を指す。その用途はソナー、プラスチックの溶着、油分洗浄と様々であるが、健康診断における臓器のエコー検査や配管溶接部の内部欠陥検出といった、医療・工業分野における非破壊的検査といった応用例が有名である。

超音波による非破壊検査・健全性診断とは、照射されて対象物に反射した超音波エコーの状態が、健全部と非健全部とで異なる点に着目している（図 1）。例えば、外観からは判別できないが、その内部にき裂が存在する場合、超音波はそのき



(a)厚さ測定、(b)探傷、(c) FRP劣化診断

図 1 超音波による計測事例

裂で反射するためにエコーとして捉えられる。き裂がなければエコーはないため、内部にき裂が存在することを切断することなく判断することができる。

非破壊的に検査できることの利点は、現在稼働中である装置・部品を交換する必要がないため、コスト的なメリットが大きいことが挙げられる。一方で、確立した手法でなければ、検査した後の稼働中に破損するという事態を招きかねず、検査員の技能により結果が変わる可能性もあることは留意が必要である。

3. 診断方法（原理）

工業的に確立されている超音波を用いた非破壊検査は、上記のようにき裂や巣（気泡）といった物理的な欠陥を検知する手法である。これらの欠陥は、およそ数ミリメートル程度の大きさである。

一方、FRPの化学的な劣化により生じる欠陥の最小単位は、強化繊維と母材樹脂のはく離であり、その大きさは数マイクロメートルである。このはく離が材料全体に分布することにより、機械的特性や耐食性が低下すると考えられる。このように、FRPの劣化現象は、一般的な物理的欠陥とは大きく異なっている。

実際のFRP劣化診断においては、汎用の超音波探傷器と探傷子を用いている。探傷器はパルス電圧を探傷子に送り、探傷子内の圧電材料が振動することで超音波が生じる。この超音波は材料表面から内部に伝播され、また探傷子に戻ってくる（エコー）。エコーは探傷子を介して探傷器で受信される（図1）。材料表面から伝播した超音波は、エコーとして戻ってくる間に減衰する。この減衰は一般的に伝播距離が長い程に大きくなり、一定の出力に対してエコーレベルは低下する傾向を示す。FRPは強化繊維と母材樹脂から構成される複合材料であり、超音波がこれらの材料によって散乱しやすく、減衰が大きい材料でもある。FRPの劣化が繊維と樹脂のはく離を引き起こし、これが材料全体に分布すると、減衰性がより顕在となり、エコーレベルの低下を引き起こすことになる。この劣化とエコーレベルを関連付けることで、FRPの劣化を診断する手法が他の一般的な非破壊検査手法と異なる点であり、特許²⁾も申請・取得している。

4. 評価事例

4.1 送風機羽根車

ゲルコート（着色樹脂）を使用しないFRPは、

板厚にもよるが透光性があり、全てではないが材料内部の損傷を視認することができる。しかしながら、除去が容易でない汚れが表面に固着した場合、目視で損傷を確認することは不可能となる。

本事例は、FTF1201（HClガス、83℃ 約10年稼働）の大量の結晶物が表面に固着していた羽根車に（図2）、試験的に超音波による探傷試験を実施し、材料内部に層間はく離が確認できた例である。



図2 羽根車外観

羽根車の翼部分（図4）について、図中の赤い印を付した箇所とそうでない箇所におけるエコー波形を図3に示す。縦軸はエコーレベル、横軸は材料の厚さ方向の距離に対応する。印の無い通常箇所は、約17mmでエコーを示しており、これは翼部の板厚と一致している。一方、印を付した箇所では翼部の板厚の約半分の箇所においてエコーが見られた。このような箇所が翼部に点在していることがわかり、層間はく離の発生・進展が疑われた。実際に翼部を切り出したところ、印を付した箇所において層間はく離が確認された（図5）。実際の羽根車において、層間はく離は頻繁に生じる事例ではなく、この場合では熱による翼の曲げ変形によるせん断から生じたはく離であると考えられる。このように、一般的な非破壊検査手法も適用できることが明らかになった。

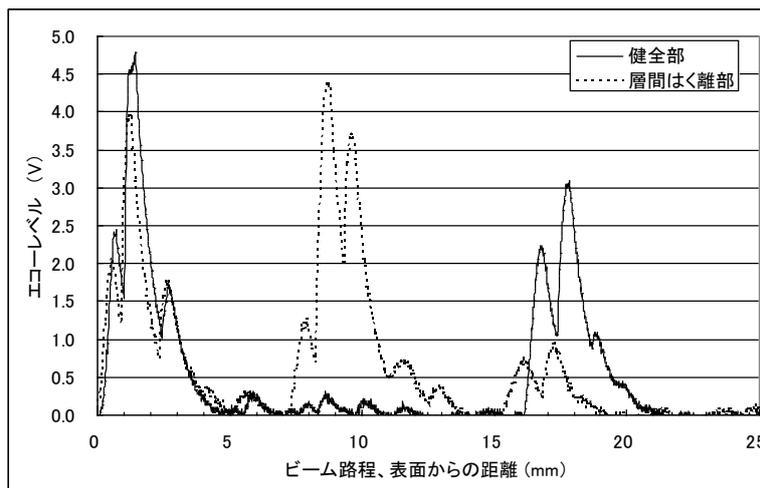


図3 エコーと距離の関係



図4 翼部のはく離箇所

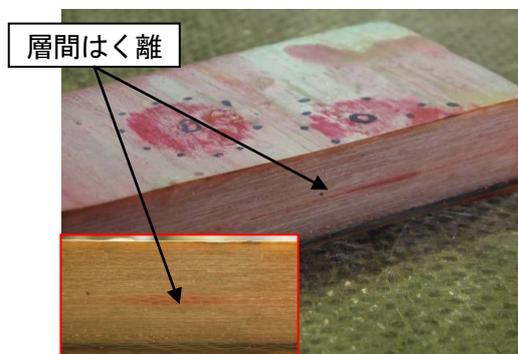


図5 はく離箇所の断面

4.2 薬液タンク

耐食 FRP は、薬液貯槽・タンクとして鉄鋼・化学・メッキ・半導体業界と応用分野が広い。多くのタンクが設置してから 20~30 年経過しているが、現役で稼働しているものが多数存在している。計画的な更新が理想である一方、使用環境・条件による優先順位付けが極めて困難な案件でもある。

本事例は、それぞれ、20 年~30 年使用した薬液タンク 3 基を劣化診断した例である。

(1) 外観

薬液の貯蔵量は製造ラインの稼働に応じて定期的に増減するため、液面も移動する。タンク底部は常時薬液に曝され、水圧も作用することになる。天井付近は液面になることがほとんどないが、薬液の蒸気成分の付着・濃縮や日光・紫外線による環境劣化が促進される。

このように、薬液の種類だけでなく、部位によっても劣化条件が異なる。そこで、天板・液面上・

液面付近・液面下・底板の 5 種類のカットサンプルで目視観察した。図 6 に各カットサンプルの接液面からの写真を示す。目視観察においては、表面の光沢の有無が劣化の程度を判定する上で重要となる。その他の外観上の特徴も含めて表 1 にまとめる。

表 1 各カットサンプルの外観の特徴

A タンク	表面の光沢はいずれの部位も消失。 底板のみ変色。
B タンク	表面の光沢は天板のみが保持。 常時接液である下段・底板は緑色に変色。
C タンク	天板から液面付近まで光沢保持。 液面下と底板は補修された痕跡があり、全面に FRP が積層。 FRP 内部での層間はく離による白化が見られ、特に液面付近では白化領域が大。

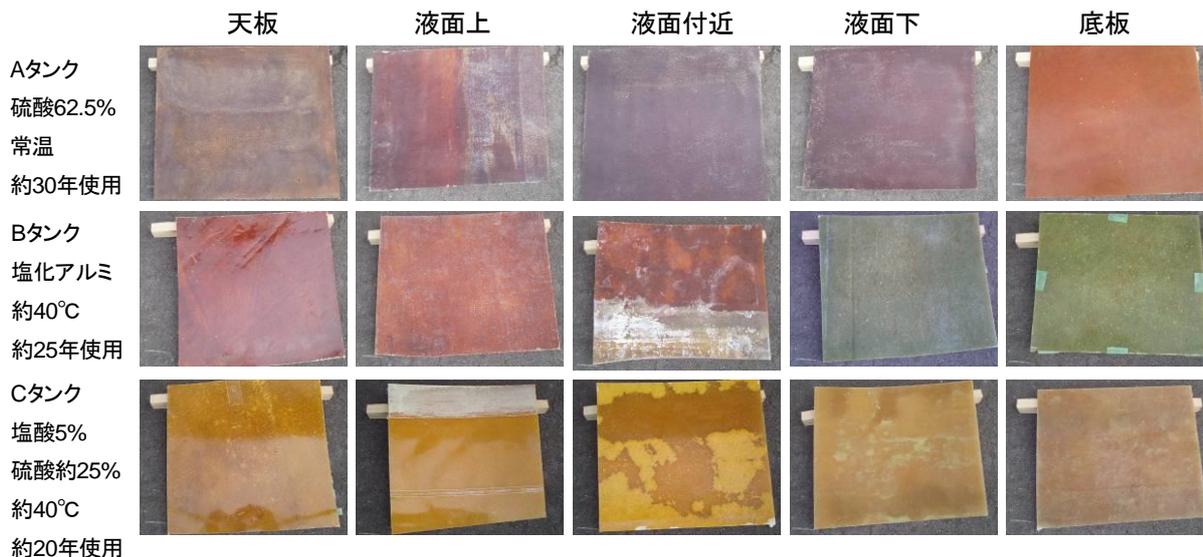


図6 各カットサンプルの外観写真

(2) 強度

図7に各部位からサンプルを切り出し、引張試験を実施した結果を示す。各タンクともガラス繊維の積層構成が同様でないために単純な比較はできないが、各タンクの共通した傾向として天面は強度が低く、液面下の強度が高い。特にA、Cタンクにおける天面と液面下の差は顕著であるといえる。

タンクの構造として、水圧が作用する土台付近は板厚が大きく、天面に近い程に板厚は小さくなる。特に天面は最も板厚が小さく、外側は長期間の紫外線暴露である影響が大きいことが推察できる。また、天面は基本的に液面に触れることが無いという点でも他と大きく異なっている。天面は液面には触れないが、昼夜や夏冬における温度差、蒸気として接触したガスの結露による濃縮があり、その劣化メカニズムは複雑であるが、天面の劣化が顕著に進行するという結果は事実であるといえる。

(3) エコー強度

図8に超音波探傷器を用いて得られた各サンプルのエコー強度と板厚の関係を示す。実際のカットサンプルの板厚は均一ではないが、おおまかに板厚を6mm、7.5mm、11mmの3種類に分類、製作したblank材のエコー強度の測定値も併せて示す。板厚の増加にしたがってエコー強度は距離減衰のために低下の傾向を示す。全体の傾向としては、いずれのタンクもblank材と比較して低いエコー強度を示した。したがって、長期間使

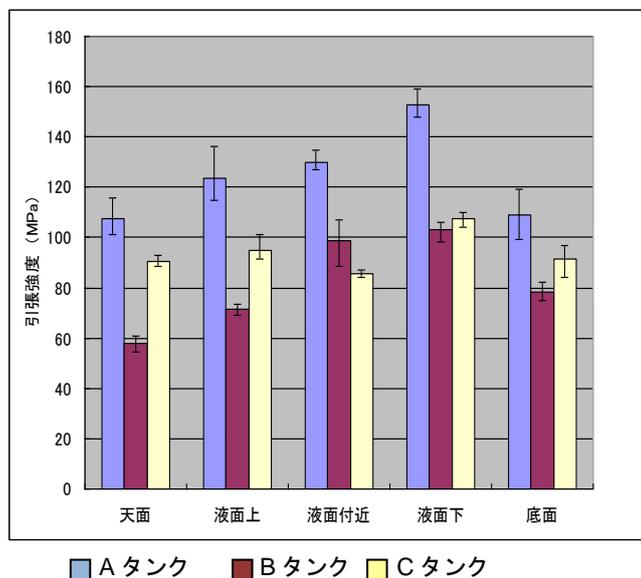


図7 各部位の引張強度

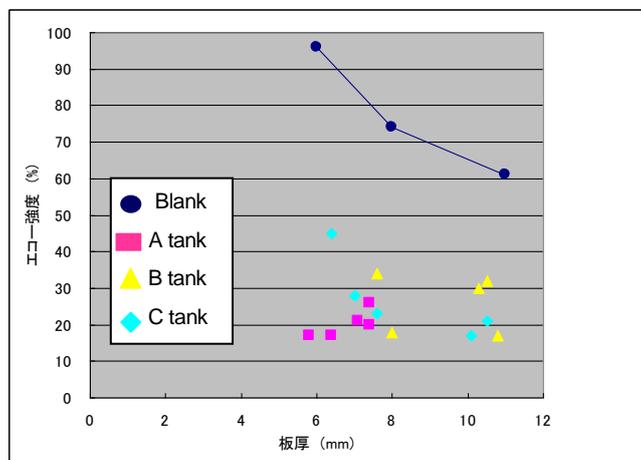


図8 エコー強度と板厚の関係

用したタンクはblankと比較して超音波の透過性が低下していると考えられる。

次に、エコー強度比と引張強度保持率の関係を図9に示す。エコー強度比、強度保持率は、それぞれタンクサンプルとblank材のエコー強度、引張強度の比とした。それぞれのタンクの部位も図9中に併せて示す。全体の傾向として、Aタンクは強度保持率が比較的高いがエコー強度は低い。Bタンクは強度保持率が低いが、エコー強度が高い。Cタンクはエコー強度、引張強度ともにAとBの中間に位置している。それぞれのタンクについて部位別で見ると、天面や液面付近のエコー強度が低く、底面のエコー強度が高い傾向を示した。

このように、タンクの部位による劣化には一定の傾向が見られることはわかった。また、使用期間・条件によって腐食の程度も異なるため、タンクそれぞれのエコー強度に違いを生じることは妥当であると考えられる。しかしながら、腐食が進行していると考えられるタンクの引張強度が他と比較して高い理由は説明できない。この原因の一つとして、比較対象としてのblank材が、Aタンクに対して妥当であるか否かという点が挙げられる。blank材は3基のタンクに対して等しく比較を行っているが、実際はそうではない可能性もあるためである。しかしながら、30年以上も以前に製作されたFRPを忠実に再現することは不可能である。

5. 今後の課題

超音波探傷技術においては、探傷面の平滑性が結果に及ぼす影響が大きい。耐食FRPの表面が型面（成型型に接していた面）以外に平滑であることはないため、実際の現場における測定でどのように対応するかは常に留意が必要である。今回の計測では型面である接液面からの計測であるが、実際の場面において常に接液面から計測できるとは考えられない。したがって、ペーパーがけによる平滑処理などについても、その妥当性については確認が必要である。

図9に示すように、エコー強度が最も低く、引張強度が最も高いAタンクのような結果が得られる一方で、エコー強度は高いが引張強度が低いBタンクのような結果もある。このような原因の一つは、blank材が比較対象として妥当であるか否かにある。つまり、Aタンクのblank材となるべきFRPは、より高い強度を有していた可能性があるからである。

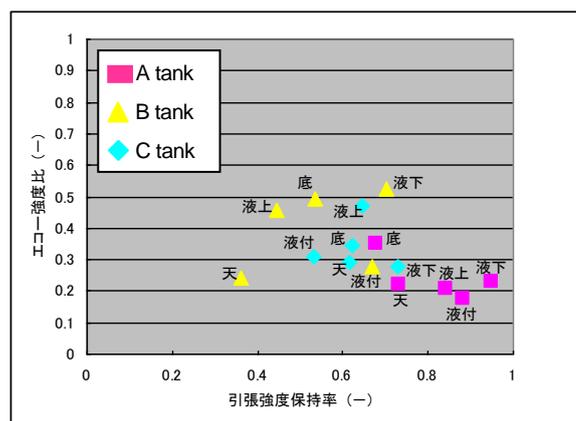


図9 エコー強度比と引張強度保持率の関係

また、A,Bタンクは使用条件が異なっており、腐食のメカニズムが異なっているということが上記の様な結果を示す理由として考えることができる。このように踏み込んだ議論に関しては学術的な側面が強く、簡単に結論が出る内容でもない。いずれにせよ、今後の継続したデータ収集によって、精度の高いデータベースを構築しながら、学術的交流による理論的考察が重要であると考えられる。

6. おわりに

本報では、非破壊検査手法としては一般に普及している超音波探傷技術を転用したFRPの劣化診断技術の概要と、評価事例について報告した。

FRPの劣化メカニズムは複雑であり、環境条件と機械的特性、超音波エコーを理論的に関連付けることが必要である。今後も継続的にデータを採取していく予定であり、FRP超音波データ採取の案件について一報いただければ、幸いである。

7. 参考文献

- 1) 超音波探傷試験実技参考書「デジタル超音波探傷器」編, (社)日本非破壊検査協会, 3-9 (2009).
- 2) 藤井善通, 杉本健一:【公開番号】特開2008-96340(P2008-96340A), 繊維強化複合材の劣化診断方法