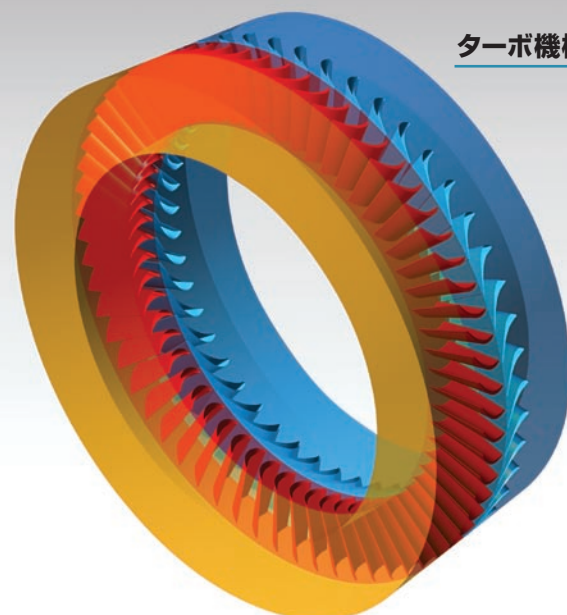


ターボ機械の 浸食速度を予測

浸食速度を予測し、過酷な環境で動作しなければならない回転機械装置の耐久性向上を実現

Edward Bennett (米国 ホイツパニー, Mechanical Solutions, Inc., 流体工学部門ディレクター),
Artem Ivashchenko (米国 ホイツパニー, Mechanical Solutions, Inc., プロジェクトエンジニア)



FCC ホットガスエキスパンダーの流体領域のソリッドモデルで、この機械のブレード形状とおおよそのサイズを示したもの

ターボ機械の流路に固体粒子が含まれることは決して良いことではありませんが、ターボ機械を実際に稼働させると、どうしても固体粒子が混入してしまいます。埃、砂、飛散灰、酸化鉄、工程から出る材料屑、摩耗性シールの破片、ブレードの摩耗屑などから成る固体粒子の多くは、浸食、沈殿、腐食を引き起こし、性能低下や部品破損の原因になると同時に、ターボ機械の部品を修理または交換する必要性を生じさせ、コスト増をもたらします。こうしたコストには、プラント設備を稼働させているターボ機械を点検のために停止し、機械稼働率と生産性の低下を招くことによって発生するコストも含まれます。しかし最近では、浸食をシミュレーションしてターボ機械の耐久性を向上させることのできる計算手法が登場しています。

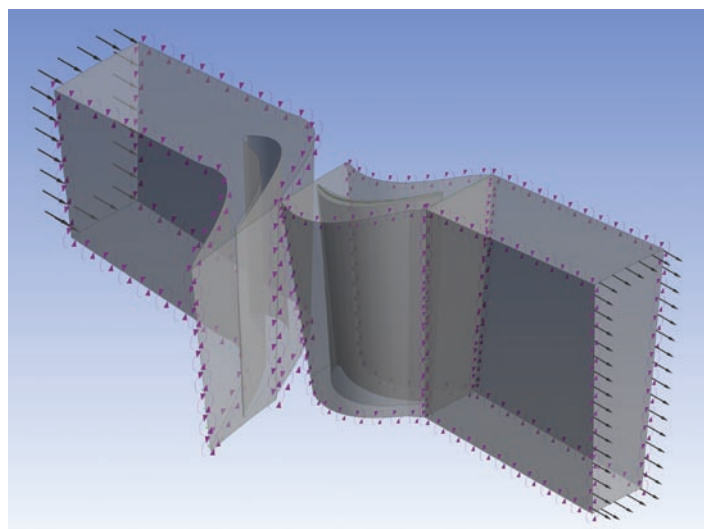
Mechanical Solutions (MSI) 社は、設計、解析、試験の各サービスを世界中の企業に提供しているコンサルティング・研究開発企業です。あらゆるタイプの回転機械の設計と解析に対応する高度な専

門知識を持つ同社は先ごろ、2種類のホットガスエキスパンダーの浸食速度を比較しました。

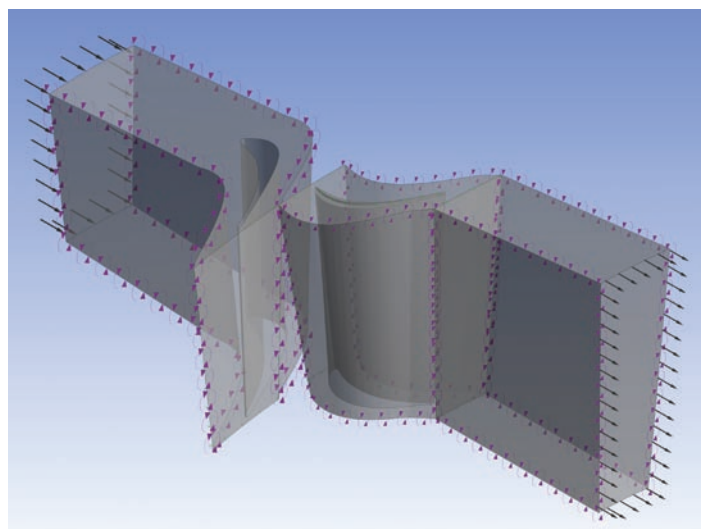
浸食に悩まされる FCC エクスパンダー

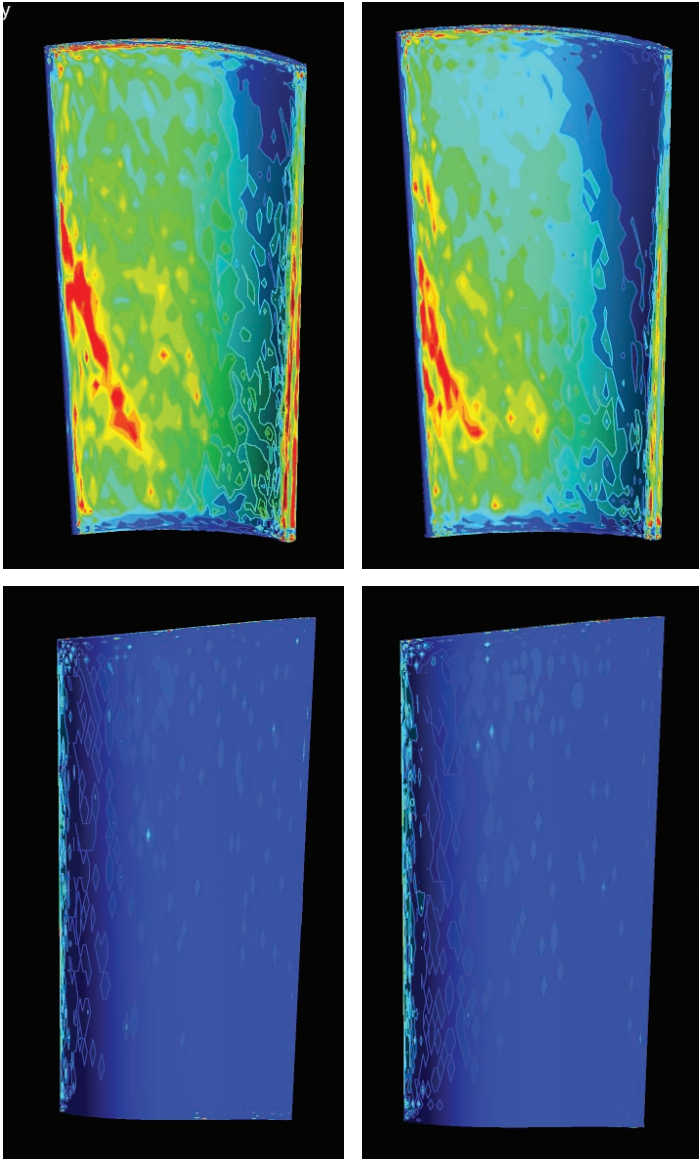
産業用ターボ機械に組み込まれ、大きな浸食損傷を受け続けるものの、流動式接触分解 (FCC: Fluid Catalytic Cracking) ホットガスエキスパンダーがあります [1]。多くの石油精製所では、高温下で粉末触媒を使用して高分子量石油炭化水素から有用な石油製品 (ガソリンなど) を製造する FCC プロセスが数ヶ月間にわたって稼働し続けています。

このプロセスによって生じた排ガスは、触媒粒子の除去率が90%の分離装置を経て、FCC ホットガスエキスパンダーに供給されます。その後には、特殊なターボ機械である FCC エクスパンダーが、排ガス内に残っている圧力と熱エネルギーの大半を回収して利用し、プロセス装置を稼働させたり、発電したりします。



再設計した FCC ホットガスエキスパンダーの流路の CFD モデル (左: 反応率 40% の流路, 右: 反応率 68% の流路)





ローターの浸食速度密度を予測したときに作成したカラーコンタープロット。左は反応率 40% の形状、右は反応率 68% の形状で、赤色は浸食速度が最も速い領域を表す。

なお、入口温度が高いだけでなく、圧力比が 3 対 1 と大きいという特徴も持つ単段 FCC エキスパンダーのタービンブレードには、残余固体の触媒粒子に起因する浸食損傷を大きくする空力応力と熱応力が同時に加わります。

様々な解決策を提供する強力な解析手法

ターボ機械流路の設計最適化に長年にわたって利用されているものに、数値流体力学 (CFD) があります。たとえば、ANSYS CFX では、米国のシンシナティ大学の Widen Tabakoff 氏とそのチームが開発した理論モデルを使用して、流体領域に含まれる固体粒子の追跡や固体粒子浸食の予測を簡単に行うことができます [2] [3]。この理論モデルは、流路壁に生じることがある損傷を定量化して、ターボ機械の流路を設計したり、設計案の耐浸食性が高いかどうかを判断したりする際にも利用できます。

FCC エキスパンダーの流路を評価して浸食を低減

時系列データに基づいて、FCC ホットガスエキスパンダーのモデ

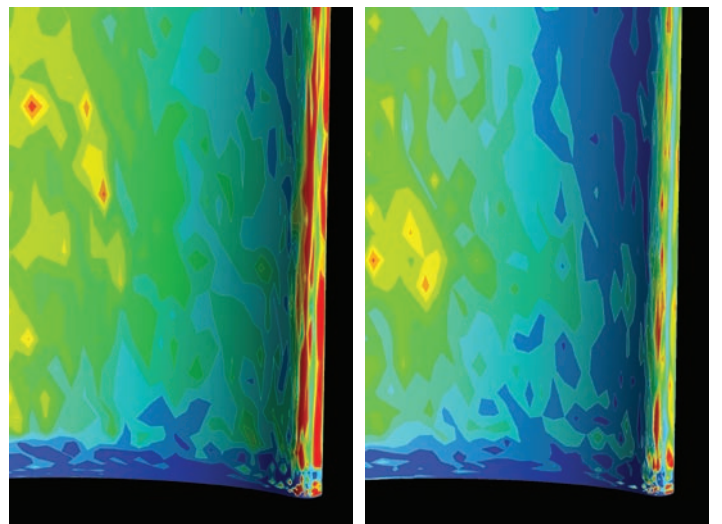
ルを作成して確認してみたところ、固体粒子が原因でこのエキスパンダーが過度の浸食損傷を受けることが分かりました。そこで MSI 社のエンジニアチームは、エキスパンダーの数を計画的に増やしながら、その流路に発生する浸食の数値解析を ANSYS CFX で行い、エキスパンダー段の反応を向上させることによって浸食速度に生じる差を定量化しました。

次に、公称反応率 40% の新しい流路を設計してから、この設計と、反応率が 68% のもう 1 つの新しい設計を比較しました (設計圧力比は 3.5、ローター速度は 5,070rpm)。隣接する 3 つの流体領域 (ステーター領域、ローター領域、ディフューザー領域) から構成される設計では、それぞれ周周期対称性を持ちます。このため、各流体領域の 1 つのブレード列またはセクターのみをモデリングし、解析時間の短縮を図りました。その後には、これらのモデルを ANSYS TurboGrid でメッシュ分割し、約 637,000 ノードの六面体メッシュを生成しました。

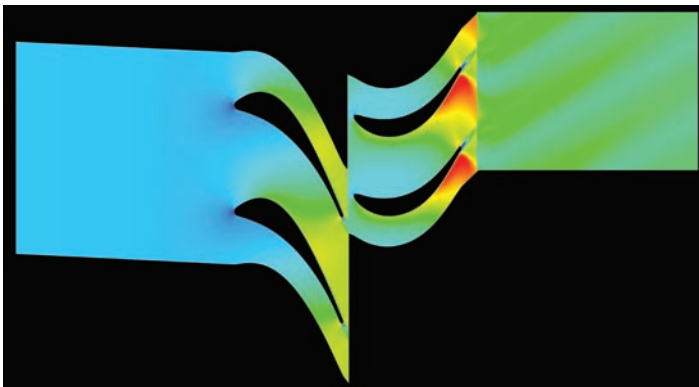
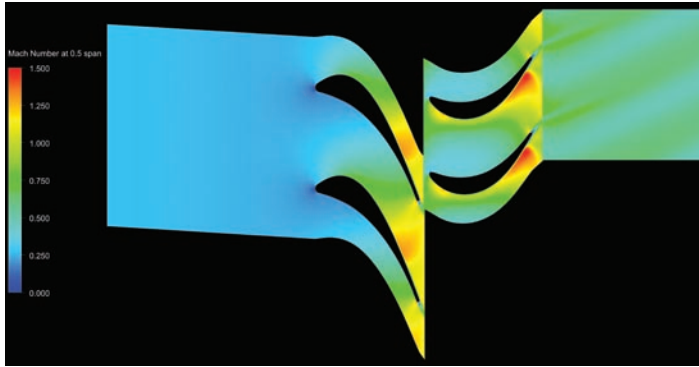
乱流の影響は $k-\varepsilon$ 乱流モデルに組み込み、ステーター領域、ローター領域、ディフューザー領域間の界面には段フレーム変更モデルを適用しました。固体粒子のサイズ、相対速度、衝突角、材料のほか、浸食表面材料は浸食モデルに組み込みました。さらに、石英鋼の係数を用いて固体粒子と浸食表面を表現してから、浸食モデルのデフォルトの反発特性を設定しました。

改善を予測していた解析結果

反応率が 40% と 68% の 2 種類の設計の空力性能を予測したところ、機械効率がそれぞれ 87.2%、87.9% となり、ほとんど差はありませんでしたが、浸食速度では大きな差が出ました。たとえば、反応率 68% の流路設計の CFD 解析では、反応率 40% の流路設計に比べ、ローターブレードとステーターブレードの浸食速度密度の平均がそれぞれ 22%、5% 低くなりました。また、反応率 40% の設計では、ローターブレードの浸食速度密度がステーターブレードに比べて 65% も高くなりましたが、反応率 68% の設計では、35% 高くなっただけでした。つまり、反応率 68% の設計の方が、ローターとステーターの摩耗が同じ速度で進んでいたこととなります。



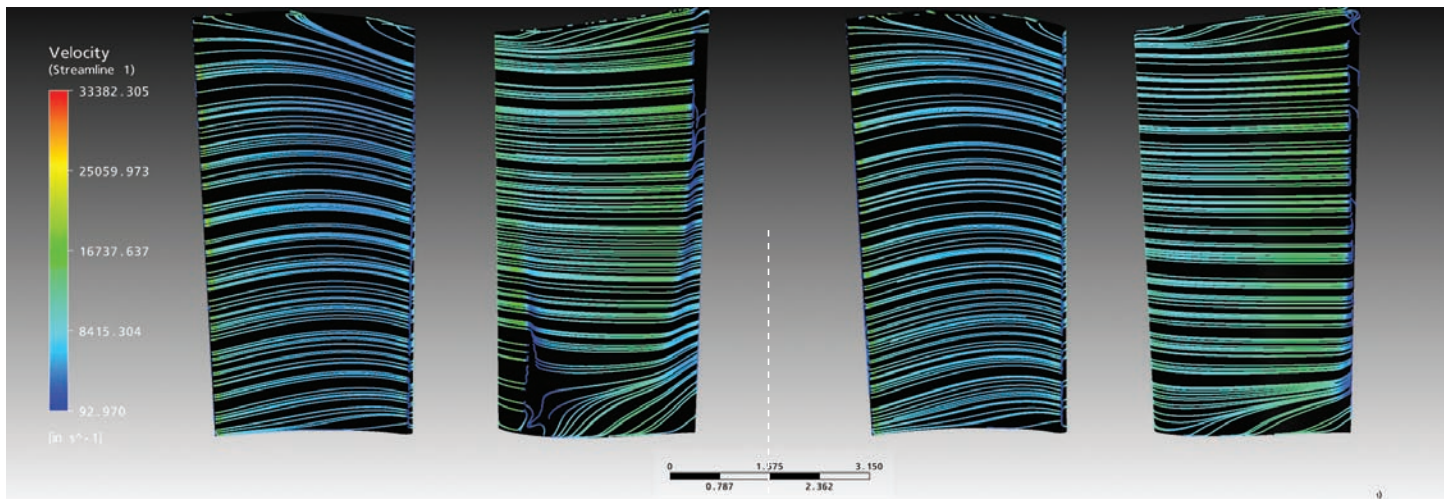
FCC ガスエキスパンダーのローターブレード前縁部の浸食速度密度を示すカラーコンタープロットを拡大したところ (左は反応率 40% の形状、右は反応率 68% の形状)



ハーフスパンのマッハ数カラーコンタープロット（上が反応率 40% の形状、下が反応率 68% の形状）

なお、反応率 40% の流路設計を対象に浸食損傷を予測した際には、ある石油精製所で稼働している同じのタイプの FCC ガスエキスパンダーが受けていた浸食損傷を的確に再現し、実際の FCC エクスパンダーを正確に評価することができました。また、反応率 68% の流路設計を対象に浸食損傷を予測したところ、ローターブレードの前縁部の耐浸食性能が大幅に向上することがわかりました。これは、ローターブレードの前縁部で排ガス速度が低下するというこの設計の特徴によるものと思われます。

いずれの設計も、流れが遷音速で、大きな空力荷重を受けますが、



FCC ホットガスエキスパンダーのローターブレード表面付近の流線（速度で色分け）。左側の 2 つの画像は反応率 40% の形状、右側の 2 つの画像は反応率 68% の形状を示したものであり、それぞれ左が圧迫側、右が吸い込み側を表す。

マッハ数プロットを確認してみると、反応率 68% の設計ではステーターにかかる荷重が大幅に減少していました。また、流線プロットでは、各設計に使われているローターの圧力面側（プロットの上部）のフローパターンに大きな差が見られなかったものの、シミュレーション結果を確認すると、反応率 68% の設計では負圧面上のハブ二次流れが減少し、性能が向上していました。

まとめ

2 種類の FCC ガスエキスパンダーの流体解析を実施したことで、ターボ機械の流路を再設計して耐浸食性能の向上とブレードの長寿命化が図れることがわかりました。ブレードの頻繁な交換、機械効率の低下、装置のダウンタイムによる生産ロスによってコストが増大することがありますが、こうした CFD 解析を行えば、浸食の問題を解決し、コストを最小限に抑えることができます。それと同時に、主要な流路に含まれる固体粒子に起因する浸食損傷を緩和し、ターボ機械の有効寿命を大幅に延ばすことも可能になります。■

Reference

- [1] Carbonetto, B.; Hoch, G. Advances in Erosion Prediction of Axial Expanders. Texas A&M University Turbomachinery Symposium, Houston, Texas, U.S.A., September 1999.
- [2] Hamed, A.; Tabakoff, W.; Wenglarz, R. Erosion and Deposition in Turbomachinery. Journal of Propulsion & Power, 2006, vol. 22, no. 2, pp. 350–360.
- [3] Hamed, A.; Tabakoff, W.; Rivir, R.B.; Das, K.; Arora, P. Turbine Blade Surface Deterioration by Erosion. Journal of Turbomachinery, 2005, vol. 127, pp. 445–452.