地熱タービンにおける解析・評価技術

酒井　吉弘（さかい　よしひろ）　　**山下　満男**（やました　みつお）　　**坂田　昌良**（さかた　まさよし）

1　まえがき

環境問題への関心が高まるなかで，クリーンエネルギーとしての地熱発電の重要性が世界的に再認識されている。世界の地熱発電設備容量は最近10年間で約 2,000 MW 増加し，8,000 MW 強（運転中の地熱発電設備の合計）となり，また地熱発電プラントの設置国も20か国を超えた。富士電機は，最近10年間に世界で新設された地熱タービンの設備容量の半分近くを納入し，地熱発電の発展に貢献してきた。最近納入した設備のなかには，50 Hz 機として世界最大のワヤンウィンド発電所 1 号機 110 MW（インドネシア，1999年完成）などがある（**図1**）。

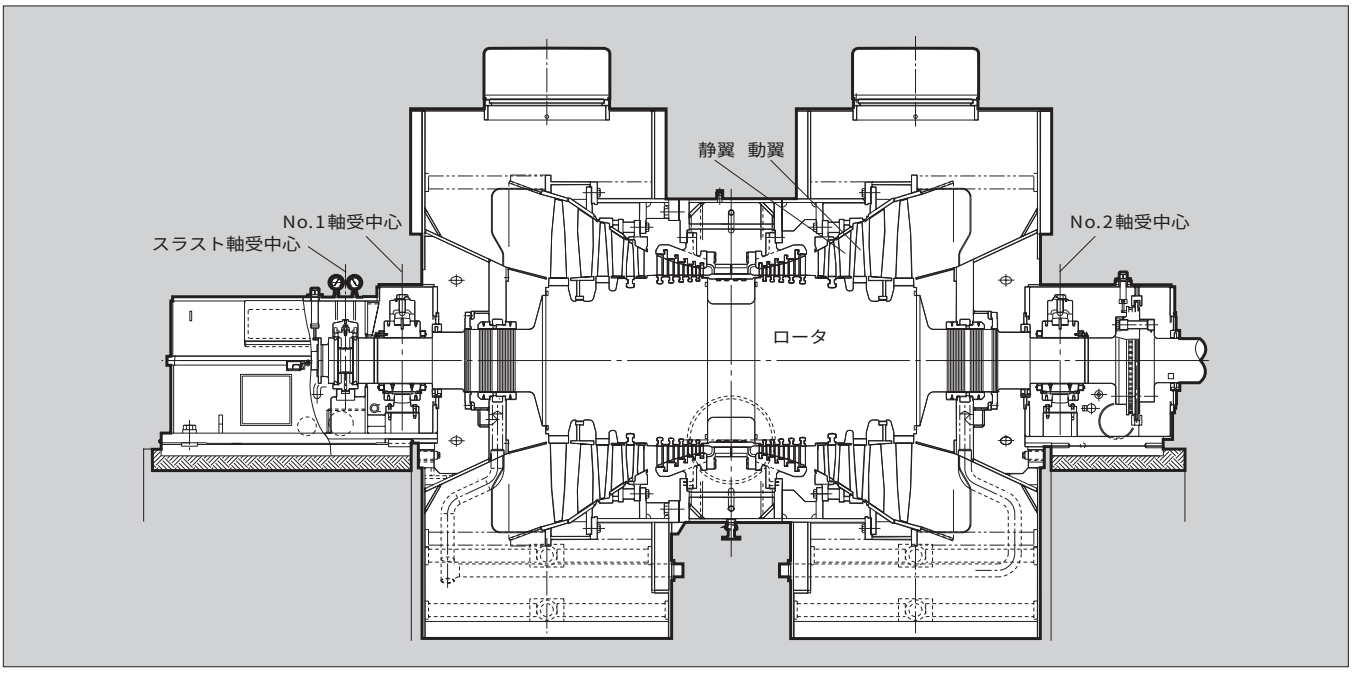
地熱流体中には塩素，硫化水素，炭酸ガスなどの強い腐食作用を持つ不純物が多量に含まれているため，これを利用する地熱発電プラントでは，使用材料の腐食にまつわる問題への対応が最も重要な課題の一つである。本稿では，過酷な腐食環境で使用される地熱タービンの応力解析および評価技術について概説する。

2　地熱蒸気中の不純物とその影響

地熱発電の形式には種々のものがあるが，一般的には地熱井から取り出される蒸気と熱水の混合流体をセパレータ（気水分離器）に導いて蒸気と熱水を分離し，蒸気だけをタービンに導いて発電を行っている。

地中から噴出した地熱流体には，ガス状および非ガス状の不純物や地殻からの固形物が含まれている。地熱流体中に溶解している非ガス状の不純物は，セパレータで蒸気と熱水を分離する過程でかなりの部分除去されるが，一部は蒸気に溶解してそのままタービン内に持ち込まれる。また，地熱流体中に不凝縮ガスとして含まれる不純物の大部分は，蒸気とともにタービン内に流入する。

図1　地熱タービン断面図（ワヤンウィンド発電所 1 号機 110 MW）



酒井　吉弘

蒸気タービンの設計，開発に従事。現在，エネルギー製作所火力設計部技師長。日本機械学会会員。

山下　満男

電力用材料および電子デバイス材料の研究開発に従事。現在，生産技術研究所第二開発部担当部長。日本金属学会会員，日本材料学会会員。

坂田　昌良

機械系シミュレーション技術の開発に従事。現在，生産技術研究所第二開発部。日本機械学会会員，精密工学会会員，電気学会会員。

図２　地熱蒸気中の不純物の影響

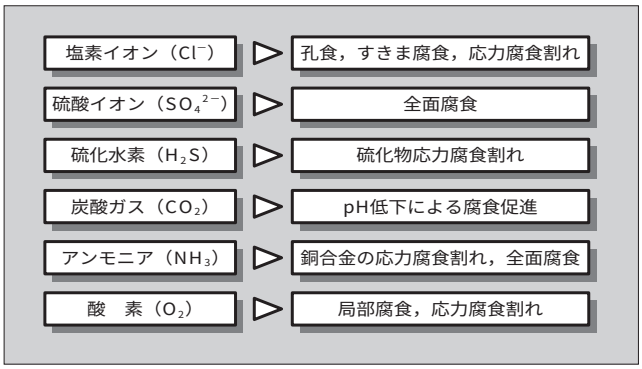
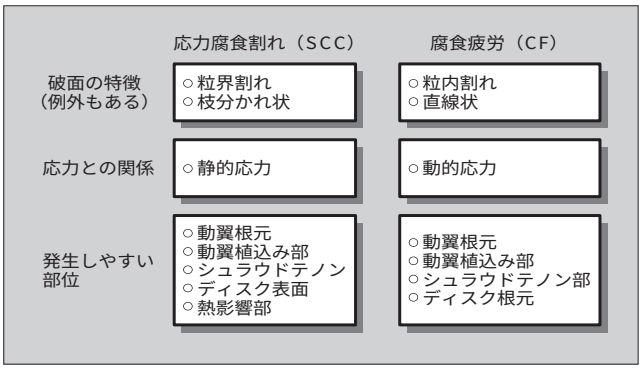


図３　応力腐食割れと腐食疲労



地熱流体中に含まれる不純物の組成は地域によって大きな差があるが，一般的には不凝縮ガスの大部分は炭酸ガス（CO_2）であり，次いで多いのは硫化水素（H_2S）である。そのほかアンモニア，メタン，窒素，水素などが含まれることが多い。蒸気に溶解している不純物としては，塩化物（XCl），硫酸塩（XSO_4）などの腐食性成分のほか，シリカ（SiO_2），炭酸カルシウム（$CaCO_3$）などのようにスケール付着の原因となる成分がある。地熱蒸気中に含まれる不純物がタービン部材に与える影響を**図２**に示す。

③　地熱タービンの応力解析と評価

厳格な水質管理が行われる火力発電の場合と異なり，地熱タービンはきわめて腐食性の高い環境で使用されるので，材料の選定や応力の評価に際しては腐食にまつわる問題，特に応力腐食割れ（SCC：Stress Corrosion Cracking）や腐食疲労（CF：Corrosion Fatigue）に対する配慮が非常に重要である。

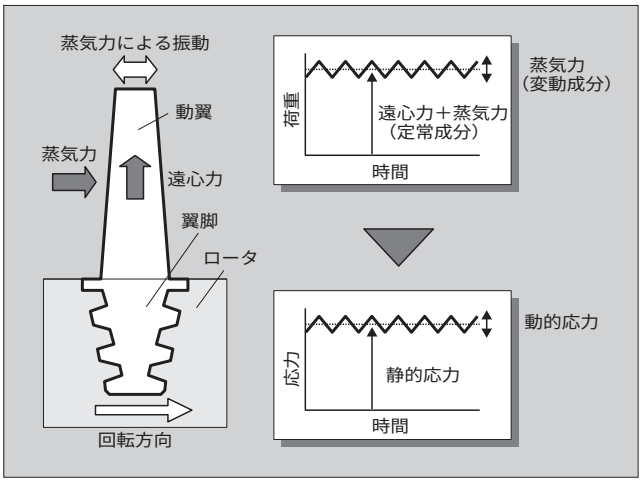
応力腐食割れは腐食環境のもとで静的応力（引張応力）が作用する部位に割れが発生・進展する現象である。また，腐食疲労は腐食環境のもとで動的応力（繰返し応力）が作用する部位に割れが発生・進展する現象である（**図３**）。動翼やロータなどの実際のタービン部品には静的応力と動的応力が同時に作用することが多く，応力腐食割れと腐食疲労の両方に対する配慮が必要となる。

動翼とロータのはめあい部は，応力腐食割れや腐食疲労が比較的発生しやすい部位である。その理由としては，形状が複雑であり応力集中により比較的高い応力が作用すること，部材間のすきまに不純物がたい積し著しく腐食環境を高めることなどがあげられる。応力腐食割れや腐食疲労の発生には，応力だけではなく蒸気の温度や湿り度が大きな影響を与える。一般には，蒸気がウィルソン線（4～5 %湿り度）を横切って膨張する乾湿交番域において応力腐食割れや腐食疲労が発生しやすいことが知られている。

動翼やロータなどの回転部品に発生する応力腐食割れや腐食疲労は，地熱発電プラント全体の運用に重大な影響を及ぼすので，設計には特に細心の注意を払う必要がある。

運転中，動翼には遠心力と蒸気力による応力が重畳して作用する。遠心力は定常荷重であるが，蒸気力は定常成分と非定常成分からなる変動荷重である。したがって動翼に働く応力は，遠心力および蒸気力の定常成分による静的応力と，蒸気力の非定常成分による動的応力が重畳したものと考えることができる（**図４**）。実際の解析では便宜上，静的応力と動的応力を個別に解析・評価している。

図４　動翼に作用する応力



(1)　静的応力の解析と評価

遠心力および蒸気力による静的応力の分布は，有限要素法（FEM）計算により求めることができるが，局所応力をより正確に把握するためには，製作公差による荷重分担の変化や，工場出荷前に安全性確認のために行う過速度試験の影響を考慮する必要がある。**図５**は 120 %過速度試験前後における動翼はめあい部（翼脚）の静的応力分布の変化を弾塑性解析により求めた結果である。過速度試験により局所的な塑性変形（降伏）が生じ，その結果応力ピークが緩和されることが分かる。120 %過速度試験を実施することにより，応力ピークを材料の耐力の約 70 %のレベルに抑えることができる。

応力腐食割れに対する材料の強度を調べるため，富士電機は世界各地の地熱蒸気中で応力腐食割れ試験を実施してきた（**図６**）が，動翼材として使用されている 13 % Cr 鋼およびロータ材として使用されている 1 % CrMoNiV 鋼は，耐力近傍の応力においても応力腐食割れを発生しないことが確認された（**図７**）。

地熱蒸気中に含まれる種々の腐食性不純物の影響を調べ

図５　過速度試験前後における翼脚の静的応力分布の変化

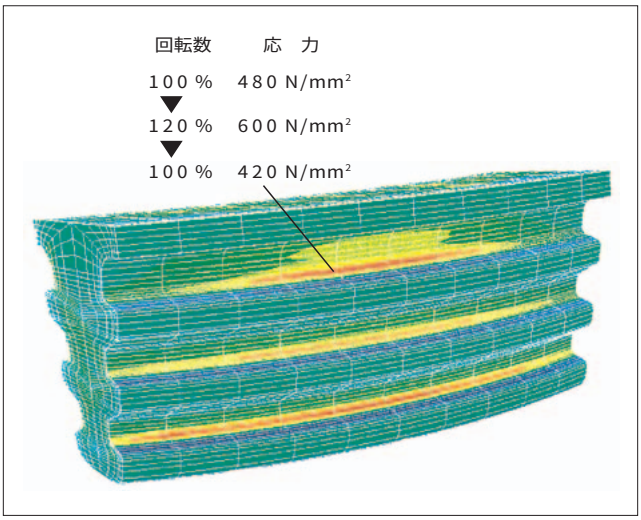
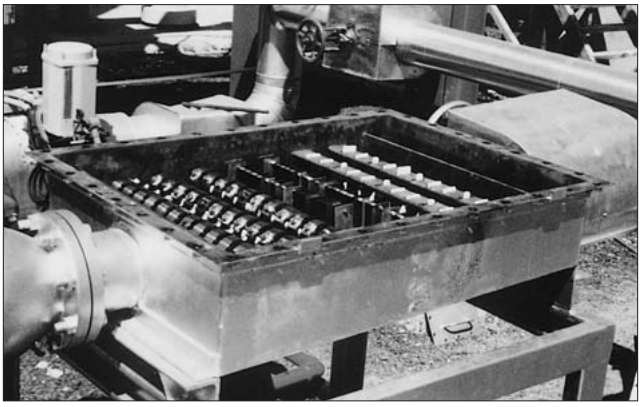


図６　地熱サイトにおける材料試験



るために，実験室の人工腐食雰囲気中で応力腐食割れ試験を行った。試験結果を**図８**に示す。試験結果から，硫化水素（H_2S）単独では高応力のもとでも応力腐食割れを発生しないが，酸素（O_2）や塩素イオン（Cl^-），硫酸イオン（SO_4^{2-}）が加わると応力腐食割れが発生することが分かった。これは部材表面に生じた硫化鉄の不働態皮膜が酸素や塩素イオン，硫酸イオンなどの作用により破壊されるためと考えられる。実験室での試験はきわめて過酷な腐食環境中で行った一種の加速試験であり，実際の使用条件とは異なるが，地熱蒸気中に一般に存在する硫化水素に酸素や塩素イオン，硫酸イオンが加わることによって，応力腐食割れが発生しやすくなることが分かる。

(2)　動的応力の解析と評価

運転中の動翼は蒸気力の変動成分（蒸気励振力）により励振される。動翼の固有振動数が蒸気の励振周波数と一致すると翼は共振し，大きな動的応力を発生する可能性がある。共振時の動的応力は一般に下式により表される。

$$\sigma a = (\pi / \delta) \cdot S \cdot H \cdot \sigma b$$

σa：共振時の振動応力

δ　：対数減衰率

S　：励振係数

H　：モード係数

図７　地熱蒸気中での１３％Cr 鋼の応力腐食割れ試験結果

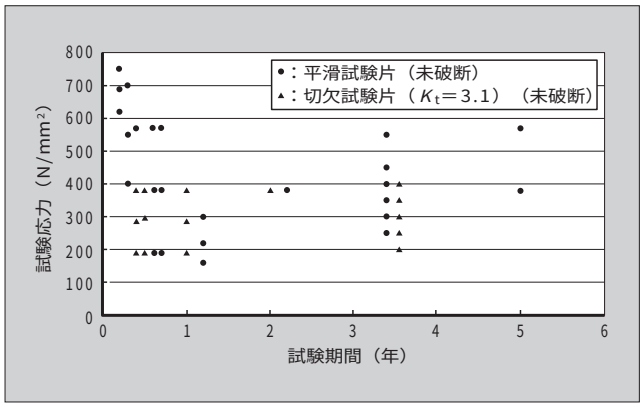
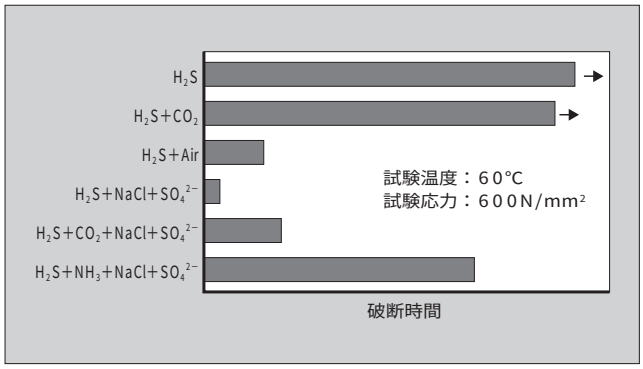


図８　実験室での１３％Cr 鋼の応力腐食割れ試験結果



σb：蒸気力による静的応力

蒸気励振力は主として周方向の圧力変動によって生じる。蒸気励振力の大きさを調べるため，三次元流れ解析を行い，動翼入口における周方向の圧力変動を求めた（**図９**，**図10**）。こうして得られた圧力変動に対してフーリエ解析を行い，回転数の整数倍（ハーモニクス）の励振周波数ごとに励振係数（蒸気力の変動成分と定常成分の比）を求めた結果を**図11**に示す。図から分かるように，励振係数はハーモニクス次数（励振周波数と回転サイクルの比）が小さいほど大きく，６次以上のハーモニクス次数に対しては急速に小さくなる。モデルタービン試験や実機における測定結果からも同様の結果が得られている。

モード係数は翼の形状や振動モードによって決まる関数であるが，FEM 計算により各振動モードごとのモード係数を求めることができる。このようにして求めたモード係数は一般に振動次数が高くなるほど小さくなることが知られている。

上記の解析条件に基づいて，FEM 計算により共振時の動的応力を求めた結果を**図12**に示す。解析結果から分かるように，一般に低次ハーモニクスとの共振は比較的大きな動的応力を生じるので，運転中の共振を確実に回避する必要がある。これに対して高次ハーモニクスとの共振は問題となるような動的応力を生じないので共振回避の必要はない。富士電機はシュラウドがないフリースタンディング動翼に対しては，８次ハーモニクス以下の共振を回避する設計としている。

図９　翼列の流れ解析結果

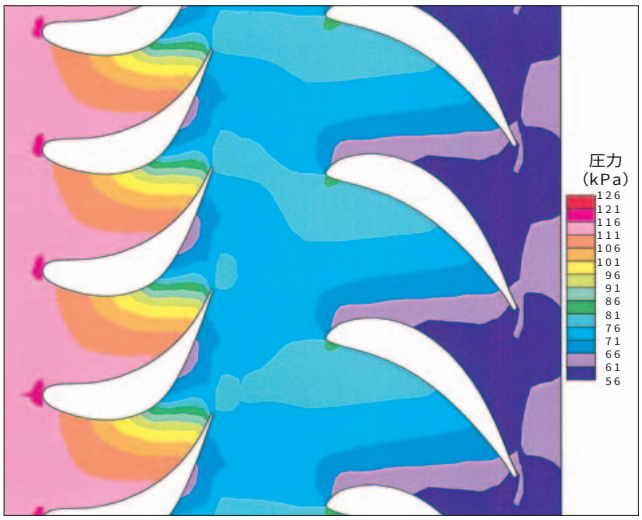


図 10　動翼入口における周方向圧力分布

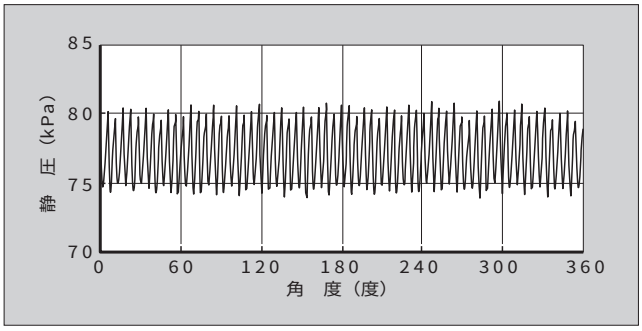
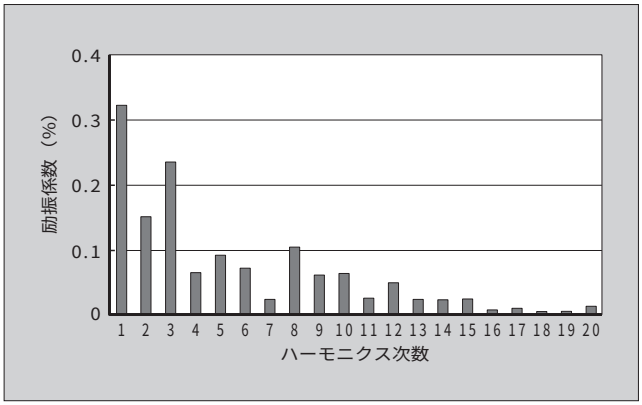


図 11　フーリエ解析による励振係数の分布



地熱蒸気中では材料の疲労強度が著しく低下する。**図13**は世界各地の地熱サイトおよび実験室で行った腐食疲労試験の結果を示している。設計応力は地熱蒸気中での疲労強度の低下を考慮して，十分小さな値に抑えている。

4　あとがき

地熱タービンの運転環境は，通常の火力タービンとは比べものにならないほど過酷である。このような過酷な環境

図 12　共振時の動翼の応力

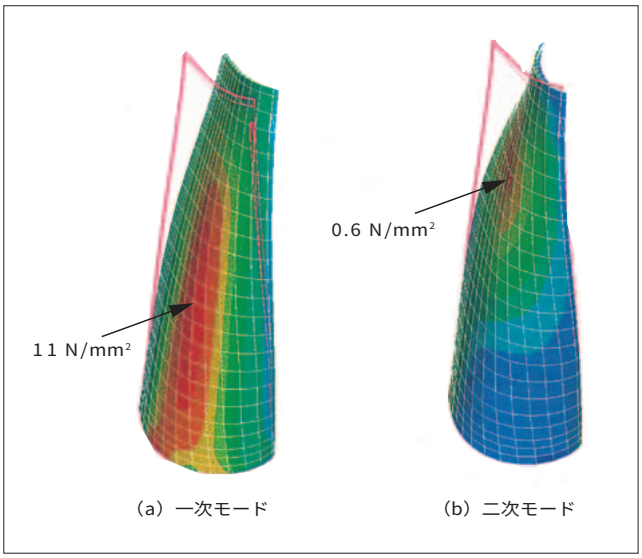
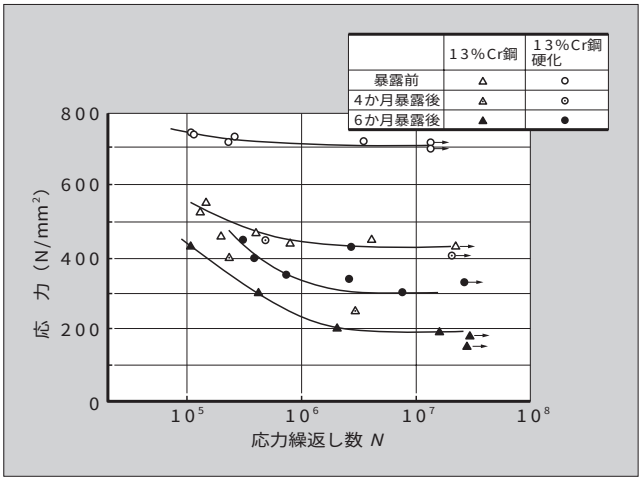


図 13　地熱蒸気に暴露した 13 % Cr 鋼の疲労強度



のもとで，長期にわたって安定な運転を続けるためには，材料選定，設計，製作，運転，メンテナンスの各段階で細心の注意を払うことが必要である。

富士電機の地熱タービンは，高い信頼性によって地熱発電プラントの安定運転に寄与してきた。今後ともユーザー各位のご指導を得て，たゆまぬ改善を続けていく所存である。

参考文献

(1)　酒井吉弘：地熱発電タービンの腐食とエロージョン，火力原子力発電，Vol.50，No.7，p.14-19（1999）
(2)　加藤佳史・和泉栄：地熱発電用タービンの最新技術，富士時報，Vol.68，No.10，p.576-583（1995）
(3)　森田益夫：地熱発電プラント用材料の腐食試験，富士時報，Vol.55，No.8，p.523-529（1982）
(4)　Traupel, W. : Thermische Turbomaschinen, 3.Auflage, Vol.II, Springer-Varlag（1982）

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。