

蒸気タービンロータの異種材料溶接技術

特集

今村 清治 (いまむら せいじ)

和泉 栄 (いずみ さかえ)

飯塚 実 (いづか みのる)

1 まえがき

コンバインドサイクルプラントや IPP (電力卸供給事業者) プラントの市場拡大に伴い、中容量蒸気タービンの発注台数が近年増大している。従来の中容量機の標準構成は、高中圧一体形タービンと低圧タービンをタンデムに結合した 2 気筒 2 流排気式であったが、長大低圧翼の開発に伴い、初期コスト、保守コストの安価な高中低圧一体形タービンに対するニーズが高まっている。

蒸気タービン用ロータ材は、使用される部位により要求される材料特性が異なる。すなわち、軸径は小さいが高温下で使用される高中圧部においては高温クリープ強度が、また使用される温度は低い軸径が大きい低圧部においては引張強度と靱性が、それぞれ要求される。

1% CrMoNiV 鋼は良好な高温クリープ強度を持ち低コストで製作可能なロータ材であるが、引張強度・靱性はそれほど高くない。3.5% NiCrMoV 鋼は高い引張強度と靱性を持ち低コストで製作可能なロータ材であるが、高温下では脆化する特性がある。2% CrMoNiWV 鋼は良好な高温クリープ強度と高い引張強度と靱性とを併せ持つロータ材であるが、製作プロセスが複雑で製作コストが高い。

図 1 はタービンの構成とロータ材の使用範囲を示したものであるが、それぞれのロータ材には前述した強度特性があるため、従来は上段に示す材料選定がされていた。

本稿では、中容量高中低圧一体ロータ材を低コスト、短納期で提供するために、図 1 の下段に示す 1% CrMoNiV 鋼と 3.5% NiCrMoV 鋼の異種材料を溶接する技術を開発したので紹介する。

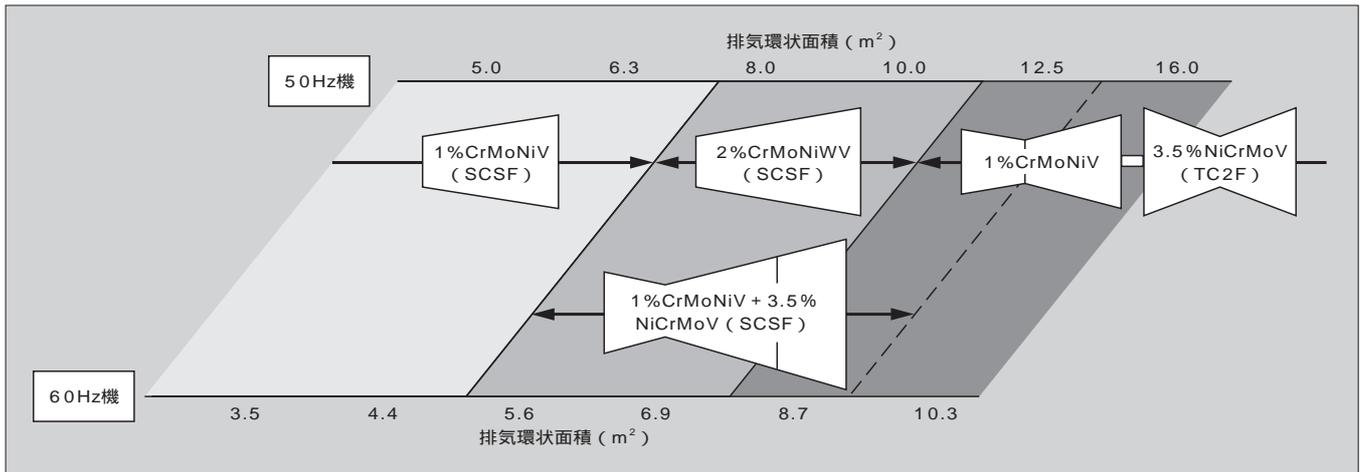
地熱タービンは、蒸気中に腐食性物質が含まれる環境下で使用されるため、経年的にロータ材は腐食減肉し、高応力の作用する翼溝部には腐食ピットやクラックが生じる場合がある。本稿では、腐食により損傷した地熱ロータ材 (1% CrMoNiV 鋼) の補修技術として、耐腐食性に優れた 12% CrMoV 鋼の肉盛溶接についても開発したので併せて紹介する。

2 ロータ溶接

2.1 異種材料の溶接

高温・高中圧側ロータの 1% CrMoNiV 鋼と低温・低圧側ロータの 3.5% NiCrMoV 鋼は、上述したように蒸気タービンロータとしての使用条件が、それぞれ異なるため

図 1 タービンの構成とロータ材の使用範囲



今村 清治

レーザ加工、溶接加工の研究・開発に従事。現在、富士電機アドバンステクノロジー(株)生産技術研究所担当課長。レーザ加工学会会員。



和泉 栄

蒸気タービンの設計に従事。現在、富士電機システムズ(株)川崎工場火力タービン部課長。



飯塚 実

製缶・溶接構造物の製造技術および製造合理化業務に従事。現在、富士電機システムズ(株)川崎工場製造部。

に要求される機械的特性も異なる。図2は、両ロータの突合せ部の概略図である。すなわち、両ロータの継手部は異種材料同士の溶接となる。このロータ材はCr, Moなどの合金成分を含有し、比較的炭素量も多いことから溶接部において焼入れ性が高くなる。溶接のままでは靱性も乏しく、低温割れの発生も起こりやすくなるので、実際の溶接施工では溶接棒の選定、パタリング溶接（下盛溶接）、初層裏波溶接（第一層目完全溶け込み溶接）、多層溶接、そして予熱や後熱処理など溶接プロセスの一つ一つが重要な要素となる。

溶接方法はワイヤ供給式の狭開先 TIG 溶接方法（狭い開先部内を不活性ガス雰囲気にして非消耗式タングステン電極と供給ワイヤとによりアーク溶接する方法。狭開先溶接については141ページの「解説」参照）を用いた。供給ワイヤには1% CrMoNiV 鋼と3.5% NiCrMoV 鋼の中間成分となる組成のものを選定した。

まず1% CrMoNiV 鋼側の突合せ面にパタリング溶接を行った。一種の中間層として、3.5% NiCrMoV 鋼との溶接において成分調整の働きをするためである。溶接の際は急冷硬化を防ぐため予熱を行った。これは拡散性水素を放出して低温割れ防止に有効となるためである。そしてパタリング溶接後は、延性・靱性の回復、硬度の低減のため後熱処理を行った。

図3に異種材料溶接前のロータの外観を示す。

1% CrMoNiV 鋼側ロータと3.5% NiCrMoV 鋼側ロータの溶接前突合せ作業はロータの軸心調整後に、両ロータのつなぎ固定のためのブリッジ溶接や狭開先底部の仮付け溶接など、いずれも異種材料溶接となる。このような箇所は短時間の溶接となるため急冷硬化しやすい。したがって、異種材料溶接となるすべての箇所に対して、予熱の考慮が重要となる。

タービンロータは、高速回転（3,000/3,600 r/min）するため狭開先部の初層溶接では、内径側継手部全周において裏波が出ることが必要となる。溶接時におけるバックギ

ガス（Ar ガス）の給排気によるロータ内径側空洞部の内部ガス圧力（ゲージ圧）の最適化と低い酸素濃度（およそ0.5%以内）の維持が必要で、これが裏波の安定化に重要となる。図4は、ロータ内径側空洞部の Ar バックギングガスの内部圧力が、全周の溶接線（突合せ部）上に事前にあけられた複数個の Ar ガス給排気穴をアークが通過する際に、アークに及ぼす影響を調べたもので、30 ~ 40 Pa を超えない内部ガス圧力のときにきわめてアークが安定した。ここでの裏波溶接は、溶け落ち（穴あき）や裏波途切れの発生がロータ製作のうえで致命的なものとなるため最も溶接難易度の高い箇所となった。次に、2層目以降の多層溶接（67層）は正味アーク溶接時間だけでも30 ~ 40時間にも及ぶ。ここでは入熱量、ワイヤ溶着量、ビード高さなどの選定において、溶接部の結晶粒サイズの肥大化・脆化などの防止配慮をした最適条件出しが重要となった。図5に多層溶接部の断面組織（溶接後熱処理後）を示す。多層溶接では狭開先面の片方の側、すなわちパタリング側の溶接部は、ほぼ同材質の溶接となり、もう片方の側の3.5%

図3 溶接前のロータの外観

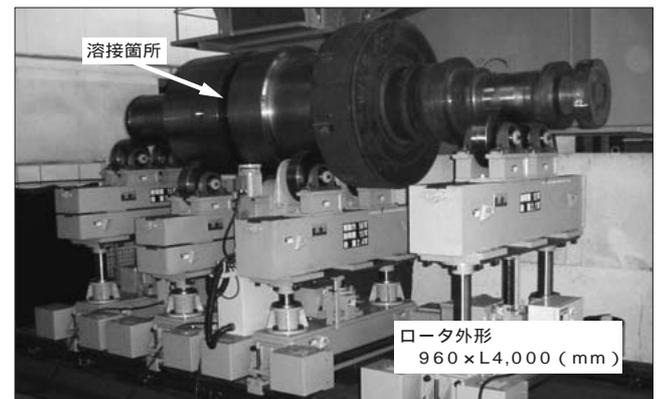


図4 アーク変動と内部ガス圧力

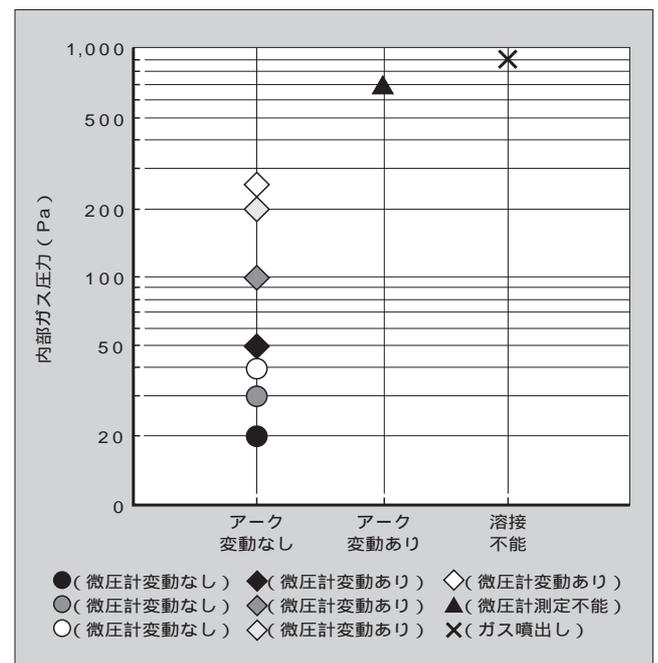


図2 両ロータの突合せ部の概略図

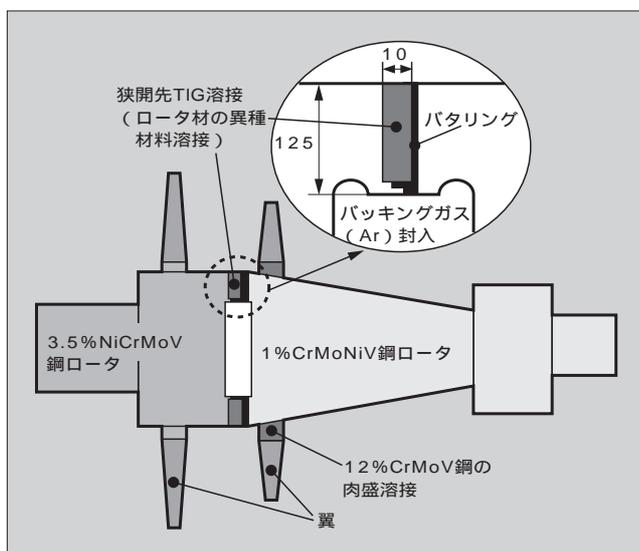
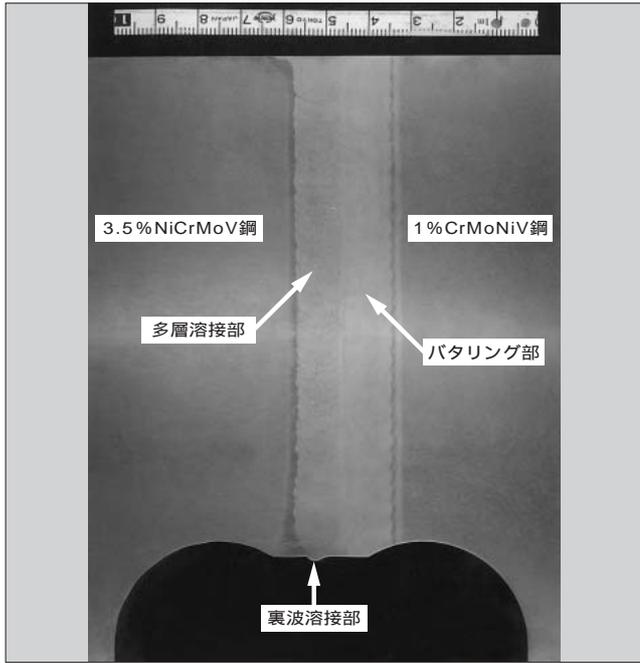


図5 狭開先溶接部の断面 (図2の○内に対応)



NiCrMoV 鋼側では異種材料溶接部となる。本溶接では狭開先1層1パス溶接であるので、この両面の溶接部は異なる希釈率を呈することになり予熱温度の選定が重要となる。

2.2 溶接部の検査

溶接部検査の方法は、非破壊検査方法ではX線透過撮影試験、超音波探傷試験、X線残留応力測定、溶接部変形量の測定など、破壊検査方法では引張試験、衝撃試験、回転曲げ試験、断面組織検査、応力腐食割れ試験などである。

非破壊検査では、初層溶接部にX線透過撮影試験を、また多層溶接部には超音波探傷試験 (Ultrasonic Testing : UT) を用いた。このうちの TOFD 法試験^注では、溶接内部におけるきず (気孔など) の深さ方向の位置やそのサイズが 1mm の精度で検出でき、これを超える溶接内部のきずは検出されなかった。

図6はロータ材の特性と、溶接部の引張強度、衝撃試験の結果である。各溶接箇所を切り出した試験片から調べたもので、ロータ材の特性値 (規格値) を上回る結果を得た。

図7における溶接後熱処理後の溶接部の硬さ分布では3.5% NiCrMoV 鋼側の HAZ (熱影響部) で最も高い硬さを示すが、これは異種材料間における浸炭現象と考えられ機械的特性にはまったく影響を及ぼすものではなかった。

③ 地熱タービンロータの肉盛補修溶接

蒸気中に腐食性物質が含まれる環境下で地熱タービンは使用されるため、ロータ材翼溝部は経年的に腐食を生じる

注 TOFD 法 : 飛行時間回折法。きずの上端と下端で発生した回折波の到達時間差からきずのサイズ・深さなどを調べる方法

図6 ロータ材および溶接部の機械的特性

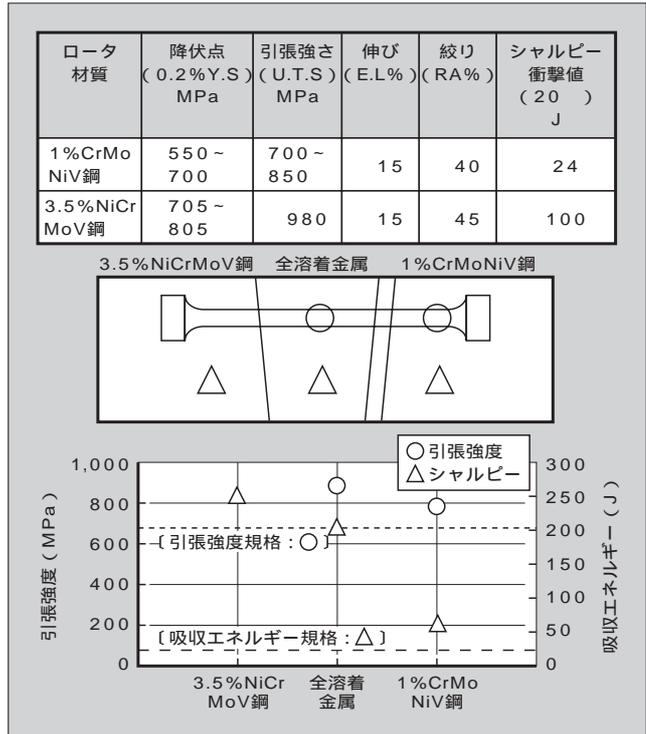
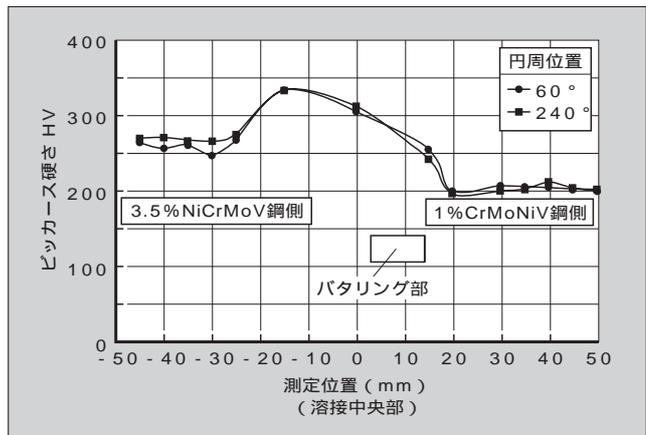


図7 溶接部の硬さ分布



場合がある。そこで、この翼溝部を補修する溶接方法について紹介する。

この翼溝部はロータ本体側の1% CrMoNiV 鋼の翼溝部を補修するもので、まずロータ本体側劣化部を切削削除した後、下盛溶接 (5% Cr 鋼)、肉盛溶接 (12% CrMoV 鋼)、溶接後熱処理 (焼鈍)、翼溝加工という工程で行われる。

3.1 溶接方法の選定

肉盛溶接方法としてはサブマージアーク溶接を選定した。この溶接方法は、太径のワイヤを使用し、かつ大電流が使用できるので高能率・高品質の特長を持つ。

3.2 予備実験

溶接ワイヤ、溶接条件および溶接後熱処理の組合せを変えた平板溶接実験を行い、各組合せにおける溶接部の機械

表 1 肉盛溶接部の機械的特性試験結果

	規格値	部 位		
		母材 (1%CrMoNiV鋼)	母材と溶接境界部	溶接部
引張強度	686 ~ 833 MPa	686 ~ 833 MPa	690 ~ 698 MPa	849 MPa
降伏点	549 ~ 686 MPa	565 ~ 577 MPa	549 ~ 566 MPa	692 MPa
伸 び	15 %以上	21.5 ~ 22.8 %	15.3 ~ 16.3 %	13.3 ~ 15.5 %
絞 り	40 %以上	70.7 ~ 71.6 %	69.7 ~ 72.4 %	52.7 ~ 56.1 %
吸収エネルギー	24 J以上	46.2 ~ 55.8 J	60.8 ~ 95.1 J	30.0 ~ 39.3 J
ビッカース硬さHV	-	190 ~ 220	220 ~ 270	260

図 8 ロータ翼溝部の肉盛補修溶接の施工状況

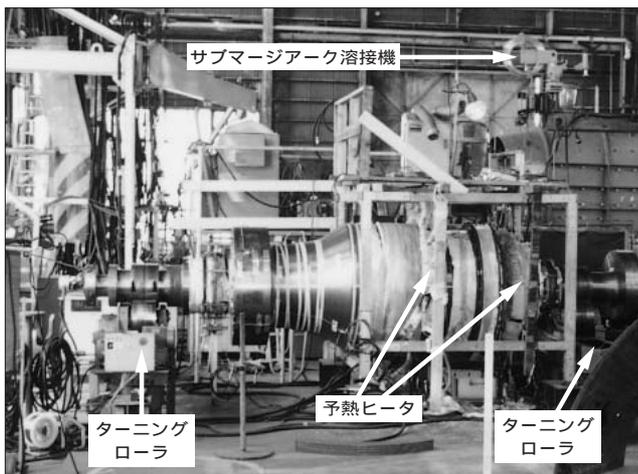
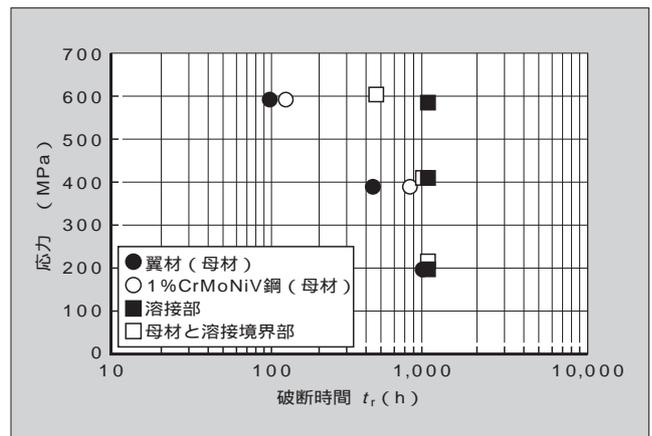


図 9 肉盛溶接部の応力腐食割れ試験結果



的特性の確認により最適条件の絞込みを行った。その結果、下盛材 5 % Cr 鋼，本溶接材 12 % CrMoV 鋼，焼鈍温度 720 の組合せにおいて継手引張強度 729 MPa (母材強度 686 ~ 833 MPa)，衝撃試験のシャルピー吸収エネルギー 24.4 ~ 108.4 J (母材吸収エネルギー 23.5 J 以上)，溶接部のビッカース硬さ HV190 ~ 265 という機械的特性が得られ，実機への適用が可能であることを確認した。

3.3 実物大モデルによる肉盛溶接実験

予備実験により決定した施行条件により，実物大モデルの肉盛溶接実験を実施した。肉盛溶接は，ロータを回転ローラ上で水平姿勢で回転・予熱しながら行う。特に溶接後熱処理 (焼鈍) もロータを回転させながら実施した。ロータ翼溝部の肉盛補修溶接の施行状況を図 8 に示す。溶接後熱処理後，肉盛部を粗引き加工した後，超音波探傷試験 (UT) および残留応力測定を実施した。UT 結果では判定基準である 1 mm 以上の欠陥は検出されなかった。また，肉盛溶接部の機械的特性試験およびその他評価試験では，引張試験，シャルピー衝撃試験，硬さ試験，組織観察，Cr 量分析，応力腐食割れ (Stress Crack Corrosion : SCC) 試験，腐食疲労試験を実施した。いずれも良好な結

果が得られたが，その主な結果は表 1 および図 9 に示すとおりである。SCC 試験では，溶接部およびその境界部は，いずれも母材 (ロータ材 : 1 % CrMoNiV 鋼と翼材) の破断時間を上回っている。これは溶接表層部における不動態皮膜 (Cr 酸化物) の変化により腐食モードが，応力集中を受けやすい局部腐食モードから受けにくい全面腐食モードに移行したことによるものと考えられる。

以上から，翼溝部への肉盛溶接が下盛材 5 % Cr 鋼，肉盛溶接材 12 % Cr 鋼，焼鈍温度 720 の組合せにより，実機ロータへの補修が可能であることを確認した。

4 あとがき

本稿では，中容量蒸気タービンの高中低圧一体形タービンを製作するうえで欠かせない高中圧側ロータと低圧側ロータの異種材料を溶接する技術，および地熱タービンなどのような腐食環境下で経年腐食した場合のタービン翼溝部の補修を肉盛溶接で対応する技術について紹介した。

今後は，高中低圧一体形タービン，すなわち 1 ケーシング再熱・非再熱タービンへの適用，および地熱ロータ補修への適用を図っていく所存である。



*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。