サクシヨンロール素材の残留応力と加工性

大平洋製鋼(株) 瀬尾 省逸, 高橋 博彦

Residual Stress and Machinability of Pipe Materials for Suction Roll Shells

Shoitsu Seo and Hirohiko Takahashi

Pacific Steel MFG, Co., Ltd.

Suction hole drilling decreases Residual stress of Pipe materials quite a lot, so a residual stress level of working Suction roll is very low. Stress relief occurs at the drilling depending on increasing of drill holes. Therefore, ununiform drilling makes a trouble like as roll distortion because of ununiform stress relief.

Good machinability of pipe materials are important for making good Suction rolls. Forged materials are specified in uniform and defects free structure, therefore, forged pipes are the better materials than cast pipes in order to drill the suction holes.

New materials need not only good corrosion resistance and high fatigue strength but also good machinability. If there is a confused suction hole pattern, effective fatigue strength decreases depending on stress concentration.

To use the technical data of a material for designing the Suction rolls, machinability is the most important characteristic of the pipe material.

Keywords : Residual stress, Sachs method, Ring cut method, Drillability
2 Phase alloy, Corrosion resistance, Stress concentration

1. はじめに

サクシヨンロールは弱い腐食雰囲気のもとで引張り-圧縮の繰返し応力を受け、1秒間に6回程度の速度(最高の場合)で回転するロールである。それ故に、ロール用素材に要求される性質としては、(1)耐食性(2)高疲労強度の2点がある。薄肉パイプの形状をしているこの材料は、一定の負荷応力下で長時間使用された段階で折損したという事故例が多数報告されている^{1),2)}。従来の鑄造系ロールの折損原因として著者ら³⁾は内在している素材の欠損を起点とする疲労破壊であるとの報告をしているが、他の報告は(1)腐食説(2)残留応力説の2説に大別され、それぞれ結論に結び付く有力なデータを示している。

Thompson⁴⁾はサクシヨンホールの周辺が腐食し、応力集中源として作用している状況を示している。

Castillo⁵⁾は腐食疲労強度を改善する方法として残

留応力を低減することが対策として有効であるとしている。また、Hiraishiら⁶⁾は材料開発の方向として、残留応力の低減対策が必要であると主張するとともに、耐食性のよい高Cr系の材料を利用し、極端に残留応力のレベルを下げる熱処理を採用した材料を開発、利用している。

しかしながら、折損そのものは最終的には疲労破壊である点は共通していると思われる。このような解析に基づき、耐食性のよい高Cr系の材料が利用されたり、特殊熱処理を採用できる材料が利用されている。

一方、サクシヨンロールの製造工程では材料の機械加工性が実用上極めて大切な特性である。すなわち、サクシヨンホールの穴明け加工の際、加工性の悪い材料ではドリルの折損やパターンの乱れが起こり易い。加工むらにより、パイプ自身が加工後に変形し、ロールとして使用できなくなったり、乱れたパターンが応力集中源として作用し、サクシヨンロールの疲労破壊

が起きる直接原因になることもある。

ところで、サクシヨンロールが使用不可能となるのは、折損事故によるものであり、著者の行った鋳造系ロールに関する15例の折損事故原因調査によると、いずれも素材に内在した欠陥を起点として多数の微細な疲労クラックが発生し、材料の有効断面積の減少により疲労破壊が急速に進行したために折損する⁷⁾。したがって、優れたサクシヨンロール用素材としては、高い疲労強度が条件であるが、無欠陥な素材で造られたロールに必要な疲労強度はドリル穴の応力集中係数 $=4.0^8)$ を考慮すると、ほとんどのロールは 10 kg/mm^2 程度以下の発生応力が採用されている。現在多用されている素材の中には腐食疲労強度の値として 20 kg/mm^2 のものも存在しているが、それらの材料においても折損事故が発生しているという事実は、もっと正確に議論されなければならないと考える。

本報告はサクシヨンロール用素材に要求される条件として、残留応力ならびに機械加工性をどのように評価すべきかについて解説するとともに、これらの特性を改良した新材質の特性について紹介したものである。

2. サクシヨンロール素材における残留応力の挙動

残留応力は素材が熱処理される際の冷却過程において、表面と内部の温度差が原因で発生する。したがって、冷却速度が大きいほど冷却途中の温度差が大きくなるために残留応力の絶対値は大きくなる。

通常のステンレスでは耐食性を改善するため、溶体化処理という高温加熱とそれに続く急冷処理が必要で、このために残留応力はどうしても高くなる。この対応としては、急冷処理の後に焼き戻し加熱ができる成分を持ったステンレス鋼を使用することが必要である。

ここでは、最も高い残留応力を発生する熱処理を施した素材から制作されるサクシヨンロールには、どの程度の応力が残留するかについて調査した。

2.1 残留応力の挙動を知るための実験

熱処理で大きな残留応力が発生したサクシヨンロール素材に穴明け加工を行った場合についてモデル実験を行った。実験の条件は表1の通りであり、穴明けパ

表1 実験の条件

素材寸法	$\phi 124 \times \phi 100 \times 210$
素材材質	SUS 304
熱処理	$1,000^\circ\text{C}$ WQ
ドリル径	$\phi 4$

図1 穴明けパターン

ターンは図1に示す正方形モデルとした。

素材のSUS 304材は以前クーチロールに使用された代表的なステンレス鋼であり、モデルロールの内径側での開口率は約31%とした。

2.2 実験方法

残留応力の測定はSACHS法（内層除去法）とRING CUT法の代表的な2つの測定法によった。実験の手順は図2に示すように、同一の熱処理をした2本のパイプを使用し、穴明けにより解放された残留応力の量を測定するものである。

図3は焼入れ熱処理直後のパイプの残留応力の分布状態を示したもので、内径側で $+7\text{ kg/mm}^2$ 、外径で -12 kg/mm^2 の値となっている。この値は実用サイズのオーテスナイト系のパイプで測定された場合のものと極めて良く一致している。写真1は図1の穴明けパターンにより全面に穴明けを実施したミニチュア・サクシヨンロールと、応力測定用に糊付した静歪み測定用ゲージを示したものである。

図4は2本のパイプのそれぞれの端面から採取したリングにより、円周方向の残留応力を測定した結果から残留応力の分布状況を予測したもので、2本のパイプがほぼ同一の残留応力値を持っていることが分る。

図5は穴明けの開始から終了までの間にパイプが変形していく様子を示したもので、残留応力の開放が穴明け量の増加、あるいは位置に依存して進行していることが分る。この歪みの変化量から、…パイプが変形した様子は図中の参考図であり…、径の増大と長手方向の縮みとして残留応力の開放の効果が現われたことを現している。

図6は穴明けしたパイプに対して、SACHS法により残留応力を測定した結果を示したもので、穴明けされたことにより全体の残留応力は最内層付近でわずかに高いプラスの応力を残す以外は1/5程度に減少する

図2 穴明けによる残留応力の変化の実験手順

図3 ミニチュアパイプ材のザックス法による残留応力分布

図4 ミニチュアパイプ材のリングカット法による残留応力分布

ことを示している。

パイプ素材をドリル加工する過程で、パイプ材の残留応力は開放される方向に変化し、約31%の開口率の場合には残留応力の絶対値は1/5程度に減少した。この事実は実際に稼動しているサクションロールでは極めて低いレベルの応力しか残存しない事を示している。さらに、サクションロール材にとって残留応力が問題になるのは、ドリル加工の途中に残留応力の開放と同時にロールの寸法変化が発生している事である。

したがって、素材メーカーが留意しなければならないことは、機械加工する際、いかにスムーズに全面を均一な条件で実施できる材料とするかである。

ドリル穴加工により残留応力は減少するので、これまで“破壊の原因は残留応力である”とする残留応力説で言われていた応力は加工後の応力ではなくパイプ素材そのものの残留応力が評価されていたものと考え

写真 1 穴明けを実施したミニチュアロールの外観

られる。この実験結果は、ドリル加工されたサクシヨ
ンロール材の段階での残留応力は可なり低いことを示
しており、残留応力が応力腐食あるいは直接疲労に関
与すると考えることは極めて困難であると言える。

ドリル加工の表面においては加工硬化の現象もある
が、この加工層はサクシヨンホールの全面に存在し、
しかも 0.3 mm 程度の厚さである¹⁰⁾。この加工面にお
ける残留応力を X 線法により測定した結果、+3 kg/
mm² の値であった。この加工硬化層はサクシヨンロー
ルの表面付近における腐食の進行、あるいはマイクロ
クラックの発生に対して作用する可能性を残している
ものの、多くのサクシヨンロールの折損事故がロール
のほぼ中央で起きているという事実を説明できない¹¹⁾。

ドリル加工表面における加工硬化現象は、全てのサ
クシヨンホールに共通の条件であるため、応力腐食の
原因に成り得るとすれば全面が腐食する可能性がある。
しかしながら、写真 2 が示すようにツイストドリルで
加工された、13 Cr 系の比較的粗い仕上げ面の約 10 年
使用後に折損したロールについてはホール内面に全面
腐食を観察することはできなかった。部分的に発生し
ている腐食孔は大部分が鑄造欠陥、あるいは非金属介
在物を起点としている事も観察されている³⁾。

図 5 穴明け途中におけるパイプ材の変形

図 6 ミニチュアサクシヨンロール材のザックス法による残留応力分布

写真 2 13Cr系折損鑄造ロールのドリルホールの内面

図 7 各素材の5%硫酸による腐食減量の比較 (JIS G 0591)

3. 良快削性の新材質の開発¹²⁾

3.1 新材質の耐食性

図7はJIS G 0591による5%硫酸の沸騰溶液を用いた腐食試験の結果である。比較材として、これまでサクシヨンロールとして使用されている各種素材を用いた。新しく開発した素材は鍛造による21Cr系と表示したものである。耐腐食性は合金成分のCr, Ni, Mo量が多いほど良好であり、粒界の腐食が支配的となるこの試験方法では、Cuによる効果が極めて大きいことが分る。この試験から得られた耐食性の傾向は白水での耐食性をよく表現していると言える。

3.2 機械加工性の比較検討

図8はドリル穴を明ける際、ドリル先端に発生するトルク(回転反力)およびスライト(前進反力)を測定し、切削抵抗を判定するための試験装置である。

機械加工性を比較する場合、基準として利用すると最も良く理解できる材料としては13Cr系の鑄造材がある。この材料を使用したサクシヨンロールは最も多く、ドリリング条件はほとんどの機械でマスターされ

図 8 トルクおよびスラスト測定のための試験装置

ていると判断できるからである。

図9は550 rpm, 0.05 mm/rev.の加工速度で8 mmドリルにより穴明けした場合の加工抵抗が、標準となる鑄造材の13Cr,あるいは鍛造材の18Cr系2相合金とどのように異なるかを測定した数例を示したものである。トルクおよびスラスト力は低い値ほど切削抵抗が低いのでその平均値が低いことが望ましい。一方、刃先に振動が発生するような状況は刃先の劣化の原因

図 9 試験装置によるトルクとスラストの測定例

- 1: 鑄造 13Cr 素材の場合
 2: 鍛造 2 相合金の場合
 3: 鍛造新材料の場合

図 10 500 rpm の場合の鑄造材と鍛造材の切削特性

となるため望ましくない。

スラストおよびトルクの変化を示す測定曲線にはノコギリ刃状の応力振幅が見られるが、これは刃先近傍で加工硬化が起き、次第に加工抵抗が増加していく様子を示したもので、この応力振幅が少ない材料ほど良い加工性を示す材料である。

図 10 は各材質の 550 rpm の場合の切削抵抗をまとめたもので、平均スラスト、平均トルクおよび平均トルク振幅を見ることで素材の切削特性が表わせることを示している。残留応力を低減させる熱処理のできる従来の 18Cr 系の 2 相合金の場合にも新材料に匹敵する加工性を示しており、機械加工する際の条件設定を

表 2 ドリリングの条件

ドリルの名称	Tin Coated Twist Drill, Cobalt Twist Drill
ドリル径	6 mmφ
切削送り	0.05 mm/rev.
切削速度	224 rpm, 450 rpm, 710 rpm, 1,120 rpm の 4 段階
切削深さ	20 mm
その他の条件	無潤滑

図 11 各種素材の加工条件による加工性の比較

- 1: 鑄造材の 13 Cr 系
 2: 鍛造材の 13 Cr 系
 3: 鍛造材の 2 相合金 (18 Cr-4 Ni 系)
 4: 鍛造材の 2 相系新材質 (21 Cr-6 Ni 系)

することで極めて良好なパターンを得ることができる。

図 11 は加工条件を変化させた場合、各材質の切削特性がどのように推移するかを比較したもので、新材質

は従来の 2 相合金よりも優れた加工性を示している。

なお、ドリリング条件は表 2 のとおりである。

これらの試験により、材料の被削性がドリルにどの

ような応力を与えるかを判定し、材料の総合的な切削特性を迅速に判断することができる。

したがって、潤滑液を使用する実際の加工条件を一義的に決定することはできないが、ここに得られた結果は材料の被切削性が明らかに加工速度により異なり、どの材料も比較的高速の加工条件において、ドリルの寿命が伸びることを予想させる結果を得た。さらに特徴的な事実として、どの材質においても、鍛造材はドリルに対して抵抗が少ないことが分った。

3.3 新材質の機械的性質

表3は良加工性である新材料の室温における機械的性質を示したものである。この材料は2相合金の特徴である低い降伏比（降伏応力／抗張力）を示すが、良好な耐食性のため腐食疲労強度は極めて高い値を示している。

3.4 新材質の顕微鏡組織

写真3に特に快削性を重視した素材の組織写真を示した。微細な析出相をわずかに含んだ”フェライト＋オーステナイト”組織よりなる2相合金である。組織は鍛造されているため、パイプの長手方向に伸びているが、組織の分布状態は場所的な依存性がなく、どの位置をとらえても同様の組織が見られる。この様に組織はどこをとらえても均一であるという特性は鍛造材の特徴で、鑄造材では凝固組織であるデンドライトのために組織が粗く、成分の偏析が存在する。鍛造材では機械的にデンドライト組織が破壊されるため、鑄造材の弱点がすべて改善されることになる。

4. 熱処理残留応力とサクシヨンロールの残留応力

素材であるパイプ材が加工されてサクシヨンロールとして製造され、抄紙機にセットされた後、折損事故を起こす場合の原因について考察する。製造順に要因を並べると次の通りであり、加工条件をいかに重要な要因として取り扱わなければならないかということが理解できる。

- (1) 材料欠陥（パイプ素材固有の特性）
- (2) 熱処理残留応力
- (3) ドリリングによる応力の開放（加工性が悪いとパターンの乱れの原因となる）
- (4) サクシヨンロール素材の腐食疲労強度
- (5) サクシヨンロールに作用する応力（設計応力）
- (6) 使用条件による腐食雰囲気（材料の耐食性）

この6項目のうち、材料欠陥、材料の耐食性、腐食疲労強度および熱処理残留応力は素材メーカーが制御できる項目であるが、ドリリングの際に発生する現象の制御と使用雰囲気についてはユーザーの方々の努力に期待するものである。

ドリリングが熱処理残留応力を1/5以下にするという事実は、不均一な加工が行われると、応力緩和のばらつきが起こるためロールの異常変形が起きることを示している。さらに、加工性が悪い素材をドリリングすると、ドリルの損傷が激しく、応力緩和のばらつきはさらに増幅される。また、ドリルの進む方向性に対しても材料の加工性は影響を与えるため、難加工材で

表3 新材質の機械的性質

0.2%耐力 kg/mm ²	抗張力 kg/mm ²	伸び %	硬度 BHN	衝撃値 kg·m/cm ²	腐食疲労強度 kg/mm ² (10 ⁹ , TAPPI I)
44.6	73.5	24.7	217	6.3	16.7

写真3 加工性に優れた材料の顕微鏡組織（×86, ×345）

図 12 三角形モデルにおける開口率と応力集中係数の関係(8)

はパターンの乱れが発生し易い。

腐食疲労強度はドリルホールが正常に分布する場合を想定しているが、パターンが乱れている部分では応力集中係数が大きく変化する。図 12 は三角形モデルにおいて、開口率の変化が応力集中係数に対してどのように変化するかを示したものであるが、穴が接近した場合、応力集中係数の変化を予測する事ができる⁸⁾。例えば、曲げ応力が 2 kg/mm^2 として設計されたサクシジョンロールにおいては、正三角形モデルではドリルホール最短距離の方向で最大発生応力となり、約 20% の開口率では 8 kg/mm^2 であるが ($\alpha_A = 0.5$)、正三角形の頂点の位置から 2 mm 外れるとその応力は 10.8 kg/mm^2 となり、13 Cr 系では疲労破壊が起こりうることになる。

この場合、残留応力は素材の状態では 3 kg/mm^2 であり、ドリル加工後では 0.6 kg/mm^2 で、疲労強度の 5% 程度にしかならず、疲労破壊にはほとんど関与せず、加工むらによる応力集中の効果が材料の寿命を決定したことになり、材料の加工性がいかに大切かが分る。

5. 結 論

サクシジョンロール素材として何故、加工性が重要であるかについて、残留応力の挙動、あるいは加工条件と素材の関連について考察した結果、次のような結論を得た。

- (1) 加工性の良い材料は機械製造者にとって最も大切な性質であると同時に残留応力を安定化する。
- (2) 残留応力は Drilling 作業が完了すると、パイプ素材に残留していた値の $1/5$ 程度となることが測定された。このことにより、折損の原因として残留応力が作用しているとする残留応力説は否定される。

- (3) 穴明けの加工条件が不適切な場合、発熱による残留応力の局所的な増加あるいは減少が起こり、パイプの変形が発生することになる。
- (4) 耐食性を改善するということは Cr, Ni 合金量の増加により達成されるため、通常は加工性が劣化するが、新しく開発した析出硬化型の耐食合金は優れた加工性を示す。
- (5) 13 Cr 系のステンレス鋼は 2 相あるいはオーステナイト系の物より“ねばさ”の点で劣るが加工性においては優れ、腐食性の低い白水では加工性に優れた欠陥のない 13 Cr 系の鍛造材が最も優れた材料であると言える。
- (6) Drilling により残留応力の開放があるため、素材における応力値がそのまま使用上のトラブルの原因になることはないが、素材加工上の留意点として考慮されなければならない。

文 献

- 1) A. GARNER : Pulp & Paper CANADA 3 (1985) 81
- 2) W. S. Butterfield : Tappi sep. (1982) 139
- 3) 瀬尾省逸 他：紙パ技協誌, 39 (1985) 1124
- 4) R. Thompson : Pulp & Paper Magazin 72 (1971), 70
- 5) A. P. Castillo : Proc. Tappi conf. 1984, 601
- 6) H. Hiraishi : Proc. Tappi conf. 1984, 611
- 7) S. Seo, Y. Sato, H. Takahashi : Proc. Tappi conf. 1984, 197
- 8) 西田正孝：応力集中, (1969) 森出版
- 9) 米谷 茂：残留応力の発生と対策, (1979) 養賢堂
- 10) 切削加工技術便覧 (1962), 518 日刊工業
- 11) R. A. Yeske : Proc. Tappi conf. 1987, 17
- 12) 瀬尾省逸 他：特許出願中, 昭 61-146071