

技術資料



非磁性保持環の冷間拡環加工における 耐力バラツキ低減手法

伊藤樹一^{*1}, 大江章平^{*2}, 吉田悠也^{*3}, 今頭俊文^{*3}

Forming Technique to Reduce the Proof Stress Dispersion in Cold Expansion of Nonmagnetic Retaining Rings

Shigekazu ITO, Shouhei OOE, Yuuya YOSHIDA and Toshifumi IMAZU

Synopsis

Nonmagnetic retaining rings are one of the components attached to both ends of a dynamo rotor coil shaft. To ensure the quality of the rings, it is necessary that they have high proof stress with small dispersion. Therefore, we established a technique to reduce proof stress dispersion in cold expansion using the developed miniature test and simulation.

The miniature expansion test was conducted with several stroke and rotation angles to reduce proof stress dispersion. Furthermore, according to this test a database of the strength of expanded rings was constructed that helps predict the proof stress distribution. Proof stress can be predicted at low cost and in a short time by means of simulation.

This is because, unlike production machine and miniature expansion ring tests, simulation does not require remanufacturing of a die (adapter) when the adapter shape is changed. The adapter shape and the technique were optimized through the simulation.

In this way, a technique to reduce proof stress dispersion by a miniature cold expansion test and simulation was obtained, and the cold expansion method was established early.

1. はじめに

非磁性保持環は、発電機ローターコイル両端に取り付けられる環状（リング状）の部品である。ローターの肩部に焼き嵌めて固定され、エンドリング^{1), 2)}や、リテーニングリング³⁾とも称される。この非磁性保持環は、コイルからの漏れ磁束回路形成を防ぎ、耐力力腐食割れ性⁴⁾が求められるため、非磁性であるオーステナイト鋼が用いられる。大型のタービン発電機に用いられる非磁性保持環は、大径ローターが回転するため、高い遠心力が発生する。このため、重量のあるローターコイルを保持できるだけの高い機械的強度が要求される。一

般的に非磁性鋼は、オーステナイト組織のため、焼入による強化ができない。そこで、冷間加工による加工硬化によって強度を高める手法が取られ、高強度が要求される場合は、冷間加工量を増やす必要がある⁵⁾。しかし、加工量が円周方向の場所により異なる場合、強度分布が一様ではなくなり焼き嵌め取り外し時に変形が起こる。このため、均一な強度分布となる冷間拡環加工方法が施されるのが一般的である。

円周方向に均一な加工ができる拡環方法として、被加工材の内側に液体を充填させて内圧を高める液圧拡環法がある⁶⁾。しかし、内部に均一な液圧がかかったとしても、端部を均一に変形させることが困難で、軸方向に均

2016年6月10日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博(Dr. Eng., Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 アメディア(株)(Amedia Co., Ltd.)

* 3 大同特殊鋼(株)渋川工場 (Shibukawa plant, Daido Steel Co., Ltd.)

一な変形を得ることが難しい。このような端面の課題に対して、被加工材内部に液体を満たし、両端面側から円錐金型を押しこみ、端面部を拡げる拡環方法がある^{7), 8)}。この円錐金型のテーパ角の設定は重要であり、厚肉、短尺な円筒材ほど、軸方向に均一な加工が可能である。

円周方向の強度バラツキは液圧成形に劣るが、軸方向に均一な拡環加工が可能な方法として、芯金とダイスを用いた拡環方法がある⁹⁾。この方法では、被加工材の内面のすべては工具と接しないため、円周方向のひずみに差が生まれ、強度バラツキが発生しやすい。このため、一般的には、芯金の押し込み量を小さくし、円周方向に回転をさせての作業を繰り返すことにより、強度バラツキを低減する手法が採られている。一方で、回転と押し込み量を変化させて、実機の試作を繰り返すことは、開発期間とコストを大幅に費やすことになるため、より短期間にバラツキの少ない拡環手法を確立する必要があった。

そこで、本報では、芯金とダイスを用いる冷間拡環法の耐力バラツキ低減手法を短期間に確立するため、拡環加工のミニチュア試験を行い、さらに、実機の拡環を模擬したシミュレーション解析を実施した結果を報告する。

2. 拡環ミニチュア試験

2.1 供試材

ミニチュア拡環試験に用いた被加工材の主要成分をTable 1に示す。非磁性のオーステナイト組織であり、高い加工硬化係数を有するため、冷間加工により高強度となる¹⁰⁾。さらに、窒素を多く添加することで固溶強化を図っている¹¹⁾。

鍛伸された素材を切断し、1060℃×1時間の溶体化熱処理で均質化を行ったのち、所定の形状に機械加工を施した。Fig. 1に機械加工後のリング形状を示す。

Table 1. Chemical composition (mass%).

C	Si	Mn	Cr	N	Fe
0.07	0.3	19	19	0.6	Bal.

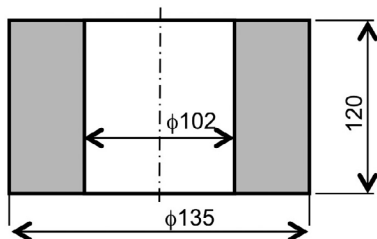


Fig. 1. Specimen for miniature expansion ring test.

2.2 試験方法

Fig. 2にミニチュア拡環試験に使用した金型組図を示す。ミニチュア拡環試験の分割ダイス数は、6分割とした。芯金も6面錐となっており、それぞれ面がダイスを均一に押す設計とした。また、芯金とダイスのテーパ角度は同じ角度である。

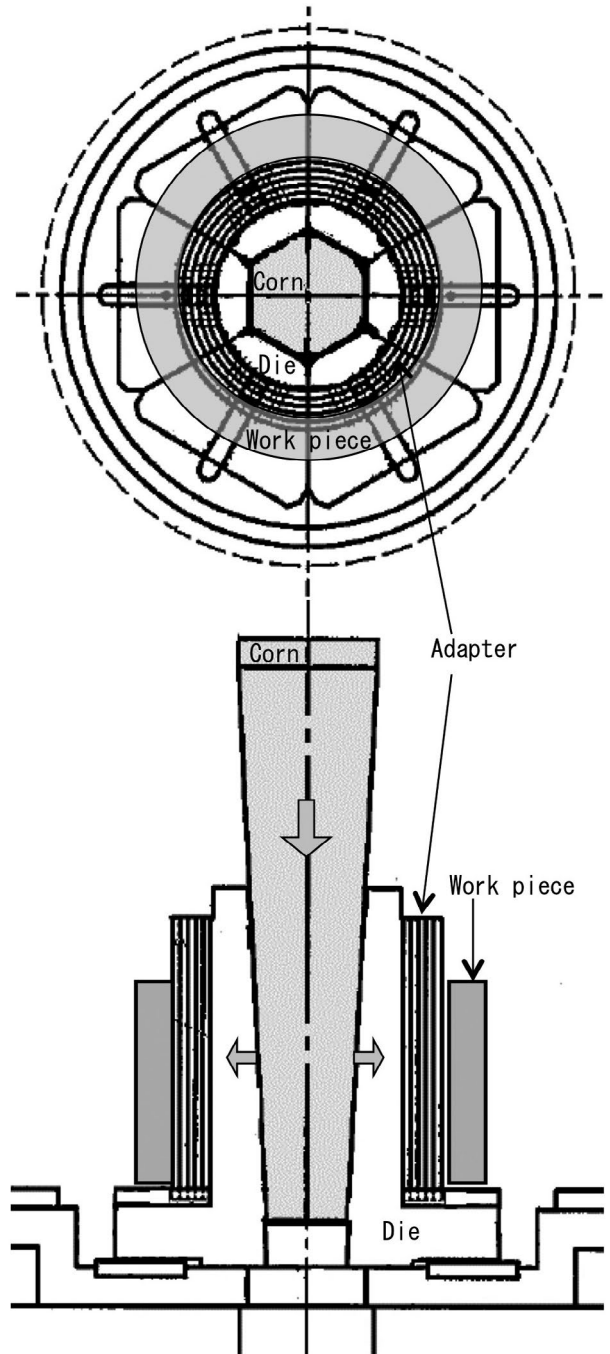


Fig. 2. Schematic illustration of miniature expansion ring test.

はじめに、ダイスの外側に被加工材をセットし、隙間が大きい場合は、アダプタを挿入する。アダプタは、径に合わせた曲率を持っており、拡環加工により内径をより真円に近づけることができる。最大荷重 5000 kN のサーボ油圧プレスを使用して芯金を押し込み、芯金が下降する際にテーパを介して、ダイスをリングの半径方向に移動させることで、アダプタを介して被加工材の内径を上げた。一定量押し込んだ後に、さらに、被加工材の内径を広げる場合は、芯金を抜き、ダイスを中心に寄せ、リングの内径に見合った、より大きな曲率を持ったアダプタを挿入して、芯金を再度押し込んだ。この時、耐力バラツキに影響を及ぼす被加工材の回転が周方向位置などの諸条件を変えて試験を行った。Fig. 3 に拡環試験時の全体写真を示す。

拡環後は、軟化しない程度の低温域で被加工材の焼きなまし処理を行った。その後、周方向の耐力バラツキを調査するため、30°毎に微小な引張試験片を切り出すため切断した。引張試験片は、評価部が厚みの中央となるように採取し、室温で引張試験を実施した。

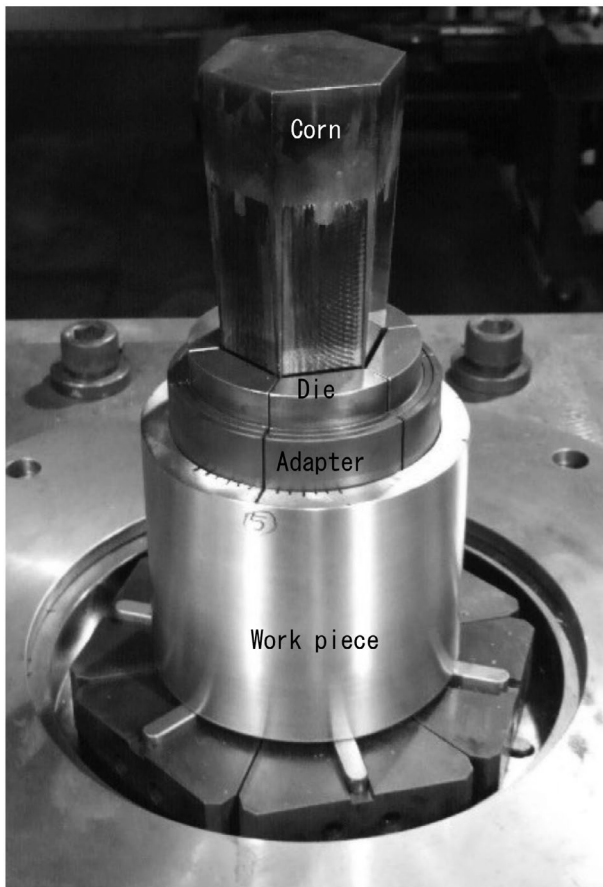


Fig. 3. Photograph of miniature expansion ring test.

2. 3 結果および考察

Fig. 4 にミニチュア試験前後の被加工材の外観写真を示す。試験前の内径は 102 mm であり、芯金を押し込み、内径 133 mm まで拡環加工した。径を上げたため、高さは 120 mm から 112 mm へ、厚みは 16.5 mm から 14.5 mm に減少した。

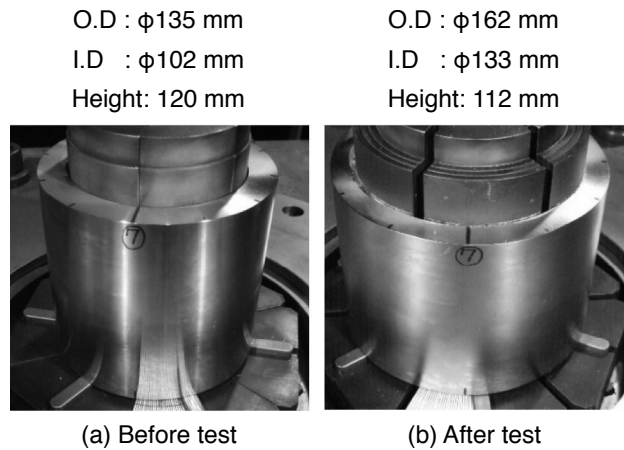


Fig. 4. Photograph of work piece in miniature expansion ring test.

Fig. 5 に各試験片採取位置における 0.2% 耐力を示す。拡環前の 0.2% 耐力は 600 MPa 程度であり、拡環後には 1000 MPa 前後まで強度が向上した。途中で被加工材を回転させた場合、耐力バラツキが小さい結果となった。Table 2 に、得られた数値を統計的にまとめた結果を示す。回転させなかった場合の耐力バラツキの幅は 59 MPa であり、これに対して、回転させた場合の耐力バラツキは 26 MPa と半分以下になっていた。

回転によって耐力バラツキが低減された理由としては、回転によるひずみの分散が考えられる。アダプタと被加工材が接している部位は、接触面に働く摩擦抵抗によって変形が抑制されるためひずみが入りにくい。逆に、アダプタと被加工材が接していない部位は、拘束されるものが無いので、大きなひずみが入り、局部的に強度が向上する。回転させないままに拡環させていった場合、ひずみが入りやすい位置とひずみが入りにくい部位が固定されたまま押し込み続けることで、強度バラツキが大きくなると考えられる。これに対して、押し込む間に回転させた場合は、ひずみがより均等に分散されて入り、バラツキが減少したと考えられる。本ミニチュア試験では、周方向位置もさまざまに変え、より耐力バラツキの少ない方案を検討した。

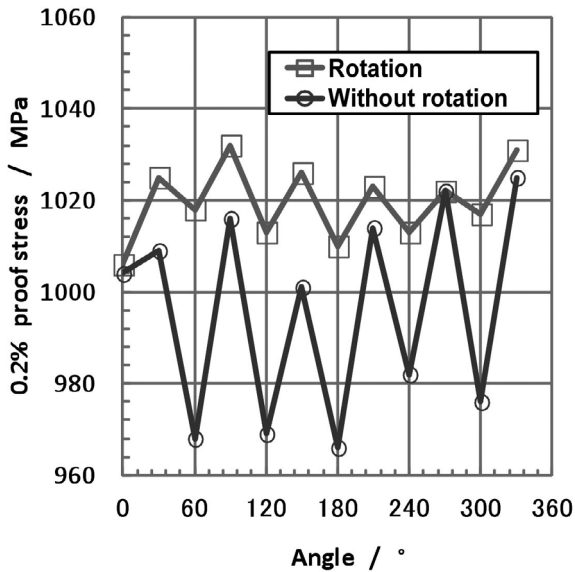


Fig. 5. Relation between angle and 0.2 % proof stress of work piece after miniature expansion ring test.

Table 2. 0.2 % proof stress of work piece after miniature expansion ring test (MPa).

	Without rotation	Rotation
Max.	1025	1032
Min.	966	1006
Range	59	26

3. シミュレーションによるパス設計

3. 1 解析手法

前節のミニチュア試験から、データベースを作成し、以下に示すシミュレーションにおいて0.2%耐力を予測し、耐力バラツキの少ない方案を検討した。

データベースの作成は、まず、ミニチュア拡環試験を用いて、いろいろな径に拡環を実施した。次に、それぞれの径についてひずみを算出する。併せて、拡環後の被加工材から引張試験片を採取し、0.2%耐力を測定した。これによって、各ひずみ位置の0.2%耐力が得られた。次に、ひずみ値がわかると0.2%耐力を算出できる近似式を作成した。

解析コードにはSIMUFACT社のSimufact Ver.10.1を用いた。解析は素材の高さ方向を均質と仮定し、2次元一般化平面ひずみモデルで実施した。

前述のデータベースを基に、ユーザーサブルーチンとして解析コードに組み入れ、解析コードが計算したひずみから、0.2%耐力を予測可能とした。

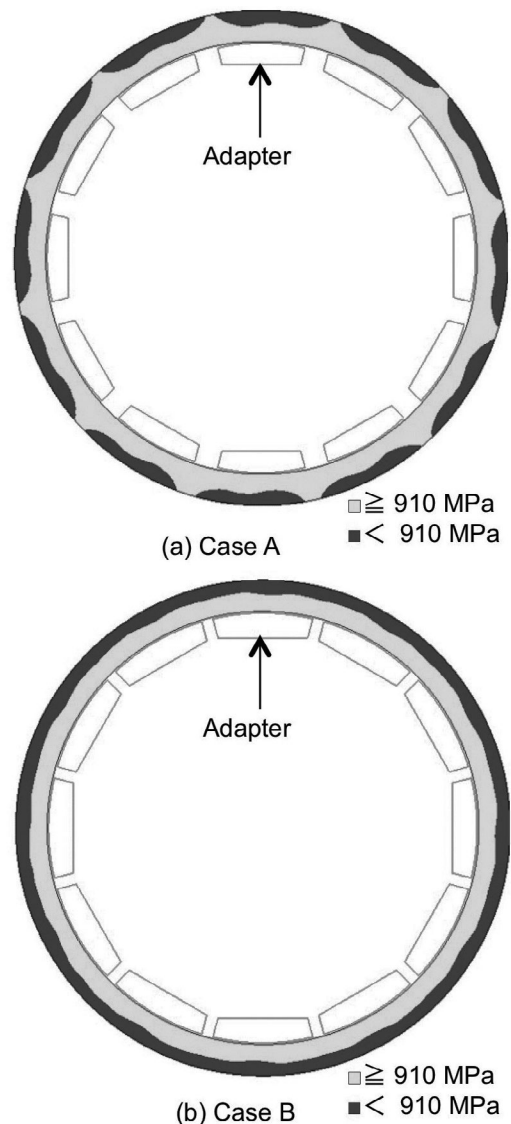


Fig. 6. Predicted 0.2 % proof stress distribution after expansion in FE analysis.

3. 2 解析結果

Fig. 6 に実機サイズを想定した拡環解析例を示す。本例では、アダプタ形状を変え、同じ芯金押込み量において同じ回転をさせた場合の解析結果を示している。Case A は、拡環開始から拡環終了まで1つの形状のアダプタを使用しており、外周の曲率は、リング初期形状の内周の曲率に合わせている。これに対し、Case B は、拡環開始から拡環終了まで、リング内の径に合わせて複数のアダプタを使用した。Fig. 6(a)のCase Aは、0.2%耐力910 MPaとなる境界が大きく蛇行し、周方向に大きくバラつく予測結果が得られた。これに対し、Case Bでは、周方向にほぼ均等な強度分布が得られる見込みとなった。

Fig. 7 に拡環リングの厚み中央位置において1周360°

を1°毎に0.2%耐力の数値を出力した結果を示す。また、Table 3に全周範囲での0.2%耐力最大、最小、および振れの予測結果を示す。Case Aの0.2%耐力は、Case Bよりもバラツキが大きく、振れ幅は24 MPaから12 MPaに減少すると見積られた。

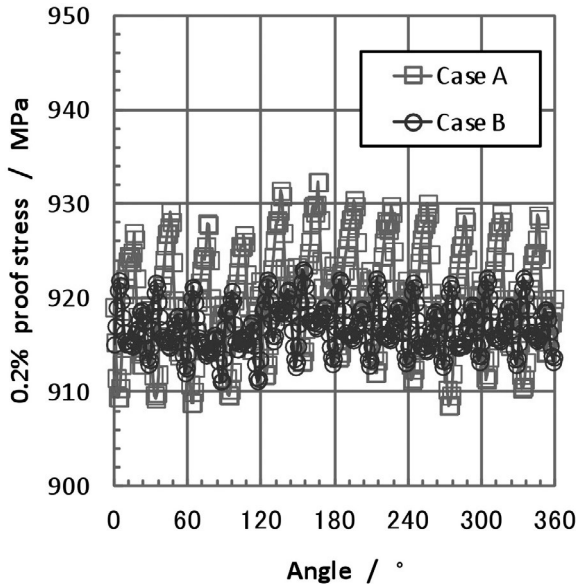


Fig. 7. Relation between angle and predicted 0.2% proof stress after expansion ring in FE analysis .

Table 3. Prediction of 0.2% proof stress after expansion in FE analysis (MPa).

	Case A	Case B
Max.	933	923
Min.	909	911
Range	24	12

本解析結果を基に、治具および成形方案を決定し、実機での試作を実施した。Fig. 8に製作した保持環の外観写真を示す。事前のミニチュア試験、およびシミュレーションでの検討により、短期間で目標特性を満足する加工手法を確立できた。

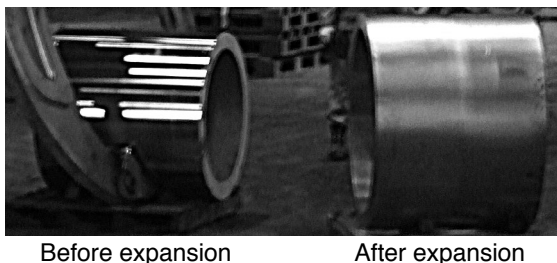


Fig. 8. Photograph of expansion ring in production.

4. おわりに

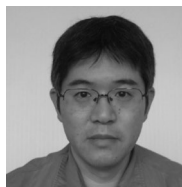
芯金とダイスを用いた冷間拡環後の耐力バラツキを低減させるため、拡環加工のミニチュア試験を立ち上げた。この試験機によって、拡環時に芯金押し込みのみよりも被加工材の回転を加えた方が、耐力バラツキを低減できることが検証できた。さらに、この試験を用いて、ひずみと耐力との関係式作成などのデータベース作成も実施した。

ミニチュア試験よりも簡便に、さらに実機サイズも予測できる手法として、シミュレーションを実施した。シミュレーションでは、形状を変更した場合、実機や試験のように、金型を再製作する必要が無いため、低コスト、短期間で予測が可能である。アダプタ形状の検証もそのひとつである。

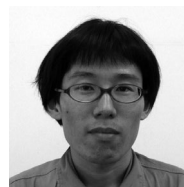
このように、ミニチュア試験とシミュレーションを活用して早期に耐力バラツキが少ない冷間拡環加工方法を確立することができた。

(文 献)

- 1) 伊藤裕道, 大高徹, 宮地潔: 東芝レビュー, 56 (2001), 21.
- 2) 伊藤裕道, 沖田信雄, 宮地潔: 東芝レビュー, 60 (2005), 58.
- 3) 野田俊治: 日本鉄鋼協会 第190回西山記念講座, (2006), 141.
- 4) 実松俊弘, 小松弘二, 鈴木敏孝: 日立評論, 62 (1980), 4, 267.
- 5) 中野平, 後藤督高, 前田昌敏: 鉄と鋼, 50(1964), 1, 37.
- 6) Yang Yie-tian, Liu Zhu-bai and Guo Huei-guang: 9th International Forging Conference, (1981).
- 7) 北村善男, 木下修司, 村井秀夫, 松下富春, 高野正義: 昭62春塑加講論, (1987), 37.
- 8) 北村善男, 松下富春, 木下修司, 高野正義: 塑性と加工, 30(1989), 344, 1275.
- 9) Heinrich E., Kroncke G. and Tacke G.: Stahl u. Eisen, 102(1982), 23, 1183.
- 10) 友田陽: 鉄と鋼, 77(1991), 315.
- 11) 石坂淳二, 折田勝利, 寺尾勝廣: 鉄と鋼, 78(1992), 1846.



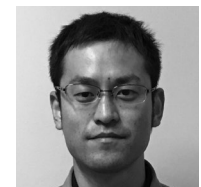
伊藤樹一



大江章平



吉田悠也



今頭俊文