

軸受鋼冷間リングローリング時の キズ発生機構に関する研究

尾崎 勝彦*・野方 一勲*²

Cold Ring Rolling Process Free from Hair Cracks in Bearing Steel

Katsuhiko Osaki, Kazunori Nokata

Synopsis : When making outer bearing races from machined blanks by cold ring rolling process, hair cracks awfully occur on the inner surface. Machining them after rolling to remove hair cracks causes an increase in process cost. The present research in the relation between occurrence of hair cracks and rolling conditions has shown that occurrence of hair cracks strongly depends on "mandrel partition of rolling draft" calculated by ring rolling theory proposed by Hayama et al.. Cracks do not occur in the case of large mandrel partition of rolling draft (more than 50%), while cracks occur in the small one. The following conditions are required to obtain large mandrel partition of rolling draft; ① use of mandrels with small diameters compared with inner diameter of blank. ② adoption of small rolling draft per blank revolution.

Key words : cold ring rolling process; bearing steel; hair cracks on the inner surface; mandrel partition of rolling draft; small diameter mandrel; small rolling draft per blank revolution

1. 緒言

ボールベアリング外輪の製造には、一部で冷間リングローリングが用いられている。リングローリングは、Fig. 1に示すようにマンドレルと成形ロールの間にブランクを挟み込み、その肉厚を圧下しつつ、断面成形、拡径する圧延プロセスである。受けロールはマンドレルを支えると共に、駆動を与える働きをする。

冷間リングローリングにてボールベアリングを製造する工程には、次の2種類がある。

①リングローリング→全面旋削→熱処理、研磨(後削り方式)
②全面旋削→リングローリング→熱処理、研磨(先削り方式)
素材はいずれも温・熱間鍛造により、または熱間仕上げ鋼管を切断して得た黒皮つきリングである。これらの工程の内、コストの面では先削り方式の方が有利である。しかし先削り方式の場合、リング内面のボール溝肩部に微細な割れキズが多数発生する。しかもこの部分は後工程で研磨のかからない部分なのでキズがそのまま製品に残存することになるので、一般には①の後削り方式が広く採用されている。キズ対策として、素材のSを極端に低減するなどの材質面からのアプローチは試みられている¹⁾²⁾³⁾が、キズ発生機構や圧延条件とキズ発生との関係などに関する研究⁴⁾は筆者らの知る限りほとんど見あたらない。

筆者らは圧延条件とキズ発生との関係の実験的研究を行い

キズを発生させない圧延条件、およびキズ発生に大きく影響するパラメータを見いだした。以下にその内容について報告する。

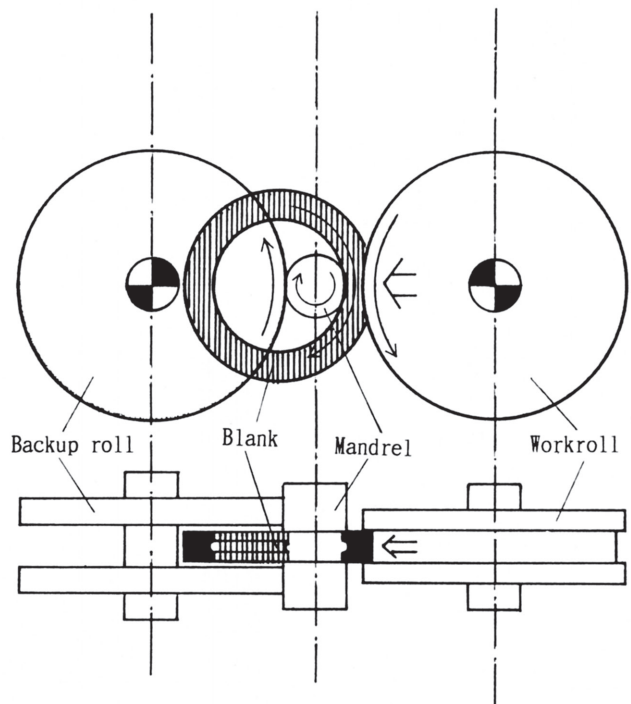


Fig.1 Ring rolling process.

* 研究開発本部技術研究所研究第一室
* 2 生産本部素材材事業推進プロジェクトチーム

2. 内面に発生するキズの観察

2・1 内面キズ発生状況

Fig. 2 に熱間仕上げ鋼管を切断して得たリングを先削り方式によってその黒皮を除去し、ボール溝付きリングに圧延したときの内面キズの発生状況を示す。ボール溝肩部分では深い割れキズが無数に発生しているのがみられると共に、旋盤加工条痕がそのまま残存している。また平坦部ではキズの程度は軽く、散発しているが旋盤加工条痕は残存している。これに対し、ボール溝底部においては、キズは全く見られない。ボール溝を成形せずにブランクの肉厚を一様に圧下して得たリング（以下、矩形断面リングという）には、キズは内面全面に一様に発生し、その程度は、溝付きリング溝肩部のものよりも軽度である。また、予めボール溝を旋削にて成形したブランクを圧延すると、Fig. 3 に見られるように通常の圧延においては発生しなかった溝底部にも深い割れキズが発生した。

2・2 内面キズの進展状況

Fig. 4 にブランク寸法 $\phi 65.5 \times \phi 44.4 \times \text{Q} 20.8$ のリングを圧延したときの外径の延伸比（圧延リング外径/ブランクリング外径）と内面キズの関係を示す。キズは外径延伸比1.05（肉厚圧下量0.25mm）のときに既に発生しており、その後圧延の進行と共に拡大される傾向にある。しかし外径延伸比が1.4を越えるとキズはやや小さくなっている。

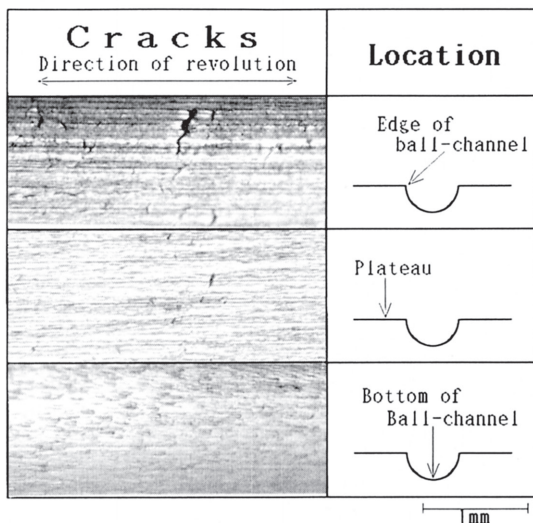


Fig.2 Cracks on inner surface.

3. 各部応力状態の推定

リングローリングでは、肉厚が圧下されることによって内外径が拡大される。この様な変形の下では、内径延伸比は必ず外径延伸比よりも大きい。したがってリング内面側は、マンドレルによって圧下されたことによる周方向への自発的の広がり（圧縮による広がり）と外面側の広がりに追従する従属的の広がり（引張りによる広がり）の2つの変形モードがあると推定される。この2つのモードの大きさによって圧縮、引張りの応力状態が変化し、キズが発生すると考えられる。そこで2項で観察した各部の応力状態と内外圧下量を以下のように推考した（Fig. 5）。

〈ボール溝底部〉

マンドレルが凸状になっているため、マンドレル圧下による周方向への自発的の広がりの方が大きく、あたかもリング内面側がリング外面側に焼き詰めされたような状態で圧縮応力となり、キズは発生しない。

〈ボール溝肩部〉

この部分は旋盤加工条痕がそのまま残存していることから、圧延中マンドレルとほとんど接触していないと考えられる。したがって変形モードは外側の広がり、あるいは溝底部の広がりに追従する従属的の広がりがほとんどで引張り応力状態となり、キズが多発する。

〈平坦部〉

ボール溝肩部、溝底部の中間的な状態で、自発的な広がりも従属的な広がりもあるが、後者の方がやや大きく、キズが散発する。

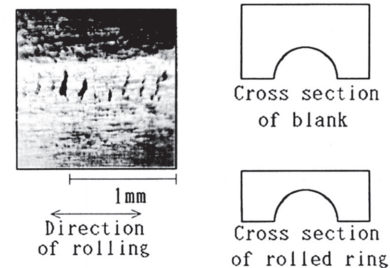


Fig.3 Cracks on bottom of ball-channel using machined blank.

Cracks					
Ratio of Outer diameter rolled ring/blank (Draft of thickness (mm))	1.05 (0.25)	1.15 (1.32)	1.24 (2.16)	1.34 (2.94)	1.45 (3.56)

1 mm

Fig.4 Relationship between ratio of outer diameter rolled ring/blank and cracks.

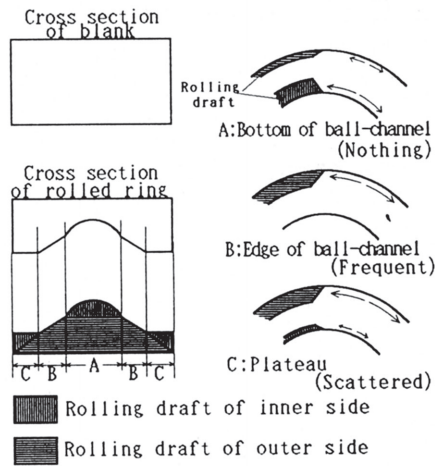


Fig.5 Supposition of rolling draft and stress of tangential direction.

4. 実験 I

3項のキズの観察により、キズ発生を抑制するためにはマンドレル圧下量を大きくし、内面側の周方向への自発的広がりを強めることが必要であると推定された。マンドレル圧下量を大きく取るためには、マンドレルを細くする必要がある (Fig. 6)。そこで細径マンドレルを含む種々の条件で圧延を行い、キズの発生状況を観察した。

4・1 実験設備

共栄精工㈱製CRF120を改造し、成形ロールおよび受けロール (マンドレル駆動ロール) を独立に駆動させ、任意に回転数が設定できるようにした。

4・2 供試材

軸受鋼 (SUJ2) 球状化焼鈍材、 $\phi 65.5 \times \phi 50.5 \times Q 19.9$

4・3 工具寸法

成形ロール： $\phi 187.6$ 、受けロール： $\phi 200$ 、マンドレル： $\phi 35.81$ 、 $\phi 25.81$ 、 $\phi 16.81$

4・4 実験条件およびキズ観察結果

実験条件と内面キズの観察結果を Table 1 に示す。ここで O、 Δ 、 \times は、それぞれ、キズ皆無、希発、多発の意である。キズの観察は低倍率の顕微鏡で行った。この結果より、内面キズを発生させないためには細径のマンドレルを用い、且つ、リング一回転当たりの圧下量を小さくすることが必要であるといえる。

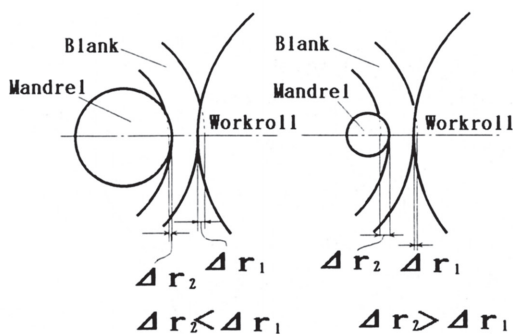


Fig.6 Rolling draft by workroll; Δr_1 , by mandrel; Δr_2
Mandrel with large diameter(left), with small diameter(right).

Table 1 Working conditions and occurrence of cracks.

Diameter of mandrel	Ratio of revolution workroll/backuproll (rpm/rpm)	Closure rate of workroll (mm/sec)	Dimensions of rolled rings		Occurrence of cracks on inner surface
			Outer diameter	Inner diameter	
35.81	84/72	1.93	82.56	68.81	\times
	98/84	0.95	82.18	69.05	\times
		0.72	82.16	68.93	\times
		0.56	82.03	68.84	\times
25.81	84/72	1.93	82.86	69.85	Δ
	98/84	0.95	82.21	69.13	$\circ\Delta$
		0.72	83.15	70.09	$\circ\Delta$
		0.56	81.93	68.85	\circ
16.81	98/84	0.39	82.91	69.11	\times
		0.95	82.59	69.56	\circ
		0.72	82.56	69.48	\circ

\circ ; nothing, Δ ; scattered, \times ; frequent

5. 考察

細径のマンドレルを用いることは、マンドレルとリング内面の接触弧長を短くすることによって接触圧を高めマンドレル圧下量を大きくすることを意味する。しかしマンドレルを細くするだけではキズはある程度は良くなるにしてもなくなることはなく、完全になくするためには、さらにリング一回転当たりの圧下量を小さくする (圧延条件的には、ロール回転数を速く、圧下速度を遅くする) ことが必要であることが実験によって明らかになった。ここではキズ発生に対する、リング一回転当たりの圧下量を小さくすることの意義を検討する。

リングローリングは、異径、異周速の高度に非対称な圧延方式である。非対称の板圧延では、圧下量の大小によって圧延材の曲がりの方向が異なることが報告されている⁵⁾。このことから、圧下量の大小によって曲げモーメントの向きが変化しキズ発生に影響を及ぼすと推考した。それならば、圧下量の大小によって圧延材の曲率の向きも変化するはずである。そこでマンドレル径、および圧下量を変えて平板 (幅19.9×厚さ10.0×長さ70.0) の圧延を行った。マンドレルは、 $\phi 27$ 、 $\phi 37$ の2種類とし、圧下量を、板厚の1%、および3%とした。曲率の向きを圧延された板につき表面あざさ計で長さ方向にトレースして確認した。Fig. 7に結果を示す。これからマンドレル径の違いによる圧延材の曲率の向きの変化は認められたが、圧下量の違いによる変化は認められず、曲げモーメントの向きの変化がキズの発生に影響を及ぼすのではないことがわかった。

豊島は、リングローリングの解析モデルの中で成形ロールおよびマンドレルの圧下量を仮定しているが⁶⁾、このモデルでは圧下量が変わってもそれぞれの圧下量配分が変化せず、圧下量の大小によってキズ発生に影響を及ぼすような現象は見いだせない。

葉山らは成形ロールおよびマンドレルによる変形領域の違いを考慮したリングローリングのモデルを提唱している⁷⁾⁸⁾。

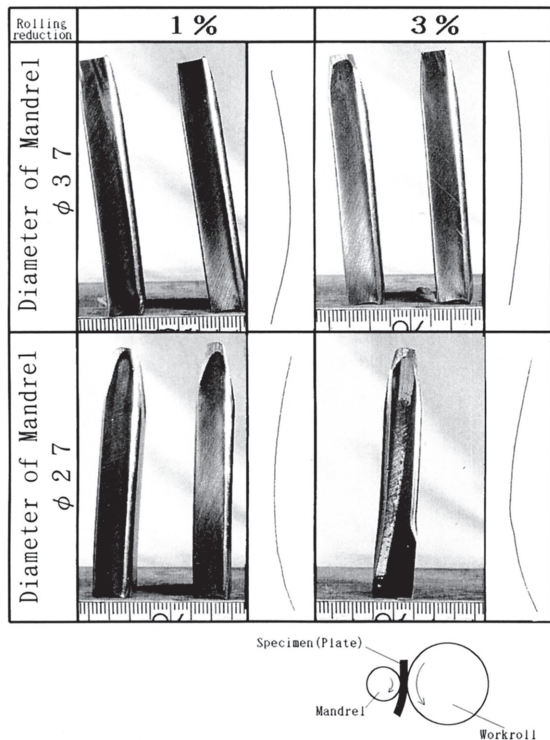


Fig.7 Results of plate rolling by ring rolling mill and surfstest of rolled plate.
Left side of curve; mandrel side, right side; workroll

このモデルを用いて成形ロール、およびマンドレルの圧下量の計算を行い、圧下量とその配分の関係を調べた。実験Ⅰのマンドレル径25.81のときの条件で、リングは矩形断面とし、幅広がりは無視して計算を行った。軸受鋼の変形抵抗、および降伏応力としては以下の値を用いた。

〈変形抵抗〉 $\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}) = 1103.25 \bar{\epsilon}^{0.174}$ (MPa)

〈降伏応力〉 $\sigma_y = 413.8$ (MPa)

計算結果をFig. 8に示す。図中のマンドレル圧下率 R_{DM} は、下式で定義した。

$$R_{DM} = \Delta r_2 / (\Delta r_1 + \Delta r_2) \times 100 \quad (1)$$

ここで、 Δr_1 は成形ロール圧下量、 Δr_2 はマンドレル圧下量である (Fig. 6 参照)。

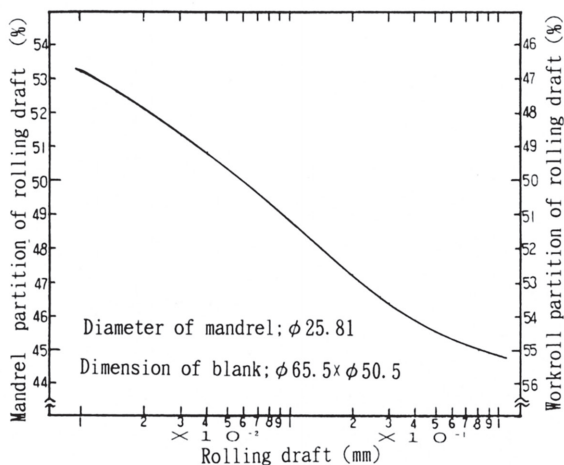


Fig.8 Relationship between mandrel partition of rolling draft and rolling draft.

Fig. 8より、圧下量が小さくなるにつれて、マンドレル圧下率が増加する、即ちリング内面側からのマンドレルによる圧下が大きくなり、キズの発生しにくい条件が存在することが分かった。つまり、細いマンドレルを用いること、およびリング一回転あたりの圧下量を小さくすることは、いずれもマンドレルによる圧下率を大きくすることに寄与していることが明らかになった。

6. 実験Ⅱ

実験Ⅰの結果と考察から、マンドレル圧下率がキズの発生に大きく寄与していることが分かったので、簡単のため矩形断面リング圧延を行いマンドレル圧下率とキズ発生状況との関係を調べた。

6・1 実験条件

〈工具寸法〉 成形ロール径：φ185、受けロール径：φ200、マンドレル径：φ37, φ27 (成形ロール、受けロール回転数比) 84/70, 98/82, 110, 92 (rpm/rpm)

〈成形ロール圧下速度〉 0.39~1.93 (mm/sec、設定値)

〈ブランク〉 外径：φ78.2~φ64.8、内径：φ61.7~φ43.5 (ブランク質量が一定になるように内外径を設定した)、幅：19.9、材質は実験Ⅰと同じ軸受鋼球状化焼鈍材である。

〈製品寸法〉 外径：φ97.3~φ80.0、内径：φ83.7~φ63.5

6・2 マンドレル圧下率の計算

マンドレル圧下率は、圧延開始からおわりまで、リング寸法、変形抵抗および降伏応力の変化にともない時々刻々変化するので理想的にはリング一回転毎に計算し、キズの発生および進展状況と比較すべきである。しかし、キズを一回転毎にフォローする事は困難なため、以下の仮定の下に計算を行い、圧延終了後の内面キズ発生状況と比較検討した。

イ) リング寸法、変形抵抗および降伏応力は圧延開始時の値を採用する。これはFig. 4に見られるように、キズは圧延開始直後に発生しているからである。

ロ) 計算に必要な圧下量 $\Delta r (= \Delta r_1 + \Delta r_2)$ をブランクと製品の中間の外径のリングが成形ロールによって滑りなしで回転させられていると仮定して次式にて“リング一回転当たりの平均圧下量”として定義した。

$$\Delta r = 160 \cdot (D_{ob} + D_{op}) \cdot v / 12 D_w \cdot R_w \quad (2)$$

ここで、

D_{ob} : ブランク外径 (mm)、 D_{op} : 製品外径 (mm)、 v : 成形ロール圧下速度 (mm/sec)、

D_w : 成形ロール径 (mm)、 R_w : 成形ロール回転数 (rpm) である。

ハ) また、簡略化のために軸方向の材料流れ (幅広がり、コーナーのR部) は考慮しない。

6・3 計算結果とキズ発生状況との比較

結果をTable 2およびFig. 9に示す。マンドレル圧下率50%を越えるとほぼキズは発生しなくなることが分かった。この結果から2・2項のキズの進展状況の観察で圧延がある程度進行するとキズがやや縮小されており、これは圧延が

Table 2 Relationship between mandrel partition of rolling draft and occurrence of cracks on inner surface. (Square cross section ring)

Mandrel partition of rolling draft	Occurrence of cracks on inner surface
$\geq 51\%$	Nothing
50%~51%	Small ones, rare
45%~50%	Scattered
$\leq 45\%$	Frequent

Table 3 Relationship between mandrel partition of rolling draft and occurrence of cracks on inner surface. (Ring with ball-channel)

Mandrel partition of rolling draft	Occurrence of cracks on inner surface
$\geq 50\%$	Nothing
45%~50%	Small ones, rare (sometime nothing)
40%~45%	A little large ones, frequent
45%以下	Large ones, frequent

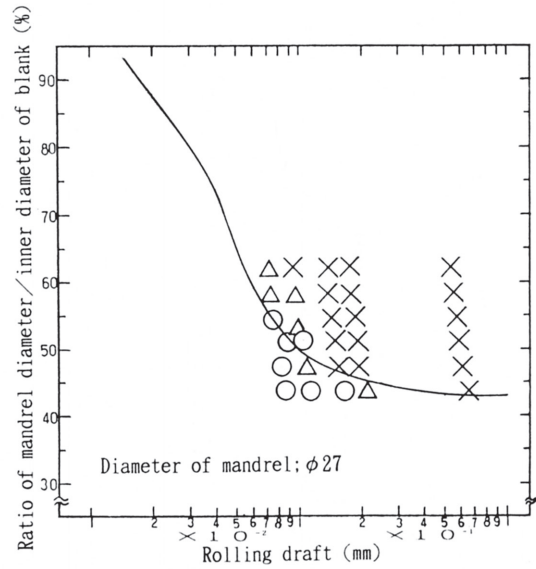


Fig.10 50% line of mandrel partition and occurrence of cracks. (Square cross section ring)

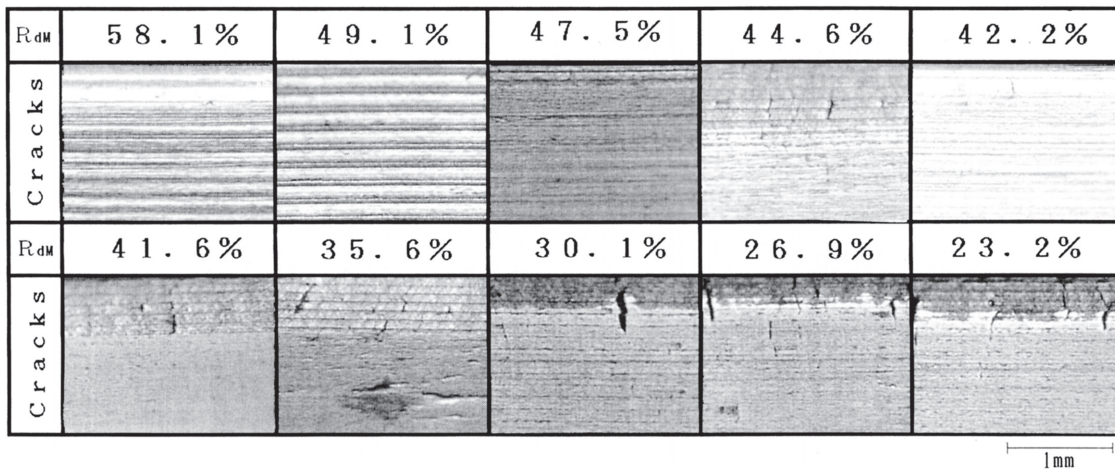


Fig.9 Relationship between mandrel partition; RdM and cracks. (Square cross section ring)

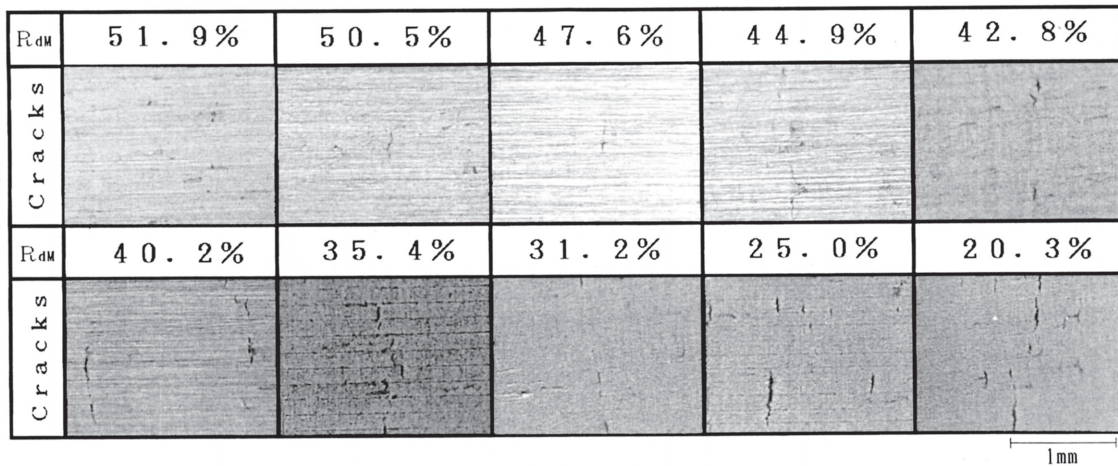


Fig.11 Relationship between mandrel partition; RdM and cracks. (Ring with ball-channel)

進むに従い、マンドレル径が相対的に細くなることによってマンドレル圧下率が大きくなってきたためであると考えられる。この観察における圧延開始時のマンドレル圧下率は上記仮定に基づいて計算すると22.1%であり外径延伸比1.4のところでは45.4%であった。そこで、マンドレル圧下率の値に大きく影響を及ぼす、マンドレル径、および圧延開始時のリング一回転当たりの平均圧下量をそれぞれ縦軸、横軸にとり、マンドレル圧下率50%を示す曲線を描き、併せて実験IIの結果をプロットした(Fig.10)。但しマンドレル径は $\phi 27$ とし、素材内径に対するマンドレル径の比(D_M/D 値: マンドレル径/素材内径 $\times 100$; %)として相対的に表した。この図により、キズを発生させない適切な圧延条件を設定することができる。

6・4 ボール溝のあるリング圧延への適用

ボール溝のあるリングに対しても同様の計算を行いTable 3およびFig.11を得た。計算はボール溝底部の材料流れなどの幅方向のフローを無視して平坦部の寸法変化だけで行った非常に大ざっぱなものだが、やはりマンドレル圧下率50%がキズ発生のしきい値になっていることがわかった。

7. 結言

軸受鋼冷間リングローリング時に生じる内面キズの対策と発生機構の解明を目的として圧延条件とキズ発生の関係

を調べる実験的研究を行い、キズを発生させない圧延条件を見いだすことができた。さらにその圧延条件の物理的意味を検討することによって以下の知見が得られた。

(1)キズ発生に大きく影響するパラメータは、葉山らのモデルによって計算したマンドレル圧下率であることを明らかにした。

(2)マンドレル圧下率が小さいとキズが発生しやすく、大きくなるにつれて発生しにくくなる。

(2)矩形断面リングでは、マンドレル圧下率が50%を越えるとはほぼキズは発生しない。

(3)ボール溝を有するリングも、近似的にその平坦部寸法変化で計算したマンドレル圧下率が50%を越えるとキズは発生しない。

(4)ブランクリングに対するマンドレル径の比、およびリング一回転当たりの平均圧下量を適切に選ぶことによって内面キズの発生を防止することができる。

文 献

- 1) 公開特許公報: 平3-146639
- 2) 同: 平3-285041
- 3) 同: 平4-160134
- 4) 尾崎勝彦、野方一勲: H4年度塑性加工春季講演会講演論文集 p.339
- 5) 成田健次郎、栗津原博: S63年度塑性加工春季講演会講演論文集 p.241
- 6) 豊島史朗: H3年度塑性加工春季講演会講演論文集 p.603
- 7) 葉山益次郎、大島 勉: 塑性と加工, 22, (1981), no.240, p.71
- 8) 葉山益次郎: 塑性と加工, 22, (1981), no.246, p.717