

## 内面溝付銅管の再結晶集合組織に及ぼす造管条件の影響\*

玉川 博一\*\*, 小平 正明\*\*\*, 鈴木 忍\*\*, 法福 守\*\*

### Effect of the Fabrication Schedules on Recrystallization Texture in Inner Grooved Copper Tube\*

Hirokazu Tamagawa\*\*, Masaaki Kodaira\*\*\*, Shinobu Suzuki\*\* and Mamoru Houfuku\*\*

Since 2000, because of the rising price of copper metal, the copper tubing used in air conditioner heat exchangers are being made thinner, both in terms of their diameters and their wall thicknesses, in order to reduce the amount of copper used. These reduced thickness tubes make it more difficult to create hairpin bends in the copper tubing when assembling the heat exchangers. The component rolling process creates grooves on the insides of the copper tubes used in air conditioner heat exchangers. Rotational draw-bending is used to create hairpin bends. This method bends the copper tubing by 180° while drawing it in alignment with the rotation of the bending die. In narrow-diameter copper tubing with thin walls, this bending can result in wrinkling, flatness, and, in worst case scenarios, leads to the tubing rupturing. In order to resolve these problems, we investigated methods for increasing the  $r$ -value of the copper tubing through texture control. Changes in the copper tubing outer diameter have a larger effect than changes in the wall thickness on the  $r$ -values of the copper tubing made by drawing or rolling. The development of Goss orientation, as a result of a high degree of external diameter processing, causes the  $r$ -values to drop. Materials with high  $r$ -values can be produced by a performing processing with a limited amount of external diameter processing. Tubes with high  $r$ -values have more even thicknesses and less flatness in areas which have undergone bending, making it possible to create high quality hairpin bends.

**Keywords:** Goss orientation, recrystallization texture,  $r$ -value, hairpin bending, inner grooved copper tube

#### 1. 緒言

空調機用熱交換器では、近年の銅地金価格の高止まりを背景に伝熱管の薄肉化が求められている。熱交換器組立工程におけるヘアピン曲げ加工では、薄肉銅管を用いると銅管の扁平や曲げ部内周側でのシワ、外周側で局所的な肉厚減少による割れが生じやすくなり、形状を維持することが難しい。これら課題に対し、平滑管の集合組織制御により $r$ 値を高くすることでヘアピン曲げ加工性が改善することが報告されている<sup>1), 2)</sup>。すなわち、平滑管の再結晶集合組織である  $\{011\} \langle 211 \rangle$

方位の発達を抑制することで $r$ 値が上昇し、曲げ加工部の内外周における肉厚変化を抑えて加工性が改善される。一方、伝熱管として多く用いられる内面溝付管では、平滑管の製造工程である熱間押出、冷間圧延および冷間抽伸に加え、中間焼鈍、冷間抽伸および仕上焼鈍が行われており (Fig. 1)、この内面溝付管を想定した調査事例はない。

本研究では、内面溝付銅管を想定し、中間焼鈍以後の冷間加工が再結晶集合組織に及ぼす影響を明確にするとともに、内面溝付管の $r$ 値を向上させるための加工条件および組織状態について検討した。

\* 本稿の主要部分は、銅と銅合金、54 (2015), 11-14に掲載。同論文は、日本銅学会より第49回論文賞を受賞。

The main part of this paper has been published in Journal of Japan Institute of Copper, 54 (2015), 11-14. It received the 49th technical paper awards from Japan Institute of Copper.

\*\* (株)UACJ 技術開発研究所 第五研究部

No. 5 Research Department, Research & Development Division, UACJ Corporation

\*\*\* UACJ Copper Tube (Malaysia) Sdn. Bhd.

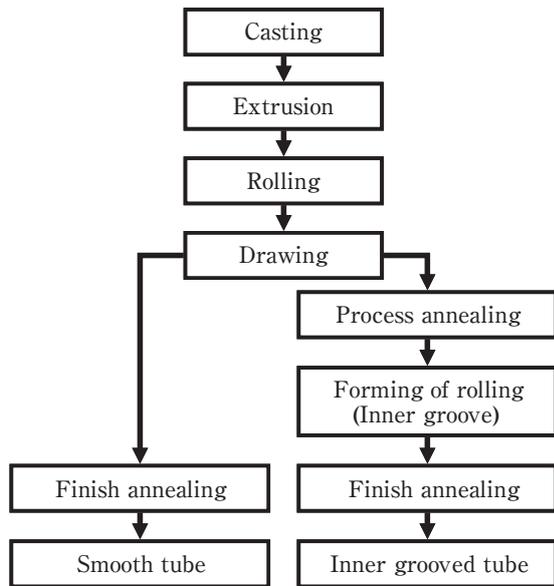


Fig. 1 Schematic of copper tubes production process.

## 2. 実験方法

試料は、JIS H3300 C1220 (りん脱酸銅) の平滑管 (外径 15.8 mm, 肉厚 0.8 mm) を用いた。加工度の影響を調査するため、種々の外径, 肉厚へ抽伸加工を行い、500 °C で 20 min の中間焼鈍を施した。その後、転造加工を想定した抽伸加工を行い外径 9.50 mm, 肉厚 0.40 mm に仕上げた。中間焼鈍以降の抽伸加工での加工度を Table 1 に示す。最後に 500 °C で 20 min の仕上焼鈍を行い、軟質銅管を得た。

作製した軟質銅管に対し、機械的性質の調査として引張試験による  $r$  値測定およびマイクロビッカース硬さ試験を行った。管材における  $r$  値は、次式のように定義した。

Table 1 Reduction ratio of drawing.

No.	Cross section reduction, $R_c$ (%)	Diameter reduction, $R_D^{*1}$ (%)	Thickness reduction, $R_T^{*2}$ (%)
1	16.5	12.1	4.8
2	19.4	15.0	4.8
3	26.9	15.0	14.1
4	28.0	23.3	5.3
5	32.4	20.1	15.3
6	35.3	15.3	24.1
7	36.5	24.0	16.1

\*1)  $R_D = (D_0 - D_1) / D_0 \times 100\%$   
 $D_0$ : Outer diameter before drawing  
 $D_1$ : Outer diameter after drawing

\*2)  $R_T = (t_0 - t_1) / t_0 \times 100\%$   
 $t_0$ : Wall thickness before drawing  
 $t_1$ : Wall thickness after drawing

$$r = \frac{\ln(D'/D)}{\ln(t'/t)}$$

ここで  $t, D$  は引張試験前の銅管の肉厚と直径,  $t', D'$  は引張試験後の値である。集合組織の調査には、銅管を切開後に平坦にして外表面から肉厚方向に 1/4 研磨した面を X 線回折法で測定した。この時、Schulz の反射法を用いて (100), (110), (111), (311) の不完全極点図を測定した後、級数展開法により偶数項の展開次数を 22 次、奇数項の展開次数を 19 次として結晶方位分布関数 (ODF) を求めた。また、得られた主要方位の方位密度は、ランダムな集合組織を有する純銅粉末試料の方位密度に対する比として算出した。また、ヘアピン曲げ加工性を調査するため、前述のように加工履歴を変えて  $r$  値の異なる 2 種類の銅管 (外径 7.00 mm × 肉厚 0.25 mm) を作製し、回転引き曲げ法によるヘアピン曲げ加工試験を実施した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 再結晶集合組織に及ぼす転造加工の影響

Fig. 2 に同一の抽伸工程を経て作製した平滑管および内面溝付管の集合組織状態を示す。平滑管では、 $\{011\} \langle 211 \rangle$  方位,  $\{012\} \langle 100 \rangle$  方位への配向が観察されたことに対して、内面溝付管では、 $\{001\} \langle 100 \rangle$  方位,  $\{011\} \langle 100 \rangle$  方位,  $\{112\} \langle 111 \rangle$  方位に配向していた。これは、内面溝付管では、転造加工における加工度が中

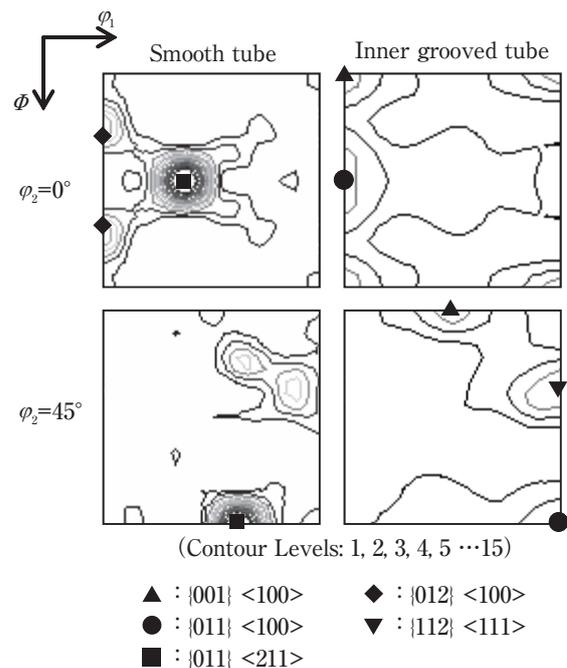


Fig. 2 Recrystallization texture of the copper tubes.

間焼鈍前の圧延や抽伸に対して十分に低いことから、中間焼鈍後の加工では集合組織が十分に発達せず、異なる再結晶集合組織を生じたと推察された。なお、平滑管における再結晶集合組織は、過去の結果<sup>2)</sup>とも一致し、同文献によれば、中間焼鈍後も断面積減少率で70%以上の加工を加えることで、再結晶集合組織において $\{011\}\langle 211 \rangle$ 方位が発達すると述べられている。以上より、内面溝付管においては、対象とする結晶方位が平滑管でのそれと異なる。

### 3.2 内面溝付管における再結晶集合組織

Fig. 3に種々の加工度で抽伸加工を施した銅管の仕上げ焼鈍後の再結晶集合組織における主要方位の方位密度を測定した結果を示す。なお、抽伸加工度との関係を明らかにするため、ここでは、断面積減少率、外径減少率、肉厚減少率に対する方位密度の関係を示した。断面積減少率と方位密度の関係によれば、断面積減少率の増加に伴い $\{011\}\langle 100 \rangle$ 方位の発達が認められた。

その他の $\{001\}\langle 100 \rangle$ 、 $\{011\}\langle 211 \rangle$ 、 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 方位においては、方位密度の変化が認められなかった。また、加工度を肉厚減少率と外径減少率とに分解した場合の $\{011\}\langle 100 \rangle$ 方位の方位密度は、肉厚減少率との相関関係は認められなかったが、外径減少率に対しては、その増大ともなって集合組織が発達することが確認された。すなわち、外径減少率により集合組織の発達が決まるものと考えられた。

Fig. 4に抽伸加工度と $r$ 値の関係を示す。断面積減少率の増加ともなって $r$ 値は低くなる傾向を示した。外径減少率および肉厚減少率においては、肉厚減少率の変化に対する $r$ 値の増減は認められなかったものの、外径減少率に対しては、その値が増加するにつれて $r$ 値が低下する傾向が確認された。

Fig. 5に主要方位の方位密度と $r$ 値との関係を示す。 $\{001\}\langle 100 \rangle$ 方位、 $\{011\}\langle 211 \rangle$ 方位、 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 方位と $r$ 値との相関関係は認められないものの、 $\{011\}\langle 100 \rangle$ 方位とは、方位密度が増大するにつれて $r$ 値が減少する

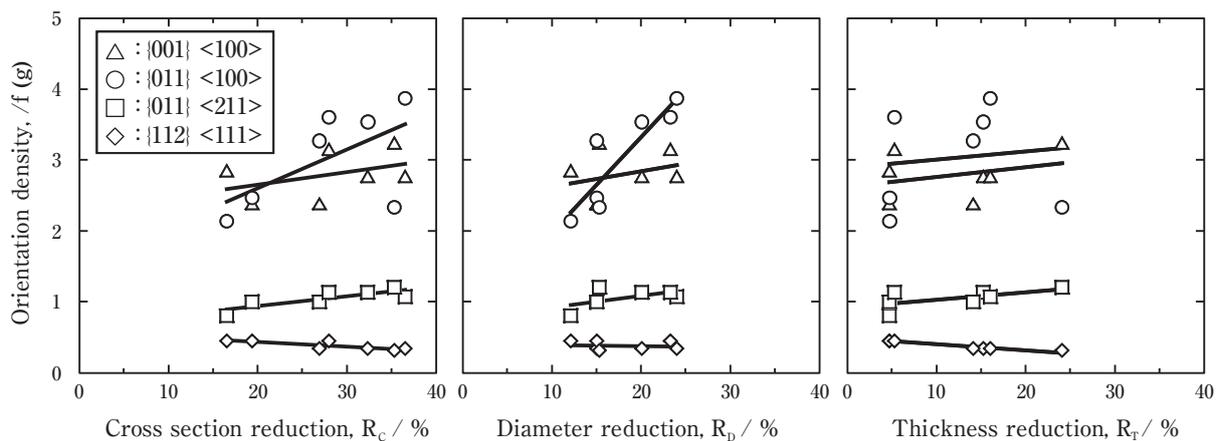


Fig. 3 Change in the orientation density on processing ratio in drawing.

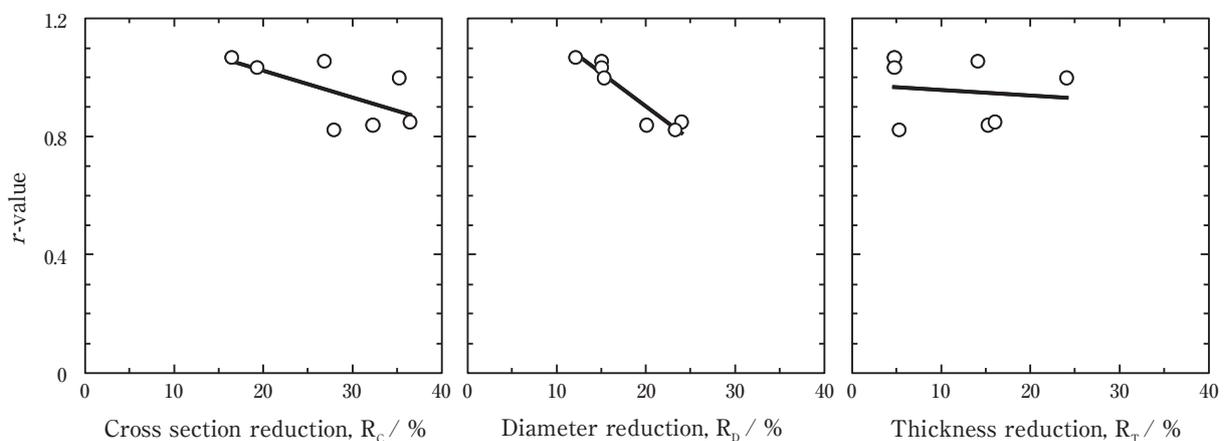


Fig. 4 Change in the  $r$ -value depending on processing ratio in drawing.

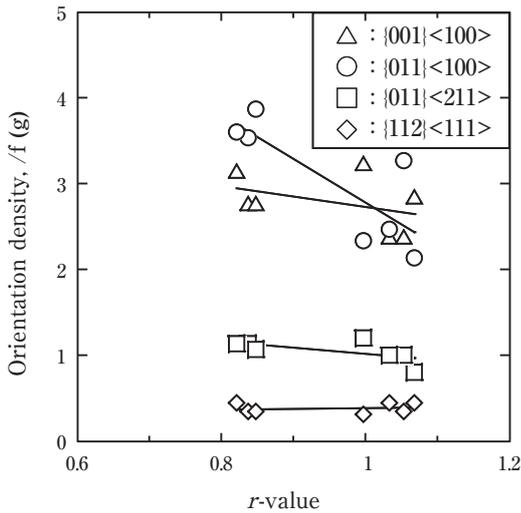


Fig. 5 Relation between r-values and orientation density.

傾向を示した。よって、内面溝付管においては、 $\{011\}\langle 100\rangle$  方位の発達により、 $r$  値が低下した。

以上の結果、内面溝付管においては、外径減少率の増大により、 $\{011\}\langle 100\rangle$  方位が発達することで、 $r$  値が減少することが明らかとなった。外径減少率の影響に関しては、抽伸の機構に着目する必要がある。板圧延においては、圧下率（肉厚変化）が重要な要因となることが分かっている<sup>3)</sup>。一方、管抽伸においては、肉厚変化のほかに外径変化もあり、断面形状の変化に対して自由度が高い特徴がある。今回用いた抽伸は、フローティングプラグ抽伸 (Fig. 6) であり、外径はダイスにより、内径はダイスとプラグとの寸法差によって決定する。外径変化に着目すると、銅管がダイスに入るとき、さらにはダイスから抜けるときの計2度のせん断加工が加わることとなる。このせん断加工により材料内部も含めて大きな加工が加わることで集合組織が発達すると考えられた。Fig. 7 に断面積減少率が、約

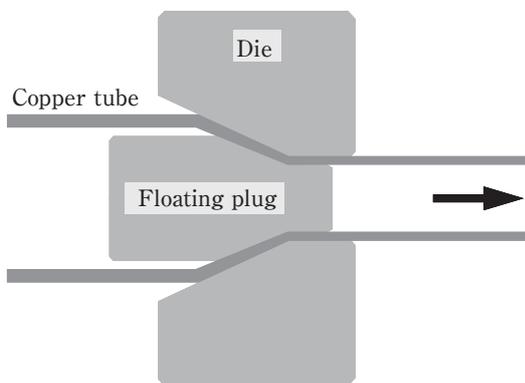


Fig. 6 Schematic of drawing process using a floating plug.

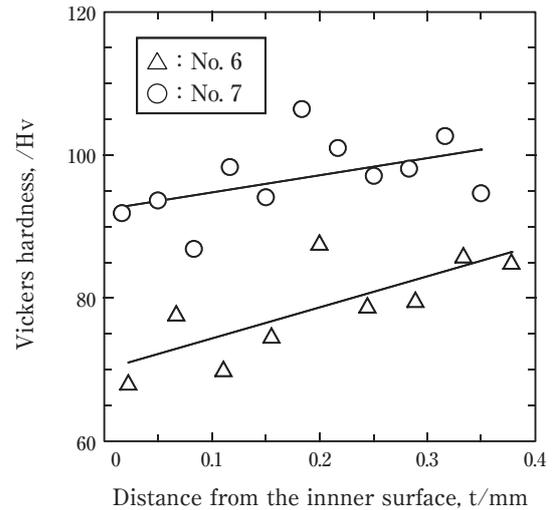
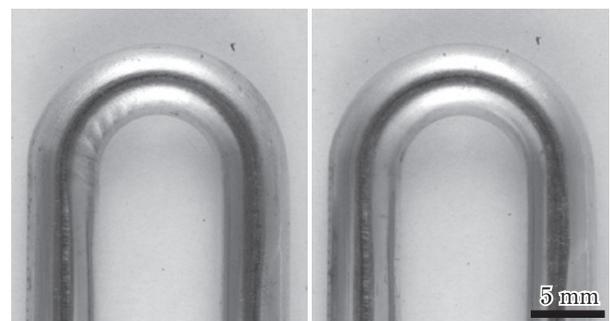


Fig. 7 Relation between r-values and orientation density.

35%と同程度であるが外径減少率が15.3% (No. 6), 24.0% (No. 7) と異なる銅管での肉厚方向における硬さ分布を示す。同程度の断面積減少率でも外径減少率が高い方が、硬さの上昇が大きい。すなわち、抽伸加工において大きなせん断力が加わっており、それに伴い集合組織も発達していると推察された。

### 3.3 $r$ 値と曲げ加工性の関係

中間焼鈍後の外径減少率を13.6%, 27.1%と変化させることで、 $r$  値の異なる2種類の銅管（いずれも外径7.00 mm, 肉厚0.25 mm, 平滑管）を作製し、回転引き曲げ法によりヘアピン曲げ加工（曲げ半径9 mm）を行った。Fig. 8 に示した様に、 $r$  値が1.0（外径減少率27.1%）のものでは、加工部の内周にシワが生じたのに対し、 $r$  値が1.3（同13.6%）のものでは、シワのない良好な加工性が得られた。 $r$  値の高い材料において良好な加工性を示した。



(a)  $r$ -value: 1.0

(b)  $r$ -value: 1.3

Fig. 8 Appearance of hairpin bend copper tubes. The bending pitch was 18 mm.

#### 4. まとめ

- (1) 中間焼鈍工程を含む内面溝付管では、再結晶集合組織状態が平滑管と異なり、 $\{011\}\langle 100\rangle$ が発達していた。
- (2) 曲げ加工性を改善するため、銅管の $r$ 値の向上を検討した結果、中間焼鈍後の外径減少率を小さくすることで、 $\{011\}\langle 100\rangle$ の方位密度を低減させ、 $r$ 値の向上が可能であることが明らかとなった。
- (3)  $r$ 値を改善することで良好なヘアピン曲げ加工性が得られた。

#### 参考文献

- 1) 佐藤一雄, 高橋壮治: 塑性と加工, **23** (1982), 17-22.
- 2) 佐藤一雄, 内田史彦, 高橋壮治, 落合和泉, 大泉 清: 塑性と加工, **23** (1982), 57-62.
- 3) 鈴木敬治郎, 上田喜三郎, 辻 正博: 塑性と加工, **19** (1978), 199-203.



玉川 博一 (Hirokazu Tamagawa)  
(株)UACJ 技術開発研究所 第五研究部



小平 正明 (Masaaki Kodaira)  
UACJ Copper Tube (Malaysia) Sdn. Bhd.



鈴木 忍 (Shinobu Suzuki)  
(株)UACJ 技術開発研究所 第五研究部



法福 守 (Mamoru Houfuku)  
(株)UACJ 技術開発研究所 第五研究部