

# Ti 添加極低炭素連続焼鈍鋼板の材料特性におよぼす Cu の影響

岸 田 宏 司\*・秋 末 治\*<sup>2</sup>

## Effect of Copper Content on Mechanical Properties of Continuously Annealed Extra-low-carbon Titanium-added Steel Sheets

Koji KISHIDA and Osamu AKISUE

### Synopsis :

The Effects of copper content and coiling temperature after hot-rolling on the mechanical properties of continuously annealed extra-low-carbon titanium-added IF steel sheets were studied in order to develop deep drawable sheet steels having tensile strength higher than 45 kgf/mm<sup>2</sup>. Tensile strength of the 1.36% copper added steel can be increased by about 15 kgf/mm<sup>2</sup> by holding for 5 min at 550°C after recrystallization annealing. The recrystallization texture and  $\bar{r}$ -value are affected not only by the copper content but also by the coiling temperature. The  $\bar{r}$ -value of the 1.36% copper added steel sheet is kept high only when the steel is coiled at extremely low temperature by keeping copper in solution prior to cold rolling.

**Key words :** continuous annealing ; high strength steel sheet ; deep drawability ; extra low carbon titanium-stabilized steel ; copper ;  $r$ -value ; coiling temperature.

## 1. 緒 言

自動車の車体軽量化や外板パネルの耐デント性向上などの観点から、深絞り性に優れた高強度冷延鋼板の開発が望まれている。深絞り性の優れた高強度冷延鋼板を製造する方法として、極低炭素鋼に Ti, Nb 等の炭窒化物形成元素を添加したいわゆる Interstitial Free Steel (IF 鋼) に P, Mn, Si 等の置換型固溶元素を添加する方法が幾つか報告されている<sup>1)2)</sup>。しかし、この方法で製造する鋼板の強度は高々 40 kgf/mm<sup>2</sup> 級であり、45 kgf/mm<sup>2</sup> 級以上の高強度鋼板に深絞り性を付与する方法については MEYZAUD らの報告<sup>3)</sup> のほかはほとんど報告されていない。彼らは 0.2% の Ti を含む 0.03% 炭素鋼に Cu を添加した冷延鋼板を徐加熱焼鈍により再結晶処理した後冷却し、再び Cu 析出のための熱処理を行うことにより高  $r$  値の高強度鋼板を得る可能性があることを示した。しかし、MEYZAUD らの方法では徐加熱焼鈍である箱焼鈍を 2 回行わねばならず生産性が著しく劣る欠点があり、実用化には至っていない。そこで著者らは Cu を利用して深絞り性の優れた高強度冷延鋼板を生産性の高い連続焼鈍で製造する方法の検討を行うこととした。この場合検討すべき課題は、①急速加熱焼鈍時の再結晶集合組織におよぼす Cu の影響の把握と②強度と

Cu の析出処理条件の関係の把握である。

本報告では上記の二つの課題のうち、主として急速加熱焼鈍時の再結晶集合組織におよぼす Cu の影響を Ti-IF 鋼について明らかにした結果を報告する。再結晶集合組織におよぼす Cu の影響についてはこれまで多数の研究がなされているが<sup>4)~10)</sup>、これらは固溶炭素が存在する Cu 添加鋼の徐加熱焼鈍時の再結晶を対象としており、固溶炭素の存在しない鋼を連続焼鈍のような急速加熱で焼鈍した時の再結晶集合組織におよぼす Cu の影響についてはあまり知られていない。本報告では Cu 添加量と Cu の冷延前の存在状態が集合組織におよぼす影響を明らかにする目的で行われた実験結果を報告する。すなわち Cu 添加量を変化させると同時に、Cu が固溶元素として存在する場合、もしくは析出粒子として存在する場合の差異を明らかにするため、熱延後の巻取りに相当する温度を変化させその影響を明らかにした。

## 2. 実験方法

供試材の化学組成を Table 1 に示す。高周波真空溶解炉により、電解鉄を原料とし、Ti 添加極低炭素鋼を基本にして Cu 量を変化させた約 30 kg の鋼塊を溶製した。鋼塊はあらかじめ予備の熱間圧延によって 20 mm 厚の鋼片にした。それを 1050°C の炉中で 0.5 h 加熱後、

平成元年 9 月 4 日受付 (Received Sep. 4, 1989)

\* 新日本製鉄(株)広畑技術研究部 (Hirohata R & D Lab., Nippon Steel Corp., 1 Fuji-cho Hirohata-ku Himeji 671-11)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)薄板研究センター 理博 (Sheet & Coil Research Lab., Nippon Steel Corp.)

Table 1. Chemical composition of specimens (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Sol. Al	N	Ti	Cu
0.0027	0.01	0.10	0.005	0.004	0.037	0.0016	0.069	—
0.0018	0.01	0.10	0.004	0.005	0.036	0.0013	0.069	0.69
0.0026	0.01	0.10	0.004	0.004	0.036	0.0013	0.068	1.36

1パスの圧延によって5.5 mm厚の熱延板にした。仕上圧延温度は910°C以上であり、圧延後Cuの析出状態を制御するため室温までの冷却過程において次の3水準の巻取り相当の処理を行った。①高温巻取り相当；780°Cに加熱した炉中に1h保持した後炉冷した。②中温巻取り相当；550°Cに加熱した炉中に1h保持した後炉冷した。③極低温巻取り相当；室温まで空冷した。炉冷および空冷の際の300°Cまでの平均冷却速度はそれぞれ0.01°C/sと3°C/sであった。以下、これらをおのおの高温巻取材、中温巻取材および極低温巻取材とよぶ。熱延板の表裏面を研削し板厚を4 mmにした後、圧下率80%の冷間圧延をして板厚0.8 mmの冷延板を得た。この冷延板に赤外線加熱炉と気液混合噴霧冷却装置を組み合わせた連続焼鈍シミュレーターを用いて連続焼鈍を施した。加熱速度は10°C/sであり850°Cで60sの均熱をした後、100°C/sの冷却速度で550°Cもしくは400°Cまで冷却し、各温度で300s保持後再び100°C/sの冷却速度で室温まで冷却する熱履歴、および850°Cでの均熱後直ちに100°C/sの冷却速度で室温まで冷却する熱履歴の3種である。連続焼鈍後1.0%のスキンパス圧延を施した。

こうして得た熱延板、冷延板および連続焼鈍板のビッカース硬さ測定、光学および電子顕微鏡によるマイクロ組織と析出物観察、X線ディフラクトメーターによる極密度測定と極点図による集合組織測定を行うとともに引張試験と $r$ 値の測定を行った。ビッカース硬さ測定と光学顕微鏡による組織観察は圧延方向に平行な断面で行い、電子顕微鏡による析出物観察と集合組織測定は板厚中心層の圧延面で行った。引張試験はJIS 5号試験片を用い圧延方向引張りを行った。 $r$ 値の測定は圧延方向に対して0度、45度および90度方向から平行部の幅12 mm、長さ25 mmの試験片を切り出し、標点間距離10 mmで20%の引張歪みを与えて行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 連続焼鈍板の強度

連続焼鈍板の強度におよぼす再結晶焼鈍後のCuの析出処理条件の影響について述べる。Cu添加鋼を利用して連続焼鈍設備で高強度鋼板を製造する場合には、過時

効処理帯を活用しここでCuの析出をはかる熱処理を行うことが望ましい。

過時効処理帯での保持(以後、恒温処理と略記する)条件を550°Cで300sとした場合の連続焼鈍板の機械的性質におよぼすCu量の影響を熱延巻取温度別にFig. 1に示す。Cuの増加に伴う強度の増加はCu量が0.7%までは小さいが、0.7%を超えると大きくなり1.36%Cu添加鋼では45 kg/mm<sup>2</sup>級の鋼板となる。熱延巻取温度の影響は小さい。Fig. 2に1.36%Cu添加鋼の機械的性質におよぼす恒温処理温度の影響を示す。恒温処理温度が室温から400°Cまでは強度の変化はほとんど認められない。しかし、550°Cに高めることにより引張強さは約15 kgf/mm<sup>2</sup>上昇する。このように300sという短時間保持にもかかわらず大きな強度上昇が得られているのは注目される。極低温巻取材の伸びに比べ中温巻取材と高温巻取材の伸びが低いのは、局部伸びの差によるものであり、局部伸びと相関の強い $r$ 値にも次に示すように差が認められている。

#### 3.2 連続焼鈍板の $r$ 値

Fig. 3に $r$ 値におよぼすCu添加量の影響を巻取温度別に示す。Cu添加による $r$ 値の変化の程度は巻取温度によって異なり、高温巻取材と中温巻取材ではCu添加量が1.36%になると $r$ 値が顕著に低下する。これに対して極低温巻取材ではCu添加による $r$ 値の変化は比較的小さく、Cu添加量が1.36%でも $r$ 値の低下はわず

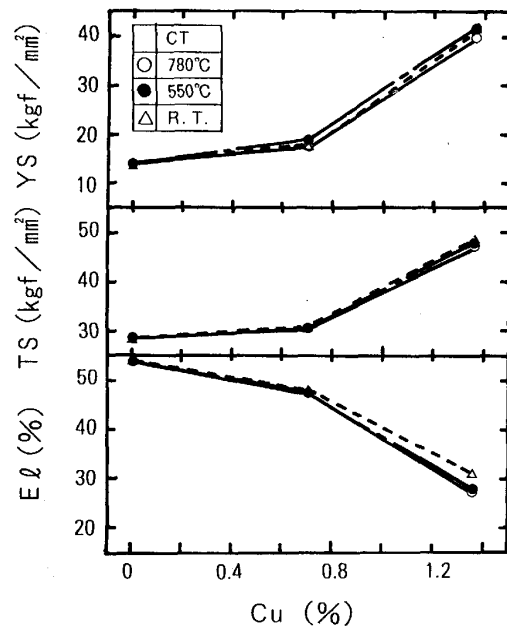


Fig. 1. Effect of copper content and coiling temperature on mechanical properties of continuously annealed Ti-IF steels aged for 300 s at 550°C after recrystallization.

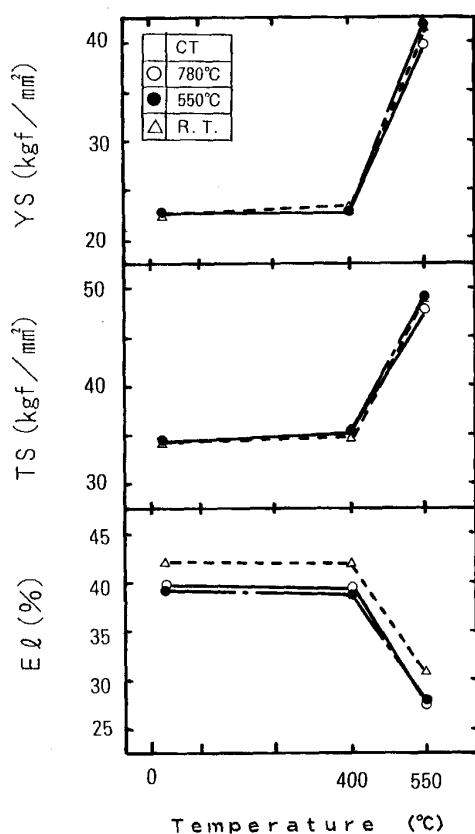


Fig. 2. Effect of aging temperature after recrystallization and coiling temperature on mechanical properties of continuously annealed 1.36%Cu added Ti-IF steel.

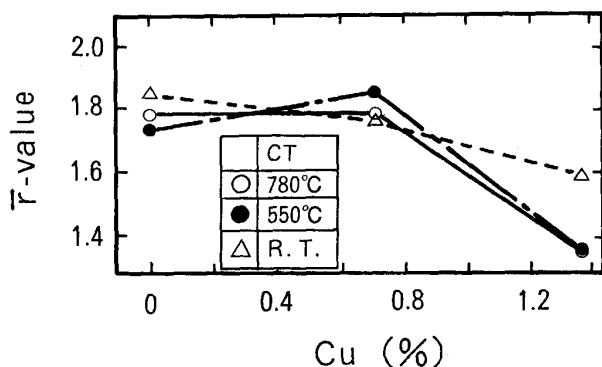


Fig. 3. Effect of copper content and coiling temperature on  $\bar{r}$ -value of continuously annealed Ti-IF steels.

かである。

Fig. 4 に 1.36%Cu 添加鋼の  $\bar{r}$  値におよぼす恒温処理温度と熱延巻取温度の影響を示す。 $\bar{r}$  値は恒温処理温度の影響を受けていない。集合組織の測定結果でも、恒温処理温度によって集合組織が変化しないことが確認された。これに対し、巻取温度によって  $\bar{r}$  値は変化している。極低温巻取材では  $\bar{r}$  値は約 1.6 と高いのに対して、中

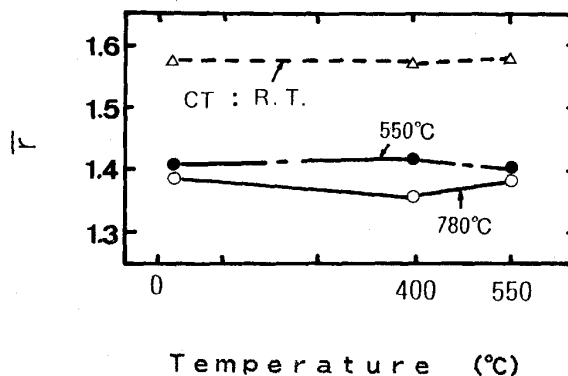


Fig. 4. Relation between  $\bar{r}$ -value and aging temperature after recrystallization in continuously annealed 1.36%Cu added Ti-IF steel.

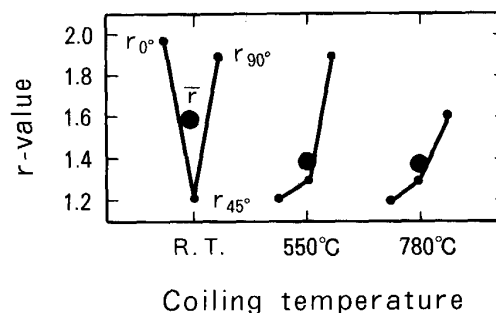
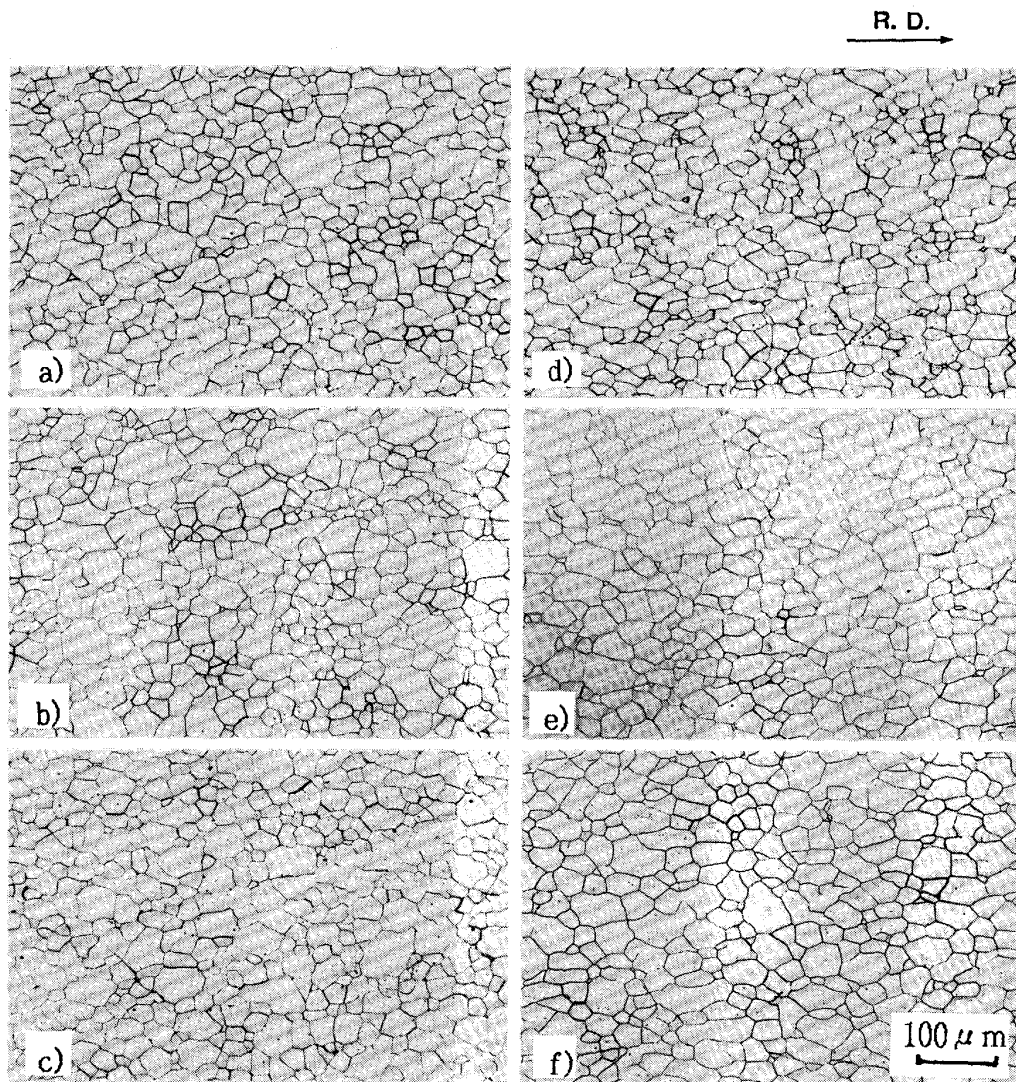


Fig. 5. Effect of coiling temperature on planer anisotropy of  $\bar{r}$ -value of continuously annealed 1.36%Cu added Ti-IF steel.

温巻取材と高温巻取材では  $\bar{r}$  値は約 1.4 である。これらの鋼板の  $r$  値の面内異方性を Fig. 5 に示す。巻取温度は特に圧延方向の  $r$  値に影響をおよぼし、極低温巻取材では圧延方向の  $r$  値は約 2.0 あるのに比べ高温巻取材と中温巻取材ではそれが約 1.2 と低く、Fig. 4 に示した  $\bar{r}$  値の差は主に圧延方向の  $r$  値の差に起因する。

### 3.3 連続焼鈍板のマイクロ組織と集合組織

連続焼鈍板の集合組織は恒温処理温度によって変化しないことを確認したので、以下に述べる結果はすべて恒温処理温度が 400°C での結果である。Photo. 1 に Cu 無添加鋼と 1.36%Cu 添加鋼の連続焼鈍後のマイクロ組織を示す。いずれも完全に再結晶したフェライト単相組織である。連続焼鈍板の代表的な低指数面の極密度 (ランダム試料の X 線積分極密度に対する測定試料の X 線積分極密度の比  $I/I_0$ ; 以下  $I_{(222)}$  等と略記する) と Cu 添加量との関係を熱延巻取温度別に Fig. 6 に示す。高温巻取材と中温巻取材では Cu 添加量が 1.36% になると顕著に  $I_{(200)}$  と  $I_{(211)}$  が増え、 $I_{(222)}$  が減少する。これに対して極低温巻取材では Cu 添加による極密度の変化は比較的小さく、Cu 添加量が 1.36% でも  $I_{(200)}$  と  $I_{(211)}$



a) Ti-IF steel, CT : 780°C  
 b) Ti-IF steel, CT : 550°C  
 c) Ti-IF steel, CT : RT

d) 1.36%Cu-Ti-IF steel, CT : 780°C  
 e) 1.36%Cu-Ti-IF steel, CT : 550°C  
 f) 1.36%Cu-Ti-IF steel, CT : RT

Photo. 1. Optical micrographs at longitudinal section of the continuously annealed steels.

の増加はわずかである。なお、図示はしないが  $I_{(110)}$  は Cu 添加量および熱延巻取温度によってほとんど変化しておらず、すべて 0.10 以下である。

Fig. 7 に Fig. 6 に示した鋼板の  $\{100\}$  極点図を示す。再結晶集合組織の主方位はいずれの鋼板も  $\{554\} \langle 225 \rangle$ ,  $\{111\} \langle 112 \rangle$ , および  $\{111\} \langle 110 \rangle$  であるが、1.36%Cu 添加鋼の高温巻取材と中温巻取材では上記方位への集積度が弱くなり、かつ  $\{211\} \langle 011 \rangle$  と板面に平行な  $\{100\}$  面が認められる。

以下に、連続焼鈍板の集合組織の変化がどの段階で生じたのかを明らかにする目的で、熱延板と冷延板の集合組織等を測定した結果をのべる。

#### 3.4 熱延板の集合組織、硬さおよび粒径

熱延板の代表的な低指数面の極密度を測定し、熱延板

の集合組織は Cu 量や熱延巻取温度によって変化していないことを確認した。

熱延板の硬さにおよぼす Cu 量の影響を巻取温度別に Fig. 8 に示す。熱延板の硬さはいずれの巻取温度でも Cu 量の増加とともに硬くなるが、1.36%Cu 添加鋼では巻取温度による硬さの差が極めて大きいことが注目される。中温巻取材が最も硬く、高温巻取材がそれに続き、極低温巻取材が最も軟らかい。

熱延板の結晶粒径はいずれの試料も 30~45  $\mu\text{m}$  の範囲である。

#### 3.5 熱延板中の析出物

Photo. 2 に 1.36%Cu 添加鋼の熱延板の薄膜の電子顕微鏡観察結果を示す。高温巻取材では、Photo. 2 a) に示すような粒径 60~270 nm 程度の球状もしくは棒状の

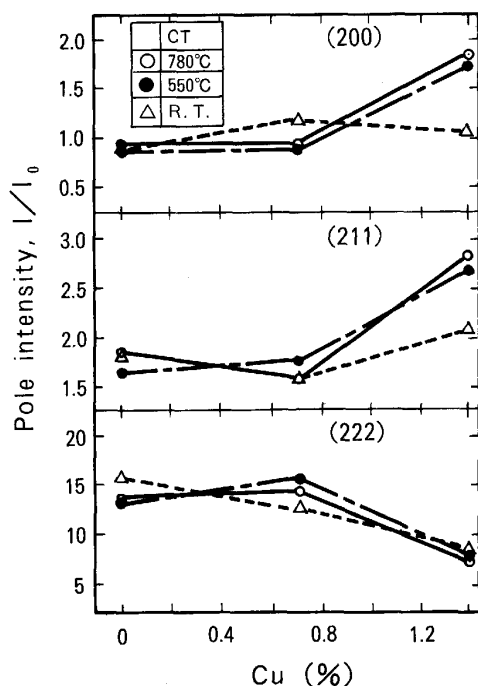


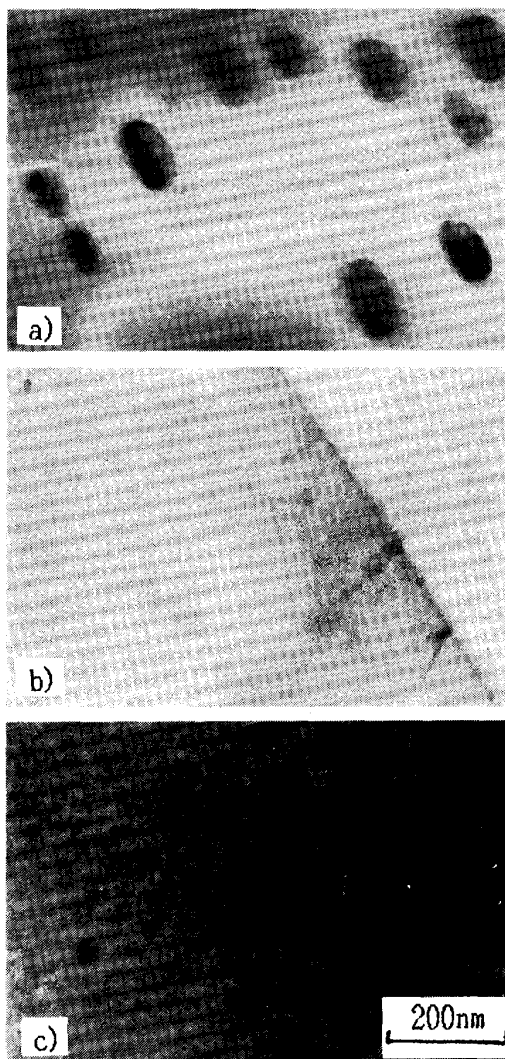
Fig. 6. Effect of copper content and coiling temperature on pole intensities of continuously annealed Ti-IF steels.

$\epsilon$ -Cu 粒子が粒界や粒内に均一に析出しているのが観察される。極低温巻取材 (Photo. 2 c) では  $\epsilon$ -Cu 粒子の析出は観察されず Cu は過飽和に固溶しているものと考えられる。一方最も硬い中温巻取材 (Photo. 2 b) では粒界に粒径 10~20 nm の  $\epsilon$ -Cu 粒子の析出が観察されるがその数は極めて少ない。

なお、硫化物としては、すべての熱延板に粒径が 100~300 nm の Ti の硫化物が観察されたが、Cu の硫化物は観察されなかった。

### 3.6 冷延板の集合組織

冷延板の代表的な低指数面の極密度と Cu 添加量との関係を熱延巻取温度別に Fig. 9 に示す。極低温巻取材では Cu 量による変化は認められない。しかし、高温巻取材と中温巻取材では、Fig. 6 に示した連続焼鈍板での極密度の測定結果と同じように、1.36%Cu 添加鋼において著しい  $I_{(200)}$  と  $I_{(211)}$  の増加が認められる。1.36% Cu 添加鋼について、熱延後、冷延後および連続焼鈍後の集合組織を巻取温度別に Fig. 10 に示す。巻取温度による集合組織の差は冷延後の段階で発生し、その差は連続焼鈍後にも基本的に引き継がれることが Fig. 10 から読み取れる。この現象は熱延板中の微細析出物によるものと考えられるが、これについては後に考察する。



a) CT: 780°C, showing  $\epsilon$ -Cu as precipitates  
b) CT: 550°C    c) CT: RT

Photo. 2. Transmission electron micrographs of the hot-rolled 1.36%Cu-Ti-IF steels coiled at different temperatures.

## 4. 考 察

### 4.1 熱延板中の Cu の析出

1.36%Cu 添加鋼の熱延板の硬さが巻取温度によって大きく変化したことについて考察する。硬さは結晶粒径が小さくなるほど、第二相が微細に分散しているほど硬くなることが知られている。しかし、結晶粒径はほとんど変化しておらず、粒径では本実験の硬さの差を説明しえない。つぎに熱延板中の析出物につき考察する。

Cu は低濃度ではフェライト中に過飽和に固溶し、析出は純 Cu に近い  $\epsilon$ -Cu 粒子として析出する<sup>11)</sup> ことが知られている。WRIEDT ら<sup>12)</sup> によるとフェライト中の Cu の固溶度は  $\log(\text{wt}\% \text{Cu}) = 4.335 - (4499/T)$  で与

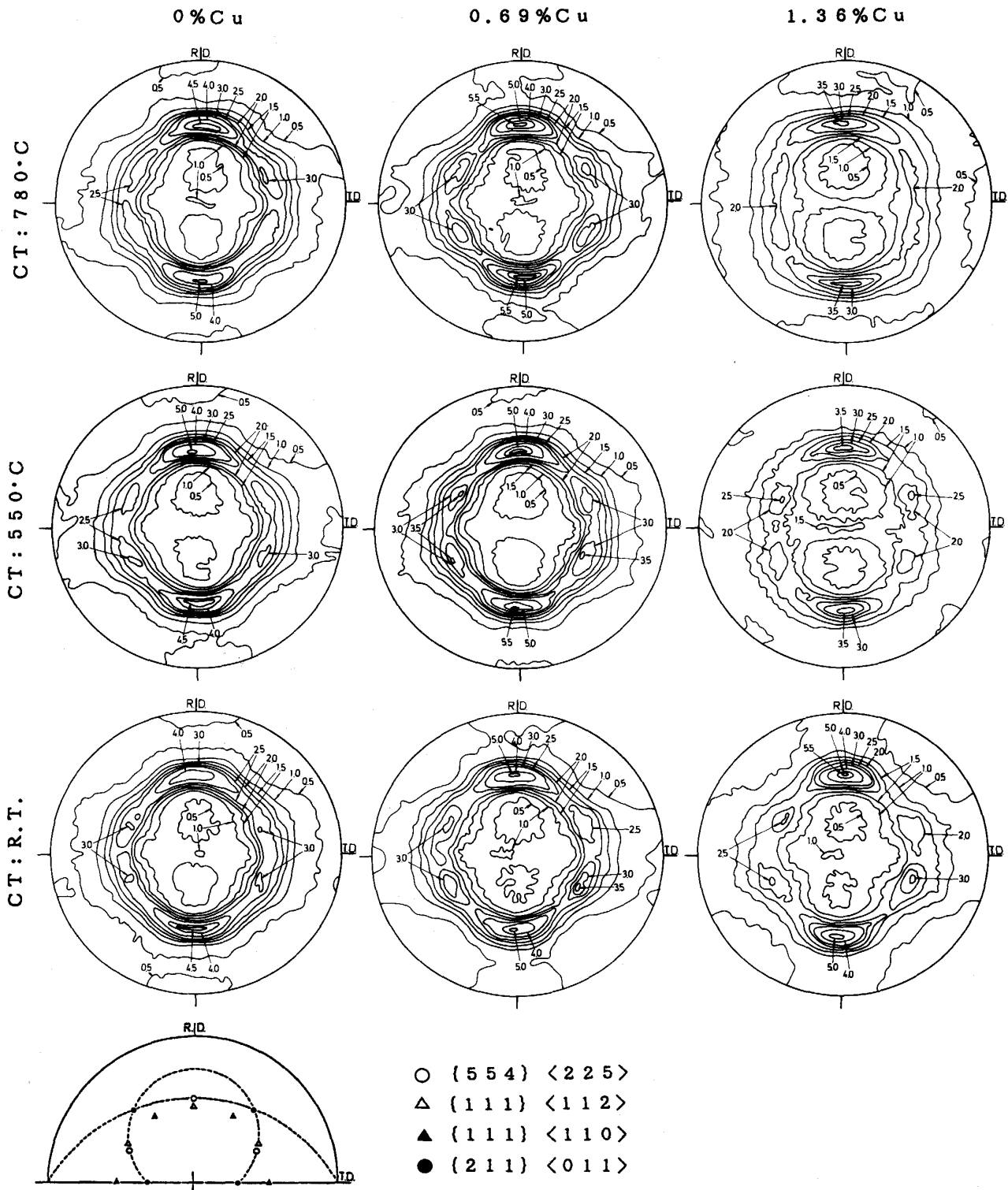


Fig. 7.  $\{100\}$  pole figures of continuously annealed Ti-IF steels with or without copper addition.

えられ、温度による固溶度の変化が著しく大きい。たとえば  $850^{\circ}\text{C}$  では最も多く固溶し固溶度は約 2.13% であり、 $780^{\circ}\text{C}$  における固溶度は約 1.15% Cu、 $700^{\circ}\text{C}$  では約 0.51% Cu である。本実験において、極低温巻取材では Cu がフェライト中に過飽和に固溶された結果 Cu の

固溶強化のみが認められたものと考えられる。Fig. 8 に示すように極低温巻取材の硬さは Cu 量の増加とともにほぼ直線的に増加し、1% Cu 当たりピッカース硬さで約 25 上昇する。この硬さの上昇量は、今井ら<sup>13)</sup>の報告による Cu の固溶強化量 (0.1% 当たり引張強さで約 0.8

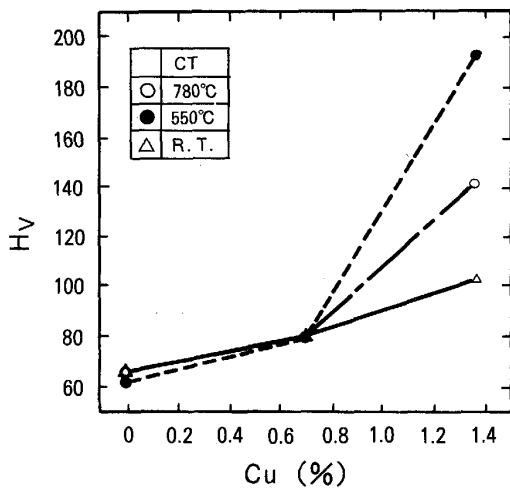


Fig. 8. Effect of copper content and coiling temperature on hardness of hot-rolled Ti-IF steels.

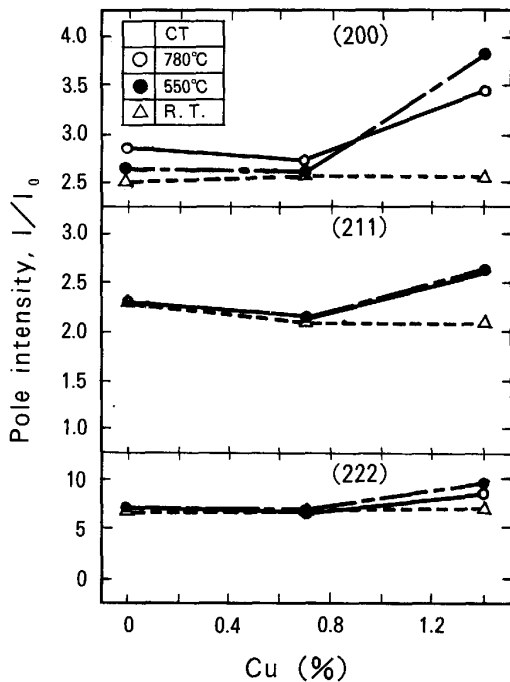


Fig. 9. Effect of copper content and coiling temperature on pole intensities of cold-rolled Ti-IF steels.

kgf/mm<sup>2</sup>) とほぼ等しい。これに対し、高温巻取材では、Photo. 2 a) に示すような粒径 60~270 nm 程度の  $\epsilon$ -Cu 粒子が均一に析出しており、これによる析出強化があったものと考えられる。一方最も硬い中温巻取材では粒界に粒径 10~20 nm の  $\epsilon$ -Cu 粒子の析出が観察されるがその数は極めて少なく硬さの上昇を説明しえない。今回の実験範囲では微小な析出物を検出できなかったが、GOODMAN ら<sup>14)</sup> は 1.4%Cu 添加鋼を 500°C で時効した時の析出物の観察を Field-ion microscope を使って詳細

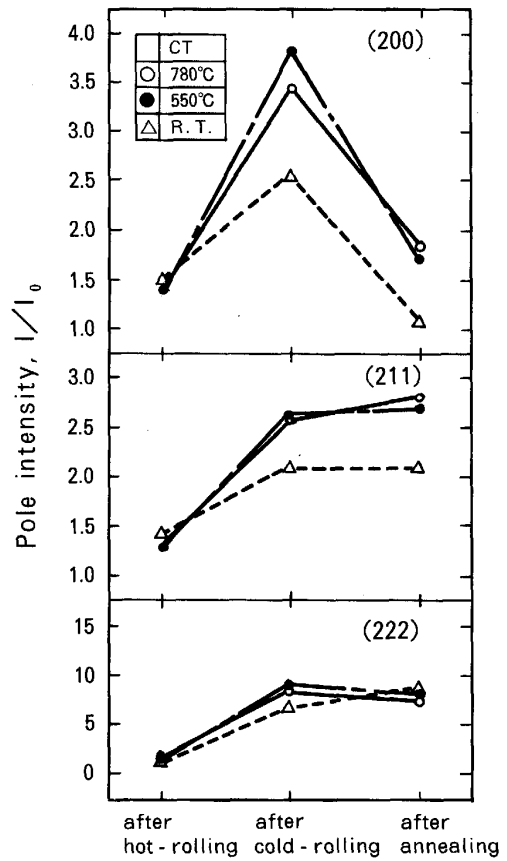


Fig. 10. Change of pole intensities of 1.36%Cu added Ti-IF steels coiled at different temperature.

に観察している。それによれば 1 h 時効時に強度のピークがあり、その時の析出物の平均粒径は 2.4 nm で析出密度は約  $10^{18}/\text{cm}^3$  である。このような微細な粒子が本研究における中温巻取材にも存在しているものと考えられ、今後検討を進めていく。

#### 4.2 熱延板中の微細析出物と集合組織

析出物のような第二相成分による集合組織制御のメカニズムについてはいろいろな考え方が提案されており、武智<sup>15)</sup> は前析出型、後析出型、Scavenging 型および純鉄型に分類している。このうち前析出型とは冷延前に析出物として既に存在し、それらが冷延集合組織を変化させるか、焼鈍再結晶時に粒成長の選択的抑制力として働くという考え方である。Fig. 10 の結果は前析出型の考え方を支持する。冷間圧延集合組織に対する微細析出物の効果については幾つかの報告がある。寺崎ら<sup>16)</sup> は、冷延前に微細な析出物 (TiC, NbC) が存在する場合には圧下率にとまなう冷延集合組織の発達は低圧下率側へ移動するとしている。著者の一人<sup>17)</sup> は Nb と C 量の異なる極低炭素鋼を用いて、熱延板中の析出物の数と冷間圧延および再結晶集合組織の関係を検討した。その結果、

熱延板中で5~20 nm程度の微細なNb (CN)が $10^{14}/\text{cm}^3$ と高強度に析出している場合には、冷延率が75%を超えると圧延方向から板厚方向に60度傾いた $\langle 110 \rangle$ 軸を中心にして $\{554\} \langle 225 \rangle$ 近傍の方位が $\{211\} \langle 011 \rangle$ 方位に向かって回転し、再結晶過程においてはこの回転系列に移った小領域を再結晶の核として再結晶集合組織を発達させることが明らかになった。冷延率が高くなると $\{554\} \langle 225 \rangle$ 近傍の方位が $\{211\} \langle 011 \rangle$ 方位に向かって回転する理由は析出物がすべり系の選択に関与しているためと考えられるが、詳細は不明である。本研究の1.36%Cu添加鋼の高温および中温巻取材の場合も、上記のNb (CN)の場合と同様に熱延板に存在する高密度な微細析出物がすべり系に関与した結果、冷延時に圧延方向から板厚方向に60度傾いた $\langle 110 \rangle$ 軸を中心にして $\{554\} \langle 225 \rangle$ 近傍の方位が $\{211\} \langle 011 \rangle$ 方位に向かって回転した小領域が発達し、その小領域は $\{111\}$ 圧延集合組織にくらべて蓄積エネルギーが高いといった再結晶核となりうる条件を備えており、その核の方位をもった再結晶集合組織が発達したものと考えられる。

熱延板で析出物がある場合、上に述べたように再結晶後に $\{211\} \langle 011 \rangle$ 方位が強くなるが、このことがFig. 5に示すように巻取温度の高い1.36%Cu添加鋼の圧延方向の $r$ 値が低い原因と考えられる。岡本ら<sup>18)</sup>は薄鋼板において3種類のすべり面上の臨界剪断応力がほぼ等しいと仮定し、主要方位の面内各方位について $r$ 値を計算している。それによれば $\{211\} \langle 011 \rangle$ 方位の圧延方向の $r$ 値は他の方向のそれに比べて低く、本実験の $r$ 値および集合組織測定結果と一致している。

熱延板で析出した $\epsilon$ -Cuは、フェライト中でのCuの固溶度が大きい高温域で焼鈍される間に再び固溶すると考えられる。Fig. 2において恒温処理条件が一定であれば、極低温巻取りもしくは中温巻取りをした連続焼鈍板の強度はほぼ等しいことがこのことを示唆している。850°Cでの焼鈍中に再固溶したCuは、550°Cでの恒温処理の間に再び $\epsilon$ -Cuとして微細析出して強度の上昇をもたらしたものと考えられる。高温巻取りをした熱延板で析出していた粒径60~270 nmの $\epsilon$ -Cuのうち大きなものは今回の実験条件である850°Cで60 s保持の間には完全には再固溶せず、550°Cでの恒温処理中に微細析出する $\epsilon$ -Cuの量が少なく、結果として強度が少し低くなったものと考えられる。

## 5. 結 論

Ti添加極低炭素鋼を基本鋼としCu量を無添加、

0.69%および1.36%添加と変化させた鋼を用いて、連続焼鈍後の冷延鋼板の材質におよぼすCu量と熱延巻取温度の影響を調査し、つぎの結果を得た。

(1) Cuを1.36%添加した鋼板は再結晶焼鈍後に、550°Cで恒温保持することにより強度が大きく上昇する。保持時間が300 sと短時間の場合でも保持を行わない場合に比べ、引張強さは約15 kgf/mm<sup>2</sup>上昇する。

(2) 1.36%Cu添加鋼の $r$ 値は熱延巻取温度の影響を受け極低温巻取りすることによりCu無添加鋼と同等の $r$ 値が得られる。 $r$ 値は上記の恒温保持をおこなっても変化しない。

(3) 冷延後の再結晶集合組織におよぼすCu添加の影響はCu量と熱延後の巻取温度により異なる。極低温巻取材ではCu量を1.36%まで添加しても再結晶集合組織の主方位は $\{554\} \langle 225 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 、および $\{111\} \langle 110 \rangle$ であり、Cu添加による大きな変化はない。しかし、中温巻取材および高温巻取材ではCu量が1.36%になると上記方位への集積が弱まり、 $\{211\} \langle 011 \rangle$ と板面に平行な $\{100\}$ 面が増える。

(4) Cu量と巻取温度による再結晶集合組織の変化は、冷延集合組織の変化に起因している。

(5) 冷延時に析出物がなく、再結晶焼鈍後のCu析出処理により、高 $r$ 値をもった高強度鋼板の製造が可能であることが明らかになった。

## 文 献

- 1) C. BRUN, P. PATOU and P. PARNIERE: *Metallurgy of Continuous-Annealed Sheet Steel*, Proc., ed. by B. L. BRAMFITT and P. L. MANGONON, Jr. (1982), p. 173 [The Metallurgical Society of AIME]
- 2) 高橋延幸, 柴田政明, 高野嘉邦: 鉄と鋼, **66** (1980), S1127
- 3) Y. MEYSAUD and P. PARNIERE: *Mater. Sci. Eng.*, **29** (1977), p. 41
- 4) R. L. RICKETT and W. C. LESLIE: *Trans. Am. Soc. Met.*, **51** (1959), p. 310
- 5) W. C. LESLIE: *Trans. Metall. Soc. AIME*, **221** (1961), p. 752
- 6) 清水峯男, 高橋延幸, 末宗賢一郎: 鉄と鋼, **58** (1972), S267
- 7) 稲垣裕輔, 須田豊治, 栗原 極: 鉄と鋼, **59** (1973), S198
- 8) 小西元幸, 大橋延夫, 有馬与志広: 鉄と鋼, **59** (1973), S200
- 9) 阿部秀夫, 鈴木竹四, 戸川史江, 宮坂直樹: 鉄と鋼, **60** (1974), p. 1496
- 10) 恵良秀則, 清水峯男, 蛭田敏樹: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 1946
- 11) 阿部秀夫: 鉄鋼薄板の再結晶および集合組織(鉄鋼基礎共同研究会再結晶部会編) (1974), p. 135
- 12) H. A. WRIEDT and L. S. DARKEN: *Trans. Metall. Soc. AIME*, **218** (1960), p. 30
- 13) 今井勇之進, 石橋哲郎: 日本金属学会誌, **20** (1956), p. 673
- 14) S. R. GOODMAN, S. S. BRENNER and J. R. LOW, Jr.: *Metall. Trans.*, **4** (1973), p. 2363
- 15) 武智 弘: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 1795
- 16) 寺崎富久長, 高橋政司, 金子輝雄: 住友金属, **24** (1972), p. 230
- 17) 秋末 治, 高階喜久男: 日本金属学会誌, **36** (1972), p. 1124
- 18) 岡本豊彦, 白岩俊夫, 福田 実: 住友金属, **14** (1962), p. 211