

.....
 論 文

UDC 669.15'3-194.2-122.2 : 621.785.3.014 : 620.186.5

Cu 添加低炭素鋼の再結晶集合組織*

阿 部 秀 夫**・鈴 木 竹 四***

戸 川 史 江***・宮 坂 直 樹****

Recrystallization Textures of Low Carbon Steels Containing
0.61% or 0.29% Copper

Hideo ABE, Takeshi SUZUKI,

Fumie TOGAWA, and Naoki MIYASAKA

Synopsis:

It is shown that the recrystallization texture of low carbon steel containing a small amount of copper depends on the heating rate of the final annealing. In a steel containing 0.61% Cu, the (222) pole intensity shows a maximum at about 100°C/hr and a minimum at about 50°C/hr. This behavior is interpreted qualitatively by separating the (222) pole intensity into two components; one from {111} <110> orientation and another from {554} <225> orientation. The microstructures after recrystallization are also interpreted by considering the difference in the condition for the selection of the recrystallized grains of each orientation. In a steel containing 0.29% Cu, the (222) pole intensity also shows a weak maximum at about 100°C/hr and the {111} <110> component is weak in the recrystallization texture of this steel.

(Received Feb. 4, 1974)

1. 緒 言

著者らは前報¹⁾において、C=0.008%、Mn=0.001%、Cu=0.56% (記号 CUK1)、および C=0.054%、Mn=0.001%、Cu=0.56% (記号 CUK2) の2種のCu添加鋼について、熱間圧延板を950°Cでオーステナイト化後焼入れ、約70%の冷間圧延を行ない、700°C-3hrの最終焼鈍を行なうときの再結晶集合組織を昇温速度の関数として調査した。その結果を要約すると、(1) 試料 CUK2は昇温速度約100°C/hrのときに最高の(222)極密度を示し、その再結晶集合組織の優先方位は{111} <110>である(2) 試料 CUK1では{111} <110>型再結晶集合組織はほとんど発達しない(3) いずれの試料でも再結晶完了後に展伸粒組織を示すが、伸長比はC=0.054%の試料のほうが大きい、などの結論が得られた。Cu添加鋼が展伸再結晶粒組織を示すことは、すでに1959年のRICKETT, LESLIE²⁾の研究で知られ、また前報¹⁾の研究に先だつて清水、高橋、末宗、加藤³⁾は、C=0.052%、Mn=0.18%、Cu=0.58%の試料について、工程は前報と異なるが、再結晶集合組織が{111} <110>優

先方位をもつことを報告している。

前報¹⁾の研究と平行して、小西、大橋、有馬⁴⁾⁵⁾はCu添加低炭素鋼板の諸特性に及ぼすC、Mnおよび熱処理の影響について広範囲の研究を行なった。その研究では、熱間圧延板を950°Cオーステナイト化後空冷または焼入れした試料、およびそれに350°Cまたは650°Cの析出処理をした試料に、約70%の冷間圧延を行ない、最終焼鈍は25°C/hrの昇温速度で700°C-10hr、または第1段焼鈍温度450°C~550°C、第2段焼鈍700°C-10hrの2段焼鈍について実験を行ない、機械的性質、 r 値、極密度、組織、電気抵抗などを詳細に調べている。また寺崎、金子⁶⁾は、0.49~1.00%の範囲のCu添加量に対し、約0.03~0.05%Cおよび(または)約0.2%のMnを添加または添加しない各鋼種について、熱間圧延板を950°Cでオーステナイト化後焼入れた試料、およ

* 昭和48年10月本会講演大会にて発表

昭和49年2月4日受付

** 東京大学工学部 工博

*** 東京大学工学部

**** 東京大学工学系大学院

びそれを 300°, 500°, 700°C で各 10 hr 焼きもどした試料に, 75% の冷間圧延を行ない, 20°C/hr または 160°C/hr の昇温速度で 710°C-16hr の最終焼鈍を行ない, 機械的性質, r 値, 極点図などを測定した。

また炭素含有量が 0.01% 以下で Cu を 0.26~1.69% 含む各鋼種について, 須藤, 橋本⁷⁾, 久保寺, 稲垣, 須田, 栗原⁸⁾ により詳細な実験が行なわれた。

現在までの研究結果のうち重要な実験事実は; (1) {111}<110> 型再結晶集合組織は, 約 0.5% の Cu と約 0.05% の C が共存する材料において最も顕著に発達する。それが発達するための製造条件は, 熱間圧延板をオーステナイト化後焼入れ, それに適当な温度と時間の析出処理を行なう⁹⁾ か, または冷間圧延後の最終焼鈍を適当な昇温速度で行なう¹⁾ ことである。(2) 展伸再結晶粒組織は, 0.05% C の共存しない材料でも得られるが, 0.05% C の共存する材料のほうが展伸粒の得られる条件範囲は広い⁴⁾⁵⁾。(3) 0.05% C が共存すると, Cu の析出速度が速く, 再結晶温度は低くなる¹⁾⁴⁾⁵⁾。そのことは C の共存する材料では冷間圧延前後において転位密度が非常に高いことと関連がある。

著者らは前報¹⁾の研究に続き, Mn を添加した 2 種の試料について, 小西ら⁴⁾⁵⁾の研究, 寺崎ら⁶⁾の研究を考慮し, 実験条件として, 熱間圧延板の処理を「950°C オーステナイト化後焼入れ」のみに限定し, 可変因子として圧延率 (60, 70, 80 各 %) および最終焼鈍昇温速度をとり前報と同様な実験を行なった。

2. 試料および実験方法

試料は板厚約 2.8mm の熱間圧延板で, Table 1 に試料記号と鋼塊分析値を示す*。試験工程の概略図を

* 前報¹⁾の試料記号と区別するため, CUK5, CUK6 の各記号を用いた。

Table 1. Chemical composition of materials (in wt%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu
CUK 5	0.036	0.012	0.24	0.003	0.008	0.29
CUK 6	0.045	0.007	0.16	0.005	0.006	0.61

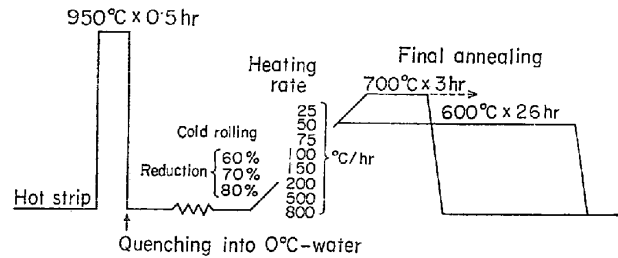


Fig. 1. Diagram of processing for experiment.

Fig. 1 に示す。前報¹⁾と同様に熱間圧延板を 950°C で 0.5 hr オーステナイト化後 0°C の水中に焼入れ, 60%, 70%, または 80% の冷間圧延を行ない, 25°C/hr~800°C/hr の範囲内の 8 段階の昇温速度で加熱し, 600°C-26 hr または 700°C-3hr (一部は 24hr) の最終焼鈍を行なった。焼鈍はすべてアルゴン気流中で行なった。

各最終焼鈍板について MoK α 線により (222), (211), (200), (110) 各極密度の測定, 工程中の主要な段階について (200) 極点図の測定と光学顕微鏡組織観察, 最終焼鈍の昇温過程における (222), (200) 各極密度の変化の測定と組織変化の観察を行なった。

3. 実験結果

3.1 熱間圧延板の焼入れ組織

Photo. 1 に 950°C-0.5hr オーステナイト化後 0°C の水中に焼入れた CUK 5 および CUK 6 各熱間圧延板の組織を示す。CUK 5 が主としてフェライト粒組織を示



(a) CUK 5



(b) CUK 6

Photo. 1. Microstructures of hot strips austenitized at 950°C for 30 min. and quenched into 0°C-water.

しているのに対して、CUK 6 には多くのマルテンサイト状組織が含まれている。焼入れ後のピッカース硬さは CUK 5 が 140 であるのに対し、CUK 6 は 165 である。

3.2 冷間圧延集合組織

Fig. 2 (a), (b) は、CUK 6 において 70% および 80% の冷間圧延を行なった状態の (200) 極点図である。いずれも典型的な α 鉄の冷間圧延集合組織であるが、圧延率 80% のほうが {211} <011> 方位に近い成分の集積が高い傾向がある。

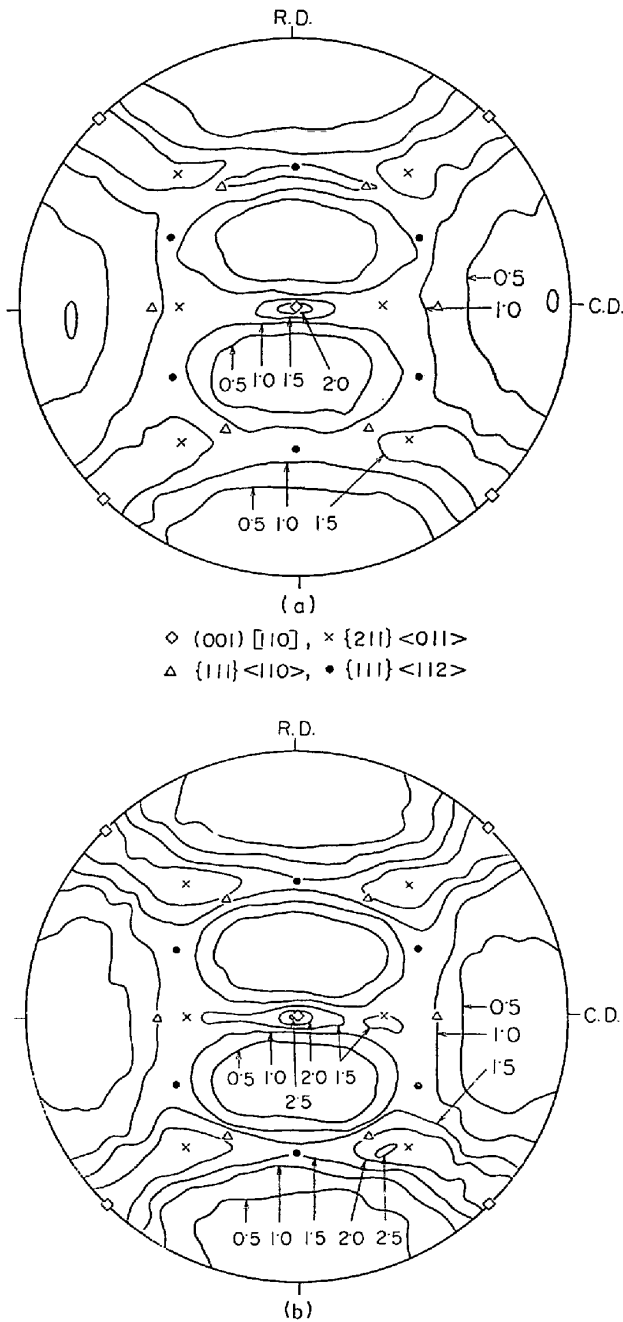


Fig. 2. (200) pole figures for the rolling textures of CUK6 cold rolled to (a) 70% and (b) 80% reductions.

3.3 再結晶集合組織

Fig. 3 に、70% および 80% の冷間圧延を行なった CUK 6 に 600°C -26hr の最終焼鈍を行なった後の (222), (211), (200), (110) 各極密度を昇温速度の関数として示す。この結果は、後に示す 700°C での最終焼鈍のばあいと異なり、(222) 極密度の昇温速度による変化が比較的小さいことが注目される。また圧延率 80% のばあいには、昇温速度が速いほど (222) 極密度は低下する傾向を示すのに対し、圧延率 70% のばあいには昇温速度が遅い範囲で (222) 極密度が低い。すべての昇温速度において圧延率 80% のほうが (222) 極密度および (211) 極密度は高く (200) 極密度は低い。

Fig. 4 には、60%, 70% および 80% の冷間圧延を行なった CUK 5 および CUK 6 の 700°C -3hr 最終焼鈍後の (222), (211), (110), (200) 各極密度を昇温速度の関数として示した。CUK 5, CUK 6 のいずれの試料でも、圧延率が高いほど (222) 極密度は高く、(110) 極密度は低くなる。CUK 5 においては、(222) 極密度は昇温速度 100°C/hr 付近でわずかな極大を示すが、すべての圧延率において、昇温速度が遅くなるほど (222) 極密度が高くなる。

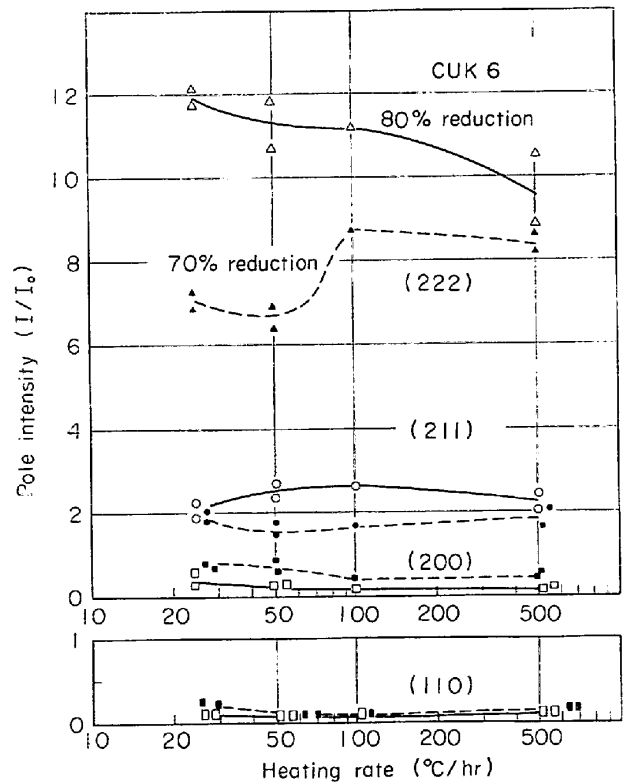


Fig. 3. Variations of pole intensities of CUK 6 with heating rate in final annealing at 600°C for 26hr.

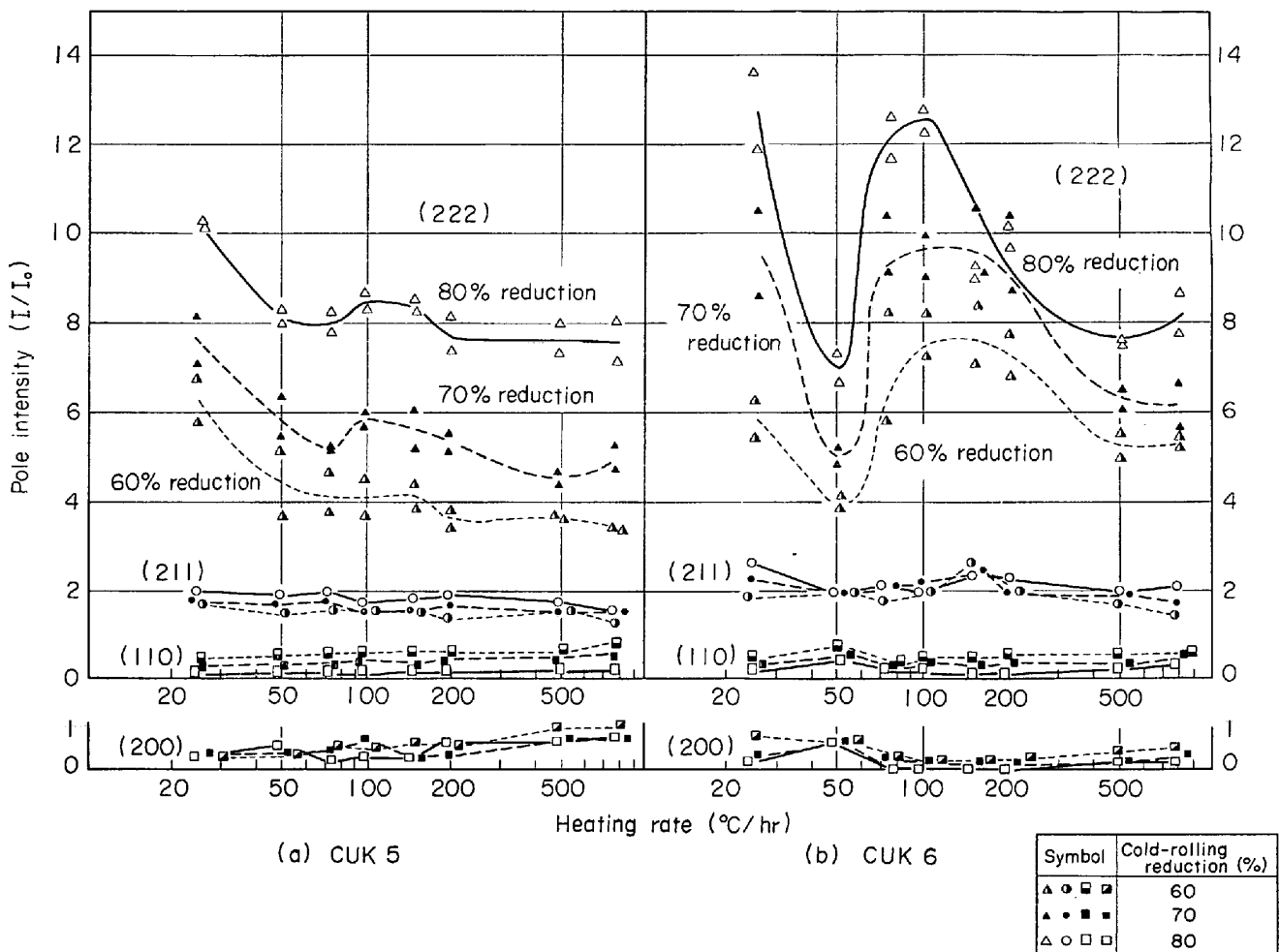


Fig. 4. Variations of pole intensities of (a) CUK5 and (b) CUK6 with heating rate in final annealing at 700°C for 3hr.

CUK 6 については、測定点の間隔がひろいので正確なことはいえないが、(222) 極密度は約 100°C/hr で極大、約 50°C/hr で極小を示している。50°C/hr での (222) の極小に対応して (110), (200) 各極密度は極大を示す。

Fig. 5(a)~(h) には、CUK 6 について、Fig. 4 (b) の極密度測定結果を考察するさいに重要と思われる各点に対応する (200) 極点図を示した。(a), (b) は圧延率 60% で昇温速度 25°C/hr, 100°C/hr のばあい、(c), (d) は圧延率 70% で昇温速度 25°C/hr, 100°C/hr のばあい、(e), (f), (g), (h) は圧延率 80% で昇温速度 25°C/hr, 50°C/hr, 100°C/hr, 500°C/hr のばあいについて 700°C -3hr 最終焼鈍後の (200) 極点図である。(a), (b) の圧延率 60% のばあいは、いずれも {554}<225> 方位と {111}<110> 方位におもな集積があるが、(a) の昇温速度 25°C/hr のほうが {554}<225> の強度が高い。またいずれも微弱な {hk0}<001> 方位成分を含むがその量は (a) のほうがやや多い。(c), (d) の圧延率 70% のばあいには、圧延率 60% のばあいよりも

集積度は高まっているが、これらも {554}<225>, {111}<110> 各方位に主として集積している。それらの各 {200} 極点における強度を比較すると、方位分散の評価が正極点図では難しいが、(d) の 100°C/hr のほうが {111}<110> 方位の量が多いといえる。また (c), (d) のいずれにも微弱な {hk0}<001> 方位を含んでいるが、その量は (c) のほうが多い。(e)~(h) の圧延率 80% のばあいには、優先方位は明らかに {554}<225> 方位であり、その方位からの分散の端が {111}<110> 方位となっている。{554}<225> 優先方位の量は、Fig. 4(b) の曲線とよく対応し、(e) の 25°C/hr, (g) の 100°C/hr のばあいにとくに多い。

3.4 再結晶後の光学顕微鏡組織、再結晶粒平均直径および伸長比

Photo. 2 に 70% の冷間圧延を行なった CUK 5 と CUK 6 の 700°C -3 hr 最終焼鈍後の再結晶粒組織を示す。CUK 5 では昇温速度が速いほど再結晶粒は小さくなる傾向を示す。500°C/hr での再結晶粒はほぼ等軸粒

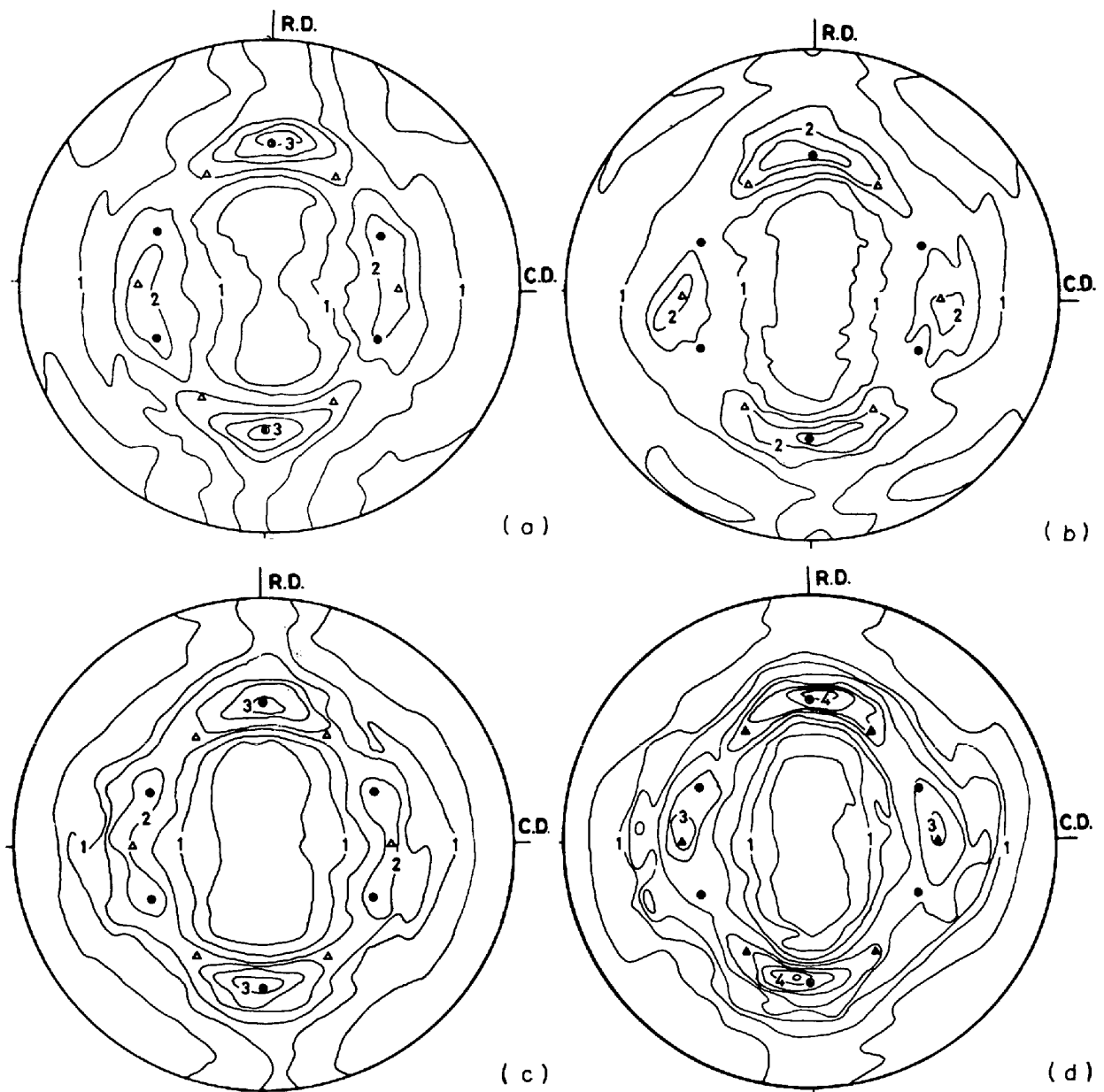

 $\Delta\{111\} <110>, \bullet\{554\} <225>$

Figure	Cold-rolling reduction (%)	Heating rate (°C/hr)
(a)	60	25
(b)	60	100
(c)	70	25
(d)	70	100
(e)	80	25
(f)	80	50
(g)	80	100
(h)	80	500

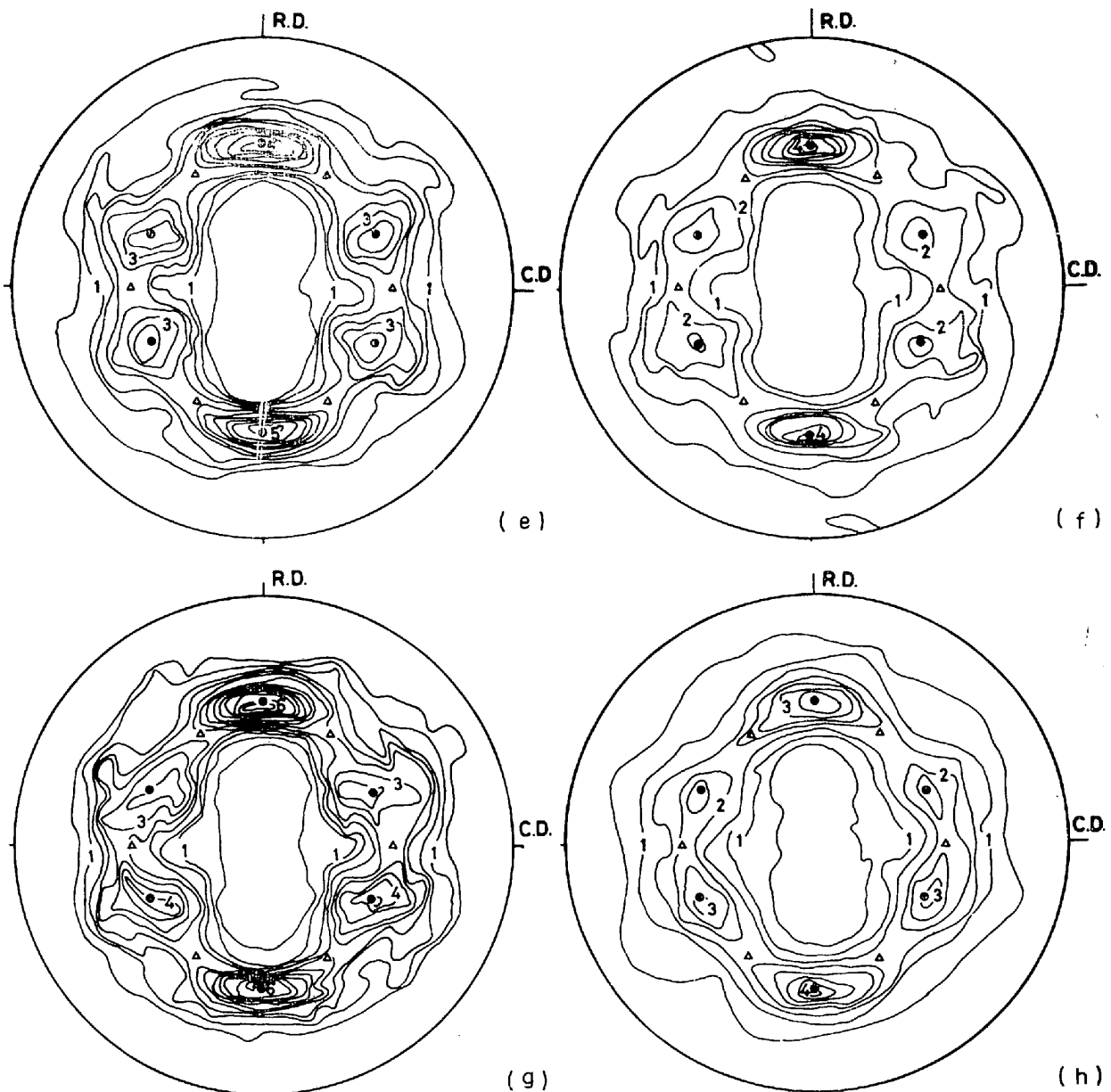


Fig. 5. (200) pole figures for the annealing textures of CUK6 after final annealing at 700°C for 3hr.

に近い。CUK 6 においては昇温速度による組織の変化が明りようにみられる。Fig. 4(b) の (222) 極密度の変化で極小を示した 50°C/hr では再結晶粒が細かい。それに対して (222) 極密度が極大を示した 100°C/hr では大きく伸長しており、また (222) 極密度が高かった 25°C/hr では混粒組織を示す。

Fig. 6 は再結晶粒平均直径と伸長比の昇温速度による変化を示す。70% および 80% の冷間圧延した試料では再結晶粒平均直径は極大および極小をもつが、Fig. 4(b) の (222) 極密度の極大および極小と完全には対応していない。伸長比は一般に昇温速度が速いほうでは大き

く、遅くなるほど小さくなる傾向をもつ、Photo. 2 に示したように昇温速度が遅い側では混粒組織なので、その影響も考慮する必要がある。

3.5 再結晶過程における (222) および (200) 極密度の変化

Fig. 7 に CUK 6 について、最終焼鈍の昇温過程での (222) および (200) 各極密度の変化を示す。いずれの昇温速度についても (222) 極密度の増加は 600°C から 650°C までの間に起こっている。再結晶進行途中の各段階を光学顕微鏡により観察した結果によると、再結晶の進行過程は 25°C/hr ~ 500°C/hr の範囲の昇温速度によつ

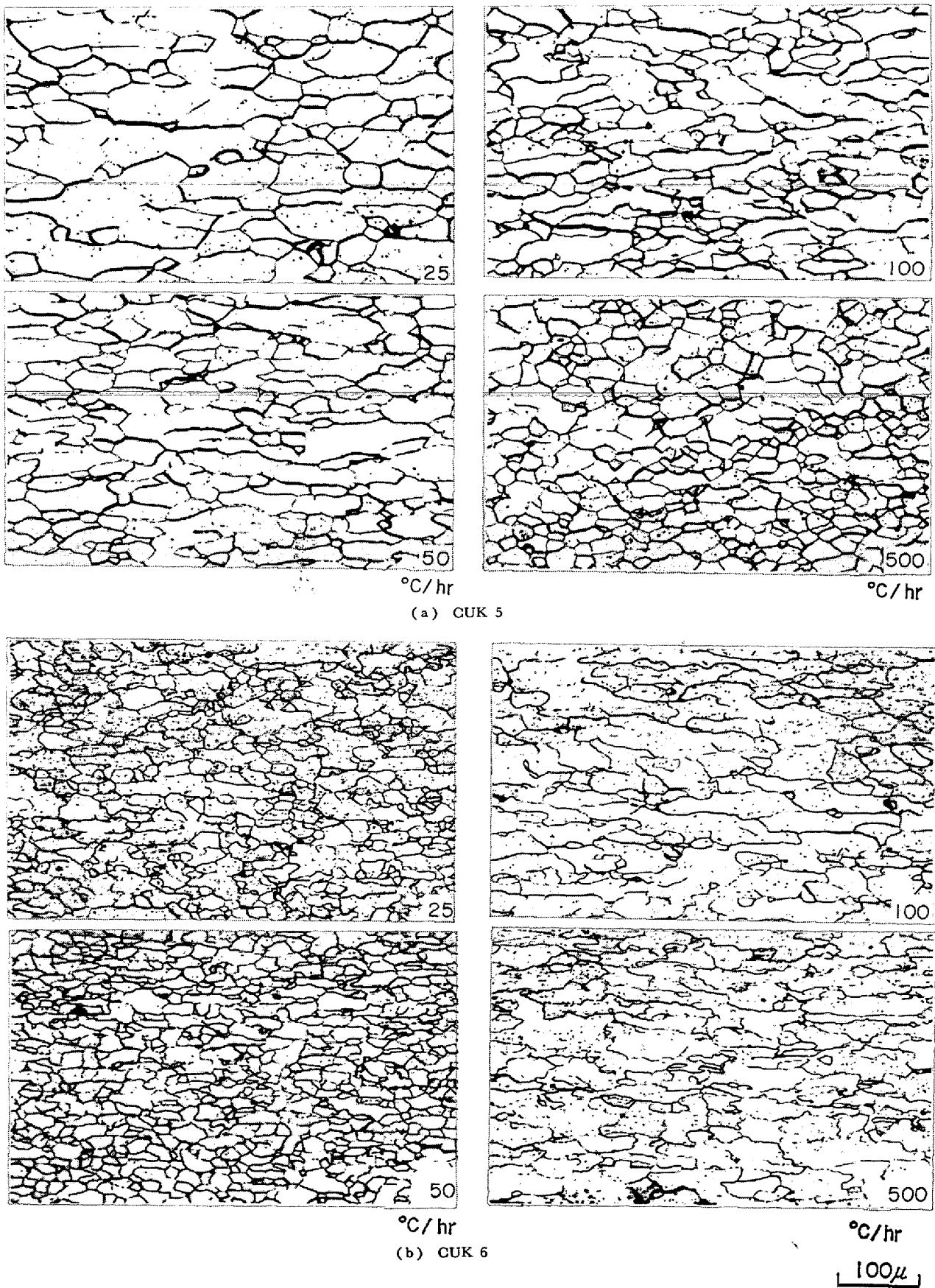


Photo. 2. Microstructures of (a) CUK 5 and (b) CUK 6 annealed at 700°C for 3hr. with various heating rates after 70% cold rolling.

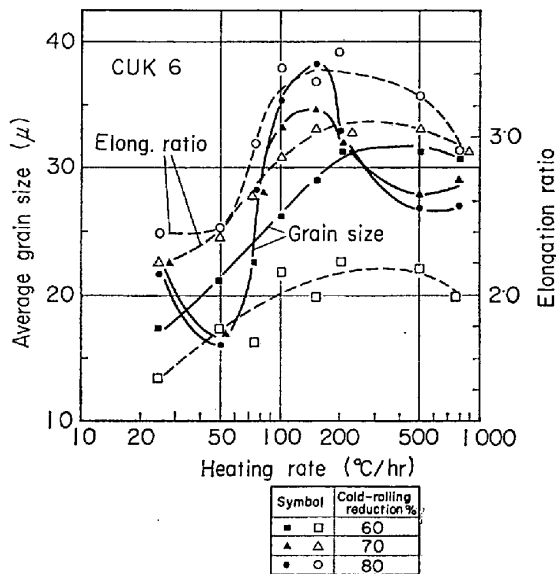


Fig. 6. Changes in average grain size and elongation ratio with the heating rate in final annealing at 700°C for 3hr.

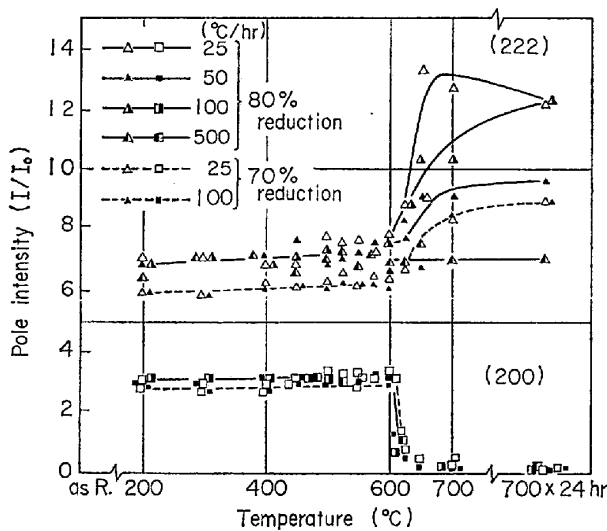


Fig. 7. Variations in (222) and (200) pole intensities during heating at a rate of 25°, 50°, 100° or 500°C per hour. Observed in CUK6 specimen cold rolled to 80% or 70% reduction.

てそれほど大きな差はなく、600°C では再結晶率数 %, 625°C では大部分の領域が再結晶粒でおおわれ、650°C では一次再結晶が終了している。したがって Fig. 7 から (222) 極密度の増加は一次再結晶進行途中で起こり、一次再結晶完了後の粒成長は本研究の (222) 極密度の増加には寄与していない。(222) 極密度の増加に対応して (200) 極密度はすべてのばあいにおいて 600°C から 625°C にかけて急激に減少している。

4. 考 察

前報¹⁾において、Mn をほとんど含まない試料 CUK 2 (組成; C=0.054%, Mn=0.001%, Cu=0.56%) の 70% 冷間圧延板に昇温速度 100°C/hr で 700°C-3hr の最終焼鈍をした後の再結晶集合組織の優先方位は {111}〈110〉方位であることを示した。それと同じ優先方位は、清水、高橋、末宗、加藤²⁾によつて少量の Mn を含む試料 (C=0.052%, Mn=0.18%, Cu=0.58%) において前報¹⁾と異なる工程で得られており、適切な工程をとれば Mn 含有量に関係なく {111}〈110〉型再結晶集合組織が得られるようである。しかし本報の CUK 6 (C=0.045%, Mn=0.16%, Cu=0.61%) の Fig. 5(d) の再結晶集合組織では明らかに {554}〈225〉方位成分の量が多く、この極点図は寺崎、金子³⁾の報告している C=0.037%, Mn=0.22%, Cu=0.50% の試料の極点図と類似している。いままで報告された極点図の数が少ないので確実な結論は与えられないが、C=0.052~0.054, Cu=0.56~0.58% の組成では {111}〈110〉型再結晶集合組織が得られ、C および (または) Cu 含有量がそれよりも少なくなると {554}〈225〉方位成分が増加するようである。

Fig. 5 の (200) 極点図にはすべて {554}〈225〉方位成分が多量に含まれ、それは圧延率の高い試料ほど多くなっている。したがって本報における再結晶集合組織の成因の考察には、{554}〈225〉方位成分と {111}〈110〉方位成分の成因を区別して考えなければならない。

低炭素鋼板の再結晶集合組織に関する従来の研究によれば、{111}〈110〉方位と {554}〈225〉方位の再結晶粒が出現する場所は異なり、前者は {111} 方位変形結晶領域⁹⁾、後者は {211}〈011〉方位変形結晶領域であると見られている。著者ら⁹⁾¹⁰⁾がアルミニウムキルド鋼の再結晶初期段階の電顕観察で示したように、{111}〈110〉方位の再結晶粒は、析出粒子による転位の再配列の阻止の効果によりいわゆる「核生成」の段階で選択されると推定されるのに対し、{554}〈225〉方位は {211}〈011〉変形方位と〈110〉軸に関する約 35° の回転関係にあつて、この回転関係は Goss 方位と {111}〈112〉方位変形結晶の間の関係として古くから知られ、Hu¹¹⁾の見解によれば、それは oriented growth の条件を満たしていると考えられるので、一次再結晶粒の成長過程で優先成長するものと推定される。

(222) 極密度には主として {111}〈110〉方位成分と {554}〈225〉方位成分の両成分からの寄与があり、したがって Fig. 3, Fig. 4, Fig. 7 における (222) 極密度の昇温速度、加熱温度などの関数としての挙動については、それ

らの2方位成分からの寄与を分離して考察することが必要である。

Fig. 4(b)において、(222)極密度が昇温速度約 100°C/hr で極大、約 50°C/hr で極小を示しているが、このことは 100°C/hr と 25°C/hr で再結晶過程の本質に相違があることを示唆している。Fig. 5 の CUK 6 の (200) 極点図において、(a)と(b)、(c)と(d)をそれぞれ比較すると、25°C/hr では {554}⟨225⟩ 方位成分が比較的多く、100°C/hr では {111}⟨110⟩ 方位成分が比較的多いといえる。しかし Fig. 5 の (e)~(h) ではすべて {554}⟨225⟩ 方位が強く {111}⟨110⟩ 方位成分は相対的に弱い。したがってこの Fig. 5 の極点図の結果から「25°C/hr のときは {554}⟨225⟩ 方位成分の発達、100°C/hr のときは {111}⟨110⟩ 方位の発達が相対的に優越している」という極端な結論を下すことは避けるべきであるが、ある程度そのような傾向があることを考慮して考察してみることは、再結晶集合組織の成因を究明するために有意義と思われる。

そこで Fig. 4(b) の CUK 6 についての (222) 極密度の昇温速度による変化を、Fig. 8 に示すように {111}⟨110⟩ 方位からの寄与と {554}⟨225⟩ 方位からの寄与とに分離して考える。{111}⟨110⟩ 方位の再結晶粒は、最も適切な昇温速度 (約 100°C/hr) のとき析出粒子の最も効果的な作用が与えられて 'oriented nucleation' する⁹⁾ であろう。それに対して 'oriented growth' で {211}⟨011⟩ 変形結晶領域から発達する {554}⟨225⟩ 方位の再結晶粒は、昇温速度が遅いほど顕著に発達すると考えられる。{554} 面と {111} 面はわずかの角度差があるので、(222) 極密度に対する {554}⟨225⟩ 方位成分の寄与は、その成分の量が多いわりには比較的小さいであろう。Fig. 8 に

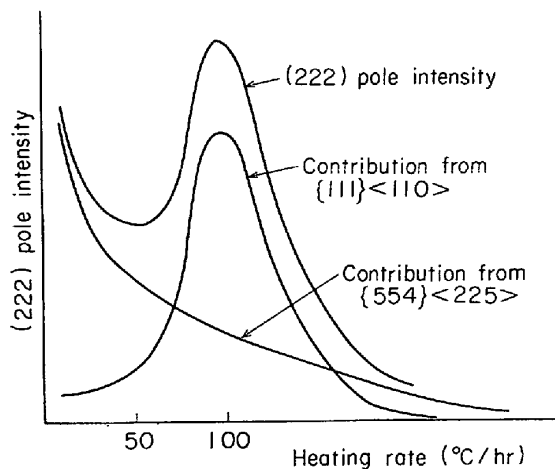


Fig. 8. Interpretation of the maximum and minimum in the (222) pole intensity versus heating rate curve.

よる Fig. 4(b) の極大、極小の現われる理由の説明はかなり極端な表現ではあるが、定性的にはこのような説明は可能であろう。

これと同じ見解は、清水、松倉、高橋、品川¹²⁾によつてアルミニウムキルド鋼についての同様な実験結果を説明するために示され、寺崎、高橋、金子¹³⁾により批判されている。この場合清水らは圧延率 65% について実験を行なつたのに対し、寺崎らは圧延率 80% について実験をしており、両者で冷間圧延率が異なっていることを考慮する必要がある。圧延率が高くなると {554}⟨225⟩ 方位の再結晶粒が発達しやすくなり、Fig. 8 の {554}⟨225⟩ 方位による (222) 極密度への寄与を示す曲線のレベルが全体的に高くなると考えられる。

ここで、Fig. 8 の考え方によつてほかの実験事実も矛盾なく説明できることが注目される。

まず Photo. 2 (b) の再結晶粒組織において、昇温速度 100°C/hr では比較的均等な大きさの展伸粒を示しているが、25°C/hr では多くの小さい再結晶粒を含む混粒組織である。混粒を示すことは、異なる方位の変形結晶粒からの再結晶粒が混在するためか、または再結晶粒の成長速度の方位依存性が著しいために混粒となつたことを示唆する。したがって Photo. 2 (b) は Fig. 8 の見解と矛盾なく説明される。

Fig. 6 の再結晶粒平均直径と伸長比のデータには混粒の影響が入っているため、それと Fig. 4(b) の (222) 極密度の挙動との対応はつけがたい。

Fig. 7 において、(222)極密度は約 600°C から約 650°C にかけて増加しているばあいが多く、その増加の勾配が「圧延率 80%、昇温速度 25°C/hr」のばあいに最大であることは、これらの再結晶集合組織に {554}⟨225⟩ 方位が多く含まれ、その方位の再結晶粒は再結晶の進行途中での oriented growth により発達することを考えれば理解できることである。

Fig. 4(a) の CUK 5 では、100°C/hr 付近での極大が非常に弱い、それはこの試料の Cu および C 量が少なく {111}⟨110⟩ 方位再結晶粒が発達しなかつたためとして Fig. 8 の見解によつて説明される。

最後に Fig. 4(b) の 700°C 焼鈍の結果と、Fig. 3 の 600°C 焼鈍の結果との比較考察をしておこう。Fig. 4 (b) と Fig. 3 を比較すると、CUK 6 において高い (222) 極密度を得るための昇温速度選定範囲は、最終焼鈍を 600°C としたほうがはるかに広い。この結果は、見かけ上、速い昇温速度で加熱して 600°C で保持するときの再結晶過程が、それよりもはるかに遅い速度で加熱して 700°C で保持するときの再結晶過程と類似して

いるという考えを適用して説明される。すなわちFig. 3のすべての昇温速度範囲が、Fig. 4(b)の約25°C/hr以下の昇温速度範囲に該当しているものといえる。

5. 結 論

C=0.036%, Mn=0.24%, Cu=0.29% (記号CUK 5), および C=0.045%, Mn=0.16%, Cu=0.61% (記号CUK 6)の2種のCu添加低炭素鋼熱延板を950°Cから0°Cの水中に焼入れ, 60, 70 および80%の各冷間圧延を行ない, 25°C/hr~800°C/hrの8段階の昇温速度で加熱し, 最終焼鈍後の再結晶集合組織におよぼす冷間圧延率および昇温速度の影響について調査した。その結果次のような結論が得られた。

(1) 0.29%Cu添加鋼の再結晶集合組織は昇温速度による変化が小さい。700°C-3hrの最終焼鈍を行なつたばあい, 昇温速度25°C/hrで(222)極密度がもつとも高く, 再結晶粒も大きい。

(2) 0.61%Cu添加鋼の700°C-3hr最終焼鈍後の再結晶集合組織は, 昇温速度による変化が顕著である。このばあい100°C/hr付近で(222)極密度が極大になり, 50°C/hr付近で極小値をとり, 25°C/hrで再び高くなる。最終焼鈍後の組織観察によると, 25°C/hrでは混粒組織を示し, 50°C/hrでは再結晶粒が細かく, 100°Cでは大きく展伸した再結晶粒組織を示す。

(3) 0.61%Cu添加鋼においても600°C-26hrの最終焼鈍のばあいは, 再結晶集合組織の昇温速度による変化が比較的小さい。

(4) 再結晶の途中と再結晶完了後の長時間焼鈍における組織観察および極密度測定から本実験の範囲内では, (222)極密度は主として1次再結晶進行中に増加し, 後の粒成長の寄与は小さい。

(5) 0.29%Cuおよび0.61%Cu添加鋼のいずれにおいても, 冷間圧延率が60, 70, 80%と高くなるにつ

れて(222)極密度は増加する。0.61%Cu添加鋼について圧延率および昇温速度と再結晶集合組織の優先方位との関係を見ると, 圧延率が高いほど{554}<225>方位が強くなり, また60%および70%の圧延率のばあいには昇温速度25°C/hrでは{554}<225>方位が強く, 100°C/hrでは{111}<110>方位の割合が多い。

本研究に用いた実験試料を提供された川崎製鉄株式会社技術研究所大橋延夫氏に謝意を表す。

なお, 本研究は鉄鋼基礎共同研究会再結晶部会の分担研究として行なつたものである。

文 献

- 1) 阿部, 鈴木, 戸川: 鉄と鋼, 59 (1973), S 199; 60 (1974), p. 217
- 2) R. L. RICKETT and W. C. LESLIE: Trans. A.S.M, 51 (1959), p. 310
- 3) 清水, 高橋, 末宗, 加藤: 鉄と鋼, 58 (1972), S 267; 第5回再結晶部会資料, 鉄再 31, (1972年7月)
- 4) 小西, 大橋, 有馬: 鉄と鋼, 59 (1973), S 200; 第6回再結晶部会資料, 鉄再 36, (1972年12月)
- 5) 小西, 大橋, 有馬: 鉄と鋼, 59 (1973), S 648; 第8回再結晶部会資料, 鉄再 50, (1973年12月)
- 6) 寺崎, 金子: 鉄と鋼, 59 (1973), S 495; 第7回再結晶部会資料, 鉄再 45, (1973年7月)
- 7) 須藤, 橋本: 鉄と鋼, 58 (1972), S 476; 第6回再結晶部会資料, 鉄再 35, (1972年12月)
- 8) 久保寺, 稲垣, 須田, 栗原: 鉄と鋼, 59 (1973), S 198; 第7回再結晶部会資料, 鉄再 44, (1973年7月)
- 9) H. ABE and T. SUZUKI: Trans. ISIJ, 11 (1971), p. 201
- 10) 阿部, 鈴木, : 鉄と鋼, 59 (1973), p. 241
- 11) H. HU: Trans. Met. Soc. AIME, 224 (1962), p. 75
- 12) 清水, 松倉, 高橋, 品川: 鉄と鋼, 50 (1964), p. 2094
- 13) 寺崎, 高橋, 金子: 住友金属, 24 (1972), p. 230