

第4章 Ti-Ni形状記憶合金薄板の集合組織に及ぼす圧延率の効果

4-1 緒言

形状記憶合金薄板を用いて2次元形状のアクチュエータなどに応用するためには、圧延による材料特性の変化を評価する必要がある¹⁻³⁾。薄板を効率良く作成するためには、冷間圧延率を高めた加工が望ましく、この場合には、変態歪みの異方性に及ぼす圧延率の効果を評価することが重要になる^{4),5)}。この章では加工集合組織、再結晶集合組織を持つ2種類の熱処理条件の試料について、変態歪みの異方性を実験的に明らかにし、集合組織の違いによる影響を、比較・検討することを目的としている。そのために、まず、DSCにより変態温度を測定し、次にX線回折による極点図測定を{110}、{200}、{211}の3面に対して行い、集合組織を測定した。得られた集合組織の情報を基にR相とマルテンサイト変態歪みを計算により求めた。さらに、圧延方向から15度間隔で7方位に切り出した試料を用いて、一定荷重下で、冷却・加熱を行い、形状記憶特性を評価し、実験的にも変態歪みを評価した。

4-2 試料作成と実験方法

試料の作成方法と実験方法は、2-1ですでに述べている。そのため、ここでは圧延率の効果に関する部分についてのみ、詳しく説明する。

用いた試料はTi-50.18at%Niで、インゴットから多段ロールの圧延機を用いて、厚さ0.2mmの試料を作成した。この試料に973K-0.6Ksで、熱処理を行い、再結晶した状態の試料を作成した。この試料をスタート材として、最終冷間圧延率が0%~70%の間で、圧延加工を行い、厚さが0.2mm~0.07mmの試料を作成した。この圧延薄板を用いて、それぞれの測定用の試料を作成した。それぞれの試料に対して、673Kと1073Kの2種類の熱処理を施し、加工集合組織、再結晶集合組織を持つ試料とした。

4-3 実験結果及び考察

4-3-1 変態温度の圧延率依存性

まず始めに、673K材について変態温度の圧延率依存性を明らかにしていくことにする。各圧延率の試料について、変態温度がどのように変わるかを明らかにするために、DSC曲線を示したいと思う。Fig.4-1は、それぞれの圧延率の試料のDSC曲線である。Fig.4-1の左側が冷却カーブ、右側が加熱カーブである。冷却時のカーブを見ると、圧延率0%の試料では、母相からマルテンサイト相に1段階で変態が起こっている。10%材ではR相変態が現れ、2段階変態が現れる。この理由は、R相変態は、加工により転位密度が高い試料や時効により試料内部に析出物が形成されている場合、R相変態が起こるからである。さらに加工が進み、40%圧延材では、R相、マルテンサイト相共に、加工の影響で変態温度が下がる。しかし、R相変態温度よりも、マルテンサイト変態温度の方が加工の影響を受けやすいので、マルテンサイト変態温度は極端に下がる。さらに加工が進むと、マルテンサイト変態温度はさらに低下して、70%圧延材では、測定可能な温度領域では、はっきりしたマルテンサイト変態ピークは見られなかった。ここで、R相変態温度は、先ほどの効果で、加工が進むにつれて減少するはずだが、逆に上昇する。この理由は、加工が進むにつれて内部応力場が形成され、R相の核発生を助けるため、加工が進むにつれてR相変態温度を上昇させる効果があるからである。この効果の方が強いので、R相変態温度は圧延率の増加により上昇する。

次に逆変態を見ていくことにする。0%材、10%材では、一段階で逆変態が起こっている。40%材、50%材では、マルテンサイト相からR相、R相から母相への逆変態ピークが重なって現れる。また、70%圧延材では、マルテンサイト相からR相への逆変態ピークは見られなかった。一般に、加工の影響は、逆変態を妨げる方向に働くので、逆変態温度は加工が進むに連れて上昇する。しかし、逆変態温度は変態温度ほど加工の影響を受けなかった。

次に、1073K材についても、同様の評価をしてみたいと思う。

Fig.4-2は、1073K材のDSC曲線である。左側が冷却曲線、右側が加熱曲線である。まず、冷却曲線について見ていくことにする。0%材では一般的なDSCの冷却曲線が現れているが、10%材では、マルテンサイト変態ピークの左側に肩が現れる。これは加工の影響で、試料内部に部分的にマルテンサイト変態しにくい部分が形成されたために、変態温度が下がり、その部分のマルテンサイト変態のピークがメインの変態ピークと重なっているからである。加工が進むに連れて、サブピークの変態温度がシフトしていることが解る。また、70%材では、ピークがブロードになり、全体的に変態しにくくなっている。次に逆変態を見ると、逆変態ピークは、メインのピークの左側に別のピークが重なった形になっている。

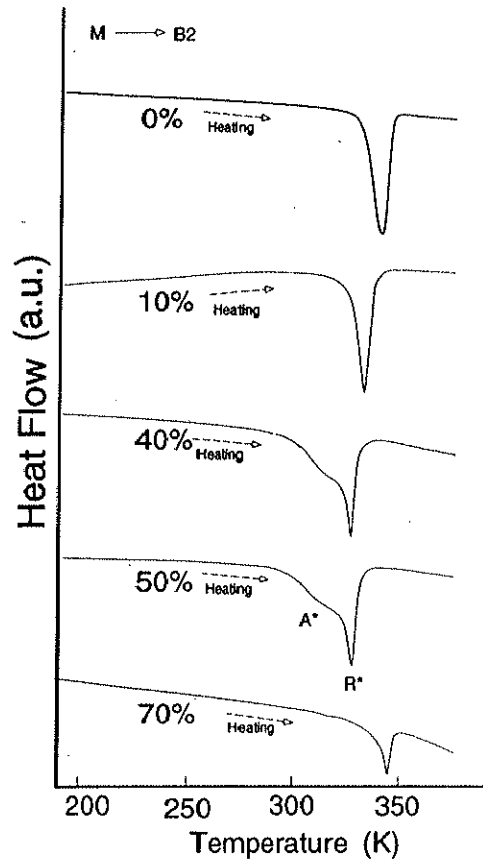
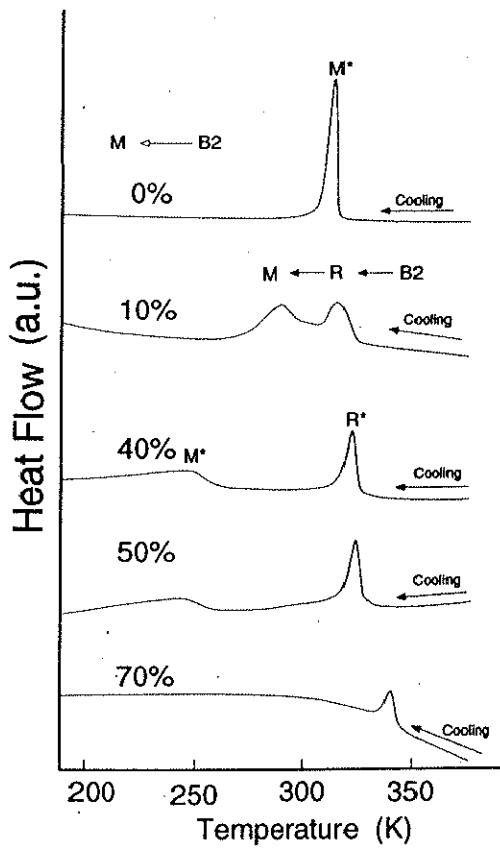


Fig.4-1 673K材のDSC曲線

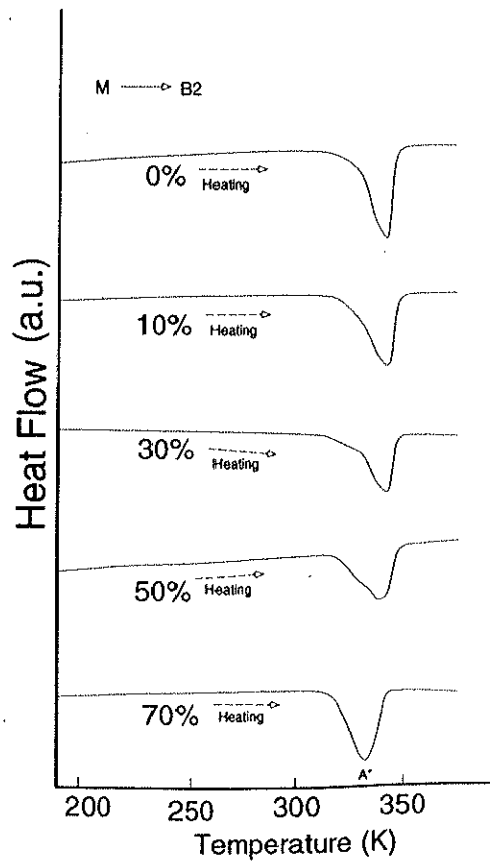
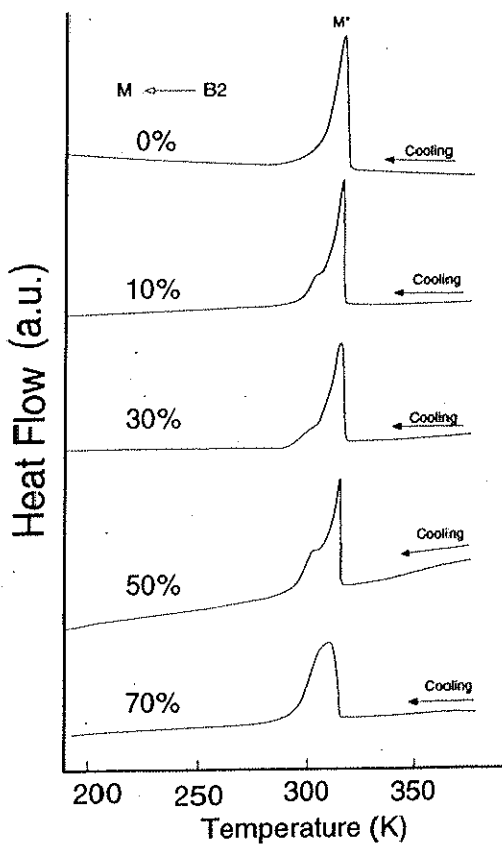


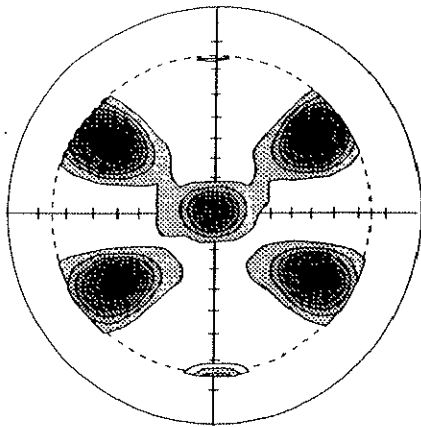
Fig.4-2 1073K材のDSC曲線

4-3-2 圧延率の違いによる集合組織の相違

次に材料の圧延率の違いにより、集合組織がどのように変化するかを評価していくことにする。まず、加工集合組織の試料である673K材について見ていくことにする。集合組織の評価には、正極点図、結晶方位分布関数(ODF)、逆極点図の3つの方法があるが、まず、正極点図について評価を行うことにする。

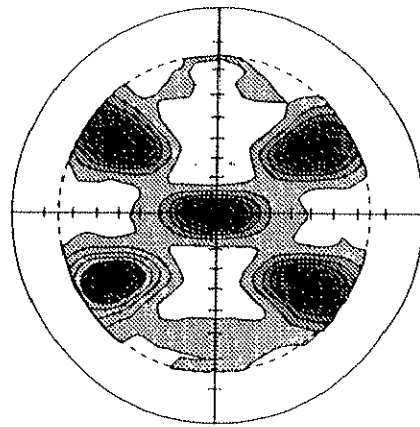
Fig.4-3は、0%材、10%材の{110},{200},{211}の3面の正極点図を示している。0%材は加工を行っていないので、再結晶集合組織の状態になっている。これらの極点図から、集合組織は、3-3-2の1073K材と同じ{110}<1 $\bar{1}$ 0>だということがわかる。10%材では、加工の影響が小さく、正極点図の形に違いは見られなかった。さらに、Fig.4-4は、40%材、70%材の正極点図を示している。40%材、70%材の試料では、0%材、10%材と比較して、{200}正極点図、{211}正極点図は、圧延率の効果があまり現れていないが、{110}正極点図の集合組織には、違いが現れる。

CW=0%

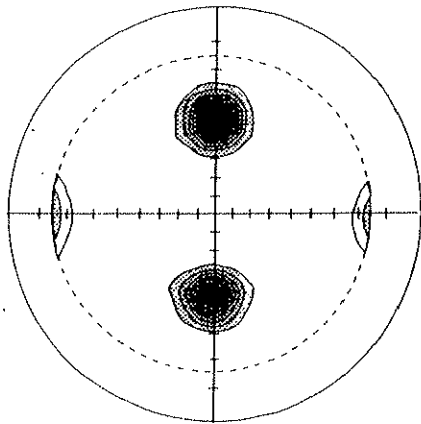


{110}, I_{max}=7.05

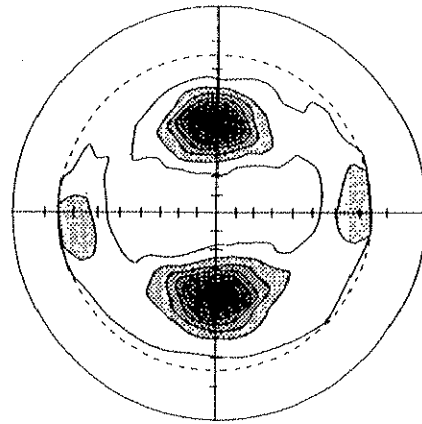
CW=10%



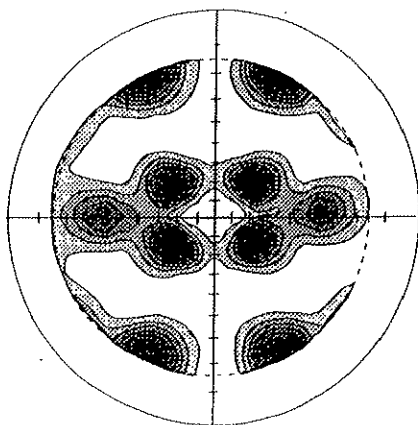
{110}, I_{max}=5.77



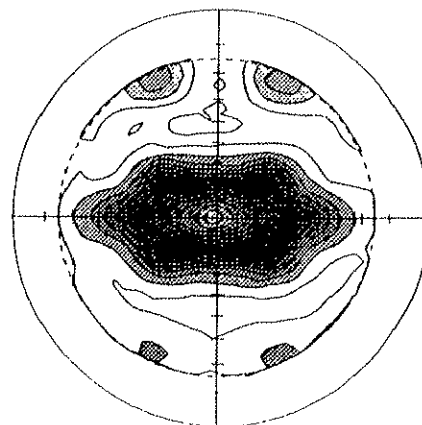
{200}, I_{max}=11.20



{200}, I_{max}=6.41



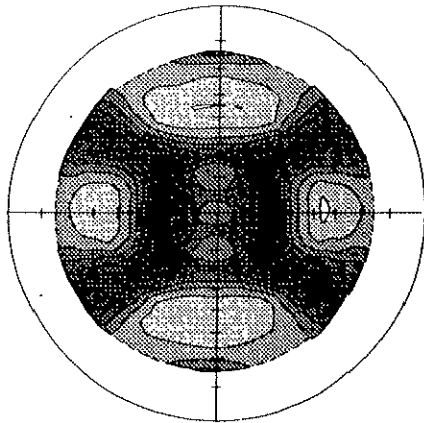
{211}, I_{max}=5.40



{211}, I_{max}=3.16

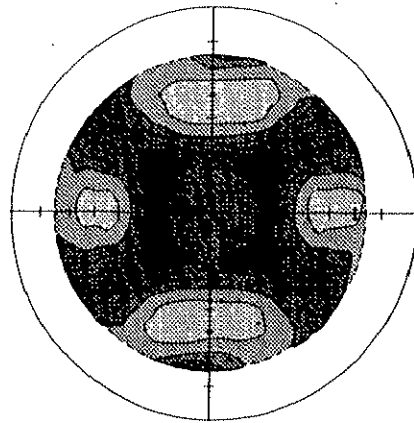
Fig.4-3 0%材、10%材の{110},{200},{211}3面の正極点図

CW=40%

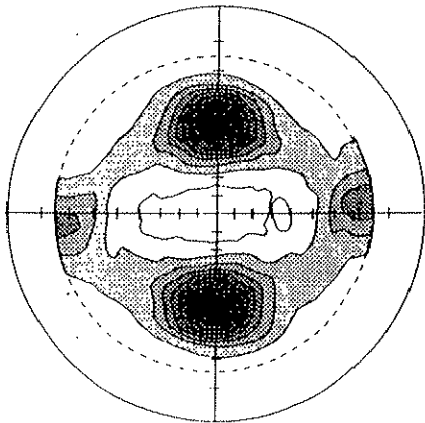


{110}, I_{max}=3.51

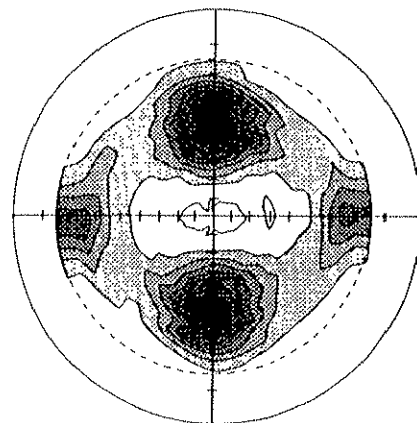
CW=70%



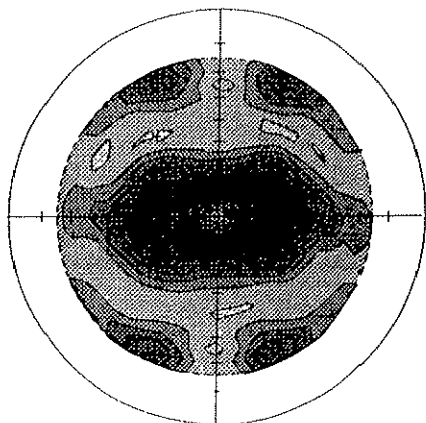
{110}, I_{max}=3.78



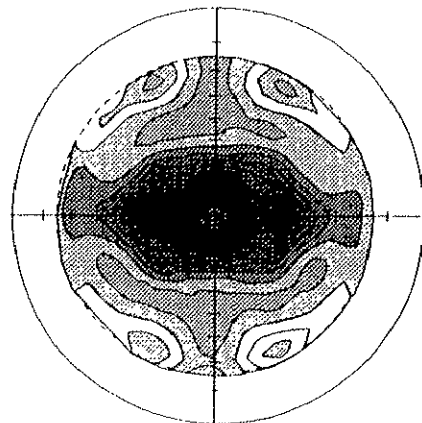
{200}, I_{max}=3.97



{200}, I_{max}=3.54



{211}, I_{max}=1.95



{211}, I_{max}=2.08

Fig.4-4 40%材、70%材の{110},{200},{211}3面の正極点図

そこで、全ての圧延率の試料に対して、{110}正極点図の変化を評価してみたいと思う。Fig.4-5は、それぞれの圧延率試料の{110}正極点図である。Fig. 4-5で、10%材までは、典型的な再結晶集合組織が現れているが、20%材で、中心から左右に35度付近に強度を持つようになる。さらに、加工が進むと、中心から35度、35度付近の4箇所強い強度が現れ、次第に強度が増していることがわかる。

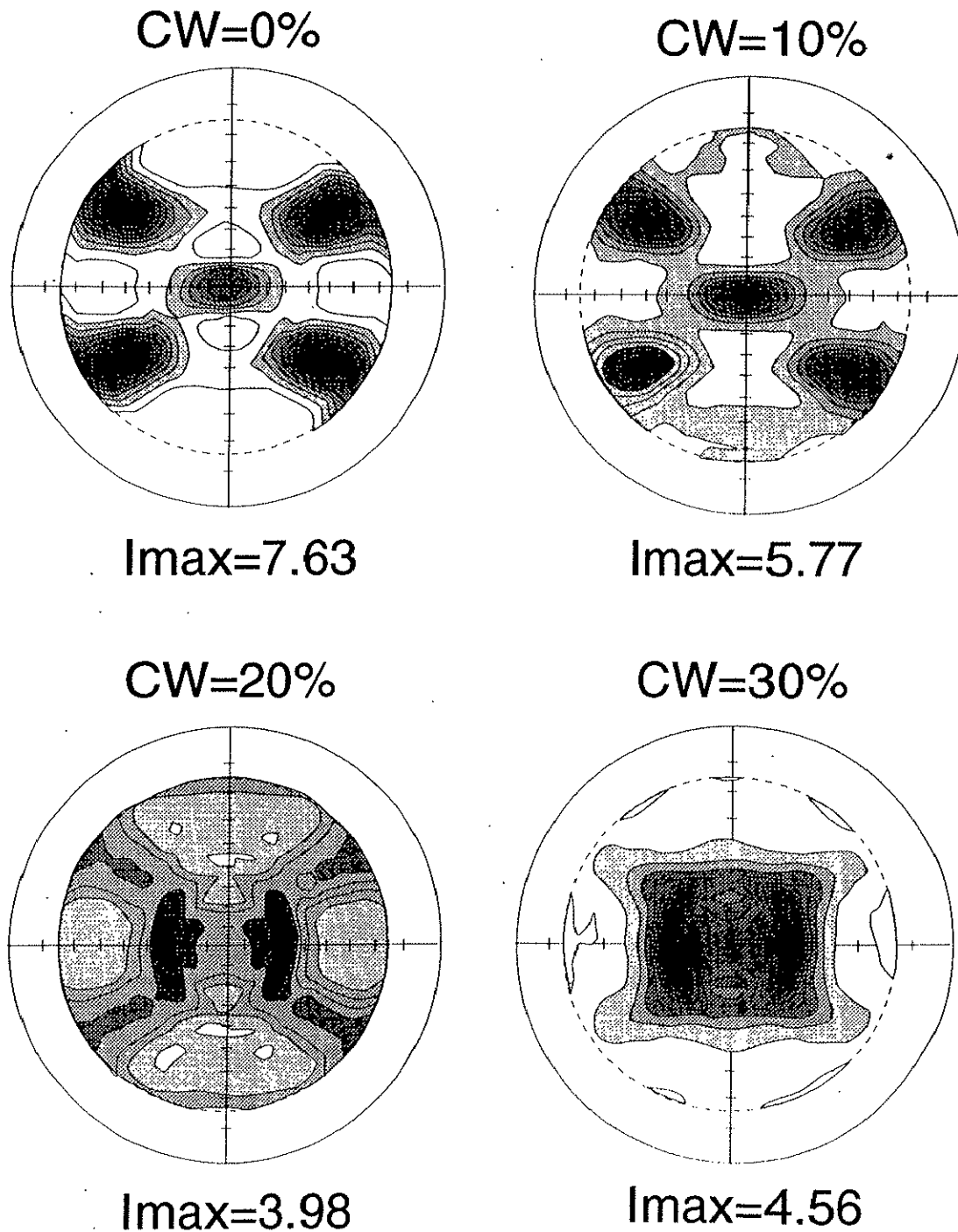


Fig.4-5 各圧延率の試料の{110}正極点図 (続く)

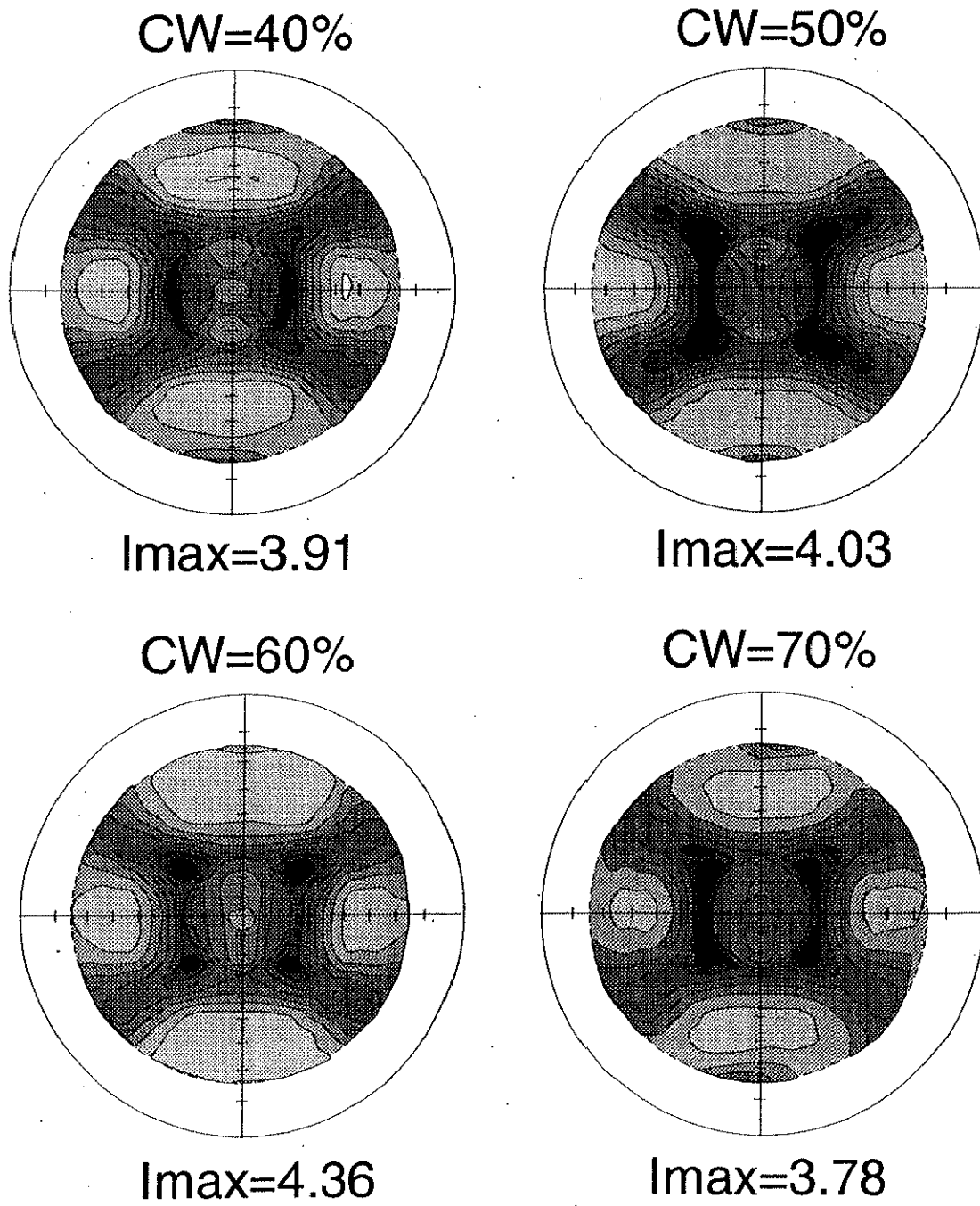


Fig.4-5 各圧延率の試料の{110}正極点図 (続き)

次に結晶方位分布関数ODFを用いて、どのような圧延面と圧延方向の組み合わせの集合組織が存在するのかを評価してみたいと思う。Fig.4-6は、主要な集合組織が含まれる ψ_2 が45度のODFの断面を示している。また、0%材では、973K-0.6ksで焼鈍した試料を圧延せずに673K-1hで熱処理しているため、 $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ に分布密度が集中して、再結晶集合組織の状態になっている。30%まで加工が進むにつれて、そこでの密度は急激に減少すると共に、広い範囲に分散する。さらに加工が進むと、 $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ に加えて $\{111\}\langle 0\bar{1}1\rangle$ 集合組織が現れる。

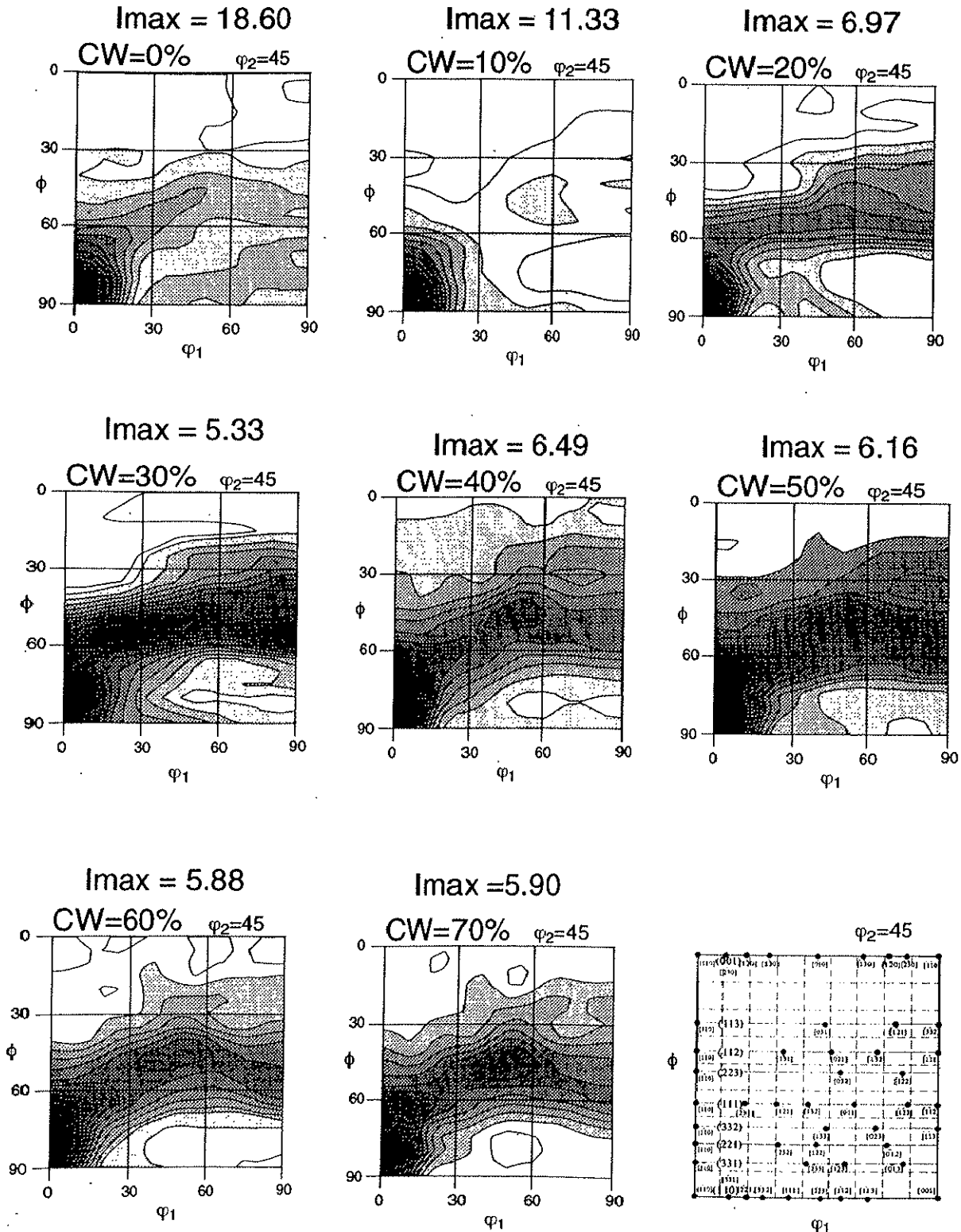


Fig.4-6 各圧延率の試料のODFの ψ_2 の45度断面

このような表記は、どのような集合組織が存在するかということを示すには適しているが、変態歪みの異方性を評価するためには、引張り軸方向に存在する軸密度の情報が重要になる。この情報は、ODFから求めた逆極点図で得られる。そこで、それぞれの圧延率の試料について、逆極点図を示したいと思う。

Fig.4-7は、一例として、RD方向の逆極点図を示したのもである。0%材で、 $[011]$ に集中していた軸密度は、加工が進むにしたがって、30%材までは、 $[\bar{1}11]$ にも高い軸密度を持つようになる。また40%以上の加工率では、 $[011]$ に強い軸密度が集束する。

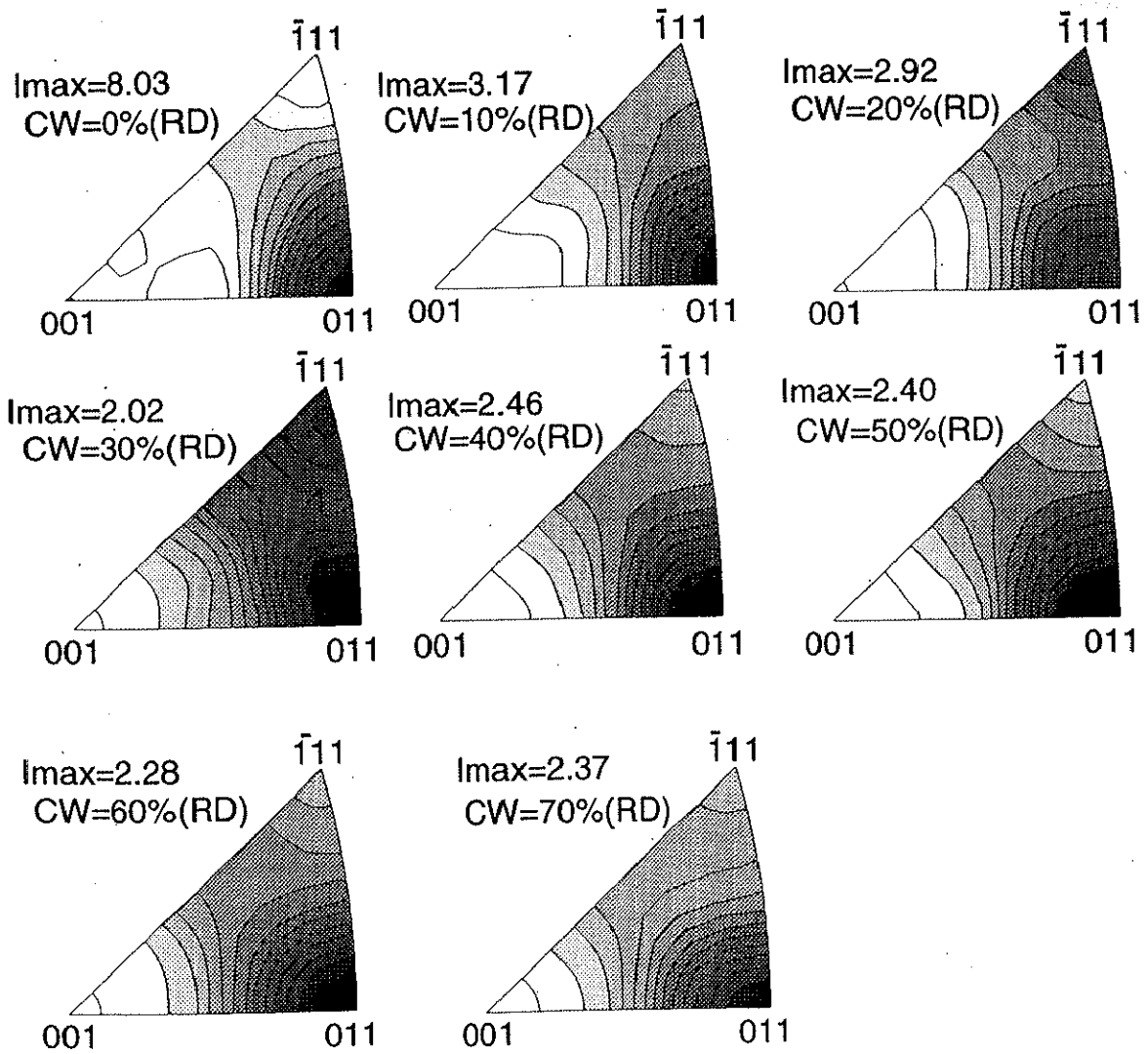
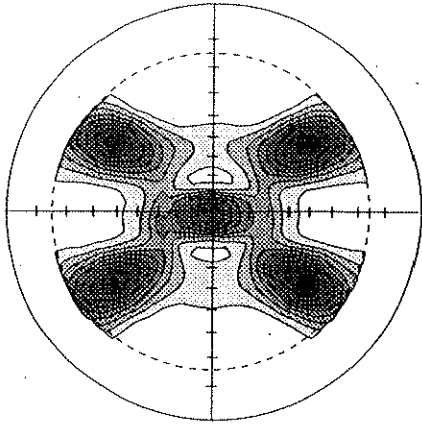


Fig.4-7 各圧延率の試料のRD方向の逆極点図

以上が673K材の結果である。次に、1073K材についても、同様の評価を行ってみようと思う。

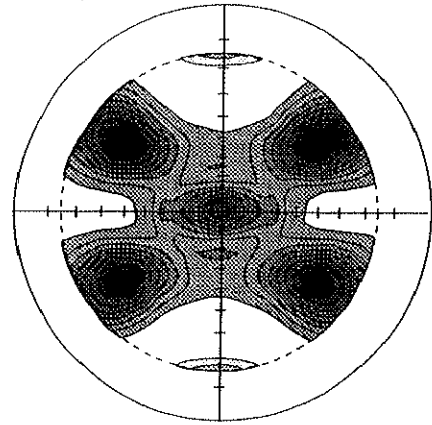
Fig.4-8は、0%材、10%材の{110},{200},{211}の3面の正極点図を示している。いずれの試料でも、典型的な再結晶集合組織が現れている。Fig.4-9は、40%材、70%材の正極点図である。いずれの極点図も同様の集合組織を示している。また、加工が進むにつれて、{110}正極点図の最大強度(I_{max})の値が増加していることがわかる。そこで、次に各圧延率の試料について、{110}正極点図を示したいと思う。Fig.4-10は、0%~70%の圧延材についての{110}正極点図を示している。いずれの試料でも、典型的な再結晶集合組織を示している。さらに、加工が進むにつれて、 I_{max} の値が高くなっている。この事は、圧延率の増加に伴って、より強い集合組織が形成される事を示している。

CW=0%

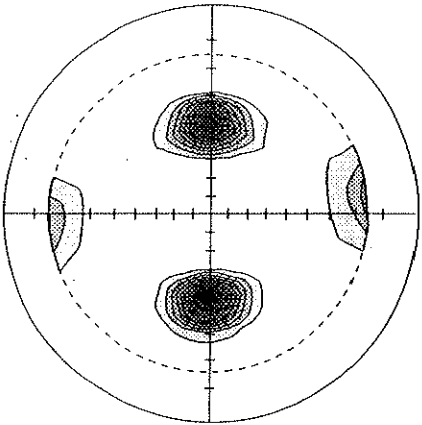


{110}, I_{max}=6.62

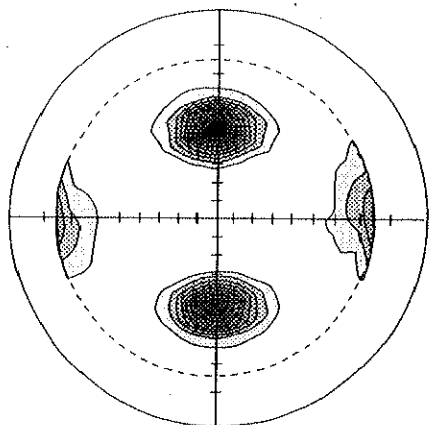
CW=10%



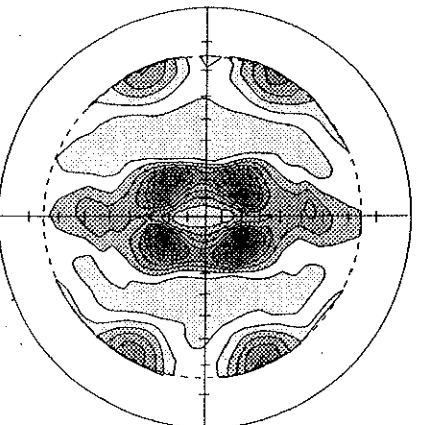
{110}, I_{max}=6.55



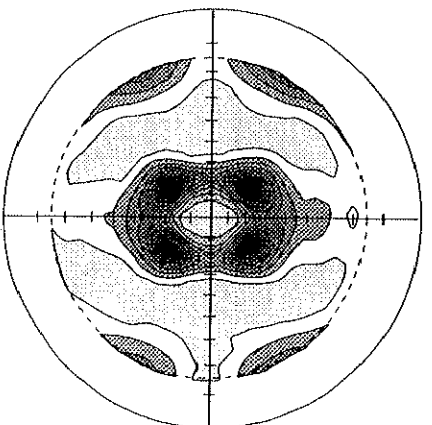
{200}, I_{max}=12.27



{200}, I_{max}=10.33



{211}, I_{max}=6.08

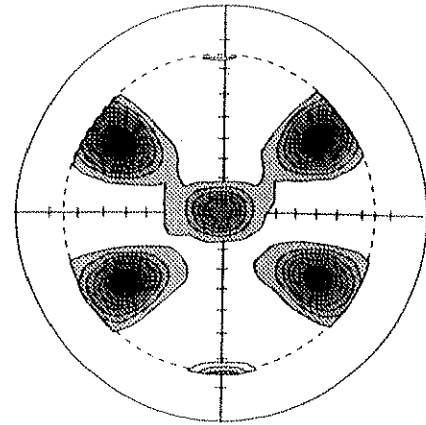
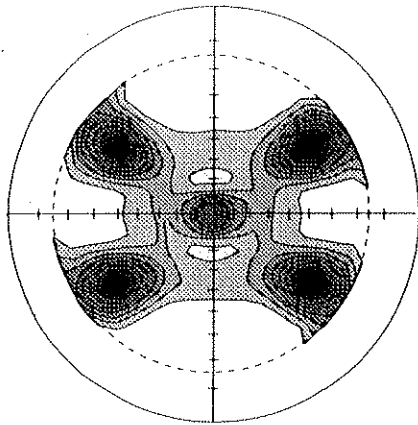


{211}, I_{max}=6.08

Fig.4-8 0%材、10%材の{110},{200},{211} 3面の正極点図

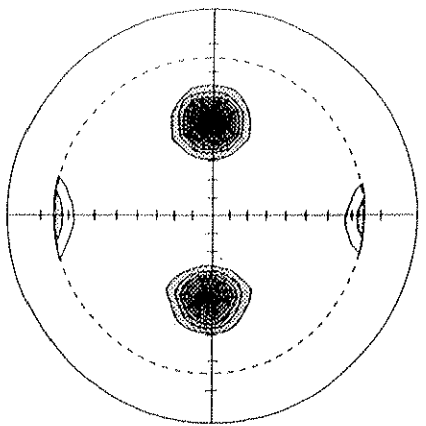
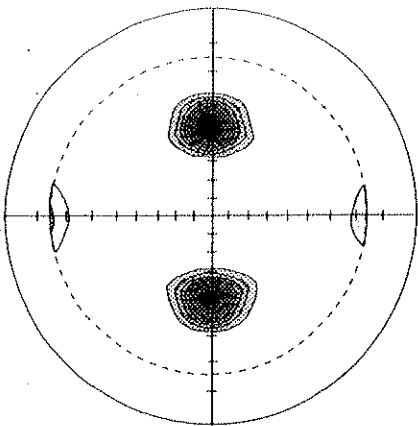
CW=40%

CW=70%



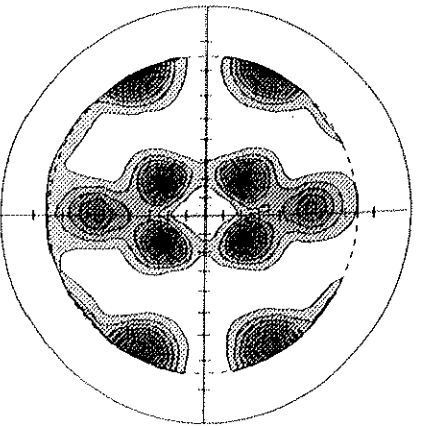
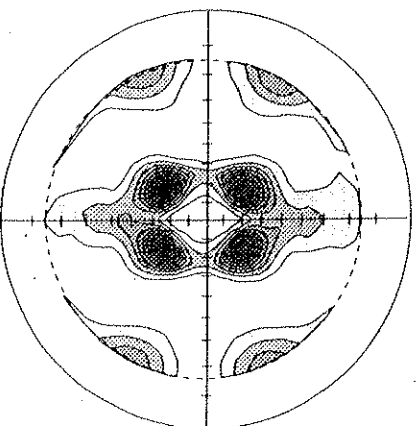
{110}, $I_{max}=7.05$

{110}, $I_{max}=11.77$



{200}, $I_{max}=11.20$

{200}, $I_{max}=17.95$



{211}, $I_{max}=5.40$

{211}, $I_{max}=6.22$

Fig.4-9 40%材、70%材の{110},{200},{211}3面の正極点図

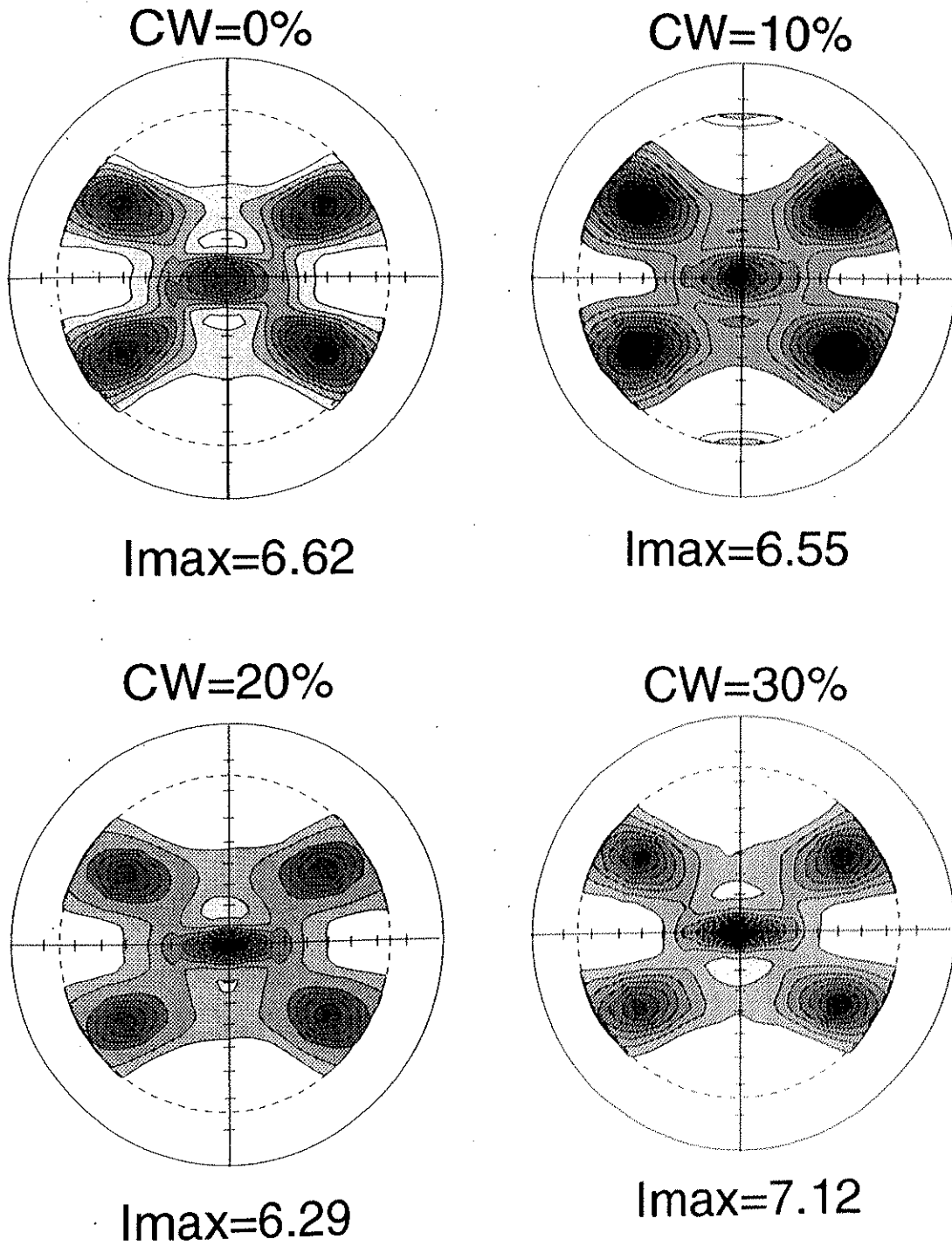


Fig.4-10 各圧延率の試料の{110}正極点図 (続く)

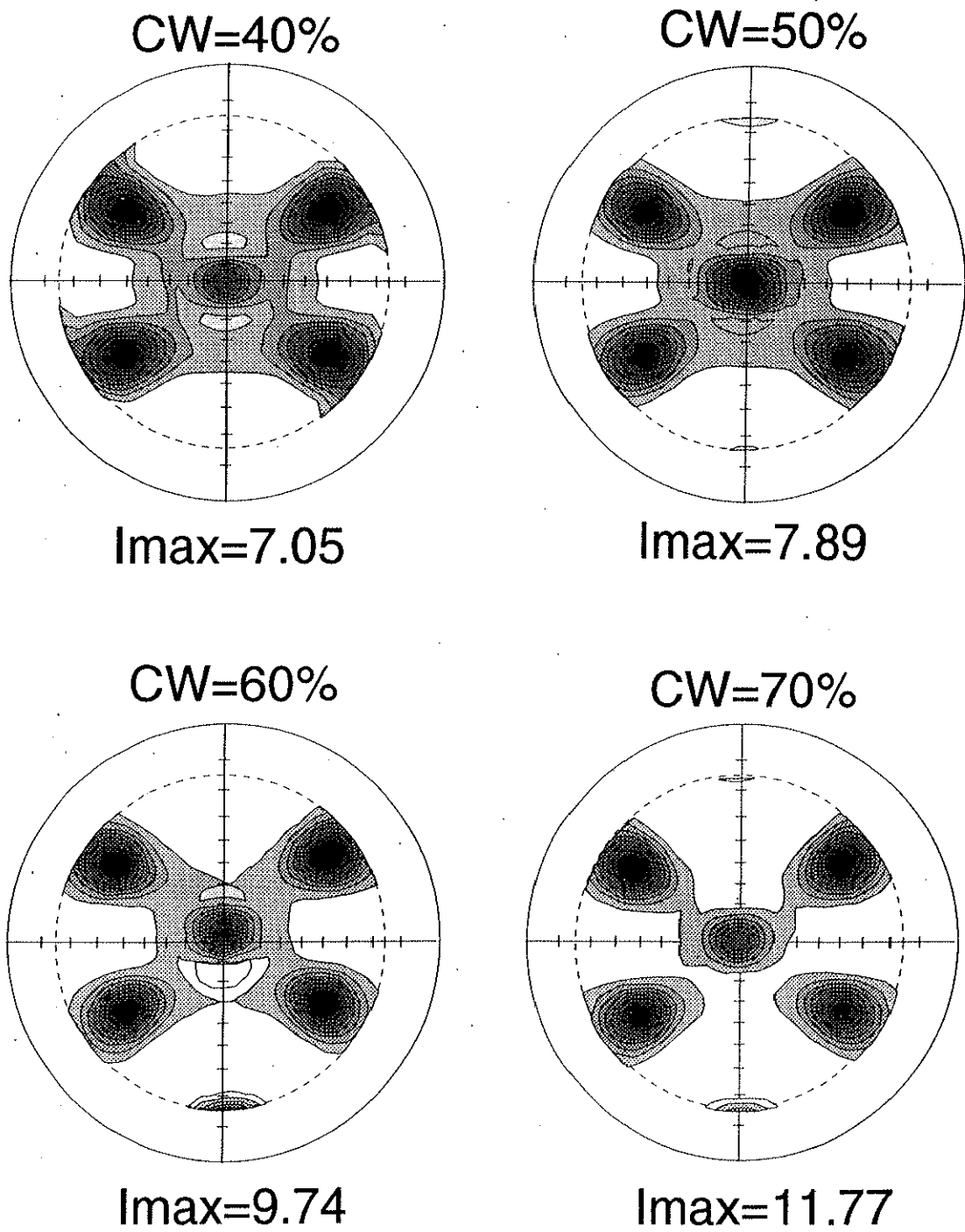


Fig.4-10 各圧延率の試料の(110)正極点図 (続き)

次に、これらの試料の集合組織をODFの45度断面を用いて評価することにする。Fig.4-11は、それぞれの圧延率の試料のODFの45度断面を示している。いずれの試料でも、基本的に $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ 集合組織を持っているが、60%材から、右にシフトしていき、70%圧延材では、 $\langle 1\bar{1}0\rangle$ 方位よりずれて、 $\{110\}\langle 2\bar{2}1\rangle$ 集合組織を持つようになる。

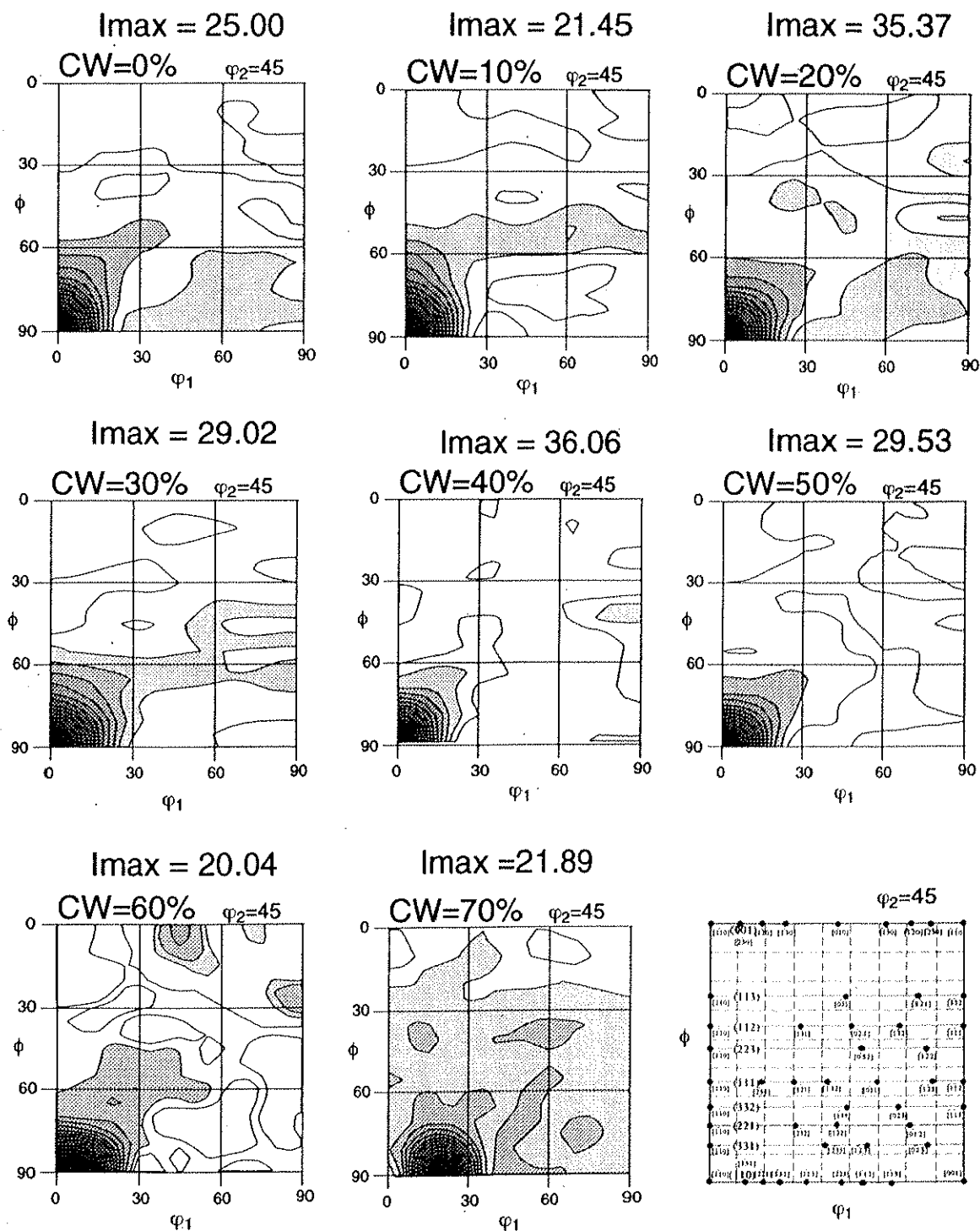


Fig.4-11 各圧延率の試料のODFの ψ_2 の45度断面

次に、それぞれの圧延率の試料についての逆極点図を示す。Fig.4-12は、それぞれの圧延率の試料についてのRD方向の逆極点図である。いずれの試料でも、基本的に[011]方位に強度があるが、60%材、70%材では、[011]方位からずれたところに強度を持つ。70%材では、Fig.1-14(b)を見ても解るように、最大値を示す[355]方位に近くなっている。

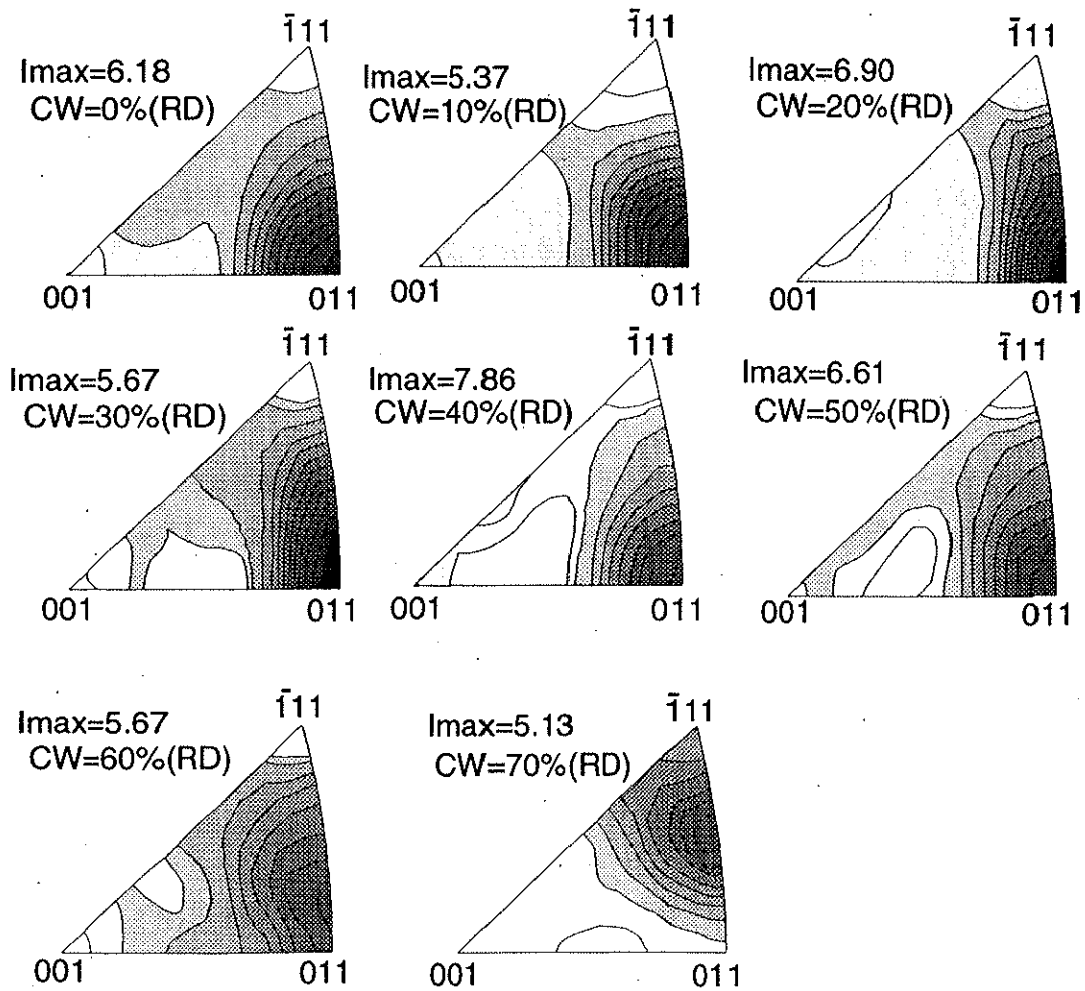


Fig.4-12 各圧延率の試料のRD方向の逆極点図

4-3-3 変態歪みの計算

次にこれらの集合組織の情報を基にして変態歪みを計算するためには、基本データとして単結晶における変態歪みの方位依存性の情報が必要になる。マルテンサイトについては、3-3-4で示しているが、R相については触れていなかった。そこで、ここでは、改めて示したいと思う。

Fig.1-14は、単結晶を引張り変形した時に、優先方位バリエントが成長すると仮定した時の各軸方位に現れるR相及びマルテンサイト変態に伴い発生する最大歪みを示している。R相変態では、最大歪みが発生するのは、 $[\bar{1}11]$ 方位であり、 $[001]$ 方向に進むに連れて、変態歪みは減少していき、 $[001]$ 方位では、0.1以下になる。マルテンサイト変態では、 $[\bar{3}55]$ 方位で最大の変態歪みが発生することがわかる。また、 $[001]$ 方向に進むにつれて減少しているが、減少の割合はR相と比較して小さくなっている。 $[\bar{3}55][\bar{1}11][011][001]$ 等の主要方位の軸密度の変化が、多結晶試料の変態歪みの異方性に影響を及ぼしているので、次に、このような主要方位の軸密度が、各切り出し角度でどのように変わるかを示したいと思う。

まず、加工集合組織の試料である、673K材について見ていくことにする。

Fig.4-13は、一例として10%と70%の試料について、各切り出し角度に対する主要方位の軸密度の値を示している。10%材では、 $[\bar{3}55]$ 、 $[\bar{1}11]$ の変態歪みの大きな軸の密度が約30度付近まで上昇し、その後切り出し角度の増加と共に減少する。この事から示される変態歪みの変化は、0度~30度までは変態歪みは増加し、その後は90度まで、変態歪みは減少していくという事である。また、変態歪みの小さな $[001]$ 方位は、切り出し角度の増加に伴って60度付近から急激に増加している。この事は、歪みは、60度付近から急激に減少することを意味している。

70%材についても、軸密度の値は異なるが、同様の傾向が認められる。

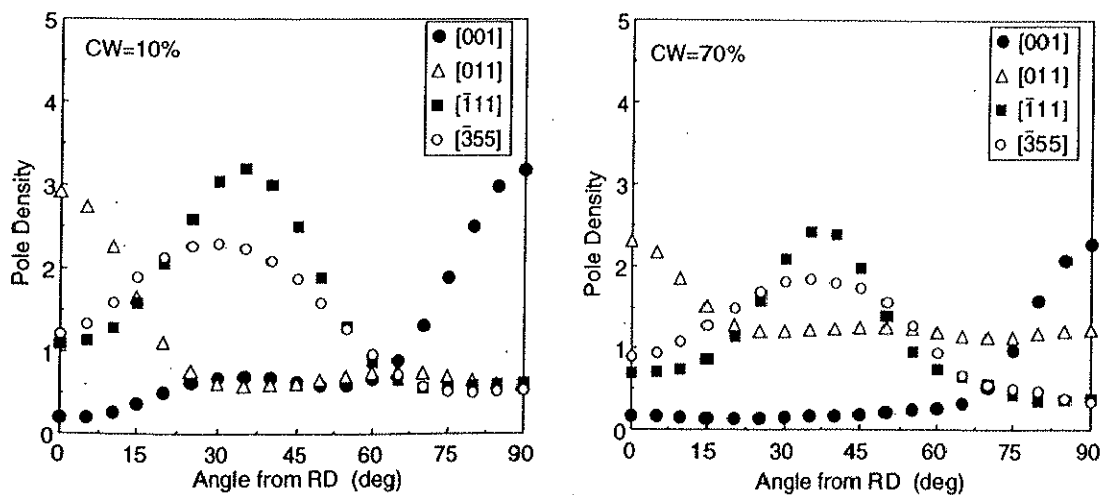


Fig.4-13 10%材、70%材の主要方位の軸密度の切り出し角度依存性

Fig.1-14で示している単結晶試料の各方位の変態歪みの情報と、Fig.4-13のような軸密度の情報を組み合わせる事で2-3-5で述べたように、多結晶試料の変態歪みを計算できる。この方法を使って、各圧延率の試料について、変態歪みの切り出し角度依存性を計算した結果をFig.4-14に示す。R相及びマルテンサイト相変態に伴う歪みは、いずれも0%材のみが異なる切り出し角度依存性を示している。この事は、0%材は、加工集合組織ではなく、再結晶集合組織と同じものであるからである。低い圧延率である、10%材、30%材では、変態歪みは35度までは、ほぼ一定値をとり、その後急激に減少する。圧延率の高い70%材では、35度までは歪みは増加し、その後減少するが、0%材とは異なる切り出し角度依存性を示している。R相、マルテンサイト相共に、同様の切り出し角度依存性が現れているが、R相の方が、マルテンサイト相よりも変態歪みの異方性が大きくなっている。この事は、単結晶試料での変態歪みの方位依存性が、マルテンサイトの方位依存

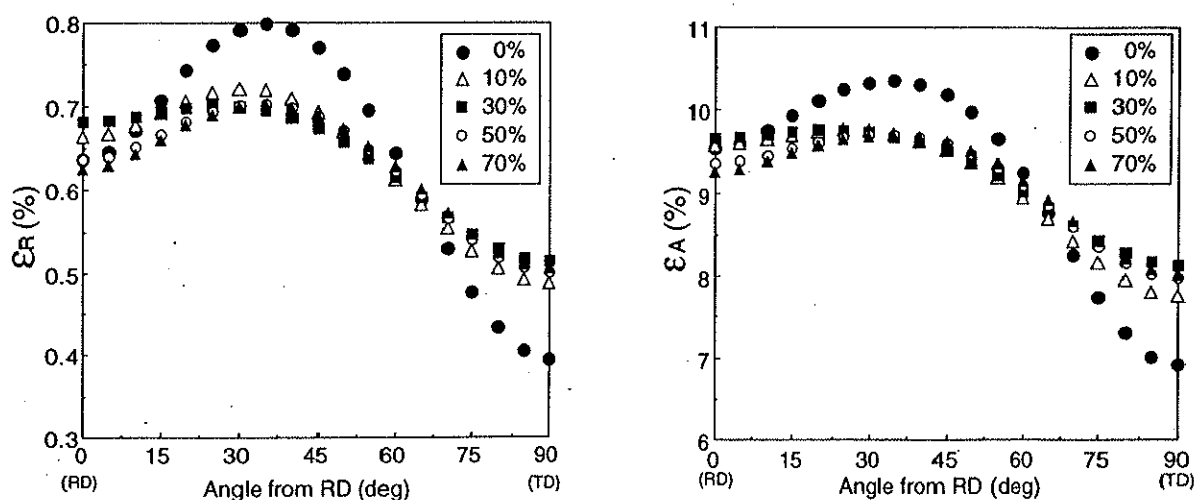


Fig.4-14 各圧延材についての計算により求めた変態歪みの切り出し角度依存性

性よりも大きいことが原因になっている。

次に、1073K材についても673K材と同様の手順で、変態歪みの切り出し角度依存性を計

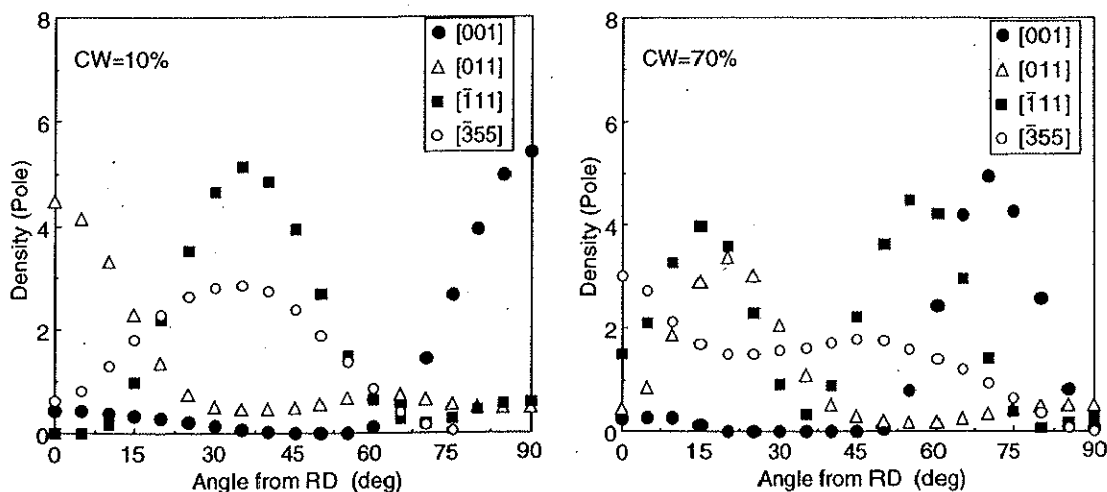


Fig.4-15 10%材、70%材の主要方位の軸密度の切り出し角度依存性

算してみる。Fig.4-15は、10%材と、70%材について、変態歪みに影響を与える主要方位の切り出し角度依存性を示している。10%材では、673Kの10%材と同様の典型的な切り出し角度依存性を示しているが、70%材では、複雑な変化を示している。Fig.4-16は、各圧延率の試料について、計算により求めた変態歪みの切り出し角度依存性を示している。70%材を除いて、いずれの圧延率の試料でもほぼ同様の切り出し角度依存性を示している。

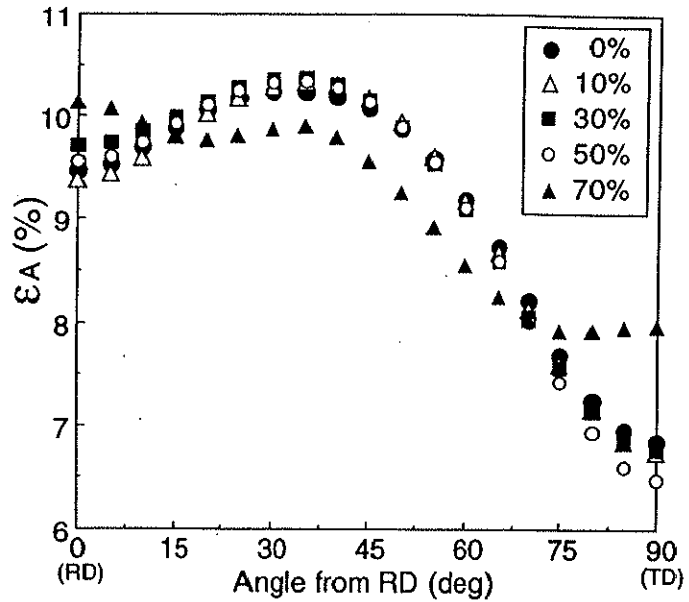


Fig.4-16 各圧延材について、計算により求めた変態歪みの切り出し角度依存性

次に、計算による変態歪みの異

方性を評価してみたいと思う。Fig.4-17は、歪みの最大値と最小値の差を歪みの最大値で割ったものを変態歪みの異方性と定義して、圧延率依存性を示したものである。上が1073K材、下が673K材である。673K材において、0%材では、1073K材と異方性は同じであるが、圧延が進むにしたがって異方性は減少し、ほぼ一定の値に落ち着く。一方、1073K材では、40%材までは異方性は増加し、その後、圧延率の増加に伴って異方性は減少する。

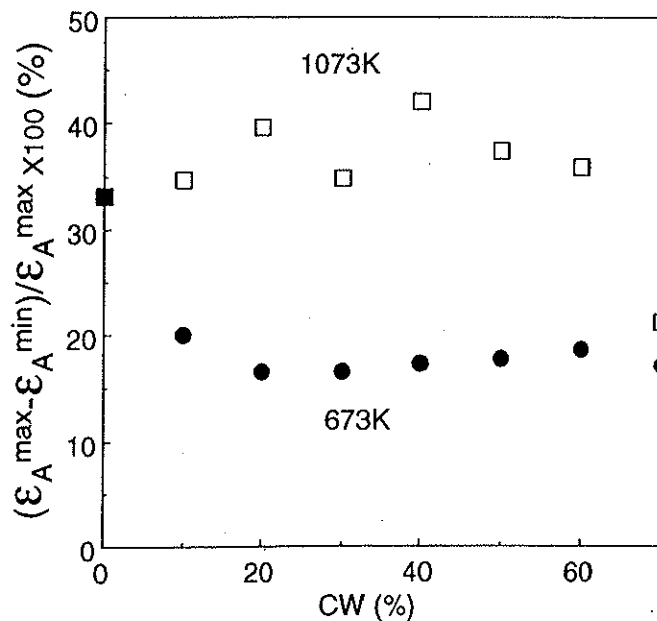


Fig.4-17 各圧延材の変態歪みの異方性の圧延率依存性

4-3-4 圧延率の違いによる形状記憶特性の評価

次に各圧延率の試料について、実験的にも変態歪みを評価するために、一定荷重下の熱サイクル試験を10%、40%、70%の各試料について行った。

まず、673K材について評価を行ってみたいと思う。

Fig.4-18は、10%材についての結果を示している。左側の図は圧延方向、右側の図は、計算値で最も歪みが現れる角度に近い30度、下の図は、TD方向に切り出した試料である。いずれの切り出し角度の試料でも、応力の増加に伴って、変態歪みが増加していることが解る。また、応力の増加に伴って、変態温度も上昇している。さらに、同じ応力でも、切り出し角度によって変態歪みの大きさが異なり、切り出し角度30度と、TD方向で、大きな変態歪みの異方性が現れている。Fig.4-19は、40%材についての結果である。基本的に、10%材と同様の結果が得られている。Fig.4-20は、70%材の結果である。70%材では、R相変態がはっきり現れていると共に、DSCでは現れていなかったマルテンサイト変態が現れた。

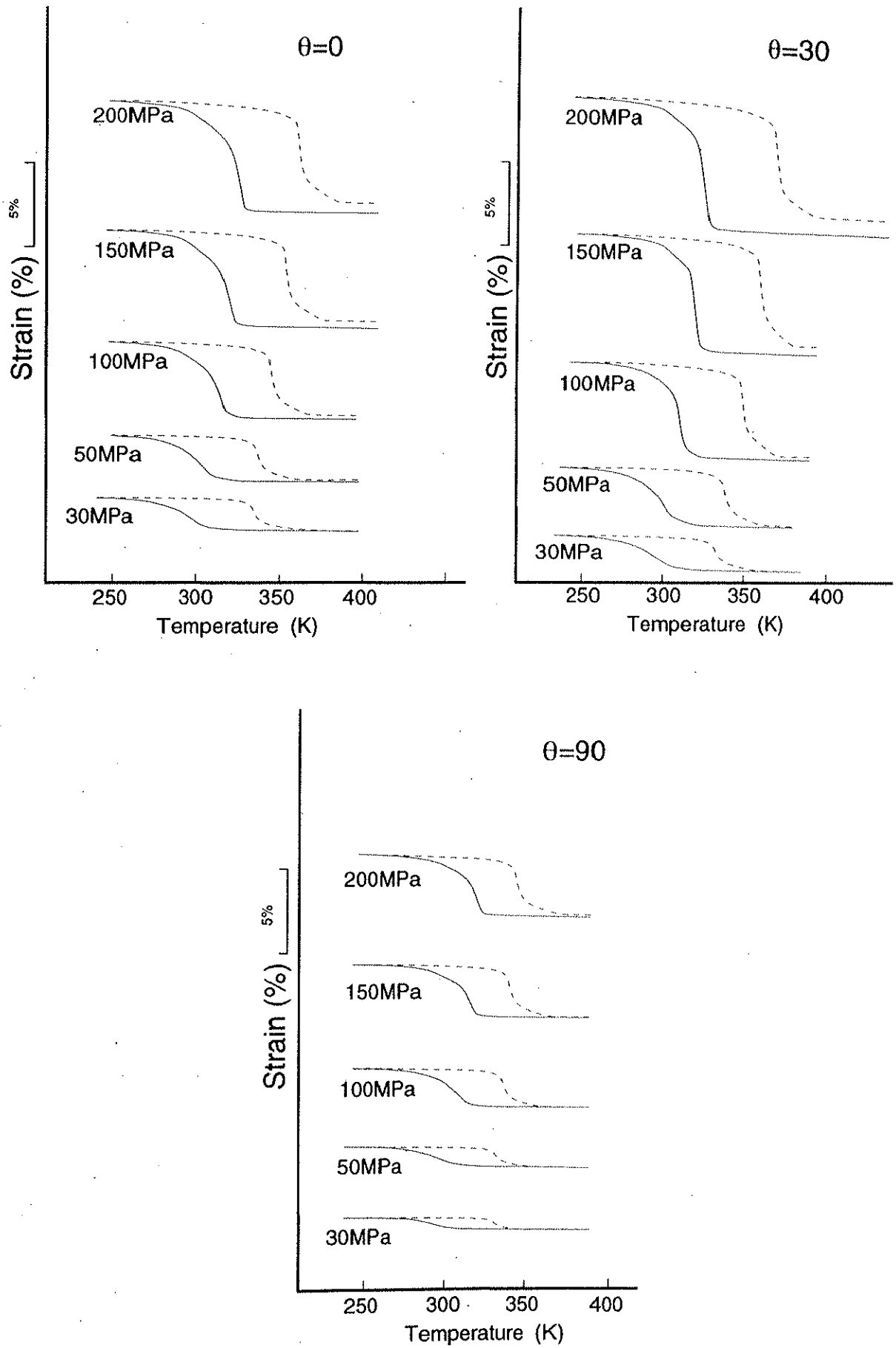


Fig.4-18 10%圧延材の歪み—温度曲線

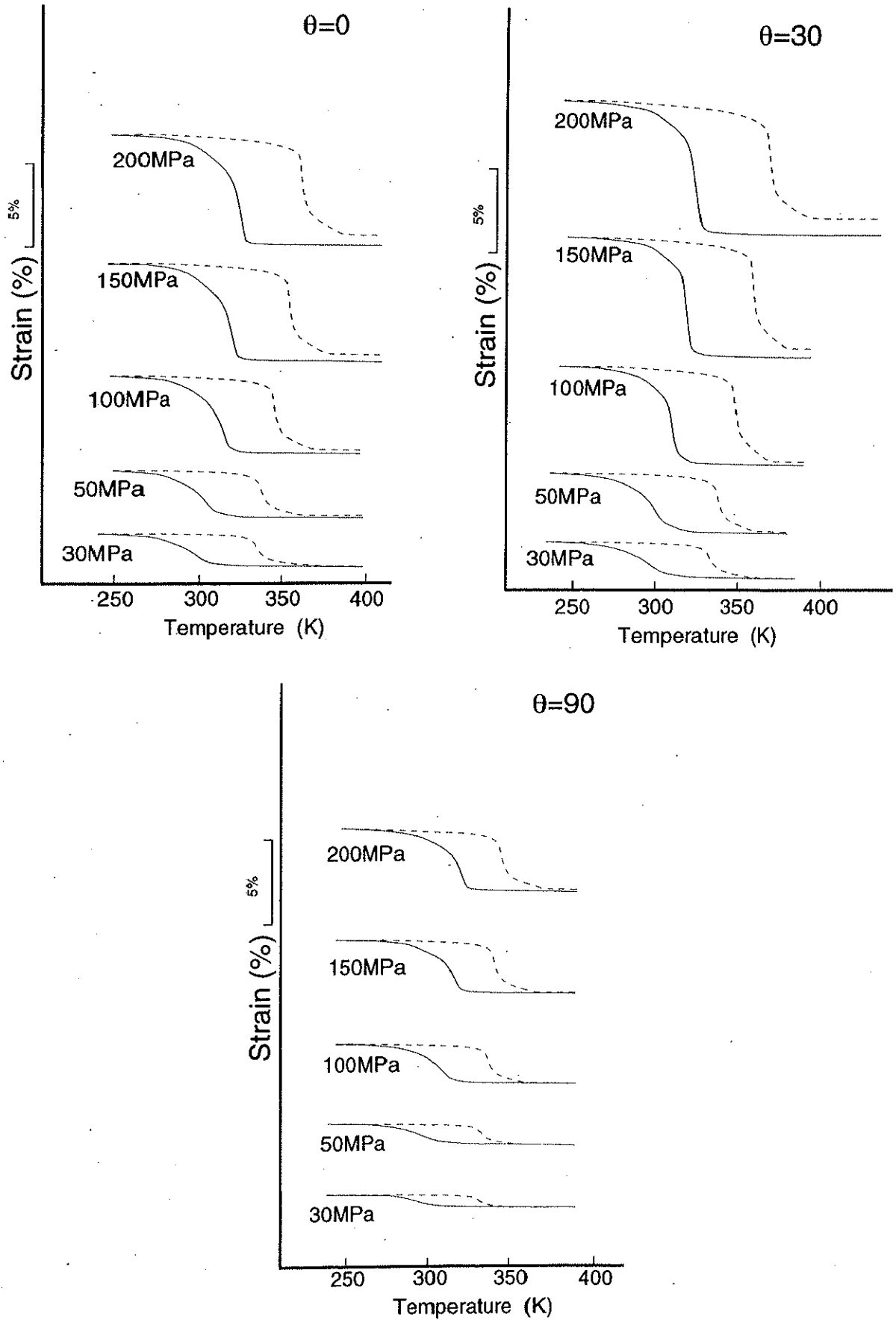


Fig.4-19 40%圧延材の歪み—温度曲線

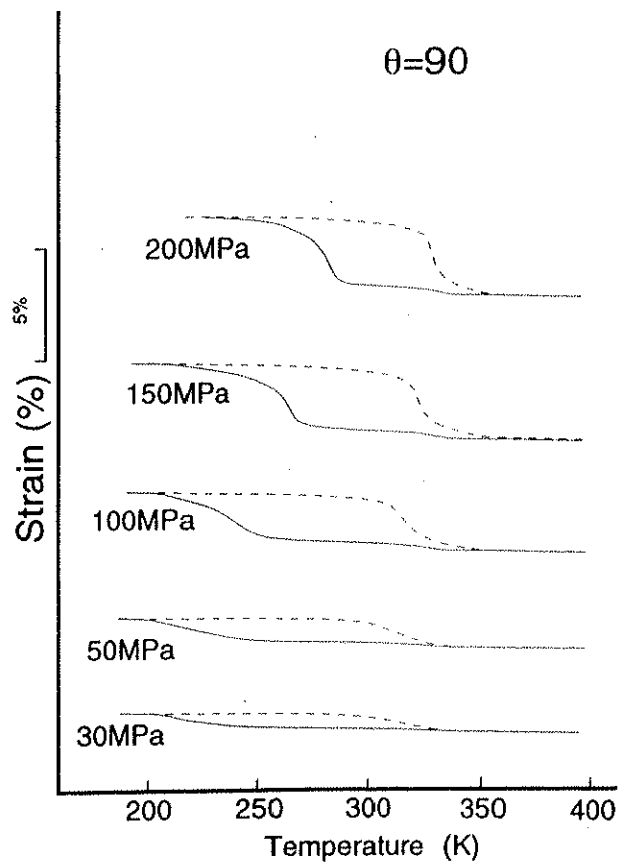
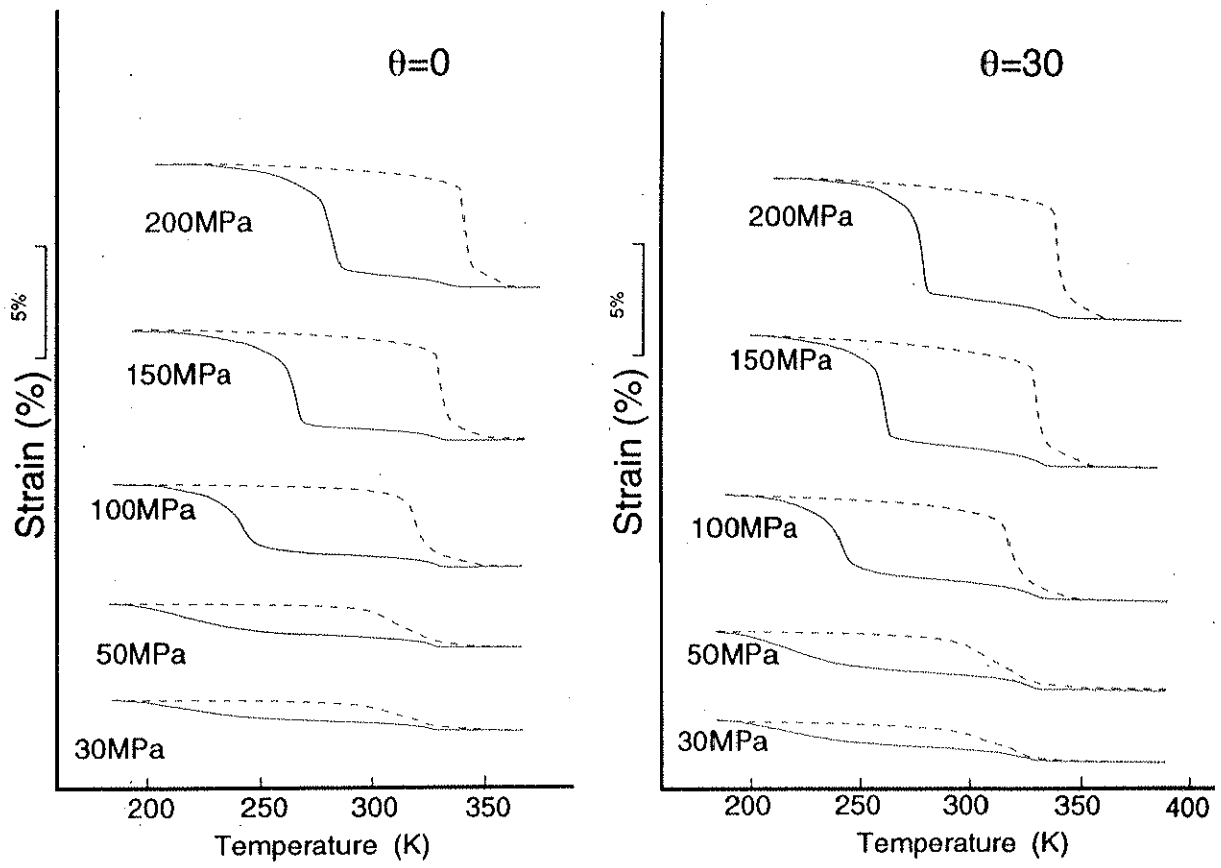


Fig.4-20 70%圧延材の歪み—温度曲線

次に計算により求めた変態歪みが、実験値とどの位一致するかを見るために、最大の圧延率である70%材について、実験値と計算値を比較したものがFig.4-21である。

実験結果は、応力が増加すると共に、変態歪みは全体的に上昇している事が解る。R相では、計算値と実験値の差が小さく、マルテンサイト相では、差が大きくなっている。これは、R相の方がマルテンサイト相よりもバリエーションの再配列がしやすい事が原因になっていると考えられる。いずれの相でも、実験結果は計算結果と定性的に同様の切り出し角度依存性を示している。

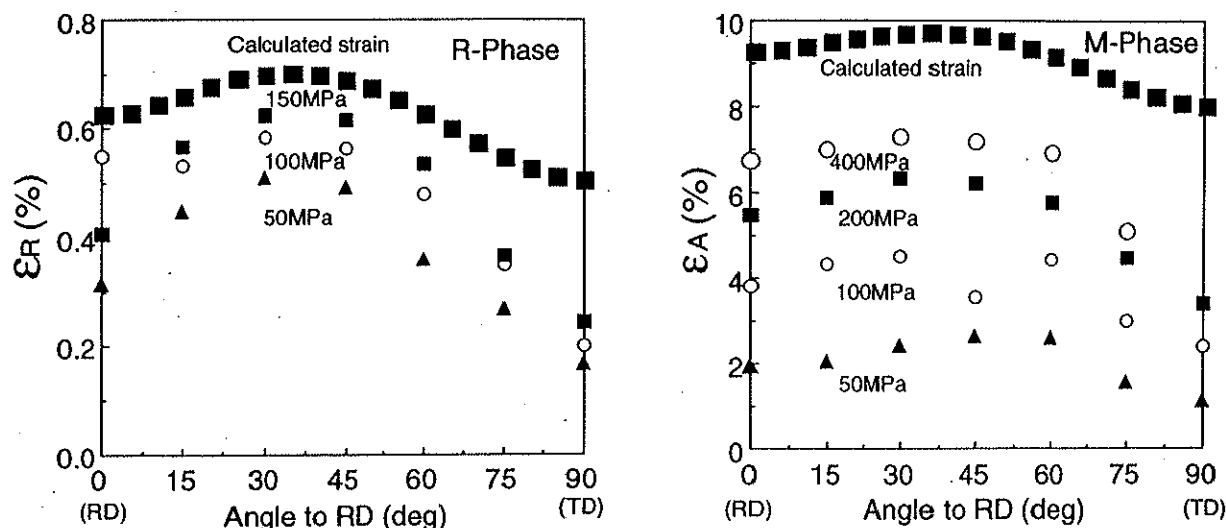


Fig.4-21 70%圧延材の変態歪みの計算値と実験値の比較

Fig4.22~24のそれぞれの上の図は、マルテンサイト変態歪みに注目し、10%、40%、70%の試料についての、マルテンサイト変態歪みの計算値と実験値を表している。ここでは、最大の回復歪みの現れる応力までの結果を示している。また、それぞれの下の図は、各応力でのマルテンサイト変態歪みの最大値と最小値の差を表している。上のそれぞれの図を見ると、応力が増加すると、変態歪みも上昇していることがわかる。ここに載せている実験値は、回復歪みであるので、たとえ高い応力下でマルテンサイト変態歪みが増加しても、塑性歪みが大量に導入されてしまい、逆変態時の回復歪みは小さくなる。また、いずれの試料も、定性的に同様の切り出し角度依存性を示している。

次に変態歪みの異方性の評価を行う。10%材、70%材では、200MPaで最大回復歪みが現れている。変態歪みの異方性も、ほぼ同じ応力で最大値を示している。また40%圧延材では、400MPaで最大の回復歪みが現れていて、それに対応して異方性が最大になる応力もほぼ同じになっている。したがって、回復歪みが大きいほど、変態歪みの異方性が大きいことが解る。

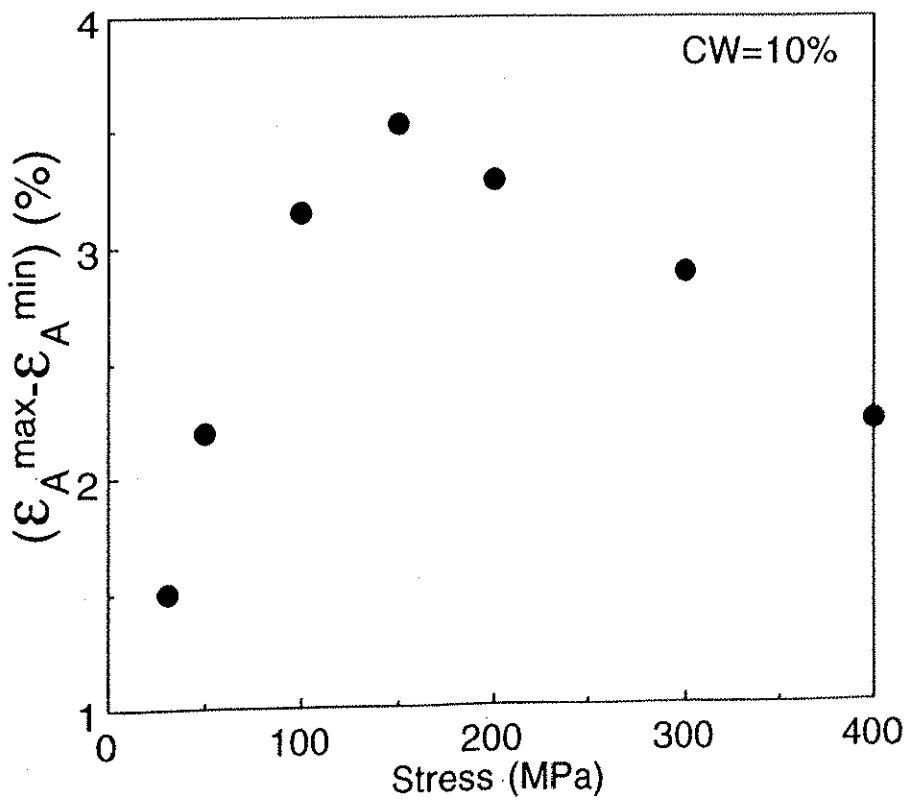
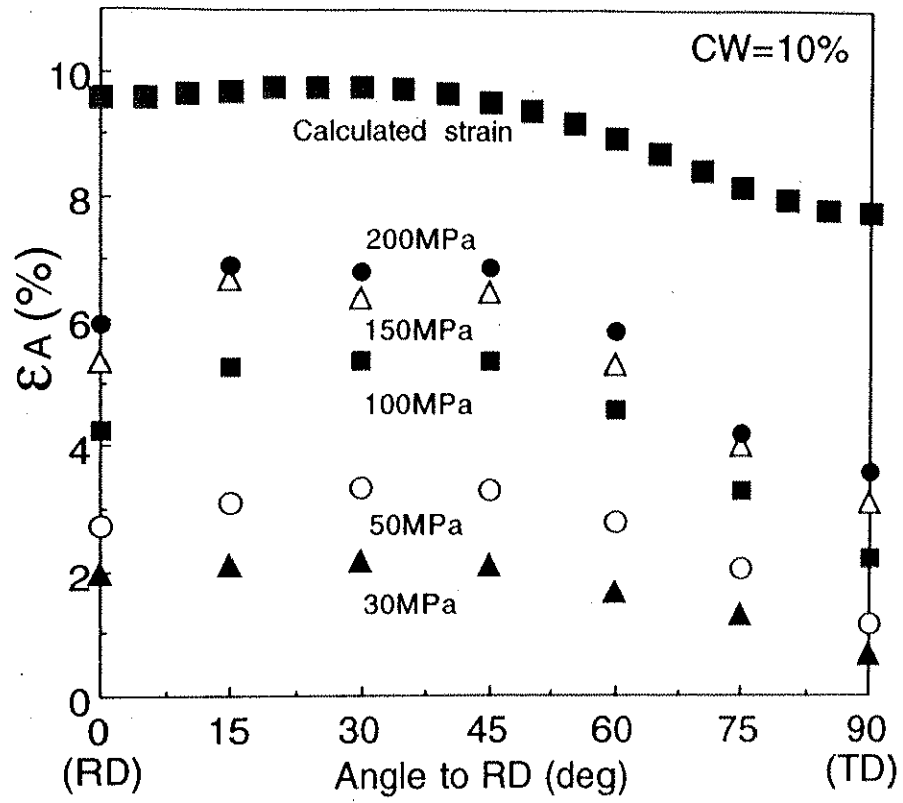


Fig.4-22 10%材の変態歪みの実験値と計算値の比較と変態歪みの異方性

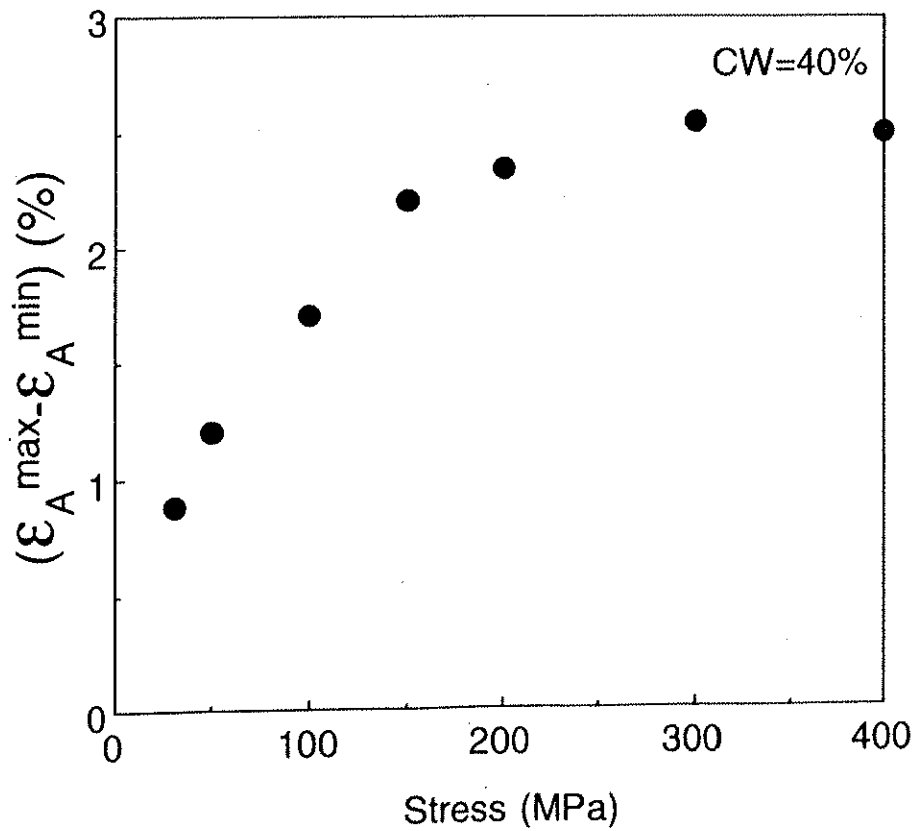
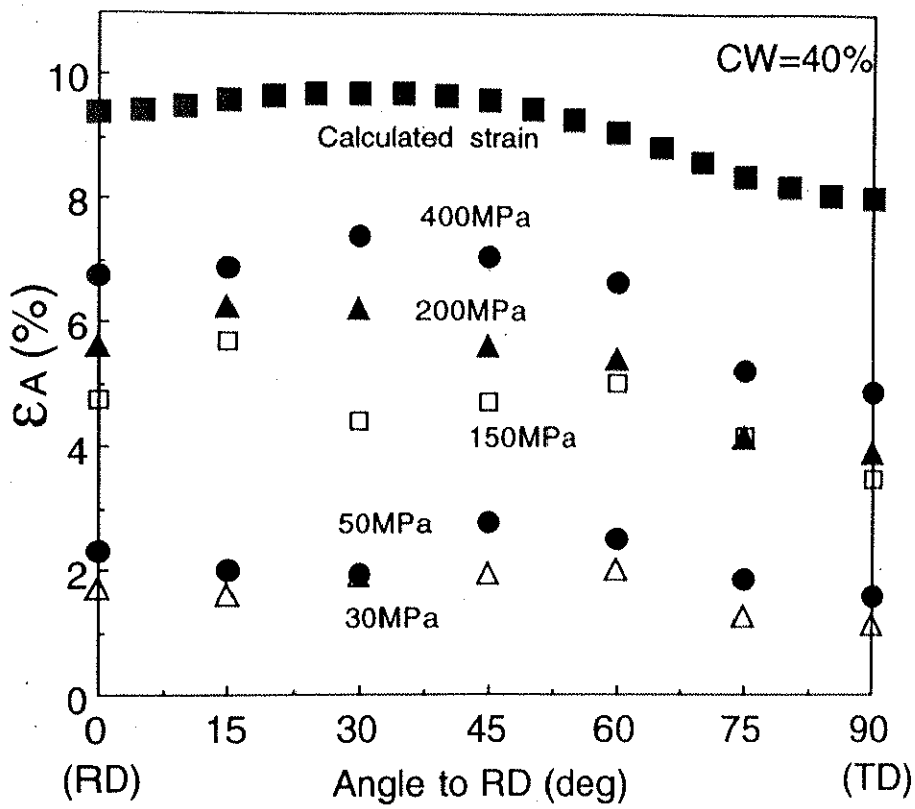


Fig.4-23 40%材の変態歪みの実験値と計算値の比較と変態歪みの異方性

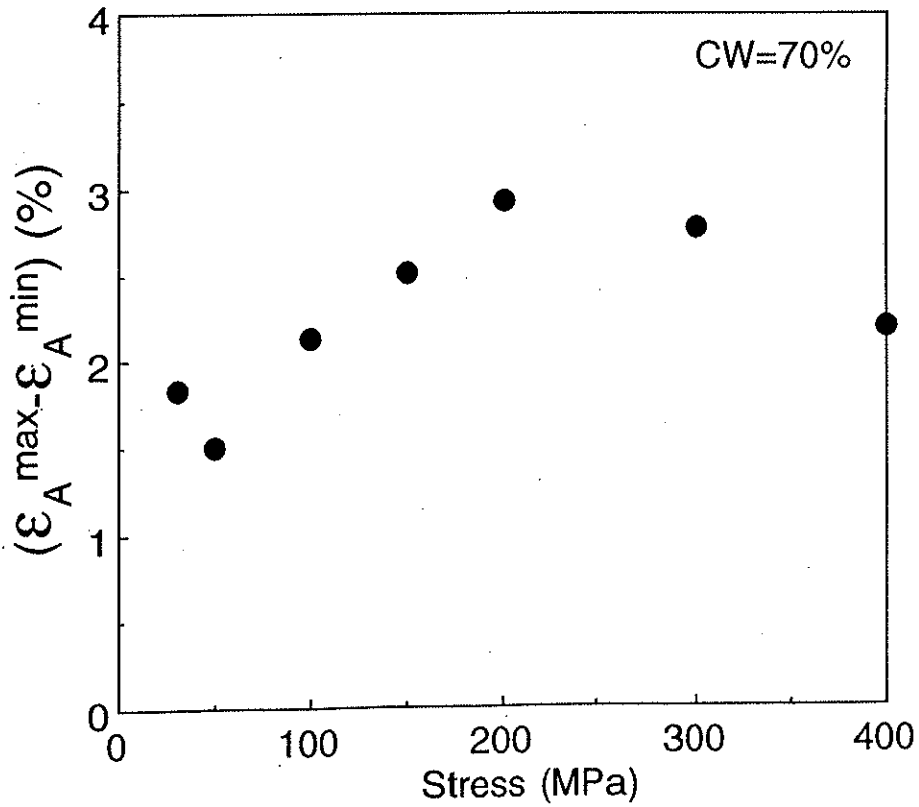
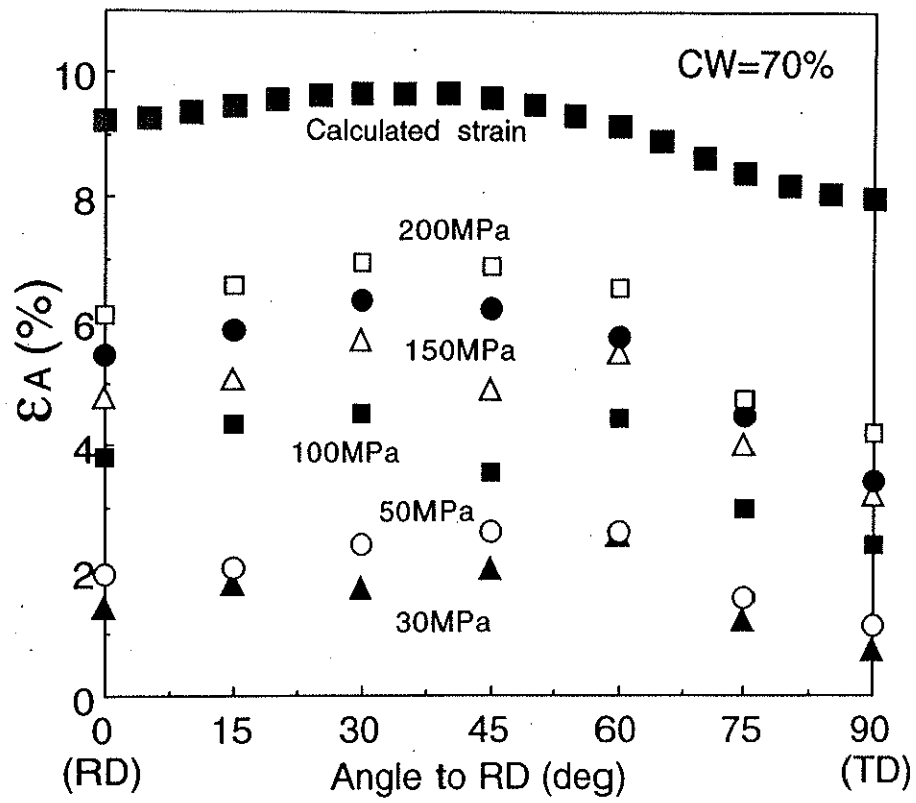


Fig.4-24 70%材の変態歪みの実験値と計算値の比較と変態歪みの異方性

次に、1073K材についても、同様の評価を行う。まず一定荷重下の熱サイクル試験の結果を示したいと思う。Fig.4-25は、10%材の結果を示している。673K材と比較して、変態歪みの異方性が大きく、塑性歪みも入りやすい事が見て取れる。Fig.4-26は、40%材について示している。RD方向と、切り出し角度30度の試料で、100MPaという低い応力にもかかわらず、かなりの塑性歪みが導入されていることが解る。しかし、TD方向では、全く塑性歪みが入っていない。Fig.4-27は、70%材の場合を示している。変形挙動は、基本的に40%材と同様の結果である。

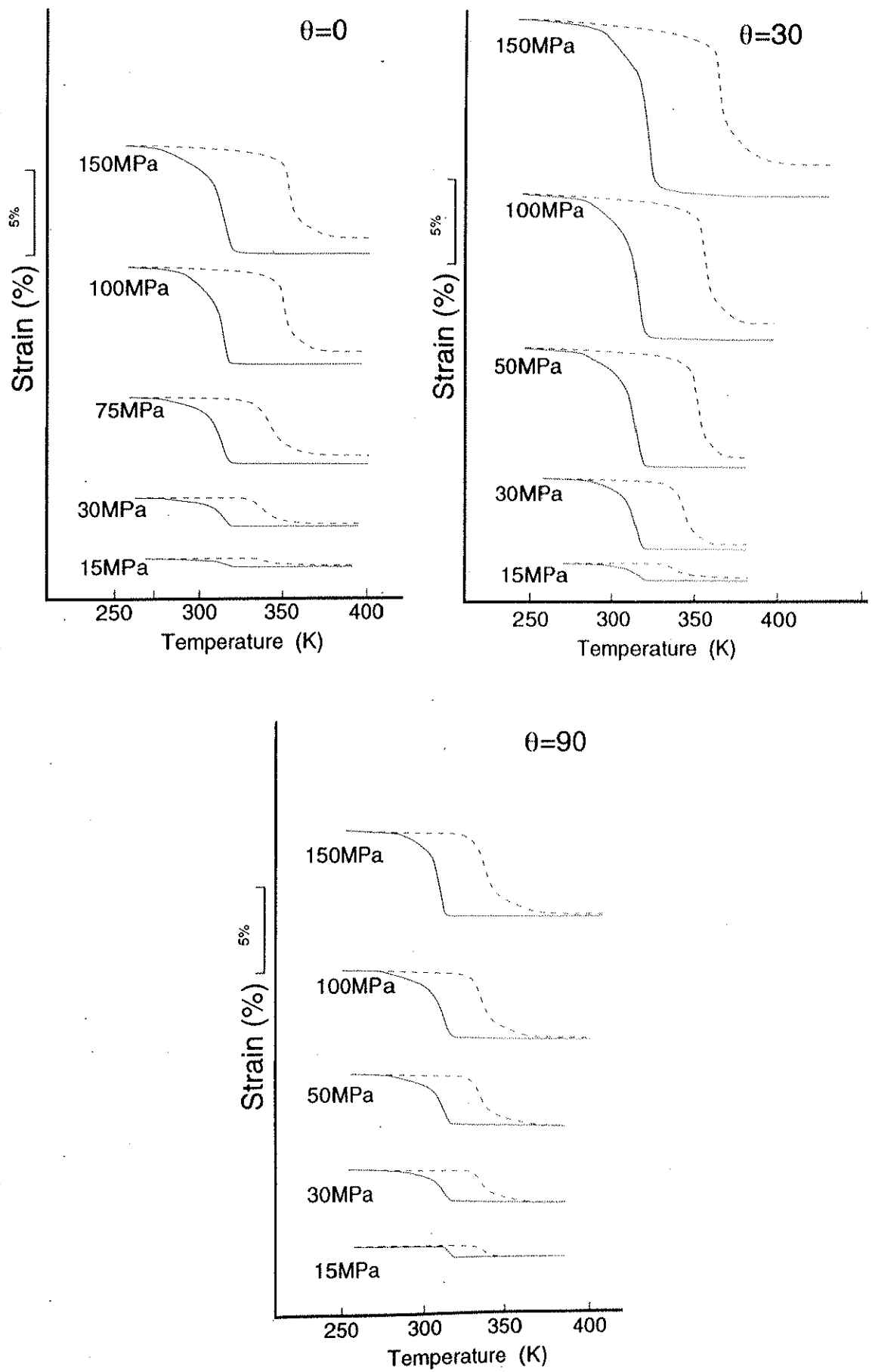


Fig.4-25 10%圧延材の歪み-温度曲線

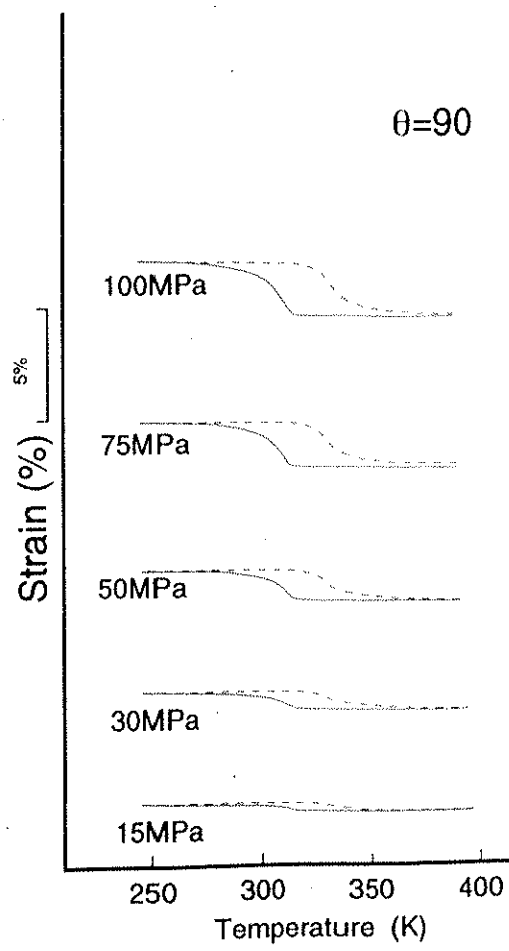
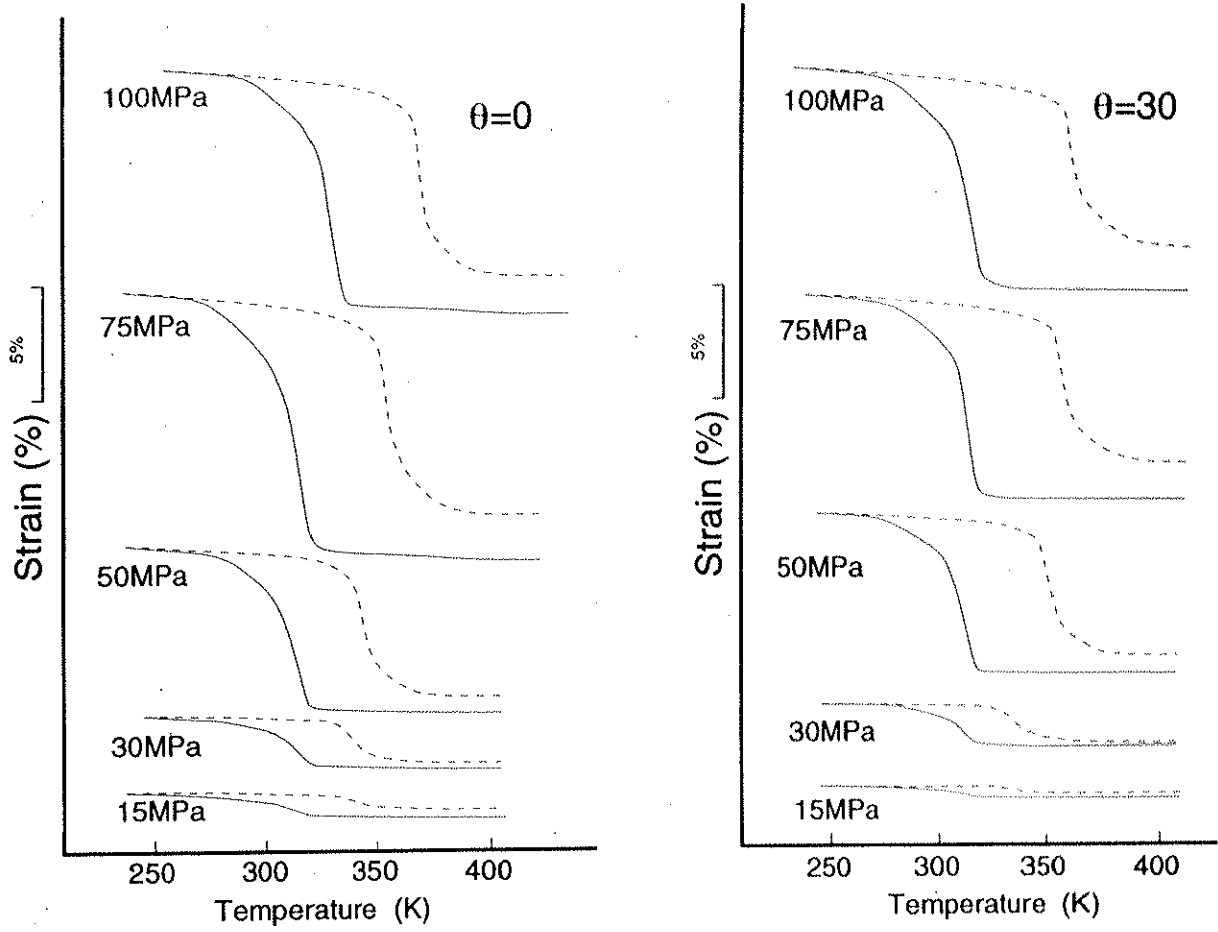


Fig.4-26 40%圧延材の歪み-温度曲線

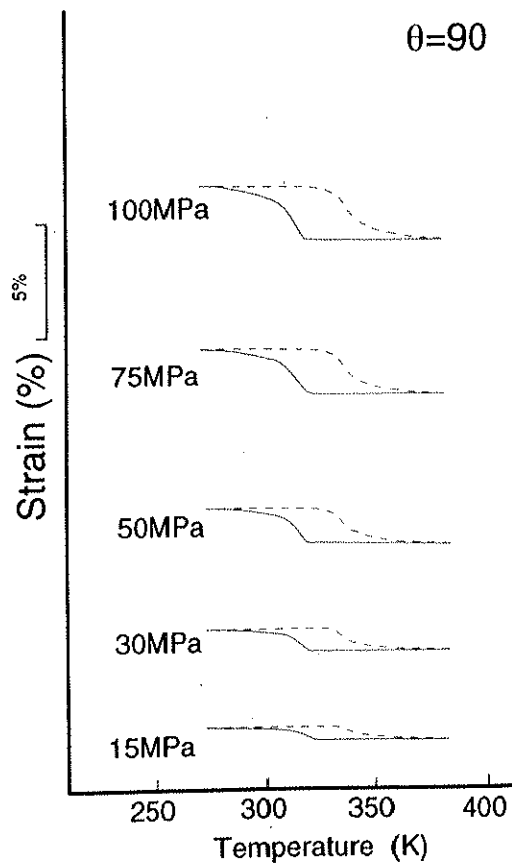
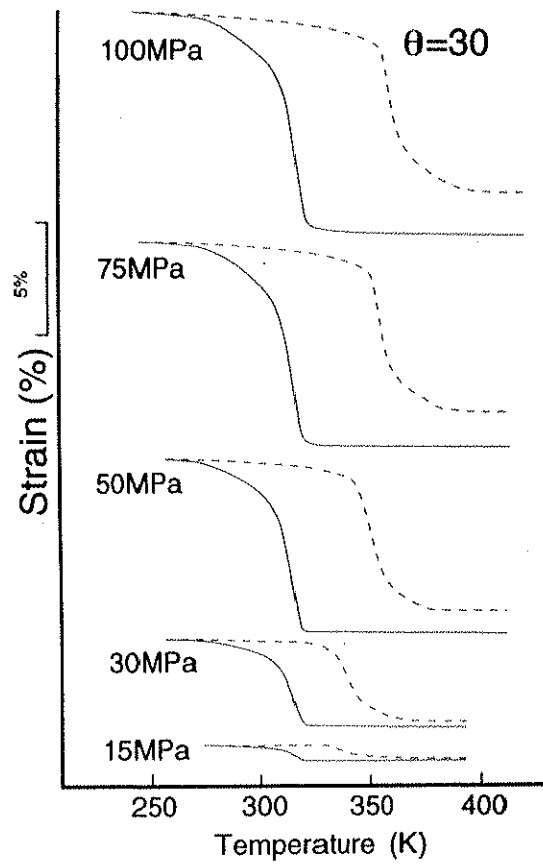
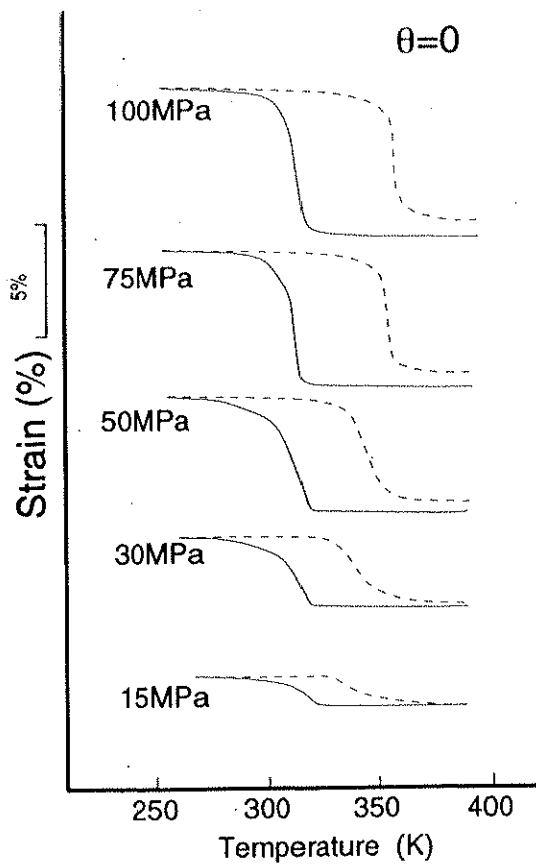


Fig.4-27 70%圧延材の歪み-温度曲線

Fig.4-28~30のそれぞれの上の図は、変態歪みの計算値と各応力での実験値を示している。またそれぞれの下の図は、各応力での実験値の変態歪みの最大値と最小値の差を示している。

Fig.4-28~30のそれぞれの上の図で、10%材、40%材の実験値では、低い応力では多少ばらついているが、十分変態歪みの現れる領域では、実験値と計算値は定性的に同様の切り出し角度依存性が現れている。70%材では、実験値は40%材と同様の切り出し角度依存性を示しているが、計算値とは別の切り出し角度依存性を示した。この理由は、70%材では、先ほどのRD方向の逆極点図で軸密度が高い部分が、最大歪みが発生する方位である $[355]$ の近くに位置しているため、計算結果のRD方向の歪みが大きくなっている事が原因になっていると考えられる。

次に、Fig.4-28~30のそれぞれの下の図を用いて、実験値の異方性を評価したいと思う。10%材では、低い応力の実験結果のばらつきが原因で、低い応力で異方性が大きくなっているが、基本的に、100MPaで極大を取っているものと思われる。また、40%材、70%材では、100MPa前後で極大値を示し同様の異方性を示した。

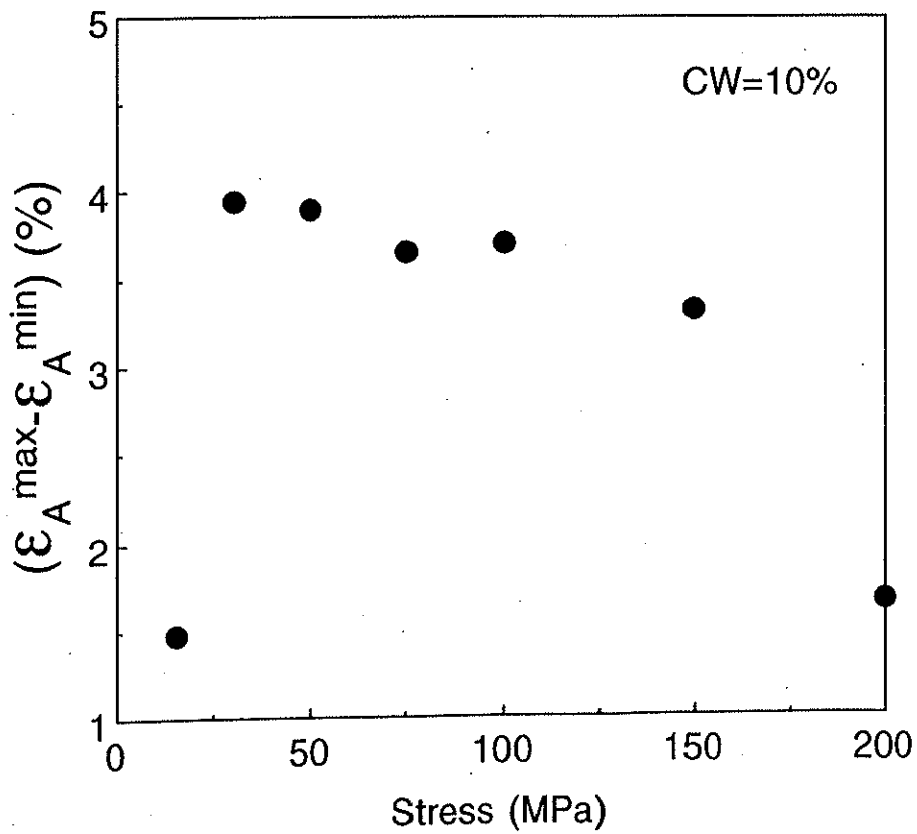
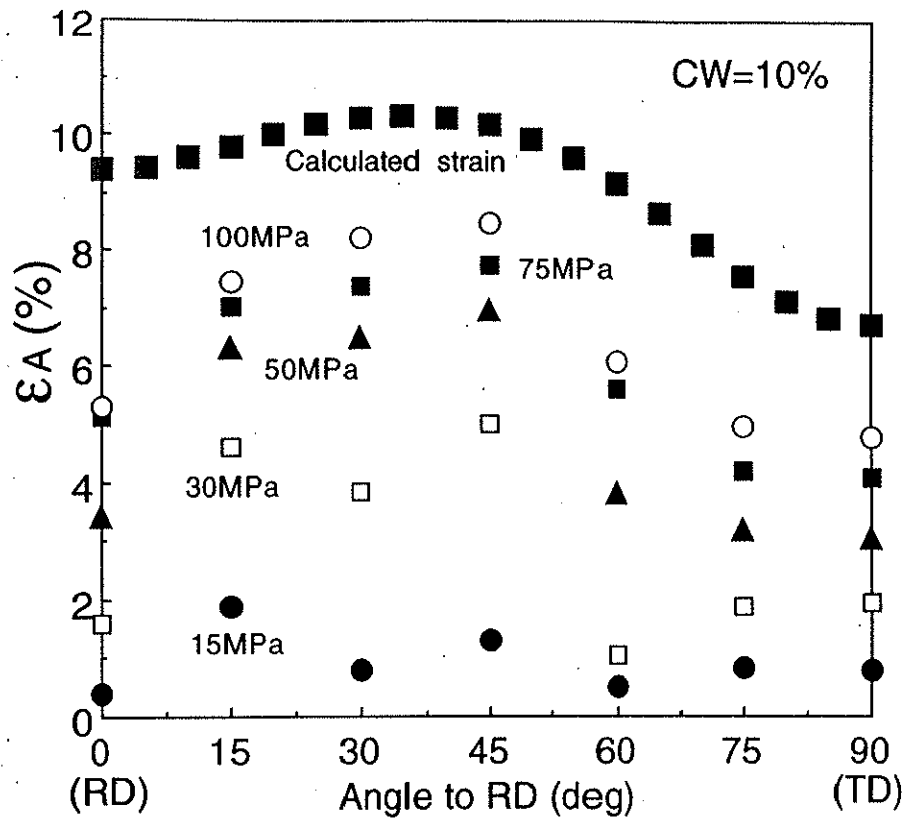


Fig.4-28 10%材の変態歪みの実験値と計算値の比較と変態歪みの異方性

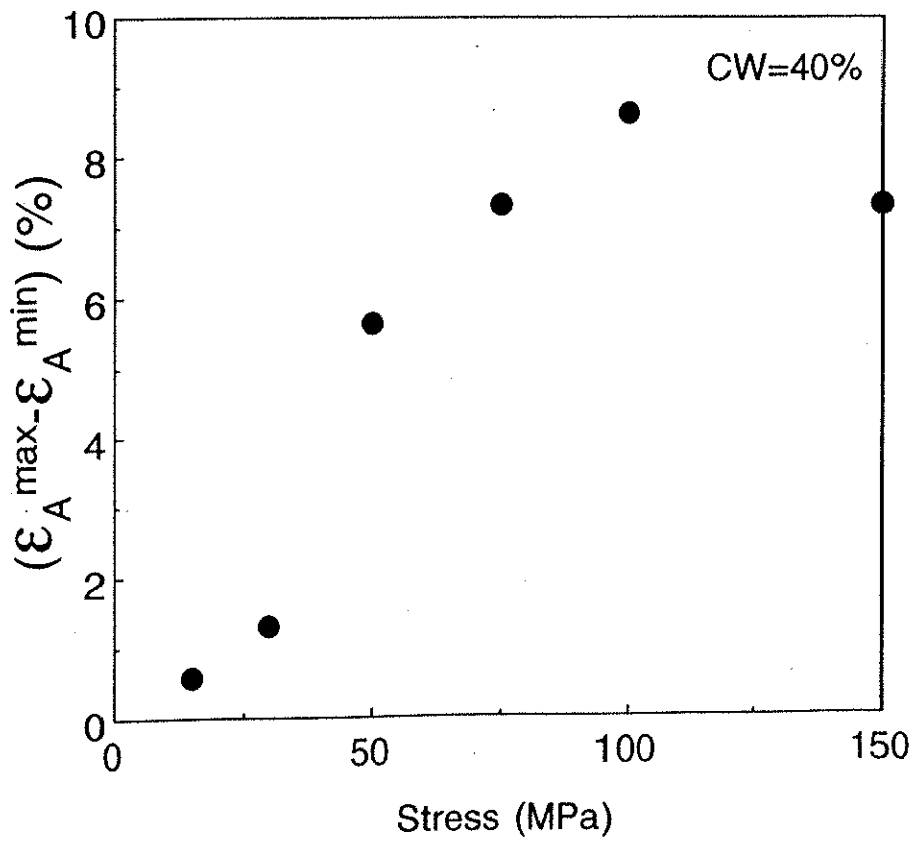
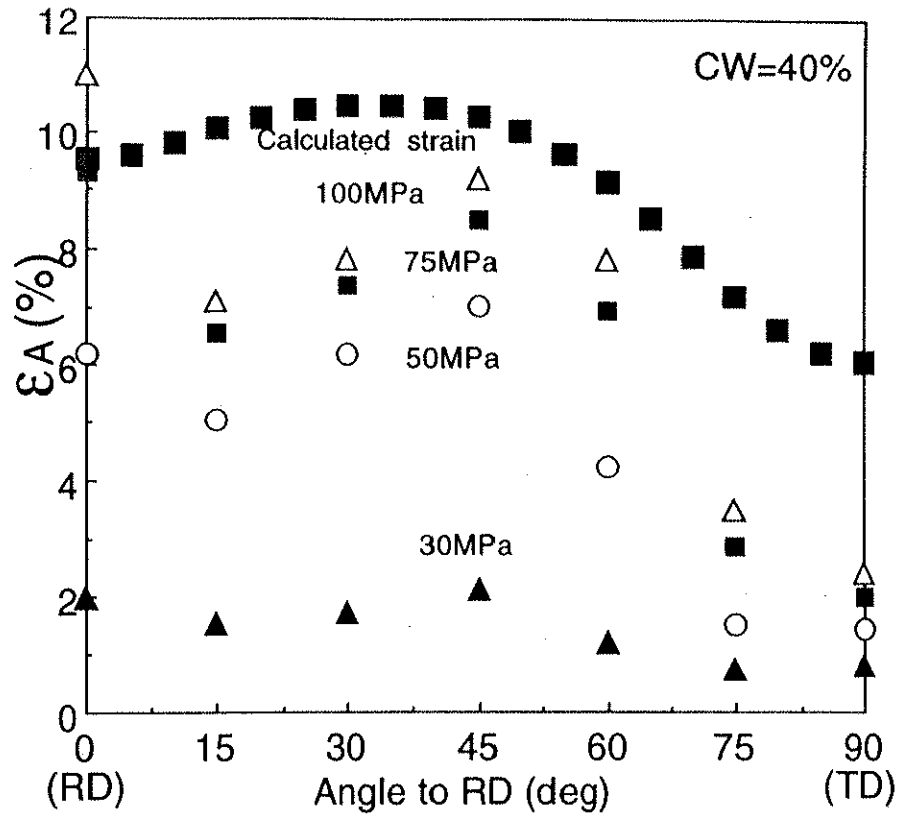


Fig.4-29 40%材の変態歪みの実験値と計算値の比較と変態歪みの異方性

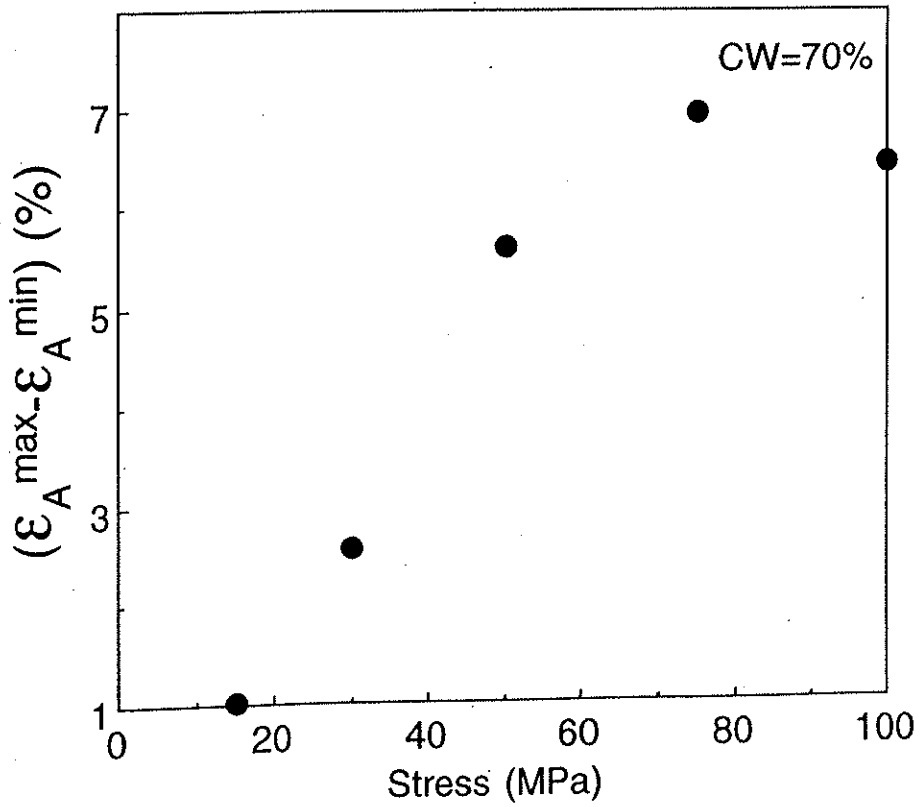
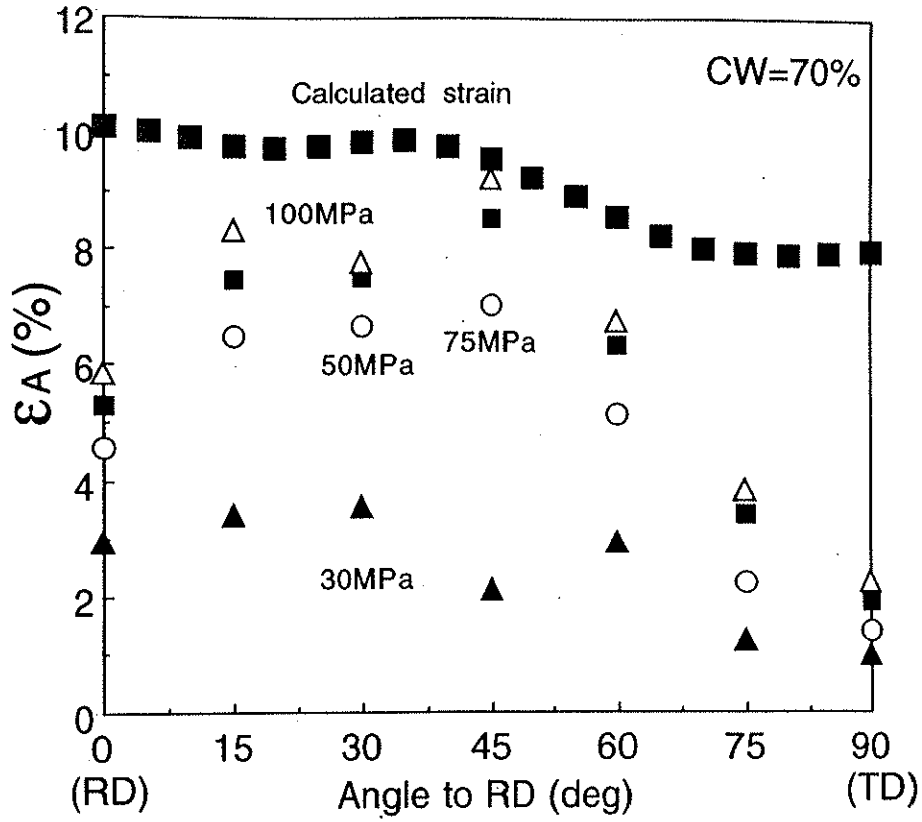


Fig.4-30 70%材の変態歪みの実験値と計算値の比較と変態歪みの異方性

4-4 結論

最終冷間圧延率を0~70%の間で変化させたTi-50.18at%Ni合金薄板をそれぞれ673Kと1073Kの2種類の熱処理を施し、加工集合組織と再結晶集合組織を持つ試料を作成した。これらの試料について集合組織と変態歪みの異方性に及ぼす圧延率の効果をX線回折と、引張り試験で調べ、以下のような結果を得た。

- (1) 加工集合組織の試料では、集合組織は、圧延率の低い場合には $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ に強く集中しているが、圧延率20%以上では弱くなった。また、高い圧延率では、 $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ の他に、弱い $\{111\}\langle 0\bar{1}1\rangle$ 集合組織が現れた。一方、再結晶集合組織の試料では、いずれの圧延率の試料でも $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ 集合組織が強く存在した。
- (2) 変態歪みの異方性に及ぼす加工の影響は、加工集合組織では、圧延率の低い試料に強く現れ、20%以上の圧延率では、加工の影響は弱かった。しかし、再結晶集合組織の試料では、20%までの圧延率では、加工の影響は弱かったが、40%以上の圧延率で、加工の影響が強く現れた。
- (3) 単結晶試料における変態歪みの方位依存性と、圧延板材の各引張り軸方向に存在する軸密度の情報を組み合わせることで、各試料の最大回復歪みを計算で求めた。また、一定荷重下の熱サイクル試験からも回復歪みを実験的に求めた。R相変態歪みは、マルテンサイト変態歪みよりも計算値と実験値は近い値を示した。この事は、R相変態はマルテンサイト変態より、バリエーションの最配列がしやすい事が原因になっている。いずれの実験結果も、計算値と実験値は定性的に同様の切り出し角度依存性を示した。

4-5 参考文献

- 1) J.H. Mulder, P.E. Thoma and J.Beyer, *Z. Metallkd.*, 84, 1993, p.501.
- 2) H.Inoue, N. Miwa and N. Inakazu, *Acta mater.* 44, 1996, p.4825.
- 3) S.Miyazaki, K.Kitamura, K. Nomura, F.Dong and H. Tobushi, *Smart Materials Technologies*, SPIE Vol.2716, (1996), SPIE Proc. Series Vol.2716 (1996) p.95.
- 4) K.Kitamura, S.Miyazaki and M.Kohl, "Anisotropy of Shape Memory Behavior of Rolled Ti-Ni Thin Plates", *Proc. of Inter. Conf. on New Actuators*, Bremen , Germany (1996) p.401.
- 5) K.Kitamura, S.Miyazaki, H.iwai, and M. Kohl, "Effect of Rolling Reduction on the Deformation Texture and Anisotropy of Transformation Strain in Ti-50.2at.% Ni Thin Plates", *Materials Science and Engineering A.*, (1999) p.758.