



K. Kakéhi

ニッケル基単結晶超合金の強度におよぼす 塑性異方性の影響

筧 幸次*

1. 研究の目的と背景

燃料費の高騰やCO₂削減目標などの制定により、航空機エンジンは高効率化が求められている。高効率化を達成するためには、エンジンのタービン入口温度を上げることが不可欠である。そのため、タービン翼材として1000°C以上の高温クリープ強度に優れた単結晶Ni基超合金(以下、単結晶合金と表記)が開発されてきた。単結晶は本質的に顕著な塑性異方性をもつ材料である。単結晶の塑性異方性は板状試験片において、応力負荷方向および板厚方向の結晶方位によって定まるすべり系の配置によって決まる。こうしたことから、板状試験片の応力負荷方向および板厚方向の結晶方位の組合せが単結晶材料の強度と加工性に大きな影響を及ぼすと考えられる。単結晶合金の高温強度について、応力負荷方位の結晶方位と板厚方向の結晶方位をどの様に選ぶかは、単結晶材を有効利用するために実用上重要であるにもかかわらず、研究はほとんどなされていない。そこで、本研究では、4種類の方位関係をもつ薄板切り欠き試験片を用いて、タービンブレード用Ni基超合金CMSX4の高温強度に及ぼす塑性異方性の影響について検討した。

2. 実験方法

本研究では、Rolls-Royce社のTrentエンジンのタービン動翼として実機使用されている単結晶合金CMSX4を供試材とした。化学組成を表1に示す。試験片形状はタービン動翼の空冷流路付近である肉厚が薄い場所を想定し、厚さは1.0mmとした。試験片形状を図1に示す。また単結晶合金は塑性異方性を有し、低温(700~850°C)において{111}<112>および{111}<101>すべり系が活動する¹⁾²⁾³⁾。その異方性を考慮するために結晶方位の異なる4種類の試験片を作製し試験を行った。各試験片の方位関係を図2に示す。順にA方位、B方位、C方位、D方位試験片と呼ぶ。この試験片には次のような熱処理を施した。固溶化熱処理は、1280°C/2 h、1290°C/2 h、1320°C/2 hで保持した後空冷した。AC(Air Cooled)材は、1140°C/4 hの時効熱処理後空冷した。標準熱処理材(ST材)は、その後、870°C/20hの2段階目の時効熱処理を施した。クリープ破断試験は、塑性異方性が顕著な750°C、試験応力を切り欠き部の断面に対して750MPaとした。破断面は走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した。また750°Cにおいて結晶格子の回転方向を調べるため、長方形断面(縦2.7mm、横3.0mm)の平滑試験片を用いて、クリープ破断試験を行った。{111}<112>すべり系に対するシュミット因子を最大の0.5とするため、<001>方位から10°離れた方位([118]方位)試験片を用いた。その際の分解せん断応力が[001]方位と同じ

になるように、引張応力は708MPaとした。試験終了後、引張クリープ変形後の結晶格子の方位回転を解析するために後方散乱電子回折パターン法(EBSP: Electron Backscatter Diffraction Pattern)を用いた。

表1 供試材の化学組成 (mass %)

Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Ta	Re	Hf	Ni
6.4	9.6	0.6	6.5	1.0	5.67	6.5	2.9	0.1	Bal.

表2 熱処理後の析出物の形態

時効熱処理条件	AC	ST
粒子の平均径 (μm)	0.42	0.44
体積率 (%)	64.7	66.2

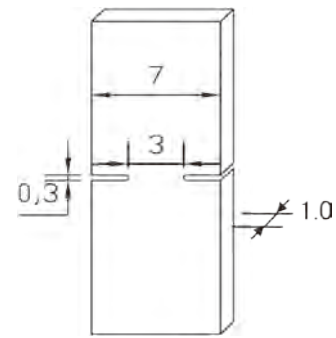


図1 切り欠き試験形状 (mm)

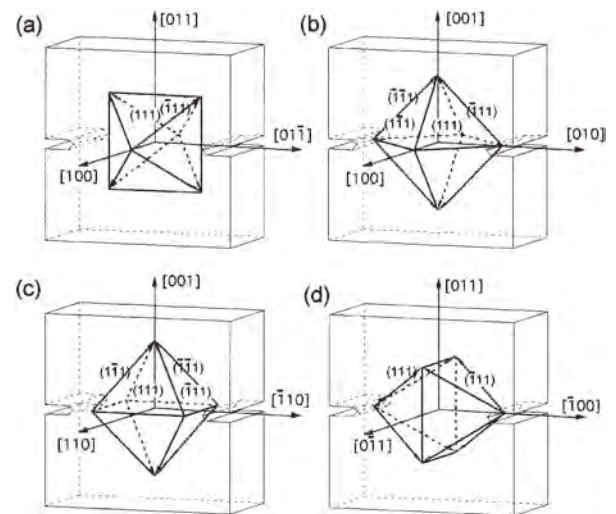


図2 4種類の塑性異方性をもつ切り欠き試験片の結晶方位と主すべり面の幾何学的関係

*首都大学東京大学院理工学研究科 准教授

3. 実験結果

3.1 時効熱処理後の組織

図3は、各熱処理後の試料のTEM組織である。いずれの熱処理試料でも γ 粒子は規則正しく配列した立方体形状をしており、界面転位は観察されず整合界面である。AC材およびST材において、 γ チャンネル中に二次析出 γ 粒子が観察された。AC材の二次析出 γ 粒子は、均一に微細分散していたが、ST材では粒成長して分散は不均一化していた。SEM組織写真から求めた1次析出 γ 粒子の平均粒子径と体積率の結果を表2に示す。粒子径および体積率とも、ST材の方がAC材より若干大きかった。

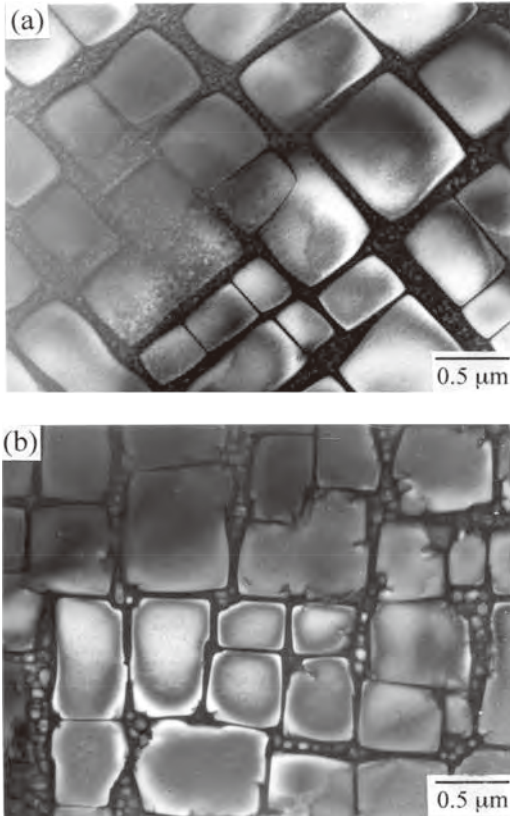


図3 熱処理後の組織：(a) AC材, (b) ST材

3.2 平滑試験片におけるクリープ

750°Cにおけるクリープ曲線を図4に示す。[001]方位では、時効熱処理は1次クリープに大きな影響を与えた。1段階時効材であるAC材の1次クリープひずみは11.0%であり、2段階

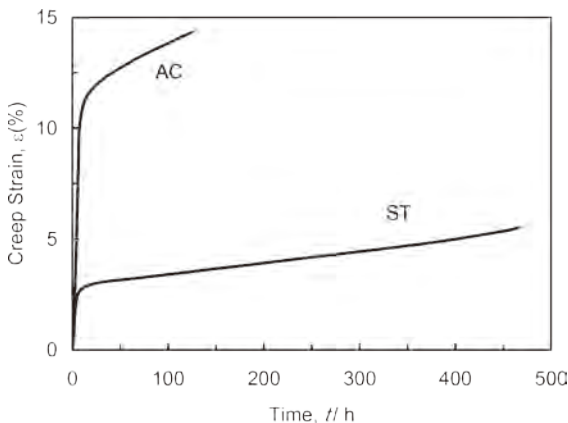


図4 平滑試験片のクリープ曲線

時効材であるST材の2.6%に比べて著しく大きい。また、図5に示すように、両試験片とも $\{111\}\langle 112\rangle$ すべりに起因するひずみ軟化が観察された。図6にクリープ試験後のEBSP解析結果を示す。[1 $\bar{1}$ 2]方向に結晶格子が回転していることが明らかになった。この試験片の回転方位は、 $\{111\}\langle 112\rangle$ すべり系は単一すべり方向と一致することから、CMSX4の750°Cのクリープにおいて $\{111\}\langle 112\rangle$ すべり系が活動したことがわかった。

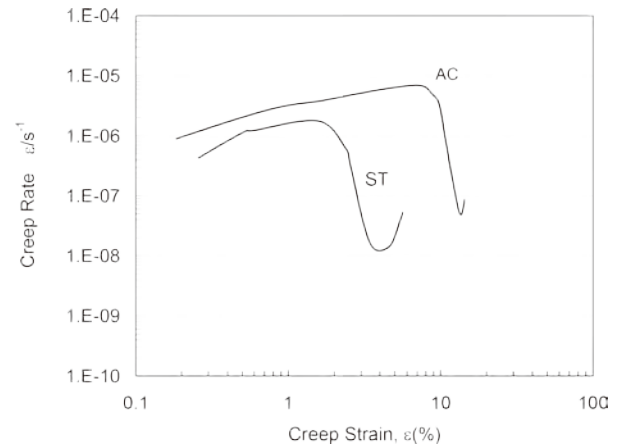


図5 クリープひずみとクリープ速度との関係

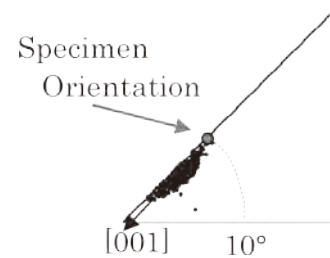


図6 [1 $\bar{1}$ 8] 方位試験片のクリープ変形による結晶格子回転。矢印方向の[1 $\bar{1}$ 2]方向に回転している。

3.3 切り欠き試験片のクリープ破断試験

4つの方位のクリープ曲線とクリープひずみ・クリープ速度線図を、それぞれ、図7と図8に示す。クリープひずみを算出する上でのゲージ長さは切り欠きの幅とした。平滑材では、AC材の方が、1次クリープひずみが大きく、 $\{111\}\langle 112\rangle$ すべりが顕著であることから、AC材をこの試験に供した。[001]引張方位であるB方位とC方位では、B方位の方がC方位よりも約5倍の長い破断寿命を示した。一方[011]引張方位であるA方位とD方位では、D方位の方が約400倍も長い破断寿命を示した。また、4つの方位の中で、A方位が一番短い破断寿命を示し、D方位が一番長い破断寿命を示した。平滑試験片では $\{111\}\langle 112\rangle$ すべりに起因するひずみ軟化がみられたのに対し、切り欠き材では、引張方位は[001]方位であるB,C方位とも観察されなかったことから、 $\langle 112\rangle$ すべりが効果的に拘束されたと考えられる。図9に方位Aと方位Bのクリープ後の破断面を示す。主すべり面である $\{111\}$ 面に沿って破断していた。

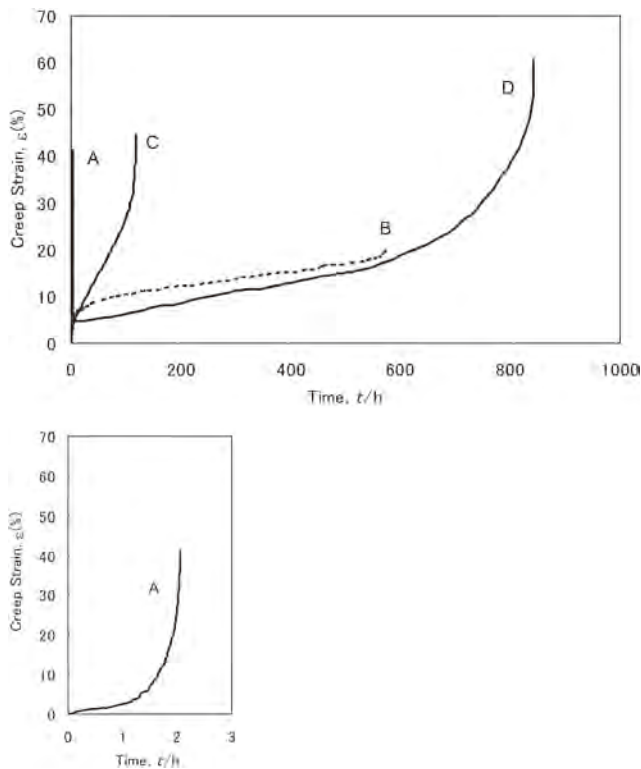


図7 切欠試験片のクリープ曲線.

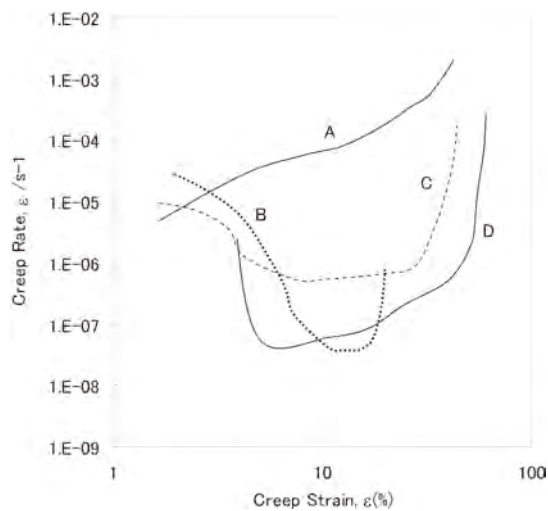


図8 切欠試験片のクリープひずみとクリープ速度との関係.

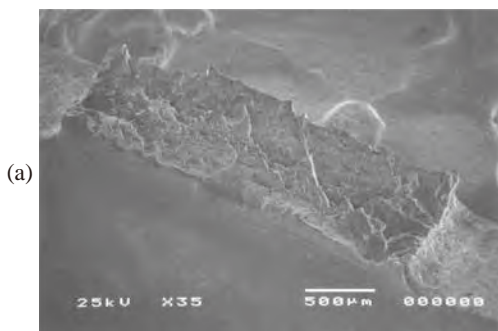


図9 切欠試験片の破面：(a) 方位 A, (b) 方位 B.

4. 考察

切欠材の強度と延性は応力状態に強く依存し、平面応力状態と平面歪状態とではそれぞれが大幅に異なることはよく知られている。単軸引張りを受ける多結晶切り欠き材の切り欠き先端領域での変形様式を大別すると図10に示すように、平面ひずみ状態では面内すべりからなるHinge typeの変形(同図(b))が起こり、平面応力状態では面外すべりからなる45°せん断型の変形(同図(b))が起こることが、Hahnら⁴⁾により報告されている。Hahnらの結果は、単に板厚が変化することによる応力状態の変化に起因するものである。単結晶材においては、すべり系の配置を変えることによって塑性異方性が著しく変化するため、上記変形様式の変化が顕著に生じることが考えられる。したがって、単結晶材のように、材料が顕著な塑性異方性をもつ場合は、応力状態のみならず塑性異方性も大きな影響を及ぼし、両者の組合せ方によって切欠強度と延性が大幅に変化することは容易に予想できる。両端に切り欠きが対称に存在する平面応力状態では、面内すべりであるHinge-typeは拘束され、面外すべりである

45°-shear-typeは拘束をうけない。上に述べた考え方によって、本章では単結晶材の結晶方位を適宜選ぶことによって4種類の顕著な塑性異方性をもつ板材を想定し、それらのもつ塑性異方性について検討する。

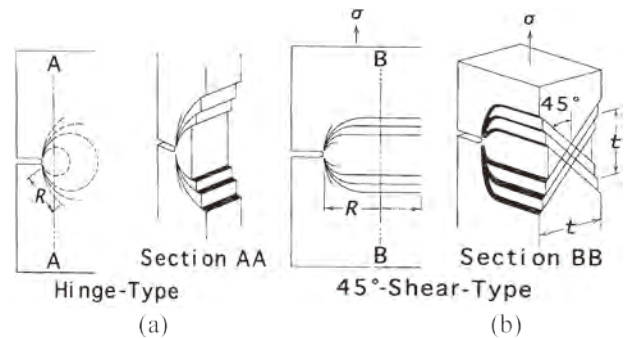


図10 切り欠き先端の塑性域の広がり.

4.1 すべり系の安定性

一般に、引張軸方位が[011]方位であるとき、一つのすべり系のみが優先的にすべる不安定すべりを起こして、すべり間の相互作用によるひずみ硬化がなく強度が低い。それに対し、引張軸方位が[001]方位であるとき、安定多重すべりが生じ強度が高い。

図7の結果は、単に引張軸方位のみの影響で説明できないことは明らかである。

4.2 {111}<112> すべりによる塑性異方性

EBSP解析より {111}<112>すべり系が活動することが明らかとなっているので、クリープ挙動について、{111}<112>すべり系と切り欠きの幾何学的配置から考察する。図11に4種類の試験片と{111}<112>型すべり系の配置を示す。単純な1軸引張り試験変形(X_2 軸方向の引張)において、最大の分解せん断応力の作用する主すべり系のみが活動するものと仮定する。AおよびD方位においてはこの主すべり系はそれぞれ2個あり、BおよびC方位ではそれぞれ4個ある。軸応力 σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} が作用するとき、各主すべり系に作用する分解せん断応力および主すべり系に発生するせん断ひずみと軸ひずみとの関係を表3に示す。板厚の減少のみを起こすすべり系Tグループと板幅の減少のみを起こすすべり系のWグループ、板厚と板幅を同時に減少させるすべり系のTWグループに分類できる。もし $\sigma_{11} > \sigma_{33}$ ならば、表1に示したTグループに属する4つの主すべり系が優先的に活動し、このグループは試験片の厚さのみを減少させる。このグループに起因する塑性異方性はA方位の塑性異方性と同じである。もし $\sigma_{11} < \sigma_{33}$ ならば、Wグループに属する4つの主すべり系が優先的に活動し、試験片の幅のみ減少させる。

A方位($r=0$)：単純な1軸引張り変形においては厚さ方向の塑性ひずみ ε_{33} のみが発生し、幅方向の塑性ひずみ ε_{11} は0である。したがって、この異方性をLankfordの r 値を用いて簡潔に表すと $r=0$ である。主すべり系に属する2つのすべり系1,2は、 X_2 方向の1軸引張またはそれに近い応力状態において、板厚のみ減少させ、板幅は変化させない。多軸応力状態(σ_{22} 、 σ_{11} 、 σ_{33} が存在)で、すべり系1,2に作用する分解せん断応力 τ は

$$\tau = (\sqrt{2}/3)(\sigma_{22} - \sigma_{33})$$

従って、板幅方向の応力 σ_{11} は全く拘束効果に関与せず、薄板切欠材の場合は両切欠を結ぶ線上で $\sigma_{33} \approx 0$ であるため、切欠に起因する拘束効果は無く、切欠強度は低い。

B方位(真性 $r=1$)：B方位の塑性異方性は真性 $r=1$ である。これは多成分の応力が同時に作用する複雑な応力下においても、板厚方向の収縮と板幅の収縮が相伴って発生するという塑性異方性を意味している。すなわち、TおよびWグループに属する4つのすべり系1~4は、その内の一つのみが活動しても必ず板厚と板幅の減少を相伴って起こす。従って、板幅方向の変形が切欠周辺部によって拘束されることにより σ_{11} が発生する。多軸応力状態(σ_{22} 、 σ_{11} 、 σ_{33} が存在)で、すべり系1~4に作用する分解せん断応力 τ は

$$\tau = (\sqrt{2}/3)[\sigma_{22} - (\sigma_{33} + \sigma_{11})/2]$$

これらのすべり系は σ_{11} と σ_{33} の両方による拘束を受ける。薄板切欠材の場合は両切欠を結ぶ線上で $\sigma_{33} \approx 0$ であるが板幅方向の σ_{11} が存在するため、すべり系が切欠拘束を受けるので、切欠強度が高い。

C方位(擬似 $r=1$)：単純な平滑試験片による1軸引張り変形においては、板厚と板幅が均等に減少するため、 $r=1$ である。しかし、TグループとWグループとにはっきり分かれているため、どちらかのグループに属するすべり系のみが優先的に活動して、 $r=0 \sim \infty$ の値を示す可能性がある。したがって、C方位の異方性を擬似 $r=1$ と呼ぶ。Tグループに属する2つのすべり系に対しては、多軸応力下で、

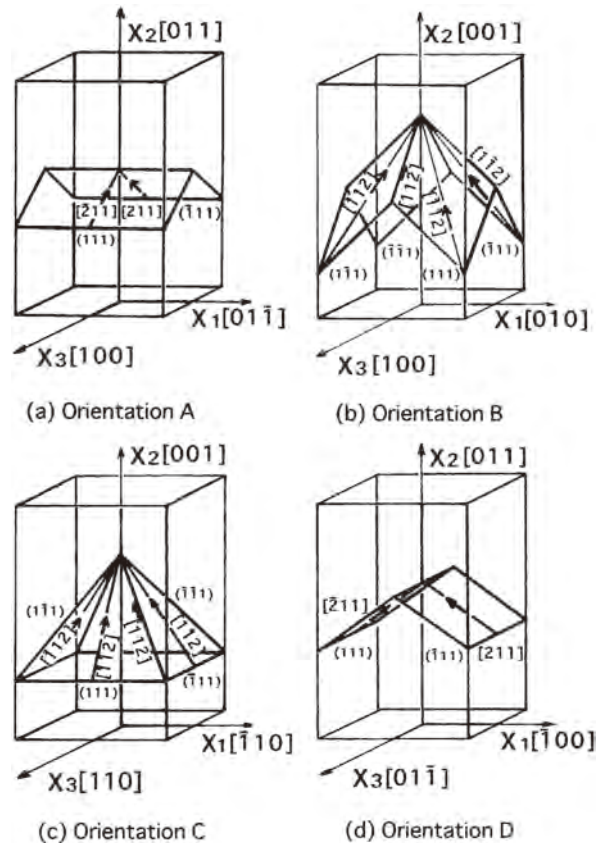


図11 試験片における{111}<112>すべり系の配置。

表3 {111}<112>すべりに作用する分解せん断応力とすべり系のグループ

Specimen Orientation	Group	Principal Slip System	τ
A	T	1. (111)[211]	$\frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_{22} - \sigma_{33})$
		2. (111)[211]	
B	TW	1. (111)[112]	$\frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_{22} - \frac{\sigma_{11} + \sigma_{33}}{2})$
		2. (111)[112]	
		3. (111)[112]	
		4. (111)[112]	
C	T	1. (111)[112]	$\frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_{22} - \sigma_{33})$
		2. (111)[112]	
	W	3. (111)[112]	$\frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_{22} - \sigma_{11})$
		4. (111)[112]	
D	W	1. (111)[211]	$\frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_{22} - \sigma_{11})$
		2. (111)[211]	

$$\tau = (\sqrt{2}/3)(\sigma_{22} - \sigma_{33}).$$

薄板切欠材では $\sigma_{33} \approx 0$ なので拘束を受けない。Wグループに属する2つのすべり系に対しては、

$$\tau = (\sqrt{2}/3)(\sigma_{22} - \sigma_{11}).$$

従って、切欠があれば、 σ_{11} が発生するので、これによる拘束を受ける。Wグループの3と4は活動しないが、薄板切欠材では、Tグループの1と2が拘束を受けることなく活動する。すなわち、薄板切欠材の場合、Wグループは拘束を受け

るが、Tグループがほとんど拘束を受けないのでこれが優先的にすべり強度は低い。

D方位($r = \infty$): 単純な1軸引張変形においては、板厚は全く減少せず板幅のみが収縮する。したがって、 $r = \infty$ である。多軸応力状態(σ_{22} , σ_{11} , σ_{33} が存在)で、すべり系1, 2に作用する分解せん断応力 τ は

$$\tau = (\sqrt{2}/3)(\sigma_{22} - \sigma_{11}).$$

従って、両すべり系は板幅方向の σ_{11} によってのみ拘束を受け、板厚方向の σ_{33} には影響されない。Wグループに属する2つのすべり系1,2は、 X_2 方向の1軸引張またはそれに近い応力状態において、板幅のみ減少させ、板厚は変化させない。板幅方向の変形が切欠周辺部によって拘束されることにより σ_{11} が発生する。このことから、D方位の切欠材は σ_{11} による拘束を受け、切欠強度が高い。

[001]引張であるB方位では4つの $\{111\}\langle 112 \rangle$ すべり系が、すべて幅方向の面内すべり成分をもっている。このためすべてのすべり系が拘束を受けたと考えられる。同じく[001]引張であるC方位では4つの $\{111\}\langle 112 \rangle$ すべり系があり、そのうちの2つが面外すべり、残りの2つが幅方向に面内すべりを生じる。つまりC方位では幅方向のすべり系は拘束されたと考えられるが、厚み方向のすべり系は拘束されず、破断までこのすべり系が働いたと考えられる。B方位はすべての $\{111\}\langle 112 \rangle$ すべり系が拘束されたのに対して、C方位では2つの $\{111\}\langle 112 \rangle$ すべり系が自由に活動できたので、C方位よりもB方位の方が高い強度を示したと考えられる。[011]引張のA方位では2つの $\{111\}\langle 112 \rangle$ すべり系があり、その両方も厚み方向に変位を生じる。この2つの $\{111\}\langle 112 \rangle$ すべり系は拘束を受けず、クリープ強度は著しく低下したと考えられる。C方位よりも強度が低かったのは、[011]引張で生じる $\{111\}\langle 112 \rangle$ 方向の双晶²⁾による容易すべりが生じたためと考えられる。同じく[011]引張であるD方位では、すべてのすべり系が幅方向に変位を生じる。そのため、すべり系が完全に拘束されたと考えられる。B方位は、すべり系は厚み方向の成分をもっていたのに対して、D方位はすべりが幅方向に生じ、すべりが完全に拘束されたために優れたクリープ強度が得られたと考えられる。

4.3 $\{111\}\langle 101 \rangle$ すべりによる塑性異方性

$\{111\}\langle 101 \rangle$ すべりの配置と各すべりに働くせん断応力とすべりの種別をそれぞれ図12, 表4に示す。

A方位($r = 0$): この方位には、4つの主すべり系がある。もし、この方位をもつ平滑試験片の1軸引張応力 σ_{22} が作用するとき、各主すべり系には同じ大きさの分解せん断応力が作用する。したがって、もし不安定すべりが生じないと仮定すれば、各すべり系には等しい大きさのせん断ひずみが発生する。A方位の塑性異方性は、 $r = 0$ と表される。主すべり系に作用する分解せん断応力は板圧方向の σ_{33} のみによって低下し、幅方向の応力 σ_{11} の影響は受けない。薄板材では、 $\sigma_{33} \approx 0$ であるので切欠強度は低い。

B方位(擬似 $r = 1$): B方位には8つの主すべり系がある。1軸引張りのとき、8つの主すべり系には等しい大きさの分解せん断応力が作用し、各すべり系は等量ずつすべる。したがって、 $r = 1$ である。このグループに起因する塑性異方性は

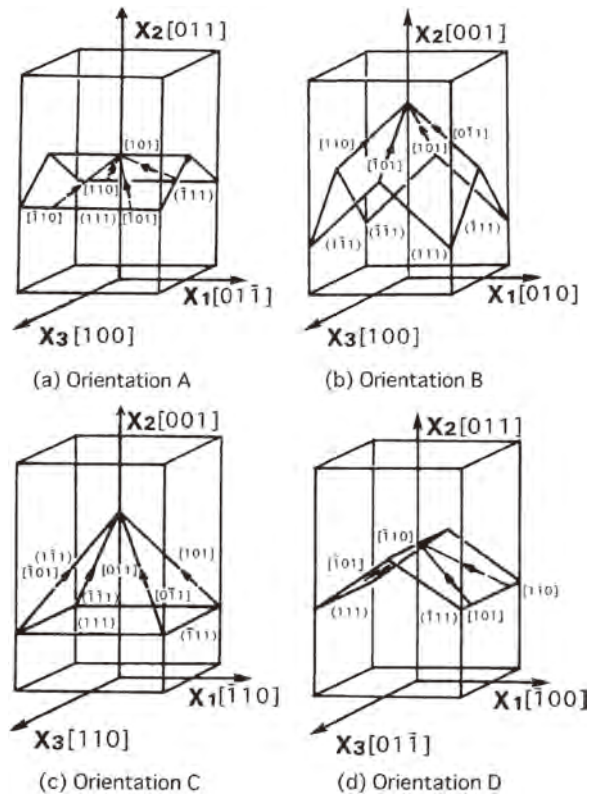


図12 試験片における $\{111\}\langle 101 \rangle$ すべり系の配置

表4 $\{111\}\langle 101 \rangle$ すべりに作用する分解せん断応力とすべり系のグループ

Specimen	Group	Principal Slip System		τ
A	T	1. $(111)[101]$	3. $(111)[101]$	$\frac{1}{\sqrt{6}}(\sigma_{22} - \sigma_{33})$
		2. $(111)[110]$	4. $(111)[110]$	
B	T	1. $(111)[101]$	3. $(111)[101]$	$\frac{1}{\sqrt{6}}(\sigma_{22} - \sigma_{33})$
		2. $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[110]$	4. $(111)[101]$	
	W	5. $(111)[011]$	7. $(111)[011]$	$\frac{1}{\sqrt{6}}(\sigma_{22} - \sigma_{11})$
		6. $(111)[011]$	8. $(111)[011]$	
C	T	1. $(111)[101]$	3. $(111)[101]$	$\frac{1}{\sqrt{6}}(\sigma_{22} - \sigma_{33})$
		2. $(111)[011]$	4. $(111)[011]$	
	W	5. $(111)[011]$	7. $(111)[101]$	$\frac{1}{\sqrt{6}}(\sigma_{22} - \sigma_{11})$
D	W	1. $(111)[101]$	3. $(111)[101]$	$\frac{1}{\sqrt{6}}(\sigma_{22} - \sigma_{11})$
		2. $(111)[110]$	4. $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[110]$	

D方位のそれと同じである。したがって、B方位の r 値は応力状態に応じて1から0まであるいは1から ∞ まで変化する擬似 $r = 1$ ($r = 1, \text{extrinsic}$)である。B方位をもつ薄板切欠材においては、Tグループに属するすべり系が切欠き拘束をほとんど受けなため、切欠引張り強さは低いであろう。

C方位(擬似 $r = 1$): B方位の板を X_2 軸のまわりに 45° 回転するとC方位の板になる。C方位の塑性異方性はC方位と同様に擬似 $r = 1$ である。

D方位($r = \infty$): A方位の結晶を X_2 軸のまわりに 90° 回転するとD方位の結晶が得られる。この方位の4つの主すべり系は板幅のみ減少させるので $r = \infty$ である。主すべり系に作用する分解せん断応力は幅方向の応力 σ_{11} のみの影響をうける

ので、切欠き引張り強さは高い。

BおよびC方位では、TグループとWグループが同等に存在するので、 $\{111\}\langle 101\rangle$ すべりに関しては同等であり、異方性はクリーブ強度に影響を及ぼさない。すなわち、B、C方位間の強度差は $\{111\}\langle 112\rangle$ すべりに起因する。一方、D方位は、 $\{111\}\langle 112\rangle$ すべりに加え、 $\{111\}\langle 101\rangle$ すべりも効果的に拘束されたため、最もクリーブ強度が高くなったと考えられる。それに対し、A方位は、両すべり系とも切欠拘束を受けないため、クリーブ強度が最小になったと考えられる。

最後に、構造材料として単結晶合金が実用化されているのはタービン翼のみであることから、本研究の知見の応用可能な範囲は現時点では、限られているが、(i)特有のひずみ軟化を利用して塑性変形抵抗を低下させる、(ii) $\{111\}\langle 101\rangle$ すべりと $\{111\}\langle 112\rangle$ すべりの活動すべり系の組み合わせをコントロールすることによる、0~ ∞ までの様々な r 値をもつ単結晶合金の創製、(iii)塑性加工（予ひずみ）を付与することにより、稼働中のブレードのTMF強度を低下させるひずみ軟化を抑制すること等が考えられる。

5. 結言

- (1) 単結晶Ni基超合金CMSX4の750°Cのクリーブ変形において、EBSP解析から $\{111\}\langle 112\rangle$ すべり系が活動することが明らかとなった。

- (2) 切り欠き試験片の強度特性は、単に引張り方向の結晶方位に依存するだけでなく、板厚方向の結晶方位にも強く依存する。切り欠き試験片では、すべり系に起因する塑性異方性が顕著になり、クリーブ寿命に400倍以上の差が現れることが明らかとなった。
- (3) 試験片の幾何学形状と $\{111\}\langle 112\rangle$ すべりと $\{111\}\langle 101\rangle$ すべりの活動を考慮することで、クリーブ挙動を説明することができた。

謝 辞

本研究は、財団法人天田金属加工機械技術振興財団（現公益財団法人天田財団）の平成16年度一般研究開発助成（AF-2004018）を受けて行われた。ここに記して、同財団に謝意を表します。

参考文献

- 1) G.R. Leverant and B.H. Kear: Metall. Trans., 1970, vol. 1, pp. 491-98
- 2) R.A. MacKay and R.D. Maier: Metall. Trans. A, 1982, vol. 13A, pp.1747-54
- 3) K. Kakehi, Metall. and Mater. Trans. A. 30A, 1249 (1999)
- 4) G.T. Hahn and A.R. Rosenfield, Acta Metall, 13(1965), pp.293-105