

Ti 合金 (SP700) 及び SiC (SCS-6) / Ti (SP700) 複合材料の引張試験

祖父江 靖*1, 橋本良作*1, 小河昭紀*1, 周風華*2

Tensile Tests of SiC/Ti Composites and SP700 Titanium Alloy

Yasushi SOFUE*1, Ryosaku HASIMOTO*1, Akinori OGAWA*1, Fenghua ZHOU*2

ABSTRACT

Tensile tests of titanium alloy and SiC/Ti composites at room temperature were carried out to examine the strength characteristics of the materials. Before testing, finite element analysis was performed to confirm that no stress concentration exists on the present two shapes of specimens. Three types of material were used in the tensile tests SP700 titanium alloy manufactured by Hot Isostatic Pressing (HIP) forming, SP700 titanium alloy manufactured by roll forming, and SiC/Ti composites manufactured by HIP forming. In each test, tensile strength characteristics were measured, including tensile strength, elongation, elastic modulus and Poisson's ratio. After testing, the rupture area of each specimen was observed by optical microscope, and the fractured surface by scanning electron microscope. All the testing data and photographs were synthesized for this paper.

Keywords : Material Testing, Molding Methods, Tensile Properties, Fractography, Composite Material

概要

航空エンジンの軽量化を目的に, SiC/Ti 複合材料を構造部材に適用することの可能性を検討した。SiC/Ti 複合材料とマトリックスである Ti 合金の機械的特性を把握するため, Ti 合金及び SiC/Ti 複合材料の常温の引張試験を行い引張強さ, 弾性率, ポアソン比, 破断伸び等の材料強度特性を調べた。試験片の種類は (1) HIP 成形の Ti 合金 (SP700) 試験片, (2) 圧延成形の Ti 合金 (SP700) 試験片, (3) HIP 成形の SiC (SCS-6) /Ti 合金 (SP700) 複合材試験片の三種類である。引張破壊後の試験片について光学顕微鏡を用いて破断部, 走査電子顕微鏡を用いて破面の観察を行った。本報では, これらの結果について述べる。

1. まえがき

近年, 航空用エンジンの構造部材に耐熱性, 比強度, 比剛性に優れた SiC/Ti 複合材料を適用する目的で, 材

料強度特性を調べる研究が行われている(1),(2)。複合材料の耐熱性は, 樹脂系複合材料では 250 , アルミ合金複合材料では 300 , チタン合金複合材料では 650 近傍までの耐熱性がある(1)。革新的航空用高効率エン

* 平成 11 年 3 月 16 日受付 (received 16 March 1999)

* 1 航空エンジン研究部 (Aeroengine Division)

* 2 航空エンジン研究部 科学技術特別研究員 (Reserch Fellow Aeroengine Division)

ジンのファン動翼では、高周速化による段数削減によってファン部の重量軽減を目指すため、従来より応力条件が厳しくなる場合が多い。250～600の中高温域で使用する各種材料の高温比強度を比較するとチタン合金複合材料が最も優れている⁽¹⁾。

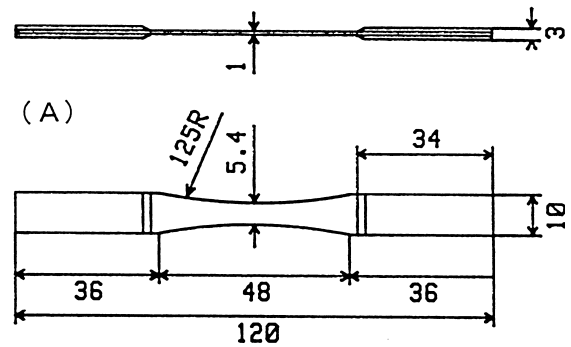
航空用エンジンのファン動翼にSiC/Ti複合材料を適用する場合、異物吸い込みに対する耐FOD(Resistance against foreign object damage,異物吸い込み損傷)性が高いことが必須の要件である。複合材料は成形条件及びマトリックスの違いによって材料強度特性に大きな影響を及ぼす。このため、最適なSiC/Ti複合材料製造条件を選定して、耐FOD特性の高い複合材料を開発することが必要である。

エンジン材料構造研究室では、ファン動翼にSiC/Ti複合材料を適用するための研究として、以前にSiC繊維(SCS-6)で強化したTi合金(Ti-15-3)マトリックスを用いたSiC/Ti複合材試験片の衝撃試験を行い耐FOD特性を調べた^{(3),(4)}。この結果、複合材料成形法である熱間静水圧プレス(以後HIPと記述する)成形工程の温度を低くすると、SiC繊維とTi合金マトリックスとの界面反応層の違いの影響で、耐FOD特性を向上できる可能性がある結果を得た。そこで、Ti合金(Ti-15-3)よりHIP温度を150℃低下できるTi合金(SP700)をマトリックスに用いたSiC/Ti複合材試験片を製作して、耐FOD特性を高めるための研究を進めている。

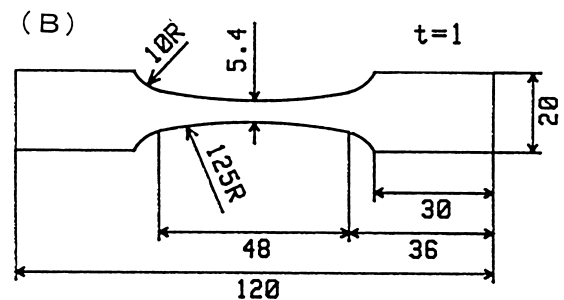
本報では、Ti合金(SP700)及びSiC(SCS-6)/Ti(SP700)複合材料の静的な材料強度特性に関する基礎資料の提供を目的として、Ti合金及びSiC/Ti合金複合材料の引張試験を行い、材料強度特性を調べたので報告する。なお、試験で用いたSiC/Ti試験片は、SiC繊維を一方に配向し強化したUD材であり、繊維含有率は32%である。

2. 試験片の種類

図1の(A),(B)に引張試験で用いた二種類の試験片形状を示す。(A)はHIP成形のTi合金(SP700)板から採取した試験片(以後Ti・HIP試験片と記述する)及びHIP成形のSiC(SCS-6)繊維強化Ti合金(SP700)複合材料板から採取した試験片(以後SiC/Ti試験片と記述する)である。(B)は圧延成形のTi合金(SP700)板から採取した試験片(以後Ti・Roll試験片と記述する)である。(A)と(B)の試験片形状が違うのは、成形方法が異なるためである。(A)の場合、HIP成形時にタブ部を成形した。しかし、(B)の場合、圧延成形材をそのまま使用しタブ部を厚くできなかったため、つかみ部の幅を大きくした。なお、Ti合金(SP700)の組成はTi-4.5Al-3V-2Mo-2Feである。



Ti-alloy-HIP and SiC/Ti Specimen



Ti-alloy-Roll Specimen

図1 引張試験で用いた試験片の形状

図2に複合材料製造工程であるHIP成形法の概要を示す。強化繊維及びマトリックスの裁断から6工程で複合材料成形板を製造する。表1にTi合金及びSiC/Ti複合材料のHIP成形の製造条件を示す。

図3にHIP成形によるTi・HIP試験片及びSiC/Ti試験片の積層方法を示す。Ti・HIP試験片は厚さ120 μ mのTi合金(SP700)箔を9枚積層し、その上下に試験片のタブとなる厚さ1mmの圧延成形Ti合金(SP700)板を重ねて、HIP成形した縦120mm、横120mmのHIP成形板から採取した。Ti・HIP試験片は、HIP成形板から試験片形状に切り出した後、試験片タブ部の形成及び試験片標定部が厚さ1mm、長さ48mmとなるように切削加工した。

SiC/Ti試験片は繊維直径140 μ mのSiC繊維(SCS-6)グリーンプリフォームを4層、厚さ120 μ mのTi合金(SP700)箔を7枚、図3のように積層し、その上下に試験片のタブとなる厚さ1mmの圧延成形Ti合金(SP700)板を重ねて、HIP成形した縦120mm、横120mmのHIP成形板から採取した。なお、SiC/Ti試験片は、Ti・HIP試験片と同様に、HIP成形板から試験片形状に加工した。試験片の標定部の繊維含有率は32%である。SiC/Ti試験片の強化繊維に用いたSiC繊維(SCS-6)は、米国Textron社製のTi合金用強化繊維である。SiC繊維の特性を表2に示す。なお、SiC繊維は、芯線のカーボン

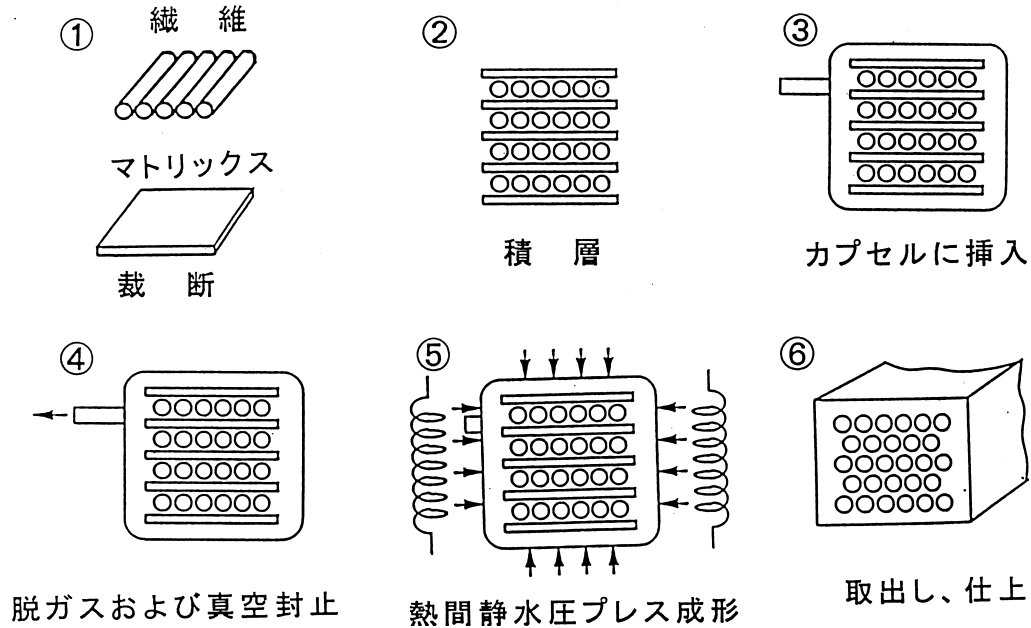


図2 熱間静水圧プレス成形 (HIP) 法による製造法の概要

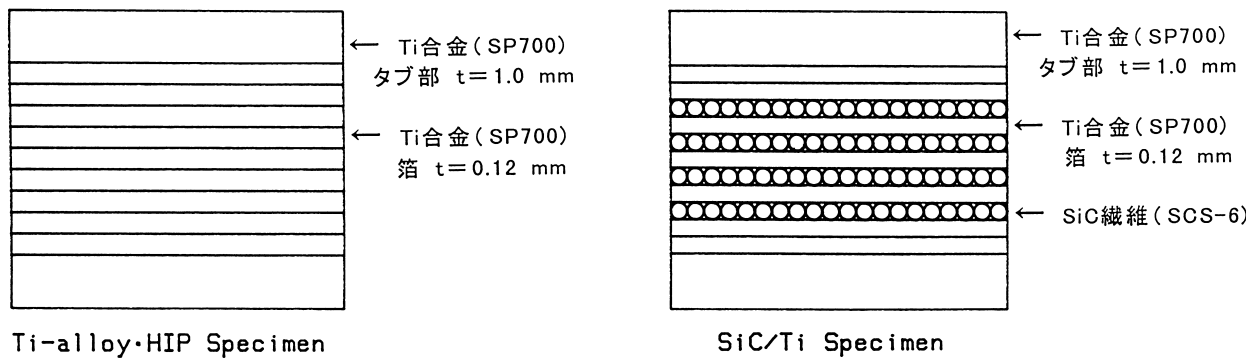


図3 Ti-alloy・HIP試験片およびSiC/Ti複合材試験片の積層方法

表1 Ti合金及びSiC/Ti複合材料のHIP成形製造条件

温度	775
圧力	118MPa
保持時間	120min

表2 強化繊維SCS-6の特性

繊維直径	140 μ m
引張強度	3450 MPa
弾性率	400 GPa
密度	3.05 g/cm ³

繊維の周囲にSiCをCVD法(化学蒸着法)で蒸着したものである。

Ti-Roll試験片は縦120mm,横120mm,厚さ1mmの圧延成形板から最大主応力方向が圧延方向になるよう採取した。この試験片は製作方法が前者と異なるためタブを付けなかった。このため引張試験機のグリップに挟むつかみ部の幅を20mmとした。試験片の標定部は前者のTi・HIP試験片及びSiC/Ti試験片と同じ形状にした。

引張試験で得られた各試験片の材料強度特性の詳細は後述するが、概要を以下に示す。図4は各試験片の引張強さである。横軸は試験片の番号,縦軸は応力である。

はSiC/Ti試験片, はTi・HIP試験片, はTi-Roll

試験片を示す。個々の試験片の呼び方は,試験片の種類
の次に試験片番号を記し,SiC/Ti複合材料の試験片番号4の場合SiC/Ti・N4試験片とした。なお,試験片の種類が明らかである箇所では,試験片番号のみを示しN4試験片と記述した。SiC/Ti・N4試験片は他のSiC/Ti試験片に比べ引張強さが低下した。SiC/Ti・N4試験片は,後述の図31の(B)で示すようにHIP成形時の残留応力等の影響で反りによる曲がりが生じた。このため,試験片形成のための切削加工に際し,試験片表面に繊維が露出した。引張強さが低下したのは,繊維による強化機能が充分達成できなかったためと考えられる。図5は三種類の代表的試験片の引張破壊までの応力-ひず

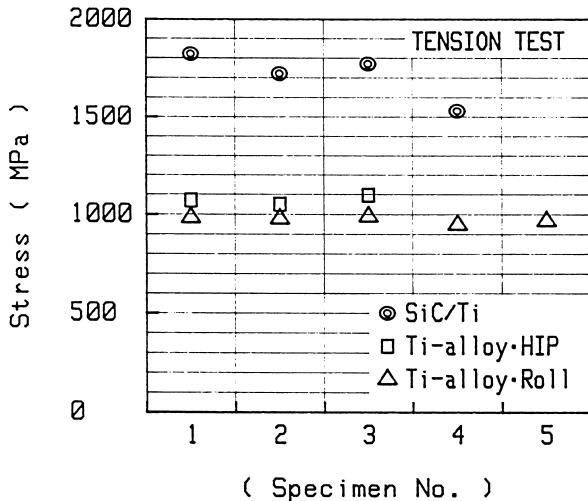


図4 各試験片の引張強さ

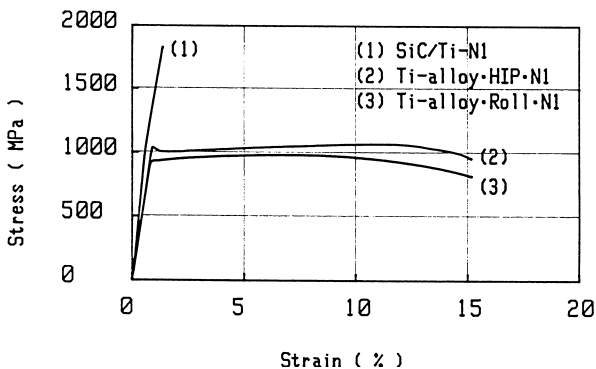


図5 各試験片の応力 - ひずみ曲線

み曲線を示したものである。例としてTi・HIP・N1試験片, Ti・Roll・N1試験片, SiC/Ti・N3試験片について比較した。Ti・HIP試験片の場合, 降伏点を超えると応力が低下し, その後, 図に示すように最大応力に達した後破断した。Ti・Roll試験片の場合, 降伏点を超えても応力は低下せず, 図のような挙動を示した後破断した。このように, 製造方法の違うTi合金試験片の応力 - ひずみ曲線は異なる挙動を示した。SiC/Ti試験片の応力 - ひずみ曲線では, マトリックスの塑性変形の影響で, 途中で直線の勾配が異なる挙動を示した。表3は三種類の試験片の引張試験で得られた引張強度特性を示す。引張強さ, 弾性率, ポアソン比, 破断伸び及び密度は各種の試験片の平均値である。SiC/Ti試験片の引張強さは, SiC/Ti・N4試験片を除いた3枚の試験片の

平均値で示した。なお, NKKが公表しているTi合金(SP700)薄板の主な材料強度特性は弾性率110GPa, ポアソン比0.33, 密度4.45g/cm³である。

3. 試験方法

引張試験はINSTRON-1185型万能試験機(以後引張試験機と記述する)を使用し, 試験片のひずみを三軸ロゼットひずみゲージ(以後ひずみゲージと記述する)及びクリップゲージで測定した。又, 引張試験のクロスヘッド移動量をダイヤルゲージで測定した。なお, クロスヘッドスピードは0.5mm/minである。

図6に引張試験状況を示す。試験片は引張試験機の上下グリップに挟んで固定した。試験片の中央部には標点間距離12.5mmのクリップゲージを輪ゴムで取り付けられた。又, 試験片中央部の両面にひずみゲージを瞬間接着剤(共和電業製CC-88A)で接着した。

図7に引張試験の計測系の概要を示す。引張試験機のロードセルとクリップゲージのアナログ電圧の測定値

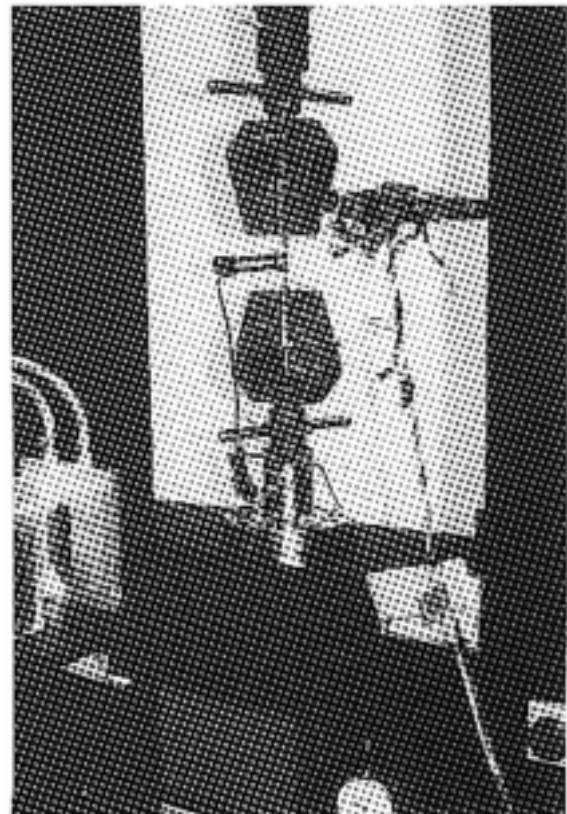


図6 引張試験状況

表3 各試験片の引張強度特性および密度

種類	引張強さ	弾性率	ポアソン比	破断伸び	密度
Ti・HIP	1071MPa	127GPa	0.27	15.1%	4.46g/cm ³
Ti・Roll	972MPa	110GPa	0.33	15.1%	4.49g/cm ³
SiC/Ti	1770MPa	205GPa	0.24	1.3%	4.09g/cm ³

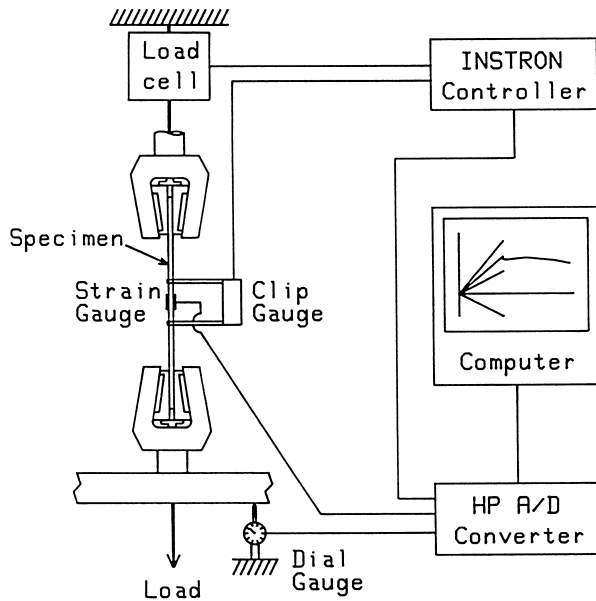


図7 引張試験の計測系の概要

は、引張試験機の制御器から A/D 変換器 (HP 3852A DATA ACQUISITION/CONTROL UNIT) を経由してデータ集積装置のパーソナルコンピュータ(以後パソコンと記述する)に入力した。又、ひずみゲージとダイヤルゲージの測定値は、A/D 変換器を経由してパソコンに入力した。引張試験の試験過程におけるロードセル、クリップゲージ、ひずみゲージ、ダイヤルゲージ等の測定値の挙動はリアルタイムでパソコン画面に表示した。

今回の引張試験では破壊まで行える試験片の数が少なかったため、引張破壊試験を行う試験片の他に、弾性範囲内の引張試験を行い弾性率とポアソン比を調べる試験片を用意した。なお、弾性範囲内の引張試験を行った試

験片は後日疲労試験を行う予定である。Ti・HIP 試験片では5枚の試験片の内3枚の試験片について引張破壊試験を行い、2枚の試験片について弾性範囲内の引張試験を行った。Ti・Roll 試験片では5枚の試験片について引張破壊試験を行った。SiC/Ti 試験片では7枚の試験片の内4枚の試験片について引張破壊試験を行い、3枚の試験片について弾性範囲内の引張試験を行った。

引張破壊試験後の試験片は光学顕微鏡(ハイロックス製 KH-2200)を用いて破断状況の巨視的観察を行った。又、走査型電子顕微鏡(エリオニクス製 ERA-8000, 以後 SEM と記述する)を用いて破面の微視的観察を行った。

4. Ti・HIP 試験片の引張試験

表4に引張試験で得られたTi・HIP 試験片の材料強度特性を示す。Ti・HIP・N1～N3の3枚の試験片は引張破壊試験を行い引張強さ、降伏応力、弾性率、ポアソン比、破断伸びを測定した。破断伸びは破壊までの伸びをクリップゲージで測定して求めた。又、Ti・HIP・N4, N5の2枚の試験片は弾性範囲内の引張試験を行い応力、伸び、弾性率、ポアソン比を測定した。

表5にTi・HIP 試験片の密度を調べた結果を示す。引張試験片の密度の計測は、試験片にタブがあるため直接計測できなかった。このため、密度は引張試験片と同じ積層の縦120mm、横120mm、厚さ1mmの衝撃試験用試験片Ti・HIP・N6～N9の4枚の試験片を用いて計測した。密度の計測は試験片の縦横をノギス、厚さをマイクロメータ、重さを電磁式秤(研精工業製)で測定した。密度を実測した結果4.46g/cm³の平均値を得た。

引張試験では(イ)クリップゲージで測定した伸びからひずみを求めた応力-ひずみ線図、(ロ)試験片の両

表4 Ti-alloy・HIP試験片の引張強度特性

試験片番号	引張強さ	降伏応力	最大負荷	弾性率	ポアソン比	破断伸び
Ti-alloy・HIP・N1	1069MPa	1040MPa	-	125GPa	0.27	15.2%
Ti-alloy・HIP・N2	1049MPa	1040MPa	-	126GPa	0.27	15.1%
Ti-alloy・HIP・N3	1096MPa	1058MPa	-	129GPa	0.27	14.9%
Ti-alloy・HIP・N4	-	-	694MPa	127GPa	0.29	-
Ti-alloy・HIP・N5	-	-	694MPa	126GPa	0.27	-
平均値	1071MPa	1046MPa	-	127GPa	0.27	-

表5 Ti-alloy・HIP試験片の密度測定

試験片番号	L × B × T = 体積 V (mm ³)	重さ (g)	密度 (g/cm ³)
Ti-alloy・HIP・N6	120.13 × 120.14 × 1.013 = 14620	65.44	4.48
Ti-alloy・HIP・N7	120.19 × 120.15 × 1.020 = 14729	65.60	4.45
Ti-alloy・HIP・N8	120.35 × 120.13 × 1.015 = 14674	65.35	4.45
Ti-alloy・HIP・N9	120.14 × 120.15 × 1.015 = 14651	65.19	4.45
密度の平均値			4.46

面に接着したひずみゲージで測定した三方向のひずみから求めた応力 - ひずみ線図, (ハ) 三方向のひずみから主ひずみを求めた応力 - 主ひずみ線図, (ニ) 応力の変化に応じた弾性率の変化を示す応力と弾性率の関係, (ホ) 応力の変化に応じたポアソン比の変化を示す応力とポアソン比の関係等について調べた。

図8にTi・HIP・N1～N3試験片の引張破壊試験におけるひずみ2%までの応力 - ひずみ線図を示す。ひずみはクリップゲージで計測した伸びから求めた。Ti・HIP・N1, N2試験片はほぼ同じ挙動であるが, ロットの異なるTi・HIP・N3試験片はやや高い弾性率となった。ひずみ2%までの応力 - ひずみ線図は, 他の種類の試験片の挙動と比較するため, 後述する他の試験片のひずみ2%までの応力 - ひずみ線図と同じスケールで示した。

図9にN1～N3試験片の破壊までの応力 - ひずみ線図を示す。縦軸は応力, 横軸はひずみである。ひずみはクリップゲージで測定した伸びから求めた。降伏応力は1040MPaである。このときのひずみは0.98%である。降伏点を越えると応力は1000MPaまで低下する。その後ひずみの増加と共に応力も増加し, ひずみ10.7%のとき最大応力1069MPaになった。

図10の(1)にN1試験片に接着したひずみゲージで測定した三方向のひずみと応力との関係である応力 - ひず

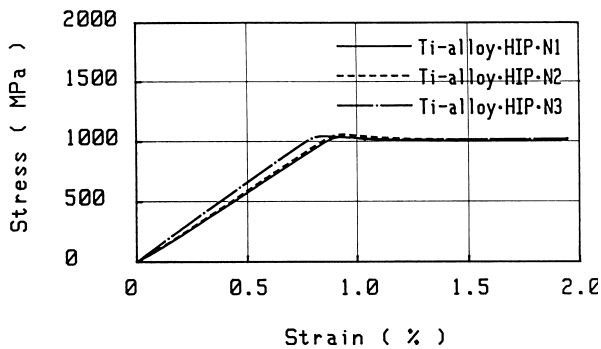


図8 Ti-alloy・HIP試験片の応力 - ひずみ曲線 (クリップゲージからひずみを求めた)

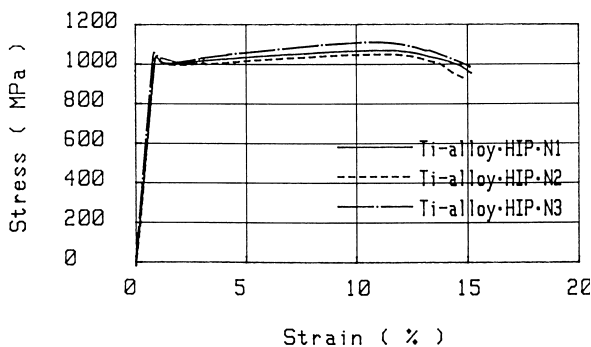


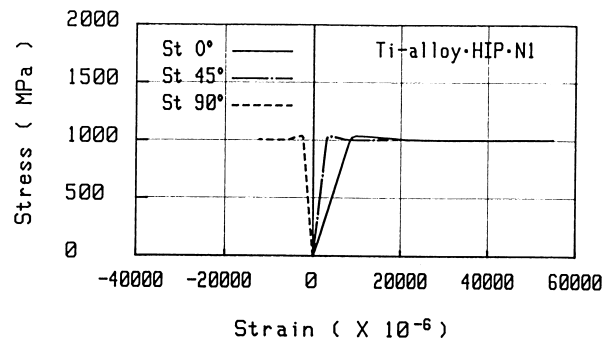
図9 Ti-alloy・HIP試験片の応力 - ひずみ曲線 (クリップゲージからひずみを求めた)

み曲線を示す。ひずみゲージは試験片の両面に接着したが, 図の表示は片側のひずみゲージの挙動だけを示した。St0°は試験片の最大主応力方向を0°方向(ひずみゲージ接着位置に影響され0°方向と最大主応力方向は厳密には一致しない)としたときの0°方向のひずみ, St45°は45°方向のひずみ, St90°は90°方向のひずみである。ひずみの計測ではSt0°の値が54900 μまで測定できた。その後, ひずみゲージが剥離して計測不能になった。又, (2)に応力 - 主ひずみ曲線を示す。なお, 最大主ひずみ₁と最小主ひずみ₂は次式で求めた。

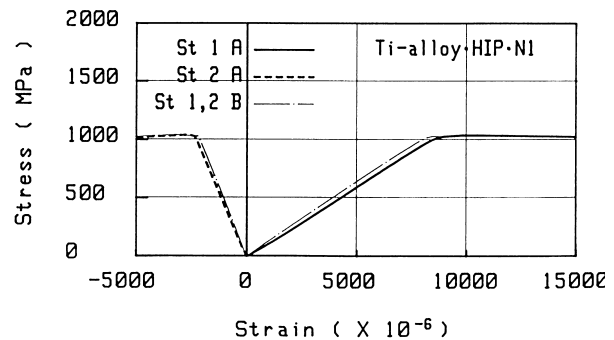
$$\epsilon_1 = 0.5 \times [St0^\circ + St90^\circ + \sqrt{2\{(St0^\circ - St45^\circ)^2 + (St45^\circ - St90^\circ)^2\}}]$$

$$\epsilon_2 = 0.5 \times [St0^\circ + St90^\circ - \sqrt{2\{(St0^\circ - St45^\circ)^2 + (St45^\circ - St90^\circ)^2\}}]$$

(2)の主ひずみの挙動を示す応力 - 主ひずみ曲線図は, 他の試験片との差異を比較するため, 他の試験片も同じスケールで示した。(2)の図は試験片の両面に接着したひずみゲージを便宜的にそれぞれAゲージ, Bゲージとしたとき, 図中のSt1AはAゲージで求めた最大主ひずみ, St2Aは最小主ひずみである。又, 図中のSt1, 2Bは線種の区別をしないが, Bゲージで求めた最大及び最小



(1) 三方向のひずみの挙動



(2) 試験片両面の主ひずみの挙動

図10 Ti-alloy・HIP・N1試験片の応力 - ひずみ曲線 (三軸ロゼットひずみゲージからひずみを求めた)

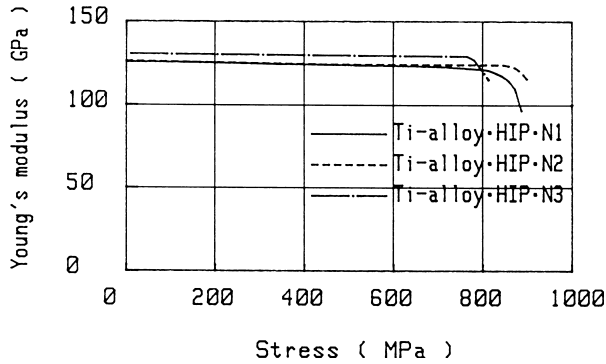


図11 Ti-alloy·HIP試験片の応力と弾性率の関係

主ひずみである。この試験片の場合、接着面が異なるひずみゲージで求めた主ひずみを比較するとAゲージで測定した主ひずみの方がやや大きい値になった。なお、(1)の図の応力と三方向のひずみの関係はAゲージで測定した値である。

図11にN1～N3試験片の応力に伴う弾性率の挙動を示す。縦軸は弾性率、横軸は応力である。図の弾性率は引張試験時にパソコンで記録した応力及びひずみの入力データから計算した。N1試験片の場合、負荷の初期から750 MPa付近まで弾性率は125 GPaでほぼ一定である。750 MPaを越えると弾性率は低くなり、800 MPa以上では急低下した。

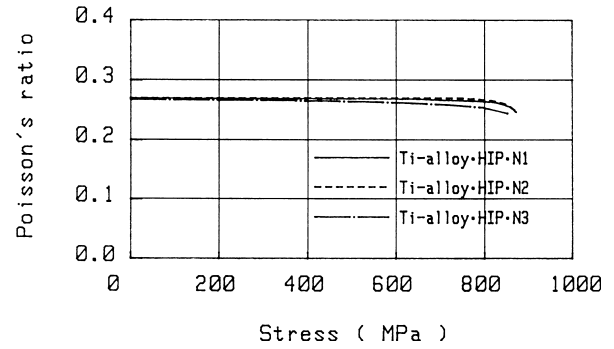
図12 Ti-alloy·HIP試験片の
応力とポアソン比の関係

図12にN1～N3試験片の応力に伴うポアソン比の挙動を示す。縦軸はポアソン比、横軸は応力である。図のポアソン比は弾性率の場合と同様に引張試験時にパソコンで記録した応力及びひずみの入力データから計算した。N1試験片の場合、負荷の初期から750 MPa付近までやや凹凸の変動があるがポアソン比は0.27である。800 MPa以上では低下した。

図13の(1),(2),(3)にTi·HIP試験片の有限要素法解析条件を示す。(1)は試験片の寸法形状である。(2)は有限要素法解析範囲である。試験片の変断面部分を4分割した実線で囲まれた範囲を解析対象とした。(3)は解析範囲の要素分割状況である。要素分割では試験片の

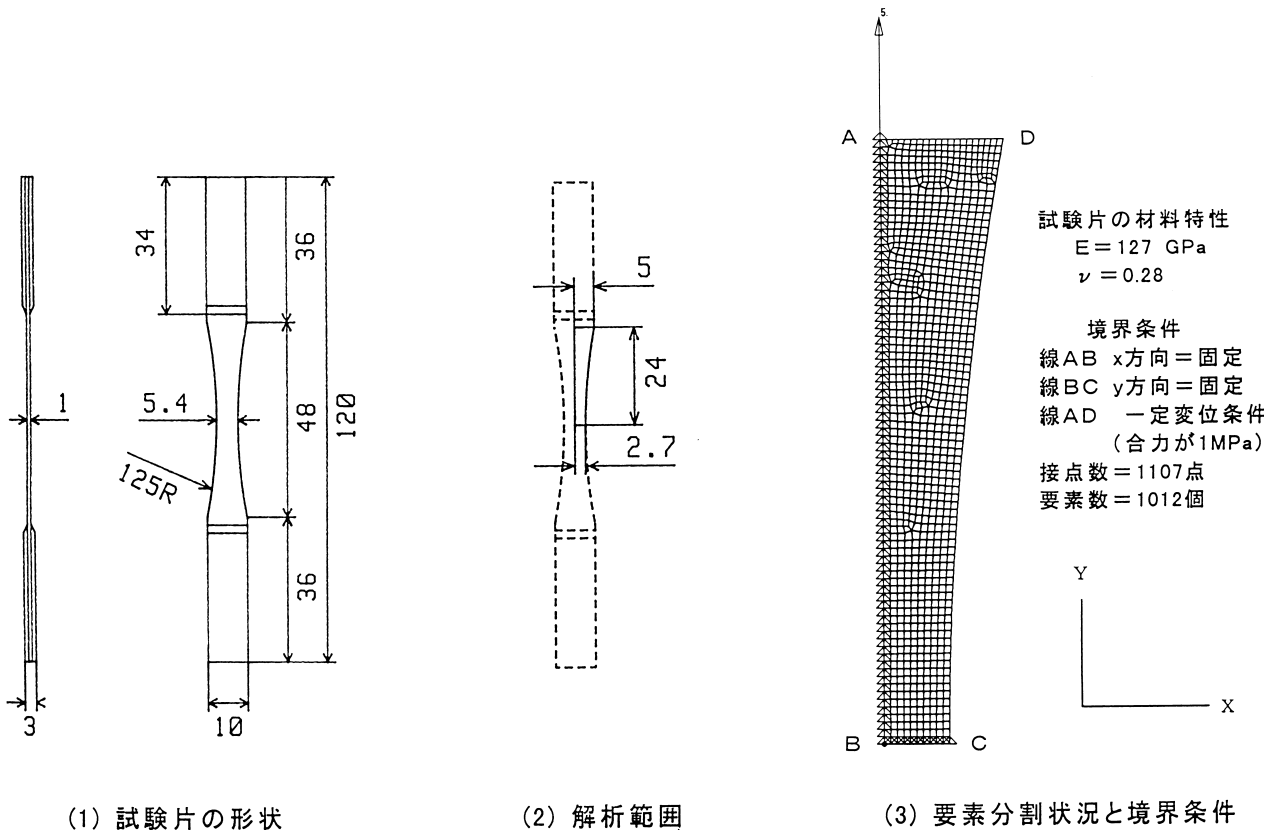
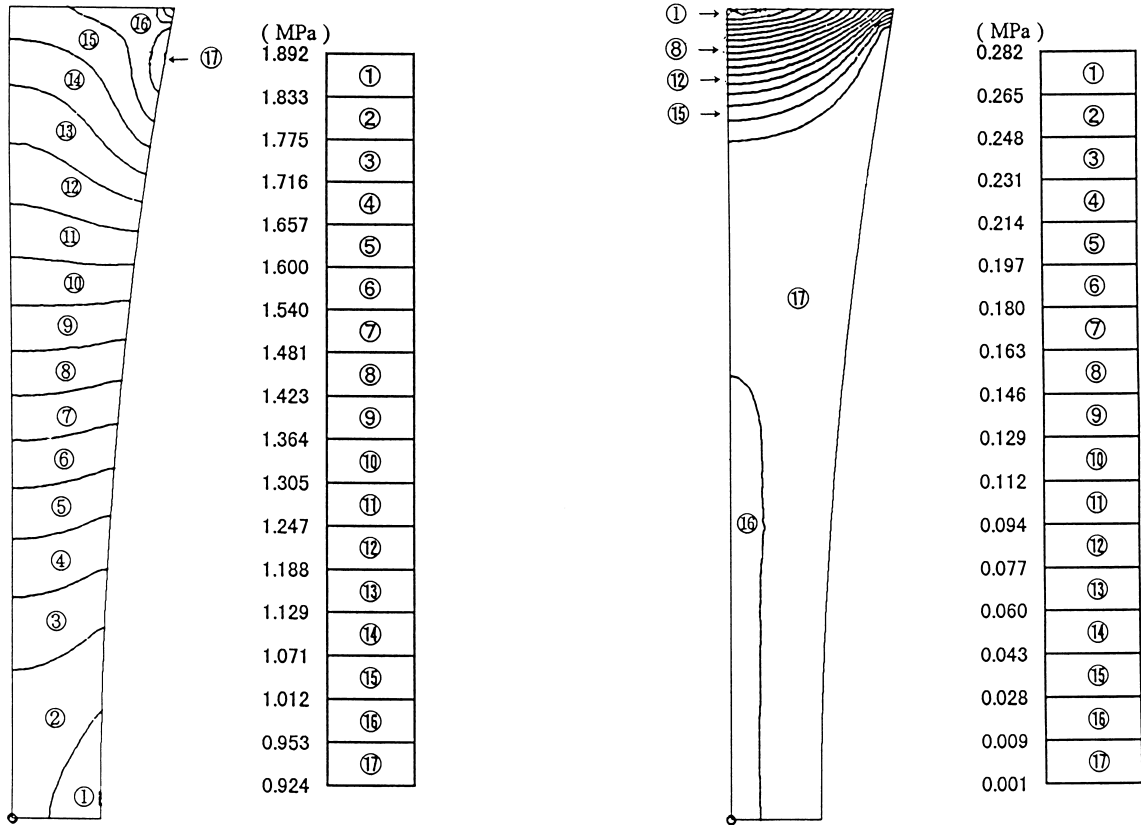


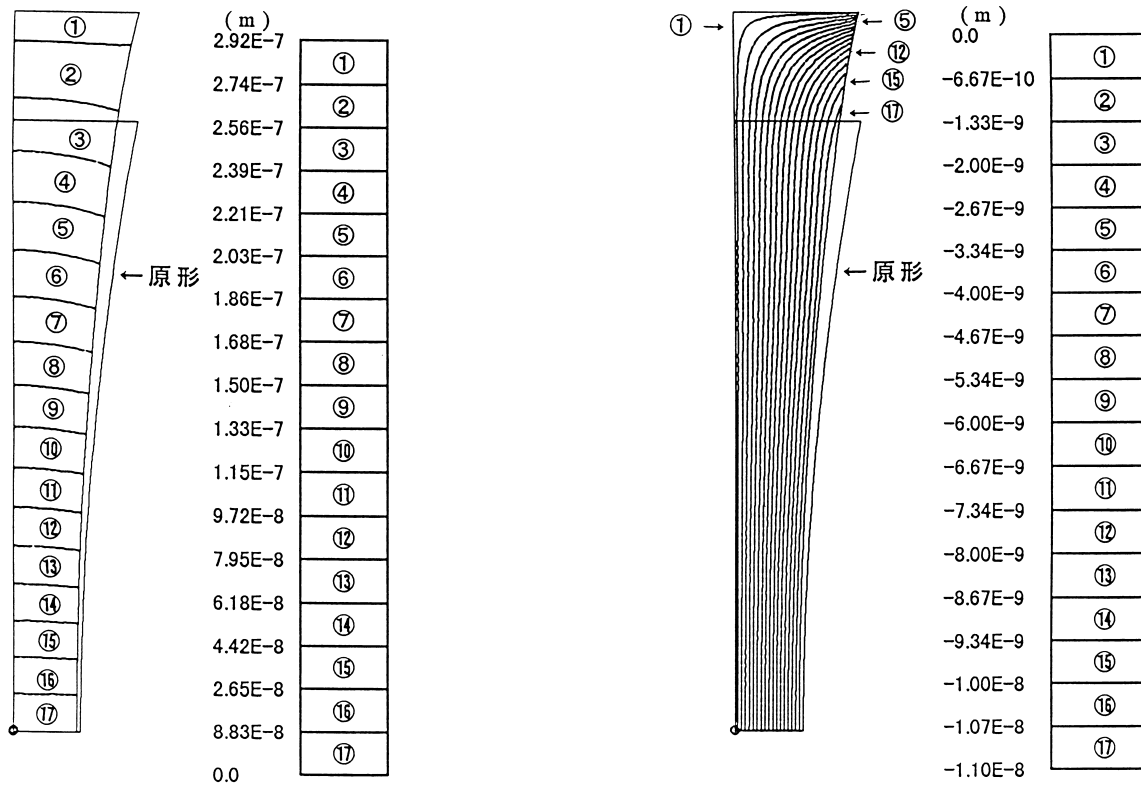
図13 Ti-alloy·HIP試験片の有限要素法解析条件



(1) Y方向応力の分布

(2) X方向応力の分布

図14 Ti-alloy・HIP試験片の応力分布解析結果



(1) Y方向変位の分布

(2) X方向変位の分布

図15 Ti-alloy・HIP試験片の変位分布解析結果

線ABに80点、線ADに22点、線BCに12点、線CDに80点与えて自動分割した。その結果、接点数1107点、要素数1012個に分割された。有限要素法解析で用いた試験片の材料特性は、引張試験で求めた平均値、弾性率127GPa、ポアソン比0.27を採用した。境界条件は線ABのX方向固定、線BCのY方向固定、線ADを一定変位条件で1MPa負荷する条件である。

図14の(1),(2)に有限要素法による応力分布の解析結果を示す。(1)はY方向応力の分布,(2)はX方向応力の分布である。左側に示した試験片の応力分布図内の丸数字は、右側応力表の丸数字に該当する応力域を示したものである。Y方向応力分布のの応力域は1.481~1.540MPaである。Y方向最大応力は図13の(3)に示した線BC上の応力域で生じ1.892MPaである。Y方向最小応力は線CD上のに生じ0.924MPaである。X方向最大応力はA点近傍ので生じ0.282MPaである。応力分布解析の結果、この試験片には応力集中部がない。引張試験では標定部で破断しており、引張用試験片として妥当な形状である。

図15の(1),(2)に有限要素法による変位分布の解析結果を示す。(1)はY方向変位の分布,(2)はX方向変位の分布である。左側に示した図は試験片の原形と変形後の変位量を拡大して示した。又、試験片の変位分布図内の丸数字は、右側変位表の丸数字に該当する変形が生じたことを示す。Y方向の場合0.168~0.186 μm の範囲の変形である。Y方向最大変位は図13の(3)に示した線AD上に0.292 μm の伸びが生じた。X方向最大変位は線DC上のに0.011 μm の縮みが生じた。

図16の(B)にTi・HIP・N3試験片の引張破壊状況を示す。(A)は引張試験前のN5試験片である。N3試

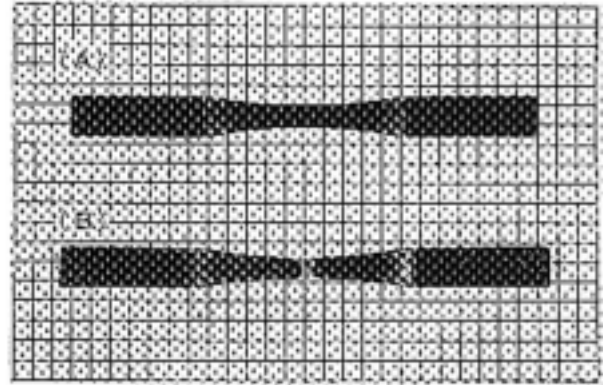


図16 Ti-alloy・HIP・N3試験片の引張破壊状況

験片は中央部で破壊した。なお、破壊までの試験を行ったN1,N2試験片もN3試験片と同様に中央部で破壊した。

図17に光学顕微鏡で観察したTi・HIP試験片の引張破壊状況を示す。(1)はN1試験片,(2)はN2試験片,(3)はN3試験片である。破断部付近は延性材料特有のネッキングが生じてくびれている。破壊状況はN1,N2試験片の一部を除いて大部分が厚さ方向に斜めにせん断破壊した。これは、後述のTi・Roll試験片の幅方向に斜めにせん断破壊した状況と異なる。Ti・HIP試験片の場合、Ti合金箔を積層して成形されているため、厚さ方向に斜めにせん断破壊したのは、Ti合金箔の積層が完全には均質化されず、すべりが生じやすくなったためと考えられる。

図18にSEM観察したN1試験片の引張破面状況を示す。(A)は図17の(1)の上側にある試験片の破面である。(B),(C),(D)は(A)の一部を拡大したもので(B),(C),(D)の順に倍率が高い。厚さ方向に斜めに

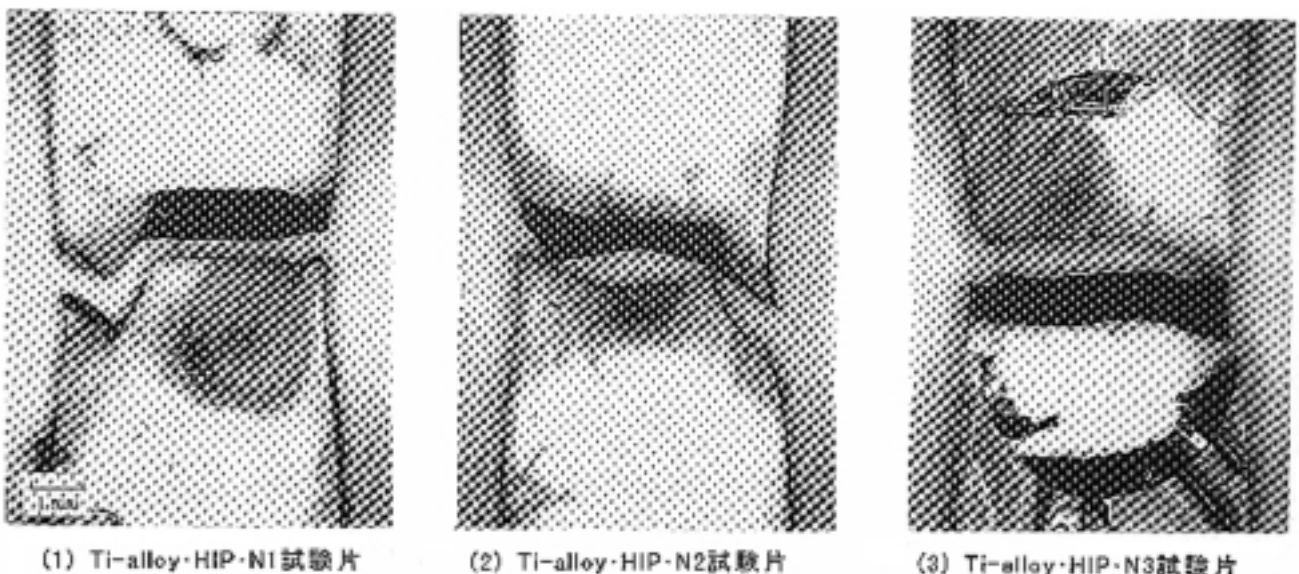


図17 Ti-alloy・HIP試験片の引張破壊状況

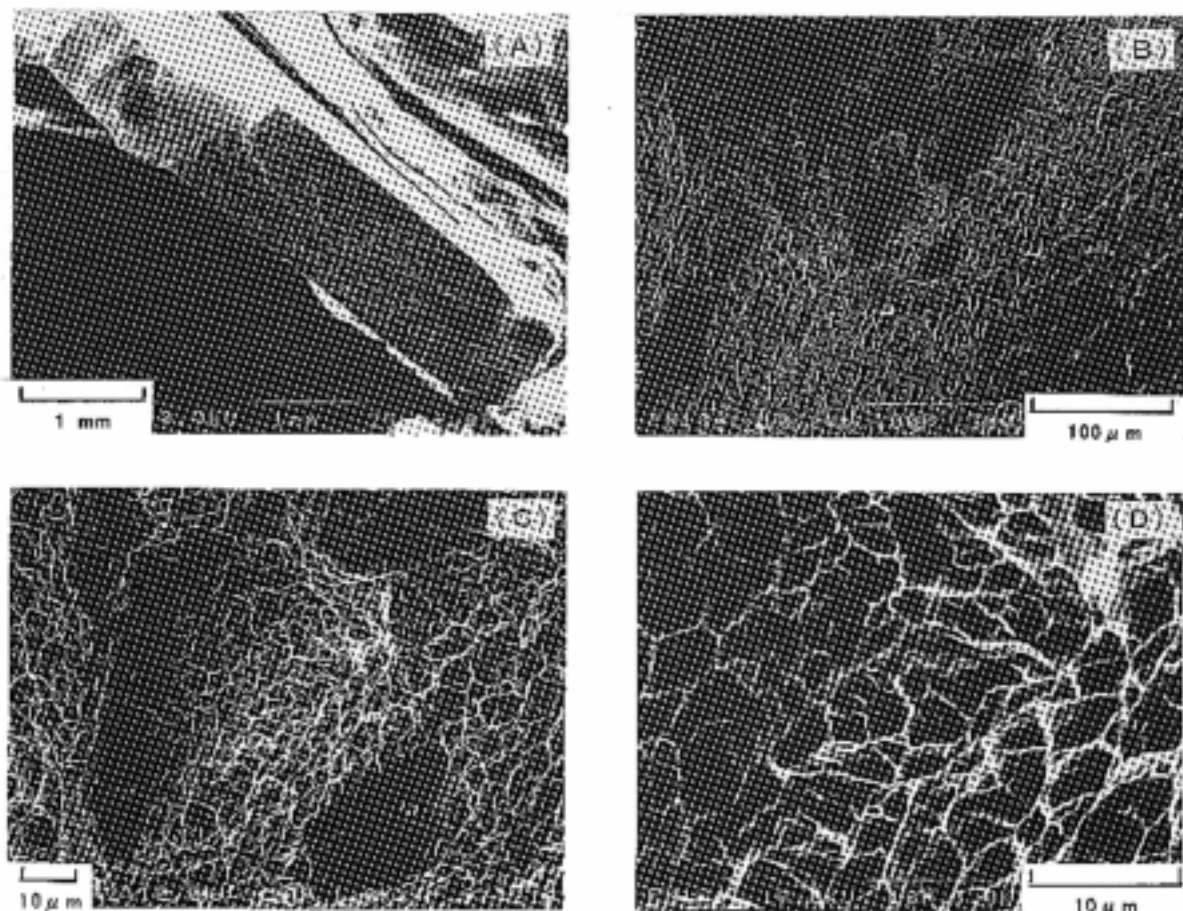


図18 Ti・HIP・N1試験片破面のSEM観察

破壊した破面には、(A)破面の約2/3の右側部分に示すように、幅方向と平行に細かい白色のすべり面分離が見える。なお、破面の大部分は(C)、(D)に示すように、微小空洞の成長と合体による引き裂き破壊で生じるディンプル破面であるが、一部に微小空洞が形成されずにせん断分離によって表面積だけが增加するすべり面分離が

観察できる。

5 .Ti・Roll 試験片の引張試験

表6に引張試験で得られたTi・Roll試験片の材料強度特性を示す。Ti・Roll・N1～N5の5枚の試験片について破壊までの引張試験を行い引張強さ、降伏応力、弾性

表6 Ti-alloy・Roll試験片の引張強度特性

試験片番号	引張強さ	降伏応力	弾性率	ポアソン比	破断伸び
Ti-alloy・Roll・N1	982MPa	932MPa	112GPa	0.33	15.2%
Ti-alloy・Roll・N2	977MPa	917MPa	112GPa	0.32	15.1%
Ti-alloy・Roll・N3	988MPa	917MPa	112GPa	0.32	15.0%
Ti-alloy・Roll・N4	947MPa	880MPa	109GPa	0.33	15.1%
Ti-alloy・Roll・N5	966MPa	908MPa	109GPa	0.33	15.1%
平均値	972MPa	911MPa	110GPa	0.33	-

表7 Ti-alloy・Roll試験片の密度測定

試験片番号	L × B × T = 体積V (mm ³)	重さ (g)	密度 (g/cm ³)
Ti-Roll-N6	119.70 × 120.53 × 0.980 = 14139	63.41	4.48
Ti-Roll-N7	119.63 × 119.78 × 0.988 = 14157	64.13	4.53
Ti-Roll-N8	119.80 × 120.40 × 0.989 = 14265	63.93	4.48
Ti-Roll-N9	119.58 × 120.00 × 0.994 = 14263	64.08	4.49
密度の平均値			4.49

率, ポアソン比, 破断伸びを測定した。

表 7 に Ti・Roll 試験片の密度を調べた結果を示す。密度は 4 枚の縦 120mm, 横 120mm, 厚さ 1 mm の衝撃試験用 Ti・Roll・N6 ~ N9 試験片についてノギス, マイクロメータ, 電磁式秤を用いて計測した。密度を実測した結果 4.49g/cm^3 の平均値を得た。

図 19 に Ti・Roll・N1 ~ N5 試験片のひずみ 2% までの応力 - ひずみ曲線を示す。ひずみはクリップゲージで計測した伸びから求めた。応力 - ひずみ曲線は各試験片ともほぼ同様な挙動を示している。

図 20 に N1 ~ N5 試験片の引張破壊までの応力 - ひずみ曲線を示す。ひずみはクリップゲージで測定した伸びから求めた。Ti・Roll 試験片は Ti・HIP 試験片のような降伏点後の明瞭な応力低下は生じない。N1 試験片の場合, 降伏応力は 932MPa である。引張強さは 982MPa であり, Ti・HIP 試験片の引張強さ 1069MPa に比べ約 8% 低い。

図 21 の (1), (2) に N1 試験片の三軸口ゼットひずみゲージで計測したひずみの挙動から求めた応力 - ひずみ曲線を示す。図の表示方法は図 10 の (1), (2) と同じである。図 21 の (1) は試験片の A 面に接着したひずみゲージで測定した $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の三方向のひずみの挙動である。ひずみの計測では St_{0° の値が $45000\ \mu$ まで

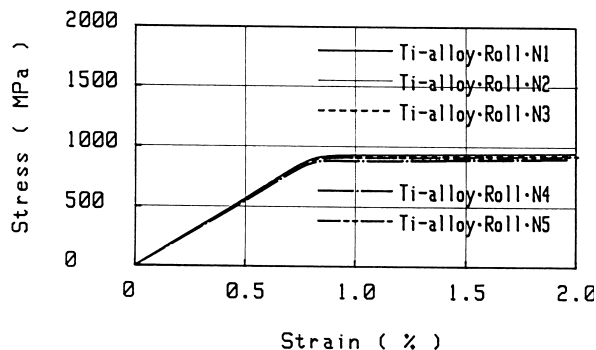


図19 Ti-alloy-Roll試験片の応力 - ひずみ曲線 (クリップゲージからひずみを求めた)

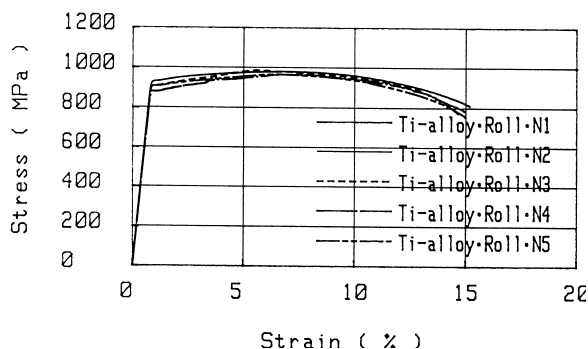
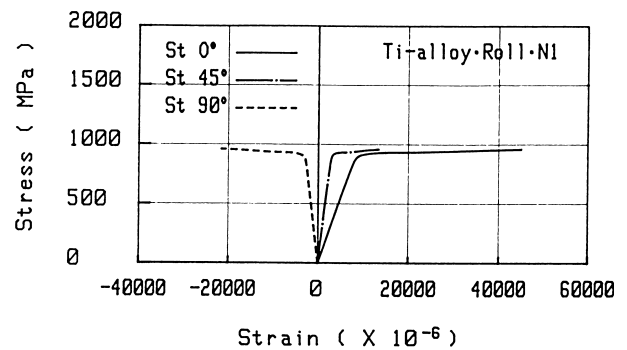


図20 Ti-alloy-Roll試験片の応力 - ひずみ曲線 (クリップゲージからひずみを求めた)

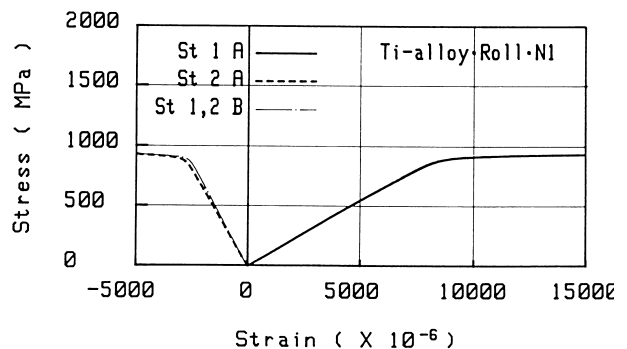
測定できた。その後ひずみゲージが剥離して計測不能になった。図 21 の (2) は試験片の A, B 両面に接着したひずみゲージで計測したひずみから求めた主ひずみの挙動を示した。主ひずみの挙動は A, B 両面ともほぼ同じである。

図 22 に N1 ~ N5 試験片の応力に伴う弾性率の挙動を示す。弾性率を求める方法及び図の表示方法は図 11 の場合と同じである。N1 試験片の場合, 弾性率は負荷の初期から 350MPa の負荷まで $110\ \text{GPa}$ でほぼ一定であるが, 350 MPa を越えると弾性率は低下した。

図 23 に N1 ~ N5 試験片の応力に伴うポアソン比の挙動を示す。



(1) 三方向のひずみの挙動



(2) 試験片両面の主ひずみの挙動

図21 Ti-alloy-Roll・N1試験片の応力 - ひずみ曲線 (三軸口ゼットひずみゲージからひずみを求めた)

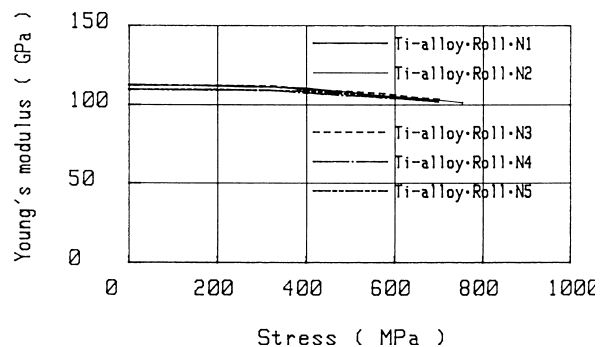


図22 Ti-alloy-Roll試験片の応力と弾性率の関係

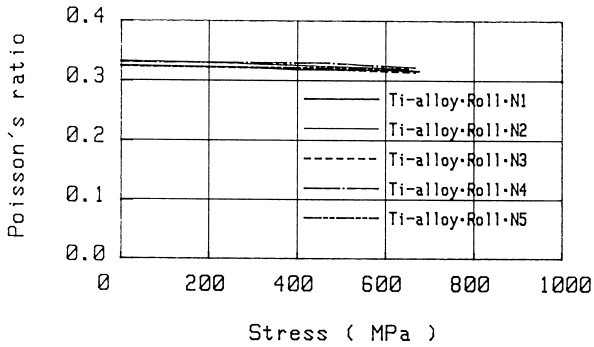


図23 Ti-alloy-Roll試験片の
応力とポアソン比の関係

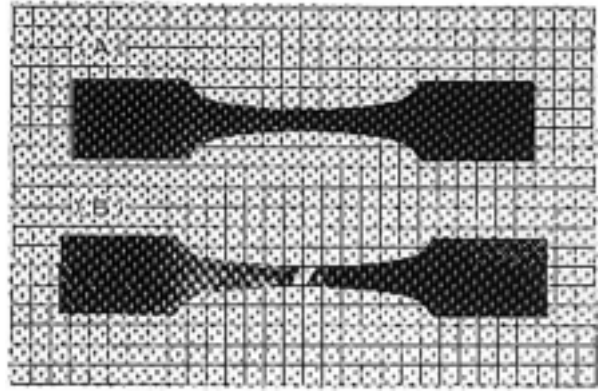


図24 Ti-alloy-Roll-N3試験片の引張破壊状況

動を示す。ポアソン比を求める方法及び図の表示方法は、図12の場合と同じである。N1試験片の場合、ポアソン比の挙動は、負荷の初期の0.333から応力380MPaの0.327まで直線的に傾斜しており、この区間の平均値0.33をこの試験片のポアソン比とした。なお、応力380MPaを越えるとポアソン比は低くなった。

図24の(B)にTi-Roll-N3試験片の引張破壊状況を示す。(A)は引張試験前のN5試験片である。N3試験片の破壊は中央部で生じており、幅方向に斜めに破断した。なお、N1、N2、N4、N5試験片もN3試験片と同様に中央部で破壊した。

図25と図26に光学顕微鏡で観察したTi-Roll試験片の引張破壊状況を示す。図25の(1)はN1試験片、(2)はN2試験片、(3)はN3試験片である。又、図26の(4)はN4試験片、(5)はN5試験片である。各試験片の破断部付近は延性材料特有のネッキングが生じてくびれている。引張破壊状況を見るとN1、N2、N4、N5試験片

の幅方向の中央付近は、最大主応力方向に対し直角方向に破壊しているが、中央付近を外れると幅方向に斜めにせん断破壊した。

図27にSEM観察したN1試験片の引張破面状況を示す。(A)は図25の(1)に示した試験片の下側破面である。(B)は(A)の試験片右側端部を含む拡大破面である。左側が試験片の中央部寄り、右側が試験片端部である。(C)は(B)の右側中央部の拡大破面である。(D)は(C)の右側中央部の拡大破面である。(B)、(C)で示すように、破面の随所に試験片の厚さ方向にすべり面分離が生じている。破面の状況は、(C)に示すように大部分がディンプル破面であるが、ディンプル破面と厚さ方向のすべり面分離が混在している。なお、前述したようにTi-HIP試験片の破面は、ディンプル破面と幅方向のすべり面分離が混在していた。このような厚さ方向及び幅方向のすべり面方向の差異は、製造方法の違いによる影響と考えられる。



(1) Ti-alloy-Roll-N1試験片

(2) Ti-alloy-Roll-N2試験片

(3) Ti-alloy-Roll-N3試験片

図25 Ti-alloy-Roll試験片の引張破壊状況

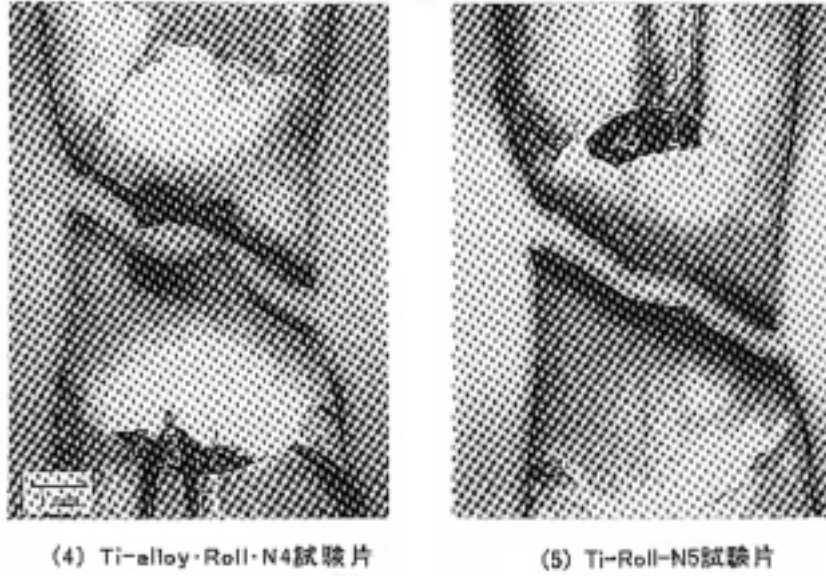


図26 Ti-alloy-Roll試験片の引張破壊状況

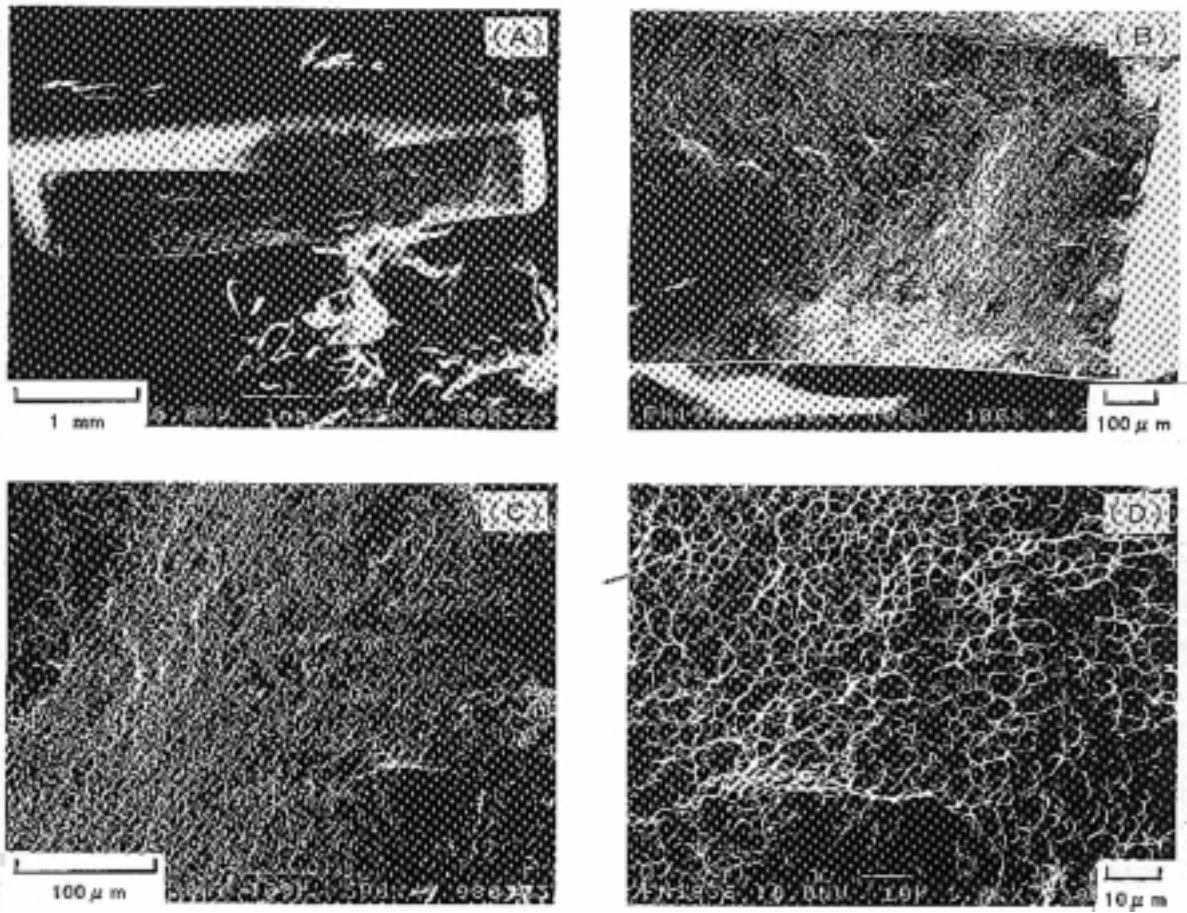


図27 Ti-Roll-N1試験片破面のSEM観察

6 . SiC/Ti 試験片の引張試験

SiC/Ti 試験片はHIP 成形した外形寸法 120mm × 120mm の複合材料板から採取した。このHIP 成形板には残留応力及び繊維配列の乱れ等の影響で変形が生じていた。このため、SiC/Ti 試験片には図28に示すような反りによる曲がりが生じた。図は5 mm 間隔で升目を描いた紙の上に曲がりの大きい試験片の順に並べて撮影した試験片の状態を示した図である。

表8に引張試験で得られたSiC/Ti 試験片の引張強度特性を示す。引張試験では基礎荷重を負荷しないで試験を行ったものと、基礎荷重0.5KNを負荷して反りによる曲がりを矯正した後試験を行ったものがある。SiC/Ti・N1, N2 試験片は基礎荷重なし、SiC/Ti・N3 ~ N7 試験片は基礎荷重を負荷して引張試験を行った。 SiC/Ti・N1 ~ N4 の4枚の試験片は引張破壊試験を行い引張強さ、knee 点、破断伸びを測定した。なお、SiC/Ti・

N3, N4 試験片は弾性率、ポアソン比も測定した。SiC/Ti・N5 試験片はマトリックスが弾性限度付近の負荷になるまで引張試験を行い応力、弾性率、ポアソン比を測定した。又、SiC/Ti・N6, N7 試験片はマトリックスが弾性範囲内の引張試験を行い応力、弾性率、ポアソン比を測定した。なお、SiC/Ti・N5 ~ N7 試験片は後日の疲労試験を予定している。

表9にSiC/Ti 試験片の密度を調べた結果を示す。密度は縦120mm, 横120mm, 厚さ1mmの衝撃試験用試験片SiC/Ti・N8 ~ N11の4枚の試験片についてノギス、マイクロメータ、電磁式秤を用いて計測した。密度を実測した結果4.09 g/cm³の平均値を得た。

図29にSiC/Ti・N1 ~ N4 試験片の破壊までの応力 - ひずみ曲線を示す。SiC/Ti 試験片の応力 - ひずみ曲線には、直線の折れ曲がりによるknee 点が生じる。knee 点が生じるのは複合材料の破断前に強化繊維が破壊する場合、又は、マトリックスが塑性域に達した場合が考え

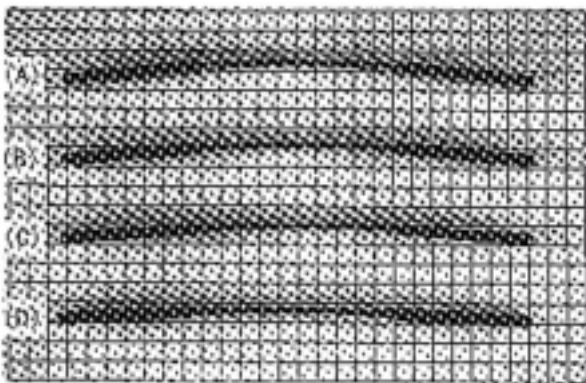


図28 SiC/Ti 試験片の側面変形状況

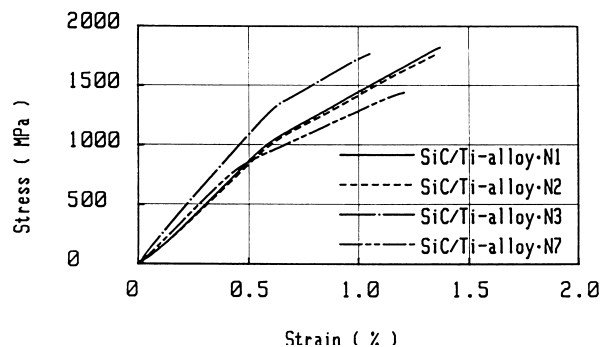


図29 SiC/Ti 試験片の応力 - ひずみ曲線 (クリップゲージからひずみを求めた)

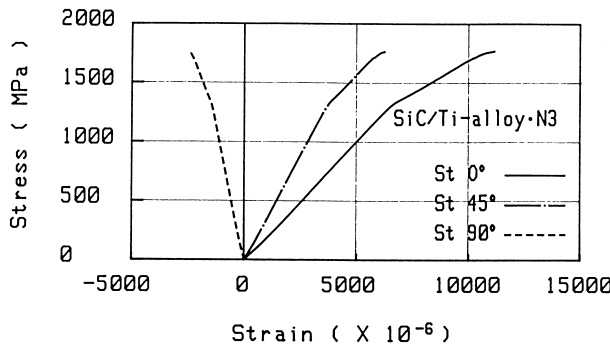
表8 SiC/Ti試験片の引張強度特性

試験片番号	引張強さ	Knee点	最大負荷	弾性率	ポアソン比	破断伸び
SiC/Ti-N1	1820MPa	1010MPa	-	-	-	1.37%
SiC/Ti-N2	1720MPa	1030MPa	-	-	-	1.35%
SiC/Ti-N3	1770MPa	1280MPa	-	207GPa	0.24	1.08%
SiC/Ti-N4	1450MPa	826MPa	-	197GPa	0.25	1.26%
SiC/Ti-N5	-	-	1210MPa	214GPa	0.24	-
SiC/Ti-N6	-	-	905MPa	199GPa	0.24	-
SiC/Ti-N7	-	-	860MPa	206GPa	0.24	-
平均値				205GPa	0.24	-

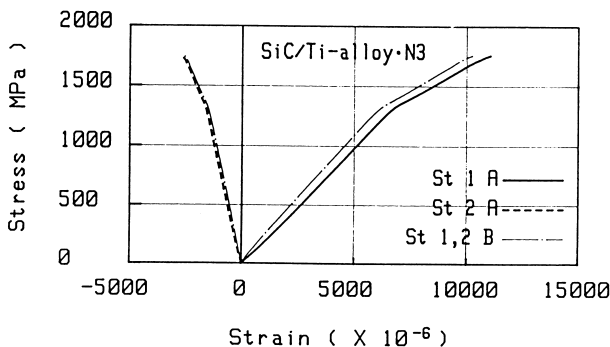
表9 SiC/Ti 試験片の密度測定

試験片番号	L × B × T = 体積 V (mm ³)	重さ (g)	密度 (g/cm ³)
SiC/Ti-N8	120.12 × 119.98 × 1.018 = 14671	60.11	4.10
SiC/Ti-N9	120.22 × 120.00 × 0.996 = 14368	60.15	4.19
SiC/Ti-N10	120.13 × 120.08 × 1.015 = 14641	58.32	4.98
SiC/Ti-N11	120.17 × 120.06 × 1.026 = 14803	60.86	4.11
密度の平均値			4.09

られる。連続繊維で強化した複合材料の場合、マトリックスの弾性限度までと塑性域まで変形したときでは次に示すように弾性係数が異なる。マトリックスが弾性限度までの場合、繊維方向に引張力が働いたときの繊維方向の弾性係数 E は、 $E = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$ で定義される。又、マトリックスが塑性域まで変形したときの弾性係数 E は、 $E = E_f V_f + (d_m / d_m) V_m$ で定義される⁽⁶⁾。式中の V は体積含有率である。添字の f, m はそれぞれ繊維、マトリックスを示す。なお、図 29 に示す SiC/Ti 複合材料の knee 点は図 10 の (2) に示すマトリックス材料の Ti・HIP 試験片の塑性域に達する前に生じている。HIP 成形複合材料は高温で成形されるため、引張残留応力がマトリックス内に生じる。このためマトリックス単独の場合より小さなひずみで塑性変形が生じるといふ報告がある⁽⁷⁾。図の場合、全ての試験片が knee 点から破壊まで直線的かつ、この配もほぼ等しい挙動を示すことから、knee 点は強化繊維の損傷による影響ではなくマトリックスが塑性域になったため生じたと考えられる。基礎荷重を負荷しない SiC/Ti・N1, N2 試験片は、HIP 成形時の残留応力等で生じた反りによる曲がりの影響で 130MPa までの低い負荷ではこの配の緩い傾斜になった。SiC/Ti・N3, N4 試験片は基礎荷重を負荷して試験片の反りによる曲がりを矯正したため、



(1) 三方向のひずみの挙動



(2) 試験片両面の主ひずみの挙動

図30 SiC/Ti・N3試験片の応力 - ひずみ曲線
(三軸ロゼットひずみゲージから求めた)

負荷の初期から knee 点まで直線的な挙動を示した。SiC/Ti 試験片の応力 - ひずみ曲線は、他の種類の試験片の場合(図 8, 図 19)に比べ各試験片の違いが大きい。この原因は、図 35 に示すように繊維配向の偏り等、各試験片が同一に製作されていないためと考えられる。

図 30 の (1), (2) に N3 試験片に接着したひずみゲージで測定したひずみの挙動から求めた応力 - ひずみ曲線を示す。(1) は試験片の A 面に接着したひずみゲージで測定した $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の三方向のひずみの挙動である。(2) は試験片の A, B 両面に接着したひずみゲージで測定したひずみから求めた主ひずみの挙動を示した。図の表示方法は図 10 の (1), (2) と同じである。主ひずみの挙動は A 面と B 面ではやや違いがあった。なお、N3 試験片の knee 点は 1280MPa である。

図 31 に N3 ~ N6 試験片の応力に伴う弾性率の挙動を示す。弾性率を求める方法及び図の表示方法は図 11 の場合と同じである。N3 試験片の場合、弾性率の挙動は低い負荷から 650MPa までは弾性率 207GPa でほぼ一定であり、knee 点を挟む 1000 ~ 1350MPa で急激に低下する。1400MPa を超えると弾性率 112GPa で安定し、ほぼマトリックス材の弾性率と同等の値になった。

図 32 に N3 ~ N6 試験片の応力に伴うポアソン比の挙動を示す。ポアソン比を求める方法及び図の表示方法は図 12 の場合と同じである。N3 試験片の場合、ポアソン

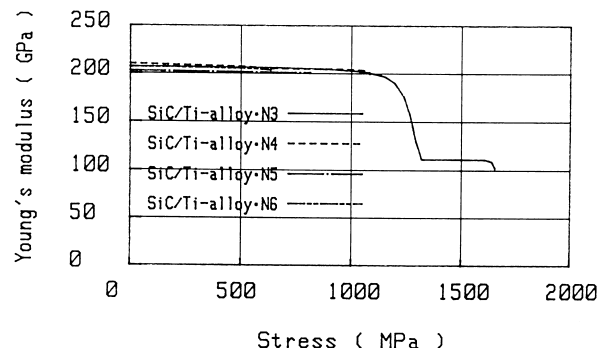


図31 SiC/Ti 試験片の応力と弾性率の関係

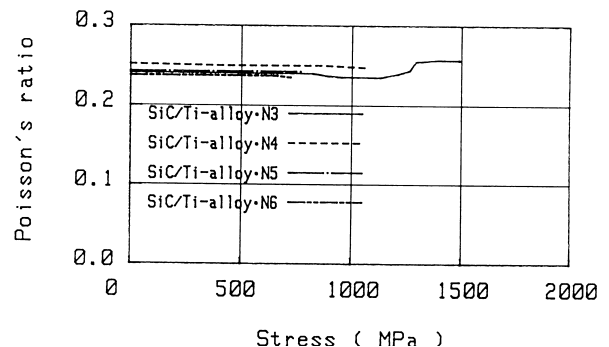


図32 SiC/Ti 試験片の応力とポアソン比の関係

比は応力 1000MPa までは約 0.24 とほぼ一定の値になるが、1000 MPa を超えると高くなった。

図 33 の (B) に SiC/Ti・N3 試験片の引張破壊状況を示す。(A) は引張試験前の N5 試験片である。N3 試験片は中央部よりやや右側で破壊した。引張試験で破壊した N1, N2, N4 試験片も中央部よりややずれた位置で破壊した。なお、前述の均質材料である Ti 合金試験片の場合には試験片の中央部で破壊した。

図 34 に光学顕微鏡で観察した SiC/Ti 試験片の引張破

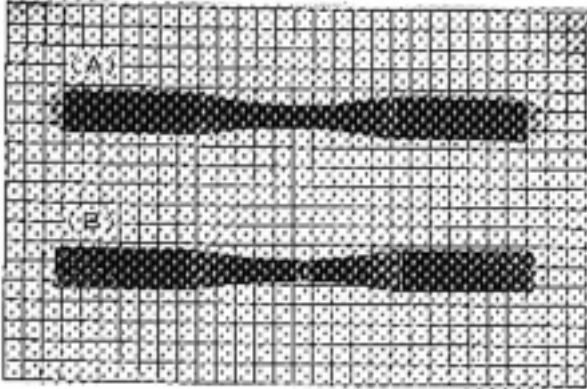
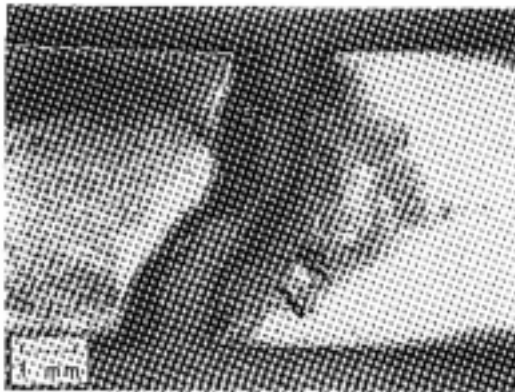


図 33 SiC/Ti・N3 試験片の引張破壊状況

壊状況を示す。(1) は N1 試験片, (2) は N2 試験片, (3) は N3 試験片, (4) は N4 試験片である。N4 試験片は HIP 成形時の残留応力の影響で反りによる曲がりのため破断部の表面に SiC 繊維が露出していた。各試験片の破断部の状況は、多数の SiC 繊維が引き抜けて露出している。破断形状は 4 枚の試験片それぞれ異なっている。複合材料の破壊は繊維の破壊と密接に関係し、マトリックスの破壊部位は繊維の破壊部位に影響されるため、繊維破壊位置によって多様な破壊状況になったと考えられる。なお、Ti 合金試験片の場合には図 17, 図 25 及び図 26 に示すように、同種の試験片では同様な破壊状況を示していた。

図 35 に SEM 観察した SiC/Ti 試験片の引張破面状況を示す。(1) は N1 試験片, (2) は N2 試験片, (3) は N3 試験片, (4) は N4 試験片である。試験片破面内の繊維分布を調べるため破面の上から撮影した。N1 試験片は外側のマトリックスの厚みに違いがあった。図の上側が薄く、下側は 3 倍程度の厚みになっている。N2, N3 試験片の外側マトリックスの厚みは均等であり繊維は適切な分布になっていた。N4 試験片は図の下側のマトリックスが厚く、上側は繊維が露出しており表面部の繊維



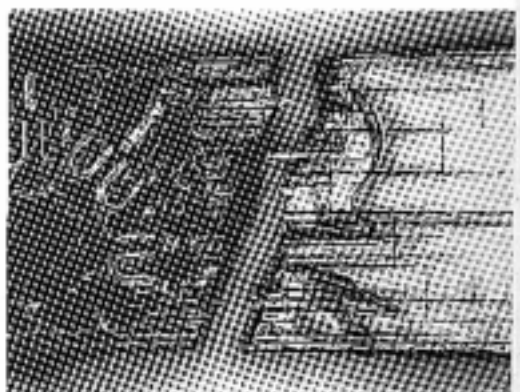
(1) SiC/Ti・N1 試験片



(2) SiC/Ti・N2 試験片



(3) SiC/Ti・N3 試験片



(4) SiC/Ti・N4 試験片

図 34 SiC/Ti 試験片の引張破壊状況

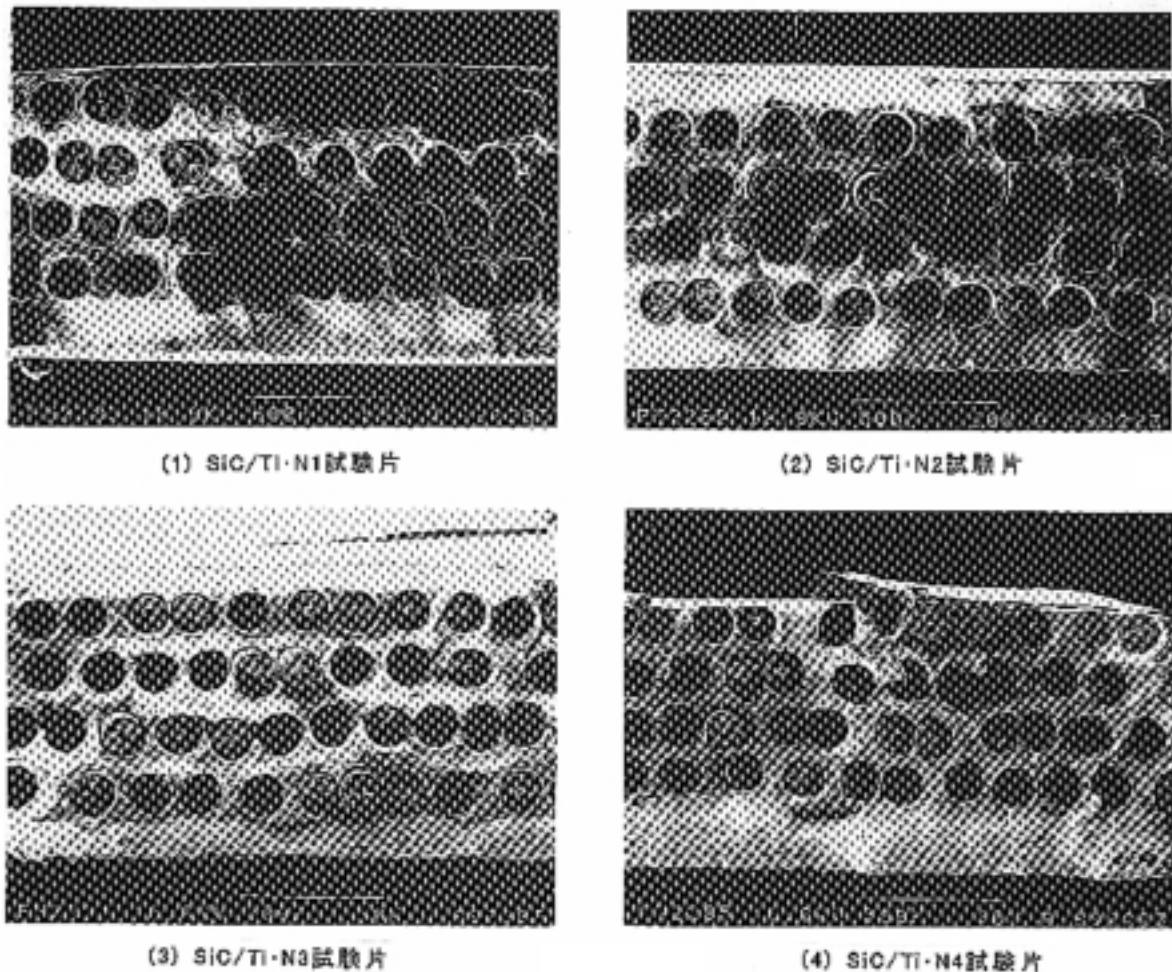


図35 SiC/Ti 試験片破面のSEM観察

に損傷が生じていた。複合材料試験片の外側マトリックスに厚みの違いがあるのは、試験片を採取したHIP成形板に反りが生じており、試験片標定部を切削加工した際に生じた。なお、HIP成形板の反りは、残留応力及び繊維配列に乱れ等、製造要因の影響で生じたと考えられる。各試験片の引張強度は表8、図29に示すように試験片表面に繊維が露出していない3種類の試験片の場合引張強さはほぼ等しいが、繊維が露出しているSiC/Ti・N4試験片の引張強さは約18%低下した。

図36に斜めからSEM観察したN1試験片の引張破面状況を示す。(A)は破断面の全面、(B)は左側端部を含む拡大破断面、(C)はSiC繊維の引き抜けが生じた部位の拡大破断面、(D)は引き抜けたSiC繊維である。破断面(A)、(B)、(C)を観察すると、繊維とマトリックスの界面は剥離しており、引き抜けた繊維や繊維が引き抜かれた穴がある。破断した繊維の位置は様々で破面は様な面ではない。又、(D)を観察すると、SiC繊維の破面及び芯線のカーボン繊維の破面は、脆性材料特有の塑性変形をともなわないへき開面に沿った引張分離で生じるへき開破面である。マトリックスの破面はディンプル

破面が大部分である。SiC/Ti試験片のディンプル破面は、Ti合金試験片のディンプル破面に比べ、凹部の溝が浅い特徴がある。これは、SiC/Ti試験片の破壊が伸びが少ない状態で破断したためと考えられる。SiC繊維の表面には表皮が剥離しているのが観察できる。繊維表面は滑らかであるが、表面の表皮が剥離した繊維面には微小な凹凸が見られる。SiC繊維の表面にはマトリックスとの濡れ性を高めるためにコーティング層があり、剥離した表皮はSiC繊維表面のコーティング層と考えられる。又、SiC繊維とカーボン芯線の界面も剥離しカーボン芯線が抜き出ている。カーボン芯線の表皮も剥離しており、この表皮はカーボン芯線のコーティング層と考えられる。各繊維の破断位置が異なり繊維の引き抜け等もある破壊状況から推定すると、引張試験においてSiC/Ti試験片の繊維強度は充分発揮されたと考えられる。

7. あとがき

SiC/Ti複合材料のマトリックスであるTi合金についてHIP成形及び圧延成形等成形方法が異なるTi合金の引張強度特性に関するデータを収集した。HIP成形Ti合

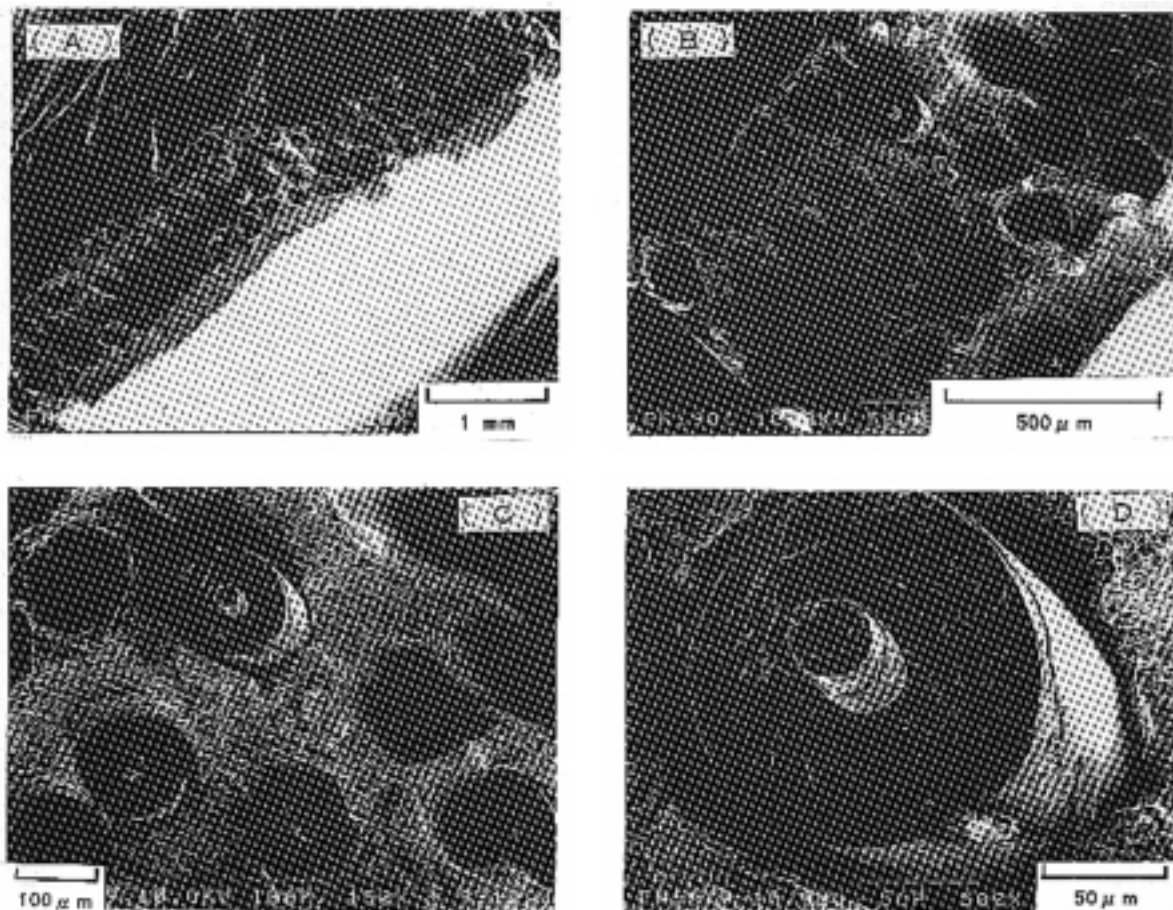


図36 SiC/Ti・N1試験片破面のSEM観察

金の引張試験の結果，材料特性の平均値は引張強さ 1070MPa，弾性率 127GPa，密度 4.46g/cm³ の結果を得た。圧延成形 Ti 合金の引張試験の結果，材料特性の平均値は引張強さ 972MPa，弾性率 110GPa，密度 4.49g/cm³ の結果を得た。HIP 成形及び圧延成形 Ti 合金の破壊までのひずみを調べたが，破断伸びは両者とも約 15% でほぼ等しいが，応力 - ひずみ線図の挙動は著しく異なった。又，ファン動翼の材料として適用が期待されている SiC 繊維で強化した Ti 合金複合材料の引張強度特性に関するデータを収集した。引張試験で用いた SiC/Ti 試験片は，HIP 成形時の残留応力及び繊維配列の乱れ等の影響で，反りによる曲がりが生じた試験片である。SiC/Ti 試験片の材料特性の平均値は引張強さ 1770MPa で Ti 合金マトリックス材に比べ 1.65 倍高い。弾性率は 203GPa で Ti 合金マトリックス材に比べ 1.6 倍高い。密度は 4.09g/cm³ で Ti 合金マトリックス材の 92% である。破断伸びは 1.4% で Ti 合金マトリックス材の 9.5% である。この試験片では強化繊維の配列及び残留応力の軽減等改良すべき製造上の問題点があることがわかった。

本報では，Ti 合金及び SiC/Ti 複合材料の基礎的な材料特性である引張強度特性について述べた。なお，エン

ジン材料構造研究室では SiC/Ti 複合材料をファン動翼に適用するための実証試験である耐衝撃特性を調べるため，打ち抜き衝撃試験及び衝撃試験を模擬した静的押し込み試験等も行われている。今後，これらの試験結果についても報告する予定である。

参考文献

- (1) 藤原力：金属および金属管化合物基複合材料の課題と今後の展開，日本金属学会シンポジウム，複合材料の新展開，(1997)，P.13-16
- (2) 中谷浩，他 5 名：チタン基複合材料の航空機エンジン部品への適用技術の研究，川崎重工技報，129 号，(1997)，P.8-13
- (3) 小河昭紀，橋本良作，藤原力：SiC/Ti 複合材料の衝撃試験，日本機械学会材料力学講演会講演論文集 A，(1991)，P.369-371
- (4) 橋本良作，小河昭紀，藤原力：SiC/Ti 複合材料の衝撃試験（第 2 報，繊維含有率の影響について），日本機械学会 68 期通常総会機論 A (1991)，P.174-176
- (5) MATERIALS PROPERTIES HANDBOOK：Tita-

nium Alloys , ASM

- (6) 日本機械学会編, 技術資料, 金属材料の弾性係数
- (7) 岡崎正和, 他 2 名: SiC連続繊維強化Ti-24Al-11Nb
基複合材料の安定き裂成長過程, 「材料」, Vol.46 ,
No.7 , P.787-794 , July 1997