

一定荷重振幅繰返し負荷を受ける斜交対称積層板の 低サイクル疲労挙動に関する研究

境, 昌宏
九州大学工学航空宇宙

<https://doi.org/10.11501/3135044>

出版情報：九州大学，1997，博士（工学），課程博士
バージョン：
権利関係：



一定荷重振幅繰返し負荷を受ける斜交対称積層板の
低サイクル疲労挙動に関する研究

境 昌 宏

一定荷重振幅繰返し負荷を受ける斜交対称積層板の低サイクル疲労挙動に関する研究

一定荷重振幅繰返し負荷を受ける斜交対称積層板の
低サイクル疲労挙動に関する研究

1998 年 2 月

境 昌 宏

目次

第1章 序論	1
1.1 緒言	1
1.2 従来の研究	2
1.3 研究の目的と論文の構成	4
第2章 静的引張試験	6
2.1 緒言	6
2.2 試験片	6
2.2.1 試験片の種類	6
2.2.2 試験片形状および寸法	8
2.3 試験方法	10
2.3.1 試験装置	10
2.3.2 試験手順	10
2.3.3 試験条件	12
2.4 実験結果	13
2.4.1 全試験結果	13
2.4.2 応力-ひずみ線図	17
2.4.3 破断の様子	26
2.4.4 総括的な考察	32
2.4.4.1 応力-ひずみ関係のマトリックス依存性	32
2.4.4.2 応力-ひずみ関係の繊維配向角依存性	34
2.4.4.3 応力-ひずみ関係の積層順序依存性	37
2.5 結言	40
第3章 低サイクル疲労試験	41
3.1 緒言	41
3.2 試験片	41
3.2.1 試験片の種類	41
3.2.2 試験片の形状および寸法	42

3.3	試験方法	42
3.3.1	システム構成	42
3.3.2	試験手順	50
3.3.2.1	応力-ひずみ測定試験	50
3.3.2.2	超音波探傷試験	50
3.3.3	試験条件	53
3.4	実験結果	54
3.4.1	全試験結果	54
3.4.2	応力-ひずみ線図	56
3.4.3	破断の様子	64
3.4.4	超音波探傷試験の結果	69
3.4.5	S-N 線図	76
3.5	静的引張試験結果との比較	78
3.5.1	破断ひずみの分布	78
3.5.2	最大応力変動繰返し負荷試験	81
3.5.3	破断面の様子	82
3.6	結言	85
第4章	数値シミュレーション	86
4.1	緒言	86
4.2	ラチェットひずみに対する数値シミュレーション	86
4.2.1	ひずみの定義	86
4.2.2	ラチェットひずみの特性	87
4.2.3	クリープ構成式を利用したラチェットひずみの定式化	89
4.2.4	ラチェット構成式中の係数の決定方法	91
4.2.5	ラチェットひずみの計算方法	94
4.2.6	数値シミュレーション結果および考察	94
4.3	繰返し負荷に対する数値シミュレーション	98
4.3.1	Ramberg-Osgood 則による単調負荷の数式的表現	98
4.3.2	単調負荷の数値シミュレーション結果	99
4.3.3	繰返し負荷の数値シミュレーション結果	103
4.4	結言	106

第5章 結論	107
--------	-----

謝辞	110
----	-----

参考文献	111
------	-----

表目次

2.1	試験片の種類	7
2.2	プリプレグの仕様および力学的特性	8
2.3	P30D 試験片の静的引張試験結果	14
2.4	P30B 試験片の静的引張試験結果	14
2.5	P45D 試験片の静的引張試験結果	14
2.6	Epoxy 試験片の静的引張試験結果	15
2.7	古典積層理論に用いた材料特性値 (Epoxy 試験片)	15
3.1	疲労試験に用いた試験片の種類および本数	42
3.2	PEEK 試験片の疲労試験結果	54
3.3	Epoxy 試験片の疲労試験結果	55
3.4	係数 a , b の値	76

図目次

1.1 金属材料と複合材料の疲労の違い	2
2.1 積層順序による試験片名称の定義	7
2.2 試験片形状および寸法	9
2.3 材料定数の古典積層理論による計算結果と実験結果との比較	16
2.4 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (P30D 試験片)	20
2.5 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (P30B 試験片)	20
2.6 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (P45D 試験片)	21
2.7 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E15D 試験片)	22
2.8 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E15B 試験片)	22
2.9 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E30D 試験片)	23
2.10 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E30B 試験片)	23
2.11 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E45D 試験片)	24
2.12 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E45B 試験片)	24
2.13 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E60D 試験片)	25
2.14(a) マトリックスの違いによる応力-ひずみ線図の比較 (45 度試験片)	32
2.14(b) マトリックスの違いによる応力-ひずみ線図の比較 (30 度試験片)	33
2.15 マトリックスによる材料特性の違い (PEEK に対する Epoxy の比)	33
2.16(a) 繊維配向角の違いによる応力-ひずみ線図の比較 (Distributed Ply)	35
2.16(b) 繊維配向角の違いによる応力-ひずみ線図の比較 (Blocked Ply)	35
2.17 古典積層理論による強度値と実験結果との比較	36
2.18(a) 積層順序の違いによる応力-ひずみ線図の比較 (15 度試験片)	38
2.18(b) 積層順序の違いによる応力-ひずみ線図の比較 (30 度試験片)	38
2.18(c) 積層順序の違いによる応力-ひずみ線図の比較 (45 度試験片)	39
2.19 積層順序による材料特性の違い (Distributed に対する Blocked の比)	39
3.1 試験システム概要	43
3.2 超音波探傷装置システム構成	48
3.3 疲労試験時の荷重波形	53
3.4 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (P30D 試験片, $75\% \sigma_{ult}$)	58
3.5 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (P30B 試験片, $75\% \sigma_{ult}$)	58
3.6 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (E30B 試験片, $70\% \sigma_{ult}$)	59

3.7 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (E30B 試験片, $70\% \sigma_{ult}$)	59
3.8(a) 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (E45D 試験片, $79\% \sigma_{ult}$)	60
3.8(b) 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (E45D 試験片, $68\% \sigma_{ult}$)	60
3.9 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (E45B 試験片, $76\% \sigma_{ult}$)	61
3.10 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (E60D 試験片, $75\% \sigma_{ult}$)	61
3.11 最大ひずみおよび剛性の定義	62
3.12 E30D 試験片の最大ひずみおよび剛性低下の様子	63
3.13 超音波探傷による損傷進展の様子 (E15D 試験片)	71
3.14 超音波探傷による損傷進展の様子 (E60D 試験片)	72
3.15 超音波探傷による損傷進展の様子 (E30D 試験片)	73
3.16 超音波探傷による損傷進展の様子 (E30B 試験片)	74
3.17 P30 試験片の S-N 線図	77
3.18 E30 試験片の S-N 線図	77
3.19 疲労試験における破断ひずみの分布	79
3.20 P30D 試験片の破断ひずみの分布	80
3.21 最大応力変動繰返し負荷試験時の応力-ひずみ線図 (P30D 試験片)	81
3.22 最大応力変動繰返し負荷試験時の応力-ひずみ線図 (E30D 試験片)	82
4.1 ひずみの名称の定義	87
4.2 繰返し数と全ひずみとの関係	88
4.3 クリープひずみとラチェットひずみの類似性	89
4.4(a) ラチェットひずみと繰返し数との関係	92
4.4(b) 係数 α の決定法	92
4.4(c) 係数 β , A の決定法	93
4.4(d) 第2領域における Norton 則中の係数 γ , λ の決定法	93
4.5 ラチェットひずみ計算のフローチャート	95
4.6 $\Delta \sigma$ を変化させたときのラチェットひずみ計算結果	96
4.7 ラチェットひずみの実験結果と計算結果との比較	97
4.8 単調負荷時の応力-ひずみ線図	100
4.9(a) 応力-塑性ひずみ曲線	101
4.9(b) 応力-塑性ひずみ曲線 (両対数表示)	101
4.10 Ramberg-Osgood 則による応力-ひずみ曲線の計算結果	102
4.11 繰返し負荷時の応力-ひずみ線図のモデル化	104

4.12 繰返し負荷挙動のシミュレーション結果 105

写真目次

2.1 疲労試験機概観	11
2.2 静的引張試験による破断の様子 (P30D 試験片)	28
2.3 静的引張試験による破断の様子 (P30B 試験片)	28
2.4 静的引張試験による破断の様子 (P45D 試験片)	29
2.5 静的引張試験による破断の様子 (E15D 試験片)	29
2.6 静的引張試験による破断の様子 (E15B 試験片)	29
2.7 静的引張試験による破断の様子 (E30D 試験片)	30
2.8 静的引張試験による破断の様子 (E30B 試験片)	30
2.9 静的引張試験による破断の様子 (E45D 試験片)	31
2.10 静的引張試験による破断の様子 (E45B 試験片)	31
2.11 静的引張試験による破断の様子 (E60D 試験片)	31
3.1 リアルタイム端面観察および録画装置	45
3.2 超音波探傷装置	47
3.3 端面観察および撮影装置	49
3.4 応力-ひずみ測定試験におけるシステム全景	51
3.5 試験部詳細	51
3.6 超音波探傷試験の様子	52
3.7 疲労試験による破断の様子 (P30D 試験片)	66
3.8 疲労試験による破断の様子 (P30B 試験片)	66
3.9 疲労試験による破断の様子 (E15D 試験片)	67
3.10 疲労試験による破断の様子 (E30D 試験片)	67
3.11 疲労試験による破断の様子 (E30B 試験片)	67
3.12 疲労試験による破断の様子 (E45D 試験片)	68
3.13 疲労試験による破断の様子 (E45B 試験片)	68
3.14 疲労試験による破断の様子 (E60D 試験片)	68
3.15 E30D および E30B 試験片の端面顕微鏡写真	75
3.16 静的引張試験と疲労試験による破断面の比較	83

第1章 序論

1.1 緒言

航空宇宙構造に用いられる材料に最も要求される特性として、「軽量であること」かつ「高強度，高剛性であること」が挙げられる．この相反する2つの要求を同時に満足させることは，従来の金属材料では困難であったが，複合材料を使用することにより可能となった．複合材料には母材や強化材の違いにより様々な種類があるが，その中でもプラスチックを炭素繊維で強化したCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)は，その比強度，比剛性の高さから，航空機用材料として早くから2次構造（エンジンカウル，ラダー，エルロンなど）に用いられてきた．最近では主（1次）構造への導入もなされており，最新の民間機 Boeing 社の B777 では，水平，垂直尾翼のボックス構造および胴体のフロアビームに高靱化した CFRP が使用されている．

このように複合材料は航空機や宇宙構造物に幅広く用いられるようになってきたが，その力学的特性にはまだ解明されていないところが多い．その中の一つに材料が繰返し負荷を受けることにより破壊を起こすいわゆる「疲労 (fatigue)」現象がある．この疲労破壊については，従来の金属材料においても，その発生や進行のメカニズムをはじめ，未だに解明されていない部分が多く，純粋な理論解析のみで設計基準を与えるような状況には至っていない．複合材料の疲労に関しては，理論的研究のみならず，実験的研究が未だ初期の段階にある．

金属材料と比較して，複合材料の疲労は破壊様式の複雑さに特徴がある．図 1.1 に金属材料と複合材料の疲労の違いについて模式的に表したものを示す¹⁾．図に示すように，まず，疲労損傷を評価する指標が，金属材料の場合は亀裂の長さという一つの形態であるのに対し，複合材料では，マトリックスクラック，層間剥離，繊維破断，繊維と母材の界面の剥離など複雑多岐にわたる．また，破壊に至る過程も金属材料と複合材料では大きく異なる．金属材料では繰返し負荷により亀裂が発生し，それがさらに繰返し負荷を受けることで徐々に成長し，最終的に不安定破壊に至るという過程をたどる．一方，複合材料の場合は，繰返しの比較的初期の段階で無数の損傷が観察されるが，それが致命的な欠陥

とはならず、層間剥離や繊維破断などの複数の損傷形態が複雑に絡み合って破壊に至る。

このように複合材料の疲労破壊メカニズムは非常に複雑であり、ほとんど解明されていない状態にあるため、複合材料を実機に用いる際には、未だにクーパーレベルでの疲労試験を多数行う必要がある²⁾。疲労試験によるデータ収集には多大な時間、コストを要するため、複合材料の疲労破壊メカニズムを解明することが渴望されている。

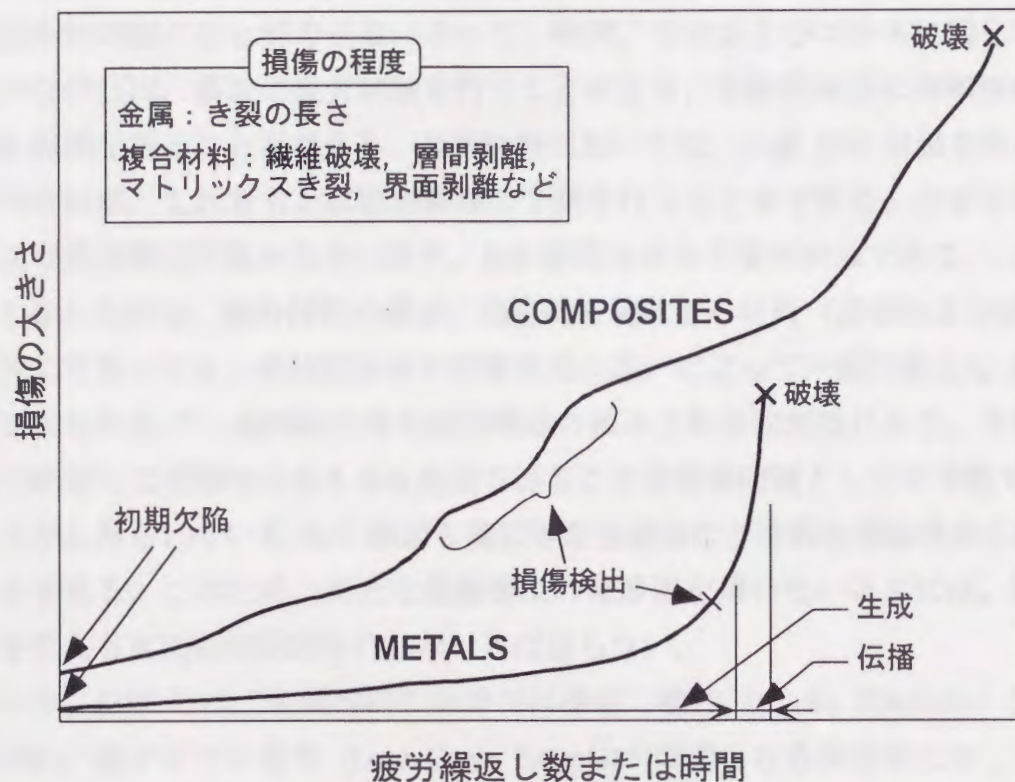


図 1.1 金属材料と複合材料の疲労の違い

1.2 従来の研究

これまでも、複合材料、特にプリプレグシートを積み重ねて作成された積層板（Laminate）の疲労に関する研究が様々なアプローチでなされてきた^{3)~12)}。複合材積層板の疲労の問題、特に疲労寿命予測を対象とする疲労問題を議論する際、大別して次の2つの方法が考えられる。

(1) 負荷中の積層板内に生じる個々の損傷には触れず、S-N 曲線のみを対象と

する。

(2) 繰返し負荷中の積層板の応力-ひずみ関係に着目して、疲労挙動を考える。

このうち(1)については、従来から引張や圧縮荷重下において短冊形試験片を用いた疲労試験が数多く行われている。Rotem と Hashin⁹⁾は様々な配向角の斜交対称積層板による疲労試験を行い、理論から求めた S-N 曲線との比較を行っている。また Rotem¹⁰⁾は疲労関数(fatigue function)という概念を導入し、これと積層理論とを組み合わせることで、ある積層構成の積層板の S-N 曲線を予測する方法を提案している。

S-N 線図は繰返し負荷時の応力（あるいはひずみ）と破断までの繰返し数さえ分かれば描くことができる。よって、時間、労力およびコストに関しての制約がなければ、多数の疲労試験を行うことにより、比較的簡便に信頼性のある S-N 線図を得ることができる。金属材料においては、一度 S-N 線図を得ることができれば、これをもとに疲労寿命の予測を行うことができる。なぜなら材料および使用環境が変わらない限り、S-N 線図もまた不変だからである。

しかしながら、複合材料の場合、複合材を構成する材料（母材および強化材）が同じであっても、繊維配向角や積層構成の違いによって一般に異なる S-N 線図が得られる¹²⁾。繊維配向角や積層構成の組み合わせは無数にあり、それらすべてに対して信頼性のある S-N 線図を得ることは現実問題として不可能であり、今までに得られている S-N 線図も擬似等方性積層など特別な積層構成に対するものである。このため、新たな積層構成の積層板を用いたいときには、積層構成を変える度に疲労試験を行わなければならない。

一方、(2)の方は、金属材料の分野では繰返し塑性 (Cyclic Plasticity) 問題と呼ばれ、低サイクル疲労 (Low Cycle Fatigue) が問題となる構造物に対しての解析方法として、最近になって研究が盛んに行われている¹³⁾。このうち、繰返し負荷時の応力-ひずみ関係、すなわち構成方程式 (Constitutive Equation) を求めることが様々な研究者によって試みられているが^{14), 15)}、式中に決定すべき定数の数が多いなどの問題があり、未だ統一の見解を得るまでには至っていない。

このように金属材料の分野においても、(2)の立場から疲労を扱った研究は現在のところ初期の段階にあり、複合材料に至っては、(2)の立場から疲労問題を扱った研究自体、数少ない^{16)~19)}。このうち、金川ら¹⁸⁾は CFRP[±45]円管に引張・圧縮繰返し負荷を加え、得られた応力-ひずみヒステリシスループと内部損傷の関係について検討している。佐々木と石川¹⁹⁾は同じく CFRP[±45]円

管を用いて一定ひずみ振幅繰返し負荷試験を行い、応力-ひずみヒステリシスループが囲む面積を用いて、疲労寿命に関する考察を行っている。ところが、これら2つの試験はどちらも $[\pm 45]$ 試験片のみを対象としており、繊維配向角や積層順序を変化させたときの繰返し負荷時の応力-ひずみ関係については述べられていない。また、どちらも円管の試験片を用いており、作製が比較的容易で、一般の疲労試験でよく用いられる短冊形試験片を用いて、繰返し負荷時の応力-ひずみ関係について調べたものは現在のところ見当たらない。

1.3 研究の目的と論文の構成

繰返し負荷を受ける複合材積層板の応力-ひずみ線図より、繰返し負荷時の構成方程式を実験的に得ることは、低サイクル疲労破壊メカニズムを解明する上で重要な課題となる。

本研究は以上のような背景のもとに、繰返し負荷を受ける複合材積層板の応力-ひずみ関係に着目して、低サイクル疲労破壊のメカニズムを明らかにすることを目的とした。試験片には短冊形の斜交対称積層板を用い、樹脂の違いによる影響を調べるために、熱可塑性樹脂である PEEK(PolyEtherEtherKeton)、および熱硬化性樹脂である Epoxy の2種類を用いた。また繊維配向角による違いを調べるために、配向角 15, 30, 45, 60 度の試験片を用意し、また積層順序の違いによる変化を見るために層を一層ずつ交互に重ねて積層した $[+\theta/-\theta]_4$ (θ は繊維配向角を表す) および同じ方向に4層を重ねて積層した $[+\theta_4/-\theta_4]_2$ の2種類を用いて実験を行った。

なお、本研究では疲労寿命が $10 \sim 10^4$ となる高応力レベルでの低サイクル疲労を対象としている。

論文の構成は5章からなる。第1章では従来の研究の概要、本研究の背景や目的、および本論文の構成について述べた。

第2章では静的引張試験を行った結果について述べる。静的引張試験は、試験片の基本的力学特性を得るため、また繰返し負荷時の応力-ひずみ関係との比較をするために行った。得られた応力-ひずみ線図に対して、マトリックス、繊維配向角、積層順序依存性について調べた。また、破断面の様子を比較することにより、マトリックス、繊維配向角、積層順序による破断モードの違いについての考察を行った。

第3章では低サイクル疲労試験を行った結果について述べる。低サイクル疲

労試験は、初期負荷から破断までの応力-ひずみ関係を測定する試験と、超音波探傷装置を用いて、試験片内部の損傷進展の観察を行う試験の2種類を行った。前者の試験から得られた繰返し負荷時の応力-ひずみ線図を示し、斜交対称積層板の繰返し負荷時の応力-ひずみ関係についての考察を行った。また、破断面の比較により、疲労試験における破断モードのマトリックス、繊維配向角、積層順序依存性について調べた。さらに、超音波探傷試験による内部損傷（特に層間剥離）の様子について示し、繊維配向角、および積層順序が疲労損傷進展に与える影響について調べた。また、疲労試験における破断ひずみが静的引張試験時の破断ひずみに近いことに着目し、「疲労破壊は繰返し負荷により蓄積するひずみが、静的引張時の破断ひずみ付近に達したときに生じる」との仮説を立て、その仮説に対して詳細な検討を行った。

第4章では第2章および第3章での実験結果をもとに、繰返し負荷を受ける斜交対称積層板の応力-ひずみ関係の数値シミュレーションを行う。まず、繰返し負荷による蓄積ひずみとクリープひずみの類似性に着目し、クリープ構成式を参考に導出した蓄積ひずみの構成式を用いて数値シミュレーションを行った。さらに単調負荷の応力-ひずみ関係が、Ramberg-Osgood 則と呼ばれる非線形の応力-ひずみ関係を表す関係式を用いてよく表されることを示し、蓄積ひずみの構成式と組み合わせることで、繰返し負荷の応力-ひずみ関係の数値シミュレーションを行った。

第5章では本研究から得られた結論を総括し、これからの研究について言及している。

第2章 静的引張試験

2.1 緒言

本章では静的引張試験について述べる。静的引張試験は、積層板の基本的な力学特性を得るとともに、次章で行う疲労試験における荷重条件を決定し、静的引張と疲労の破壊モードの違いを調べるために行う。

本章の内容としては、まず用いた試験片の種類や形状について説明し、試験方法について述べる。次に応力-ひずみ線図および破断の様子を示し、最後に実験により得られた応力-ひずみ線図に対して、マトリックス、繊維配向角、積層順序の違いによる比較、考察を行っている。

2.2 試験片

2.2.1 試験片の種類

表 2.1 に静的引張試験に用いた試験片の種類を示す。試験片のマトリックスは熱可塑性樹脂である PEEK と熱硬化性樹脂である Epoxy の 2 種類であり、繊維配向角は PEEK 樹脂の方が 30, 45 度の 2 種類、Epoxy 樹脂の方は 15, 30, 45, 60 度の 4 種類である。また積層順序として、 $[+\theta/-\theta]_{4s}$ と $[+\theta_1/-\theta_2]_s$ の 2 種類を用いた。

表中の試験片名は、はじめの英文字がマトリックスの種類を表し、P が PEEK, E が Epoxy を意味する。次の 2 桁の数字が繊維配向角を表す。その次の英文字は積層順序を表し、図 2.1 に示すようにプリプレグを 1 層ずつ交互に、繊維配向角の符号を変えて重ねた積層順序 $[+\theta/-\theta]_{4s}$ を Distributed Ply と名付け D で表し、4 層を重ねて積層した積層順序 $[+\theta_1/-\theta_2]_s$ を Blocked Ply と名付け B で表す。例えば、E45D は Epoxy の $[+45/-45]_{4s}$ 試験片である。

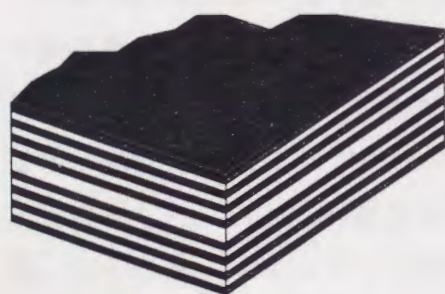
PEEK 試験片は本研究室で作製した。積層板作製には英国 ICI 社製一方向プリプレグシート APC-2 (樹脂 ; ICI 社製 PEEK, 繊維 ; Hercules 製炭素繊維 AS4) を使用した。このシートをハンドレイアップ法により積層し、万能試験機 (東京衡機製作所製 RU-30) を改良したホットプレスにより、加圧、加熱を行って成形した²⁰⁾。

Epoxy 試験片の作製は新明和工業 (株) に依頼した。プリプレグは東邦レー

ヨン製 Q-2132 (樹脂 ; 東邦レーヨン製 Epoxy 樹脂 #132, 繊維 ; 東邦レーヨン製 炭素繊維 HTA) である。APC-2 及び Q-2132 プリプレグの仕様及び力学的特性を表 2.2 に示す。

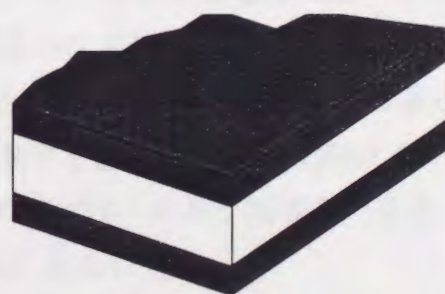
表 2.1 試験片の種類

試験片名	樹脂の種類	積層構成
P30D	PEEK	$[+30/-30]_{4s}$
P30B		$[+30_4/-30_4]_s$
P45D		$[+45/-45]_{4s}$
E15D	Epoxy	$[+15/-15]_{4s}$
E15B		$[+15_4/-15_4]_s$
E30D		$[+30/-30]_{4s}$
E30B		$[+30_4/-30_4]_s$
E45D		$[+45/-45]_{4s}$
E45B		$[+45_4/-45_4]_s$
E60D		$[+60/-60]_{4s}$



$$[+\theta / -\theta]_{4s}$$

Distributed Ply



$$[+\theta_4 / -\theta_4]_s$$

Blocked Ply

図 2.1 積層順序による試験片名称の定義

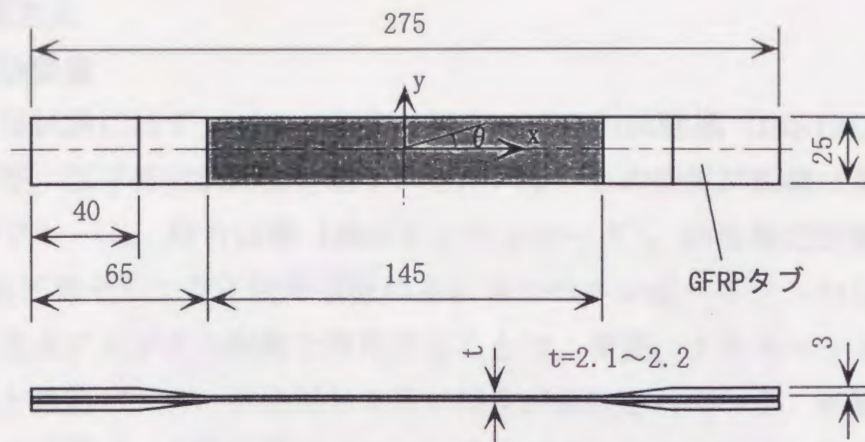
表 2.2 プリプレグの仕様および力学的特性^{21),22)}

仕様及び特性	単位	プリプレグ名	
		APC-2	Q-2132
密度	g/c. c.	1.6	1.6
厚さ	mm	0.125	0.137
繊維体積含有率	%	61	60
0° 引張強さ	MPa	2130	2060
弾性率	GPa	134	137
破断ひずみ	%	1.45	1.48
圧縮強さ	MPa	1100	1130
曲げ強さ	MPa	1880	1705
弾性率	GPa	121	118
90° 引張強さ	MPa	80	64
弾性率	GPa	8.9	8.24
破断ひずみ	%	1.0	0.77
曲げ強さ	MPa	137	98
弾性率	GPa	8.9	9.8

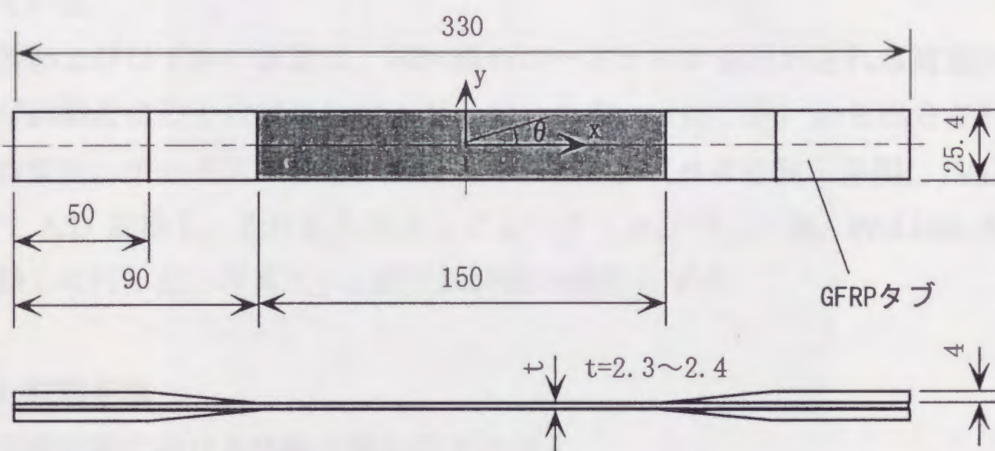
2.2.2 試験片形状および寸法

試験片の形状および寸法を図 2.2(a), (b)に示す。複合材積層板においては、寸法の違いにより力学特性に差が出るとの報告がなされており²³⁾、その影響が生じないように PEEK と Epoxy 試験片の幅およびタブ間ゲージ長をほぼ等しくした。試験片両端にはチャック部による応力集中を避けるために GFRP 製のタブを接着した。PEEK 試験片のタブ接着にはテープ状エポキシ接着剤（住友 3M 製、ロックタックボンディングテープ Y-582A）を用いた。

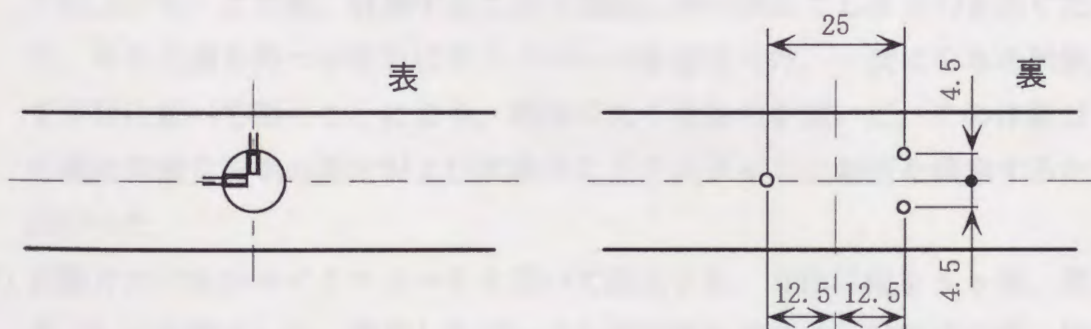
ひずみゲージ接着位置および伸び計マウント位置をそれぞれ図 2.2(c), (d)に示す。ここで伸び計マウントとは、伸び計のナイフエッジが当たる部分に、伸び計が負荷中に滑るのを防ぐために落とした接着剤（共和電業製、ひずみゲージ用瞬間接着剤 CC-33A）のことを指す。図 2.2(d)に示す位置に接着剤をほんの少しだけ落とし、接着剤が完全に硬化した後、サンドペーパーで接着剤の表面を平らにならし、マウントを作製した。



(a) PEEK試験片



(b) Epoxy試験片



(c) ひずみゲージ貼り付け位置

(d) 伸び計マウント位置

図 2.2 試験片形状および寸法

2.3 試験方法

2.3.1 試験装置

静的引張試験にはデジタル制御油圧サーボ疲労試験機 (INSTRON 製モデル 8501 型, 以下疲労試験機と略す) を用いた。この疲労試験機は荷重を支えるロードフレーム, 動力装置 (油圧アクチュエータ), 荷重測定装置 (ロードセル), 油圧源そして電子制御装置の主に 5 つのコンポーネントから構成されており, 完全デジタル制御を採用することで, 荷重, クロスヘッドの位置, ひずみなどの諸パラメータに対して高い精度が保証されている。試験条件の設定や荷重の制御は, 本体付属のフロント操作パネルによるマニュアル制御か外部コンピュータによるコンピュータ制御のいずれかが選択可能である。なお, 静的引張試験では複雑な荷重設定を行う必要がないため, マニュアル制御を採用している。

荷重およびひずみの測定は, 試験機のロードセルから出力される荷重の値, および試験片に取り付けたひずみゲージ (あるいは伸び計) から出力されるひずみの値を, データアクイジションコントローラ (日本電気三栄製, 7V11) を用いて A/D 変換し, それを外部コンピュータ (コンパック製, ProLinea 4/33) で集録して行った。写真 2.1 に疲労試験機の概観を示す。

2.3.2 試験手順

静的引張試験における試験手順を以下に示す。

- 1) 試験片の片側端面をサンドペーパーおよびピカール金属磨きを用いて磨く。具体的には 600→1000→1500→2000 番ペーパー→ピカールと徐々に目を細かくして仕上げた。この際, 研磨することで端面に曲率が出てしまうのを防ぐために, 平らな面を持つ木切れにサンドペーパーを巻き付け, 一度に 2 本の試験片を平行に並べて磨くことにより, 端面が丸くなるのを防いだ。この作業は 3) の繊維体積含有率の測定および試験中にリアルタイムに端面を観察するために行った。
- 2) 試験片の寸法をマイクロメータを用いて測定する。寸法は幅を 5 ヶ所, 厚さを 15 ヶ所測定した。測定したデータの平均値を求めて, 試験片の幅, 板厚とし, これらより断面積を求めた。

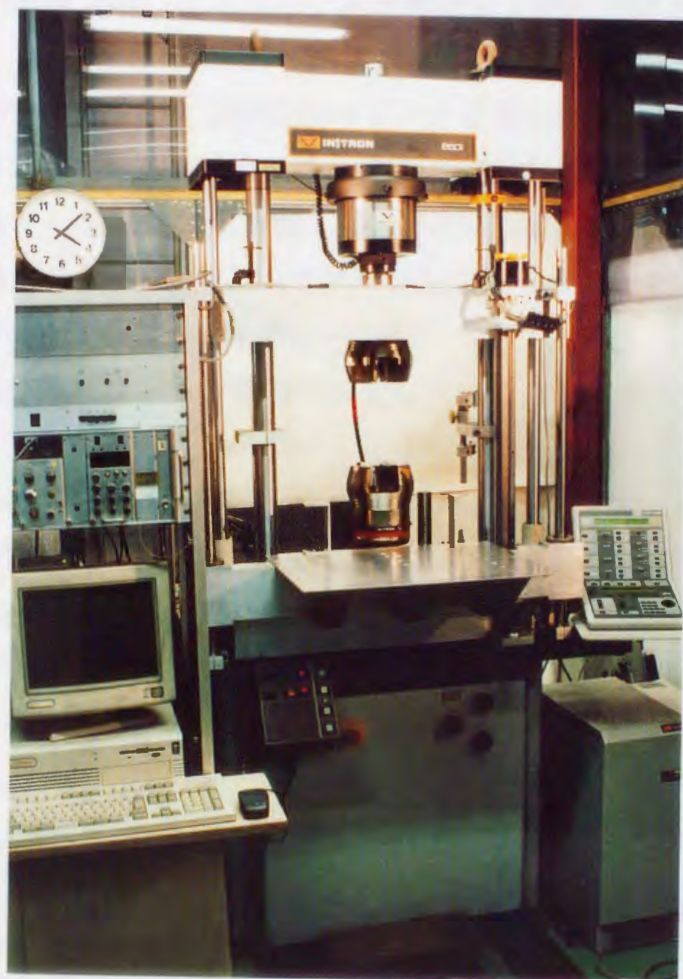


写真 2.1 疲労試験機概観

- 3) 繊維体積含有率（以下、 V_f と略す）の測定を行う。 V_f 測定には万能写真顕微鏡（ニコン製、MICROPHOTO-FXA）および画像処理装置（東芝製、TOSPIX-II）を用いた。万能写真顕微鏡で撮影された試験片端面画像を、画像処理装置に取り込み、マトリックスと繊維を2値化処理することで V_f を求めた。
- 4) ひずみゲージ接着位置および伸び計マウント位置にけがき線を入れ、ひずみゲージの接着および伸び計マウントの作製を行う。静的引張試験時のひずみ測定には2軸ゲージ（共和電業製、KFE-5-120-D32）を用い、ゲージ用瞬間接着剤（共和電業製、CC-33A）でゲージを接着した。また伸び計マウントは2.2.2で述べた方法で作製した。
- 5) ゲージ及び伸び計マウントの接着剤を完全に硬化させるために、最低24時間放置する。
- 6) ひずみゲージのリード線を接続し、伸び計（MTS製、634.12F-24、ゲージ長25mm）をマウント位置に正確に取り付ける。
- 7) 試験片を疲労試験機に取り付け、フロント操作パネルで試験条件の設定を行い試験を開始する。

2.3.3 試験条件

静的引張試験はJIS K 7073の「炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法」に準じて行った。すなわち、荷重条件として、クロスヘッドの位置制御でひずみ速度が1%/minとなる試験速度を採用した。

ただし、Blocked Ply 試験片は破断までの伸びが数千 μ strain と小さいものもあるため、1%/min のひずみ速度では試験片がすぐに破断に至り、十分な荷重-ひずみデータの測定ができないケースが生じる。そこでBlocked Ply 試験片の試験速度にはひずみ速度0.5%/minを採用した。なお、試験はすべて常温下で行った。

2.4 実験結果

2.4.1 全試験結果

表 2.3~2.5 に PEEK 試験片の静的引張試験結果を、表 2.6 に Epoxy 試験片の静的引張試験結果を示す。表中、引張弾性率 E_x はひずみが 0.2% 内の応力-ひずみ線図のデータを線形領域とみなして、その傾きより求めた。荷重と垂直方向の剛性 E_y も同様に、-0.2% 内の応力-ひずみ線図のデータを線形領域とみなして、その傾きより求めた。またポアソン比は E_x と E_y より $\nu_{xy} = -E_x/E_y$ として計算した。ただし、表中の — はゲージがはがれたり、伸び計がずれるなどの不具合が生じたため信頼できるデータが測定できなかったことを示す。

なお、P45D 試験片は破断までの伸びが約 18% と非常に大きく、ひずみゲージの信頼できる測定領域を越えるため、伸び計のみを用いてひずみの測定を行った。このためポアソン比は計算されていない。

また、表 2.5 には ICI 社提供のカタログ値を示しており、実験結果の平均値と比較するとよく一致している。このことから、本研究室で作製した積層板の信頼性が証明できる。

Epoxy 試験片については、試験片本数の都合上、各積層構成に対して一本ずつしか静的引張試験を行っていないが、過去に本研究室で行われた結果²⁴⁾との比較、および古典積層理論を用いて計算した材料定数との比較を行って信頼できるデータであることを確認している。

図 2.3 に古典積層理論により計算した斜交対称積層板の剛性 E_x , G_{xy} およびポアソン比 ν_{xy} を実験より得られた値とともに示した。古典積層理論の計算の際必要な Epoxy 試験片の材料定数を表 2.7 に示す。表中の記号は E_L , E_T がそれぞれ繊維方向および繊維と直角方向のヤング率、 G_{LT} はせん断弾性係数、 ν_{LT} はポアソン比を表す。また下添字のついた F , ϵ はそれぞれ、破断強度および破断ひずみを表し、大文字の下添字の L は繊維方向、 T は繊維と直角方向、 LT はせん断を表す。小文字の下添え字の t は引張、 c は圧縮を表す。例えば、 F_{Lt} は繊維方向の引張強度を、 ϵ_{Tc} は繊維と直角方向の圧縮破断ひずみを表す。これらの値は表 2.2 で与えられたプリプレグ(Q-2132)のデータを用いた。

図 2.3 をみても分かるように E_x , ν_{xy} ともに実験結果と古典積層理論による計算結果とはよく一致しており、信頼できる実験結果が得られたと言える。

表 2.3 P30D 試験片の静的引張試験結果

試験片名	引張弾性率 E_x (GPa)	ポアソン比 ν_{xy}	引張強さ (MPa)	破断ひずみ (%)
P30D-01	48.4	1.32	775	3.91
P30D-02	44.2	—	741	4.35
P30D-03	46.3	—	734	4.40
P30D-04	46.0	1.26	716	4.66
P30D-05	47.1	1.30	736	3.79
P30D-06	47.3	1.27	717	3.22
P30D-07	46.1	1.29	704	3.34
P30D-08	45.5	1.21	743	3.66
平均値	46.4	1.28	733	3.92

表 2.4 P30B 試験片の静的引張試験結果

試験片名	引張弾性率 E_x (GPa)	ポアソン比 ν_{xy}	引張強さ (MPa)	破断ひずみ (%)
P30B-01	47.8	1.29	422	1.12
P30B-02	46.0	—	422	1.15
平均値	46.9	1.29	422	1.14

表 2.5 P45D 試験片の静的引張試験結果

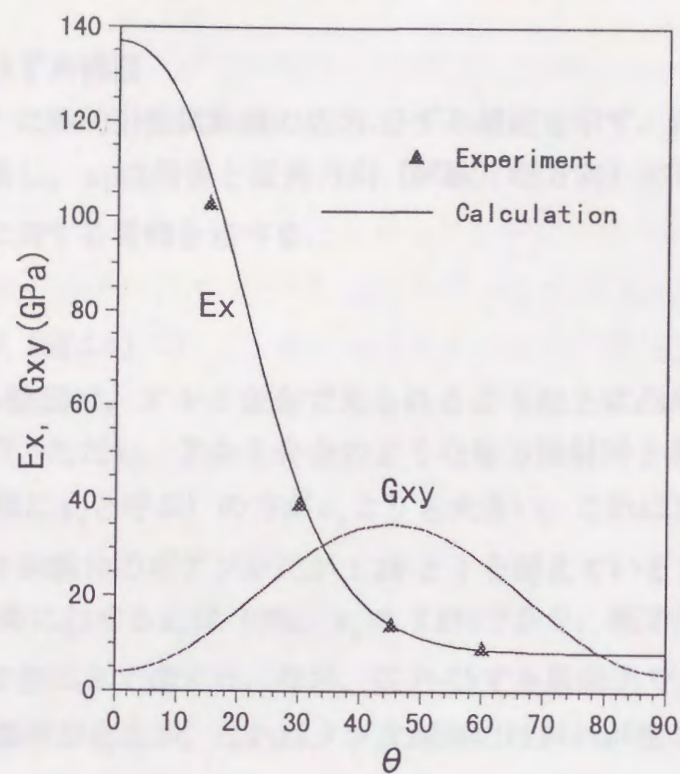
試験片名	引張弾性率 E_x (GPa)	ポアソン比 ν_{xy}	引張強さ (MPa)	破断ひずみ (%)
P45D-01	18.5	—	334	18.5
P45D-02	17.9	—	293	18.2
P45D-03	19.7	—	297	17.0
P45D-04	19.4	—	313	17.8
平均値	18.9	—	309	17.9
分散値	18.2	—	300	17.2

表 2.6 Epoxy 試験片の静的引張試験結果

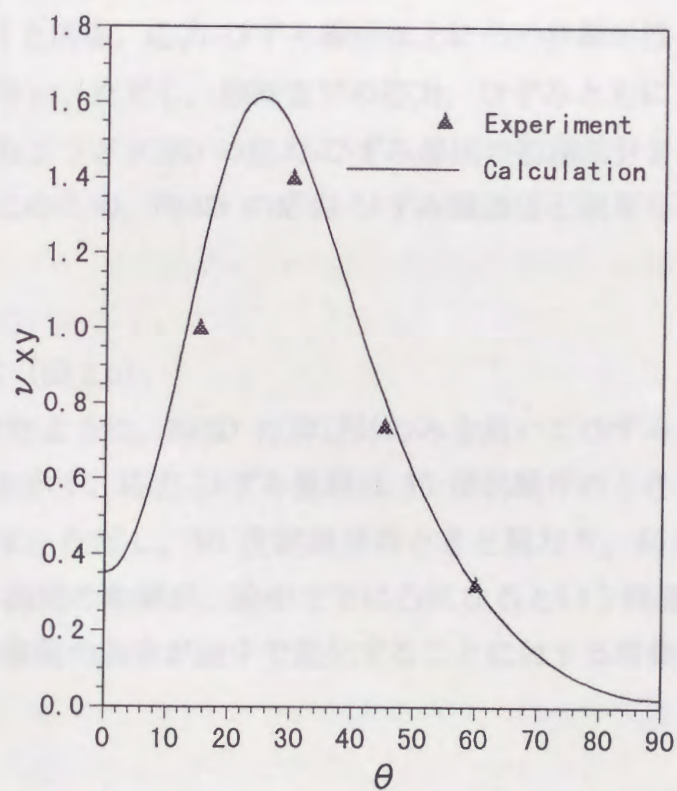
試験片名	引張弾性率 E_x (GPa)	ポアソン比 ν_{xy}	引張強さ (MPa)	破断ひずみ (%)
E15D-01	102.6	1.00	1036	0.90
E15B-01	97.0	0.98	441	0.45
E30D-01	39.2	1.39	574	2.23
E30B-01	38.2	1.40	245	0.79
E45D-01	14.1	0.74	190	8.87
E45B-01	12.7	0.74	78	0.84
E60D-01	9.0	0.32	83	1.30

表 2.7 古典積層理論に用いた材料特性値 (Epoxy 試験片)

$E_L=137$ (GPa)	$E_T=8.24$ (GPa)	$G_{LT}=3.89$ (GPa)	$\nu_{LT}=0.35$	
$F_{Lt}=2060$ (MPa)	$F_{Lc}=1130$ (MPa)	$F_{Tt}=64$ (MPa)	$F_{Tc}=196$ (MPa)	$F_{LT}=95$ (MPa)
$\varepsilon_{Lt}=0.0148$	$\varepsilon_{Lc}=0.0083$	$\varepsilon_{Tt}=0.0077$	$\varepsilon_{Tc}=0.024$	$\varepsilon_{LT}=0.024$



(a) 弾性係数



(b) ポアソン比

図 2.3 材料定数の古典積層理論による計算結果と実験結果との比較

2.4.2 応力-ひずみ線図

図 2.4~2.13 に静的引張試験時の応力-ひずみ線図を示す。図中、 ϵ_x は荷重方向のひずみを表し、 ϵ_y は荷重と直角方向（試験片幅方向）のひずみを表す。以下に各試験片に対する考察を述べる。

・ P30D 試験片（図 2.4）

応力-ひずみ線図は、アルミ合金で見られるような上に凸の顕著な非線形性を示す^{25)~28)}。ただし、アルミ合金のような等方性材料と異なり、 ϵ_y の絶対値（以下、単に ϵ_y と呼ぶ）の方が ϵ_x よりも大きい。これは表 2.3 から分かるように P30D 試験片のポアソン比が 1.28 と 1 を越えていることに起因している²⁹⁾。破断時における ϵ_y は 10%、 ϵ_x は 3.8% であり、幅方向縮みが荷重方向伸びの約 2.6 倍にまで達する。なお、応力-ひずみ線図上で、応力が急激に減少している箇所があるが、これはタブ先端部のはがれが生じたためである。

・ P30B 試験片（図 2.5）

P30D 試験片と同様、応力-ひずみ線図は上に凸の非線形性を示し、 ϵ_y の方が ϵ_x よりも大きい。ただし、破断までの応力、ひずみともに P30D と比較すると小さく、ちょうど P30D の応力-ひずみ線図の初期部分を取りだした形になっている。このため、P30D の応力-ひずみ線図ほど顕著な非線形性はあらわれていない。

・ P45D 試験片（図 2.6）

2.4.1 で述べたように、P45D は伸び計のみを用いてひずみの測定を行ったため、 ϵ_x のみを示す。応力-ひずみ線図は 30 度試験片のときと同様、顕著な非線形性を示す。ただし、30 度試験片のときと異なり、始め上に凸であった応力-ひずみ線図の曲率が、途中で下に凸になるという特徴を持つ。（なお、応力-ひずみ線図の曲率が途中で変化することに対する考察は E45D 試験片の項を参照）

・ E15D 試験片（図 2.7）

応力が低い部分では ϵ_x 、 ϵ_y はほぼ一致している。これは表 2.6 から分かるように、E15D 試験片のポアソン比がほぼ 1 に等しいことに起因している。応

力が増加するにつれて、30 度試験片と同様に ϵ_y の方が ϵ_x よりも大きくなる。また、他の試験片ではみられない特徴として、 ϵ_x がわずかに下に凸の非線形性を示すこと（このことは、 ϵ_x より求めた剛性が 103GPa から破断前には 117GPa へと上昇していることから分かる）が挙げられる。なお、 ϵ_y は他の試験片のときと同様、わずかに上に凸であり、剛性は 103GPa から破断前には 84GPa へと減少している。応力の増加とともに引張方向の剛性が上昇する現象は、0 度試験片においても生じることが確認されている³⁰⁾。15 度試験片は繊維配向角が 0 度に近いために同様の現象が生じたと考えられる。

・ E15B 試験片（図 2.8）

E15D と同様、 ϵ_x がわずかに下に凸の、 ϵ_y がわずかに上に凸の非線形性を示す（ ϵ_x の剛性は 97GPa から破断前には 101GPa へと増加、 ϵ_y の剛性は 98GPa から破断前には 91GPa へと減少）。P30D と P30B の関係と同様に、E15B の応力-ひずみ線図は E15D の応力-ひずみ線図の初期部分を取りだした形とほぼ一致する。

・ E30D, E30B 試験片（それぞれ図 2.9, 図 2.10）

特徴は P30D, P30B に対するものと同様で、上に凸の顕著な非線形性、 ϵ_y が ϵ_x よりも大きい（原因も P30 試験片のときと同様、ポアソン比が 1.39 と 1 より大きいため）、E30B の応力-ひずみ線図が E30D の初期部分とほぼ一致することが挙げられる。

・ E45D 試験片（図 2.11）

応力-ひずみ線図は P45D 試験片と同様に、顕著な非線形性を示し、曲率が上に凸から下に凸、再び上に凸へと変化する。ただし P45D と異なり、応力が一定でもひずみが増加する領域（図 2.11 で、ひずみが約 3% から 5% の領域、flat zone あるいは plateau zone と呼ばれる）が現れる。応力-ひずみ線図に flat zone が生じる原因は、次のように推定される。試験片の端面観察によれば、flat zone に入るときに、同時に無数のマトリックスクラックが入る。これにより、荷重一定でもひずみが増加する flat zone があらわれ、試験片が伸びるときに、層内せん断により繊維の回転が生じる。このことにより、繊維の配向角が 45 度より小さくなり、再び上に凸の挙動を示すと考えられる。また、

この flat zone を境に ϵ_x と ϵ_y の伸びが逆転しているが、これは繊維回転により、配向角が、ポアソン比 1 を越える 30 度に近づいたためだと推定できる。

・ E45B 試験片 (図 2.12)

E45D の初期部分を取りだした形になっているため、E45D でみられた応力-ひずみ線図の曲率の変化は現れていない。上に凸の非線形性も顕著には生じていない。

・ E60D 試験片 (図 2.13)

応力-ひずみ線図は上に凸の非線形性を示す。一般の等方性材料と同様に ϵ_x の方が ϵ_y よりも大きく、ポアソン比も 0.32 と金属材料に近い値を示す。

以上の考察をまとめると次のようになる。

- 1) 引張荷重を受ける斜交対称積層板は非線形の応力-ひずみ関係を示す。なお、荷重方向ひずみ ϵ_x の非線形性は繊維配向角に依存し、30, 60 度試験片が上に凸の顕著な非線形性を示すのに対し、15 度試験片はわずかに下に凸の非線形性を示す。荷重と直角方向のひずみ ϵ_y の非線形性は 15, 30, 45, 60 度試験片いずれにおいても上に凸の非線形性を示す。
- 2) 45, 60 度試験片のひずみは通常の等方性材料と同様、荷重方向ひずみ ϵ_x の方が荷重と直角方向のひずみ ϵ_y よりも大きいのに対し、15, 30 度試験片のひずみは ϵ_y の方が ϵ_x よりも大きくなる。すなわち 15, 30 度試験片では、引張方向に伸びる変位よりも幅方向に縮む変位の方が大きくなり、通常の等方性材料では見られない現象が生じる。
- 3) 45 度試験片は他の試験片に比べて特異な応力-ひずみ関係を示す。すなわち、応力-ひずみ線図の曲率が応力の増加とともに、上に凸→下に凸→上に凸と変化し、著しく延性的な挙動を示す。

なお、応力-ひずみ関係のマトリックス、繊維配向角および積層順序に対する依存性については 2.4.4 で考察する。

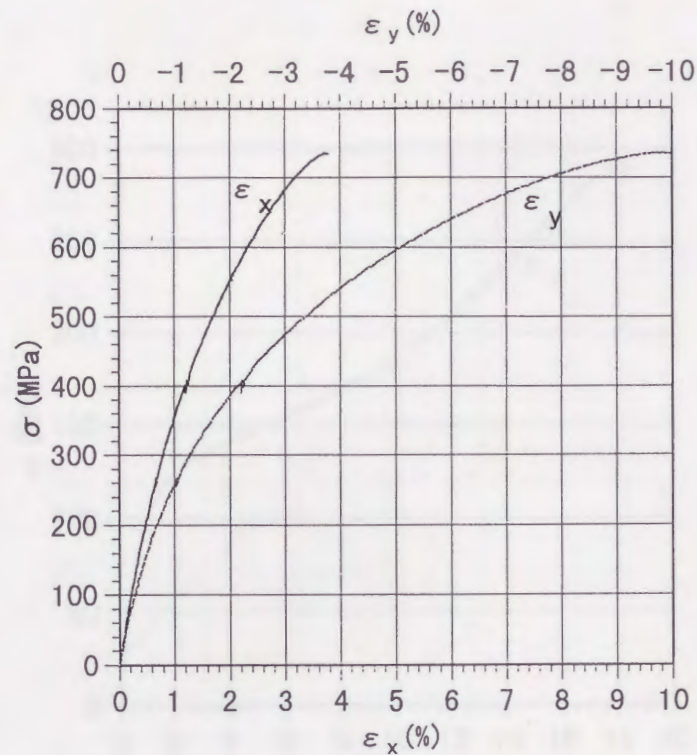


図 2.4 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (P30D 試験片)

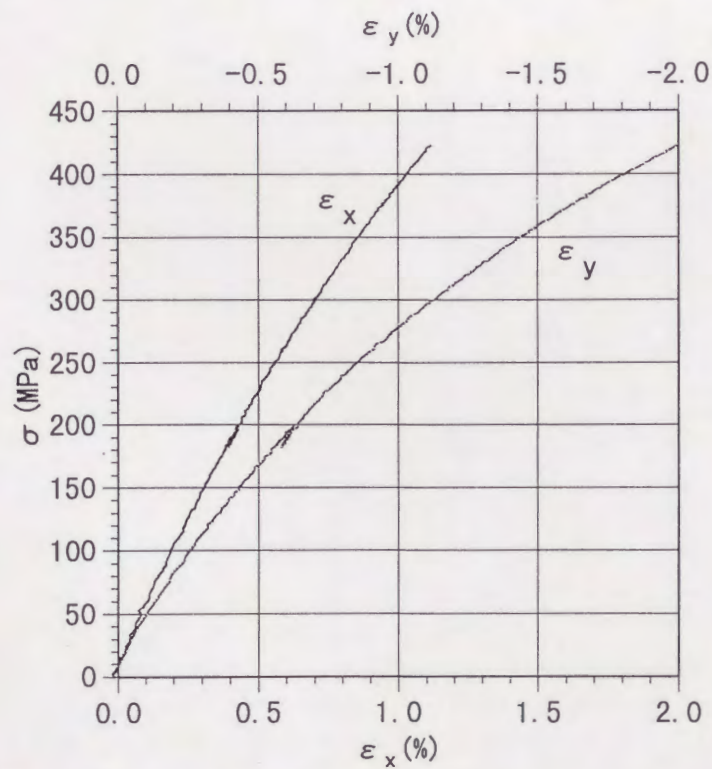


図 2.5 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (P30B 試験片)

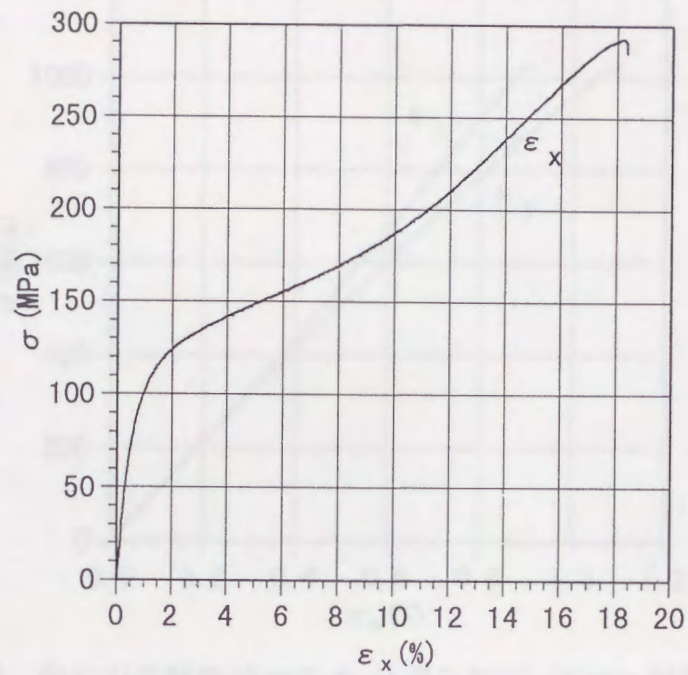


図 2.6 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (P45D 試験片)

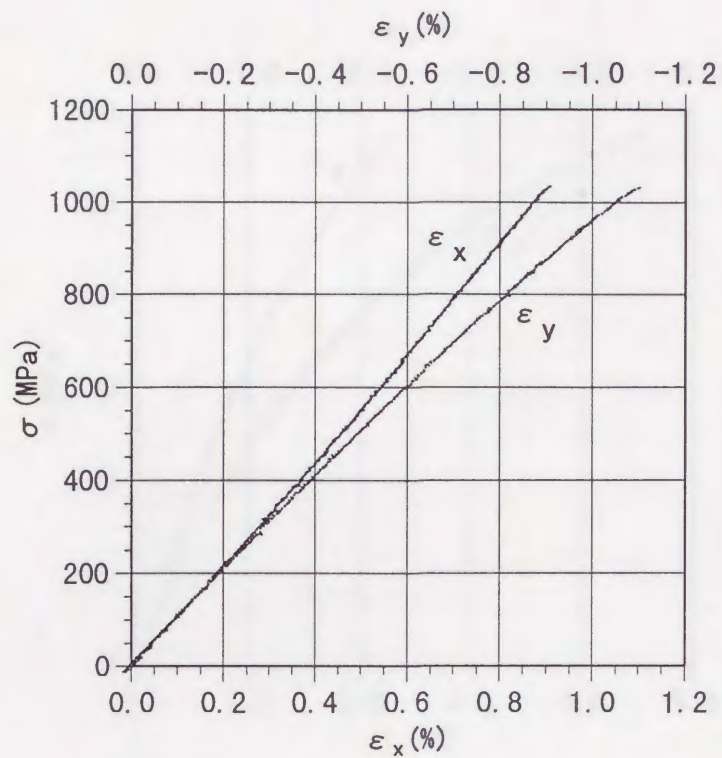


図 2.7 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E15D 試験片)

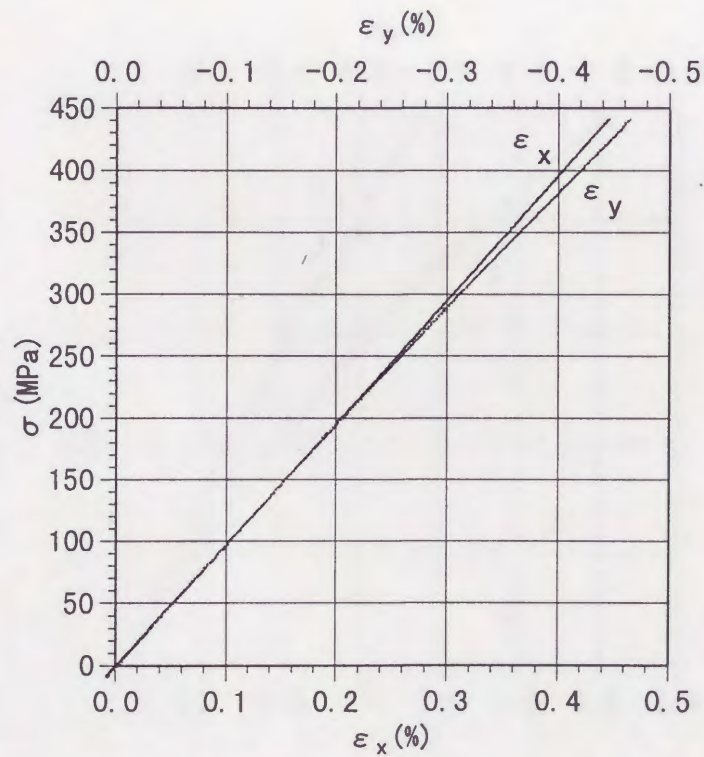


図 2.8 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E15B 試験片)

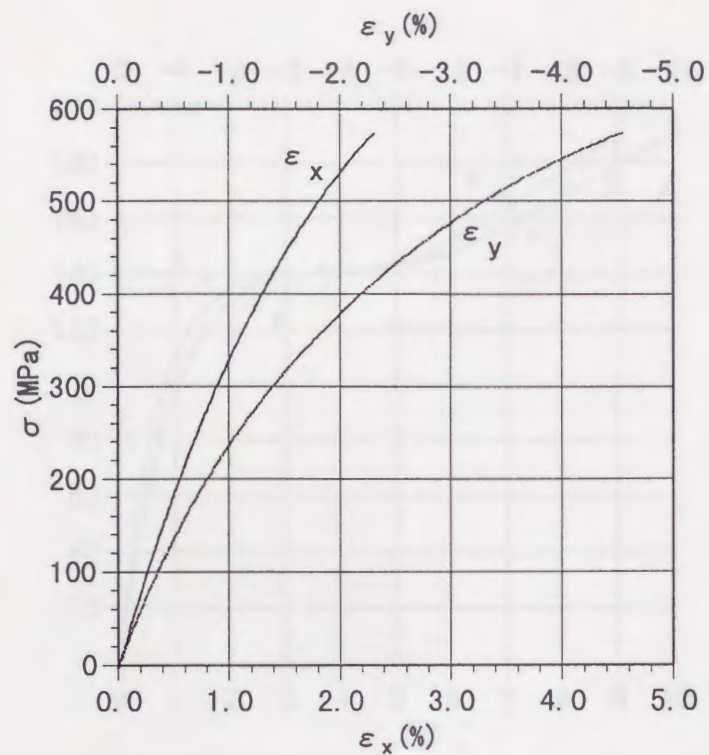


図 2.9 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E30D 試験片)

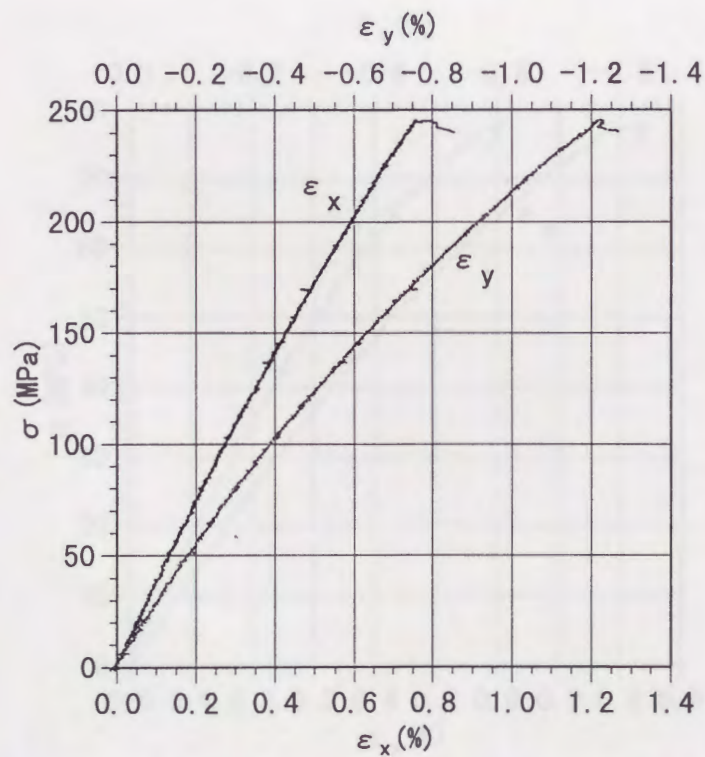


図 2.10 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E30B 試験片)

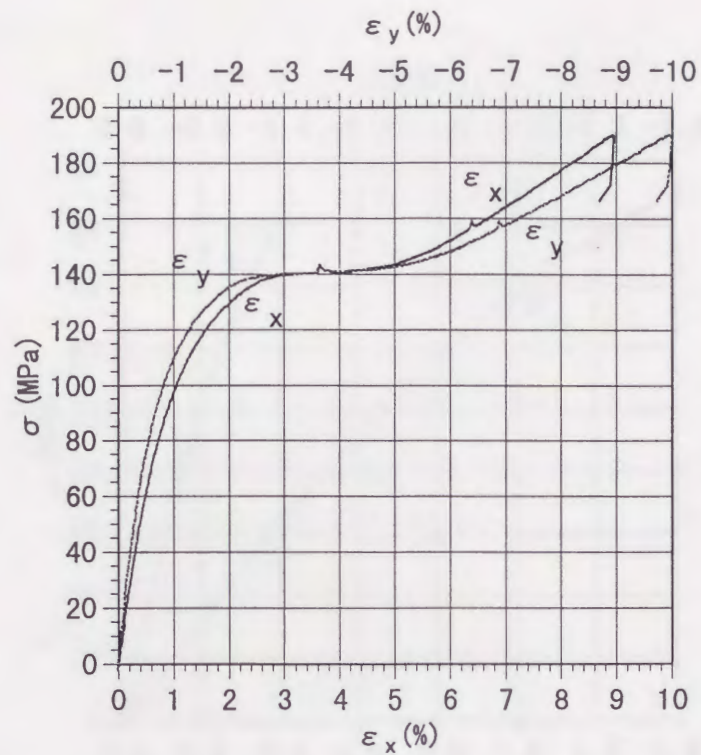


図 2.11 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E45D 試験片)

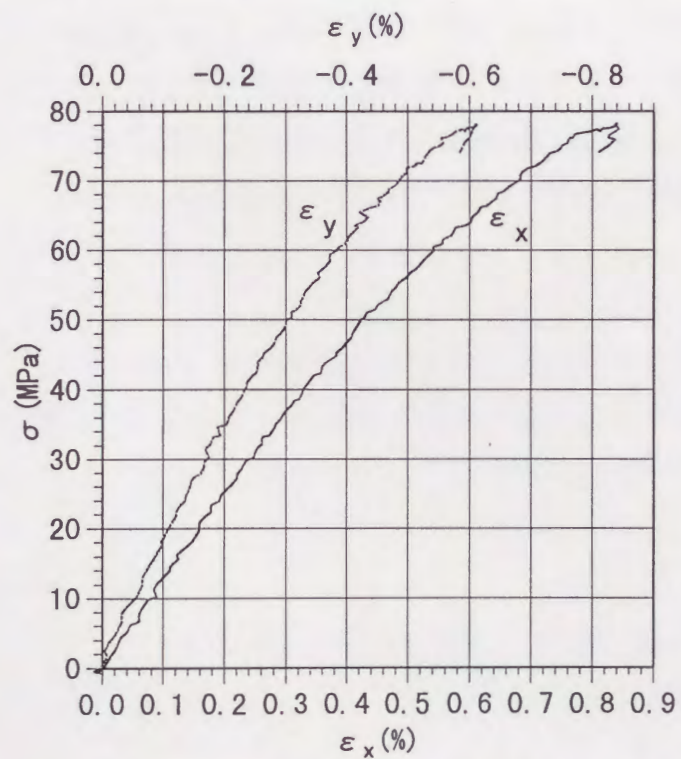


図 2.12 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E45B 試験片)

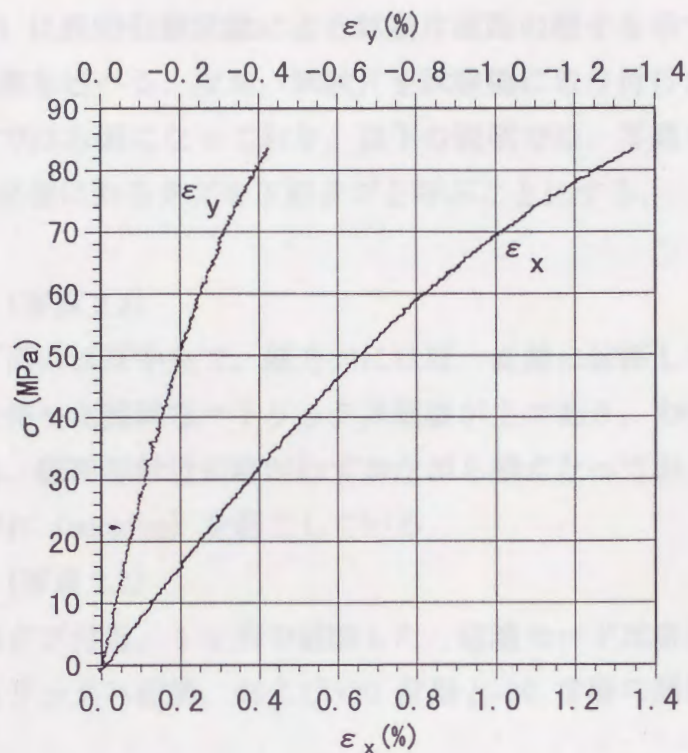


図 2.13 静的引張試験時の応力-ひずみ線図 (E60D 試験片)

2.4.3 破断の様子

写真 2.2～2.11 に静的引張試験による試験片破断の様子を示す。以下、各試験片に対する考察を述べる。なお、試験片を試験機に取り付けたときに上部に来る方が、写真では右側になっており、以下の説明では、写真で右側にあるタブを上部タブ、左側にあるタブを下部タブと呼ぶことにする。

・ P30D 試験片 (写真 2.2)

試験片はタブ間のほぼ中央で、幅方向にほぼ一直線に破断した。破壊モードは繊維破断を伴った複雑なマトリックス破壊が主であり、わずかながら剥離も観察される。破断部付近の幅がわずかながら細くなっており、金属材料でみられるくびれ (necking) を起こしている。

・ P30B 試験片 (写真 2.3)

試験片は下部タブ付近、1ヶ所で破断した。破壊モードは各層での繊維方向に沿ったマトリックス破壊、および+30 度層と-30 度層の層間における剥離である³¹⁾。

・ P45D 試験片 (写真 2.4)

試験片はタブ間のほぼ中央、1ヶ所で破断した。破壊モードは表面付近の外層部では、繊維方向に沿ったマトリックス破壊であるが、内部の層は繊維破断を伴ったマトリックス破壊である。また、破断部で顕著なくびれを生じており、これにより P45D 試験片は、破断までの伸びが他の試験片に比べて著しく大きくなると考えられる。

・ E15D 試験片 (写真 2.5)

試験片は数ヶ所で破断した。破断面の様子から、下部タブ付近の、繊維破断と剥離を伴って破壊を起こしている箇所が引張荷重によるものであり、残りの、繊維方向に沿って全層が破壊を起こしている箇所は破断時の衝撃によるものと思われる。

・ E15B 試験片 (写真 2.6)

写真では分かりにくいですが、上部タブ付近と下部タブ付近の2ヶ所で破断した。破断モードは P30B や E30B と同様に、各層で繊維に沿ったマトリックス破壊、層間で剥離を生じている。

・ E30D 試験片 (写真 2.7)

試験片は2ヶ所で破断した。上部タブ側の、幅方向にほぼ一直線に破断して

いる箇所が引張荷重によるものであり、下部タブ側の、全層が繊維方向に沿って破断している箇所は破断時の衝撃によるものと思われる。引張荷重による破断と思われる箇所の破断モードは、自由縁付近は繊維方向に沿ったマトリックス破壊が主である。中央部は幅方向にほぼ一直線に破断していることから分かるように、繊維破断を伴ったマトリックス破壊が主である。また、中央層で剥離が生じている（上部タブ側の破断部で、色が薄い部分が剥離である）。

- ・ E30B 試験片（写真 2.8）

試験片はタブ間の中央付近、1ヶ所で破断した。破断モードは P30B とほぼ同様で、各層で繊維方向に沿ったマトリックス破壊、層間で剥離が生じている。

- ・ E45D 試験片（写真 2.9）

試験片は下部タブ内、1ヶ所で破断した。破断面がタブ内にあるため、破断モードを明確に述べることはできない。なお、同じ配向角、積層順序でマトリックスが PEEK である P45D 試験片では顕著なくびれが生じたが、E45D では、ほとんどくびれは生じなかった。

- ・ E45B 試験片（写真 2.10）

試験片はタブ間の中央付近、1ヶ所で破断した。破断モードは P30B、E30B とほぼ同様で、各層で繊維に沿ったマトリックス破壊、層間で剥離が生じている。

- ・ E60D 試験片（写真 2.11）

試験片はタブ間のほぼ中央、1ヶ所で破断した。写真では分かりにくいですが、全層が繊維方向に沿って破断を生じている。

P30D と P30B、E30D と E30B の比較から、同じマトリックス、繊維配向角であっても、積層順序により破断のモードが全く異なることが分かる。すなわち、P30D や E30D の Distributed Ply の方は、幅方向にほぼ一直線に切れることから、繊維破断を伴う複雑なマトリックス破壊が生じているのに対し、P30B や E30B の Blocked Ply の方は、各層で繊維方向に沿ったマトリックス破壊、層間で剥離が生じている。



P30-D (static)

写真 2.2 静的引張試験による破断の様子 (P30D 試験片)



P30-B (static)

写真 2.3 静的引張試験による破断の様子 (P30B 試験片)



P45-D (static)

写真 2.4 静的引張試験による破断の様子 (P45D 試験片)



E15-D (static)

写真 2.5 静的引張試験による破断の様子 (E15D 試験片)



E15-B (static)

写真 2.6 静的引張試験による破断の様子 (E15B 試験片)



E30-D (static)

写真 2.7 静的引張試験による破断の様子 (E30D 試験片)



E30-B (static)

写真 2.8 静的引張試験による破断の様子 (E30B 試験片)



E45-D (static)

写真 2.9 静的引張試験による破断の様子 (E45D 試験片)



E45-B (static)

写真 2.10 静的引張試験による破断の様子 (E45B 試験片)



E60-D (static)

写真 2.11 静的引張試験による破断の様子 (E60D 試験片)

2.4.4 総括的な考察

2.4.4.1 応力-ひずみ関係のマトリックス依存性

応力-ひずみ関係のマトリックス依存性を調べるために、図 2.14(a)に P45D と E45D の応力-ひずみ線図をあわせて描いたものを、また図 2.14(b)に P30D と E30D の応力-ひずみ線図をあわせて描いたものをそれぞれ示す。

マトリックスの違いに関わらず、応力-ひずみ線図は同じような傾向を示すが、Epoxy の方が破断までの応力、伸びともに小さい。このことを定量的に調べるために、図 2.15 に PEEK 試験片の引張強度、破断ひずみ、剛性を 1 としたときの Epoxy 試験片がとる値を示す。引張強度、破断ひずみ、剛性ともに Epoxy 樹脂での低下が見られるが、特に破断ひずみは PEEK の約半分まで低下している。逆に言えば、PEEK は Epoxy の倍近い破断ひずみを持つことが分かり、このことから PEEK 樹脂が Epoxy 樹脂に比べ、高い靱性を持つことが分かる³²⁾。

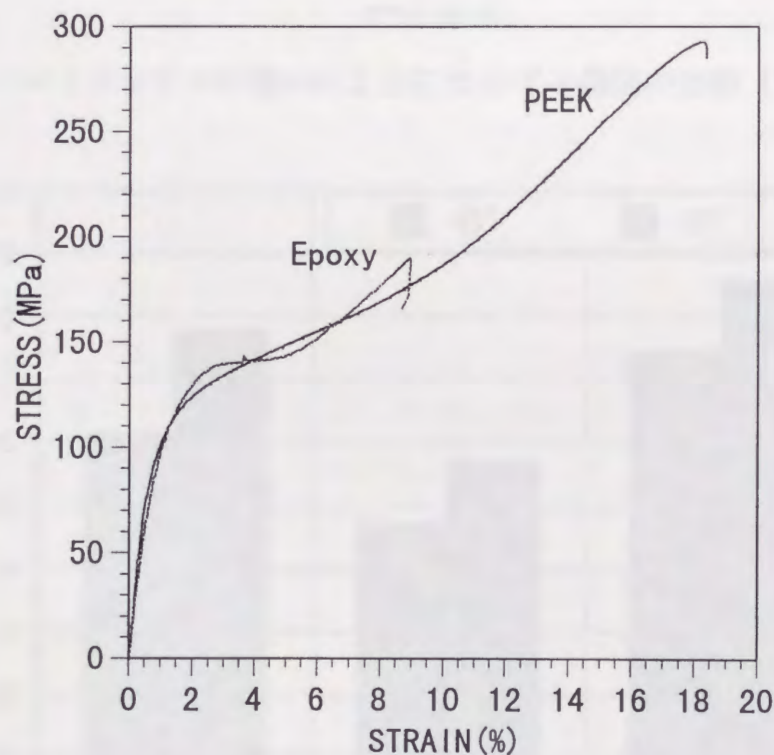


図 2.14(a) マトリックスの違いによる応力-ひずみ線図の比較 (45 度試験片)

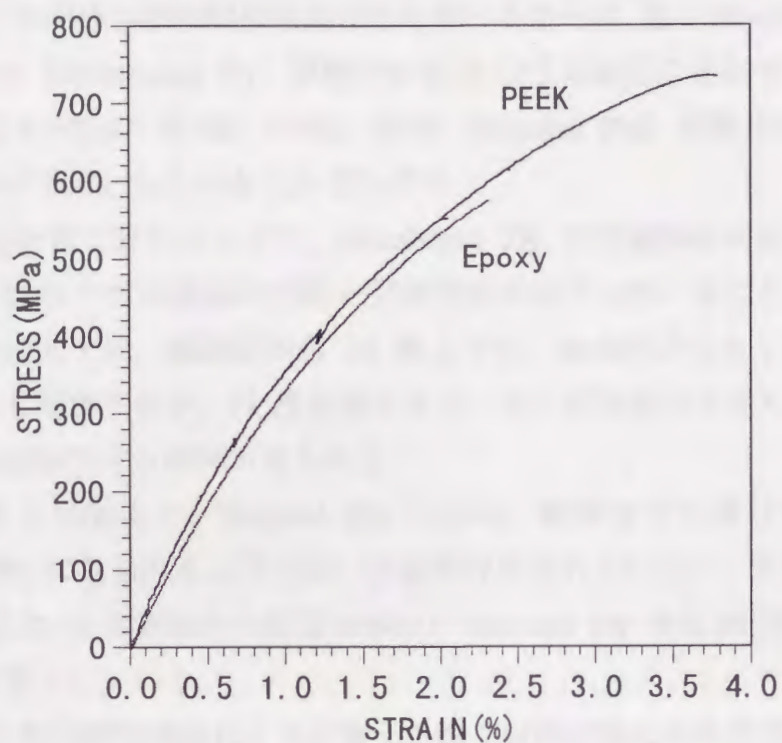


図 2.14(b) マトリックスの違いによる応力-ひずみ線図の比較 (30 度試験片)

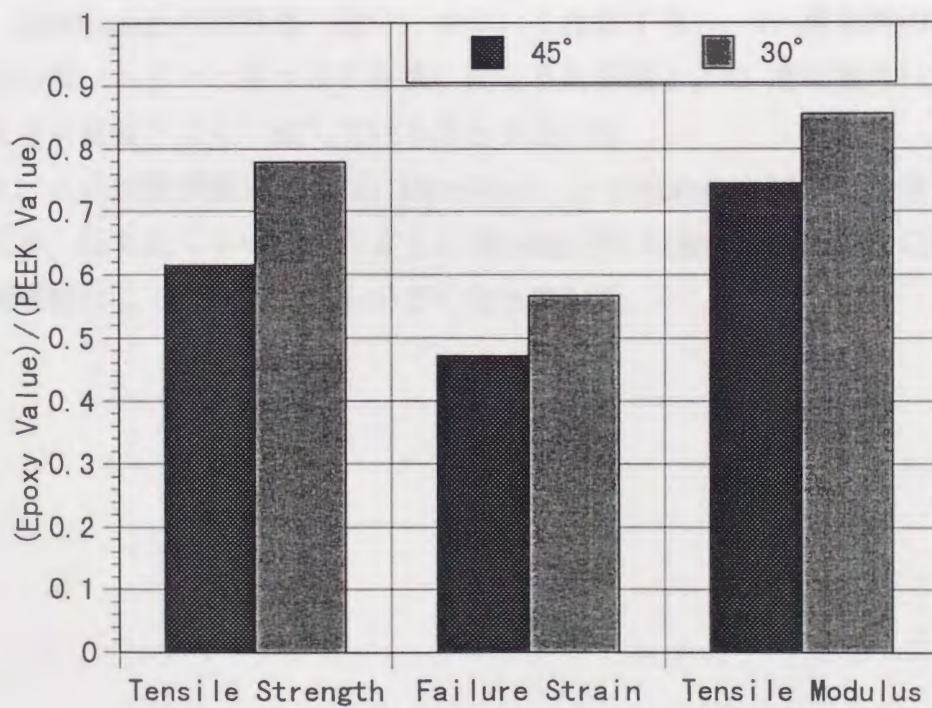


図 2.15 マトリックスによる材料特性の違い
(PEEK に対する Epoxy の比)

2.4.4.2 応力-ひずみ関係の繊維配向角依存性

応力-ひずみ関係の繊維配向角依存性を調べるために、図 2.16(a)に E15D, E30D, E45D, E60D (Distributed Ply) 試験片の応力-ひずみ線図をあわせて描いたものを、また図 2.16(b)に E15B, E30B, E45B (Blocked Ply) 試験片の応力-ひずみ線図をあわせて描いたものをそれぞれ示す。

図 2.16(a)を見て分かるように、Distributed Ply では繊維配向角が増加することにより、応力-ひずみ線図の勾配と引張強度が低下していることが分かる。破断ひずみに関しては、繊維配向角 45 度までは、配向角が大きくなるにつれて破断ひずみも増加するが、45 度を越えると、逆に配向角が大きくなるにつれて破断ひずみは減少する傾向が見られる。

一方、図 2.16(b)より、Blocked Ply の方は、破断までの伸びが小さいため Distributed Ply に見られるような強い非線形性は表れていない。また、Distributed Ply で見られた 45 度試験片の顕著な伸びが Blocked Ply では 30 度試験片とほぼ同じ値まで低下している。

図 2.17 に古典積層理論により計算した斜交対称積層板の強度値と実験結果をあわせて示す。古典積層理論の計算に用いた材料定数は 2.4.1 で述べた表 2.7 の値を用い、破損則には最大応力説、最大ひずみ説、Tsai-Hill 説の 3 種類を用いた。Distributed の実験値（図中、◆印）と比較すると、15 度以外の試験片は最大応力説（あるいは最大ひずみ説）による計算値と、15 度試験片は Tsai-Hill 説による計算値とよく一致していることが分かる。

また、古典積層理論によれば、Distributed と Blocked の強度値は等しくなるはずだが、図を見ても明らかなように Blocked Ply の強度値（図中、□印）は古典積層理論による予測値よりも小さくなっている。

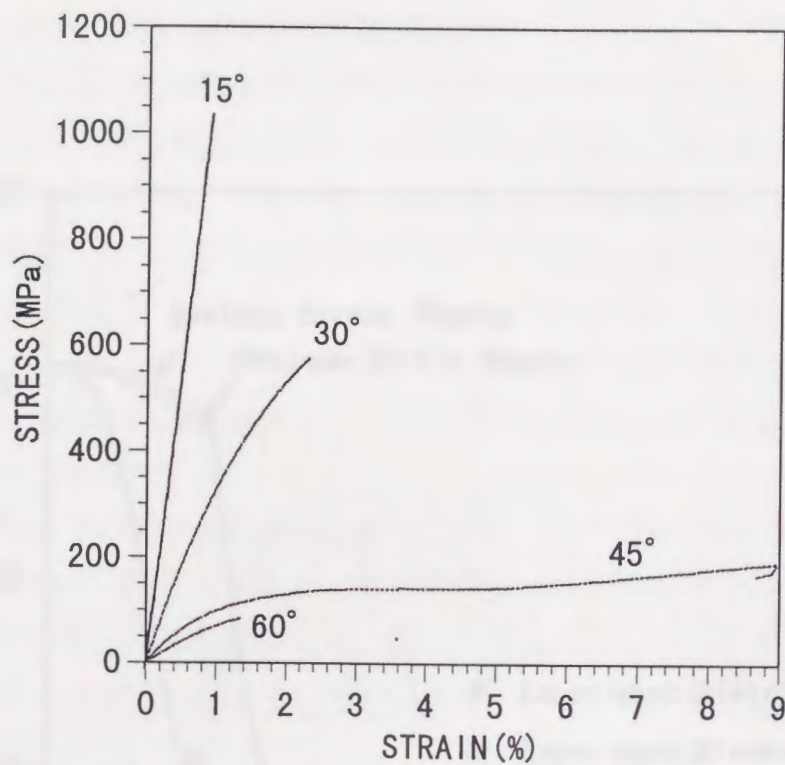


図 2.16(a) 繊維配向角の違いによる応力-ひずみ線図の比較 (Distributed Ply)

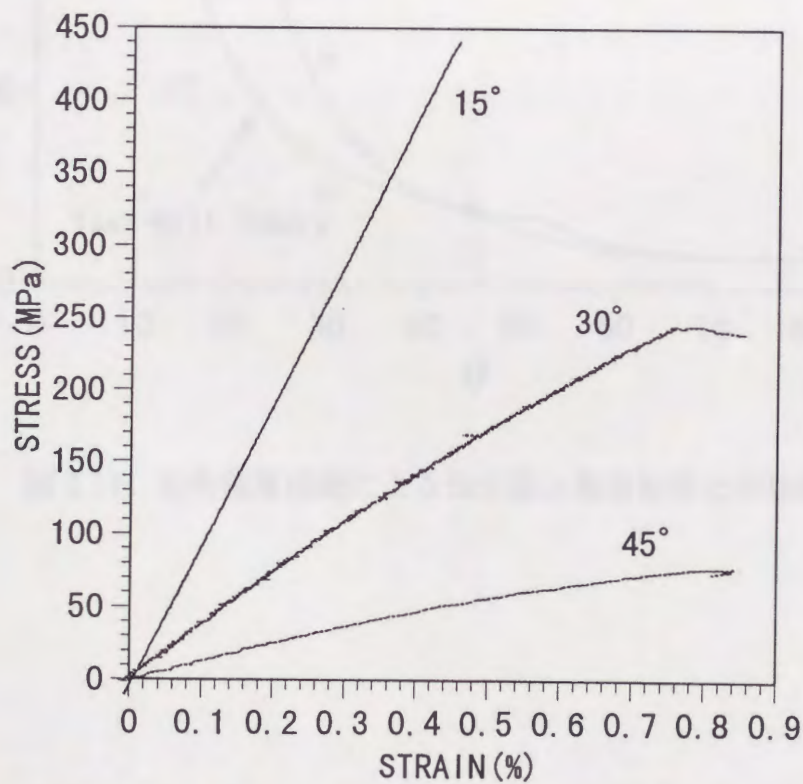


図 2.16(b) 繊維配向角の違いによる応力-ひずみ線図の比較 (Blocked Ply)

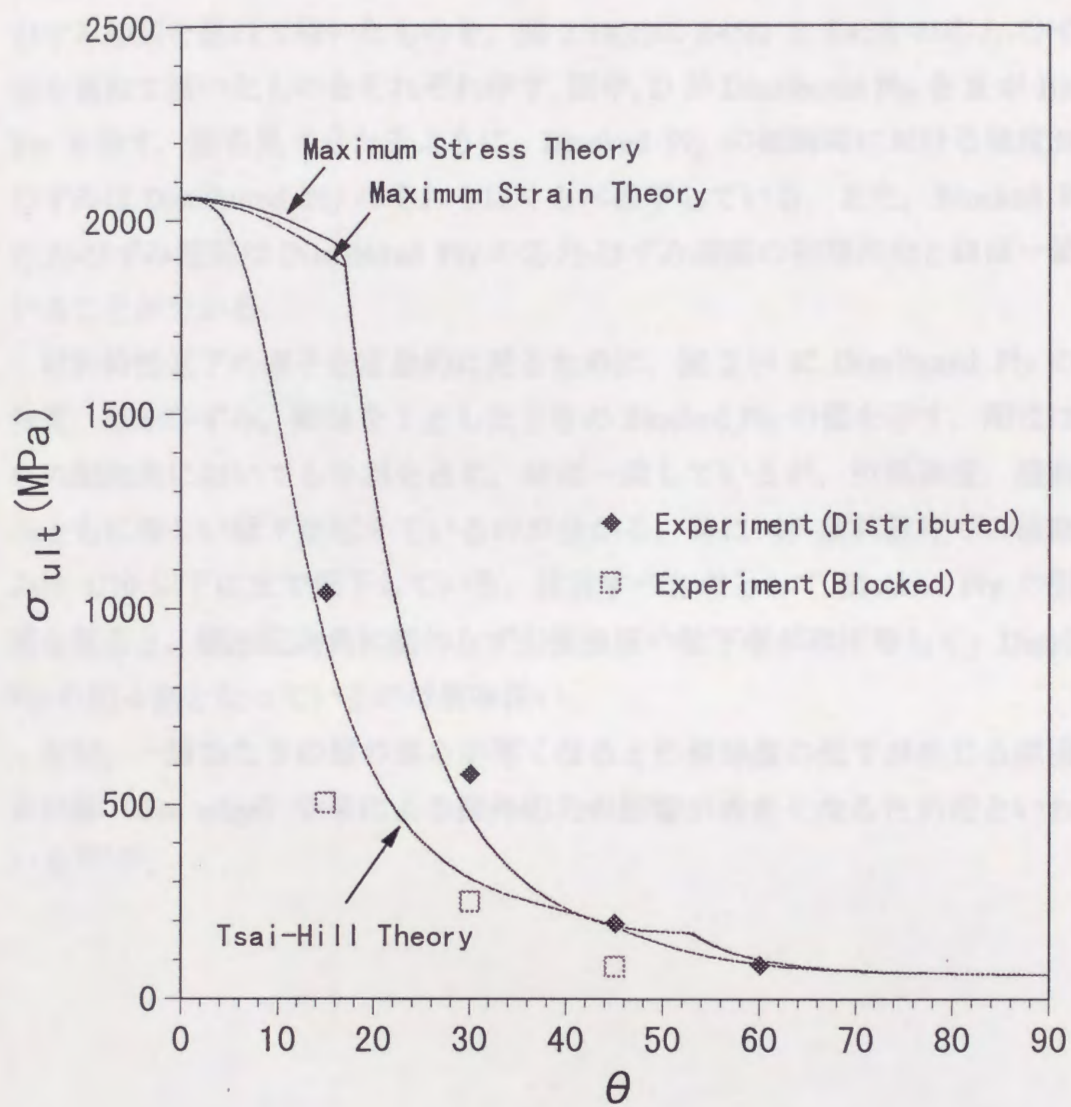


図 2.17 古典積層理論による強度値と実験結果との比較

2.4.4.3 応力-ひずみ関係の積層順序依存性

応力-ひずみ関係の積層順序依存性を調べるために、図 2.18(a)に E15D と E15B の応力-ひずみ線図を重ねて描いたものを、図 2.18(b)に E30D と E30B の応力-ひずみ線図を重ねて描いたものを、図 2.18(c)に E45D と E45B の応力-ひずみ線図を重ねて描いたものをそれぞれ示す。図中、D が Distributed Ply を B が Blocked Ply を示す。図を見て分かるように、Blocked Ply の破断時における強度およびひずみは Distributed Ply のそれらにくらべ低下している。また、Blocked Ply の応力-ひずみ線図は Distributed Ply の応力-ひずみ線図の初期部分とほぼ一致していることが分かる。

材料特性低下の様子を定量的に見るために、図 2.19 に Distributed Ply の引張強度、破断ひずみ、剛性を 1 としたときの Blocked Ply の値を示す。剛性はいずれの配向角においても 9 割を占め、ほぼ一致しているが、引張強度、破断ひずみともに著しい低下が起きているのが分かる。特に 45 度試験片での破断ひずみは 1/10 以下にまで低下している。注目すべき点として Blocked Ply の引張強度を見ると、繊維配向角に関わらず引張強度の低下率がほぼ等しく、Distributed Ply の約 4 割となっているのは興味深い。

なお、一層あたりの層の厚さが厚くなると引張強度の低下が生じる原因は、自由縁 (free edge) 効果による面外応力の影響が大きくなるためだといわれている^{33)~35)}。

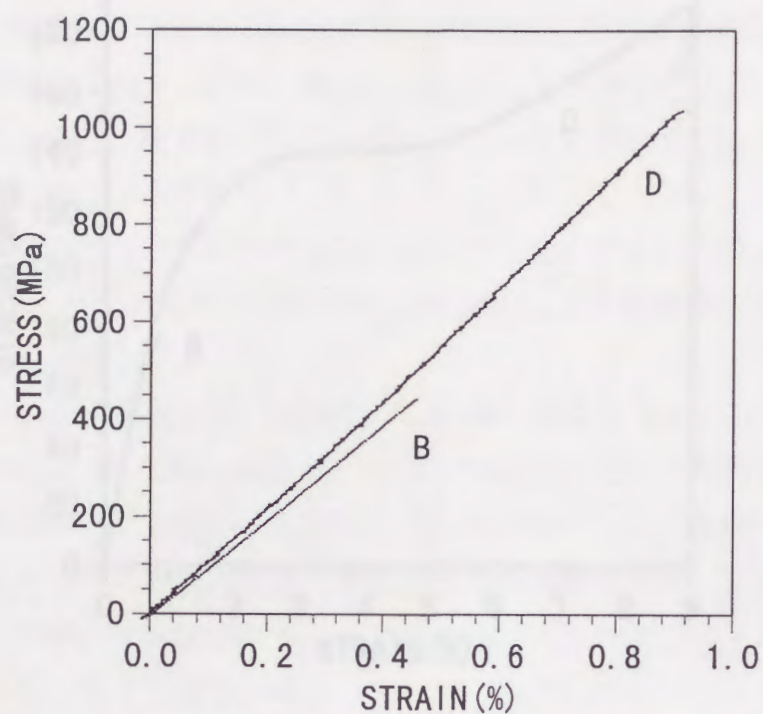


図 2.18(a) 積層順序の違いによる応力-ひずみ線図の比較 (15 度試験片)

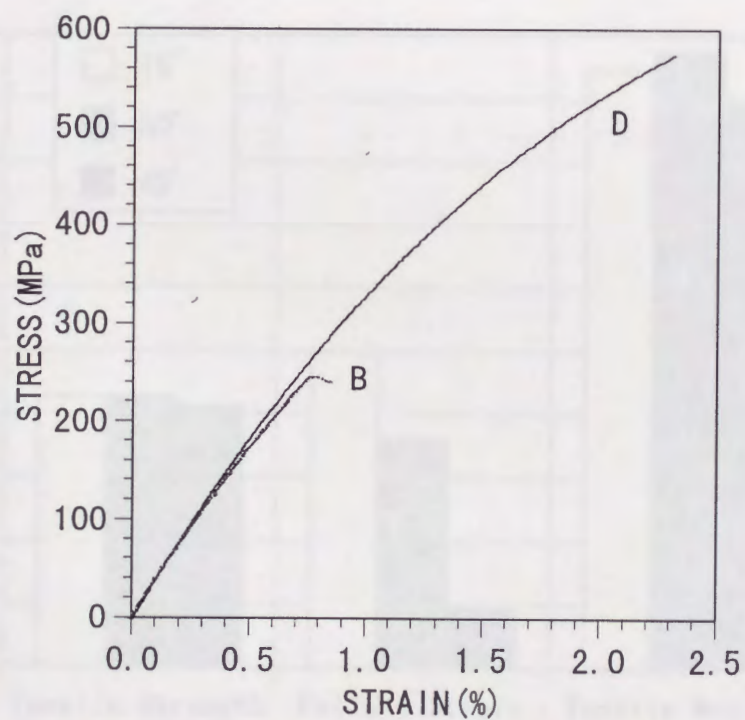


図 2.18(b) 積層順序の違いによる応力-ひずみ線図の比較 (30 度試験片)

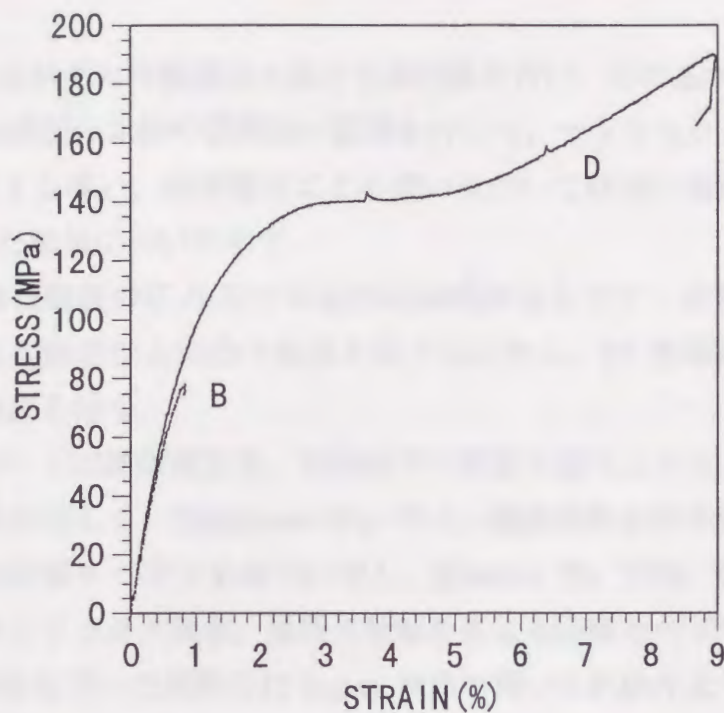


図 2.18(c) 積層順序の違いによる応力-ひずみ線図の比較 (45 度試験片)

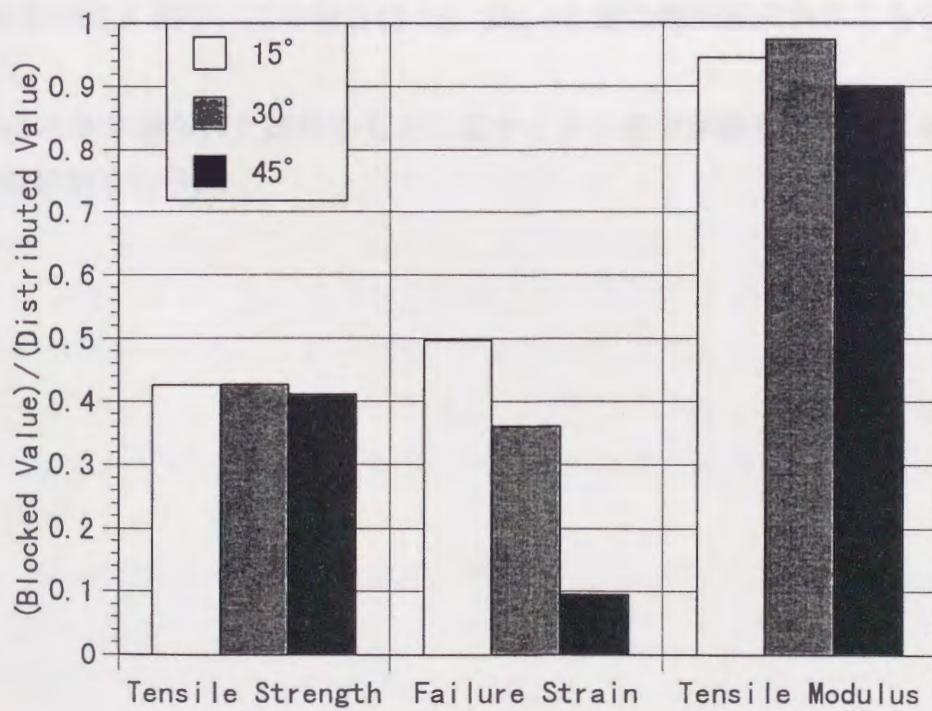


図 2.19 積層順序による材料特性の違い
(Distributed に対する Blocked の比)

2.5 結言

この章では斜交対称積層板の静的引張試験を行い、その基本的特性を調べた。応力-ひずみ線図の比較や破断面の観察を行って、マトリックスによる違い、繊維配向角による違い、積層順序による違いについて詳細に検討した。以下に本章で得られた結果について示す。

- 1) 斜交対称積層板の応力-ひずみ線図は非線形性を示す。ただし、30, 45, 60 度試験片が顕著な上に凸の曲線を描くのに対し、15 度試験片はわずかに下に凸の曲線を描く。
- 2) 破断のモードは繊維配向角、積層順序の影響を強く受ける。特に積層順序による効果は著しく、Distributed Ply では、繊維破断を伴う複雑なマトリックス破壊の破断モードであるのに対し、Blocked Ply では、各層で繊維方向に沿ったマトリックス破壊、層間で剥離を生じる破断モードである。
- 3) PEEK 樹脂を用いた試験片は Epoxy 樹脂を用いた試験片よりも引張強度、破断ひずみともに大きな値を示す。
- 4) 繊維配向角は特に試験片の剛性、強度に影響を及ぼし、配向角が大きくなると剛性、強度ともに低下する。
- 5) 積層順序は特に試験片の強度に影響を及ぼす。Blocked の強度は Distributed の強度の約 4 割で、この割合は 15, 30, 45 度の繊維配向角によらずほぼ等しい。

次章では本章で得られた結果をもとに低サイクル疲労試験を行い、本章の結果との比較検討を行う。

第3章 低サイクル疲労試験

3.1 緒言

本章では、前章で行った静的引張試験結果をもとに、斜交対称積層板の低サイクル疲労試験を行う。本研究で扱う低サイクル疲労は破断までの繰返し数（疲労寿命）が $10 \sim 10^4$ となるものを対象とする。これは本研究で用いた試験片では、静的引張強度の 70% 以上の応力レベルに相当する。試験は一般によく行われている荷重制御の片振り引張で行った。繰返し負荷時の応力-ひずみ関係を調べるために、ロードセルと伸び計により応力-ひずみの測定を行った。また、繰返し負荷による積層板内部の損傷進展の様子を調べるために超音波探傷試験も行った。

本章の内容としては、まず、疲労試験に用いた試験片および試験システムについて説明する。つぎに疲労試験の結果を応力-ひずみ線図、破断の様子、超音波探傷、S-N 線図でまとめ、それらに対する考察を行う。最後に静的引張試験結果との比較を行い、疲労破壊のメカニズムについて考察する。

3.2 試験片

3.2.1 試験片の種類

低サイクル疲労試験に用いた試験片の種類は、2.2.1 で説明した静的引張試験に用いたものと同じである。ただし、疲労試験は一本あたりの試験に多大な時間を要することを考え、重点的に試験を行う試験片を定めた。重点的に行う試験片は繊維配向角が 30 度で積層順序が Distributed のものにした。これは次章で行う数値シミュレーションを考慮してのことである。すなわち、静的引張試験の応力-ひずみ線図があまり特異な形でなく、単純な挙動を示しているものを選んだ。

表 3.1 に疲労試験に用いた試験片の種類および本数を示す。表中の試験片の名称の決め方は静的引張の時と同じである。すなわち、P が PEEK, E が Epoxy, 数字が繊維配向角, D, B が積層順序 ($D \cdots [+ \theta / - \theta]_{4s}$, $B \cdots [+ \theta_1 / - \theta_2]_s$) を表す。

表 3.1 疲労試験に用いた試験片の種類および本数

試験片名	本数
P30D	21
P30B	4
E15D	3
E30D	8
E30B	6
E45D	7
E45B	4
E60D	3

3.2.2 試験片の形状および寸法

試験片の形状および寸法は 2.2.2 で説明した静的引張試験のときと同じである（図 2.2 参照）。ただし，図 2.2(c)に示すひずみゲージ貼り付け位置には 2 軸ではなく，単軸のひずみゲージ（共和電業製 KFE-5-120-C1）を接着した。単軸ゲージは初期負荷の応力-ひずみ線図から試験片の剛性を求めるために用い，繰返し負荷時のひずみ測定には使用していない。この理由は，高応力レベルでの繰返し負荷試験の場合，ひずみゲージ自身が疲労してしまい信頼のできるデータが得られないからである。よって，繰返し負荷時のひずみは，伸び計（MTS 製，634.12F-24，ゲージ長 25mm）を用いて測定した。

3.3 試験方法

3.3.1 システム構成

本研究で用いた試験システムの概要を図 3.1 に示す。疲労試験のシステムは主に次の 5 つから成る。

- 1) 疲労試験装置
- 2) 荷重およびひずみ測定装置
- 3) リアルタイム端面観察および録画装置
- 4) 超音波探傷装置
- 5) 端面観察および撮影装置

以下に，各装置の機器内訳，および概要を述べる。

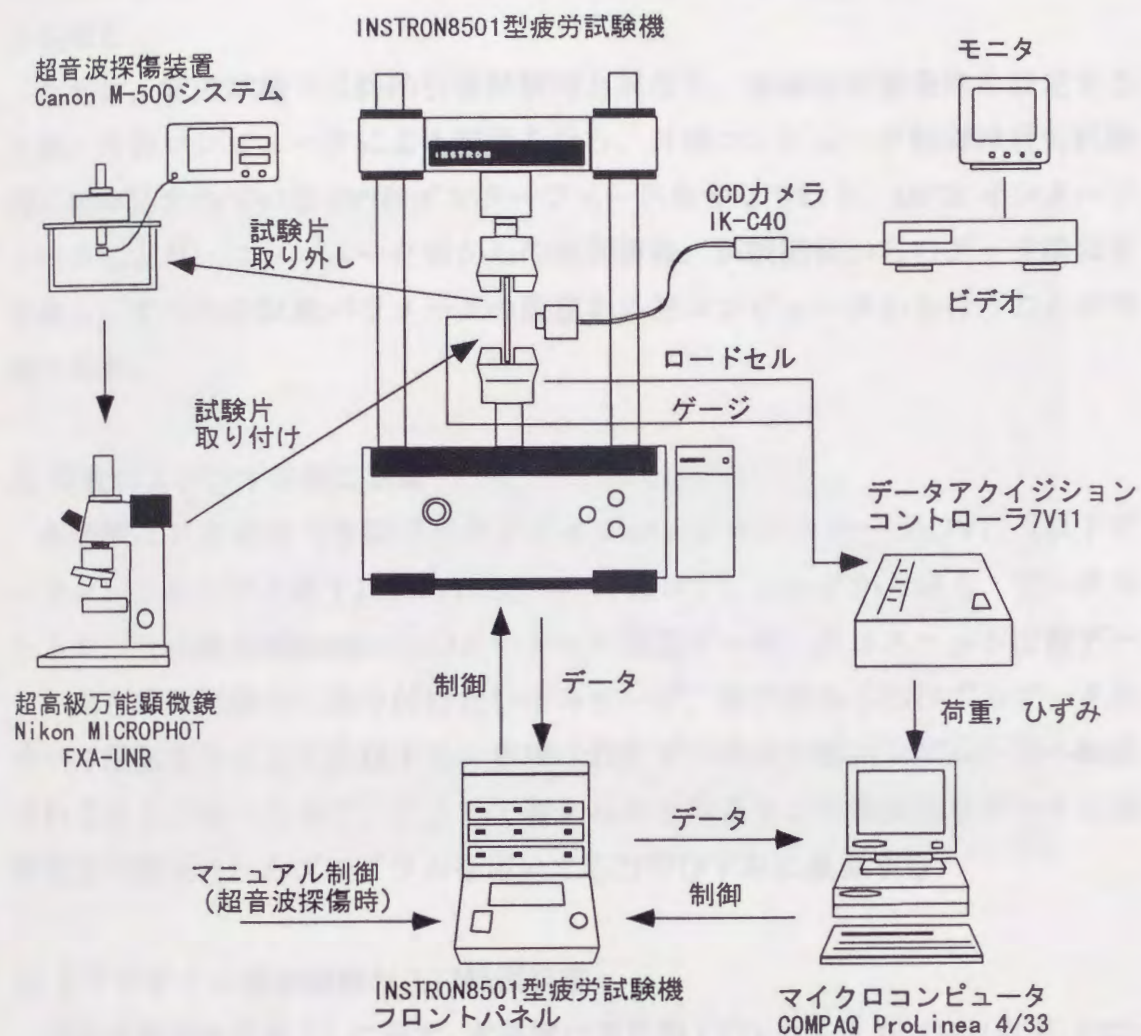


図 3.1 試験システム概要

1) 疲労試験装置

疲労試験装置は静的引張の時に用いたものと同じである（概観は写真 2.1 参照）。すなわち，デジタル制御油圧サーボ疲労試験機（INSTRON 社製，8501 型）と外部コンピュータ（コンパック製マイクロコンピュータ，ProLinea 4/33）から成る。

ただし，疲労試験では静的引張試験時と異なり，複雑な荷重条件を設定するため，外部コンピュータによる制御を行う。外部コンピュータ制御は疲労試験機に組み込まれている GPIB インターフェースを介して行う。GPIB インターフェースにより，コンピュータ側からの制御情報，試験機側からのデータ情報を交換し，すべての試験パラメータの設定を外部コンピュータから行うことが可能である。

2) 荷重およびひずみ測定装置

本装置は日本電気三栄製データアクリジションコントローラ 7V11（以下データコントローラと略す）と 1)で述べた外部コンピュータから成る。データコントローラは疲労試験機からのロードセル荷重データ，クロスヘッド位置データ，ならびに試験片に取り付けたひずみゲージ，伸び計からのひずみデータをすべて電気信号として集積する。集積されたデータは外部コンピュータへ転送されるようになっており，こうして蓄えられた荷重などの電気信号データは本研究室で開発されたプログラムを用いて応力やひずみに換算する。

3) リアルタイム端面観察および録画装置

本装置概観を写真 3.1 に示す。本装置は東芝製 CCD カメラ IK-C40（以下，CCD カメラと略す），三菱製ビデオカセットレコーダ HV-S21（以下，ビデオと略す）およびソニー製カラーモニタ PVM-9020（以下，モニタと略す）から成る。本装置は負荷中の試験片端面の様子を CCD カメラでとらえ，それをモニタに表示させることで，リアルタイムに端面の損傷（マトリックスクラック，層間剥離など）を観察するものである。またビデオに録画することによって，損傷進展の様子を試験終了後に追跡することが可能である。



写真 3.1 リアルタイム端面観察および録画装置

4) 超音波探傷装置

本装置概観を写真 3.2 に示す。本装置は次の 6 つの機器により構成されている。

- i) キヤノン製 超音波探傷器 M-500 A
- ii) キヤノン製 自動操作装置 M-500 MS
- iii) キヤノン製 自動操作制御装置 M-500 2SC
- iv) キヤノン製 画像処理装置 M-500 IP
- v) 神鋼電機製 カラーハードコピー装置 CHC34
- vi) 日本電気製 カラーモニタ PC-8853n

本装置のシステム構成を図 3.2 に示す。本装置は超音波により試験片内部の損傷の可視化を行うためのものである。本装置の探傷方式は反射法であり、自動操作装置を用いて精度の良い探傷を行うことができる。超音波探傷器より発せられた超音波ビームが、試験片内部の損傷部で反射し、その反射エコーが時間-振幅線図 (A スコープ) として表示される。さらにそれを画像処理装置を用いて計算処理することで、損傷を可視化した画像 (C スコープ) が表示される。C スコープ画像は損傷探傷中、モニタ上にリアルタイムに表示され、探傷結果はハードコピーとして出力することが可能である。

5) 端面観察および撮影装置

本装置の概観を写真 3.3 に示す。本装置は倉敷化工製卓上型防振台上に設置されたニコン製万能写真顕微鏡 MICROPHOTO FXA-UNR から成る。本装置により、試験片に生じるマトリックスクラック、層間剥離などの微視的な損傷を詳細に観察することが出来る。また顕微鏡に付属のカメラ (ニコン製, FX-35DX) により、寸法データ等を写しこんだ写真撮影も可能となっている。

以上が疲労試験で用いる試験システムである。



写真 3.2 超音波探傷装置

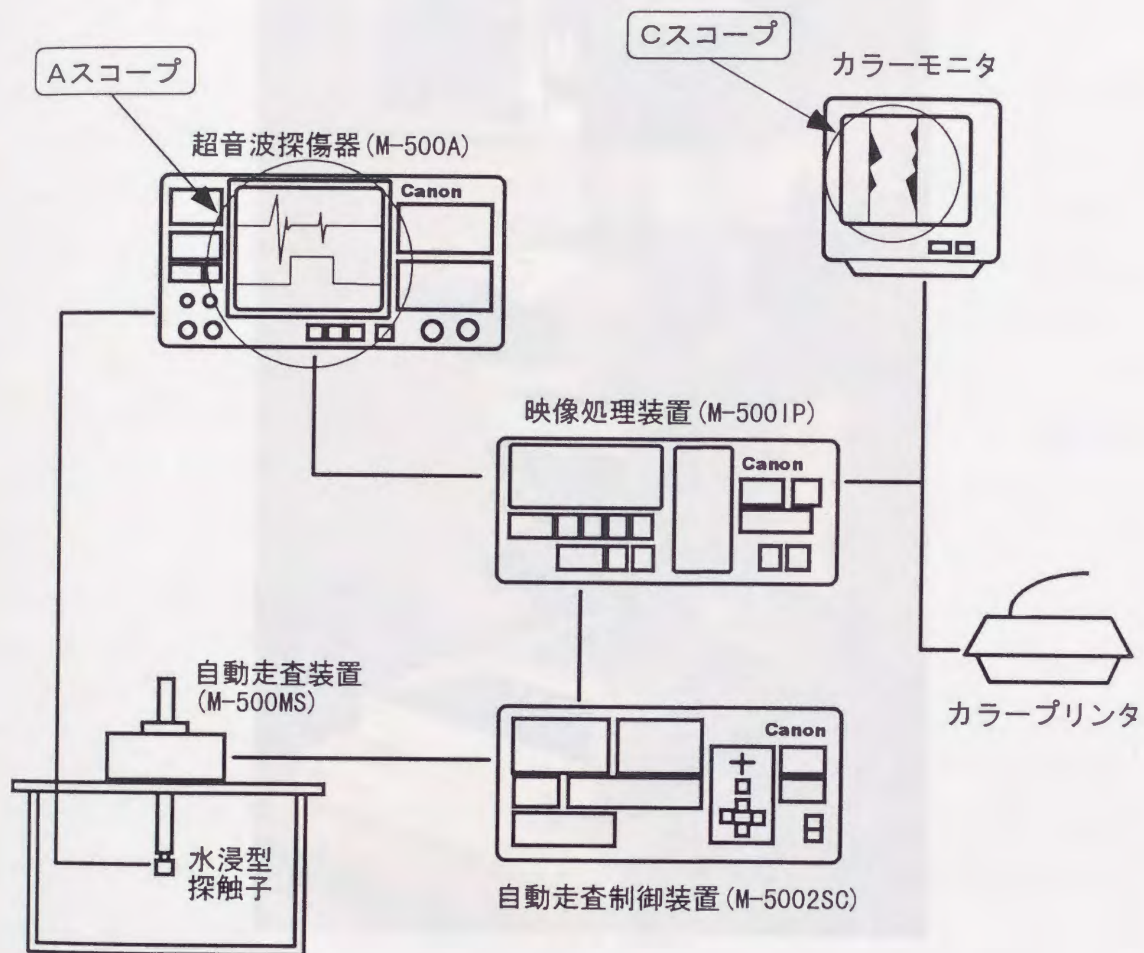


図 3.2 超音波探傷装置システム構成



写真 3.3 端面観察および撮影装置

3.3.2 試験手順

本研究で行った疲労試験は応力-ひずみ測定試験と超音波探傷試験とに分かれる。以下、それぞれの試験手順について述べる。

3.3.2.1 応力-ひずみ測定試験

試験前の準備は 2.3.2 で説明した静的引張の時と全く同じであり、試験手順も静的引張試験の手順とほぼ同じである。異なるのは外部コンピュータ（コンパック）により、試験機を制御する点である。試験条件（荷重振幅、周波数、繰返し数など）を設定したファイルにより試験機を自動制御することが出来るプログラムを作成し、このプログラムを用いて応力-ひずみ測定試験を行った。これにより、試験時の操作ミスや労力を大幅に軽減することが出来た。

応力-ひずみ測定試験における試験システム全景を写真 3.4 に示し、試験部詳細を写真 3.5 に示す。

3.3.2.2 超音波探傷試験

試験前の準備は上と同様、静的引張試験時とほぼ同じである。ただし、超音波探傷時にはひずみの測定を行わないため、ひずみゲージを貼り付けていない。この理由は、本研究で用いた超音波探傷が水浸法であるため、探傷時に試験機から試験片を取り外す必要があるからである。疲労試験における応力-ひずみ測定は処女試験片から連続して行うことを目的としているため、超音波探傷の際は、ひずみの測定は行わず、損傷追跡のみを行った。

超音波探傷時は静的引張試験と同様、疲労試験機付属のコントロールパネルによるマニュアル制御で試験を行う。具体的な手順を以下に示す。

- 1) 繰返し負荷を加える前に一度、超音波探傷を行い、処女試験片の様子を調べておく。
- 2) 試験片を試験機に取り付け、コントロールパネルから荷重波形、繰返し数などを設定し、試験を開始する。
- 3) 2)で設定した繰返し数になると試験機が停止するので、試験片を取り外して、超音波探傷を行う。
- 4) 超音波探傷の後、万能顕微鏡を用いて試験片端面の観察を行う。必要ならばこのとき端面の写真撮影も行う。

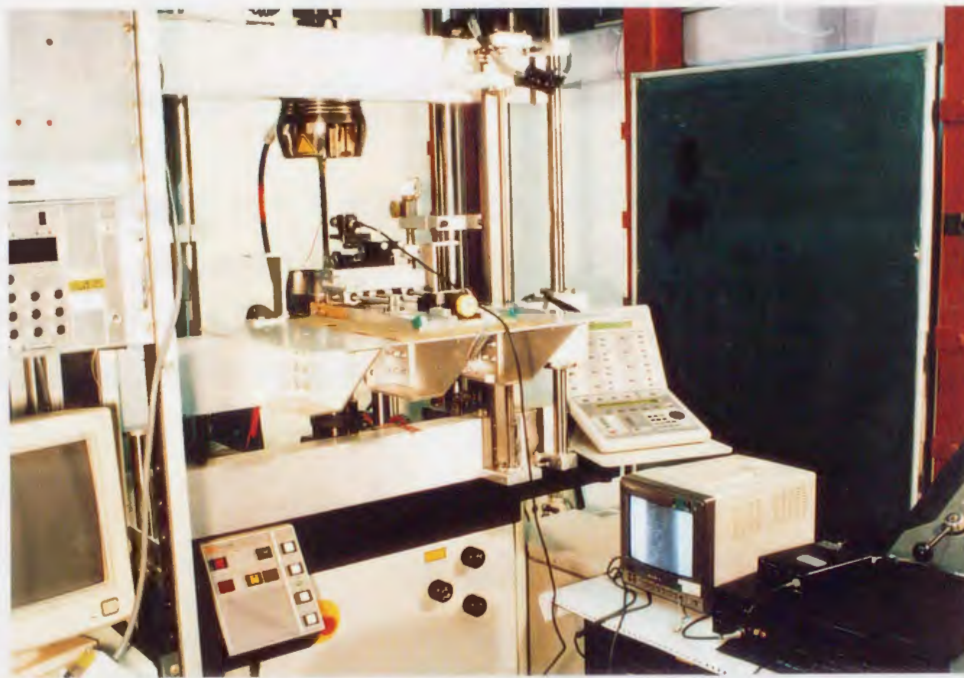


写真 3.4 応力-ひずみ測定試験におけるシステム全景

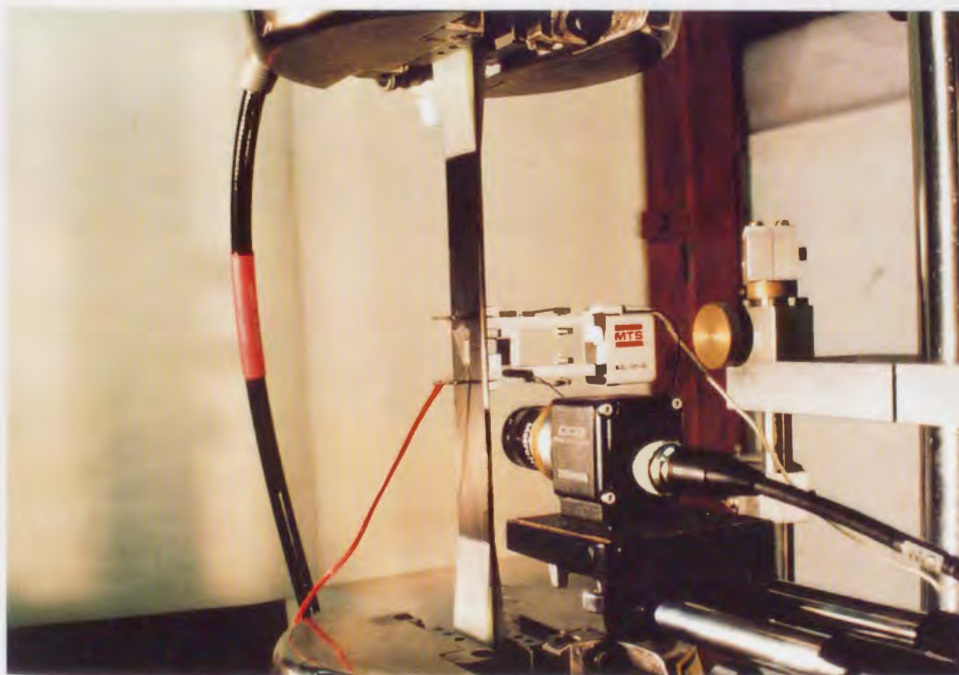


写真 3.5 試験部詳細

5) 再び、試験機に試験片を取り付け、以下、試験片が破断するまで 2)~4)の操作を繰り返す。

なお、超音波探傷は 1,2,5,10,20,50,100,200,...サイクル目に行うのを基本としている。ただし、損傷進展の様子によっては、間隔を短くしてなるべく破断直前の様子がとれるようにした。

超音波探傷試験の様子を写真 3.6 に示す。

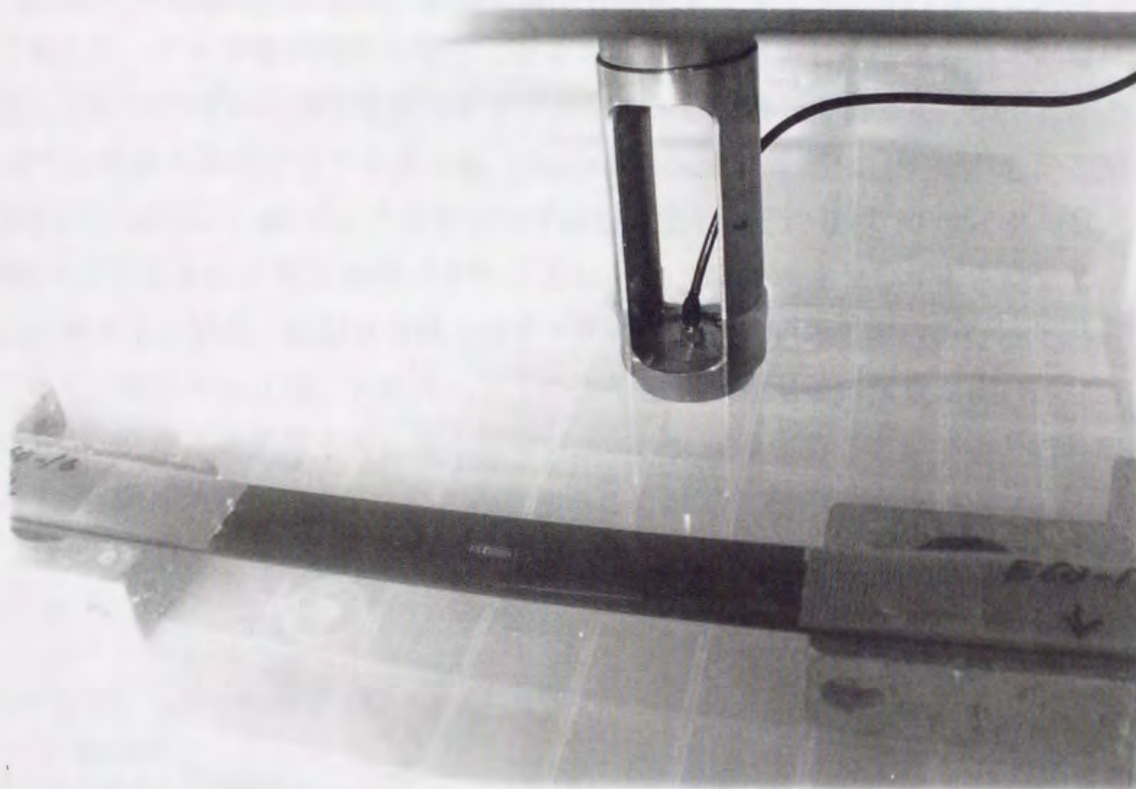


写真 3.6 超音波探傷試験の様子

3.3.3 試験条件

応力-ひずみ測定時の疲労試験に用いた荷重波形を図 3.3 に示す。試験は一定荷重振幅繰返し負荷で、応力比 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ の片振り引張試験である。図に示すように、はじめの負荷と除荷の過程のみクロスヘッドの位置制御で試験を行った。これは初期負荷の応力-ひずみ線図を静的引張時のものと一致させるためである。その後は荷重制御に切り替え、周波数 $0.01 \sim 0.1\text{Hz}$ のサイン波形を試験片が破断するまで加え続けた。繰返し負荷における最大応力 (σ_{\max}) の値は静的引張時の引張強度を 100%として、その何%かで与えることにした。

応力-ひずみ関係の測定は、初期負荷から破断まで全サイクル行うことが理想であるが、データ量が膨大になることを考慮し、あらかじめ指定された回数になると応力-ひずみの測定を開始するプログラムを作成して行った。図中に応力-ひずみ関係を測定するサイクル数 (Recorded Cycle) を示す。すなわち、初期負荷から連続して 20 サイクルまでひずみを測定し、その後は 50 サイクル目、100 サイクル目のように 50 サイクルごとに 1000 サイクルまでひずみを測定し、1000 サイクル以降、破断までは 100 サイクルごとにひずみの測定を行った。

なお、本システムは、クロスヘッドの変位量、ロードセル荷重および伸び計の 1 サイクルごとの最大値と最小値をファイルに記録することができ、これにより、試験片破断時の変位、ひずみを知ることができる。

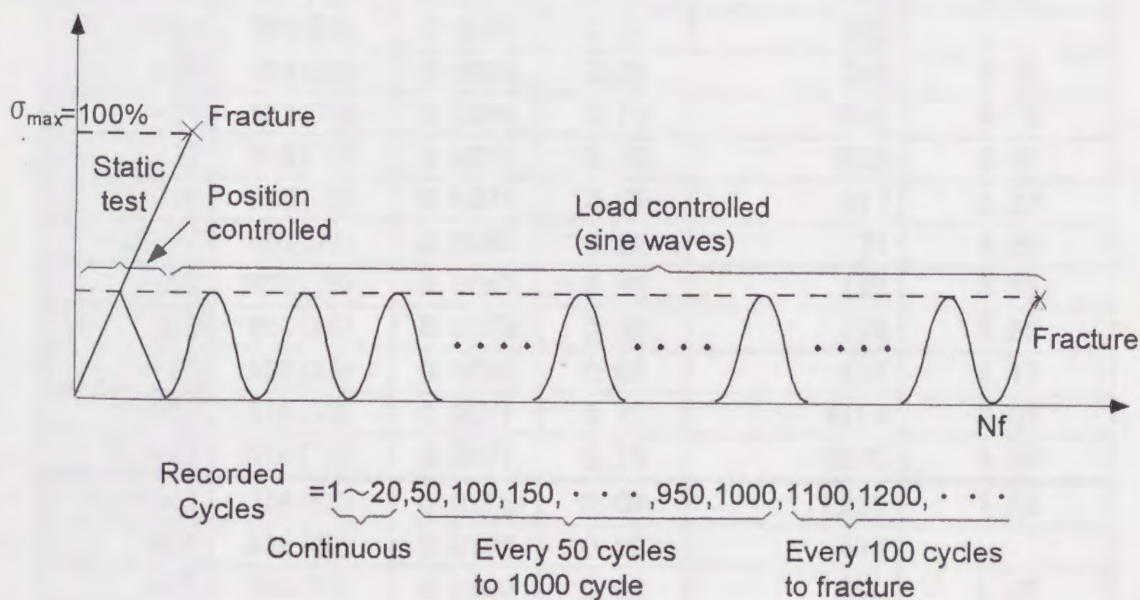


図 3.3 疲労試験時の荷重波形

3.4 実験結果

3.4.1 全試験結果

表 3.2 に PEEK 試験片の疲労試験結果を、表 3.3 に Epoxy 試験片の疲労試験結果を示す。表中、最大応力のあとのかっこ内の数字は引張強度に対する最大応力の割合をパーセンテージで示したものである。また、破断ひずみが空欄になっている箇所は試験中に伸び計の滑りが生じ、正しい測定が出来なかったことを示す。また、UST とは超音波探傷試験 (Ultrasonic Scanning Test) を行った試験片を意味する。

表 3.2 PEEK 試験片の疲労試験結果

試験片名	最大応力 (MPa) (%)	応力比	周波数 (Hz)	破断までの 繰返し数	破断ひずみ (%)
P30D-09	642 (87)	0.0057	0.01	77	4.75
-10	547 (74)	0.0068	0.01	1115	4.10
-11	590 (80)	0.0063	0.01	412	3.58
-12	520 (71)	0.0070	0.01	2069	3.37
-13	626 (85)	0.0059	0.01	37	2.97
-14	604 (82)	0.0061	0.01	41	3.78
-15	590 (80)	0.0063	0.01	140	3.62
-16	553 (75)	0.0067	0.01	781	
-17	553 (75)	0.0067	0.01	1619	3.82
-18	516 (70)	0.0071	0.02	8859	2.60
-19	626 (85)	0.0059	0.01	235	
-20	589 (80)	0.0063	0.01	384	4.07
-21	553 (75)	0.0067	0.10	1011	4.15
-22	515 (70)	0.0071	0.10	1823	2.81
-23	515 (70)	0.0071	0.02	317	3.24
-24	553 (75)	0.0067	0.02	71	4.00
-25	553 (75)	0.0067	0.02	181	3.95
-26	626 (85)	0.0059	0.02	179	3.60
-27	626 (85)	0.0059	0.02	101	4.17
-28	516 (70)	0.0071	0.10	4154	3.07
-29	516 (70)	0.0071	0.10	6940	3.28
P30B-03	338 (80)	0.0113	0.04	2228	1.53
-04	359 (85)	0.0106	0.02	686	
-05	380 (90)	0.0100	0.02	250	1.43
-06	317 (75)	0.0120	0.10	3292	1.16

表 3.3 Epoxy 試験片の疲労試験結果

試験片名	最大応力 (MPa) (%)	応力比	周波数 (Hz)	破断までの 繰返し数	破断ひずみ (%)
E15D-02	800 (77)	0.0028	0.02	75	0.87
-03	750 (72)	0.0022	0.04	210	
-04	650 (63)	0.0024	0.05	1293	UST
E30D-02	450 (78)	0.0070	0.02	210	
-03	400 (70)	0.0042	0.04	2085	2.10
-04	430 (75)	0.0040	0.04	122	2.12
-05	410 (71)	0.0040	0.04	440	2.13
-06	400 (70)	0.0045	0.10	443	UST
-07	380 (66)	0.0045	0.04	4028	2.57
-08	380 (66)	0.0045	0.10	553	UST
-09	400 (70)	0.0042	0.04	2625	2.46
E30B-02	200 (82)	0.0078	0.04	90	0.65
-03	170 (70)	0.0094	0.10	803	UST
-04	170 (70)	0.0094	0.04	761	0.75
-05	150 (61)	0.0100	0.04	3738	0.80
-06	150 (61)	0.0110	0.04	4602	0.66
-07	190 (78)	0.0087	0.04	187	0.65
E45D-02	150 (79)	0.017	0.02	99	8.80
-03	141 (74)	0.018	0.02	390	7.95
-04	130 (68)	0.020	0.02	421	8.47
-05	140 (74)	0.018	0.02	165	8.29
-06	110 (58)	0.024	0.04	1730	
-07	120 (63)	0.020	0.04	4390	7.69
-08	120 (63)	0.020	0.20	1478	UST
E45B-02	59 (75)	0.028	0.02	1915	0.73
-03	60 (76)	0.027	0.04	1687	0.70
-04	62 (80)	0.026	0.20	2358	UST
-05	65 (83)	0.025	0.04	684	1.10
E60D-03	65 (78)	0.027	0.04	1222	0.94
-04	70 (84)	0.006	0.10	189	UST
-05	63 (75)	0.026	0.04	1738	1.00

3.4.2 応力-ひずみ線図

図 3.4~3.10 に疲労試験時における応力-ひずみ線図を静的引張試験時の応力-ひずみ線図とあわせて示す。図中、static が静的引張試験時の応力-ひずみ線図を表し、 N_f は破断までの繰返し数（疲労寿命）を、 σ_{ult} は静的引張試験での引張強度を表す。最大応力 σ_{max} の下のかっこ内は静的引張強度に対する最大応力の割合を示す。例えば、 $0.70 \sigma_{ult}$ は引張強度の 70% の最大応力で試験を行ったことを意味する。以下の説明に用いるため、 n サイクル目における最大ひずみ $\epsilon_{max}^{(n)}$ 、剛性 $E_{(n)}$ を図 3.11 に示すように定義する。すなわち、最大ひずみは各ヒステリシスループの頂点におけるひずみであり、剛性は簡便化のため、ヒステリシスループの頂点を結ぶ直線の傾きで定義した。以下に各試験片に対する考察を述べる。

・ P30D 試験片 (図 3.4)

繰返し数の増加とともにひずみが蓄積していく、いわゆるメカニカルラチェット現象が観察される³⁶⁾。また、除荷、再負荷の過程においても、応力-ひずみ線図は顕著な非線形性を示すため、ヒステリシスループが閉じた紡錘形となり、それが囲む面積は大きい。寿命後半においても、剛性低下はほとんど生じていない。

・ P30B 試験片 (図 3.5)

P30D と同様にラチェット現象が観察される。応力-ひずみ線図の非線形性が小さいため、ヒステリシスループが囲む面積は P30D に比べると小さい。また、寿命後半で剛性低下が生じている。

・ E30D 試験片 (図 3.6)

P30D 試験片とほぼ同様の傾向を示す。ただし、P30D に比べると寿命後半における剛性低下が大きい。

・ E30B 試験片 (図 3.7)

ラチェット現象は観察されるが、それにより蓄積するひずみ（以下、ラチェットひずみと呼ぶ）の増加量は小さい。ヒステリシスループは、応力-ひずみ線図が線形に近いと直線的な挙動を示す。寿命後半における剛性の低下が著しく、これにより最大ひずみの急増が生じている。

・ E45D 試験片 (図 3.8(a), (b))

応力-ひずみ線図の非線形性が大きいと、ヒステリシスループが囲む面積

は他の試験片の場合よりも大きい。剛性の低下はほとんど生じていない。また、(a)、(b)いずれの場合においても、顕著なラチェット現象が観察されるが、(a)と(b)でラチェットひずみの増加の様子が異なる。すなわち、(a)の方のラチェットひずみは繰返し数の増加とともに、破断まで減衰し続けているのに対し、(b)の方のラチェットひずみは、繰返し初期の段階でほぼ一定の割合で増加し、破断前になって(a)と同様に減衰している。図を見て分かるように、(a)の方は初期負荷の段階で flat zone (2.4.2 参照) を越えており、(b)の方は初期負荷では flat zone を越えていない。このことから E45D 試験片においては、初期負荷で flat zone を越えるか否かにより、ラチェット現象の傾向が変わってくると思われる。

・ E45B 試験片 (図 3.9)

ラチェットひずみの増加量、ヒステリシスループが囲む面積ともに非常に小さい。また、剛性低下もほとんど生じていない。

・ E60D 試験片 (図 3.10)

図 3.9 と同様に、ラチェットひずみの増加量、ヒステリシスループが囲む面積ともに非常に小さく、剛性低下もほとんど生じていない。

以上の考察から、一定荷重振幅繰返し負荷を受ける斜交対称積層板の応力-ひずみ関係はメカニカルラチェット現象を示すことが分かる。また、ラチェットひずみの増加量および応力-ひずみヒステリシスループが囲む面積は、応力-ひずみ線図の非線形性が強いほど大きくなる。

なお、繰返し負荷時の応力-ひずみ線図の形状は、ラチェットひずみ、剛性低下に着目して、次の2つに大別することができる。

タイプ1. ラチェットひずみの増加量が大きく、剛性低下が小さい。

…Strain Accumulation Type と呼ぶ

タイプ2. ラチェットひずみの増加量が小さく、剛性低下が大きい。

…Stiffness Loss Type と呼ぶ

タイプ1の典型的な例としては、P30D (図 3.4)、E30D (図 3.6)、E45D (図 3.8) が挙げられる。また、タイプ2の典型的な例としては、E30B (図 3.7) が挙げられる。

タイプ1と2を定量的に比較するため、E30DとE30Bの最大ひずみ、および剛性を繰返し数を横軸にとってプロットしたものを図 3.12 に示す。最大ひずみ、

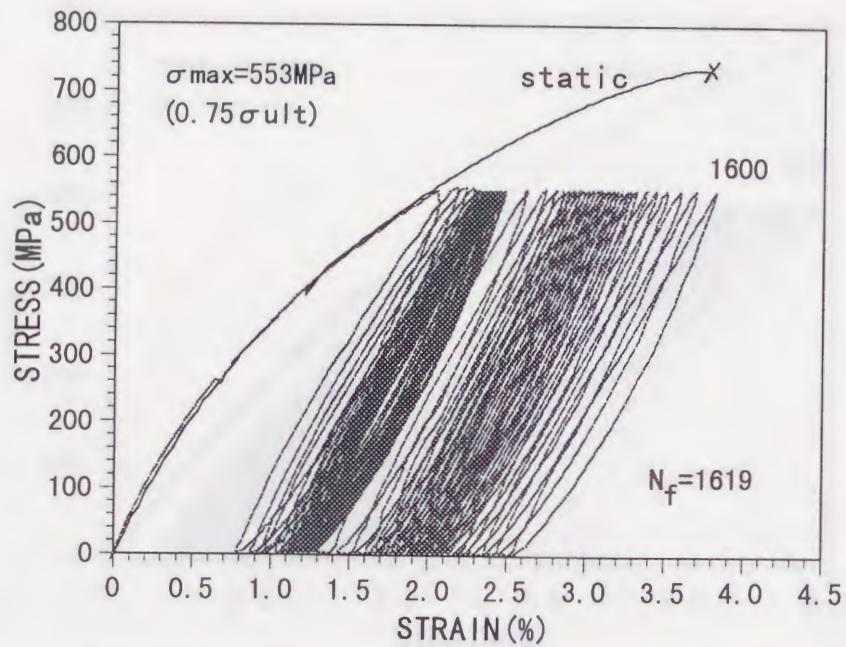


図 3.4 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (P30D 試験片, $75\%\sigma_{\text{ult}}$)

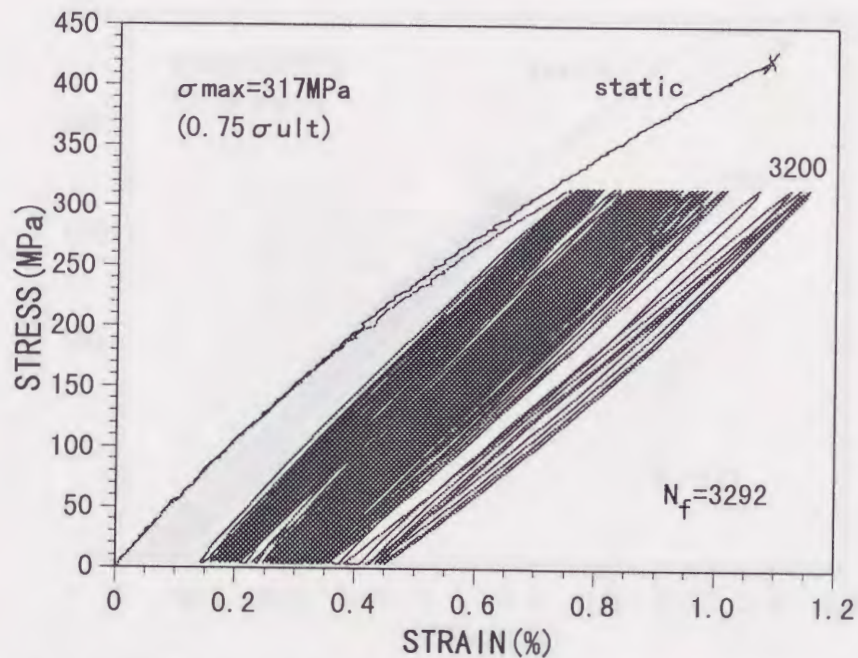


図 3.5 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (P30B 試験片, $75\%\sigma_{\text{ult}}$)

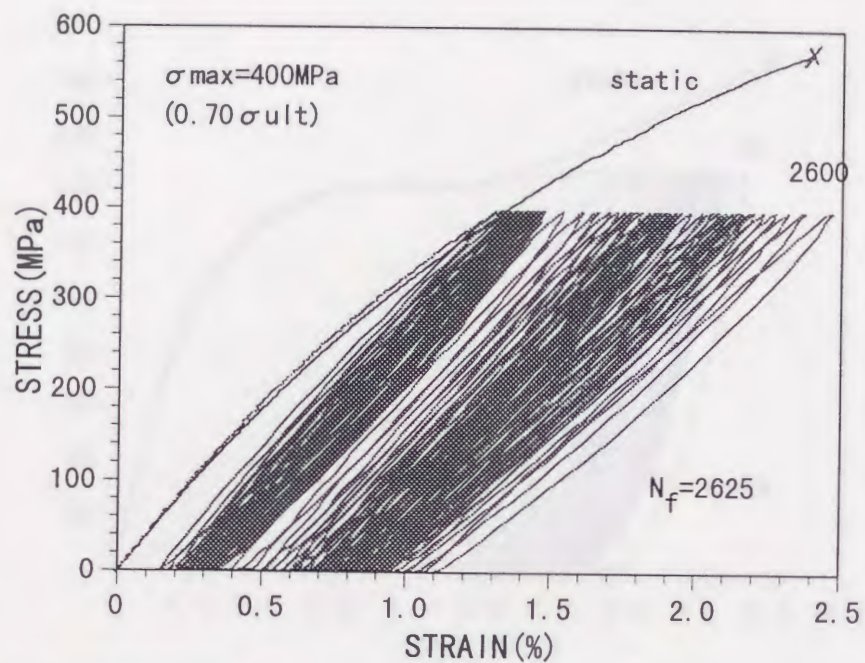


図 3.6 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (E30D 試験片, $70\% \sigma_{\text{ult}}$)

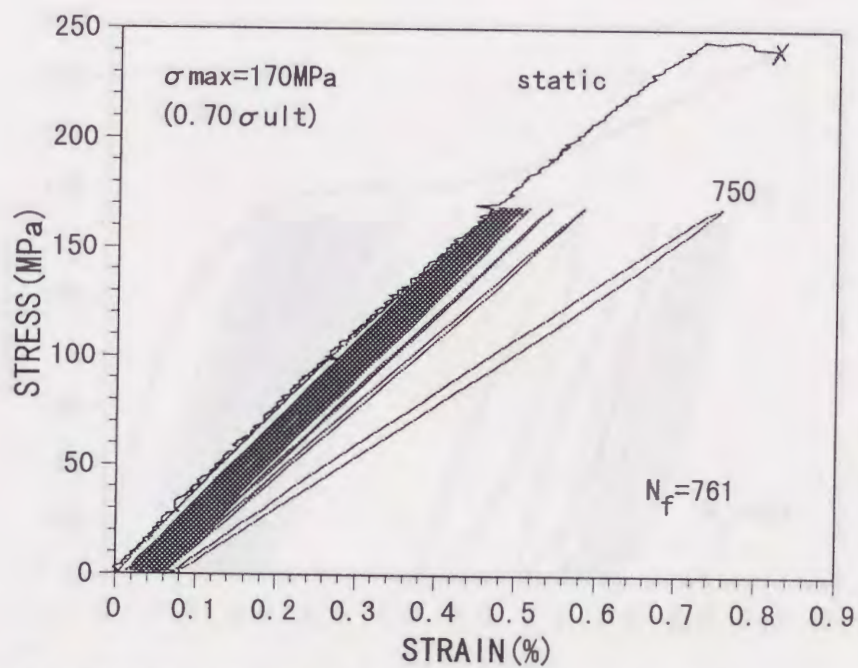


図 3.7 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (E30B 試験片, $70\% \sigma_{\text{ult}}$)

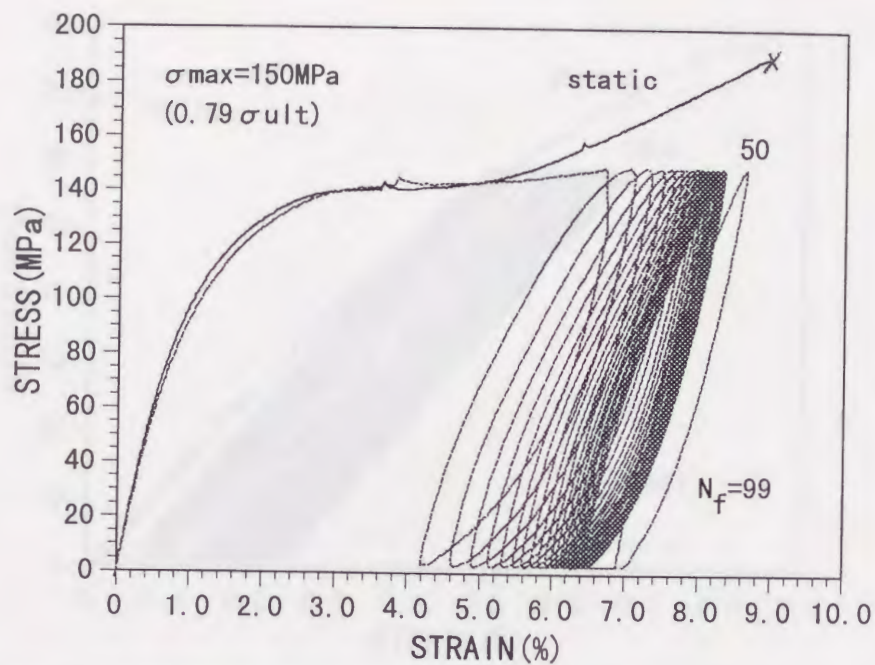


図 3.8(a) 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (E45D 試験片, 79% σ_{ult})

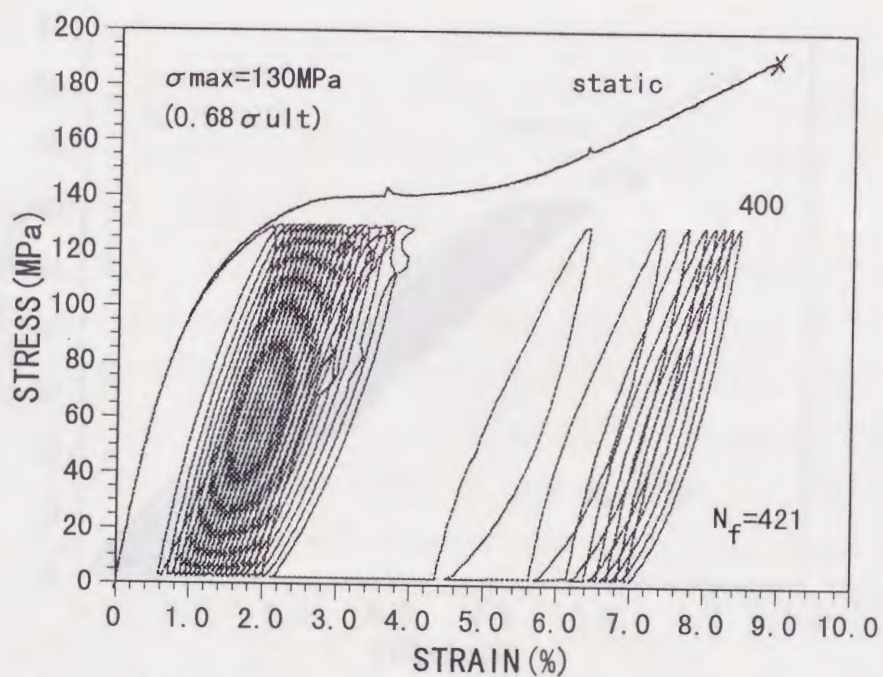


図 3.8(b) 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (E45D 試験片, 68% σ_{ult})

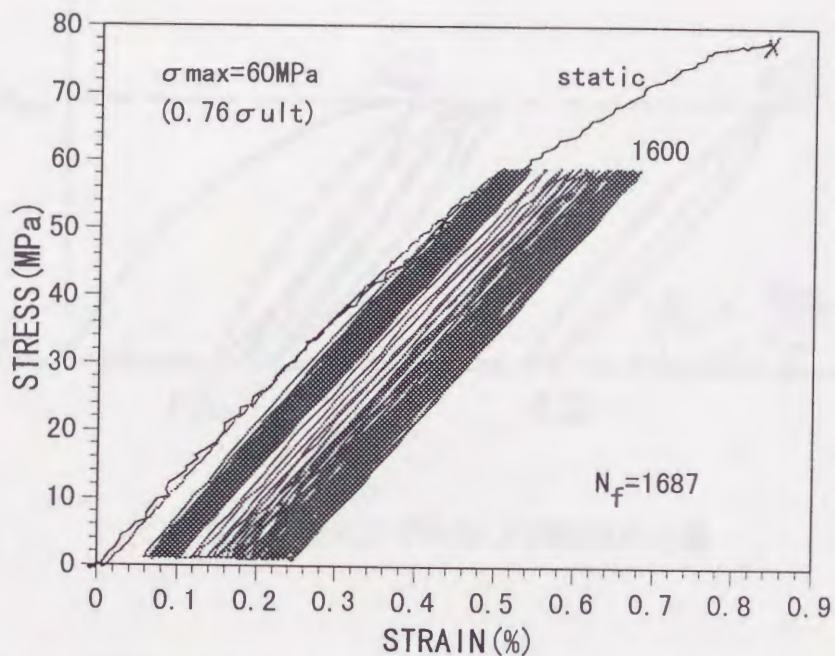


図 3.9 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (E45B 試験片, $76\% \sigma_{ult}$)

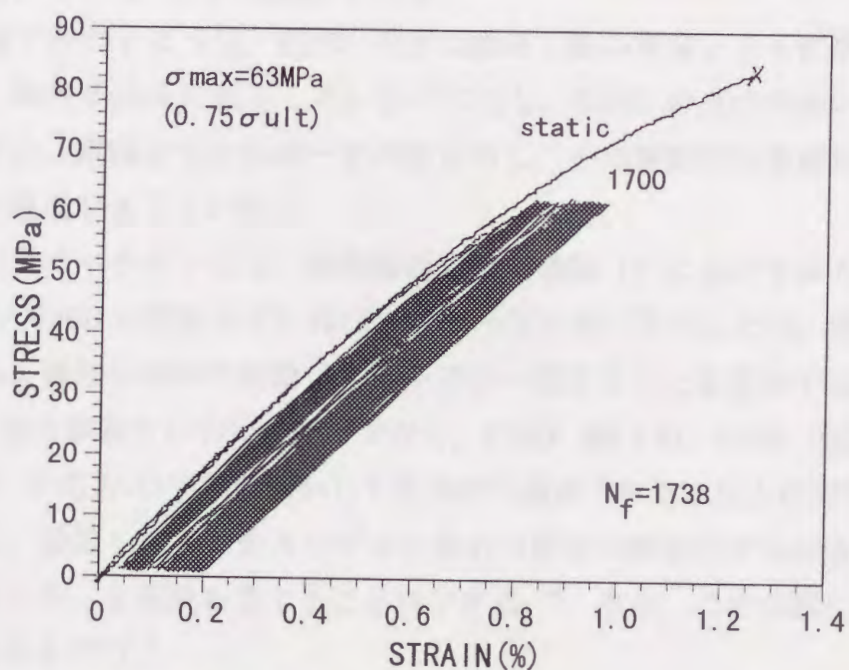


図 3.10 疲労試験時の応力-ひずみ線図 (E60D 試験片, $75\% \sigma_{ult}$)

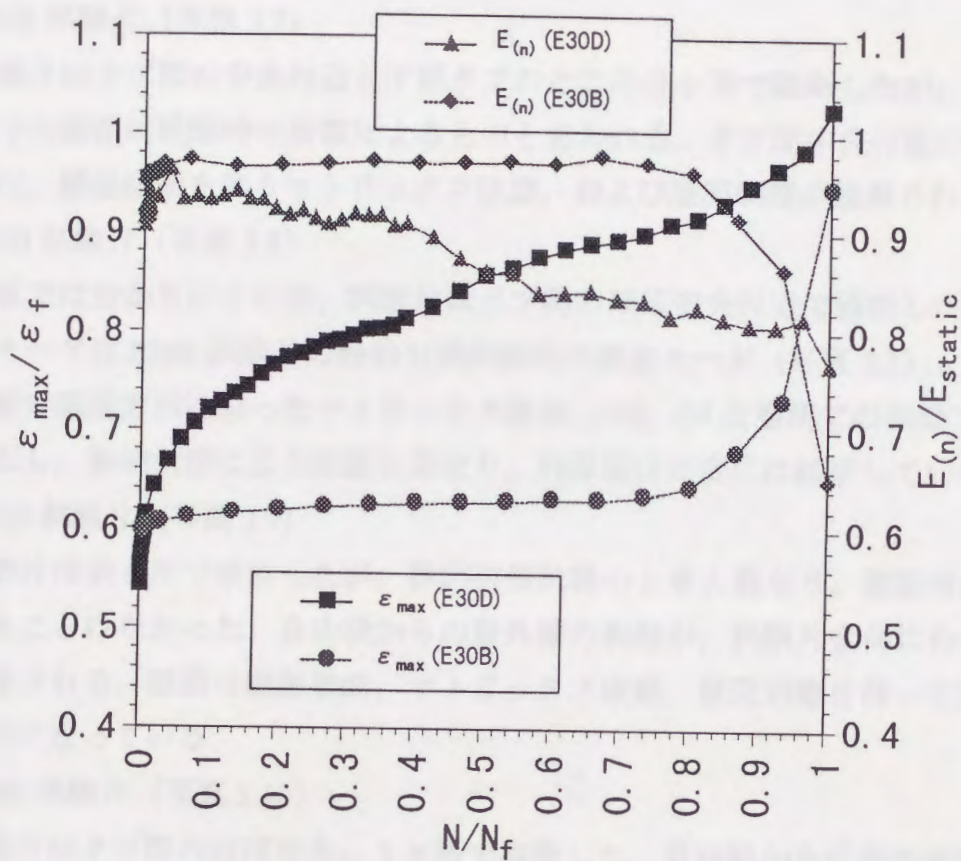


図 3.12 E30 試験片の最大ひずみおよび剛性低下の様子

3.4.3 破断の様子

写真 3.7~3.14 に疲労試験による試験片破断の様子を示す。以下、各試験片に対する考察を述べる。説明のため、2.4.3 のときと同様、写真で右側にあるタブを上部タブ、左側にあるタブを下部タブと呼ぶことにする。

- ・ P30D 試験片 (写真 3.7)

試験片はタブ間の中央付近と下部タブのところ 2ヶ所で破断したが、下部タブでの破壊は破断時の衝撃によるものと思われる。タブ間中央付近の破断面では、繊維破断を伴うマトリックス破壊、および層間剥離が観察される。

- ・ P30B 試験片 (写真 3.8)

写真では分かりにくいだが、試験片はタブ間のほぼ中央付近で破断した。破壊のモードは P30B 試験片の静的引張試験時の破壊モード (写真 2.3) と同様、各層で繊維方向に沿ったマトリックス破壊、+30, -30 度層間での剥離である。ただし、静的引張による破壊と異なり、内部層は完全には破断していない。

- ・ E15D 試験片 (写真 3.9)

試験片は数ヶ所で破断したが、静的引張試験のときと異なり、破断時に飛散することはなかった。自由縁からの最外層の剥離が、試験片全体にわたって観察される。破壊は繊維破断、マトリックス破壊、層間剥離を伴った複雑なものになっている。

- ・ E30D 試験片 (写真 3.10)

試験片はタブ間のほぼ中央、1ヶ所で破断した。自由縁からの最外層剥離が試験片全体にわたって観察される。破壊モードは静的引張のとき (写真 2.7) と同様、繊維破断を伴うマトリックス破壊が主であるが、写真 2.7 のように完全に 2つには分かれなかった。

- ・ E30B 試験片 (写真 3.11)

試験片はタブ間中央付近、1ヶ所で破断した。破壊モードは静的引張時 (写真 2.8) とほぼ同様である。すなわち、各層で繊維方向に沿ったマトリックス破壊、層間で剥離が生じたものになっている。

- ・ E45D 試験片 (写真 3.12)

試験片はタブ間のほぼ中央、1ヶ所で破断した。破断部付近で最外層の剥離が目立つ。破壊モードは繊維破断、マトリックス破壊、層間剥離が絡み合った複雑なものになっている。また、わずかながら破断部付近の試験片幅が細

くなっており、くびれ現象が生じているのが分かる。

- ・ E45B 試験片 (写真 3.13)

試験片はタブ間ほぼ中央、1ヶ所で破断した。破壊モードは静的引張時 (写真 2.10) とほぼ同様であるが、内部層が完全に破断せずにつながっているため、破断後の試験片は2つに分かれていない。

- ・ E60D 試験片 (写真 3.14)

試験片はタブ間の下部タブ側、1ヶ所で破断した。全層が繊維配向角の 60 度方向に沿って破断しており、このことから、+60 度層はマトリックス破壊、-60 度層は繊維破断を生じていることが分かる。

以上の考察から、疲労破壊による試験片のみに観察される特徴として、自由縁からの最外層剥離が試験片全体に生じること、内部層が完全に破断しないため、破断後も試験片がつながっていることが挙げられる。なお、静的引張による破壊と疲労による破壊との詳細な比較検討は 3.5 で行う。



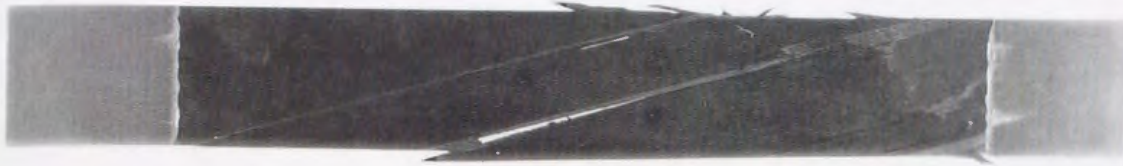
P30-D (fatigue)

写真 3.7 疲労試験による破断の様子 (P30D 試験片)



P30-B (fatigue)

写真 3.8 疲労試験による破断の様子 (P30B 試験片)



E15-D (fatigue)

写真 3.9 疲労試験による破断の様子 (E15D 試験片)



E30-D (fatigue)

写真 3.10 疲労試験による破断の様子 (E30D 試験片)



E30-B (fatigue)

写真 3.11 疲労試験による破断の様子 (E30B 試験片)



E45-D (fatigue)

写真 3.12 疲労試験による破断の様子 (E45D 試験片)



E45-B (fatigue)

写真 3.13 疲労試験による破断の様子 (E45B 試験片)



E60-D (fatigue)

写真 3.14 疲労試験による破断の様子 (E60D 試験片)

3.4.4 超音波探傷試験の結果

図 3.13 に E15D 試験片の超音波探傷結果を、図 3.14 に E60D 試験片の超音波探傷結果を、図 3.15 に E30D 試験片の超音波探傷結果を、図 3.16 に E30B 試験片の超音波探傷結果をそれぞれ示す。赤い部分が健全部、その他の色が損傷部であり、同じ色は試験片表面から同一深さにある損傷を表す。超音波探傷は試験片のタブ間すべてに対して行っており、これにより損傷が試験片のどの部位に入っても損傷状態を追跡可能である。超音波探傷の図は試験片の実寸で表示してある。

以下に各試験片に対する試験条件および考察を述べる。説明に用いた記号は σ_{\max} が繰返し負荷における最大応力、 σ_{ult} は静的引張強度、 N_f は破断までの繰返し数（疲労寿命）、 N は繰返し数を意味する。

- ・ E15D 試験片 ($\sigma_{\max}=650\text{MPa}(63\%\sigma_{\text{ult}})$, $N_f=1293$, $N=50,200,500,800,1135$)

端面観察によれば、剥離は試験片最外層から入り始める。よって、図 3.13 の青い部分は最外層の剥離の様子を表す。繰返しの初期の段階 ($N=50$, 4% of life) で剥離が入り始め、繰返し数の増加とともに剥離の数が増加する。剥離の形状はその 1 辺が繊維方向と一致する三角形で^{38),39)}、繰返し数の増加とともに、相似な形状を保ちながら面積が広がっているのが分かる。また、繰返し数の増加に伴い、隣り合う剥離が繋がりながら試験片内部へと進展していく。寿命の後半 ($N=1135$, 88% of life) では剥離の先端は試験片幅の中央付近まで達している。

- ・ E60D 試験片 ($\sigma_{\max}=70\text{MPa}(84\%\sigma_{\text{ult}})$, $N_f=189$, $N=100,189$)

端面観察によれば、繰返し負荷中、クラックおよび剥離は見受けられない。図 3.14 を見て分かるように、疲労寿命の半分以上を過ぎた繰返し数 ($N=100$, 53% of life) における超音波探傷結果でも、剥離は全く見受けられない。破断後の超音波探傷でも、破断部以外は全く損傷を受けておらず、このことから 60 度試験片は、初期破損が直ちに最終破壊に繋がることが分かる。

- ・ E30D 試験片 ($\sigma_{\max}=380\text{MPa}(66\%\sigma_{\text{ult}})$, $N_f=553$, $N=5,20,100,200,500$)

E30D 試験片端面の様子を写真 3.15(a)に示す。写真から多数のマトリックスクラック、および層間剥離の存在が観察されるが、超音波探傷により観察で

きるのは、最外層に生じる層間剥離である。よって、図 3.15 の青い部分は最外層に生じる層間剥離を表す。繰返しのごく初期の段階 ($N=5$, 1% of life) で、既に試験片両端面の数ヶ所から剥離が生じている。繰返し数の増加とともに、剥離の数が増え、その剥離が試験片内部へと進展していくのが分かる。寿命後半 ($N=500$, 90% of life) では最外層の剥離が完全につながっている部分も観察される。

・ E30B 試験片 ($\sigma_{\max}=170\text{MPa}(70\%\sigma_{\text{ult}})$, $N_f=803$, $N=200,700,800,801,803$)

E30B 試験片端面の様子を写真 3.15(b)に示す。剥離は+30 層と-30 層の層間に入ることが分かる。よって、超音波探傷における色が違う部分はこの剥離を観察していることになる。 $N=200$ (25% of life) ではじめて自由縁の左側に1ヶ所、剥離が観察された。その後繰返し数の増加とともに、剥離の数および面積は増加するが、E30D と比較するとその増加の割合は小さい。しかも、最初に入った剥離のみが進展していき、他の剥離はほとんど広がらないことが分かる。特に破断直前の $N=800$ と 801 では、わずか1サイクルの繰返しで剥離面積が急増している。試験時においても剥離が進展する音を聞くことが出来た。 $N=801$ で一番大きな剥離の先端部は試験片のほぼ中央にまで達しており、その後の2回の繰返しで剥離は一気に進展し、最終破断に至る。

E30D と E30B の比較から、同じ繊維配向角であっても積層順序により、疲労損傷進展の仕方が全く異なることが分かる。すなわち、E30D 試験片の剥離は、繰返し数の増加とともに徐々に進展する漸増型であるのに対し、E30B 試験片の剥離は、寿命の後半で急激に進展する急増型である。3.4.2 で述べた繰返し負荷時の応力-ひずみ線図の2つのタイプ (Strain Accumulation Type...E30D と Stiffness Loss Type...E30B) は、この損傷進展の仕方の違いにより生じたと考えられる。

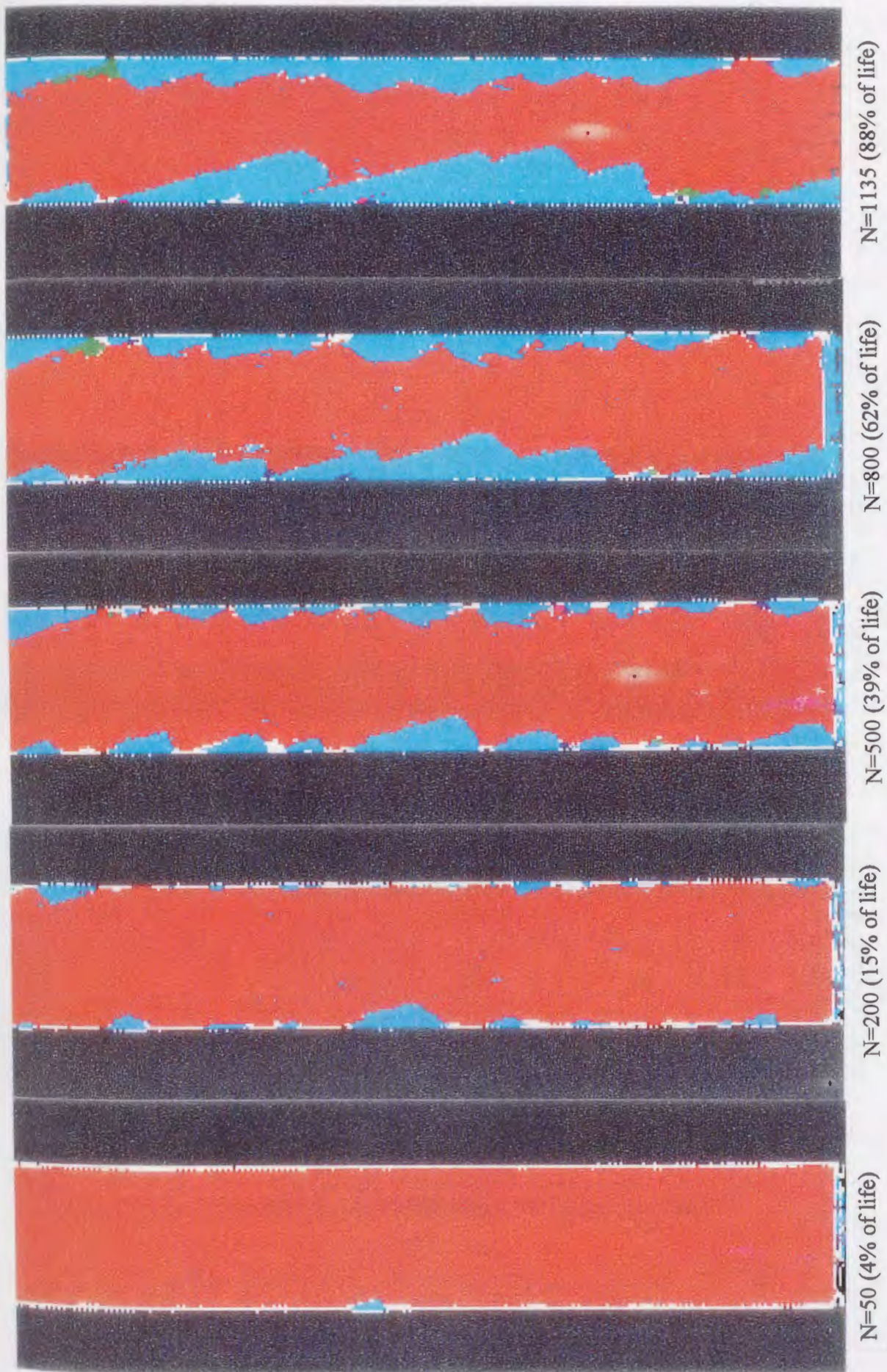


図 3.13 超音波探傷による損傷進展の様子 (E15D 試験片)

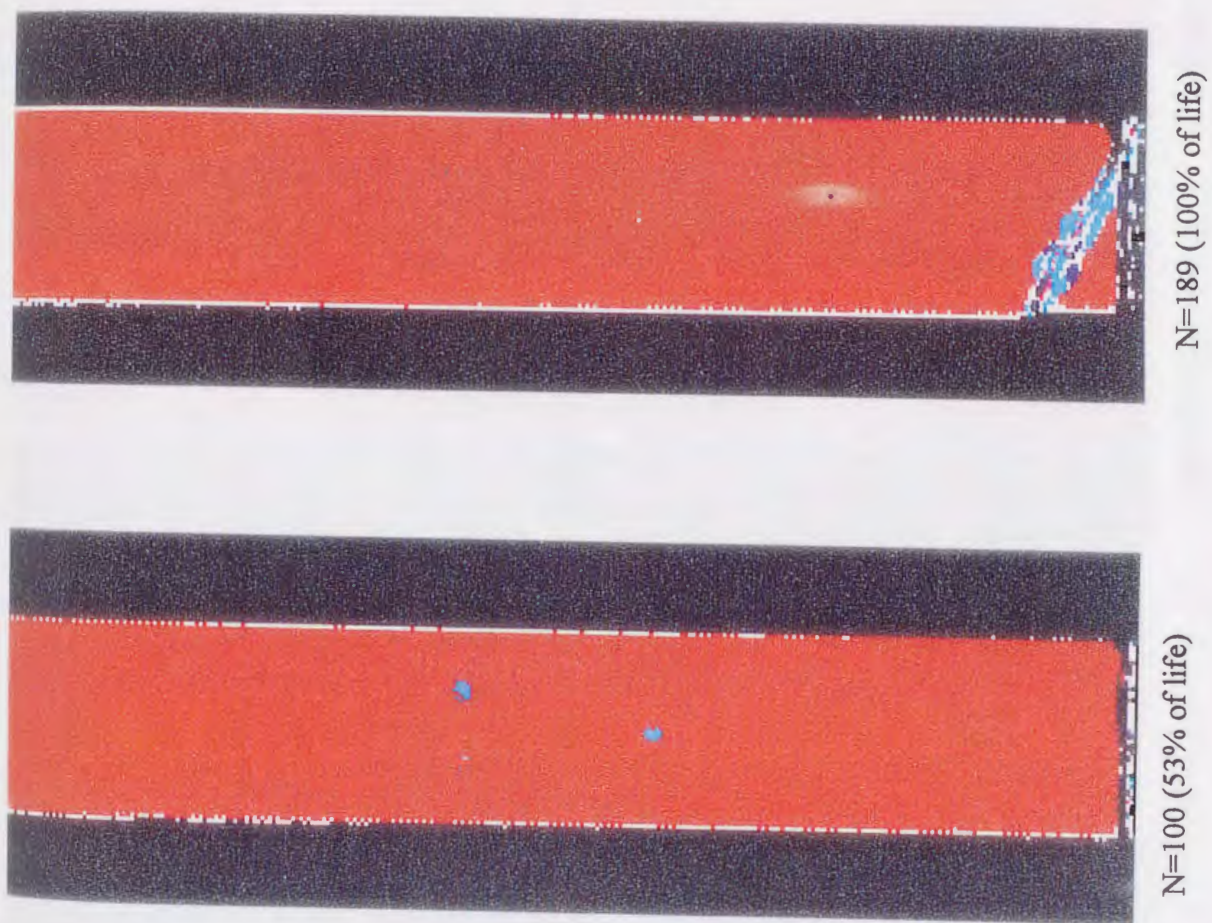


図 3.14 超音波探傷による損傷進展の様子 (E60D 試験片)

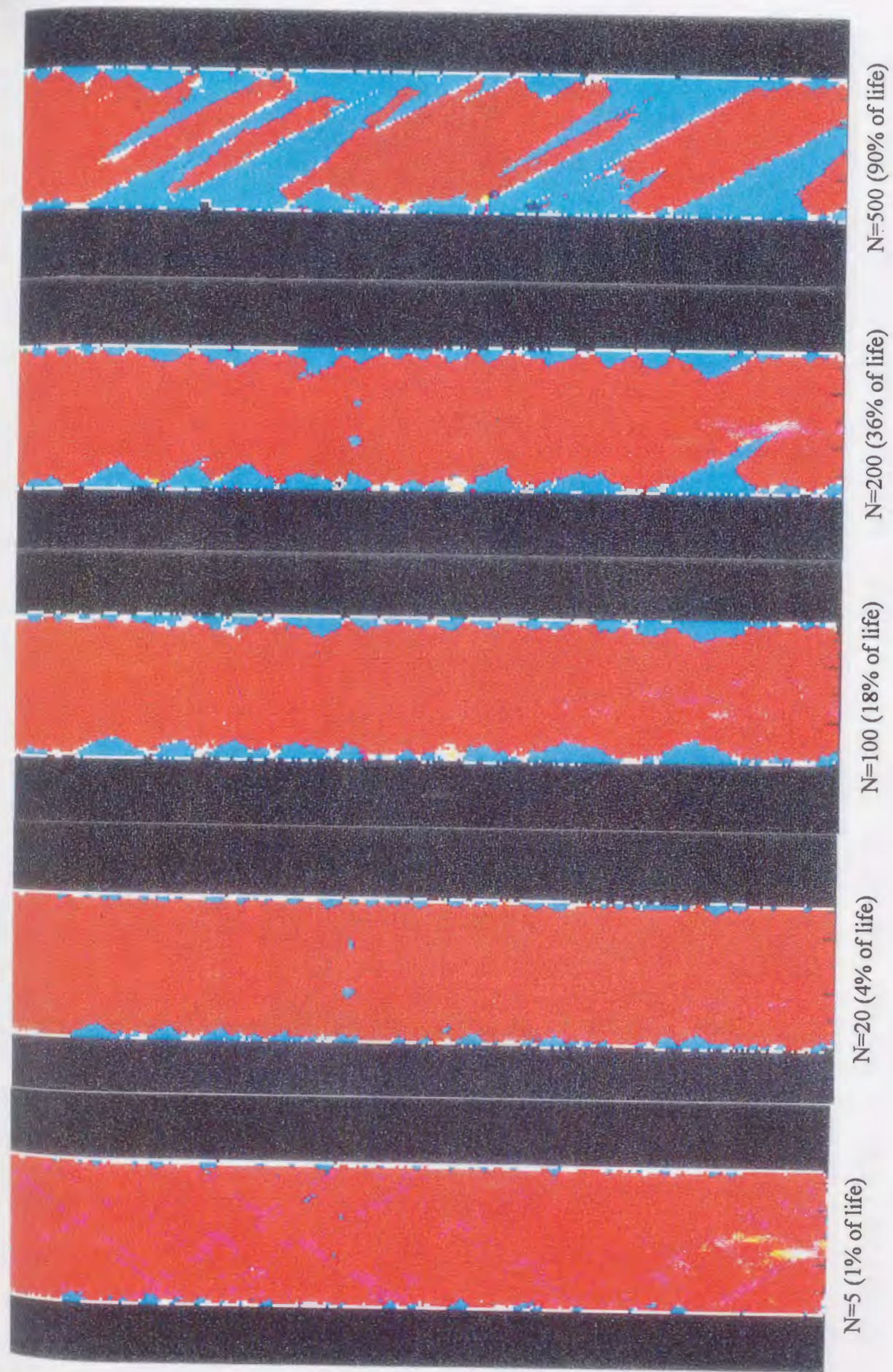


図 3.15 超音波探傷による損傷進展の様子 (E30D 試験片)

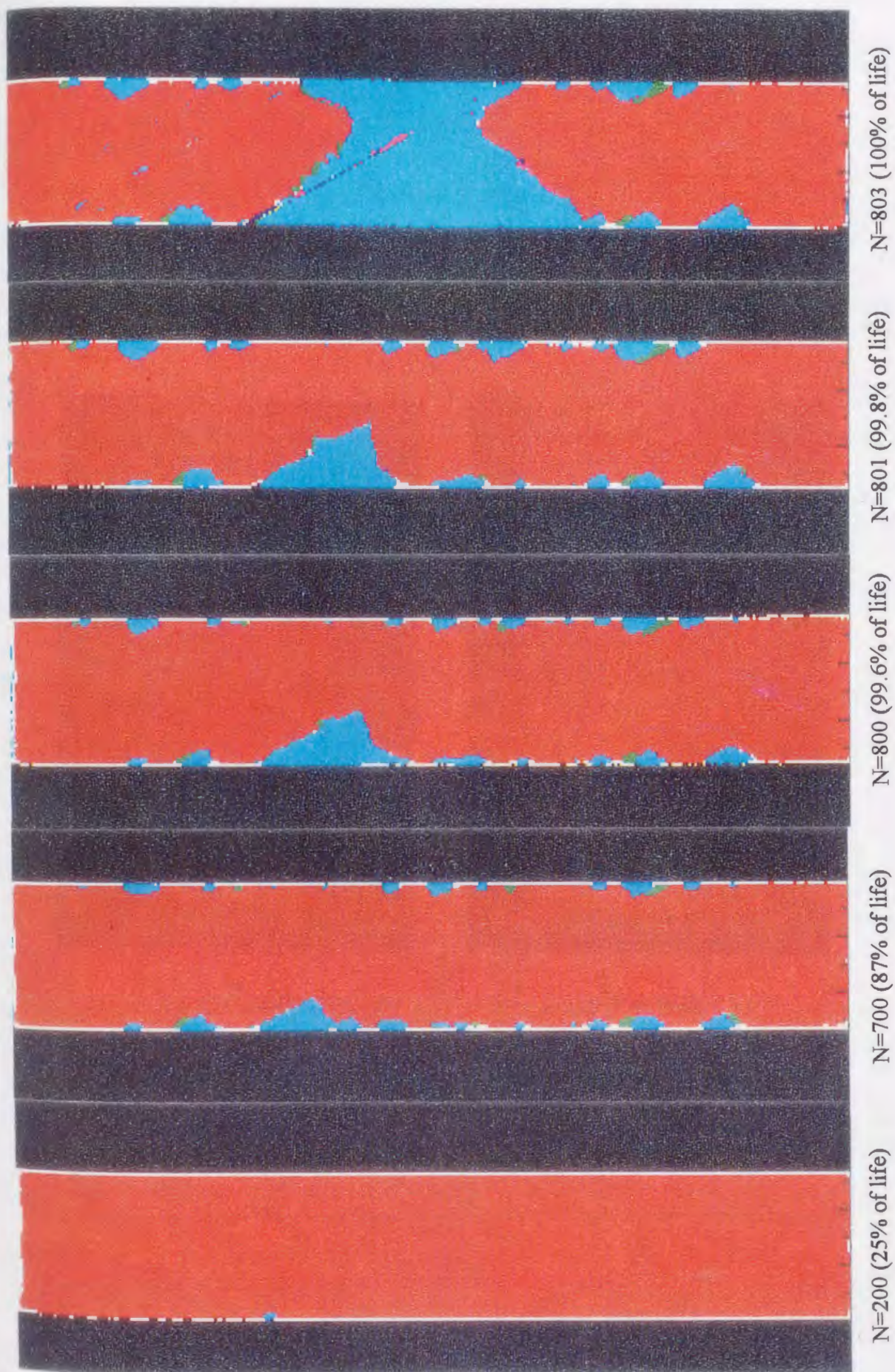


図 3.16 超音波探傷による損傷進展の様子 (E30B 試験片)



(a) E30D 試験片



(b) E30B 試験片

写真 3.15 E30D および E30B 試験片の端面顕微鏡写真

3.4.5 S-N 線図

図 3.17 に P30 試験片の疲労試験結果を S-N 線図でまとめたものを、図 3.18 に E30 試験片の疲労試験結果を S-N 線図でまとめたものをそれぞれ示す。どちらも Distributed と Blocked の S-N 線図を同時に示してある。横軸は破断までの繰返し数 N_f ，縦軸は繰返し負荷時の最大応力 σ_{\max} とした。また、 $N=1$ の所にプロットしたデータは静的引張試験で求めた引張強度である。

図中、実線は実験データを最小自乗法で直線回帰したもので、次式により計算したものである。

$$\sigma_{\max} = a \log N_f + b \quad (3.1)$$

ただし、直線回帰には $N=1$ のデータは用いていない。表 3.4 に係数 a 、 b の値を示す。表から P30D と P30B の a の値、E30D と E30B の a の値がほぼ等しいことが分かる。このことは、積層順序 (Distributed と Blocked) に関わらず S-N 線図における直線の勾配がほぼ一致することを意味する。

Distributed と Blocked では前節までに述べたように、繰返し負荷時の応力-ひずみ関係、破壊のモード、損傷進展の仕方が全く異なるのだが、S-N 線図の勾配がほぼ一致するのは興味深い現象である。

表 3.4 係数 a 、 b の値

試験片名	a	b
P30D	-48.7	698
P30B	-52.4	507
E30D	-31.0	495
E30B	-29.9	258

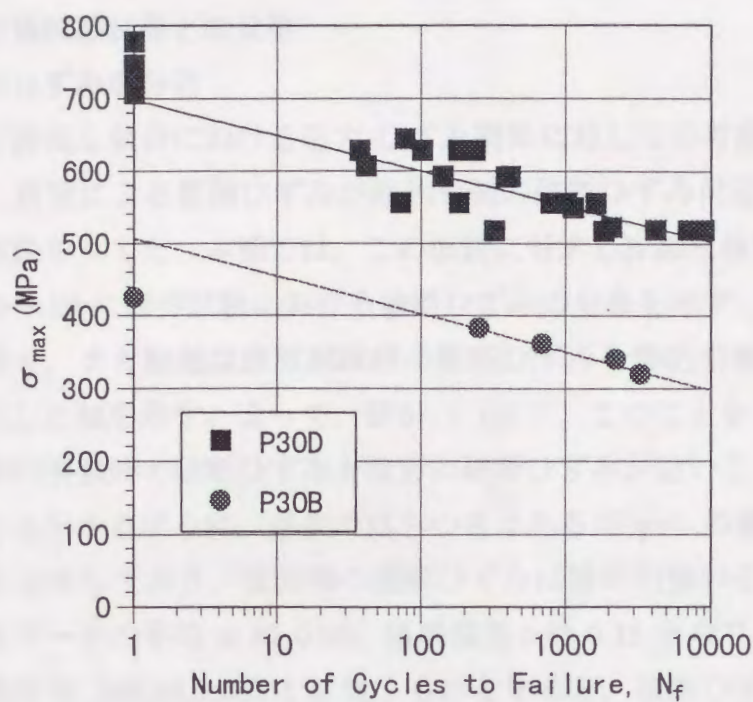


図 3.17 P30 試験片の S-N 線図

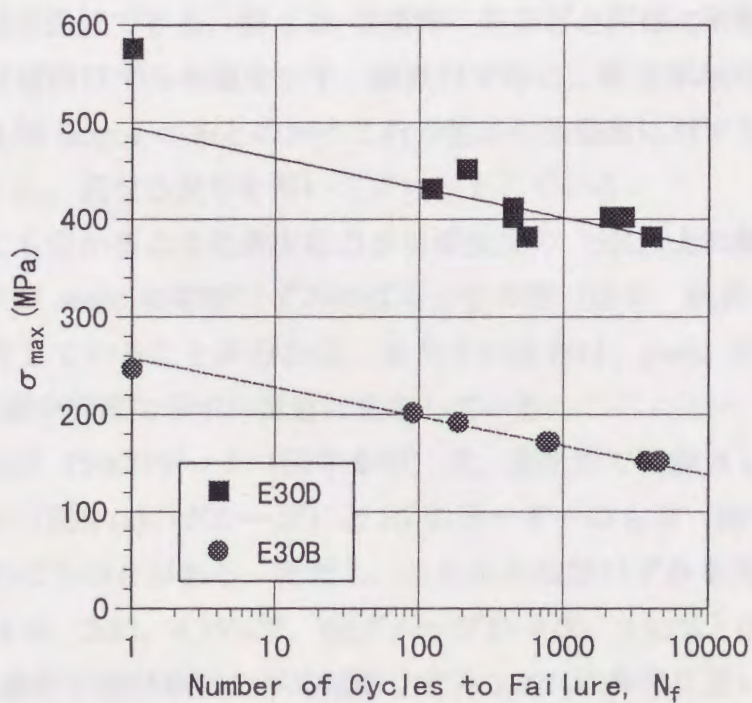


図 3.18 E30 試験片の S-N 線図

3.5 静的引張試験結果との比較

3.5.1 破断ひずみの分布

3.4.2 で繰返し負荷における応力-ひずみ関係に対しての考察を行い、疲労破壊は繰返し負荷による蓄積ひずみが静的引張の破断ひずみ付近に達すると生じるという仮説を立てた。本節では、この仮説に対する詳細な検討を行う。

まず、図 3.19 に疲労試験における破断ひずみの分布を示す。横軸は破断までの繰返し数を、また縦軸は疲労試験時の破断ひずみを静的引張時の破断ひずみで無次元化した値を示す。よって、値が 1 (以下、このことを $y=1$ と呼ぶ) に近いほど静的引張時の破断ひずみと疲労の破断ひずみが近いことを示す。

図を見ても分かるように、多少のばらつきはあるが $y=1$ の直線付近にデータは集中して分布しており、疲労時の破断ひずみは静的引張のそれに近いことが分かる。全データの平均 m は 0.95、標準偏差 σ は 0.15 となり、図 3.19 に示すように正規分布 $N(0.95, 0.0225)$ に従うものとする、破断ひずみは $0.65 \sim 1.25$ ($m \pm 2\sigma$) の範囲内に 95.5% が存在する。

図 3.20 に P30D 試験片のみの破断ひずみの分布を示す。この P30D 試験片は静的引張試験を 8 本、疲労試験を 21 本と多数の試験を行っているので、かなりの信頼性が保証できる。図 3.20 は横軸に先ほどと同様に破断までの繰返し数を、縦軸は破断ひずみの値を示す。破断ひずみは、疲労試験時における最大応力 (図中凡例 fatigue のあとのかっこ内の値が引張強度に対する割合を示す) が分かるように、異なる記号を用いてプロットしている。

図を見ても分かるように最大応力が引張強度の 75% 以上の試験では、ほとんどのデータが static の破断ひずみのばらつきの帯 (図中、破線で囲まれた部分) の中に存在していることが分かる。またその分布は、static の平均破断ひずみ (3.92%, 図中実線で示す) 付近に集中している。

最大応力が 75% のデータ (図中◆印) は、破断までの繰返し数が 10^3 のオーダーのもの (図中(a)のグループ) と 10^2 のオーダーのもの (図中(b)のグループ) とかなりのばらつきがある。ただし、これらの破断ひずみを見てみると、(a)グループが 4.10, 3.82, 4.15% で、(b)グループが 4.00, 3.95% とほぼ等しい値を示し、しかも静的引張試験時の平均破断ひずみ 3.92% に非常に近いことが分かる。このことから疲労破壊時における破断ひずみと静的引張試験時の破断ひずみとの関連性が認められる。

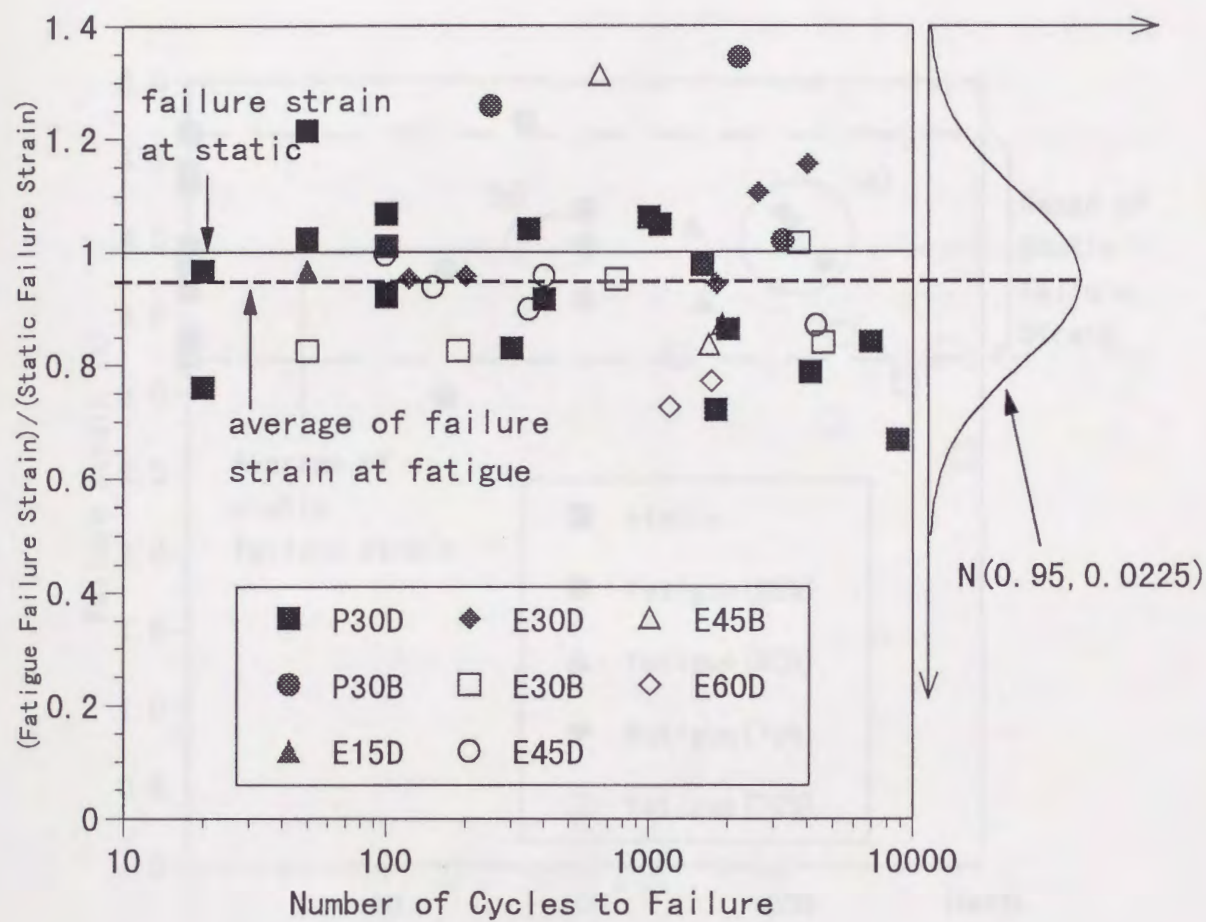


図 3.19 疲労試験における破断ひずみの分布

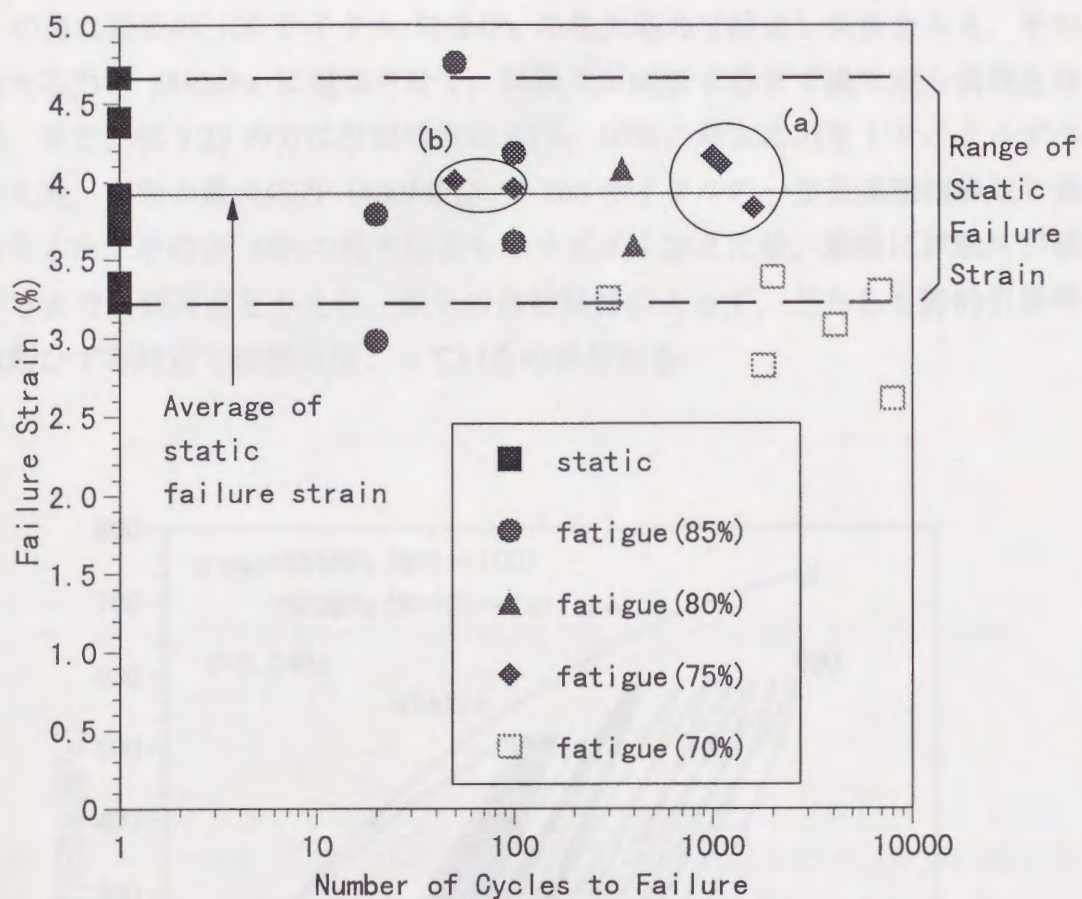


図 3.20 P30D 試験片の破断ひずみの分布

3.5.2 最大応力変動繰返し負荷試験

前節で疲労試験における破断ひずみの値は，静的引張試験での破断ひずみの値に近いことを示した．さらにこのことを確認するために，最大応力を途中で変化させた繰返し負荷試験を行った．図 3.21 および図 3.22 にそのときの応力-ひずみ線図を静的引張時の応力-ひずみ線図とともに示す．

図 3.21 の方は P30D 試験片を，図 3.22 の方は E30D 試験片を用いている．図 3.21 の方は始めの 100 サイクル 516MPa の最大応力で繰返し負荷を与え，その後最大応力を 589MPa に増加させて，試験片が破断するまで繰り返し負荷を与えた．また，図 3.22 の方は引張強度の 50%，60%の最大応力を 1 サイクルずつ加えた後，70%の最大応力（400MPa）で 100 サイクルの一定荷重振幅繰返し負荷を与えた．その後 80%の最大応力を 1 サイクル加えた後，最後に試験片が破断するまで引張荷重を与えた．途中の負荷経路によらず，どちらも静的引張時の破断ひずみ付近で破壊が起こっているのが分かる．

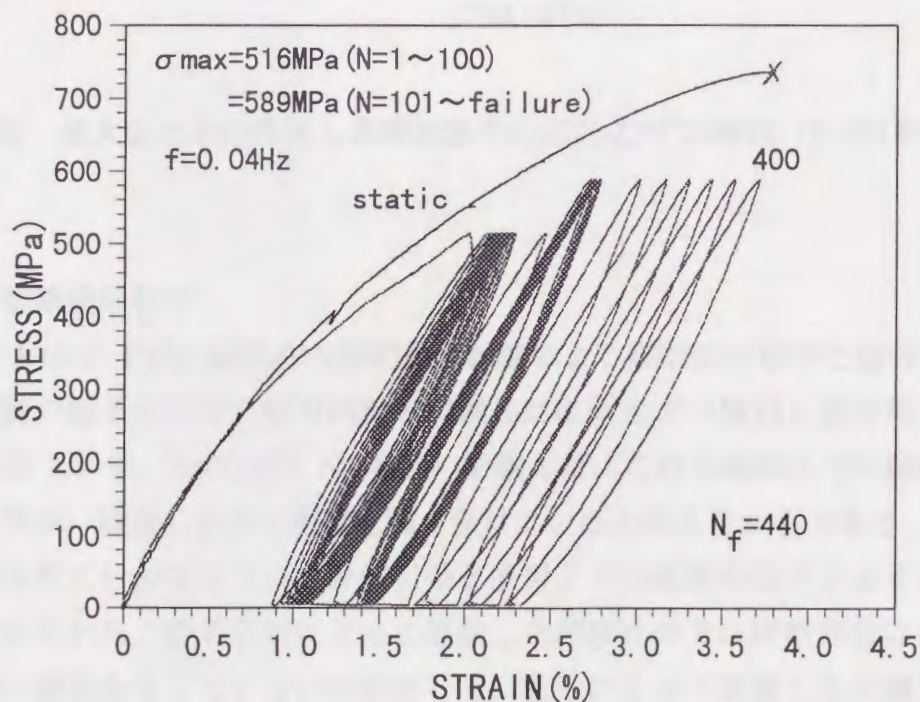


図 3.21 最大応力変動繰返し負荷試験時の応力-ひずみ線図 (P30D 試験片)

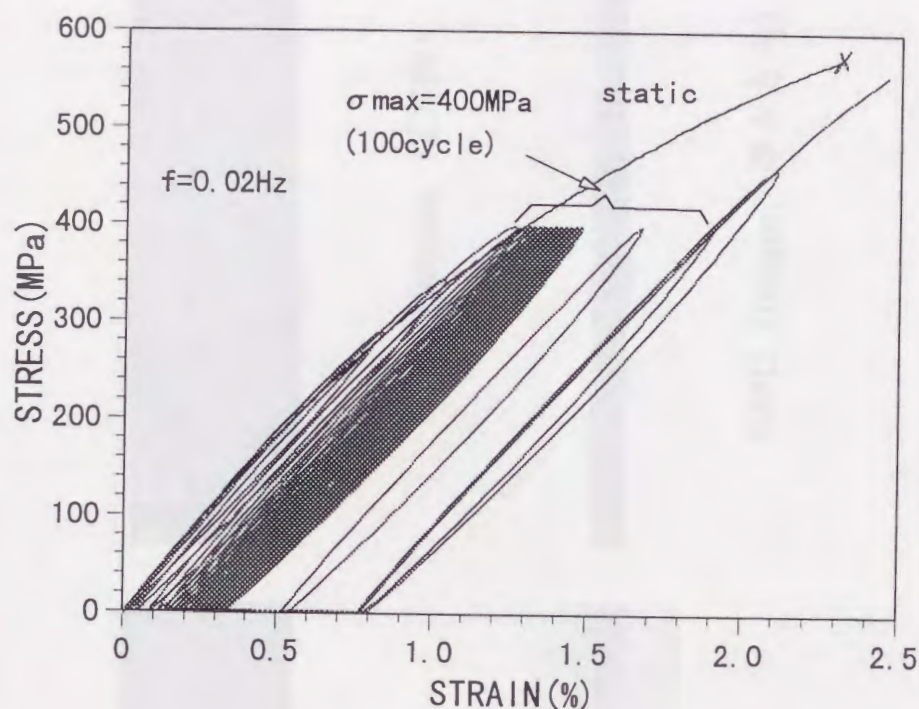


図 3.22 最大応力変動繰返し負荷試験時の応力-ひずみ線図 (E30D 試験片)

3.5.3 破断面の様子

写真 3.16 に E30D 試験片の静的引張試験による破断面の様子と疲労試験による破断面の様子を示す。疲労試験の試験片は破断までの繰返し数が最も大きいもの（表 3.3 中、E30D-07, $N_f=4028$ ）を選んだ。これは破断までの繰返し数が大きい方が、繰返し負荷の影響を強く受けていると考えたからである。

写真を見て分かるように、静的引張と疲労とでは破断の様子が全く異なっている。すなわち、静的引張によって破断した試験片の方は破断部分以外、巨視的に見て損傷を生じていないのに対して、疲労によって破壊した試験片の方は破断部だけでなく試験片全体にわたって、剥離が生じていることが分かる。

この違いは次のように推測される。積層板では初期破損が生じる荷重と最終破断を起こす荷重との間にはかなりの差があるといわれている⁴⁰⁾。E30D 試験片も初期破損（E30D 試験片の場合は最外層に入る剥離のことを指す）が生じ



E30D (fatigue, 幅方向)



E30D (static, 幅方向)



E30D (fatigue, 厚さ方向)



E30D (static, 厚さ方向)

写真 3.16 静的引張試験と疲労試験による破断面の比較

てから、完全な試験片の破断に至るまでにはかなり荷重の開きがある。静的引張試験の場合は初期破損が生じたあとも荷重は増え続けるため、始めに初期破損を起こした箇所だけに損傷が集約される。一方、疲労試験の場合は初期破損が起こる荷重まで負荷されるが、最終破断に達する前に荷重は取り除かれる。このとき、初期破損が生じた箇所は完全にもとの状態には戻れないが、その周囲がもとの状態に戻ろうとするために、破損部では圧縮応力が生じる。このあと再び負荷されるが、破損部では圧縮応力が作用しているため応力レベルが低くなり、別の箇所に引張応力による初期破損が起きる。以下、負荷除荷により今述べたことが繰り返される。よって、疲労試験では初期破損の破壊様式が試験片全体に広がると考えられる。

なお、30D 試験片だけでなく、他の配向角（15D、45D）においてもこの現象は観察された。

3.6 結言

この章では斜交対称積層板の低サイクル疲労試験について述べた。具体的には一定荷重振幅の片振り引張試験を行い、その応力-ひずみ関係について調べた。また超音波探傷試験により、試験片内部損傷の観察も行った。以上の実験より得られた結果を次に示す。

- 1) 一定荷重振幅繰返し負荷を受ける斜交対称積層板の応力-ひずみ線図において、繰返し数の増加とともにひずみが蓄積するメカニカルラチェット現象が観察された。
- 2) 超音波探傷により、疲労による剥離進展の様子が観察できた。その結果、Distributed と Blocked の剥離の発生時期、進展の様子が全く異なることが分かった。すなわち、Distributed の方は繰返しの初期の段階で試験片自由縁全体に剥離が入り、それらが徐々に進展していくのに対して、Blocked の方はある1ヶ所に致命的な剥離が入り、それが破断直前に急激に進展する。
- 3) 破断面の観察により、静的引張と疲労とでは破断の様子が異なることが分かった。すなわち、静的引張による破壊は局所的に起こるのに対し、疲労による破壊は試験片全体に損傷が広がることで生じる。
- 4) 静的引張時の破断ひずみと疲労試験時における破断ひずみとの関係を詳細に調べた。これにより、疲労破壊はラチェット現象あるいは剛性低下により、繰返し負荷時の最大ひずみが増加していき、その値が静的引張時の破断ひずみ付近に達したときに生じると推定された。

結果 4)より、繰返し負荷による蓄積ひずみは疲労破壊に関連のある重要なパラメータと考え、次章ではこの蓄積ひずみに対する数値シミュレーションを行い、繰返し負荷時の応力-ひずみ関係を表す構成式について提案する。

第4章 数値シミュレーション

4.1 緒言

本章では、第2章、第3章の実験結果をもとに数値シミュレーションを行う。第3章では、繰返し負荷を受ける斜交対称積層板はメカニカルラチェット現象を示し、このラチェット現象により蓄積するひずみ（以下、ラチェットひずみと呼ぶ）が疲労破壊と密接なつながりを持つ重要なパラメータであると考えた。

そこで、本章ではまず、ラチェットひずみに対する数値シミュレーションを行う。ラチェットひずみと繰返し数との関係が、粘塑性現象としてよく知られているクリープひずみと時間との関係に類似していることに着目し、クリープ構成式を参考にして、ラチェット現象を表す構成式（以下、ラチェット構成式と呼ぶ）を導く。

次に、第2章で得られた単調負荷に対しての数値シミュレーションを行う。第2章で、斜交対称積層板の応力-ひずみ関係は非線形性を持つことを示した。ここでは、斜交対称積層板の非線形構成式として、アルミ合金の非線形挙動を表すのによく用いられる Ramberg-Osgood 則を用いた。

最後に、ラチェットひずみに対する数値シミュレーションと単調負荷に対する数値シミュレーションを組み合わせることにより、繰返し負荷に対する数値シミュレーションを行った。

なお、本章における数値シミュレーションは前章で詳細な実験を行った P30D (PEEK[+30/-30]_{4s}) 積層板を用いて得られた実験結果を対象としている。

4.2 ラチェットひずみに対する数値シミュレーション

4.2.1 ひずみの定義

図 4.1 に前章で得られた斜交対称積層板の応力-ひずみ曲線の模式図を示す。本章で扱うひずみを次のように定義した。

- 1) 初期ひずみ (Pre-Strain, ϵ_0) … 始めの単調負荷により生じるひずみ
- 2) ラチェットひずみ (Ratchet Strain, $\epsilon_{(n)}^R$) … 繰返し負荷により進行する
ひずみ
- 3) 全ひずみ (Total Strain, ϵ) … 上のひずみを足し合わせたひずみ

また、最大応力と最小応力の差を応力振幅と名付け、 $\Delta\sigma$ で表す。本研究では、応力比がほぼゼロ ($10^{-3} \sim 10^{-2}$) であるので、最大応力をそのまま応力振幅とする。

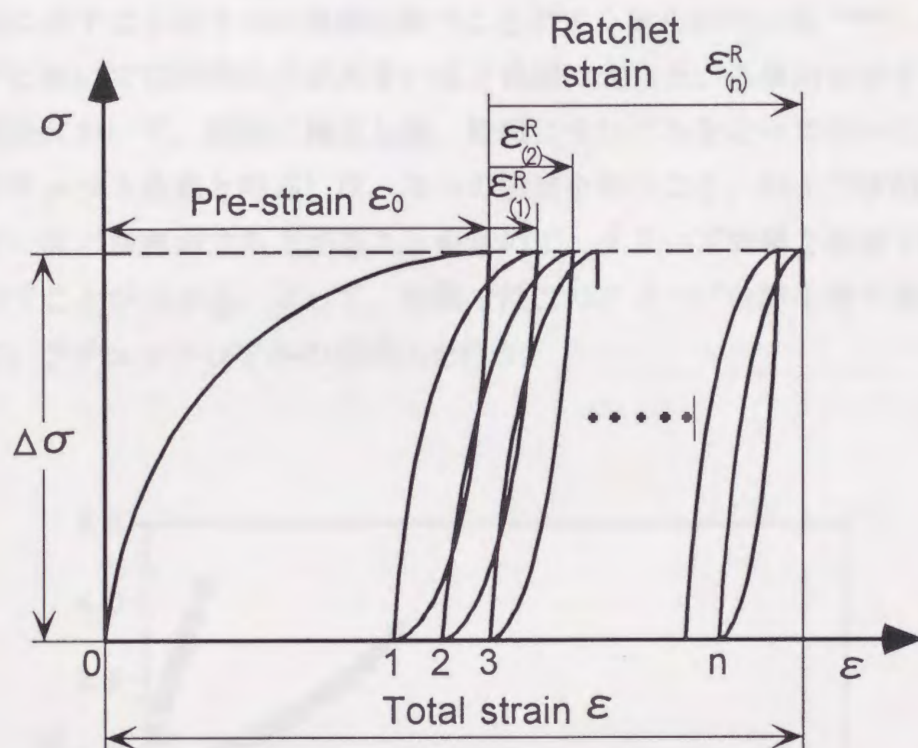


図 4.1 ひずみの名称の定義

4.2.2 ラチェットひずみの特性

図 4.2 に繰返し数増加による全ひずみの様子を示す。図中■, ●, ▲の記号はそれぞれ応力振幅が静的引張強度の 80%, 75%, 70%のときの全ひずみを表す。全ひずみを繰返し数で微分したもの ($d\varepsilon/dn$) を繰返しひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ と定義すると、この繰返しひずみ速度は図 4.2 の曲線の接線の傾きを表すことになる。繰返しひずみ速度により、全ひずみは次の 3つの領域に分類される。

- 1) 第1領域 (Primary region) ; 繰返しひずみ速度が始め非常に高い値を持ち、その後、急減する領域。
- 2) 第2領域 (Secondary region) ; 繰返しひずみ速度が繰返し数によらず、一定の領域。このとき、全ひずみは繰返し数に比例して直線的に増加する。

3) 第3領域 (Tertiary region) ; 繰返しひずみ速度が増加する領域.

このように, 3つの領域が現れる類似の現象として, クリープ現象が挙げられる. 図 4.3 にクリープとラチェットを比較したものを示す. クリープ現象において, 横軸に応力作用時間, 縦軸に全ひずみをとって描かれるクリープ曲線は, 図に示すように3つの領域を持つことがよく知られている^{41),42)}. また, クリープにおいては作用応力が大きいほど曲線は立ち上がる傾向を示す. ラチェット現象において, 横軸に繰返し数, 縦軸に全ひずみをとって描いた曲線(以下, ラチェット曲線と呼ぶ)は, 3つの領域を持つこと, および作用応力振幅が大きいほど曲線が立ち上がることを含めて, クリープ曲線と極めて類似の現象を示すことが分かる. よって, 次節ではこのクリープ曲線を表す構成式を利用して, ラチェットひずみの定式化を行う.

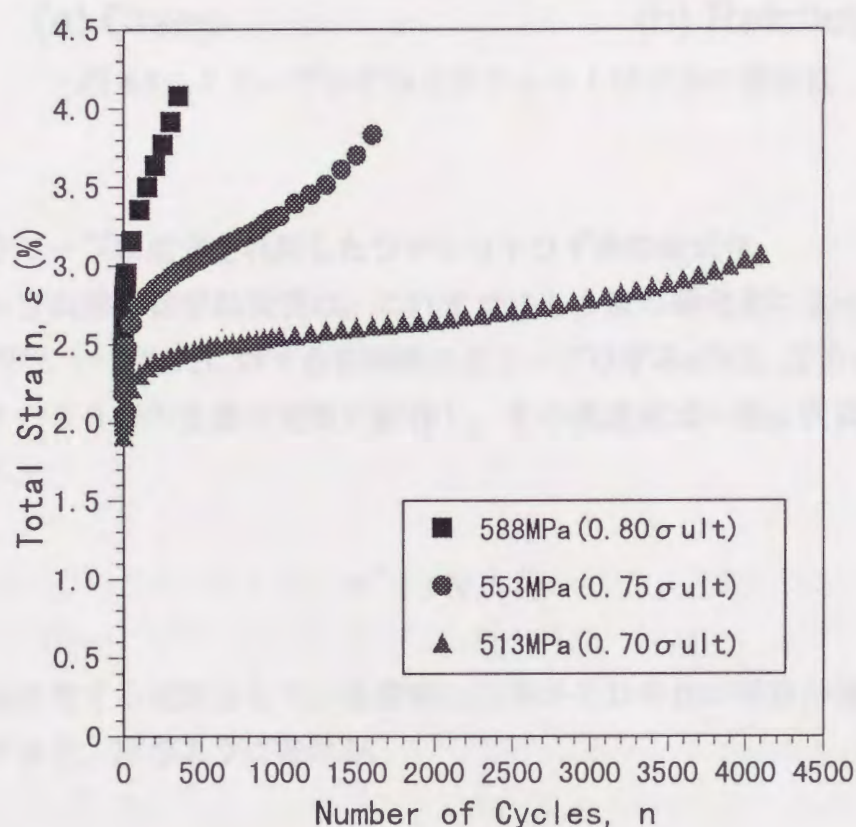


図 4.2 繰返し数と全ひずみとの関係

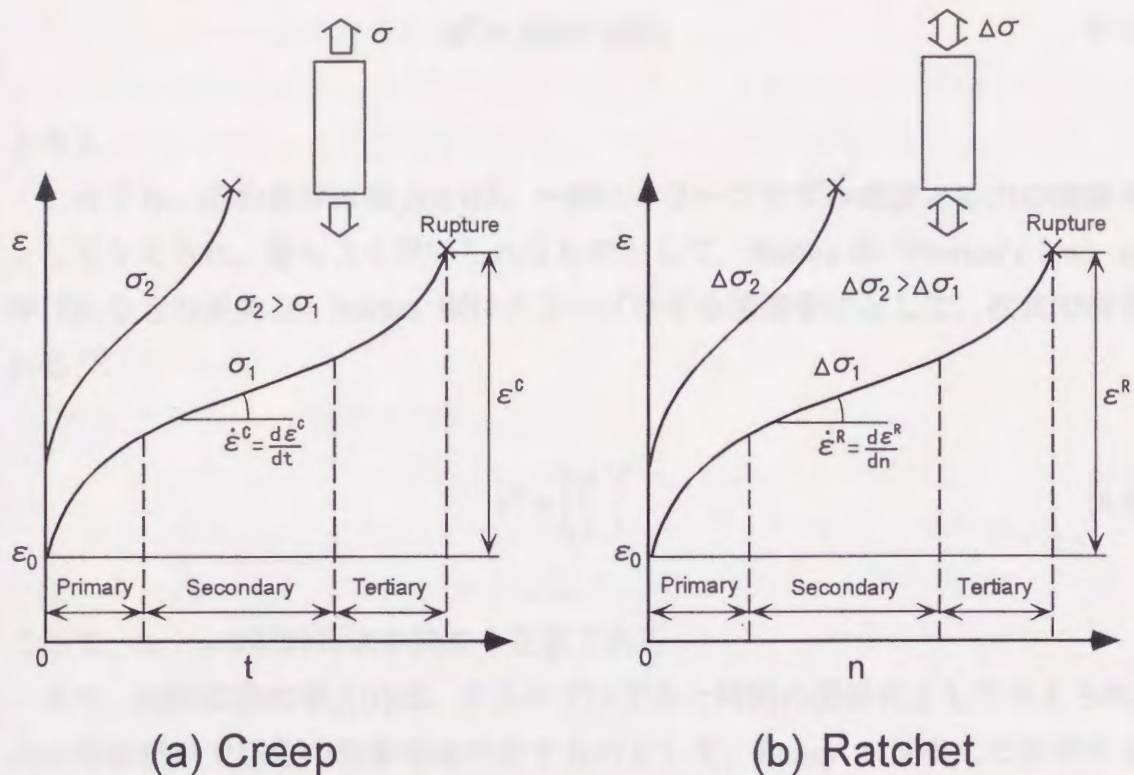


図 4.3 クリープひずみとラチェットひずみの類似性

4.2.3 クリープ構成式を利用したラチェットひずみの定式化

クリープ曲線の数学的表現は、これまでも多数の研究者によって提案されている^{41),42)}。一定応力に対する各瞬間のクリープひずみ ϵ^c は、応力 σ ，時間 t ，温度 T という3つの主要な変数に依存し，その構成式は一般に次式のように表示される。

$$\epsilon^c = f(\sigma, t, T) \quad (4.1)$$

上式(4.1)に対する近似として，各変数の効果がそれぞれの関数の積で表されるものとする，次のように書ける。

$$\epsilon^c = f_1(\sigma) \cdot f_2(t) \cdot f_3(T) \quad (4.2)$$

温度による効果が無視できるとき，上式は

$$\varepsilon^C = f_1(\sigma) \cdot f_2(t) \quad (4.3)$$

となる。

このうち、応力依存の項 $f_1(\sigma)$ は、一般にクリープひずみ速度と応力の関係式として与えられ、最もよく用いられるものとして、Norton 則 (Norton's law) と呼ばれるものがある。Norton 則はクリープひずみ速度を $\dot{\varepsilon}^C$ として、次式で表される¹⁵⁾。

$$\dot{\varepsilon}^C = \left(\frac{\sigma}{\lambda} \right)^\gamma \quad (4.4)$$

ここで、 λ 、 γ は材料により決まる定数である。

また、時間依存の項 $f_2(t)$ は、クリープひずみと時間の関係式として与えられ、式の形が簡単で実際の現象をよく表すものとして、Bailey が提案した次式がよく用いられる^{41), 42)}。

$$\varepsilon^C = at^\alpha \quad (4.5)$$

ここで、 a 、 α は材料により決まる定数である。式(4.4)を時間で積分し、式(4.5)と組み合わせた次式がクリープ構成式としてよく用いられる。

$$\varepsilon^C = A\sigma^\beta t^\alpha \quad (4.6)$$

式(4.6)は式中の定数の数も A 、 β 、 α の3つと少なく、定数をうまく選べば、第1、第2領域までのクリープひずみを記述することができる。

式(4.6)をラチェットひずみに適用するため、クリープひずみ ε^C をラチェットひずみ ε^R に、応力 σ を応力振幅 $\Delta\sigma$ に、時間 t を繰返し数 n に置き換えたものを考える。すなわち、ラチェットひずみに対して次式が成り立つものとする。

$$\varepsilon^R = A\Delta\sigma^\beta n^\alpha \quad (4.7)$$

式(4.7)がラチェット構成式となる⁴³⁾。

4.2.4 ラチェット構成式中の係数の決定方法

構成式における定数の決定が困難であると、いくらその式が簡単な形であっても、実用上有効なものとは言えない。ラチェット構成式として用いる式(4.7)中の定数は、比較的簡単に決定することが出来る。以下にその方法を述べる。

1) 全ひずみから初期ひずみを引いたラチェットひずみと繰返し数のグラフを描く。(図 4.4(a))

2) 式(4.7)において、両辺対数をとると、

$$\log \epsilon^R = \log A \Delta \sigma^\beta + \alpha \log n \quad (4.8)$$

となり、横軸 $\log n$ 、縦軸 $\log \epsilon^R$ のグラフを描けば、その直線の傾きは α を表す。よって、図 4.4(a)のグラフで第1領域が確実に成り立っている部分を両対数表示して、その直線の傾きを求める。実験結果から $\alpha = 0.24$ となった。

(図 4.4(b))

3) 式(4.7)を両辺 n^α で割って対数をとると、

$$\log \frac{\epsilon^R}{n^\alpha} = \log A + \beta \log \Delta \sigma \quad (4.9)$$

となり、横軸 $\log \Delta \sigma$ 、縦軸 $\log \frac{\epsilon^R}{n^\alpha}$ のグラフを描けば、その直線の傾きは β を、

切片は $\log A$ を表す。よって、2)で求めた α を用いて、 $\frac{\epsilon^R}{n^\alpha}$ を計算し、この対数を縦軸に、 $\Delta \sigma$ の対数を横軸にとって、その直線の傾きおよび切片を求める。実験結果から $\beta = 8.41$ 、 $A = 1.9 \times 10^{-24}$ となった。(図 4.4(c))

以上がラチェット構成式中の係数の決定方法である。

さらに、ラチェットひずみが第1領域から第2領域に移行する点の判定のために、クリープにおける Norton 則 (式(4.4)) をラチェットに適用した次式

$$\dot{\epsilon}^R = \left(\frac{\Delta \sigma}{\lambda} \right)^\gamma \quad (4.10)$$

の係数 γ 、 λ を決定する。図 4.4(d)に、第2領域におけるラチェット曲線の勾配を横軸に、応力振幅を縦軸にとったもの(ただし、両軸とも対数表示)を示す。ほぼ直線関係が成り立ち、Norton 則が成立していることが分かる。実験結果から $\gamma = 24.4$ 、 $\lambda = 748$ となった。

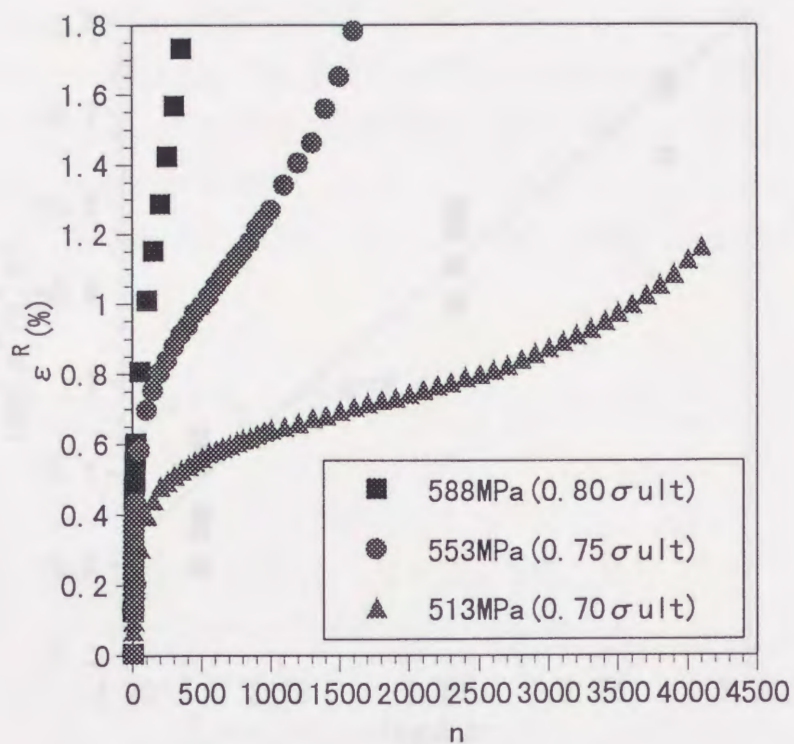


図 4.4(a) ラチェットひずみと繰返し数との関係

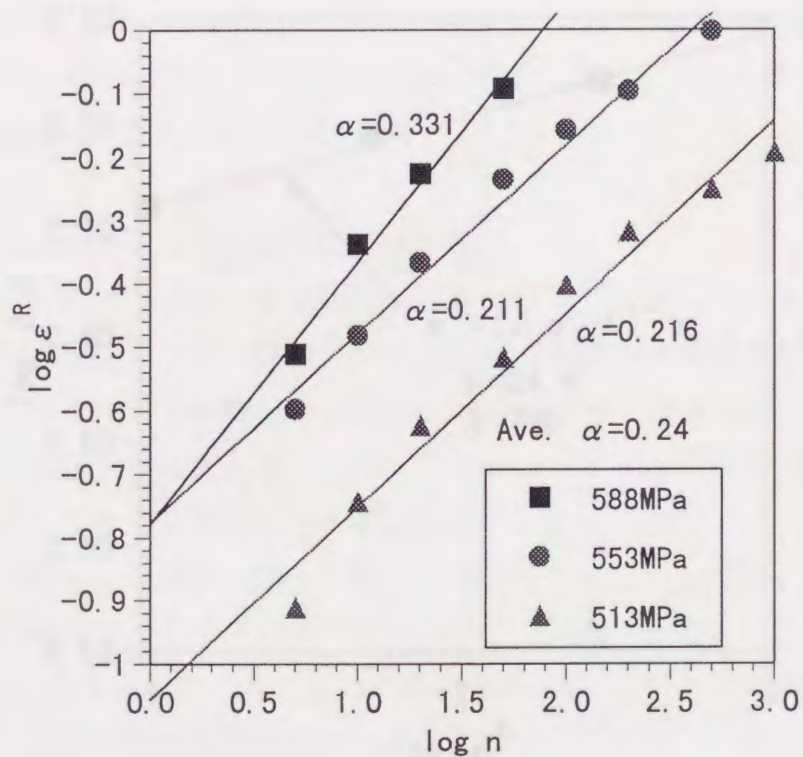


図 4.4(b) 係数 α の決定法

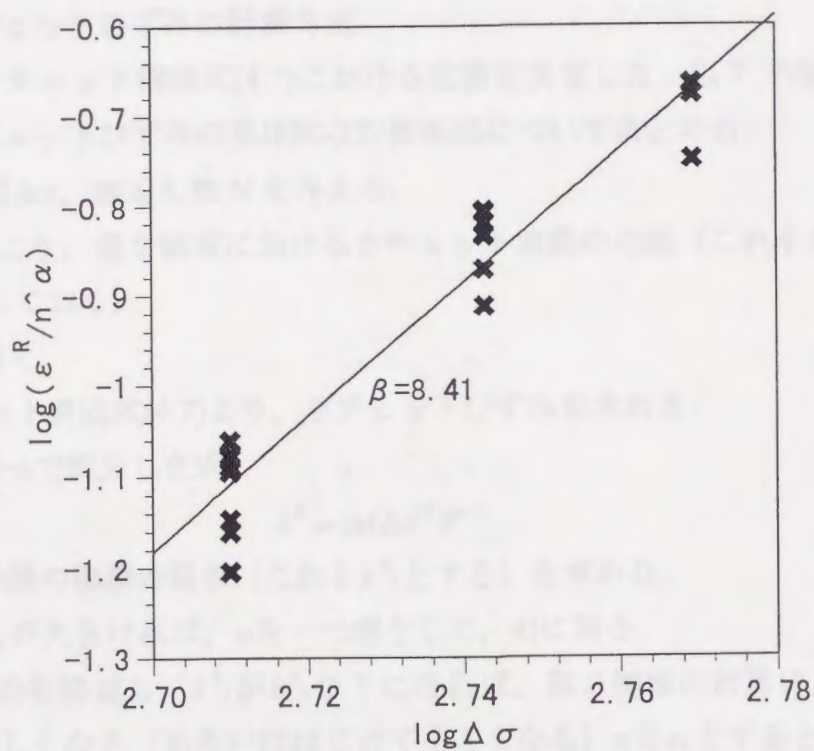


図 4.4(c) 係数 β, A の決定法

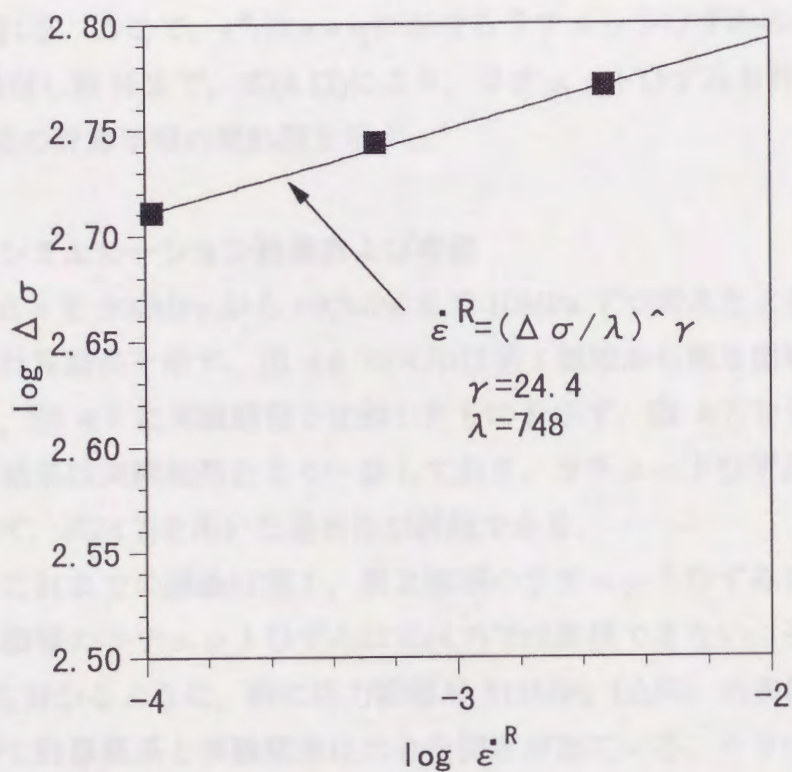


図 4.4(d) 第 2 領域における Norton 則中の係数 γ, λ の決定法

4.2.5 ラチェットひずみの計算方法

前節でラチェット構成式(4.7)における定数を決定した。以下では、式(4.7)を用いたラチェットひずみの具体的な計算手順についてまとめる。

- 1) 応力振幅 $\Delta\sigma$ ，繰返し数 N を与える。
- 2) 式(4.10)より，第2領域におけるラチェット曲線の勾配（これを $\dot{\epsilon}^R_2$ とする）を計算しておく。
- 3) $n=1$ とおく。
- 4) ラチェット構成式(4.7)より，ラチェットひずみを求める。
- 5) 式(4.7)を n で微分した式

$$\dot{\epsilon}^R = \alpha A \Delta\sigma^\beta n^{\alpha-1} \quad (4.11)$$

より，曲線の接線の傾き（これを $\dot{\epsilon}^R_1$ とする）を求める。

- 6) $\dot{\epsilon}^R_1$ が $\dot{\epsilon}^R_2$ が大きければ， n を一つ増やして，4)に戻る。
- 7) 4)から 6)を繰返し， $\dot{\epsilon}^R_1$ が $\dot{\epsilon}^R_2$ 以下になれば，第2領域の計算に入る。 $\dot{\epsilon}^R_1$ が $\dot{\epsilon}^R_2$ と等しくなる（あるいははじめて小さくなる） n を n_1 とすると，第2領域のラチェットひずみは，式 $\epsilon^R = A \Delta\sigma^\beta n^\alpha$ の $n = n_1$ における接線

$$\epsilon^R = \alpha A \Delta\sigma^\beta n_1^{\alpha-1} (n - n_1) + \epsilon^R_1 \quad (4.12)$$

で計算される。ここで， ϵ^R_1 は $n = n_1$ におけるラチェットひずみの値を表す。

- 8) 所定の繰返し数 N まで，式(4.12)により，ラチェットひずみを計算する。

図 4.5 に上述の計算手順の流れ図を示す。

4.2.6 数値シミュレーション結果および考察

図 4.6 に $\Delta\sigma$ を 500MPa から 600MPa まで 10MPa ずつ変えたときのラチェットひずみの計算結果を示す。図 4.6 の×印は第1領域から第2領域に移る点である。また，図 4.7 に実験結果と比較したものを示す。図 4.7 を見て分かるように，計算結果は実験結果とよく一致しており，ラチェットひずみの数式による表現として，式(4.7)を用いた妥当性が評価できる。

ただし，これまでの議論は第1，第2領域のラチェットひずみに対してのもので，第3領域のラチェットひずみは式(4.7)では表現できない。そのため，図 4.7 を見ても分かるように，特に応力振幅が 513MPa（△印）の実験結果は第3領域において計算結果と実験結果に大きな開きが出ている。クリープ現象の第1領域から第3領域まですべての領域を表現する構成式がいくつか提案されているが，どれも式中に決定すべき定数の数が多く，あまり実用的ではない。

そこで本研究では構成式中に決定すべき定数の数が少なく，しかもその定数の決定が比較的容易なものとして式(4.7)を採用した．しかしながら，ラチェットひずみによる疲労破壊予測を行う場合には，第3領域まで表現可能な構成式が必要となるであろう．

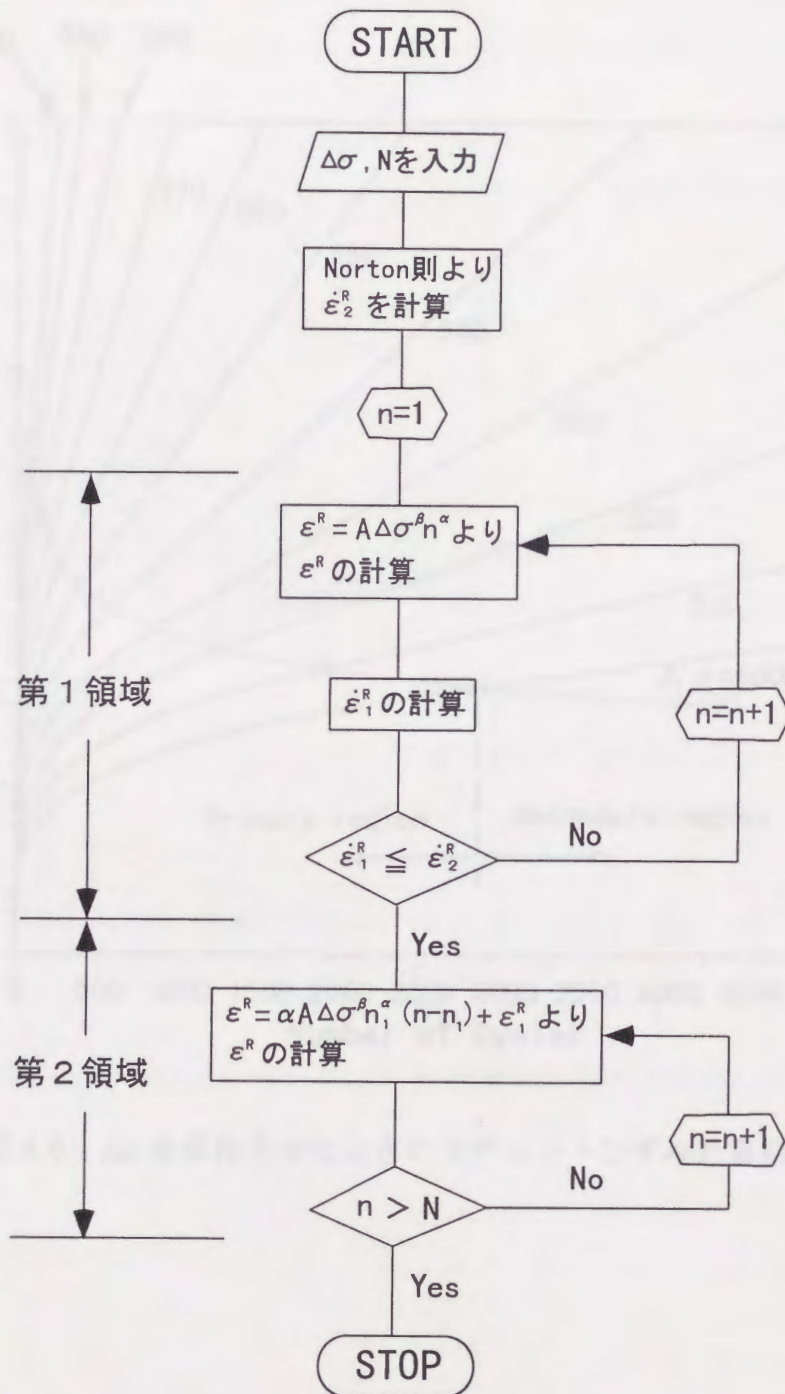


図 4.5 ラチェットひずみ計算のフローチャート

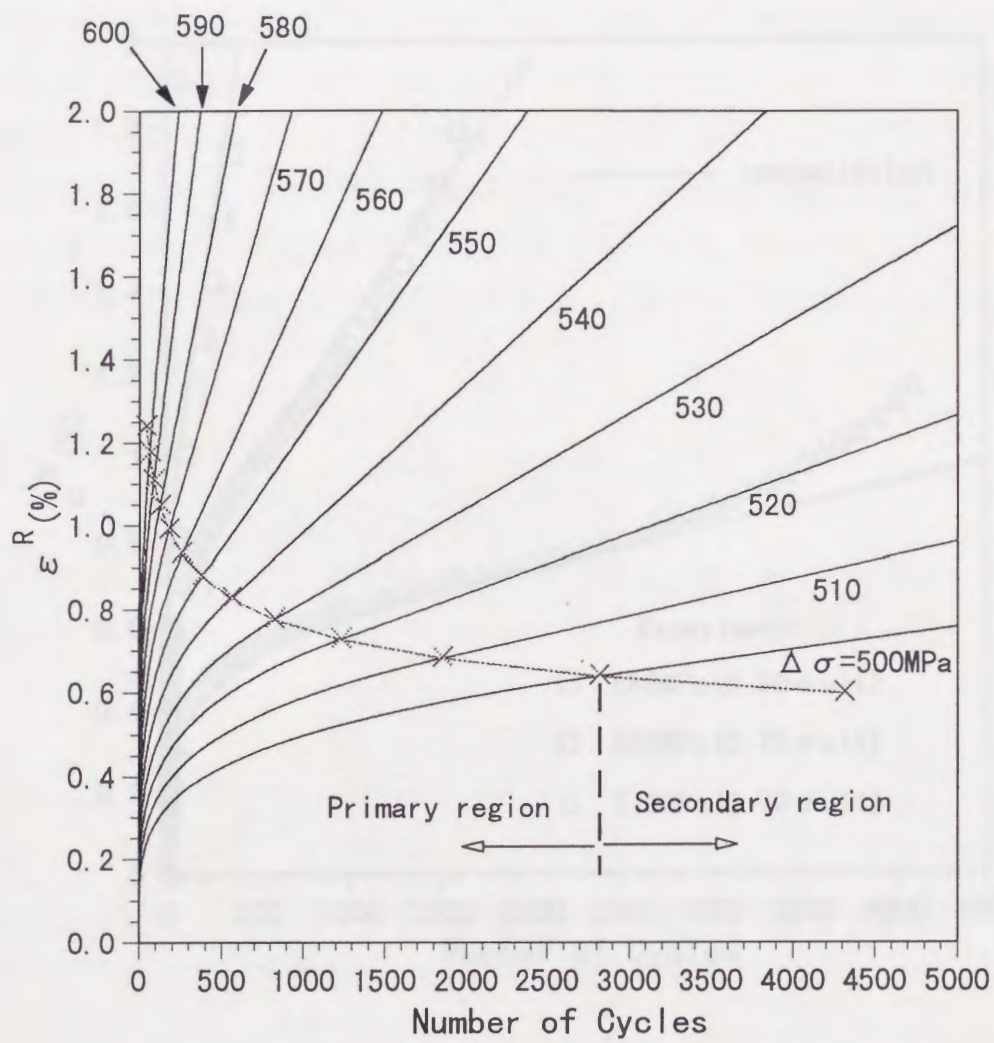


図 4.6 $\Delta\sigma$ を変化させたときのラチェットひずみ計算結果

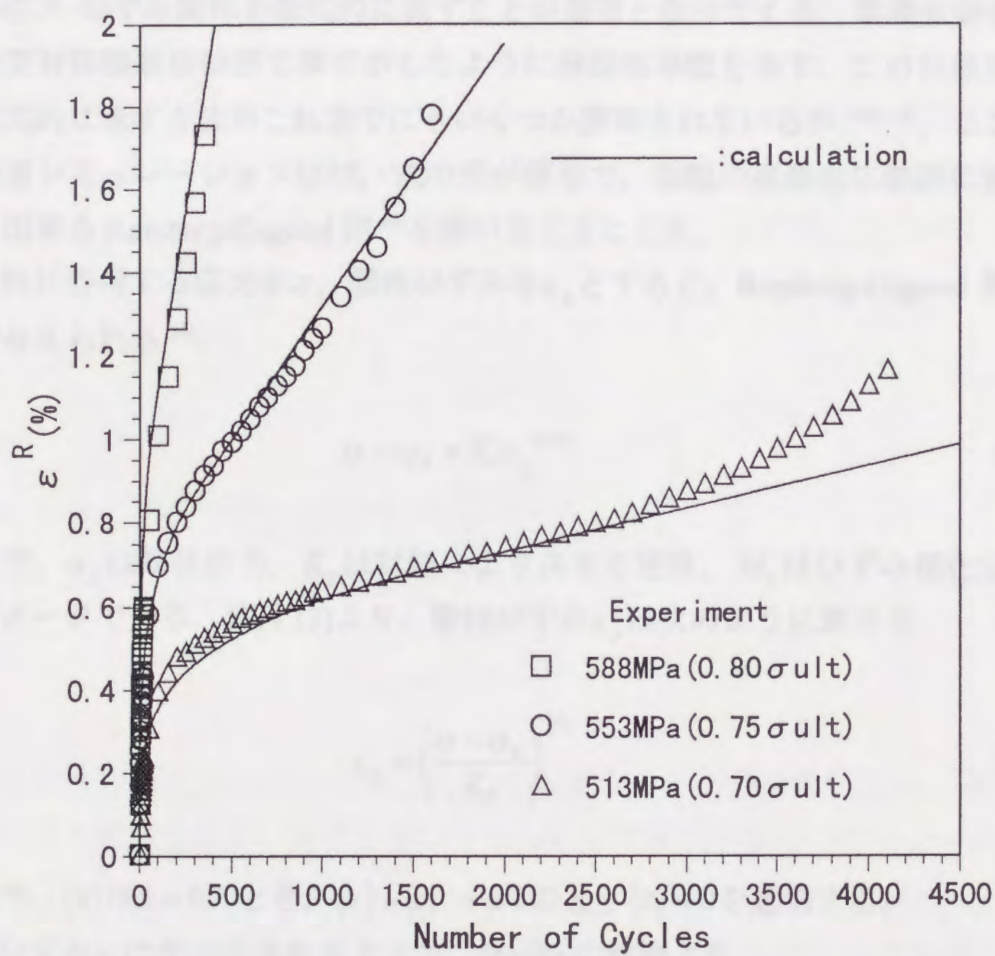


図 4.7 ラチェットひずみの実験結果と計算結果との比較

4.3 繰返し負荷に対する数値シミュレーション

4.3.1 Ramberg-Osgood 則による単調負荷の数式的表現

繰返し負荷による全ひずみを求めるには、4.2 で求めたラチェットひずみの他に初期負荷により生じる初期ひずみを求める必要がある。このため単調負荷時の応力-ひずみ関係を数式的に表すことが重要となってくる。単調負荷を受ける斜交対称積層板は第2章で示したように非線形挙動を示す。この非線形挙動を数式的に表す方法がこれまでもいくつか提案されているが^{44)~47)}、ここで行う数値シミュレーションには、式の形が簡単で、実際の現象を広範囲に表すことが出来る Ramberg-Osgood 則⁴⁸⁾を用いることにした。

材料に作用する応力を σ 、塑性ひずみを ϵ_p とすると、Ramberg-Osgood 則は次式で与えられる¹⁵⁾。

$$\sigma = \sigma_y + K_y \epsilon_p^{1/M_y} \quad (4.13)$$

ここで、 σ_y は降伏応力、 K_y は材料により決まる定数、 M_y はひずみ硬化を表すパラメータである。式(4.13)より、塑性ひずみ ϵ_p は次のように表せる。

$$\epsilon_p = \left\langle \frac{\sigma - \sigma_y}{K_y} \right\rangle^{M_y} \quad (4.14)$$

ここで、 $\langle x \rangle$ は $x > 0$ のとき、 $\langle x \rangle = x$ 、 $x \leq 0$ のとき $\langle x \rangle = 0$ を意味する。

弾性ひずみ ϵ_e はヤング率を E として、Hookeの法則より

$$\epsilon_e = \frac{\sigma}{E} \quad (4.15)$$

で表される。よって、単調負荷におけるひずみ ϵ は、式(4.14)と式(4.15)より、

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left\langle \frac{\sigma - \sigma_y}{K_y} \right\rangle^{M_y} \quad (4.16)$$

と表せる。式(4.16)が一般に Ramberg-Osgood 則と呼ばれる式である。

4.3.2 単調負荷の数値シミュレーション結果

式(4.16)を用いて、P30D 試験片の単調負荷に対する数値シミュレーションを行う。数値シミュレーションの対象となる P30D 試験片の応力-ひずみ線図を図 4.8 に示す。式(4.16)中には E , σ_y , K_y , M_y と 4 つの材料定数を含むが、このうち、 E はヤング率で、試験結果の弾性域を使って簡単に求めることができ、図 4.8 に示すように $E=45830\text{MPa}$ となった。

次に σ_y であるが、図 4.8 を見ても分かるように P30D 試験片では明確な弾性限は現れず、負荷のごく初期の段階から応力-ひずみ線図は非線形性を示すので、ここでは、 $\sigma_y = 0$ と仮定する。この仮定の下で、式(4.14)の塑性ひずみは

$$\epsilon_p = \left(\frac{\sigma}{K_y} \right)^{M_y} \quad (4.17)$$

となり、式(4.16)の Ramberg-Osgood 則は

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K_y} \right)^{M_y} \quad (4.18)$$

と書き直せる。式(4.18)中の決定していない残りの 2 つの材料定数 K_y , M_y は次のようにして決定する。まず、全ひずみから弾性ひずみを引くことで σ - ϵ_p 曲線を描く (図 4.9(a))。それを両対数表示すると、実験データはほぼ直線上に並ぶので、この直線の傾きと切片を求める (図 4.9(b))。式(4.17)の両辺対数をとって、整理すると

$$\log \sigma = \frac{1}{M_y} \log \epsilon_p + \log K_y \quad (4.19)$$

となるので、直線の傾きが $\frac{1}{M_y}$, 切片が $\log K_y$ を表す。これにより、 M_y , K_y を

決定でき、実験データから $M_y = 2.947$, $K_y = 2793$ と定められた。

この材料定数をもとに式(4.18)で応力-ひずみ線図を計算した結果を実験データとともに図 4.10 に示す。計算結果と実験結果は非常に良く一致しているので、P30D の単調負荷時の応力-ひずみ関係式は式(4.18)でよく表せることが分かる。

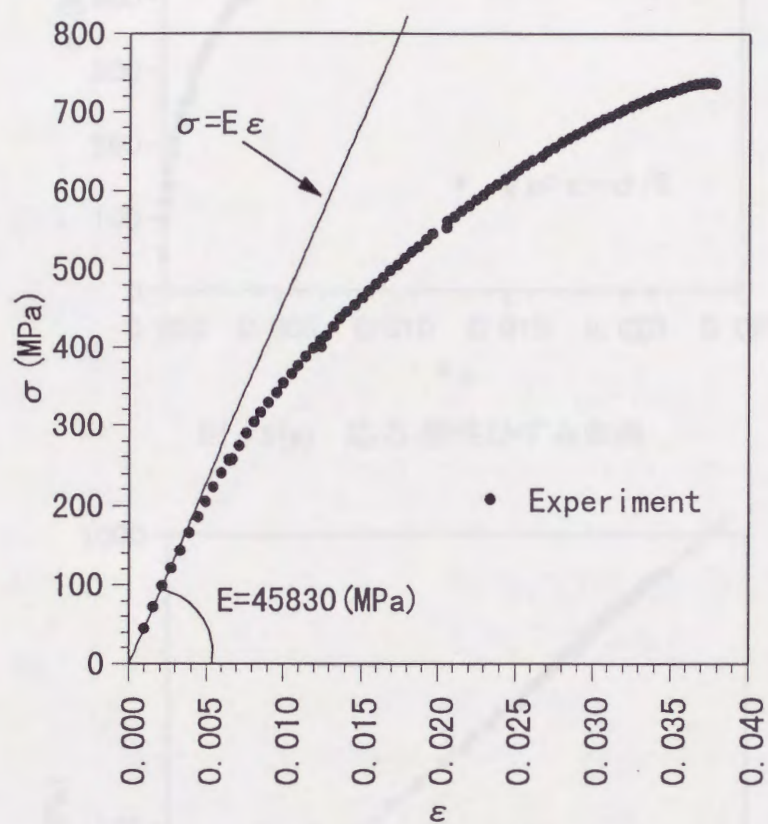


図 4.8 単調負荷時の応力-ひずみ線図 (P30D 試験片)

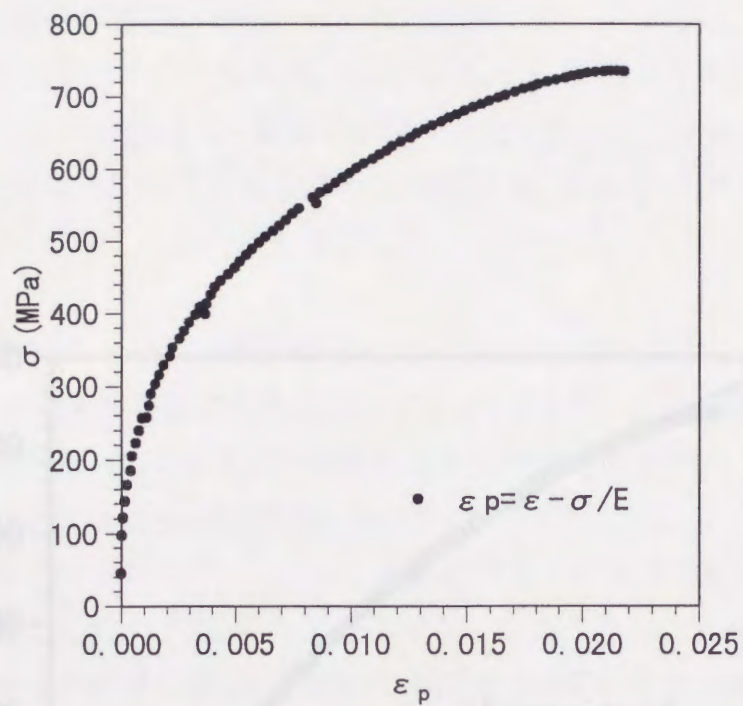


図 4.9(a) 応力-塑性ひずみ曲線

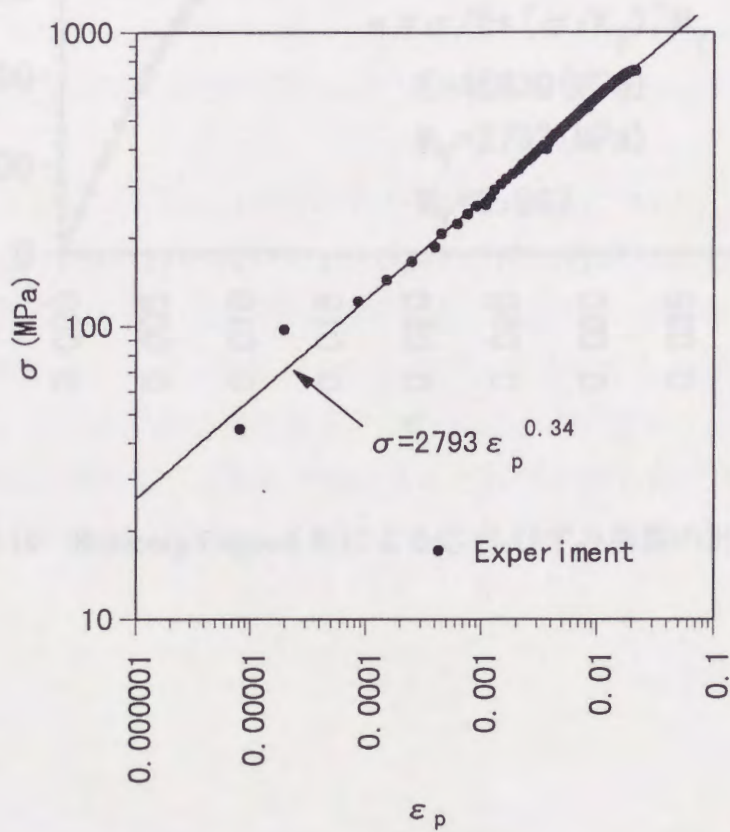


図 4.9(b) 応力-塑性ひずみ曲線 (両対数表示)

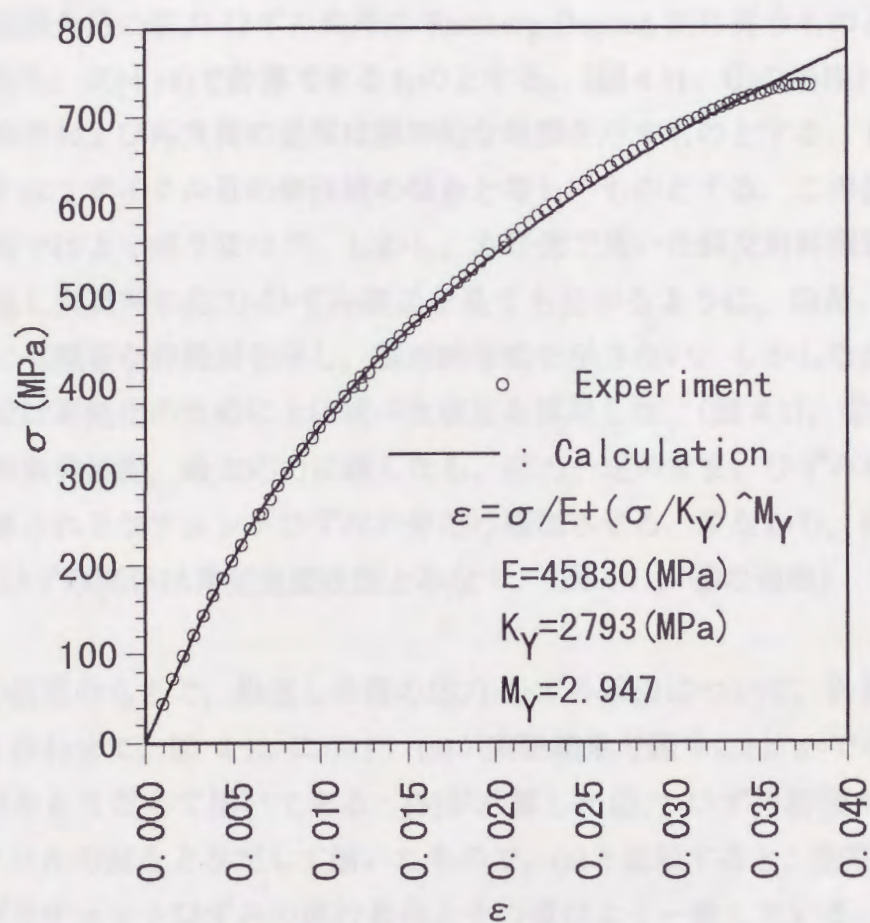


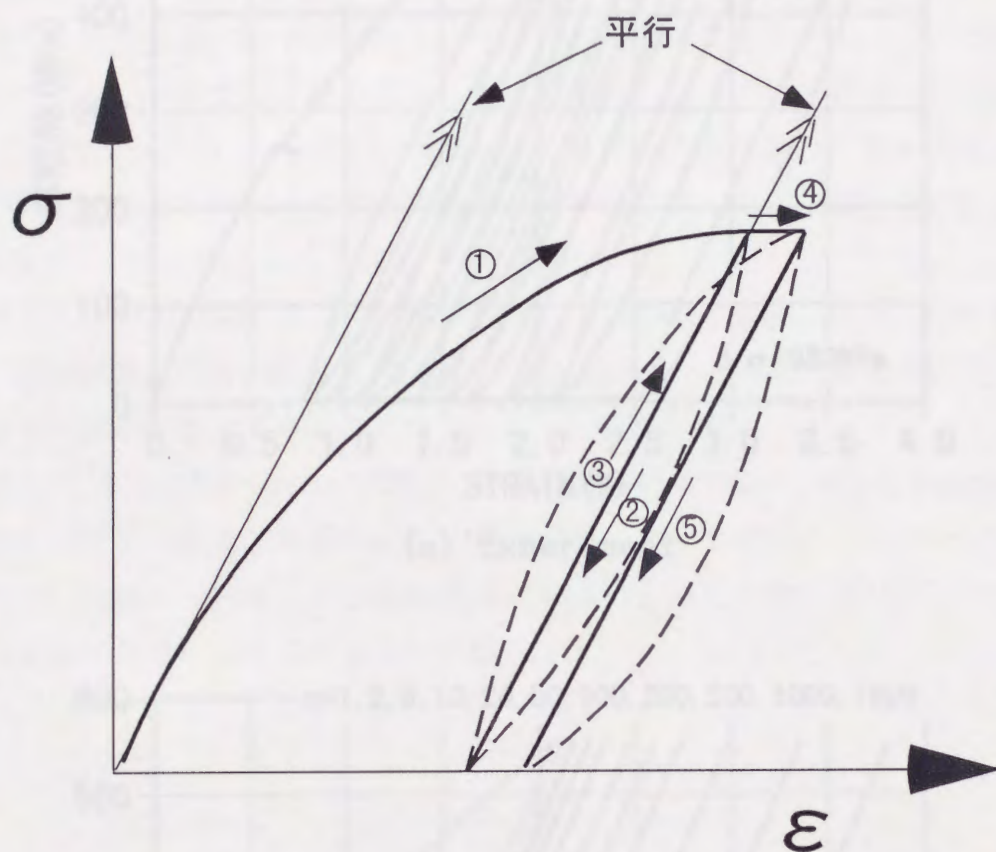
図 4.10 Ramberg-Osgood 則による応力-ひずみ曲線の計算結果

4.3.3 繰返し負荷の数値シミュレーション結果

4.2 で導いたラチェット構成式, および 4.3.2 で導いた単調負荷に対する Ramberg-Osgood 則を用いて, 繰返し負荷の数値シミュレーションを行う. 数値シミュレーションに際して, 応力-ひずみ線図を図 4.11 に示すように理想化した. すなわち, 次のような条件を仮定した.

- 1) 初期負荷の応力-ひずみ曲線は Ramberg-Osgood 則に従うものとする. すなわち, 式(4.18)で計算できるものとする. (図 4.11, ①の過程)
- 2) 除荷および再負荷の過程は線形的な挙動を示すものとする. しかもその傾きは 1 サイクル目の弾性域の傾きと等しいものとする. この仮定は金属材料ではよく成り立つ⁴⁹⁾. しかし, 本研究で用いた斜交対称積層板では, 繰返し負荷時の応力-ひずみ線図を見ても分かるように, 除荷, 再負荷の際にも顕著な非線形を示し, 線形的挙動を示さない. しかしながら, 本研究では単純化のために上に述べた仮定を採用した. (図 4.11, ②③⑤の過程)
- 3) 再負荷の際, 最大応力に達したら, 応力一定のまま, ひずみを式(4.7)で計算されるラチェットひずみの分だけ増加させる. すなわち, 再負荷の応力-ひずみ関係は弾完全塑性型とみなす. (図 4.11, ④の過程)

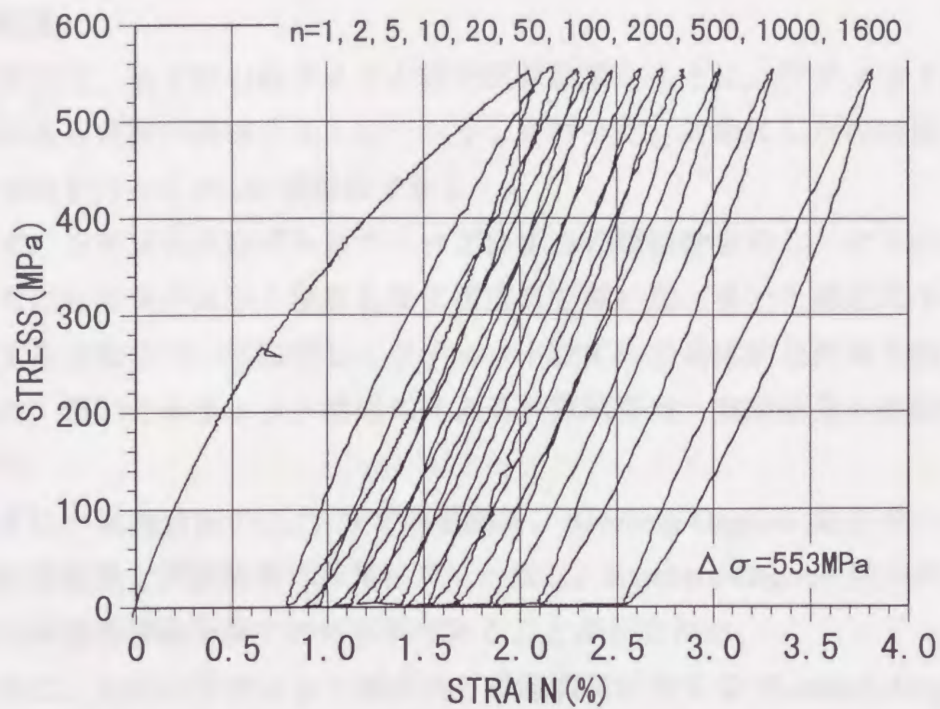
以上の仮定のもとで, 繰返し負荷の応力-ひずみ線図について, 計算結果と実験結果を合わせて, 図 4.12 に示す. (a)が実験結果で図中には $n=$ で示すサイクルの波形をとりだして描いてある. (b)が計算した応力-ひずみ線図から, (a)と同じサイクルの波をとりだして描いたもので, (a)と比較すると, 初期負荷の挙動, およびラチェットひずみの進行具合とその値はよく一致している. ただし, (a)で見られる除荷-再負荷の非線形挙動による紡錘形の閉じたヒステリシスループは再現されていない.



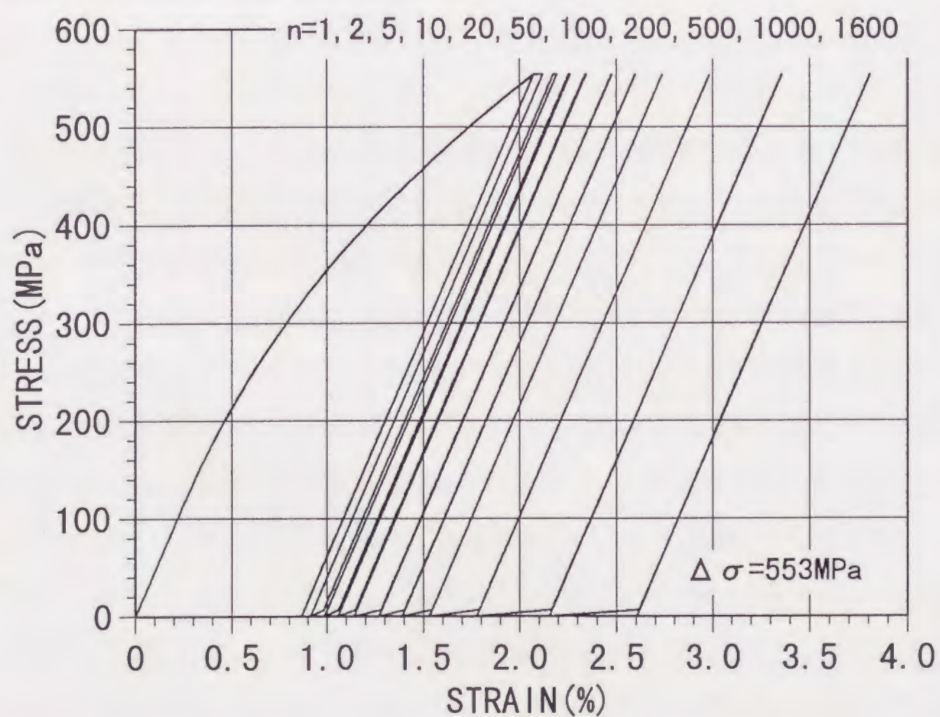
----- 実際の応力-ひずみ線図

———— シミュレーション時の
応力-ひずみ線図

図 4.11 繰返し負荷時の応力-ひずみ線図のモデル化



(a) Experiment



(b) Calculation

図 4.12 繰返し負荷挙動のシミュレーション結果

4.4 結言

本章では、第3章の低サイクル疲労試験結果をもとに、ラチェットひずみおよび繰返し負荷の数値シミュレーションを行った。対象にしたのは第3章で詳細な実験を行った P30D 積層板である。

まず、ラチェットひずみとクリープひずみの類似性を示し、クリープ構成式を参考にしてラチェット現象を表す構成式を導いた。導いた構成式中の係数を決定する方法について説明し、ラチェットひずみの具体的な計算手順について述べた。導いたラチェット構成式による計算結果は、実験結果と比較的よく一致した。

つぎに、単調負荷の応力-ひずみ関係を、Ramberg-Osgood 則を用いて計算した。計算結果と実験結果は非常に良く一致し、Ramberg-Osgood 則が斜交対称積層板の非線形挙動を表すのに有効であることが示された。

最後に、上述のラチェット構成式と単調負荷に対する Ramberg-Osgood 則を組み合わせ、繰返し負荷の応力-ひずみ関係に対する数値シミュレーションを行った。数値シミュレーション結果は実験結果とよく一致しており、ラチェットひずみの進行をよく表せることが分かった。

第5章 結論

航空宇宙構造物は様々な繰返し負荷を受けることが多いため、材料の疲労を十分考慮に入れて設計する必要がある。近年、比強度、比剛性の高さから航空宇宙構造物に幅広く用いられるようになった複合材料においても、疲労に関する研究は重要な課題とされている。複合材料の疲労に関する研究はこれまでも数多く行われているが、従来の金属材料の手法に倣って、S-N 曲線を対象としたものが多い。しかし、この S-N 曲線によるアプローチは複合材料の疲労を扱う際には、必ずしも有効な手段とは言えない。なぜなら、金属材料では、材料が決まればその材料の S-N 曲線が決まってしまうのに対し、複合材料の場合は、同じ材料から構成されていても、繊維配向角や積層順序などにより異なる S-N 曲線が得られるからである。

複合材料は、繊維配向角や積層順序を変えることにより、使用箇所や目的に応じて最適設計が可能であるという他の材料にはない特徴を持つ。この特徴を最大限に生かすためには、現在のところ実験でしか得ることができない疲労特性を、数値シミュレーションによって予測することが重要となる。疲労の数値シミュレーションのためには材料の繰返し負荷特性を知る必要があるが、S-N 曲線では破断までの繰返し数という結果のみを対象とするため、負荷中の材料挙動については取り扱うことができない。

そこで、繰返し負荷時の応力-ひずみ関係に着目して、疲労挙動を研究する方法が考えられる。この手法は、低サイクル疲労が問題となる構造物の解析において重要な位置を占め、金属材料の分野では繰返し塑性問題として研究が盛んに行われている。しかし、複合材料においては、繰返し負荷時の応力-ひずみ関係について調べた研究自体少なく、疲労挙動との関連性まで論じたものはほとんどない。繰返し負荷を受ける材料の応力-ひずみ関係を調べることは、有限要素法などの構造解析に必要な構成方程式を実験的に得るために不可欠である。

本論文は以上のような背景をもとに、複合材料の低サイクル疲労挙動を応力-ひずみ関係に着目して調べ、疲労破壊メカニズムを解明することを試みたものである。

まず、第1章では、本研究の背景および目的、複合材積層板の疲労問題に対

する従来の研究について述べた。

第2章では実験に使用した積層板の基本的力学特性を知るため、および静的引張試験と疲労試験における応力-ひずみ関係、破断モードの比較を行うために、斜交対称積層板を用いて静的引張試験を行った。マトリックス、繊維配向角および積層順序の異なる試験片を用い、各々の試験片から得られた応力-ひずみ線図の比較検討を行った。これにより、斜交対称積層板の応力-ひずみ関係は非線形性を示し、その挙動はマトリックス、繊維配向角、積層順序の影響を顕著に受けることを示した。特に繊維配向角、積層順序による影響が著しく、次のような結果を得た。まず繊維配向角の影響については、その角度が大きいほど、剛性、強度の低下が生じることが分かった。また、45度試験片の応力-ひずみ線図は2段階の曲率を持ち、他の繊維配向角では見られない特異な応力-ひずみ関係を示すことが分かった。積層順序の影響については、 $[+\theta/-\theta]_s$ (以下、Distributed) と $[+\theta_4/-\theta_4]_s$ (以下、Blocked) の比較より、一層あたりの層厚が厚くなると、強度の低下が生じることが分かった。しかも、その強度の低下率は繊維配向角が15, 30, 45度のいずれにおいてもほぼ一定の値を示し、Blockedの強度はDistributedの約4割となった。破断面の観察では、積層順序によって破壊モードに著しい違いが見られ、Distributedの方は幅方向にほぼ一直線に破断が生じるのに対し、Blockedの方は各層で繊維に沿ったマトリックス破壊および層間での剥離を生じて破断することが分かった。

第3章では、低サイクル疲労試験の結果について示した。低サイクル疲労試験は一定荷重振幅の片振り引張で行った。荷重とひずみをある定めた回数ごとに測定し、これにより繰返し負荷時の応力-ひずみ曲線を得た。得られた応力-ひずみ線図より、一定荷重振幅繰返し負荷を受ける斜交対称積層板はメカニカルラチェット現象を示すことが分かった。また、疲労試験時の破断ひずみと静的引張時の破断ひずみがほぼ等しいことに着目し、「疲労破壊は繰返し負荷による蓄積ひずみが、静的引張時の破断ひずみに達したときに生じる」との仮説を立て、この仮説に対して詳細な検討を行った。それによれば、破断ひずみの分布、および最大応力変動繰返し負荷試験においても、疲労試験時の破断ひずみは静的引張試験時のそれに近いことが分かり、上の仮説の妥当性が示された。

また、第3章では超音波探傷による疲労損傷進展の様子について調べた。その結果、マトリックス、繊維配向角が同じであっても積層順序の違いにより、損傷進展の様子が全く異なることが分かった。すなわち、 $[+30/-30]_s$ と $[+30_4/-30_4]_s$

の比較により、1層ずつ交互に重ねた積層板では、剥離が自由縁全体にわたって生じ、それが繰返し数の増加とともに徐々に進展するのに対し、4層を同じ向きに重ねた積層板では、ある1ヶ所の剥離が、破断前に急激に進展することが分かった。また、破断面の静的引張試験結果との比較により、静的引張の損傷が破損部に集中しているのに対し、疲労破壊の方は、初期損傷が試験片全体に広がる破壊様式を示すことが観察された。

第4章では、静的引張試験および低サイクル疲労試験結果をもとに、繰返し負荷を受ける斜交対称積層板の応力-ひずみ関係の数値シミュレーションを行った。まず、繰返し負荷により生じるラチェットひずみが、クリープひずみと類似の挙動を示すことに着目し、クリープ構成式を利用してラチェットひずみの定式化を行った。実験結果より構成式中の定数を決定する方法を示し、求めた定数を用いてラチェットひずみを計算し、実験結果との比較を行った。この結果、実験結果と計算結果は比較的良く一致し、ラチェット現象を表すのに用いた構成式の妥当性が評価できた。次に、斜交対称積層板の単調負荷時における非線形応力-ひずみ曲線を Ramberg-Osgood 則を用いて数式的に表し、実験結果とよく一致することを示した。さらに、上述のラチェット構成式と単調負荷における Ramberg-Osgood 則を用いて、繰返し負荷時の応力-ひずみ曲線の数値シミュレーションを行った。数値シミュレーション結果は実験結果とよく一致しており、上述の方法が一定荷重振幅繰返し負荷を受ける斜交対称積層板の応力-ひずみ関係を数式的に表現するのに有効であることが示された。

以上、斜交対称積層板の低サイクル疲労挙動を応力-ひずみ関係に着目して、実験的な検討を行い、その挙動を表す数値シミュレーション方法について提案した。その結果、一定荷重振幅、高応力レベルでの斜交対称積層板の低サイクル疲労においては、メカニカルラチェット現象により蓄積するひずみが疲労破壊を支配する重要な因子であることが明らかとなった。

以上の結論より、疲労破壊を考えるとときは S-N 線図による議論だけでなく、応力-ひずみ関係に着目することも大切であると言える。本研究では、荷重条件が一定荷重振幅の片振り引張、積層構成が斜交対称と限られた条件での議論となった。今後は、圧縮疲労、両振り試験、一定ひずみ振幅繰返し負荷などの様々な荷重条件、およびクロスプライ、擬似等方性板など様々な積層構成を用いて、応力-ひずみ関係に着目した低サイクル疲労の研究が行われ、統一的な見解が得られることが複合材の疲労を研究する上で重要であると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり，終始懇切なご指導，ご教授を賜った九州大学工学部航空工学科 久能 和夫 教授に心より感謝の意を表します。

また，本論文をまとめるにあたり，適切なご助言とご討論を賜った九州大学工学部応用力学研究所 高雄 善裕 教授，ならびに九州大学工学部機械工学科 村上 敬宜 教授に厚く御礼申し上げます。

さらに，絶えず有益なご助言とご討論を賜った九州大学工学部航空工学科 宇田 暢秀 助教授に心から御礼申し上げます。

また，本研究における実験にあたっては，装置の製作やプログラムの開発などに関して，九州大学工学部航空工学科 小野 幸生 助手，永安 忠 技官に多大なるご指導，ご援助を頂きました。厚く御礼申し上げます。

最後に，諸事にご協力いただいた九州大学工学部航空工学科軽構造システム工学講座の皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Salkind, M. J., "Fatigue of Composites," in Composite Materials: Testing and Design (Second Conference), ASTM STP 497, (1972) pp.143-169.
- 2) 下河 利行, "航空機構造の安全性・信頼性設計と複合材構造の強度保証について", 九州大学工学部航空工学科集中講義資料, (1997年10月)
- 3) Reifsnider, K. L.(Editor), "Fatigue of Composite Materials(Composite Materials Series Vol.4)", Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, (1991)
- 4) Hashin, Z. and Rotem A., "A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials", Journal of Composite Materials, Vol.7(1973), pp.448-464
- 5) Hahn, H. T. and Kim R. Y., "Fatigue Behavior of Composite Laminate", Journal of Composite Materials, Vol.10(1976), pp.156-180
- 6) 富岡史城, 和田 弘, "CFRP 積層板の引張疲労強度", 日本機械学会論文集 (A 編), 58 巻 550 号(1992-6), pp.21-28
- 7) 富岡史城, 和田 弘, "短冊形試験片を用いた圧縮, 引張-圧縮荷重下での CFRP 積層板の疲労試験結果と強度評価", 日本機械学会論文集 (A 編), 61 巻 582 号(1995-2), pp.224-232
- 8) O'Brien T. K., Rigamonti M. and Zanotti, C., "Tension fatigue analysis and life prediction for composite laminates", International Journal of Fatigue, Vol.11, No.6(1989), pp.379-393
- 9) Rotem, A. and Hashin, Z., "Fatigue Failure of Angle-Ply Laminates", AIAA Journal, Vol.14, No.7(1976), pp.868-872
- 10) Rotem, A., "Fatigue Failure of Multidirectional Laminate", AIAA Journal, Vol.17, No.3(1979), pp.271-277
- 11) Rotem, A., "The Fatigue Behavior of Composite Laminates under Various Mean Stresses", Composite Structures, Vol.17(1991), pp.113-126
- 12) Fawaz, Z. and Ellyin, F., "Fatigue Failure Model for Fiber-Reinforced Materials under General Loading Conditions", Journal of Composite Materials, Vol.28, No.15(1994), pp.1432-1451
- 13) Nobutada Ohno, "Recent topics in constitutive modeling of cyclic plasticity and viscoplasticity", Appl. Mech. Rev. Vol.43, No.11(1990), pp.283-295

- 14) 橋口公一, “最新弾塑性学”, 朝倉書店, (1990)
- 15) Lemaitre, J. and Chaboche, J. L., “Mechanics of solid materials”, Cambridge University Press, (1990)
- 16) 石田孝明, 金川靖, 佐野村幸夫, 玉置一雄, “炭素繊維強化複合材料円管[$\pm 45^\circ$]₄の引張-圧縮疲労損傷と非弾性変形に対する応力比の影響”, 日本機械学会論文集 (A 編), 60 巻 569 号(1994-1), pp.105-112
- 17) 石田孝明, 金川靖, 村上澄男, 安田直明, “CFRP[$\pm 45^\circ$]₄積層円管の繰返し引張-圧縮応力下における内部損傷の発達と定量的評価”, 日本機械学会論文集 (A 編), 61 巻 583 号(1995-3), pp.561-568
- 18) 金川靖, 村上澄男, 玉置一雄, 石田孝明, “CFRP[$\pm 45^\circ$]₄薄肉円管の繰返し引張-圧縮による疲労損傷過程”, 材料, Vol.43, No.487(1994), pp.427-433
- 19) 佐々木克彦, 石川博将, “CFRP の繰返し非弾性変形と疲労寿命に関する一考察”, 材料, Vol.44, No.498(1995), pp.332-337
- 20) Carlsson, L. A. and Pipes, R. B.著, 福田博, 高雄善裕, 影山和郎訳, “高性能複合材料の実験的評価”, 古今書院, (1990)
- 21) 化成ファイバーライト株式会社提供, プリプレグ APC-2 に関する資料, (1989)
- 22) 新明和工業株式会社提供, プリプレグ Q-2132 に関する資料, (1997)
- 23) Kellas, S., Morton, J. and Jackson K. E., “Damage and Failure Mechanisms in Scaled Angle-Ply Laminates”, ASTM STP1156, Vol.4(1993), pp.257-280
- 24) 久能和夫, “複合材料の疲労損傷機構の解明に関する研究”, 平成 6 年度科学研究費補助金 (一般研究(A)) 研究成果報告書, (1995)
- 25) Hahn, H. T. and Tsai, S. W., “Nonlinear Elastic Behavior of Unidirectional Composite Laminae”, Journal of Composite Materials, Vol.7(1973), pp.102-118
- 26) Hahn, H. T., “Nonlinear Behavior of Laminated Composites”, Journal of Composite Materials, Vol.7(1973), pp.257-271
- 27) Lagace, P. A., “Nonlinear Stress-Strain Behavior of Graphite/Epoxy Laminates”, AIAA Journal, Vol.23, No.10(1985), pp.1583-1589
- 28) 金川靖, 村上澄男, 石田孝明, 津島栄樹, “CFRP 積層円管の組み合わせ応力下の非弾性変形と破壊”, 日本機械学会論文集 (A 編), 57 巻 544 号 (1991-12), pp.2930-2935
- 29) 三木光範, 室津義定, “異方性の積極利用 (II) —ポアソン比を負にする—”,

日本複合材料学会誌, Vol.14, No.2(1988), pp.8-14

- 30) 石川隆司, 松嶋正道, 林洋一, “一方向強化炭素繊維複合材料の繊維方向の非線形特性”, 日本複合材料学会誌, Vol.12, No.1(1986), pp.8-15
- 31) Herakovich, C. T., “Influence of Layer Thickness on the Strength of Angle-Ply Laminates”, *Journal of Composite Materials*, Vol.16(1982), pp.216-227
- 32) Hamada, H., Ramakrishna, S. and Sato, H., “Effect of Fiber Orientation on the Energy Absorption Capability of Carbon Fiber/PEEK Composite Tubes”, *Journal of Composite Materials*, Vol.30(1996), pp.947-963
- 33) Whitney, J. M. and Browning, C. E., “Free-Edge Delamination of Tensile Coupons”, *Journal of Composite Materials*, Vol.6(1972), pp.300-303
- 34) Pagano, N. J. and Pipes, R. B., “The Influence of Stacking Sequence on Laminate Strength”, *Journal of Composite Materials*, Vol.5(1971), pp.50-57
- 35) 劉継紅, 平野徹, “斜交対称積層板の破損挙動に及ぼす積層順序および配向角の影響”, 日本機械学会論文集 (A 編), 61 巻 585 号(1995-5), pp.1015-1022
- 36) 境昌宏, 久能和夫, 宇田暢秀, 小野幸生, 永安忠, “斜交対称積層板の低サイクル疲労挙動に関する実験的考察”, 日本航空宇宙学会西部支部講演会講演集(1996), pp.97-100
- 37) 境昌宏, 久能和夫, 宇田暢秀, 小野幸生, 永安忠, “一定応力振幅繰返し負荷を受ける斜交対称積層板の応力-ひずみ関係”, 第 39 回構造強度に関する講演会講演集(1997), pp.161-164
- 38) O'Brien, T. K. and Hooper, S. J., “Local Delamination in Laminates with Angle Ply Matrix Cracks, Part I: Tension Tests and Stress Analysis”, *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, forth volume, ASTM STP 1156(1993), pp.491-506
- 39) O'Brien T. K., “Local Delamination in Laminates with Angle Ply Matrix Cracks, Part II: Delamination Fracture Analysis and Fatigue Characterization”, *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, forth volume, ASTM STP 1156(1993), pp.507-537
- 40) 小林繁夫, “航空機構造力学”, 丸善, (1992), pp.217-218
- 41) 日本材料学会編, “固体力学の基礎”, 日刊工業新聞社, (1981), pp.149-187
- 42) 日本機械学会編, “固体力学—基礎と応用—”, オーム社, (1987), pp.183-198
- 43) Kunoo, K., Sakai, M., Uda, N., Ono, K. and Nagayasu, T., “Fatigue Failure Mechanism in Angle-Ply Laminates”, *Proceedings of The Second Asian-Pacific*

Conference on Aerospace Technology and Science,(1997), pp.361-368

- 44) Sun, C. T. and Chen, J. L., "A Simple Flow Rule for Characterizing Nonlinear Behavior of Fiber Composites", *Journal of Composite Materials*, Vol.23(1989), pp.1009-1020
- 45) Gates, T. S. and Sun C. T., "Elastic/Viscoplastic Constitutive Model for Fiber Reinforced Thermoplastic Composites", *AIAA Journal*, Vol.29, No.3(1991), pp.457-463
- 46) Vaziri, R., Olson, M. D. and Anderson, D. L., "A Plasticity-Based Constitutive Model for Fiber-Reinforced Composite Laminates", *Journal of Composite Materials*, Vol.25(1991), pp.512-535
- 47) 金川靖, 村上澄男, 小坂直哉, 白秋実, 石田孝明, "損傷を考慮した CFRP の非弾性変形挙動の解析", *日本複合材料学会誌*, Vol.21, No.1(1995), pp.27-33
- 48) Ramberg, W. and Osgood, W. R., "Discription of Stress-Strain Curves by Three Parameters", *NACA TN 902*(1943)
- 49) 境 昌宏, 久能和夫, 宇田暢秀, 小野幸生, 永安忠, "低サイクル疲労挙動の数値シミュレーション", *日本航空宇宙学会西部支部講演会講演集* (1995), pp.108-111

日本書紀卷之八 孝武天皇二十一年

inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

