

博士論文

大ひずみ二軸応力下における樹脂材料の
弾塑性変形挙動の測定と解析

Measurement and analysis of elasto-plastic deformation behavior of
polymers subjected to biaxial tensile stress under large strain

東京農工大学 工学府
機械システム工学専攻

学籍番号 20833005

久保 漱汰

目次

第1章 緒論	1
1.1 背景	1
1.2 ポリエチレン	2
1.3 エステル系熱可塑性エラストマー	5
1.4 樹脂材料のひずみ速度，温度依存性に対する研究	8
1.5 樹脂材料の二軸応力試験に関する研究	11
1.6 二軸延伸	18
1.7 粘塑性挙動	19
1.8 樹脂材料の大変形挙動のシミュレーション	20
1.9 本研究の目的	21
1.10 本論文の構成	22
第2章 樹脂用二軸バルジ試験機	23
2.1 緒言	23
2.2 二軸バルジ試験機	24
2.3 二軸バルジ試験機の構成（シリンダ軸上）	25
2.4 二軸バルジ試験機の構成（シリンダ軸上外）	29
2.5 二軸バルジ試験機の構成（試験片円周方向）	32
2.6 二軸バルジ試験測定値計算方法	37
2.6.1 管軸方向曲率半径の算出	37
2.6.2 肉厚中心部のひずみの算出	38
2.6.3 外径及び肉厚の算出	40
2.6.4 応力の算出	41
2.7 制御対象	42
2.8 アクチュエータ	42
2.8.1 電動シリンダ	42
2.8.2 プランジャポンプ	43
2.8.3 容積式ポンプ	43
2.9 センサ	43
2.9.1 水圧計	43
2.9.2 ロードセル	43
2.9.3 レーザ変位計	43
2.9.4 エリアカメラ	44
2.10 DAC デバイス	44
2.11 プログラム実行箇所	46
2.11.1 プランジャポンプ，容積式ポンプ指令値算出	46
2.11.2 電動シリンダ指令値算出	47
2.12 メインプログラム	47

2.12.1 更新周期	47
2.12.2 メインプログラム構成	48
2.13 電動シリンダ用 SEL プログラム	49
2.14 本試験機の性能	51
2.15 結言	52
第3章 ポリエチレン押出し円管の二軸応力試験と材料モデリング	53
3.1 緒言	53
3.2 供試材	53
3.3 単調負荷試験実験方法	54
3.4 単調負荷試験実験結果	56
3.5 等仕事面	63
3.6 負荷－除荷試験実験方法	65
3.7 負荷－除荷試験速度	67
3.8 負荷－除荷試験実験結果	69
3.9 弾性率	72
3.10 真応力－対数塑性ひずみ線図	75
3.11 等塑性仕事面	77
3.12 塑性ひずみ速度方向の算出	78
3.13 Yld2000-2d 降伏関数の同定	83
3.14 結言	86
第4章 熱可塑性エラストマー円管の二軸応力試験と材料モデリング	87
4.1 緒言	87
4.2 供試材	87
4.3 試験方法	88
4.4 試験結果	89
4.5 真応力－対数ひずみ線図	93
4.6 真応力－対数塑性ひずみ線図	95
4.7 等塑性仕事面	98
4.8 Yld2000-2d 降伏関数の同定	99
4.9 樹脂材料の二軸変形挙動	102
4.10 結言	104
第5章 結論	106
5.1 結言	106
5.2 今後の展望	106
参考文献	109
付録 A 容積式ポンプの設計	117
A.1 概要	117
A.2 容積式ポンプ用シリンダの選定	117

A.3	容積式ポンプの設計	121
A.4	モータドライバ	123
A.5	モータ動作方式	124
A.6	モータドライバの通信	125
A.7	シリンダポンプの故障が予測される場所	126
A.8	容積式ポンプによる水圧負荷試験	127
付録 B	二軸バルジ試験機試験機使用方法	129
付録 C	試験機制御プログラム	143
C.1	概要	143
C.2	制御対象	143
C.3	アクチュエータ	144
C.3.1	電動シリンダ	144
C.3.2	プランジャポンプ	144
C.3.3	容積式ポンプ	144
C.4	センサ	145
C.4.1	水圧計	145
C.4.2	ロードセル	145
C.4.3	レーザ変位計	145
C.4.4	エリアカメラ	145
C.5	制御機器	146
C.5.1	CompactRIO-NI9063 と制御用 PC との接続	148
C.5.2	Measurement & Automation Explorer (MAX)	149
C.5.3	LabVIEW プログラム関数	150
C.5.4	CompactRIO のプログラム	154
C.5.5	エリアカメラデータの読み出しプログラム	155
C.5.6	アクチュエータの制御手法	156
C.5.6.1	ポンプ系統指令値算出	158
C.5.6.2	電動シリンダ指令値算出	158
C.6	メインプログラム	159
C.6.1	メインプログラム起動時	159
C.6.2	メインプログラム強制終了例	159
C.7	電動シリンダ用 X-SEL プログラム	160
C.8	試験機指令方法	165
C.8.1	応力比一定, 1 アクチュエータ制御	165
C.8.2	応力比一定, 2 アクチュエータ制御	165
C.8.3	応力比一定ひずみ速度一定, 2 アクチュエータ制御	166
謝辞		169

第1章

緒論

1.1. 背景

樹脂材料は、日用品から水道管やガス管をはじめとする一般工業製品まで幅広く使われている。また、自動車や精密機械などの最先端分野で使われるエンジニアリングプラスチックや特殊エンプラの開発、適用箇所の拡大により、生活に不可欠な材料として普及している（中山, 2018）。

自動車にとって最大の課題は地球環境問題及び地球温暖化防止への対応である。従来の自動車は、ガソリンエンジンや軽油などの化石燃料により走行するが、それによって排出される二酸化炭素の量は全体の 20% を占めてきた。2050 年には地球の二酸化炭素排出量を半減させる目標があり、自動車業界では 90% 削減が必要であると公表している。Fig. 1.1 には車両重量と 1 km 走行当たりの CO₂ 排出量の関係を示す（大庭 2017）。自動車の車体重量を軽量化することで、走行に必要なエネルギーを少なくすることができる。このため、車体材料の薄肉化が行われているが、金属材料やゴム製品から樹脂製品への置き換えも多数の部品で行われている。Fig. 1.2 は自動車のフロントエンドモジュールだが、鉄からガラス繊維、さらに炭素繊維の代替により、鉄では 5.8kg だったものが、3.1kg までの軽量化に成功した。これは、高比強度による軽量化だけでなく、プラスチックは複雑な形状でも容易に成形できる特性により、パーツ数の減少によるところも大きい。部品の一体成型により原材料のコスト高を成形工程の簡略化によって補い、今後も適用箇所は拡大していくことが予測される（野々村. et al., 2000, 大庭. 2017）

従来部品の代替には、精密な物性の把握が不可欠である。樹脂材料の弾塑性変形挙動を観察する手法として、JIS K7161 や ASTM D638 に規定される単軸引張試験がある。しかしながら、単軸応力下での試験だけでは、実現象として材料に生じる多軸応力下での塑性変形挙動を評価するには不十分である。二軸応力状態を再現する試験法として、桑原らの提案した十字形試験片を用いた金属薄板の二軸引張試験法（桑原, 池田, 1999）、平面ひずみ引張試験法（桑原 et al., 2002）、引張圧縮組合せ応力試験法（桑原 et al., 2007）があり、これらの手法を用いることで、二軸応力下における板材の塑性変形挙動を精度よく測定することができる。

しかし、十字形試験片では、腕部のスリットの存在により、測定部分に与えることのできるひずみは数%にとどまる。実現象は、これより大きなひずみに加わるため、より大きなひずみ域での変形挙動の測定手法が必要である。大ひずみ域まで測定可能な手法として、桑原が提案した二軸バルジ試験がある（桑原 et al., 2003）。この試験は、円管形状に丸めた試験材の両端に軸方向の荷重を加えるのと同時に円管内に水圧をかけ、二軸応力状態を作り出すもので、菅原ら（菅原 et al., 2013）は冷延 IF 鋼板に対し基準塑性ひずみにして 0.19% までの等塑性仕事面測定に成功した。しかし、従来の二軸引張試験機及び二軸バルジ試験機は金属材料を対象としており、数十%程度の塑性ひずみまでの測定が前提である。しかしながら樹脂材料においては、最大公称ひずみが数百%以上にも達する場合があります。従来の試験機では高分子材料の大ひずみ域における測定は不可能である。さらに、接触式のセンサでは、接触部から局部くびれが発生する事例があるため非接触で測定装置を構築する必要がある。樹脂材料に特化した二軸バルジ試験機の開発を行い、精密

な二軸応力下の変形挙動を再現できる材料モデルを用いて実現象を評価することが必要不可欠である。

1.2. ポリエチレン

ポリエチレンは用途に合わせて、低密度、高密度、直鎖状低密度ポリエチレン等が生産され、世界での生産量は6100万トンとプラスチック全体の生産量2.2億トンの28%を占めている（永井, 2007）。ポリエチレンは、1939年に英国ICI社での2400気圧下で生成する高压法ラジカル重合により実用が始まった（児玉, 1983）。その後1954年にドイツのチーグラが溶媒中で10気圧以下の圧力でポリエチレンを合成する低压法を発明し、ポリエチレン製造法を革新した（伊藤, 2018）。この製造方法で、多数のプラントが建設・稼動した。さらに溶媒中での合成法は、触媒の活性を上げることで、触媒の使用量を減らし、触媒除去の工程を不要とすることが可能となった。この

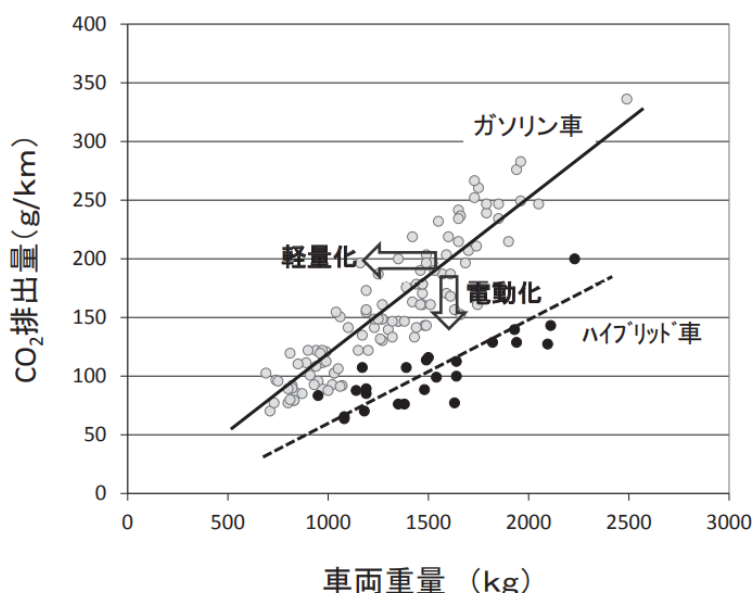


Fig. 1.1 CO₂ Emissions by Passenger Vehicle Weight（大庭 2017）

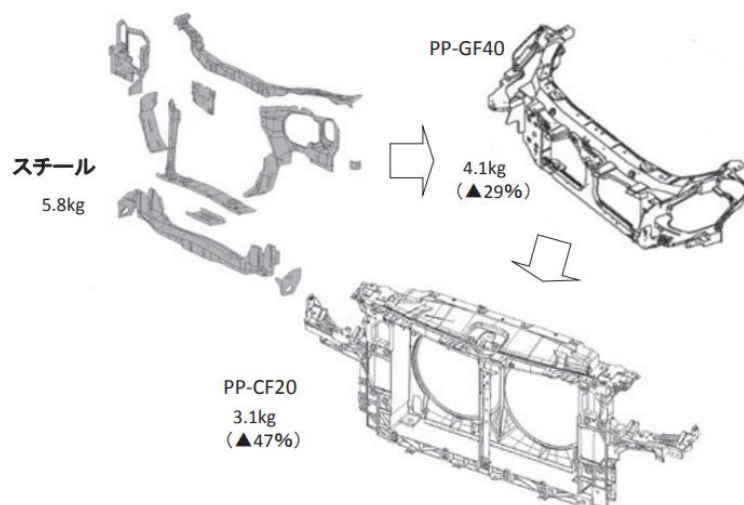


Fig. 1.2 Material transition of front-end module（大庭 2017）

第1章 緒論

高活性触媒の使用により、溶媒が不要な気相でも合成反応ができることがわり、1968 年以降は気相重合触媒の開発と流動層技術の進歩により、気相重合法が現在のポリエチレン製造プロセスで一般的となった。

高密度ポリエチレンは、エチレンの分岐をほとんど持たずに結合した高分子で、主に低圧法で製造される。低密度ポリエチレンはエチレンがランダムに分岐をもって結合した高分子で、主に高圧法で製造される。さらに、低圧法で生成した直鎖状のポリエチレンに短鎖分子を結合することにより低密度ポリエチレンを製造する方法も存在する（清水, 1981）。ポリマ中の分岐の量は材料特性に大きくかわるため、適用箇所に合わせて調整される（善光, 2005, 吉田, et al., 1999）。

ポリエチレンの生産量は 2007 年から続く世界金融危機の影響から、現在は減産となっているが樹脂材料としてはもっとも生産量が多く、様々な場所で使用されている (Fig. 1.3)。

ポリエチレンは、ガス管や水道管などに適用されており、そのためにクリープ試験や衝撃特性

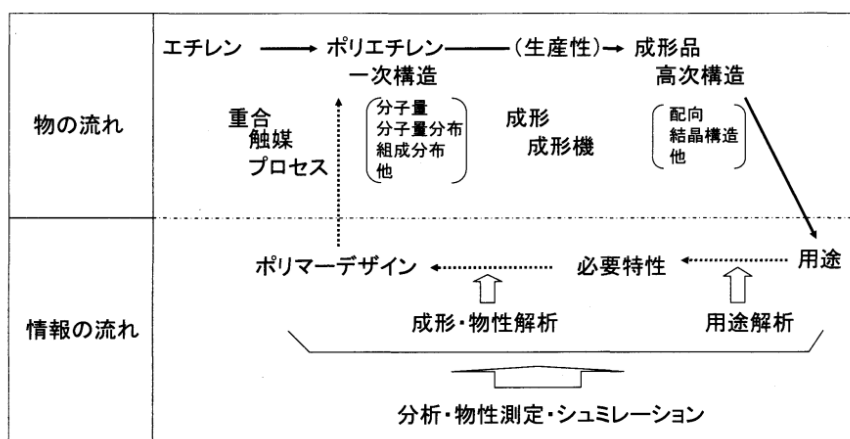


Fig. 1.3 Polyethylene material development scheme (永井 2007)



Fig. 1.4 Production volume of polyethylene and thermoplastics in Japan (中山 2021)

をはじめとする各種材料試験が行われ、材料特性のデータが蓄積されている (Higuchi et al., 2000, 北尾, 鶴田, 1995, 北尾, 1997). 近年我が国では、地中に埋設した水道管が地震による断層の発生や、工事機械による予期せぬ接触により、破損する事例が報告されている (浦野 et al., 2019, 茂木 et al., 2019). そのほかにも、海底送水パイプや海底ケーブルなどが地震による断層の発生や、船の錨に引っ掛かり、予期せぬ力がかかり破断に至る例や、メンテナンス時の引き揚げ作業中に破壊する例が報告されている (丸山, et al., 2014, 鈴木, et al., 2013). 断層による水道管の受ける変形挙動を測定するために、実際に水道管を設置し、土をかぶせ、圧縮力やせん断力を負荷する試験が実施されている (西川, et al., 2016). この試験により、地震発生時の水道管の変形挙動を実環境に近い環境で測定、評価することができる. しかし、この試験は極めて大きい装置と準備時間がかかる. そこで、ものづくりの現場では、成形シミュレーションによる製造工程の最適化が指向されている (根岸, 松谷, 2004, 鈴木, 2014, 鈴木, 塩屋, 2018, 金子, et al., 2019).

ポリエチレンの開発を行う際に必要とされる技術的な機能・要素の関連を **Fig. 1.4** に示す. 流れを大きく見ると、①製造手段としての触媒、プロセス、成形気筒も含めたエチレンからポリエチレン、成形品へと続くものづくりへの流れ. ②用途解析、成形、物性解析による用途から必要特性、ポリマーデザインへと続く情報の流れの二つが存在する. これらを支えるベースとして、各種の分析、物性測定、シミュレーションが行われる (中山, 2021). 成形シミュレーションにより、加工中、使用中の材料の変形挙動が高精度に予測できるようになれば、成形不良の発生を起こさない最適な製造工程が迅速に構築できる. さらに、予期せぬ外力が作用した場合における製品の安全性を保障するためにも、多軸応力状態における当該材料の変形挙動に関する精密な実験データを整備しておくことは極めて重要である.

成形シミュレーションを用いて材料の変形挙動を高精度に予測するためには、加工中に材料に付与されるレベルの大きなひずみ範囲まで、材料の変形挙動 (応力-ひずみ曲線: ss 曲線) を正確に再現できる材料構成則を確立し、成形シミュレーションに適用する必要がある. 樹脂材料についてはその力学特性の解明が望まれているものの、大変形の二軸応力状態における ss 曲線を精密に測定するための材料試験法が確立されていないため、大変形領域における成形シミュレーションの予測精度は十分ではなく (根岸, et al., 2004), 高精度な材料モデルの構築と、その成形シミュレーションへの適用が渴望されている (井上, 2016).

1.3. エステル系熱可塑性エラストマー

エステル系熱可塑性エラストマーは、主成分の種類によってスチレン系、オレフィン系、塩ビ系、ウレタン系、エステル系等に分けられる。本研究では、エステル系熱可塑性エラストマーを扱う。同材料は1980年代後半から生産され始め、合成対座屈性を生かし、自動車内装品（ドアラッチストライカー、シートベルト等）ウィンドレギュレーター、等速ジョイントブーツに採用されている（小松 and 寺西.1988）。自動車以外の分野では、電話機のカールコード、高圧ホース、スポーツ用品などに適用されている。Fig. 1.3 に注目すると、年々熱硬化性プラスチックの割合が低下し、熱可塑性プラスチックの割合が増加している。特に熱可塑性エンジニアリングエラストマーは、今後とも適用箇所の拡大と技術革新が続くことが見込まれる（中山, 2018）。

熱可塑性エラストマーは10%の変形量で使用すれば、ヒステリシスを残さないため、ゴムとプラスチックの中間の性質を持つ材料として、大変形が与えられる領域で適用される。例えば、自動車タイヤチューブや、多数の枝葉上の組み合わせによるクッション材などである。特にクッション材は、海洋国家である我が国においては、海上道路橋や港に設置される緩衝工としての採用例が多く（庄司 1996, 清宮 et al., 1996）、研究が行われている。

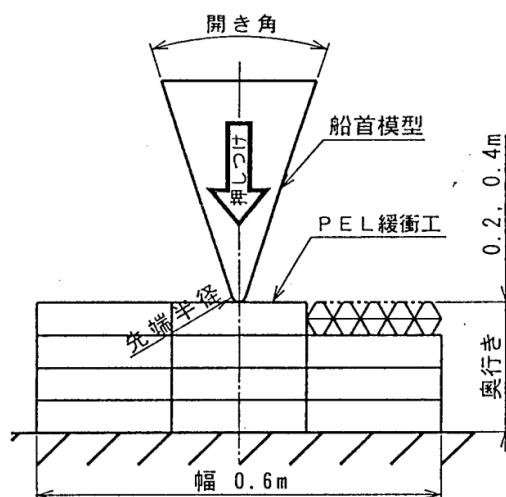


Fig. 1.5 Schematic diagram of bow static penetration experiment (庄司 1996)

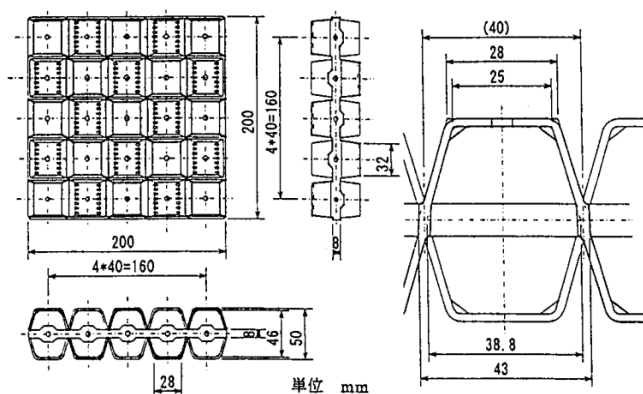


Fig. 1.6 Drawing of hood with honeycomb structure (庄司 1996)

1990年代後半から対船衝突に関する研究が行われている。三田と庄司（三田 and 庄司 1997, 大和, 1996）は船の先端が橋脚に取り付けられたエステル系熱可塑性エラストマーで作られた緩衝工に衝突する際の緩衝効果を測定するために実際のモデルの 1/5 の模型で衝突実験を行った。緩衝工はサイズが異なるハニカム構造を採用としたもので、200mm 四方のものである。衝突の評価は、試験装置に取り付けたロードセルと変位計をもって測定し、衝突エネルギーと反力-突入量曲線を測定した。この実験により、熱可塑性エラストマーから作られた製品の変形挙動を測定した。さらにこの試験を繰り返し行い、緩衝工の形状の復元の状態を観察した。この結果 50%の圧縮では、除荷後の形状はほとんど変化しないということがわかった。三田（三田 et al. 1998, 三田 et al. 2000a, 三田 et al. 2000b, 山下 et al. 2001, 三田 et al. 2001）らはさらに船の突入角度(Fig. 1.5 (庄司 1996))が変化した時の変形量を実測し、ハニカム構造の緩衝工(Fig. 1.6(庄司 1996))の全体を均質

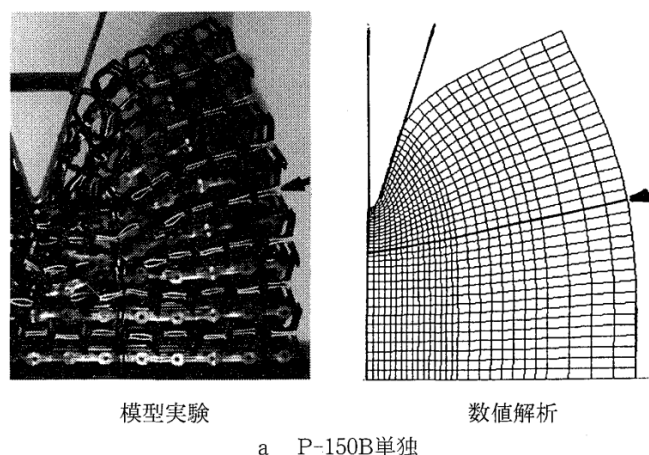


Fig. 1.7 Comparison of deformation of entrance hood formed by engineering elastoma of model test and numerical analysis (根岸 et al., 2000)

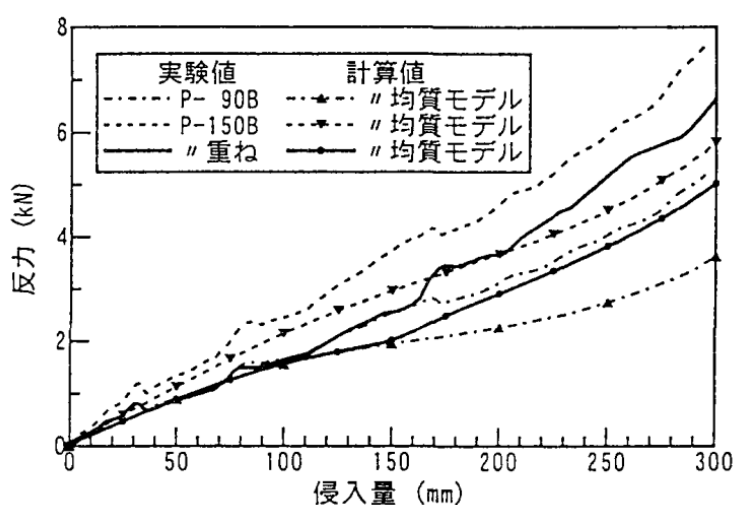


Fig. 1.8 Reaction Force - Penetration Amount Characteristics of Entrance Hood Molded with Engineering Elastoma (根岸 et al., 2000)

第1章 緒論

なモデルとして有限要素解析を行った(Fig. 1.7(根岸, et al., 2000)). 実験と解析結果は定性的に一致し, 特に変形初期は高い精度で両者は一致した(Fig. 1.8(根岸, et al., 2000)). しかし, 大ひずみ領域では乖離が見られた. 熱可塑性エラストマーに対しても数値解析ができることを示したが, 更なる課題として, 緩衝特性や動的変形挙動の考慮や二軸応力における変形挙動の考察が必要であることを示した.

圧縮の特性をより詳細に解析するために, 根岸らや野々村ら(根岸 et al., 2000, 野々村 et al., 2000)は樽型の試験片に圧縮試験を行い, 中空円筒型の緩衝材の圧縮変形挙動を予測した. 中空円筒型の緩衝材の実験と解析結果は定性的には一致し, 座屈を伴うような大変形挙動では, 弾塑性構成則を用いたモデル化の妥当性を示した.

樹脂材料にはひずみ速度依存性や温度依存性が強く存在し, 変形による発熱で物性が変化することが報告されている. 磯貝ら(磯貝, et. al 2018a, 磯貝, et. al 2018b)はデジタル画像相関法(DIC)とサーモグラフィックカメラを同時に計測に用いることで, 引張速度に応じた温度上昇を計測した. これをシミュレーションに反映させることで, 大変形時の発熱減少と力学特性を定性的に再現した. 発熱交換率はネック箇所の発熱領域の真応力-対数塑性ひずみの関係と温度上昇を再現するうえで重要なパラメータであることを示した.

このハニカム構造の緩衝工は, 圧縮力を加えた時に, 空洞が存在するため, 母材は曲げ変形を受ける. 特に実部品では, 材料は二軸応力下で変形する部位が多く存在するため, 実験値と単軸応力下での試験を元とする解析値では乖離が生じる. また, 二次元的な形状の部品の押し付けや単軸圧縮下の条件下を想定しているため, 実際の船の先端の様な複雑な形状をした材料が押し付けられる際の緩衝工の変形挙動を正確に予測できない. このために多軸応力下での材料の変形を, シミュレーションに反映させる必要があり(三田. et al.2004), 実際に材料に負荷される二軸応力状態を再現する試験法で評価し, 同応力状態を考慮した材料モデルの作成が求められる.

1.4. 樹脂材料のひずみ速度、温度依存性に対する研究

高分子材料の変形挙動を測定するもっとも基礎的な材料試験法として、JIS K 7113, JIS K 7161 に規定されている単軸引張試験法がある。JIS K 7161やISO 527-1 では、Fig. 1.9 に示すように、応力-ひずみ線図の原点に接線を引き、この傾きをヤング率として算出する。このようにして算出したヤング率は接線弾性率と呼ばれる。JIS K 7161 では、ひずみ 0.0005 における応力とひずみ 0.0025 における応力を用いて、二点間を結んだ直線の傾きからヤング率を算出する。このようにして算出したヤング率は割線引張弾性率(secant modulus of elasticity)と呼ばれる。両者はともに試験開始の直後の応力-ひずみ線図の傾きから測定するが、これはプラスチックが粘弾性挙動の顕著な材料であるため、多くの場合、荷重を加えた初期の段階においても、応力-ひずみ線図は比例関係を示さない(廣恵, 本吉, 1972)。規定されたひずみである0.0005~0.0025ではひずみ速度が安定しないことや試験片の品質や加工精度の影響が大きいため、実際にJISに定義された弾性率の測定方法から弾性ひずみを測定し、全ひずみから差を取るような金属材料で行われている方法は難しい。一般的に、樹脂材料の変形は、ひずみ速度及び温度依存性が大きい。樹脂材料に対するひずみ速度依存性に対する研究について概説する。

北川ら(北川 et al., 1988)は円管丸棒に対して圧縮試験とねじり試験を行うことにより、高分子材料の校正式が含まねばならない物理量を特定する試みを行った。その中で、単調圧縮試験で速度を急変させた結果を Fig. 1.10(a) (北川 et al., 1988) に示す。変形速度の急増および急減によらず、急変直後では応力-ひずみ曲線はほぼ弾性的となり、急変後の変形速度で最初から実験した場合の曲線と次第に一致するようになることが示された。また一定変形速度試験中にひずみが約5, 10および15%に達した時点で1分間の緩和試験を行った結果をFig. 1.10 (b) (北川 et al., 1988) に示す。0, 15%ひずみにおける緩和応力量はほぼ同じであり、前述の緩和試験の結果と一致した。また、再負荷初期では、弾性挙動を示し、その後等速変形試験の曲線に漸近していくことも示した。

大堀ら(大堀, et al., 1993)は、独自に同心円等方式の粘弾性特性測定装置を試作した。この試

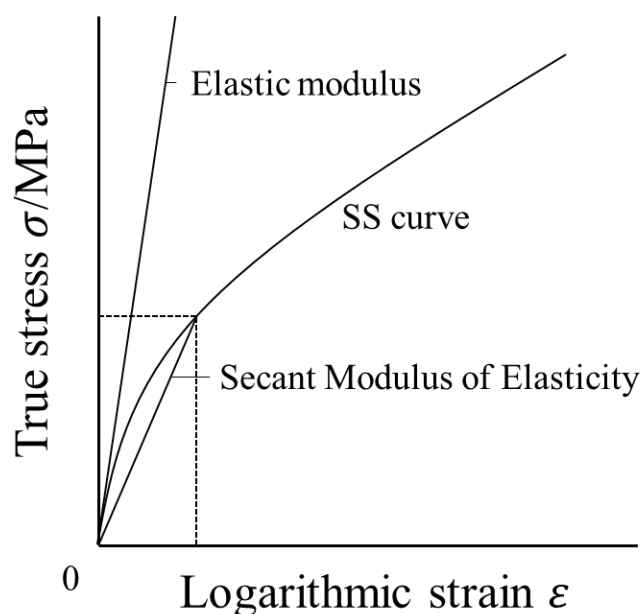


Fig. 1.9 Calculation method of Young's modulus

験装置を使い、熱硬化ビニルエステル系樹脂に対し粘弾性測定を行い、フォークト形の3要素モデルで定式化した。この結果と、硬化収縮関係式を用いて、粘弾性解析と弾性解析を有限要素法により行った。この結果、粘弾性解析の方が樹脂の硬化変形を正確に予測できることを示した。ZhangとMoore (Zhang and Moore, 1997a) は $0.1/\text{s}$ から $0.00001/\text{s}$ までの幅広い速度で高密度ポリエチレン(HDPE)に対して単軸引張試験を実施し、強い速度依存性を観測した。この試験結果とクリープ試験から、ひずみ速度を考慮した単軸引張挙動のモデル化を行った。さらにひずみ速度を $10^{-3} \text{ s}^{-1} \rightarrow 10^{-2} \text{ s}^{-1} \rightarrow 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ に急変させた実験結果と、提案したモデルは精度よく一致した (Zhang and Moore, 1997b)。一方で、一度ひずみ負荷されたのちにひずみが減少する経路においては、両者に乖離がみられ、再現には課題が残った。プラスチック材料に対する通常の材料試験時のひずみ速度は $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ のオーダーであるが、プラスチック部材の成形、加工時や衝撃荷重下での部材の変形時では $10^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度に達している場合がある。谷村ら (谷村 et al., 2011) はプラスチックのひずみ速度依存性をモデル化するために、ポリカーボネート7種類とポリアミド8種類とABSとポリプロピレンに対し広いひずみ速度域 ($10^{-3} \text{ s}^{-1} \sim 500 \text{ s}^{-1}$) での動的引張強度特性を調べた。金属材料を対象として、開発された検力ブロック式高速材料試験機を用いて、プラスチック材料の引張試験を、ひずみ速度 $10^{-3}, 10^{-2}, 1, 32, 500 \text{ s}^{-1}$ で行った。各塑性ひずみに対応する流動応力は、ひずみ速度の対数表示で、ひずみ速度の増大とともに直線的に上昇し、さらに、約 10 s^{-1} 以上の高ひずみ速度域になると、その増大は一層顕著になる傾向を示し、プラスチックの塑性ひずみを評価する研究においては、塑性ひずみ速度を把握して試験を行うことの重要性をしめした。

温度依存性については、廣江ら (廣江 et al., 1995) は高密度ポリエチレンに対し、定ひずみ速度試験と、 10°C , 25°C , 40°C の水槽中で圧縮試験等を行った。この定ひずみ試験は、アクチュエータの動作速度を一定にすることによって行われた。ひずみ速度 $1.1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ で測定した真応力-対数ひずみ線図をFig. 1.11 (廣江 et al., 1995) に示す。対数ひずみ $\epsilon=0.1$ において、 10°C では $\sigma = 40 \text{ MPa}$, 25°C では $\sigma = 32 \text{ MPa}$, 45°C で $\sigma = 25 \text{ MPa}$ と、温度の上昇により強度が下がる、明らかな温度依存性を測定した。これらの結果から温度及び速度依存性を持つ粘弾性構成式のモデルの定数決定を行った。このモデルは各種実験から測定した負荷応答を良好にシミュレートした。

大変形時に樹脂材料に特有なネック現象などの不均一変形や発熱が生じる。ネック現象などの不均一変形が生じた場合、真応力-対数ひずみの一様性が崩れること (飯田, 坂見, 1976, 村上 et al., 2003) や、発熱による真ひずみへの影響が加わるため従来のひずみゲージなどの計測技術だけでは評価が難しいことも指摘した。これに対して、樹脂材料の引張や圧縮の特性をデジタル画像相関法 (DIC) を用いて測定する方法を西脇は提案した (西脇, 2019)。さらに川崎ら (川崎 et al. 2013) はDICを用いてポリエステル系熱可塑性エラストマーに対し、単軸引張試験を行った。DICの活用により、ネッキングを含む試験片全体のひずみ分布の測定に成功した。この結果とサーモグラフィックカメラの温度分布の測定結果を組み合わせることで、塑性発熱の構成式の評価を可能とした (川崎 et al. 2014)。

このように、樹脂材料を研究対象とする実験装置では、材料のひずみ速度と温度依存性が大きいので、これらを十分に制御、把握しなければ、正確な材料特性の把握をすることはできない。

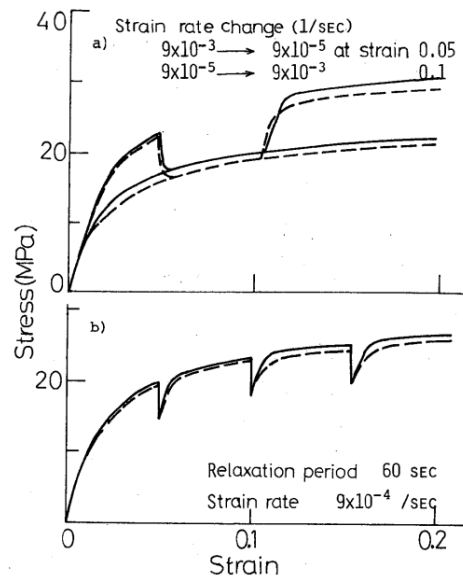


Fig. 1.10 Experimental and theoretical stress- strain curves at combined tests of constant strain rate, abrupt strain rate change and relaxation (Kitagawa et al., 1970)

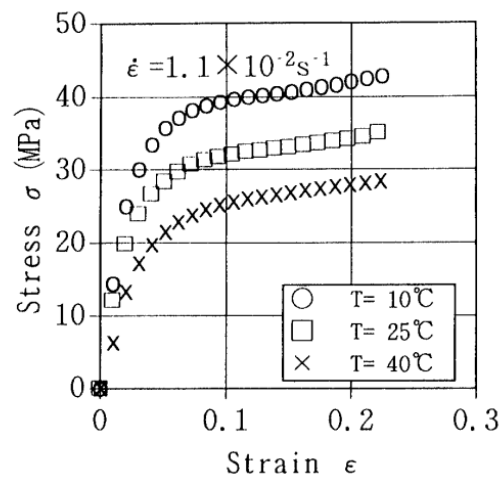


図 1 定ひずみ速度負荷応答への温度の影響
($\dot{\epsilon} : 1.1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, Test A)

Fig. 1.11 Effect of temperature on constant strain rate load response ($\dot{\epsilon} = 1.1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) (廣江 et al., 1995)

1.5. 樹脂材料の二軸応力試験に関する研究

単軸引張試験のような簡便な試験は、現在においても多用されているが、その一方で高精度に材料の変形を予想する場合、二軸応力下になると実現象とシミュレーション等による変形予測は乖離が大きい。このため、種々の試験により、降伏曲面や二軸応力挙動を測定する試みが行われてきた。より高精度な材料モデルを構築するためには、単軸応力下での材料試験に加えて、実際の使用環境下における応力状態を再現できる多軸応力試験を行い、その測定値を用いて材料モデルを構築することが必須である（北川 et al., 1988）。

液圧バルジ試験のように等二軸の応力を材料に負荷することができる試験法（Yoshida, 2013）や、片側ゴム厚バルジ試験法（吉村, 中原, 大津, 2020）のように単軸引張試験機に小規模の改造で、簡便かつ安価に円管の二軸応力下におけるひずみを測定できる手法など、種々提案されている。材料に任意の二軸の応力をかけることができる試験は、特殊な形状のものを除くと、**Fig. 1.12**に示すようなものに大別できる。**Fig. 1.12 (a)**は板材の二方向にシリンダ等により軸力を負荷する試験である。**Fig. 1.12 (b)**円管材に対して引張力をかけながらせん断力や内部に水圧や油圧を負荷することで多軸応力を発生させることができる試験法である。

坂口ら（坂口, et. al 1968）は、正方形の試験部とそれぞれの辺に6個と頂点部に一つのチャック部を持つ試験片を特殊なチャック機構を有する二軸引張試験機を作成した。チャック部は、試験力と垂直になる方向に自由に動作する機構となっており試験片の二軸変形に追従することができる機構である(**Fig. 1.13**)。試験力はサーボ機構により発生し、定速引張試験、二軸方向クリープ試験、二軸破壊強度試験が可能である。この試験装置を用いてポリエチレン平板の等二軸弾性変形挙動を測定した。二軸変形挙動は、単軸引張試験で測定した変形挙動から予測された結果よりも低強度の結果を示し、変形挙動に非線形を示す場合や、大ひずみ領域で見られるような、物質の内部構造の関係で弾性理論が適応できない場合には、実際に二軸変形を与えて、物性を測定するしか方法がないと結論付けた。坂口らの試験機を使った手法では、特にフィルムの様な肉厚が薄い材料に対し、高精度に二軸の力を負荷することができる試験として有効である。しかし、材料に厚みがある場合や、降伏応力を超える大ひずみ領域では、チャック部で試験片が破断してしまうため、試験を行うことができない。そこで、円管状の試験片に軸力と内圧をかける手法と、十字形

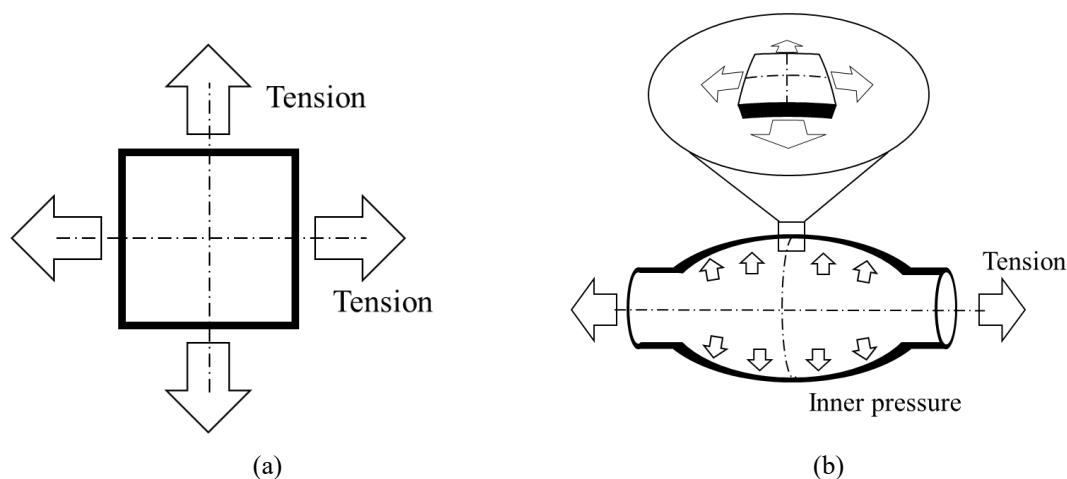


Fig. 1.12 Test method for applying biaxial stress

試験片のように正方形試験片に腕部を設けた試験片が開発された。

Zengら (Zeng, et. al 2010) はナイロン6とポリエチレンの正方形フィルムを試験片として、90℃下で、単軸引張試験と直交する二対の油圧シリンダを使い、等二軸引張試験を行った。この研究では、材料の変形を粘弾性モデルと置き、結晶構造からポリエチレンとナイロンの単軸引張挙動と等二軸変形挙動を予測した。ポリエチレンの実験値とシミュレーションの結果をFig. 1.14に示す。この研究では、弾性領域と塑性領域を明確に分けて材料パラメータを同定した。単軸引張試験の同定結果の、真ひずみで0.9を超える高ひずみ領域ではシミュレーションは実験値との乖離が見られるが、概ね再現できている。また、等二軸の同定結果は、最大荷重点に達するまでは高精

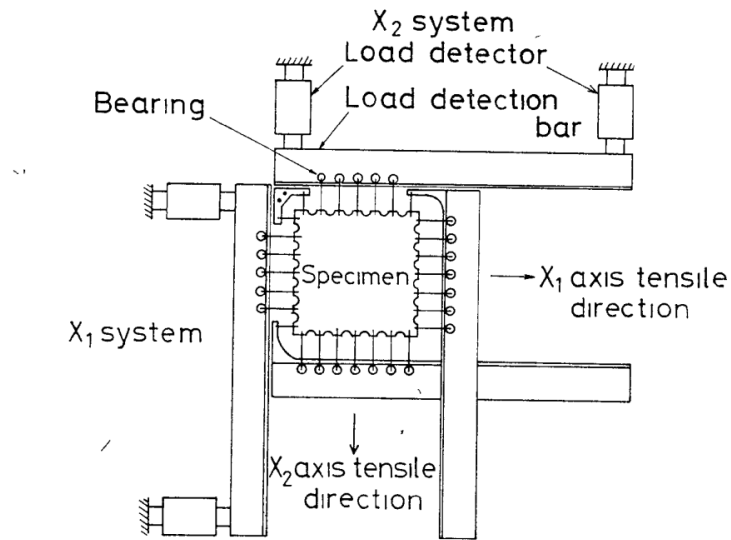


Fig. 1.13 Mechanism of the biaxial tensile tester (Sakaguchi, et al., 1968)

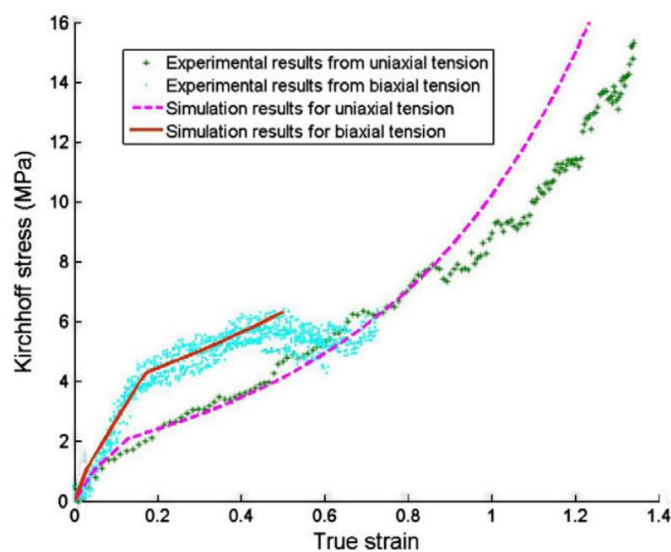


Fig. 1.14 Comparisons between simulation and experimental results for PE at 90 °C in both uniaxial and equi-biaxial cases. (Zeng, et. al 2010)

度に一致した。ナイロン6では、単軸引張試験及び等二軸引張試験共に測定することができた真ひずみまで高精度に再現できた。同材料モデルで負荷除荷の単軸引張挙動の再現も行ったが、ヒステリシスは再現することができなかったものの、包絡線は高精度に再現することができた。等二軸であれば、単軸引張試験の結果から変形挙動を予測できることを示した。

白鳥と池上（白鳥 and 池上, 1973）は十字形の板状試験片を使用する二軸引張試験機を試作した。この試験機は、2組の対向する油圧シリンダにより、二軸の力を十字形の試験片に与えることができるもので、対抗するシリンダの可動軸は、パンタグラフ型のリンクを備えた等変位装置により拘束されている。両軸の軸力はロードセルで測定され、ひずみはひずみゲージで測定する。試験片の把持は、三つのボルトと、チャックによって行われた。この試験機を用いて、公称応力とひずみの関係を測定し、板幅1mmの黄銅板の降伏曲面と、予ひずみを与えた時同材料の降伏曲面を測定した。同様の試験装置を用いて、白鳥ら（白鳥 et al., 1973）は、一方向強化された異方性弾性材料の弾性定数を近似モデルで計算し、この結果から弾性—線形粘弾性対応原理を用いて粘弾性定数を計算した。これらを強化された方向を 15° ごとに変化させた十字形試験片の中央に円形の穴をあけた試験片をクリープ試験、リラクゼーション試験、定荷重速度引張試験、定ひずみ速度引張試験を行い結果を比較した。

軸力内圧形試験片では、円管の試験片を使った例として、牧野内ら（牧野内, et al., 1970）は、ポリカーボネートの単軸引張および圧縮試験、液圧バルジ試験に加えて、押出し成形により作製された円管試験片に軸力と内圧を負荷する二軸応力試験を行い、降伏曲面を測定したものがあある。材料も同じ温度同じひずみ速度の下で、降伏応力はほぼ同じ値を示した。また板材は面内、丸棒では軸方向にと軸に垂直な方向、円管では軸方向と円周方向において、管軸応力の値はほぼ等しくなった。Fig. 1.15はvon MisesおよびTrescaの降伏曲面と測定した実験値を比較した。二軸応力

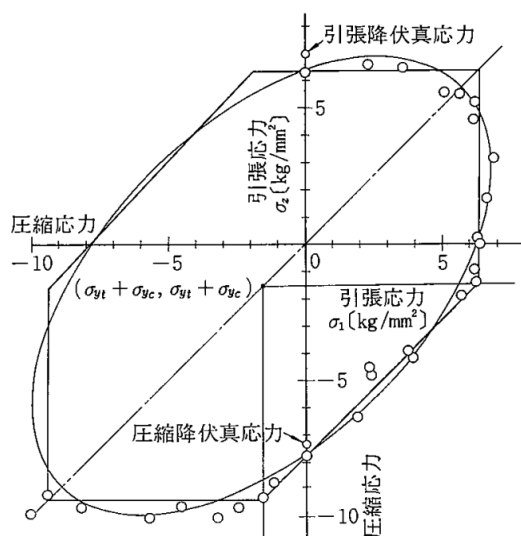


図 21 公称応力表示によるポリカーボネート樹脂の降伏条件

Fig. 1.15 Yield curves measured from specimens under constant control of load and internal water pressure (Makinouchi. et al., 1972)

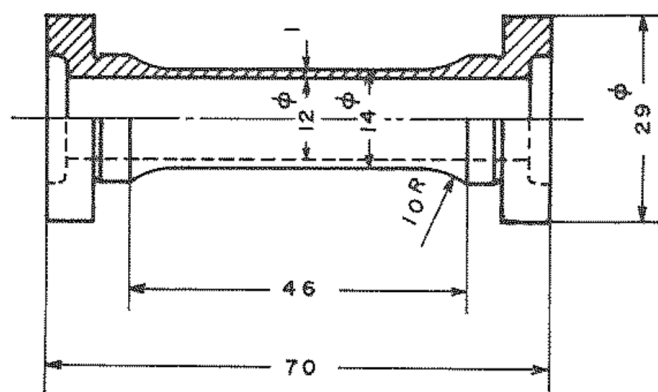


Fig. 1.16 Specimen with constant control of load and water pressure applied inside (Hyakutake,1972)

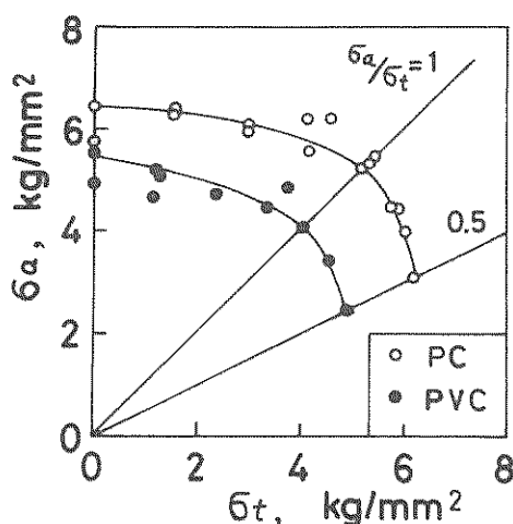


Fig. 1.17 Yield curves measured from specimens under constant control of load and internal water pressure(Hyakutake,1972)

状態における降伏はvon MisesおよびTrescaの降伏曲面とは一致せず，降伏曲面全体がずれていることを指摘した．これは降伏応力を公称値で表示したためであるとし，ポリカーボネート樹脂は降伏点におけるひずみが非常に大きく，引張では約6%に達する．したがって，降伏応力よりも引張では大きく圧縮では小さい値を測定した．二軸応力試験で高精度に降伏曲面を測定する際には，真応力，対数ひずみでの評価が必須であるとの見解を示した．

楯列ら（楯列, et. al 1970）は，切削加工されたポリカーボネートの円管試験片に，内圧・引張に加えて外圧・引張，内圧・圧縮の組合せ応力試験を行った．ここで，静水圧成分が降伏条件に影響するのは圧縮と引張の塑性変形機構が違うことによる．と仮定してMisesと Trescaの降伏曲面をそれぞれ拡張させた降伏条件を定義し，静水圧成分が影響する場合の降伏条件式を求めた．この条件式は，実験値とよく一致し，降伏条件の静水圧依存性を指摘した．更なる変形挙動の解明には，塑性変形域での挙動が重要な研究課題であることを示した．

百武（百武, 1976）は、ポリカーボネートと塩化ビニル製の直径30mm長さ1mの丸棒をFig. 1.16に示すような形状に加工した試験片を作成した。この円管状試験片に軸力と内圧の比が一定になるように制御をかけた試験機を用いて、二軸応力を降伏点まで負荷した。Fig. 1.17に注目すると、二軸引張における降伏点は、いずれも一軸引張における降伏点のひずみより小さくなっているの。このことより、二軸引張における降伏点は力学的不安定点であると考え、二軸引張における降伏曲線はTrescaの降伏条件よりも内側にあると結論づけた。

森下（森下, 1986）は、ポリプロピレンやポリエチレンなど5種類の樹脂材料に対して軸力-内圧型の二軸応力試験を作成したFig. 1.18。これは万能材料試験機に円管状試験片をチャックし、内部に油圧を負荷することができる試験機である。この円管は直径30mm、長さ102mm、の丸棒を、試験部のみ内径20mm 外径25mm に切削したものである。実験は、負荷しようとする内圧に適するようにリリース弁を調整し、油圧ポンプによりあらかじめ上げておき、負荷を行う。これを用い、内圧-引張試験と内圧-圧縮試験を実施し、第一及び第四象限の降伏曲面を測定した。ポリエチレンとABSは、実験値を楕円で近似したが、内圧-圧縮の組み合わせ応力状態では楕円と近似するが、引張-引張組み合わせ応力状態では、楕円の内部に実験値が乖離した(Fig. 1.19, Fig. 1.20)。これらの材料は、等二軸組み合わせ応力状態においてぜい性化することが報告されている。これらのことから、引張-引張組み合わせ応力状態においてぜい性とな材料は楕円の内部に実験値が乖離が見られることを示した。

Lefebvre（Lefebvre, 1986）も同様の方法で二軸応力挙動を測定した。これらの二軸バルジ試験機は単軸引張試験機のチャックに水圧や油圧を負荷することができる機構を追加した試験機で測

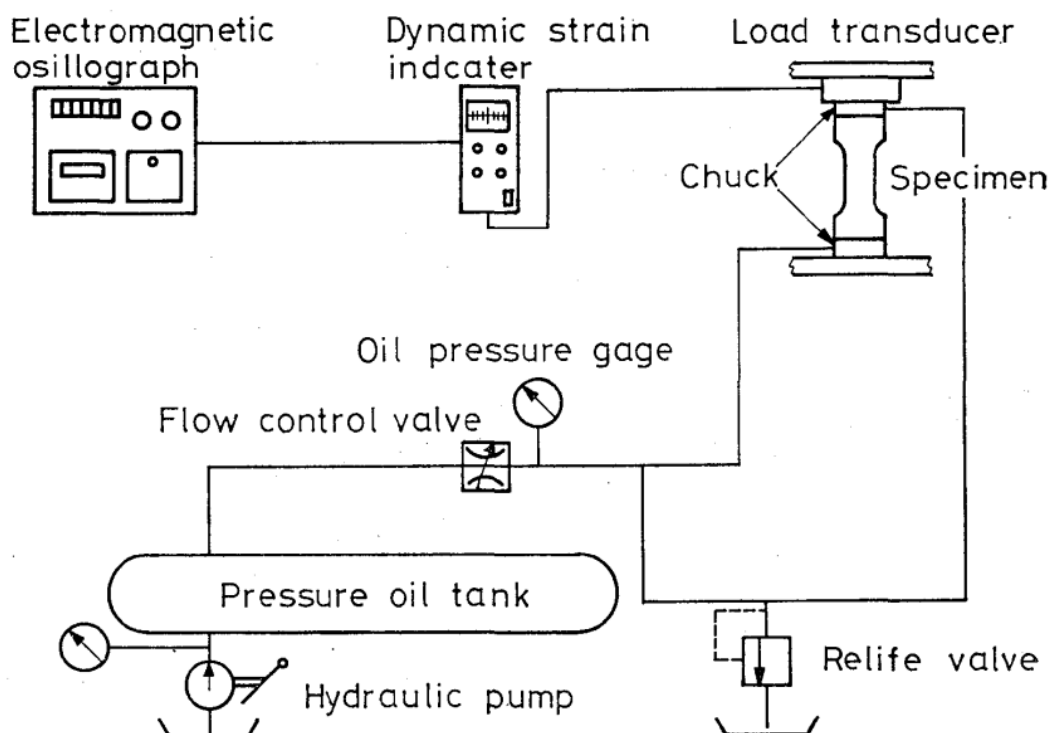


Fig. 1.18 Circuit diagram of testing apparatus (Morishita, 1985)

定している。また、試験片の形状は、試験力測定部で変形を行うため、単純な円筒管ではなく、チャック部の肉厚が大きく、試験測定部にかけて薄肉化されており、旋盤等により加工されたものである。

DuvallとEdwards (Duvall and Edwards, 1993) は、板材の円盤形状の試験片をパイプ状の治具の一方の開口部に把持し、内圧をかけることにより、等二軸引張応力下で23℃, 60℃, 80℃においてポリエチレンのクリープ特性を測定した。

材料の3方向に軸力を負荷する試験法も開発されている。DeshpandeとFleck (Deshpande and Fleck, 2001) は、多孔質PVCを対象として、チャックのために各辺に溝加工を施した立方体試験片を作成した。これは、立方体の試験片の面に張り付けたひずみゲージでひずみを測定し、軸力はそれぞれ試験装置の腕部に取り付けられたロードセルによって測定した。真応力の測定には課題があるが、三軸応力状態での降伏曲面を測定した。Shafiqら (Shafiq, et. al, 2001) は、多孔質

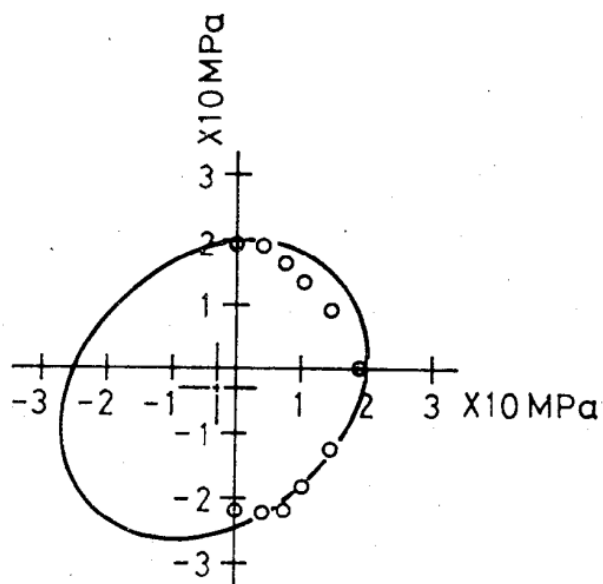


Fig. 1.19 Yield locus of PE represented by nominal stress (Morishita,1985)

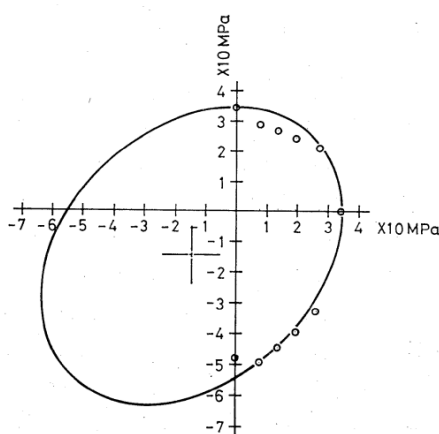


Fig. 1.20 Yield locus of ABS represented by nominal stress (Morishita,1985)

第 1 章 緒論

PVCを対象としてDeshpandeとFleckと同様の試験片を作製し，多軸応力下におけるss曲線および降伏曲面を測定した．Ayyagariら（Ayyagari, et. al , 2015）は単軸引張試験で同定したパラメータを使い，粘弾性モデルを用いた多軸応力下の変形挙動を有限要素解析した．このシミュレーションの結果と，Shafiqらの実験値を比較し，両者は一致することを示した．

これらの研究は，降伏曲面の測定に注目しており，降伏後の二軸応力下における塑性変形挙動には注目していない．また，二軸応力下における塑性変形挙動を測定した例であっても，その目的は，単軸引張試験から等二軸応力状態における応力とひずみの予測を行った際の評価を行うために，この時の材料は等方性を仮定している．このため，肉厚が大きい材料において異方性を考慮した二軸引張応力を測定し，そのデータを用いて降伏関数等を同定した例はまだない．

1.6. 二軸延伸

樹脂材料は、押出後フィルムを製造するために延伸される。延伸により、分子配向をそろえたり、引張強さ、透明性、ガスバリア性、耐熱性などが改善される。(M.A. Guseva, et. al, 2018, Nitta, Nomura, 2014, Peiyu Y, et. al, 2020, 森田, et. al, 2016, 葛良, 2009) この工程を高速で製造を行うため、**Fig. 1.21**に示すように、シート状のフィルムの延伸は縦方向と横方向に行われる(吉田, 2006)。延伸には逐次二軸延伸と同時二軸延伸がある。逐次二軸延伸は、多数のロールから構成される伸機にて、前のロール回転速度よりも後のロール回転速度を早くすることでシートを押出方向に延伸する。その後フィルム両端をフィルムと同じ速度で流れるクランプで把持し、シートの送りと同時に広げる事により圧延直角方向に延伸する。生産においては機構が独立しているため、逐次二軸延伸の方が、コストが低い。結晶性樹脂では片側に延伸した後に垂直に延伸すると、フィルムが破壊することがある。このため、二つの方向の延伸量を自在に設定できる同時二軸延伸の方が自由度が高い。この延伸を効率的に行うために、同変形下における樹脂材料の変形特性の研究が行われてきた。

松本ら(松本, et. al, 1972)は、PET フィルムで、延伸方法と延伸倍率を変えた試験片を作成し、単軸引張試験を行い、機械的特性を把握し、一軸延伸と同時二軸延伸フィルムについては、延伸初期に著しい平行結晶化を引き起こし、結晶化度が增加するが、延伸が進むと鈍化する。ただし、逐次二軸延伸フィルムでは、結晶の解きほぐれを起こし、配向結晶化が防げる傾向にあることを示した。

西山ら(西山, et. al, 2011)は二軸延伸フィルムに対して、熱特性、機械特性、電気特性、耐久性を評価した。このような薄膜の二軸試験は正方形の試験片と二軸のクリップの様なチャック部を持つ二軸延伸機により、温度や試験速度などを変えて様々な条件により材料試験が行われる。この試験機は市販されている。楠本ら(楠本, et. al, 2005)はこのような機構を持った試験機のうち、一方の軸を固定し、それと垂直方向の軸を延伸することで、ひずみが400%を超える領域までのポリエチレンとポリプロピレンの多層構造のフィルムの測定を行い、これと温度を変化させたときのシミュレーションを行い、計算手法の妥当性を評価した。

上記のようにフィルム材については二軸変形の研究が近年まで多数行われているが、これらは等方性を仮定し相当応力、相当ひずみで材料を評価するのが一般的である。さらに本研究のように1mm以上の肉厚を持つ材料の変形挙動を測定した例は前項に示した通り限られている。

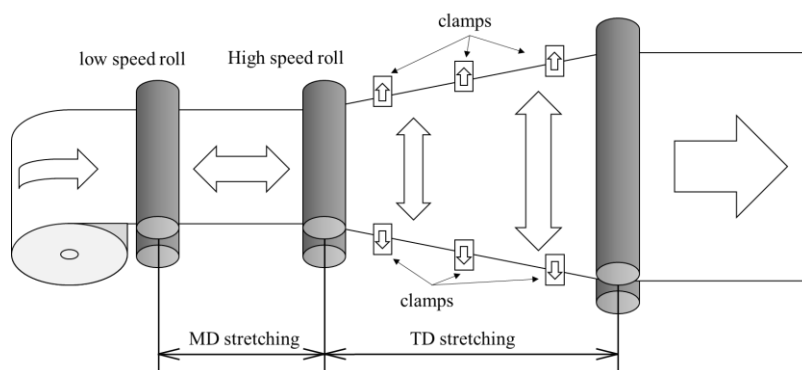


Fig. 1.21 Schematic diagram of sequential biaxial stretching process

1.7. 粘弾性挙動

樹脂材料の変形挙動は、多くの場合、弾性変形と粘性抵抗を組み合わせた粘弾性挙動を仮定してモデル化される。粘弾性とは、粘性と弾性の両方を合わせた性質のことを指す。基本的にはあらゆる物質が持つ性質である。変形が粘性・弾性の両方に無視できないスケールで影響されるような物質を粘弾性体と呼ぶ。樹脂材料は基本的に粘弾性体に分類される。

粘弾性体の特徴として、応力緩和が顕著にあらわれるため、弾性率が時間に依存して変化することと、非フック弾性体であり、弾性率がひずみに依存して変化することが挙げられる。高分子材料の応力-ひずみ線図が弾性域においても線形にはならない（廣恵, 本吉, 1996）。

プラスチックの粘弾性挙動は応力緩和やクリープとして観測される。応力緩和は、材料に一定のひずみを加えた状態に保つと、時間の経過とともに応力が低下する現象である。応力緩和は温度依存性があり、温度が高いほど顕著に進行する（藤野, et. al 1962）。クリープは応力を一定としたときに時間の経過とともにひずみが増加する現象である。クリープについても、温度依存性が認められている（井川, et. al 2015）、（北川, et. al 1988）。

これらの粘弾性の変形をモデル化するために Fig. 1.22のようなスプリングとダッシュポットを利用しモデル化が行われている。これらは粘弾性モデルと呼ばれ、様々なモデルが提唱されてきた。このモデルでは、スプリングにより弾性を、ダッシュポットにより粘性を表現する。スプリングとダッシュポットを直列に組み合わせたものをマックスウェルモデルと呼び、スプリングとダッシュポットを並列に組み合わせたものをフォークトモデルと呼ぶ(Fig. 1.23)。この二つのモデルが粘弾性挙動を記述する際の基本となり複雑な材料の変形挙動をバネとダッシュポットの組み合わせにより表現し、粘弾性モデルを構築した（染宮, et. al 2022, 山本, et. al 2018, 曾田, et. al 1994）。

このように、材料の変形をモデル化して、変形を表現する試みが多数行われているが、現在、本分野において、二軸の異方性を考慮した、粘弾性体をモデル化した例は無い。

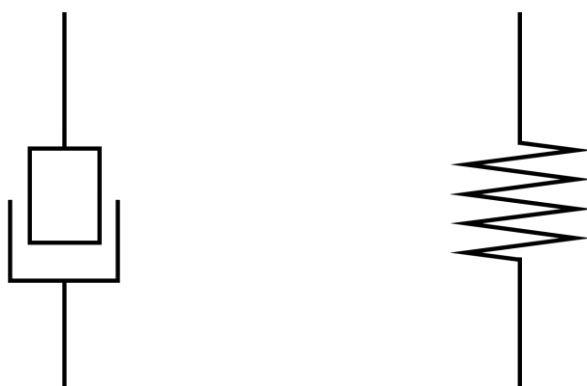


Fig. 1.22 Dashpot and spring model

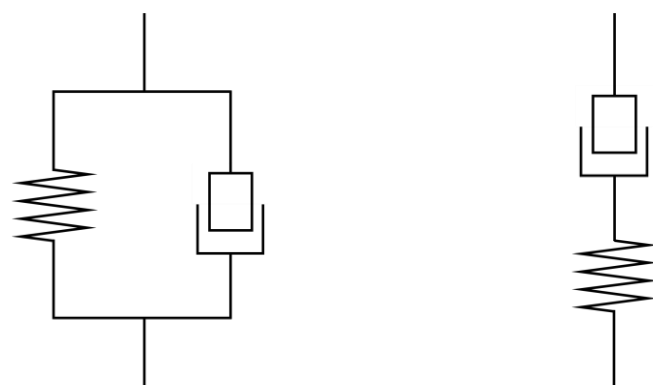


Fig. 1.23 Dashpot model combining multiple models

1.8. 樹脂材料の大変形挙動のシミュレーション

落橋防止用緩衝材や、船の衝突の衝撃を押さえる緩衝材や車のバンパーをはじめとする衝撃吸収材のように材料に大変形吸収挙動が求められる場合、同一材料であっても、形状の違いが大きな性能差を生み出す可能性がある。これらの形状を想定しうる限り製作し、試験を行うのは現実的ではない。そこで Mooney モデル (Mooney, 1940) や Ogden モデル (Ogden, 1984) 等ゴムを対象としたひずみエネルギー関数を樹脂材料に適用するシミュレーションが多用されている (萩原, 1991)。

根岸ら (根岸ら, 2000, 野々村ら, 2000) は樽型の試験片に圧縮試験を行い、中空円筒型の緩衝材の圧縮変形挙動を予測した。中空円筒型の緩衝材の有限要素法によるシミュレーションの結果と実験結果は定性的には一致し、座屈を伴うような大変形挙動では、弾塑性構成則を用いたモデル化の妥当性を示した。磯貝ら (磯貝ら, 2017) は、さらに複雑なハニカム構造の高さ100mmの緩衝材でシミュレーションと実験を行った。両者は、15mmの圧縮となる低ひずみ領域では高い精度で一致したが、15mm以上の領域ではシミュレーションの結果が実験結果よりも大きくなった。これは、ハニカム構造の端の部分のプラトー領域で相違が生じたものと結論付けた。一方で定量的な評価のためには、より高精度な材料モデルでの解析が必要であると主張した。

S. Ahzi ら (S. Ahzi, et. al, 2003) は、ひずみ速度と温度の影響を考慮した、ガラス転移温度以上のポリエチレンテレフタラートの応力-ひずみ挙動のモデルを、結晶相の配向の影響は無視して開発と実装に成功した。G. Ayoub ら (G. Ayoub et. al, 2010) は、LDPE に対して、単軸の負荷除荷試験とクリープ試験を行い、この実験結果から、S. Ahzi らのモデルを使用してシミュレーションを行った。単軸引張試験とクリープ試験から予測した単軸負荷除荷挙動は実験値と高い精度で一致した。

1.9. 本研究の目的

本研究では、樹脂材料の大変形領域における二軸応力下の変形挙動を明らかにすることを目的とする。現在最も生産量が多い樹脂材料である、低密度ポリエチレン（LDPE）と、大型船舶が発着する栈橋に設置され、大変形をしながら着岸の衝撃を軽減する緩衝工等に採用される材料である、ポリエステルを主成分とする熱可塑性エラストマー（TPE, 東洋紡株式会社製）の二軸応力下における弾塑性変形挙動を明らかにすることを目的とした。

樹脂材料においては、先述したように、種々の二軸応力を測定する試みが行われているが、その多くは降伏曲面の測定に注目しており、降伏後の二軸応力下における塑性変形挙動への言及はない。このため、試験装置に要求される測定能力は、降伏直後であるため、肉厚が樹脂材料に特化した二軸応力試験機は少数である。さらに、二軸応力下における塑性変形挙動を測定した例であっても、その目的は、単軸引張試験から等二軸応力状態における応力とひずみの予測を行った際の評価を行うためであり、この時の材料は等方性を仮定している。このため、肉厚が大きい材料において異方性を考慮した二軸引張応力を測定し、そのデータを用いて降伏関数等を同定した例はまだない。

本研究では樹脂材料に任意の二軸応力状態を負荷することができる二軸バルジ試験機を設計・製作した。この試験機を用いて、精密に制御された線形応力経路による二軸応力試験を実施し、材料の二軸変形挙動を測定する。

本研究では、樹脂材料に対し、金属材料でなされる材料モデリング手法を適用し、評価することを目的とする。このため、材料は弾塑性材料と仮定し、材料試験におけるひずみ速度も可能な限り一定に保つことにより、粘性の影響は無視して測定、評価を行った。

さらに塑性ひずみの測定方法として、2種類の手法を検討する。一つは単調に直線応力経路を負荷し、弾性係数を算出し、全ひずみから弾性ひずみを引く方法である。もう一つは、応力の負荷と除荷を繰り返し、除荷直前の応力と除荷時の永久ひずみを塑性ひずみを測定し、真応力－塑性ひずみ曲線を求める方法である。両者を比較してその特性を評価・検証した。さらに測定された二軸変形特性に基づいて、降伏関数を用いた材料モデルを作成した。

1.10. 本論文の構成

第1章では、本研究にかかわる社会的背景を述べ、ポリエチレンと熱可塑性エラストマーの適用事例について述べている。さらに樹脂材料に二軸応力を負荷し、材料の変形挙動を測定する試験方法の現況と関連研究を概説し、それらを踏まえたうえで、本研究の意義を述べている。

第2章では、本研究で設計・製作した、樹脂材料に適した二軸応力試験機（以下、二軸バルジ試験機）について、主にそのハードウェアを記述している。本試験機は、円管樹脂材料に軸力と内圧を同時に付加し、かつ非接触で材料の変形を測定することにより、二軸の真応力-対数ひずみ曲線を測ることができる。真応力と対数ひずみの算出手法についてその詳細を記述している。さらに作成した二軸バルジ試験機のアクチュエータとセンサの制御PCへの接続方法及び、制御プログラムを解説する。線形応力経路下で単調に二軸応力を負荷する試験方法（単調負荷試験）におけるひずみ速度の制御方法と、負荷除荷を繰り返しながら試験を行う方法（負荷-除荷試験）におけるひずみ速度制御方法について、詳細に説明している。

第3章では、低密度ポリエチレン押出し円管を供試材として、二軸応力下における変形挙動を精密に測定している。まず単調負荷試験を行い、真応力-対数全ひずみ曲線を測定した。さらに等仕事面を測定し、その形状を観察することで異方性を評価した。単軸引張応力状態の試験については、管軸方向と円周方向の単軸応力状態では変形特性に差異は見られなかったが、二軸応力下では明らかな異方性を示すことがわかった。すなわち、正確な材料特性の把握には、二軸応力試験が必要不可欠であると結論付けている。さらに詳しい材料特性の把握のため、真応力-塑性ひずみ曲線の測定方法を提案している。一つの試験片に対して負荷除荷を繰り返し、除荷直前の真応力と除荷時の塑性ひずみの関係から材料の真応力-塑性ひずみ曲線を測定している。この試験結果から等塑性仕事面を測定し、その形状を観察することで、材料の異方性を評価するとともに、異方性降伏関数を用いた材料モデルを提案している。

第4章では、ポリエステル系熱可塑性エラストマー押出し円管の真応力-塑性ひずみの関係を測定した。この材料では、二軸応力単調負荷試験と二軸応力負荷除荷引張試験を実施している。金属材料と同等の手法で二軸応力単負荷引張試験から測定した真応力-対数塑性ひずみの関係と、負荷除荷試験によって測定した真応力負荷除荷引張試験の関係を比較している。さらに、試験結果から等塑性仕事面を測定し、これに異方性降伏関数を適用することで、同材料でシミュレーションを行う際の材料モデルを同定している。その結果、材料の加工硬化挙動と変形挙動を同時に精度よく再現したい場合には、降伏関数には Yld2000-2d (A)を用い、塑性ポテンシャルには Yld2000-2d (B)を用いる、非関連流れ則に基づく材料構成則の構築を推奨している。

第5章では1～4章の結果を総括して、本研究で得られた知見及び残された課題を示した。

なお、本章中の図表については塑性加工学会、成形加工学会、ELSEVIER 社の著作権利用申請基準に従い使用した。

第2章

樹脂用二軸バルジ試験機

2.1 緒言

プレス成形シミュレーションの高精度化には二軸引張試験により同定された高精度な材料モデルの適用が不可欠である。高精度な材料モデルを同定可能な多軸応力試験法として十字形引張試験を用いた二軸引張試験がある。十字形引張試験には曲げ剛性の影響を低減するためのスリットが備え付けられ、試験部に一様な応力場を与えることができる一方、腕部の断面積は試験部よりも小さくなるために早期破断し、金属材料では負荷できる相当塑性ひずみは数%程度であり、樹脂材料では塑性変形開始前に腕部が大変形するため、測定することができない。

大ひずみかつ二軸応力下の塑性変形挙動を測定する試験方法として、二軸バルジ試験(Kuwabara, et al., 2003; 桑原ら, 2003)がある。桑原、箱山らは非接触測定が可能なデジタル画像相関法を用いることで、10%以上の大ひずみ領域で金属材料の二軸バルジ試験を行い、正確な変形挙動を測定した。この試験装置は、金属板材料をロール曲げし、溶接を施して作成した円管の測定を想定している。これにより、相当塑性ひずみ換算で、純チタン板で0.085(Ishiki et al., 2009)、冷延 IF 鋼板で0.19 (桑原ら, 2012) および0.15(Kuwabara, Sugawara, 2013)までの、等塑性仕事面の測定に成功した。

しかし、この実験装置では樹脂材料の変形挙動を測定するには、出力が過大である。樹脂材料は金属と比較して1000分の1程度降伏応力である、このため軸力負荷に使用する油圧シリンダや水圧負荷に使用する高圧ポンプでは出力が過大であり、樹脂材料に合わせた細かい出力の調整が困難である。また、軸力を測定するロードセルや水圧を測定する圧力計についても、樹脂材料の測定領域においては測定誤差が無視できない大きさになる。さらに、試験片の直径が40mm 程度で、樹脂材料で押出し円管を作成した場合、偏肉率が金属材料と比較すると大きくなるため、旋盤の加工が必要になり試験片の加工コストが高くなること、物性を均一に保つことが困難なこと等があり樹脂材料への適用が困難であった。

そこで、本章では、高分子材料の試験片に対し、精密に制御された線形応力経路を負荷することができる樹脂材料専用の二軸バルジ試験機を新たに開発する。本研究では新たに高精度に位置制御を行うことができる、電動シリンダを採用することにより、より高精度に軸力を負荷できるものである。さらにその性能を評価・検証することを目的として、ポリエチレン製の押出し円管材を供試材として大ひずみ領域における応力ひずみ線図を測定し、変形挙動を測定することを目的とする。樹脂材料に対し大ひずみ応力下において精密に制御された線形応力経路を負荷する研究は本研究が初めてである。

2.2 二軸バルジ試験機

本研究で製作した二軸バルジ試験機の応力測定部を **Fig. 2.1** に,二軸バルジ試験の概略図を **Fig. 2.2**, **Fig. 2.3** に示す. 以下, 管軸方向を ϕ , 円周方向を θ と記す. 二軸バルジ試験は円管状の試験片に ϕ 方向にシリンダにより軸力を, 円管内部に水圧を負荷することにより, 試験片の中央部に任意の二軸応力を負荷することができる試験である. 大ひずみ域までの任意の二軸応力状態を測定することができるため, 大変形が生じる樹脂材料の試験に適している. 軸力は試験機両端に取り付けられた電動シリンダ 2 つで, 内圧は, プランジヤポンプと容積式ポンプで負荷する. 軸力

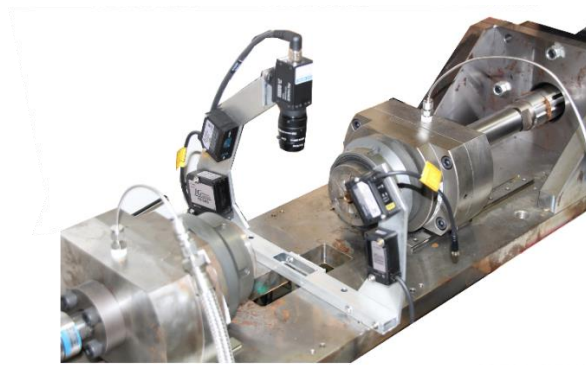


Fig. 2.1 Photograph of the stress measurement section of a biaxial bulge testing machine for resin

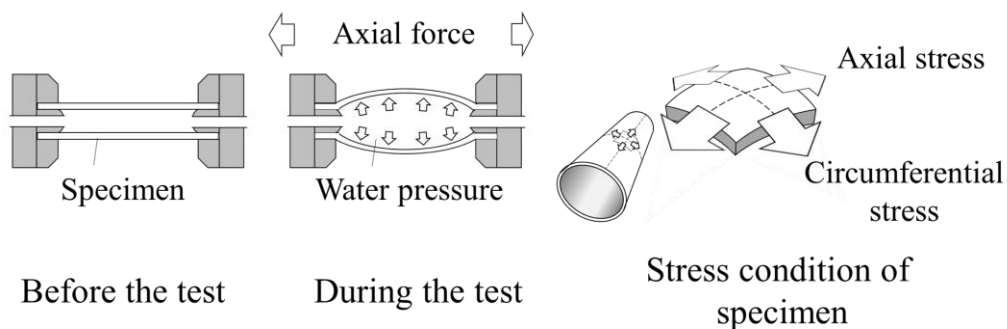


Fig. 2.2 Schematic of multi-axial tube expansion testing method

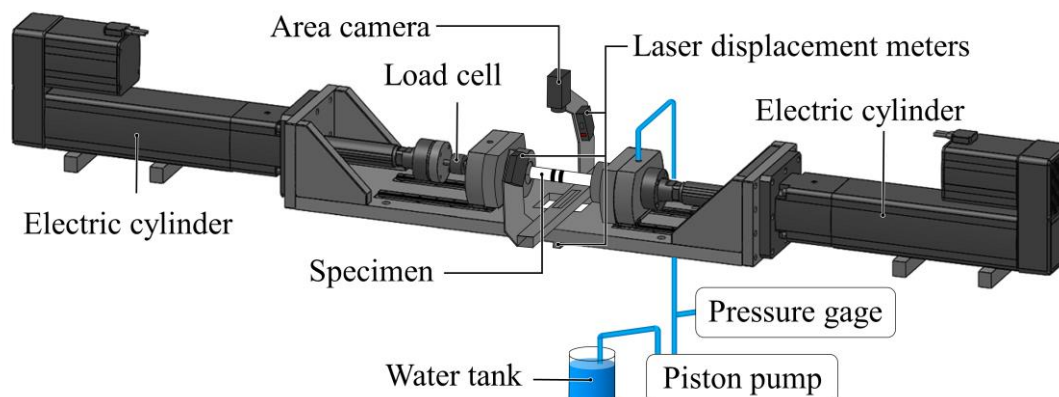


Fig. 2.3 Schematic diagram of the actuator and sensor of the testing machine

はロードセルで、内圧は水圧計で、管軸方向曲率半径と管軸方向ひずみはエリアカメラで、円周方向管軸ひずみは試験片試験片の周囲に取り付けたレーザ変位計群で測定する。

本試験機は初の樹脂専用の二軸バルジ試験機であるため、電動シリンダと非接触センサ系の採用をした。以下に、センサとアクチュエータ及び構成機械要素の詳細を記す。

2.3 試験機の構成（シリンダ軸上）

樹脂用二軸バルジ試験機のシリンダ軸上の構造を **Fig. 2.4**に示す。各部品の詳細の説明を以下に述べる。

1) 電動シリンダ

試験機に軸力を発生させる役割を持つ。試験片外径 17mm 試験片肉厚を 2.1mm と仮定し、熱可塑性エラストマの引張強さは 31.4MPa であるため、必要な推力は 3820N となる。金属用二軸バルジ試験機は駆動源が油圧であったが、非接触でひずみ測定を行うため、試験機中心付近でのパンタグラフ機構の採用は控えたい。そこで、本試験では電動シリンダで左右の動作量を精密に制御する。株式会社 IAI 製 RCS2-RA13R を対向 2 機採用した。このシリンダはボールねじにより動作するシリンダである。定格出力が 750W でストローク長さは 200mm、押し付け力は 19600N である。基本最低速度は 1mm/s であるが、オーバーロード機能を使うことにより 0.01mm/s まで減速することができる。

シリンダの制御は安全装置が付いた専用のコントローラ X-SEL-R を用いた。X-SEL-R は株式会社 IAI 製のシリンダコントローラである。このコントローラにはシリアルポート 2 つとデジタルポート 25 個搭載されている。シリンダはこのコントローラを介して制御用 PC から行う。この部分のプログラムについては後述する。この電動シリンダはシリンダコントローラから速度制御を行うことができる。

2) フロージョイント A

試験片チャック部はスライドレール上に設置されており、レール可動方向以外に動くことはできない。しかし、電動シリンダはボールねじの機構で動作する。このため、シリンダのロッドが前後するとラジアル方向に軸心揺れが発生する。これはレール可動方向に対し垂直に力がかかり、スライドレールの摩擦の増大や、シリンダロッドに負荷をかけ、ロードセルによる軸力測定不良やシリンダの寿命を短くする原因となる。これを防ぐためにフロージョイントで締結し、シリンダの軸心揺れが試験片チャック部に伝達しないように

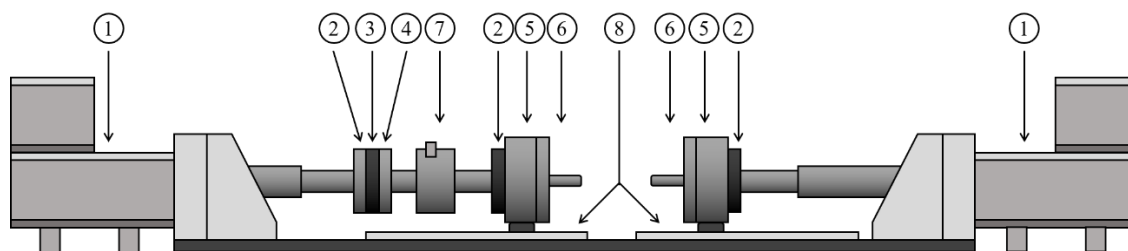


Fig. 2.4 Schematic illustration of test apparatus

した。

3) バックアッププレート

硬質な薄いプレートで、フロージョイントの接続相手を保護する役割を持つ。フロージョイントの接続相手がもうひとつのフロージョイントである場合や、穴部が存在する場合などに使用する。

4) 接続フランジ

フロージョイントの前後で接続するねじの径が異なる場合に変換する役割を持つ。金属用二軸バルジ試験機と異なり本試験機では、両側二つの試験片チャック部と測定部の長さの比を保つリンク機構が存在しないため、コネクティングロッドも存在しない。そのため接続フランジにてねじ径が異なる部品を接続している。

5) チャックブロック

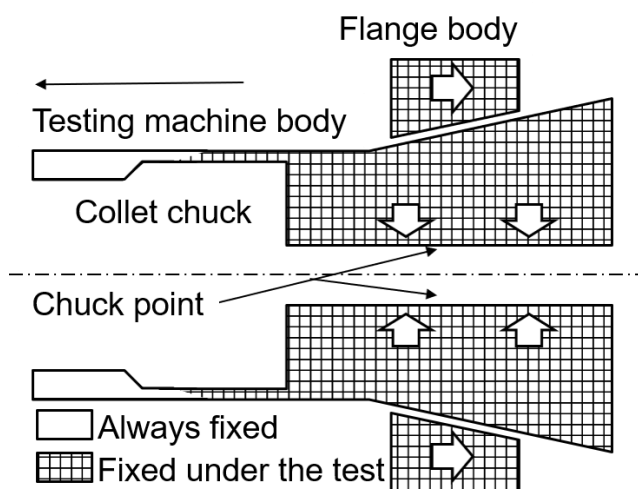
試験片把持部を接続する。スライドレール二つによって自重を支えている。試験片への水の流入と流出をさせるパイプの取り付け部であり、チャックブロックとチャックの間には、水圧がかかるため、Oリングを取り付けて、水密構造とした。

6) チャック把持部

円管状試験片を把持する役割を持つ、この部分はパーツを変えることで、様々な試験片の大きさや材質に対応が可能である。二種類のチャック部を用意しており、それぞれを以下に説明する。

a) コレットチャック方式

コレットチャックは本来、切削加工を行う工作機械において、ワークあるいはツールの把持に用いられる工具である。コレットチャックは **Fig. 2.5** に示すように、コレットとチャックユニットで構成される。ワークはチャックユニットに組み込まれたコレットが開閉することで、ワークの把持を行う。コレットチャックは様々な形状の製品が存在し、幅広



(a)



(b)

Fig. 2.5 (a) Schematic illustration of the collet chuck (b) The collet chuck

い用途でワークあるいは切削工具の固定に用いられている。通常のチャック(旋盤などの方式はスクロールチャックと呼ばれる)は3~4つの爪でワークを掴むのに対し、コレットチャックはコレットの割り数(コレットの種類によって異なる)によりワークを包み込むように把持するため、1点当たりの圧力がかかる方向が中心に近くなる。そのためより正確にワークを把持できる特徴を持つ。このチャックはフックスパナによって開閉する。

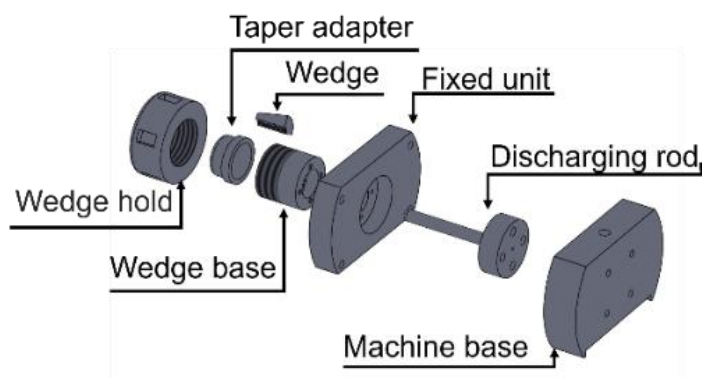


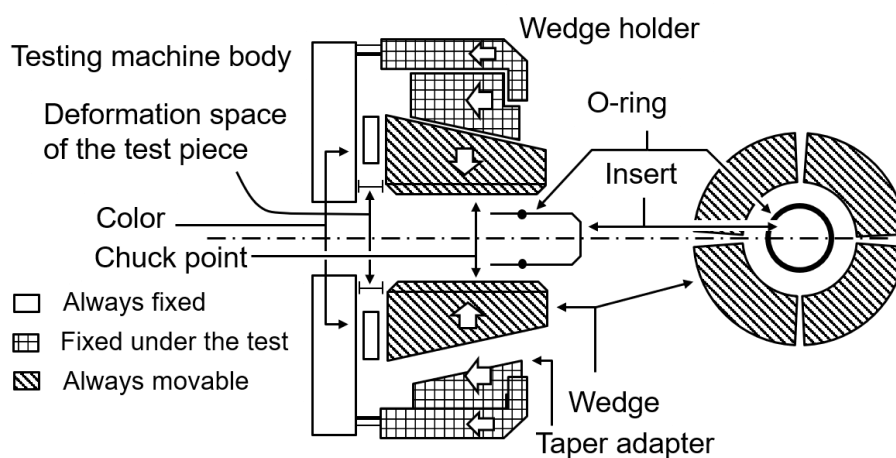
Fig. 2.6 Schematic illustration of the collet chuck



(a) Wedge base and Discharging rod



(b) Wedge hold and Taper adapter



(c) Sectional view of the chuck mechanism using wedge

Fig. 2.7 Discharge section of test machine using wedge

第2章 樹脂用二軸バルジ試験機

コレットチャックは構造から、把持後には、把持部の大きさは変えることはできない。このため大きな把持力により破壊するゴム等の柔らかい材料の試験に適する。一方、変形により板厚が大きく変化する材料の把持においては、管軸方向に主応力の試験で試験力を加えると、変形により把持力が低下し、試験片が試験機から抜けてしまう現象が発生する。本試験機では6つのチャック部を持つコレットチャックを採用した。中子のOリングは水密のために取り付ける。Oリングの規格は、試験片の大きさ及び硬度によって使い分ける。

b) くさび方式

金属材料用二軸バルジ試験機で採用されているくさびを改良して作成した。本試験機のくさび機構を **Fig. 2.7** 示す。くさびの数は作業性を考慮して、90度ごと4分割とした。

外くさびはテーパ部とネジ部に分かれており両者は滑らかに摺動する。ネジ部を回すことにより、テーパ部が回転せずに前後し、くさびを押さえつける機構である。

外くさびは金属材料用のくさびと比較して長尺に設計した。これは、くさびが短尺である場合試験片にかかるチャック圧力が高くなり、チャック部で破断してしまうことを防ぐためである。

中子には中心部と上部の二か所に穴をあけた。管軸方向単軸引張試験以外の試験では中心部の穴をふさいで試験を行う。これは試験開始時に試験片内に水を満たすためである。一方で管軸方向引張試験では中心部の穴をあけた状態で試験を行う。中心部の穴がない場合、試験中に縮管したとき、上部の穴が試験片により密着され、試験片内が減圧状態になる。これが円周方向の負の応力として働くため、精密な管軸方向引張試験とならないためである。

中子のOリングは水密のために取り付ける。Oリングの規格は、試験片の大きさ及び硬度によって使い分ける。

7) ロードセル

試験片に負荷される軸力を電圧値に変換することで計測する。ロードセルの対応最大荷重はシリンダの最大荷重19600Nを超えている必要がある。これに適合する最大荷重として2kNのロードセルが存在するが、対応最大荷重の半分以下で使用することで機器寿命が延長するために最大荷重5kNの共和電業社製 LUX-B-5KN-IDを採用した。このセンサの測定値を同社製のシグナルコンディショナ CDV-900Aを用い-10V~+10Vのアナログ信号に変換した。校正係数、入出力抵抗等が記載されている検査成績書は付録として添付する。

8) スライドレール

シリンダは軸心揺れを含むため、スライドレールは左右のチャック部を中心軸上で動作させるために取り付けた。

2.4 試験機の構成 (シリンダ軸上外)

1) プランジャポンプ

二軸バルジ試験機の試験片内圧を負荷する増圧器について、従来の試験機に倣いシリンダを用いた方法がある。この方法では、防錆水を満たした容器内でシリンダヘッドを移動させ、容積を変化することで容器内の防錆水を試験片内部へ送り出す、あるいは外部容器から増圧器容器内に引き込む構造となっている。しかしながら、この方法は圧力容器の作製の必要があり製作価格が数百万円見込と非常に高額である。

増圧ポンプには試験片に強弱なく吐出することができる無脈流のプランジャポンプを採用した。Fig. 2.8に 日本精密科学株式会社製 NP-KX-500の外観を示す。Fig. 2.9にプランジャの動作原理を示す。このポンプは、プランジャ、流入弁、吐出弁からなる機構である。プランジャはクランクを介してモータに接続されており、左右に動作する。Fig. 2.9 (a)ではプランジャが完全に押し切った状態であり、Fig. 2.9 (b)ではプランジャが右側に動作し、シリンダ内が減圧状態になり、流入弁が解放され、シリンダ内の水量が増加する、Fig. 2.9 (c)まで



Fig. 2.8 Plunger pump mounted on a biaxial bulge testing machine NP-KX-500

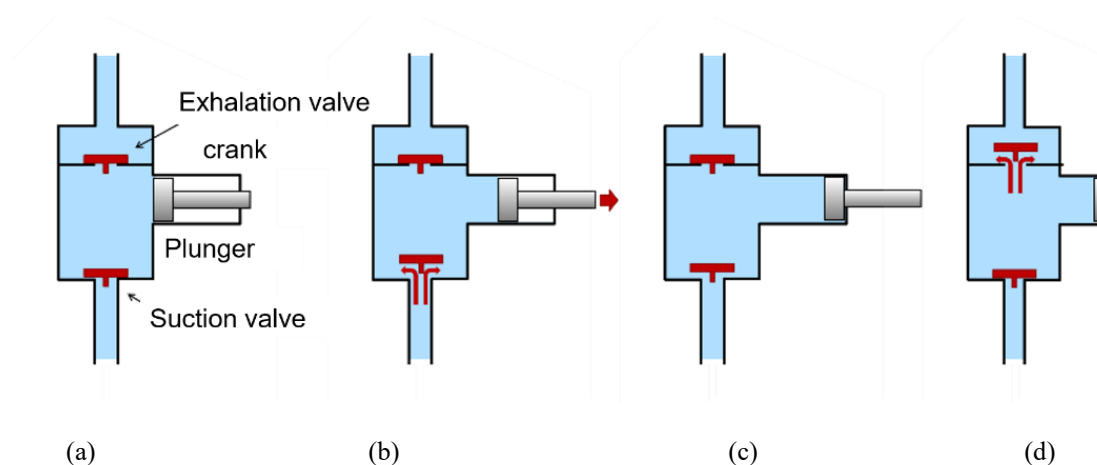


Fig. 2.9 Schematic diagram of plunger pump

Table 2.1 Relationship between Set flow rate and real flow rate

Set flow rate / ml/min	Flow rate measured with a graduated cylinder / ml/min						
Load pressure /MPa	0	5	10	15	20	30	46
100.0							90.5
78.0	78.5	77.0	76.5	75.5	74.8	73.5	71.0
50.0							45.0
39.0	39.0	38.3	38.1	37.8	37.5	36.5	35.5
10.0							8.92
8.0	7.90	7.70	7.60	7.50	7.40	7.30	
4.0	3.90	3.70	3.67	3.60	3.58		
1.0	0.72	0.70	0.70	0.70	0.67		

プランジャがひかれる。Fig. 2.9 (d)では再びプランジャが左側に動作し、シリンダ内が増圧され、流入弁が閉じる。同時に吐出弁が開き、水を吐出する。このシリンダが2機取り付けられていて、互い違いに動作することにより無脈流を作る。このポンプは吐出側にしか水圧を負荷することができず、減圧を行うことはできない。

仕様を Table 2.1に示す。流量は最大で100ml/min 最小0.01ml/min であり、換算して約1.67 ml/sである。吐出圧力も20 MPa まで負荷可能である。稼働電源は AC100V, 6 A 電源で稼働し、取り回し、保守点検性に優れる。ポンプのメンテナンスには流入弁及び吐出弁を分解して清掃する。

このポンプは高負荷時に安定した吐出を行うため、フライホイールが搭載されている。このため、停止状態から最大出力である100ml/min に達するまで5秒程度かかる。これは、試験開始時の水圧の応答性が低い原因の一つである。プランジャポンプのみを使用した試験を行う場合は、応答性をよくすると、試験値が発散するため、P パラメータの調整には注意を要する。

2) 容積式ポンプ

容積式ポンプは、負荷除荷試験を行うために増設した。以下の理由で自作した。

- ・完成品は2号館の中2階の重量制限に耐えることができない
- ・完成品は納期が1年近くに及ぶ
- ・完成品は高額である
- ・試験前の円管試験片への水の流入は既存のダブルプランジャポンプで行うため、容積は初期試験片内容積の4倍程度で比較的低用量でよい。一方で最大で10MPa程度の大出力の加圧が必要になり、低容量高出力が求められるが、完成品では要求に合致したポンプがない。

自作した容積式ポンプは電動シリンダで動作する。この電動シリンダはDCモータを搭載したもので、ロボシリンダとは異なる。モータドライバは市販品を使った。これは最大24V15Aの出力が可能である。10V、20kHzのPWMの入力により、出力を調整可能である。制御PCとの接続には、ドライバ電源と出力調整の2系統の接続を行った。

流量は最大で300ml/minである。吐出圧力は、設計上は20MPaであり、16MPaまで負荷を確認した。本研究で作成したポンプをFig. 2.10に示す。

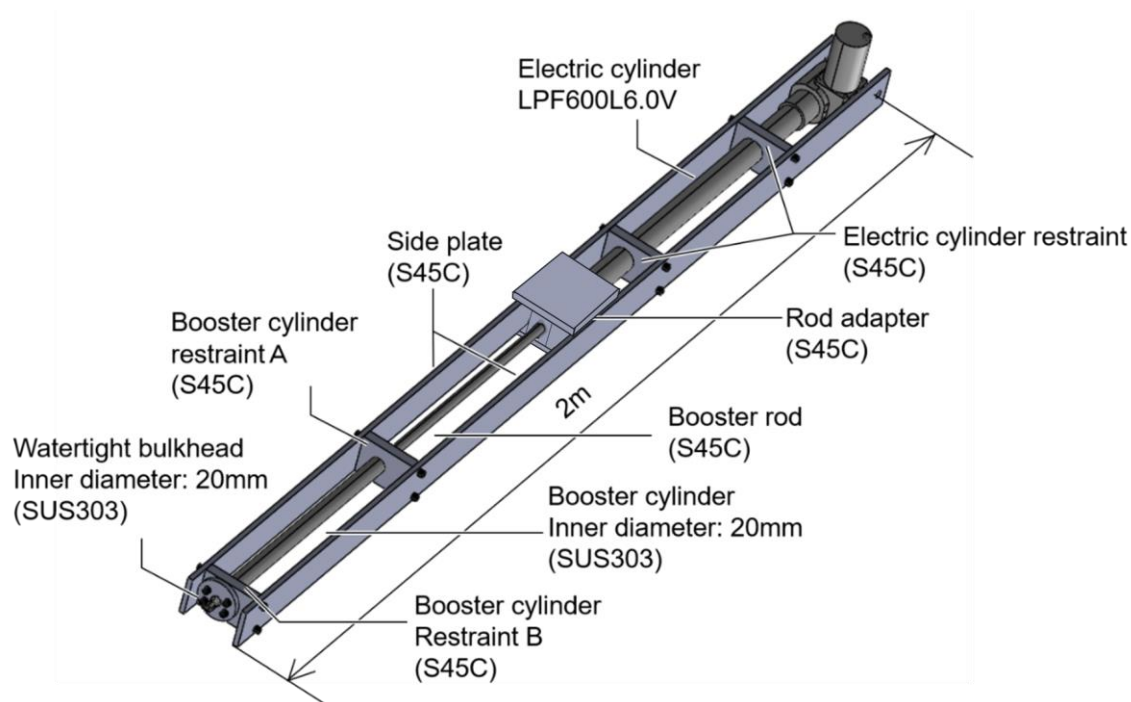


Fig. 2.10 Self-made positive displacement pump for biaxial bulge tester

2.5 二軸バルジ試験機の構成（試験片円周方向）

1) 透過型レーザ変位計

試験片管軸方向中心部の外径を測定するために、透過型レーザ変位計と反射型レーザ変位計の二種類の変位計を用いている。ひずみ測定部を **Fig. 2.11** に示す。透過型レーザ変位計の外観を **Fig. 2.12 (a)**に測定方法を **Fig. 2.12 (b)**に示し、反射型レーザ変位計 **Fig. 2.13 (a)**に、測定方法を

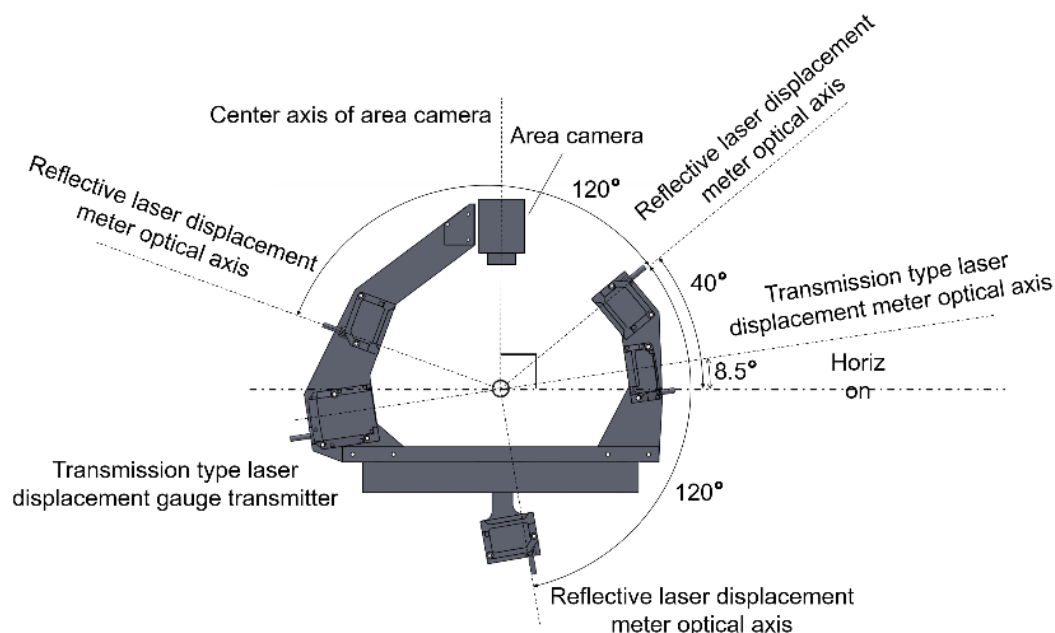


Fig. 2.11 Schematic illustration of jig for laser displacement meter

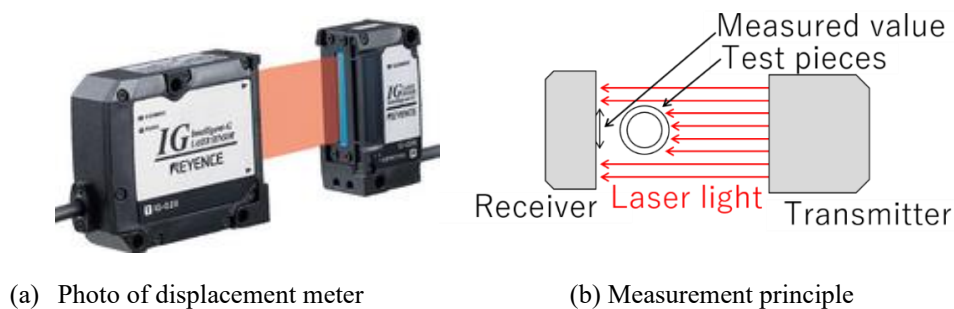


Fig. 2.12 Transmission laser displacement meter and measurement location

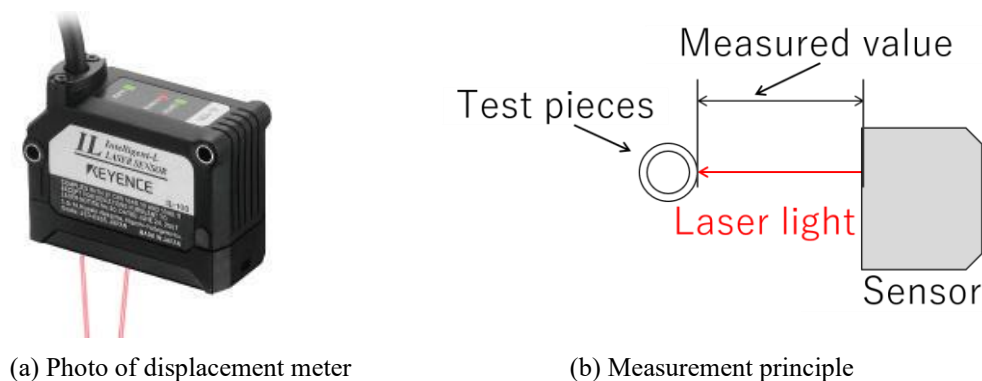


Fig. 2.13 Reflection type laser displacement meter and measurement place

Fig. 2.13 (b)に示す．透過型レーザ変位計は，レーザ送信部と受信部に分かれていて，測定物を挟むようにして配置する．送信部から帯状にレーザが照射され，受信部では測定物の影を読み取る．本試験機は株式会社キーエンス社製 IG-28 である．これは最大で 28mm まで測定することができ，最小分解能は 6 μ m である．反射型レーザ変位計は，レーザ変位計から測定物の表面との相対距離を三点測量の原理で測定する．本試験機で採用しているのはキーエンス社製の IL-065 である．最大 65mm まで測定することができ，最小分解能は 4 μ m である．試験機には透過型レーザ変位計を 1 組，反射型レーザ変位計を 3 つ搭載している．配置方法を **Fig. 2.11** に示す．試験片直上にエリアカメラを設置した．レーザ変位計は，試験中は常にレーザ光を出し続ける．このため，万が一試験片が設置しない状態で変位計の電源が入った場合，エリアカメラの画像素子を傷つける恐れがある．このため，反射型レーザ変位計は試験片から真下の角度から 8.5°ずらした角度から 120°ごとに 3 つ設置した．透過型レーザ変位計は，反射型レーザ変位計の間に設置した．

反射型レーザ変位計は，変位計本体と試験片の相対位置を測定するため，初期外径 D_0 は，レーザ変位計の値を使用した．反射型レーザ変位計 A~C で測定される初期状態からの外径差分を $\Delta D_A, \Delta D_B, \Delta D_C$ とすると式 2.1 のように算出した．

$$D = D_0 + \frac{\Delta D_A + \Delta D_B + \Delta D_C}{3} \quad (2.1)$$

試験片の初期外径 D_0 は，透過型レーザ変位計で変形開始時に測定された値を使う．試験開始後は，3 つの反射型レーザ変位計から読み取られた値の平均値を外径変化量 ΔD として計測した．

試験片は，均一に変形しない場合がある **Fig. 2.15** に中心軸から均一に変形しなかった場合の試験片を示す．このように変形した場合は，3 つのレーザ変位計の偏差が大きくなるため判別することができる (**Fig. 2.16**)．

レーザ変位計は，アナログ出力，RS232C シリアル通信に対応している．シリアル通信の場合は，入力部に信号入力部が導通した時に計測した値を出力させる．出力にはキーエンス社製の通信ユニット DL-RS1A を使用した．これは，センサの系統ごとに出力を行うデバイスであり，透過型レーザ変位計と反射型レーザ変位計にそれぞれ一つずつの合計二つ設置した．結線方法を **Fig. 2.17** に示す．それぞれのセンサごとに，スペース区切りの数字列を出力した．

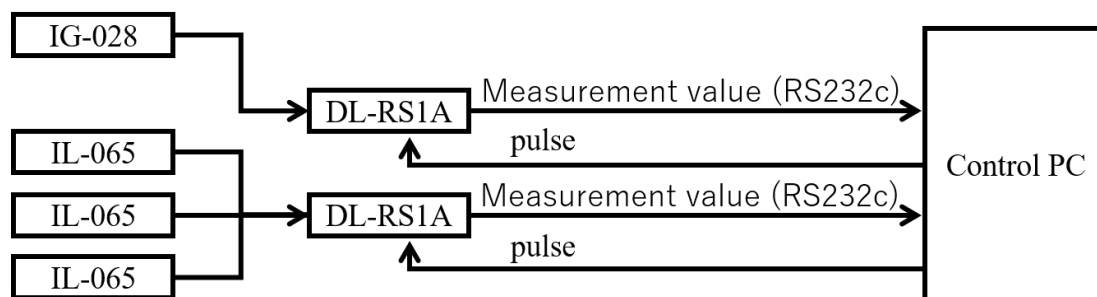
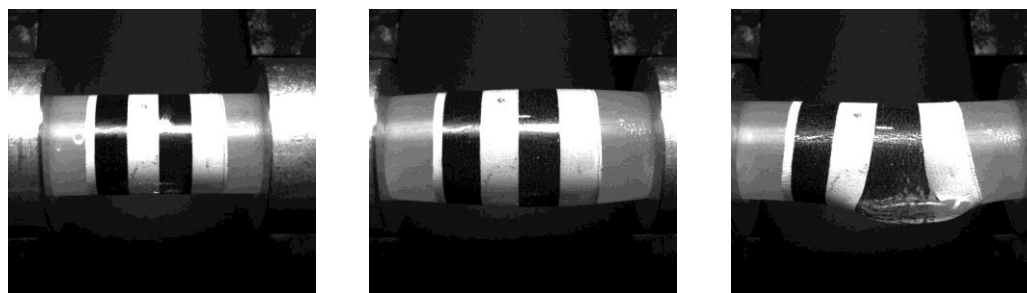


Fig. 2.14 Connection method between laser displacement meter and control personal computer



(a) Before the test (b) Specimen under uniform deformation (c) Specimen after uneven deformation

Fig. 2.15 Example of test after uneven deformation

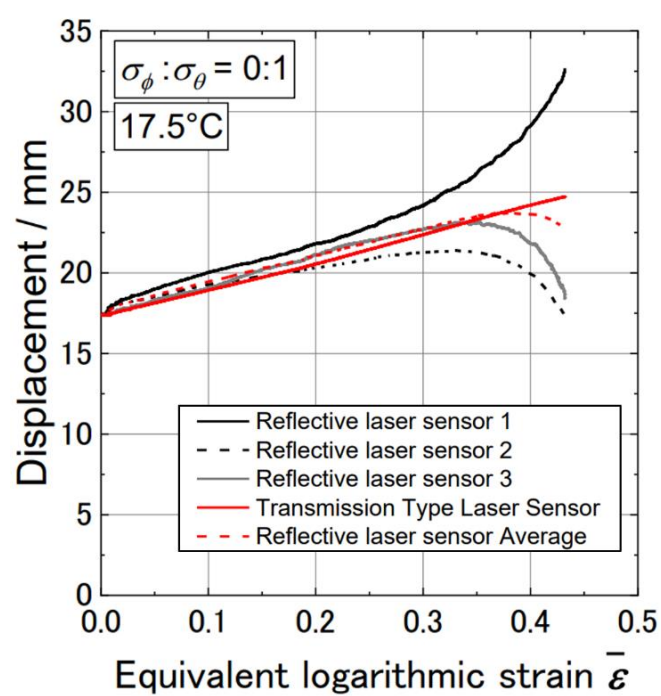


Fig. 2.16 Laser displacement meter measurement

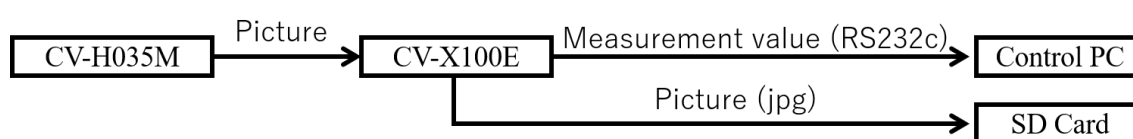


Fig. 2.17 Connection method between area or camera and camera controller

2) エリアカメラ

エリアカメラは、写真を撮影し、その中の特徴のある測定点の画像を送信することができるデバイスである。本試験機では試験片のひずみ測定部の上方に設置した (Fig. 2.11)。

管軸方向変位および管軸方向曲率半径の測定は、エリアカメラによる画像解析を用いて行う。カメラ視野内における試験片の上端の試験片中央部と、試験片中央部から左右 5mm の3点の座標を追跡し、**Fig. 2.18**, **Fig. 2.19** に示すように、その3点の位置関係から管軸方向曲率半径と弦 L を求めた。

任意の点の追跡にはその点に識別可能な特徴となるコントラストパターンが必要である。そこ

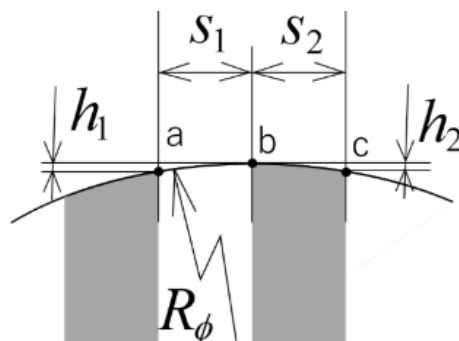


Fig. 2.18 Schematic illustration of the measurement of the area camera

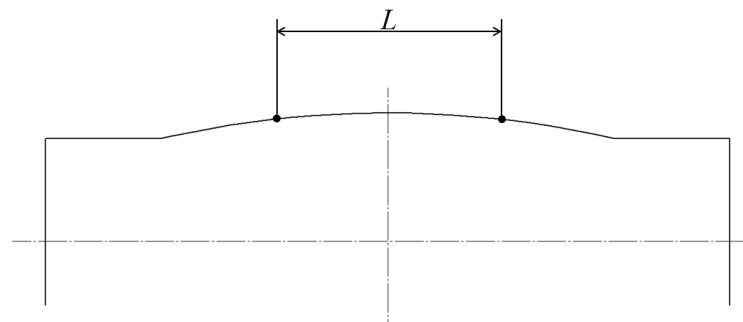


Fig. 2.19 Schematic illustration of the measurement of the area camera

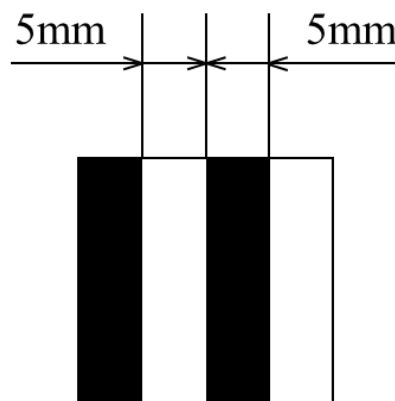


Fig. 2.20 Decal dimensions for resin biaxial bulge testing

第2章 樹脂用二軸バルジ試験機

で、本試験機では試験片に耐水デカルを用いて塗分けを行った。デカルはインクジェットプリンタで5mm 間隔の白と黒の縞模様を作成して使用した。Fig. 2.20 にデカルの寸法を示す。

エリアカメラでは、Fig. 2.21 に示す白と黒のコントラストパターンの中心追跡させた。点 a 及び点 c は同一の模様であるが、試験片の均一変形のまま推移した場合、点 b を境に均一変形するため、両者を混同することはない。管軸方向変位については、Fig. 2.22 に示すように試験片をカメラで撮影し、カメラ視野内における上端の任意の2点の座標を追跡し、その間の距離を計算することで管軸方向伸びを測定した。

任意の2点の追跡については曲率半径の測定と同様に測定点を設ける必要がある。

上記の測定に用いたカメラセットは高速・高容量マルチカメラ CV-H035M とコントローラ CV-X100E であり、カメラは白黒、640×480 画素、転送時間は 4.7ms である。640×480 画素は、カメラ視野の縦方向を 40mm とした場合、1 画素あたり 0.083mm であることを指す。本システムはソフトウェアの処理により 1 画素の 1/10 の移動までを算出できるため、このカメラで計測可能な最小単位は 0.0083mm、すなわち約 8.3 μ m である。なお、これはカタログスペック上であり、実際の使用状況によってはこの数字は上下する。

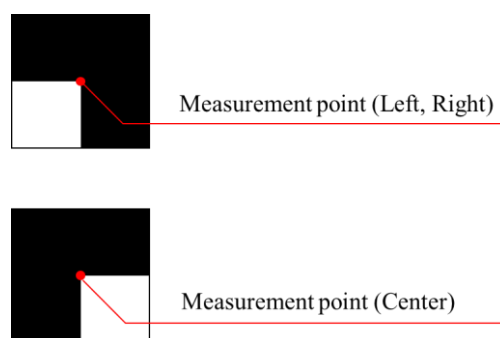


Fig. 2.21 Measurement points of the specimen

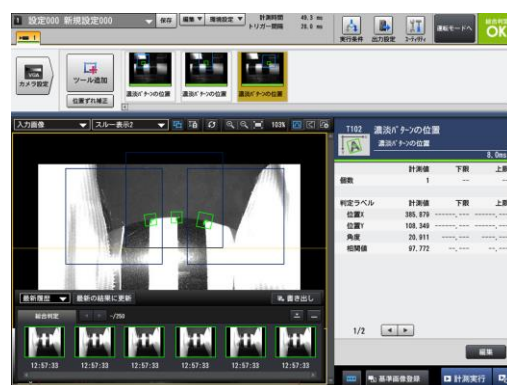


Fig. 2.22 Schematic illustration of the measurement of the area camera

2.6 二軸バルジ試験測定値計算方法

二軸バルジ試験の概念図を Fig. 2.23 に示す。

水圧を増圧ポンプで、軸力を電動シリンダで加える。

二軸バルジ試験では、円管試験片に対して軸力 T と内圧 P を負荷することで、管中央部に二軸応力状態を発生させている。軸方向真ひずみ ε_ϕ ，軸方向真応力 σ_ϕ ，円周方向真ひずみ ε_θ ，円周方向真応力 σ_θ の算出方法を以下に述べる。

各種パラメータの算出にあたっては、以下を仮定している。

- 1) 管は直径に対し十分に肉厚が小さく、管の半径方向には応力が作用しない平面応力状態である。
- 2) 管の円周方向の材料特性は均一であり、変形中の管断面は真円かつ、その中心は移動しない。
- 3) 管の変形は管軸方向中心において最大かつ対称である。

管の変形は管軸方向中心において最大かつ対称である。

2.6.1. 管軸方向曲率半径の算出

応力とひずみの算出に当たり、円環表面の管軸方向の曲率半径 R_ϕ が必要である。本研究ではエリアカメラを用いた画像処理システムにより、Fig. 2.25 に示す a, b, c の3点の座標を測定することで、 R_ϕ を算出する。 R_ϕ の算出式は、図中 h と S を用いて、三平方の定理を用い式(2.6)となる。

$$R_\phi = \frac{h^2 + S^2}{2h} \quad (2.6)$$

二軸バルジ試験法は、円管試験片に軸力と内圧を同時に負荷することで、試験片の管軸方向中

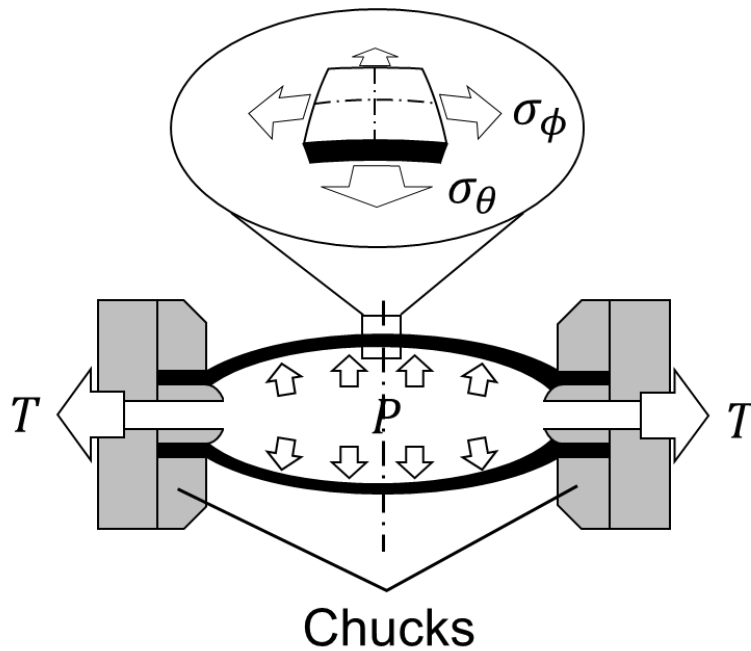


Fig. 2.23 Schematic of multi-axial tube expansion testing method

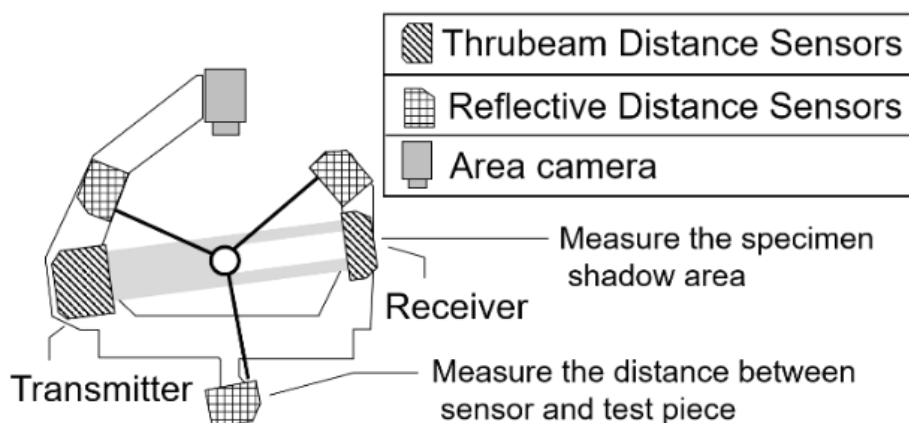


Fig. 2.24 Noncontact diameter measurement apparatus

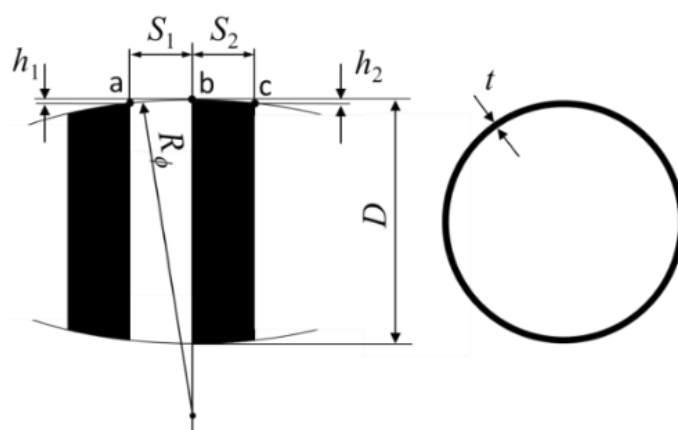


Fig. 2.25 Cross section along circumferential direction

中央部の微小要素に二軸応力場を発生させる試験法である。大ひずみ域までの任意の二軸応力状態における変形挙動を測定することができ、大変形が生じる高分子材料の試験に適している。

本試験機では軸力をシリンダによって与え、内圧はポンプによって試験片内部に水を注入し、その流量を調整することで変化させる。これらによって試験片に変形を与え、その変形を各種測定器で測定することで材料の変形挙動を得る。

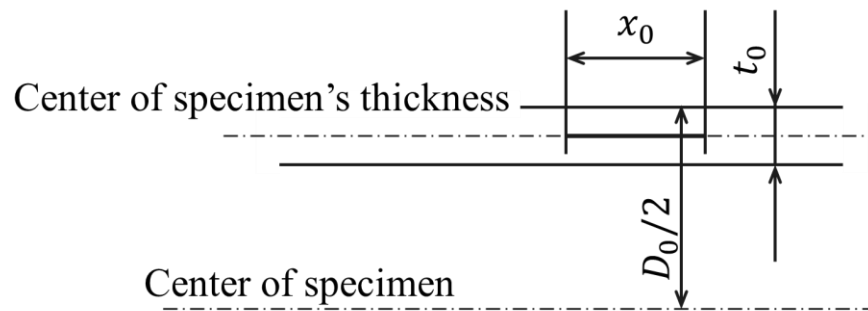
2.6.2. 肉厚中央部のひずみの算出

変形中の試験片には管軸方向に曲率が生じるために肉厚方向にひずみの分布を有する。そのため本研究においては肉厚中央部のひずみを代表値とした。変形前後の円管の管軸方向断面図を Fig. 2.26 に示す。エリアカメラを用いた画像処理システムにより、管軸方向の標点間距離 L を測定し、透過型レーザ変位計を用いて直径 D を測定する。これらの値を用い、式(2.7a)、(2.7b)によって円管表面部における管軸方向ひずみ ε_{ϕ}^s 及び円周方向ひずみ ε_{θ}^s をそれぞれ算出する。添字 0 は初期形状を意味する。

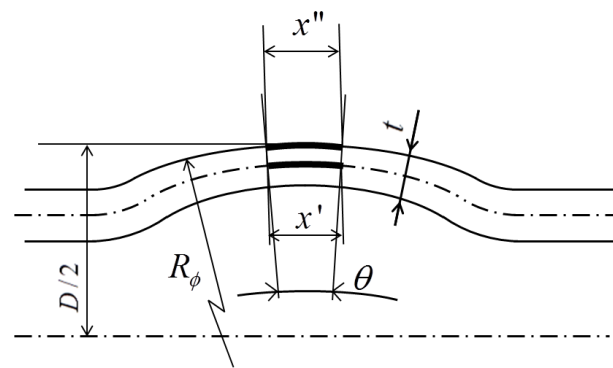
$$\varepsilon_{\phi}^s = \ln \left\{ \frac{2R_{\phi}}{L_0} \sin^{-1} \left(\frac{L}{2R_{\phi}} \right) \right\} \quad (2.7a)$$

$$\varepsilon_{\theta}^s = \ln \frac{D}{D_0} \quad (2.7b)$$

ここで円管表面の管軸方向と円周方向の真ひずみ ($\varepsilon_{\phi}^s, \varepsilon_{\theta}^s$) は、ひずみ測定器により計測される公称ひずみを変換し算出される。肉厚中心における真ひずみ ($\varepsilon_{\phi}^c, \varepsilon_{\theta}^c$) は上式を用いて以下の式(2.8a), (2.8b)のように算出できる。



(a) before deformation



(b) after deformation

Fig. 2.26 Cross section along axial direction

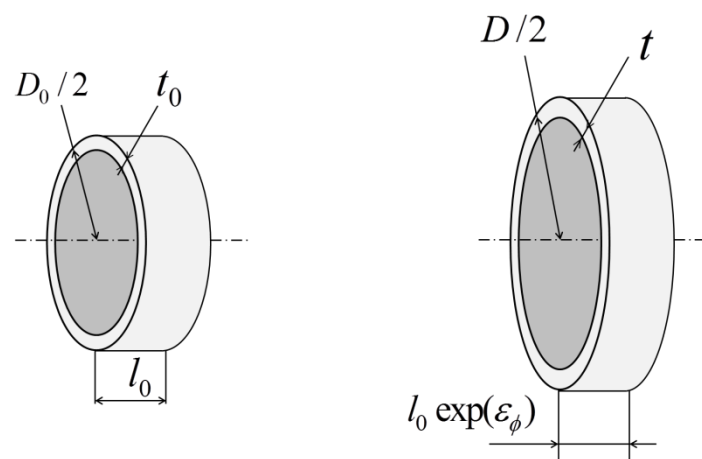


Fig. 2.27 Cross section along circumferential direction

$$\varepsilon_{\phi}^c = \ln \frac{x''}{x_0} = \ln \frac{(R_{\phi} - t/2)\theta}{x_0} = \varepsilon_{\phi}^s - \ln \frac{R_{\phi}}{R_{\phi} - (t/2)} \quad (2.8a)$$

$$\varepsilon_{\theta}^c = \ln \frac{D - t}{D_0 - t_0} \quad (2.8b)$$

2.6.3. 外径及び肉厚の算出

式(2.8a)および(2.8b)で用いた外径と肉厚の導出方法を示す。Fig. 2.27 に管軸中央部の円管状要素を示す。円周方向公称ひずみ ε_{θ}^s の算出式は、式(2.9)より算出する。ただし(2.9)における D は、円周方向に設置された変位計により測定される外径である。 D_0 はノギスで測定した初期外径である。

$$D = D_0(1 + \varepsilon_{\theta}^s) \quad (2.9)$$

次に、円環状要素の変形前後に存在する弾性ひずみと、変形によって生じる管軸方向の曲率を無視し、この要素に体積一定則を適用する。すると式(2.10)が導かれる。現時点では体積一定速を仮定しているが、この仮定は実際の動作中に異常が認められた場合、別の置き方を考える。

$$(D_0 - t_0)\pi t_0 L_{\phi_0} = (D - t)\pi t L_{\phi} \exp(\varepsilon_{\phi}) \quad (2.10)$$

上式の t について整理すると、 t の2次方程式となり式(2.11)となる。

$$t^2 - Dt + \frac{(D_0 - t_0)t_0}{\exp(\varepsilon_{\phi})} = 0 \quad (2.11)$$

解の公式より、

$$t = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{(D_0 - t_0)t_0}{\exp(\varepsilon_{\phi})}\right)} \quad (2.12)$$

ただし、試験中の板厚の算出には式(2.13)を用い求めた。

$$t = t_0 \exp(-\varepsilon_{\phi}^c - \varepsilon_{\theta}^c) \quad (2.13)$$

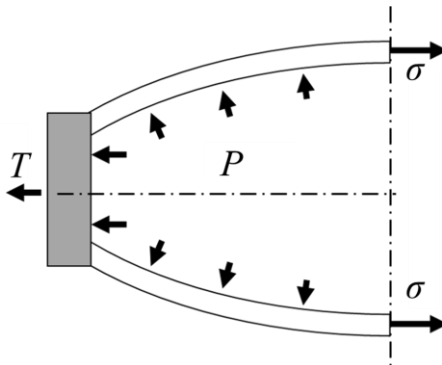


Fig. 2.28 Force equilibrium in the axial direction of a specimen subjected to internal pressure P and axial

stress σ_{ϕ}

2.6.4. 応力の算出

拡張および縮管後の円管の管軸方向断面図を **Fig. 2.28** に示す．拡張の場合は内圧が軸方向の引張方向に寄与するのに対し，縮管の場合は軸方向の圧縮にも寄与する．これらを踏まえると円環状要素の力のつり合いより式(2.14)が導かれる．

$$T + P\pi(\rho_\theta - t/2)^2 - 2\pi\rho_\theta t\sigma_\phi \cos(d\phi/2) = 0 \quad (2.14)$$

ここで， σ_ϕ は肉厚中央部の管軸方向応力， $\rho_\theta (= D/2 - t/2)$ は肉厚中央部の円周方向曲率半径， $\rho_\phi (= R_\phi - t/2)$ は肉厚中央部の管軸方向曲率半径， $d\phi$ は管軸方向微小角である．円管の軸方向中央部の微小要素に着目しているため， $\cos(d\phi/2) \cong 1$ と近似でき，管軸方向応力は式(2.15)により算出される．

$$\sigma_\phi = \frac{T + P\pi(D/2 - t)^2}{\pi(D - t)t} \quad (2.15)$$

Fig. 2.29 の微小要素の肉厚方向の力のつり合いより (2.1.11)が導かれる．

$$2\sigma_\theta t\rho_\phi d\phi \sin(d\theta/2) + 2\sigma_\phi t\rho_\theta d\theta \sin(d\phi/2) = P(\rho_\phi - t/2)(\rho_\theta - t/2)d\theta d\phi \quad (2.16)$$

微小要素に着目しているため $\sin(d\theta/2) \cong d\theta/2$ ， $\sin(d\phi/2) \cong d\phi/2$ と近似して，以下のようになる．

$$\frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} + \frac{\sigma_\phi}{\rho_\phi} = \frac{P(\rho_\theta - t/2)(\rho_\phi - t/2)}{t\rho_\phi\rho_\theta} \quad (2.17)$$

σ_θ について整理すると円周方向応力の式を得る．

$$\sigma_\theta = \frac{P(\rho_\theta - t/2)(\rho_\phi - t/2)}{t\rho_\phi} - \frac{\sigma_\phi\rho_\theta}{\rho_\phi} \quad (2.18)$$

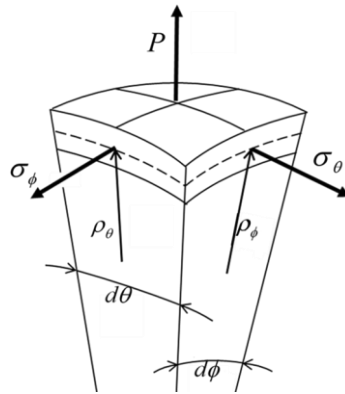


Fig. 2.29 Force equilibrium in the thickness direction of a material element embedded at the center of a tubular specimen

2.7 制御対象

試験機は複数のセンサとアクチュエータにより構成されている。接続方法を **Fig. 2.30** に示す。プログラムは 制御用 PC, Compact RIO, シリンダコントローラで行った。制御用 PC ではメインプログラム, 指令値読み取り, 初期値設定, 計測/算出, 試験値書き込みの各サブプログラムを LabVIEW で動作させた。さらに, 制御 PC からシリンダ制御ソフトを用いて, シリンダコントローラ内にある方向制御, 速度制御プログラムの動作の指示を出した。

Compact RIO で動作させる IO プログラムでは, すべてのアクチュエータとセンサとの通信を行った。laser 変位計とエリアカメラとプランジャポンプとは RS232C シリアル通信で, 容積式ポンプは 24V デジタル通信で, ロードセルと水圧計は同ひずみアンプを用いてアナログで通信した。詳細について以下に示す。

2.8 アクチュエータ

2.8.1 電動シリンダ

IAI 社製のロボット電動シリンダ。専用のシリンダコントローラボックスから X-SEL と呼ばれる SEL 言語により動作させる。このコントローラには 2 つのシリアルポートと 25 のデジタルポートがある。このコントローラのみでポンプの制御, センサの値の測定は技術的には可能である。しかし, 後述する LabVIEW を利用する方法と比較して, プログラムが煩雑になるため, シリンダコントローラは, シリンダの制御のみに利用した。このシリンダコントローラは大出力の電動シリンダを動作させるため, 安全装置が必須である。そのため, ロボシリンダはコントローラを使わずに LabVIEW から直接シリンダを動作させることはできない。シリンダは精密機器であるため次のような注意点が存在する。

- ・制御電源はアクチュエータ電源よりも先に投入すること
- ・制御電源はアクチュエータ電源よりも後に遮断すること
- ・回路内に高電圧が充電されているため, コネクタの抜き差し, 内部点検は電源 OFF 後 10 分以

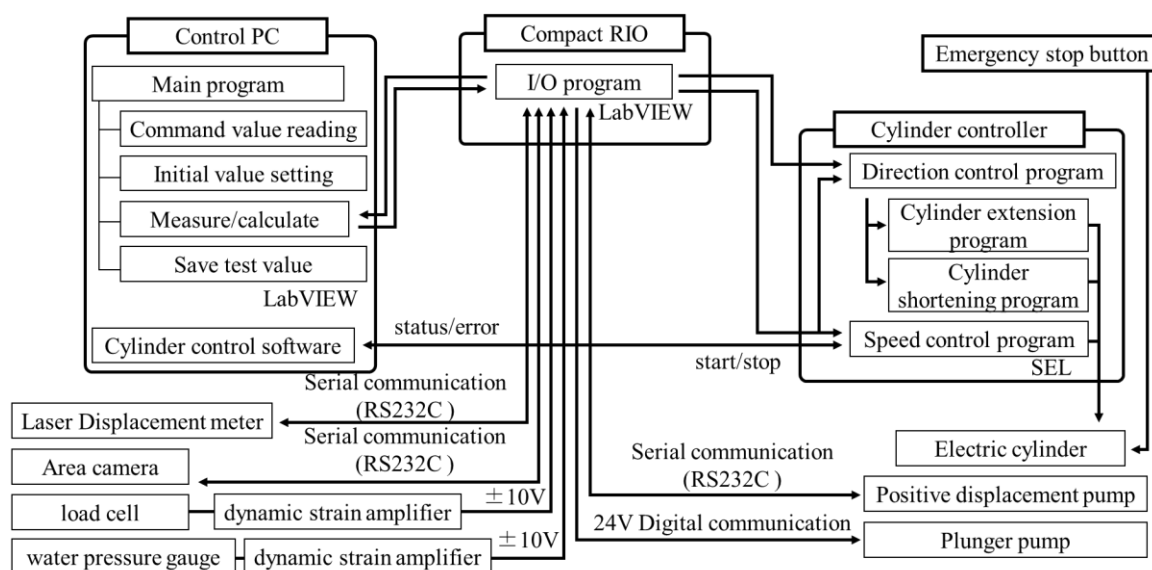


Fig. 2.30 Control system diagram

上放置して行うこと

- ・制御電源を OFF にした後再度 ON にするまでの間隔は 40 秒以上確保すること
- ・コントローラ電源が ON の状態でコネクタ操作を行わないこと
- ・アースは機器毎に別個に行うこと

シリンダはアブソリュート方式であるため、アブソエンコーダバッテリー電圧異常時やバッテリー、エンコーダケーブルを外した場合エンコーダバッテリーエラーとなりアブソリュートリセットを行う必要がある。アブソリュートリセットの手順はマニュアルの P. 85 を参照のこと。その際、シリンダが自動的に原点復帰するため、干渉・衝突が生じないようにクリアランスの確保には十分に留意する。シリンダコントローラ内の SEL 言語の動作は、制御 PC 中及び DAC デバイス中の LabVIEW プログラムと密接に関わる事項なので後述する。制御 PC との接続には、RS232C クロスケーブルを利用した。

2.8.2 プランジャポンプ

ダブルプランジャポンプは手動操作、アナログ制御、デジタル制御によって動作する。ポンプ背面には、シリアルポート 1 つと、アナログポート一式によって外部危機から制御することができる。本試験機ではノイズによる誤作動がより少ないとされるシリアルポートを使ったデジタル通信を採用した。制御 PC とは、RS232C ストレートケーブルを利用した。

2.8.3 容積式ポンプ

自作した容積式ポンプは電動シリンダで動作する。この電動シリンダは 24V で動作する。モータドライバは市販品を使った。これは最大 24V15A の出力が可能である。10V、20kHz の PWM の入力により、出力を調整可能である。制御 PC との接続には、ドライバ電源と出力調整の 2 系統の接続を行った。

2.9 センサ

2.9.1 水圧計

水圧系として共和電業製圧力センサ PG-500KU を採用した、このセンサで取得された値を同社製のシグナルコンディショナ CDV-900A を使って-10V～+10Vのアナログ信号に変換している。校正係数、入出力抵抗等が記載されている検査成績書は付録として添付する。

2.9.2 ロードセル

ロードセルは共和電業製 LUX-B-5KN-ID-P 引張圧縮両用小型ロードセルを採用した。このセンサで取得された値を同社製のシグナルコンディショナ CDV-900A を使って-10V～+10Vのアナログ信号に変換している。校正係数、入出力抵抗等が記載されている検査成績書は付録として添付する。

2.9.3 レーザ変位計

レーザ変位計は KEYENCE 社製の IG-28 を利用している。測定された値をアナログ信号 0～+5V で返す。サンプリング周期は 490 μ s で返す値は 1 回の測定値、2 回の測定値の平均、4 回の測定値の平均...と最大 4096 回の測定値の平均まで選択可能である。測定回数を増やすほどに測

定値は精度が高くなるが、応答性が低くなる。現在は4回の測定値の平均を返すように設定しているが、アナログ信号のノイズは日々変化する。レーザ変位計の直線性は $\pm 0.28\%$ なので、その範囲に収まる最小の測定回数を選択した。レーザ変位計の受信部と送信部に水滴がついている場合は正確な値を返してこないため注意する。

2.9.4 エリアカメラ

エリアカメラは、試験片の管軸方向ひずみ等を計測するための試験片三点の位置を取得する。カメラで得られた画像は、カメラコントローラへ送信される。

エリアカメラは高速で撮影するため、シャッタ速度が速くなる。このため十分な光量が得られず、取得した画像がブラックアウトする。この解決として、光源が追加されたが、後付けであるため、試験機に固定されていない。光量の差は、三点の位置取得に影響を及ぼすため、試験ごとに、定位置を決めておく必要がある。DAQデバイスとの接続はRS232Cの専用ケーブルを用いて行った。詳細は後述する。

2.10 DAC デバイス

DAQデバイスとしてLabVIEWのCompactRIO-NI9063を採用した。Fig. 2.31に外観を示す。シャーシと呼ばれるケースであり、このケースにCシリーズモジュールを挿入して使用する。Cシリーズモジュールは、NI9215 アナログインプットモジュールや、NI9870 デジタルインプット/アウトプットモジュールなどを挿入して任意の制御系に合わせたDACデバイスを作成することができる。CompactRIO-NI9063はCシリーズモジュールを4つまで挿入することができる。このほかCompactRIO-NI9063にRS232C規格のシリアルポートが備え付けられている。このデバイスはUSBシリアル通信にて制御用PCと接続する。

水圧系、ロードセルは、アナログ通信でNI9215に接続した。プランジャポンプ、電動シリンダ、laser変位計、カメラコントローラはNI9870に接続した。容積式ポンプはNI9472に接続した。

DACデバイスは精密機器であるため扱いの上で注意点が存在する。以下に記す。

- ・電源投入中及びスタンバイ中はシャーシからモジュールを抜き差ししない。
- ・グラウンド線は強電系とは区別する。
- ・モジュール端子部分及びシャーシとの接続部分は金属部品である。絶縁対策はとられているが、触れる場合はあらかじめ地面やグラウンド線等をさわって、静電気を逃がしてから触る。
- ・NI9870は電源を必要とするモジュールであるが、電源はCompactRIO-NI9063とは分ける。



Fig. 2.31 C Series chassis that can be used in Lab VIEW (CompactRIO-NI9063)

NI9870-A はポート 1 と 2 にシリンダコントローラを，ポート 3 にプランジャポンプを，ポート 4 に反射型レーザ変位計を接続した (Table 2.4)．NI9870-B はポート 1 に透過型レーザ変位計を，ポート 2 にカメラコントローラを接続した (Table 2.5)．

NI9215 の配線表を Table 2.2 に示す．二つの端子で一つのアナログデータを読み取る．またそれぞれのセンサグラウンド線を COM ポートに接続した．COM ポートの GND を接続しない場合，正しい値が取れないので注意する．アースは地面に直接つなげる線である．フレームグラウンド主に強電に対して漏電した場合の対策として取られることが多い．シグナルグラウンドはセンサなどを始めとする弱電に対それぞれのセンサグラウンド線を COM ポートに接続した．

Table 2.2 Geometry of a specimen for multiaxial tube expansion test

	NI9215	NI9870-A	NI9870-B	NI9472
Signal format	Analog Input	Digital IO	Digital IO	Digital Output
Channel format	$\pm 10V$	Serial communication	Serial communication	$\pm 24V$
number of channels	4	4	4	8

Table 2.3 Order of connecting analog inputs on the NI9215

Number	Port	Access point
0	AI0-	
1	AI0+	
2	AI1-	Water pressure gauge , -10~10V
3	AI1+	Water pressure gauge , GND-
4	AI2-	load cell, -10~10V
5	AI2+	load cell, GND
6	AI3-	
7	AI3+	
8	NC	
9	COM	GND each sensor

Table 2.4 Order of connecting digital inputs and outputs on the NI9870-A

Number	Port	Access point
0	DIA0	Electric cylinder controller 1
1	DIA1	Electric cylinder controller 2
2	DIA2	Plunger pump
3	DIA3	Reflective laser displacement meter

Table 2.5 Order of connecting digital inputs and outputs on the NI9870-B

Number	Port	Access point
0	DIA0	Transmission type laser displacement meter
1	DIA1	Area camera controller
2	DIA2	
3	DIA3	

2.11 プログラム実行箇所

本試験機には複数の制御対象と、シリンダコントローラ、CompactRIO、制御 PC の三つのプログラムを行うことのできるデバイスを持つ。これらをまとめて一つのプログラムで動かすのは困難であるため、制御用 PC でメインプログラムを実行し、その他のデバイスでサブプログラムして制御を行う。プログラムの実行場所 Fig. 2.30 に示す。

このうち、制御用 PC と CompactRIO で実行するプログラム言語は LabVIEW であり、シリンダコントローラで実行するプログラム言語は SEL 言語である。

メインプログラムでは計測値から応力及びひずみ等の実験データの算出と書き出し、制御値の書き出しを行う。現在は開発段階であるため、それぞれのデータの監視、任意の値への指令値の書き換えを行った。

CompactRIO 中のサブプログラムでは、出力系はメインプログラムで算出されたデータを各種アクチュエータに出力するため RS232C 規格に変換する。また、入力系ではアナログデータや、RS232C 規格で書き出されたデータをメインプログラムで読ませるために変換を行うプログラムを実行する。これは制御用 PC と CompactRIO との間の通信を高速で行うために、専用の変数を用いているためである。シリンダコントローラ中のサブプログラムでは RS232C 規格で受け取ったデータで電動シリンダを任意の速度で動作できるプログラムを実行している。LabVIEW は NATIONAL INSTRUMENTS 社（以後 NI 社）製のシステム開発用ソフトウェアである。プログラムはブロックダイアグラムと呼ばれる視覚的に組むことができるインターフェイスを備える言語であり、先述したアナログとデジタル両方の信号を扱うことのできる DAC デバイスなどのハードの開発も行っている。

2.11.1 プランジャポンプ、容積式ポンプ指令値算出

試験片内は水で満たすことが理想であるが、実際には若干の空気を含む。このため、ポンプを動作させると、まず空気の気泡の圧縮が支配的となり、十分につぶれたのちに水圧が上昇する。つまり、ポンプの吐出量に応じた水圧の変化は試験開始時と終了時で異なる。試験開始直後の水圧が低い状態では水圧の変化は小さいが、試験終了直前の水圧が高い状態では水圧の変化は大きい。ポンプの制御量算出は P 制御で行ったが、一定の P ゲインでは、試験開始時に合わせて制御パラメータを決めてしまうと、試験が進むにつれて吐出量がオーバーシュートして発散する。反対に、試験終了時を見込んで、パラメータを決定すると、試験開始直後では、水圧が長い間上昇しない。そこで本研究では P パラメータに水圧を除いたものを指令値とした。

増圧ポンプは複数の指令が連続した一つの指令を読むことができる。しかし、スピード・セットコマンドは文字列の最後に入れなければ、ポンプはそれ以降通信ができなくなる。さらに、スピード・セットコマンドは、他のコマンドと異なり、終端文字として `\r\n` を読み取れないとポンプが急停止するため、余裕を持った指令値の送信が必要である。このため、スピード・セットコマンドの前か後のどちらかに、フラットシーケンスストラクチャと待機関数を使い送信時間に余裕を持たせた。高速でグローバル関数の書き換えによるデータの欠損でポンプの通信が途切れることを防いだ。

2.11.2 電動シリンダ指令値算出

シリンダの動作は、メインプログラムで算出した軸力に達するように動作速度と動作方向を指令した。ここでの指令値の出し方はシリンダコントロールソフトである X-SEL と密接に関わる。

X-SEL は、プログラム動作中に割り込みで別の動作を行うことができない。また、X-SEL ソフトでのプログラムのタイミングによっては、受信信号を読み落とす場合がある。仮に方向指定の信号を読み落とすと、シリンダは指定とは逆方向に動作する。この場合指令値と動作量が乖離するだけでなく、速度も増加し危険な状態に陥る。受信を確実にを行うため、方向指定信号を繰り返し送信する方法があるが、その間の速度指定ができなくなる。そこで、CompactRIO-NI9063 に速度を指定するプログラムと方向を指定するプログラムの二種類に対して別々にケーブルを用いて通信を行った。

2.12 メインプログラム

メインプログラムでは、指令値及び試験結果の算出、表示、保存を行う。

2.12.1 更新周期

試験速度は、ひずみ速度で評価する。ひずみ速度を一定で試験を行うことは、樹脂材料の材料特性を精度良く測定する上で重要である（北川 et al., 1988, 大堀, et al., 1993, 谷村 et al., 2011）。本試験機では、応力制御を行う方法とひずみ制御を行う方法の二通りで制御を行った。応力制御方式では、試験開始からの瞬間の指令応力値を CSV ファイルで指定することによって行う。応力制御方式で、ひずみ速度を一定に制御する方法については後述する。CSV ファイルの応力指令値は、その時のメインプログラムのループ回数を参照して呼び出す。ひずみ制御方式では、試験中のひずみ速度の指定することで試験を行う。ひずみ速度は、メインプログラムの瞬間のループと、一つ前のループのひずみの差分を指定する。両者は共に指令値の呼び出しをメインプログラムのループに依存しているため、メインプログラムの更新周期の精度が試験速度の精度を決定する。さらに、ポンプや電動シリンダの制御パラメータは制御周期に大きく依存する部分があり、制御周期を安定させることは、アクチータの安定動作のために必要不可欠である。本試験機では

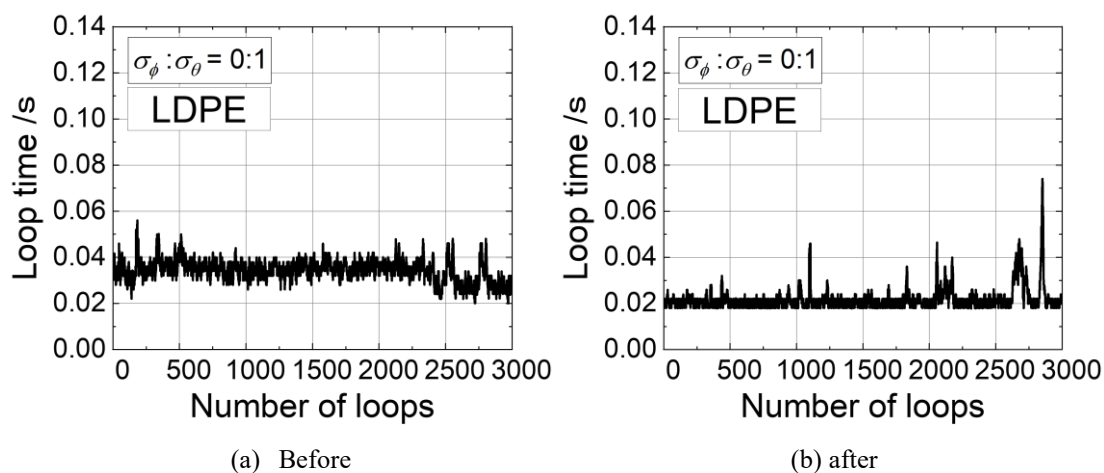


Fig. 2.32 Transition of the time required for the program loop

50Hz で書き込みを行っているが、OS の更新プログラム等の動作によりパソコンの処理が遅くなると、度々制御周期も遅くなる。試験機制御のためのすべてのプログラムを同時に動作させたときのプログラムのループ時間を **Fig. 2.32(a)** に示す。更新周期は 50Hz であるため、本来ループ間隔は 0.02s であるべきだが、0.035s となった。そこで、本試験機では測定結果の CSV ファイルへの書き込みのためのプログラムと指令値の読み取りのためのプログラムと試験機制御を行うプログラムを完全に独立させ、制御 PC に負荷がかかった場合でも、指令値読み取りのプログラムの処理落ちだけは防ぎ、ひずみ速度を高精度に制御した。さらに試験中はネットワークから遮断した。この条件で測定を行った結果を **Fig. 2.32(b)** に示す。瞬間的な指令値の読み取り遅れはあるが、概ね 0.02s で測定できていることを確認した。

2.12.2 メインプログラム構成

試験プログラムの構成を説明する。指令値の読み取り、センサからの値の取得、アクチュエータの動作量の算出、試験値の計測を 1 つのプログラムで行うと、プログラムの視認性が悪くなる。さらに、処理落ちの原因もわかりにくくなるため、役割ごとにサブルーチンに分けた。動作を時系列で **Fig. 2.33** に示す。サブルーチンは、指令値読み取り、初期値決定、計測/算出、指令値書き込みが主である。このほかに、それぞれのアクチュエータへの出力のための AD 変換プログラムと、センサから入力された値の DA 変換を行うサブプログラムが存在するが、ここでは省略している。また、サブプログラムを統括するための、メインプログラムも存在するが、同様に省略する。それぞれのサブプログラムについて説明する。

- 1) 指令値読み取りプログラム CSV で予め出力されているファイルを開き、円管軸方向応力と円周方向応力の指令値を変数に格納する物である。
- 2) 初期値決定プログラム シリンダの軸力をロードセルの値をもとにして除荷すること、センサから測定された値から初期値を算出し変数に格納すること、ポンプを手動操作することの三つを行うプログラムである。
- 3) 計測/算出プログラム センサから測定された値から試験力を算出し変数に格納すること、アクチュエータへの試験力出力のための動作量を算出し、変数に格納するプログラムである。
- 4) 試験値書き込みプログラム その時の時刻を外部から参照しつつ、変数に格納された値を

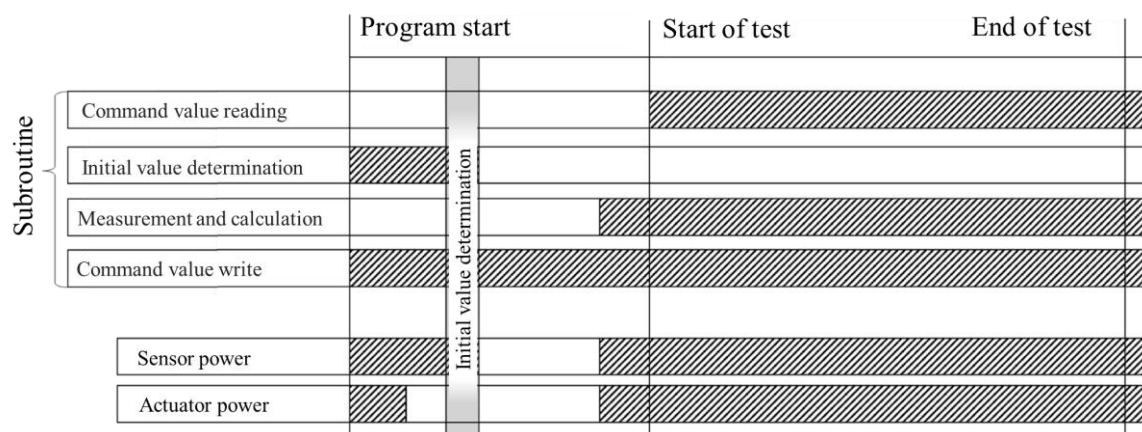


Fig. 2.33 Operation timing for each programs

CSV ファイルに書き出すプログラムである。

これらのサブプログラムを、メインプログラムにより開始と停止を行う。試験手順としては、まずプログラムを動作させ、チェック後の軸力を除荷するために、軸力負荷用電動シリンダとロードセルを使い、軸力 0 まで動作させ初期値を決定する。初期値の設定は初期値決定のボタンを押した直前 10 個のデータの平均である。つまり現在は 50Hz データを取得しているため、0.2 秒間の平均のデータが初期値になる。その後、試験を行うための安全確認、手動弁の開動作等を行い、指令値の読み取りと同時に試験が開始される。プログラム開始から試験終了まで指令値の書き込みは行い続ける。

2.13 電動シリンダ用 SEL プログラム

シリンダコントローラで実行するプログラムは SEL 言語で書く。プログラムの例を Table 2.6 に示す。具体的な動きを以下に示す。

- No.1, 二つのシリンダを速度 10 に指定する。
- No.2, あらかじめ指定した場所 10 へ移動する。
- No.3, あらかじめ指定した場所 1 へ移動する。
- No.4, プログラムを終了する。

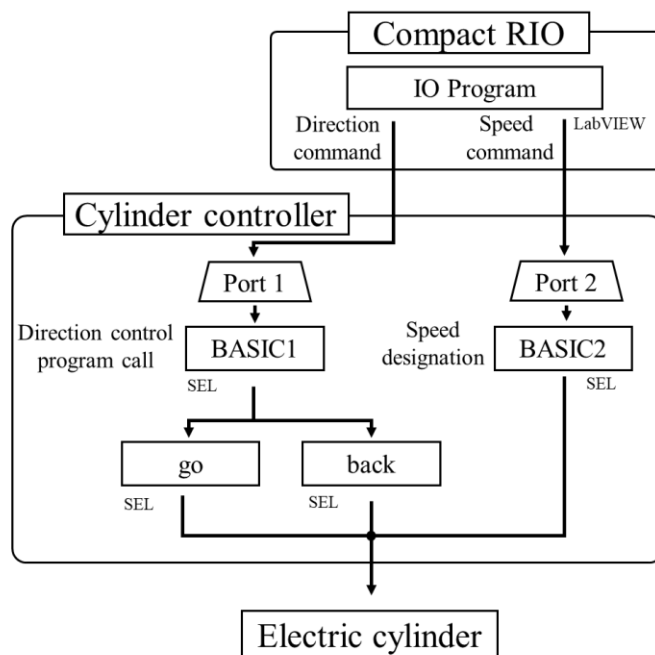


Fig. 2.34 Changes in experimental values by changing the direction of operation of the cylinder

Table 2.6 Chuck program of X-SEL

No.	Cmnd	Operated 1	Operated 2	Comment
1	VEL	10	11	2 cylinders set to speed 10
2	MOVP	10		Move to position 10
3	MOVP	1		Move to position 1
4	EXIT			The end of the program

SEL 言語でのプログラムは、1つのコマンド動作が終了するまで次の動作に移らない特徴がある。これはあらかじめ決められた動作を行う場合には問題にならないが、時々刻々と速度と方向を変化させるときに、一定の速度でシリンダを動かしてしまうと、動作が完了するまで次の動作を行うことができない。そこで、シリンダに前進と後退を指示する方向制御プログラム 2 つと、シリアルポートから信号を受信し、方向制御のプログラムを起動するプログラム、シリンダの動作速度を指定するプログラムの合計四つのプログラムを用意した。シリンダコントローラのシリアルポートから、CompactRIO-NI9063 内で実行されたサブプログラムを受け取った信号を処理して実際にシリンダを動かす部分の系統図を Fig. 2.34 に示す。

IO プログラムは CompactRIO-NI9063 中で動作する LabVIEW プログラムである。ここから、シリアル通信でシリンダコントローラ中の BASIC1 プログラム及び BASIC2 プログラムそれぞれ別のケーブルで通信させた。一つのケーブルでも通信はできるが、通信時間の短縮化による速度更新をより高速でできるように別々のケーブルとした。シリンダの前進プログラムは go, シリンダの後退プログラムは back とした。

BASIC1 プログラムを Fig. 2.35 に示す。このプログラムはシリアルポート 1 で受信した文字列に合わせてシリンダに方向制御 (go, back) プログラムに動作指令を出すものである。

BASIC2 プログラムを Fig. 2.36 に示す。このプログラムはシリアルポート 2 で受信した文字列に合わせてシリンダに速度の制御に動作指令を出すものである。Table 2.6 プログラム No.30 から No.31 の間では速度変更指示の繰り返しなので省略した。両者は共に GOTO 関数を利用して、繰り返し処理が行われるようにした。

Fig. 2.35 BASIC1 program of X-SEL

No.	Cmd	Operated 1	Operated 2	Comment
1	SCHA	10		Command termination character setting
2	OPEN	1		Preparation for communication port 1 reception
3	TAF	1		Specify "TAG1" as the jump destination
4	READ	1	1	Received from communication port 1
5				
6	ISEQ	1	'go'	When "go" is specified for communication port 1 Execution of the program after this
7	EXPG	24		Start program 24 (go program)
8	EXSR	1		Execute subroutine 1
9	EDIF			If "go" is not specified for communication port 1, ignore the program up to this point
10				
11	ISEQ	1	'back'	When "back" is specified for communication port 1 Execution of the program after this
12	EXPG	25		Start program 25 (back program)
13	EXSR	1		Execute subroutine 1
14	EDIF			If "go" is not specified for communication port 1, ignore the program up to this point
15				
16	GOTO	1		Move to "TAG1"
17				
18	BGSR	1		Start subroutine 1
19	SCPY	1	'ok'	Draw a string
20	WEIT	1	1	Sent from communication port 1
21	EDSR			End of subroutine

Fig. 2.36 BASIC2 program of X-SEL

No.	Cmnd	Operated 1	Operated 2	Comment
1	SCHA	10		Command termination character setting
2	OPEN	2		Preparation for communication port 2 reception
3	TAF	1		Specify "TAG1" as the jump destination
4	READ	2	1	Received from communication port 2
5				
6	ISEQ	2	'down'	When "down" is specified for communication port 2 Execution of the program after this
7	OVRD	1		Change speed to default 1/100
8	EXSR	1		Execute subroutine 1
9	EDIF			If "down" is not specified for communication port 2, ignore the program up to this point
10				
11	ISEQ	2	'up'	When "up" is specified for communication port 2 Execution of subsequent programs
12	OVRD	100		Change speed to default 100/100
13	EXSR	1		Execute subroutine 1
14	EDIF			If "up" is not specified for communication port 2, ignore the program up to this point
15				
16	ISEQ	2	'000'	If "000" is specified for communication port 2, execute the following program
17	CHVL	11	0	Change 2 cylinder speeds to speed 0
18	EXSR	1		Execute subroutine 1
19	EDIF			Ignore the program up to this point if "000" is not specified for communication port 2
20				
21	ISEQ	2	'001'	If "001" is specified for communication port 2, execute the following program
22	CHVL	11	1	Change 2 cylinder speeds to speed 1
23	EXSR	1		Execute subroutine 1
24	EDIF			Ignore the program up to this point if "001" is not specified for communication port 2
25				
26	ISEQ	2	'002'	If "002" is specified for communication port 2, execute the following program
27	CHVL	11	2	Change 2 cylinder speeds to speed 2
28	EXSR	1		Execute subroutine 1
29	EDIF			Ignore the program up to this point if "002" is not specified for communication port 2
30				
omit				
31	ISEQ	2	'100'	If "100" is specified for communication port 2, execute the following program
32	CHVL	11	100	Change 2 cylinder speeds to speed 100
33	EXSR	1		Execute subroutine 1
34	EDIF			Ignore the program up to this point if "100" is not specified for communication port 2
35				
36	GOTO	1		Move to "TAG1"
37				
38	BGSR	1		Start subroutine 1
39	SCPY	1	'ok'	Prints the string "ok"
40	WEIT	2	1	Sent from communication port 1
41	EDSR			End of subroutine

2.14 本試験機の性能

本研究では、樹脂材料の二軸応力挙動を金属材料で用いられている手法を用いて解析を行ったため、材料特性については弾性と塑性のみを考慮し、粘性については無視した。このため線形二軸応力負荷試験及び線形二軸応力負荷除荷試験を行った。

この二軸バルジ試験機では、直径 15mm~20mm、肉厚 1mm~3mm 程度の円管試験片に対し、二軸クリープ試験、二軸応力緩和試験を行うことができる。これらの試験法を用いれば、樹脂材料の有する粘性特性についても測定評価が可能である。

2.15 結言

金属材料用二軸バルジ試験機をもとに，樹脂用の二軸バルジ試験機を設計，製作，制御を行った．本章で得られた知見を以下にまとめる

- (1) 金属材料用の二軸バルジ試験機では，軸力負荷用のシリンダと水圧負荷用のポンプの出力が大きく，低出力で高精度な制御が求められる樹脂材料の試験に利用することは難しい．
- (2) 金属材料用の二軸バルジ試験機は測定することができるひずみの量が小さく，樹脂材料の様な数 100%程度の測定を行うことは困難である．
- (3) Laser 変位とエリアカメラを使用することで，接触式センサと同等の測定精度を持ちながら，非接触で試験片の変形を測定することができる．
- (4) 作成した二軸バルジ試験機では，直径 15mm~20mm，肉厚 1mm~3mm 程度の円管試験片に対し，二軸引張試験だけでなく，二軸クリープ試験，二軸応力緩和試験を行うことができる．これらの試験法を用いれば，樹脂材料の有する粘性特性についても測定評価が可能である．

第3章

ポリエチレン押出し円管の 二軸応力試験と材料モデリング

3.1. 緒言

工業用樹脂材料は一般的に比強度、耐食性成形性に優れている。さらに耐熱性や耐疲労性等の特定の機能を強化することが可能であるため、用途に応じた選定を行うことで過酷な条件下での使用にも耐え得る優れた材料である（中山, 2018）。ポリエチレンは世界のプラスチック生産量の28%を占め、今後とも適用箇所の拡大と技術革新が続くことが見込まれる（永井, 2007, 野々村, et al., 2000）。しかし、その大変形領域での変形特性は、ひずみ速度や、温度に依存し、不明なところが多く、力学特性の解明が望まれている。現在では大変形を受ける製品を製造する際、シミュレーションによって変形の事前予測を行うことで、最適な形状を同定してから金型製作を行い、作り直しのコストを削減している。しかし大変形ひずみ範囲における樹脂材料の変形挙動を正確に再現できる材料構成則が未だ確立されていないため、大変形領域におけるシミュレーションの予測精度は十分ではない（根岸 et al., 2004）。製品製作の加速化及び効率化が求められる昨今において、高精度な材料モデルの構築と、そのシミュレーションへの適用が渴望されている（井上 2016）。

本章では、第2章で作成した二軸バルジ試験機を用いて、ポリエチレン製の押出し円管材を供試材として、二軸応力下における変形挙動を精密に測定する。まず単調負荷試験を行い、真応力-対数全ひずみ曲線の測定を行う。さらに等仕事面を測定し、その形状を観察することで異方性を評価した。さらに詳しい材料特性の把握のため、真応力-塑性ひずみ曲線の測定方法として、一つの試験片に対して負荷除荷を繰り返し、除荷直前の真応力と除荷時の塑性ひずみの関係から材料の真応力-塑性ひずみ曲線を測定する。この試験結果から等塑性仕事面を測定し、その形状を観察することで、材料の異方性を評価し、異方性降伏関数を用いた材料モデルを提案することを目的とする。

3.2. 供試材

供試材は、山一化工株式会社製低密度ポリエチレン(Low Density Polyethylene, LDPE)押出し

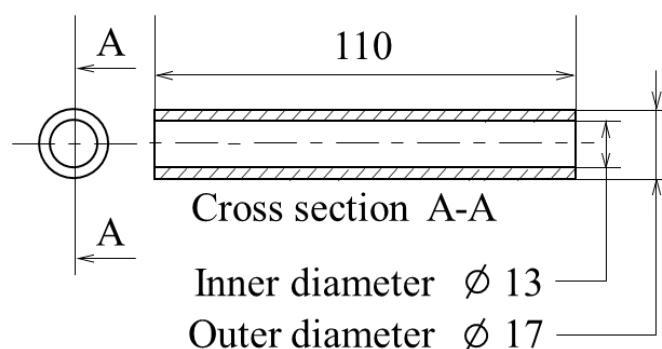


Fig. 3.1 Geometry of specimen for the multi-axial tube expansion test. Dimensions are in mm.

円管材である．試験片の寸法を **Fig. 3.1**に示す．公称肉厚 t_0 は 2.0 mm，試験片外径 D_0 は17 mm，試験片長さは110 mm である．東洋紡株式会社から提供された山一化工株式会社製の処女材から切断して試験を行った．試験片の円周方向の肉厚分布の測定結果を **Fig. 3.2**に示す．測定は30度ごとに各5回ずつ測定し，平均値とした．最大肉厚は2.17mm，最小肉厚は1.94だった．押出円管の同ロット材からの切り出しであるため，試験片の肉厚分布は管軸方向に同一であり，試験片ごとに变化しない．よって実験における初期肉厚はすべてこれらの平均した値を用いた．試験片の写真を **Fig. 3.3**に示す．試験片は微小な曲率を持っているが，試験機にチャックした段階で，直線形状になるので，この影響は考慮せずに実験を行った．試験片は紫外線により劣化するため，試験片は直射日光の当たらない場所で保管した．

3.3. 単調負荷実験方法

第2章，で開発した二軸バルジ試験システムを用い，9通りの線形応力経路 $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:0, 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4, 0:1$ を円管試験片に付与し， $\sigma_\phi - \varepsilon_\phi$ および $\sigma_\theta - \varepsilon_\theta$ 曲線を測定した．樹脂材料はひずみ速度依存性が大きいため（谷村 et al., 2011），ひずみ速度はおよそ $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で一定に維持されるように以下の手法で応力指令値（CSV ファイル）を作製した．まず，予備試験として，応力速度一定の応力－時間線図を CSV ファイルで作製し，それを指令値とした二軸バルジ試験を行った(**Fig. 3.4 a**)．一般的に応力－ひずみ線図（ss 線図）は非線形であるため，この試験のひずみ速度は，降伏を超える前まではひずみ速度が小さく，降伏を超えた後はひずみ速度が大きくな

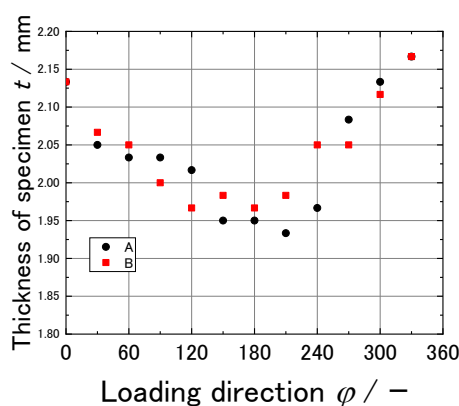


Fig. 3.2 Circumferential wall thickness distribution of test material



Fig. 3.3 Photograph of circular tube test piece of extruded polyethylene tube

る (Fig. 3.5). 次に, 予備試験で得られた ss 線図からひずみ速度が一定となる応力-時間線図を逆算した. ここで ss 線図は降伏の前後で式を分け, 変形初期は5次式で, その後は3次式で近似を行った. この値からひずみ速度一定の応力-時間線図を CSV ファイルで作製した.

応力速度一定で行った試験で測定された ss 線図は, ひずみ速度が一定ではないため, この結果からひずみ速度一定となる応力指令値を作成すると, 微量ではあるが, 所望のひずみ速度との誤差が生じる (Fig. 3.6). このため, 所望のひずみ速度で試験ができるようになるまで, 指令値作成のための試験を繰り返し行った.

試験はそれぞれの応力比で2回行った. 樹脂材料はマイクロクラック等の影響により, 測定し

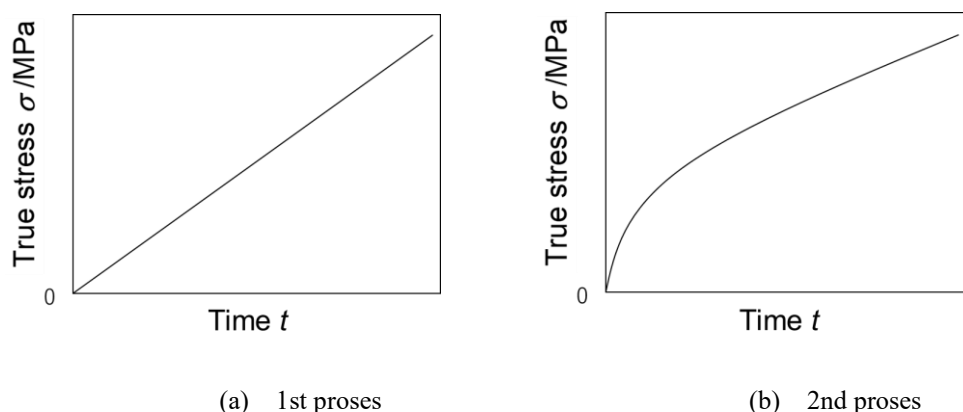


Fig. 3.4 Amount of change in stress command value over time

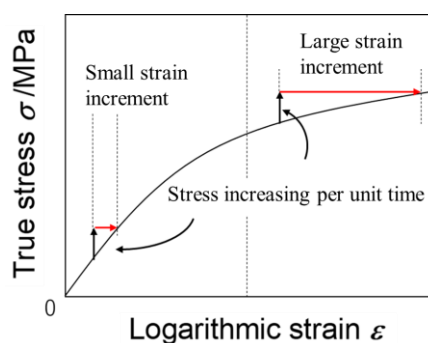


Fig. 3.5 Amount of increase in strain with respect to a constant increase in stress

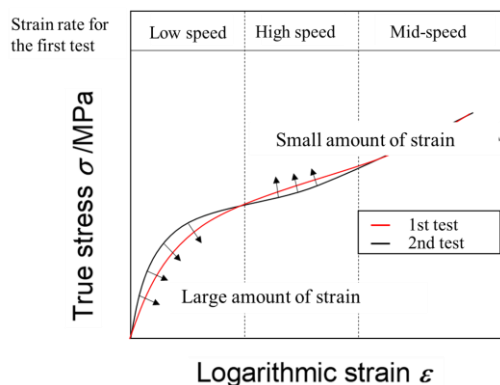


Fig. 3.6 stress-strain curve

た真応力-対数ひずみ線図は、初期から本来より低強度の物性を示す可能性がある。そこで、本研究では同条件での試験を最低2回行い、最もひずみを測定することができた試験を材料特性の評価を行うデータとして採用した。

3.4. 単調負荷実験結果

線形応力経路の指令値と実験値の比較を **Fig. 3.7**に示す。縦軸は円周方向応力、横軸に管軸方向応力を示す。試験は $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0, 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4, 0:1$ の9経路で行った。このうち、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0$ は水圧負荷せずに、電動シリンダのみを使用して負荷した。黒破線が指令値、赤実線が実験値である。試験は試験片のチャック部から抜ける例や、水漏れが発生する例があり、応力負荷が止まる。チャック部から抜けてしまう場合は管軸方向応力の負荷が止まり、水圧のみ負荷されるため、実験値は図中で垂直方向に上昇する。一方で、水漏れが発生した場合は、円周方向応力の負荷が止まり、軸力のみが負荷されるため、実験値は図中で水平方向に上昇する。このような事象が発生した場合は、試験を中断した。いずれの応力比についても実験値は指令値に誤差3%以内で追従しており、構築した応力経路制御システムが正常に作動していることを確認した。

線形応力経路の試験片中央部の写真を **Fig. 3.8**に示す。この写真はエリアカメラで撮影したものである。エリアカメラは計測中写真の保存ができるが、測定点の検出を優先するため、10秒に一回程度の撮影周期となる。また、検出条件によって、この時間は前後する。

(a)は試験前、(b)~(j)は各応力経路における試験終了時（除荷直前）である。いずれの応力経路においても試験片中央がエリアカメラの測定範囲内に位置しており、応力およびひずみの測定が正常に行われたことを確認した。

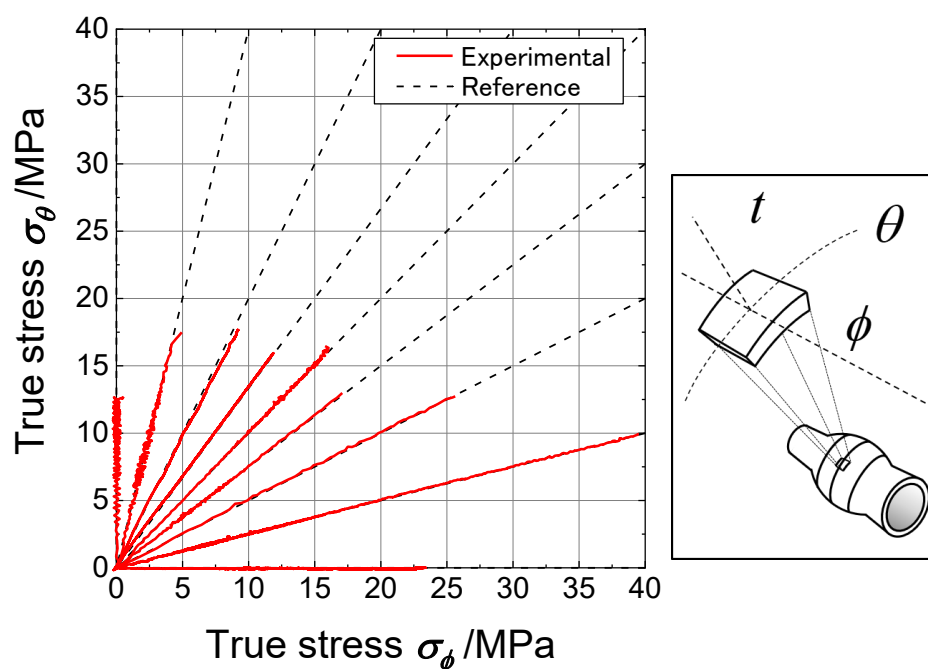


Fig. 3.7 Reference and experimental stress paths

線形応力経路 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1$ の試験終了時における全ひずみ成分はそれぞれ $(\varepsilon_\phi, \varepsilon_\theta) = (1.09, -0.59), (0.72, 0.09), (0.35, 0.15), (0.05, 0.37), (-0.96, 0.36)$ であった。試験を終了した理由は以下による。

- ・ $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 0:1, 1:4, 1:2$ および $3:4$ 試験片の応力測定部で ϕ 方向にき裂が入り、破断に達した。
- ・ $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1$ 試験片のエリアカメラの撮影面と反対側の応力測定部で θ 方向にき裂が入り

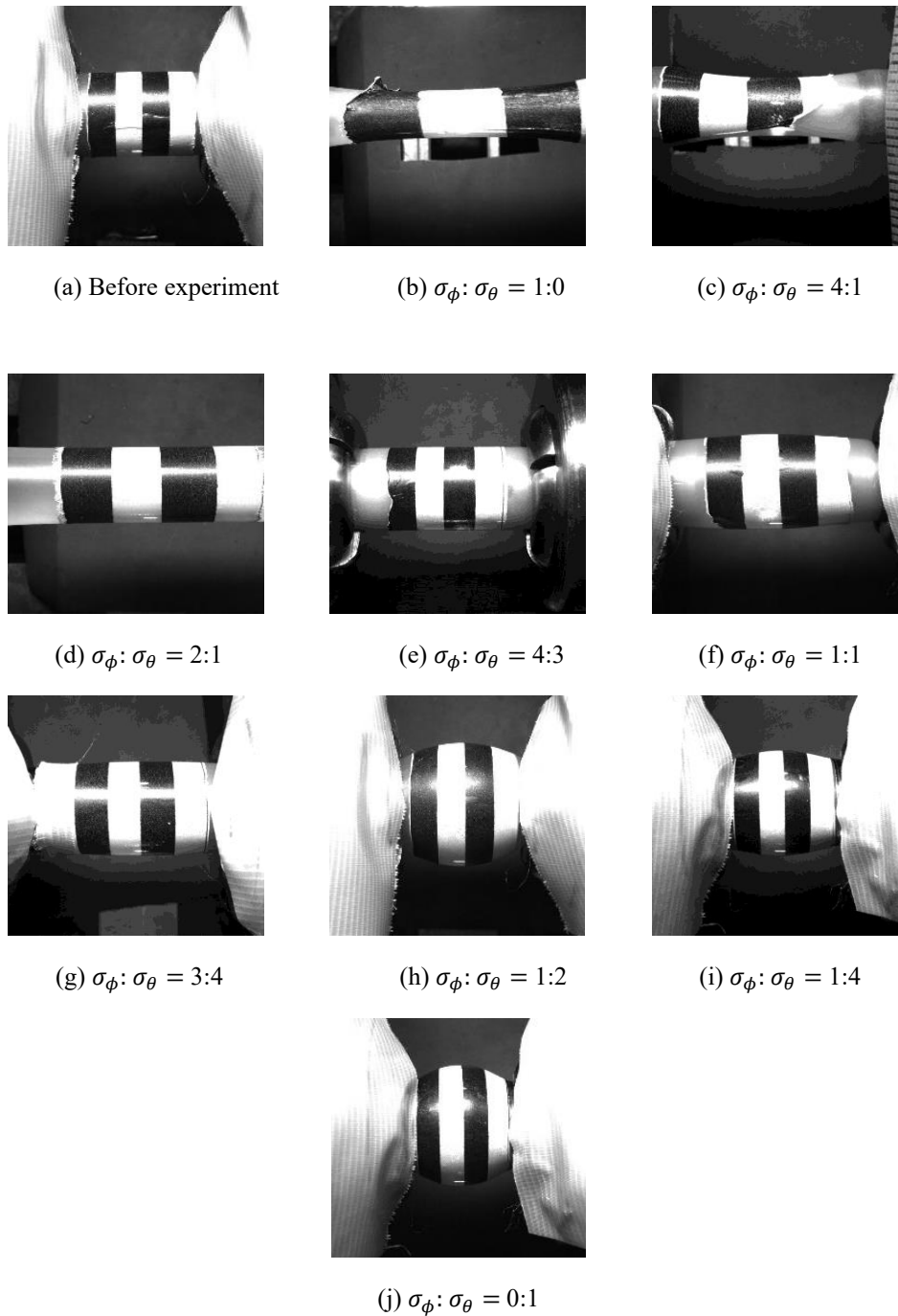


Fig. 3.8 Images of the specimens before experiment (a) and immediately after completing the experiment with linear stress paths (b)–(i)

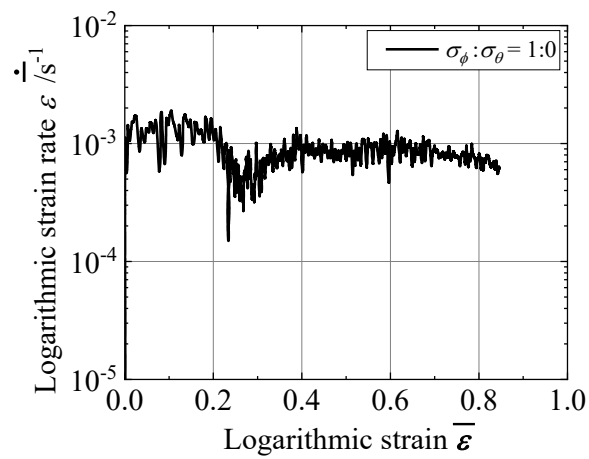
破断した。

- ・ $\sigma_\phi:\sigma_\theta=4:3, 2:1$ 試験片の応力測定部（白黒帯のデカールの範囲）の外側で ϕ 方向に局所的に伸び変形したため、応力測定部の変形が停止した。
- ・ $\sigma_\phi:\sigma_\theta=4:1, 1:0$ 試験片の応力測定部がエリアカメラの ϕ 方向の測定可能範囲上限に達した。相当ひずみの増加に伴う相当ひずみ速度の変化を Fig. 3.9に示す。各方向の塑性ひずみは10秒間の平均速度として測定した。いずれの応力経路でもひずみ速度はおよそ $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で一定に維持されていることを確認した。

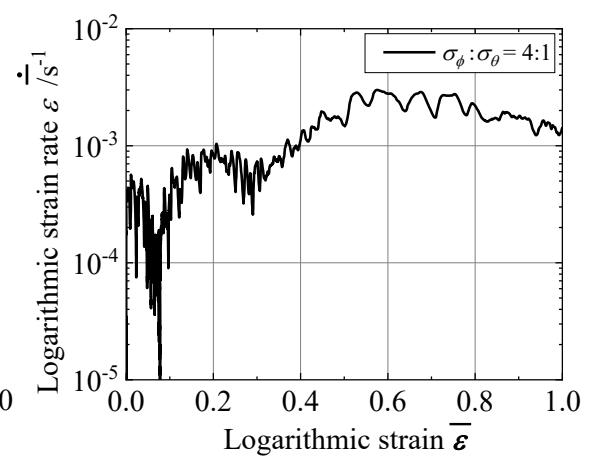
測定した真応力-対数ひずみ曲線（ss 曲線）を Fig. 3.10 に示す。一回目の測定を赤で、二回目の測定を黒で示す。実線が ϕ 方向 ss 曲線、破線が θ 方向 ss 曲線である。二回の試験結果は $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:1$ をのぞいて一致した。一方 $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:1$ については円周方向の結果には乖離が見られた。

$\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:0$ 及び $\sigma_\phi:\sigma_\theta=0:1$ の ss 線図の形状は一致した。つまり、単軸応力状態についてのみ観測すると、一見等方性材料の様な性質を示した。しかし、本供試材の二軸応力下における ss 曲線は、等方性の von Mises 降伏条件に従うと仮定した材料（von Mises 材料）のそれとは以下の点で大きく異なり、強い異方性を示している点特徴的である。

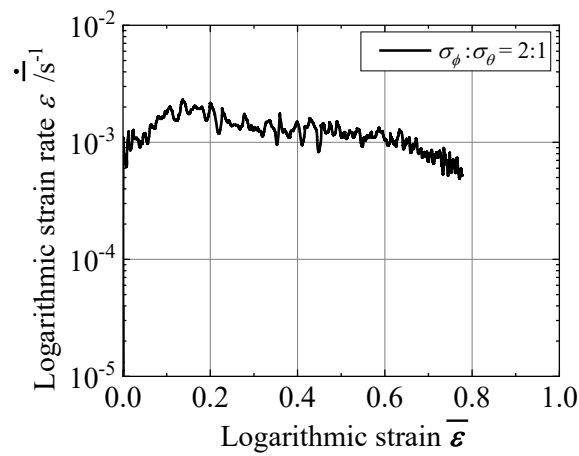
- ・ $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:1$ では、von Mises 材料の ϕ 方向と θ 方向の ss 曲線は一致する。一方、本供試材では、同じ応力に対して ε_ϕ は ε_θ の2～3倍大きく、 θ 方向の方が強度が高い。
- ・ $\sigma_\phi:\sigma_\theta=2:1$ および $1:2$ では、von Mises 材料の ss 曲線は両応力経路で一致する。一方、本供試材では、両者の最大主応力方向の ss 曲線は大きく異なる。例えば、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta=2:1$ では $\sigma_\phi=15 \text{ MPa}$ において $\varepsilon_\phi \approx 0.4$ であるが、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:2$ では $\sigma_\theta=15 \text{ MPa}$ において $\varepsilon_\theta \approx 0.2$ である。すなわち θ 方向の方が強度が高い。これは、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:1$ において θ 方向の方が強度が高くなる測定結果と整合する。
- ・ $\sigma_\phi:\sigma_\theta=2:1$ および $1:2$ においては、von Mises 材料ではそれぞれ θ 方向と ϕ 方向（中間主応力の方向）の塑性ひずみ増分は0となる。一方本供試材では、変形の進行と共に、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta=2:1$ では ε_θ が圧縮側に増大し、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:2$ では、 ε_ϕ が引張側に増加した。



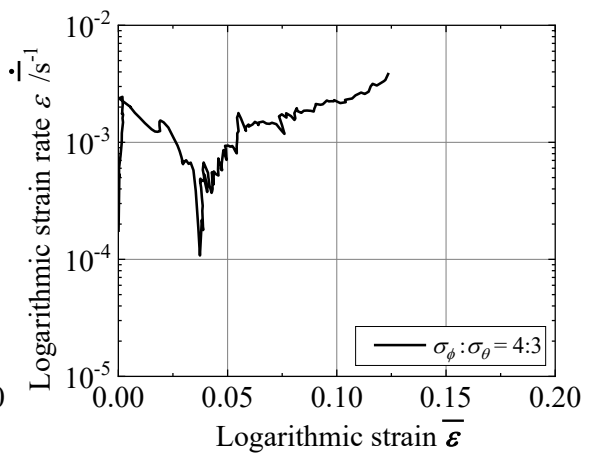
(a) $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 1:0$



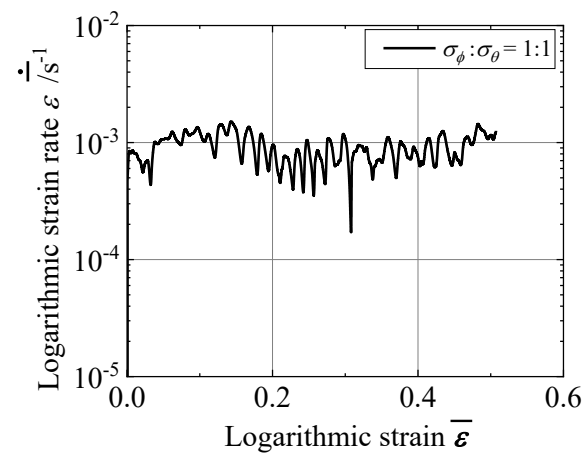
(b) $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 4:1$



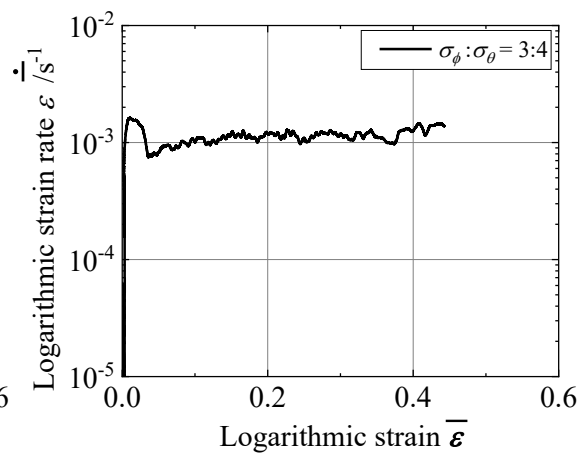
(c) $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 2:1$



(d) $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 4:3$



(e) $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 1:1$



(f) $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 3:4$

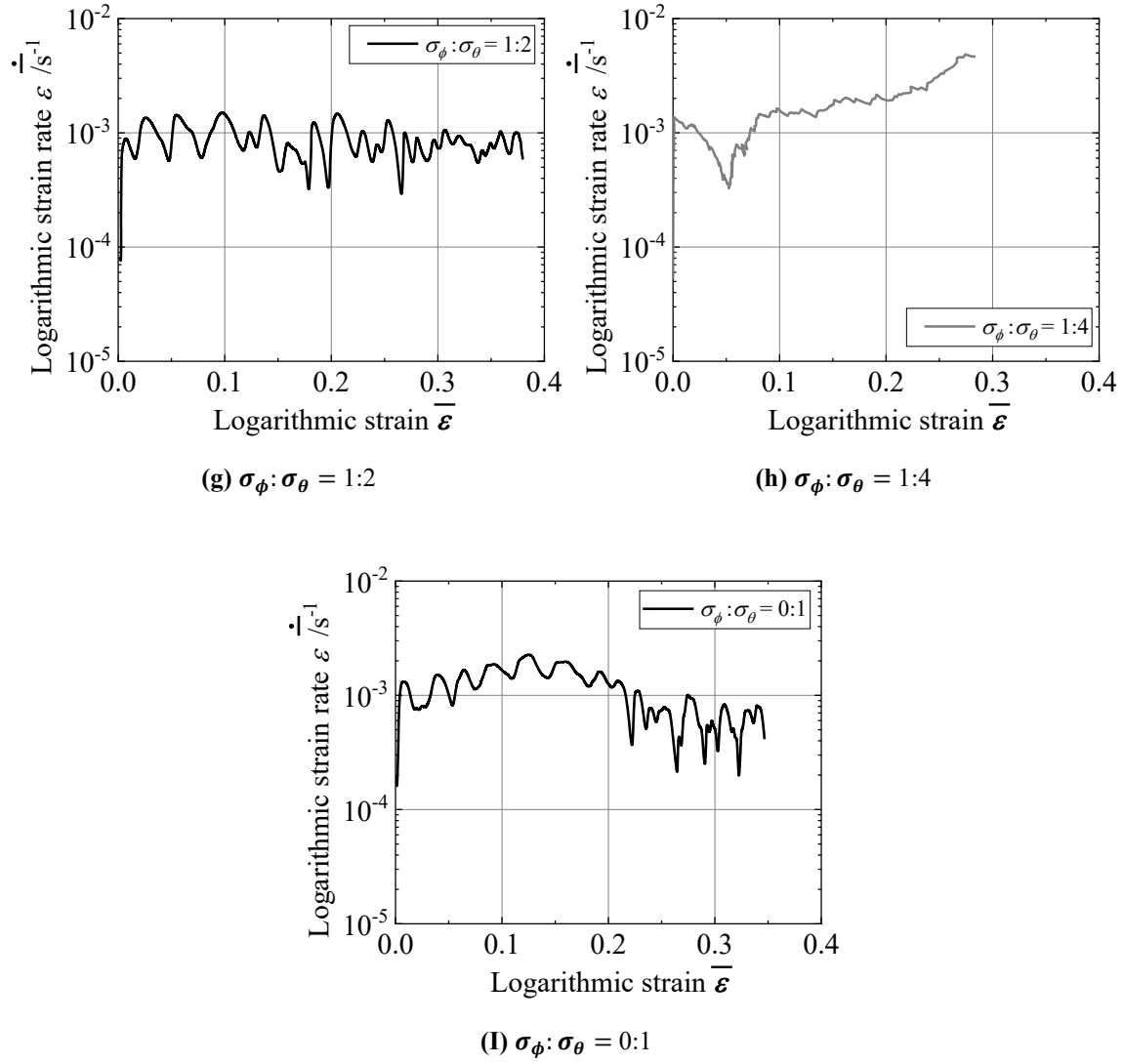
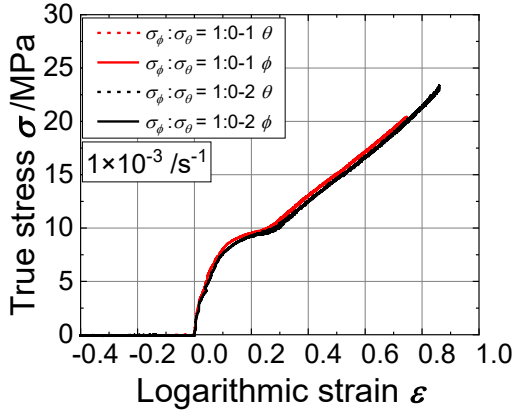
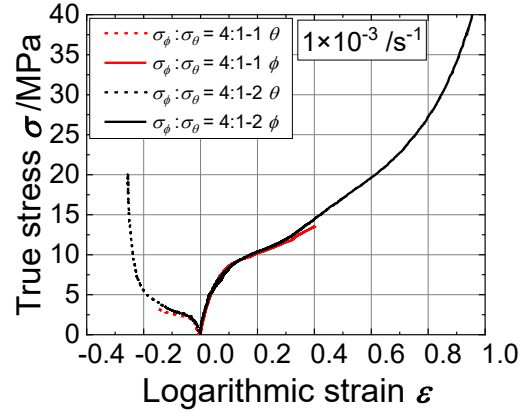


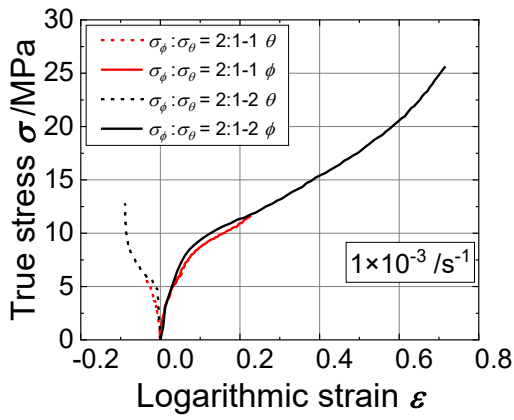
Fig. 3.9 Change in equivalent strain rate with equivalent strain measured along every linear stress path



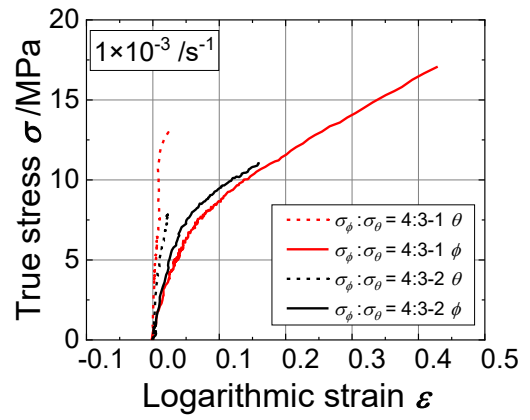
(a) $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0$



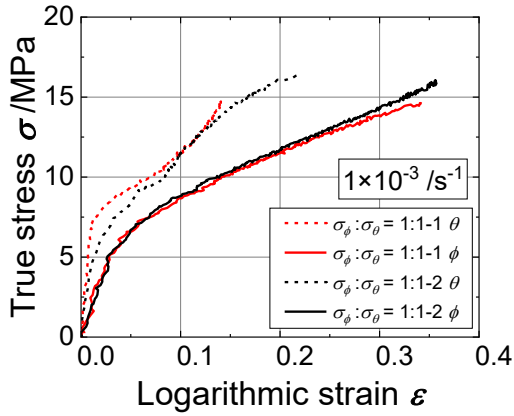
(b) $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 4:1$



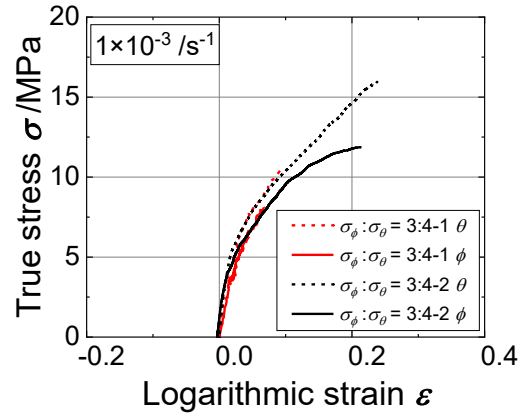
(c) $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 2:1$



(d) $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 4:3$



(e) $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1$



(f) $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 3:4$

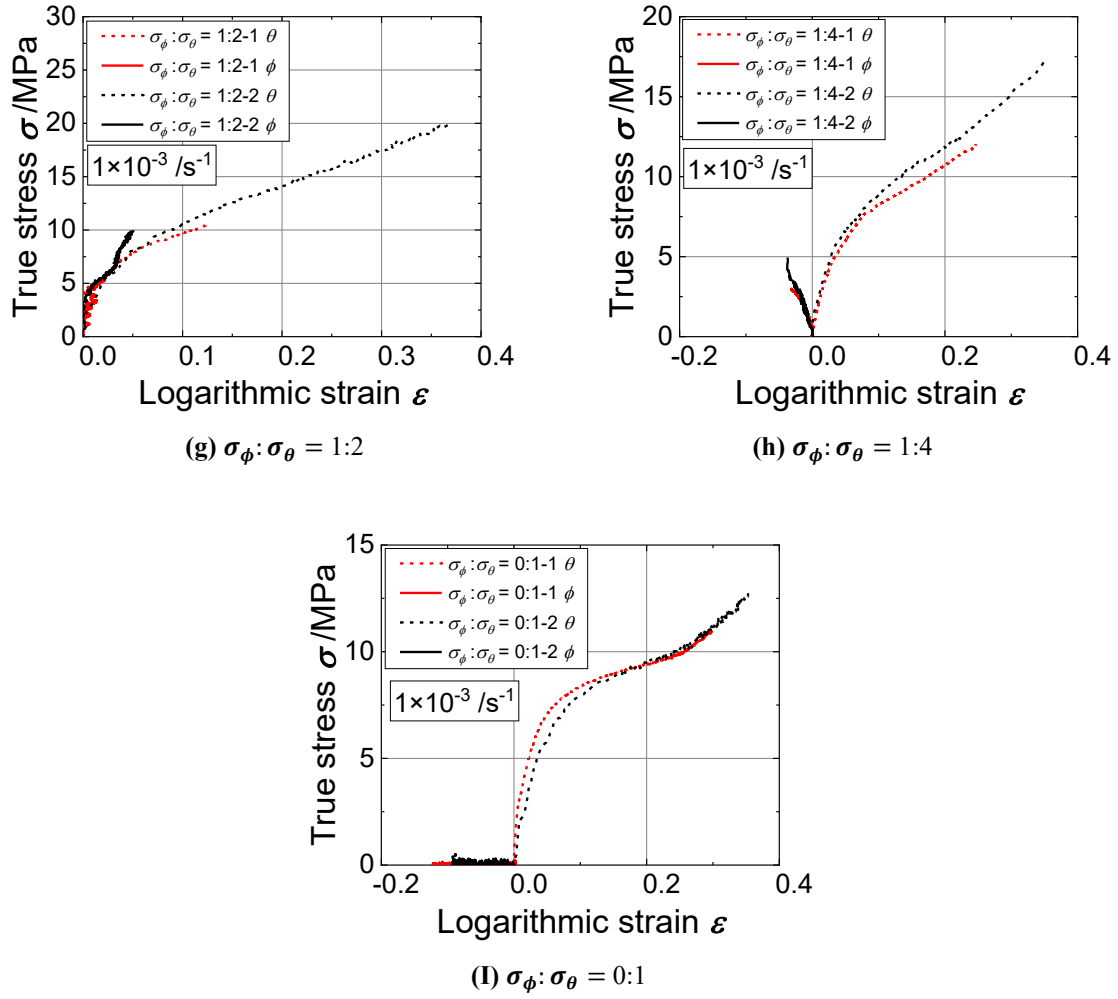


Fig. 3.10 True stress – logarithmic strain curves

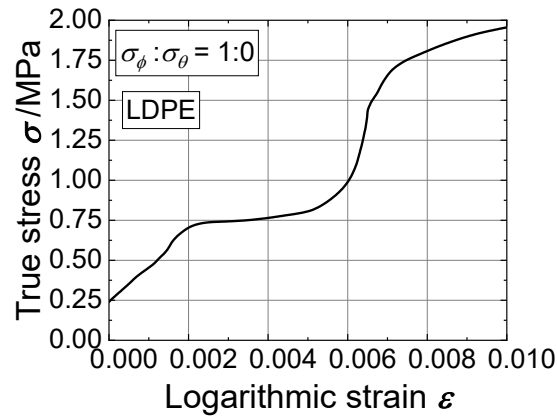


Fig. 3.11 True stress – logarithmic strain curves until $\epsilon = 0.01$ immediately after the start of the test

樹脂材料の弾性率の測定は、JIS-K7161 及び K-7162 に明記されている。 $0.0005 \leq \varepsilon \leq 0.0025$ における ss 線図の傾きを弾性率として扱うと定めている。 **Fig. 3.11** に Fig. 3.10(a)の $0 \leq \varepsilon \leq 0.01$ を拡大した結果を示す。本試験で測定した ss 線図は、滑らかな曲線ではなく微小に変化する。これは、試験開始時点ではひずみ速度が安定せず、瞬間的に指定したひずみ速度よりも高くなり、本来よりも高強度な材料特性を計測している、もしくは、瞬間的に指定したひずみ速度よりも低くなり、本来よりも低強度な材料特性を計測しているためである。さらに、二軸応力経路の場合、ポンプの応答性が試験開始時には悪いため、水圧上昇が遅れる。そのため、全ひずみから弾性ひずみを引くことで塑性ひずみを算出し、塑性仕事を計算する金属材料的な手法を用いることができない。

3.5. 等仕事面

Fig. 3.10 で測定した本供試材の異方性硬化挙動を可視化するために、真応力－全ひずみの関係を元に、以下の方法で等仕事面を作製した。まず ϕ 方向単軸試験において、基準となる $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 1:0$ における ϕ 方向の対数ひずみ ε_0 に達した瞬間における真応力 σ_0 とそれまでになされた単位体積あたりの仕事 W_0 を測定する。

仕事 W_0 は真応力－対数ひずみ線図の曲線で囲まれた面積であり、区分求積法で算出することができる(**Fig. 3.12**)。Fig. 3.12 の斜線部の面積は次式のように台形近似によって求める。

$$W_n = \sigma : \varepsilon = \frac{1}{2}(\sigma_{n+1} + \sigma_n) : (\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n) \quad (4.1)$$

従って、総仕事量はこれの和で算出することができる

$$W = \sum W_n \quad (4.2)$$

他の応力経路においては、 W_0 と等量の仕事が消費された時点の真応力 $(\sigma_\phi, \sigma_\theta)$ を測定して主応力空間にプロットし、その集合をもって等仕事面を決定した。等仕事面の測定結果を **Fig. 3.13** に示す。9 つすべての応力経路に対して応力点が測定されたのは $\varepsilon_0 = 0.3$ までだった。 $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 0:1$

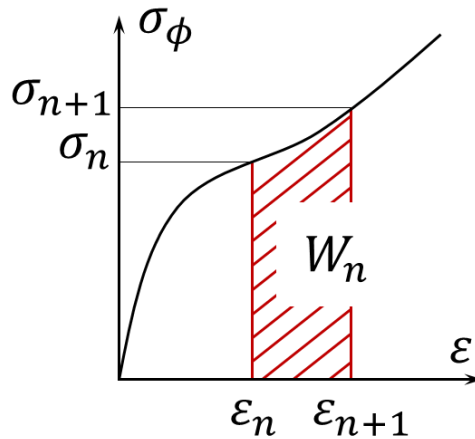


Fig. 3.12 Conceptual diagram for the measurement of the work

以外の応力比ではさらに大きな仕事領域まで測定できたため、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:2, 1:1, 2:1, 4:1, 1:0$ においては $\varepsilon_0 = 0.5$ まで測定値を記載する。等仕事面は $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:4$ から $3:4$ の方向にかけて相対的に大きく張り出す形状となり、強い異方性が観測された。

次に、任意の ε_0 に対する等仕事面を構成する応力点の値を、当該の ε_0 に対応する σ_0 で除して無次元化した無次元化等仕事面を **Fig. 3.14** に示す。ここで $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0$ および $0:1$ の結果に注目する。 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 0:1$ の無次元化等仕事の成分は $\sigma_\theta/\sigma_0 = 1.000 \pm 0.006$ 以内の値であった。すなわち ϕ および θ 方向の単軸引張変形に限定すれば、等方性的な加工硬化特性を示した。

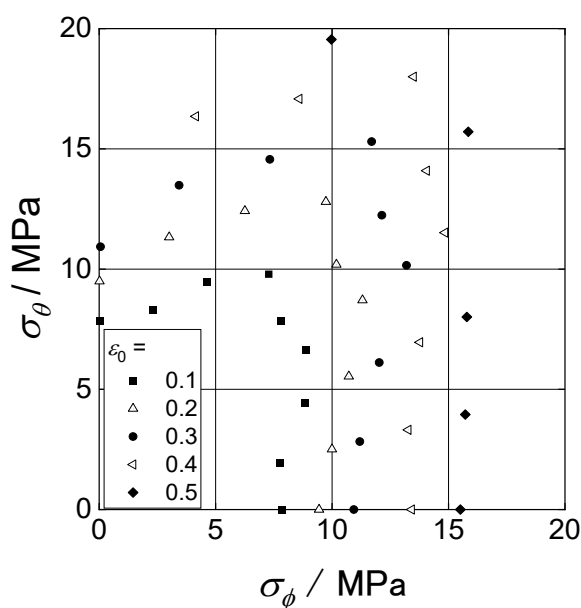


Fig. 3.13 Stress points forming contours of equal work

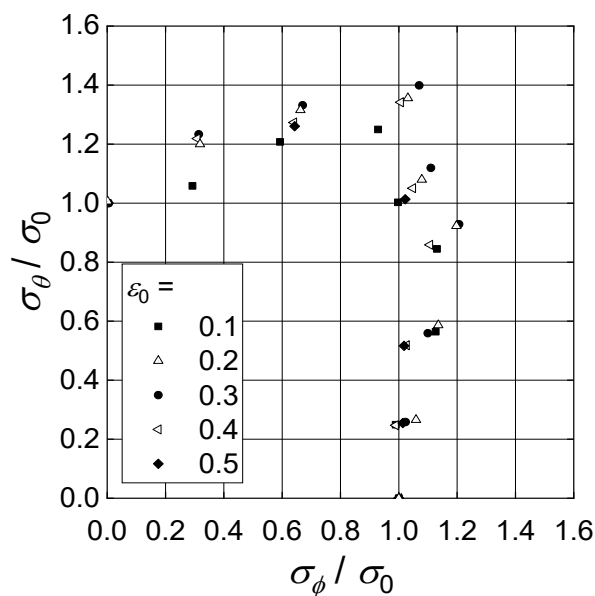


Fig. 3.14 Stress points forming work contours normalized by uniaxial tensile flow stress σ_0 associated with reference strain ε_0

以上のことから、本供試材の異方性硬化挙動を単軸引張試験のみで評価することはできず、多軸応力試験を実施することにより、定量的に測定・評価することが可能である。

3.6. 負荷－除荷試験実験方法

材料より高精度な材料特性の評価のためには、二軸応力－塑性ひずみでの評価が必要である。そこで、LDPE 製押出し円管に対し、線形応力経路を負荷した後に除荷を行い、永久（塑性）ひずみを測定し、真応力－対数塑性ひずみの関係を実験的に測定し、降伏関数を同定した。の塑性ひずみを測定するために、負荷除荷試験を行う。供試材は、単調負荷試験と同様の試験で行った。内径 13mm、公称肉厚 2mm の LDPE 製押出し円管材である。

二軸応力下の負荷－除荷試験として、応力比一定の 9 つの直線経路($\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:0, 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4, 0:1$)で試験を実施した。代表として $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:0$ における、応力とひずみの時間との関係を Fig. 3.15 に示す。応力を黒実線で、ひずみを赤実線で示した。負荷－除荷経路として、各試験では、最大主応力 σ_1 を 1MPa ずつ増加させ、都度除荷した。試験速度は、最大主応力方向のひずみ速度が負荷、除荷時ともに $1\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ となるように、軸力と内圧の負荷速度をフィードバック制御した。このためひずみは直線的な増減をした。

応力と異なり、ひずみ速度は小さく、測定誤差の比率が大きい。また、一般的に中間主応力方向のひずみの大きさは異方性がある材料では、試験前から予測することは難しい。負荷－除荷試験を行う際には、負荷ごとに指令値を作成するのは現実的ではないため、この手法を使った。試験中の温度は $22\pm 2^\circ\text{C}$ だった。

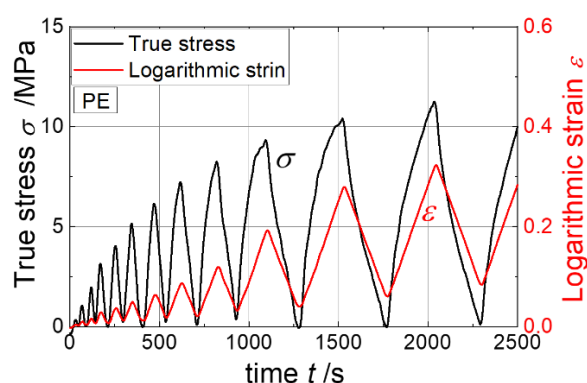


Fig. 3.15 Path of stress and strain in load-unload test

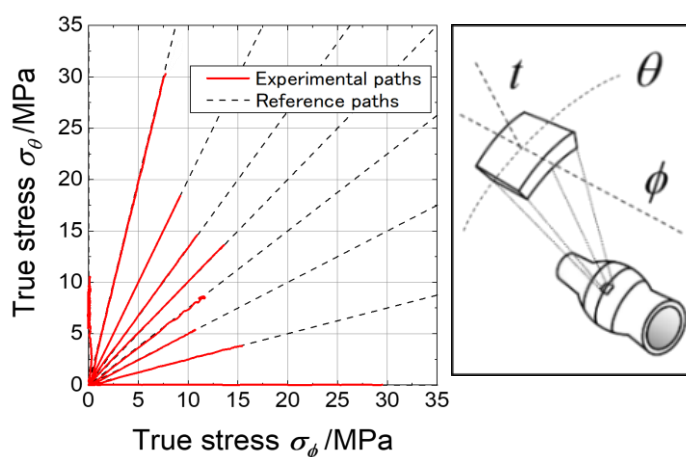


Fig. 3.16 True stress – logarithmic strain curves measured for loading-unloading tests

応力比の指令値と実験値の比較を **Fig. 3.16** に示す．いずれの応力比においても，指令値に対する実験値の追従性は良好であり，任意の応力比で線形応力経路における塑性変形挙動を測定できることを確認した．1 応力経路当たりの試験数は 2 とし，より大きなひずみまで応力-ひずみ曲線が測定できた方を実験値として採用した． $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:4$ では最大主応力 31MPa まで測定できたが， $\sigma_\phi:\sigma_\theta=2:1, 4:3, 1:1, 1:2, 0:1$ では試験片中央部で破断せず測定できた領域は小さい．

試験のひずみ速度は以下の方法で一定に保った．まず，一つ前の制御周期（0.02 秒前）における最大主応力方向のひずみとその時に指令されているひずみ速度から，現在の指令ひずみを算出する．これと，現在の制御周期における最大主応力方向のひずみの差を取り，フィードバックした．次に中間主応力は，その指令周期における最大主応力と，応力比から算出した中間応力指令値を使ってフィードバックした (**Fig. 3.17**)．

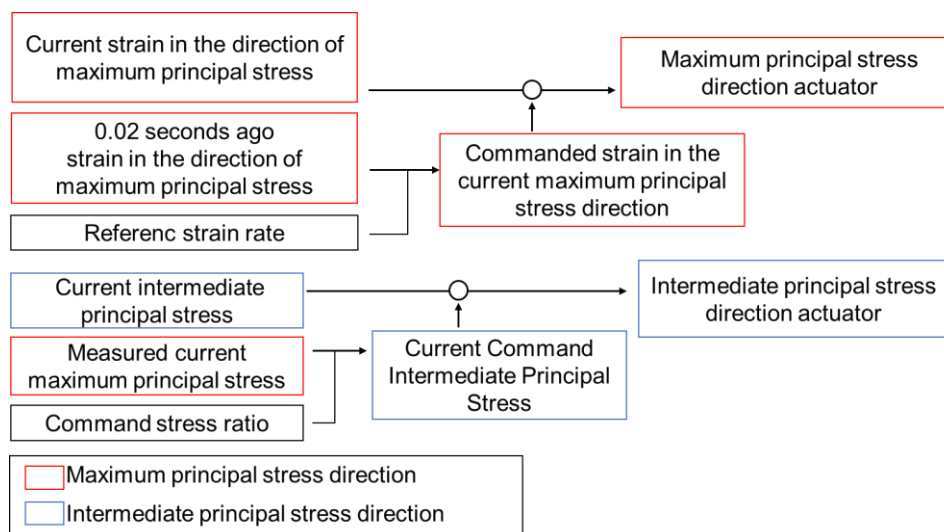


Fig. 3.17 A method to control two actuators while maintaining the stress ratio and strain rate

3.7. 負荷－除荷試験速度

試験中の全ひずみ速度と試験時間の関係を **Fig. 3.18** に示す．全ひずみ速度は，10 秒間の平均速度として算出した．応力比ごとに試験時間が異なり，横軸のレンジが異なることに注意されたい．本試験では全ひずみ速度が $1 \times 10^{-3}/s$ となるように制御をかけ，試験を行った．このため，負荷時には $+1 \times 10^{-3}/s$ で推移し，その後除荷に切り替わるときには，間を置かず $-1 \times 10^{-3}/s$ に推移するのが理想である．

6MPa（6 回負荷除荷）より小さい応力領域においては，負荷と除荷の切り替えの周期が速いため，所定の速度より低くなった．6MPa 以上の領域において， $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 1:0, 4:1, 4:3, 3:4, 1:2, 1:4, 0:1$ では，所定のひずみ速度で試験が行われたことを確認した．

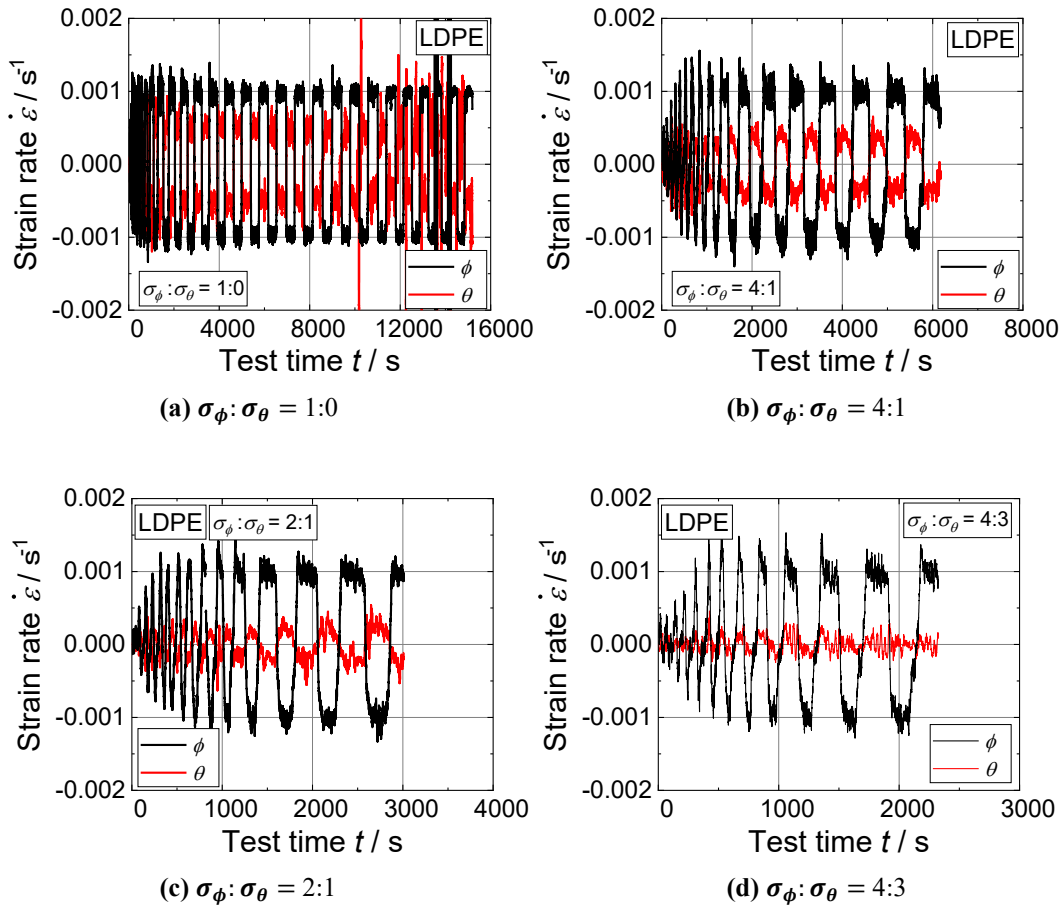


Fig. 3.18 True stress – logarithmic strain curves measured for loading-unloading tests

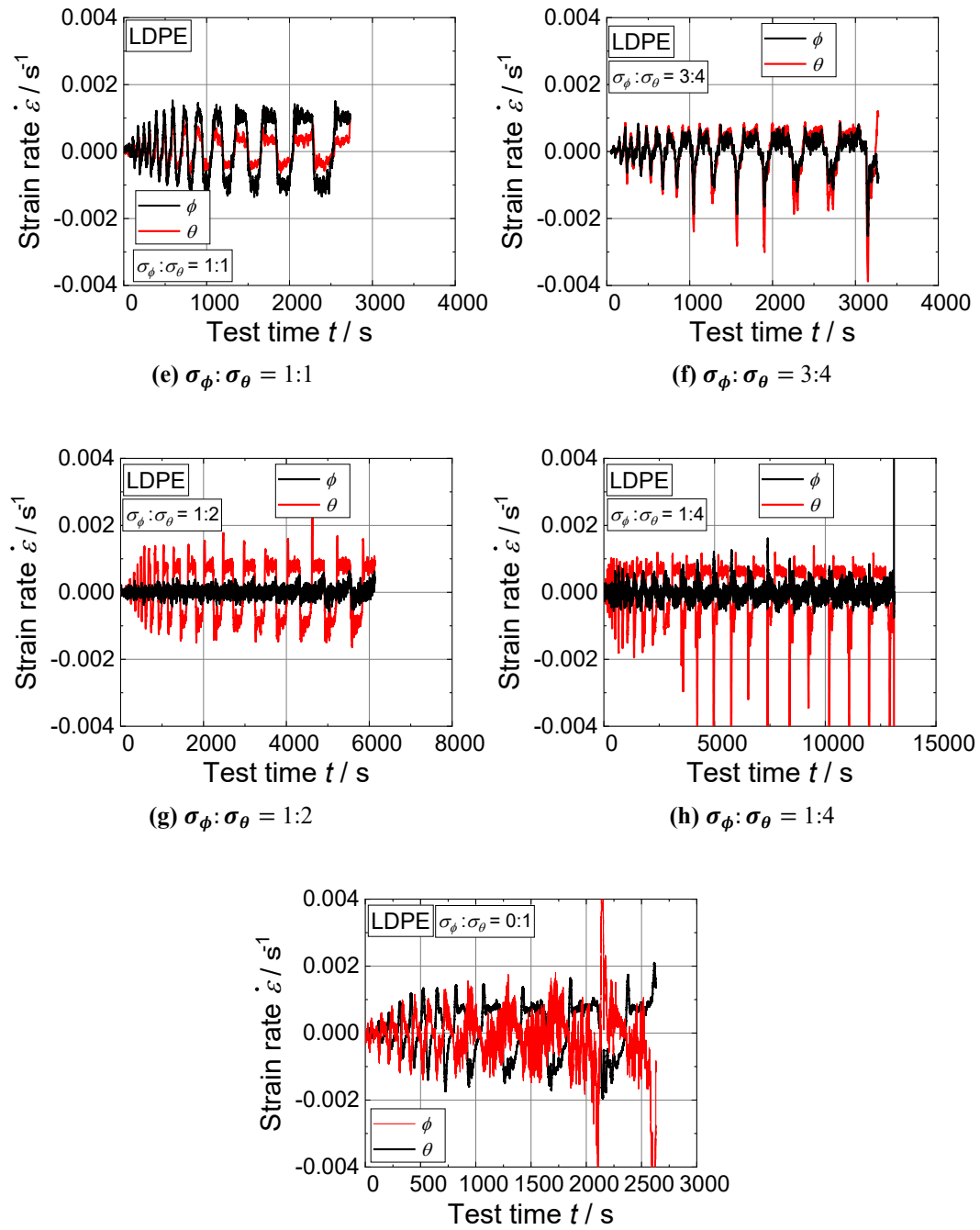


Fig. 3.18 True stress – logarithmic strain curves measured for loading-unloading tests (Second)

3.8. 負荷－除荷試験実験結果

1 MPa 負荷－除荷試験における応力全ひずみ線図と，単調負荷試験との比較を **Fig. 3.19** に示す．単調負荷試験の管軸方向を黒実線，円周方向を赤実線で，負荷－除荷試験の管軸方向を灰色実線で，円周方向を橙実線で示した．まず，両者の形状について比較する．単調負荷試験の応力ひずみ線図と，負荷－除荷試験の，初めて応力負荷される部分（包絡線）の ss 線図は， $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0$, $2:1$, $1:2$, $0:1$ では一致した． $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0$, $2:1$, $1:2$, $0:1$ では，形状は一致しているものの，同じひずみに対し，単調負荷試験の応力が 10%程度大きく観測された． $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1$ は同じひずみに対し，単調負荷試験の応力が 10%程度小さく観測された．

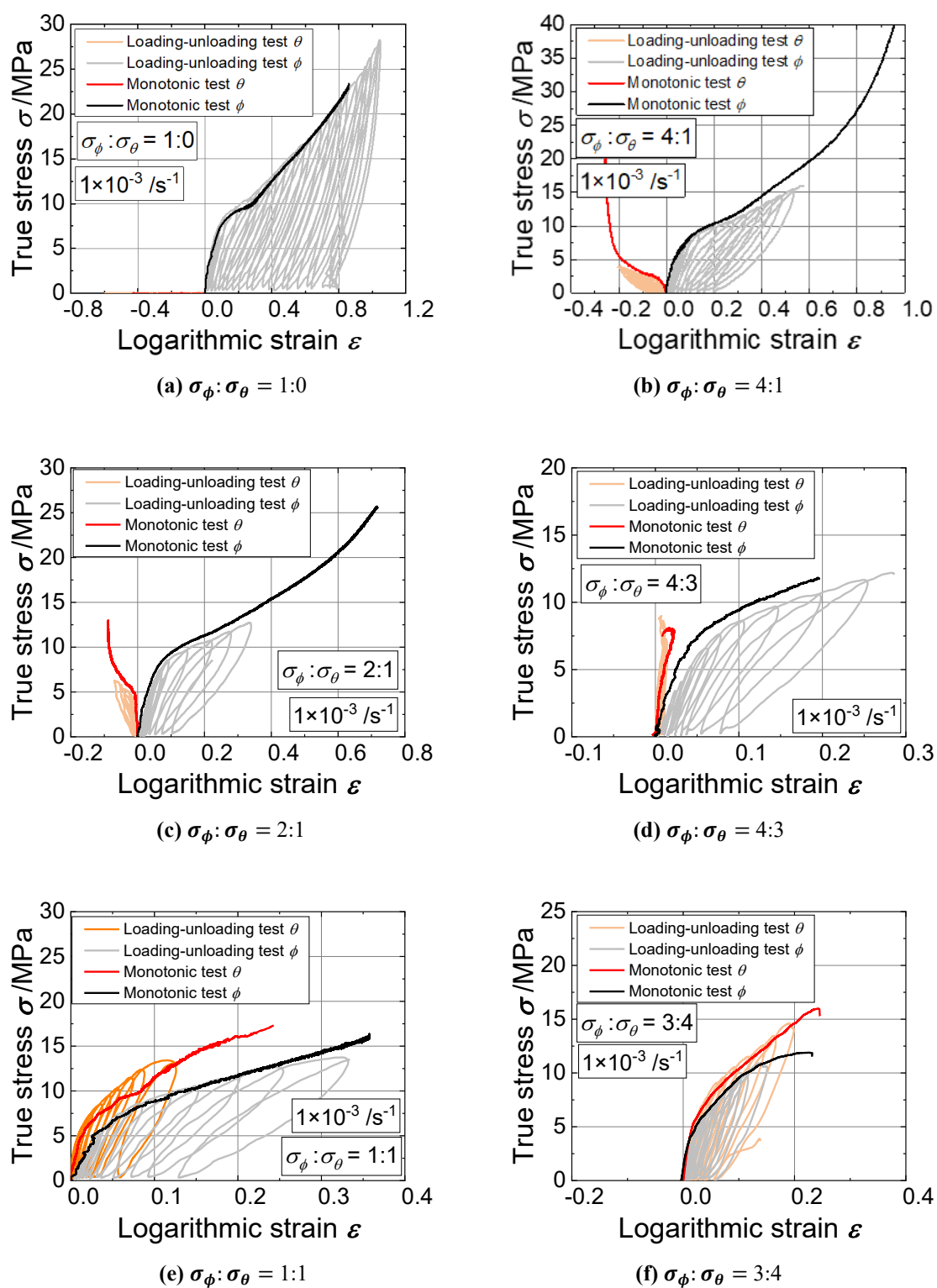


Fig. 3.19 True stress – logarithmic strain curves measured for loading-unloading tests

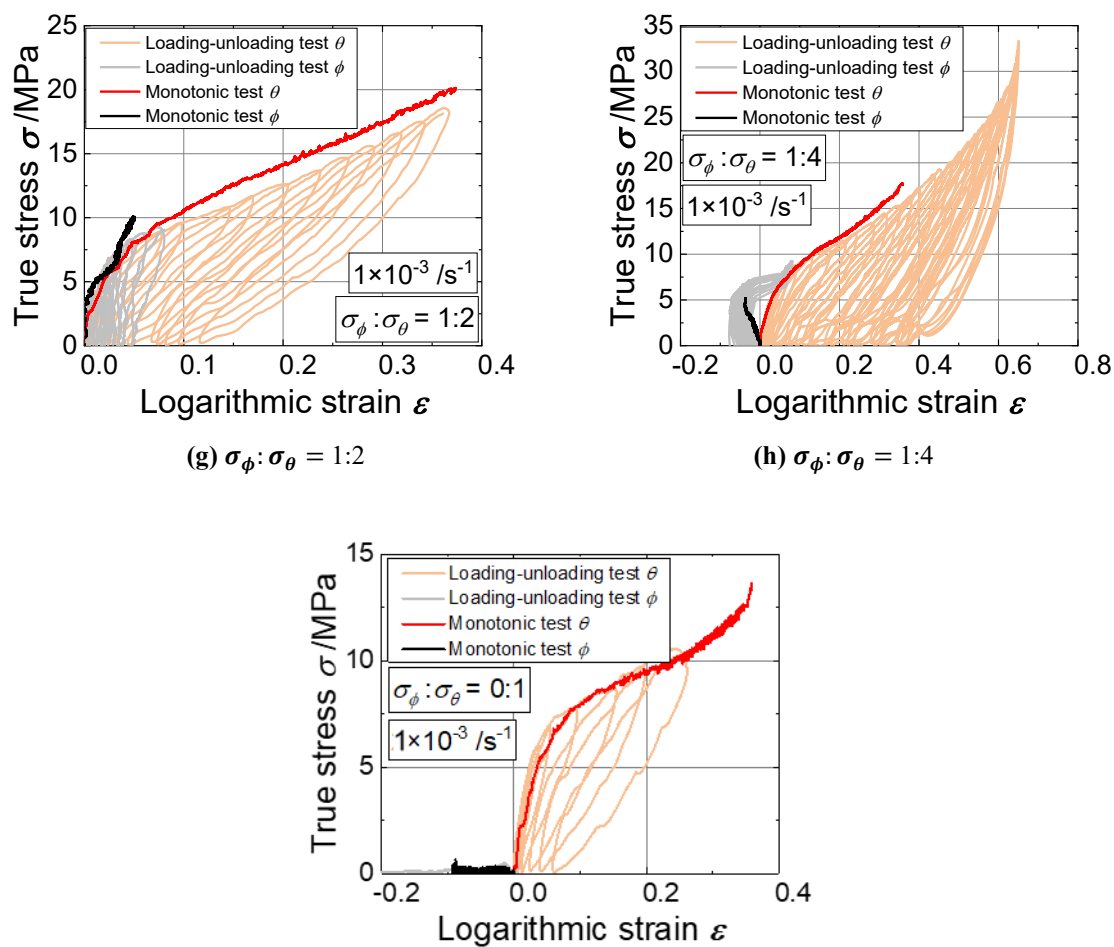


Fig. 3.19 True stress – logarithmic strain curves measured for loading-unloading tests (Second)

3.9. 弾性率

塑性ひずみの精密な測定を行うために、負荷除荷試験を行ったが、LDPE 押出し円管材は弾性ひずみの変形全体に及ぼす影響が大きく、金属で広く適用されている解析手法では、変形挙動を精密に再現することはできない。以下弾性率の変化を示す。この弾性率の測定方法を **Fig. 3.20**を用いて示す。負荷 - 除荷二軸バルジ試験で測定した、負荷時の真応力-対数塑性ひずみの測定点と、除荷時の真応力-対数塑性ひずみの測定点の傾きを求めた。

対数塑性ひずみは直後の除荷過程時に測定された対数ひずみ（永久ひずみ）とした。**Fig. 3.21**に測定結果を示す。それぞれの応力比でグラフのレンジが異なる点に注意されたい。**Fig. 3.21 (a)**, **(b)** $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 0:1, 1:0$ では、単軸応力状態のため、最大主応力方向の結果のみを示した。**(d)** $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 4:3$ では円周方向ではひずみの進展が微小だったため、円周方向側の弾性率は、 $E=6000\text{MPa}$ を超える極めて大きな値を取ったため、結果を示していない。まず **Fig. 3.21 (a)** $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0$ に注目すると、試験開始直後の $E=396\text{ MPa}$ から減少し、その後塑性ひずみ $\varepsilon^p=0.205$ で $E=48.6\text{ MPa}$ まで減少し、 $\varepsilon^p>0.205$ の領域では単調増加となった。このほかの応力比についても、最大主応力方向の弾性率の推移は定性的に一致している。**Fig. 3.21 (a)**, **(b)** $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0, 0:1$ を比較すると、測定範囲内では、同様の弾性率で推移した。

次に中間主応力方向に注目する、例えば、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:4$ と $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 4:1$ において、推移の傾向は管軸方向と円周方向で逆転するような対称性は見いだせなかった。

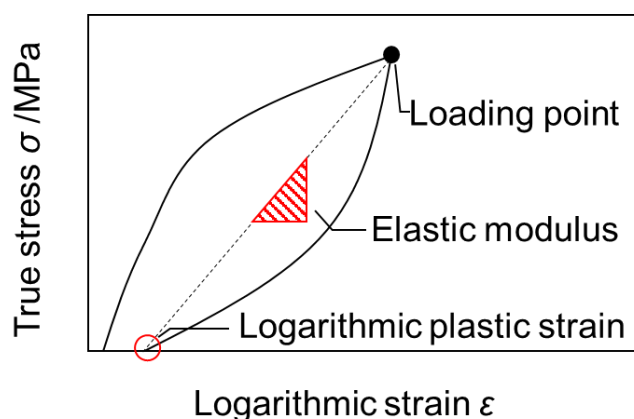


Fig. 3.20 Method to measure elastic modulus from the result of load unloading test

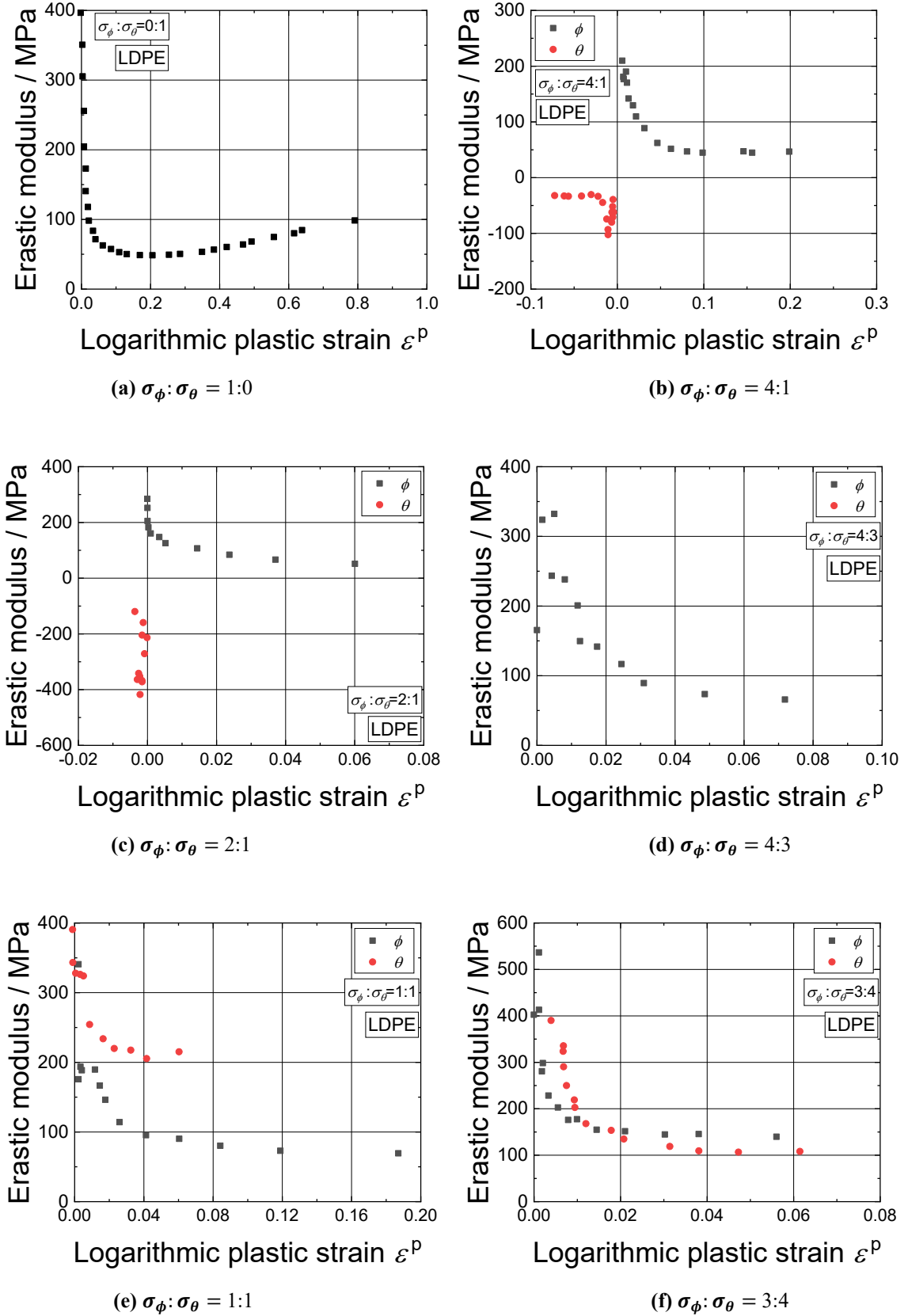


Fig. 3.21 Elastic modulus from the result of load unloading test

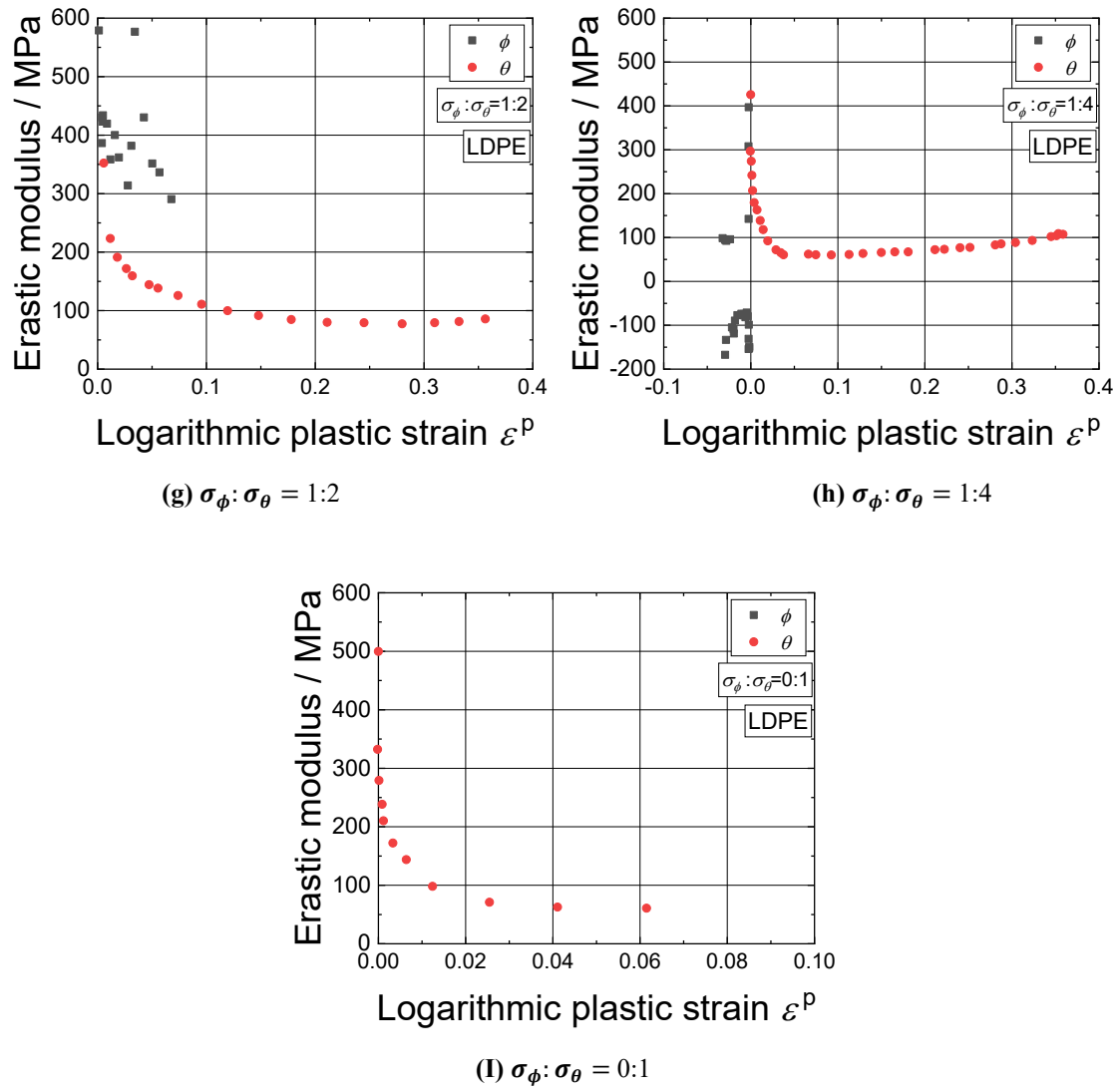


Fig. 3.21 Elastic modulus from the result of load unloading test (Second)

3.10. 真応力-対数塑性ひずみ線図

Fig. 3.19 の負荷-除荷曲線から、完全除荷時の残留ひずみを対数塑性ひずみ ε_p^p として、それと対応する除荷直前の真応力 σ_θ との関係を求めた。その結果を Fig. 3.22 に示す。

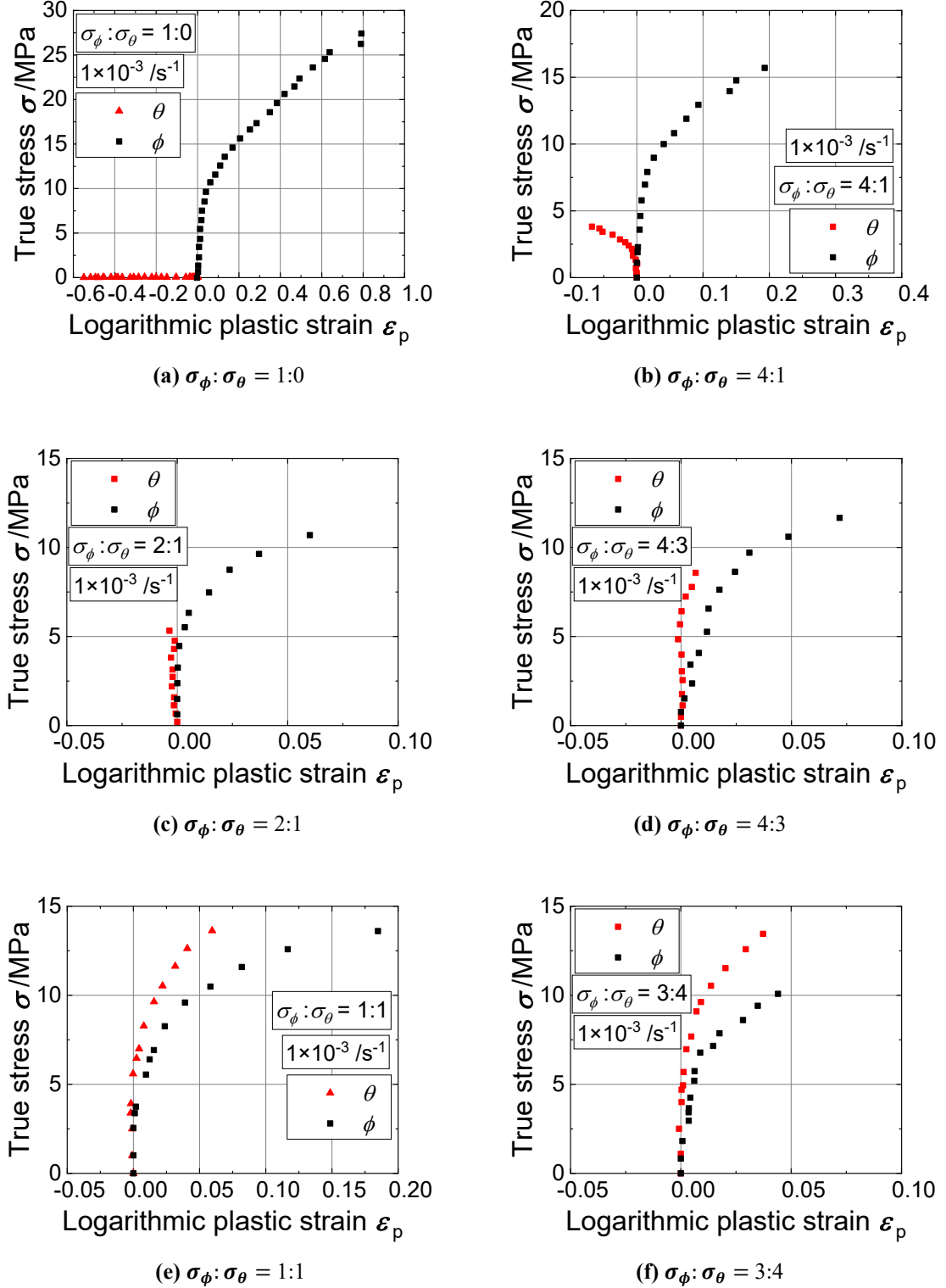


Fig. 3.22 True stress – logarithmic strain curves measured for loading-unloading tests

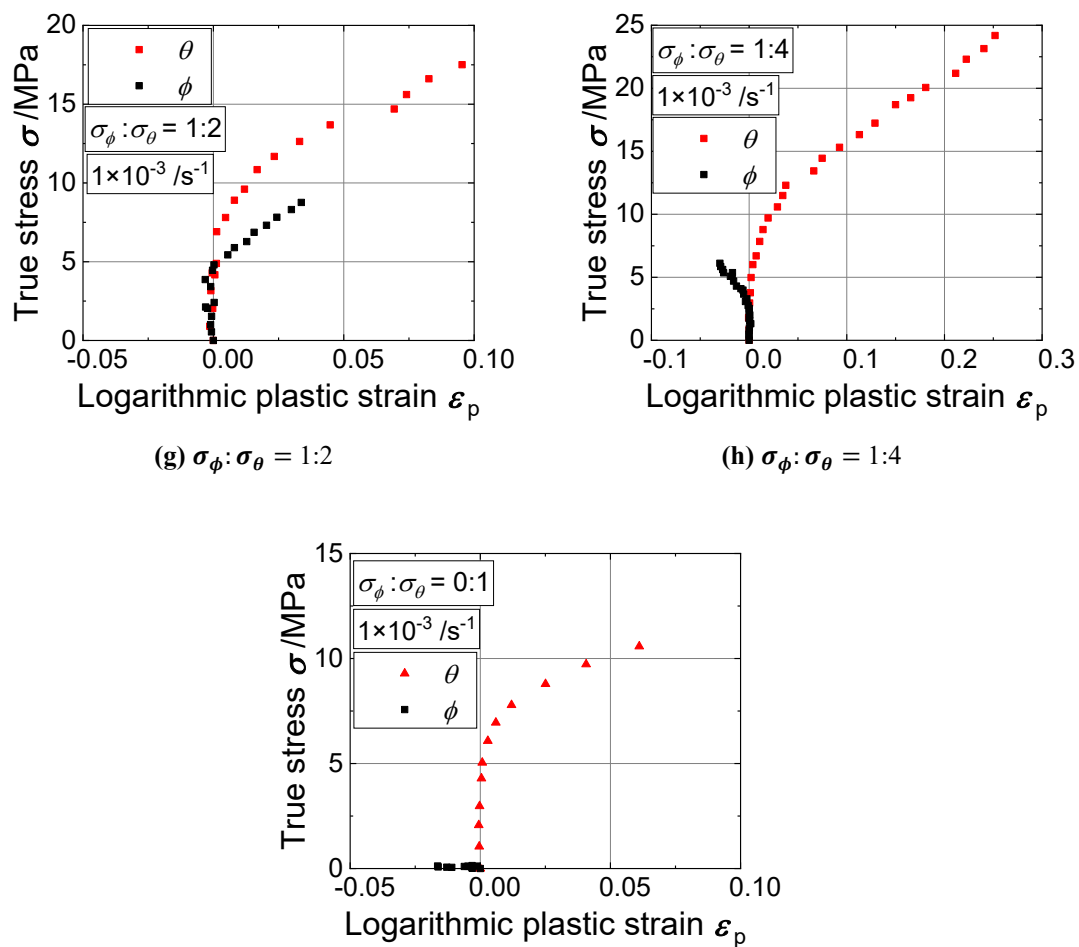


Fig. 3.22 True stress – logarithmic strain curves measured for loading-unloading tests (Second)

3.11. 等塑性仕事面

Fig. 3.22 で測定した本供試材の異方性硬化挙動を可視化するために、真応力－塑性ひずみの関係を元に、以下の方法で等仕事面を作製した．まず ϕ 方向単軸試験において、基準となる $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:0$ における ϕ 方向の対数塑性ひずみ ε_0^p に達した瞬間における真応力 σ_0 とそれまでになされた単位体積あたりの塑性仕事 W_n^p を測定する．

塑性仕事 W^p は真応力－対数ひずみ線図の曲線で囲まれた面積であり、区分求積法で算出することができる(Fig. 3.12)．Fig. 3.12 の斜線部の面積は次式のように台形近似によって求める．

$$W_n^p = \frac{1}{2}(\sigma_{n+1} + \sigma_n)(\varepsilon_{n+1}^p - \varepsilon_n^p) \quad (4.1)$$

従って、総仕事量はこれの和で算出することができる

$$W^p = \sum W_n^p \quad (4.2)$$

他の応力経路においては、 W_0^p と等量の仕事が消費された時点の真応力 $(\sigma_\phi, \sigma_\theta)$ を測定して主応力空間にプロットし、その集合をもって等仕事面を決定した．

各線形応力経路から測定した離散的な真応力－対数塑性ひずみ線図について、測定点間を線形補間して、真応力－対数塑性ひずみ線図を測定した．次に ϕ 方向単軸引張試験（ $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:0$ ）により測定した真応力 σ_0 －対数塑性ひずみ ε_0^p 曲線において、規定の ε_0^p に達するまでになされた単位体積当たり塑性仕事 W_0^p を測定する．他の応力経路において、 W_0^p と等量の塑性仕事が消費された瞬間の真応力 $(\sigma_\phi, \sigma_\theta)$ を主応力空間上にプロットする．その集合をもって等塑性仕事面を決定した．等塑性仕事面の測定結果を **Fig. 3.24** に示す．9 つすべての応力経路に対して応力点が測定されたのは $\varepsilon_0 = 0.07$ までであった． $\varepsilon_0^p=0.03$ 以上の領域の形状は、楕円形の一部となり、大きく凹となる部分はなかった．

材料の変形の進展による等塑性仕事面の形状変化を測定するため、各基準塑性ひずみに対する基準応力で無次元化した、無次元化等塑性仕事面を **Fig. 3.25** に示す． $\varepsilon_0^p = 0.07$ までの等塑性仕事面を測定した． $\varepsilon_0^p = 0.02 \rightarrow 0.04$ では進展に伴い無次元化等塑性仕事面の形状は大きく変化するが、

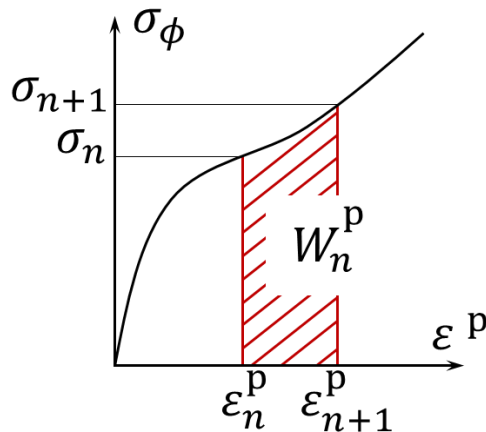


Fig. 3.23 Conceptual diagram for the measurement of the work

$\varepsilon_0^p \geq 0.04$ では形状変化は微少だった。

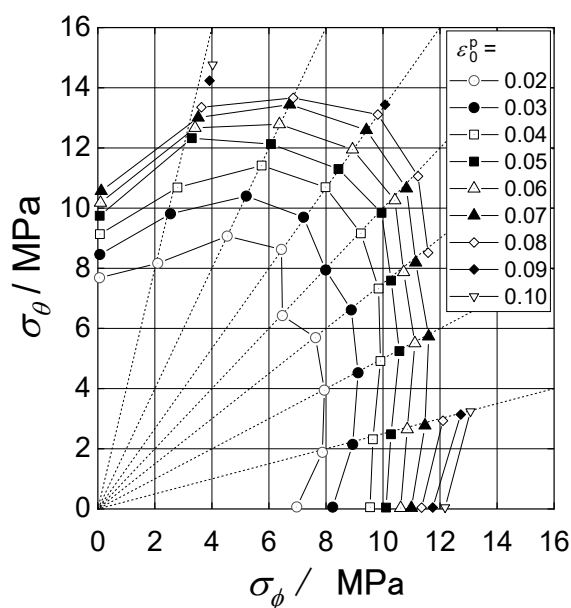


Fig. 3.24 Stress points forming contours of equal work

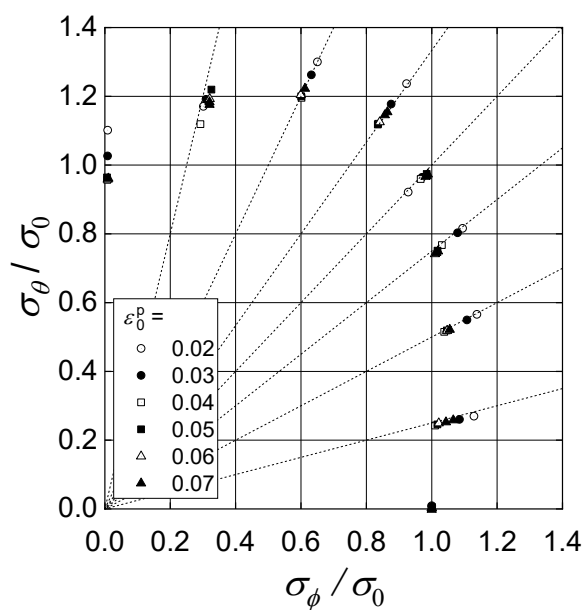


Fig. 3.25 Stress points forming contours of equal work

3.12. 塑性ひずみ速度方向の算出

塑性ひずみ速度方向の測定について述べる。本研究では 1MPa ずつ負荷する応力を増加させる経路でひずみ速度一定で、負荷 - 除荷二軸バルジ試験を行った。負荷 - 除荷曲線から完全除荷時の残留ひずみを対数塑性ひずみとして、それと対応する除荷過程直前の真応力 σ を測定した。これらの離散的な測定点を、線形補間して真応力-対数塑性ひずみ線図とした。

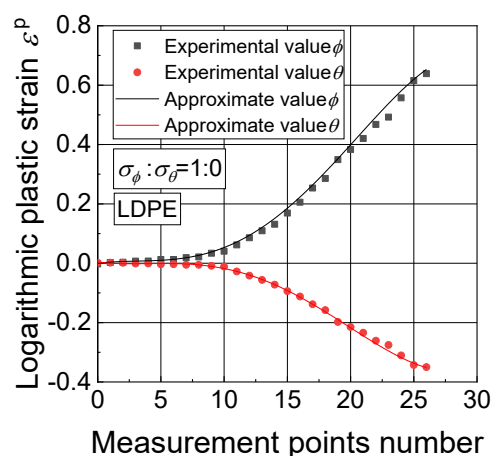
第3章 ポリエチレン押出し円管の二軸応力試験と材料モデリング

塑性ひずみを測定した時間は、繰り返しの時間を含むため、試験時間は塑性ひずみの測定点に紐づけることができない。さらに、弾性率は試験片の変形が進むにつれて変化するため、塑性ひずみの測定点（負荷から除荷への切り替えの点）の付近の真応力-対数全ひずみ線図の傾きを算出し、弾性による影響を除去する方法で塑性ひずみ速度を求めることは難しい。そこで本研究では以下に示す方法で塑性ひずみ速度方向を算出した。

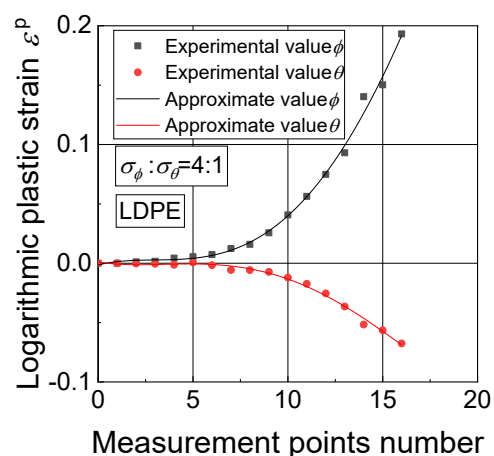
まず、測定した真応力-対数塑性ひずみを、塑性ひずみを Y 軸、測定点数（負荷除荷の回数）を X 軸としたグラフにプロットする。

これらの実験点を結ぶ 5 次式の近似曲線を作成する。近似結果を **Fig. 3.26** に示す。この近似曲線を微分し、塑性ひずみ速度を算出した。それぞれの応力比でグラフのレンジが異なる点に注意されたい。

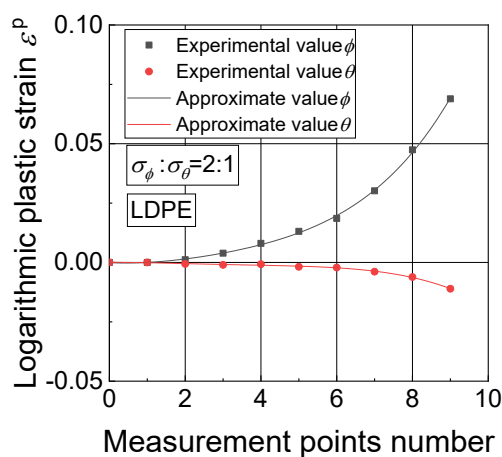
本研究において、等塑性仕事面の測定では、測定した真応力-対数塑性ひずみの関係を直線近似しているが、塑性ひずみ速度方向の算出では 5 次式で曲線近似を行った。これは、等塑性仕事面の測定には積分を使う、塑性ひずみ速度方向の算出には塑性ひずみを微分する必要がある、一つの測定点の誤差により、微分値は大きく差が出て適さないと判断したためである。



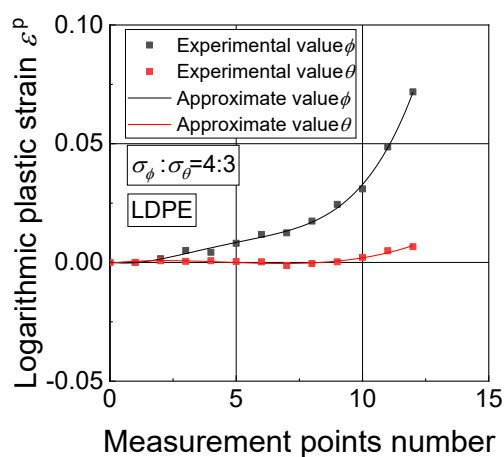
(a) $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 1:0$



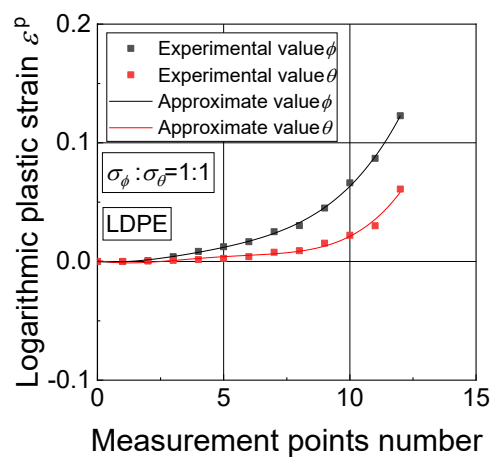
(b) $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 4:1$



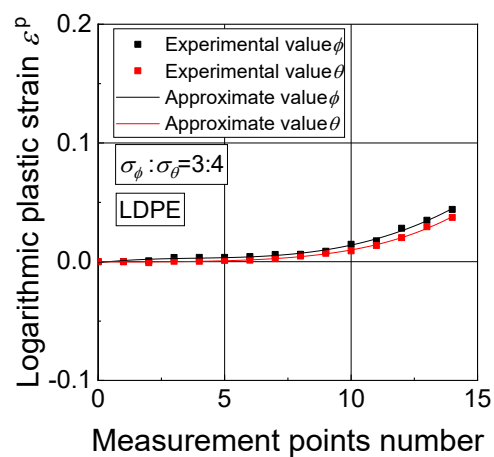
(c) $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 2:1$



(d) $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 4:3$



(e) $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 1:1$



(f) $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 3:4$

Fig. 3.26 Experimental points and approximate curves of logarithmic plastic strain

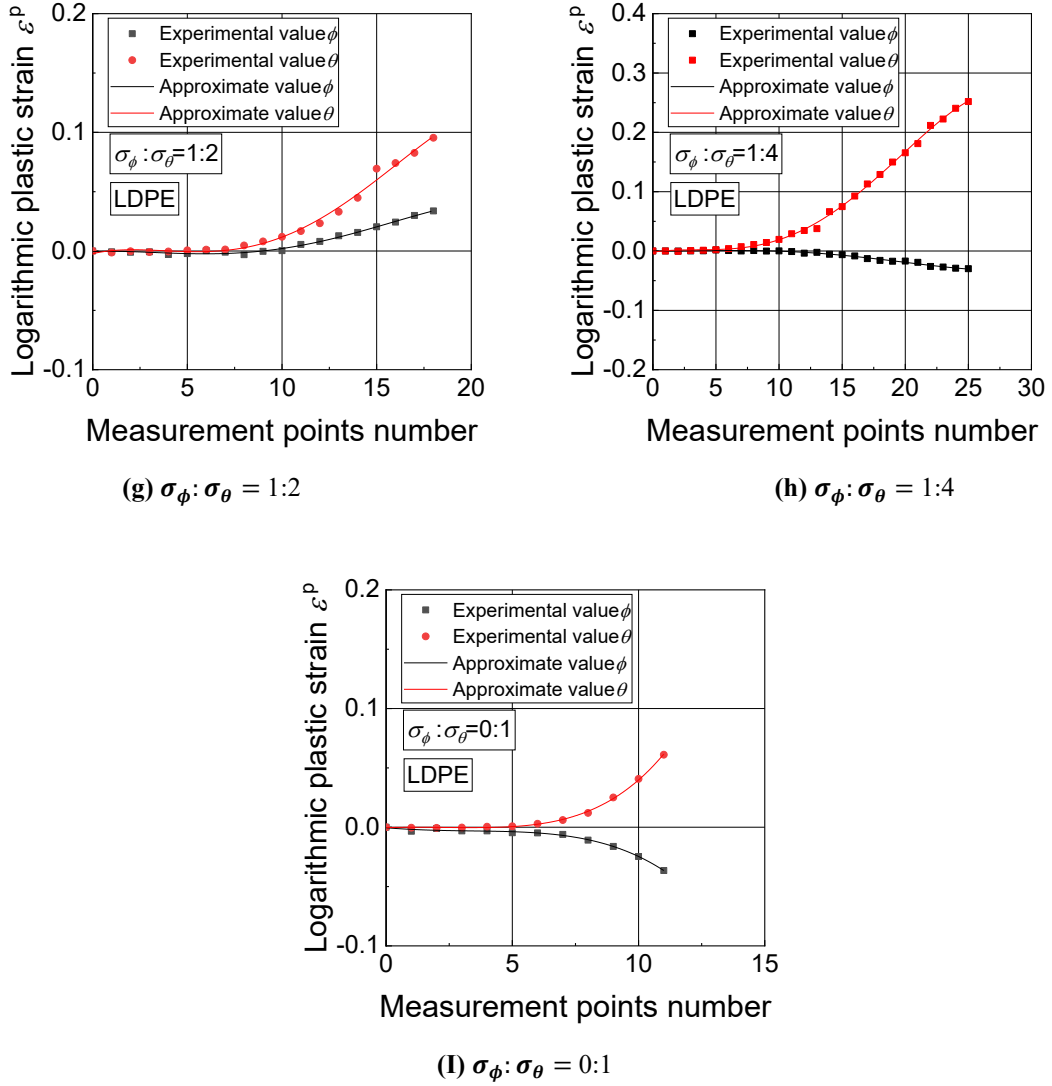


Fig. 3.26 Experimental points and approximate curves of logarithmic plastic strain (Second)

算出した塑性ひずみ速度比と相当ひずみの関係を Fig. 3.27 に示す。

$\sigma_\phi : \sigma_\theta = 3:4$ から $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 0:1$ においては，塑性ひずみ速度方向 β は， $\varepsilon_0^p = 0.02$ までで収束しているが， $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 1:0$ から $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 1:1$ における領域では収束が遅い．本研究では降伏関数の同定のパラメータは全応力経路で測定できた最大の塑性ひずみである $\varepsilon_0^p = 0.07$ で同定した．

応力角の変化に伴うひずみ速度方向 β の推移を Fig. 3.28 に示す．ひずみ速度方向 β は管軸方向を 0° とし，反時計回りの角度増分を正とした． $\varepsilon_0^p = 0.02$ から 0.07 まで測定した．円周方向最大主応力の試験は管軸方向最大主応力の試験と比較して早々に収束した．

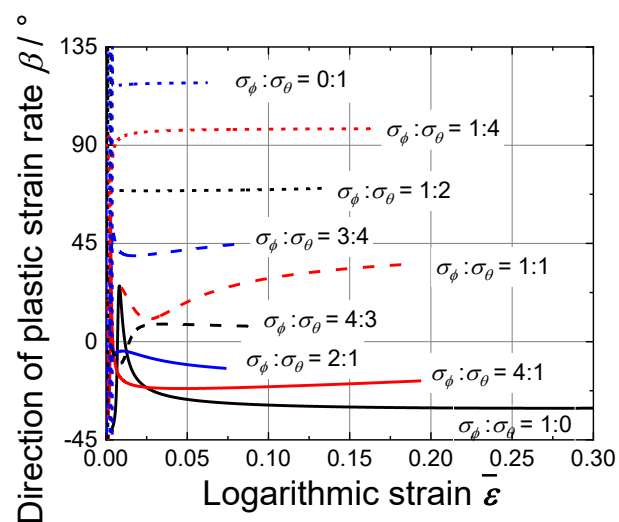


Fig. 3.27 Relation between Logarithmic strain and directions of the plastic strain rates β

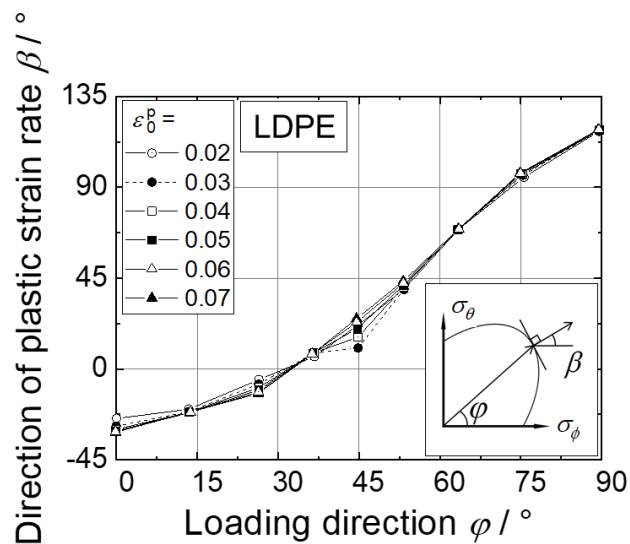


Fig. 3.28 Relation between Loading direction and directions of the plastic strain rates β

3.13. Yld2000-2d 降伏関数の同定

$\varepsilon_0^p = 0.07$ に対する実験結果から、降伏関数を同定した。同定した降伏関数は von Mises 降伏関数と Yld2000-2d 降伏関数である。本研究の試験片は肉厚 2mm の樹脂円管であるが、樹脂材料用に異方性を考慮できる降伏関数はない。そこで金属薄板材の異方性を考慮することができる降伏関数として開発された Yld2000-2d 降伏関数 (F. Barlat, et al., 2003) を同定した。金属材料においては適用実績が多数あるが、樹脂材料に対しての適用実績はない。この材料モデルは、平面応力状態を前提としているため、面内応力が支配的となる問題に限定して適用可能である。本研究では 9 経路の線形応力経路とひずみ速度方向の測定ができたため、これらをバランスよく再現するため、以下に示す方法を用いて同定を行った。

Yld2000-2d 降伏関数は次数 M 、異方性係数 α_i の ($i = 1 \sim 8$) の 9 個のパラメータで決定される。 M 及び α_i の決定には遺伝的アルゴリズム (GA 法) を採用し、式(1)に示す評価関数 F を最小化するように決定した。

$$f = \sum_{i=1}^N w_{\sigma,i} (\delta' - \delta)^2 + \sum_{i=1}^N w_{\beta,i} (\beta' - \beta)^2 \quad (1)$$

ここで $w_{j,\sigma}$, $w_{j,\beta}$ は重み係数, $\alpha_{j,M}$ は応力空間の原点と j 番目の応力点との距離, $\alpha_{j,C}$ は降伏関数による計算値との距離, $\beta_{j,M}$ は j 番目の応力経路において測定された塑性ひずみ速度方向 (degree), $\beta_{j,C}$ は降伏関数と関連流れ則により計算される塑性ひずみ速度方向 (degree) である (Fig. 3.29 参照)。このとき重み係数を変えることで、等塑性仕事面の再現性を重視した場合 (A), 等塑性仕事面とひずみ速度方向 β の両方を重視した場合 (B), ひずみ速度方向 β のみを重視した場合 (C) の 3 通りの同定を行った。重み付け係数を Table 3.1 に示す。各降伏関数による同定結果と実験値との比較を、等塑性仕事面に関して Fig. 3.30 (a) に、塑性ひずみ速度方向に関して Fig. 3.30 (b) に示す。一方 Yld2000-2d 降伏関数では、方法(A)は、第一象限の実験点を概ね再現することができ、管軸方向に強く凸な形状となった。方法(B)では等塑性仕事面で材料の円周方向に硬化する異方性は再現できたものの、単軸応力状態における実験点の再現精度は悪い。応力角 φ の変化に伴うひずみ速度方向 β は、定性的に傾向を再現することができた。方法(C)は円周方向最大主応力におけるひずみ速度方向の再現に優れるが、管軸方向単軸試験の結果や $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 4:1$ の結果の再現には課題が残った。

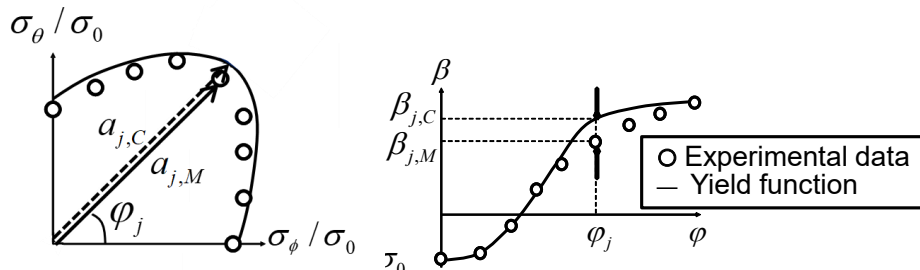


Fig. 3.29 Schematic illustration of the parameter identification of the Yld2000-2d yield function.

Table 3.1 Values of $w_{j,\sigma}$ and $w_{j,\beta}$

Stress ratio $\sigma_\phi : \sigma_\theta$	Method A		Method B		Method C	
	$w_{\sigma,i}$	$w_{\beta,i}$	$w_{\sigma,i}$	$w_{\beta,i}$	$w_{\sigma,i}$	$w_{\beta,i}$
1:0	10	3	10	1	10	10
4:1	10	3	10	5	10	10
2:1	10	3	10	5	10	10
4:3	1	3	1	3	1	10
1:1	10	3	1	3	1	10
3:4	1	3	1	3	1	10
1:2	10	3	10	3	10	10
1:4	10	3	10	3	10	10
0:1	10	3	1	3	10	10

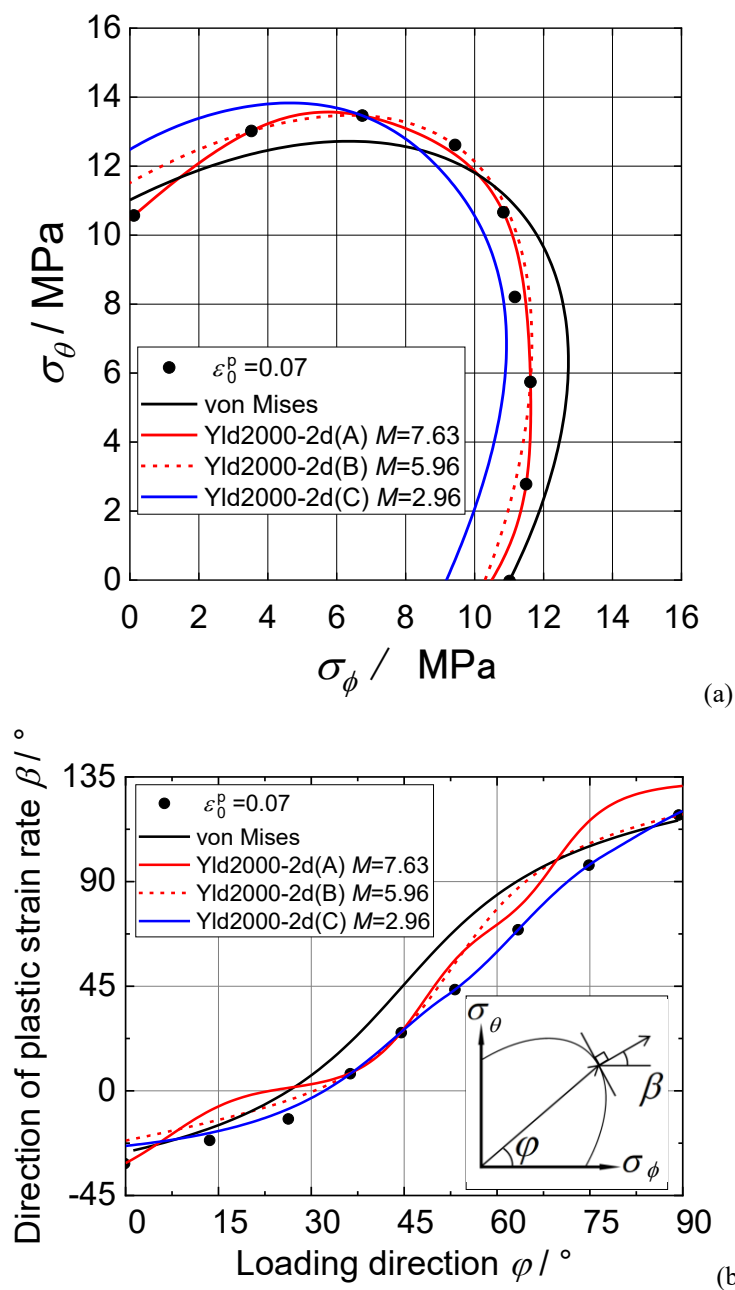


Fig. 3.30 Comparison of the experimental data at $\varepsilon_0^p = 0.07$ for (a) the stress points forming the contour of plastic work and (b) the directions of the plastic strain rates with those calculated using the von Mises and the Yld2000-2d yield functions.

3.14. 結言

製作した樹脂材料用の二軸バルジ試験機を使い、LDPEの押出し円管材に対して、二軸応力下における単調負荷試験及び負荷－除荷試験を実施した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) LDPE 円管試験片に対し、任意の線形応力経路における $\sigma_\phi - \varepsilon_\phi$ および $\sigma_\theta - \varepsilon_\theta$ 曲線の測定に成功した。
- (2) 相当ひずみ速度一定で二軸バルジ試験を行うための制御方法を考案した。
- (3) LDPE 押出し円管材は、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0, 0:1$ では、等方性材料的な変形挙動を示したが、二軸引張応力状態では強い異方性を示し、異方性硬化挙動は、多軸応力試験を行うことにより定量的に測定、評価可能である。
- (4) 本供試材は、 ϕ および θ 方向の単軸引張 ss 曲線はほぼ一致したが、二軸引張応力状態では強い異方性を示した。例えば、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1$ では、同一の応力値に対して ε_ϕ は ε_θ の2～3倍大きくなった。
- (5) 樹脂材料の二軸応力下における変形挙動を定量的に評価する方法として、等仕事面の作製が有効である。
- (6) 本供試材では塑性変形挙動を精密に評価するためには、真応力－対数塑性ひずみの測定が必要不可欠であり、単調な応力増加を行う二軸バルジ試験から二軸応力下の塑性ひずみを測定することは困難である。
- (7) 単調負荷試験と負荷－除荷試験で測定される、真応力－対数全ひずみ線図の形状に差異はない。
- (8) 測定した負荷－除荷を伴う応力－全ひずみ線図から二軸応力下における、真応力－対数塑性ひずみの関係を測定するした。
- (9) $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1$ における二軸引張応力状態では塑性領域において、 ϕ 方向と比較して、 θ 方向の方が強度が高くなる異方性を確認した。
- (10) 無次元化等塑性仕事面は、基準塑性ひずみ $\varepsilon_0^p \geq 0.04$ では、形状変化は微少である。
- (11) 方法(B)に基づいて Yld2000-2d 降伏関数を決定すれば、等塑性仕事面は二軸応力下では再現が可能であり、ひずみ速度方向 β の値は定性的に再現できる。

第4章

熱可塑性エラストマー円管の 二軸応力試験と材料モデリング

4.1. 緒言

第3章では、低密度ポリエチレン(LDPE) 製押出し円管材を供試材として、試験片へ応力負荷後に除荷を行い、永久ひずみを測定し、真応力－塑性ひずみの関係を実験的に直接測定する必要がある。この手法でポリエチレン押出し円管材に対し、負荷－除荷試験を実施し、精密な等塑性仕事面を測定し、材料の異方性を評価した。

本章では、ポリエステルを主成分とする熱可塑性エラストマー (ThermoPlastic Elastomer, TPE, 東洋紡株式会社製) を研究対象として、二軸応力下における変形挙動を測定する。さらに塑性ひずみの測定方法として、単調に直線応力経路を負荷し、弾性係数を算出し、全ひずみから弾性ひずみを引く方法と、応力の負荷と除荷を繰り返し、負荷時の応力と除荷時の永久ひずみを塑性ひずみとする方法で測定を行い、両者を比較しその特性を評価・検証した。

4.2. 供試材

供試材として硬度がショアーD52 (ASTM D2240) の熱可塑性エラストマーの円管材を用いた。試験片の寸法を **Fig. 4.1**に示す。公称肉厚 t_0 は 2.0 mm, 試験片外径 D_0 は15 mm, 試験片長さは 110 mm である。

試験片は一つの試験片における扁平率 (扁平率=最小直径/最大直径 $\times 100$) が 95%程度であったため、初期外径 D_0 と初期肉厚 t_0 はノギスで測定した。外径測定は 30°ごとに 6 か所を 5 回ずつ行ない、平均値を使った。測定中に明らかに傾向から外れる値を測定した場合は、測定をやり直した。なお、試験片ごとの外径は最小が 14.62mm, 最大の試験片外径が 16.24mm だった (**Fig. 4.2**)。

偏肉率 (偏肉率= (最大肉厚－最小肉厚) / (平均肉厚) /2 $\times 100$) は、7%程度だった。肉厚は試験

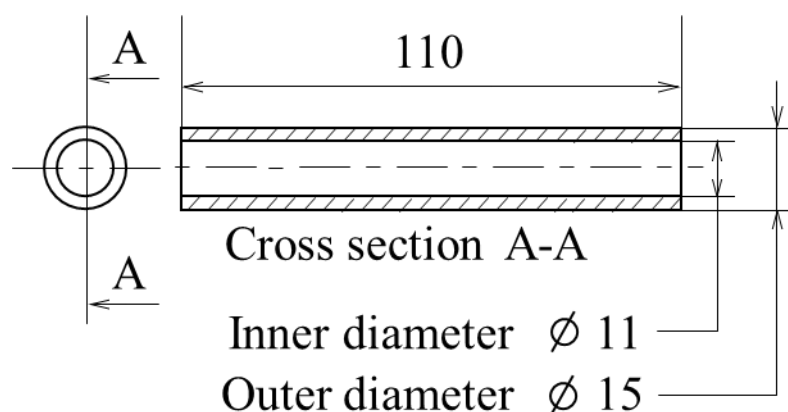


Fig. 4.1 Geometry of specimen for the multiaxial tube expansion test. Dimensions are in mm.

片ごとにノギスで測定した。測定は 30° ごとに 12 か所を 5 回ずつ行ない、平均値を採用した。測定中に明らかに平均値から外れる値を測定した場合は、その値のみ測定をやり直した。一部試験片の測定結果を Fig. 4.3 に示す。

4.3. 試験方法

二軸応力下の負荷－除荷試験として、応力比一定の 9 つの直線経路($\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:0, 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4, 0:1$)で試験を実施した。代表として $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:0$ における、応力とひずみの時間との関係を Fig. 4.4 に示す。応力を黒実線で、ひずみを赤実線で示した。負荷－除荷経路として、各試験では、最大主応力 σ_1 を 2MPa ずつ増加させ、都度除荷した。試験速度は、最大主応力方向のひずみ速度が負荷時は $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、除荷時は $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ となるように、軸力と内圧の負荷速度をフィードバック制御した。このためひずみは直線的な増減をした。試験機の制御方法は第 3 章の負荷－除荷試験と同様の方法を用いた。

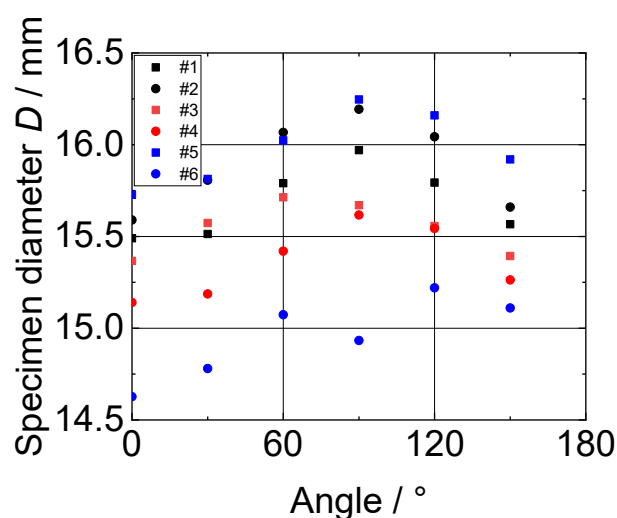


Fig. 4.2 Specimen diameter D

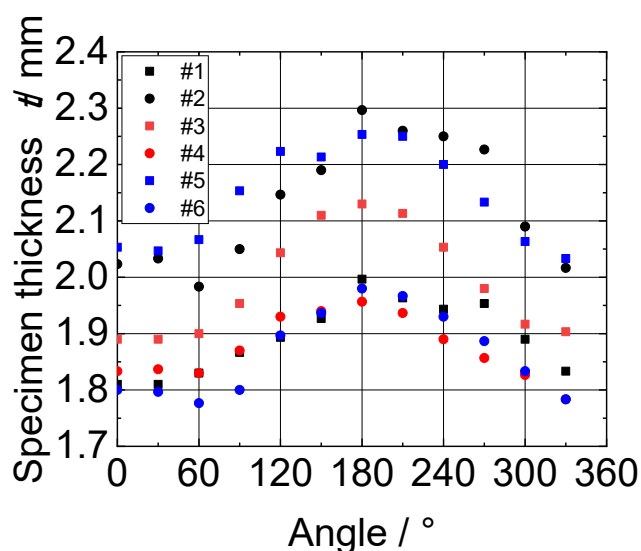


Fig. 4.3 Specimen thickness t

4.4. 試験結果

線形応力経路の指令値と実験値の比較を単調負荷試験の結果を **Fig. 4.5** に、負荷－除荷試験の結果を **Fig. 4.6**, 示す. 破線が指令値, 実線が実験値である. いずれの応力比についても実験値は指令値に誤差 5% 以内で追従しており, 構築した応力経路制御システムが正常に作動していること

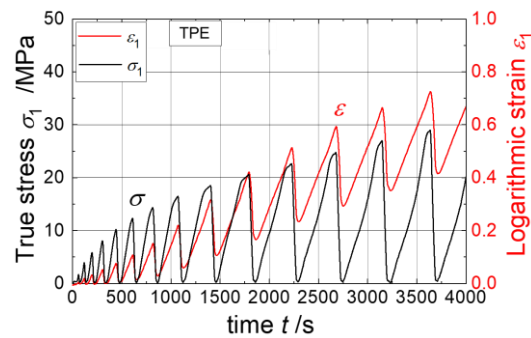


Fig. 4.4 Path of stress and strain in load-unload test

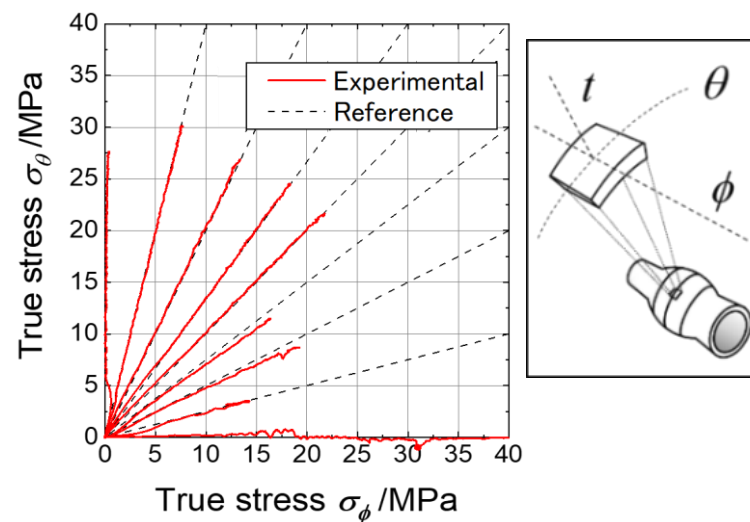


Fig. 4.5 Reference and experimental stress paths (Monotonic load test)

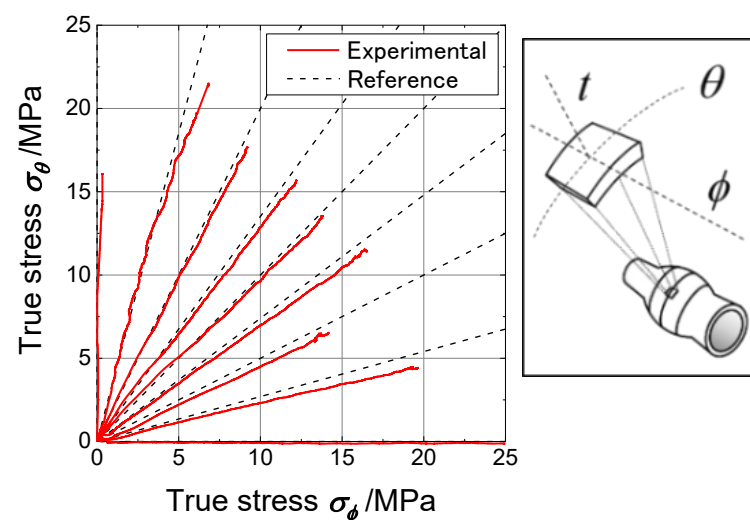


Fig. 4.6 Reference and experimental stress paths (Loading and unloading test)

を確認した。すべての経路において、負荷－除荷試験は単調負荷試験より先に試験を終了した。指令値と実験値が若干乖離した。その理由は、試験片内部に残留する気泡の影響により、水圧の制御に遅れが生じ、 σ_θ の指令値への追従が遅れたためと考える。

線形応力経路 $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:0$ における、最大主ひずみ速度の変化 Fig. 4.7 に示す。

負荷中の応力を黒実線で、除荷中の応力を赤実線で示す。負荷中の応力に注目すると、ひずみ速度は $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で一定に維持されていることを確認した。除荷中に注目すると、水圧の変化が支配的となる円周方向最大主応力 (e) ~ (i) では、除荷時に低ひずみ領域において指定した速度よりも遅い速度で推移している。これは低圧領域では圧力を変化させるためにポンプの動作量を大きくする必要があるが、この時ポンプに搭載したシリンダは最高速度で動作させており、現環境においては、速度を維持するのは難しい。除荷中はおよそ $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ でそのほかの応力比においても同様にひずみ速度を制御できていることを確認した。

試験片中央部の写真を Fig. 4.8 に示す。(a)は試験前、(b)~(j) は各応力経路における試験終了時(除荷直前)である。いずれの応力経路においても試験片中央がエリアカメラの測定範囲内に位

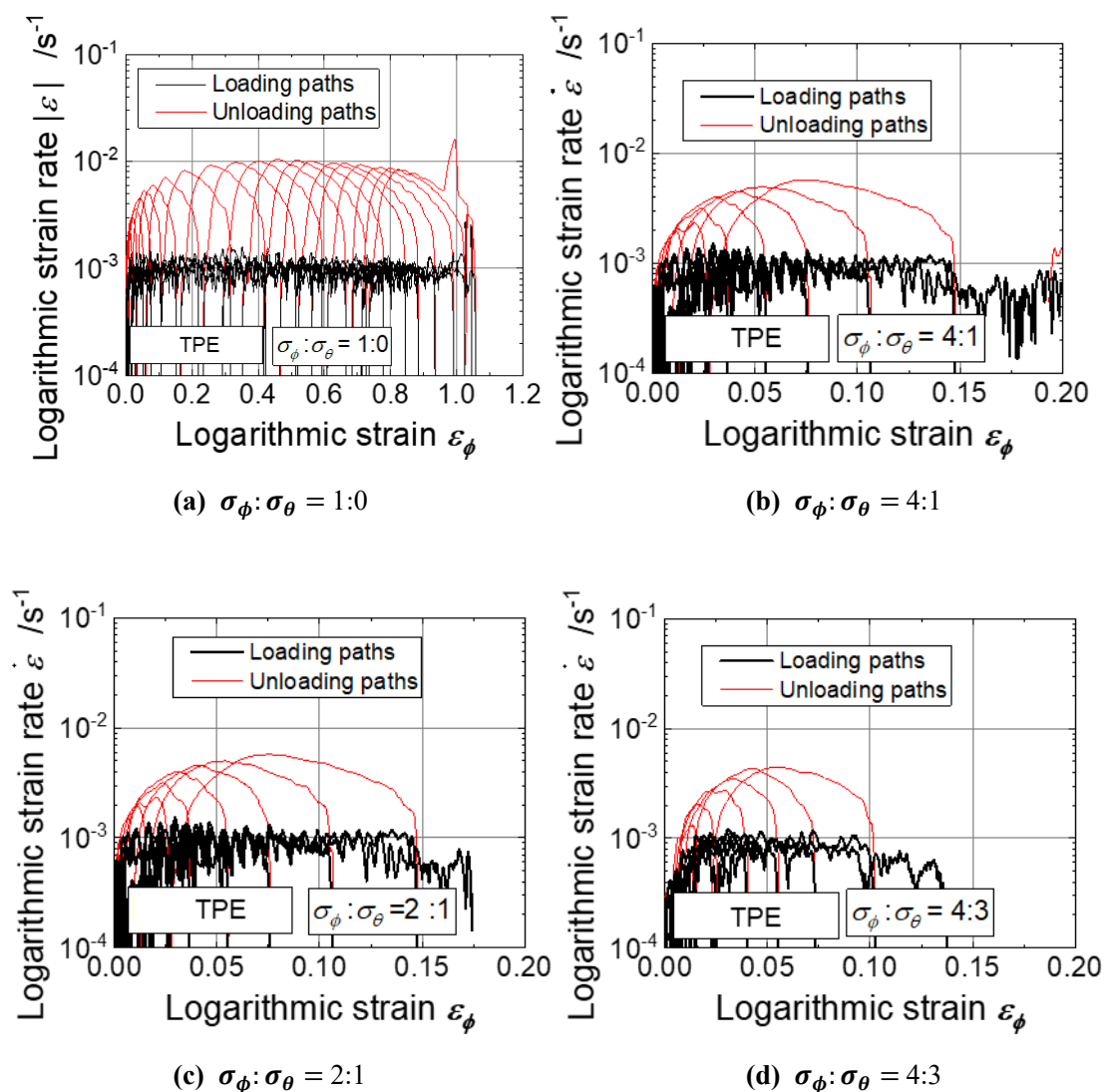


Fig. 4.7 Change in equivalent strain rate with equivalent strain measured along every linear stress path

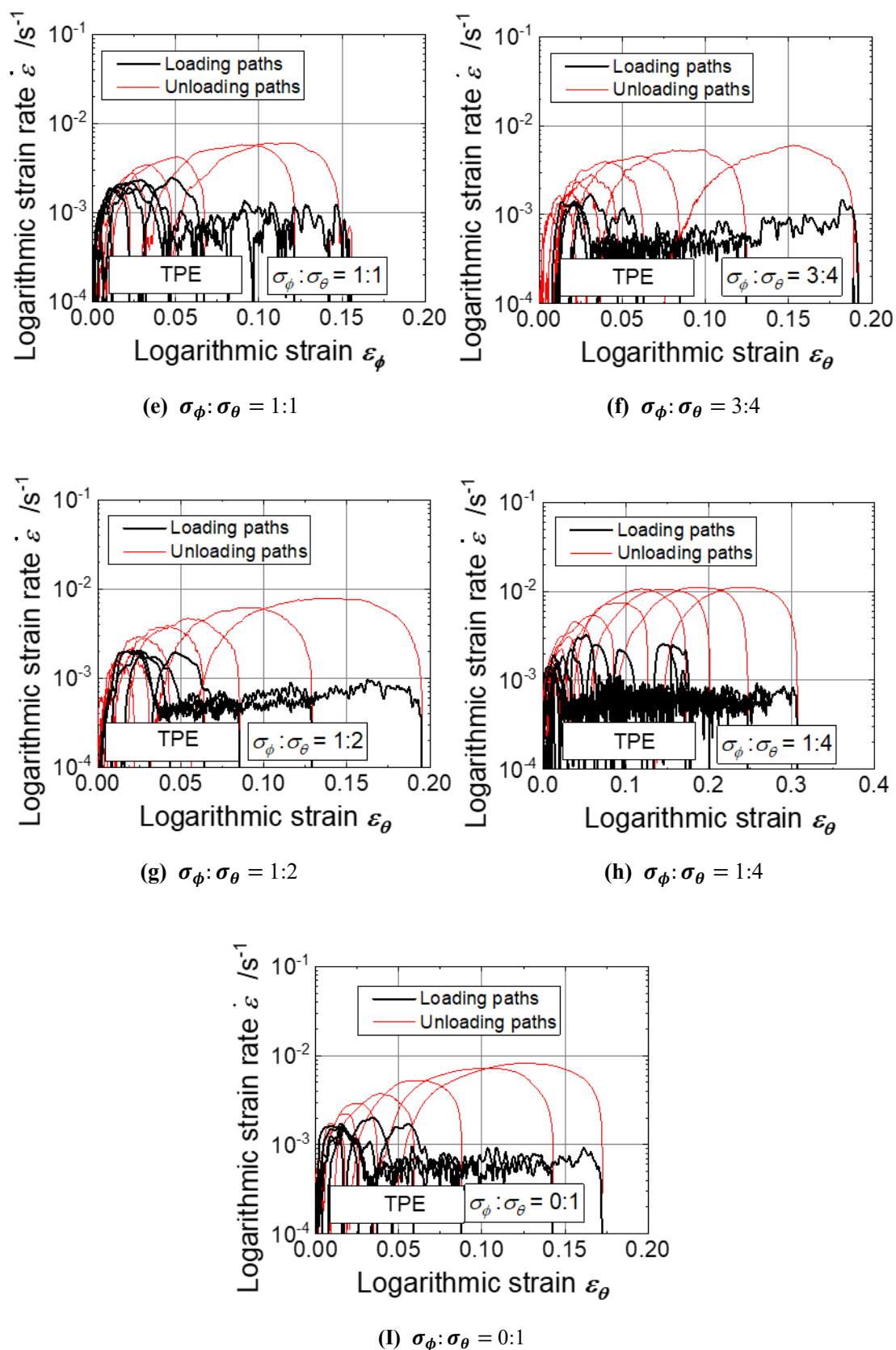


Fig. 4.7 Change in equivalent strain rate with equivalent strain measured along every linear stress path

置しており、応力およびひずみの測定が正常に行われたことを確認した。

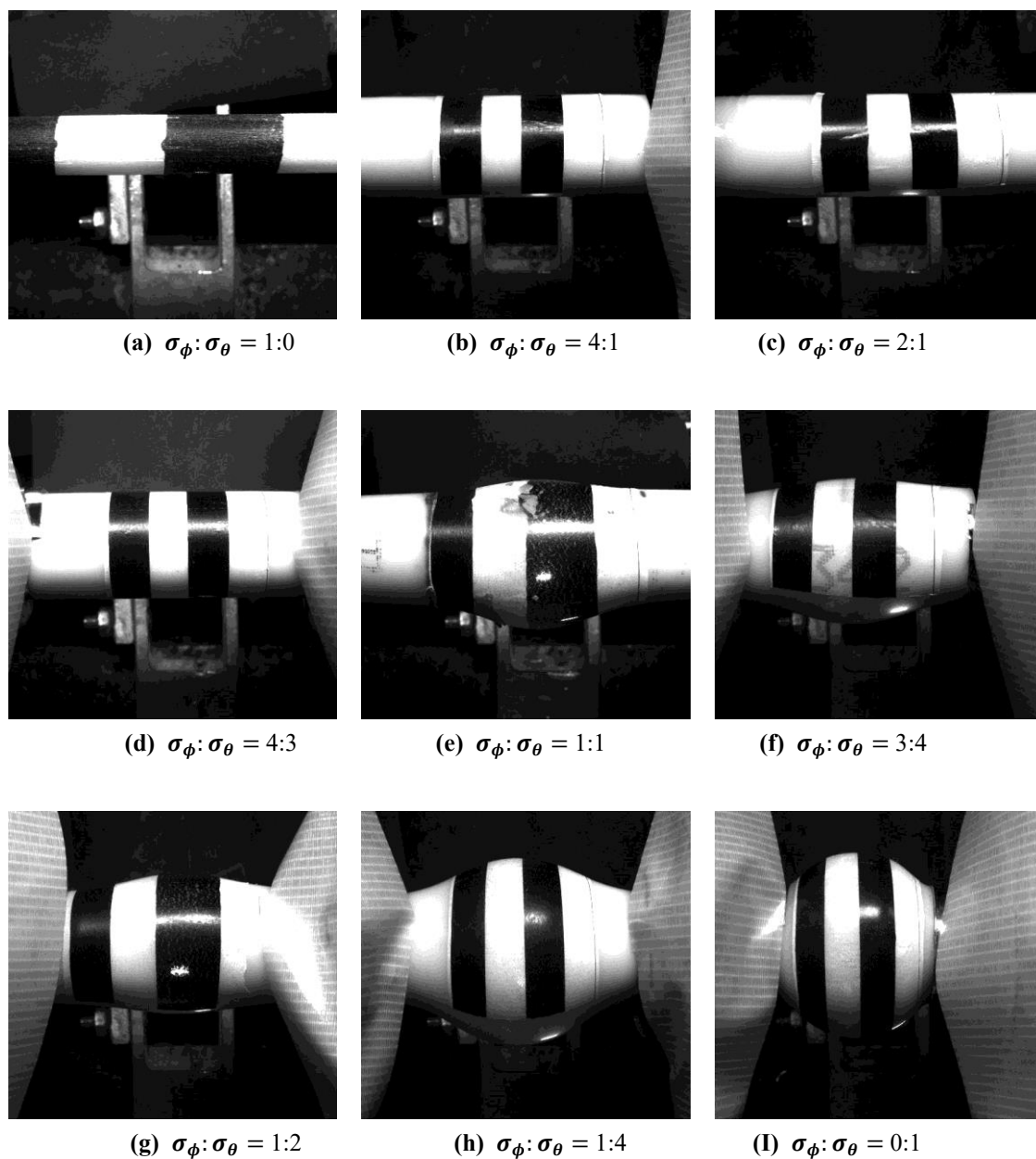


Fig. 4.8 Images of the specimens immediately after completing the experiment with liner stress paths

4.5. 真応力-対数ひずみ線図

単調負荷試験と負荷-除荷試験で測定された真応力-対数ひずみ曲線（ss 曲線）を Fig. 4.9 に示す。黒実線，赤実線がそれぞれ単調負荷試験による ϕ および θ 方向 ss 曲線であり，灰色実線，橙実線が負荷-除荷試験による ϕ 方向， θ 方向 ss 曲線である。

すべての応力経路において，試験片が破断する手前で試験を終了した。その理由を応力経路毎に以下に記す。

- ・ $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 0:1, 1:4, 1:2$ および $3:4$ 負荷-除荷によるチャック部付近に設置した O リングが摩耗し，水漏れが発生し内圧が負荷できなくなった。
- ・ $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1, 4:3$ および $2:1$ 試験片の応力測定部（白黒帯のデカールの範囲）の外側で ϕ 方向に局所的に伸び変形したため，応力測定部の変形が停止した。
- ・ $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0$ 試験片の応力測定部がエリアカメラの ϕ 方向の測定可能範囲上限に達した。
- ・ $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 4:1$ 負荷-除荷により，チャックの把持力が低減し，結果試験片の応力測定部がエリアカメラの ϕ 方向の測定可能範囲から外れた。

単調負荷試験と負荷-除荷試験の結果を比較すると， $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:2$ 以外は，通常の金属材料の ss 曲線同様，単調負荷試験の ss 曲線は負荷-除荷試験の ss 曲線の包絡線となった。 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:2$ においては， $\varepsilon_\theta > 0.07$ のひずみ範囲において，単調負荷試験の応力の方が，負荷-除荷試験の包絡線の応力より大きくなった。

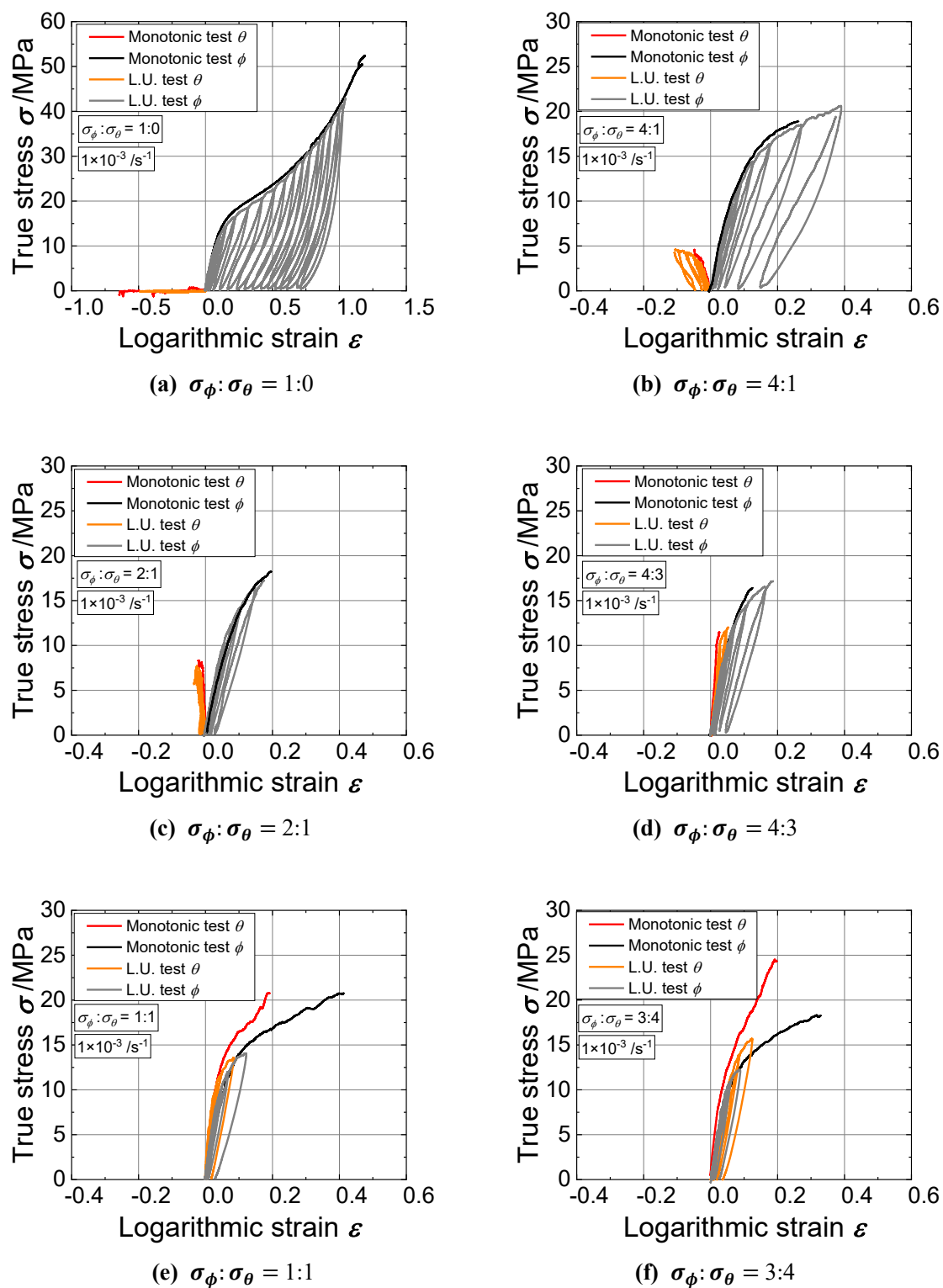


Fig. 4.9 True stress–logarithmic strain curves measured along every linear stress path

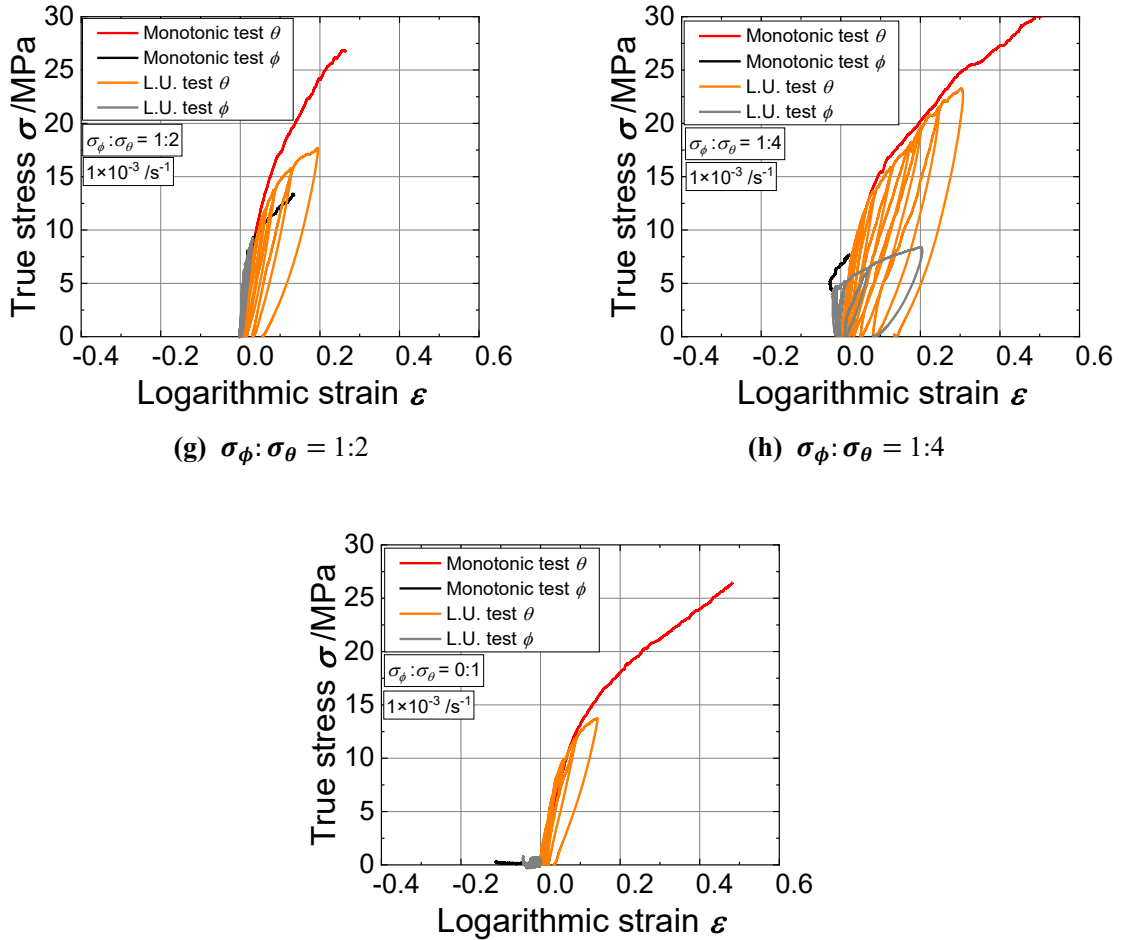


Fig. 4.9 True stress–logarithmic strain curves measured along every linear stress path
(second)

4.6. 真応力–対数塑性ひずみ線図

Fig. 4.9 の実験値から、真応力–塑性ひずみ線図を以下の要領で決定した。単調負荷試験では、測定した真応力–対数ひずみ線図から、最大主応力 $2 \text{ MPa} \leq \sigma_1 \leq 5 \text{ MPa}$ の範囲における ss 曲線を直線近似して弾性率を決定し、全ひずみから弾性ひずみを引くことにより塑性ひずみを求め、真応力–塑性ひずみ線図を決定した。負荷–除荷試験に対しては、Fig. 4.9 で測定した真応力–対数ひずみ線図から、完全除荷時の残留ひずみを塑性ひずみ ε^p とし、それと対応する除荷直前の真応力 σ との関係性を求めた。それらの測定結果を Fig. 4.10 にプロット点で示す。負荷–除荷試験から測定した真応力–塑性ひずみ線図と、単調負荷試験から算出した真応力–塑性ひずみ線図は概ね一致していることから、後者において決定された弾性ひずみの妥当性が確認できた。また、単調負荷試験の方が、どの応力比においても、より大きな塑性ひずみまで ss 曲線を測定することができた。

本供試材の ss 曲線は、等方性の von Mises 降伏条件に従うと仮定した材料（ミーゼス材料）のそれとは以下の点で異なり、強い異方性を有することがわかる。

- $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1$ では、ミーゼス材料の ϕ 方向と θ 方向の ss 曲線は一致する。一方、本供試材では、同

じ応力に対して ε_ϕ^p は ε_θ^p の2倍程度大きく、 θ 方向の方が強度が高い。

・ $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 2:1$ および $1:2$ では、ミーゼス材料のss曲線は両応力経路で一致する。一方、本供試材で $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 2:1$ と $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:2$ を比較すると、 $\sigma = 14\text{MPa}$ までの最大主応力方向の真応力-対数塑性ひずみ線図は一致しているものの、 $\sigma > 14\text{MPa}$ では、 θ 方向の方が強度が高い。これは、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1$ において θ 方向の方が強度が高くなる測定結果と整合する。

本研究ではひずみ速度一定条件下で試験を実行したため、試験片に負荷される応力およびひずみの測定値は微小な振動を示す。そこで、本研究では、測定された真応力-塑性ひずみ線図を、式(6.1)のJohnson-Cookモデルで近似し、その近似曲線に基づいて等塑性仕事面と塑性ひずみ速度 D^p の方向 β を算出した。

$$\sigma = (C_0 + C_1 \varepsilon^x) \quad (6.1)$$

$\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:4$ における管軸方向にはひずみが減少した後に増加する。このため、減少から増加に切り替わる点でデータを分け同定を行った。

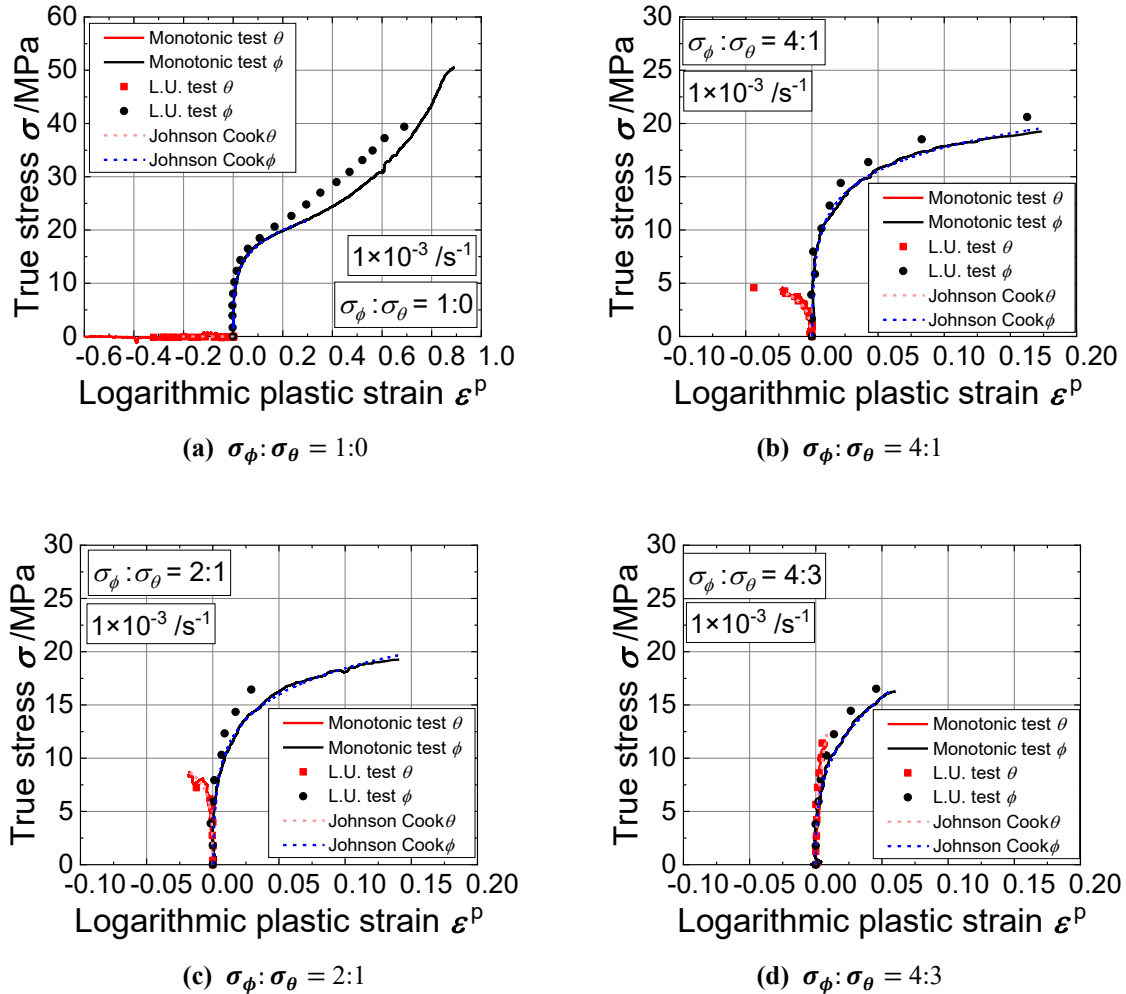


Fig. 4.10 True stress-logarithmic plastic strain curves measured along every linear stress path

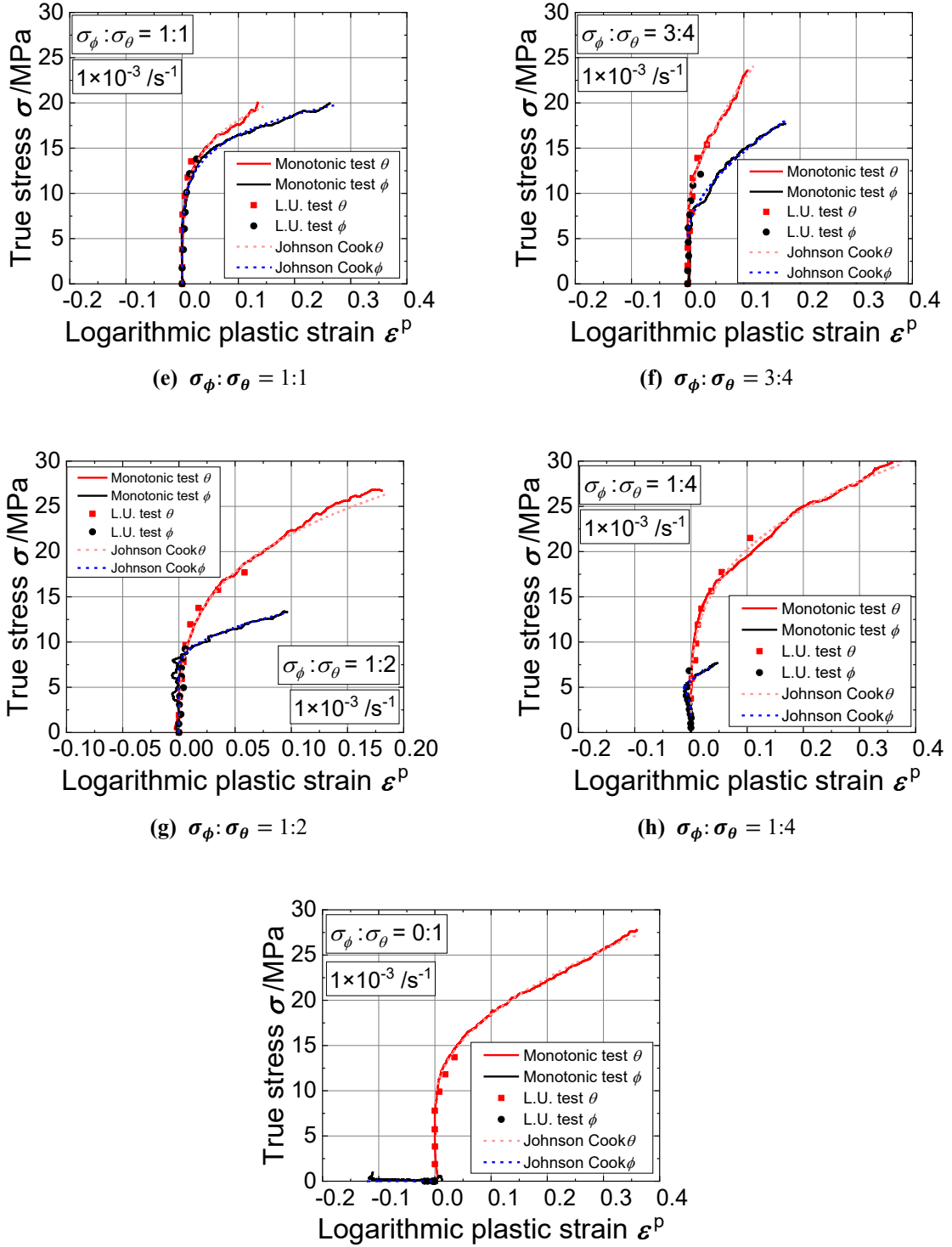
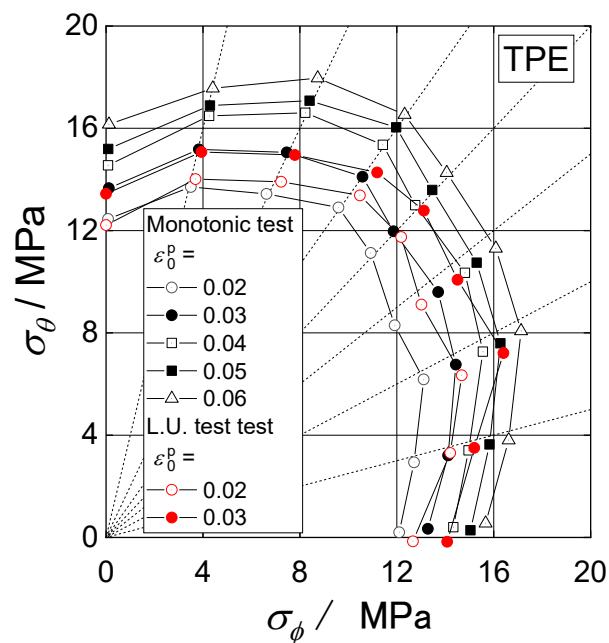


Fig. 4.10 True stress–logarithmic plastic strain curves measured along every linear stress path

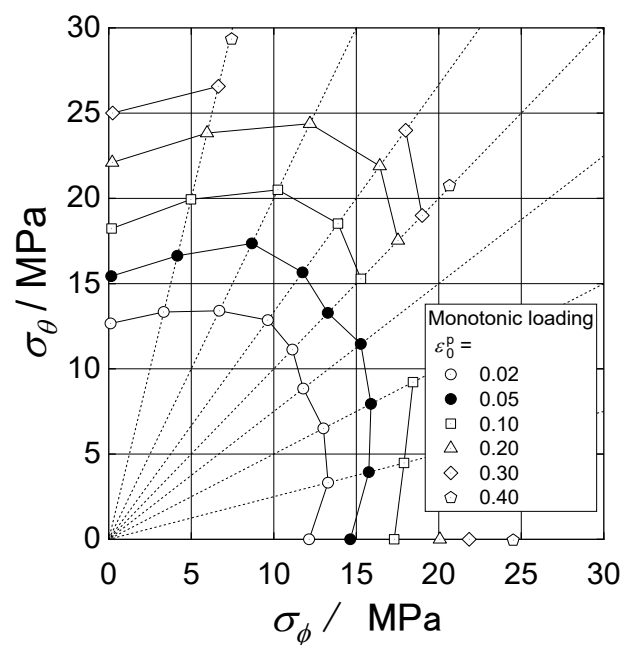
C_0 , C_1 , x は、実験値と近似式と差分をニュートンラプソン法で最小にする手法で決定した。結果を Fig. 4.10 に破線で示す。いずれの応力比においても、真応力–塑性ひずみ曲線の測定値を精度よく近似できている。

4.7. 等塑性仕事面

本供試材の二軸応力状態における硬化挙動を定量的に評価し可視化するために、以下の方法で等塑性仕事面を測定した。まず、 ϕ 方向単軸引張試験において、 ϕ 方向の塑性ひずみ ε_0^p に達した瞬間における真応力 σ_0 とそれまでになされた単位体積あたりの塑性仕事 W_0 を測定する。他の応力経路においては、 W_0 と等量の塑性仕事が消費された時点の真応力 $(\sigma_\phi, \sigma_\theta)$ を測定して主応力空間にプロットし、その集合をもって等塑性仕事面を決定した。等塑性仕事面の測定結果を Fig. 4.11 に



(a)



(b)

Fig. 4.11 Stress points forming contours of equal work

示す。構成する応力点が測定できたのは $\varepsilon_0^p = 0.05$ までであった。一方、 $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 4:3$ 以外の応力経路では、さらに大きな塑性ひずみ範囲まで測定できたため、最大 $\varepsilon_0^p = 0.40$ までの応力点を記載した。Fig. 4.11(a)で9経路すべての応力比で測定が行うことができた結果を示す。Fig. 4.11(b)では単調負荷試験の結果から測定した結果を基準塑性ひずみ $\varepsilon_0^p = 0.4$ まで示す。図中のプロット点は真応力－塑性ひずみ曲線の測定値から直接得られた実験値、折れ線はJohnson-Cookモデルで近似された真応力－塑性ひずみ曲線から決定した実験値である。両者の等塑性仕事面の測定点は4%以内の差で一致した。

まず単調負荷試験と負荷－除荷試験との結果を比較する。Fig. 4.10で、円周方向の特性は両者概ね一致していたため、円周方向最大主応力下での試験の等塑性仕事面の形状は一致する。一方で、管軸方向最大主応力の試験に注目すると、同じ基準塑性ひずみで比較すると、単調負荷試験の結果は負荷－除荷試験の結果より大きい値となった。本研究ではより大ひずみまで測定することができた単調負荷試験により測定された結果を用いて材料モデリングを行った。

各 ε_0^p における等塑性仕事面の相似性を調べるため、等塑性仕事面を構成する応力点の値を当該の ε_0^p に対応する σ_0 で除して無次元化した無次元化等塑性仕事面をFig. 4.13に示す。 $\sigma_\phi < \sigma_\theta$ の応力状態で $0.02 \leq \varepsilon_0^p \leq 0.20$ のひずみ範囲において最大で10%膨張する傾向、すなわち異方硬化が確認された。

4.8. Yld2000-2d 降伏関数の同定

この材料では、9経路全てにおいて等塑性仕事面を構成する応力点が測定できた、 $\varepsilon_0^p = 0.05$ における等塑性仕事面とD^pの方向の実験値に基づいて材料モデルを構築する。Yld2000-2d降伏関数は次数 M 、異方性係数 α_i の($i = 1 \sim 8$)の9個のパラメータで決定される。 M 及び α_i の決定には遺伝的アルゴリズム(GA法)を採用し、式(15)に示す評価関数 F を最小化するように決定した²⁷⁾。

$$F = \sum_{j=1}^N w_{j,\sigma} (\alpha_{j,C} - \alpha_{j,M})^2 + \sum_{j=1}^N w_{j,\beta} (\beta_{j,C} - \beta_{j,M})^2 \quad (15)$$

$w_{j,\sigma}$, $w_{j,\beta}$ の値は、以下の三つの場合(A), (B), (C)に分けて決定した。

- (A) 等塑性仕事面の再現性を重視した場合
- (B) β について、管軸方向が最大主応力になる応力経路($\sigma_\phi > \sigma_\theta$)の実験値の再現性を重視した場合
- (C) β について、円周方向が最大主応力になる応力経路($\sigma_\phi < \sigma_\theta$)の実験値の再現性を重視した場合

(A), (B), (C)で用いた $w_{j,\sigma}$, $w_{j,\beta}$ の値をTable 4.1に示す。

von Mises降伏関数ならびに先に述べた(A), (B), (C)3種類の方法で同定したYld2000-2d降伏関数による降伏曲面の計算値をFig. 4.13に、D^pの計算値とD^pの実験値との比較をFig. 4.12に示す。まず等塑性仕事面(Fig. 4.13)に注目する。Yld2000-2d(A)は、最も実験値との乖離が見られる $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 1:1$ でも4%以内で再現できており、(A), (B), (C)の中で最も精度よく実験値を再現した。一方で、Yld2000-2d(B)とYld2000-2d(C)による計算値を比較すると、両者ともに、 $\sigma_\phi < \sigma_\theta$ なる応力経路では、実験値を5%程度大き目に予測している。また $\sigma_\phi > \sigma_\theta$ なる応力経路では、 β の再現精度に重みを置いた(C)の方が(B)よりも実験値から乖離する結果となった。

次に、 β (Fig. 4.12)に注目する。Yld2000-2d(A)は、 $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 0:1$ (応力角 $\varphi = 90^\circ$)を除き、全般に実験値を過大に評価する結果となり、 $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 4:3$ において最大で15°乖離した。Yld2000-2d(B)と

Yld2000-2d(C)による計算値を比較すると、前者は $\sigma_\phi:\sigma_\theta=4:3$ において 9° 、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta=3:4$ において 11° 、後者は $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:1$ において 14° 実験値と乖離しているが、それら以外の応力経路では実験値を概ね再現できている。

Fig. 4.13 と Fig. 4.12 の結果を総括すると、少なくとも本供試材の場合、等塑性仕事面の形状と β を同時に精度よく予測することができる Yld2000-2d 降伏関数を決定することはできなかった。従って、供試材の変形挙動を第1次近似的に予測したい場合は Yld2000-2d(A)を用いて関連流れ則を適用することが推奨される。一方、材料の加工硬化挙動と変形挙動を同時に精度よく予測計算したい場合には、降伏関数には Yld2000-2d(A)を用い、塑性ポテンシャルには Yld2000-2d(B)を用いる、非関連流れ則に基づく定式が推奨される。

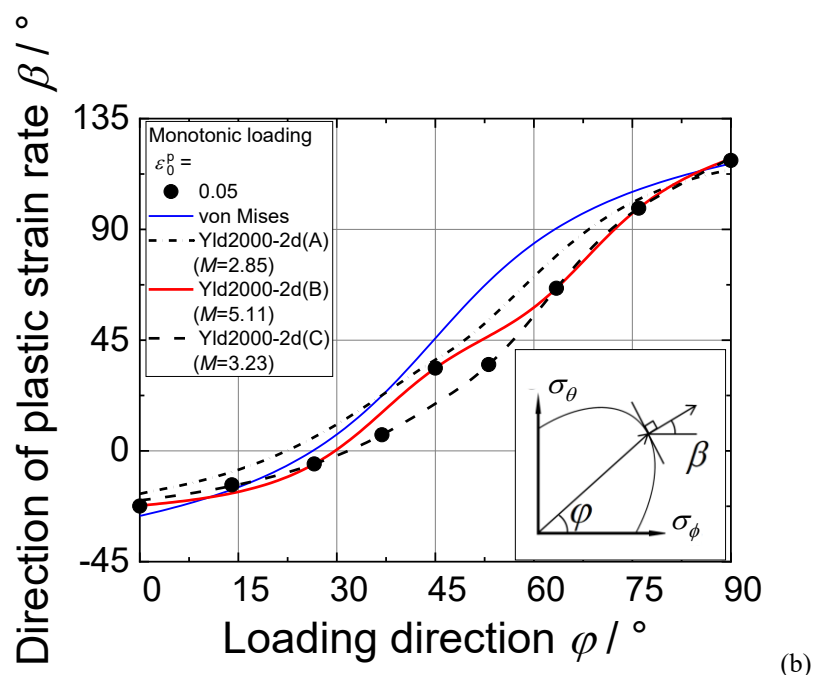


Fig. 4.12 Measured direction of plastic strain rates with Yield function identified at reference strain $\varepsilon_0^p=0.05$

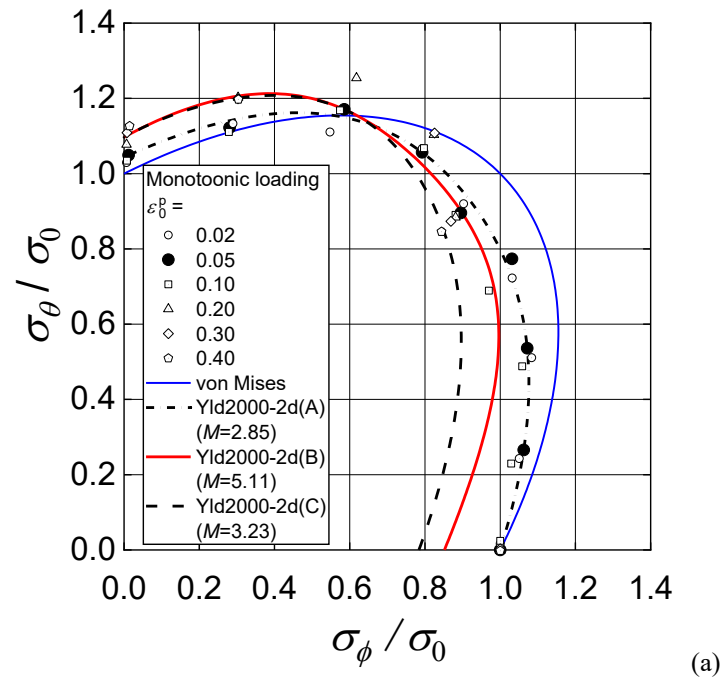


Fig. 4.13 Stress points forming work contours normalized by the uniaxial tensile flow stress σ_0 associated with the respective ϵ_0^p with Yield function identified at reference strain $\epsilon_0=0.05$

Table 4.1 Values of $w_{j,\sigma}$ and $w_{j,\beta}$

Stress ratio $\sigma_\phi : \sigma_\theta$	Method A		Method B		Method C	
	$w_{\sigma,i}$	$w_{\beta,i}$	$w_{\sigma,i}$	$w_{\beta,i}$	$w_{\sigma,i}$	$w_{\beta,i}$
1:0	100	1	10	1	1	100
4:1	100	1	5	10	1	100
2:1	100	1	10	10	1	100
4:3	100	1	0	10	1	100
1:1	100	1	10	10	1	100
3:4	100	1	0	5	1	100
1:2	100	1	10	10	1	100
1:4	100	1	5	10	1	100
0:1	100	1	5	10	1	100

4.9. 樹脂円管の二軸変形挙動

第3章における供試材である LDPE と、本章における供試材である TPE を比較する．まず単軸応力状態については， $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:0$ 及び $\sigma_\phi:\sigma_\theta=0:1$ の真応力-対数全ひずみ線図の形状は LDPE については一致したが，TPE については θ 方向応力の方が強度が高い結果となった．次に塑性変形特性に注目する．Fig. 4.14 に LDPE 及び TPE の単軸応力下における負荷除荷試験により測定した真応力-対数塑性ひずみの測定結果を示す．LDPE と TPE については，管軸方向と円周方向の単軸引張特性は共に一致した．つまり塑性変形特性については等方性を示した．

単調負荷試験の結果と負荷除荷試験の結果を比較する LDPE 及び TPE は，単調負荷試験と，負荷除荷試験の包絡線は一致した．このことから，今回の負荷除荷回数である 30 回以下であれば，負荷除荷による後続の変形挙動への影響は出ないことがわかる．

次に二軸応力-対数ひずみ特性に注目する．両者ともに θ 方向の方が強度が高い．さらに $\sigma_\phi:\sigma_\theta=2:1$ および $1:2$ においては変形と共に， $\sigma_\phi:\sigma_\theta=2:1$ では ε_θ が圧縮側に増大し， $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:2$ では， ε_ϕ が引張側に増加する傾向も一致した．等塑性仕事面に注目すると，両者とも円周方向に張り出す傾向を示すものの，等二軸応力状態となる $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:1$ において LDPE は単軸引張試験の結果よりも内側に測定点がプロットされたのに対し，TPE は単軸試験と同程度の

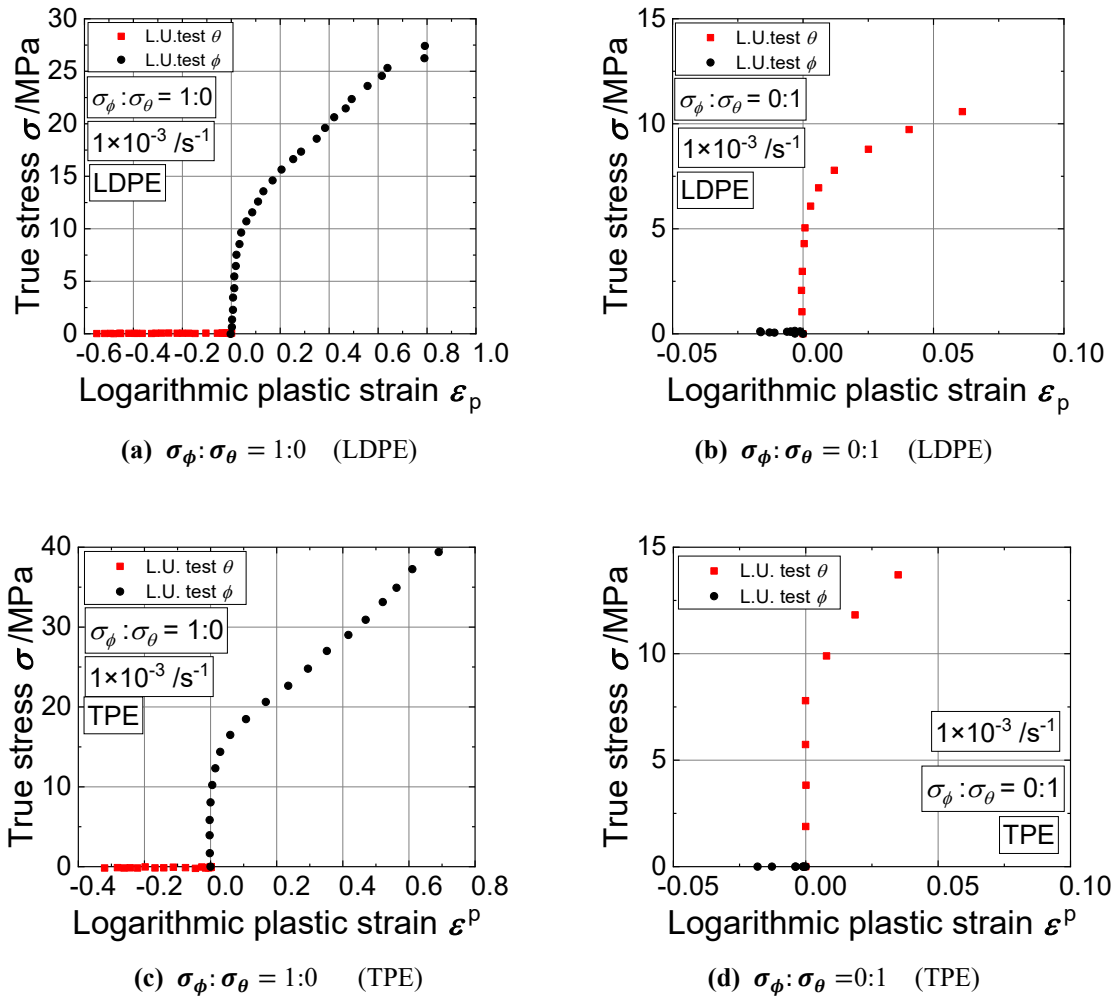


Fig. 4.14 True stress-logarithmic plastic strain curves measured along every linear stress path

第4章熱可塑性エラストマー円管の二軸応力試験と材料モデリング

値が測定された。この点において、両者の形状には統一的な傾向は見出すことができず、二軸応力試験を行わなければ、正確な等塑性仕事面を予測することは困難である。

4.10. 結言

樹脂材料用の二軸バルジ試験機を製作し、熱可塑性エラストマー円管材に対して、二軸応力試験を実施した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 本供試材は、二軸引張応力状態では強い異方性を示した。例えば、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1$ では、同一の応力値に対して ε_ϕ は ε_θ の2倍大きくなり、強い異方性を有することがわかった。すなわち、通常行われている管軸方向の単軸負荷試験に比べて、二軸バルジ試験方法を用いることにより、供試材の機械的性質をより精密に評価可能である。
- (2) 単調負荷試験と負荷－除荷試験で測定された $\sigma_\phi - \varepsilon_\phi$ および $\sigma_\theta - \varepsilon_\theta$ 曲線を比較した結果、通常の金属材料のss曲線と同様、単調負荷試験のss曲線は負荷－除荷ss曲線の包絡線とほぼ一致した。ただし、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:2$ においては、 $\varepsilon_\theta > 0.07$ のひずみ範囲において、単調負荷試験の応力の方が、負荷－除荷試験の包絡線の応力より大きくなった。
- (3) 少なくとも本供試材の場合、等塑性仕事面の形状と β を同時に精度よく予測することができるYld2000-2d降伏関数を決定することはできなかった。従って、供試材の変形挙動を第1次近似的に予測したい場合は、等塑性仕事面の再現精度に優れるYld2000-2d (A)に関連流れ則を適用した材料構成則が推奨される。一方、材料の加工硬化挙動と変形挙動を同時に精度よく予測計算したい場合には、降伏関数にはYld2000-2d (A)を用い、塑性ポテンシャルにはYld2000-2d (B)を用いる、非関連流れ則に基づく材料構成則の構築が推奨される。

第 5 章

結論

5.1 結言

本研究では、現在最も生産量が多い樹脂材料である、LDPE と、大型船舶が発着する栈橋に設置され、大変形をしながら着岸の衝撃を軽減する緩衝工等に採用される材料である、ポリエステルを主成分とする熱可塑性エラストマー（TPE, 東洋紡株式会社製）の二軸応力下における弾塑性変形挙動を明らかにすることを目的した。

樹脂材料に任意の二軸応力状態を負荷することができる二軸バルジ試験機を設計・製作した。この試験機を用いて、精密に制御された線形応力経路による二軸応力試験を実施し、材料の二軸変形挙動を測定した。さらに塑性ひずみの測定方法として、2種類の手法を検討し、両者を比較してその特性を評価・検証した。さらに測定された二軸変形特性に基づいて、降伏関数を用いた材料モデルを作成した。

第1章では、本研究にかかわる社会的背景を述べ、LDPE と TPE の適用事例について述べた。さらに樹脂材料に二軸応力を負荷し、材料の変形挙動を測定する試験方法の現況と関連研究を概説し、それらを踏まえたうえで、本研究の意義を述べた。

第2章では、本研究で設計・製作した、樹脂材料に適した二軸応力試験機（以下、二軸バルジ試験機）について、そのハードウェアを記述し、作成した二軸バルジ試験機のアクチュエータとセンサの制御PCへの接続方法及び、制御プログラムを解説した。線形応力経路下で単調に二軸応力を負荷する試験方法（単調負荷試験）におけるひずみ速度の制御方法と、負荷除荷を繰り返しながら試験を行う方法（負荷－除荷試験）におけるひずみ速度制御方法について、詳細に説明した。本試験機は、円管樹脂材料に軸力と内圧を同時に付加し、かつ非接触で材料の変形を測定することにより、二軸の真応力－対数ひずみ曲線を測ることができる。真応力と対数ひずみの算出手法についてその詳細を記述した。

第3章では、LDPE 押出し円管を供試材として、二軸応力下における変形挙動を精密に測定した。まず単調負荷試験を行い、真応力-対数全ひずみ曲線を測定した。さらに等仕事面を測定し、その形状を観察することで異方性を評価した。単軸引張応力状態の試験については、管軸方向と円周方向の単軸応力状態では変形特性に差異は見られなかったが、二軸応力下では明らかな異方性を示すことがわかった。すなわち、正確な材料特性の把握には、二軸応力試験が必要不可欠である。さらに詳しい評価のため、真応力-塑性ひずみ曲線の測定方法を提案した。一つの試験片に対して負荷除荷を繰り返し、除荷直前の真応力と除荷時の塑性ひずみの関係から材料の真応力－塑性ひずみ曲線を測定した。この試験結果から等塑性仕事面を測定し、その形状を観察することで、材料の異方性を評価するとともに、異方性降伏関数を用いた材料モデルを提案した。

第4章では、ポリエステル系 TPE 押出し円管の真応力-塑性ひずみの関係を測定した。この材料では、二軸応力単調負荷試験と二軸応力負荷除荷引張試験を実施した。金属材料と同等の手法で二軸応力単負荷引張試験から測定した真応力－対数塑性ひずみの関係と、負荷除荷試験によって測定した真応力負荷除荷引張試験の関係を比較した。さらに、試験結果から等塑性仕事面を測定し、

これに異方性降伏関数を適用することで、同材料でシミュレーションを行う際の材料モデルを同定した。その結果、材料の加工硬化挙動と変形挙動を同時に精度よく再現したい場合には、降伏関数には Yld2000-2d (A)を用い、塑性ポテンシャルには Yld2000-2d (B)を用いる、非関連流れ則に基づく材料構成則の構築を推奨した。

本研究全体では、樹脂材料に特化した二軸バルジ試験の制作手法と制御手法を示した。さらに異方性を持つ樹脂材料に対し、二軸バルジ試験を行い、そのデータの処理方法と用途による Yld2000-2d 降伏関数の同定方法の差異を示した。この研究により、樹脂材料が単軸引張試験だけでなく、二軸応力試験による評価が重要であるということ、樹脂材料の用途に応じた材料モデルの同定手法が示せたと考えている。

5.2 今後の展望

樹脂材料では、二軸応力における変形挙動の測定は活発ではない。過去の二軸応力を測定することができる試験機は、コンピュータなどをはじめとする制御機器が極めて高価な時代であったため、限られた条件でのみの試験にとどまっている。現在は制御機器が比較的普及しており、実験装置さえあれば、より特殊な条件下で試験をできる環境が整いつつある。二軸応力だけでなく、更なる、樹脂材料の実験的な材料特性の解明を期待する。

本研究では、二軸バルジ試験を実施したが、材料が均一変形せず、大量の試験をやり直した。また負荷除荷試験では、最長の試験では一回の試験が6時間を超える例などもある。この間にも、危険のため、実験を監視する必要がある。安全装置を多用した無人の試験環境を構築し、時間を有効活用できることになることを期待する。

供試材が均一変形せず、成形限界や破断限界の測定を行うことができなかった。これには、円管試験の肉厚が大きすぎることが問題である可能性がある。本試験機では、材料の肉厚を変更するには、くさびを交換することが必須で、コストがかかる。そのため、肉厚の大きさを頻繁に変更することができる二軸応力試験機により、材料の延伸性の評価をすることが行われることを期待する。

参 考 文 献

- 1) Ayyagari S R, Vural M (2015) Multiaxial yield surface of transversely isotropic foams: Part I—Modeling. *J Mech Phys Solids* 74: 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2014.10.005>
- 2) Chuntao Zhang. Ian D. Moore (1997) Nonlinear Mechanical Response of High Density Polyethylene. Part 1: Experimental Investigation and Model Evaluation, *Polymer Engineering & Science*, 1997, 37-2: 404-413, <https://doi.org/10.1002/pen.11683>
- 3) Chuntao Zhang. Ian D. Moore, (1997) Nonlinear Mechanical Response of High Density Polyethylene. Part 2: Uniaxial Constitutive Modeling, *Polymer Engineering & Science*, 37-2: 414-420, <https://doi.org/10.1002/pen.11684>
- 4) Deshpande V S, Fleck N A (2001) Multi-axial yield behaviour of polymer foams. *Acta Mater* 49: 1859–1866. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00058-1)
- 5) Duvall D E, Edwards D B (1993) Creep and Stress Rupture Testing of Polyethylene Sheet under Equal Biaxial Tensile Stresses. *J Reinf Plast Compos* 12: 285–295. <https://doi.org/10.1177/073168449301200303>
- 6) F. Barlat, J.C. Brem, J.W. Yoon, K. Chung, R. E. Dick, D. J. Lege, F. Pourboghra, S.-H. Choi and E. Chu, (2003) Plane stress yield function for aluminum alloy sheets — part 1: theory, *Int. J. Plast.* 19 1297–1319.
- 7) Frederik Van Loock. Norman A. Fleck, Deformation and failure maps for PMMA in uniaxial tension. 2018, *Polymer.*, 148 259-268. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.06.027>
- 8) G. Ayoub, F. Zaïri, M. Naït-Abdelaziz, J.M. Gloaguen. 2010, Modelling large deformation behaviour under loading–unloading of semicrystalline polymers: Application to a high density polyethylene. *International Journal of Plasticity* 26 329–347. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2009.07.005>
- 9) Hakoyama T, Kuwabara, T (2015) Effect of Biaxial Work Hardening Modeling for Sheet Metals on the Accuracy of Forming Limit Analyses Using the Marciniak-Kuczyński Approach. *From Creep Damage Mechanics to Homogenization Methods* :67-95. 10.1007/978-3-319-19440-0_4
- 10) Higuchi Y, Nishimura H, Tamamura H (2000) Relationship between Molecular Structure of Polyethylene Resins and Long-term Performance of Polyethylene Pipes, *Seikei-Kakou* 12:175-180. <https://doi.org/10.4325/seikeikakou.12.175>
- 11) Hyakutake H (1976) Anelastic Component of Strain for Polycarbonate. *J Soc Mater Sci Jpn* 25: 760–764. <https://doi.org/10.2472/jsms.25.760>
- 12) ISO 527-1: 2019 Plastics — Determination of tensile properties — Part 1: General principles
- 13) Isogai Y, Wada M, Yokoyama A, Murata M, Sumiyama T, Furuich K, Nonomura C (2018) Deformation Behavior of a Thermoplastic Elastomer-Finite Element Analyses for Heat Generation Phenomenon in Large Deformation-. *J Jpn Soc Polym Process* 30: 594–602. <https://doi.org/10.4325/seikeikakou.30.594>

- 14) Kengo YOSHIDA (2013) Evaluation of Stress and Strain Measurement Accuracy in Hydraulic Bulge Test with the Aid of Finite-element Analysis, *ISIJ International* 53:86-95, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.86>
- 15) Kitagawa M, Matsutani T (1988) Stress-Strain Curve in Polyethylene. *J Soc Mater Sci Jpn* 37: 1391–1396. <https://doi.org/10.2472/jsms.37.1391>
- 16) M Mooney (1940) A Theory of Large Elastic Deformation, *Journal of Applied Physics* 11: 582-592. <https://doi.org/10.1063/1.1712836>
- 17) M.A. Guseva, V.A. Gerasin, B.F. Shklyaruk, V.A. Dubinskiy (2018) Relation between thermal effects and structural changes under deformation of thermoplastics, *Polymer* 144- 23 18-32. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.04.023>
- 18) Makinouchi, A., Fujiwara, K. & Maeda, T. (1970) The Yield Condition of Polycarbonate under Biaxial Stress Fields, *Journal of Japan Society for Technology of Plasticity*, **11**-110, 192–201.
- 19) Mita, S., Yamashita, K., Nonomura, C. (2004) Influence of the Bow Collision Condition on the Characteristic of the New Material Fender with Bridge Piers, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A*, **70**-693 , 703–709.
- 20) Morishita T (1986) Prediction of Yield Condition for Plastics under Biaxial Stress Fields. *J Soc Mater Sci Jpn* 35: 1267–1271. <https://doi.org/10.2472/jsms.35.1267>.
- 21) Nitta K, Nomura H (2014) Stress–strain behavior of cold-drawn isotactic polypropylene subjected to various drawn histories, *Polymer* 55-25 6614-6622. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.10.028>
- 22) Nonomura C, Negishi K, Yamashita K, Kamata S, Araki Y, Matsuyama Y (2000) Deformation Behavior of Thermoplastics Elastomer Molding (2) -Compressive Deformation Analysis of Cylindrical Molding by Finite Element Method-. *J Jpn Soc Polym Process* 12: 516–522. <https://doi.org/10.4325/seikeikakou.12.516>
- 23) Negishi, K., Nonomura, C., Yamashita, K., Kamata, S., Araki, Y. & Matsuyama, Y. (2000) Deformation Behavior of Thermoplastic Elastomer Molding (1) -Observation for Static Compressive Deformation Behavior of Cylindrical Molding -, *Journal of the Japan Society of Polymer Processing*, 12-7, 451–456. <https://doi.org/10.4325/seikeikakou.12.451>
- 24) Peiyu Y, Li Z, Xuefeng P, Fuqiang Z, Zaixing Y, Xuelian H (2020) The effect of branched structure on the lamellae evolution under uniaxial extension and SCG resistance of polyolefins, *Polymer Testing* 87 106555. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106555>
- 25) R W Ogden (1984) *Non-linear Elastic Deformations*, Dover Publications.
- 26) S.Ahzi, A. Makradi, R.V.Gregory, D.D.Edie. (2003) Modeling of deformation behavior and strain-induced crystallization in poly(ethylene terephthalate) above the glass transition temperature. *Mechanics of Materials* 35-12 1139-1148
- 27) Sakaguchi K, Kawabata S, Kawai H, Hazama N (1968) Biaxial Tensile Tester for Flat Plates. *J Soc Mater Sci Jpn* 17: 356–360. <https://doi.org/10.2472/jsms.17.356>

- 28) Sakaguchi K, Kawabata S, Kawai H (1969) Determination of Mechanical Moduli of Polymeric Materials by Biaxial Tensile Testing. *J Soc Mater Sci Jpn* 18: 325–329. <https://doi.org/10.2472/jsms.18.325>
- 29) Shafiq M, Ayyagari S R, Ehaab M, Vural M (2015) Multiaxial yield surface of transversely isotropic foams: Part II—Experimental. *J Mech Phys Solids* 76: 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2014.10.009>
- 30) Tatenami T, Saito K (1970) A Study of Plastic Flow of Polycarbonate Resin. *J Jpn Soc Technol. Plast* 11: 608–616.
- 31) Zeng F, Grogne L P, Lacrampe F M, Krawczak P (2010) A constitutive model for semi-crystalline polymers at high temperature and finite plastic strain: Application to PA6 and PE biaxial stretching. *Mechanics of Materials* 42: 686–697. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2010.04.006>
- 32) 飯田昌造, 坂見宏 (1977) 高密度ポリエチレンのネッキング応力, *高分子論文集* 34: 75-83. <https://doi.org/10.1295/koron.34.75>
- 33) 伊東章 (2018) ポリエチレン-ガスからプラスチックを作る-. *化学と教育* 66: 252-253. https://doi.org/10.20665/kakyoshi.66.5_252
- 34) 磯貝悠美子, 古市謙次, 住山琢哉, 山下勝久, 野々村千里, (2017) 熱可塑性ポリエステルエラストマー成型品の変形挙動—ハニカム型成形品の圧縮変形解析— *成形加工* 第29巻5号168-173. <https://doi.org/10.4325/seikeikakou.29.167>
- 35) 磯貝悠美子, 和田将宜, 横山敦士, 村田真伸, 住山琢哉, 古市謙次, 野々村千里 (2018) 熱可塑性エラストマーの変形挙動—デジタル画像関連法とサーモグラフィックカメラの同時計測による真ひずみと温度観測— *成形加工* 第30巻5号 210-214. <https://doi.org/10.4325/seikeikakou.30.209>
- 36) 井上貴之 (2016) 人工関節の設計・製造プロセスの現状・課題・展望, *Materia Jpn. (Bull. Jpn. Inst. Met.)*, **55-4**, 137–141.
- 37) 浦野宏太, 木村吉昭, 鍛冶川賢一, 中川大輔, 鈴木康弘, 長尚希, 庄山正彦, 井上浩, 弓指勝, 池田啓介(2019) 地下埋設物の毀損事故防止に向けた調査・研究, 令和元年度全国会議(水道研究発表会) 講演集 セッション ID: 9-40 952-953 https://doi.org/10.34566/jwwaproc.2019.0_952
- 38) 大庭敏之, (2017) 自動車に期待される高分子材料, *日本ゴム協会誌* 90: 428-432. <https://doi.org/10.2324/gomu.90.427>
- 39) 大庭敏之, (2017) 自動車軽量化の現状と将来展望—樹脂化と接着技術への期待—, *日本接着学会誌* 49: 260-266. <https://doi.org/10.11618/adhesion.49.260>
- 40) 大堀雅司, 佐藤千明, 池上皓三 (1994) 熱硬化性樹脂の効果過程における粘弾性特性と内部応力, *材料*, 第43巻484号 18-22. <https://iss.ndl.go.jp/books/R100000002-I000000009135-00>
- 41) 葛良忠彦 (2009) ガスバリア包装材料の技術動向, *成形加工* 第21巻 5号, 234-240. <https://doi.org/10.4325/seikeikakou.21.234>
- 42) 金子武司, 畑中哲夫, 道浦吉貞, 笹山太, 府川栄治, 渡部公亮, 宮原裕享, 鈴木賢一, 太田宏

- 一、有吉寛記 (2019) 水道管路におけるアセットマネジメントの実践に向けた実行可能なミクロマネジメント構築の取組み (Ⅲ-Ⅱ) -導水管のミクロマネジメントデータ活用による評価手法検討Ⅲ-, 令和元年度全国会議(水道研究発表会)講演集 セッション ID: 5-67 594-595. https://doi.org/10.34566/jwwaproc.2019.0_594
- 43) 川崎愛, 小林卓哉, 村田真伸, 西脇武志, 山下勝久, 野々村千里 (2013) ポリエステル系熱可塑性エラストマーの高速引張挙動, M&M 材料力学カンファレンス : OS0502 https://doi.org/10.1299/jsmemm.2013_OS0502-1_
- 44) 川崎愛, 渡辺洋一, 村田真伸, 西脇武志, 金谷知子, 磯貝悠美子, 古市謙次, 山下勝久, 野々村千里 (2014) 切り欠き付き試験片による樹脂材料の計測と解析, 計算工学講演会論文集 19:
- 45) 木村博, 山口拓治, 井町正樹, 柳川昭明, (1972) ポリエチレンフィルム of 非線形粘弾性挙動, 材料, 第21巻 224号 463-468. <https://doi.org/10.2472/jsms.21.463>
- 46) 北尾幸市, 鶴田秀和 (1995) ポリエチレンの衝撃特性に及ぼす結晶化度の影響, 高分子論文集 52: 174-180. <https://doi.org/10.1295/koron.52.174>
- 47) 北尾幸市 (1997) ポリエチレンの脆性-延性遷移温度に及ぼす結晶化度の影響, 高分子論文集 54: 519-525. <https://doi.org/10.1295/koron.54.519>
- 48) 久我睦男 (1979) 多層フィルムの二軸配向, 繊維学会誌 第35巻 第7号 198-202. https://doi.org/10.2115/fiber.35.7_P198
- 49) 桑原利彦・池田聡 (1999) 十字形試験片を用いた2軸引張試験による冷間圧延鋼板の等塑性仕事面の測定と定式, 塑性と加工, 40-457, 145-149.
- 50) 桑原利彦・池田聡, 平面ひずみ引張を受ける鋼板の加工硬化特性の測定と解析, 鉄と鋼, 88-6 (2002), 334-339. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.88.6_334
- 51) 桑原利彦・堀内義雄・上間直幸・ヤナジエールハイモヴァ(2007) 金属薄板の面内に引張圧縮組合せ応力を負荷する材料試験法, 塑性と加工, 48-558, 630-63.
- 52) 桑原利彦・成原浩二・吉田健吾・高橋進 (2003) 軸力と内圧を受ける5000系アルミニウム合金管の塑性変形特性の測定と解析, 塑性と加工, 44-506, 281-286.
- 53) 楠本大典, 鯉塚章央, 宮本政英, 中野公彦, 河野俊一 (2005) 二軸延伸成形におけるフィルム変形シミュレーション解析に関する基礎的研究(材料力学 III), 日本機械学会講演論文集 中国四国支部第43期総会・講演会 2005第43巻 <https://doi.org/10.1299/jsmeecs.2005.43.23>
- 54) 児玉信次郎 (1983) 高圧法 ポリエチレン 開発への道, 高分子 32: 14-17. <https://doi.org/10.1295/kobunshi.32.14>
- 55) 小松公栄, 寺西丕, (1988) 熱可塑性エラストマー概論, 日本ゴム協会誌, 第61巻 第2号 65-78. <https://doi.org/10.2324/gomu.61.65>
- 56) 清宮理, 宮城敏明, 石川雅美 門倉博之 (1996) 船舶と橋梁の杭式緩衝工との衝突解析, 土木学会論文集, 第1996巻 540号 49-57, https://doi.org/10.2208/jscej.1996.540_49
- 57) 清水明 (1981) 中低圧法低密度ポリエチレンの製造と物性, 有機合成化学協会誌 39: 554-

- 560, <https://doi.org/10.5059/yukigoseikyokaishi.39.554>
- 58) 白鳥英亮, 池上皓三 (1967) 板状試験片を使用する二軸引張試験機の試作, 材料 16: 433-439. <https://doi.org/10.2472/jsms.16.433>
- 59) 白鳥英亮, 池上皓三, 服部敏雄 (1973) 一方向繊維強化プラスチックの力学的挙動, 材料 22: 850-857. <https://doi.org/10.2472/jsms.22.850>
- 60) 庄司邦昭, (1996) 新素材を用いた緩衝工について, 日本造船学会誌, 1996 第810巻 866-869
- 61) 菅原史法, 桑原利彦, (2013) 金属板材の大ひずみ二軸応力-ひずみ曲線の連続測定を可能とする二軸バルジ試験機の開発, 塑性と加工, 54-624, 57-63. <https://doi.org/10.9773/sosei.54.57>
- 62) 鈴木哲也 (2014) 送水パイプラインの事故後復旧過程の非破壊安全性診断に関する研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題) 第 70 巻 2 号 I_143-I_148 https://doi.org/10.2208/jscejsp.70.I_143
- 63) 鈴木哲也, 久保成隆, 飯田俊彰, (2013) 弾性波計測による損傷パイプラインの水密性評価に関する研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題) 第 69 巻 2 号 I_49-I_54. https://doi.org/10.2208/jscejsp.69.I_49
- 64) 鈴木哲也, 塩谷智基 (2018) AE 計測に基づく送配水パイプラインの非破壊モニタリング法の開発, 農業農村工学会誌 2018 年 第 86 巻 4 号 277-280. https://doi.org/10.11408/jjsidre.86.4_277
- 65) 善光洋文 (2005) 超高分子量ポリエチレンの押出成形技術, 成型加工 17: 239-241 <https://doi.org/10.4325/seikeikakou.17.239>
- 66) 曾田五月也, 和田純一, 平田裕一, 山中久幸 (1994) 繰返加力実験にもとづく粘弾性ダンパーの力学モデルの構築, 日本建築学会構造系論文集 第 59 巻 457 号 29-36. https://doi.org/10.3130/aijs.59.29_1
- 67) 染宮聖人, 田口尚輝, 平山紀夫, 松原成志朗, 山本晃司, 寺田賢二郎 (2022) 粘弾性・粘塑性・損傷複合モデルに対する材料物性値の混合型同定による熱可塑性樹脂の非線形材料挙動の再現と評価, 日本機械学会論文集, 第 88 巻 913 号 22-00178, <https://doi.org/10.1299/transjsme.22-00178>
- 68) 谷村眞治, 林寛幸, 山本照美, 各種プラスチック材料の広ひずみ速度域での動的引張強度特性. 日本機械学会論文集 第77巻780号 1347-1356. <https://doi.org/10.1299/kikaia.77.1347>
- 69) 中山和郎 (2011) プラスチック成型加工の足跡ー塑性加工から機能材料へー. 塑性と加工, 第 52 巻 600 号 K.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 52-600 (2011), 60-64. <https://doi.org/10.9773/sosei.52.60>
- 70) 中川有三, 奥田聰, 古賀満男, 大久保修三, 守谷恒夫 (1962) 硬質塩化ビニルのクリープ試験, 材料試験 第 11 巻 108 号 561-567. <https://doi.org/10.2472/jsms1952.11.561>
- 71) 永井洋三 (2007) ポリエチレン, 日本ゴム協会誌 8: 282-287. <https://doi.org/10.2324/gomu.80.282>
- 72) 西川源太郎, 塩浜雄一, 鈴木剛史 大沼博幹, 清野純史 (2016) 水道排水用ポリエチレン管

- の地震動に対する耐震性評価に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) 第72巻 4号 (地震工学論文集第35巻) I_424-I_433 10.2208/jscejsee.72.I_424
- 73) 西脇武志 (2019) デジタル画像相関法による樹脂の材料試験, 成型加工 31:292-296. <https://doi.org/10.4325/seikeikakou.31.292>
- 74) 西山公典, 小野光正 (2011) J191022 高耐熱二軸延伸フィルムの諸物性 : 芳香族ポリエーテルケトン二軸延伸フィルムの製造および物性([J19102]構造・材料の高度化に向けた宇宙工学と材料力学の展開(2)), 日本機械学会年次大会 第2011巻 セッション ID: J191022 https://doi.org/10.1299/jsmemecj.2011._J191022-1
- 75) 根岸正義, 松谷智彦 (1988) ポリエチレン材の応力・ひずみ曲線. 材料 第37巻423号1391-1396. <https://doi.org/10.2472/jsms.37.1391>
- 76) 根岸聖司, 野々村千里, 山下勝久, 鎌田賢, 荒木良夫, 松山雄二郎 (2000) 熱可塑性エラストマー成型品の変形挙動(1)―円筒型成形品の静的圧縮変形挙動の観測―成型加工 第12巻7号451-456. <https://doi.org/10.4325/seikeikakou.12.451>
- 77) 野々村千里, 根岸聖司, 山下勝久, 鎌田賢, 荒木良夫, 松山雄二郎, (2000) 熱可塑性エラストマー成型品の変形挙動(2)―有限要素法による円筒型成形品の圧縮変形解析―成型加工 第12巻8号516-522. <https://doi.org/10.4325/seikeikakou.12.516>
- 78) 萩原一郎, 自動車の衝突大変形シミュレーション 可視化情報 第11巻 41号 88-96. <https://doi.org/10.3154/jvs.11.88>
- 79) 廣江哲幸, 松尾日出男, 藤原和人, 宮田政信, 柴田陽介, 酒井憲司 (1995) 高密度ポリエチレンの粘塑性変形 : ひずみ速度と温度の影響について, 日本機械学会論文集 A 編 61: 743-749. <https://doi.org/10.1299/kikaia.61.743>
- 80) 廣恵章利. 本吉正信 (1996) 成型加工技術者のためのプラスチック物性入門, 日刊工業新聞社, p339, p.95
- 81) 藤野清久, 宮本喜八郎, 河合弘迪, 堀野恒雄 (1962) ポリエチレンの伸張応力緩和挙動について, 材料試験 第11巻 104号 313-318. <https://doi.org/10.2472/jsms1952.11.313>
- 82) 松本清一, 泉由美子, 今村力三 (1972) 乾式法で作製した二軸延伸ポリ(エチレンテレフタレート) フィルムの構造と機械的性質, 繊維学会誌 第28巻 第6号 179-188. https://doi.org/10.2115/fiber.28.6_179
- 83) 丸山喜久, 伊藤智大, 若松加寿江, 永田茂 (2014) 東北地方太平洋沖地震における宮城県仙台市の水道管被害状況の分析, 土木工学会論文集 A1 (構造・地震工学) 第70巻 3号 377-388. <https://doi.org/10.2208/jscejsee.70.377>
- 84) 三田重雄, 庄司邦昭, 大和俊一郎 (1996) ペルブレン緩衝工に働く波力について, 日本航海学会論文集, 第94巻 51-57. <https://doi.org/10.9749/jin.94.51>
- 85) 三田重雄, 庄司邦昭 (1997) ペルブレン緩衝工の緩衝効果について, 日本航海学会論文集 第97巻 93-101. <https://doi.org/10.9749/jin.97.93>
- 86) 三田重雄. 庄司邦昭, 野々村千里, 山下勝久, 山田敏郎 (2001) 樹脂緩衝工の緩衝特性に関する

- る研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第189巻 201-207.
<https://doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.2001.201>
- 87) 三田重雄, 庄司邦昭, 野々村千里 (1998) 樹脂弾性体の緩衝性能に関する研究-1. 一軟質ポリウレタンフォームの緩衝性能一, 日本航海学会論文集, 第99号 125-131.
<https://doi.org/10.9749/jin.99.125>
- 88) 三田重雄, 庄司邦昭, 野々村千里, 船城健一 (1999) 樹脂弾性体の緩衝性能に関する研究-2. 一船首の寸法による反力-侵入量特性の変化一, 日本航海学会論文集, 第100号 145-151.
<https://doi.org/10.9749/jin.100.145>
- 89) 三田重雄, 庄司邦昭, 野々村千里, 船城健一 (1999) 樹脂弾性体の緩衝性能に関する研究-3. 一ペルプレン緩衝工の反力-侵入量特性の推定-侵入量特性の変化一, 日本航海学会論文集, 第101号 211-218, <https://doi.org/10.9749/jin.101.211>
- 90) 三田重雄, 山下勝久, 野々村千里 (2004) 橋脚用新素材緩衝工の緩衝特性に及ぼす船首衝突状態の影響, 日本機械学会論文集 (A 編) 70-689:120-125
- 91) 宮本圭介 (2020) 粘弾性測定装置, 日本ゴム協会誌 第93巻 7号 240-242, <https://doi.org/10.2324/gomu.93.240>
- 92) 大和俊一郎, 庄司邦昭, 三田重雄, 橋本一明 (1996) 船舶の衝突に対するペルプレン緩衝工の動的特性について, 日本航海学会論文集第94巻 59-62. <https://doi.org/10.9749/jin.94.59>
- 93) 村上大輔, 小林誠一, 島垣俊和, 志澤一之 (2003) ポリマの年塑性大変形挙動に関する熱・力学モデリングとシミュレーション (第一報, ひずみ速度依存性に由来する構成式の非共軸性), 日本機械学会論文集 (A 編) 第68巻668号 674-681. <https://doi.org/10.1299/kikaia.68.674>
- 94) 茂木謙太郎, 増田伸介, 川崎敬生 (2019) 給水装置工事における事故事例分析結果の報告, 令和元年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集 セッション ID: 6-23 952-953
https://doi.org/10.34566/jwwaproc.2019.0_702
- 95) 森田湧也, 鶴田諒平, 笠松昂平, 染谷大地, 小金澤智之, 中山泰生 (2018) 分子動力学シミュレーションを用いたフェノール樹脂の構造-機械特性発現メカニズムの解析, ネットワークポリマー論文集 第39巻 4号 163-171 https://doi.org/10.11364/networkedpolymer.39.4_163
- 96) 山下勝久, 船城健一, 野々村千里, 庄司邦昭, 山田敏郎 (2001) 熱可塑性エラストマー緩衝工の圧縮変形挙動, 理論応用力学講演会 講演論文集 125.
<https://doi.org/10.11345/japanntam.tam51.0.125.0>
- 97) 山本晃司, 石橋慶輝, 染宮聖人, 平山紀夫, 寺田賢二郎 (2019) 繊維強化熱可塑性樹脂の異方性粘弾性構成則における緩和特性と弾性率の温度依存性に関する数値解析的検討, 日本機械学会論文集 第85巻 874号 19-00058 <https://doi.org/10.1299/transjsme.19-00058>
- 98) 吉田晃 (2006) 二軸延伸成形を中心としたフィルム機械の進歩, 成形加工 第18巻 3号 194-200. <https://doi.org/10.4325/seikeikakou.18.194>
- 99) 吉田博次, 山内健司, 松井俊満 (1999) 高密度ポリエチレンと異なるタイプの低密度ポリエチレンの融着海面モノホロジー, 高分子論文集 56: 869-872.

<https://doi.org/10.1295/koron.56.869>

- 100) 吉村英徳, 中原花奈, 大津雅亮 (2020) 金属管の2軸変形における成形限界評価のための部分片側ゴム圧バルジ試験法の開発, 塑性と加工 60 : 219-225.

<https://doi.org/10.9773/sosei.61.219>

付録 A

容積式ポンプの設計

A.1 概要

本気研究で作成した容積式ポンプの設計，製作手法について，この付録で記す．

A.2 容積式ポンプ用シリンダの選定

本容積式ポンプはポリエチレン押出し円管に対する負荷除荷を想定して作成した．本研究では，後続が単純で，設計が容易である容積式ポンプとした．**Fig. A.1** に増圧ポンプの概念図を示す．シリンダと水圧ポンプが一直線に並んだ形状である．水圧ポンプのロッドには，運動型 O リングを複数搭載し，水圧ポンプ内の水圧を保持する．容積式ポンプの性能は以下のとおりである．シリンダの出力は水圧ポンプの内面積の積である．水圧ポンプの吐出性能はシリンダの定格速度と水圧ポンプの内面積の積である．水圧ポンプの肉厚は，試験中に水圧がかかる状態においても十分に变形しない程度の大きさが必要である．

二軸試験を行う材料により，ポンプに使用するシリンダの出力を決定方法を述べる．二軸引張試験の試験中の試験片の模式図を **Fig. A.2** に示す．試験中の円周方向応力の算出式を式 6.1 に示す．

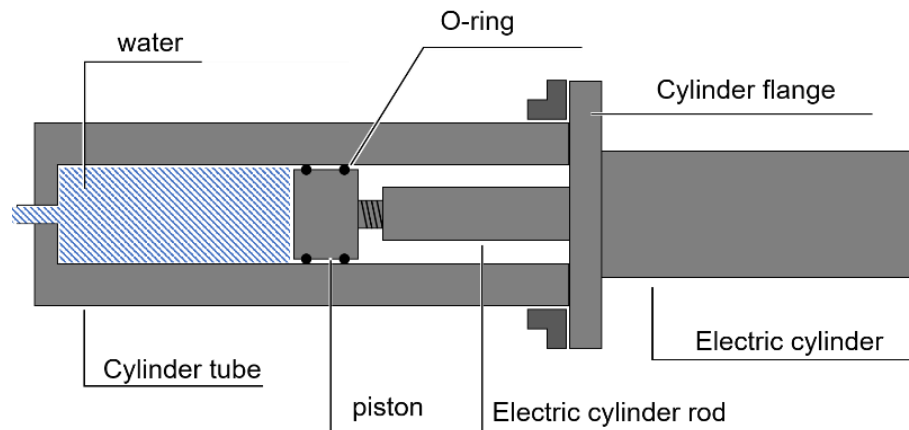


Fig. A.1 Booster pump conceptual diagram

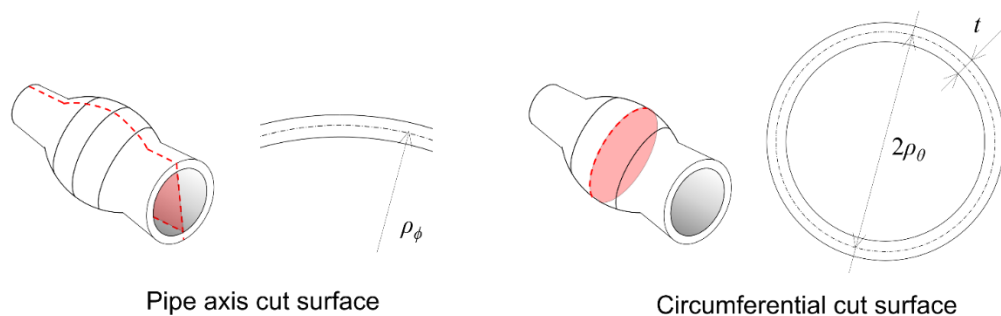


Fig. A.2 Specimen cross section and symbol definitions

$$\sigma_{\theta} = \frac{P(\rho_{\theta}-t/2)(\rho_{\phi}-t/2)}{t\rho_{\phi}} - \frac{\sigma_{\phi}\rho_{\theta}}{\rho_{\phi}} \quad (6.1)$$

式中の P は内圧， ρ_{θ} は試験片肉厚中心半径， ρ_{ϕ} は試験片肉厚中心部の管軸方向曲率半径， t は試験片肉厚を示す．式 2.1 の右辺第二項に注目する．試験中の多くの時間は管軸方向曲率半径が試験片内半径よりも十分に大きいといえるこのため，この項は 0 と近似できる負の項として，式 6.2 のようになる．

$$\sigma_{\theta} = \frac{P(\rho_{\theta}-t/2)}{t} \quad (6.2)$$

式 2.2 を P について解くと，式 6.3

$$P = \sigma_{\theta} \frac{t}{(\rho_{\theta}-t/2)} \quad (6.3)$$

ポリエチレンで実施する予定の試験片形状(肉厚 2mm，内半径 6.5mm，円周方向応力 30MPa)で計算を行うと，水圧は 9.2MPa となる．ただしこの値は，試験経過に伴う試験片の肉厚減少を考慮していないため，実際の試験よりも大きく水圧を算出する．試験中の水圧と円周方向ひずみの実測値を **Fig. A.3** に示す．水圧は 2.5MPa を超えることなく推移していることがわかる．

水圧シリンダ内側半径を r とすると，必要なシリンダの推力 F は式 6.4 で算出することができる．

$$F = P \times \pi r^2 = \pi r^2 \frac{t}{(\rho_{\theta}-t/2)} \quad (6.4)$$

ポンプのピストンは直径が大きい場合，加圧には大出力が必要であり，ピストンの微小な動作で吐出量が大きく変化する．このため，ピストンの直径は必要な容積にとどめる必要がある．

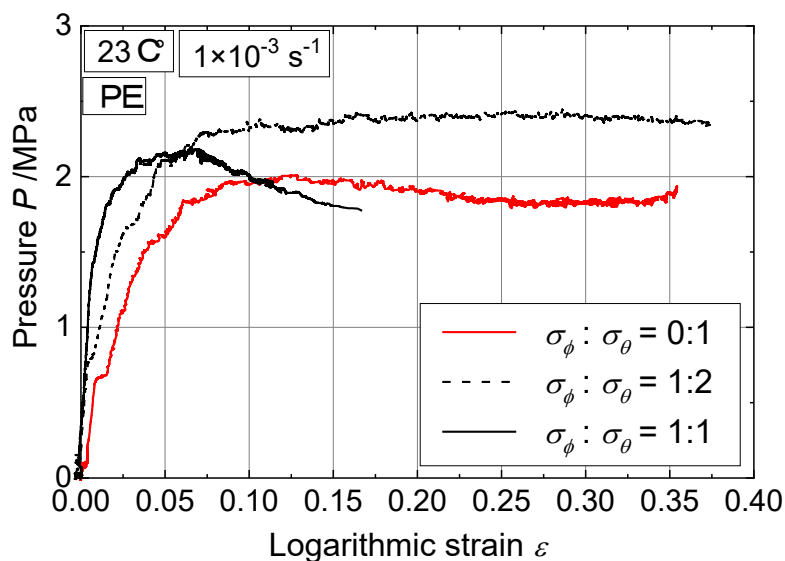


Fig. A.3 Relationship between water pressure and circumferential strain of specimen

今回は、ポンプのピストンの直径を 20mm とし、必要な推力を算出した。この時の必要推力は 2700N である。この条件に適合する電動シリンダは多数存在する。二軸バルジ試験機の軸方向にはサーボモータが搭載された超大出力の電動シリンダを採用している。これは、対抗する 2 つのシリンダが同期をとって動作する必要がある、超大出力領域においても、高精度な制御が要求されるからである。容積式ポンプでは、水圧計から取得されたデータをもとに、ポンプを駆動する電動シリンダを動作させるため、サーボモータを利用するほどの精度は必要ない。油圧シリンダの導入も考慮したが、油圧配線を試験機周辺に設置することが困難であるとし、採用を見送った。

以上の理由から、DC ブラシモータにより駆動する、電動シリンダを選定対象とした。発売元不明のものと TSUBAKI から発売されているものがある。このうち、TSUBAKI 製のパワーシリンダ F, G, T は、油圧シリンダの代替を考慮されており、屋外で利用されることを想定した電動シリンダ群である。Table A.1 に採用対象のシリーズの諸元を示す。

一般的に電動シリンダは推力ではなく、モータ出力に起因して値段が上昇する。T シリーズの LPTC500S6 がそのほかのシリンダよりもモータ出力が小さいにも関わらず価格が高いのは、シリンダの基本設計推力が 19.600kN と大型であり、5kW を超えるモータの搭載を想定しているからである。今回の条件では、オプションで小出力モータを搭載している。

定格出力に注目すると、表中のどのシリンダにも 2700kN を超えていることから、十分であることがわかる。一方定格速度に注目すると、F シリーズの LPF600L6.0V が最低である。しかし、先に示した面積のピストンで吐出した場合、150.72ml/min の吐出速度を確保することができる。Table A.1 に現在のプランジャポンプの吐出速度と圧力の関係を示す。プランジャポンプは表示吐出量が 100.00ml/min で実際の吐出量が 80ml/min 程度であり、現状の試験速度においては十分であり、G シリーズの LPGA300LT6 や T シリーズの LPTC500S6 は吐出速度に関してオーバースペックであると考えることができる。

G シリーズ及び T シリーズは 200V 駆動であり、モータドライバも高額になる。一方で F シリ

Table A.1 Specifications of electric cylinder

Series	F	G	T
Model number	LPF600L6.0V	LPGA300LT6	LPTC500S6
Rated output / N	6.00k	3.00 k	4.90k
Rated speed / mm/s	8	25	12.5
Rated discharge rate / ml/min	150.8	471.2	235.6
Stroke / mm	600	600	600
Power supply / V	DC 24	AC 200	AC 200
Motor output / W	160	400	100
Rated operating time / min	5	30	30
Ambient temperature / °C	-5~40	-15~40	-15~40
Humidity / %	80	85	85
Impact value / G	1以下	1以下	1以下
Atmosphere	General atmosphere	General atmosphere	General atmosphere
Price / yen	75473	165207	295844

LPF100～LPF600:基本形

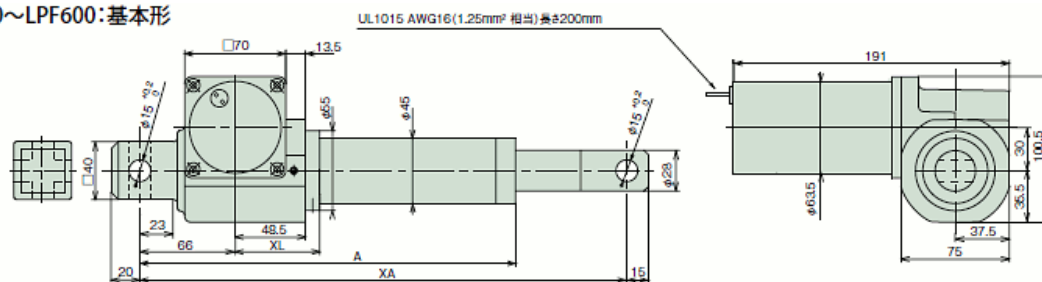


Fig. A.4 Drawing of electric cylinder

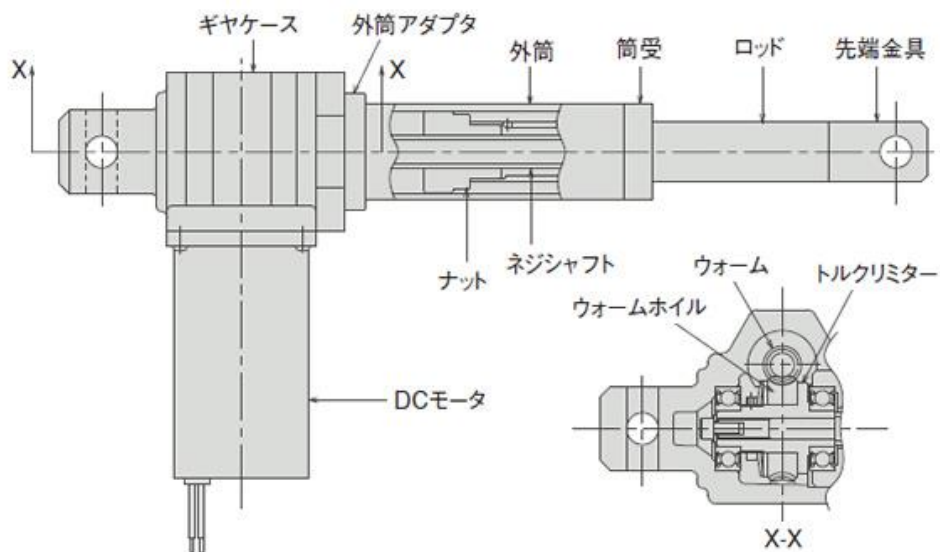


Fig. A.5 Cross section of electric cylinder

ーズは 24V 駆動でありモータドライバは安価なものを利用することができる。F シリーズの図面を **Fig. A.3** に示す。このシリンダの固定は、本体側とロッド側にそれぞれクレビスが一つずつ搭載されるのみである。**Fig. A.4** にシリンダの内部構造を示す。X-X 断面に注目すると、ウォームホイールが搭載されており、試験中にポンプ内が高圧になり、シリンダのロッドが強力に押し返された場合でも、モータには負荷がかからない構造である。

A.3 容積式ポンプの設計

設計を行った増圧ポンプを **Fig. A.6** 示す. Booster cylinder, Watertight bulkhead は水と直接接触しなかつ錆による腐食を避けたい部分であるため, SUS303 を使用した. そのほかの場所は, 入手性が比較的良好な S45C を使用した. Electric cylinder restraint, Booster cylinder restraint A, Booster cylinder restraint B は, 位置決めピンと M8 六角穴付きボルトで Side plate と締結した. Rod adapter と Booster rod は内側から M8 ボルトで締結した. Rod adapter と電動シリンダの先端金具との締結には, 先端金具を Rod adapter にかぶせ, 外径 14mm の丸棒を割りピンのように挿入することで締結を行った.

ロッドアダプタを **Fig. A.7** に示す. これは, 側面板を六面フライスを行うことで, 平滑な面を保証し, その部分をベアリングの外面でなぞることにより, ロッドアダプタをシリンダの軸方向以外への変形を拘束する役割を持たせた. ロッドアダプタが滑らかに動作することを確認した.

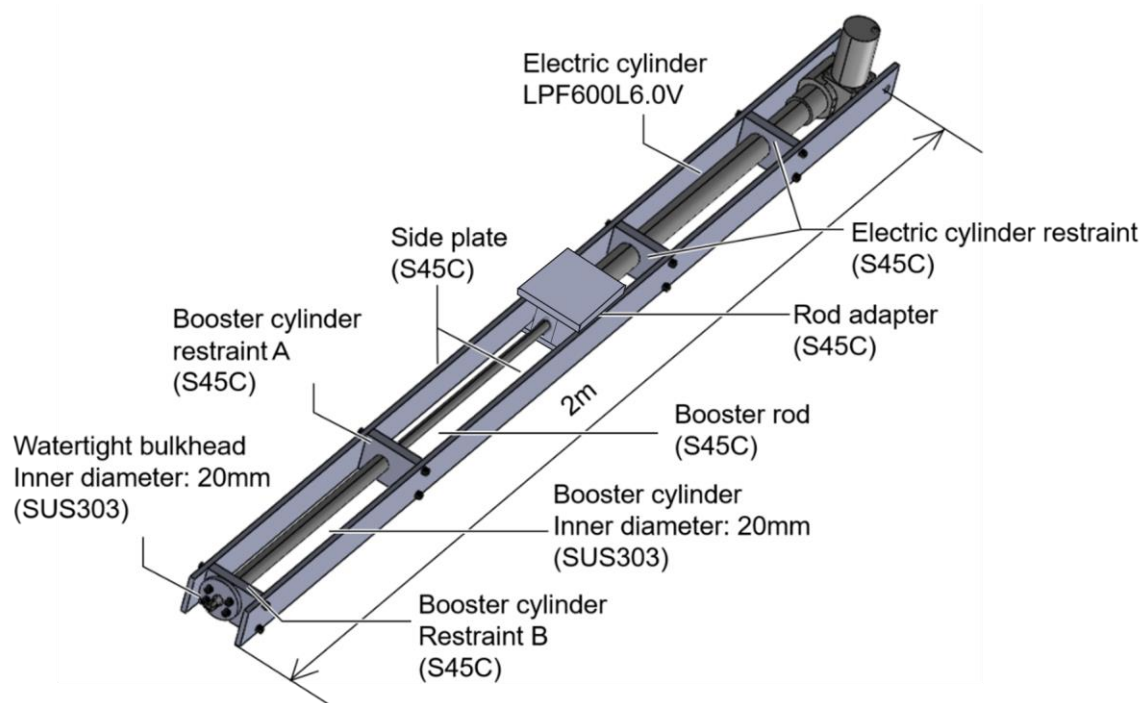


Fig. A.6 New electric booster pump appearance

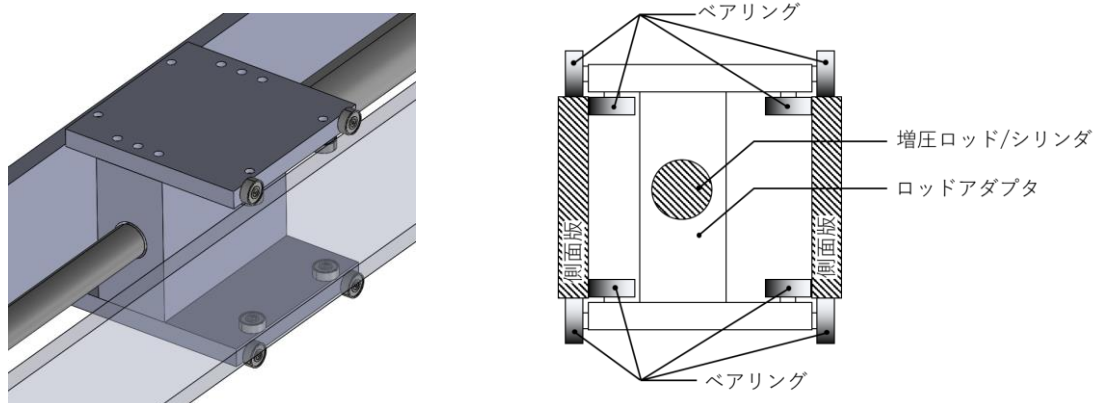


Fig. A.7 Illustration of rod adapter

Oリングは、このシリンダポンプで使われているような摺動を前提としたものと、接する面が動かない固定を前提としたものが存在する。摺動を前提としたものは耐圧が10MPaを超えるものはない。このため、本機構で20MPaに対応するためにOリングを2段合わせにすることで20MPa耐圧を達成する。Fig. A.8にシリンダポンプのOリングとかかる水圧の位置関係を示す。

新增圧機構の最終組み立て方法について詳細に説明する。新增圧機構は、Oリングによりシーリングされたピストンを電動シリンダで押し込むことで水圧を負荷させる。このため、Oリングの取り付けには現物合わせを伴う比較的精密な加工が必要となる。今回は、シリンダとロッドをMISUMIの標準品で発注し加工した。Fig. A.9に加工図を示す。加工は電動シリンダ端から15mmの場所に直径8mmの穴をフライスでドリルを使い通した。次に、反対側の端から5mm, 10mmの場所に幅5mmのOリング溝を旋盤で溝切バイトを使い加工した。ロッド先端の溝は規定通りの寸法で、二段目の溝は規定よりも浅い溝をつけた、現物合わせをして、Oリングをつけたロッドがシリンダに入っていくぎりぎりの溝深さまで加工した。どちらのOリングにも、電動シリンダ側にバックアップリングを取り付けて水圧が負荷された場合でもOリングの溝外への逸脱することを防いだ。

水の吸入は逆流防止弁を搭載したタンクを別に設置し行う。尚試験機側には手動弁を取り付けて吸入時は閉じ、試験時は解放をすることで流路を確定する。安全弁は、逆流防止弁の逆流定格が10MPaなので、搭載しなかった。

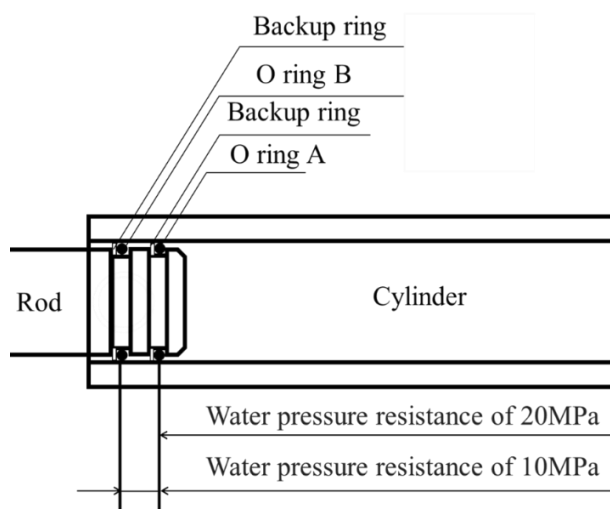


Fig. A.8 Positional relationship between O-ring of cylinder pump and water pressure resistance

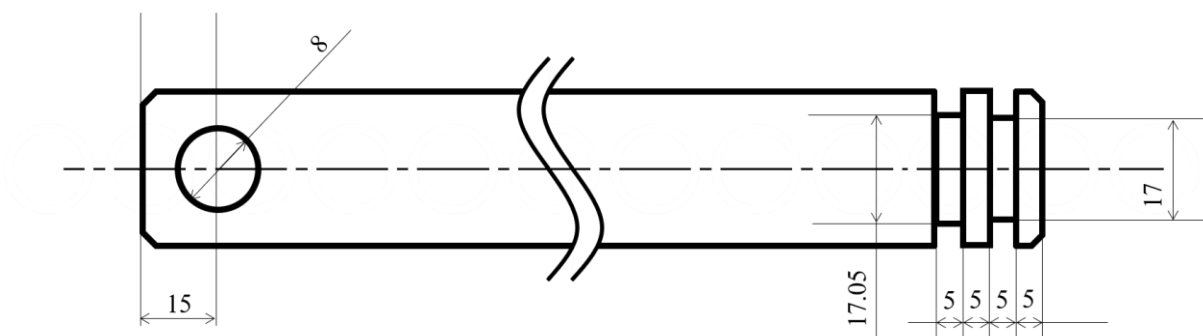


Fig. A.9 Machining drawing of Rod

A.4 モータドライバ

モータドライバと周辺部品の価格を見積もったところ、既製品を購入した方が自作する場合のパーツ購入費より 1/2 近く安価であることを確認した。購入したモータドライバ (Fig. A.10) は定格電圧 48V で定格電流は定常 16A, 瞬間 30A である。尚このドライバには、出力チャンネルが二つあるため、不慮の事故により、1 チャンネルが故障した場合でも発注することなく運用を続けることができる。出力の制御は制御用 PC から PWM でおこなう。

現在樹脂用二軸バルジ試験機の cRIO-9063 には、4 つのカセットのうち、3 つが使用中である。このため、空いている一つに、デジタル OUTPUT 端子を増設して試験を行う。この端子は、出力が $\pm 10V$ である。制御系とシリンダの通信の図を Fig. A.11 に示す。増圧機のシリンダへの出力電圧はモータドライバを返して、AC100V を使う。先に記した通り cRIO9063 を通して制御用 PC と接続する。シリンダの動作は、水圧を測定することにより確認する。しかし、動作確認中に負荷をかけたところ、シリンダの限界まで動作した場合は、トルクリミタが作動する前にギアがかみついてしまい、シリンダが機構的にロックしてしまうことがあった。このような場合は、ロッドを回転させることでロックを解除することが可能であるが、増圧機に組み込んだ時にこのトラブルが発生すると、機構の一部解体という時間のかかる作業が必要になるため、試験時及び、プログラム書き換え中は特に注意する。



Fig. A.10 Motor driver for new booster-board

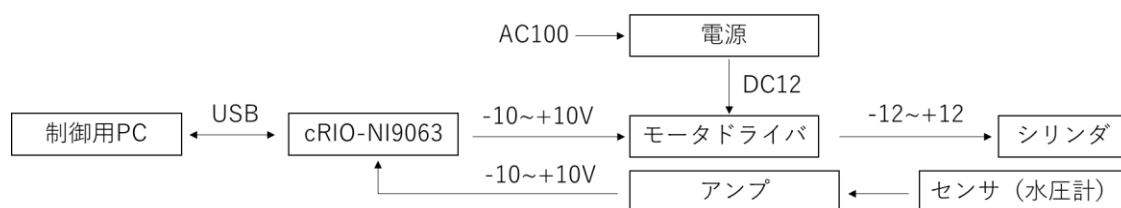


Fig. A.11 Wiring method for control personal computer and cylinder of new booster mechanism

A.5 モータ動作方式

モータの制御はモータドライバに制御信号を PWM で信号入力を行う。ここで PWM を簡単に説明する。PWM は Pulse Width Modulation の略である。Fig. A.12 に縦軸に電圧，横軸に時間を示す。PWM は入力電圧のスイッチングを繰り返すものである。Fig. A.12 (a)は低いデューティ比でのモータドライバへの入力電圧を模式的に示したものである。なお，デューティ比は，パルス幅を PWM 周期で割ったものである。今回使用するモータドライバは 2k~20kHz での PWM 周期に対応している。Fig. A.12 (b)は Fig. A.12 (a)の入力を受けたモータドライバが出力する電圧である。この時，スイッチング周波数が極めて高いため，モータの動きは電圧のスイッチングに追従するように正転と停止を繰り返すのではなく，赤く示した電圧を印加したような動作をする。

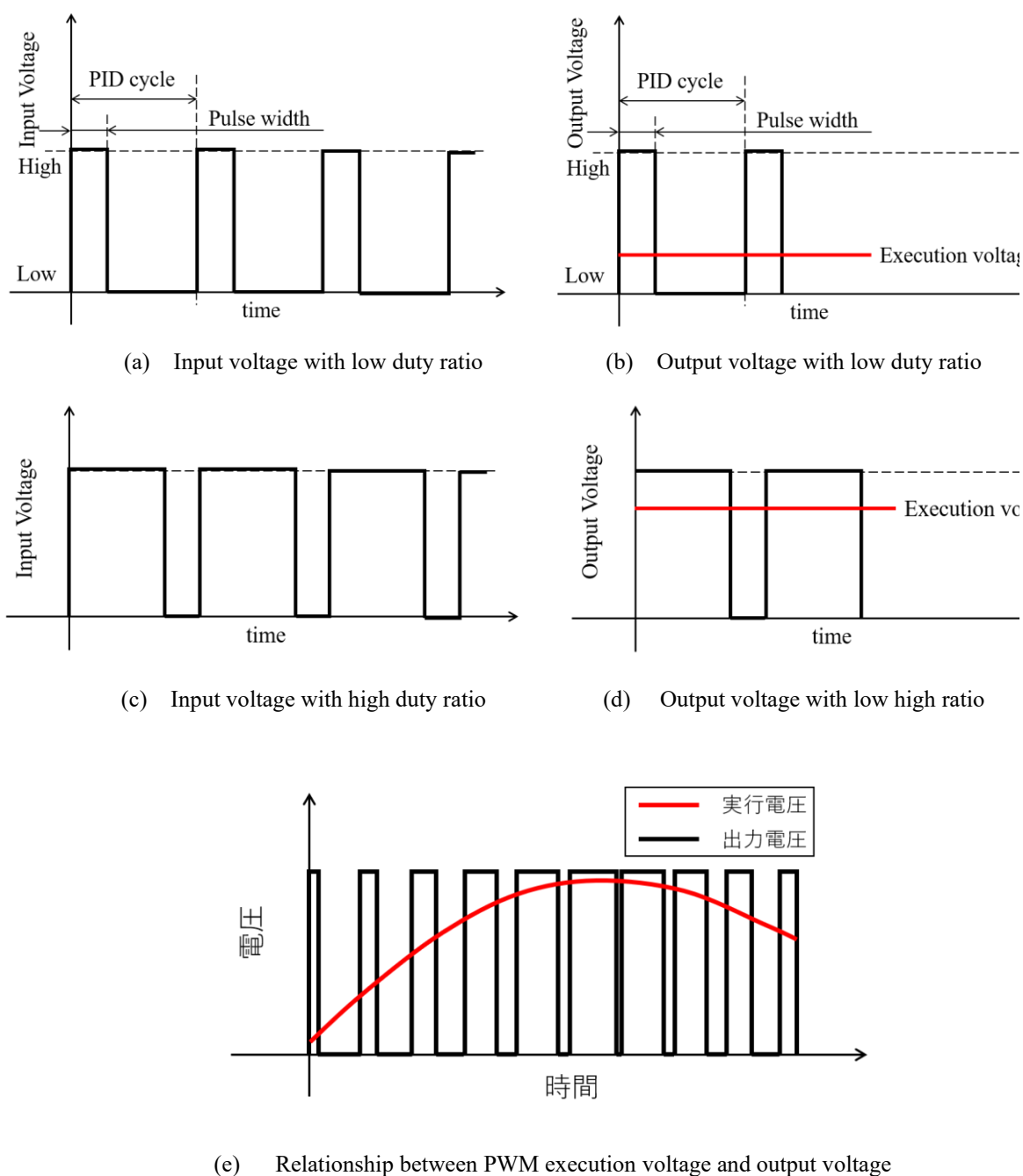


Fig. A.12 Voltage-time diagram

この電圧を実行電圧という．**Fig. A.12 (c)**は高いデューティ比でのモータドライバへの入力電圧を模式的に示したもので，**Fig. A.12 (d)**はその時に出力するであろう電圧である．このようにデューティ比を調整することで，モータの速度や回転方向を制御するものが PWM 制御である．本ポンプ機構では 20kHz で制御を行った．

PID 制御を行う．制御系統図を **Fig. A.13** に示す．指令値と試験機から測定された瞬間の円周方向応力から，その時必要なシリンダの動作量を決定し，電圧としてポンプに入力する．

A.6 モータドライバの通信

LabVIEW から行う制御には，NI9472 を使用した．この端子は外部から電源を供給し，所定の周波数でスイッチングすることができるものである．この NI 9472 とモータドライバ等の配線図を **Fig. A.14** に示す．モータの正転及び逆転は，DO3 端子から 0 または 5V を出力することで行う．図中の 12V 電源は定格電流 14A，5V 電源は定格電流 1A である．

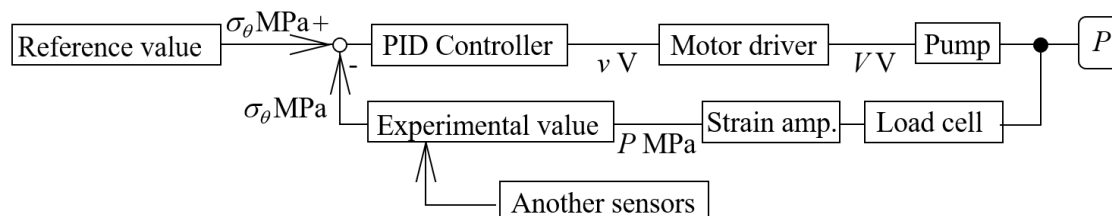


Fig. A.13 Created cylinder pump mechanism

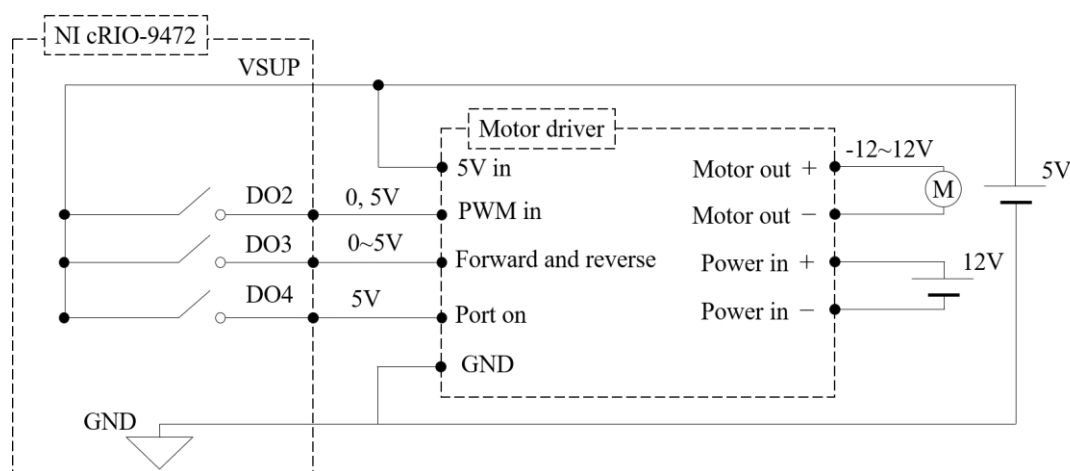


Fig. A.14 Wiring method between motor driver and control device

A.7 シリンダポンプの故障が予測される場所

シリンダ故障が予測されている場所を説明する．この機構に採用している O リングは摺動型であり，摩耗には比較的強いが，試験を繰り返し行くと，徐々に摩耗してゆくことが予想される．この場合，試験を行っている途中で水圧が上がらなくなる現象が発生する．この時シリンダのロッド側 **Fig. A.15 (a)**から水があふれている場合は，O リングを交換することで対応する．一方，コネクタ側 **Fig. A.15 (b)**で水漏れが発生している場合，シールテープのシーリングが不十分であることが想定される．この場合はシーリングをやり直す．一度配管を外したうえでコネクタを外し，シーリングテープを巻きなおす．



(a)



(b)

Fig. A.15 Where water leaks from the booster pump due to O-ring wear

A.8 容積式ポンプによる水圧負荷試験

容積式ポンプで HI-PVC を利用して耐圧試験を行った。試験機に円管状試験片を把持した後、容積式ポンプを一定の速度で増圧したの、測定した水圧—時間線図を **Fig. A.16** に示す。水圧負荷から 1 秒から 1.4 秒程度の間に急激に水圧が上昇し、最大で 17.6MPa まで達した。直後にシリンダの動作を停止させたが、その後すぐに試験片は破断した。破断時の試験片を **Fig. A.17** に示す。

20MPa 付近の高压では、ポンプの微小な動きで水圧が大きく上下する。しかし、30MPa を超えるとシリンダのトルクリミタが作動し、復旧できなくなる可能性があるため、これ以上の耐圧試験は行わなかった。

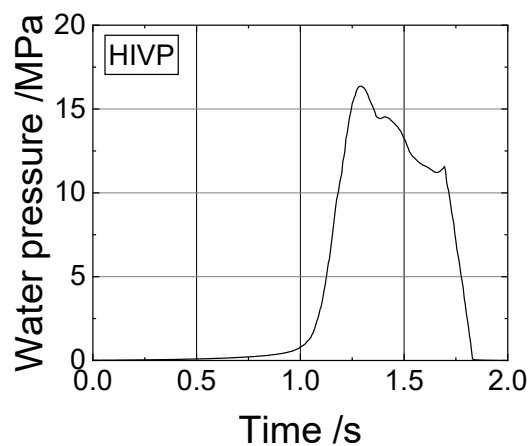


Fig. A.16 Water pressure-time diagram






Fig. A.17 Specimen after hydraulic load



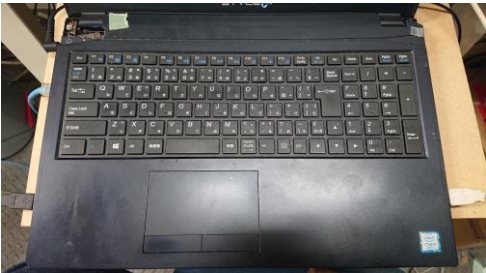
付録 B

二軸バルジ試験試験機使用方法


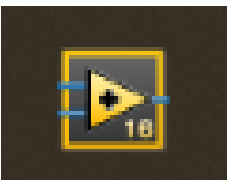
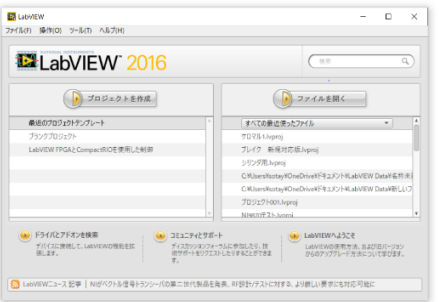
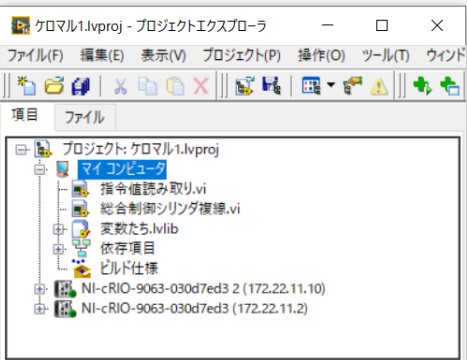
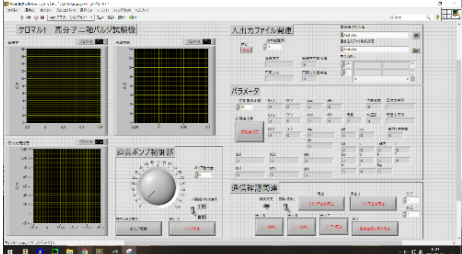
本研究で用いた樹脂材料用の二軸バルジ試験機の使用方を示す。

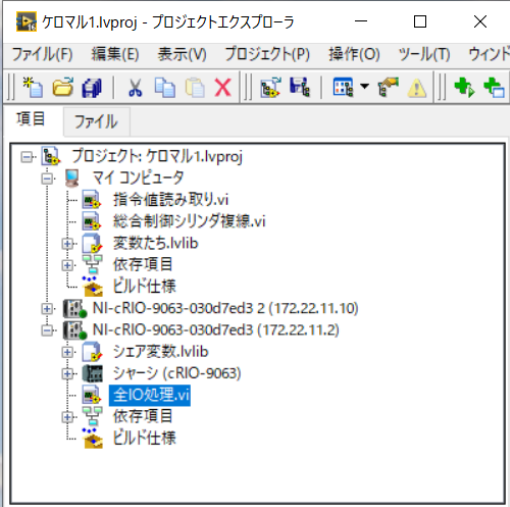
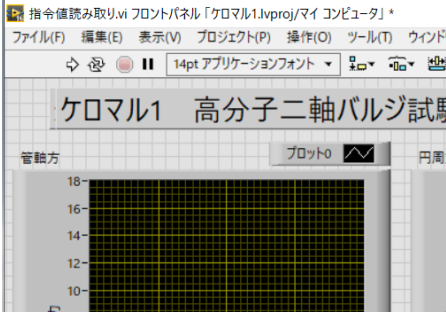
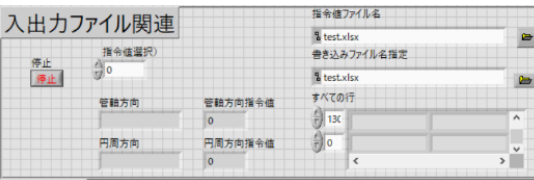
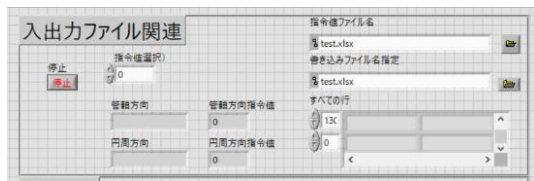
(a) 暖機運転

1	<p>アクチュエータ電源投入</p> <p>研究室 1 階にある配電盤 A(電動シリンダ系統)と配電盤 B(二階二軸制御系統)を ON にする。(右図のナイフエッジを上にあげる)</p>	
2	<p>アクチュエータ電源投入 2</p> <p>試験機左側電動シリンダ奥にある配電盤中のブレーカを投入する。</p>	
3	<p>センサ電源投入</p> <p>試験機右側シリンダ下にあるプラグを 4 つ差し込み、センサの電源を投入する。</p>	

4	<p>制御用 PC の足場組立</p> <p>制御用 PC はノートパソコンである。パソコンの足場は、試験機下にある天板を引き出し、つかえ棒を出して固定する。</p> <p>この足場は制御用パソコン以上の重さに耐えかねるので手をついたりしてはいけない。</p>	
5	<p>制御用 PC 電源投入</p> <p>制御用 PC の電源を投入する。</p>	
6	<p>制御用 PC の配線</p> <p>制御用 PC に配線を接続する。接続する配線は、シリンダコントローラからの白色の USB ケーブルと CompactRIO9063 からの黒色の USB ケーブルの二本である</p>	

(b) 静的試験準備

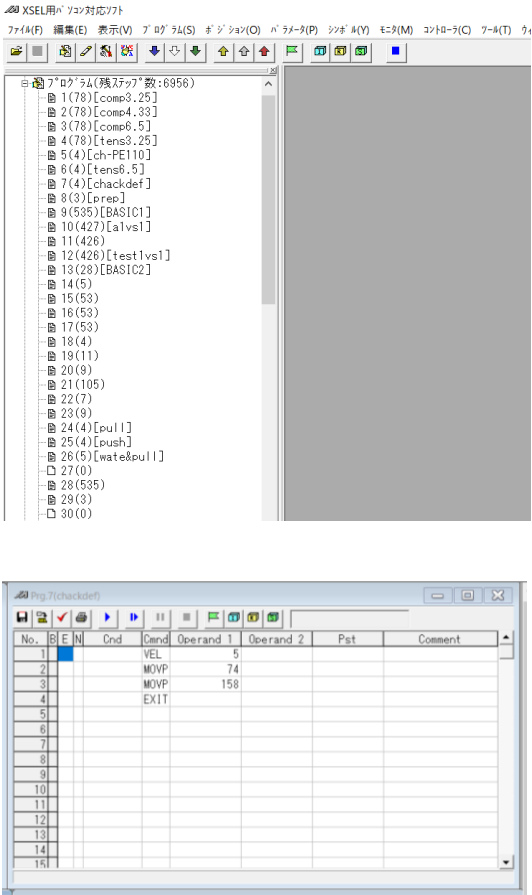
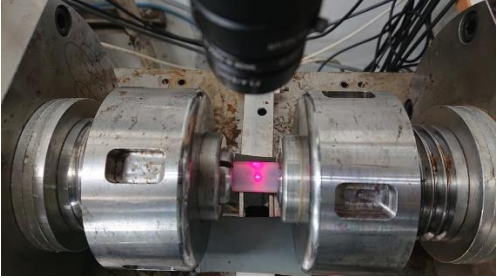
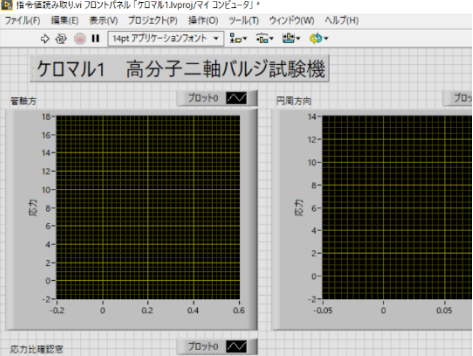
11	<p>LabVIEW の起動</p> <p>デスクトップ上にある LabVIEW2016 (32 ビット) をダブルクリックし LabVIEW を起動する.</p>	 
12	<p>LabVIEW プログラムの呼び出し</p> <p>起動時の画面左上のファイルのプルダウンメニューから最近起動したプロジェクトより、「ケロマル 1」を開く.</p> <p>手順 7 を飛ばし, デスクトップ上にあるケロマル 1 を直接開いてもよい.</p>	
13	<p>制御プログラムの呼び出し</p> <p>制御プログラムを呼び出す. 「マイコンピュータ」中にある「指令値読み取り.vi」をダブルクリックし起動する.</p>	 

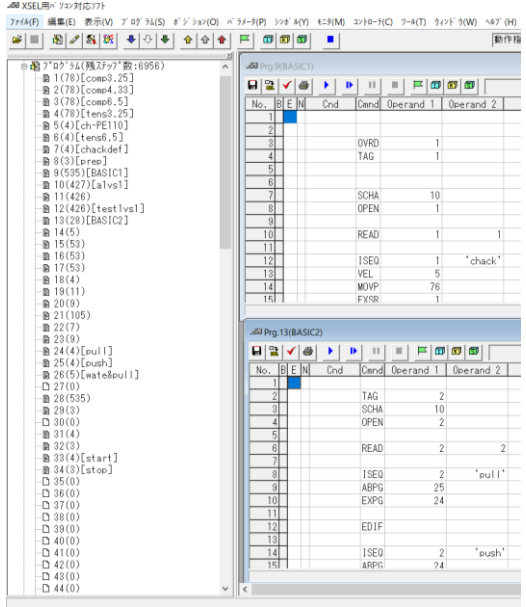

14	<p>通信プログラムの呼び出し</p> <p>通信プログラムを起動する。「NI-cRIO-9063-030d7ed3 (172.22.11.2)」中にある「全 IO 処理」を起動する。なお通信が安定しない場合は「NI-cRIO-9063-030d7ed3 (172.22.11.10)」に「シェア変数」と「全 IO 処理」をコピーし、使用する。</p> <p>フロンとパネルウィンドウには何も表示されないが問題ない。</p>	
15	<p>通信プログラムの起動</p> <p>左上にある矢印を押しプログラムを起動する。このプログラムは、レーザ変位計の読み取りパルスも出力する。プログラム起動時にレーザ変位計出力ポートが点滅することを確認し、プログラムと制御用 PC が正しく接続されているか確認する。</p> <p>これ以降「全 IO 処理」は操作する場面がないため最小化することでデスクトップを整理する。</p>	
16	<p>試験値ドキュメント保存場所の設定</p> <p>実験値の書き出しを行うファイル名を設定する。「入出力ファイル関連」の中にある、「書き込みファイルの設定」の右側のファイルのアイコンをクリックし、任意のファイルを指定する。</p>	
17	<p>指令値の呼び出し場所の設定</p> <p>指令値の呼び出しを行うフォルダ名を設定する。「入出力ファイル関連」の中にある、「指令値ファイル名」の右側のファイルのアイコンをクリックし、任意のファイルを指定する。</p>	

(c) 動的試験準備（電動シリンダ）

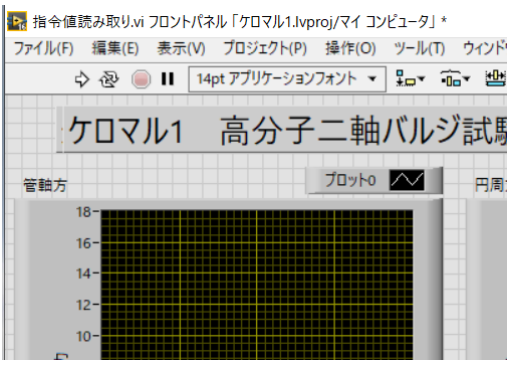
18	<p>IAI シリンダコントロールソフトの起動</p> <p>デスクトップ上にある、「XSEL 用パソコン対応ソフト」を起動する。通信ができていれば、通信ポートの確認とボーレートの指定ができる。ボーレートは 38400 (最大)とする。非常停止ボタンの場所を確認し、すぐに手で押せる場所に置く。そののち、非常停止ボタンが設置されているとして、ダイアログを閉じる。</p>	 <p>The image shows the IAI XSEL software box on the left, which is white with a blue border and contains the IAI logo and the text 'XSEL用パソコン対応ソフト'. To its right is a dark square with the IAI logo. Below these is a yellow emergency stop button with a red top and a black base.</p>
19	<p>シリンダ周辺の安全管理</p> <p>シリンダの動作範囲に障害物がないかを確認する。特にチャックユニットの下には、くさびの入り込むほどのスペースが存在するため、念入りに確認する。また、センサ群が位置決めピンにしっかり差し込まれていない場合はシリンダと干渉してしまう場合があるため、これも確認する。</p>	 <p>The image shows two photographs of a cylindrical workpiece. The top photo shows the workpiece mounted on a machine with a sensor unit. The bottom photo shows a close-up of the sensor unit and the workpiece, highlighting the area where the sensor is positioned relative to the workpiece.</p>

20	<p>試験片の仮把持</p> <p>把持部の中子の片側に試験片を差し込む。この時に試験片を濡らすことで、Oリングの摩擦抵抗を減らすことができ、スムーズに把持できる。</p>	
21	<p>ロードセルアンプのオフセット</p> <p>その日の初試験の時には、アンプのオフセットを行う。試験機に手を触れない状態で[bal]を素早く二回押し、0Vを指定する。不安定な動作が認められる場合には、複数回行う。</p>	

22	<p>把持位置への移動</p> <p>試験片を把持する場所へシリンダを動作させる。ここで、試験片の外くさびをあらかじめ試験機に仮止めさせておく。</p> <p>Chack プログラムを動作さる。このプログラムは、自動で試験片把持位置までシリンダを動作させるようにプログラムしてある。</p> <p>前進中は危険なため、絶対に試験片に触れてはならない。ただし、試験片に曲率が存在しており、自由な状態では反対側の中子に入りそうでない場合は適宜試験片をそろえる。その際には、片手に非常停止ボタンをすぐに押せる状態にして、操作する。</p>	 <p>The screenshot shows the XSEL software interface. The top part is a list of programs with their IDs and names, such as 1(78)[comp3.25], 2(78)[comp4.33], etc. The bottom part is a table with columns: No., B, E, N, Cond, Operand 1, Operand 2, Pst, and Comment. The table contains several rows of data, including VEL, MOV, and EXIT commands.</p>
23	<p>試験片の把持</p> <p>試験片が O リングを巻き込んでいないかを確認した後、フックスパナを用い、試験片を把持する。この時、フックスパナの回転により試験片が回転しないように注意する。</p> <p>この状態では、試験片に不要な力がかかっているため、素早く手順 24 に移行する。</p>	 <p>The photograph shows a mechanical fixture with two large cylindrical components. A small, rectangular test specimen is held between them. A red laser line is visible on the specimen, indicating its position or alignment.</p>
24	<p>軸力の除荷</p> <p>「LabVIEW」の「ケロマル 1」を起動する。その後「XSEL 用パソコン対応ソフト」で「BASIC2 プログラム」と「BASIC1 プログラム」を動作さる。ここで、ポップアップで、プログラム同時起動の許可を求めてくるが、許可を出す。</p>	 <p>The screenshot shows the LabVIEW software interface. The title bar indicates it's a project named 'ケロマル 1 高分子二軸バルジ試験機'. The main area contains two plots. The left plot is labeled 'プロット0' and the right plot is labeled 'プロット1'. Both plots show data points on a grid. The x-axis of the left plot is labeled '変位' and the y-axis is labeled '力'. The x-axis of the right plot is labeled '変位' and the y-axis is labeled '力'.</p>

	<p>ロードセルのアンプを確認し，0 近傍で安定するのを確認し，非常停止ボタンを押し，動作を止める。</p> <p>制御用パソコン側でのプログラムをすべて停止した後，非常停止ボタンを復位する。</p>	
25	<p>光沢部の遮光</p> <p>試験中の不必要な光沢部により，読み違いを防ぐために，遮光を行う。把持部の周辺は，特に読み違いが発生しやすいため，養生テープ等で遮光する。</p>	


(d) 静的試験準備（プランジャポンプ）

31	<p>ポンプの電源投入</p> <p>ポンプの電源を投入する。ポンプは通信モードに設定しているため、電源ボタン以外のすべてのボタンとつまみは使えない状態になっている。</p>	
32	<p>ケロマル 1 の起動</p> <p>フロントパネルウィンドウ左上の矢印ボタンを押し、「ケロマル 1」を起動する。起動直後に出力ファイルを保存するかを問うウィンドウが出るが、「いいえ」を選択する。</p>	
33	<p>ポンプの接続確認</p> <p>ポンプの接続確認と動作確認、及び試験片中への初期注水を行う。試験機の手動弁が閉じられていることを必ず確認する。「ケロマル 1」の「迫真ポンプ制御部」の「ダイヤル」と「ポンプ吐出量」を 0 に設定する。</p>	
34	<p>ポンプのプログラム内手動操作</p> <p>実際に吐出を行う。水タンク中の吸入ホースが十分に水の中に入っていることを確認する。「手動操作切り替え」レバーを手動に切り替る。「ポンプ稼働」ボタンを複数回押し、ポンプの吐出量を示すモニタが「0.10」に変わることを確認する。</p>	



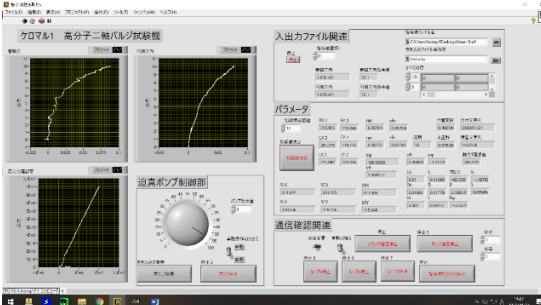
<p>35</p> <p>試験片内注水作</p> <p>「ダイヤル」を徐々に大きくなるように回し、ポンプの吐出量とダイヤルの吐出量が追従してることを確認する。</p> <p>タンクに沈めたホースから気泡が出てきていることを確認したら、最大と出量で吐出し、気泡が出なくなるまで続ける。この時に水漏れがないかを確認する。</p>	
<p>36</p> <p>水圧計アンプのオフセット</p> <p>その日の初試験の時には、アンプのオフセットを行う。水が流れた状態で水圧計側のアンプの「BAL」を素早く二回押し、0V をを設定する。</p>	
<p>37</p> <p>試験片初期注水終了措置</p> <p>赤字で書かれた「ポンプ停止」を複数回押し、プランジャポンプを停止させる。ポンプの停止を音で確認した後に手動弁を閉じる。</p> <p>「手動操作切り替え」つまみを自動側に戻し、「ケロマル」の動作を停止させる。</p>	

(e) 静的試験準備（エリアカメラ）

41	<h3>デカールの塗布</h3> <p>試験片にデカールを塗布する。この時、左から、白、黒、白、黒の向きでデカールを塗布する。逆向きで塗布すると正しい試験値が計測できない。</p>																									
42	<h3>撮影ノイズの除去</h3> <p>試験機底面には、水抜き穴が存在するが、これも定点読み取り速度の低下と誤検知の原因となるため、低反射率の材料で覆う。</p> <p>底面のカバーの際には、底部からあたるレーザ変位計の光軸に干渉しないように注意する。</p>																									
43	<h3>写真計測開始</h3> <p>CVS コントロール画面左上にある計測開始ボタンを押し、計測中に変わったことを確認する。この時、補助光の点灯する。</p> <p>測定点を問題なく検出できているか、3点について確認する。この時、数秒ごとに読み取り箇所が変わる場合や、測定点と全く異なる場所を読み取っている場合には、光の当て方を変えてみる。それでも測定点をただしく読み取ることができない場合は、デカールを張りなおす。</p>	 <table><caption>測定データの位置</caption><tr><th>測定点</th><th>計測値</th><th>下値</th><th>上値</th></tr><tr><td>相対ラベル</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>位置X</td><td>211.583</td><td></td><td></td></tr><tr><td>位置Y</td><td>123.078</td><td></td><td></td></tr><tr><td>角度</td><td>-2.415</td><td></td><td></td></tr><tr><td>相対値</td><td>99.123</td><td></td><td></td></tr></table>	測定点	計測値	下値	上値	相対ラベル				位置X	211.583			位置Y	123.078			角度	-2.415			相対値	99.123		
測定点	計測値	下値	上値																							
相対ラベル																										
位置X	211.583																									
位置Y	123.078																									
角度	-2.415																									
相対値	99.123																									

		<div><div>T100濃淡パターンの位置</div><div></div><div>濃淡パターンの位置</div></div> <table><thead><tr><th></th><th>計測値</th><th>下限</th></tr></thead><tbody><tr><td>個数</td><td>1</td><td>--</td></tr></tbody></table> <table><thead><tr><th>判定ラベル</th><th>計測値</th><th>下限</th></tr></thead><tbody><tr><td>位置X</td><td>211.609</td><td>-----, ---</td></tr><tr><td>位置Y</td><td>123.056</td><td>-----, ---</td></tr><tr><td>角度</td><td>-2.348</td><td>-----, ---</td></tr><tr><td>相関値</td><td>99.165</td><td>--, ---</td></tr></tbody></table> <div>1/2</div>		計測値	下限	個数	1	--	判定ラベル	計測値	下限	位置X	211.609	-----, ---	位置Y	123.056	-----, ---	角度	-2.348	-----, ---	相関値	99.165	--, ---
	計測値	下限																					
個数	1	--																					
判定ラベル	計測値	下限																					
位置X	211.609	-----, ---																					
位置Y	123.056	-----, ---																					
角度	-2.348	-----, ---																					
相関値	99.165	--, ---																					

(f) 試験開始

51	<p>各種確認</p> <p>以下の点を確認する</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) エリアカメラが撮影中である 2) ポンプの電源が投入されている 3) 手動弁が閉じている 	
52	<p>試験開始</p> <p>ケロマルの試験開始ボタンを押し、指令値の猶予時間内に XSEL プログラムの「BASIC2」と「BASIC1」の順でプログラムを実行する。</p> <p>初期値が安定したら、「初期値決定」ボタンを押して試験を監視する。</p>	
53	<p>試験終了</p> <p>試験を終了するときはシリンダの非常停止を押し、その後ケロマル1中のポンプ停止ボタンを押す。その後手動弁を解放し、ケロマルの停止ボタンを押す。</p>	

(g) 後片付け

61	把持部の解放 フックスパナにより把持部を解放する。その後、XSEL 中の「prep」を押し、チャック間距離をはなす。試験片は手で抜く。	
62	試験機の掃除 キムタオルを使って試験機の清掃をする。	
63	試験機電源 off すべてのアクチュエータとセンサの電源を切り、試験機のブレーカを右手で切断する。	

付録 C

試験機制御プログラム

C1. 概要

樹脂用二軸バルジ試験機は複数のアクチュエータと多数のセンサからなる制御系である。これらの統合制御は National Instruments 社製の LabVIEW を用いた。また、軸力を負荷する電動シリンダは専用の X-SEL によって制御した。付録 C ではこれらのプログラムの詳細な動作順序とアクチュエータ及びセンサの制御 PC との接続方法を詳細に示す。

C.2. 制御対象

試験機は第 2 章で記した通り、複数のセンサとアクチュエータにより構成されている。接続方法を改めて Fig. C.1 に示す。プログラムは制御用 PC、Compact RIO、シリンダコントローラで行った。制御用 PC ではメインプログラム、指令値読み取り、初期値設定、計測/算出、試験値書き込みの各サブプログラムを LabVIEW で動作させた。さらに、制御 PC からシリンダ制御ソフトを用いて、シリンダコントローラ内にある方向制御、速度制御プログラムの動作の指示を出した。

Compact RIO で動作させる IO プログラムでは、すべてのアクチュエータとセンサとの通信を行った。laser 変位計とエリアカメラとプランジャポンプとは RS232C シリアル通信で、容積式ポンプは 24V デジタル通信で、ロードセルと水圧計は同ひずみアンプを用いてアナログで通信した。詳細について以下に示す。

C.3. アクチュエータ

試験機には、軸力を負荷する電動シリンダが二つと、水圧負荷のためにプランジャポンプと容積式ポンプがある。それぞれの接続方向について詳細に述べる。

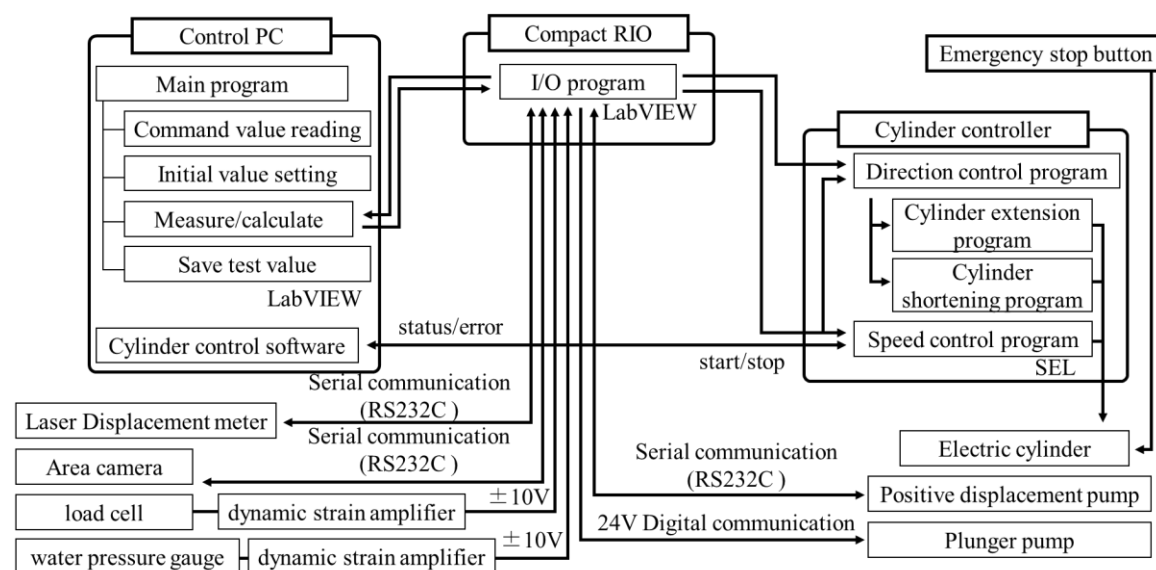


Fig. C.1 Control system diagram

C.3.1. 電動シリンダ

IAI 社製のロボット電動シリンダ。専用のシリンダコントローラボックスから X-SEL と呼ばれる SEL 言語により動作させる。このコントローラには 2 つのシリアルポートと 25 のデジタルポートがある。このコントローラのみでポンプの制御、センサの値の測定は技術的には可能である。しかし、後述する LabVIEW を利用する方法と比較して、プログラムが煩雑になるため、シリンダコントローラは、シリンダの制御のみに利用した。このシリンダコントローラは大出力の電動シリンダを動作させるため、安全装置が必須である。そのため、ロボシリンダはコントローラを使わずに LabVIEW から直接シリンダを動作させることはできない。シリンダは精密機器であるため次のような注意点が存在する。

- ・制御電源はアクチュエータ電源よりも先に投入すること
- ・制御電源はアクチュエータ電源よりも後に遮断すること
- ・回路内に高電圧が充電されているため、コネクタの抜き差し、内部点検は電源 OFF 後 10 分以上放置して行うこと
- ・制御電源を OFF にした後再度 ON にするまでの間隔は 40 秒以上確保すること
- ・コントローラ電源が ON の状態でコネクタ操作を行わないこと
- ・アースは機器毎に別個に行うこと

シリンダはアブソリュート方式であるため、アブソエンコーダバッテリー電圧異常時やバッテリー、エンコーダケーブルを外した場合エンコーダバッテリーエラーとなりアブソリュートリセットを行う必要がある。アブソリュートリセットの手順はマニュアルの P. 85 を参照のこと。その際、シリンダが自動的に原点復帰するため、干渉・衝突が生じないようにクリアランスの確保には十分に留意する。シリンダコントローラ内の SEL 言語の動作は、制御用 PC 中及び DAC デバイス中の LabVIEW プログラムと密接に関わる事項なので後述する。制御 PC との接続には、RS232C クロスケーブルを利用した。

C.3.2. プランジャポンプ

ダブルプランジャポンプは手動操作、アナログ制御、デジタル制御によって動作する。ポンプ背面には、シリアルポート 1 つと、アナログポート一式によって外部危機から制御することができる。本試験機ではノイズによる誤作動がより少ないとされるシリアルポートを使ったデジタル通信を採用した。制御 PC とは、RS232C ストレートケーブルを利用した。

C.3.3. 容積式ポンプ

自作した容積式ポンプは電動シリンダで動作する。この電動シリンダは 24V で動作する。モータドライバは市販品を使った。これは最大 24V15A の出力が可能である。10V、20kHz の PWM の入力により、出力を調整可能である。制御 PC との接続には、ドライバ電源と出力調整の 2 系統の接続を行った。

C.4. センサ

C.4.1. 水圧計

水圧系として共和電業製圧力センサ PG-500KU を採用した，このセンサで取得された値を同社製のシグナルコンディショナ CDV-900A を使って-10V～+10Vのアナログ信号に変換している．校正係数，入出力抵抗等が記載されている検査成績書は付録として添付する．

C.4.2. ロードセル

ロードセルは共和電業製 LUX-B-5KN-ID-P 引張圧縮両用小型ロードセルを採用した．このセンサで取得された値を同社製のシグナルコンディショナ CDV-900A を使って-10V～+10Vのアナログ信号に変換している．校正係数，入出力抵抗等が記載されている検査成績書は付録として添付する．

C.4.3. レーザ変位計

レーザ変位計は KEYENCE 社製の IG-28 を利用している．測定された値をアナログ信号 0～+5V で返す．サンプリング周期は 490 μ s で返す値は 1 回の測定値，2 回の測定値の平均，4 回の測定値の平均...と最大 4096 回の測定値の平均まで選択可能である．測定回数を増やすほどに測定値は精度が高くなるが，応答性が低くなる．現在は 4 回の測定値の平均を返すように設定しているが，アナログ信号のノイズは日々変化する．レーザ変位計の直線性は $\pm 0.28\%$ なので，その範囲に収まる最小の測定回数を選択した．レーザ変位計の受信部と送信部に水滴がついている場合は正確な値を返してこないため注意する．

C.4.4. エリアカメラ

エリアカメラは，試験品の管軸方向ひずみ等を計測するための試験片三点の位置を取得する．カメラで得られた画像は，カメラコントローラへ送信される．

エリアカメラは高速で撮影するため，シャッタ速度が速くなる．このため十分な光量が得られず，取得した画像がブラックアウトする．この解決として，光源が追加されたが，後付けであるため，試験機に固定されていない．光量の差は，三点の位置取得に影響を及ぼすため，試験ごとに，定位置を決めておく必要がある．DAQ デバイスとの接続は RS232C の専用ケーブルを用いて行う．詳細は後述する．



Fig. C.2 C Series chassis that can be used in Lab VIEW (CompactRIO-NI9063)

C.5.制御機器

本試験機には複数の制御対象と、シリンダコントローラ、CompactRIO(**Fig. C.2, Fig. C.3**), 制御用 PC の三つのプログラムを行うことのできるデバイスを持つ。これらをまとめて一つのプログラムで動かすのは困難であるため、制御用 PC でメインプログラムを実行し、その他のデバイスでサブプログラムして制御を行う(**Fig. C.1**)。

このうち、制御用 PC と CompactRIO で実行するプログラム言語は LabVIEW であり、シリンダコントローラで実行するプログラム言語は SEL 言語である。

メインプログラムでは計測値から応力及びひずみ等の実験データの算出と書き出し、制御値の書き出しを行う。現在は開発段階であるため、それぞれのデータの監視、任意の値への指令値の書き換えを行った。

CompactRIO 中のサブプログラムでは、出力系はメインプログラムで算出されたデータを各種アクチュエータに出力するため RS232C 規格に変換する。また、入力系ではアナログデータや、RS232C 規格で書き出されたデータをメインプログラムで読ませるために変換を行うプログラムを実行する。これは制御用 PC と CompactRIO との間の通信を高速で行うために、専用の変数を用いているためである。

シリンダコントローラ中のサブプログラムでは RS232C 規格で受け取ったデータで電動シリンダを任意の速度で動作できるプログラムを実行している。

LabVIEW は NATIONAL INSTRUMENTS 社（以後 NI 社）製のシステム開発用ソフトウェアである。プログラムはブロックダイアグラムと呼ばれる視覚的に組むことができるインターフェイスを備える言語であり、アナログとデジタル両方の信号を扱うことのできる DAC デバイスなどのハードの開発も行っている。

ソフトウェアとして LabVIEW を説明する。LabVIEW はパソコンで起動した場合フロントパネル画面とブロックダイアグラム画面の二つが開く。二つの画面はお互いに対応しており、仮想的な機械をイメージしたときに、フロントパネル画面は機械の表面にあるボタンやダイヤルや計測器類に例えることができる。また、ブロックダイアグラム画面は機械内部の配線や内部の回路素子の様にたとえることができる。シリアル通信接続確認用のプログラムを例として、**Fig. C.4** にフロントパネル画面を、**Fig. C.5** にブロックダイアグラムの画面を示す。



Fig. C.3 C Series modules that can be used in Lab VIEW

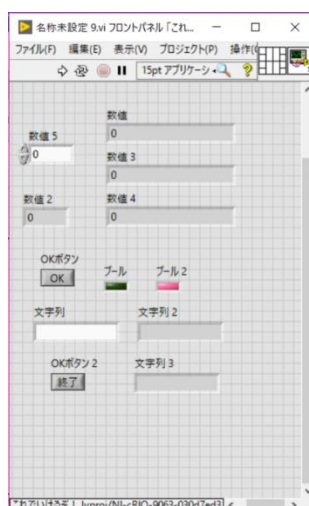


Fig. C.4 Lab VIEW front panel screen

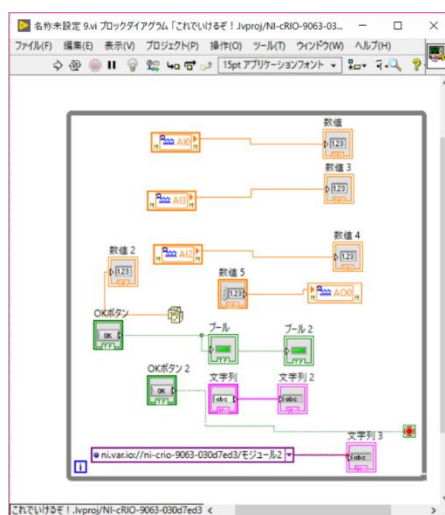


Fig. C.5 Lab VIEW block diagram screen t

C.5.1. CompactRIO-NI9063 と制御用 PC との接続

試験機にはセンサ及びアクチュエータが多数存在し、信号形式もアナログ、デジタル双方が混在するために CompactRIO-9063 で一度すべての測定値をデジタル変換したうえで、一括して制御用 PC に送信する方法を採用した。このデバイスは LabVIEW で書かれたプログラムをデバイス内で実行可能である。また、ユーザ独自で編集可能な集積回路である FPGA も搭載している。FPGA は制御用 PC や CompactRIO-Ni9063 中のオペレーションソフトウェアを経由せずに入出力及び演算を行うことができる編集可能な集積回路である。FPGA を利用して処理を行う FPGA モード、FPGA を利用しないで処理を行うスキャンインターフェースモードがある。

モードによるデータ転送の差異を Fig. C.6 に示す。制御用 PC を介するソフトウェアの意思決定においては、先述した Windows に代表されるオペレーションソフト、ドライバ API, LabVIEW を経由して行うが、これには $25\mu\text{s}$ ほどの時間がかかる、また、各システムの対応速度に応じて処理能力が変わる欠点がある。一方 FPGA モードで実験値の処理及び制御量の決定には、制御用 PC を介さずに直接 FPGA で処理することができる為、 25ns 級の応答が可能であり、制御周期を大きくすることができる。一方で FPGA はコンパイルに時間がかかる。これは FPGA に対し Fig. C.7 の様に複数のコンパイラを経由して書き込みを行うからである。LabVIEW 内で製作したプログラムは、直接 FPGA チップに書き込むことができない。Xilinx 社のコンパイルツールを利用してビットファイルに変換する必要がある。Xilinx 社のコンパイルツールが変換できる言語の中間ファイルを CompactRIO-9063 内に LabVIEW-FPGA ツールを使い作成する。その後 Xilinx 社製のコンパ

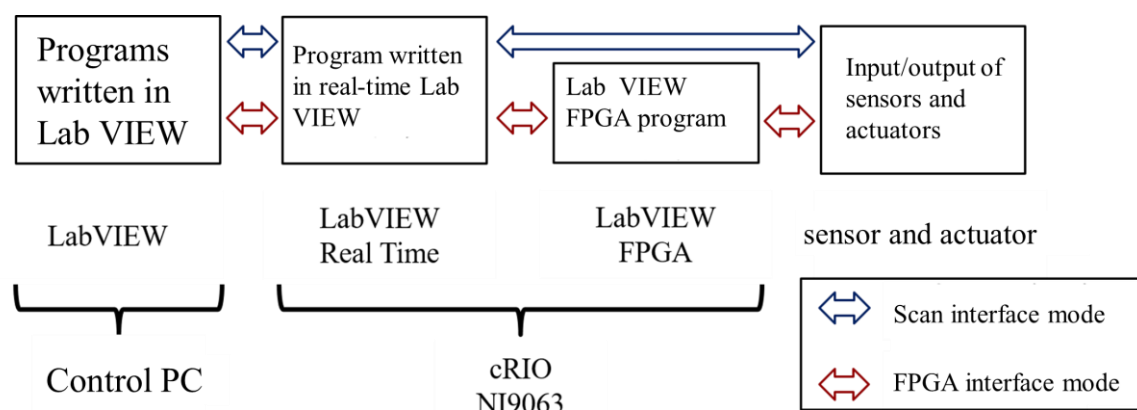


Fig. C.6 Geometry of a specimen for multiaxial tube expansion test

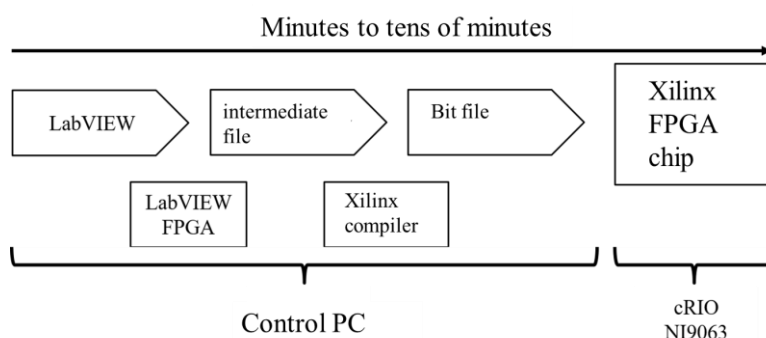


Fig. C.7 Geometry of a specimen for multiaxial tube expansion test

イルツールでビットマップとしたうえで LabVIEW コンパイルツールを利用して FPGA に書き込む。この動作には数分から数十分の時間を要し、数秒でコンパイルが終わるスキャンインターフェースモードの方が、デバッグの回数を多くとることができる。本試験機ではスキャンインターフェースモードで制御を行った。

C.5.2. Measurement & Automation Explorer (MAX)

compactRIO-NI9063 は、先述したようにいくつかの機能があるが、これを使うためには、あらかじめソフトウェアをインストールする必要がある。インストールはパソコンから Measurement & Automation Explorer (以後 MAX) を利用して行う。これは LabVIEW に付属するソフトウェアである。工場出荷時の CompactRIO-NI9063 は初期化されており、別の用途に compactRIO-NI9063 を転換する際も初期化が必要なため、本試験機の制御系構築の際にも MAX を利用した。以下に初期化から試験機の計測ができる状態までのセットアップ方法を示す。

- (1) 電源を投入し、USB ケーブルにより MAX のインストールされたパソコンと接続する。
- (2) MAX を起動する
- (3) 「リモートシステム」を展開する。
- (4) 「NI-cRIO-9063-(シリアル No.)」を右クリックして「ディスクのフォーマット」を選択する。
- (5) compactRIO-NI9063 が再起動し、パソコンとの接続が復旧したことを確認し、「システム設定」を選択し、言語設定を「英語」から「日本語」に変更し保存する。マウスで選択すると「日本語」を選択することができないことが多いのでキーボードのカーソルキーとエンターキーを利用するとよい。

「リモートシステム」→「NI-cRIO-9063-(シリアル No.)」→「ソフトウェア」を右クリックして、「新規ソフトウェア」のインストールを選択する。ユーザ名は admin を、パスワードは空欄とする。

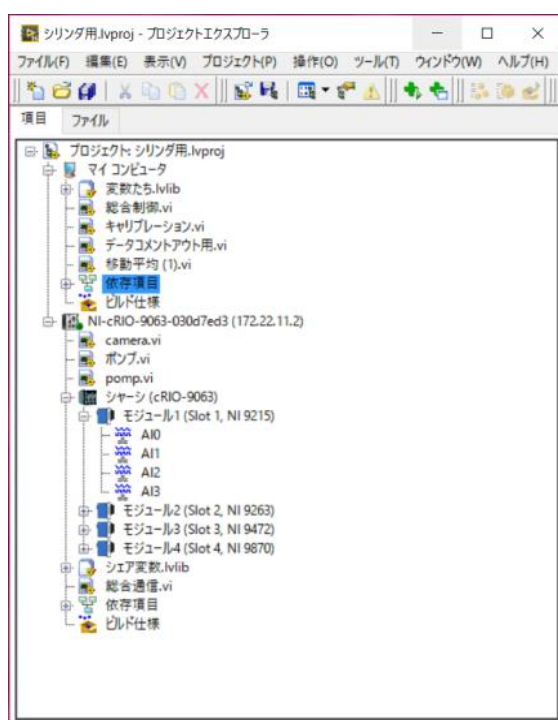


Fig. C.8 Lab VIEW project explorer screen

(6) インストール可能なソフトすべてをインストールしてもよいが、少しでも多くのメモリを有効的に使いたいので、DAC の仕様に応じて必要なソフトウェアをインストールする。当機の場合と桑場研究室で使う上で、問題なく動作させるために以下のソフトを導入した。

- ① LabVIEW RT Add-ons (中国語サポートを除く)
- ② Network I/O
- ③ NI Scan Engine
- ④ Remote Panel Server for LabVIEW
- ⑤ Run Time Engine for Web Service
- ⑥ NI-Serial 9870 and 9871 Scan Engine Support

LabVIEW 上での CompactRIO-NI9063 の認識方法を示す。プロジェクトエクスプローラ画面上の「プロジェクト(プロジェクト名).lvproj」を右クリックし、新規から新規デバイスを選択し、接続されている CompactRIO-NI9063 を選択するとプロジェクト上に表示され、LabVIEW プログラムで利用することができるようになる。プロジェクトエクスプローラの画面を **Fig. C.8** に示す。

このようにひとつのプロジェクト内に複数のプログラム実行なデバイス、(**Fig. C.8** では「マイコンピュータ」と「NI-cRIO-9063」)が表示されている。それぞれのデバイスには、それぞれのデバイス内で使うプログラム、モジュール、変数等が表示されている。

C.5.3 LabVIEW プログラム関数

LabVIEW は他プログラム言語と同様に種々の関数がある。代表的な関数を示す。

- ・ while, for ループ関数

Fig. C.9 に while ループ関数と for ループ関数のブロックダイアグラム画面での形状を示す。両枠の中にある関数をループ離脱条件に達するまで繰り返す。内部の関数を繰り返す周期は、処理速度の最大値に近い値になる。一つのプログラム中にループが一つだけの場合は問題になることはないが、複数のループが存在する場合は処理が極端に遅くなる。このため、基本的にループ関

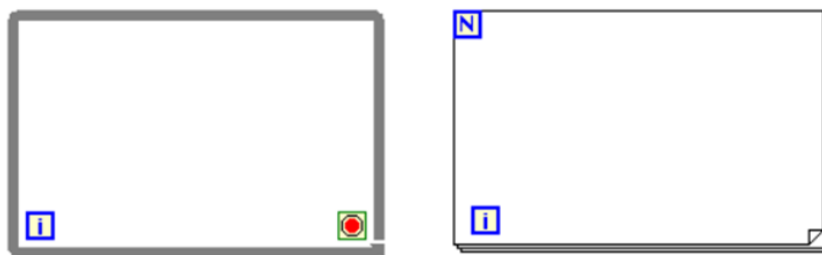


Fig. C.9 Geometry of loop function in LabVIEW



Fig. C.10 Geometry of stand by function in LabVIEW

数を設定する際には必ず **Fig. C.10** に示すような待機関数を入れる。これは繋がれた整数値だけの千分の一秒だけ待機するものである。

二つのループ中で青い四角形に囲まれた i はループの周回回数を示す端子である。while ループ中で赤い端子は、ループ離脱条件を設定する端子である。この端子にはボタン、条件式、タイマなどを設定することができる。for ループ中で青い四角形に囲まれた N はループ離脱回数を設定する端子である。この端子には整数を設定することができる。

- ・ タイミングループ関数

Fig. C.11 にタイミングループ関数のブロックダイアグラム画面での形状を示す。タイミングループは while ループに繰返しのタイミングを指定できるようにしたのである。また、複数のタイミングループを指定した場合、ループ同士で優先順位を付けることができ、処理落ちにより、指定したタイミングが保てなくなる場合、重要なループの周期は死守する設定もできる。処理落ちが発生した場合にはループの位相を保った状態で再開することもできる。

- ・ ケースストラクチャ

Fig. C.12 にケースストラクチャのブロックダイアグラム画面での形状を示す。ケースストラクチャは、分岐関数である。



Fig. C.11 Geometry of timing loop function in LabVIEW

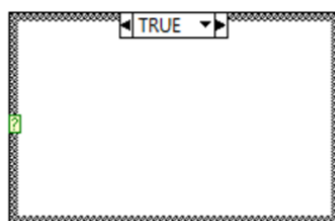


Fig. C.12 Geometry of case structure in LabVIEW

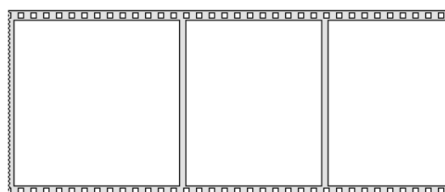


Fig. C.13 Geometry of flat sequence structure in LabVIEW

緑色の四角形に囲まれた端子に条件の TRUE と FOLSE を決定する端子をつなぐ。条件分岐後の二つのパターンは TRUE と FOLSE それぞれにプログラムを行う。

・フラットシーケンスストラクチャ

Fig. C.13 にフラットシーケンスストラクチャのダイアグラム画面での形状を示す。LabVIEW はエラー処理配線等の配線で、プログラムの実行順序を指定するが、分岐、並列処理を始めとする種々の処理の影響、また、プログラムの理解のしやすさからフラットシーケンスストラクチャを利用する。フラットシーケンスは左から右に行くにつれ時系列が遅れる。仮にエラー処理配線等をフラットシーケンスで定義される時系列と逆向きにつなぐと、実行時にエラーによりプログラムが止まることがあるため注意する。

・シェア変数

Table C.1 にシェア変数のダイアグラム画面で形状と特長示す。変数は、一つのプログラム実行デバイス中でのみ利用するローカル変数と複数のプログラム実行デバイス中で利用するグローバル変数、CompactRIO-NI9063 のモジュールで取得した値を格納している変数の三種類を使う。CompactRIO-NI9063 で取得した値を直接制御用 PC 中で動作するメインプログラムに使用することも可能ではあるが、処理速度がグローバル変数を使う場合より遅くなる。シェア変数には書き込みと読み取りの二種類の形式がある。シェア変数への書き込みは、処理速度が高速になると失敗する可能性が高くなる。また、同一時刻に同じシェア変数に書き込みを行うと、エラー処理を完了する前にプログラムが強制終了してしまうことがある。書き込みを行う際には、待機関数にて 1ms 程時間を置くと、安定した動作が期待できる。

・VISA 関数群

LabVIEW は他社製のアクチュエータやセンサと接続しプログラムをすることが前提で設計されている。このため、ある程度のアクチュエータやセンサにはすでに計測器ドライバとして操作環境が整っている。しかしながら今回使う予定である、KEYENCE 社製のエリアカメラ、IAI 社製の電動シリンダ、日本精密機械社製のプランジャポンプについてはサポートがない。このため、計測器ドライバに代わるものを制作する必要がある。これは VISA 関数を利用して製作す

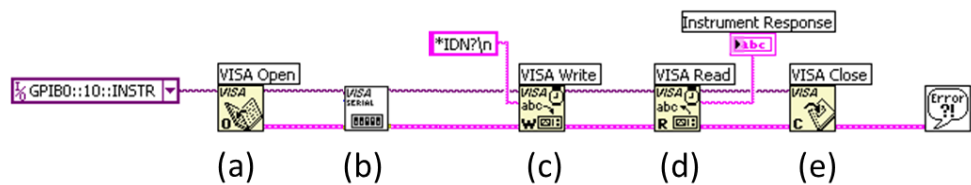


Fig. C.14 Geometry of VISA functions in LabVIEW

Table C.1 The format of each variable

アクセスモード	書き込み	読み出し	書き込み	読み出し
変数形	浮動小数点	浮動小数点	文字列	文字列
形状				

Table C.2 Communication relation specifications of each device

Device	Area camera	electric cylinder controller	Pump
Baudrate	115200	38400	9600
Terminating character	\r\n	\n	\r\n
Flow control	none	none	none
Data bit	8	8	8

Table C.3 Commands the pump can receive

\$T	Motor start command
\$P	Motor stop command
\$SXXX	Set data XXX is a number of up to 6 digits including the decimal point specifying the flow rate
\$E	Entry command(Accelerate/decelerate to the set value)
\$Q	Status report

る。VISA 関数群はプロジェクト内に存在するシリアルポートで通信する関数群である、**Fig. C.14** に VISA 関数群のプログラム例を示す。プログラムは左から右へ流れる。

Fig. C.14 (a) は VISA-Open 関数で、プロジェクト中に存在するシリアルポートから一つを選択して通信を開始する関数である、

Fig. C.14 (b) は VISA シリアルポート構成関数で、シリアルポートのタイムアウト、終端文字、フロー制御、パリティ、データビット、ボーレートを変更するものである。詳細は後述するが、シリアル通信の場合、これらの設定が通信先のデバイスと一致している必要がある。**Fig. C.14 (c)** は VISA-Write 関数で、開いたシリアルポートに文字を書き込む関数である。**Fig. C.14 (d)** は VISA-Read 関数で、開いたシリアルポートから文字を読み出す関数である。**Fig. C.14 (e)** は VISA-Close 関数で、開いたシリアルポートを閉じる関数である。

ひとつのシリアルポートで通信するには、開く→書く→読む→閉じる、の繰り返しである。しかし、電動シリンダや、増圧ポンプの様に常に書き込みをする必要があるアクチュエータやエリアカメラの様に常に読取りが必要なセンサの場合はタイミングループの中に VISA-Open 関数と VISA-Close 関数を入れると、高速で通信開始と終了を繰り返すことになる。これは、通信失敗や、エラーによるプログラムの動作不良を引き起こすため、基本的に VISA-Write 関数と VISA-Read 関数のみをループに含める。

シリアル通信は二つの機器を一対一で通信する。それぞれの通信デバイスのシリアル通信での設定を **Table C.2** に示す。

増圧ポンプは固有の制御コマンドが **Table C.3** に示すように設定されている。増圧ポンプの終端文字は\r\nであるが、セット・データコマンドである\$SXXX 以外は\nのみでコマンド終了処理をすることができる。しかしながらデータ・セットコマンドで\nのみでコマンド終了処理をすると、増圧ポンプの通信は強制終了し、再度電源を投入するまで復旧しない。この仕様とあいまって VISA 関数の初期設定の終端文字は\nであるため、増圧ポンプの強制終了する原因の特定に時間がかかることがある。デバッグを行う機会があれば注意が必要である。

C.5.4 CompactRIO のプログラム

CompactRIO 中のループの 3 種類を **Fig. C.14**, **Fig. C.16**, **Fig. C.17** に示す. このプログラムではセンサから得られたシェア変数をグローバル変数に書換え, 制御用 PC に転送する役割を持つ.

Fig. C.14 はアナログセンサから取得した値をメインプログラムに転送し, 電動シリンダの指令値の書き込みを行うループである. アナログセンサはノイズ除去の為, 10 回の計測値の平均を取ったものをメインプログラムに転送する.

Fig. C.16 は増圧ポンプの指令値の書き込みを行うループである.

Fig. C.17 はエリアカメラで撮影した画像から算出した標点 3 つの座標と撮影番号が含まれた文字列をメインプログラムに転送する役割を持つループである.

ループは, 本来一つにまとめることができるが, あるデジタルポートを開くことに時間がかかった時, 別のポートがタイムアウトしてしまい, エラーが発生することがあるため別々のループにした.

プログラムの処理が重すぎた場合, CompactRIO-NI9063 は強制終了する. この場合, 制御用 PC との通信が切断される為, 直ちに気が付くことができる. しかし, ごくまれに, CompactRIO-NI9063 内のオペレート領域のデータを破損させる場合がある. この時 MAX では, C シリーズモジュールが認識されなくなり, 警告メッセージが出る. 復旧のためには一度初 CompactRIO を期化して, 再度プログラムをインストールする必要がある. これを防ぐために, ここでのプログラムは必要最小限にとどめ, 制御用 PC で処理することが推奨されている. サブプログラムは 100Hz で動作させた.

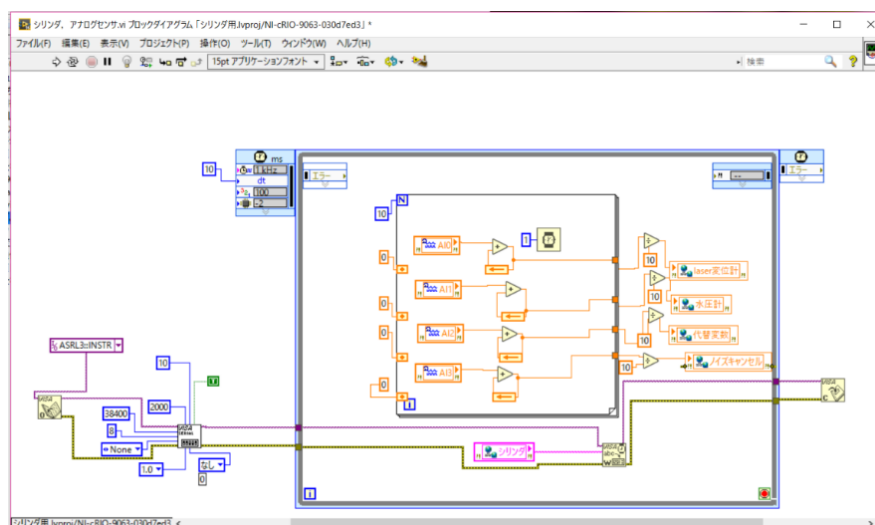


Fig. C.15 Cylinder sensor and pump conversion program

C.5.5. エリアカメラデータの読み出しプログラム

エリアカメラは撮影番号と **Fig. C.18** に示す三点の X,Y 座標をシリアル通信にて転送する. この 7 つの数字はそれぞれ空文字によって区切られて連続した文字列として送信される. そこでメインプログラムにおいて, 出てくるデータを空文字ごとに区切り, 7 つの値をそれぞれローカル変数に書き込み計算を行った.

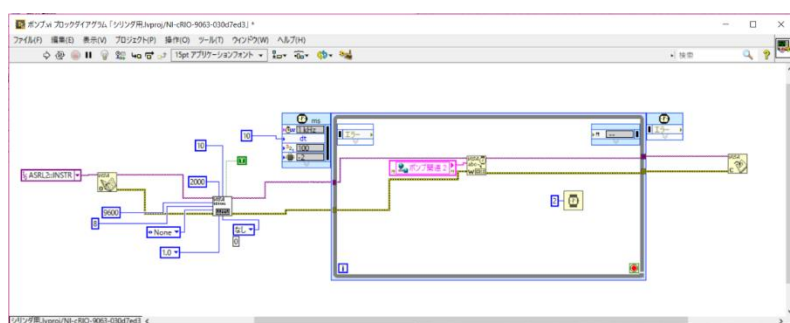


Fig. C.16 Pump conversion program

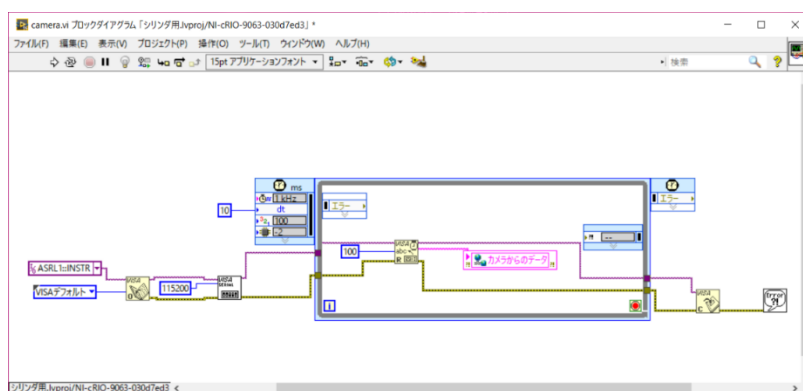
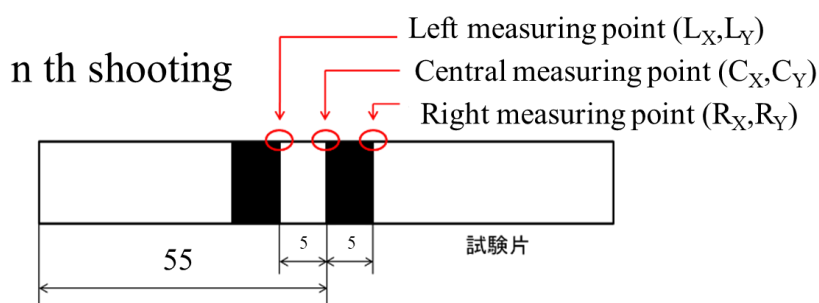


Fig. C.17 Camera data conversion program



Send string: n_Lx_Ly_Cx_Cy_Rx_Ry

Fig. C.18 Character string sent from the camera controller

C.5.6. アクチュエータの制御手法

アクチュエータにはP制御をかけた．単調負荷試験ではひずみ速度が一定となるような応力指令値を作成した．ここで，あらかじめ用意した応力指令値を読み取る手法で行った，ポリエチレンの負荷除荷試験の結果を Fig. C.19 に示す．試験は2回行った．応力の指令値は負荷と除荷を極大点を2MPaずつ大きくなる，0 MPa→2 MPa→0 MPa→4 MPa→0MPa→8 MPa→0 MPa...0 MPa→20 MPaとなるように作成した．なお，移動中の指令値は，応力速度一定0.1 MPa/sになるように作成した．20MPaの指令値が読み込まれた後は，一定時間後に指令値が読み込まれなくなり，0MPaが入力される（完全除荷）．今回は，完全除荷の挙動までss線図を作成した．2回目の試験の方がよりひずみが大きい結果となった．特に12MPaの負荷の降伏前後から測定差が出た．

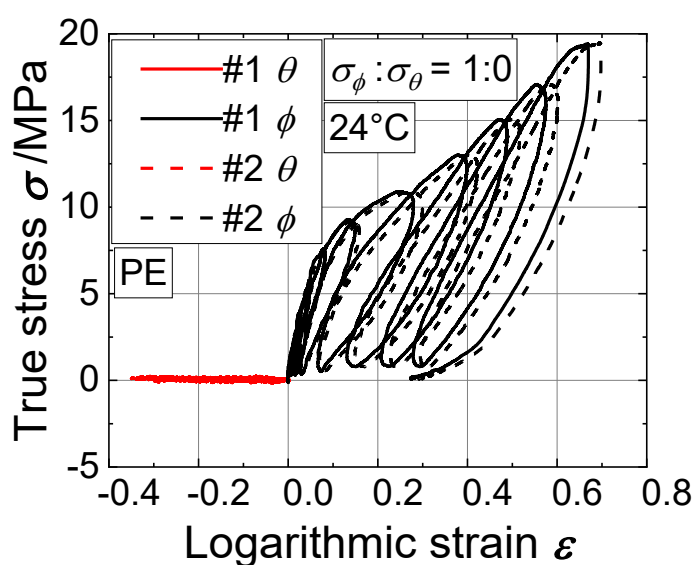


Fig. C.19 True stress – Logarithmic strain curves

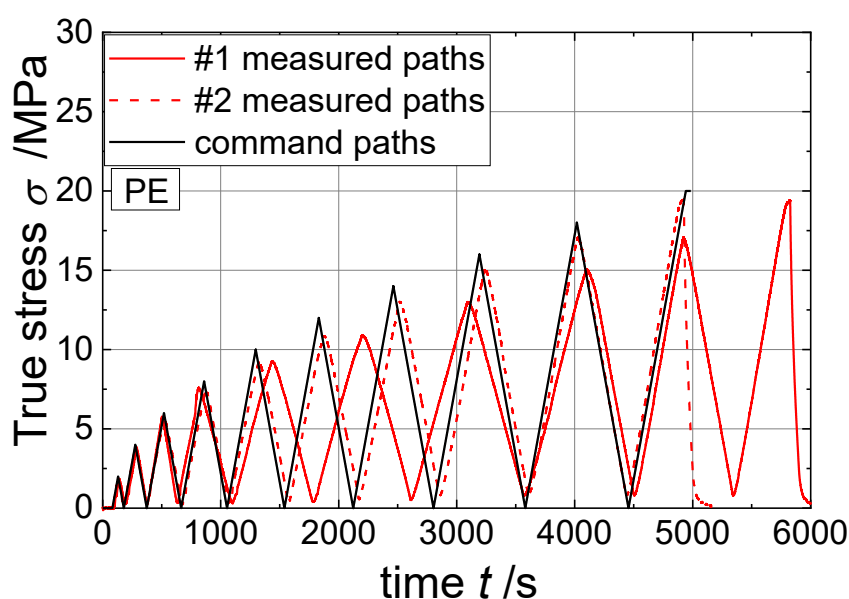


Fig. C.20 Stress-time diagram red line is experimental value, black line is command value

Fig. C.20 に指令値と実際に出力された応力値を示す。指令値と比較して、2 回目の試験で出力された応力の時間に大きく乖離があることがわかる。2 回目より差分は小さいが、1 回目の試験も指令値との乖離が認められる。これは、負荷と除荷の繰り返しにより、試験時間が従来の 3 時間程度かかるようになり、制御用 PC への負荷が大きくなり、試験周期が保てず、指令値の呼び出しが遅くなったためである。なお 2 回目に行った試験の方が、制御用 PC のメモリに負荷が蓄積されたため、より顕著に差分が出る結果となった。なお制御の読み取り周期が遅れた場合でも、試験時刻は、制御読み取りのループ外から取得しているため、測定された応力速度や、ひずみ速度、応力—ひずみ線図等の物性の計算値に影響はない。

次に指令値と実験値の極大値に注目する。極大点が 8MPa を負荷後から顕著に、実験値の極大値が指令値より 1MPa より小さく乖離した。同様に極小値が実験値で 1MPa 程度までしか除荷できていない。このほかにも単調増加する指令値に追従するようなシステムは、常に指令値よりも小さい値を取る。引張試験のような、一方向に動作させる試験を行う場合は問題ないが、増加と減少を繰り返すような挙動を行う場合、指令値が増加から瞬時に減少に転じた時、十分に追従しないことがある。以下詳細に説明する。

Fig. C.21 に、縦軸に制御しようとしている対称の指令値と実験値、横軸が時刻をとる。P 制御の場合は、指令値と実験値の差分により、アクチュエータへの制御量を算出する。このため、指令値が上昇している時は常に指令値と実験値の間に乖離がある。これは指令値が瞬時に減少になった場合、指令値と実験値の差分は小さくなり、アクチュエータの動作速度は落ちる。その後、指令値と実験値の大きさが逆転し、アクチュエータも指令値と同様の方向に動作を始める。このため、実験値の最大値は減少を始めた後の指令値との交差点ということになり、必ず、指令値の最大値よりも小さくなる。

以上のことから、負荷—除荷試験では、あらかじめ作成した指令値を用いた試験は行うことができない。そこで、リアルタイムで測定したひずみから、次の制御時間に必要となるひずみ増加量をあらかじめ指定したひずみ速度から算出し、指令値を算出した。

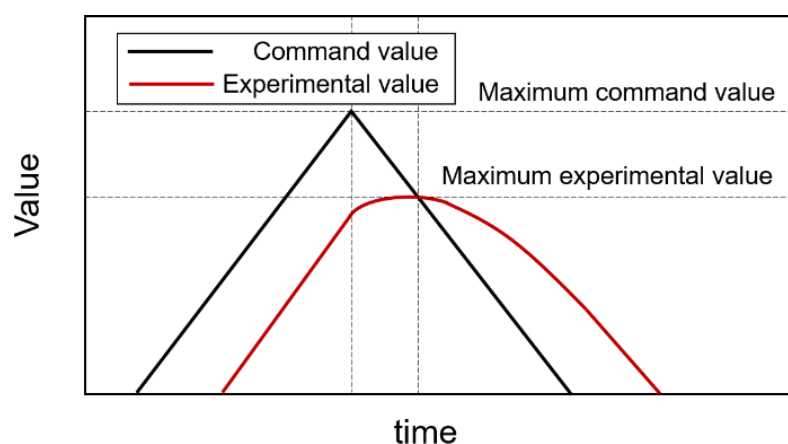


Fig. C.21 Stress-time diagram

C.5.6.1. ポンプ系統指令値算出

試験片内は水で満たすことが理想であるが、実際には若干の空気を含む。このため、ポンプを動作させると、まず空気の気泡の圧縮が支配的となり、十分につぶれたのちに水圧が上昇する。つまり、ポンプの吐出量に応じた水圧の変化は試験開始時と終了時で異なる。試験開始直後の水圧が低い状態では水圧の変化は小さいが、試験終了直前の水圧が高い状態では水圧の変化は大きい。ポンプの制御量算出は P 制御で行ったが、一定の P ゲインでは、試験開始時に合わせて制御パラメータを決めてしまうと、試験が進むにつれて吐出量がオーバーシュートして発散する。反対に、試験終了時を見込んで、パラメータを決定すると、試験開始直後では、水圧が長い間上昇しない。そこで本研究では P パラメータに水圧を除いたものを 指令値とした。

増圧ポンプは複数の指令が連続した一つの指令を読むことができる。しかし、スピード・セットコマンドは文字列の最後に入れなければ、ポンプはそれ以降通信ができなくなる。さらに、スピード・セットコマンドは、他のコマンドと異なり、終端文字として `\r\n` を読み取れないとポンプが急停止するため、余裕を持った指令値の送信が必要である。このため、スピード・セットコマンドの前か後のどちらかに、フラットシーケンスストラクチャと待機関数を使い送信時間に余裕を持たせた。高速でグローバル関数の書き換えによるデータの欠損でポンプの通信が途切れることを防いだ。

C.5.6.2. 電動シリンダ指令値算出

シリンダの動作は、メインプログラムで算出した軸力に達するように動作速度と動作方向を指令した。ここでの指令値の出し方はシリンダコントロールソフトである X-SEL と密接に関わる。

X-SEL は、プログラム動作中に別の動作を行うことができない。また、X-SEL ソフトでのプログラムのタイミングによっては、受信信号を読み落とす場合がある。仮に方向指定の信号を読み落とすと、シリンダは指定とは逆方向に動作する。この場合指令値と動作量が乖離するだけでなく、速度も増加し危険な状態に陥る。受信を確実にを行うため、方向指定信号を繰り返し送信する方法があるが、その間の速度指定ができなくなる。そこで、CompactRIO-NI9063 に速度を指定するプログラムと方向を指定するプログラムの二種類に対して別々にケーブルを用いて通信を行った。

C.6. メインプログラム

メインプログラムでは、指令値及び試験結果の算出、表示、保存を行った。算出方法については第 2 章に記した。

C.6.1. メインプログラム起動時

メインプログラムでは実際の試験片の計測値を入力する部分が存在する。これは応力比と左標点と右標点間長さである。これらの値は、試験開始直前までに入力をする必要がある。この動作を忘れると、制御値算出の段階で有限の数字をゼロで割ることになる。LabVIEW 自体は、このような計算でも直ちにエラーを出すことはない。しかし、計算は 50Hz で繰返し行われるため、試験開始後数十秒で強制終了する。

C.6.2. メインプログラム強制終了例

LabVIEW では、「シンプルエラー処理」という関数があり、各関数に標準装備されているエラー端子を接続すると、プログラムでエラーが発生した場合、エラーメッセージを出す。しかし、一部の強制終了を伴うエラーはエラーメッセージを出すことなく LabVIEW が強制終了してしまう。この場合は原因の特定に時間がかかることがあるため、発生した強制終了例を以下に示す。

- (1) 有限数をゼロで割る、負の数の平方根を取る。
- (2) 待機関数がタイミングループ周期を超える。
- (3) 同時もしくは非常に小さい時間差で同一のシェア変数に書き込みを行う。
- (4) ループ関数でひとつ前の時間のループ内の値を記録し、次の時間のループ内に出力するシフトレジスターを直列で使用する。
- (5) フラットシーケンスストラクチャで処理方向と逆にワイヤを接続する。

LabVIEW は視覚的にプログラムできる言語ゆえに、待機関数がフラットシーケンスストラクチャやループ関数の裏に消し忘れて残る事象などが発生するため、プログラムを行う際にはこのことに注意する。同一の処理を複製して作ったとき、シェア変数の書き換えを忘れると、同一のシェア変数に同時に書き込むことになり、強制終了の原因となる。

プログラムが強制終了する前兆として、ループ周期が遅くなる、コンパイルが一度目は止まるが、同一プログラムでコンパイルを二度目にやり直した際、通常と同様の時間で終了する、フロントパネル画面上の機器の応答性が悪くなる等の現象が起きる。強制終了したプログラムは、LabVIEW を再起動すると回復することができる。メインプログラムとサブプログラムが同時に動いていて、制御用 PC で LabVIEW が強制終了した場合、メインプログラムの実行場所である制御用 PC に所属するプログラムはすべて強制終了する。一方サブプログラムは compactRIO-NI9063 内で動作しているため継続して実行されている。このため、アクチュエータはそのまま動作しつづける。制御ができていないアクチュエータは危険である。事故を防ぐため、LabVIEW が強制終了すると、試験者は直ちにシリンダの非常停止スイッチを押しシリンダの動作を止める。

増圧ポンプは非常停止に代わるものは電源スイッチであるが、2 秒ほどの長押しの後に停止することに加え、水圧は増圧ポンプを止めても下がらないため変形が続く可能性がある。このため、増圧ポンプは操作せず、手動弁を開放することで水圧を下げる必要がある。

C.7 電動シリンダ用 X-SEL プログラム

シリンダコントローラで実行するプログラムは SEL 言語で書く。プログラムの例を **Table C.4** に示す。具体的な動きを以下に示す。

No.1, 二つのシリンダを速度 10 に指定する。

No.2, あらかじめ指定した場所 10 へ移動する。

No.3, あらかじめ指定した場所 1 へ移動する。

No.4, プログラムを終了する。

SEL 言語でのプログラムは、1つのコマンド動作が終了するまで次の動作に移らない特徴がある。これはあらかじめ決められた動作を行う場合には問題にならないが、時々刻々と速度と方向を変化させるときに、一定の速度でシリンダを動かしてしまうと、動作が完了するまで次の動作を行うことができない。そこで、シリンダに前進と後退を指示する方向制御プログラム 2 つと、シリアルポートから信号を受信し、方向制御のプログラムを起動するプログラム、シリンダの動作速度を指定するプログラムの合計四つのプログラムを用意した。シリンダコントローラのシリアルポートから、CompactRIO-NI9063 内で実行されたサブプログラムを受け取った信号を処理して実際にシリンダを動かす部分の系統図を **Fig. C.22** に示す。

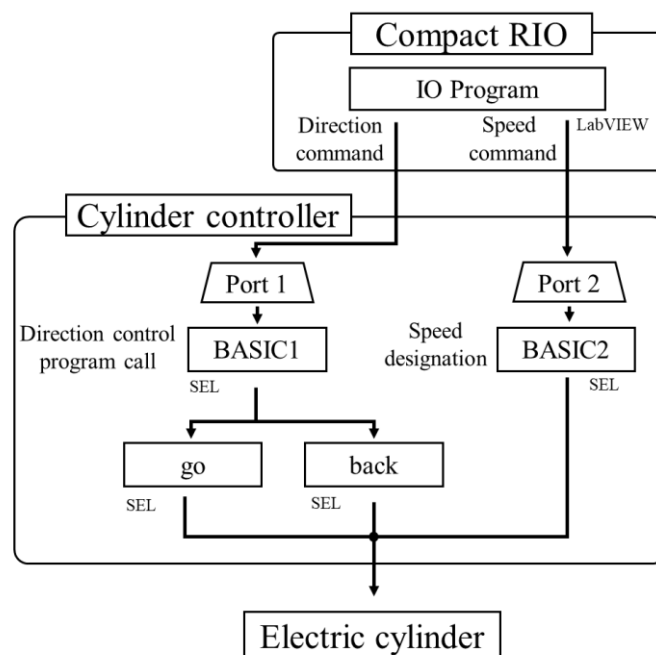


Fig. C.22 Changes in experimental values by changing the direction of operation of the cylinder

Table C.4 Chuck program of X-SEL

No.	Cmnd	Operated 1	Operated 2	Comment
1	VEL	10	11	2つのシリンダを速度 10 で移動
2	MOVP	10		位置 10 に移動
3	MOVP	1		位置 1 に移動
4	EXIT			プログラム終了

IO プログラムは CompactRIO-NI9063 中で動作する LabVIEW プログラムである。ここから、シリアル通信でシリンダコントローラ中の BASIC1 プログラム及び BASIC2 プログラムそれぞれ別のケーブルで通信させた。一つのケーブルでも通信はできるが、通信時間の短縮化による速度更新をより高速でできるように別々のケーブルとした。シリンダの前進プログラムは go, シリンダの後退プログラムは back とした。

BASIC1 プログラムを Fig. C.23 に示す。このプログラムはシリアルポート 1 で受信した文字列に合わせてシリンダに方向制御 (go, back) プログラムに動作指令を出すものである。

BASIC2 プログラムを Fig. C.24 に示す。このプログラムはシリアルポート 2 で受信した文字列に合わせてシリンダに速度の制御に動作指令を出すものである。Table C.4 プログラム No.30 から No.31 の間では速度変更指示の繰り返しなので省略した。両者は共に GOTO 関数を利用して、繰り返し処理が行われるようにしている。以下に利用した関数を示す。

SCHA 送受信終了文字設定

シリアル通信を行う際の終端文字を設定するものである。

OPEN チャンネルオープン

Operated 1 に入るシリアルポートの通信を始めることのできる状態にする。

TAG ジャンプ先指定

Operated 1 に入る番号の GOTO 命令のジャンプ先を指定する。

READ チャンネルから入力

Operated 1 に入るシリアルポートから値を受け取る。

ISEQ スtring比較

Operated 1 に入るシリアルポートから受けた文字列が Operated 2 に指定した文字列と同一の場合、一つ下の命令を、同一でない場合次に出てくる EDIF までの命令を飛ばす。

OVRD 速度比設定

電動シリンダの速度は VEL 命令で指定することができる。しかし、1~100 mm/s までの速度しか指定できない。OVRD 指令では Operated 1 に入る数字の比率に従って速度を低下させる。

EXSR サブルーチン実行

Operated 1 にあるサブルーチンを実行する。サブルーチンはプログラムの最後に記述する。

EXPG プログラム起動

Operated 1 にあるプログラムを起動する。X-SEL ソフトの起動時に、複数プログラム同時使用許可を選択していない場合、この指令を含むプログラムは実行することができない。

CHVL 速度変更

Operated 1 で指定した電動シリンダに対して、別プログラムで動作している軸の速度を変更して動作させる。別のプログラムで電動シリンダが動作していることが前提のプログラムである。

HOME 原点復帰

Operated 1 で指定した電動シリンダを原点復帰させる。

EXIT プログラム終了

プログラムを終了させる

GOTO ジャンプ

Operated 1 で指定した TAG 番号のある場所までプログラムをジャンプする。これによって繰り返し処理することができる。

BGSR サブルーチン開始

Operated 1 で指定するサブルーチンを開始する。同一プログラムでサブルーチンは 15 個つくることができる

このプログラムでは CompactRIO-NI9063 に受信確認として ok を送信するものである。

WRIT 文字列送信

SCPY で描写した文字列を通信ポートから送信する。

EDSR サブルーチン終了

この命令まででサブルーチンを終了する。

Fig. C.23 BASIC1 program of X-SEL

No.	Cmnd	Operated 1	Operated 2	Comment
1	SCHA	10		Command termination character setting
2	OPEN	1		Preparation for communication port 1 reception
3	TAF	1		Specify "TAG1" as the jump destination
4	READ	1	1	Received from communication port 1
5				
6	ISEQ	1	'go'	When "go" is specified for communication port 1 Execution of the program after this
7	EXPG	24		Start program 24 (go program)
8	EXSR	1		Execute subroutine 1
9	EDIF			If "go" is not specified for communication port 1, ignore the program up to this point
10				
11	ISEQ	1	'back'	When "back" is specified for communication port 1 Execution of the program after this
12	EXPG	25		Start program 25 (back program)
13	EXSR	1		Execute subroutine 1
14	EDIF			If "go" is not specified for communication port 1, ignore the program up to this point
15				
16	GOTO	1		Move to "TAG1"
17				
18	BGSR	1		Start subroutine 1
19	SCPY	1	'ok'	Draw a string
20	WEIT	1	1	Sent from communication port 1
21	EDSR			End of subroutine

Fig. C.24 BASIC2 program of X-SEL

No.	Cmd	Operated 1	Operated 2	Comment
1	SCHA	10		Command termination character setting
2	OPEN	2		Preparation for communication port 2 reception
3	TAF	1		Specify "TAG1" as the jump destination
4	READ	2	1	Received from communication port 2
5				
6	ISEQ	2	'down'	When "down" is specified for communication port 2 Execution of the program after this
7	OVRD	1		Change speed to default 1/100
8	EXSR	1		Execute subroutine 1
9	EDIF			If "down" is not specified for communication port 2, ignore the program up to this point
10				
11	ISEQ	2	'up'	When "up" is specified for communication port 2 Execution of subsequent programs
12	OVRD	100		Change speed to default 100/100
13	EXSR	1		Execute subroutine 1
14	EDIF			If "up" is not specified for communication port 2, ignore the program up to this point
15				
16	ISEQ	2	'000'	If "000" is specified for communication port 2, execute the following program
17	CHVL	11	0	Change 2 cylinder speeds to speed 0
18	EXSR	1		Execute subroutine 1
19	EDIF			Ignore the program up to this point if "000" is not specified for communication port 2
20				
21	ISEQ	2	'001'	If "001" is specified for communication port 2, execute the following program
22	CHVL	11	1	Change 2 cylinder speeds to speed 1
23	EXSR	1		Execute subroutine 1
24	EDIF			Ignore the program up to this point if "001" is not specified for communication port 2
25				
26	ISEQ	2	'002'	If "002" is specified for communication port 2, execute the following program
27	CHVL	11	2	Change 2 cylinder speeds to speed 2
28	EXSR	1		Execute subroutine 1
29	EDIF			Ignore the program up to this point if "002" is not specified for communication port 2
30				
omit				
31	ISEQ	2	'100'	If "100" is specified for communication port 2, execute the following program
32	CHVL	11	100	Change 2 cylinder speeds to speed 100
33	EXSR	1		Execute subroutine 1
34	EDIF			Ignore the program up to this point if "100" is not specified for communication port 2
35				
36	GOTO	1		Move to "TAG1"
37				
38	BGSR	1		Start subroutine 1
39	SCPY	1	'ok'	Prints the string "ok"
40	WEIT	2	1	Sent from communication port 1
41	EDSR			End of subroutine

C.8. 試験機指令方法

本試験機は、応力比一定、ひずみ速度一定、負荷荷重一定、シリンダ速度一定等、様々な試験速度で試験を実行できる。本項では、それぞれの方法における制御方法と指令値の選択方法について記述する。

C.8.1. 応力比一定、1 アクチュエータ制御

ポンプの吐出量や、シリンダの変位量を一定にする。どちらか一方のアクチュエータを一定の出力にした状態で、もう片方のアクチュエータを制御し、応力比を一定にする方法である。これは、シミュレーションを行う際の条件の簡略化のための試験を行う際に用いる。

この指令方法は指令値を使う必要はなく、応力比をメインプログラム内で決定しておくことで試験を行うことができる。Fig. C.25 に、それぞれのアクチュエータへの指令値の算出方法を示す。この例は、ポンプの指令値を一定とした場合を示している。指令関数は、試験時刻を変数とする関数である。シリンダの指令値は、各種センサと、求められている応力比をもとに算出される。

この制御方法は、片側のアクチュエータは滑らかに動作させることができる一方で、追従させるアクチュエータは細かく制御量を指示するため、アクチュエータの動きの滑らかさに差が出る。さらに、追従するアクチュエータは、基準としているアクチュエータに対し、プログラムで 1 ループ分遅れる。

ひずみ速度一定で試験を行う場合を考える。試験中に相当ひずみを測定して、アクチュエータにフィードバックするのは困難だった。このため、すべての経路の応力とひずみの関係を予測することが困難な試験である、負荷除荷試験のひずみ速度一定での試験では、最大主応力方向のひずみのみを考慮して実験を行った。

C.8.2. 応力比一定、2 アクチュエータ制御

ポンプの吐出量と、シリンダの変位量をあらかじめ定めておいた指令値に合わせて制御する方式である。指令値は、円周方向応力と管軸方向応力を CSV ファイルで連続的に並べたものを利用する。それぞれのアクチュエータには、必要な計測を同じループ内で行うことができる。Fig. C.26 にそれぞれのアクチュエータへの指令値の算出方法を示す。

この方法は指令値を円周方向と管軸方向の二方向の応力比を用いている。このため、指令

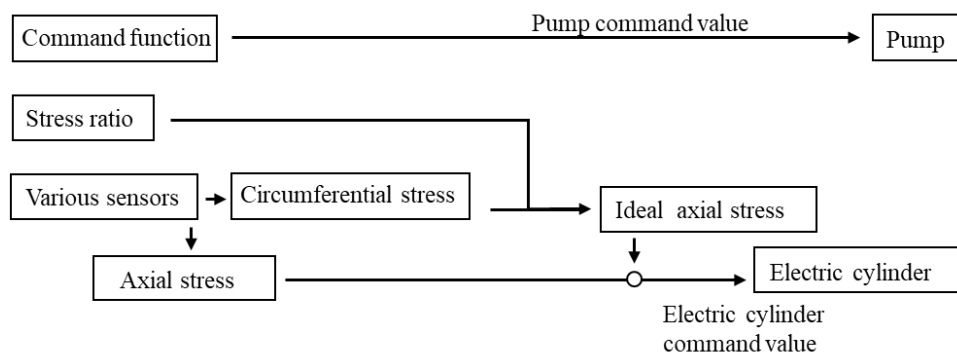


Fig. C.25 A method to control one actuator while maintaining the stress ratio

値の応力変化量を、ひずみが一定速度になるように変化させれば、ひずみ速度一定の試験が可能である。この方は、任意の二軸応力下での応力-ひずみの関係が既知である必要がある、すなわち応力比一定かつ応力増加速度一定の試験を行った後、応力比一定かつひずみ速度一定の試験を行う必要がある

C.8.3. 応力比一定ひずみ速度一定, 2アクチエータ制御

最大主ひずみの速度を制御する方式である．これは十分に材料の物性の理解が進むと実行することができる．まず，一つ前の制御周期（0.02 秒前）における最大主応力方向のひずみとその時に指令されているひずみ速度から，現在の指令ひずみを算出する．これと，現在の制御周期における最大主応力方向のひずみの差を取り，フォードバックした．中間主応力は，その指令周期における最大主応力と，応力比から算出した中間応力指令値を使ってフィードバックした（Fig. C.27）．

応力などと異なり，ひずみ速度は小さく，測定誤差の比率が大きい．また，一般的に中間主ひずみの大きさは異方性がある材料では，試験前から予測することは難しい上に，仮に測定できても最大主ひずみ速度と比較して，さらに小さい値であることがある．負荷－除荷試験を行う際には，負荷ごとに指令値を作成するのは現実的ではないため，この手法を使う．

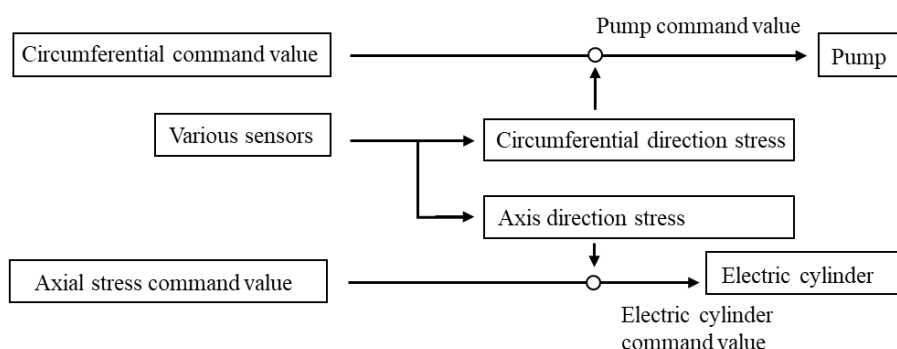


Fig. C.26 A method to control two actuators while maintaining the stress ratio

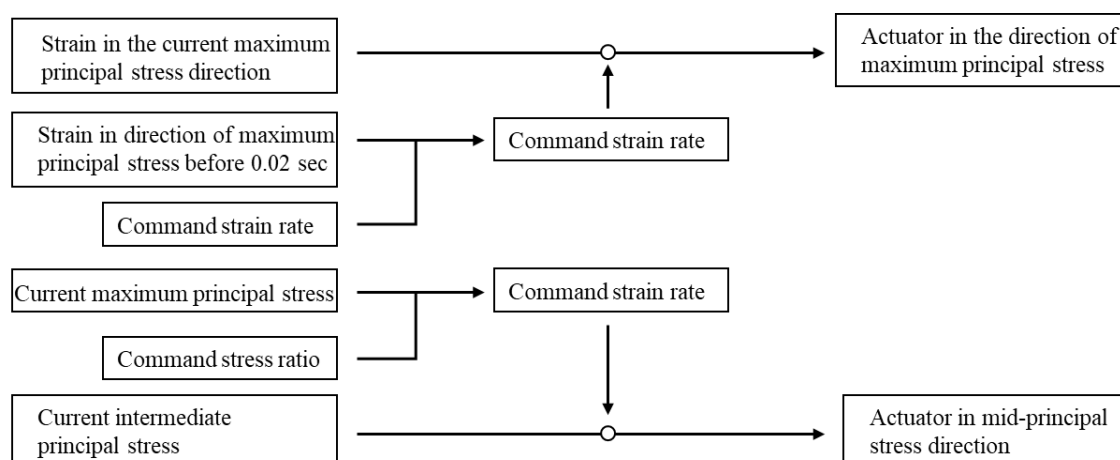


Fig. C.27 A method to control two actuators while maintaining the stress ratio and strain rate

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方々からご指導、ご助言頂きましたこと、深く感謝申し上げます。

本学大学院工学研究院先端機械システム部門、桑原利彦 教授には、学部4年から現在まで指導教員として熱意溢れるご指導、ご助言賜りましたこと深く感謝いたします。山中晃徳 教授には研究室が異なるにもかかわらず、実験装置の制御手法の構築をはじめいくつものご支援やご指摘を頂きましたこと、本論文の副査を引き受けくださいましたこと深く感謝申し上げます。夏恒教授、小笠原俊夫教授、中本圭一教授には博士論文の審査員として、貴重なご意見を賜りましたこと、感謝申し上げます。

実験装置の部品の発注や、引き継ぎが十分に行えなかった試験機的设计思想や現状等を教えていただきました本研究室、秀野雅之技術職員に心から感謝申し上げます。

共同研究先である東洋紡株式会社、住山琢哉様、古市謙次様、野々村千里様、株式会社メカニカルデザイン小林卓哉様には供試材のご提供、研究のご指導はじめ様々な面でご助言、ご教授賜り感謝いたします。

研究室において実験装置の捜査手法や、研究室での過ごし方のご教授を頂きました、関口千春氏、高木翔平氏、中野勇人氏、長井圭祐氏、前田大輝氏、永野千晴様に感謝いたします。

学部4年生から修士2年生までの初めの3年間ともに研究、研究室行事に取り組んだ桑原研究室同期の三宅能安氏、乃村峻矢氏と、博士後期1年生から博士後期3年生までの終わりの3年間同期のように研究室で接してくれた遠藤茉晴氏、大淵慎太郎氏、立花連氏に深く感謝申し上げます。

輪講で議論頂いた、小笠原柚君、川崎公伸君、南沢直樹君、西村俊城君、安藤佳蓮さん、峯村一輝君、三好淳之介君、浅利俊介君、飯塚悠貴君、池田ゆき乃さん、池田航君、佐藤創太君、に感謝いたします。

本大学ロボット研究会 R.U.R.の同期の方には、研究を遂行する上で幅広い領域の知識を習得させていただきました。特に同ロボット研究会から図らずしも同じ研究室に配属された高田柚介氏には制御分野において重要な助言をいただきました。深く感謝いたします。

最後に博士後期課程としての生活を実践して示してくれた、大島商船高等専門学校電子機械工学科 助教小林心氏、精神不安定になった際に陰ながら支えてくれた七尾岳彦氏そして、勉学の機会を与えてくださった家族に感謝いたします。

令和5年6月21日