

修士論文

平成 30 年度

各種樹脂材料の
強度設計指針に関する実験的研究

三重大学大学院 工学研究科 博士前期課程

機械工学専攻

生体システム工学研究室

栗田 詢也

目次

第1章 緒言	1
第2章 理論	2
2-1 高分子材料	2
2-2 ポリアミド6樹脂	3
2-2-1 定義および構造	3
2-2-2 特性および用途	3
2-3 ポリメタクリル酸メチル樹脂	3
2-3-1 定義および構造	3
2-3-2 特性および用途	4
2-4 脆性と延性	5
2-5 破損と降伏	6
2-6 降伏理論	6
2-6-1 最大主応力説	6
2-6-2 最大せん断応力説	7
2-7 粘弾性特性	7
2-8 クリープ特性	7
第3章 実験方法	10
3-1 試験片	10
3-2 力学試験	10
3-3 力学試験条件	12
3-3-1 ひずみ速度条件	12
3-3-2 クリープ試験条件	12
3-3-2 弾性限調査	13
第4章 実験結果および考察	21
4-1 応力 - ひずみ関係	21
4-2 ひずみ速度依存性	22
4-3 クリープ変形	22
4-4 破損曲面	23
第5章 構成方程式の構築	32

5-1	モデルの仮定	32
5-2	暫時的な弾性係数の推定	32
5-2	粘弾性効果の導入	34
5-4	構成方程式の構築	35
第6章 結言		44
参考文献		46
謝辞		47

第1章 緒言

樹脂材料は金属材料と比較して高い比強度を有しており、電気絶縁性や耐薬品性をはじめとした金属材料とは異なった特性を備えているため、工業分野のみならず医療、航空宇宙分野でも利用されている。現在、全世界における樹脂材料の生産量は年間でおおよそ4億トンに達しており、今後さらなる増加が予測される⁽¹⁾。樹脂材料のなかでも熱可塑性樹脂材料は熱硬化性樹脂材料に比べて安価で、リサイクルを容易に行うことができるため、今後さらなる応用が期待されている。

一般に機械構造用部品を設計するためには、負荷による破損と負荷に対する変形挙動についての予測が要求される。つまり熱可塑性樹脂材料を用いた機械構造用部品の設計において強度および変形についての把握が必要である。機械構造用部品は引張、圧縮およびせん断の力が複合的に加わる複雑な応力状態におかれている。熱可塑性樹脂材料の適切な強度設計を行うためには、任意の負荷条件に対する強度特性および機械的性質の理論化が望まれる。複雑な複合負荷状態を表現できる理論を展開するうえで、単軸引張、単軸圧縮および単純ねじりといった基礎的な単純荷重条件下における変形挙動を包括的に調査することが重要視される。現在、新たな樹脂材料の開発が盛んに行われており、熱可塑性樹脂材料は多種類存在している。樹脂材料は構造や組成、製造方法といった多数の因子によって異なった変形挙動を示しうる。様々な産業分野で用いられる熱可塑性樹脂材料に対して汎用的な強度設計指針の構築が求められる。幅広く応用可能な強度設計指針を構築するうえで、多種多様な複数の熱可塑性樹脂材料の強度および変形に関する理論を導出できる共通の手続きが期待される。強度設計指針の構築においてまずは限定されたメカニズムで変形挙動が説明できる単純な構造の樹脂材料について比較すべきである。そこで本研究では単純な分子構造を有するポリマーで形成される複数の熱可塑性樹脂材料の単純荷重条件下における各種機械的性質を比較し、強度設計指針の構築を目指した。

本論文は以下のとおりに構成されている。第2章で熱可塑性樹脂材料の特性や材料の破損といった本研究に関わる基礎的な知見を述べる。第3章では強度設計指針を構築するために行った実験方法について述べる。第4章で力学試験の結果および考察を示し、第5章には実験結果に基づくポリアミド6 (Polyamide 6, PA 6) 樹脂とポリメタクリル酸メチル (Polymethyl methacrylate, PMMA) 樹脂における構成方程式の構築方法について提示する。

第2章 理論

2-1 高分子材料⁽²⁾⁽³⁾

高分子材料は巨大分子であるポリマー分子の集合体である。ポリマー分子はモノマーが共有結合によって多数結び付けられた分子である。一方、ポリマー分子間は主にファン・デル・ワールス結合によって結びついている。高分子材料のなかでもポリアミドのように水素結合とファン・デル・ワールス結合で結びついている樹脂材料が存在する。2つの原子間で電子を共有することで強く結合する共有結合の結合エネルギーは 50～200kcal/mol である。水素原子を引きつけることによって結合力が生まれる水素結合の結合エネルギーは2～7kcal/mol である。ファン・デル・ワールス結合は双極子のゆらぎによって生じる結合であり、結合エネルギーは 0.01～1kcal/mol である。ファン・デル・ワールス結合は共有結合と比較して結合エネルギーが低く、破壊されやすい。すなわち高分子材料に負荷を加えると、ポリマーのモノマー間よりもポリマーのどうしの結合力が低い。そのため、ポリマー間で破壊していく。分子間の結合力は分子間距離が離れるにつれて結合力は小さくなる。たとえば温度が高くなり、分子運動が活発になると分子間距離は離れ、分子間結合力は小さくなる。また高分子材料に添加剤を加えるとポリマー分子間に入り、分子間距離が離れるため、強度は小さくなる。加えてポリマー分子間の絡み合いも強度に関係する。ポリマー分子の長さが長くなると分子の絡み合いは多くなるため、強度は大きくなる。

ランダムコイル状態のポリマー分子に応力を加えると、ポリマー分子が応力方向に引き伸ばされた状態となる。高温にされ分子が移動しやすい状態となったポリマー分子は応力が作用したまま冷やされると分子が応力の方向に配向したまま固化される。分子配向すると、配向に対して平行方向の強度は大きく、垂直方向の強度は小さくなる性質がある。

高分子材料の破壊には脆性破壊と延性破壊がある。延性破壊は伸びを示しながら破壊するが、脆性破壊では伸びを示さずクレーズが発生し、応力集中によって破壊が生じる。この破壊の違いは高分子材料がクレーズ破壊するか、せん断降伏破壊するかによって決まるといわれている。クレーズ破壊は応力作用下でクレーズが発生したのち、成長して脆性破壊するものである。またせん断降伏破壊はポリマー分子間でせん断降伏変形を示しながら延性破壊するものである。クレーズ破壊臨界応力がせん断降伏破壊臨界応力より小さければ脆性破壊が生じ、逆の場合は延性破壊が生じる。すなわち高分子材料は負荷条件によって脆性破壊あるいは延性破壊を示す。この脆性破壊や延性破壊といった特性の把握は各種熱可塑性樹脂材料の強度設計において重要であると考えられ、応力-ひずみ関係をあらわす構成方程式に大きく関与することが予測される。

2-2 ポリアミド 6 樹脂⁽⁴⁾⁽⁵⁾

2-2-1 定義および構造

ポリアミド (Polyamide) 樹脂とはアミド結合 ($-\text{CONH}-$) を有する直鎖状高分子である。なかでも脂肪族鎖を主とするポリアミド樹脂をナイロン (Nylon) 樹脂と呼ぶ。ナイロン樹脂の語源は DuPont 社が世界に初めて発表したときに名付けたものであり、現在では一般名として用いられている。ナイロン樹脂にはポリアミド 6, ポリアミド 66, ナイロン 11 といったいくつかの種類が存在しており、数字によって構成単位中の炭素数が異なる。たとえばポリアミド 6 樹脂の場合、6 つの炭素を基準として構成されている樹脂材料であることを意味する。ポリアミド 6 樹脂は主にラクタムの開環重合によって製造される (図 2-1(a))。ポリアミド 6 樹脂は炭素, 水素, 酸素, 窒素で構成され、直鎖状高分子であることから単純なポリマー構造を有する樹脂材料である。

2-2-2 特性および用途

(1) 耐摩耗性

ポリアミド 6 樹脂は摩耗性に優れており、すべりをともなう部品に使用される。無潤滑状態でも使用が可能であり、騒音が小さい。

(2) 耐薬品性

ポリアミド 6 樹脂は化学薬品に対して強い傾向を示す。特にガソリン, 潤滑油に対して強い抵抗性をもつ。

(3) 耐衝撃性

ポリアミド 6 樹脂は他の樹脂材料と比較して高い靱性を有しているため、衝撃強さが大きい傾向にある。水分を吸収した状態ではさらなる衝撃強さが見込める。

以上の特性からポリアミド 6 樹脂は自動車部品のパイプやタンク類をはじめとして歯車, 軸受, スペーサー, カムといった機械部品に多く利用されている。またフィルムやモノフィラメントとしてもよく利用されている。

2-3 ポリメタクリル酸メチル樹脂⁽⁶⁾

2-3-1 定義および構造

アクリル樹脂という語源はアクリロ基を有する化合物を主原料とした合成樹脂の総称である。現在のプラスチック分野でのアクリル樹脂はメタクリル酸メチルを主原料とする合成樹脂の総称を示す。メタクリル酸メチルは炭素間に二重結合を有する無色透明

な液状物質である。二重結合は紫外線、重合開始剤あるいは重合触媒の作用下において付加重合反応を起こし、数百万個から数万個のメタクリル酸メチルが結合した無色透明のポリメタクリル酸メチルを生ずる (図 2-1(b))。ポリメタクリル酸メチルは炭素、水素、酸素のみで構成される線状のポリマー (linear polymer) であり、加熱すると約 100°C で軟化し、さらに熱を加えるとゴム状態となる。高温域では熔融状態になるものの、冷却すると再び固化するポリメタクリル酸メチルはいわゆる熱可塑性樹脂材料 (thermoplastic resin material) である。ポリメタクリル酸メチルのなかでも、モノマーユニットの立体的配置によってポリマーの性質は大きく異なるとされている。

2-3-2 特性および用途

(1) 無色性, 透明性

ポリメタクリル酸メチル樹脂は現存する樹脂材料の中で、最も無色性、透明性が高い。すなわち可視光線は全波長にわたりほとんど吸収されない。特に鑄込みポリメタクリル酸メチル樹脂の透明性は高く 2m 以上の厚さになっても十分な透視が可能である。また紫外線も 2700Å まで透過する。

(2) 成形性

鑄込みのポリメタクリル酸メチル樹脂板は、無機ガラス面上で鑄込み重合されるため、表面の平滑性は極めて良好であり、完全な鏡面状態が得られる。また射出成形によって得られる成形品も極めて美しい成形面が得られる。加えて切削や切断された部分も研磨により十分光沢の高い表面が得られる。

(3) ノッチ敏感性

ポリメタクリル酸メチル樹脂は樹脂材料としては脆い樹脂にとされており、ノッチに対する敏感性が高い。よって断面の欠けや穿孔面の欠けがノッチとして働き、破壊をもたらすとされている。

(4) 有機溶剤の影響

ポリメタクリル酸メチル樹脂はケトン、塩素化炭化水素、芳香素族炭化水素、エステル類に溶解性である。またアルコールおよび塩化炭素類には膨潤性である。溶解性のない膨潤性の有機液体あるいはその蒸気によっても樹脂の表面状態は悪化する。また内部ひずみや外力によってグレーズやクラックが生ずる。

以上の特性からアクリル樹脂は航空機の風防ガラスにはじまり、広告塔、娯楽用建築物の屋根、水族館の水槽といった大型の建築物から義歯、義歯床といった小型なものまで幅広く利用されている。

2-4 脆性と延性

力学試験において材料を破損させる場合、試験片に加えられる負荷は材料の破損現象を起こさせる原因、すなわち駆動力である。駆動力を普遍的に表すために、通常は破損現象が起こる点あるいは領域の適当な力学状態量を用いる。たとえば、無き裂材では応力、ひずみを用い、き裂では応力拡大係数・J 積分値などが用いられる⁷⁾。

破壊という現象も巨視的尺度で定義すれば、もともと連続・一体であった固体が、不連続面、すなわち破面を形成して分離する現象である。一方、原子あるいは分子間隔の尺度で見れば、破壊は固体を形成している原子あるいは分子相互間に働く結合力の切断で起こる。材料の破壊は破壊経路が結晶粒を貫通する粒内破壊と破壊経路が粒界を通る粒界破壊の2つに大別される。粒内破壊はすべりによって起こるせん断型破壊 (shear fracture) とへき開によって起こるへき開型破壊 (cleavage fracture) にさらに細かく分類される。一般に延性材料の破壊はせん断型破壊であり、脆性材料の破壊はへき開型破壊である。以下に(1)延性破壊過程と(2)脆性破壊過程について説明する。

(1) 延性破壊過程 (せん断型破壊)

延性破壊とは本来巨視的に大きな塑性変形をともなう破壊を意味する。一般的に延性材料は、介在物などから発生したボイドが応力およびひずみの集中源の働きをして、ボイドの成長・合体を進行させ、最終的にはクラック先端領域での局所的なくびれによって破壊する。よって、破面はディンプルで覆われ、光沢のないまだらな破面を生じる。一般に延性材料は最大せん断応力が支配的な破壊を生じるため、単軸引張および単軸圧縮において Mohr の応力円より、せん断角は 45° を示す。

(2) 脆性破壊過程 (へき開型破壊)

へき開型破壊とは、結晶中のへき開面に沿って分離することによって生じる破壊である。低温や塑性変形に対する拘束の大きいなどの条件下において、bcc 金属およびセラミックスにおけるすべり帯阻止端での引張応力は結合応力に達し、結晶中で平均した応力は降伏応力の大きさであるにも関わらず、微視クラックが発生する。bcc 金属では、原子間結合力が最も弱いへき開面と呼ばれる面に沿って、この微視クラックが生じる傾向にある。へき開は、比較的低いひずみにおいて、へき開面に沿って起こるので、破面は結晶粒単体の平面からなり、一般に銀白色の光沢を呈し、電子顕微鏡で見るとリバーパターンと呼ばれる模様が見られるのが特徴である。一般に脆性材料は最大主応力が支配的な破壊を生じるため、Mohr の応力円より、せん断角は 0° または 90° を示す。また、脆性破壊とは本来巨視的にみて破壊まで塑性変形量が少ない破壊を意味する。巨視的に塑性変形の少ない破壊は、破壊までに吸収されるエネルギーが少なく、かつ構造物中に蓄えられているエネルギーがき裂伝播に費やされることになり、発生したき裂が一瞬の

うちに広範囲に伝播してしまうという特徴がある。

以上のように、延性破壊と脆性破壊の区別というものは曖昧に定義されているが、破壊までに生じた塑性変形または加えられた塑性仕事（吸収エネルギー）の多寡を基準として工学的に判断される。平滑材引張試験で、破断伸びが数十%以上であるならば延性破壊、破断伸びが数%であるならば脆性破壊とする目安がある。

2-5 破損と降伏

物体内に大きな応力が生じると、物体は塑性変形、あるいはき裂（crack）を生じて、ついでに破断（rupture）する。一般にき裂を生じて破断する現象を破壊（fracture）という。破壊には至らなくても塑性変形することで十分な機能を失うことを破損（failure）という。完全弾性の状態を要求するものに対しては、塑性変形の開始を弾性破損（elastic failure）という。単軸応力状態では材料の降伏点、耐力が弾性破損を決める基準応力になる。

鋳鉄のような脆性材料（brittle material）ではほとんど塑性変形しないで破壊する。ゆえに破壊と破損は一致すると考えてよい。脆性材料の破壊は引張力が材料の分子間の結合力より大きくなって破断するので、脆性破壊または分離破壊（cohesive fracture）という。脆性材料の破断面は垂直応力に垂直である。一方、軟鋼のような延性材料（ductile material）では降伏後に大きな塑性変形を起こして破断する。塑性変形はせん断応力によるすべりに起因するので、延性材料の破壊を延性破壊あるいはせん断破壊（shear fracture）という。以上のように材料の破壊を考えると、破壊が垂直応力によって支配される材料は分離破壊し、せん断応力によって支配される材料はせん断破壊する。

2-6 降伏理論

2-6-1 最大主応力説

最大主応力説は物体中のある任意の点において生じる3つの主応力 σ_1 , σ_2 , σ_3 のうちのいずれかが引張臨界応力あるいは圧縮臨界応力に達すれば破損が生じるという説である⁽⁸⁾。

ここで、3つの主応力を $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, $\sigma_1 > 0$, $\sigma_3 < 0$ とし、引張降伏応力を σ_Y 、圧縮降伏応力を σ_Y' とすると、次式のようにあらわされる。

$$\sigma_1 = \sigma_Y \quad \text{or} \quad \sigma_1 = \sigma_Y' \quad (2-1)$$

最大主応力説は一般的に脆性材料の破壊においてよく一致するとされている。

2-6-2 最大せん断応力説

最大せん断応力説は、Tresca によって提唱され、物体中のある任意の点において最大せん断応力がせん断の臨界応力に達すれば破損を生じるという説である⁽⁸⁾。応力テンソル $[\sigma_{ij}]$ について κ_0 を定数とし、3つの主応力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 に対して降伏条件は、

$$F(\sigma_{ij}) = \max \left\{ \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}, \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_3 - \sigma_1|}{2} \right\} - \kappa_0 = 0 \quad (2-3)$$

とあらわされ、 $F(\sigma_{ij}) = 0$ のとき物体が降伏する最大せん断応力説は一般的に延性材料の降伏においてよく一致するとされている。

2-7 粘弾性特性⁽²⁾⁽⁹⁾

樹脂材料は弾性と粘性の両方の性質をもつ粘弾性が挙げられる。樹脂材料が粘弾性特性を示す理由としてポリマーは巨大分子の集合体であることに起因する。樹脂材料に力が加わると、分子の原子間距離、結合角が瞬間的に変位して弾性ひずみが発生し、時間が経過するとポリマー分子間でせん断降伏変形によるひずみが生じる。前者は時間に依存しない可逆的な弾性変形であり、後者は時間に依存する不可逆な粘性変形である。粘弾性モデルはスプリング（弾性）とダッシュポット（粘性）の組み合わせであらわされる。基本的なモデルとして図 2-2 に示すようなマックスウェルモデルとフォクトモデルで示される。応力やひずみは時間の関数化できるもののポリマーは多分子性であるため、これらのモデルを組み合わせた複雑な関数としてあらわされる。また粘弾性特性は時間ばかりでなく温度によっても変化する。つまり温度が高い場合は分子間が塑性変形しやすく、粘性に基づく時間依存の変形が起こりやすくなる。一方、温度が低い場合には弾性に基づく変形が支配的になる。したがって力学的特性は時間や温度に依存しており、樹脂材料の設計において粘弾性特性に基づくクリープや応力緩和特性を考慮しなければならない。

2-8 クリープ特性⁽²⁾⁽¹⁰⁾

材料に一定の応力を加え、材料の変形は時間とともに増加するクリープ(creep)現象を示す。一般に緩和ひずみと時間との関係を示すクリープ曲線(creep curve)は主につぎに示す3つの領域に分けられる。

(1) 領域 1：遷移クリープ (transient creep) または第 1 期クリープ (primary creep)

負荷直後からひずみ速度がしだいに減少する部分で、ひずみ速度は一定値

に到達する.

- (2) 領域2 : 定常クリープ (steady state creep) または第2期クリープ (secondary creep)
ひずみ速度がほぼ一定となる部分で, 長期にわたって継続する.
- (3) 領域3 : 加速クリープ (accelerating creep) または第3期クリープ (tertiary creep)
クリープ曲線が上向きに曲がり, ひずみ速度は急に増加し破断に至る部分
で短い時間で終了する.

クリープ試験の大部分は単軸引張について行われているが, クリープ曲線は圧縮, 曲げ, ねじりあるいは複合負荷状態でも認められている. クリープ変形は通常 10^3 時間 (約 1.4 ヶ月), 10^4 時間 (約 1.1 年) あるいは 10^5 時間 (約 11.4 年) のような長い期間で進行する非弾性変形である. クリープ変形は負荷応力と温度に強く依存するとされている.

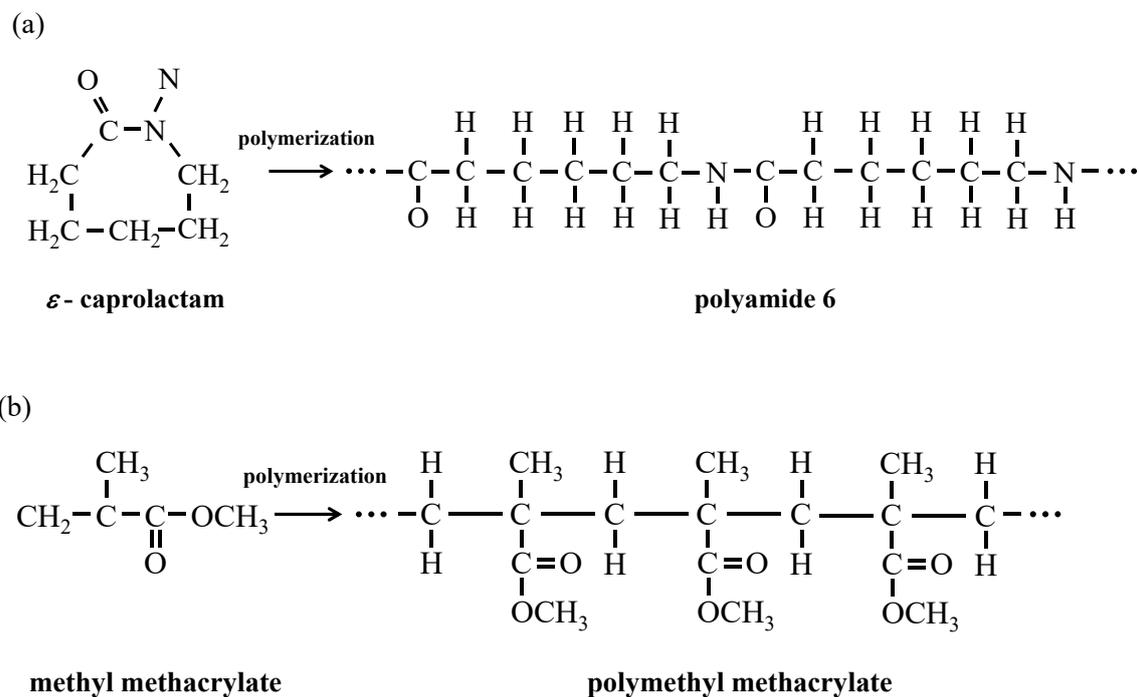


Fig.2-1 Generation flow and Structure of (a) polyamide 6 and (b) polymethyl methacrylate.

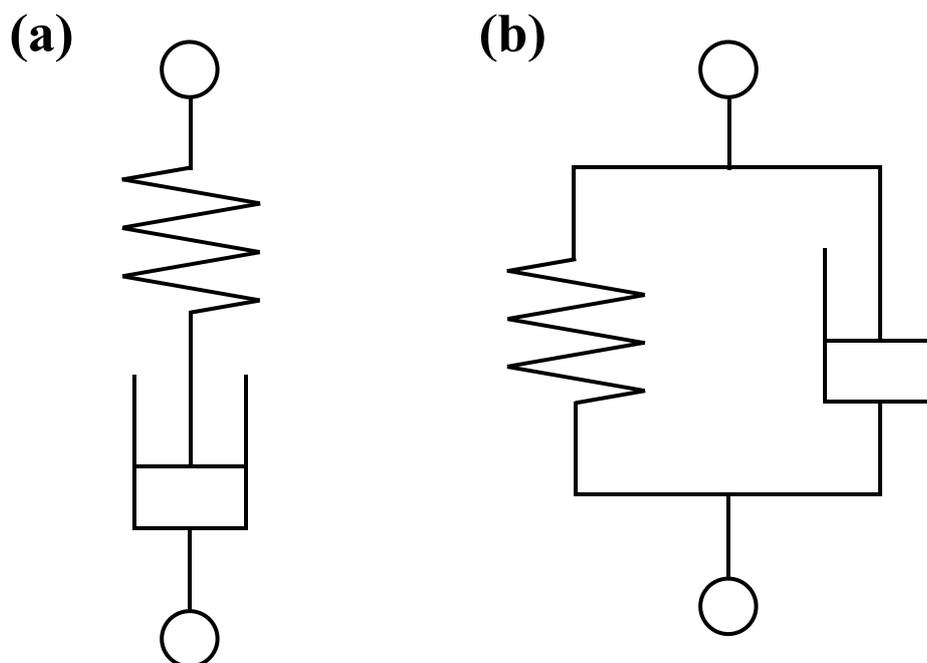


Fig.2-2 (a) Maxwell model and (b) Voigt model.

第3章 実験方法

本章では、各種熱可塑性樹脂材料における強度設計指針を得るために本研究で用いた熱可塑性樹脂材料と各種力学試験の手法について詳細に述べる。

3-1 試験片

本研究では各種熱可塑性樹脂材料における強度設計指針について検討するために2種類の熱可塑性樹脂材料を比較した。2種類の樹脂材料は単純な分子構造を有するポリマーで形成され、大幅に用途が異なるポリアミド6樹脂とポリメタクリル酸メチル樹脂とした(2-2節, 2-3節)。図3-1(a)および図3-1(b)に単軸引張、単純ねじりの試験片形状と単軸圧縮の試験片形状を示す。単軸引張、単純ねじりの試験片(図3-1(a))は標線間外径 $\phi 10\text{mm}$ 、標線間内径 $\phi 8\text{mm}$ 、標線間距離 15mm の中空丸棒形状とした。試験片の両端は力学試験機に取り付けるためにM16のねじ切り加工を施した。また単純ねじり試験の両端ねじ部には、ねじりによるトルクを標線間部に伝えるために面取りを行った。単軸圧縮の試験片(図3-1(b))は標線間外径 $\phi 7\text{mm}$ 、標線間距離 10mm の円柱形状に機械加工した。全ての試験片について切削痕が力学試験に影響を及ぼさないようにするため、標線間部に表面研磨を施した。

後述するとおり、本研究では抵抗線箔ひずみゲージを使用した。試験片にひずみゲージを貼り付けるにあたり、小型超音波洗浄機 VC-1 (アドバンス・アルファ製)を用いて試験片表面の洗浄を行った。ポリアミド6樹脂には工業用エタノールを使用し、有機溶剤の影響を受けやすいポリメタクリル酸メチル樹脂は蒸留水による洗浄とした(2-3節)。洗浄後、試験片とひずみゲージの接着効果を高めるために表面処理剤 S-9B (共和電業製)を各試験片の標線間中央部に塗布した。ひずみゲージを試験片に貼り付ける際には、ひずみゲージ用の常温硬化型瞬間接着剤を使用した。最初に常温硬化型瞬間接着剤 CC-36 (共和電業製)をひずみゲージに滴下し、標線間中央部をおよそ2分間加圧することで貼り付けた。その後常温硬化型瞬間接着剤 CC-33A (共和電業製)を貼り付けたひずみゲージの上に滴下し、再度1分間加圧することで固定性を高めた。

3-2 力学試験

熱可塑性樹脂材料の強度設計指針の構築において実用的な理論を提示するために単軸引張、単軸圧縮、単純ねじりといった基礎的な単純荷重条件下における変形挙動について包括的に調査することを重要視した。単軸引張および単純ねじり試験では、力学試験機のプルロッド(図3-2)に試験片(図3-1(a))のねじ部を嵌合し、押え板で強固に締

結した。また単軸圧縮試験には加圧用の治具（図 3-3）を使用し、図 3-1(b)の試験片を加圧治具間に取り付けて圧縮試験を行った。プルロッドおよび加圧治具が設置されたクロスヘッドを軸方向に移動させることで引張および圧縮負荷を加えた。試験機のプルロッドはクロスヘッド上の回旋機構に接続されており、クロスヘッドの移動軸まわりの回転によって試験片にトルクを加えることで単純ねじり試験を行った。すなわち単純ねじり試験片（図 3-1(a)）には軸力とともにねじり負荷を複合的に与えることも可能である。

力学試験には、複合負荷力学試験機 Autograph AG-G20kN（島津製作所製、図 3-4、図 3-5）を使用した。本試験機の引張/圧縮負荷部には最大荷重 $\pm 5\text{kN}$ のロードセルを、ねじり負荷部に最大トルク $\pm 10\text{N}\cdot\text{m}$ のトルクセルを備えている。軸応力 σ [MPa]およびせん断応力 τ [MPa]はロードセルによって計測された軸方向の荷重 W [N]およびトルクセルによって計測されたトルク T [N \cdot mm]から次式で算出した。

$$\text{軸応力} \quad : \quad \sigma = \frac{W}{\pi(d_{\text{out}}^2 - d_{\text{in}}^2)/4} \quad (3-1)$$

$$\text{せん断応力} \quad : \quad \tau = \frac{T}{\pi(d_{\text{out}}^4 - d_{\text{in}}^4)/32} \quad (3-2)$$

d_{out} [mm]は標線間外径、 d_{in} [mm]は標線間内径をあらわしている。また本試験機はクロスヘッドの移動速度および回旋機構の回転速度を調節することで試験片に加えるひずみ速度を変更することが可能である。クロスヘッド速度は $\pm 0.05\text{mm}/\text{min}$ から $\pm 1000\text{mm}/\text{min}$ の範囲、ねじり速度は $\pm 0.36\text{deg}/\text{min}$ から $\pm 3600\text{deg}/\text{min}$ の範囲で設定可能である。クロスヘッド速度およびねじりの速度の精度は定常状態において $\pm 0.5\%$ 以内に抑えられている。したがって表記の範囲内での精度よく定クロスヘッド速度試験が可能である。

本試験機はロードセルおよびトルクセルからのフィードバックにより定荷重速度または定トルク速度による負荷試験を実現できる。荷重負荷速度およびトルク負荷速度はゼロ ([N/s]または[N \cdot m/s])を設定することで垂直負荷およびせん断負荷で一定の応力状態を維持することができる。すなわち所望の応力状態まで定クロスヘッド速度あるいは定回転速度制御によって負荷し、定荷重条件を維持することでクリープ特性について調査することが可能である。ただし、単軸引張および単純ねじり試験片はいずれもプルロッド取り付け部の変形が生じ、単軸圧縮試験片では加圧治具の機構的変位が生じるため、クロスヘッドの移動量から正確な標線間のひずみを測定することができない。そこで本研究ではひずみの測定に抵抗線箔ひずみゲージを用いた。軸方向のひずみ計測には KFG および KFEL タイプのひずみゲージ（共和電業製）を使用し、せん断のひずみ計測には KFG タイプのクロスゲージ（共和電業製）を使用した。図 3-6、図 3-7 はそれぞれ軸方向のひずみとせん断ひずみの測定方法を示したものである。軸方向ひずみは y 軸か

ら θ 傾いて貼り付けられたひずみゲージによって計測されるひずみを ε ，x軸方向のひずみ ε_x ，y軸方向のひずみ ε_y ，せん断ひずみ γ とすると，

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cos 2\theta + \frac{1}{2}\gamma \sin 2\theta \quad (3-3)$$

とあらわされる．図3-7に示したひずみゲージ1，2より計測されるひずみをそれぞれ ε_1 ， ε_2 とすると， ε_1 ， ε_2 それぞれ式3-3の θ に 45° ， -45° を代入して得られる．せん断ひずみ γ は，図3-7に示すせん断方向を正として，次式であらわされる．

$$\gamma = \gamma_{xy} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (3-4)$$

図3-8に実験システムの概略図を示す．ロードセルおよびトルクセルの信号と，ブリッジボックスを介して動ひずみ測定器DPM-711B（共和電業製）から出力された信号はセンサインターフェースPCD-320A（共和電業製）を通じてA/D変換され，同期出力された荷重，トルクおよびひずみのデータをそれぞれパーソナルコンピュータで採取した．

また各種力学試験における試験片の変形状態を把握するために標線間部をビデオカメラにて撮影した．負荷開始からの時間経過を監視することで計測された変形量と変形挙動との相関がとれるようにした．

3-3 力学試験条件

3-3-1 ひずみ速度条件

多くの熱可塑性樹脂材料はひずみ速度依存性を有すると報告されている⁽²⁾⁽³⁾．ポリアミド6樹脂とポリメタクリル酸メチル樹脂の機械的性質に対するひずみ速度依存性の影響を調査するため，力学試験機のクロスヘッドおよび回旋部を一定の速度で駆動させ，様々なひずみ速度条件下で単軸引張，単軸圧縮および単純ねじり試験における応力-ひずみ関係を調査した．3-2節で述べたように試験片と冶具の締結機構により，標線間部の変形は必ずしもクロスヘッドの移動量と一致しない．そこで，ひずみゲージから計測されたひずみと経過時間から実際のひずみ速度を算出した．本研究ではひずみ速度を $1.7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ から $7.2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ の範囲で変更した．

3-3-2 クリープ試験条件

3-2節で述べたように本研究で用いた力学試験機はロードセルなどの力学センサからの信号のフィードバックにより一定荷重速度試験を行うことが可能である．負荷途中において荷重速度をゼロにすることで単位時間あたりの荷重やトルクの変動を停止し，定

応力状態を実現できる。この定応力下における試験片の変形をひずみゲージによって計測することで緩和ひずみを調査することが可能である。すなわち各種熱可塑性材料のクリープ変形挙動を詳細に調べることができる。

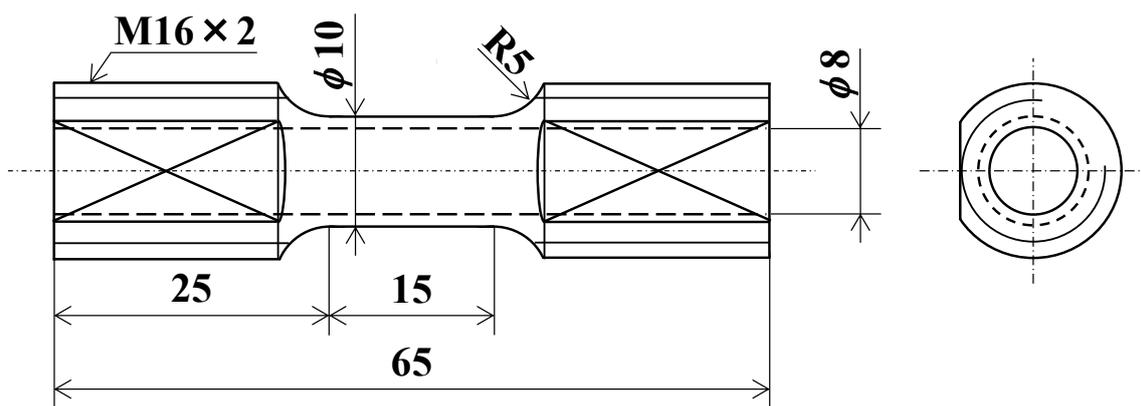
特定の応力での緩和ひずみは維持する応力と、その応力に到達するまでの負荷過程における変形速度の影響を受ける可能性がある。維持する応力を各種熱可塑性樹脂材料の単軸引張、単軸圧縮および単純ねじり試験それぞれにおける最大応力に対して変更した。ポリアミド6樹脂は最大応力に対しておよそ20%、40%、60%、80%の4条件とした。一方、ポリメタクリル酸メチル樹脂は最大応力の30%、80%程度の2条件とした。また負荷過程における変形のひずみ速度は $5.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ と $5.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ の2条件とした。図3-9に一定荷重速度試験を行った際に得られる応力と時間の関係およびひずみと時間の関係のイメージ図を示す。縦軸は公称応力[MPa]および公称ひずみ(%), 横軸は負荷開始からの時間経過[sec]をあらわしている。本研究では図3-9に示すように応力を保持したのち、およそ2時間計測を続け、緩和ひずみの経時的変化を調査した。

3-3-3 弾性限調査

応力成分 $[\sigma_{ij}]$ それぞれに対する破損応力の理論的關係は降伏関数あるいは破損関数として材料の弾性限界を定めるために用いる。降伏関数あるいは破損関数の幾何学的表現を降伏曲面もしくは破損曲面と称し、これらの曲面は材料の破損を支配する応力を視覚的に把握することができる。本研究ではポリメタクリル酸メチル樹脂に対して破損曲面の提示を試みた。たしかに、樹脂材料は金属材料とは変形メカニズムが大きく異なるため、破損の基準を決定する弾性限の調査が必要である。ポリメタクリル酸メチル樹脂の破損曲面を描くうえで、まずは漸定的に応力 - ひずみ関係における最大応力を破損基準として用いた。本研究では単軸引張、単軸圧縮および単純ねじりといった単純荷重条件に加え、引張ねじりの複合荷重を行った。各種単純荷重条件は垂直応力とせん断応力の比率を一定とする比例荷重を行った。単純荷重条件については3-3-1項と同様、ひずみ速度を変更してポリメタクリル酸メチル樹脂の最大応力を調査した。一方、複合荷重条件においては負荷過程における垂直応力とせん断応力の比率を変更するためにひずみ速度を調整した。ひずみ速度の調整は単軸引張試験での特定のひずみ速度における応力の増大傾向をもとにねじりの速度を変更した。

またポリメタクリル酸メチル樹脂の最大応力やポリアミド6樹脂の応力 - ひずみ曲線にあらわれた特徴的な変形挙動での破損の是非を調査した。ポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂に対して単軸引張負荷を加え、最大応力のおよそ80%の負荷の変形に対する永久ひずみの大きさを調査した。各種熱可塑性樹脂材料に引張負荷を加えた直後に負荷時と同じひずみ速度で除荷を行い、無負荷状態を2時間程度保持した。無負荷状態で経時的なひずみの変化から永久ひずみを調査した。負荷時および除荷時のひずみ速度は $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ とした。

(a)



(b)

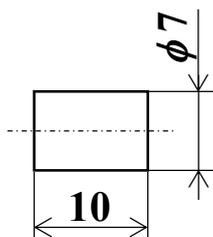


Fig.3-1 Shape of specimens for (a) tensile and torsional test (b) compressive test.

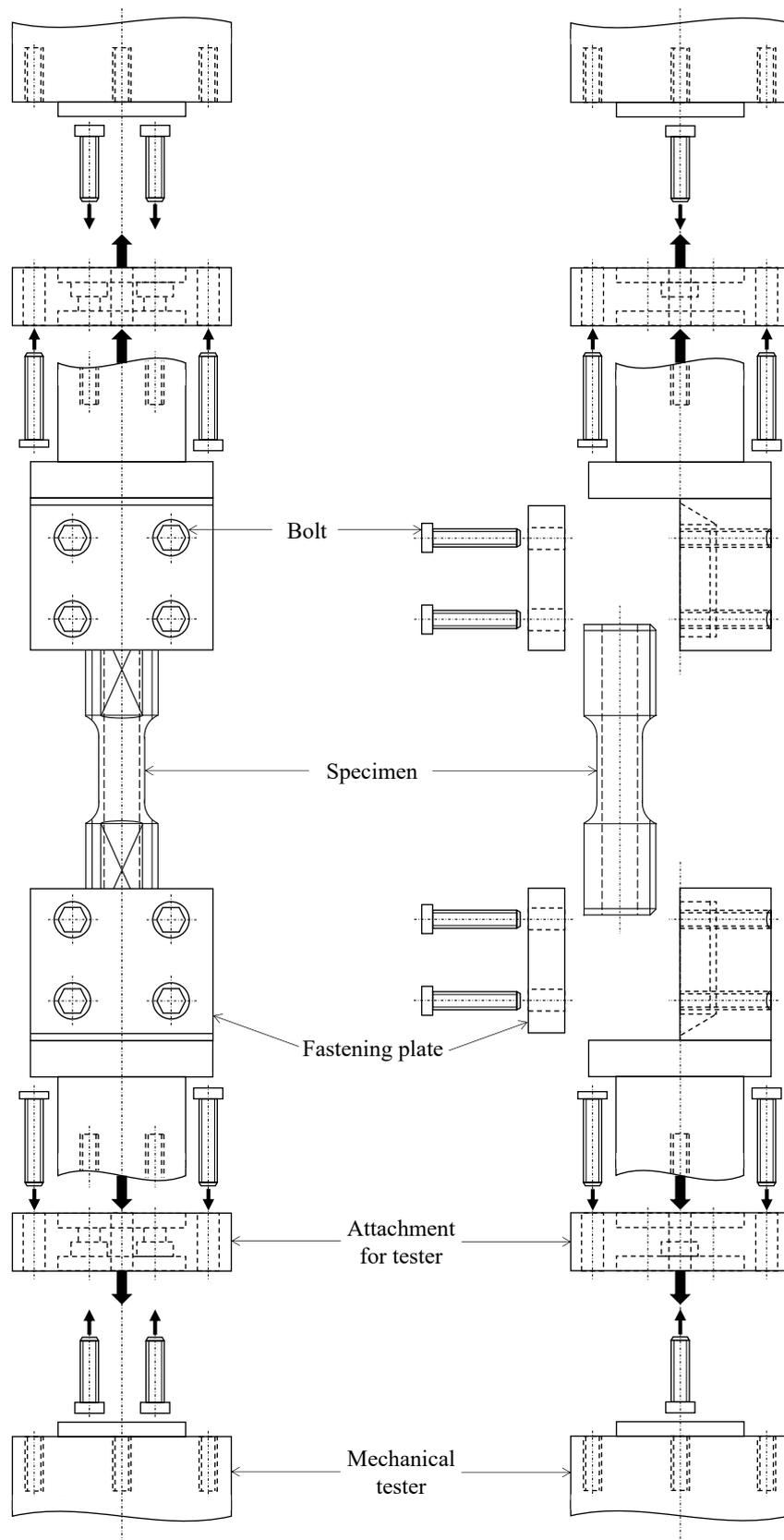


Fig.3-2 Jig for tensile and torsional test.

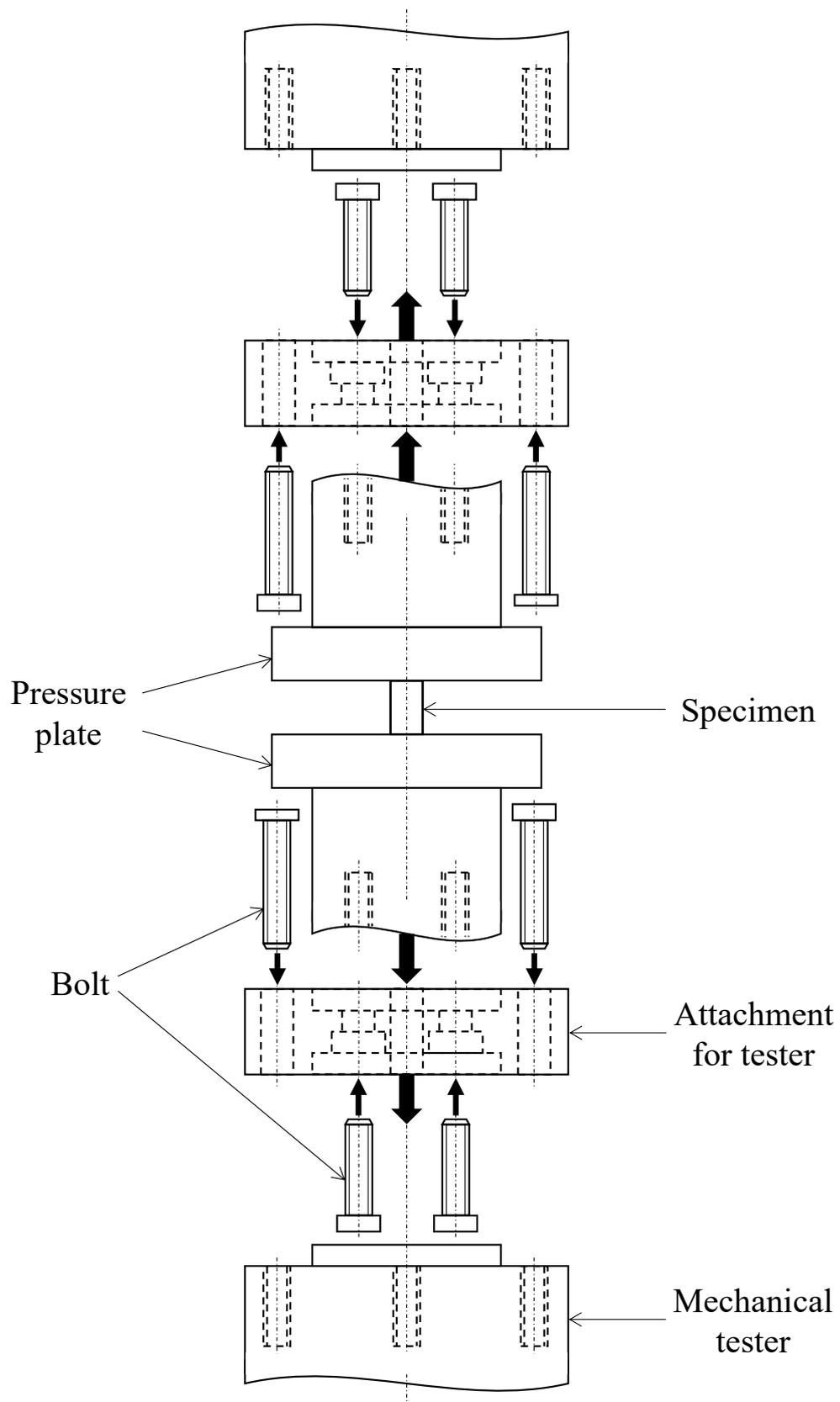


Fig.3-3 Jig for compressive test.

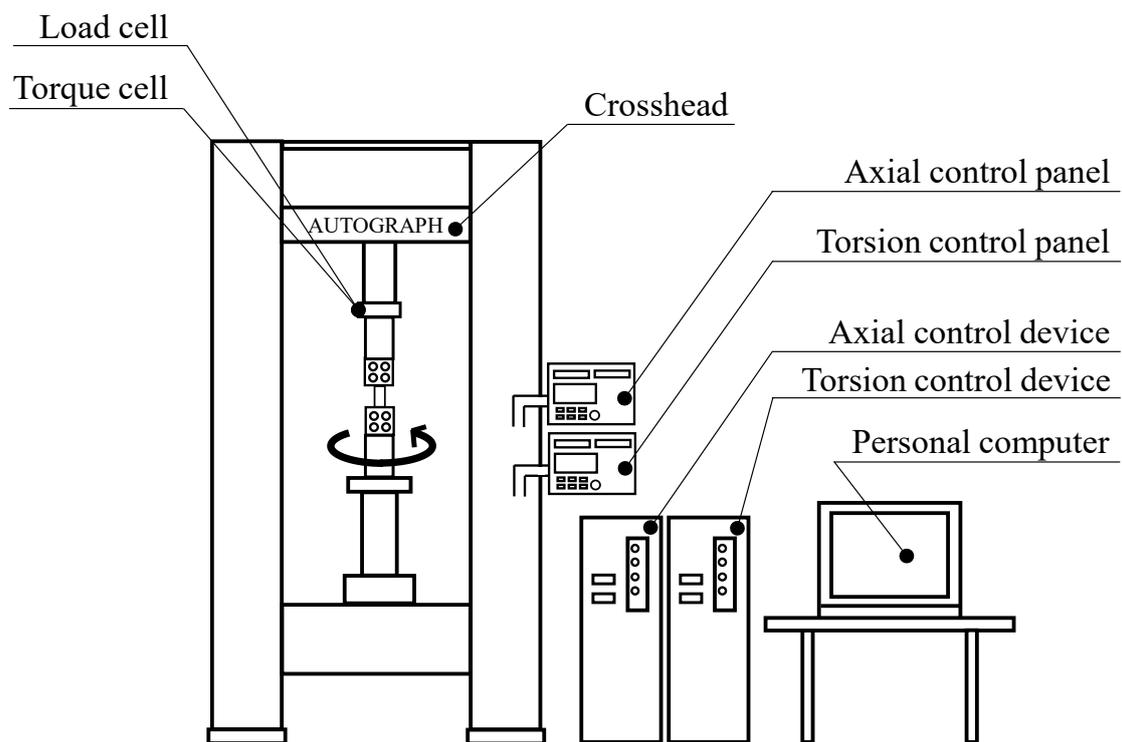


Fig.3-4 Autograph AG-G20kN system.



Fig.3-5 Autograph AG-G20KN.

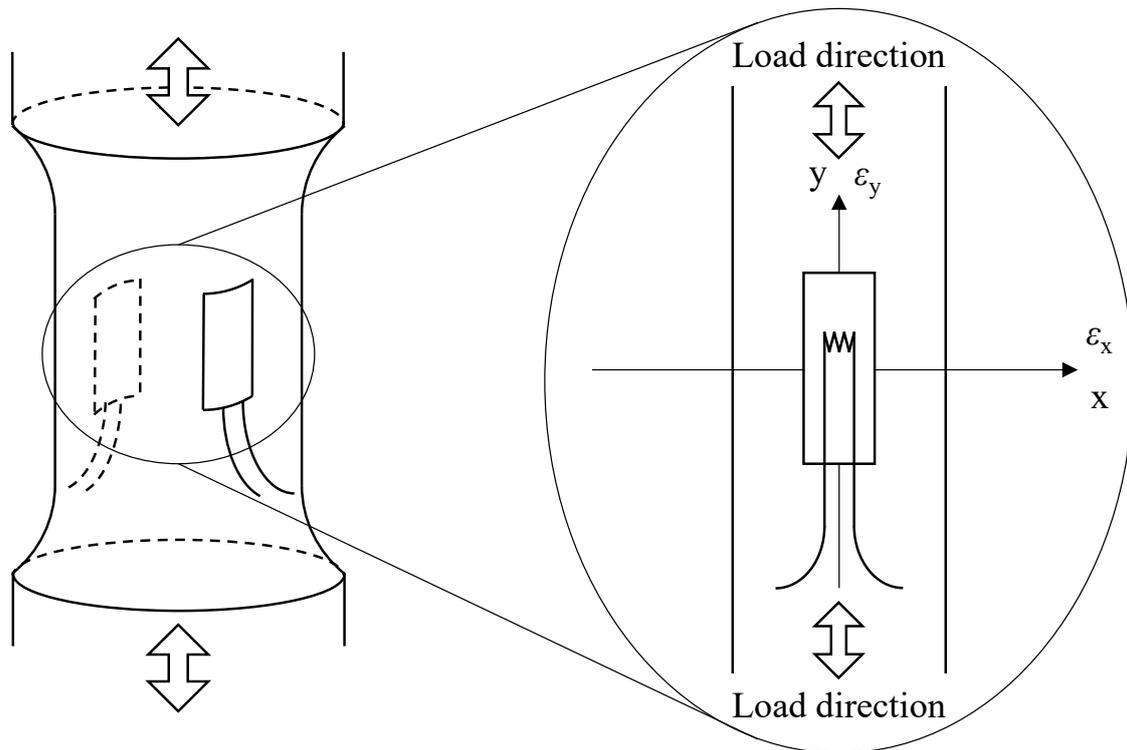


Fig.3-6 Measurement method of axial strain by single gauge.

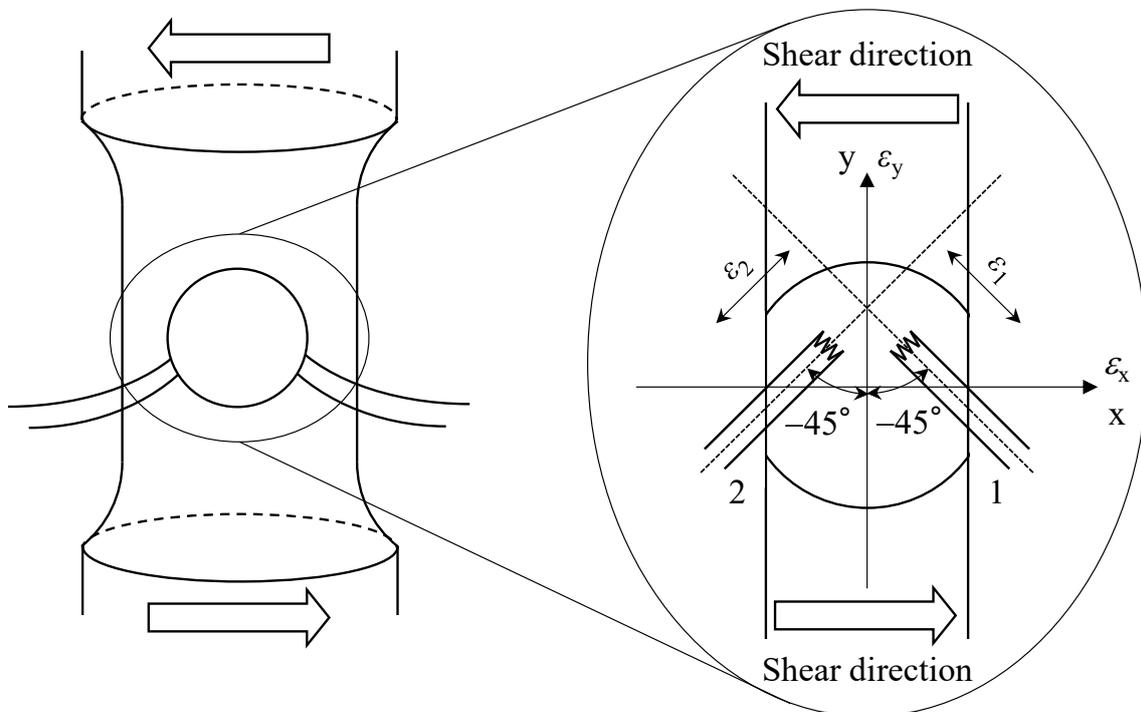


Fig.3-7 Measurement method of shear strain by cross gauge.

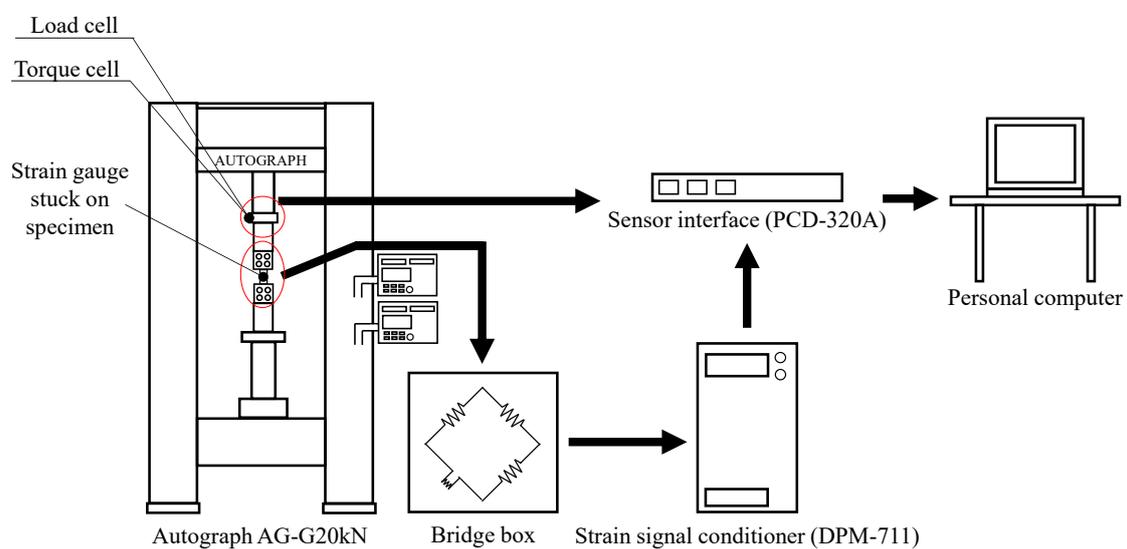


Fig.3-8 Scheme of load and strain measurement system.

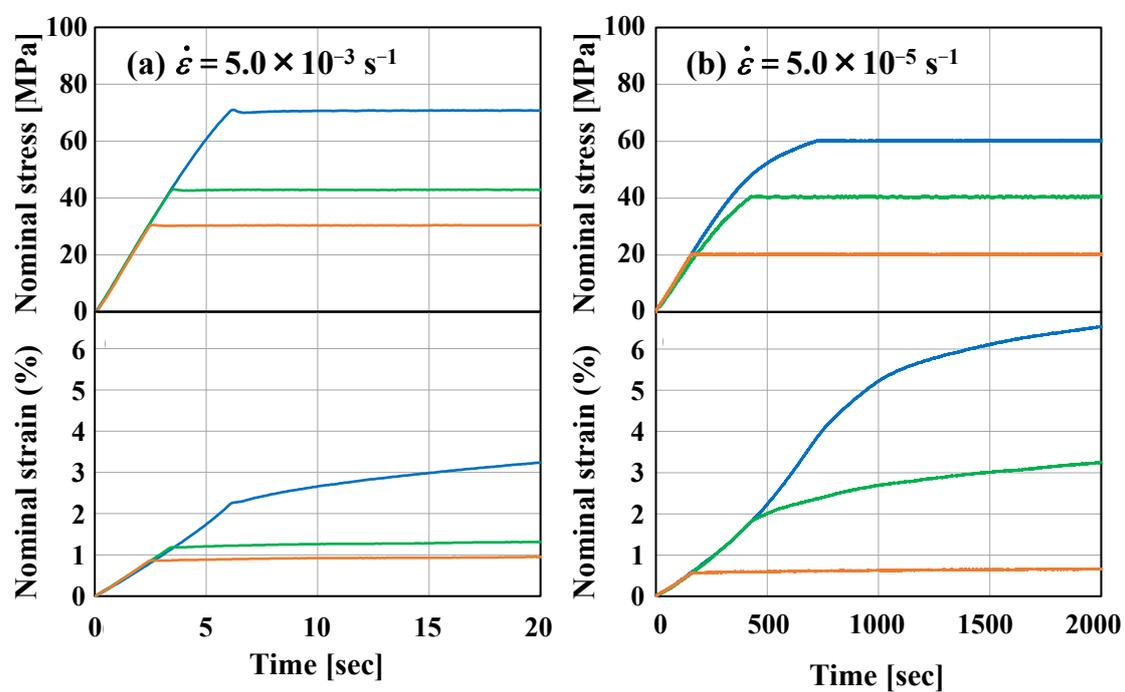


Fig.3-9 Method of stress holding test.

Upper part ; controled stress-time relation.

Lower part ; behavior of strain and creep relaxation on elapsed time.

第4章 実験結果および考察

本章では、各種熱可塑性樹脂材料における強度設計指針を得るために大幅に用途が異なるポリアミド6樹脂とポリメタクリル酸メチル樹脂を用いて行った各種力学試験の実験結果および考察について示す。

4-1 応力 - ひずみ関係

ポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂に対して行った単軸引張、単軸圧縮、単純ねじり試験の代表的な応力 - ひずみ線図を図4-1(a), (b), (c)および図4-2(a), (b), (c)に示す。縦軸に公称応力[MPa]、横軸に公称ひずみ(%)を示す。また細線は低速のひずみ速度、太線は高速のひずみ速度の実験結果である。ポリアミド6樹脂は引張、圧縮、せん断といったいずれの荷重条件において延性金属材料によくみられる加工硬化のような屈曲を示し、大きな変形が認められた。一方、ポリメタクリル酸メチル樹脂は単軸引張試験において最大応力に達するとすぐに破断する脆性的な挙動を示した。ここで、図4-3(a), (b)と図4-4(a), (b)にポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂に対して行った単軸引張試験における代表的な応力 - ひずみ線図と試験片の変形過程を示す。図4-3(a)および図4-4(a)の応力 - ひずみ線図に記した番号は図4-3(b)および図4-4(b)に示すそれぞれの画像と対応している。図4-3(a), (b)および図4-4(a), (b)より、各種熱可塑性樹脂材料の最大応力近傍までの負荷過程において標線間部の色の変化やくびれといった目立った変化は認められなかった。つまりポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂の単軸引張試験において最大応力近傍までの負荷過程では標線間部が均一に変形しているものと考えられる。またポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂の単軸圧縮試験ではひずみがおよそ5%に達すると座屈を生じ、単純ねじり試験ではひずみ10%以降で捩れをとまなう不安定変形を生じた。

ポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂はいずれも線形的なフックの法則が成立する範囲が極めて小さな負荷の状態に限定され、非線形的な応力 - ひずみ関係を示していた。2種類の熱可塑性樹脂材料ともに負荷の状態が大きくなるほどひずみの増分に対する応力増加が小さくなり、応力 - ひずみ線図において傾きが緩やかになる傾向を示した。いずれの材料においても同じひずみ速度において任意のひずみに対する応力の大きさを比較すると、単軸圧縮試験の応力が最も高く、単純ねじり試験での応力が最も低くなる傾向が認められた。ポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂は変形速度に応じて無負荷状態からの傾きが異なり、ひずみ速度が速いほど特定のひずみにおける応力は必ず高くあらわれていた。同じひずみ速度での見かけ上の弾性係数は材料と引張や圧縮、せん断といった荷重条件で異なっていた。

4-2 ひずみ速度依存性

4-1 節より、ポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂における見かけ上の弾性係数は材料の違いのみならず、荷重条件に依存する。またいずれの材料においてもひずみ速度の上昇にともなって、特定のひずみが生じたときの応力は大きくなる傾向が認められた。つまりひずみ速度の上昇にともなって見かけ上の弾性係数が大きくなることを意味している。

ポリアミド6樹脂とポリメタクリル酸メチル樹脂に対して行った単軸圧縮および単純ねじり試験ではひずみ5%および10%以降で不安定な変形を生じており、工業的観点から2%のひずみが生じたときの応力で、ひずみ速度との相関を調査した。図4-5にポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂に対して行った単軸引張、単軸圧縮および単純ねじり試験におけるひずみ2%の応力とひずみ速度の関係を示す。縦軸はひずみ2%の応力[MPa]、横軸は対数表示したひずみ速度[s⁻¹]をあらわしている。ポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂ともに荷重条件にかかわらず、ひずみ速度の上昇にともなって応力が増加するひずみ速度依存性が認められた。ポリアミド6樹脂のひずみ速度依存性はポリメタクリル酸メチル樹脂に比べて小さかった。

本研究で調査した2種類の熱可塑性樹脂材料ともに $1.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ より低いひずみ速度ではひずみ2%の応力が下限値に収束し、 $1.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ よりひずみ速度が速くなると上限値に漸近する傾向が認められた。このひずみ2%の応力とひずみ速度の関係はシグモイド関数による近似が可能であり、材料および荷重条件の違いのみで表現できる。同じひずみ速度においてポリアミド6樹脂の単軸圧縮および単純ねじりにおけるひずみ2%の応力は単軸引張に対して約3.4倍、0.5倍程度であった。またポリメタクリル酸メチル樹脂の単軸圧縮および単純ねじりにおけるひずみ2%の応力は単軸引張に対しておよそ1.4倍、0.3倍であった。

4-3 クリープ変形

図4-6および図4-7に特定の応力を保持する単軸引張、単軸圧縮および単純ねじり試験におけるポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂のクリープ特性を示す。縦軸は定応力状態下の緩和ひずみ(%), 横軸は応力を一定に保持しはじめてからの経過時間[sec]をあらわしている。図4-6において橙色、緑色、青色および赤色で示された線はポリアミド6樹脂の最大応力に対しておよそ20%, 40%, 60%, 80%の応力で保持したことをあらわしている。一方、図4-7の青色、赤色で示された線はポリメタクリル酸メチル樹脂の最大応力に対して約30%, 80%の応力で保持したことをあらわしている。ポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂はともに応力を一定にすると緩和ひずみを生じる粘弾性挙動があらわれた。この挙動は、外力による強制的なひずみ

の増分に対して、これらの熱可塑性樹脂が自発的に状態を緩和させる効果を意味している。2種類の熱可塑性樹脂材料の緩和ひずみは荷重条件、負荷状態およびその状態に到達するまでのひずみ速度の違いによらず、時間の経過にともなっている上限値に漸近する傾向が認められた。各実験条件での最大の緩和ひずみと単位時間あたりの緩和ひずみ増分は材料、荷重条件、負荷状態およびその状態に到達するまでのひずみ速度によって異なっていた。

緩和挙動は2つの熱可塑性樹脂材料で明瞭に異なっていた。ポリアミド6樹脂の場合、与えた応力あるいはひずみが大きくなるにつれて最大の緩和ひずみも増大し、さらに負荷の状態を大きくすると緩和ひずみの最大値が飽和する傾向が認められた。一方、ポリメタクリル酸メチル樹脂はポリアミド6樹脂に比べて小さなひずみで破断を生じるため、負荷の状態と緩和ひずみは線形関係であらわせると考えられる。

4-4 破損曲面

本研究ではポリメタクリル酸メチル樹脂に対して破損曲面の提示を試みた。ポリメタクリル酸メチル樹脂は単軸引張試験において最大応力に達すると同時に破断する傾向が認められた。そこで、漸定的に単軸引張、単軸圧縮および単純ねじり試験それぞれの応力-ひずみ関係における最大応力を破損基準として用いた。図4-8にポリメタクリル酸メチル樹脂が破損した時の応力状態にもとづいて得られた破損曲面を示す。縦軸はせん断応力 τ [MPa]、横軸は垂直応力 σ [MPa]をあらわす。同じひずみ速度条件ごとの破損応力を近似的に楕円で結んだ。内側の楕円がひずみ速度 $6.5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 、外側の楕円がひずみ速度 $3.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ の実験データを結んだものである。つまり外側の楕円ほどひずみ速度は高速である。引張ねじりで得られた実験値は外側の楕円と内側の楕円の間が存在しており、ポリメタクリル酸メチル樹脂の破損曲面は近似した外側の楕円と内側の楕円の間が存在すると考えられる。しかしながらひずみ速度依存性を有するポリメタクリル酸メチル樹脂は、引張ねじりといった複合的な応力状態に対して各々の応力要素に到達するひずみ速度が異なるため、単軸引張、単軸圧縮、単純ねじりといった各種単純荷重条件の試験と統一的条件で扱うことが難しい。つまり金属材料でよく用いられる降伏関数を樹脂材料に適用することは困難である(2-6節)。

本研究では、ポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂の弾性限に関する実験も行った。2種類の熱可塑性樹脂材料に単軸引張負荷を加えたのち、0MPaまで除荷し、無負荷状態でひずみの変化を調査した(図4-9)。縦軸は無負荷状態下のひずみ(%), 横軸は0MPaの無負荷状態に達してからの経過時間[sec]をあらわしている。ポリアミド6樹脂について、除荷を開始した52MPa時のひずみ2.3%に対して、無負荷状態に達すると0.4%程度のひずみとなり、その後5000secまでに0.18%程度の永久ひずみに漸近した。同様にポリメタクリル酸メチル樹脂についても最大応力の80%の51MPaで

ひずみ 2%から除荷すると、無負荷状態でのひずみ 0.2%から 0.05%まで回復した。いずれの熱可塑性樹脂材料も最大応力までの範囲に永久ひずみを生じはじめる降伏点が存在すると考えられるものの、時間経過とともにひずみの回復挙動が認められ、最大応力に達するまでの数%におよぶ変形に対して永久ひずみは小さかった。すなわちポリアミド 6 樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂のひずみ 2%におよぶ非常に大きな変形まで変形メカニズムに顕著な変化を見出すことは困難である。よって 2 種類の熱可塑性樹脂材料における応力 - ひずみ関係をモデル化する。

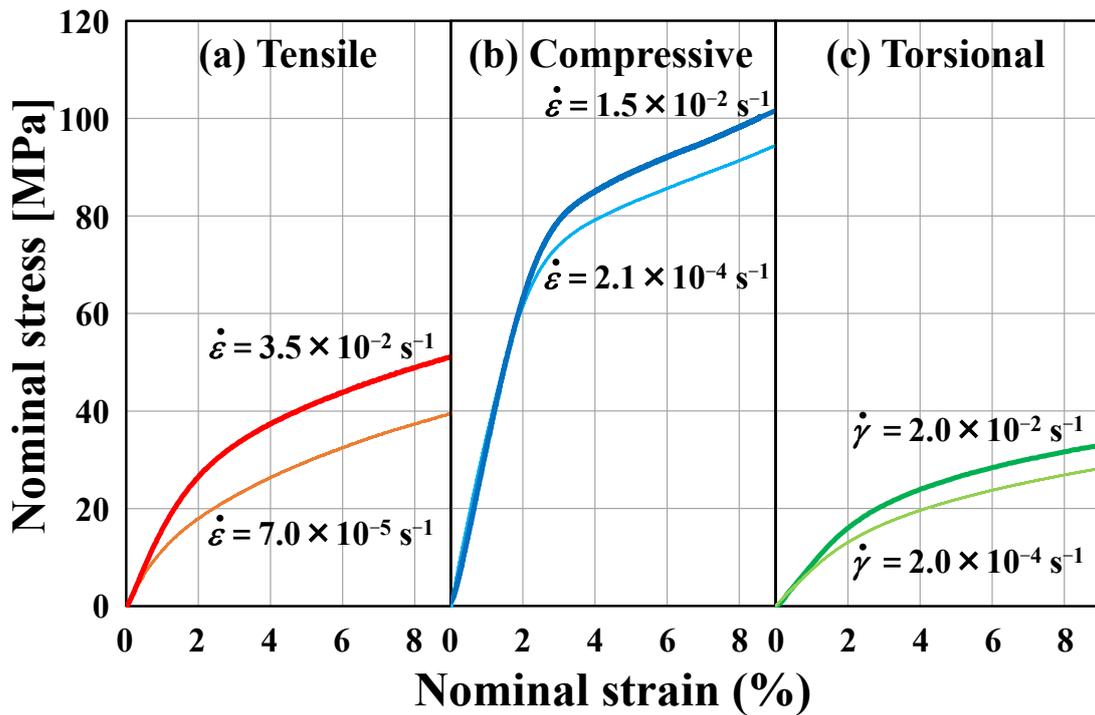


Fig.4-1 Stress-strain curves of polyamide 6 under (a) uni-axial tensile, (b) uni-axial compressive and (c) simple torsional loading for two types strain rates.

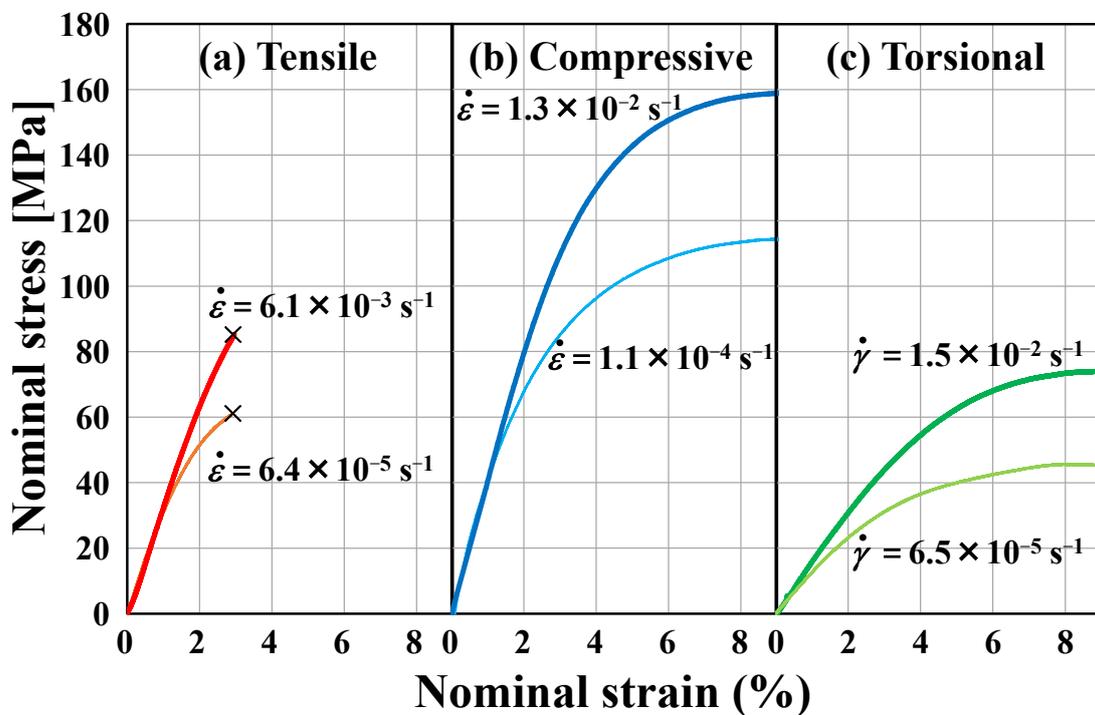
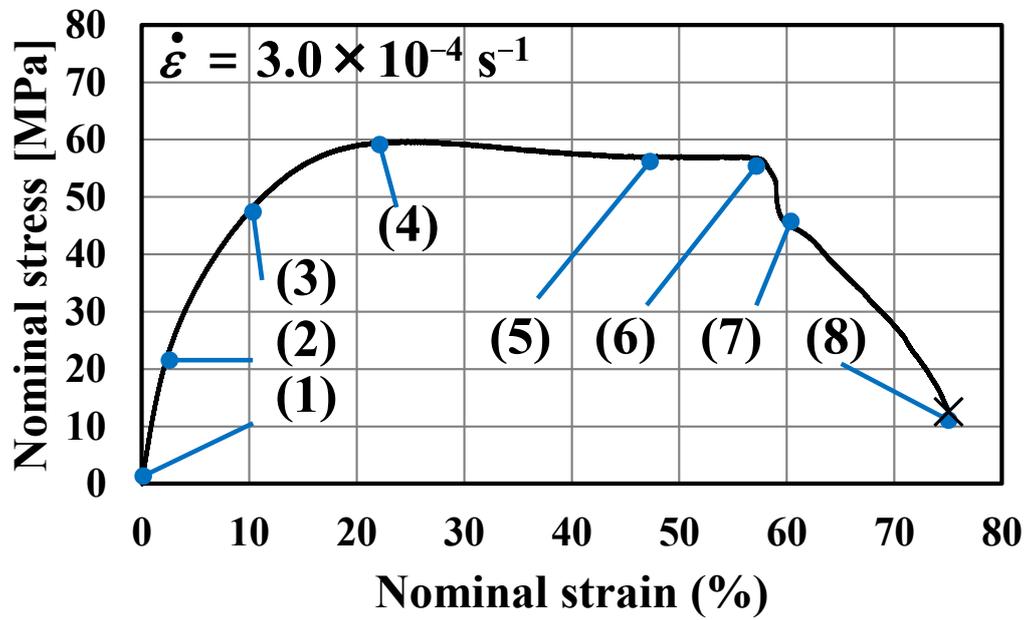


Fig.4-2 Stress-strain curves of polymethyl methacrylate under (a) uni-axial tensile, (b) uni-axial compressive and (c) simple torsional loading for two types strain rates.

(a)



(b)

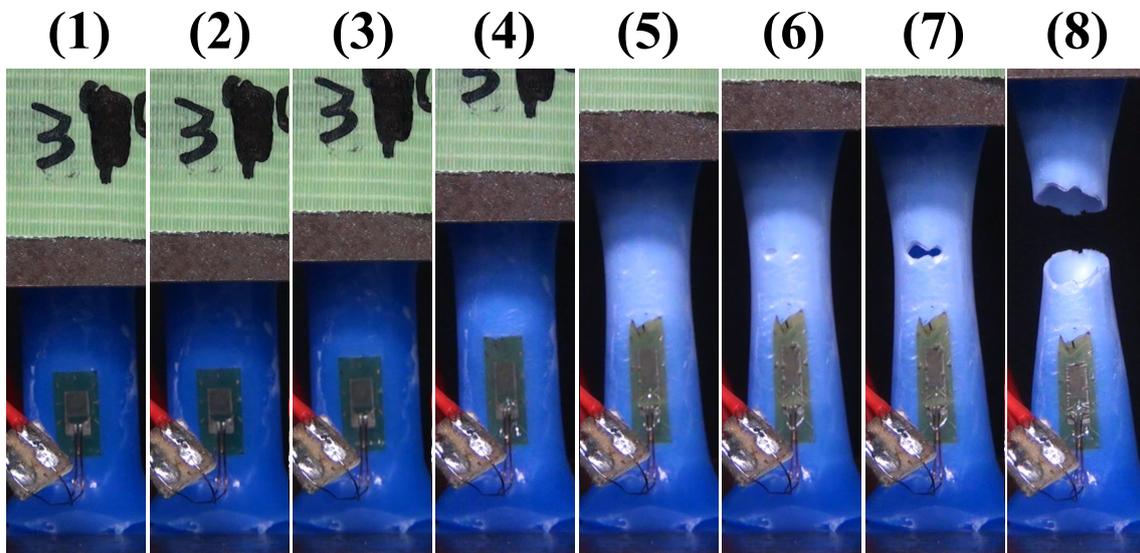
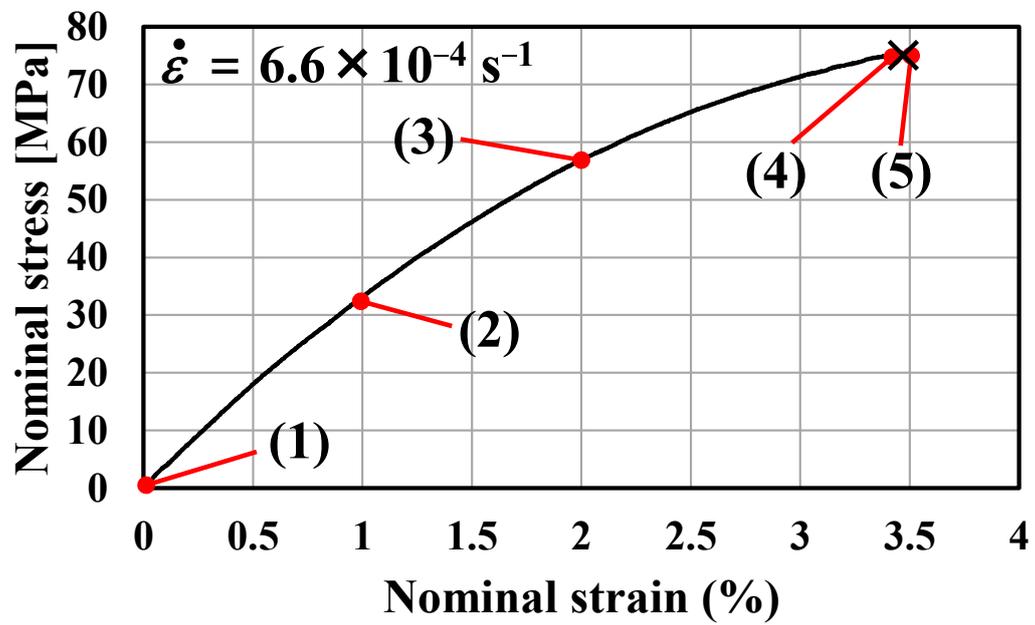


Fig.4-3 (a) Stress-strain curve of polyamide 6 under uni-axial tensile test and (b) deformation and fracture of polyamide 6.

(a)



(b)

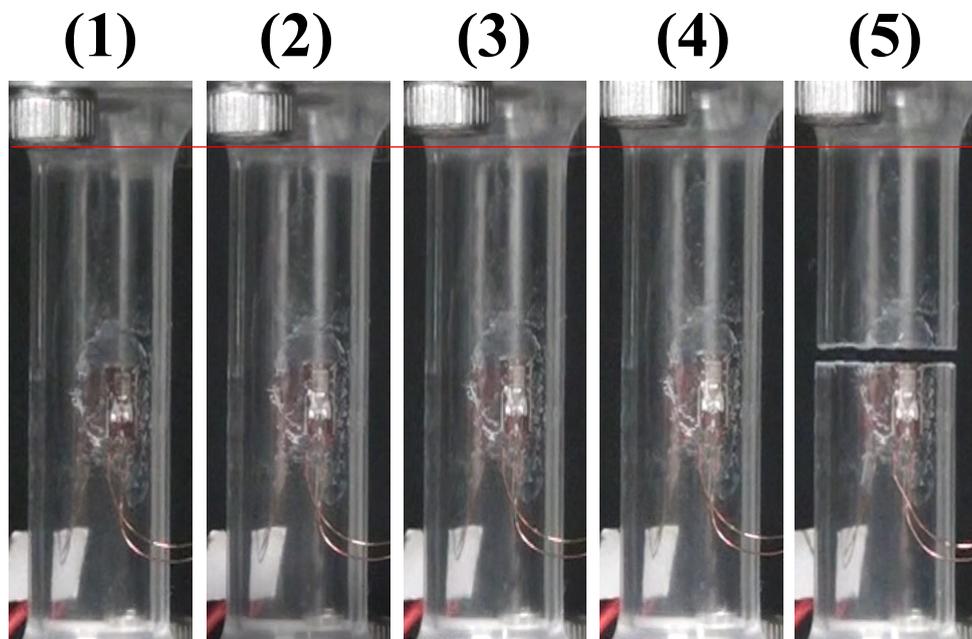


Fig.4-4 (a) Stress-strain curve of polymethyl methacrylate under uni-axial tensile test and (b) deformation and fracture of polymethyl methacrylate.

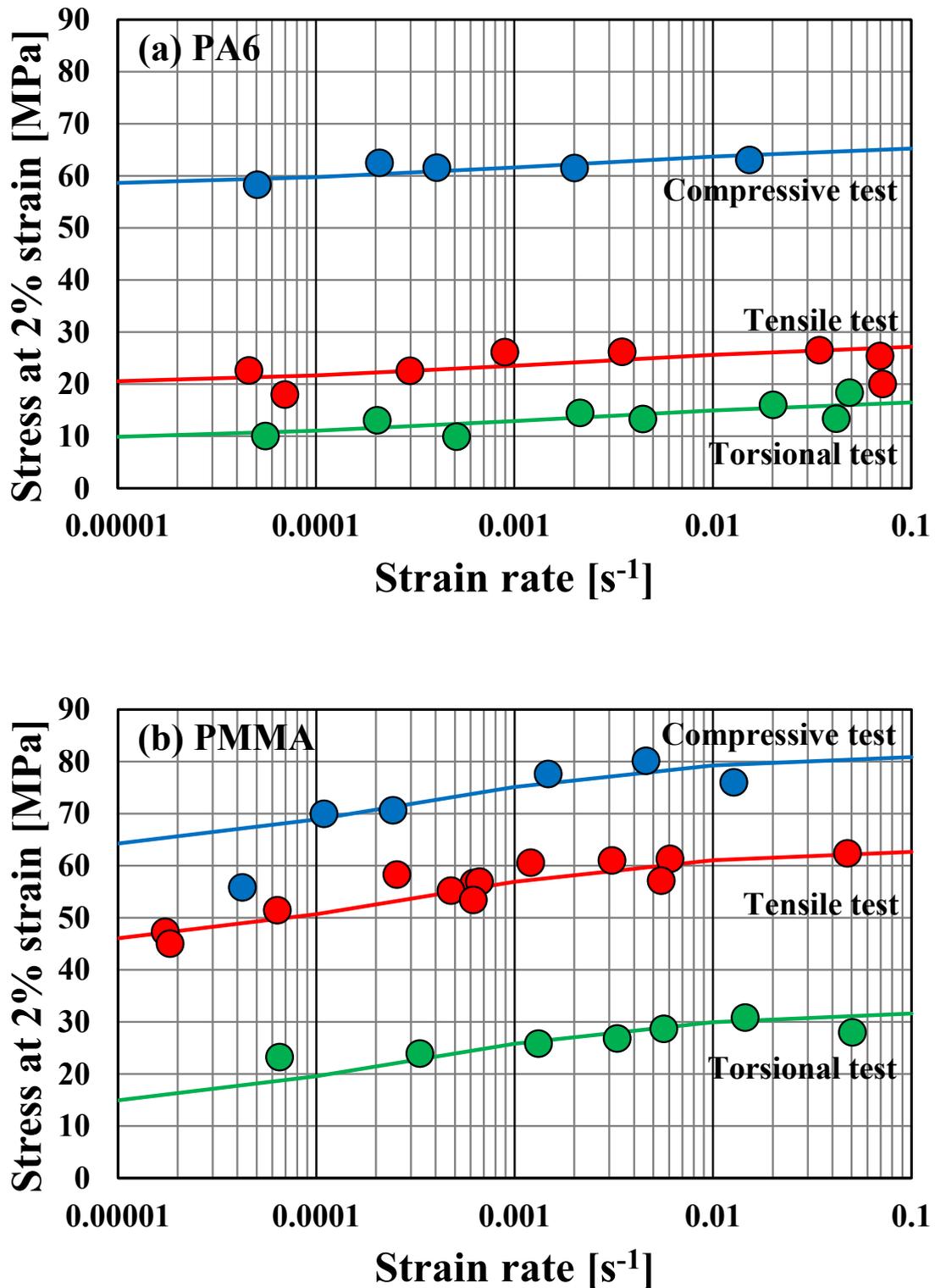


Fig.4-5 Dependencies of strain rate on stress at 2% strain of (a) polyamide 6 and (b) polymethyl methacrylate under uni-axial tensile uni-axial compressive and simple torsional loading.

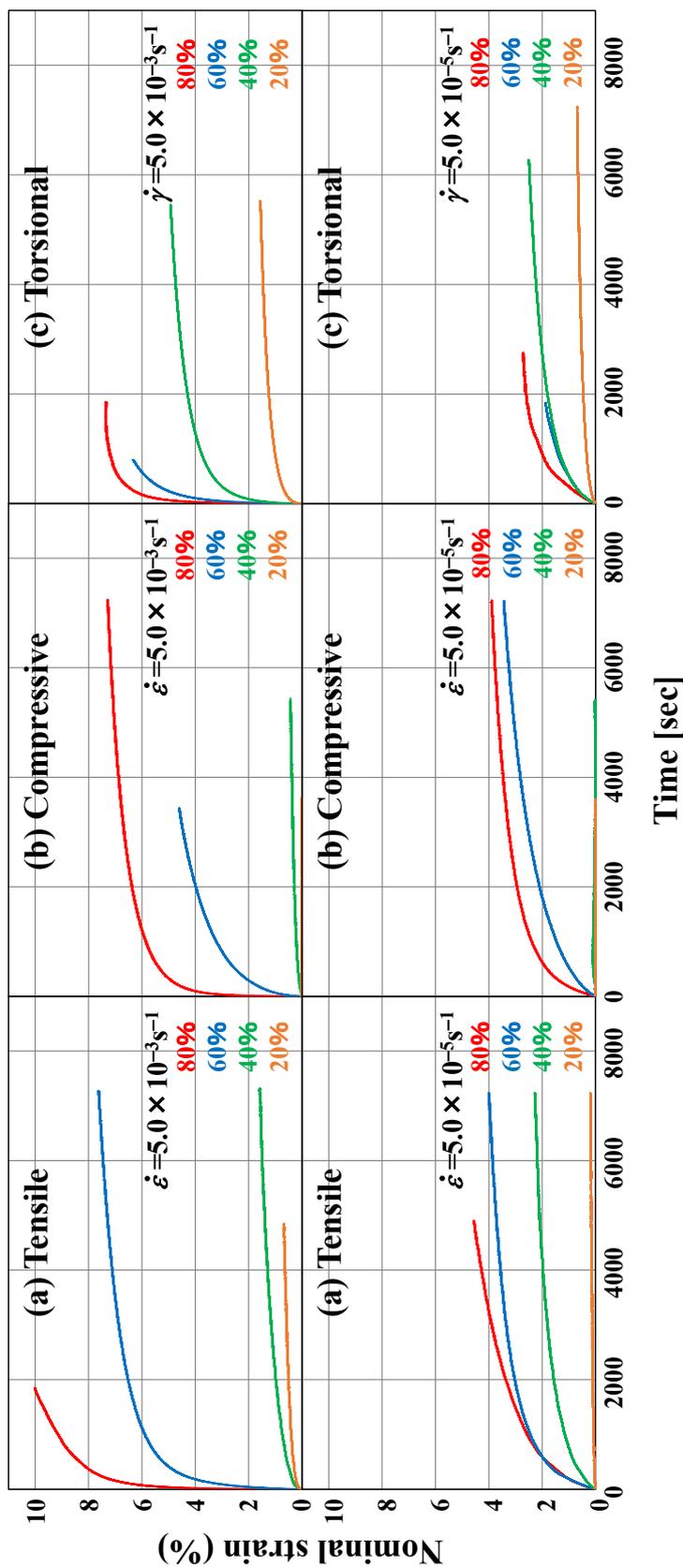


Fig.4-6 Creep behaviors of polyamide 6 under (a) uni-axial tensile (b) uni-axial compressive and (c) simple torsional loading for various strain rates and stresses.

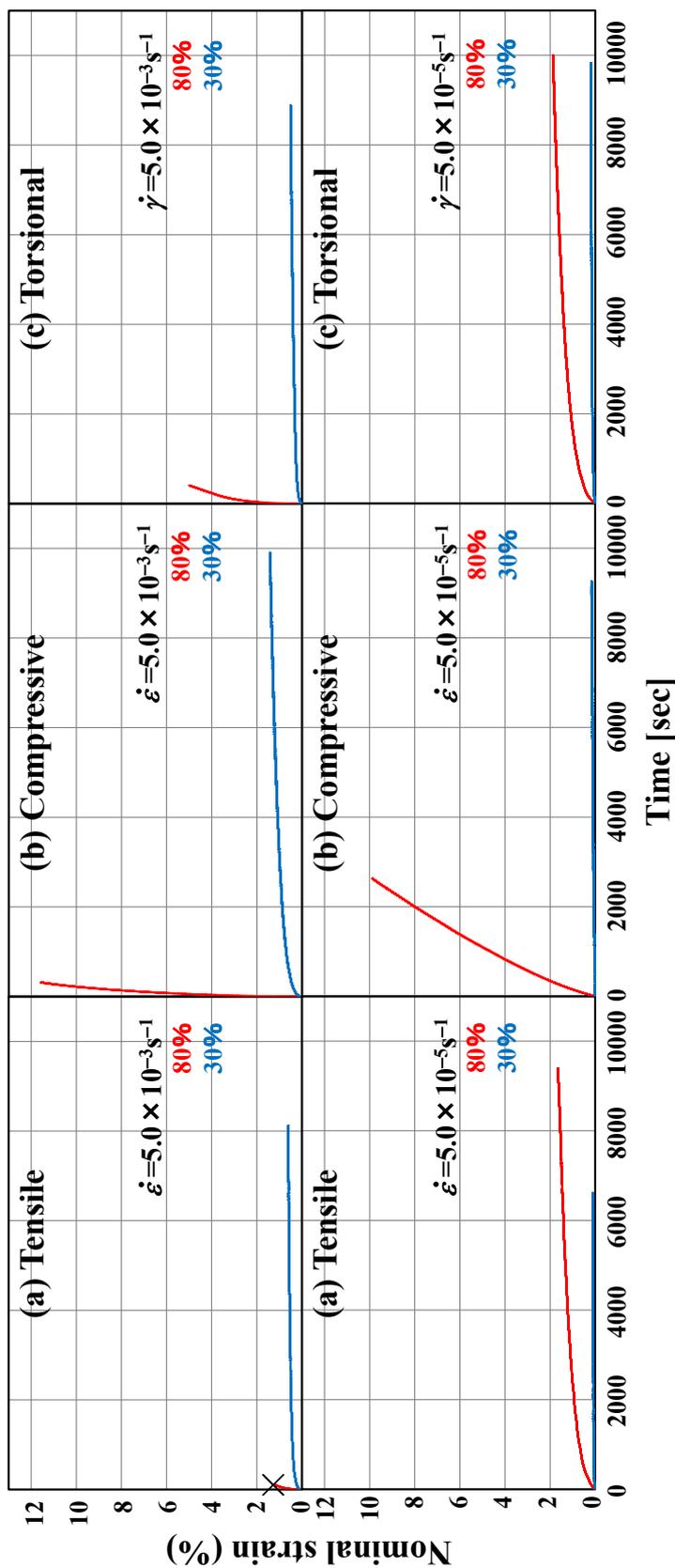


Fig.4-7 Creep behaviors of polymethyl methacrylate under (a) uni-axial tensile (b) uni-axial compressive and (c) simple torsional loading for various strain rates and stresses.

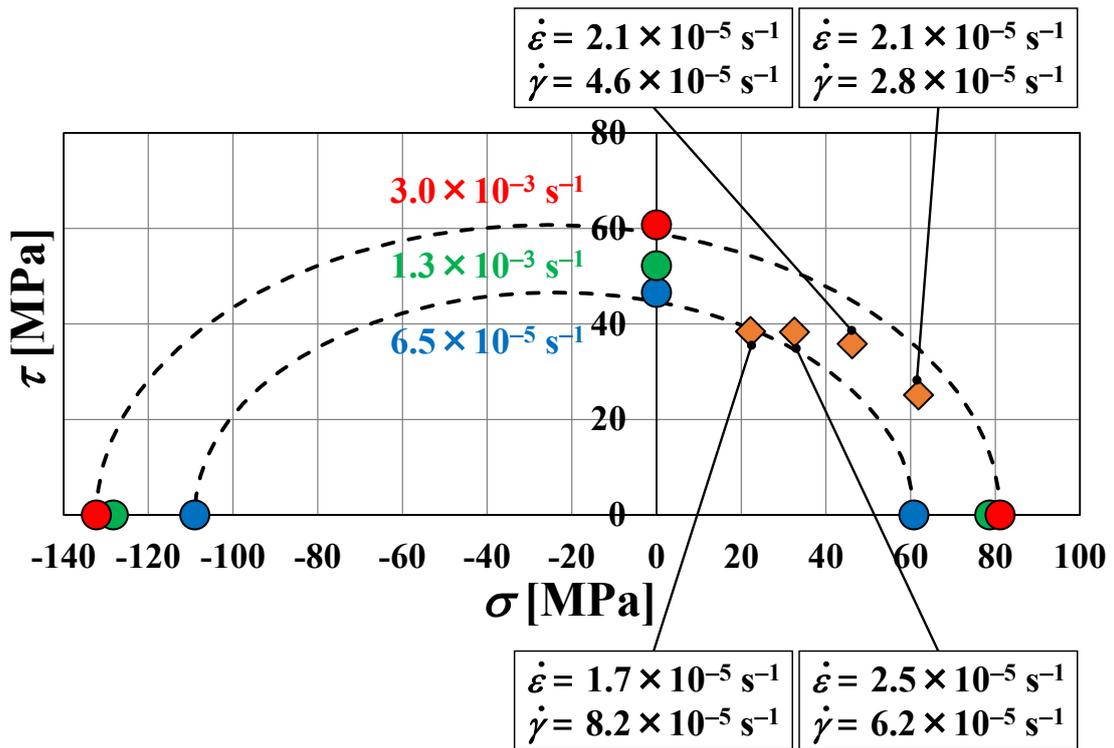


Fig.4-8 Influence of strain rate on fracture surface of polymethyl methacrylate.

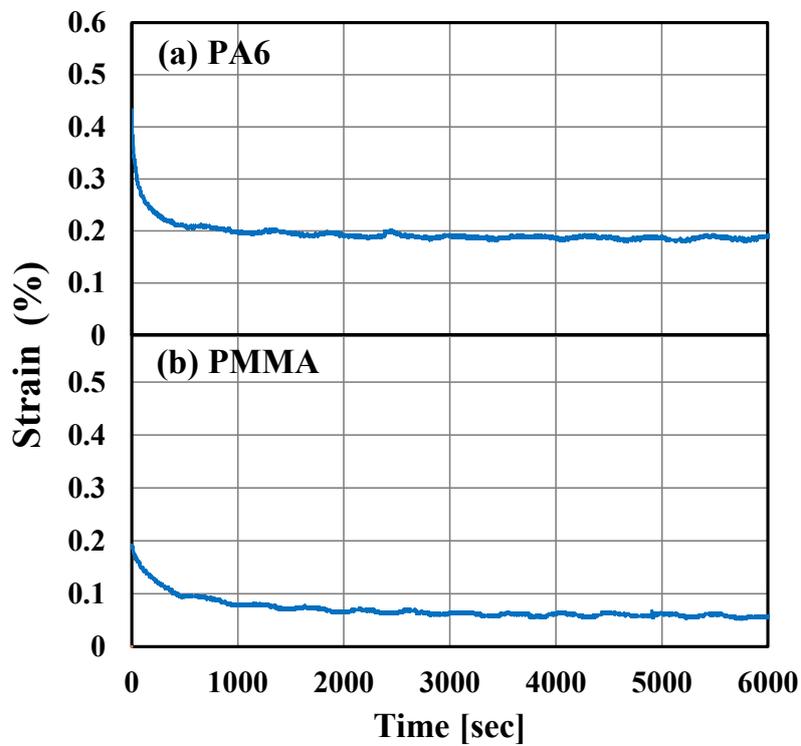


Fig.4-9 Recovery of strain after unloading for (a) polyamide 6 and (b) polymethyl methacrylate under uni-axial tensile test.

第5章 構成方程式の構築

5-1 モデルの仮定

ポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂は単軸引張、単軸圧縮および単純ねじり試験において非線形的な応力 - ひずみ関係を示していた。変形挙動にあらわれる非線形性は、応力とひずみの負荷の状態によって機械的応答が変化することを意味している。すなわちポリアミド6樹脂とポリメタクリル酸メチル樹脂の構成方程式を構築するうえで、応力 - ひずみ関係について負荷状態がほとんど同じであると考えられるほどの微小変化に基づいてモデル化する必要性が示唆された。外力による強制的な変形によって生じるひずみの微小増分は、抗力の微小増分を生み出すと考えられる。したがって強制変位によって生じるひずみの微小増分 $d\varepsilon$ と抗力としての微小の応力増分 $d\sigma$ は次式に示すような比例関係にあると仮定する (図 5-1)。

$$d\sigma = \hat{E} d\varepsilon \quad (5-1)$$

\hat{E} は微小の応力増分 $d\sigma$ とひずみの微小増分 $d\varepsilon$ との間の比例定数であり、暫時的な弾性係数を意味している。

5-2 暫時的な弾性係数の推定

4-1 節より、ポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂はともに引張や圧縮、せん断といったいずれの荷重条件においても変形速度が速いほど見かけ上の弾性係数が大きくなる傾向を示した。つまり強制変形によるひずみ $d\varepsilon$ と応力の微小変化 $d\sigma$ との間の暫時的な弾性係数 \hat{E} はひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ に強く依存しており、

$$\hat{E} = \hat{E}(\dot{\varepsilon}) \quad (5-2)$$

とあらわせる。

また式(5-2)の垂直負荷による暫時的な弾性係数とねじりによるせん断の弾性係数はヤング率と剛性率の関係と同様に明瞭に異なっていた。4-1 節で述べたとおり、いずれの材料においても変形速度に応じて無負荷状態からの傾きが異なり、ひずみ速度が速いほど特定のひずみにおける応力は必ず高くあらわれていた。したがって特定のひずみが生じたときの応力によって暫時的な弾性係数 \hat{E} の大小を見積もることができる。つまりひずみが生じたときの応力 σ_n と暫時的な弾性係数 \hat{E} は係数 ρ を用いて次式のような比

例関係で見積もることができると考えられる。

$$\hat{E} = \rho\sigma_n \quad (5-3)$$

ひずみがある程度小さい領域では、あるひずみ速度に対する特定のひずみ量での σ_n の傾向はほとんど同じであったため、式(5-3)の σ_n はひずみ2%のときの応力を用いた。単軸引張において各種熱可塑性樹脂材料の2%のひずみが生じたときの応力 σ_n は図4-5(a), (b)に示したように明瞭なひずみ速度依存性があった。いずれの材料もひずみ速度が遅くなると σ_n は低下し、速いほど上昇する傾向が認められた。ただし、ひずみ速度が無限大のときそれぞれの樹脂材料の σ_n が無限大に発散するとは考えにくく、極めて遅いひずみ速度で抗力としての σ_n がゼロになるとも考えられない。この傾向は図4-5(a), (b)のとおり、単軸圧縮、単純ねじりでも同様であった。すなわち、各材料における特定のひずみが生じたときの応力と対数表示したひずみ速度の関係はシグモイドモデルとして仮定できる。

$$\sigma = \frac{\Delta\sigma_n}{1+\exp\left\{-\beta\left(\log_{10}\frac{\dot{\epsilon}}{e_b}\right)\right\}} + \sigma_{n,\min} \quad (5-4)$$

単軸引張負荷における低速のひずみ速度であらわされる σ_n の下限値を $\sigma_{n,\min}$ [MPa]とし、高速のひずみ速度であらわれる上限値を $\sigma_{n,\max}$ [MPa]とする。式(5-4)の $\Delta\sigma_n$ [MPa]は $\sigma_{n,\min}$ と $\sigma_{n,\max}$ との差をあらわす。 β [-]は定数、 e_b [s^{-1}]は変曲点のひずみ速度である。また $\dot{\epsilon}$ [s^{-1}]は任意のひずみ速度をあらわしている。式(5-3)に式(5-4)を代入すると暫時的な弾性係数を次式のとおり表現できる。

$$\hat{E} = \rho_n \left[\frac{\Delta\sigma_n}{1+\exp\left\{-\beta\left(\log_{10}\frac{\dot{\epsilon}}{e_b}\right)\right\}} + \sigma_{n,\min} \right] \quad (5-5)$$

$\sigma_{n,\min}$, ρ_n は単軸引張、単軸圧縮、単純ねじりの荷重条件によって異なる。実験結果から式(5-5)の β および e_b を見積もると、ポリアミド6樹脂は $\beta = 0.95$, $e_b = 1.8 \times 10^{-3} [s^{-1}]$ であり、ポリメタクリル酸メチル樹脂は $\beta = 1.28$, $e_b = 2.6 \times 10^{-4} [s^{-1}]$ であった。表5-1に各材料における β [-], e_b [s^{-1}]とともに ρ_n [-], $\Delta\sigma_n$ [MPa], $\sigma_{n,\min}$ [MPa]および $\sigma_{n,\max}$ [MPa]についてまとめる。 ρ_n はいずれの材料においても単軸引張、単軸圧縮、単純ねじりの順で値が小さくなる傾向を示した。各樹脂材料の $\sigma_{n,\min}$ および $\sigma_{n,\max}$ は単軸圧縮が最も高く、単純ねじりの値が最も小さくなる傾向を示した。 $\sigma_{n,\min}$ および $\sigma_{n,\max}$ は荷重条件ごとに異なる値であったものの $\sigma_{n,\min}$ と $\sigma_{n,\max}$ の差分 ($\Delta\sigma_n$) は荷重条件に依存せず、材料の違いのみであらわせた。また各樹脂材料での β はそれぞれ1程度の値を示した。ポリアミド6樹脂

脂とポリメタクリル酸メチル樹脂の e_b を比較するとポリメタクリル酸メチル樹脂の値に対してポリアミド6樹脂の e_b はおよそ10倍であった。

5-3 粘弾性効果の導入

図4-6および図4-7に示されたクリープ特性からいずれの樹脂材料も応力を一定にすると緩和ひずみを生じる粘弾性挙動があらわれた。緩和ひずみ ε_r は時間とともに増加し、負荷の状態ごとに特定の上限值に収束する傾向が認められた。すなわち外力による強制的なひずみ増分に対して、本研究で用いた熱可塑性樹脂材料が自発的に状態を緩和させる効果をもつことを意味している。よって応力増分を生じる実質的なひずみの増分 $d\varepsilon_{ac}$ は、強制変形によるひずみ $d\varepsilon$ から緩和ひずみの効果 $d\varepsilon_r$ を減じた成分であると考えられる。したがって変形の進行にともなって生じる実質的な微小の応力増分 $d\sigma$ は

$$\begin{aligned} d\sigma &= \hat{E} d\varepsilon_{ac} \\ &= \hat{E} (d\varepsilon - d\varepsilon_r) \end{aligned} \quad (5-6)$$

とあらわせる。

4-3節に示すように定応力保持試験における緩和ひずみ ε_r と時間の関係は荷重条件、負荷状態およびその状態に到達するまでのひずみ速度によって異なっていた。図4-6および図4-7に示した応力保持のあとに生じる緩和ひずみ ε_r と時間 t は次式のような関係であらわせる。

$$\frac{d\varepsilon_r}{dt} = \phi \frac{\varepsilon_r}{t} \quad (5-7)$$

式(5-7)を積分すると

$$\varepsilon_r = A t^\phi \quad (5-8)$$

とあらわせる。 ϕ ($\phi < 1$)は緩和が進行していく時間に対する緩和ひずみ ε_r の瞬間的な速度をある時刻 t での緩和ひずみの比であらわすときの倍数、 A は積分定数である。ただし ϕ 、 A は材料、荷重条件、負荷状態およびその状態に到達するまでのひずみ速度によって異なる。図5-2にポリアミド6樹脂の単軸引張試験においてある一定の応力で保持した際に得られた代表的な緩和ひずみの変化を示す。図5-2では応力保持開始直前のひずみ量がおよそ2.3%である緩和ひずみの変化をあらわしている。縦軸に応力保持開始直後

の緩和ひずみ ε_r (%)，横軸に応力保持開始直後の時間 t [sec]をあらわす．時間の経過とともに単位時間あたりの緩和ひずみの増分は小さくなる傾向がある．すなわち緩和開始直後には単位時間あたりの緩和ひずみの増大速度は大きく，しだいに小さくなっていく．ただし，いずれの材料についても荷重条件によらず，本研究で行ったクロスヘッド速度制御による $5.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ と $5.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ のひずみ速度に対して，応力保持開始直後の単位時間あたりの緩和ひずみ速度は強制変位によるひずみ速度より常に小さかった．強制変位によるひずみ速度と緩和ひずみ速度との差は負荷状態に依存していた．すなわち単純負荷試験において，力学試験機のクロスヘッドによる強制変位のひずみ速度に対して緩和の速度は遅く，緩和が十分に進行するよりもはるかに早く材料の負荷状態が変わる．つまり，負荷状態は時々刻々と変化していくため，図5-2の緩和開始直後の非常に短い時間について考えればよい．よって微小の緩和ひずみ $d\varepsilon_r$ と微小時間 dt の関係は図5-2に示すように次式のような比例関係であらわせる．

$$d\varepsilon_r = \mu dt \quad (5-9)$$

式(5-9)の μ は荷重条件，負荷状態およびその負荷に到達するまでのひずみ速度に依存している緩和初期の緩和のひずみ速度である．

5-4 構成方程式の構築

式(5-6)より，微小の応力増分 $d\sigma$ を生み出す $d\varepsilon_{ac}$ は強制変形によって生じるひずみの微小増分 $d\varepsilon$ から緩和ひずみの成分 $d\varepsilon_r$ を差し引いた関係にあり，式(5-1)の $d\varepsilon$ を $d\varepsilon_{ac}$ として代入することで応力とひずみの関係が得られる．荷重条件，負荷状態およびその状態に到達するまでのひずみ速度に依存する式(5-5)における \hat{E} を用い，式(5-9)の μ を決定することで構成方程式を構築できると考えられる．

ポリアミド6樹脂とポリメタクリル酸メチル樹脂で負荷状態に対する緩和のひずみ速度 μ の関係は大きく異なっていた．図5-3にポリアミド6樹脂に対して行った定応力保持試験での負荷状態に対する緩和ひずみ速度 μ の関係を示す．負荷状態を定応力保持開始時点でのひずみ量で代表した．縦軸に緩和のひずみ速度 μ [s^{-1}]，横軸に応力保持開始直後のひずみ(%)をあらわす．与えたひずみの増大に対して緩和のひずみ速度 μ は線形的に変化したのち，ある特定の上限值に収束する傾向が示された．負荷過程において与えたひずみと緩和のひずみ速度 μ との関係は次の関係式で近似できる．

$$\mu = \zeta \{1 - \exp(-\omega\varepsilon)\} \quad (5-10)$$

一方，ポリメタクリル酸メチル樹脂はポリアミド6樹脂に比べて小さなひずみで破断

を生じた。たしかにポリメタクリル酸メチル樹脂の緩和ひずみ速度 μ とひずみ ε についても式(5-10)と同様の傾向を示すと予測されるが、実際には小さなひずみで破断を生じるため、変形が遮断されて十分に小さなひずみの領域での関係で近似できると考えられる。すなわち、ポリメタクリル酸メチル樹脂の負荷の状態と緩和ひずみ速度 μ との関係は図5-4に示すような線形関係であらわせる。

$$\mu = \xi\varepsilon \quad (5-11)$$

$d\varepsilon_{ac}$ に対する $d\varepsilon$ の効果は必ずしも定応力保持試験における初期の微小緩和ひずみの大きさとは一致しないため、緩和ひずみの効果を与える係数 α を用いて式(5-9)に式(5-10)あるいは式(5-11)を代入し、式(5-6)の $d\sigma$ であらわすと

ポリアミド6樹脂

$$d\sigma = \hat{E}(d\varepsilon - \alpha\zeta\{1 - \exp(-\omega\varepsilon)\}dt) \quad (5-12)$$

ポリメタクリル酸メチル樹脂

$$d\sigma = \hat{E}(d\varepsilon - \alpha\xi\varepsilon dt) \quad (5-13)$$

となる。ここで表5-2(a), (b)にひずみ速度 $5.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ および $5.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ でのポリアミド6樹脂とポリメタクリル酸メチル樹脂それぞれの $\zeta [\text{s}^{-1}]$, $\omega [1/\text{s}]$, $\zeta \times \omega [\text{s}^{-1}]$, $\xi [\text{s}^{-1}]$ および $\alpha [-]$ について示す。 $\zeta \times \omega$ および ξ は式(5-10)および式(5-11)を両辺 $d\varepsilon$ で積分し、マクローリン展開した際に得られる同等の物理量である。 ζ の値は荷重条件による変化が小さいものの、ひずみ速度条件によって大きく異なっていた。 ω はいずれのひずみ速度条件においても単軸引張が最も高く、単軸圧縮の値が最も小さくなる傾向を示した。 $\zeta \times \omega$ と ξ の値はひずみ速度条件によって異なっていた。同じひずみ速度条件における $\zeta \times \omega$ と ξ の値は材料および荷重条件によらず比較的近い値を示していた。2種類の熱可塑性樹脂材料ともにひずみ速度の上昇にともなって α の値は大きくなる。また特定のひずみ速度条件においては荷重条件によらず材料ごとで同等の値を示した。

本研究ではクロスヘッドを一定として各種単純荷重試験を行ったため、

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \text{const.} \quad (5-14)$$

の関係があり、各種単純荷重条件下におけるポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸

メチル樹脂の応力とひずみの関係は

ポリアミド6樹脂の構成方程式

$$\sigma = \hat{E} \left[\left(\frac{\dot{\varepsilon} - \alpha \zeta}{\dot{\varepsilon}} \right) \varepsilon + \frac{\alpha \zeta}{\omega \dot{\varepsilon}} \{1 - \exp(-\omega \varepsilon)\} \right] \quad (5-15)$$

ポリメタクリル酸メチル樹脂の構成方程式

$$\sigma = \hat{E} \left[-\frac{\alpha \xi}{2 \dot{\varepsilon}} \left(\varepsilon - \frac{\dot{\varepsilon}}{\alpha \xi} \right)^2 + \frac{\dot{\varepsilon}}{2 \alpha \xi} \right] \quad (5-16)$$

とあらわせる。

図5-5および図5-6にポリアミド6樹脂とポリメタクリル酸メチル樹脂の力学試験から得られた応力 - ひずみ関係と構築された構成方程式による応力とひずみの関係について示す。縦軸は公称応力 [MPa]，横軸は公称ひずみ(%)をあらわしている。構築された構成方程式は実験結果をよくあらわしている。ゆえにポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂で明瞭に異なる応力 - ひずみ関係は力学負荷条件と負荷状態に対する緩和ひずみ速度との関係の違いで説明できる。同じ材料については同一の緩和ひずみ速度のモデルを与えることが可能であり（式(5-10)，式(5-11)），応力 - ひずみ関係の荷重条件およびひずみ速度の影響を加味した係数 ζ ， ω ， ξ で表現できることが明らかとなった。

以上より，材料に依存した緩和のモデル化と負荷条件依存の係数を決定すれば，強制的な変形と緩和ひずみの線形和が抗力として変換される（式(5-6)）というきわめて単純な原理で熱可塑性樹脂の構成方程式を構築できるものと考えられる。

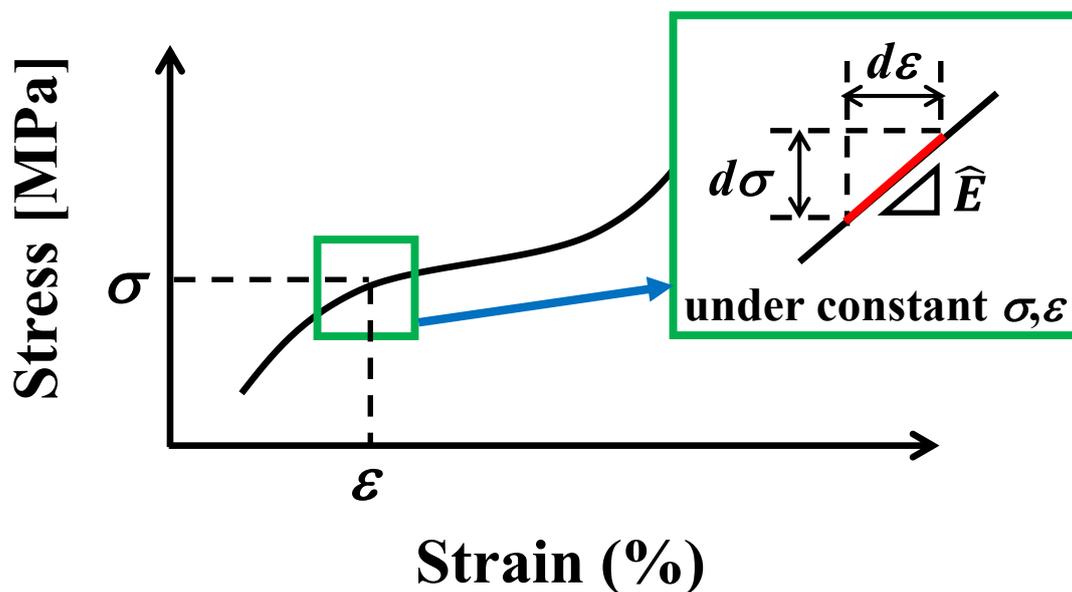


Fig.5-1 Linear relation between small differential stress and strain under approximately unchanging condition.

Tab.5-1 Values of ρ_n , σ_{n_min} , σ_{n_max} , $\Delta\sigma_n$, β and e_b of Polyamide 6 and Polymethyl methacrylate under uni-axial tensile, uni-axial compressive and simple torsional loading.

	PA 6			PMMA		
	Ten	Com	Tor	Ten	Com	Tor
ρ_n [-]	71	63	60	68	60	20
σ_{n_min} [MPa]	20	58	9	43	61	12
σ_{n_max} [MPa]	29	67	18	63	81	32
$\Delta\sigma_n$ [MPa]	9			20		
β [-]	0.95			1.28		
e_b [s ⁻¹]	1.8×10^{-3}			2.6×10^{-4}		

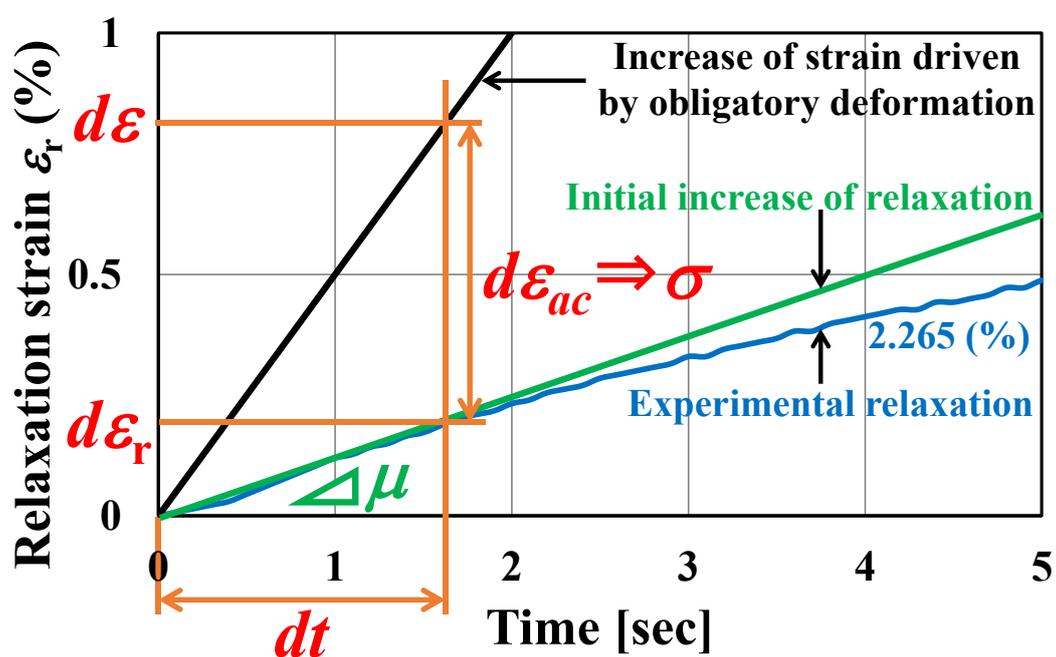


Fig.5-2 Active strain producing reaction as stress ; resulting from difference between obligatory deformation and relaxation for small duration.

Tab.5-2 Values of ζ , ω , $\zeta \times \omega$, ξ and α of Polyamide 6 and Polymethyl methacrylate under uni-axial tensile, uni-axial compressive and simple torsional loading for strain rates (a) $5.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ and (b) $5.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$.

(a) $5.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$							
	PA 6			PMMA			
	Ten	Com	Tor	Ten	Com	Tor	
ζ [s ⁻¹]	4.1×10^{-3}	5.7×10^{-3}	3.3×10^{-3}	–	–	–	
ω [1/s]	39	10	14	–	–	–	
$\zeta \times \omega$ [s ⁻¹]	1.6×10^{-1}	5.7×10^{-2}	4.6×10^{-2}	2.9×10^{-2}	5.6×10^{-2}	2.7×10^{-2}	ξ [s ⁻¹]
α [-]	7.9	7.9	8.2	4.0	5.4	6.4	
	$\mu = \zeta\{1 - \exp(-\omega\varepsilon)\}$			$\mu = \xi\varepsilon$			
	$d\sigma = \hat{E}(d\varepsilon - \alpha\mu dt)$						

(b) $5.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$							
	PA 6			PMMA			
	Ten	Com	Tor	Ten	Com	Tor	
ζ [s ⁻¹]	6.5×10^{-5}	7.1×10^{-5}	4.1×10^{-5}	–	–	–	
ω [1/s]	43	25	36	–	–	–	
$\zeta \times \omega$ [s ⁻¹]	2.8×10^{-3}	1.8×10^{-3}	1.5×10^{-3}	8.6×10^{-4}	1.2×10^{-3}	6.6×10^{-4}	ξ [s ⁻¹]
α [-]	0.93	1.1	0.98	2.2	2.0	1.5	
	$\mu = \zeta\{1 - \exp(-\omega\varepsilon)\}$			$\mu = \xi\varepsilon$			
	$d\sigma = \hat{E}(d\varepsilon - \alpha\mu dt)$						

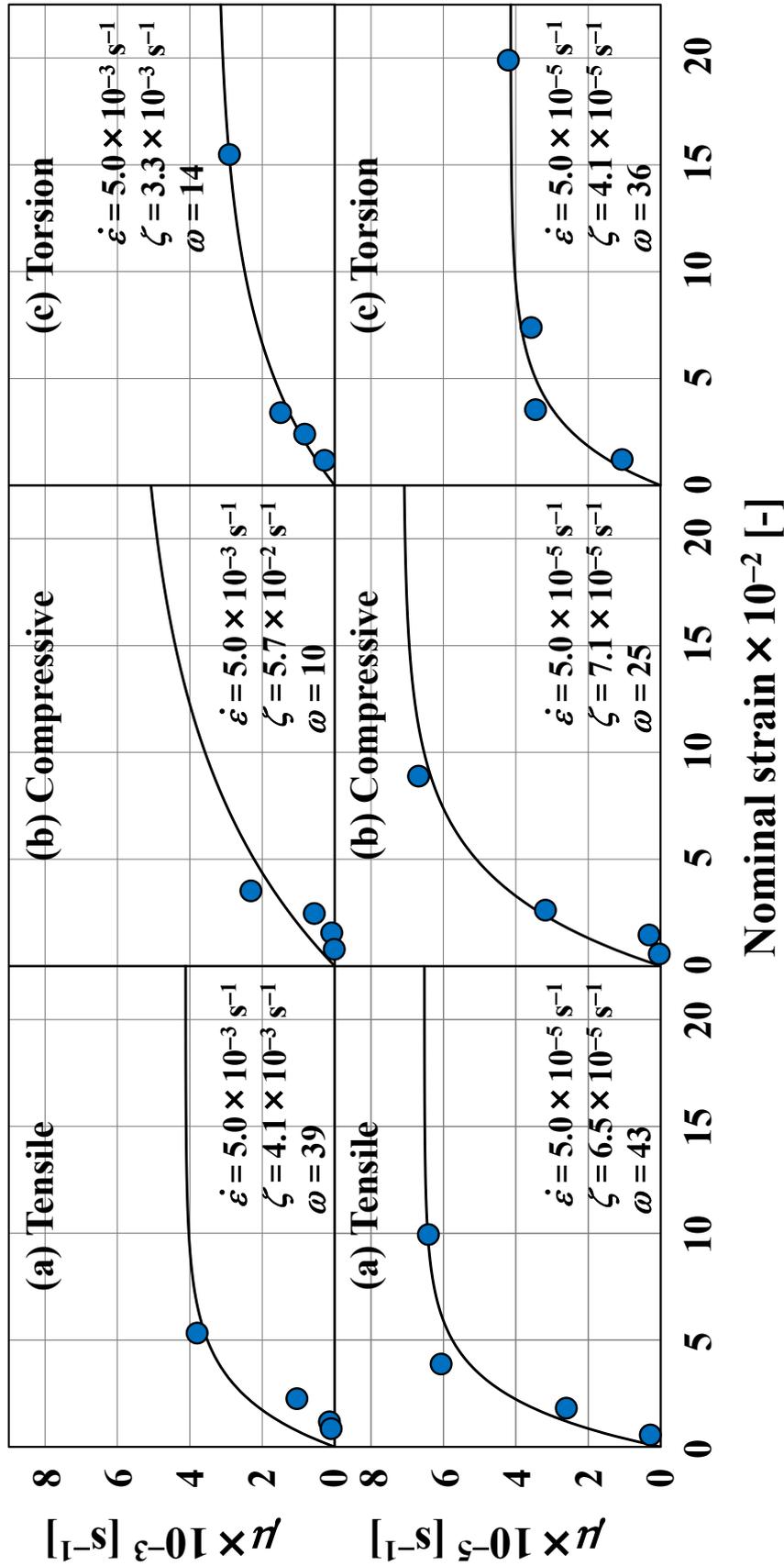


Fig.5-3 Approximate estimation of relaxation strain rate of polyamide 6 for strain state at relaxation start under each loading condition and controlled strain rate ; (a) uni-axial tension (b) uni-axial compression and (c) simple torsion.

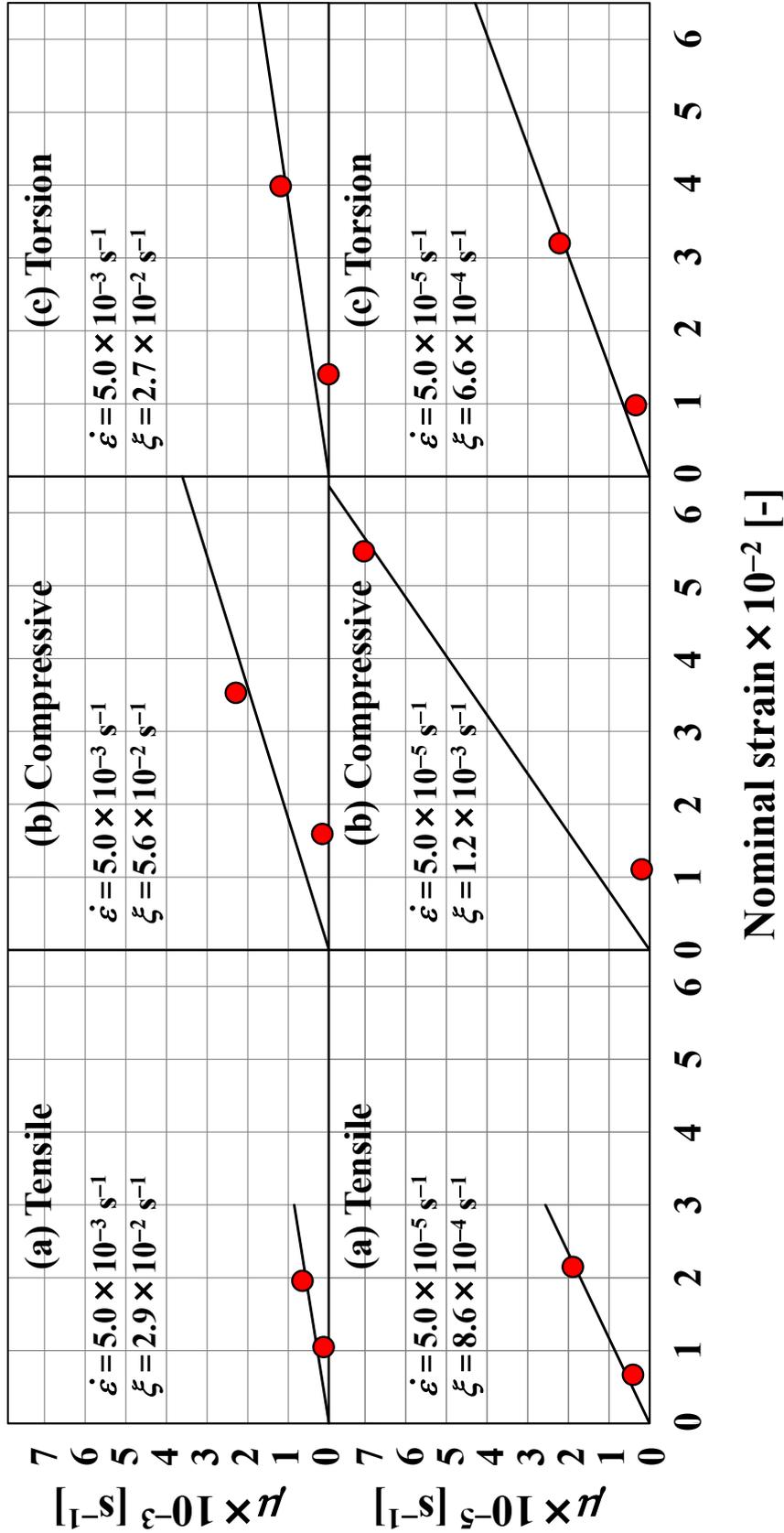


Fig.5-4 Approximate estimation of relaxation strain rate of polymethyl methacrylate for strain state at relaxation start under each loading condition and controlled strain rate ; (a) uni-axial tension (b) uni-axial compression and (c) simple torsion.

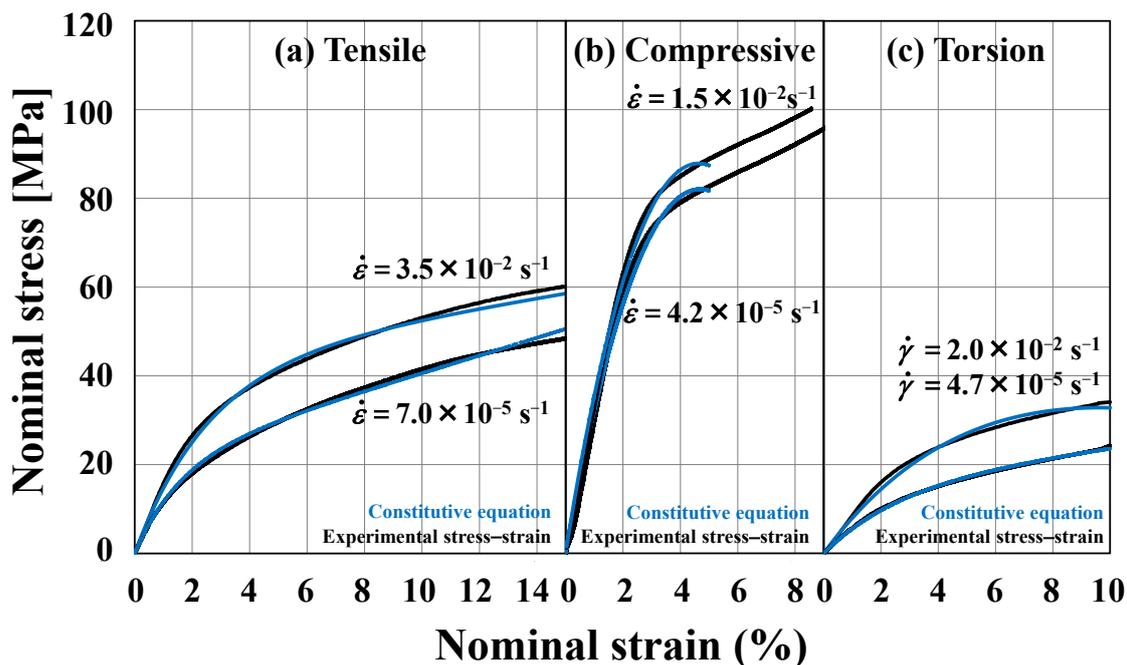


Fig.5-5 Comparison between constructed constitutive equations and experimental stress-strain curves of polyamide 6 under various loading conditions ; (a) uni-axial tensile, (b) uni-axial compressive and (c) simple torsional loading.

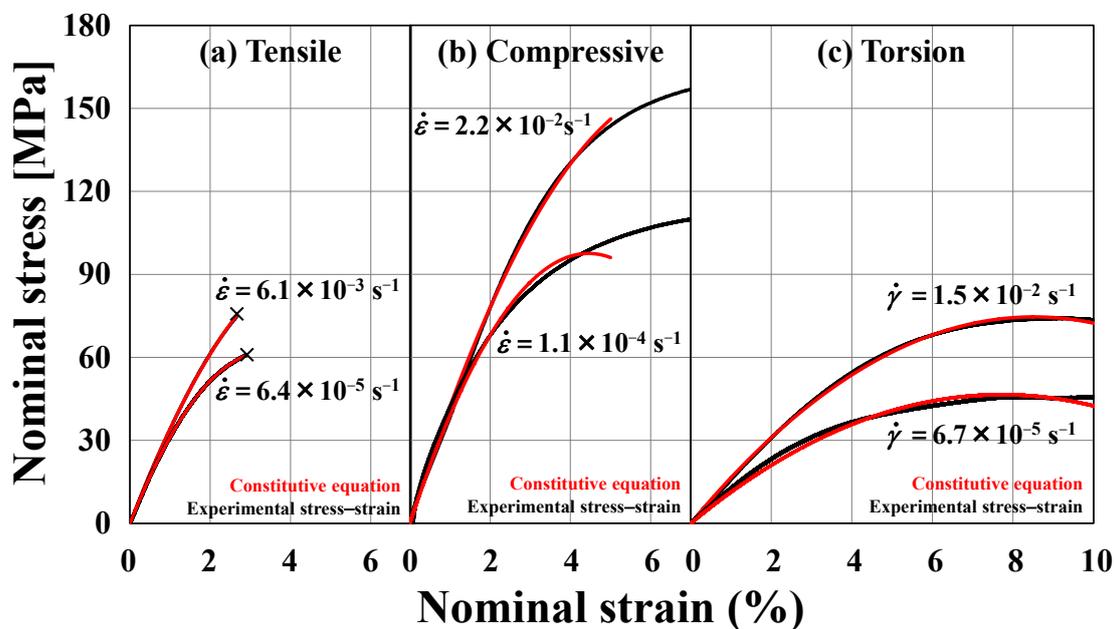


Fig.5-6 Comparison between constructed constitutive equations and experimental stress-strain curves of polymethyl methacrylate under various loading conditions ; (a) uni-axial tensile, (b) uni-axial compressive and (c) simple torsional loading.

第6章 結言

本研究では変形挙動の異なるポリアミド6 (Polyamide 6, PA 6) 樹脂とポリメタクリル酸メチル (Polymethyl methacrylate, PMMA) 樹脂を用い、単純負荷条件下における各種機械的性質を比較することによって幅広く実用的な理論の構築を目指した。

本研究から以下の結果が得られた。

- (1) ポリアミド6樹脂およびポリメタクリル酸メチル樹脂はいずれも非線形的な応力 - ひずみ関係を示していた。外力による強制的な変形によって生じるひずみの微小増分は、線形的に応力の微小増分を生み出し、暫時的な弾性係数は到達している負荷状態によって変化する (式(5-1))。
- (2) いずれの材料においても強制変位によるひずみと応力の微小変化の間の暫時的な弾性係数は、負荷状態のみならず、引張や圧縮、せん断といった荷重条件に依存する。また暫時的な弾性係数は変形速度に強く依存しており、対数表示としたひずみ速度に関するシグモイドモデルであらわせる (式(5-5))。
- (3) 応力増分を生じる実質的なひずみの増分は、強制変位によるひずみから緩和ひずみの効果を減じた成分であると考えられる (式(5-6))。また時間とともに収束していく緩和ひずみの上限値と、負荷状態とその状態に到達するまでのひずみ速度に依存していた。よって応力増分をもたらす実質的なひずみの大きさは緩和ひずみを介して負荷状態と、そこに到達するまでのひずみ速度に左右される。

以上より、緩和ひずみの成分を減じたひずみの微小増分と応力との関係に、荷重条件、負荷状態およびひずみ速度で決定される係数を用いることで構成方程式を構築できる。2つの熱可塑性樹脂材料の応力 - ひずみ関係は明瞭に異なっていた。この違いは力学負荷条件と負荷状態に対する緩和ひずみ速度との関係の違いで説明できる。すなわち力学負荷条件と負荷状態に対する緩和ひずみ速度との関係を導入することで応力 - ひずみ関係をモデル化できる。同じ材料については荷重条件とひずみ速度によらず同一の緩和ひずみ速度の関係を定式化 (式(5-10), 式(5-11)) でき、荷重条件およびひずみ速度の影響を加味した係数で応力 - ひずみ関係を表現できることが明らかとなった。よって材料に依存した緩和のモデル化と負荷条件依存の係数を決定すれば、強制的な変形と緩和ひずみの線形和が抗力として変換される (式(5-6)) というきわめて単純な原理で熱可塑性樹脂材料の構成方程式を構築できる可能性が示唆された。

本研究の結論は, より実用的な複合負荷条件下における応力 - ひずみ関係の数理を展開するための基礎理論を提示しており, 各種熱可塑性樹脂材料の適切な強度設計を実現するうえで重要な指針を与えるものと考えられる.

参考文献

- (1) 環境省, プラスチックを取り巻く国内外の状況,
<http://www.env.go.jp/council/03recycle/y0312-02/y031202-s1r.pdf>
- (2) 本間精一, “設計者のためのプラスチックの強度特性”, 丸善出版株式会社, pp.10-37, (2008).
- (3) 深堀美英, “設計のための高分子の力学 高分子鎖が織りなす力学の世界”, 技報堂出版株式会社, pp.47-51, pp.205-214, pp.253-254, (2000).
- (4) 福本修, “ポリアミド樹脂”, 日刊工業新聞社, pp.11-24, pp.41-86, (1970).
- (5) 藤吉敏生, “ポリアミド樹脂ハンドブック”, 日刊工業新聞社, (1988).
- (6) 浅見高, “アクリル樹脂”, 日刊工業新聞社, pp.9-10, pp.151-156, (1970).
- (7) 白鳥正樹, 三好俊郎, 松下久雄, “数値破壊力学”, 実教出版, pp.8-47, (1980).
- (8) 社団法人 日本塑性加工学会, “例題で学ぶはじめての塑性力学”, 森北出版, (2009).
- (9) 本間精一, “プラスチック製品の強度設計とトラブル対策”, 株式会社エヌ・ティー・エス, (2009).
- (10) 戸伏壽昭, 稲葉忠司, 池田忠繁, 竹市嘉紀, 小野勇一, 松井良介, “材料力学 機械設計の基礎”, 株式会社コロナ社, (2014).

謝辞

本研究を遂行するにあたり，ご指導して頂いた稲葉忠司教授，吉川高正准教授，馬場創太郎助教授に心から感謝するとともに，ここに敬意を示します．研究活動を通じ，工作機械の扱い方から論理的なモノの考え方まで数多くのことを熱心にご指導して頂き，深く感謝しております．また修士論文発表会において副査を引き受けて下さった鈴木泰之教授にも心より御礼申し上げます．非常に拙い修士論文にもかかわらず，御丁寧に指導して頂き，深く感謝しております．

3年間研究室生活を共にした飯田亜子さん，浦口雅隆さん，大西優希さん，藤本貴大さんには大変お世話になりました．また同じチームの後輩である河野智弘さん，柳谷正徒さん，岩谷拓真さん，江原佑哉さん，大野将寛さん，原大貴さん，山浦優人さんにはミーティングや実験の場面で協力して頂き，ありがとうございました．

最後に今まで私のことを支えてくださった家族に心から感謝致します．

平成 31 年 3 月 吉日

栗田 詢也