

# ハーバート硬さ試験機の実用化に関する研究

2018年3月

群馬大学大学院 工学研究科

工学専攻 先端生産システム工学領域

鎚木哲志



## 目 次

第1章 緒言 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 材料試験における問題点 .....	1
1.3 材料試験における硬さ試験 .....	2
1.4 硬さ試験の種類 .....	2
1.5 硬さ試験方法と特徴 .....	3
1.6 硬さ試験に関する従来の研究 .....	5
1.7 硬さ試験におけるニーズ .....	9
1.8 強制的な圧痕の形成を伴わない硬さの測定 .....	9
1.9 本研究の目的 .....	11
1.10 本論文の構成 .....	11
第2章 ハーバート硬さ試験の変遷と問題点 .....	16
2.1 はじめに .....	16
2.2 ハーバート硬さ試験機の変遷 .....	18
2.2.1 オリジナルのハーバート硬さ試験機 .....	18
2.2.2 羽原らの改良 .....	19
2.2.3 松原らの改良 .....	20
2.3 測定原理 .....	22
2.4 ハーバート硬さの問題点 .....	25
第3章 ハーバート硬さ試験の改良 .....	28
3.1 はじめに .....	28
3.2 改良型ハーバート硬さ試験機による硬さ評価方法 .....	31
3.2.1 揺動角度の測定方法 .....	31
3.2.2 硬さ試験方法 .....	33
3.3 圧子の選定 .....	35
3.3.1 圧子の形状および材質 .....	35
3.3.2 試料 .....	36
3.3.3 実験条件 .....	37
3.3.4 実験結果と考察 .....	37

3.4	測定条件の影響の調査	39
3.4.1	調査対象とする因子	39
3.4.2	試料	39
3.4.3	実験方法	39
3.4.4	実験結果と考察	41
3.5	減衰硬さとブリネル硬さの関係	50
3.6	減衰硬さの妥当性確認	51
3.6.1	流動硬さとの比較	51
3.6.2	実験方法	51
3.6.3	実験結果および考察	51
3.6	まとめ	55
第4章	減衰硬さと引張特性の関係	57
4.1	はじめに	57
4.2	実験方法	57
4.2.1	引張試験	57
4.2.2	ハーバート硬さ試験	58
4.2.3	ハーバート硬さ試験による最大接触応力	58
4.3	実験結果および考察	59
4.3.1	圧子と試験片の接触応力	59
4.3.2	減衰硬さと引張特性の関係	61
4.4	まとめ	69
第5章	減衰硬さによる炭素繊維強化樹脂の成形性の評価	71
5.1	はじめに	71
5.2	ハーバート硬さ試験における新たな硬さ指標 (HDH) の提案	72
5.3	実験方法	75
5.3.1	試験片	75
5.3.2	曲げ強度試験方法	76
5.3.3	ハーバート硬さ試験方法	76
5.4	実験結果	77
5.4.1	曲げ試験結果	77

5.4.2	ハーバート硬さ試験結果 .....	79
5.4.3	断面観察結果 .....	83
5.5	考察 .....	85
5.5.1	繊維含有率と成形温度の関係 .....	85
5.5.2	成形温度による損傷挙動と曲げ強度の関係 .....	86
5.5.3	減衰硬さによる CFRTP の機械的特性の評価 .....	92
5.6	まとめ .....	94
第 6 章	結言 .....	96
謝 辞	.....	98
関連論文一覧	.....	99



## 第1章 緒言

### 1.1 研究の背景

ものづくりにおいて日本は、自動車産業をはじめとして世界的に非常に高い水準を有してきた。近年では、より安価な労働力を求めた生産拠点の海外進出に伴い、日本国内において事業を継続させるためには、なお一層の国際競争力を備えた技術開発が求められている。

ものづくりを取り巻く環境に目を向ければ、温室効果ガスによる地球温暖化あるいは特に新興国で顕著な工場からの大気汚染等が大きな問題である。原子力発電所の事故に起因する電気料金の上昇や為替の変動に起因する原材料費の上昇等は、製品コストの観点から国際的な競争力を低下させる大きな要因である。このような社会的要因に対応するため、資源の乏しい我が国においては、ものづくり技術力で国際的優位に立つ必要がある。

ものづくりにおけるプロセスは、次のとおりである。

- 1) 顧客要求に従い設計を行う。
- 2) 設計に基づき製作する。
- 3) 製品の特性を計測および評価を行う。
- 4) 評価結果の顧客要求との適合性を判定し設計に反映する。

一般的に生産現場においては、この 1)から 4)までを繰り返す。特に、「測れないものは作れない」<sup>1)</sup>という言葉は、製品の特性を計測できる限界が品質の限界であることを意味している。新たな製品開発を行う上で計測技術の向上は必要不可欠なものである。

本研究では、ものづくりにおける材料の機械的特性値を得る計測技術の一つである硬さ試験に注目する。材料の硬さを計測する場合、従来の試験方法では、圧子による圧痕を評価することから材料の変形を伴うものが一般的であったが、本研究では、振り子型の試験機を試料上で揺動させ、その揺動の挙動から材料の硬さを計測し、従来の硬さ試験結果との関係を明らかにし、工業的な実用化に向けた検討を行う。

### 1.2 材料試験における問題点

材料試験は、材料の機械的特性を評価するために行われる試験の総称である。材料を構造部材として用いる場合、最も重要な機械的特性は強度である。材料の強度は構造の安全性および加工性に関連する重要な指標である。材料試験は、一般に評価する機械的特性に合わせて素材から試験片を採取し、これに荷重を負荷し変形または破壊を生じさせること

によって行われる。材料試験を行う一般的な方法として、引張試験、曲げ試験および硬さ試験等が挙げられる。これらの試験方法は JIS 規格により規定され、使用する試験機、試験片形状および試験条件等が標準化される。これにより、試験結果の公平性が保たれ、誰もが安心して利用できる指標となる。材料試験の問題点は、試験規格に準じた試験片を必要とし、測定に時間を要することである。試験片を用いた材料試験により得られる強度である試験片強度は、同じ材料の構造物の強度、すなわち実体強度と必ずしも一致しない<sup>2)</sup>。これは、試験片および実体の組織が必ずしも同じではないこと、寸法効果および表面状態の影響などが原因である。

### 1.3 材料試験における硬さ試験

材料試験は、調べたい材料の特性により、それに応じた試験方法を用いる。材料への引張あるいは圧縮荷重に対する特性を調べる場合、引張あるいは圧縮試験を用いる。前述の規格化された試験による応力とひずみの関係から、目的に合わせた材料の特性が評価され、製品設計に有益な指標が得られる。しかしながら、試験に用いる設備が特殊であり高価であるため、全ての製造者が容易に試験設備を導入し、試験を行うことは困難である。

材料表面の傷つきにくさを調べる場合、硬さ試験を用いる。硬さは、一般的に材料の変形に対する抵抗として考えられる。すなわち、硬さは材料強度を示す指標である。硬さ試験では圧子による押し込みや引掻きなど局所的な外力による塑性変形およびせん断などに対する抵抗が評価される<sup>3)</sup>。硬さは引張強さおよび靱性などの機械的特性と関係があるため、その値から構造部材の機械的特性を推定することができる。硬さ試験は、強度の推定に有用であることに加え、試験時間が短いことおよび試験前後での変形が微小であるため、巨視的に非破壊での検査に位置付けられる等の利点がある。試験機の価格は、引張試験に用いるものと比較して安価である。硬さ試験は、今日工業分野において、製造工程における様々な段階での検査で広く用いられている。

### 1.4 硬さ試験の種類

#### (1) 試験方法の規定

硬さ試験を含む材料試験において試験結果は試験片の採取法、成型法、形状、寸法、負荷方法および温度などの多くの要因によって変化する。そのため材料試験の方法は国際標準化機構(International Organization for Standardization, ISO)や日本工業規格(Japan Industrial



Standards, JIS)によって定められている。

## (2) 試験方法の分類

硬さ試験は大きく分けて静的硬さ試験法、動的硬さ試験法および引掻き硬さ試験法の 3 種類に分類される。工業的に用いられる典型的な硬さ試験は、押し込み硬さ試験および反発硬さ試験である。前者は静的硬さ試験に分類され、後者は動的硬さ試験に分類される。現在工業分野において最も多く用いられている試験方法は押し込み硬さのビッカース硬さ試験、ブリネル硬さ試験、ロックウェル硬さ試験、デュロメータ硬さ試験および反発硬さのショア硬さ試験である。主な硬さ試験を表 1-1 にまとめる。

表 1-1 主な硬さ試験<sup>4), 5)</sup>

硬さ	記号	試験法	材料	圧子	考案者	考案年
ビッカース	HV	押し込み	金属、セラミックス、プラスチック	ダイヤモンド四角錐	R. Smith and G. Standland	1925
ブリネル	HB	押し込み	金属	鋼球、超硬合金球	J. A. Brinell	1900
ロックウェル	HR	押し込み	金属、プラスチック	ダイヤモンド円錐、鋼球、超硬合金球	S. Rockwell	1919
ショア	HS	反発	金属	ダイヤモンド球	A. Shore	1906

## 1.5 硬さ試験方法と特徴

### (1) ビッカース硬さ試験<sup>6)</sup>

対面角 136 度の四角錐形状のダイヤモンドを圧子として用い、圧子に試験力を負荷し材料に押し込む。荷重除荷後の圧痕の対角線長さを測定する。試験力(N)を圧痕の表面積(mm<sup>2</sup>)で除した値をビッカース硬さ HV と定義する。試験荷重が 1 kgf (9.8 N)以下の測定により微小硬さが得られ、結晶粒単位での硬さや硬さ分布の測定ができる。金属材料、セラミックス材料および一部のプラスチック材料の硬さ試験に使用される。ビッカース硬さ試験の

圧痕は小さいため、非破壊的材料評価法としても用いられる。圧痕の表面積を求めるため、試験片表面の平滑処理を行う場合がある。

#### (2) ブリネル硬さ試験<sup>7)</sup>

鋼球あるいは超硬合金球を圧子として用い、圧子に試験力を負荷し材料に押し込む。荷重除荷後の圧痕の直径を測定する。ビッカース硬さと同じ定義により試験力(N)を圧痕の表面積(mm<sup>2</sup>)で除した値としてブリネル硬さ HB を求める。この試験方法は主として金属材料の硬さ試験に使用される。ビッカース硬さ試験と比較して圧痕が大きいため広い範囲の硬さの検出が可能であることから、微小部位ごとに硬さがばらつくような材料、例えば鋳巣を含むような鋳物等の材料の平均的な硬さを評価するのに適している。

#### (3) ロックウェル硬さ試験<sup>8)</sup>

先端角 120 度のダイヤモンド円錐圧子または鋼球あるいは超硬合金球を圧子として用いる。まず、初期試験力(N)を負荷し、次に追加試験力(N)を負荷する。その後、追加試験力を除荷した際の弾性回復深さ(mm)からロックウェル硬さ HR を求める。圧子および荷重によりスケールが定義される。ダイヤモンド円錐圧子は、先端が曲率半径 0.2 mm の球面であり、円錐角度は 120° である。鋼球および超硬合金球の直径は、1.5875 mm あるいは 3.175 mm である。初期試験力は 98.07 N であり、追加試験力は 588.4 N、980.7 N および 1471 N である。ダイヤモンド円錐圧子を用いる際のスケールは、追加試験力が低い方からそれぞれ A、D および C である。直径 1.5875 mm の球圧子を用いる際のスケールは、追加試験力が低い方からそれぞれ F、B および G であり、直径 3.175 mm の球圧子を用いる際のスケールは、H、E および K である。金属材料およびプラスチックの硬さ試験が可能である。測定が簡便で測定者による誤差要因が小さい。ブリネル硬さと同様に圧痕が大きい。

#### (4) ショア硬さ試験<sup>9)</sup>

先端に半球状のダイヤモンドを有する鋼丸棒のハンマーを落下させ、跳ね返り高さを測定する。跳ね返り高さから落下前の高さを除いた値をショア硬さ HS と定義する。ショア硬さ試験は簡便で、試験機が持ち運び可能である。そのため、現場での非破壊的材料評価法として用いることができる。試料によっては測定値のばらつきが大きい場合がある。

## (5) その他の試験

前述の硬さ試験は主に金属材料に用いられる試験方法である。粘弾性材料およびセラミックスのような脆性材料に硬さ試験を行う場合には表 1-1 中の硬さ以外のデュロメータ硬さ HD<sup>10)</sup>およびヌープ硬さ HK<sup>11)</sup>試験などが用いられる。

## (6) 硬さ試験の特徴のまとめ

先に挙げた各硬さ試験では、簡便性、精度または試験適用範囲のいずれかに欠点を持つため、試料の材質および試験条件により使い分けがされている。いずれの試験においても圧子を材料に押し込むあるいは衝突させて硬さを評価するため、材料には軽微な損傷を伴う。そのため、試験が簡便に非破壊的かつ広い材質への適用範囲を持つ硬さ試験機は実用化されていない。

## 1.6 硬さ試験に関する従来の研究

### (1) 金属の押し込み試験に関する基礎的な研究

金属の硬さ試験は、一般的な機械的特性を評価する手段として多くの研究が行われている。吉澤は硬さ試験方法や材料への試験適用例を紹介している<sup>12)</sup>。硬さに関する文献は硬さの試験方法に関するものが多く、硬さの本質を取り扱うものは少ない。Tabor は、それまでに経験的な法則により有用性が示された硬さについて、物理的な意味を取り扱っている<sup>13)</sup>。球圧子による硬さ測定において、圧子が材料に押し込まれる際の物理的な挙動を説明するため、圧子と材料の接触問題として取扱い、ブリネル硬さに対して押し込み圧力と降伏応力の関係で物理現象の検討を行っている。ビッカース硬さやロックウェル硬さ等の角錐および円錐圧子を用いる硬さ試験についても同様の検討を行い、それぞれの硬さが意味するものを物理的な考察により説明している。Hutchings は、硬さ試験が実用目的で使用される 20 世紀前半において、その科学的な理解がほとんどないことに着目し、Tabor の研究の前後での押し込み硬さに関する研究を整理し、押し込み硬さの発展に対する Tabor の功績を示している<sup>14)</sup>。20 世紀前半のブリネル、ビッカースおよびロックウェル等の押し込み硬さ試験に関する研究は、材料の機械的特性を簡便に得ることを主眼としており、各種機械的特性と硬さの関係の実験的な証明に留まっている。Tabor が硬さ試験を球と平面の接触としてモデル化したことにより、解析的な考察が可能となり、球圧子を用いる硬さ試験における材料の弾性および塑性流動の力学的な検討や各種試験方法における結果の持つ物

理的意味への進展がなされている。O'Neill は、金属材料に対する押し込み硬さ試験に焦点を当て、ブリネル硬さが鋼材の引張強さと良い対応を示すことを実験的に明らかにし、両者の関係を定式化している<sup>15)</sup>。ブリネル硬さ試験における荷重の増加に伴う圧痕の増加と引張試験により得られる応力-ひずみ曲線の関係を実験的に明らかにし、両者が良い対応を示す範囲が存在することを示している<sup>16)</sup>。

## (2) 硬さと材料の機械的特性との関係に関する研究

材料の強度を評価する一般的な方法は引張試験である。引張試験は硬さ試験と比較して、試料の作製が困難、実験装置が高価および試験時間が長いため、簡便な硬さ試験により引張強さを推定したいという要求は多い。JIS のハンドブック<sup>17)</sup>には、鋼材において 1.5 節で示した硬さ試験であるビッカース硬さ、ブリネル硬さ、ロックウェル硬さおよびショア硬さと引張強さについての換算値が示されている。この換算は、試験対象を理想的な均質材料と仮定したものであり、実際は材料の欠陥や化学組成のばらつきにより必ずしも一致するわけではないが、換算値としてある範囲でそれぞれの指標に用いるには有効な方法である。

押し込み硬さ試験における硬さ値は、圧子により形成された圧痕の面積で荷重を除すことで決定される。球形圧子による試験において様々な球直径や荷重の組み合わせで試験を行えば、同じ硬さ値が得られる球直径と荷重の組み合わせが存在することが考えられる。Krupkowski は、焼鈍した銅合金に対してくぼみの直径と圧子の直径の比に対する押し込み圧力が滑らかな曲線状の良い相関を示すことを明らかにしている<sup>18)</sup>。Tabor はビッカース硬さ試験により、塑性変形を生じた金属材料の降伏応力はビッカース硬さの約 3 倍であることを示している<sup>19)</sup>。Datsko らは、鋼、アルミニウムおよび銅合金において、ブリネル硬さ試験から引張強さを推定できることを明らかにし、そのための簡易な実験手順を示している<sup>20)</sup>。

## (3) 硬さの試験方法に起因する試験結果への影響に関する研究

荷重の負荷速度や荷重の保持時間により硬さの測定結果に影響を与える場合がある。そのため、試験方法を標準化する必要があり試験方法は規格化されている。歴史の長い押し込み硬さ試験においても試験結果の不確かさの観点からその試験の妥当性を検討する研究が行われている。Polzin らは、硬さ試験の ISO 規格に対して試験方法や基準片に関連する

不確かさについて実例を挙げて評価を行っている<sup>21)</sup>。篠原は、銅材料におけるビッカース硬さの荷重依存性について、引張試験から評価される加工硬化指数 ( $n$  値) との関係について実験的に調査し、 $n$  値が小さい材料ほど荷重依存性が高くなることを明らかにしている<sup>22)</sup>。

#### (4) 硬さ試験方法に対する解析的検討

村上らは、接触問題から高精度の解析が困難だとされていたブリネル硬さ試験に対して、ひずみ増分理論に基づく弾塑性有限要素法に組み入れるよう定式化し、ブリネル硬さの高精度解析法の提案および提案されたブリネル硬さの解析法を広い範囲の線形硬化材料に提供した事例について報告している<sup>23),24)</sup>。Lee らは、例えばガラスのような脆性材料に対して有限要素解析による引掻試験のシミュレーションを行い、Tabor により示された降伏強度が押し込み硬さの約 3 倍であるという関係を予測するための解析モデルを提案している<sup>25)</sup>。Leyi らは、ブリネル硬さの測定プロセスを有限要素解析に対して、理論的な測定モデルを適用した際の不確かさをモンテカルロ法により確認し、解析値と実験値の整合性を示している<sup>26)</sup>。Ziegenhain らは、物質の剛性はその硬さに及ぼす効果を分子動力学シミュレーションで調べ、塑性変形の開始と降伏の機構が弾性率とは無関係であり、物質の硬さが弾性率に比例する結果は Tabor らの提案とよく一致することを示している<sup>27)</sup>。Cheng らは、円錐圧子を用いた押し込み硬さ試験において、円錐角と硬さの関係について弾塑性有限要素解析結果と実験値の比較を行い、解析結果と実験値とは良い相関であることを示している<sup>28)</sup>。

#### (5) 動的な硬さの試験方法に関する研究

JIS では反発硬さであるショア硬さが動的な硬さ試験に分類される。反発硬さについて、Kohlhöfer らは、圧子を試験片上で落下させ、跳ね返る時間から硬さを求める小型で携帯可能な動的硬さ試験機の開発を行い、ステンレス鋼溶接部に開発した硬さ試験機を適用し、動的なロックウェル硬さ試験結果について報告している<sup>29)</sup>。Leeb は、反発硬さ試験において試験を衝突および反発の段階に分けて衝撃体の持つエネルギーの変化から測定方法を説明し、静的な押し込み硬さと動的な反発硬さを実験的に比較し、両者の関係を明らかにしている<sup>30)</sup>。Clough らは、冷間圧延鋼板に球を落下させて硬さを測定する方法を開発し、この試験により得られる動的硬さが、球の直径とひずみ速度の関数であることを実験的に明ら

かにしている<sup>31)</sup>。

新しい押し込み硬さとして、試験力と押し込み深さの関係から材料の機械的特性を評価する方法が報告されている。Köppelらは、アルミニウム、黄銅およびチタン合金について動的な押し込み硬さを求める方法を検討し、材料の動的硬さは一般的な静的硬さよりも大きく、硬さの増加は材料の結晶構造に依存することについて議論している<sup>32)</sup>。中村らは、押し込み硬さ試験において、押し込み深さと押し込み荷重とを同時に測定する動的硬さについて従来の試験方法による結果との比較等を行っている<sup>33)-35)</sup>。小島は新しい押し込み硬さ試験として、ビッカース硬さ試験において試験力と押し込み深さの関係から評価される材料特性値<sup>36)</sup>や関連する規格<sup>37), 38)</sup>を示している。

#### (6) 非破壊での試験方法に関する研究

非破壊での硬さの評価について物理的な荷重を材料に負荷しない試験方法に関する研究が行われている。Lukomskiらは、マルテンサイト系の圧延鋼材に対して超音波の音速の変化から硬さを求めることを提案している<sup>39)</sup>。Khanらは、オーステナイト系の冷間圧延鋼材に対して圧延量に対するビッカース硬さとX線回折および超音波縦波速度の変化の関係について明らかにしている<sup>40)</sup>。栗田らは、マルテンサイト系鋼材の焼入れ硬化に対して焼入れの程度によりX線回折線のピークが変化することに着目した焼き入れ硬化の評価の有効性を提案している<sup>41)</sup>。Hullらは、銅合金の化学組成に対して渦電流を基に測定された電気抵抗の変化がビッカース硬さと良い対応であることを示している<sup>42)</sup>。

#### (7) 従来の研究に関するまとめ

現在工業的に幅広く利用されている押し込み硬さおよび反発硬さについては、Taborにより硬さ試験の物理的な考察がなされている。簡便な硬さ試験結果から降伏応力等の推定や異なる硬さ試験間の換算についても規格化されている。解析的な手法においては、硬さの試験をモデル化し、硬さ試験結果を得るまでのメカニズムを解明する試みがなされている。動的な硬さ試験については、反発硬さの改善や応用だけでなく、押し込み深さと荷重を同時に測定し、材料の荷重に対する動的な応答から材料の特性を評価する試みがなされている。非破壊での硬さ測定については、超音波、X線回折および渦電流を利用した材料に物理的な荷重負荷をかけない硬さ試験方法が検討されている。

## 1.7 硬さ試験におけるニーズ

押し込み硬さ試験において、硬さは圧痕の大きさから評価される。例えば、自動車のシャフトのように、材料に圧痕を付けたくない場合は従来の硬さ試験方法は適用できない。

材料の熱処理をする場合、熱処理炉の空間には温度のむらがあるため、配置位置により材料温度にもばらつきが生じる。その結果、材料の硬さは、熱処理炉内での材料の配置により異なる。部品の形状の複雑化に伴い、熱処理におけるばらつきはさらに大きなものになる。現状は、炉内の複数箇所から製品を抜き取り、硬さ試験用に製品を加工して試験を行い、その硬さから他の炉内の製品の保証を行っている。近年では、部品を小型軽量化するために材料をより硬くすることが求められる。製品が小型化かつ複雑形状化することで材料が均質になるよう熱処理するにはさらなる困難が伴う。製品には高品質や高い信頼性が要求されることから、従来の炉内の抜き取り検査で製品の硬さを保証するのではなく、製品一品ごとに試験を行い、硬さを保証することが求められる<sup>43)</sup>。

JIS に規定される硬さ試験方法において材料への圧痕の形成を伴わない試験方法は存在しない。そのため新たな硬さの評価方法が必要になる。熱処理の程度の評価だけに限定すれば、金属の組成の変化に対する超音波、X線あるいは電気的な変化を評価することでの硬さの評価方法は前述のとおり提案されている。しかしながら、材料に対して物理的な力の負荷に対する応答を直接的に表現していない。そのため変形に対する抵抗である硬さを十分に評価しているかという点にユーザは疑念を抱く。これらの測定に用いる装置が高価であることや試料の材質や形状に制約を受けることも非破壊での評価を困難にしている。

## 1.8 強制的な圧痕の形成を伴わない硬さの測定

工業的に有用な非破壊での硬さ測定を行うためには、押し込み硬さ試験のように強制的に形成する圧痕から硬さを評価しない試験であることが望ましい。それを実現する硬さ試験機にハーバート硬さ試験機が挙げられる。ハーバート硬さ試験機は英国の Herbert が考案した振子型試験機である<sup>44)</sup>。試験機外観を図 1-1 に示す。

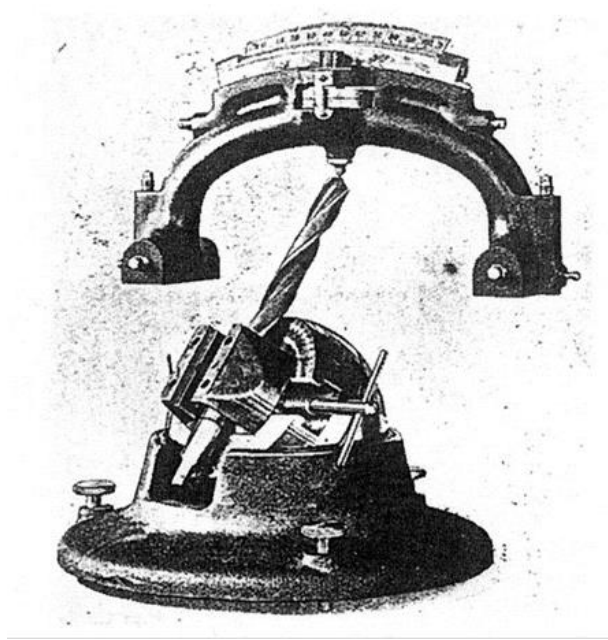


図 1-1 ハーバート硬さ試験機<sup>44)</sup>

ハーバート硬さ試験機はダイヤモンド球状圧子を支点とする倒立振り子型硬さ試験機である。図 1-1 は試験機がドリルの先端に設置されている状態である。既存の硬さ試験において図のようにドリルの先端部の硬さを測定できる方法は存在しない。ハーバート硬さ試験は動的硬さ試験に分類される。試料表面上でこの試験機を揺動させると、圧子は試料と接しながら試料上で転がりを繰り返す。圧子の試料への食い込み量および試料を押しつぶしつつ転がるときに圧子が受ける抵抗は材質によって異なる。これらの現象を硬さとして表すものがハーバート硬さである。

ハーバート硬さ試験機は工業用に実用化されている例は見当たらない。Tabor も動的硬さ試験の一つとして紹介しているのみで、その具体的な特徴については述べられていない<sup>13)</sup>。本試験機に関する文献は少なく<sup>45)-53)</sup>、試験機そのものの詳細な仕様に関する情報は極めて少ない。

しかしながら、硬さ測定におけるニーズである強制的な圧痕を伴わない硬さ試験で物理的な負荷に対する応答を評価指標とした試験を実現するためには本試験機を活用することが最も有効な手段であると考えられる。



## 1.9 本研究の目的

本研究は、強制的な圧痕を伴わないハーバート硬さ試験を工業的に実用化することを目的とする。従来の試験機に現場での使用の簡便性と評価の高精度化の観点から改良を加え、従来のハーバート硬さよりもより合理的かつ実用的な硬さ指標の提案を行う。

## 1.10 本論文の構成

本論文は次のとおり構成される。

第1章では、本研究を行うに至った研究背景および関連する従来の硬さ試験法の特徴をまとめ、本研究の目的を述べる。

第2章では、ハーバート硬さの定義、ハーバート硬さ試験機の変遷、原理および問題点について述べる。

第3章では、従来のハーバート硬さ試験機の問題点を解決するための試験機の改良について述べる。改良型の試験機にて、金属材料を対象として測定条件が硬さの評価に及ぼす影響を実験的に明らかにする。

第4章では、ハーバート硬さ試験機の工業用途としての有用性を実証することを目的として、ハーバート硬さと材料の機械的特性である引張特性の比較を行い、それらの関係を明らかにし、両者の関係から減衰硬さを用いて材料の機械的特性を予測しうることについて述べる。

第5章では、ハーバート硬さ試験の最大の特徴である材料への圧痕を伴わない非破壊での評価が可能であるという点に着目し、炭素繊維強化樹脂（Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics, CFRTP）の成形性の評価を題材として、当該特徴の有効性を実験的に明らかにした点について述べる。

第6章では、本研究で得られた結果および知見をまとめる。

## 参考文献

- 1) K. Kubo and H. Kobayashi, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 80 No. 6, pp. 497-500, (2014).
- 2) T. Ohide and K. Igawa, *Substantial Strength of Iron and Steel Castings*, Japan Foundry Engineering Society, Vol. 56 No. 4, pp. 237-243, (1984).
- 3) 中島正貴, *材料力学*, コロナ社, (2014).
- 4) 小賀正樹, *国立科学博物館材料試験硬さ技術の系統化調査*, Vol. 14, (2009).
- 5) 寺澤正男, *硬さのおはなし*, 日本規格協会, (1981).
- 6) JIS Z 2244, *ビッカース硬さ試験－試験方法*, 日本規格協会, (2009).
- 7) JIS Z 2243, *ブリネル硬さ試験－試験方法*, 日本規格協会, (2008).
- 8) JIS Z 2245, *ロックウェル硬さ試験－試験方法*, 日本規格協会, (2011).
- 9) JIS Z 2246, *ショア硬さ試験－試験方法*, 日本規格協会, (2000).
- 10) JIS K 7215, *プラスチックのデュロメータ硬さ試験方法*, 日本規格協会, (1986).
- 11) JIS Z 2251, *ヌープ硬さ試験－試験方法*, 日本規格協会, (2009).
- 12) 吉澤武男, *硬さ試験法とその応用*, 裳華房, (1967).
- 13) D. Tabor, *The Hardness of Metals*, Oxford University Press, (2000).
- 14) I. M. Hutchings, *The Contributions of David Tabor to the Science of Indentation Hardness*, *Journal of Materials Research*, Vol. 24 No. 3, pp. 581-589, (2009).
- 15) H. O'Neill, *The Hardness of Metals and Its Measurement*, Chapman and Hall, Ltd., London, (1934).
- 16) H. O'Neill, *The Significance of Tensile and Other Mechanical Test Properties of Metals*, *Proc. Inst. Mech. Engrs*, No. 151, pp. 116-146, (1944).
- 17) JIS ハンドブック ① 鉄鋼 I, 日本規格協会, (2012).
- 18) A. Krupkowski, *Rev. Metall*, Vol. 28 No. 11, pp. 598-609, (1931).
- 19) D. Tabor, *A Simple Theory of Static and Dynamic Hardness*, *Proc. R. Soc., A* 192, pp. 247-274, (1951).
- 20) Datsko J., Hartwig L. and Mcclory B., *On the Tensile Strength and Hardness Relation for Metals*, *The Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 10 No. 6, pp. 718-722, (2001).
- 21) Polzin T., Schwenk D., Frenz H. and Vogt C., *Determination of Uncertainty for Hardness*

- Testing, Proposed Methods for the Standards of Hardness Testing, *Prakt. Metallogr*, Vol. 41 No. 10, pp. 506-515, (2004).
- 22) K. Shinohara, Relationship Between Work-Hardening Exponent and Load Dependence of Vickers Hardness in Copper, *The Journal of Materials Science*, Vol. 28 No. 19, pp. 5325-5329, (1993).
- 23) Y. Murakami and L. P. Yuan., Analysis of Brinell Hardness by the Finite-Element Method. 1st report. Particular Formulation and Comparison with Experimental Results, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 56 No. 525, pp. 1274-1281, (1990).
- 24) Y. Murakami and L. P. Yuan, Analysis of Brinell Hardness by Finite Element Method. (2nd Report, Analysis of Elastic Linear-Hardening Materials and Correlation of the Results with Actual Materials), *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 57 No. 533, pp. 162-169, (1991).
- 25) L. K. Myung, Y. C. Dong and P. Andreas A., Relationship Between Scratch Hardness and Yield Strength of Elastic Perfectly Plastic Materials Using Finite Element Analysis, *The Journal of Materials Science*, Vol. 23 No. 8, pp. 2229-2237, (2008).
- 26) Leyi G., Wei Z., Songling H. and Jing Z., Mechanics Analysis and Simulation of Material Brinell Hardness Measurement, *Measurement*, Vol. 44 No. 10, pp. 2129-2137, (2011).
- 27) Ziegenhain G. and Urbassek H. M., Effect of Material Stiffness on Hardness: A Computational Study Based on Model Potentials, *Philosophical Magazine*, Vol. 89 No. 26, pp. 2225-2238, (2009).
- 28) Cheng Y. and Li Z., Hardness Obtained from Conical Indentations with Various Cone Angles, *Journal of Materials Research*, Vol. 15 No. 12, pp. 2830-2835, (2000).
- 29) W. Kohlhöfer and R.K. Penny, Dynamic Hardness Testing of Metals, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 61 No. 1, pp. 65-75, (1995).
- 30) D. Leeb, Dynamic Hardness Testing of Metallic Materials, *NDT&E international*, Vol. 12 No. 6, pp. 274-278, (1979).
- 31) Clough R.B., Webb S.C. and Armstrong R.W., Dynamic Hardness Measurements Using a Dropped Ball: with Application to 1018 Steel, *Materials Science and Engineering*, Vol. A360 No. 1/2, pp. 396-407, (2003).
- 32) Köppel B. and Subhash G., Dynamic Indentation Hardness of Metals, *IUTAM Symposium on Micro- and Macrostructural Aspects of Thermoplasticity*, pp. 447-456, (1998).

- 33) 中村雅勇, 牧清二郎, 北河義彰, 硬さ試験片の動的押込硬さ, 材料試験技術, Vol. 31 No. 3, pp. 194-200, (1986).
- 34) 中村雅勇, 牧清二郎, 木村浩久, 鈴木裕一, 動的押込み硬さ試験から求まる変形抵抗, 材料試験技術, Vol. 35 No. 2, pp. 139-146, (1990).
- 35) 牧清二郎, 中村雅勇, 荷重保持におけるビッカース圧子の侵入挙動の速度効果への応用, 材料試験技術, Vol. 37 No. 2, pp. 95-101, (1992).
- 36) 小島光司, 新しい硬さ試験 (押込み硬さ試験), 加工技術データファイル, (財)機械振興協会 技術研究所, データファイル通信, Vol.0026, (2004).
- 37) ISO 14577, Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters, (2002).
- 38) JIS Z 2255, 超微小負荷硬さ試験方法, 日本規格協会, (2003).
- 39) Lukomski T. and Stepinski T., Steel Hardness Evaluation Based on Ultrasound Velocity Measurements, Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, The British Institute of Non-Destructive Testing, Vol. 52 No. 11, pp. 592-596, (2010).
- 40) Khan S. H. and Khan A. N., Characterization of Cold Rolled Austenitic Stainless Steel by Ultrasonic Longitudinal Velocity, Key Engineering Materials, Vol. 510-511, pp. 475-480, (2012).
- 41) A. Awata, M. Shinbo and M. Miyagawa, A new X-ray Technique for Evaluating Hardening of Quenched Steels, Non-Destructive Inspection, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, Vol. 39 No. 2, pp. 67-73, (1990).
- 42) Hull S., Messoloras S. and Stewart R. J., A Study of  $\theta'$  Precipitates in an Al-1.56at.% Cu Single Crystal Using Electrical Resistivity, Small-Angle Neutron Scattering and Hardness Measurements, Philosophical Magazine A, Vol. 57 No. 2, pp. 261-276, (1988).
- 43) 井上吉弘, 私信, (2015).
- 44) E.G. Herbert, Some Recent Developments in Hardness, The Engineer, pp. 686-687, (1923).
- 45) E.G. Herbert, The "Pendulum" Hardness Tester, The Engineer, pp. 390-391, (1923).
- 46) E.G. Herbert, Work-Hardening of Metals and the Herbert Tester, The Engineer, pp. 248-251, (1924).
- 47) C. Benedicks and V. Christiansen, Investigations on the Herbert Pendulum Hardness Tester, Journal Iron and Steel Institute, Vol. 110, pp. 219-248, (1924).

- 48) Williams S.R., Hardness and Hardness Measurements, American Society for Metals, Cleveland, (1942).
- 49) 木谷要一, 財満鎮雄, 炭素鋼の内部摩擦に就て, 日本機械学会論文集, Vol. 9 No. 36, J-125, (1943).
- 50) 財満鎮雄, いわゆるハーバート振子について, 機械の研究, Vol. 3 No. 4, pp. 258-259, (1951).
- 51) P.G. Fox, I.B. Freeman, What Does Pendulum Hardness Test Measure, J. Mater. Sci., Vol. 14, pp. 151-158, (1979).
- 52) 羽原治夫, 川満武広, 播本和也, 井上英人, ハーバート硬さ試験機の復元とその応用, 材料試験技術, Vol. 43 No. 4, pp. 248-254, (1998).
- 53) M. Matsubara and K. Skamoto, Modified Herbert Hardness Tester, Proceedings of the SEM Annual Conference, Society for Experimental Mechanics Inc., Vol. 36 No. 3, pp. 73-76, (2009).

## 第2章 ハーバート硬さ試験の変遷と問題点

### 2.1 はじめに

本章では、ハーバート硬さ試験機の変遷およびハーバート硬さ試験の原理について述べる。また、従来のハーバート硬さの問題点について述べる。

ハーバート硬さ試験機は英国の Herbert が考案した倒立振子型硬さ試験機である<sup>1)</sup>。ハーバート硬さ試験では、ダイヤモンド球状圧子を支点とするヤジロベエ型の試験機を試験片上で揺動させる。この振子試験機の自由減衰挙動が試験片の硬さに依存するので、振子試験機の自由減衰特性を用いて試験片の硬さを評価することができる。

ハーバート硬さ試験機を試料上で揺動させた際の揺動角度の時間変化の例を図 2-1 に示す。図において横軸は時間、縦軸は揺動角度を示す。初期角度を  $S_0$  として試料上で試験機を揺動させると、揺動角度は圧子が試料から受ける抵抗により、振れ角である  $S_1$  および  $S_2$  のように徐々に振幅が自由減衰する。この曲線の包絡する曲線  $S(t)$  は自由減衰曲線として表される。この振幅の変化からハーバート硬さを求める。

オリジナルのハーバート硬さには「時間硬さ」、「目盛り硬さ」および「流動硬さ」の3種類の硬さが定義されている。以下にその3種類の定義について示す。

- 1) 目盛り硬さ  $SH$ : 試験機を一定角度だけ傾けて開放し、逆側に傾いた際の角度の最大値
- 2) 時間硬さ  $TH$ : 試験機を一定角度だけ傾けて開放し、5 往復の揺動 (10 揺動) に要した時間
- 3) 流動硬さ  $FH$ : 目盛り硬さと時間硬さの比

目盛り硬さは、試験機の上部に取り付けられた水準器の気泡の位置を目視により読み取る。目盛り硬さは、圧子が試料上を転がった際の圧子および試料の変形作業に起因した転がり抵抗を表現するものであり、他のどの試験機でも測定できない機械的特性である。目盛り硬さは、微小な加工硬化の影響を示す硬さ指標であると考えられる。

時間硬さは、ストップウォッチにより手動で測定が行われる。時間硬さはくぼみ硬さとも呼ばれ、加工硬化の影響を示す硬さ指標であると考えられる。球形状の圧子でくぼみを形成することから、時間硬さは球形状圧子で試料に圧痕を形成するブリネル硬さと対応すると考えられ、ブリネル硬さと良い相関を有することが示されている<sup>2)</sup>。時間硬さとブリネル硬さの関係は次のとおりである。

$$TH = 1.7HBW^{\frac{1}{2}} + 0.000047 HBW^2 \quad (2-1)$$

ここに、*HBW*はブリネル硬さである。

流動硬さは目盛硬さおよび時間硬さだけでは材料間の機械的特性の違いの抽出に困難な場合に用いられる。流動硬さは、加工硬化の影響だけでなく、材料の塑性流動に対する抵抗を測定することが可能であると考えられる。

松原らにより減衰硬さ (Damping Hardness, *DH*) が定義されている<sup>3)</sup>。振子試験機の揺動角度は自由減衰振動波形として観測される。この曲線の極大値を包絡する曲線  $S(t)$ は自由減衰曲線であり次式で示される。

$$S(t) = S_0 e^{-\alpha t} \quad (2-2)$$

ここに、 $S_0$ は試験機の初期角度、 $\alpha$ は減衰定数および  $t$ は揺動時間である。減衰定数はこの試験機の減衰を特徴付ける指標である。ハーバート硬さ試験における減衰定数が、松原らにより定義された減衰硬さである。すなわち、 $DH = \alpha$ である。減衰硬さは、加工硬化の影響を揺動角度の減少の速さで表す数値であることから、流動硬さに近い硬さ指標であると考えられる。

ハーバート硬さとは、ハーバート硬さ試験で得られる目盛硬さ、時間硬さ、流動硬さおよび減衰硬さの4種類の硬さ指標の総称である。

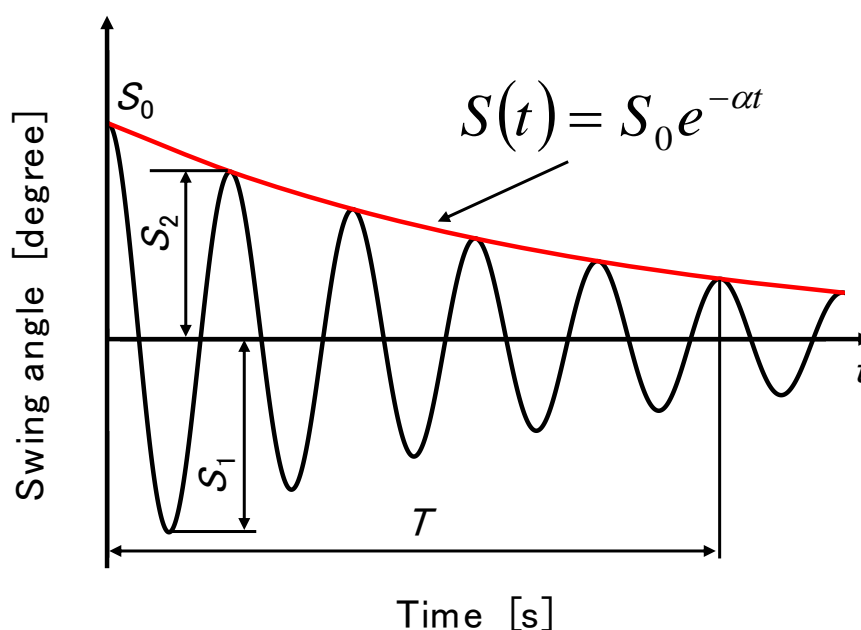


図 2-1 揺動角度の例

## 2.2 ハーバート硬さ試験機の変遷

### 2.2.1 オリジナルのハーバート硬さ試験機

オリジナルのハーバート硬さ試験機に関する文献は乏しく、試験機の寸法や詳細な仕様に関する記述を見つけることはできない。文献<sup>1)</sup>から分かる範囲の試験機の特徴は次のとおりである。

- 1)倒立振子形状である。
- 2)本体は鋼製で重さは4 kgである。
- 3)圧子形状は直径1 mmの球形状であり、材質はダイヤモンド、ルビーあるいは鋼が使用される。
- 4)揺動角度測定用の水準器が試験機の上部に取り付けられている。
- 5)揺動周期を調整するためのねじが垂直方向、左右方向および前後方向に合計6箇所設けられている。
- 6)揺動周期の調整はガラス板上で行われる。

ハーバート硬さ試験機の最大の利点は、振子形状の試験機を試料の上で揺動させることができれば試験が可能であるという点である。例えば、湾曲するドリル先端部分の硬さの測定を行う場合、工業用に一般に用いられている押し込み硬さ試験あるいは反発硬さ試験では、ドリルを加工せずにドリル先端の硬さを測定することはできない。ハーバート硬さ試験は、加工することなくドリル先端の硬さ測定を行うことができる唯一の試験方法である。

しかしながら、ハーバート硬さ試験機は次の欠点を有する。

- 1)測定方法において、目盛硬さは水準器を目視により評価を行い、時間硬さはストップウォッチで測定を行うため、測定精度が低い。
- 2)揺動周期を調節するための重心位置の調整が非常に難しい。
- 3)試験機が重く圧子が小さいため、測定対象が硬い材料に限定される。
- 4)試験機の設置や測定が人の手に依存するため、試験に多大な手間を要する。

これらの欠点により、工業用として広く普及しなかったと考えられる。



### 2.2.2 羽原らの改良

羽原らはハーバート硬さ試験機を復元し改良を行った。この試験機の模式図を図 2-2 に示す。この試験機を羽原式ハーバート硬さ試験機と呼ぶ。羽原式ハーバート硬さ試験機は、以下に示す改良が施されている<sup>4)</sup>。

- 1) 圧子を球状から曲率の小さい半円柱状にする。これにより、前後方向の揺れは生じなくなる。
- 2) 腕を長くすることによって慣性モーメントを大きくする。
- 3) 質量を小さくしたことによって軟らかい材料に対する圧子の食い込み量が小さくなる。
- 4) 全体の形状を単純にし、製作を容易とする。
- 5) 揺動角度の測定は分度器により目視で行う。

羽原らはこの試験機を用いることでゴムおよびプラスチックなどの粘弾性材料の特性を明らかにすることができる可能性を示唆した。しかしながら、ゴムに用いられているデュロメータ硬さと目盛り硬さの間に有意な関係を得ることはできなかった。測定方法が目視によることから、測定精度が低いことが原因として考えられる。実際の製品に適用するには多くの実験的および理論的研究が必要であると結論づけられている。

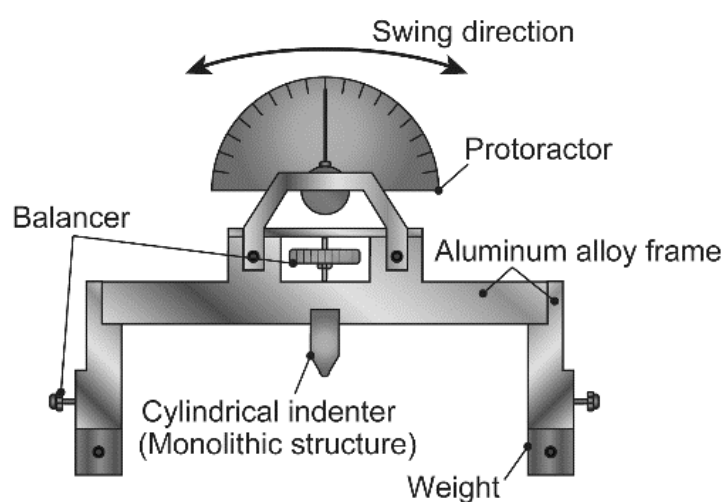


図 2-2 羽原式ハーバート硬さ試験機

揺動角度の測定は本体に取り付けられ本体の揺動に伴い回転する分度器を用い、本体の揺動により変位しないよう重錘を付け常に鉛直方向を示す針を用いて目視で行った。この方法において、次の点が問題点として抽出された。

- 1)揺動角度において分度器を目視により測定する方法では視差や個人誤差により大きな測定誤差を生じやすい。
- 2)揺動時間の測定においてストップウォッチで手動により測定する方法は試験機が振れ上がり静止した状態を目視で確認することが難しいため測定誤差が生じやすい。
- 3)重心位置のずれに起因して左右の振れ角や揺動周期のばらつきが発生し、微調整を行うことが難しい。
- 4)測定作業において目視あるいはストップウォッチでの測定は多大な労力と測定に関する熟練が要求される。

オリジナルのハーバート硬さ試験機においても、測定手法は目視あるいはストップウォッチでの測定が用いられていたことから、この試験の難しさがわかる。

### 2.2.3 松原らの改良

松原らは、羽原らの研究<sup>4)</sup>を参考にハーバート硬さ試験機を再現製作した。本体にはアルミニウム合金を用い、圧子には炭素工具鋼（SK材）を用いた。

振子の揺動角度を高精度かつ電氣的に測定するため、ポテンシオメータを取り付ける試みが松原らによって行われた<sup>5)</sup>。図 2-3 にポテンシオメータが取り付けられた試験機を示す。羽原らが復元した試験機を参考にして製作され、角度検出部にポテンシオメータが取り付けられている。ポテンシオメータの本体は試験機に取り付けられ、ポテンシオメータの回転軸が試験機の本体と一緒に回転しないよう錘が取り付けられている。従来の目視による測定から電気信号での測定に改良されたことにより、測定精度が向上している。粘弾性体である複数の種類のプラスチック材料について試験を行ったところ、ハーバート硬さとデュロメータ硬さに良い相関が見られている。

しかしながら、問題点が次のとおり抽出されている。

- 1)ポテンシオメータを用いる場合、ポテンシオメータの回転軸に取り付けた錘が振子の回転に追従しないため、振子の重心や慣性モーメントが時間的に変化する。
- 2)ポテンシオメータからのリード線の剛性やポテンシオメータの回転機構の摩擦が揺動挙動に影響を与えてしまう。

3)ポテンシオメータと測定機器等をリード線で接続する必要があるため、測定する領域が限定されてしまう。

以上のことから、未だハーバート硬さ試験機には改良の余地が残されている。

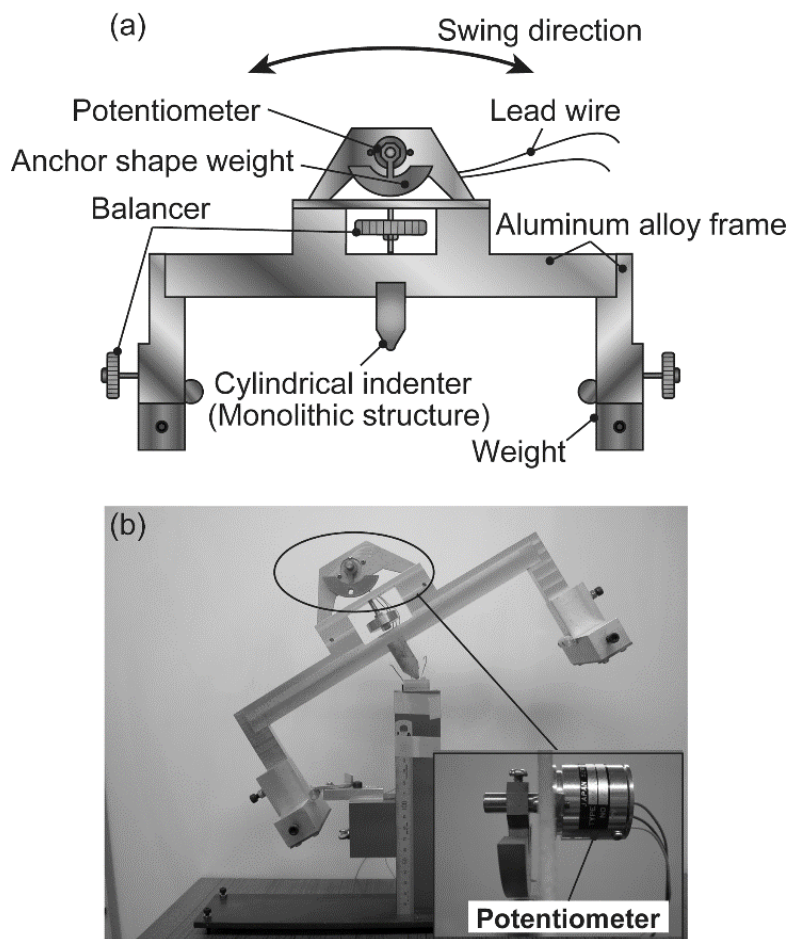


図 2-3 ポテンシオメータが取り付けられた試験機

### 2.3 測定原理

ハーバート硬さ試験において、倒立振子は圧子を支点として試験片上を揺動する。球状圧子を用いても円柱状圧子を用いても、倒立振子が揺動している間、圧子は試験片上を転がる。非保存力が作用しなければ、倒立振子の力学的エネルギーが保存されるため揺動は減衰しない。しかしながら、実際には試験片の塑性変形、表面の摩擦、内部摩擦、材料の粘性流動あるいは新たな接触面の生成などにより、倒立振子の有する力学的エネルギーは散逸し、揺動は減衰する。ハーバート硬さ試験では、このような材料の機械的特性の差異による減衰挙動の変化を定量的に評価すると考えられる。以下にハーバート硬さ試験のメカニズムについて解析モデルを用いて説明する。

ハーバート硬さ試験機は、圧子を支点とするヤジロベエ型の振子を試料表面上で揺動させることで試料の硬さを測定する。揺動の際、材質によって図 2-4 に示すような変形の違いが生じる。硬い材質では試料の塑性変形量は小さくなり、圧子が受ける抵抗および減衰は小さくなる。軟らかい材質では試料の塑性変形量は大きくなり、圧子の受ける抵抗および揺動の減衰は大きくなる。

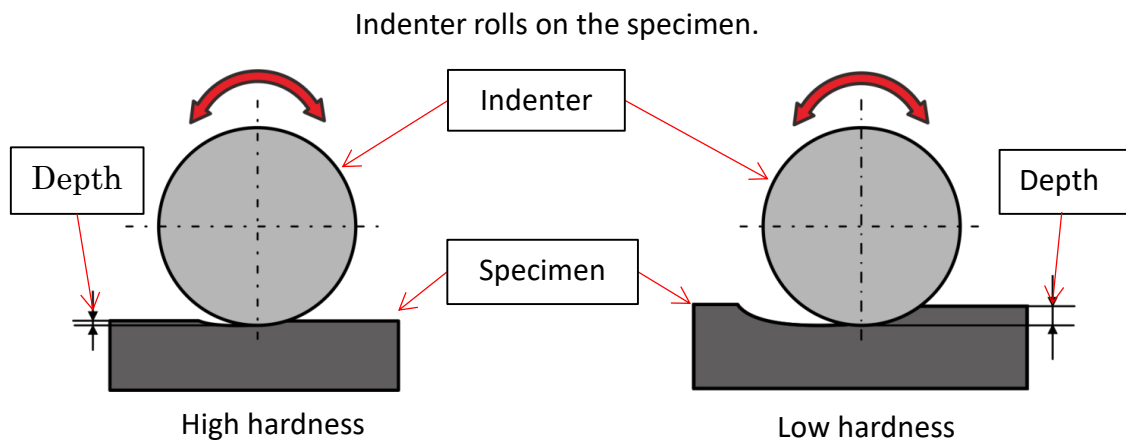


図 2-4 測定原理のモデル図

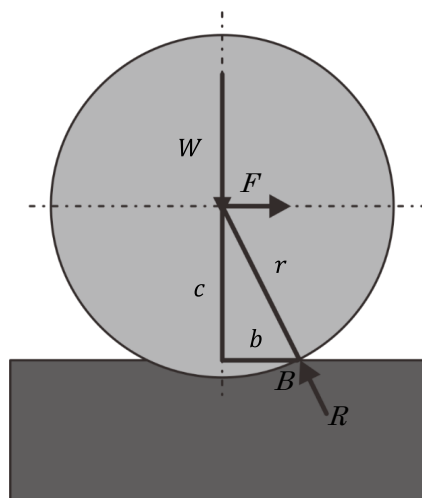


図 2-5 圧子の転がりのモデル図

試験機の揺動を図 2-5 に示すような変形を伴う平面上の円柱の転がりとしてモデル化する。図において  $r$  は圧子半径、 $b$  は接触幅である。重量  $W$  の円柱が水平な試料平面を変形させながら力  $F$  によって転がる。このとき、試料表面から円柱に及ぼす力  $R$  が働く。接触点後方での抗力を無視した場合、点  $B$  まわりに作用するモーメント  $M_B$  は次式で表される。

$$\sum M_B = Fc - Wb \quad (2-3)$$

ここで、 $c$  は円柱と試料表面との接触半径である。円柱が図の状態に静止しているとき、式(2-3)は次のようになる。

$$Fc - Wb = 0 \quad (2-4)$$

式(2-4)より、円柱を転がすために必要な力  $F$  は次のようになる。

$$F = \frac{Wb}{c} \quad (2-5)$$

試料の変形が十分に小さい場合、 $c \cong r$  と見なすことができる。従って、式(2-5)は次のようになる。

$$F = \frac{Wb}{r} \quad (2-6)$$

円柱状の圧子を剛体として考えると、 $W$  および  $r$  は既知であり不変であるから、円柱を転がすために必要な力すなわち転がり抵抗  $F$  は接触幅  $b$  に比例する。ハーバート硬さ試験機の揺動に際して試料の変形量が多いほど抵抗が大きくなることになる。

円柱形状圧子と平面形状の試料とが接触する場合について、ヘルツの弾性接触理論<sup>6)</sup>に基づき、接触幅および最大応力について検討する。材料の硬さを外力に対する抵抗という意味で縦弾性係数にとらえれば、揺動の抵抗力の増加に影響する接触幅  $b$  は縦弾性係数に反比例する。つまり、縦弾性係数が高いほど接触幅が小さくなり、抵抗も小さくなることを意味する。本試験機ではこの影響による揺動角度の減衰を評価することになる。

ハーバート硬さ試験機の支点となる圧子の運動について、財満により解析モデルが示されている<sup>7)</sup>。この解析モデルでは、試料に形成されるくぼみにおける圧子を転がり対象としている。くぼみの曲率半径に対する振り子の周期と対数減衰率（自由減衰振動の隣り合う振幅の比の自然対数をとったもの）の関係を定式化しており、試料の硬さと関連するくぼみの曲率半径が周期および対数減衰率と良い対応を示すため、ハーバート硬さ試験機が硬さ評価に有効であることが示されている。

## 2.4 ハーバート硬さの問題点

倒立振子の主なエネルギー散逸機構は塑性変形<sup>8)</sup>および内部摩擦<sup>9)</sup>だとされている。

Fox は、ソーダ石灰ガラスにハーバート硬さ試験を行い、振子の減衰のメカニズムについて議論している<sup>10)</sup>。減衰のメカニズムとして、以下に示す5つのエネルギー吸収メカニズムが検討されている。

- 1)破壊とそれに伴う新しい表面の生成
- 2)固体中の塑性流動
- 3)水などの液体が介在する場合、液体の粘性流動
- 4)介在する液体による界面動電効果
- 5)新しい破面、クラック先端における触媒効果

実験結果から、3)および4)のエネルギー吸収は非常に小さい。エネルギー吸収の大部分は静的硬さ試験の場合と同様に、固体中の塑性流動によって起こり、破壊過程でのエネルギー吸収より大きい。5)の効果はガラス表面の水の存在により大きくなることが示されている。

財満はハーバート振子を応用した試験機を試作し、熱処理条件の異なる炭素鋼とアルミニウム合金に対してハーバート硬さ試験を行っている<sup>7)</sup>。試験に用いた圧子は直径 2 mm の鋼球であり、硬さの評価はオリジナルのハーバート硬さではなく対数減衰率である。熱処理（焼き戻し）温度条件の違いにより、対数減衰率が変化することを示している。対数減衰率は、炭素鋼では2つの山をもつ分布となり、アルミニウム合金では1つの山を持つ分布となる。これらは顕微鏡により金属組織を観察した際の結晶粒の大きさや析出物等の内部組織の変化をよく表現している。そのため、ハーバート硬さ試験から得られる対数減衰率は内部摩擦の影響が表現されていると結論づけている。対数減衰率の測定と同時にブリネル硬さの測定を行っているが、両者に相関は見られない。これは式(2-1)に示したハーバート硬さとブリネル硬さの関係と合わない。

木谷らは、炭素鋼において、材料の疲労に大きく影響する内部摩擦の測定にハーバート振子型の試験を適用している<sup>9)</sup>。内部摩擦の主要因は格子欠陥にある。格子欠陥は熱処理を行うことで密度が変化するため、内部摩擦も大きく変化する。この内部摩擦の測定では、試験片を減衰振動させることは困難であることが多いため、振子試験機により減衰率を測定することを試みている。熱処理（焼き戻し）温度条件の違う炭素鋼に対して、試験片に振動させて測定する方法と振子試験機による方法により対数減衰率の評価を行っている。振子試験機により内部摩擦の状況を推定することはできると結論づけている。しかしなが

ら、2つの方法で測定した対数減衰率には明確な相関は見られない。

ハーバート硬さ試験は圧子と試験片の接触応力が試験片の塑性変形が生じない降伏応力未満であっても、硬さを評価することができる<sup>3)</sup>。実際には、表面粗さのため圧子と試験片は多数の点で接触しており(点接触)、局所的な応力が極めて高くなる<sup>11),12)</sup>。マクロ的には試験片の降伏応力未満の接触であっても試験片表面に微小な塑性変形が生じ、倒立振子の減衰の原因となっている可能性がある。あるいは、微小塑性変形ではなく試験片の内部摩擦に起因して硬さの差異が検出されている可能性もある。降伏応力以下の接触応力が試験片に作用する場合、微小塑性変形と内部摩擦のどちらが倒立振子の減衰挙動に支配的であるかはこれまでに明らかにされていない。そのため、ハーバート硬さ試験を工業的に実用化するためには、これらの問題を解決することが必要である。



## 参考文献

- 1) E. G. Herbert, Some Recent Developments in Hardness, *The Engineer*, pp. 686-687, (1923).
- 2) C. Benedicks and V. Christiansen, Investigation on the Herbert Pendulum Hardness Tester, *Journal Iron and Steel Institute*, Vol. 110, pp. 219-248, (1924).
- 3) M. Matsubara and K. Sakamoto, Improved Herbert Hardness Tester, *Experimental Techniques*, Vol. 36 No. 3, pp. 73-76, (2012).
- 4) 羽原治夫, 川満武広, 播本和也, 井上英人, ハーバート硬さ試験機の復元とその応用, *材料試験技術*, Vol. 43 No. 4, pp. 248-254, (1998).
- 5) M. Matsubara and K. Sakamoto, Modified Herbert Hardness Tester, *Proceedings of the SEM Annual Conference*, Society for Experimental Mechanics Inc., Vol. 36 No. 3, pp. 73-76, (2009).
- 6) 中原一郎, *材料力学*, 養賢堂, (1966).
- 7) 財満鎮雄, 振子硬度計の利用に就いて, *山梨大學工学部研究報告*, Vol. 3, pp. 71-75, (1952).
- 8) E.G. Herbert, The "Pendulum" Hardness Tester, *The Engineer*, pp. 390-391, (1923).
- 9) 木谷要一, 財満鎮雄, 炭素鋼の内部摩擦に就て, (附)振子型計器の利用, *日本機械学会論文集*, Vol. 9 No. 36, pp. 125-131, (1943).
- 10) P. G. Fox and I. B. Freeman, *J. Mater. Sci.*, Vol. 14, pp. 151-158, (1979).
- 11) 村木正芳, 図解トライボロジー 摩擦の科学と潤滑技術, 日刊工業新聞社, pp. 27-30, (2010).
- 12) バウデン, テーパー, 曾田範宗訳, *固体の摩擦と潤滑*, 丸善, p. 27, (1961).

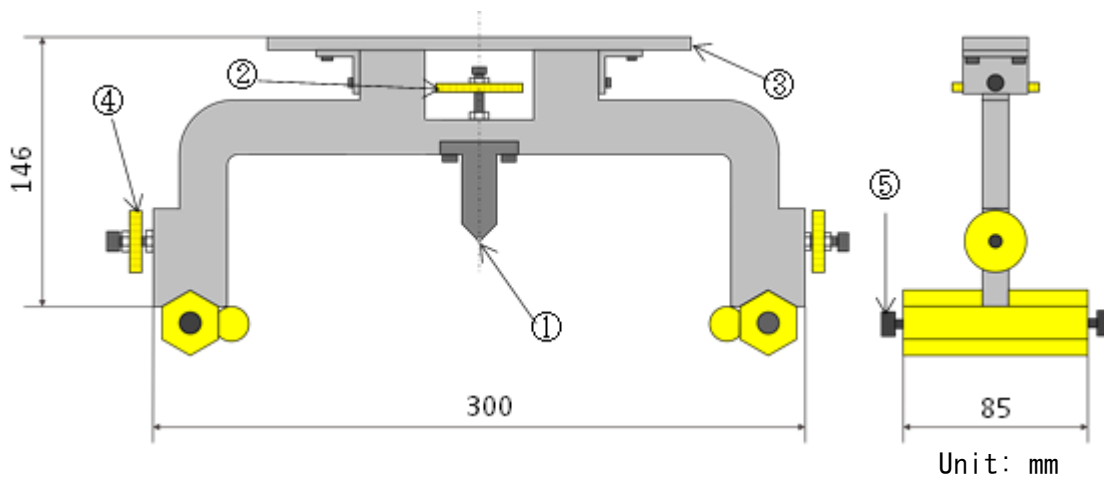
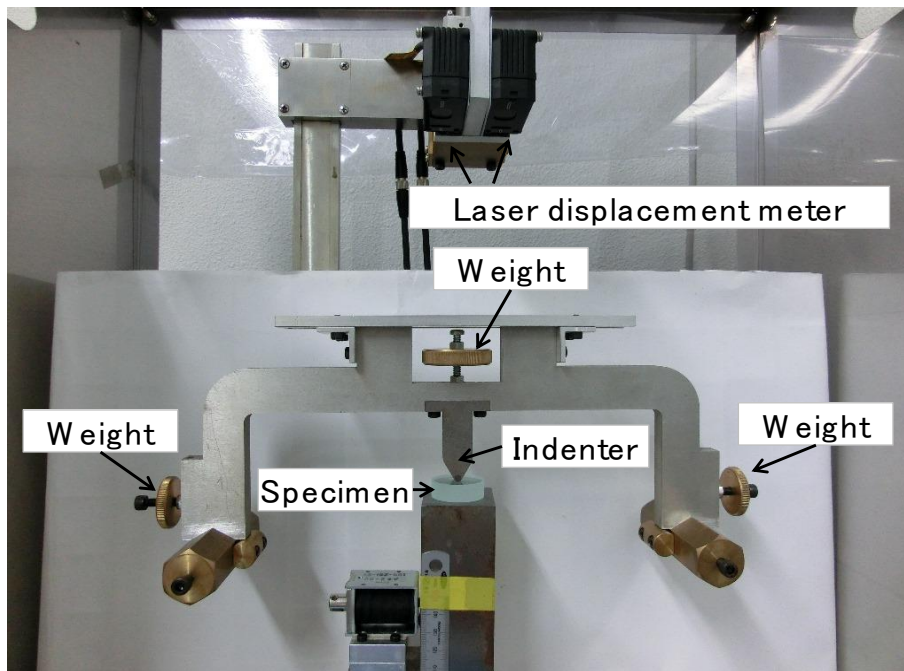
### 第3章 ハーバート硬さ試験の改良

#### 3.1 はじめに

減衰硬さを工業用に実用化するためには、従来の問題点を解決する必要がある。そこで、ハーバート硬さ試験機に改良を加え、その実用性について検討する。

測定精度の向上と作業工数の削減を目的として試験機の測定システムの改良を行った。改良した試験機を図 3-1、測定システムの模式図を図 3-2 に示す。この試験機を改良型ハーバート硬さ試験機と呼ぶ。図では試験機が試験片の上に載せられている。主な改良点は次のとおりである。

- 1)揺動角度の測定を試験機の上部に取り付けられた 2 つのレーザ変位計により電気信号で高精度かつ連続的に測定する方式とする。
- 2)本体を 1 枚のアルミニウム合金 A5052 の板からワイヤーカット放電加工機で切り出し、水平方向の重心位置のずれを極力小さくする。
- 3)重心位置調整のための錘を垂直方向および水平方向に取り付け、ねじでその位置を微調整できる機構とする。ねじの取り付け位置の寸法精度を高め、垂直方向の錘の変位により左右方向に重心が変化しないようにする。
- 4)試験機を除振台上に載せ、外乱による影響を排除する。
- 5)圧子は圧子を保持する治具ごとねじで取り付けおよび取り外しできるようにし、交換作業を容易とする。



- |   |  |
|---|--|
| ① | Indenter                                 |
| ② | Adjustment weight of time of a swing     |
| ③ | Reflector                                |
| ④ | Right and left balance adjustment weight |
| ⑤ | Back and forth balance adjustment screw  |

図 3-1 改良型ハーバート硬さ試験機

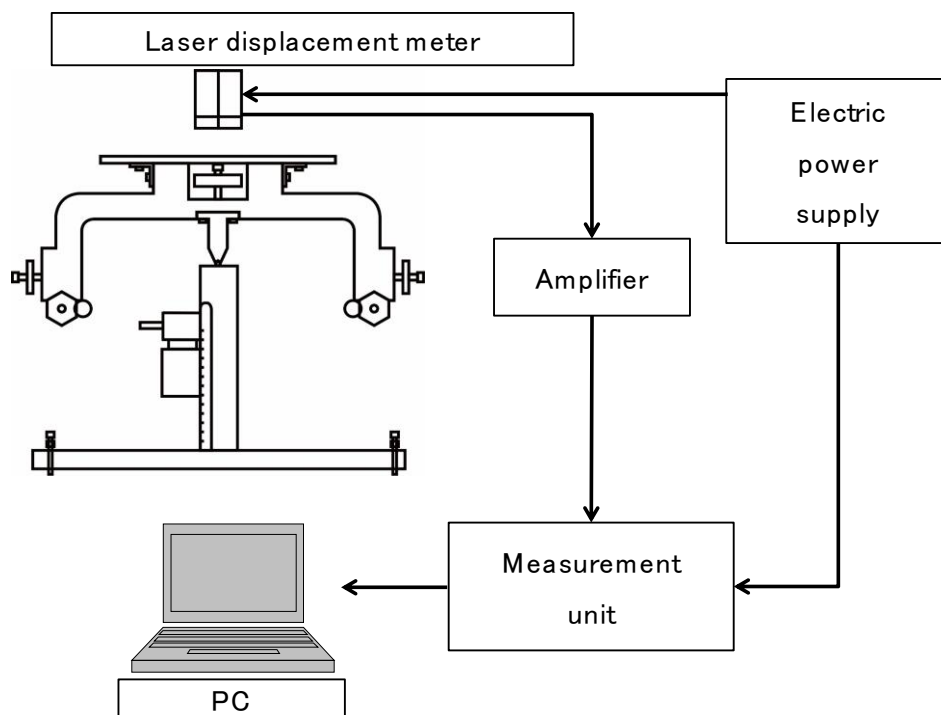


図 3-2 測定システム

揺動角度の測定には 2 つのレーザ式変位センサとデータロガ（A/D 変換器）を用いる。測定に用いたレーザ式変位計は KEYENCE 製レーザ式変位センサ(センサヘッド IL-100、アンプユニット IL-1000、IL-1050)、データロガは GRAPHTEC 製データロガ midi LOGGER GL200 である。

## 3.2 改良型ハーバート硬さ試験機による硬さ評価方法

### 3.2.1 揺動角度の測定方法

改良型ハーバート硬さ試験機では、試験機の上部に取り付けられたレーザ変位センサにより揺動角度の時間変化が測定される。図 3-3 に揺動角度の測定方法を示す。2 つのレーザ式変位計と試験機の反射板までの変位をそれぞれ  $L_1$  および  $L_2$  とする。レーザ変位センサより照射されるレーザ光どうしの間隔を  $A$ 、試験機の水平状態から変化した揺動角度を  $\theta$  とすると、 $\theta$  は次式により求めることができる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{L_2 - L_1}{A}. \quad (3-1)$$

2 つのレーザ式変位計は固定されているため、 $A$  は固定値となる。式(3-1)より揺動角度  $\theta$  は変位差のみの関数になる。そのため、試験機が試料の厚さの違いにより高さ方向に変化したり、試験機の設置位置より水平方向に変化したりすることによらず、揺動角度は正確に測定することができる。実際にはレーザ変位計からは各センサと試験機の反射板までの距離が電圧に換算されて出力される。そのため、揺動角度  $\theta$  および電圧の関係を校正する必要がある。角度ブロックを基準値として、基準角度における 2 つのレーザ変位センサの電圧差を測定した。本実験における角度  $\theta$  およびその際の電圧差  $E$  の関係を図 3-4 に示す。図において横軸はレーザ変位センサより出力される電圧差、縦軸は角度ブロックの角度である。この関係から角度を電位差  $E$  を用いて 1 次式で回帰した結果、揺動角度  $\theta$  は電位差  $E$  を用いて次のとおり表される。この回帰における相関係数は 0.98 を超えており、非常に良い精度で回帰できる。

$$\theta = 7.510 \times E \quad (3-2)$$

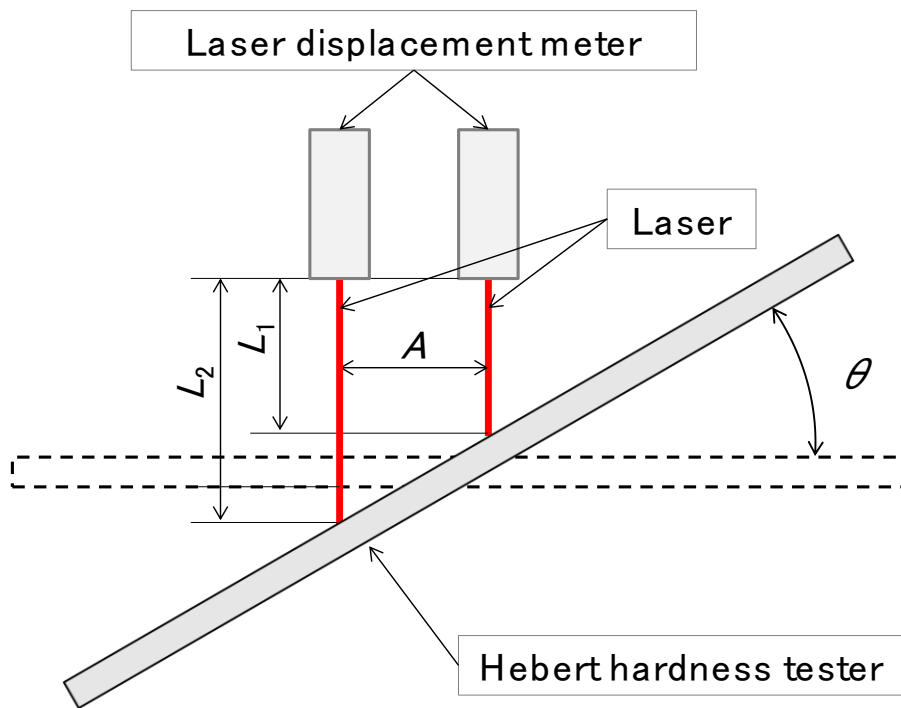


図 3-3 揺動角度の測定

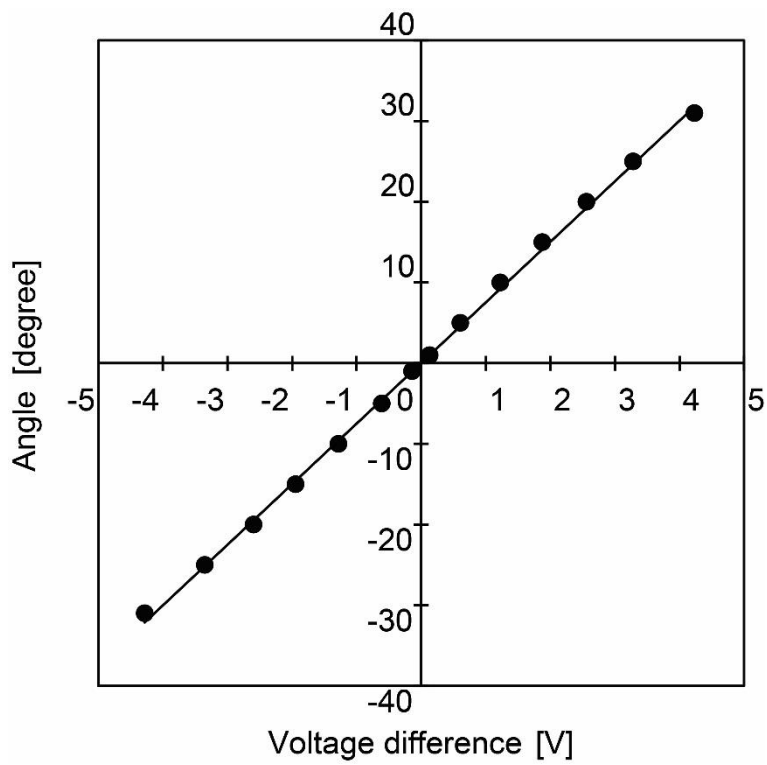


図 3-4 電圧差と基準角度の関係

### 3.2.2 硬さ試験方法

#### (1) 試験機の校正

改良型ハーバート硬さ試験機による硬さの測定では、試験機の校正を行った後に試料の測定を行う。校正は、レーザ変位センサの出力を角度に変化するための校正ではなく、試験機の揺動周期を校正する行為である。以下に校正の手順を示す。

- 1) 試験台の水平を水準器で確認する。水平でない場合、除振台で大まかな調整を行い試験台の調整ネジで微調整を行う。
- 2) 硬さの基準となる人工サファイア、試験台、試験機のレーザ光反射板および圧子を溶剤で洗浄する。
- 3) 試験台の上に人工サファイアを乗せ、試験機を人工サファイアの上に静かに設置する。
- 4) 初期角度が  $30^{\circ}$  となるように試験機を傾けて治具により保持する。
- 5) 試験機を解放し、揺動角度を測定する。このときレーザ式変位計にて出力された信号はデータログを介して PC に記録される。
- 6) 測定結果を読み取り、揺動中心が 0 となるよう試験機の左右の錘で調節する。基準とする揺動周期がオリジナルのハーバート硬さ試験と同様に 20 秒となるように、試験機中央の錘で調整する。

図 3-5 に校正を行う際に使用する人工サファイアを示す。直径 30 mm、厚さ 10 mm である。製造者の示す公称硬さは、HV 22500、表面粗さは、Ra 0.05  $\mu\text{m}$  以下である。

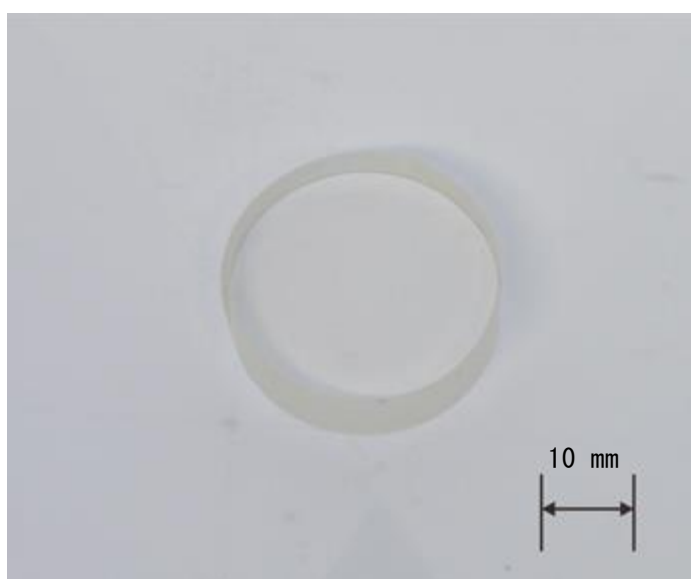


図 3-5 校正に用いる人工サファイア

## (2) 試料の硬さ測定

試料の硬さ測定は、(1)で校正された試験機で試料上の揺動角度の測定を行う。その手順は(1)と同様である。

## (3) 減衰硬さの評価

測定された試験機の揺動角度の例を図 2-1 に示した。揺動角度の変化は自由減衰振動として測定されるため、この曲線に包絡する自由減衰曲線  $S(t)$  は式(2-2)のように表される。

減衰硬さは揺動角度の測定結果から次の手順で求める。

- 1)揺動角度の自由減衰振動波形から、正の極大値を抽出する。
- 2)抽出された極大値に対して式(2-2)に示す式により最小自乗法を用いて回帰する。
- 3)回帰した結果から減衰硬さ  $DH$  が求められる。



### 3.3 圧子の選定

#### 3.3.1 圧子の形状および材質

従来の押し込みおよび反発型の硬さ試験では、ダイヤモンド等の硬い圧子が採用される。形状は、四角錐、円錐あるいは球形状である。改良型ハーバート硬さ試験機では、円柱形状の圧子が使用される。実用的に入手しやすい形状および材質から圧子を選定するための検討を実施する。

改良型ハーバート硬さ試験は、押し込み型の硬さ試験のように試料に強制的に形成する明瞭な圧痕を形成する試験方法ではない。そのため、必ずしも試料よりも硬い材質でなくても良いと考えられる。圧子の硬さに水準を設けるため、圧子の材質としてステンレス鋼 SUS304（以下、SUS という。）、合金工具鋼 SKD および超硬合金 UH を用いる。圧子半径は、入手の容易さと圧子取付のための加工の容易さから 1 mm とする。圧子の材質とビッカース硬さを表 3-1 に示す。圧子の形状を図 3-6 に示す。圧子の表面粗さは、Ra 0.1 以下である。

表 3-1 圧子の材質とビッカース硬さ

	SUS	SKD	UH
Vickers hardness (HV)	194	689	1295

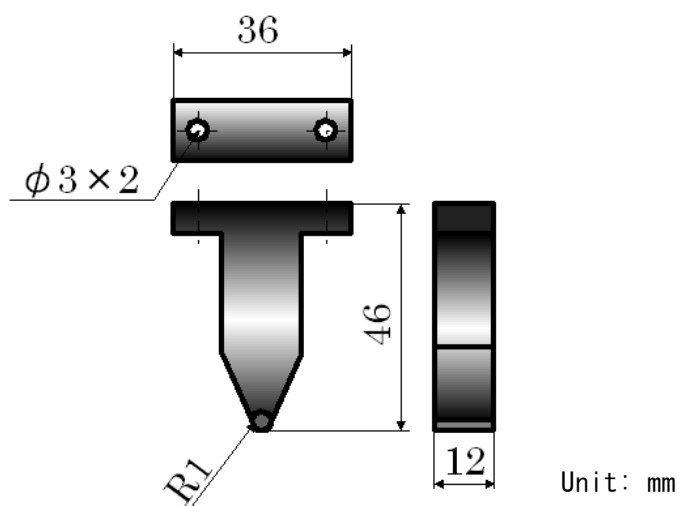


図 3-6 圧子の形状

### 3.3.2 試料

試料は、押し込み硬さの異なる鋼材とする。図 3-7 に試料の外観を示す。試料形状は直方体であり、15 mm 角の平面で 10 mm の厚さである。ブリネル硬さの公称硬さが 150、300、450 および 600 の硬さ基準片からワイヤーカット放電加工機により切り出したものである。以下、ブリネル硬さを HBW と略記する。表 3-2 に試料の材質と硬さを示す。ブリネル硬さは硬さ基準片の製造者より提供される校正値である。ビッカース硬さはビッカース硬さ試験により測定された値である。

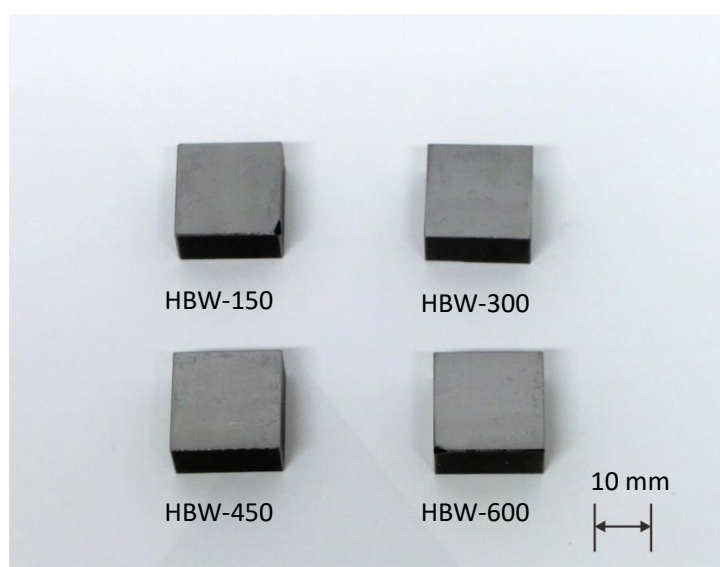


図 3-7 試料

表 3-2 試料の材質と硬さ

Symbol	Material	Brinell hardness (HBW)	Vickers hardness (HV)
HBW-150	S45C	151	157
HBW-300	SK5	309	326
HBW-450	SK5	448	475
HBW-600	SK5	604	642

### 3.3.3 実験条件

ハーバート硬さの測定方法は、3.2.2 項に従う。圧子には超硬合金製半径 1 mm、長さ 12 mm の円柱形状のものを使用する。初期角度は 30° とし、基準揺動周期は 20 s とする。試験機の重量は 1.52 kg である。サンプリング間隔は、0.1 s である。試料の表面は、試験前に 320 番、600 番、800 番および 1200 番のエメリー紙を用いて研磨する。試験環境は、温度は 20℃±3℃、湿度は 50%±20% とする。測定回数は 10 回とする。

### 3.3.4 実験結果と考察

減衰硬さとビッカース硬さの関係を図 3-8 に示す。図中の誤差範囲は標準偏差を示す。減衰硬さは硬い材料ほど減衰が小さいことから、ビッカース硬さと負の相関を示すことが特徴である。ビッカース硬さの増加に伴い減衰硬さが単調減少するのは超硬合金のみである。超硬合金では、減衰硬さはビッカース硬さの減少に対して増加する。ばらつきは、いずれの材質においても非常に小さいことから、ビッカース硬さと減衰硬さの関係が明確でない原因は系統的な要因によるものである。圧子の硬さの特徴は次のとおりである。

- 1) SUS は、軟らかい試料である HBW150 と HBW300 の中間の硬さ。
- 2) SKD は、硬い試料である HBW600 よりも少し高い硬さ。
- 3) UH は、いずれの試料よりも十分高い硬さ。

試験機の揺動角度の減衰は、圧子が試料上を転がる際の摩擦による減衰が考えられる。転がり摩擦の要因として次のものが考えられる<sup>り</sup>。

- 1) 微細すべり
- 2) 凝着
- 3) 表面粗さ
- 4) 弾性ヒステリシス（内部摩擦）
- 5) 潤滑油の粘性抵抗

全ての試料の表面は同一条件で表面を仕上げており、試料ごとの表面粗さの差異は無い。潤滑油については、試験前に溶剤（アセトン）で洗浄することから、影響はほぼ無い。その他の要因が結果に影響することは考えられる。しかしながら、減衰に影響する転がり摩擦係数は、圧子と試料との接触幅の大きさに比例する。圧子の硬さが同じであれば、試料が硬くなるほど試料と圧子の接触幅は小さくなり、減衰が小さくなる。同様に圧子が硬いほど減衰が小さくなる。Hertz の弾性接触理論によれば、圧子と試料の接触幅の計算に用い

られる等価弾性係数は、それぞれの弾性係数の積を和で除した値となる<sup>2) 3)</sup>。それぞれの弾性係数が高いほど等価弾性係数は各弾性係数に対して感度が小さくなる。ステンレス鋼および合金工具鋼での減衰硬さ結果が試料のビッカース硬さの増加に対して単調減少とならない原因の特定は難しいが、試料に対して十分に硬い材質である超硬合金を用いることで、不明瞭な誤差要因を排除できると考えられる。

実際の試験機の運用においては、試料上に設置することや繰り返しの試験において、圧子の損耗を防ぐことが望ましい。超硬合金を圧子として用いることが合理的であると考えられる。

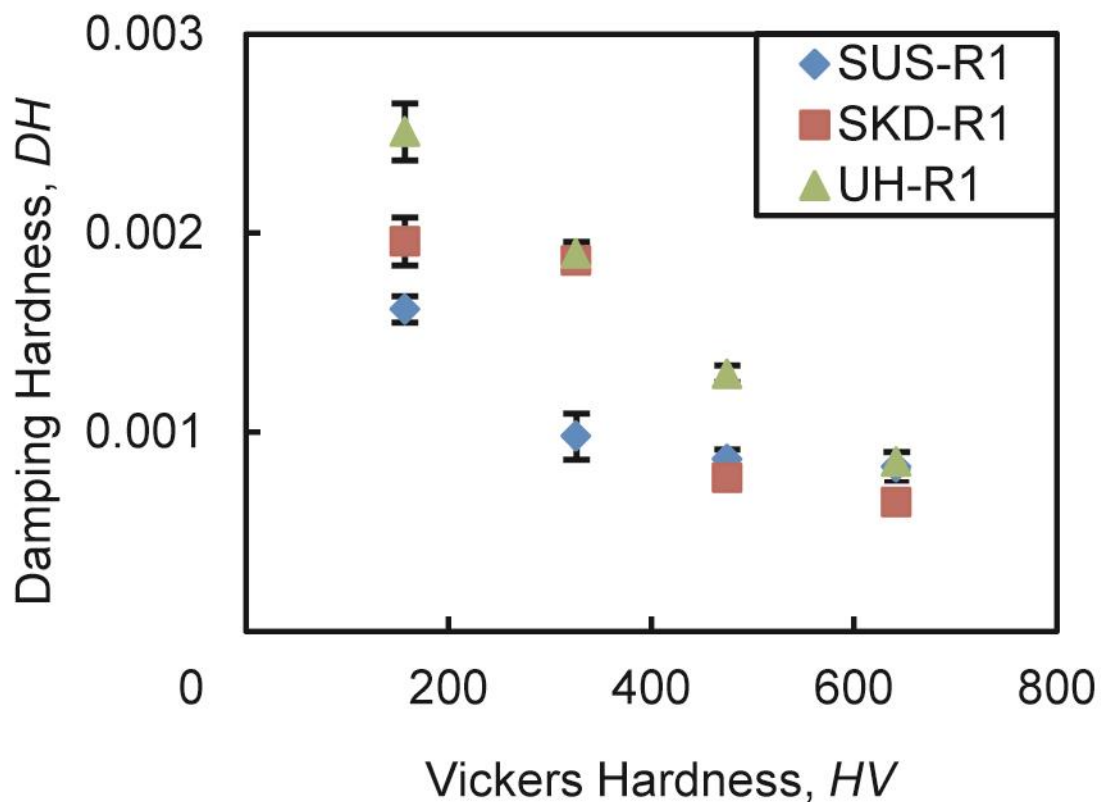


図 3-8 減衰硬さとビッカース硬さの関係（圧子半径 1 mm）

### 3.4 測定条件の影響の調査

#### 3.4.1 調査対象とする因子

改良型ハーバート硬さ試験機における硬さ試験において測定結果に影響を与えることが予想される因子として、圧子半径、揺動周期および試料の表面粗さが考えられる。そこで、それらの因子の影響を調べるため、異なる硬さの金属材料に対して減衰硬さの測定を行う。硬さの参照値としてブリネル硬さの測定を行う。

#### 3.4.2 試料

試料は 3.3 節に示したブリネル硬さ基準片を使用する。試料のブリネル硬さは呼び硬さで 150、300、450 および 600 である。

#### 3.4.3 実験方法

##### (1) 基本的な実験条件

基本的な実験条件は、3.3.3 項と同様である。圧子の材質は超硬合金であり、圧子半径は圧子半径の影響の調査以外は 1 mm とする。試料表面は、表面粗さの影響の調査以外は、試験前に 320 番、600 番、800 番、1000 番および 1200 番のエメリー紙を用いて研磨する。試験前はアセトンにて圧子および試料の洗浄を行う。

##### (2) 圧子半径の影響の調査

圧子半径の影響を調査するため、半径の異なる圧子による試験を行う。圧子形状は円柱形状である。圧子半径はそれぞれ 1 mm、2 mm および 4 mm、圧子の長さは 12 mm とする。この半径を用いる理由は、実用化の際に安定した品質で安価に入手できることおよび圧子半径により決定される測定領域（転がり範囲）を現実的な範囲にするためである。圧子の材質は超硬合金である。実験に使用した圧子の外観を図 3-9 に示す。

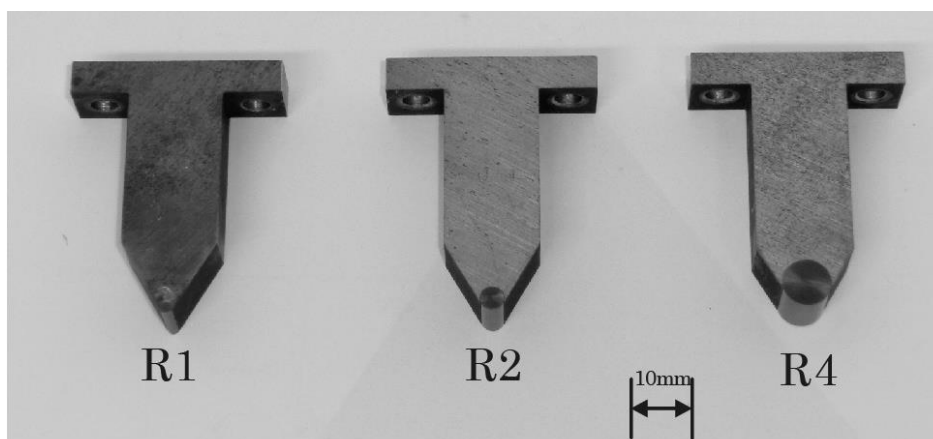


図 3-9 R1、R2 および R4 の圧子

### (3) 揺動周期の影響の調査

揺動周期の影響を調査するため、異なる揺動周期による試験を行う。基準揺動周期はそれぞれ 5 s、10 s、20 s、30 s および 40 s とする。圧子は半径 1 mm とする。

### (4) 表面粗さの影響の調査

試料の表面粗さの影響を調査するため、異なる表面粗さの試料による試験を行う。実験に用いた試料はブリネル硬さで 150 および 600 の 2 種類とする。試料の表面粗さは、320 番、600 番、800 番および 1200 番のエメリー紙による研磨により形成する 5 水準とする。圧子は半径 1 mm とする。基準揺動周期は 20 s とする。試験前はアセトンにて圧子および試料の洗浄を行う。試料の表面粗さは触針式表面粗さ測定機により測定を行う。

### 3.4.4 実験結果と考察

#### (1) 圧子半径の影響

異なる圧子での試験による揺動角度の時間変化について、最もそれらの差が大きい HBW 150 の例を図 3-10 に示す。揺動角度の変化は徐々に減衰する。圧子半径が大きくなるほど減衰が大きくなる。これは他の試料においても同様である。

減衰硬さとブリネル硬さの関係を図 3-11 に示す。減衰硬さはブリネル硬さが低いほど大きくなる。減衰硬さは圧子半径が大きいほど大きくなり、ブリネル硬さが低いほど圧子による減衰硬さの差異が大きくなる。軟らかい材料ほど圧子半径の影響を強く受ける。

圧子半径を変えた場合、この測定系において大きく変化するものとして、圧子と試料の接触面積と圧子の転がる距離が考えられる。圧子と試料の接触面積は Hertz の弾性理論から示すことができる<sup>3)</sup>。円柱形状の圧子と平面形状の試料とが接触した際の接触幅は、圧子半径および試験機重量の平方根に比例する。圧子を変更しても試験機本体の重量は変わらない。そのため、圧子半径を 1 mm から 2 mm および 4 mm へ変えると接触面積はそれぞれ  $\sqrt{2}$  倍および 2 倍になる。試験機の重量は一定であるから、平均圧力は接触面積の増加に反比例する。転がり摩擦係数は、大野により金属どうしでは非常に小さい値をとると報告されている<sup>4)</sup>。転がり摩擦係数は、接触幅に比例し圧子半径に反比例する。同一試料において、圧子半径 1 mm の転がり摩擦に対して、圧子半径 2 mm および 4 mm の転がり摩擦係数はそれぞれ約 0.7 倍および 0.5 倍となると考えられる。圧子の転がる距離は圧子半径と揺動角度の積となるため、半径が大きいほど、より長い距離を転がることとなる。この圧子半径と揺動角度の減衰の関係を図 3-12 に示す。図のグラフは、転がり摩擦係数、圧子の転がる距離およびその積である揺動角度の減衰を圧子半径 1 mm の値で正規化したものを示す。圧子半径を大きくすることで摩擦係数が小さくなる比に対して、転がる距離が長くなる比が高いため、揺動角度が大きく減衰すると考えられる。

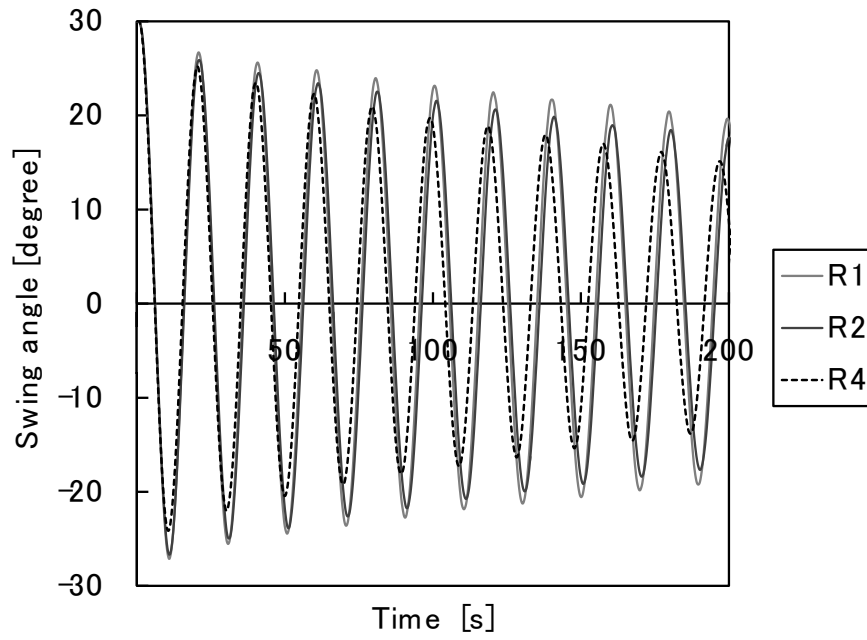


図 3-10 揺動角度の測定例 (HBW 150)

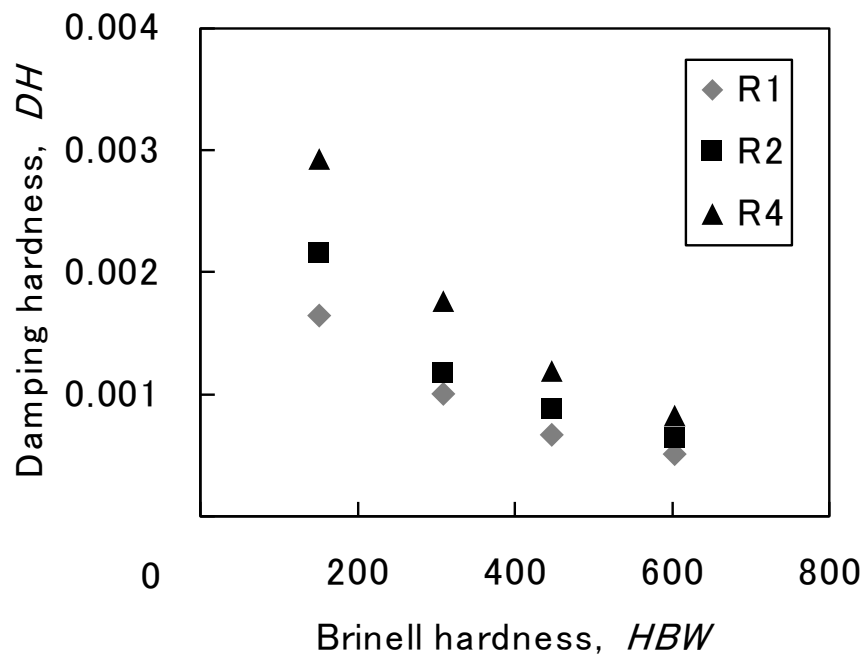


図 3-11 減衰硬さとブリネル硬さの関係



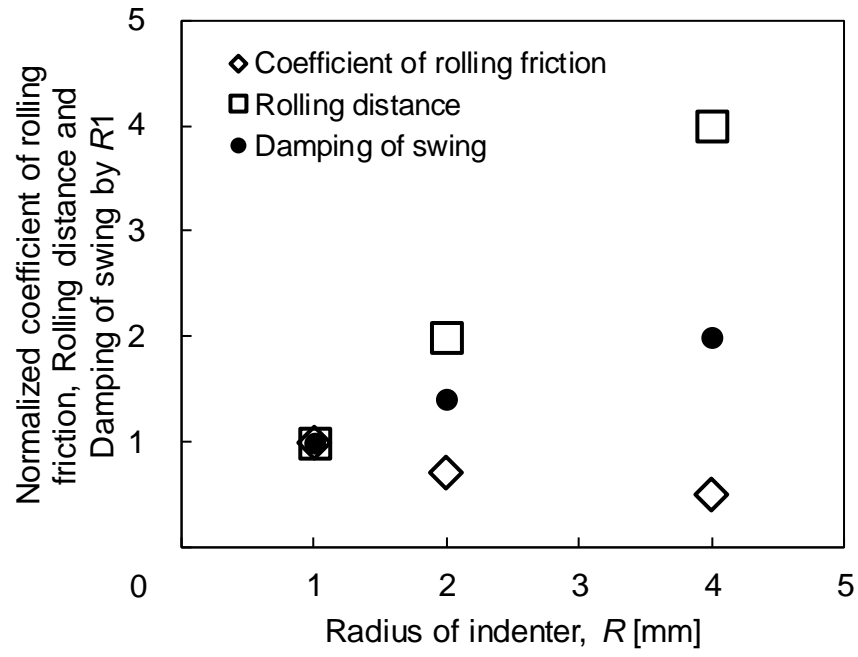


図 3-12 圧子半径と揺動角度の減衰の関係

## (2) 揺動周期の影響

基準揺動周期と減衰硬さの関係を図 3-13 に示す。減衰硬さは基準揺動周期が長いほど大きくなる。同一基準揺動周期では軟らかい材料ほど減衰硬さが大きくなる。基準揺動周期が長くなると圧子が試料上を転がる速度が遅くなる。圧子の転がる速度が遅いほど揺動角度の減衰が大きくなる。圧子の転がりに対する抵抗に対して圧子の転がり速度に比例する減衰要因があるならば、減衰の支配的要因ではない。石川によれば、鋼球の鋼平面との転がり摩擦は、転がり接触面が無潤滑の場合、低速で転がり摩擦抵抗が増大し、その主たる要因は凝着による影響であるとされている<sup>5)</sup>。高速度域での摩擦抵抗の要因は、接触表面の粗さの凹凸どうしの衝突によるエネルギーによるものと結論づけている。試料の表面は鏡面に近い表面粗さであり、圧子の表面粗さも最大高さで  $0.5\ \mu\text{m}$  以下である。揺動周期が長くなるほど減衰硬さが大きくなる原因は、低速になるほど凝着の影響が大きくなるためと考えられる。軟らかい材料ほど減衰が大きくなる原因は、軟らかい材料ほど圧子と試料の接触面積が増加し、凝着する面積が大きくなるためであると考えられる。

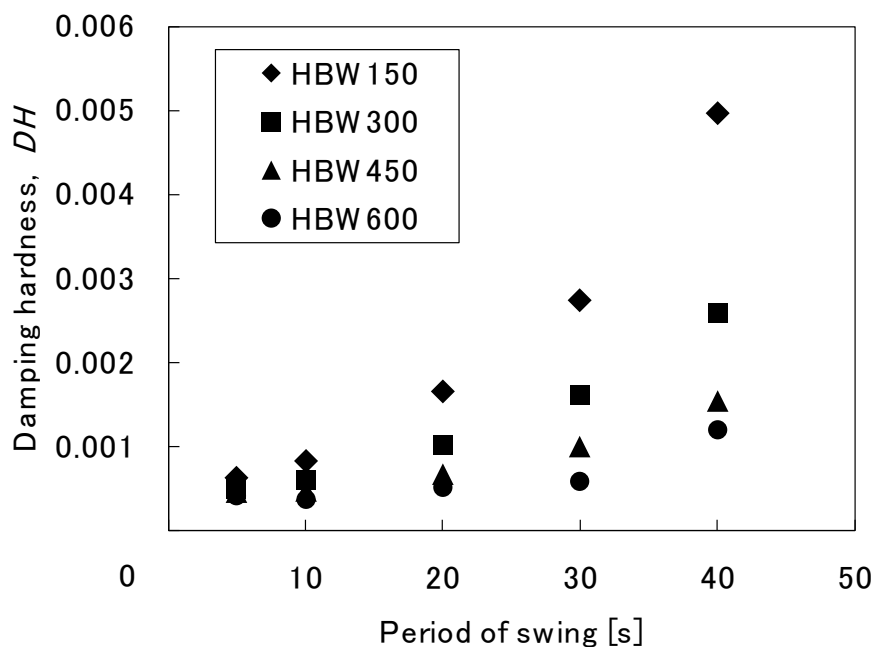


図 3-13 基準揺動周期と減衰硬さの関係

### (3) 表面粗さの影響

HBW150 および HBW600 について表面粗さと減衰硬さの関係を図 3-14 に示す。算術平均粗さ Ra を表面粗さ評価パラメータとした。図中の実線は、それぞれの硬さの測定結果を直線で回帰したものである。HBW150 および HBW600 の減衰硬さは、微小であるがほぼ同じ傾きで表面粗さの増加に伴い増加する。圧子と試料の接触は、微視的にはそれぞれの表面の微小な凸どうしの接触となる。Bowden らは、荷重と摩擦力が同時に作用すると、凝着部の面積が増えることを示し、表面の状態によって摩擦係数が変わることを説明している<sup>6), 7)</sup>。幾何学的な観点から、表面の粗さを突起形状とすれば表面粗さが小さいほど突起の高さが同じに近づくことで圧子と試料の真実接触面積は大きくなると考えられる。図 3-15 に異なる表面粗さの相対負荷曲線の例を示す。相対負荷曲線は、表面粗さの評価領域において、高さの切断レベルにおける実体の存在量の割合である相対負荷長さ率を示す。粗さの大きい表面では、粗さの小さい表面と比較して、圧子との接触により弾性変形が生じた際の接触面積の増加が大きくなる。本実験の試料表面は、エメリー紙により十分に研磨されているため、ほぼ一樣な表面状態であると考えられる。表面粗さの増加とともに相対負荷曲線の最大高さ近傍の相対負荷曲線の傾きが大きくなることは、圧子との接触時の接触面積が増加する要因となり、減衰硬さが増加する。本実験結果では、試験機重量が軽く、圧子の形状による応力集中が緩和されるため、減衰硬さへの表面粗さの影響が小さいと考えられる。

試験後の試料表面を光学顕微鏡により観察した結果を図 3-16 に示す。いずれの試料も表面粗さが一番小さいものである。図 3-16(b)のように硬い材料では、表面上にまばらに傷が見える程度ある。図 3-16(a)のように軟らかい材料では、圧子が揺動した範囲において圧子に沿うような傷が広い範囲で見られる。この傷の深さを調べるため、触針式表面粗さ測定機により、試験前後の試料表面の輪郭形状を測定した。図 3-17 に試験前後の試料表面の輪郭形状を示す。それぞれの試料の試験後の表面の輪郭形状の変化は、およそ  $0.2 \mu\text{m}$  に満たない表面の凸形状を圧子で平らにならした程度である。表面粗さが大きくなると試料表面の突起の高さのばらつきが大きくなり、真実接触面積が小さくなることで接触した突起に大きな圧力が負荷される。これは、Greenwood らが、接触状態を示す塑性指数として、表面粗さの異なる面の接触について説明している<sup>8)</sup>。軟らかい材料では突起への圧力が降伏を超えたため、塑性変形が生じた結果、図 3-16(a)のように表面に傷が見られる。これは、試料表面の凸形状が圧子により平らにならされた結果を示している。圧子と試料との接触

面積が増加して凝着による影響が大きくなり減衰硬さが大きくなると考えられる。

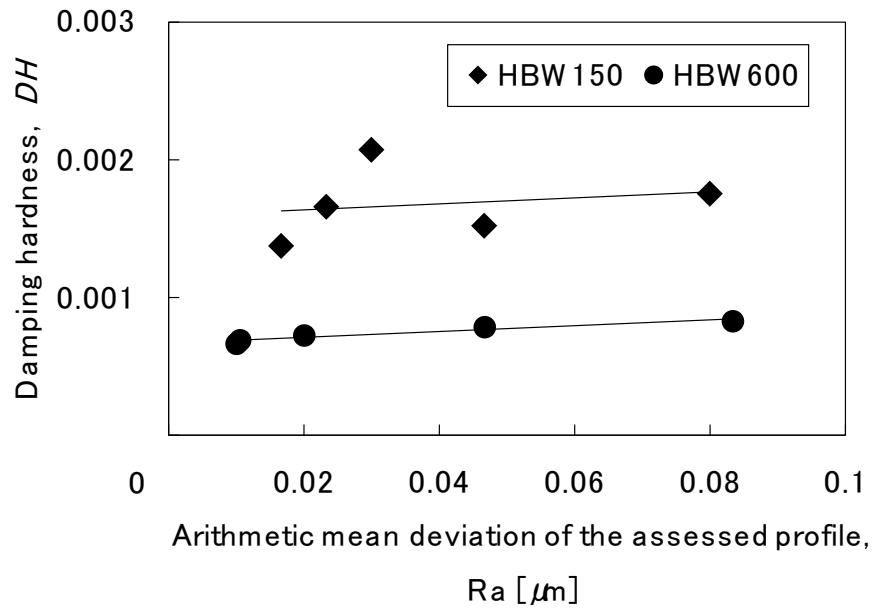


図 3-14 表面粗さと減衰硬さの関係

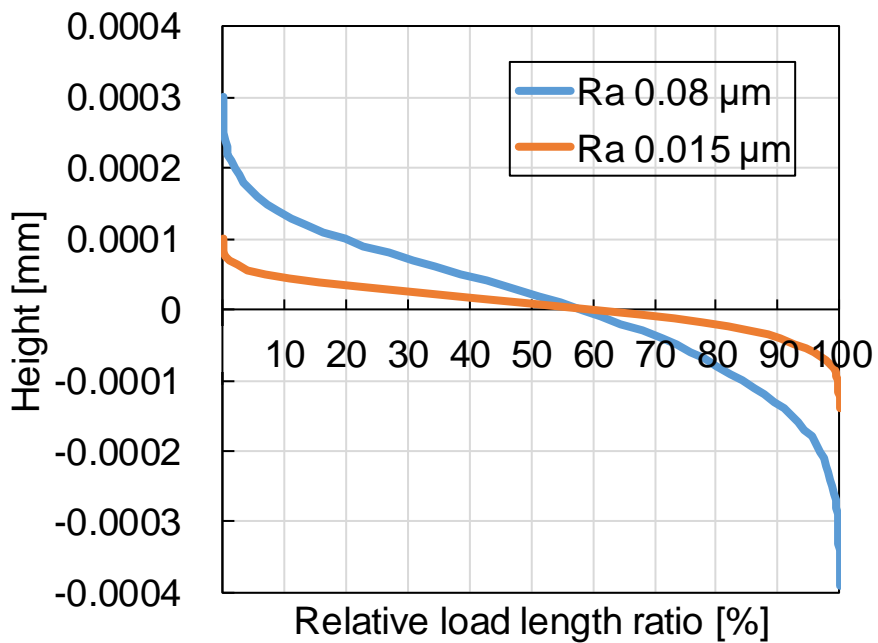
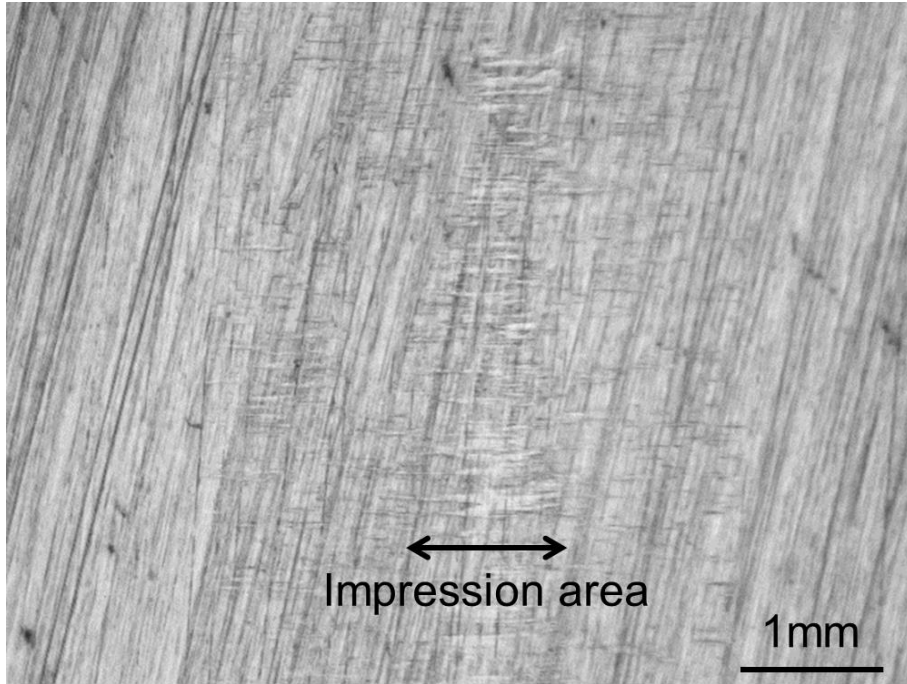
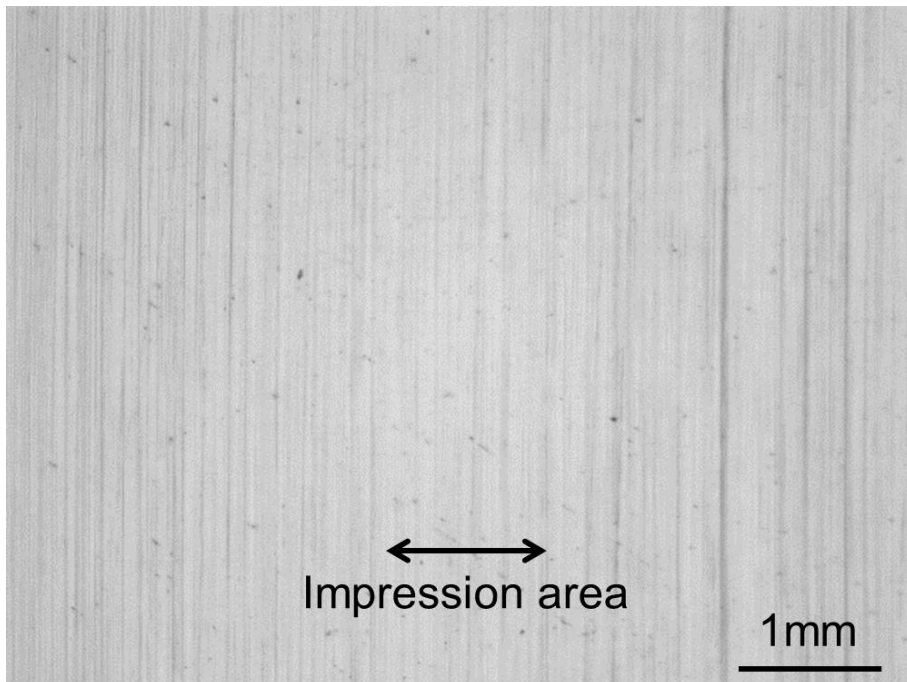


図 3-15 表面粗さと相対負荷長さ率の関係

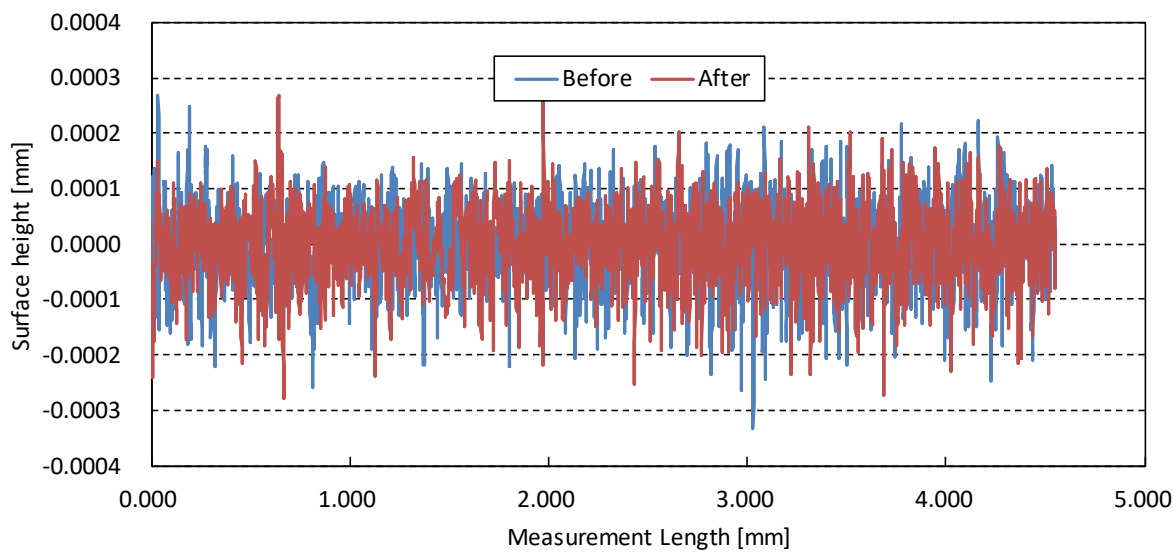


(a) HBW150

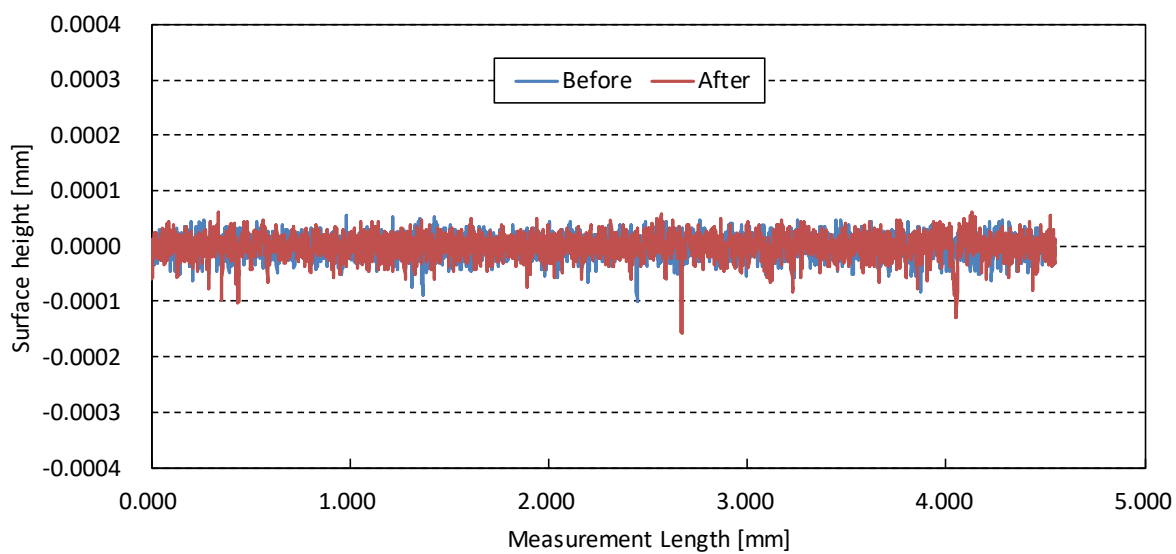


(b) HBW600

図 3-16 試験後の試料の表面状態



(a) HBW150 (Ra 0.08  $\mu\text{m}$ )



(b) HBW600 (Ra 0.015  $\mu\text{m}$ )

図 3-17 試験後の試料表面の輪郭形状

### 3.5 減衰硬さとブリネル硬さの関係

図 3-11 から減衰硬さとブリネル硬さに良い対応があることから、ブリネル硬さを減衰硬さと圧子半径により推定することについて検討を行う。圧子半径と得られた減衰硬さから、ブリネル硬さは次式で表現できる。

$$HBW = \frac{R^{0.448} \times 10^{-0.946}}{DH^{1.131}} \quad (3-4)$$

ここに、 $HBW$  はブリネル硬さ、 $DH$  は減衰硬さおよび  $R$  は圧子半径である。図 3-18 は、図 3-11 の結果に式(3-4)の推定値を破線で示したものである。上式による予測精度は非常に高く、相関係数は 0.98 を超える。ブリネル硬さが既知の材料で減衰硬さを測定し、適切な回帰を行うことで減衰硬さから他の材料のブリネル硬さを推定することができる可能性が示唆された。

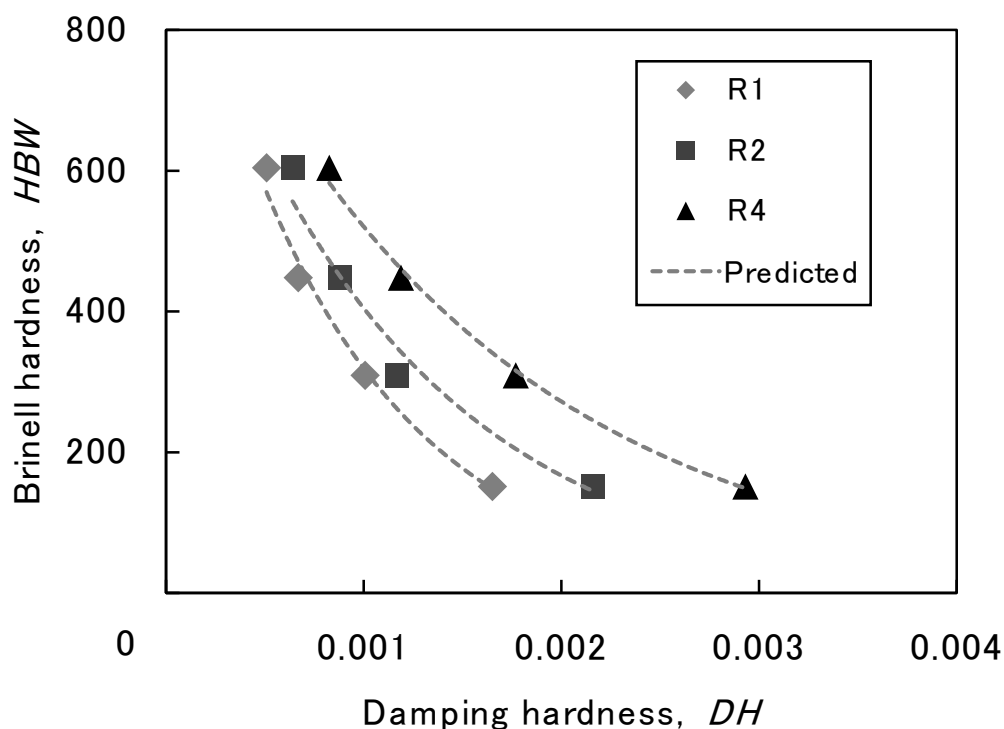


図 3-18 減衰硬さからのブリネル硬さの推定結果



## 3.6 減衰硬さの妥当性確認

### 3.6.1 流動硬さとの比較

減衰硬さは、オリジナルのハーバート硬さである流動硬さと比較して、揺動角度の測定精度および硬さを決定する情報量の多さから、より合理的な指標であることが考えられる。そこで、金属材料に対して流動硬さおよび減衰硬さの測定を行い、減衰硬さの有用性について検討する。

### 3.6.2 実験方法

基本的な実験条件および試料は、3.4節と同様である。圧子半径は、1 mm、圧子の長さは12 mmとする。測定は、5回の繰り返し測定を行う。

### 3.6.3 実験結果および考察

ブリネル硬さと流動硬さおよび減衰硬さとの関係をそれぞれ図 3-19 および図 3-20 に示す。図中の実線は、全ての測定値に対して指数関数で回帰したものである。流動硬さの評価において、オリジナルのハーバート硬さでは、図 2-1 に示した初期角度を与えた側から反対側に振れ上がった  $S_1$  が用いられるが、本実験では試験片の平行度や試験機解放時の影響により  $S_1$  が  $S_0$  を超える結果があるため、安定して評価を行うことができる  $S_2$  を用いている。流動硬さおよび減衰硬さの回帰の精度を示す決定係数はそれぞれ 0.94 および 0.96 である。ここで、決定係数は推定された回帰式の当てはまりの度合いを示す指標であり、全変動の平方和に対する回帰変動の平方和の比である。決定係数は0から1までの値をとり、0.7以上で良い当てはまりとなる。

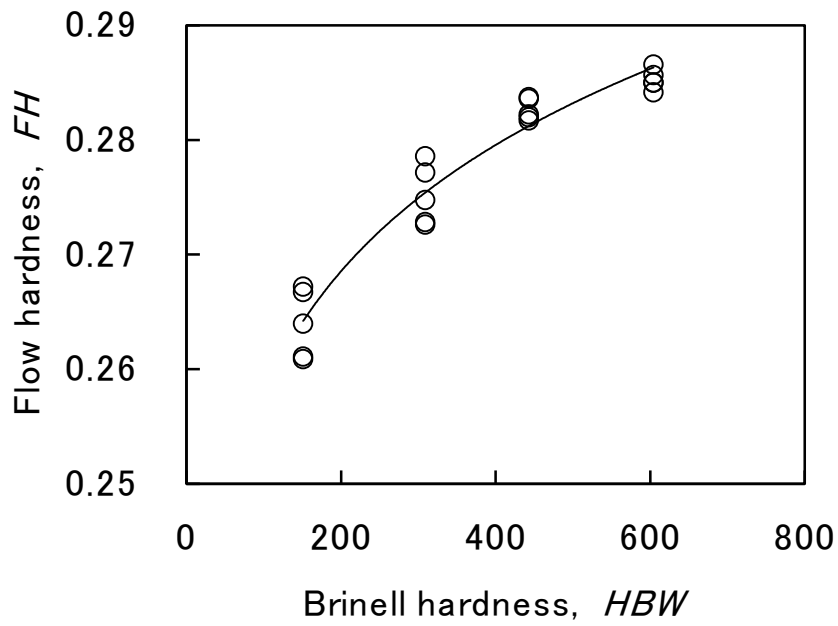


図 3-19 ブリネル硬さと流動硬さの関係

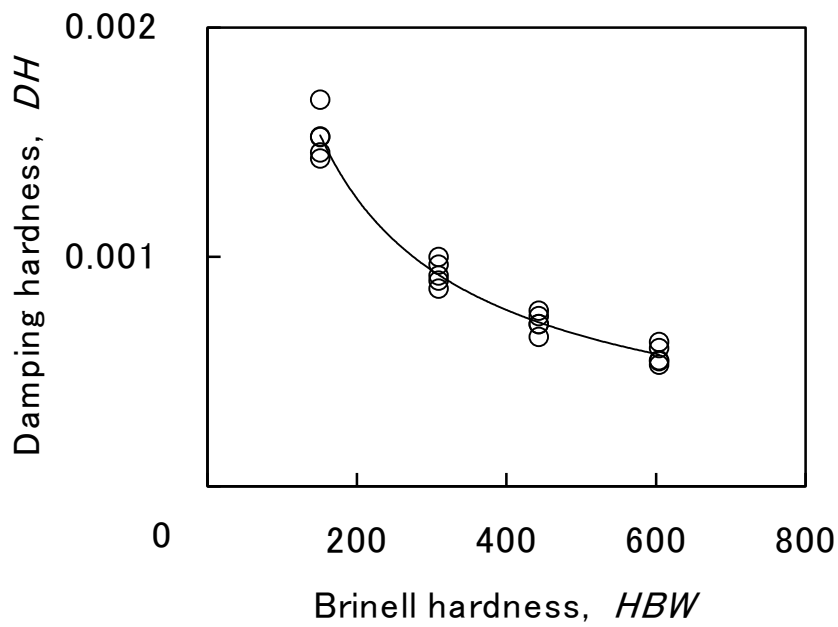


図 3-20 ブリネル硬さと減衰硬さの関係

流動硬さと減衰硬さの関係を図 3-21 に示す。図 3-21 の結果を整理して、5 回の測定結果について平均値と標準偏差を誤差範囲で示したものを図 3-22 に示す。5 回の測定において流動硬さのばらつきが減衰硬さと比較して大きい。これは、それぞれの硬さの測定方法に起因する。流動硬さは、目盛り硬さと時間硬さの比である。流動硬さは、5 揺動分の揺動角度の測定において、1 点の角度と時間から算出されることから、実験方法に起因する偶然誤差成分が顕著に表現される。減衰硬さは、揺動角度の自由減衰振動波形から得られる正の極大値 5 点に対して回帰を行い算出されるため、実験方法に起因する偶然誤差成分は平均化効果により低減される。図 3-22 から、各測定の平均値において両者は非常に良い対応を示したことから、減衰硬さは流動硬さに代わる指標として有用であることを明らかにした。

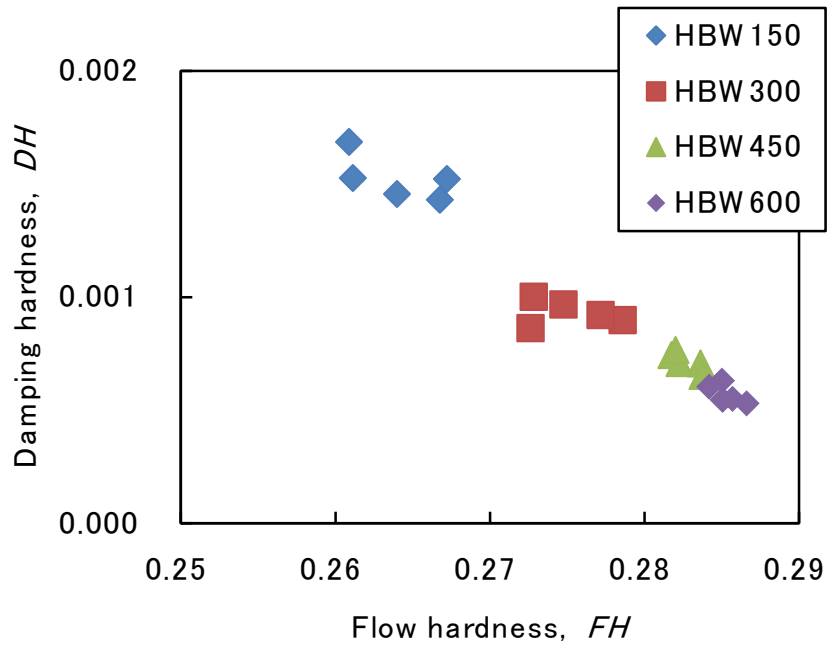


図 3-21 流動硬さと減衰硬さの関係

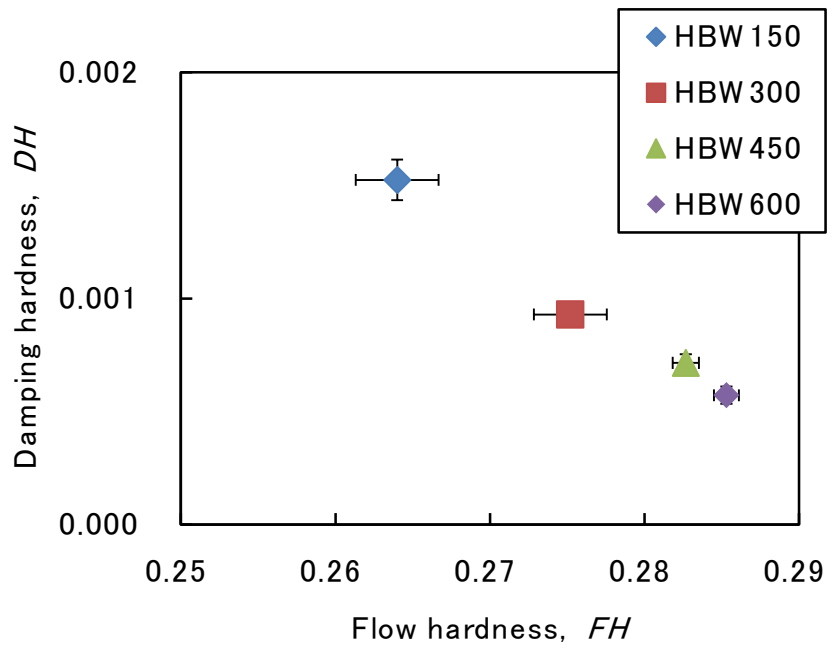


図 3-22 流動硬さと減衰硬さの関係（平均値と誤差範囲）

### 3.6 まとめ

減衰硬さを工業用に実用化するため、従来の試験機における問題点である測定精度の低さおよび作業工数の多さの改善を目的として試験機の測定システムの改良を行った。揺動角度の測定をレーザ変位計により行い、重心調整作業を容易とする改良型ハーバート硬さ試験機を開発した。本試験機の有用性を検討するため、金属材料の減衰硬さを評価する際の測定条件の影響について調べた。HBW150、300、450 および 600 のブリネル硬さの異なる鋼材の試料を対象として、圧子半径、揺動周期および表面粗さの影響について考察を行った。本実験で得られたことを以下にまとめる。

- 1) 全ての圧子半径においてブリネル硬さが小さいほど減衰硬さは大きい。同一試料において圧子半径が大きいほど減衰硬さが大きい。
- 2) 全ての硬さの材料において揺動周期が長いほど減衰硬さは大きい。同一の揺動周期においてブリネル硬さが小さいほど減衰硬さが大きい。低速度域では圧子と試料の凝着による抵抗が減衰に影響すると考えられる。
- 3) 減衰硬さは、表面粗さ  $R_a$  が  $0.1 \mu\text{m}$  以下の範囲では、 $R_a$  の増加に対してわずかであるが増加する。
- 4) ブリネル硬さが既知である複数水準の試料で減衰硬さを求めて適切に回帰することにより、減衰硬さからブリネル硬さを精度良く推定することが可能である。
- 5) 減衰硬さは、オリジナルのハーバート硬さである流動硬さに対して直線的な関係を示し、ばらつきが小さいことから、硬さの評価において有用である。

参考文献

- 1) 入門・金属材料の組織と性質, (社)日本熱処理技術協会, pp. 184-191, (2009).
- 2) K. L. Johnson, Contact Mechanics, Cambridge University Press, (1987).
- 3) 中原一郎, 材料力学, 養賢堂, (1966).
- 4) 大野薫, 転がり摩擦の制御 車輪・レールの転がり摩擦とその制御, トライボロジスト, Vol. 44 No. 7, pp. 506-511, (1999).
- 5) Y. Ishikawa, Study on Effect of Rolling Speed on Rolling Friction between a Ball and Flat Plates, Seimitsukikai, Vol. 49 No. 4, pp. 472-477, (1983).
- 6) F. P. Bowden and D. Tabor, The Friction and Lubrication of Solids. Pt. 1, Oxford University Press, (1950).
- 7) F. P. Bowden and D. Tabor, The Friction and Lubrication of Solids. Pt. 2, Oxford University Press, (1964).
- 8) J. A. Greenwood and J. B. P. Williamson, Contact of Nominally Flat Surfaces, Proc. Roy. Soc. Lond., Vol. 295, pp. 300-319, (1966).

## 第4章 減衰硬さと引張特性の関係

### 4.1 はじめに

工業用途における硬さ試験は、主に金属の機械的特性を調べる手段として用いられる。硬さは材料表面の変形に対する抵抗である。従来の押し込み硬さは、均質な材料の場合、引張強さや降伏応力などの材料全体の機械的特性と関係がある<sup>1)</sup>。前章において、鋼材における押し込み硬さであるブリネル硬さと減衰硬さには良い対応を示すことを明らかにし、減衰硬さからブリネル硬さを精度よく推定し得ることを示した。しかしながら、減衰硬さが材料の機械的特性とどのような関係にあるのかについては明らかではない。

本章では、8種類の金属材料に対してハーバート硬さ試験と引張試験を行った結果に基づき、減衰硬さと引張特性の関係について検討する。従来の押し込み硬さと同様に、減衰硬さで材料の機械的特性を推定できるか確認する。

### 4.2 実験方法

#### 4.2.1 引張試験

供試材としてアルミニウム合金 A1050、A2024、A5052、マグネシウム合金 AZ31、真鍮 C3601、純銅、純チタンおよび SUS440 の8種類の金属を用いる。試験片の形状と寸法を図4-1に示す。引張試験は、JIS Z 2241を参考に行う<sup>2)</sup>。試験には、万能材料試験機を使用する。クロスヘッド速度は、5 mm/minとし、試験温度は、23°C±2°Cである。

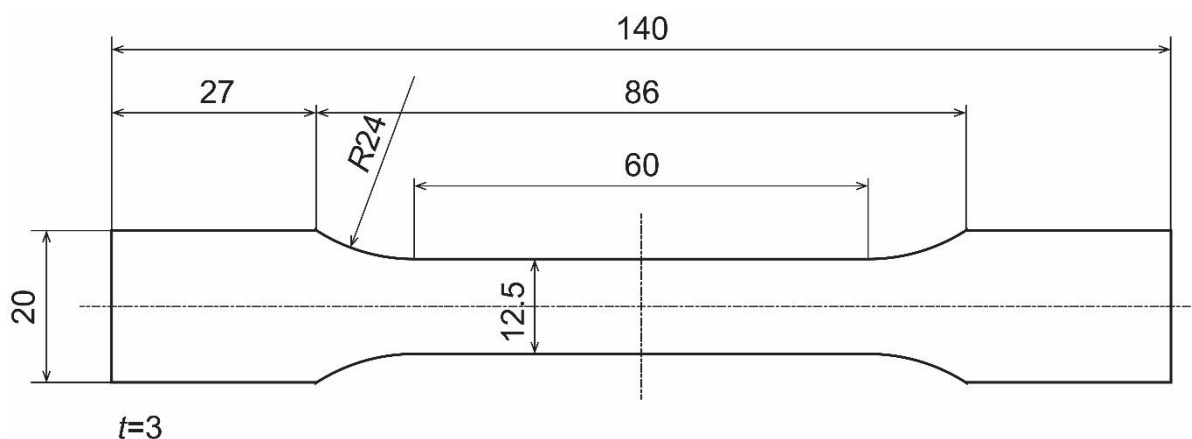


図 4-1 引張試験片の形状と寸法

$n$  値は、 $n$  乗硬化則における指数  $n$  であり、次式により示される<sup>3)</sup>。

$$\sigma = C \times \varepsilon^n \quad (4-1)$$

ここで、 $\sigma$  は真応力、 $C$  は強度定数、 $\varepsilon$  は真ひずみである。試験片にひずみゲージを貼付けて引張試験を行い、縦弾性係数  $E_2$  およびポアソン比  $\nu$  を算出する。

#### 4.2.2 ハーバート硬さ試験

減衰硬さの測定方法は、3.2.2 項に従う。圧子には超硬合金製半径 1 mm、長さ 12 mm の円柱形状のものを使用する。初期角度は  $30^\circ$  とし、基準揺動周期は 20 s とする。試験機の重量は 1.52 kg である。サンプリング間隔は、0.1 s である。試料の表面は、試験前に 320 番、600 番、800 番および 1200 番のエメリー紙を用いて研磨する。試験環境は、温度は  $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度は  $50\% \pm 20\%$  とする。測定回数は 1 つの試験変位につき 5 回とする。減衰硬さを縦弾性係数、0.2%耐力、引張強さおよび加工硬化指数  $n$  値と比較する。

#### 4.2.3 ハーバート硬さ試験による最大接触応力

最大接触応力と 0.2%耐力を比較することで、試験片に巨視的な塑性変形が生じるか検討するために、次式の Hertz の接触理論<sup>4)</sup>を用いてハーバート振子の円柱状圧子と試験片の間の最大接触応力  $p_{\max}$  を算出する。

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{P}{\pi R_1 L \left\{ \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \right\}}} \quad (4-2)$$

ここで、 $P$  はハーバート振子の質量、 $R_1$  は圧子半径、 $L$  は圧子の長さ、 $\nu_1$  と  $\nu_2$  はそれぞれ圧子と試験片のポアソン比および  $E_1$  と  $E_2$  はそれぞれ圧子と試験片の縦弾性係数である。



### 4.3 実験結果および考察

#### 4.3.1 圧子と試験片の接触応力

8種類の金属板の引張特性および Hertz の接触理論を用いて算出した圧子と試験片の最大接触応力  $p_{\max}$  を表 4-1 に示す。実際に測定した 0.2%耐力  $\sigma_{0.2}$  が  $p_{\max}$  よりも大きい金属には、ハーバート硬さ試験で巨視的な塑性変形が生じないと考えられる。

ハーバート硬さ試験後の材料の表面を光学顕微鏡で観察した結果を図 4-2 に示す。図中矢印 (Impression) の白線はハーバート振子の圧痕である。黒い部分は、ハーバート振子の設置位置を示すマーカである。全ての試験片に白い圧痕が確認できる。これは、A1050 以外の材料でも微視的には塑性変形が生じていることを示す。材料表面は完全な平滑面ではなく、表面粗さに相当する微細な凹凸が存在する。圧子と接触する材料表面の微細な凸部に生じる局所的な応力が、試験片の 0.2%耐力を超えたため、A1050 以外の試験片も微視的には塑性変形し、圧痕が生じるものと考えられる。全ての材料において塑性変形も揺動中のハーバート振子の有する力学的エネルギーを減少させ、揺動を減衰させる因子の一つである。

表 4-1 引張特性およびヘルツの接触理論による最大接触応力

Specimen	Poisson's ratio, $\nu$	Young's modulus, $E_2/\text{GPa}$	0.2% proof stress, $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	Hertzian contact stress, $p_{\max}/\text{MPa}$
A1050	0.304	62.4	114	156
A2024	0.318	69.3	396	164
A5052	0.295	66.7	181	160
AZ31	0.290	41.8	180	129
Brass	0.312	103	245	193
Pure Cu	0.301	108	250	197
Pure Ti	0.351	104	277	197
SUS440	0.293	219	403	258

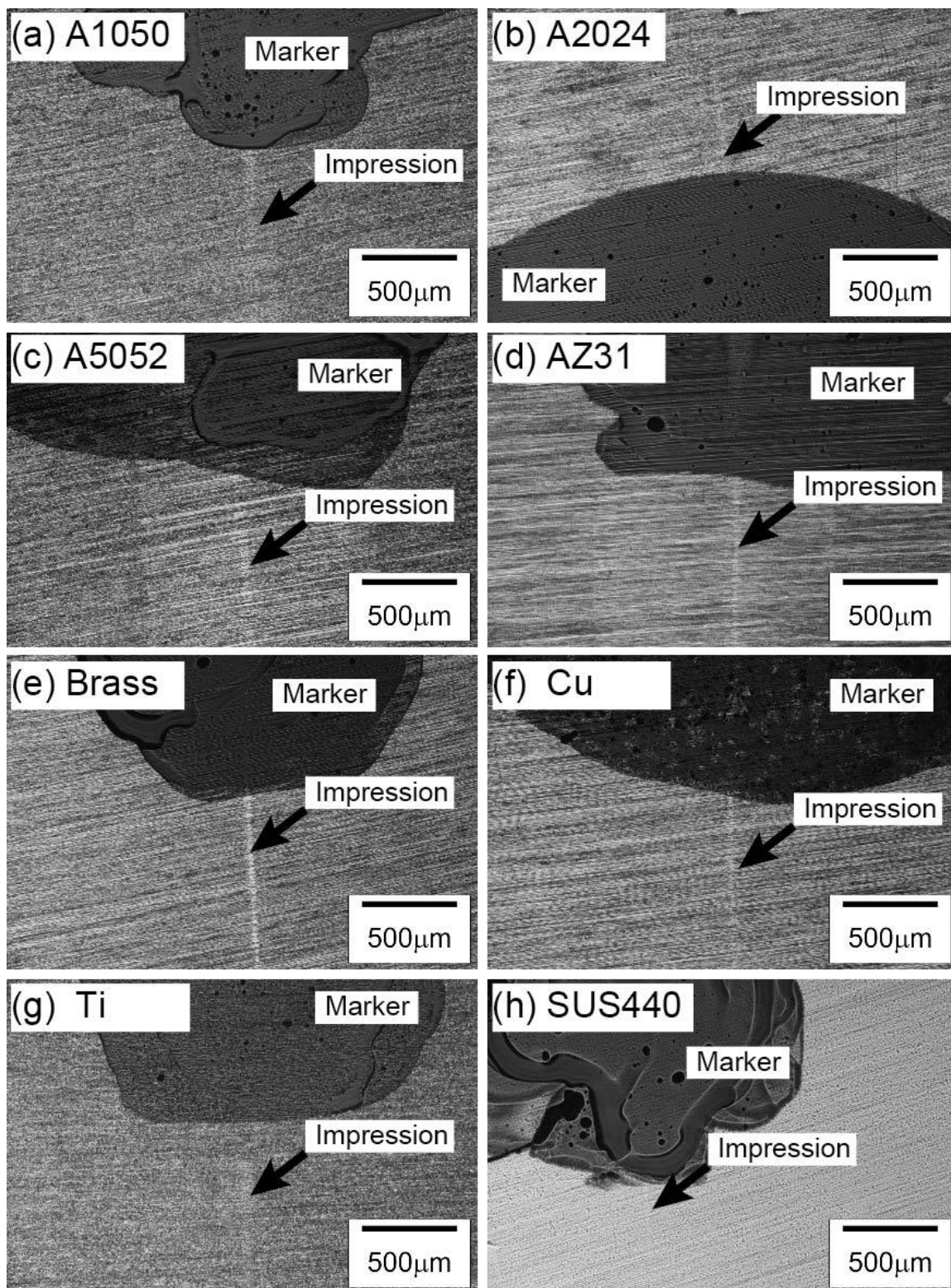


図 4-2 ハーバート硬さ試験後の試験片の表面

### 4.3.2 減衰硬さと引張特性の関係

ハーバート硬さ試験における揺動角度の自由減衰曲線の例を図 4-3 に示す。それぞれの材料で減衰の程度が異なることがわかる。アルミニウム合金である A1050、A2024 および A5052 における 5 周期後の極大値の揺動角度はそれぞれ約 10°、20°および 15°である。A1050、A2024 および A5052 の  $\sigma_{0.2}$  はそれぞれ 114 MPa、396 MPa および 181 MPa である。アルミニウム合金のみ比較したとき、0.2%耐力が低い試験片ほど振子が速く減衰する。

8 種類の金属の  $DH$  を  $\sigma_{0.2}$  および引張強さ  $\sigma_U$  に対して図 4-4 および図 4-5 にそれぞれ示す。加えて、試験結果の標準偏差を同図に示す。図中の実線は、AZ31 を除く全ての測定結果に対して指数関数で回帰したものである。AZ31 を除く理由は後述する。 $\sigma_{0.2}$  および  $\sigma_U$  の増加に伴い  $DH$  は減少する。これは、一般的な硬さ指標であるビッカース硬さと 0.2%耐力および引張強さの関係と逆の傾向であり、 $DH$  が硬さの増加に伴い減少する硬さ指標のためである。ビッカース硬さ  $HV$  は材料の強さ  $\sigma_B$  (0.2%耐力あるいは引張強さ)との間に以下の比例関係があることが知られている<sup>4)</sup>。

$$HV = C_1 \sigma_B \quad (4-3)$$

ここで、 $C_1$  は金属の種類(加工硬化特性や延性の違い)によって異なる比例定数である<sup>5)</sup>。本研究の結果より、 $DH$  を  $\sigma_B$  を用いて表せば次式になる。

$$DH = C_2 \sigma_B^m \quad (4-4)$$

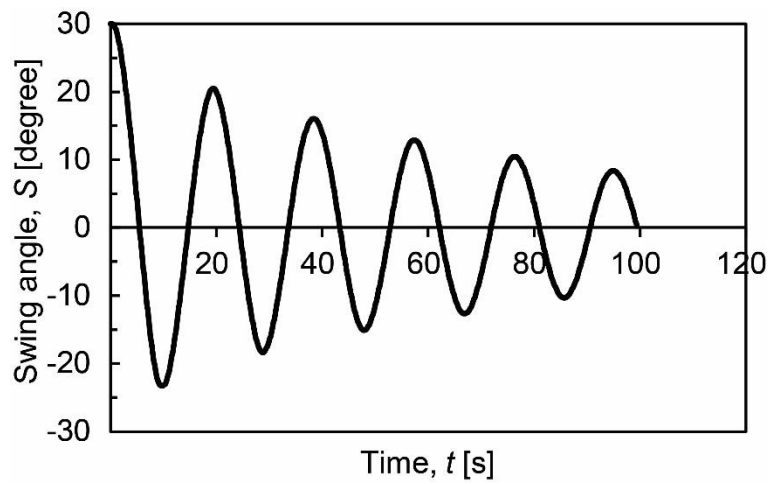
表 4-2 に図 4-4 および図 4-5 において実線で示される式(4-4)での回帰式における比例定数  $C_2$ 、指数  $m$  および決定係数を示す。 $DH$  は硬さの増加に伴い減少する指標なので  $m$  は負の値である。決定係数が高いことから、 $DH$  はビッカース硬さと同様に  $\sigma_{0.2}$  および  $\sigma_U$  に対して式(4-4)の関係がある。

表 4-2 式 4-4 における比例定数  $C_2$ 、指数  $m$  および決定係数

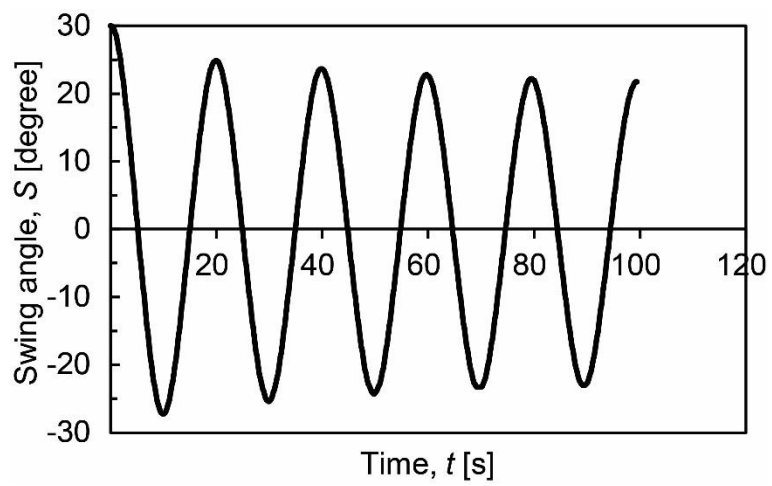
Mechanical characteristic ( $\sigma_B$ )	$C_2$	$m$	Determination coefficient squared
$\sigma_{0.2}$	0.324	-0.915	0.79
$\sigma_U$	0.120	-0.698	0.80

押し込み硬さの測定誤差は、結晶粒径の影響を大きく受けることが知られている<sup>6)</sup>。押し込み硬さ試験で形成する圧痕の大きさが結晶粒径の大きさに近づくと測定のばらつきが大きくなる。減衰硬さでは強制的な圧痕を形成せず試料上の圧子の転がりを評価するため、測定誤差の要因としては、表面粗さの違いによる圧子と試験片間の摩擦が考えられる。著者らは、図 3-14 に示したとおり、硬い材料であるブリネル硬さ標準試験片 HBW600 で表面粗さが減衰硬さにわずかではあるが影響を及ぼすことを明らかにした。本実験に用いた材料で最も軟らかい A1050 は HBW150 の試料より軟らかい。表 4-1 に示したとおり、Hertz の接触理論により、圧子と材料の接触する最大応力が 0.2% 耐力を超えるのは、A1050 のみである。巨視的に大きな変形が揺動挙動に影響を及ぼすことは、財満により示されている<sup>7)</sup>。弾性範囲であっても変形が生じることにより、圧子と試料の接触幅の変動や弾性ヒステリシス領域の変動等の要因が、振り子の減衰のばらつきの要因となり得るため、A1050 の減衰硬さのばらつきが大きくなったと考えられる。

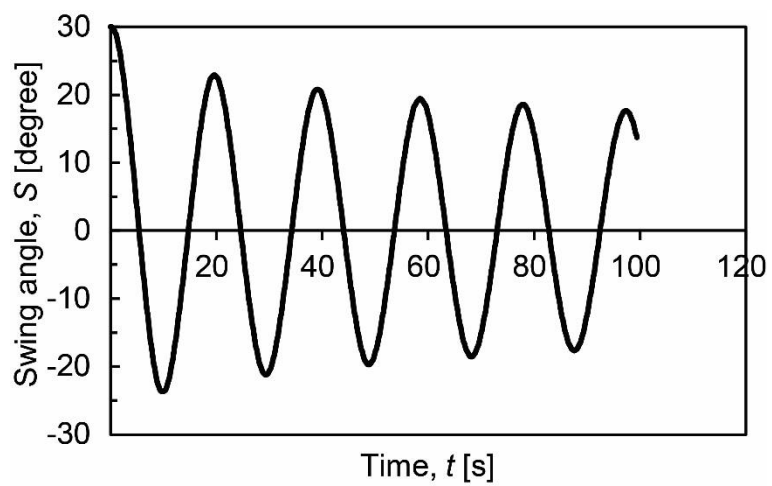
本実験に用いた材料の中で、AZ31 は他の材料と比較して異なる機械的特性を有する。AZ31 の特徴として、引張と圧縮で全く異なる応力-ひずみ曲線となることおよび荷重負荷に対して双晶変形を起こすことで減衰能が高いことが挙げられる<sup>8),9)</sup>。AZ31 の室温における引張および圧縮試験において、およそ 10% 程度までのひずみ領域では、圧縮は引張に対して著しく低い応力-ひずみ曲線を描く。本実験では、引張試験により機械的特性を評価している。減衰硬さは、振り子の転がりによる測定となるため、圧縮の機械的特性を評価している。AZ31 の圧縮の機械的特性を考えるならば、圧縮の 0.2% 耐力は引張試験での値のおよそ 6 割程度であり<sup>8)</sup>、図 4-4 において実線に近づく結果となると考えられる。本実験では、試料数は 1 である。減衰硬さの測定は 5 回行うが、引張試験は 1 回となる。そのため、系統的小よび偶然的小験誤差の十分な議論はできないが、AZ31 を除く一般的な金属材料に対しては、機械的特性において本実験により得られたものと製造者が提供するものに大きな差異がない範囲では、減衰硬さと 0.2% 耐力および引張強さとの関係は指数関数的に良い対応を示す。



(a) A1050

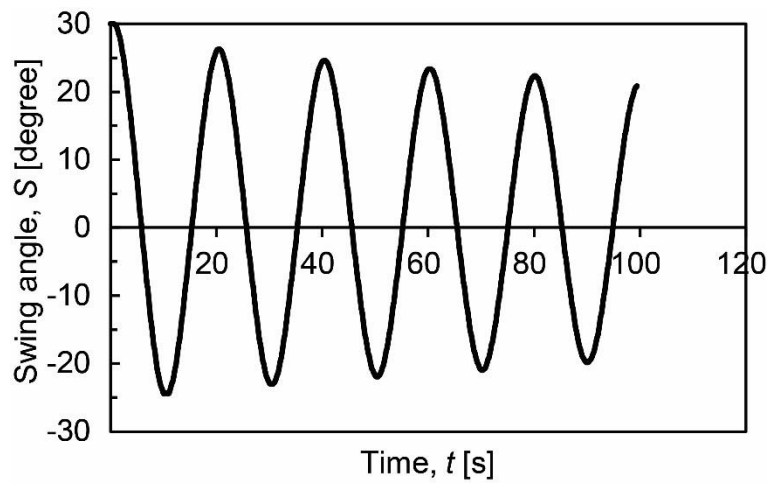


(b) A2024

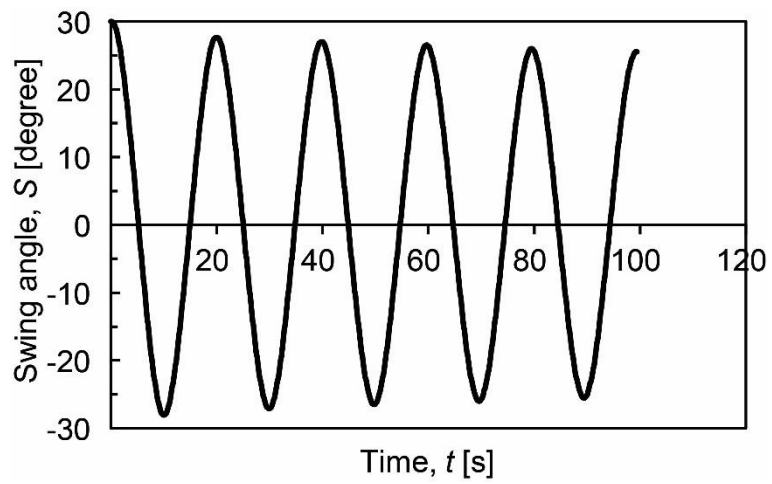


(c) A5052

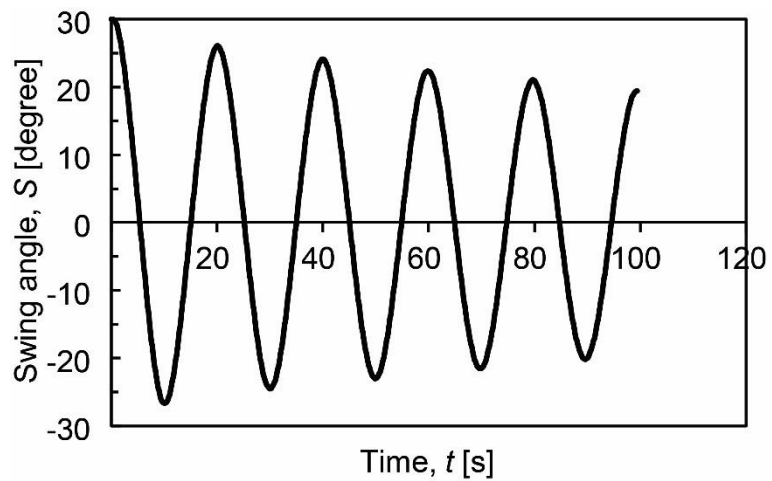
図 4-3 ハーバート振子の減衰曲線の例



(d) AZ31

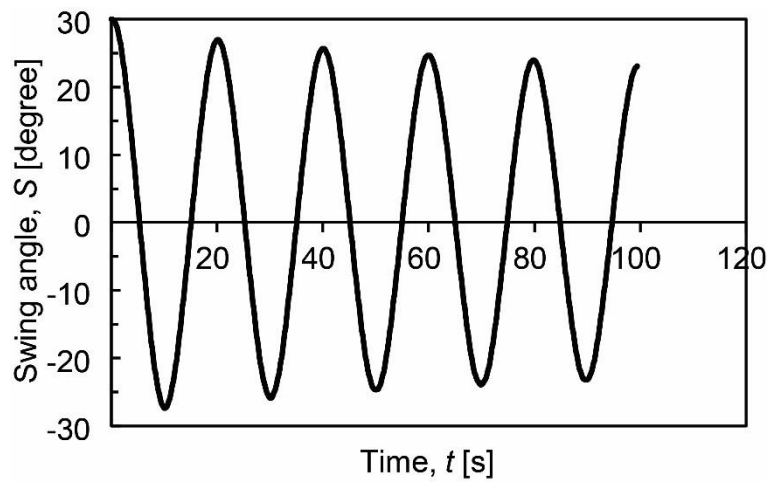


(e) Brass

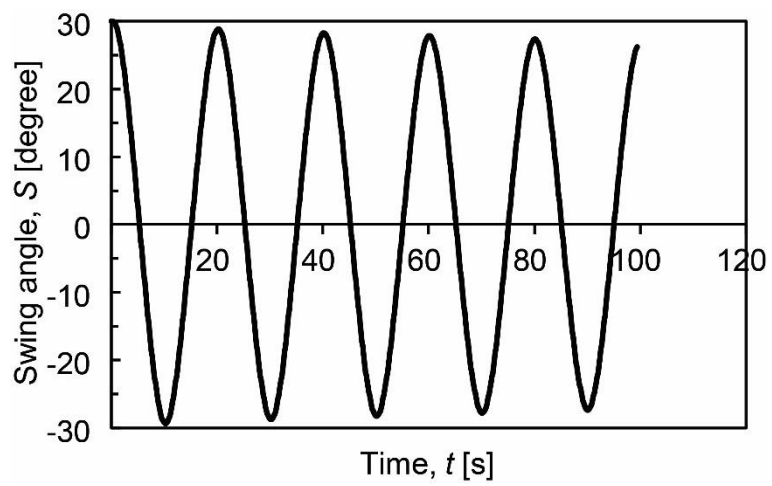


(f) Pure Cu

図 4-3 ハーバート振子の減衰曲線の例（続き）



(g) Pure Ti



(h) SUS440

図 4-3 ハーバート振子の減衰曲線の例（続き）

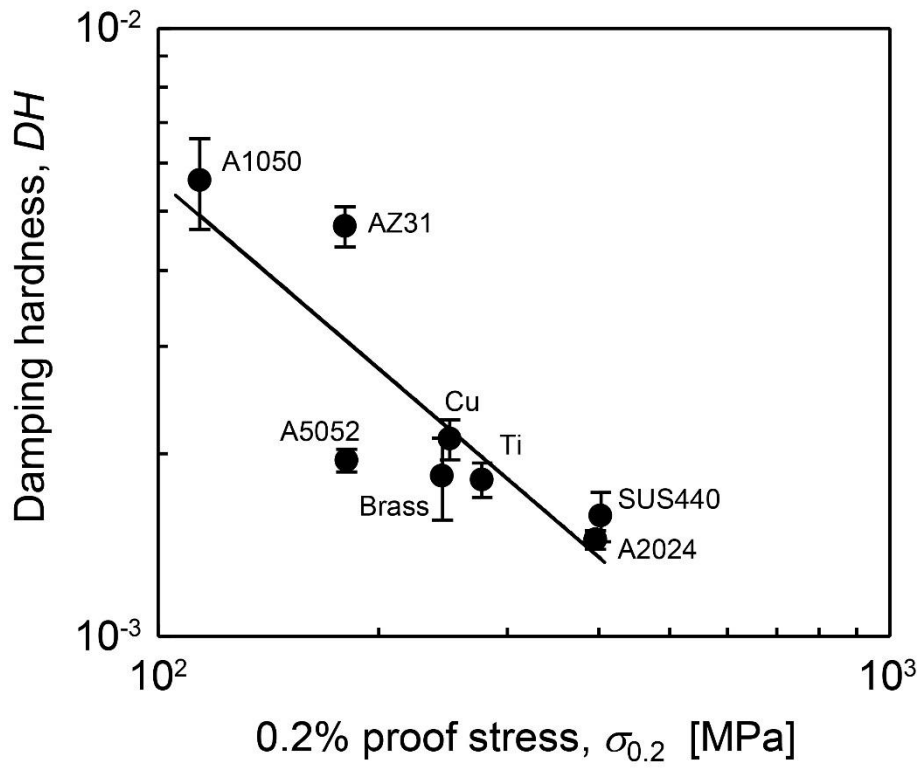


図 4-4 減衰硬さと 0.2%耐力の関係

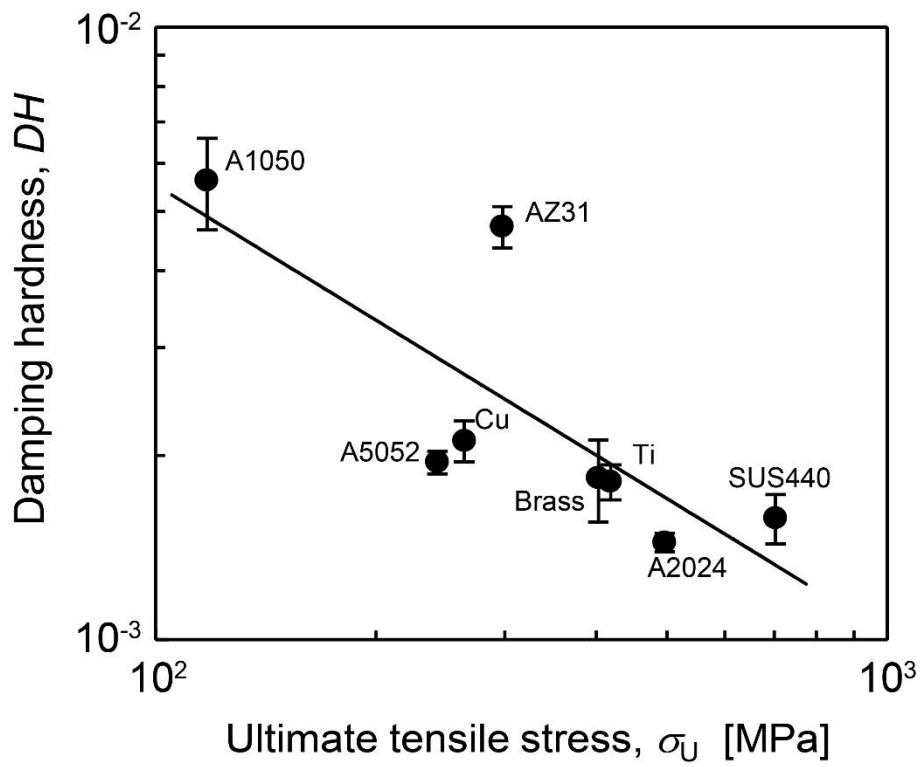


図 4-5 減衰硬さと引張強さの関係



$DH$  と  $n$  値の関係を図 4-6 に示す。図中の実線は、AZ31 を除く全ての測定結果に対して指数関数で回帰したものである。 $n$  値の増加に伴い  $DH$  は減少する。式(4-3)における  $C_1$  は  $n$  値の増加に伴い増加する<sup>7)</sup>。式(4-4)における  $C_2$  および  $m$  も加工硬化特性の 1 つである  $n$  値に依存する可能性がある。

図 4-4、図 4-5 および図 4-6 において、AZ31 の結果は図中の直線や曲線から離れている。前述のとおり、AZ31 は双晶変形による内部摩擦が大きいマグネシウム合金であり、減衰能の高い材料である。振子の自由減衰定数から評価する減衰硬さは材料の減衰能を評価していると考えられる。AZ31 と同水準の減衰硬さである A1050 は、減衰能の高い材料ではない。これも前述のとおり、Hertz の接触理論により、圧子と材料の接触する最大応力が 0.2% 耐力を超えるのは A1050 のみであるが、加工硬化がほぼ起らないのが特徴である。図 4-2 に示したとおり、減衰硬さの測定後の試料表面には、圧子の転がりによる傷が視認できることから、微視的には塑性加工が生じる。塑性加工が生じても A1050 は加工硬化しないため、表面強度が高くなることがない。それに加え、材料強度の低さに起因する巨視的に大きな変形により、圧子と試料の接触幅と弾性ヒステリシス領域の増大に伴い、減衰硬さが増加したと考えられる。

$DH$  と縦弾性係数  $E_2$  の関係を図 4-7 に示す。 $DH$  と  $E_2$  の間に明確な関係は確認できない。A1050、A2024 および A5052 は全てアルミニウム合金であり、同程度の縦弾性係数を有しているが減衰硬さは明確に異なる。したがって、減衰硬さは剛性ではなく強度を示すと考えられる。

Hertz の接触理論では、接触する 2 物体の縦弾性係数により接触幅が決定される。実際の接触では、圧子と試料の接触後の傷の様子からわかるとおり、一様ではなく離散的に存在する。振り子試験機では、圧子の試料上の転がりを取扱うことから、真実の接触状態が重要になる。そのため、真実の接触状態に影響する 0.2% 耐力と引張強さが減衰硬さと良い対応を示すと考えられる。表面の傷は塑性変形であることから、減衰硬さが加工硬化指数と良い対応を示すと考えられる。

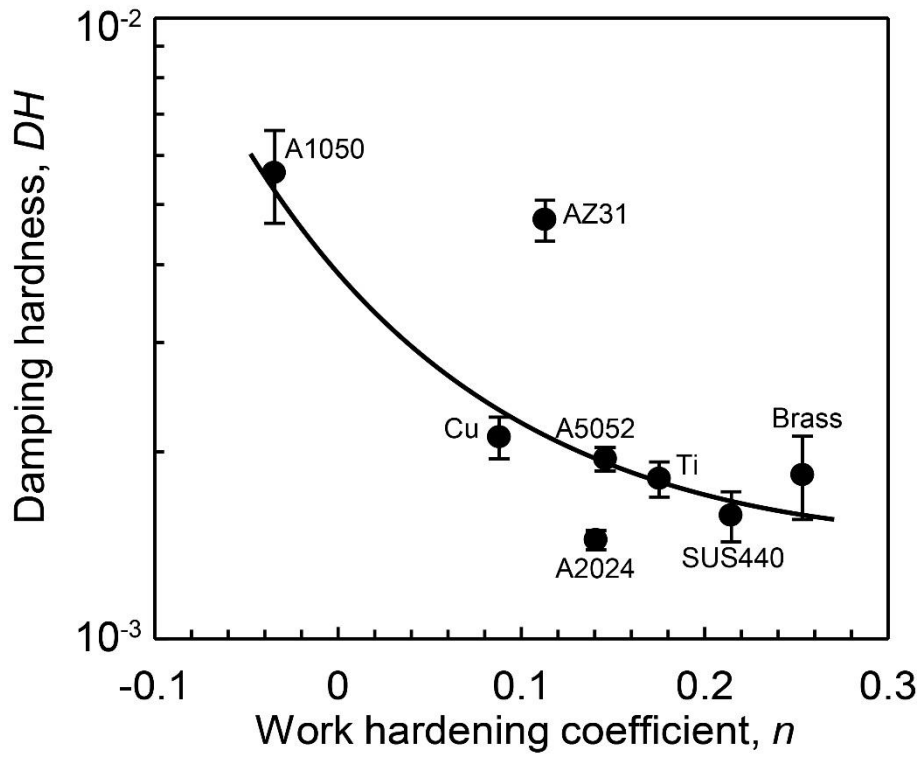


図 4-6 減衰硬さと加工硬化指数の関係

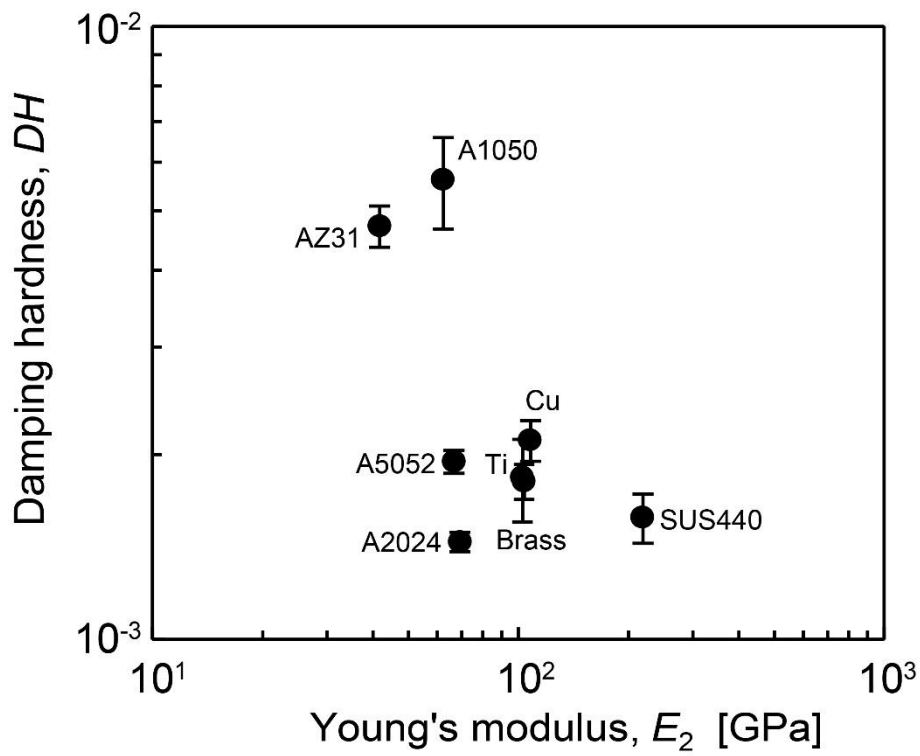


図 4-7 減衰硬さと縦弾性係数の関係

#### 4.4 まとめ

減衰硬さと引張特性の関係を調べるために 8 種類の金属に対し、ハーバート硬さ試験および引張試験を行った。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) AZ31 を除く材料において、減衰硬さは 0.2%耐力および引張強さの増加に伴い減少し、指数関数的な良い対応を示す。
- 2) AZ31 を除く材料において、加工硬化指数の増加に伴い減衰硬さは減少し、指数関数的な良い対応を示す。
- 3) A1050 および AZ31 は異なる要因で同程度の高い減衰硬さを示すが、機械的強度試験と減衰硬さを複合して評価することにより、AZ31 のような内部摩擦の要因を特徴的に捉えられる可能性がある。
- 4) 減衰硬さと縦弾性係数の間に明確な関係は確認できない。減衰硬さは材料の剛性ではなく強度を示すと考えられる。
- 5) 減衰硬さは圧子の試料上の転がりを取扱うことから、真実の接触状態が重要になるため、真実の接触状態に影響する 0.2%耐力、引張強さおよび加工硬化指数が減衰硬さと良い対応を示すと考えられる。

## 参考文献

- 1) 吉沢武雄, 硬さ試験法とその応用, 裳華房, pp. 286-288, (1977).
- 2) JIS Z2241, 金属材料引張試験方法, (2011).
- 3) JIS Z2253, 薄板金属材料の加工硬化指数試験方法, (2011).
- 4) 中原一郎, 材料力学, 養賢堂, (1966).
- 5) D. Tabor, The Hardness of Metals, Oxford University Press, (2000).
- 6) 中村雅勇, 硬さ試験の理論とその利用法, 森北出版, pp. 117-118, (2012).
- 7) 財満鎮雄, いわゆるハーバート振子について, 機械の研究, Vol. 3 No. 4, pp. 258-259, (1951).
- 8) 中谷幸治, AZ31 の高ひずみ速度域における変形応力のひずみ速度依存性, 法政大学大学院紀要 (理工学・工学研究科編), Vol. 57, (2016).
- 9) E. Yukutake, J. Kaneko and M. Sugamata, Anisotropy and Non-Uniformity in Plastic Behavior of AZ31 Magnesium Alloy Plates, Material Transactions, Vol. 44 No. 4, pp. 452-457, (2003).

## 第5章 減衰硬さによる炭素繊維強化樹脂の成形性の評価

### 5.1 はじめに

減衰硬さの工業用途として最大の特徴は、従来の押し込み式硬さ試験法のように材料への強制的な圧痕を伴わない非破壊での評価が可能であるという点にある。その特徴による評価の有用性について、炭素繊維強化樹脂（CFRTP）の成形性の評価を題材として実験的に調べる。

CFRTPは、高比強度および高比剛性の特徴を有することから、従来の金属材料に代わる軽量化材料として期待されている。自動車業界においても燃費向上のための軽量化は大きな課題であり、自動車部品へのCFRTPの適用がその有効な手段である<sup>1),2)</sup>。現在、CFRTPが自動車部品として採用されるための課題の一つは成形時間の短縮である<sup>3),4)</sup>。炭素繊維の機械的特性を活かし、成形時間を短縮する成形法として、炭素繊維の織物に熱可塑性樹脂を含浸させた中間材料（以下、プリプレグという）のプレス成形が挙げられる。プレス成形ではプリプレグが必要数積層されたシートを材料として温間で成形が行われ、高い生産性が期待できる成形法である<sup>5)</sup>。

しかしながら、材料となる積層シートで十分な強度が得られない場合がある<sup>6)</sup>。これは、積層シート内部に欠陥が生じることや炭素繊維束と樹脂が十分に浸透および含浸してないことが原因と考えられ、積層シート成形時の温度に大きく影響を受ける。積層シートをプレス成形に適用していくためには、成形温度がシートの機械的特性に与える影響を調査する必要がある。成形条件により機械的特性がシートの部位ごとに差異をもつ可能性があることから、積層シート内の各部位で機械的特性値の評価を行うことが理想的である。積層シートの各部位から試験片を切り出して静的な強度試験を行うと、その積層シートを活用することができない。製品化のためには非破壊的に積層シートの機械的特性を評価することが課題である。

本章では、積層シートの強度を非破壊で評価することおよび成形温度が曲げ強度に及ぼす影響を調べるため、ハーバート硬さ試験機を用いて検討する。ハーバード硬さは振子式で圧子が測定位置に設置できれば、試料の平坦性を求めることはなく、局所的な測定が可能である。さらなる利点は、金属組織のような微視的組織の影響を評価できることである<sup>7)</sup>。CFRTPの成形温度による樹脂の流動と浸透が積層構造の強度に影響を与えるのであれば、減衰硬さにも影響を及ぼすことになる。試験片断面を観察して、減衰硬さとCFRTPの積層構造の関連性を調べ、損傷に及ぼす成形温度の影響をフラクトグラフィ的に考察する。

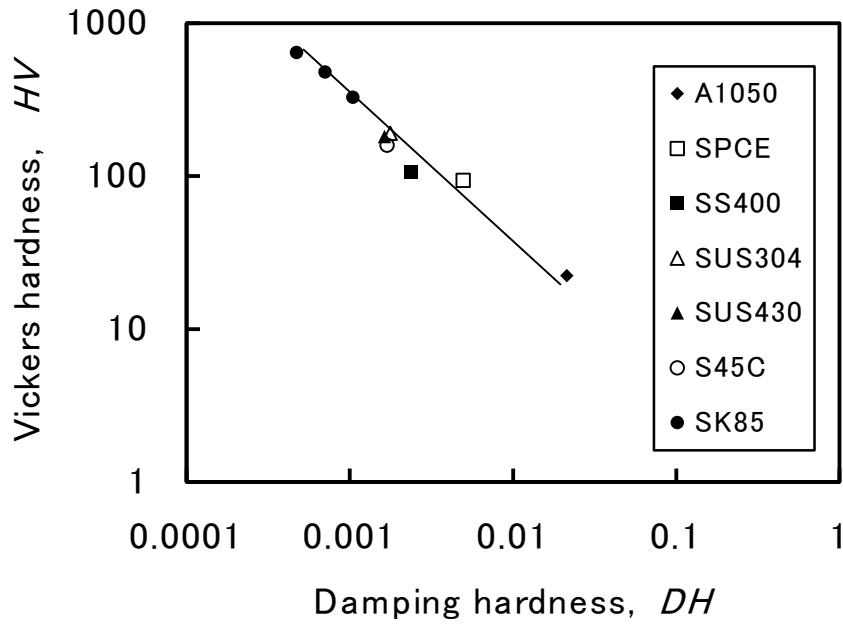
## 5.2 ハーバート硬さ試験における新たな硬さ指標 (*HDH*) の提案

複数の金属材料における減衰硬さ *DH* の測定結果とビッカース硬さ *HV* の関係を図 5-1 に示す。実験に用いた材料は、鋼材 7 種類 (SPCE、SS400、SUS304、SUS430、S45C および SK85) とアルミニウム合金 1 種類 (A1050) である。ビッカース硬さ試験は HV5 により行い、試験力の保持時間は 10 s とする。両者は非常に良い対応がある。軽微な荷重で測定できることから、減衰硬さは非破壊での硬さ試験を実現できる。図 5-1(a)では、*HV* と *DH* は負の相関があり、*DH* 値が小さいほど *HV* が大きくなる。これは、本来の硬さ値の概念と異なる。*DH* の逆数  $1/DH$  を新たなハーバード減衰硬さ *HDH* (Herbert damping hardness) として提案する。図 5-1(b)に基づくと、*HV* と *HDH* の関係は次式となる。

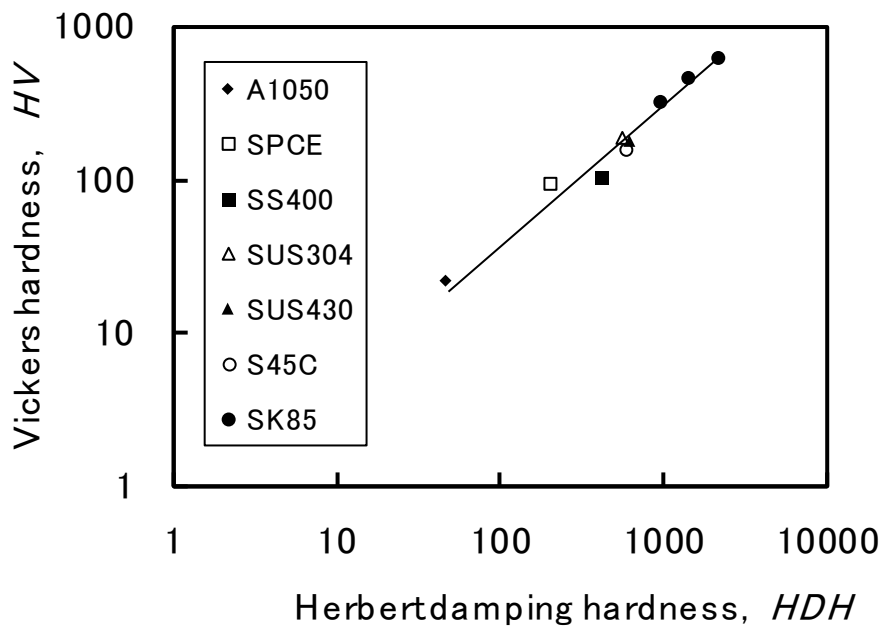
$$HV = 0.724 \times (HDH)^{0.876} \quad (5-1)$$

これにより、*HV* と *HDH* は正の相関となり、硬さという表現に齟齬はなくなる。本章の実験結果はこの *HDH* を用いる。

ハーバート硬さ値の指標を表 5-1 のとおり整理する。表中の指標は、図 5-2 に従う。



(a) 従来の減衰硬さとビッカース硬さの関係



(b) 新たに提案するハーバート硬さとビッカース硬さの関係

図 5-1 ビッカース硬さと減衰硬さの関係

表 5-1 ハーバート硬さ指標

Herbert hardness	Explanation
$S_1, T, S_1/T$	Original Herbert hardness (Scale hardness, Time hardness and Flow hardness)
$DH (= \alpha_0)$	Damping hardness (is equal to damping factor)
$HDH (= 1/DH)$	Herbert damping hardness (is equal to inverce of $DH$ )

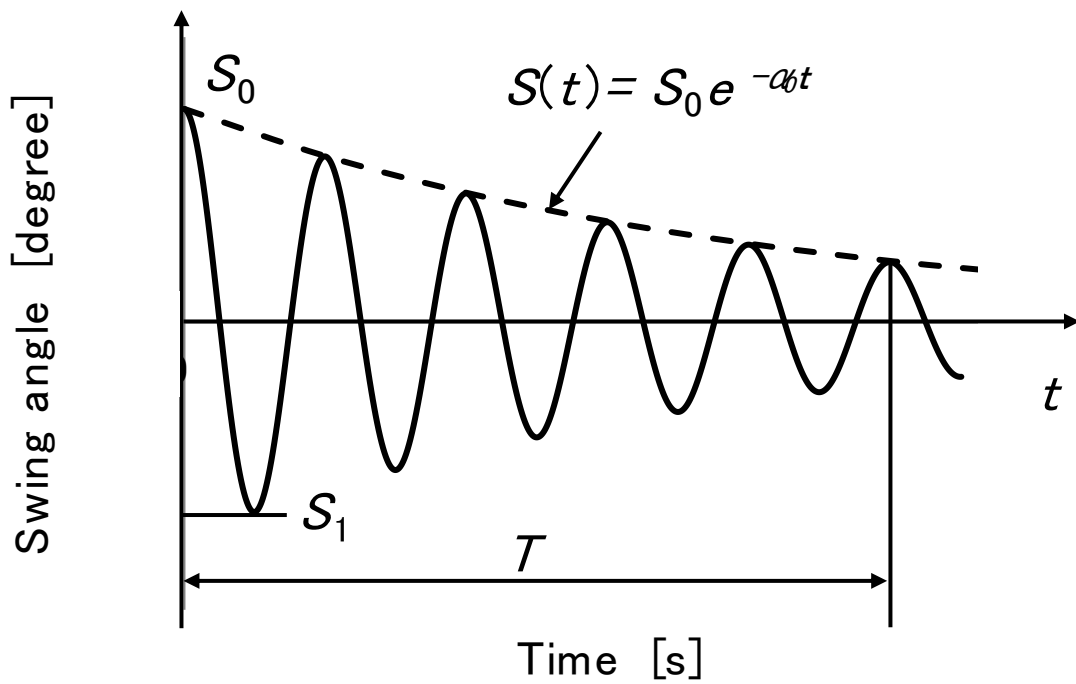


図 5-2 ハーバート硬さ試験により得られる硬さ値



### 5.3 実験方法

#### 5.3.1 試験片

試料は、2 mm メッシュの平織りの炭素繊維にアクリル樹脂が含浸された市販の 3K プリプレグを 4 枚積層しホットプレス機を用いて金型で加圧および加熱成形することで作製する。積層シートの寸法は 24 mm×104 mm とする。プリプレグの厚さは公称 0.2 mm であり、積層シートは 4 枚積層されることから、厚さはおよそ 0.8 mm である。プリプレグの積層方法は、平織りの経糸と緯糸がの方向が一致する単純積層とする。成形温度は、200℃、240℃および 280℃の 3 水準とする。成形圧力はいずれも 5 MPa とする。各成形温度にて成形圧力を 60 s 保持し、その後、プレス機の通水管を通して金型ごと水冷する。金型温度が約 40℃になったところで試験片を金型から取り出す。繊維含有率は約 70%である。

試験片の座標系および試験片形状と繊維方向の関係を図 5-3 に示す。このように試験片長手方向を 0° とし、平織の緯糸の繊維方向と一致させる。

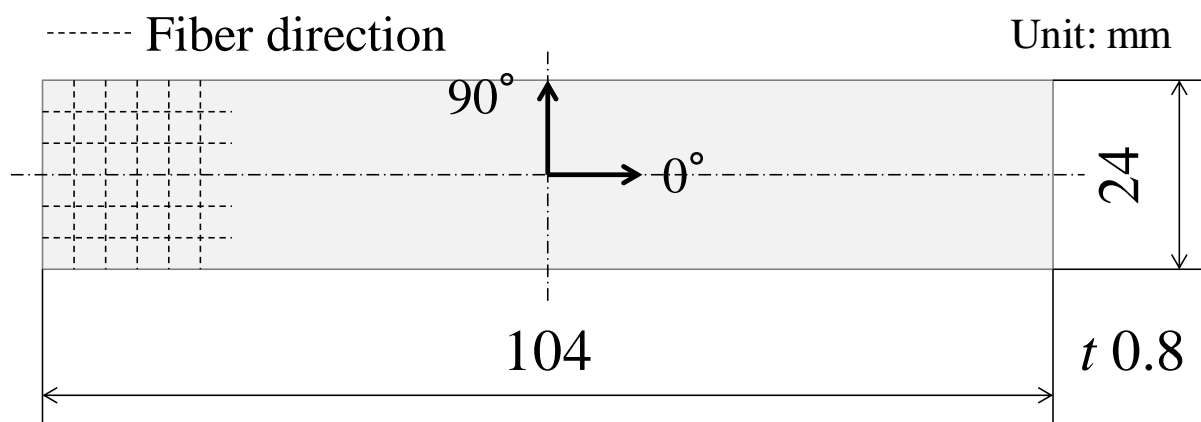


図 5-3 試験片の座標系および試験片形状と繊維方向の関係

### 5.3.2 曲げ強度試験方法

成形品の力学的特性を検討するため、JIS K 7074-1988 を参考に 3 点曲げ試験を実施する。試験には、万能材料試験機インストロン製 5582 型を使用する。圧子および支点の半径はそれぞれ、2.0 mm および 5.0 mm である。支点間距離は、30 mm とする。クロスヘッド速度は、1.9 mm/min とし、試験温度は、 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  である。

### 5.3.3 ハーバート硬さ試験方法

成形品の力学的特性を検討するため、ハーバート硬さ試験機による減衰硬さの評価を行う。圧子には超硬合金製半径 1 mm、長さ 12 mm の円柱形状のものを使用する。基準揺動周期は 20 s とする。試験機の重量は 1.52 kg である。これらは、4 章で金属材料の測定に使用したのと同じである。試験温度は、 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  である。

本実験では、部位ごとの評価を行うため、曲げ試験で圧子が接触する中央部を基準に、試験片の長辺方向に沿って位置を 0.5 mm ずつ平行移動させ 5 mm の範囲で減衰硬さの測定を実施する。本測定における圧子の配置方法を模式的に示すと図 5-4 のとおりである。

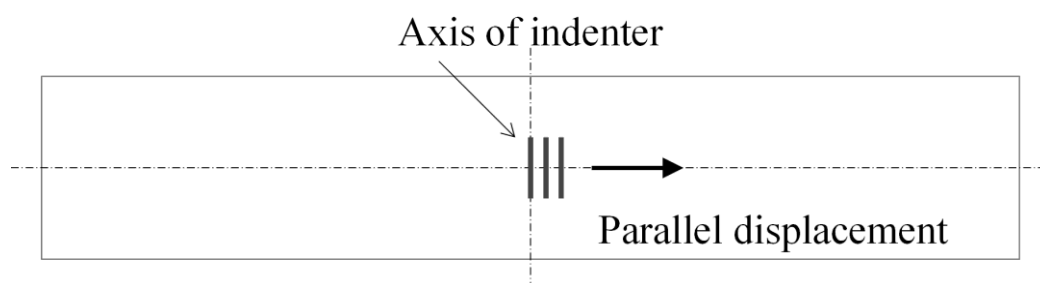


図 5-4 減衰硬さの測定における圧子の配置方法

## 5.4 実験結果

### 5.4.1 曲げ試験結果

曲げ試験から得られた応力－ひずみ線図を図 5-5 に示す。成形温度が 200℃および 240℃では初期損傷後に内部損傷を繰り返して破断に至る。図中の矢印部は内部損傷により応力が緩和された典型的な個所である。成形温度が 280℃では曲げ応力は 800 MPa 程度まで直線的に増加し、内部損傷を生じずに、初期損傷時と同時に破断する。

図 5-5 の応力－ひずみ線図から得られた曲げ強さおよび曲げ弾性率と成形条件の関係をそれぞれ図 5-6 に示す。曲げ強さおよび曲げ弾性率は共に成形温度の上昇に伴って高くなり、280℃程度においてはさらに曲げ強さ、曲げ弾性率とも変化率は大きくなる。

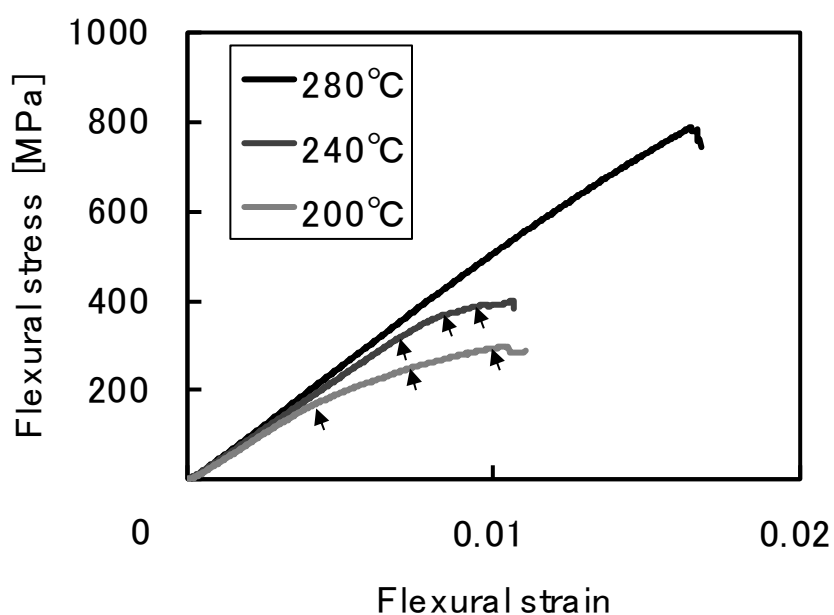


図 5-5 曲げ応力－曲げひずみ線図

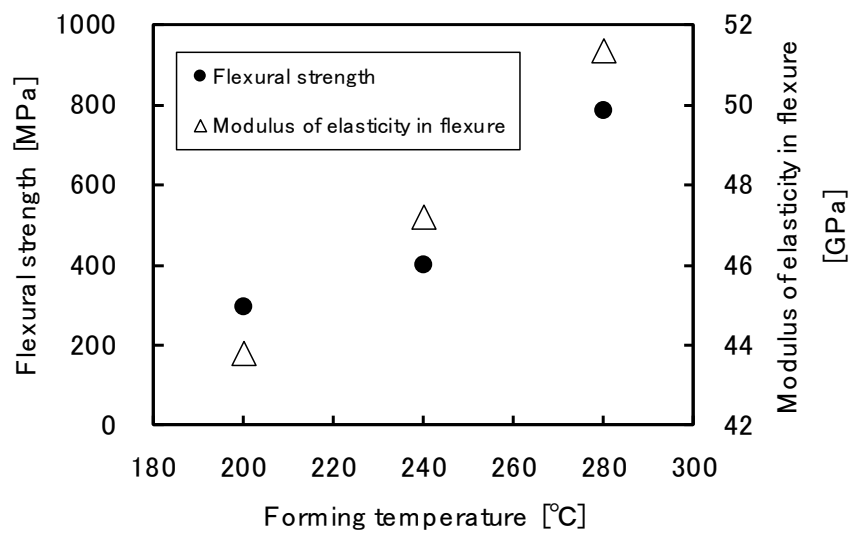


図 5-6 曲げ特性と成形温度の関係

#### 5.4.2 ハーバート硬さ試験結果

成形条件ごとの揺動角度の測定結果を図 5-7 に示す。この測定結果は、試験片中央部のものである。5 周期までは、成形温度が低いほど試験機の揺動角度の減少が速い。若干ではあるが、温度が低いほどピーク時刻も減衰と同時に短縮していることがわかる。前述のように揺動に対する抵抗に違いが見られることから、CFRTP に対して本試験法による硬さの評価が可能と考える。

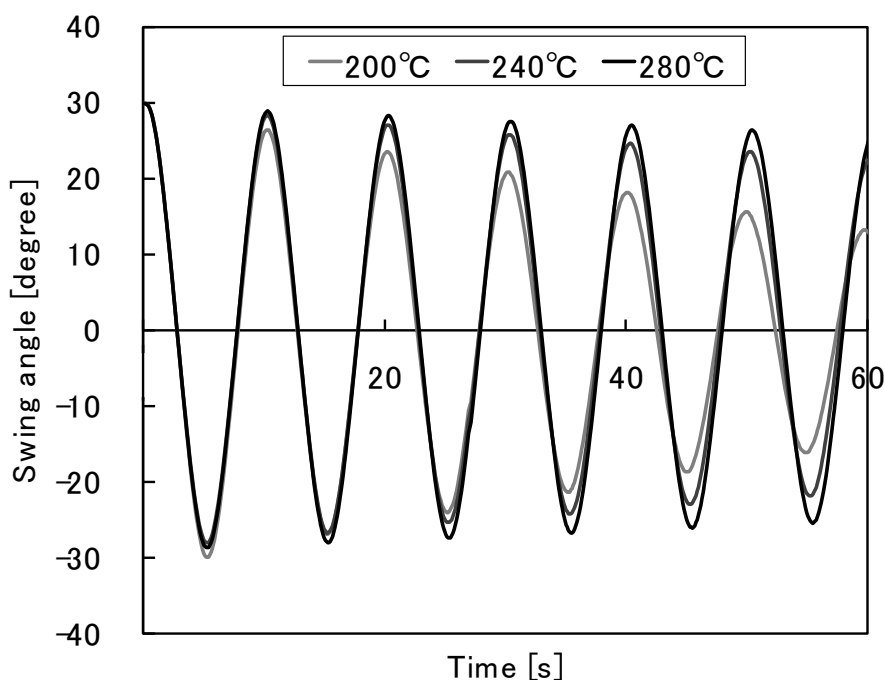
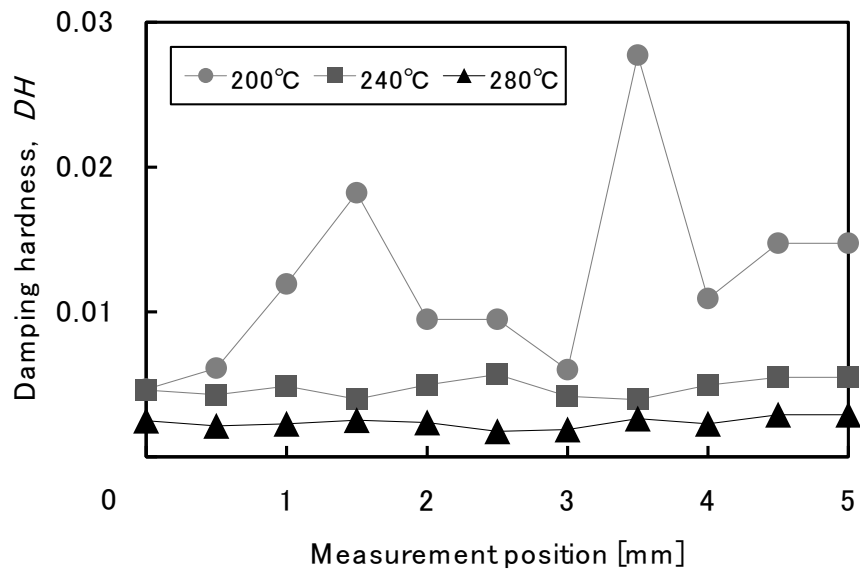


図 5-7 成形条件ごとの揺動角度の測定結果（試験片中央部）

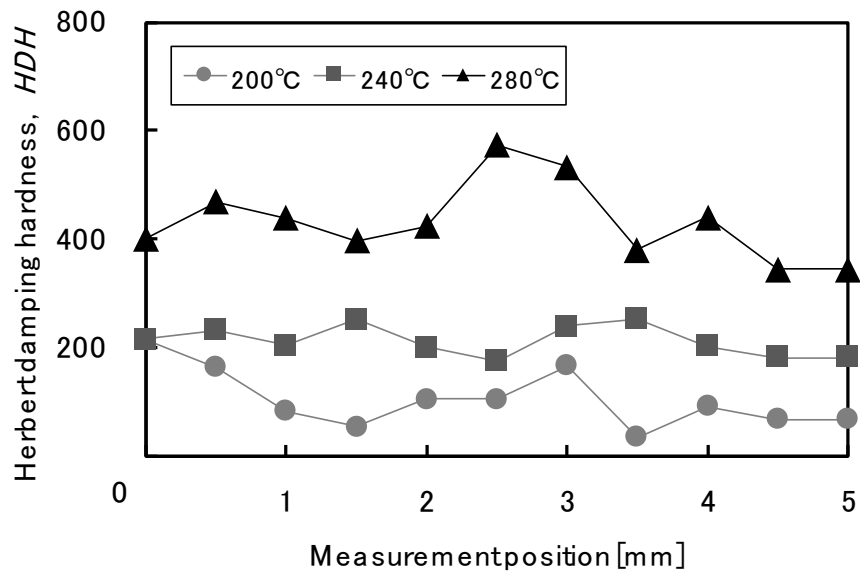
図 5-7 に示す揺動角度の時間変化から得られる減衰硬さ  $DH$  のよび  $HDH$  の結果を図 5-8 に示す。図 5-8 は圧子を試料上で図 5-4 のように平行移動させて測定した結果である。 $DH$  は、成形温度が高いほど小さい値となる。成形温度が  $200^{\circ}\text{C}$  では、 $1.5\text{ mm}$  と  $3.5\text{ mm}$  で突出した値を有し、約  $2\text{ mm}$  周期で値が大きい。成形温度が  $240^{\circ}\text{C}$  では、 $1\text{ mm}$  と  $2.5\text{ mm}$ 、 $4.5\text{ mm}$  と約  $2\text{ mm}$  周期で小さなピークは見られるが、測定位置ごとの値の変動は小さい。成形温度が  $280^{\circ}\text{C}$  では、測定位置ごとの変動は小さく、全体的に低い値を示す。これは、成形温度が高いほど、内部構造のばらつきが小さいと考えられる。 $HDH$  は  $DH$  の逆数であるため、測定結果は  $DH$  と反対に成形温度が高いほど大きい値となる。成形温度が  $200^{\circ}\text{C}$  で

の  $DH$  のばらつきは  $HDH$  では小さくなり、成形温度が  $280^{\circ}\text{C}$  でのばらつきが大きく表現される。

成形温度ごとの減衰硬さの平均値  $DH_{av}$  を求める。表 5-2 に示すように温度が低いほど減衰硬さは大きな値となる。 $HDH$  値に変換すると  $HDH$  と成形温度は正の相関を示す。



(a)  $DH$



(b)  $HDH$

図 5-8 減衰硬さの測定結果

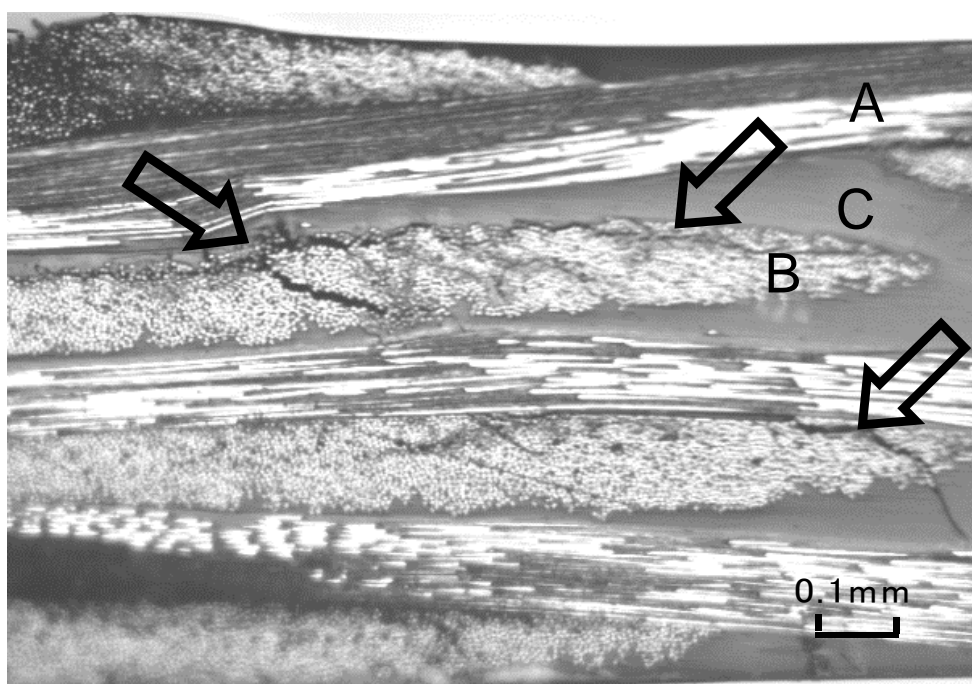
表 5-2 平均減衰硬さの評価結果

Temperature [°C]	200	240	280
Average damping hardness, $DH_{av}$	0.0122	0.00476	0.00237
$HDH (=1/ DH_{av})$	82.1	209.9	421.9



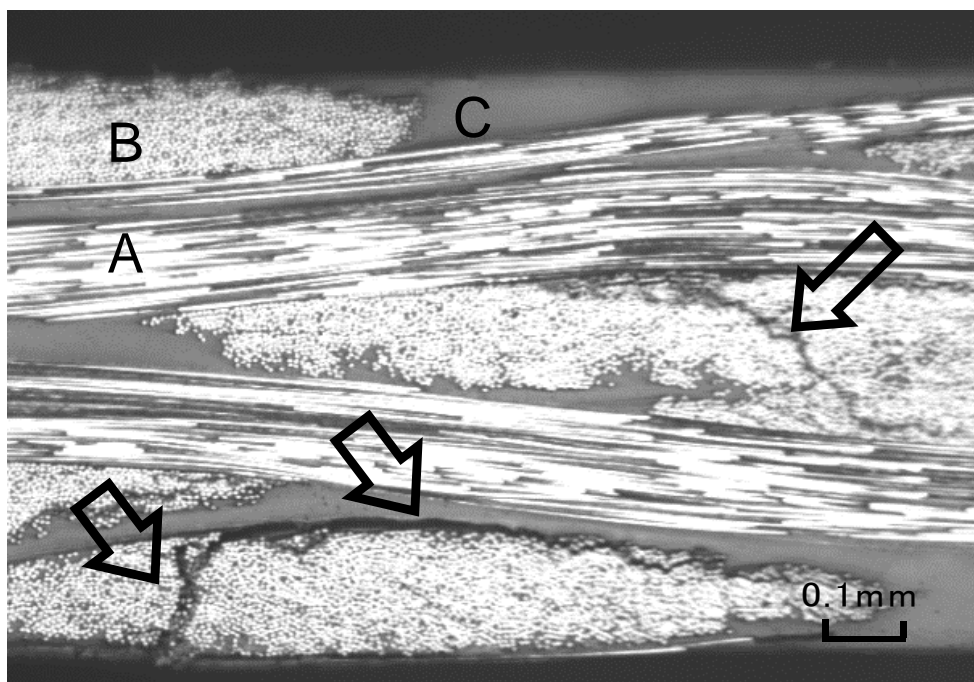
### 5.4.3 断面観察結果

成形温度により、減衰硬さに差異が生じることから、曲げ試験後の試料を切出し、断面観察を行う。観察箇所は、曲げ試験により破壊が生じた試料の中央部の圧子接触部とし、図 5-3 に示した座標系にて  $90^\circ$  方向に観察する。観察のための試料の作製方法は、まず、試験片中央で  $0^\circ$  方向に平行に切断し、中央部を含む 10 mm を切出す。次に、切出した試料を樹脂に包埋し、1200 番までのエメリー紙で研磨した後、 $1\ \mu\text{m}$  のダイヤモンドの砥粒で研磨を行う。結果の一例を図 5-9 に示す。図中の A、B および C はそれぞれ、 $0^\circ$  方向の繊維、 $90^\circ$  方向の繊維および母材樹脂である。成形温度が  $200^\circ\text{C}$  および  $240^\circ\text{C}$  では、矢印部のような繊維束間に生じたき裂および層間はく離が見られる。特に成形温度が  $200^\circ\text{C}$  では、試料の板厚方向全体的にマイクロクラックが広がる。成形温度が  $280^\circ\text{C}$  では、矢印部の 3 点曲げ試験における圧子の接触部での座屈破壊が見られるが、低温での成形に見られた繊維束間でのき裂や層間はく離がほとんど見られない。

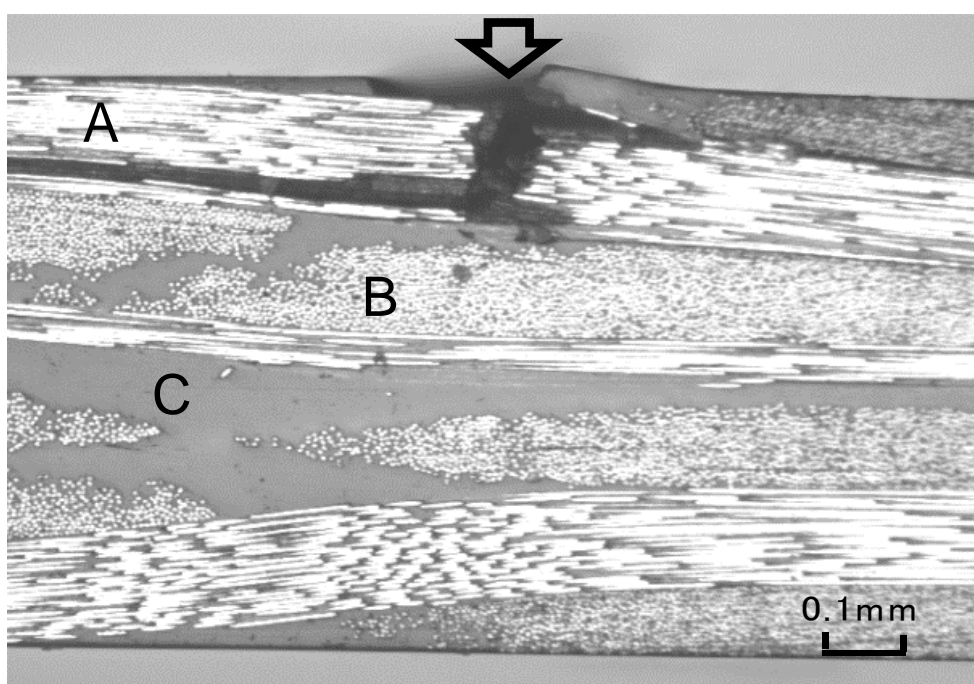


(a)  $200^\circ\text{C}$

図 5-9 断面観察結果



(b) 240°C



(c) 280°C

図 5-9 断面観察結果 (続き)

## 5.5 考察

### 5.5.1 繊維含有率と成形温度の関係

CFRTP において炭素繊維の体積含有率が変化することで硬さが変化していることが示唆される。このため、成形温度ごとの試料で体積含有率を算出する。成形した試料の密度はアルキメデス法<sup>8)</sup>を用いて求める。

成形温度ごとの繊維含有率と  $HDH$  の関係を図 5-10 に示す。繊維含有率が高いほど減衰硬さは高く、硬い傾向となり、ほぼ線形の関係を示す。繊維含有率が変化する原因は、成形時に金型のクリアランスに母材樹脂が流出したことが考えられ、成形温度の上昇に伴い、樹脂の流動性が向上し、繊維束間に樹脂が充填されるものの、樹脂リッチの層が薄くなり、繊維含有率が向上すると考えられる。

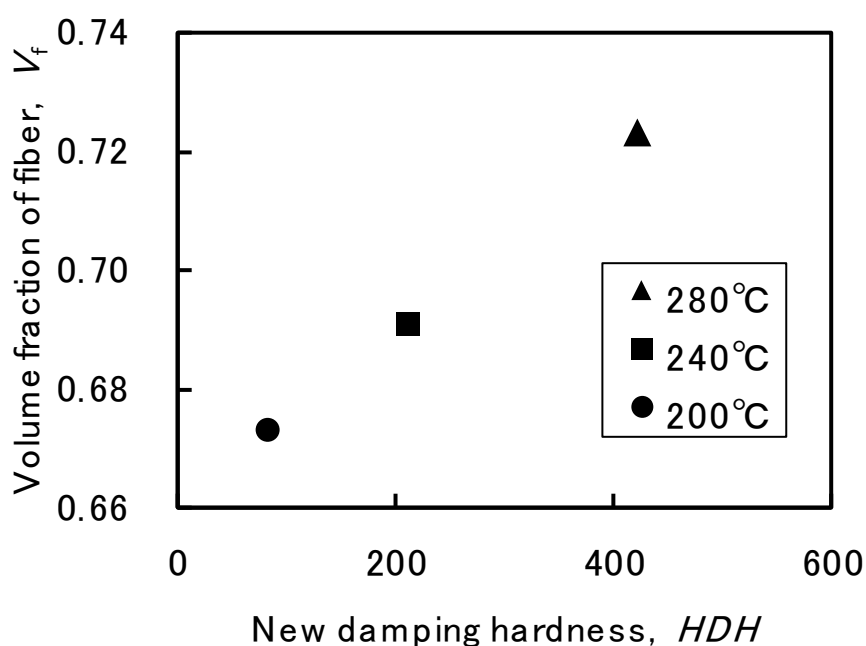


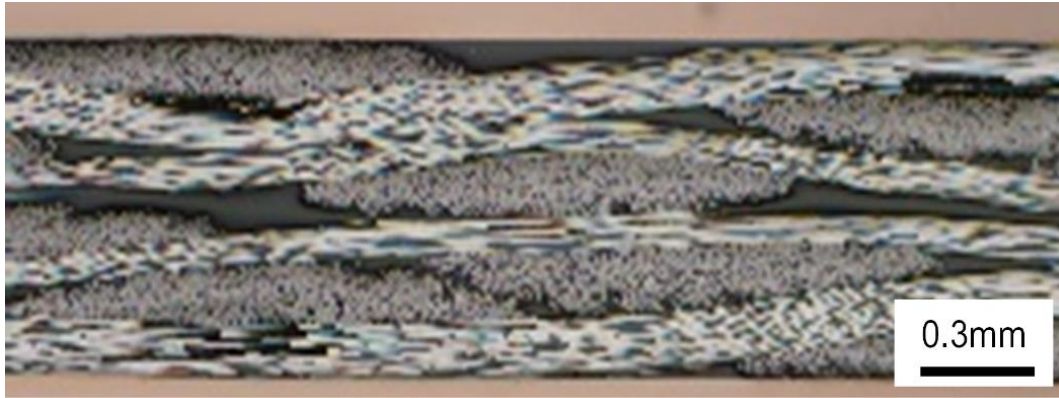
図 5-10 体積含有率と  $HDH$  の関係

### 5.5.2 成形温度による損傷挙動と曲げ強度の関係

本実験範囲では、曲げ試験の結果より、成形温度と曲げ弾性率および曲げ強さは正の相関がある。この原因の一つに繊維含有率を指摘したが、図 5-11 に示すように、断面観察の結果から、メゾスケールでの繊維構成の影響も考えられる。

図 5-11(a)に示すように、低温成形時には繊維束は厚く、上下の位置も不揃いであるが、図 5-11(b)のように高温時には繊維束は均一な厚さになり、上下の位置も整然と配列されている。これは樹脂の流動経路がプレスによって決まり、樹脂リッチの部分が減少していることを示している。模式的に示せば、図 5-12 のように考える。本実験に使用したプリプレグは、強化材の裏面に母材樹脂が塗布されているものであり、繊維束間に十分に樹脂が含浸されたものでない。成形温度が低く、樹脂の流動性が低ければ、十分な成形圧を与えても図 5-12(a)のように樹脂の体積含有率は変化せず、樹脂の繊維束内への含浸や繊維束自体の移動が困難となることから、プリプレグの初期配置の影響を残した状態で形状凍結される。ある温度以上で成形した場合、樹脂の流動によって図 5-12(b)のように整然と繊維が配向され、繊維含有率も上昇する。曲げ試験で実験した試料でも高い曲げ特性を有する場合は、このように整合配列となる。このようなメゾスケールでの繊維構成によって、強度に違いが表れ、損傷形態にも差異が生じたと考えられる。

図 5-9 の断面観察の結果では、200℃および 240℃の成形条件のものと 280℃との成形条件のものでは損傷の形態が異なる。低温側での成形温度の損傷形態は、3 点曲げの最大せん断力が発生する試験片の短辺方向、すなわち圧子円柱軸と平行方向の繊維束内部がせん断によってき裂が生じ、そのき裂がその繊維束間で連結成長し、その繊維束と直交する繊維束に達して層間はく離を起こす。これが場所を変えて繰り返されることでマイクロクラックが連結し、破壊に進行すると考えられる。但し、樹脂部の損傷ではなく、境界部近傍の繊維束内で主にき裂が進展している。樹脂と繊維の接着力よりも、繊維束内の樹脂と繊維の接着力が強度に影響しているのである。これは、図 5-5 において、曲げ応力の不連続部として表れている。



(a) 200°C



(b) 280°C

図 5-11 成形温度による繊維構成の違い

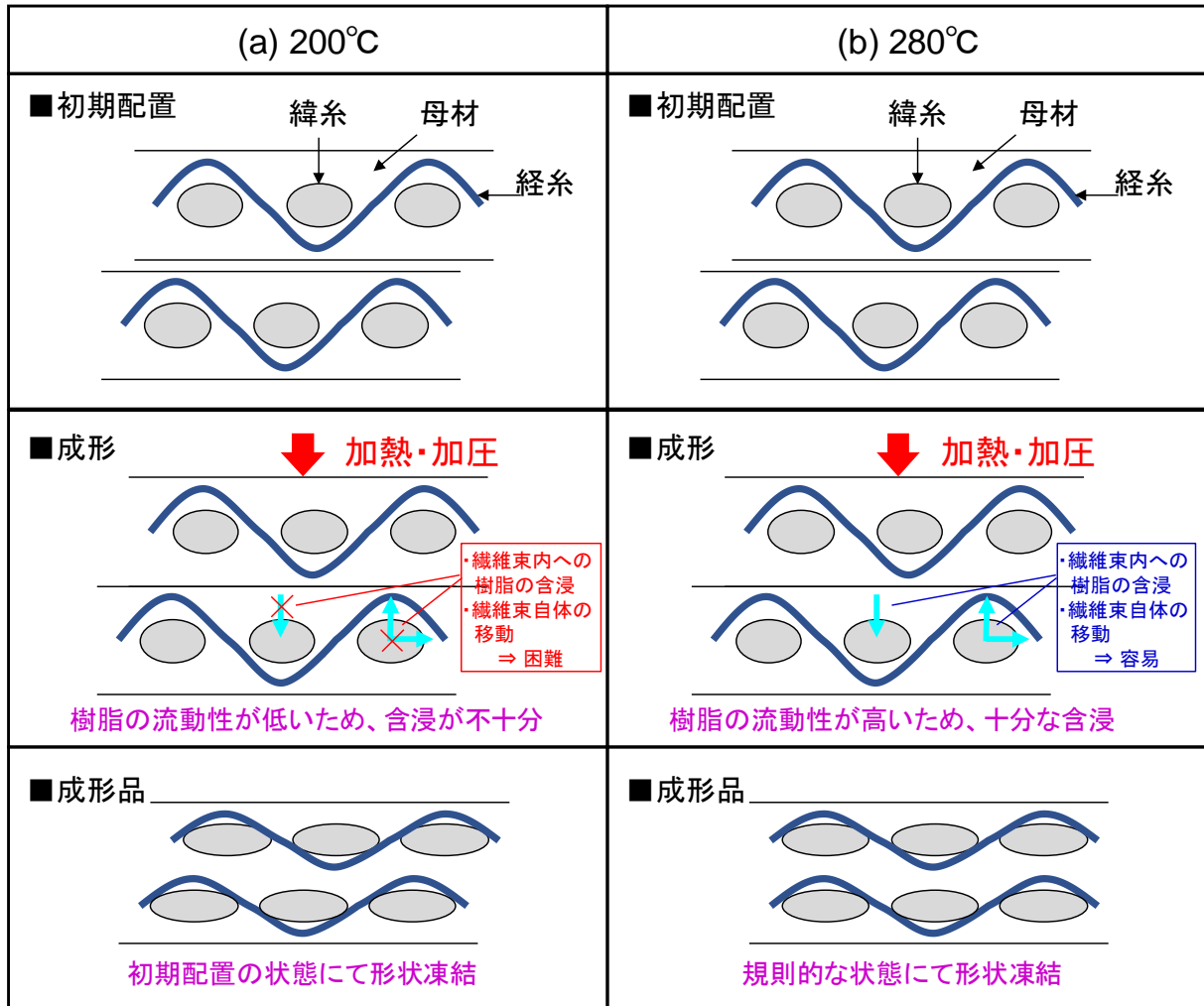
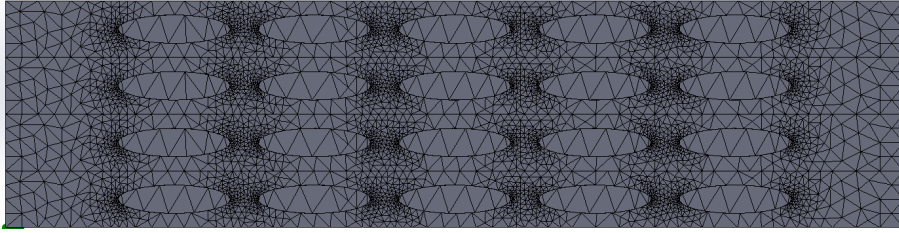


図 5-12 成形温度による繊維構成の違い（模式図）

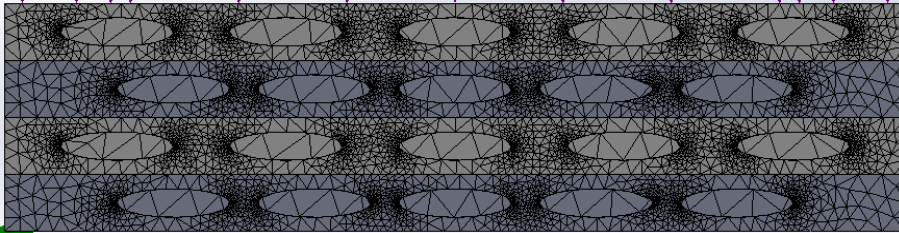
繊維分布のランダム性に強度の差異が生じるかが問題となるが、これまでの研究によれば、ランダム配列の方が規則配列よりも若干高い弾性係数になると指摘されている<sup>9)</sup>。そこで、図 5-13 のような簡易モデルを作製し、CAE によってたわみ変形の差異を比較する。寸法は厚さ 1 mm×幅 16 mm×奥行 10 mm を 4 層重ねた積層構造とする。その層内にだ円柱状の強化材を一方方向にのみ配向させ、幾何配置を層ごとに変える。図 5-13(a)が直交配置、(b)は下から偶数層を 1/2 周期ずれるように、(c)は 3/4 周期ずれるように、(d)は 1/2 周期と 3/4 周期を組み合わせる。材料定数は、強化材をカーボン繊維 Hexcel AS4C とする。製造者より示される機械的特性は、縦弾性係数 150 GPa、横弾性係数 5 GPa、ポアソン比 0.3 である。母材は、アクリル樹脂とする。製造者より示される機械的特性は、縦弾性係数 2 GPa、横弾性係数 318.9 MPa、ポアソン比 0.394 である。拘束条件はモデルの両端を固定し、上面から弾性変形範囲で等分布荷重を与える。

それぞれのモデルの最大たわみを直交配列モデルに対する比で正規化した値を図 5-14 に示す。直交配列の間隔が広がるようなランダム配置の場合にはたわみは大きくなり、(d) のような場合では直交配列と同等となり、従来の指摘のようにランダム性が高くなると強度が増す可能性もあると考える。

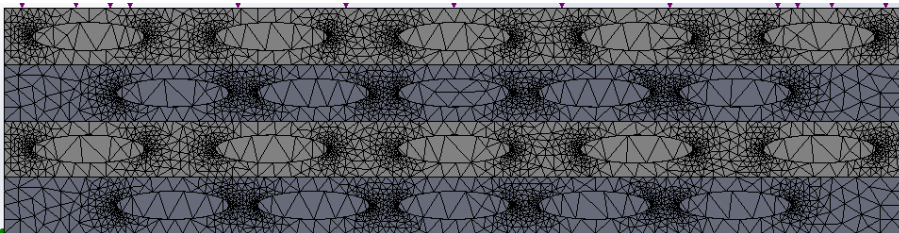
しかしながら、(b)および(c)のように強化材が荷重軸と角度を有して配置した場合は、強度が低下してたわみが大きくなるため、強化材間の応力に影響を及ぼした可能性がある。そこで強化材界面の相当応力分布を図 5-15 に示す。(a)の直交配列では強化材と母材の界面での不連続性は比較的小さく、強化材の応力は大きくない。一方、(b)のランダム配置では強化材内部の応力が高くなっており、ランダム性が強い強化材ではたわみが大きくなる傾向になる。これは、荷重の負荷が材料に及ぼす範囲での機械的特性の均質性に起因すると考えられる<sup>10)</sup>。本解析は、3 点曲げ試験を模擬したものであり、材料全体に大きな変形が生じる程度の負荷を与える。そのため、局所的に強度の低い個所が存在するランダム配置では、応力集中が生じることでひずみが大きくなると考えられる。本実験の圧子部で負荷された場合、ランダム配置の傾向が強い低温側の成形では強化材の貢献が大きくなることから、繊維束の幅であるおよそ 2 mm の位置による周期性が顕著に生じるものと考えられる。



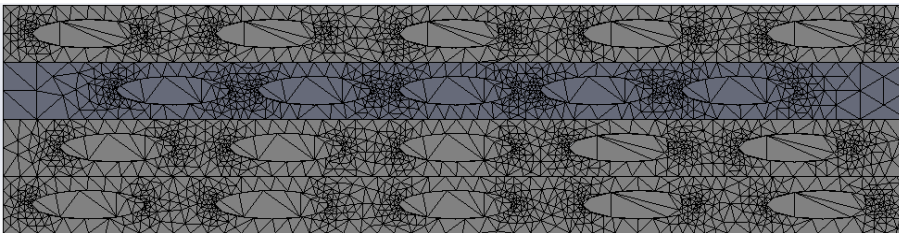
(a) 直行配置



(b) 下から偶数層の 1/2 周期ずれ



(c) 下から偶数層の 3/4 周期ずれ



(d) 1/2 周期ずれと 3/4 周期ずれの組合せ

図 5-13 CAE 解析に用いた材料モデル



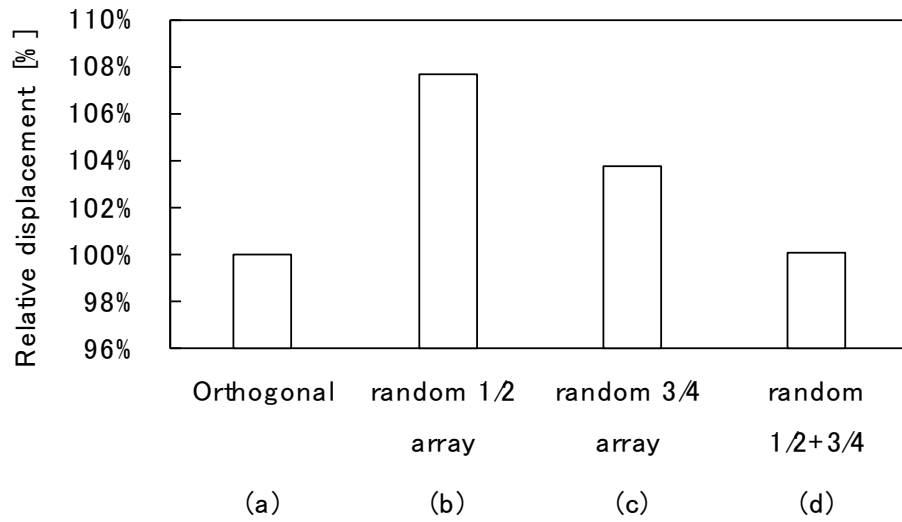
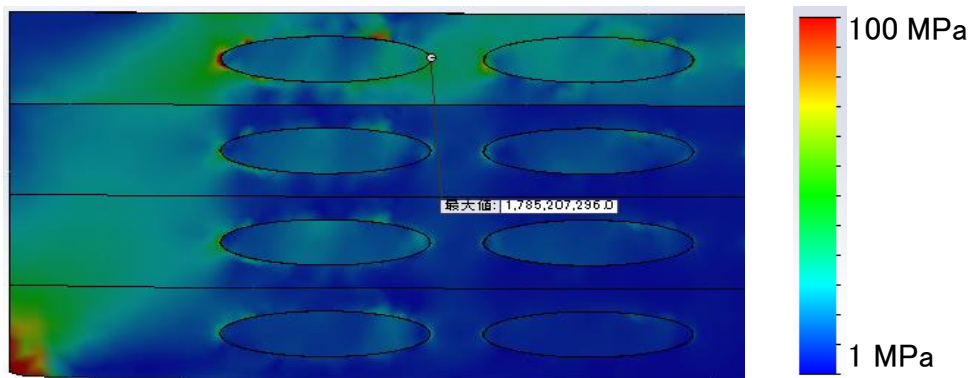
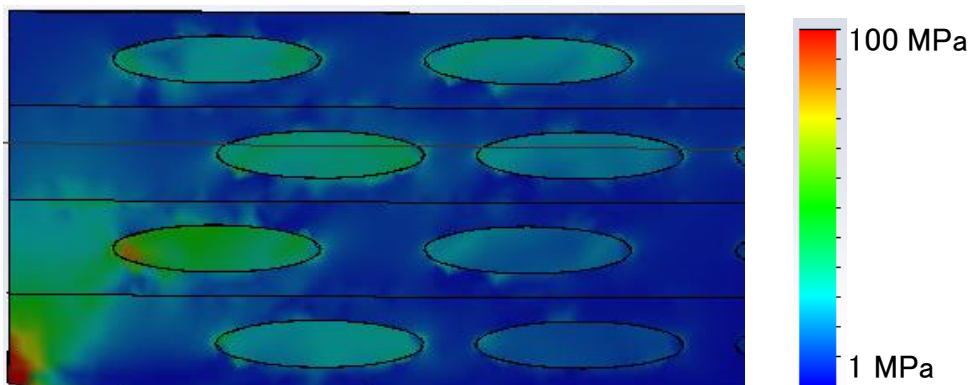


図 5-14 各モデルにおける最大たわみを直交配列モデルに対する比で正規化した値



(a) 直行配置



(b) 2/1 周期ずれと 3/4 周期ずれの組合せ

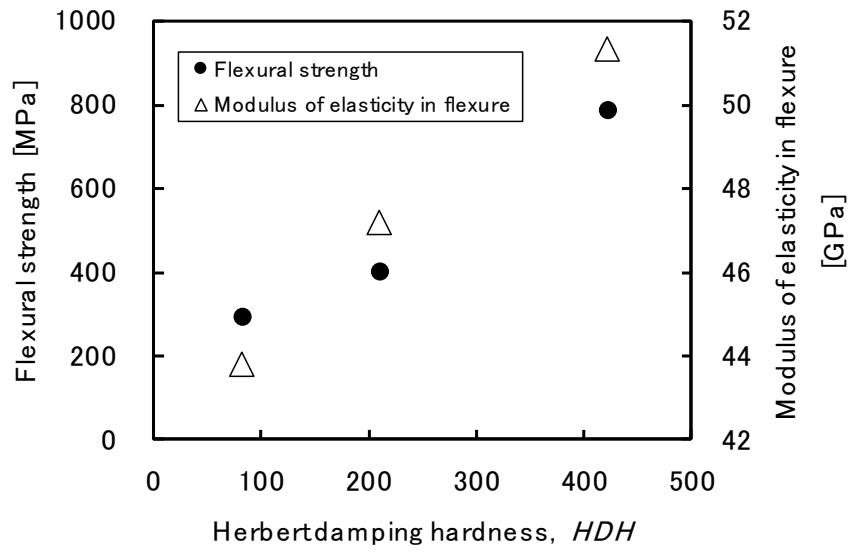
図 5-15 強化材界面の応力分布

### 5.5.3 減衰硬さによる CFRTP の機械的特性の評価

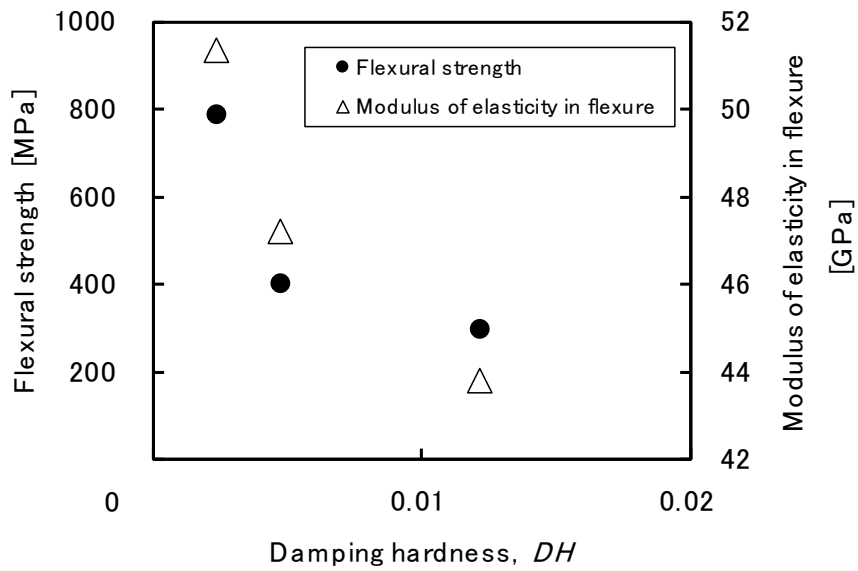
図 5-7 で示すように、成形温度が低いほど試験機の揺動角度の減少が速い。オリジナルのハーバート時間硬さは、試料表面上で試験機が揺動する際の角度の自由減衰の程度が評価されるため、揺動に対する抵抗による仕事が揺動角度の減少として表現される。そこで、ハーバート硬さ ( $HDH$ 、 $DH$ ) と曲げ強度との関係を図 5-16 にまとめる。

図 5-16 は、図 5-6 に示す曲げ強さおよび曲げ弾性率と表 5-2 に示す減衰硬さについて整理したものである。図 5-16(a)の曲げ弾性率および曲げ強さと新ハーバード減衰硬さ  $HDH$  は成形温度に対して正の相関を示す。従来の減衰硬さ  $DH$  では図 5-16(b)に示すように、減衰硬さは成形温度に対して負の相関を示し硬さの変化を表現しにくい。図 5-16(a)では、曲げ強さは線形的に向上し、曲げ弾性率は  $HDH$  が 300 以上となる  $280^{\circ}\text{C}$  では向上率が高い。

このように CFRTP を成形する際は、この新ハーバード減衰硬さ  $HDH$  を基準として評価することが有用である。



(a)  $HDH$  との関係



(b)  $DH$  との関係

図 5-16 ハーバート硬さと曲げ特性の関係

## 5.6 まとめ

新たなハーバード減衰硬さ  $HDH$  を提案し、成形温度の異なる CFRTP の硬さの評価を行った。比較指標として 3 点曲げ試験における曲げ強度との関係について考察を行った結果、CFRTP の複数位置で減衰硬さの評価を行うことで材料の均質性や機械的特性を評価することが可能であった。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 減衰硬さから新ハーバード減衰硬さ  $HDH$  を提案し、ビッカース硬さとの正の相関式を提示した。この  $HDH$  と曲げ特性とは良い対応を示す。
- 2) 試料に用いた CFRTP は、 $200^{\circ}\text{C}$  から  $280^{\circ}\text{C}$  の成形温度において曲げ強さおよび曲げ弾性率は成形温度の上昇に伴い上昇する。特に、曲げ弾性率は  $HDH$  が 300 以上となる  $280^{\circ}\text{C}$  では向上率が高く、断面観察の結果から規則配列を有する  $280^{\circ}\text{C}$  で成形した方が望ましい。
- 3) 成形温度が低いほど測定位置の違いによる減衰硬さのばらつきが大きくなり、繊維束の影響を受けていることが示される。これにより、繊維束内部の接着強度が不足していることが推定できる。

## 参考文献

- 1) 前田豊, 炭素繊維の応用と市場, シーエムシー出版, (2008).
- 2) 井塚淑夫, 炭素繊維－複合化時代への挑戦, 繊維社, (2012).
- 3) 釜江俊也, 田中剛, 山崎真明, 岩澤茂郎, 武田一朗, 山口晃司, 和田原英輔, 関戸俊英, 北野彰彦, 炭素繊維複合材料“ハイサイクル一体成形技術”の研究開発, 第23回独創性を拓く先端技術大賞論文, (2009).
- 4) 影山裕史, 自動車 CFRP 技術の最新動向, まてりあ, Vol. 53 No. 12, pp. 612-615, (2014).
- 5) 平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業「熱可塑性 CFRP による車載用大型複雑形状製品の成形技術の開発」研究開発成果等報告書, 経済産業省, (2014).
- 6) 辺吾一, 石川隆司, 先端複合材料工学, 培風館, pp. 10-12, (2005).
- 7) 木谷要一, 財満鎮雄, 日本機械学会論文集, Vol. 9 No. 36, J-125, (1943).
- 8) Adachi, K. Ogino S. Kawasaki and T. Wakayama, Measurement of the density of molten Feo-SiO<sub>2</sub> slags by the archimedean method, ISIJ Int., Vol. 50 No. 3, pp. 473-475, (1964).
- 9) 福田博, 辺吾一, 複合材料の力学序説, 古今書院, (1985).
- 10) 田代孝二, 高分子結晶の構造と物性予測, 日本結晶学会誌, Vol. 44, pp. 14-19, (2002)

## 第 6 章 結言

本研究は、ものづくり技術の高度化を目指し、強制的な圧痕を伴わない材料の硬さ試験を実現するため、ハーバート硬さ試験機の工業的な実用化を目的とした。

第 1 章では、材料試験における硬さ試験の位置付けや、現在工業用途として一般的に使用される従来の硬さ試験方法とその特徴について示した。

第 2 章では、ハーバート硬さの定義とオリジナルの硬さ試験機から現在の試験機に至るまでの改良の変遷について示した。本試験機の測定原理を単純なモデルについて説明し、振り子の減衰から硬さを評価できる理由と試験機の問題点を整理した。

第 3 章では、従来のハーバート硬さ試験機の問題点を解決するための試験機の改良について述べた。測定精度および作業性の改善を目的として、揺動角度の測定をレーザ変位計により行い、重心調整作業を容易とする改良型ハーバート硬さ試験機を開発した。改良型の試験機にて、ブリネル硬さ基準片（鋼材）を参照値として、測定結果に影響を及ぼす因子である圧子半径、揺動周期および測定対象の表面粗さを変化させた実験により、各種因子の影響を明らかにした。圧子半径が大きくなると圧子の転がり距離が長くなるため減衰硬さは大きくなる。揺動周期が長くなると圧子の転がり速度の低下により摩擦抵抗が増加するため減衰硬さは大きくなる。表面粗さが大きくなると圧子と試料の真実接触面積の増加により摩擦抵抗が増加するため減衰硬さは大きくなる。実験結果から、ブリネル硬さと減衰硬さの関係を明らかにし、減衰硬さから従来のブリネル硬さを推定しうることを示した。

第 4 章では、ハーバート硬さ試験機の工業用途としての有用性を実証することを目的として、ハーバート硬さと材料の機械的性質である引張特性の比較を行った。アルミニウム合金 A1050、A2024、A5052、マグネシウム合金 AZ31、真鍮、純銅、純チタンおよび SUS440 の 8 種類の材料について比較を行い、引張と圧縮で異なる機械的特性を示す AZ31 を除く金属において、減衰硬さは 0.2% 耐力、引張強さおよび加工硬化指数と良い相関を示すことを示した。

第 5 章では、ハーバート硬さ試験の最大の特徴である材料への強制的な圧痕を伴わない非破壊での評価が可能であるという点に着目し、炭素繊維強化樹脂（CFRTP）の成形性の評価へのハーバート硬さ試験を適用した。ハーバート硬さは従来の硬さであるビッカース硬さと負の相関となることから、減衰硬さの逆数を新たな硬さ指標 *HDH* として提案した。成形温度の異なる CFRTP について曲げ試験およびハーバート硬さ試験を行い、曲げ

特性と *HDH* の関係を明らかにした。*HDH* は、曲げ強さおよび曲げ弾性率と良い相関を示した。ハーバート硬さの測定位置を移動することにより、*HDH* の値の大きさとばらつきから CFRTP の繊維束内部の接着強度不足を評価できることを示した。

第 6 章では、本論文の成果を総括した。

先に述べたとおり、ものづくりにおける一般的なプロセスは、次のとおりである。

- 1) 顧客要求に従い設計を行う。
- 2) 設計に基づき製作する。
- 3) 製品の特性を計測および評価を行う。
- 4) 評価結果の顧客要求との適合性を判定し設計に反映する。

この 1) から 4) までを繰り返すことにより、ものづくり技術の高度化がなされる。「測れないものは作れない」という言葉にあるように、製品特性の評価限界がものづくりの限界となる。本研究において開発したハーバート硬さは、強制的な圧痕を伴わない硬さの測定手法およびそこから得られる硬さ指標を新たに提案するものであり、これから工業用途として広く用いられるためには、その適用事例と有用性を示すことが課題である。

本研究では、強制的な圧痕を伴わないというハーバート硬さ試験機の特徴について着目したが、もう一つの特徴は、従来の押し込み型硬さ試験では測定できないような形状への対応である。例えば、刃物の刃先先端部が挙げられる。測定対象に対して振子による圧子の転がりの物理現象から機械的特性を推定する本研究での提案は、適用範囲の拡大が期待できる。利便性においては、可搬性や遠隔測定を実現するため、振子試験機自体に揺動角度検出機能を付与することでの改良が考えられる。昨今の IoT の進展により、センサ技術や通信技術の向上が顕著であり、小型軽量で無線式の角度センサの入手が容易である。これらを活用することによりさらなる試験機の改良が期待できる。ハーバート硬さは、従来の硬さ試験を推定し得ることに加え、従来の硬さ試験では得られない材料の機械的特性を評価できると考える。ハーバート硬さが提供する新たな機械的特性は、ものづくり技術の高度化に貢献できるものと考えられる。





## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、終始変わらぬご指導を賜りました群馬大学大学院理工学府知能機械創製部門松原雅昭教授に深甚の謝意を表します。

また、ご指導および多くの助言と励ましを賜りました群馬大学大学院理工学府知能機械創製部門鈴木良祐助教に心より感謝申し上げます。

本論文の審査ならびに貴重なご助言と励ましを賜りました群馬大学大学院理工学府知能機械創製部門荘司郁夫教授、林偉民教授、半谷禎彦准教授、岩崎篤准教授に厚く御礼申し上げます。

本研究を行うにあたり、多大のご尽力およびご協力を頂きました群馬工業高等専門学校の黒瀬雅詞教授に心から感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、貴重なご助言を賜りました群馬大学大学院理工学府知能機械創製部門鈴木孝明准教授、西田進一助教に心から感謝申し上げます。また、貴重なご意見を賜りました群馬大学名誉教授久米原宏之様、埼玉工業大学福島祥夫教授、河田直樹准教授、井上熱処理工業株式会社社会長井上吉弘様に心から感謝申し上げます。

本研究にご理解とご協力ならびに励ましを賜りました群馬産業技術センター所長宮下喜好様、東毛産業技術センター長鈴木崇様、群馬産業技術センター上席研究員小宅勝様、東毛産業技術センター技術支援係長小谷雄二様、中村哲也様、青柳大志様、前所長眞下寛治様に心から感謝申し上げます。また、入庁以来ご指導を賜り、本研究を行うきっかけを与えて頂きました繊維工業試験場前場長青木隆行様に心から感謝申し上げます。

最後に、群馬大学大学院理工学府知能機械創製部門松原研究室の皆様心から感謝申し上げます。

## 関連論文一覧

- 1) 鈴木良祐, 鎚木哲志, 藤本博之, 瀬田川拓磨, 松原雅昭, ハーバート硬さ試験における金属の減衰硬さと引張特性の関係, 材料試験技術, Vol. 61 No. 3, pp. 216-221, (2016).
- 2) 鎚木哲志, 鈴木良祐, 黒瀬雅詞, 松原雅昭, 田代継治, ハーバート硬さ試験機の実用化に関する研究 (第 1 報)減衰硬さとブリネル硬さの関係, 材料試験技術, Vol. 61 No. 2, pp. 74-78, (2016).
- 3) R. Suzuki, T. Kaburagi, M. Matsubara, Tsugiharuru Tashiro and Toshimitsu Koyama, Hardness measurement for metals using lightweight Herbert pendulum hardness tester with cylindrical indenter, EXPERIMENTAL TECHNIQUES, Vol. 40 No. 2, pp. 795-802 (2016).
- 4) 鎚木哲志, 鈴木良祐, 黒瀬雅詞, 松原雅昭, 田代継治, CFRTP の成形温度が曲げ強度と振子型硬さ試験機による硬さに及ぼす影響, 材料, Vol. 64 No. 12, pp. 1010-1017, (2015).