

# ハーバート硬さ試験機を用いた減衰硬さによる 加工硬化特性の予測

群馬大学大学院 理工学府  
助教 鈴木 良祐

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017012)

キーワード：加工硬化，機械的特性，硬さ試験

## 1. 研究の目的と背景

ハーバート硬さ試験機は振り子型硬さ試験機のひとつである<sup>1)</sup>。ハーバート硬さ試験機はドリルやフライスといった工具の刃先の硬さを測定することができる。このようなことは、通常の押し型硬さ試験機や反発型硬さ試験機では不可能である。ハーバート硬さ試験機で測定される硬さは次の3種類に大別される。

- 1) 振り子がある一定角度片側に傾けて、反対側にどれだけ振れるかで示される目盛硬さ
- 2) 振り子が10回揺動するのに要した時間で示される時間硬さ
- 3) 目盛硬さと時間硬さの比で表される流動硬さ

ハーバート硬さにより、鉛からサファイヤまでの広範囲の材料に対する硬さ測定が可能であるが、この硬さ試験機には次の欠点があった。

- 1) 目盛硬さ評価のために、水準器内の泡の位置の目盛を目視によって読み取らねばならない。
- 2) 時間硬さ評価のために計時する必要がある。
- 3) 流動硬さを直接測定することはできない。

これらの欠点を克服するために、振り子の揺動運動をレザ変位計により測定できるように改良された<sup>2)</sup>。これにより硬さ試験機の揺動運動を電気信号で測定でき、データをコンピュータに取り込むことが可能となった。

ハーバート硬さ試験機の揺動運動は、自由減衰振動として捉えられる。自由減衰曲線から得られる減衰定数 $\alpha$ は高硬度の人工サファイヤから比較的軟らかい高分子材料まで、流動硬さととの間に非常にいい相関が見られる<sup>2)</sup>。流動硬さと等価なものと思なすことが可能な減衰定数を、減衰硬さと定義し新たな材料硬さの指標が得られた。押し硬さや反発硬さでは硬さ測定が困難な人工サファイヤなどの非常に硬い材料から軟らかい高分子材料までの硬さを減衰硬さにより一貫した表示が可能になると考えられる。

ビッカース硬さに代表される既存の硬さは単調負荷に対する材料の変形抵抗であるのに対して、ハーバート硬さは繰り返し負荷に対する材料の変形抵抗を示すものと考えられる。Herbert<sup>1)</sup>はこの考えに基づき、特に流動硬さは金属材料の加工硬化特性と関係があることを示している。既存硬さでは降伏強度や引張強度といった強度特性との関係が示されているが、加工硬化特性との明瞭な関係はないものと考えられる。一方、おおそ減衰硬さとひずみ

硬化指数との間には相関関係がある<sup>3)</sup>。素材の制限等により引張試験を行うことが難しい材料に対して塑性加工にとって有用な情報である加工硬化特性をハーバート硬さ試験による減衰硬さから予測できる可能性がある。本研究では減衰硬さよりばらつきの少ない角速度を用いて加工硬化特性の予測可能性について検討することを目的とする。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置の概要

#### (1) 引張試験装置

引張試験の模式図を図1に示す。試験には万能試験機（島津製作所製：Universal Testing Machine UH-100KNA）を用いた。万能試験機から出力される荷重の電気信号はデータロガー（GRAPHTEC製GL200）で記録される。試験片の伸びは標準軸方向のび計（Epsilon社製：Extensometer 3542-050M-100-ST）により検出され、PCベース計測器（横河電機株製：WE7000）を介してパソコンに取りこまれる。

#### (2) ハーバート硬さ試験機

ハーバート硬さ試験機の写真を図2(a)に示す。試験機の重量は約7.7 kgであり、試験機本体部分はステンレス鋼 SUS304 製である。試験機の左右のアームに備えられている重錘およびバランスウェイトは真鍮製である。重錘はM5、圧子はM4のボルトで試験機に固定されている。圧子として $\phi 2\text{mm}$ の超硬ピンゲージ（新潟精機製MTAA-2-0.001-12）がSK3製接統治具に圧入され、接統治具

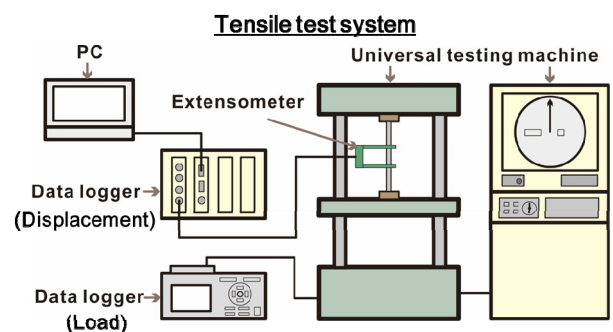


図1 引張試験模式図。

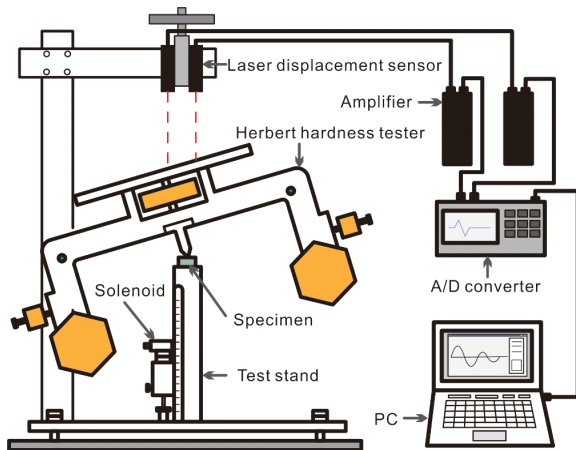
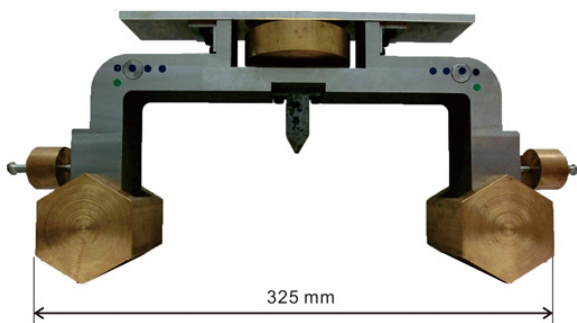


図 2 ハーバート硬さ試験システム. (a)ハーバート硬さ試験機の写真, (b)システム全体の模式図.

を介して SUS304 製ハーバート硬さ試験機本体に取り付けられている。

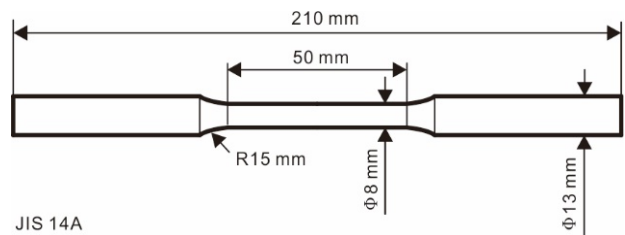
試験機の揺動周期は中央部のバランスウェイトを垂直方向に動かすことにより調整が可能であり、試験機の左右のバランスはアーム部のバランスウェイトを水平方向に動かすことにより調整が可能である。

ハーバート硬さ試験機上部には、揺動角度検出のためレーザー光を受ける反射板として、ステンレス製板材が取り付けられている。

ハーバート硬さ試験システム全体の模式図を図 1(b)に示す。試験台の上に設置された試験片上にハーバート硬さ試験機を載せる。ハーバート硬さ試験機を初期角度に傾け、ソレノイドで固定する。ソレノイドを用いてハーバート硬さ試験機の固定を解除しハーバート硬さ試験機を揺動させる。ハーバート硬さ試験機の角度の時間変化は調べるために、2つのレーザー変位センサ (KEYENCE 製 IL-100) を用いてレーザー変位センサ-反射板間の距離を検出する。検出されたデータをアンプユニット (KEYENCE 製 IL-1000, 1050) を介してデータロガー (GRAPTEC 製 GL200) に収録する。得られた変位データをパソコンに取り込み、揺動角度に変換する。

## 2・2 供試材料および試験片

力学的特性の異なる供試材料として、機械構造用炭素鋼



JIS 14A

図 3 JIS14A 引張試験片.

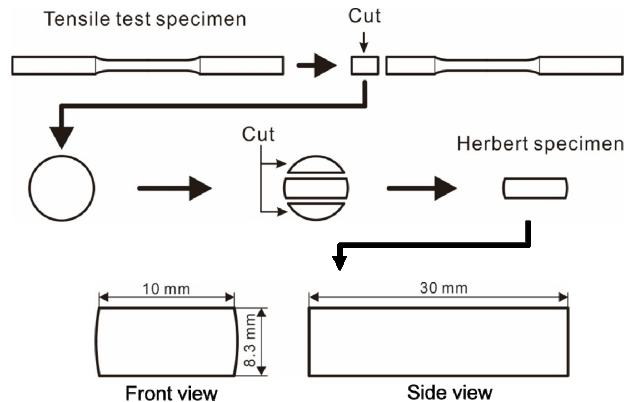


図 4 ハーバート硬さ試験用試験片の製作.

S25C, S35C, S45C, S55C, およびモリブデン鋼 SCM415, SCM435 および SCM440 の  $\phi 13\text{mm}$  の丸棒を用意する。

丸棒から図 3 に示す JIS14A 号引張試験片を切り出す。この引張試験片の標点間距離は 50 mm である。同様の試験片を各材料から 3 本ずつ切り出す。図 3 に示すように、引張試験片のつかみ部の一部を切断し、得られた円柱をさらに軸方向と平行に切断する。これにより得られる約  $30\text{mm} \times 10\text{mm} \times 8.3\text{mm}$  の板材をハーバート硬さ試験に用いた。

## 2・3 実験方法

### (1) 引張試験

万能試験機に JIS14A 号引張試験片を取り付ける。試験片に伸び計を取り付け、クロスヘッド速度  $0.5\text{mm/min}$  の引張試験を行う。引張試験中の伸びおよび荷重を記録し、力学的特性の評価に用いる。同一の試験片に対して 3 回の引張試験を行う。

### (2) ハーバート硬さ試験

ハーバート硬さ試験片の測定面を #1200 まで耐水研磨紙を用いて研磨し、アセトン洗浄により測定面の油分を取り除く。試験片を試験台の上に設置し、試験片の上にハーバート硬さ試験機を載せる。ハーバート硬さ試験機を  $30^\circ$  傾けた状態で、ソレノイドを用いて固定する。揺動角度検出機構の準備を整えて、ハーバート硬さ試験機を解放する。試験片上で揺動するハーバート硬さ試験機の揺動角度の時間変化を測定する。ハーバート硬さ試験機の自由減衰曲線からハーバート硬さをもとめる。同様の硬さ試験

を異なる 5 点で行い、平均値を硬さの代表値として用いる。

### 3. 実験結果

#### 3.1 引張試験

引張試験の結果として、7 種類の材料の代表的な引張応力-ひずみ線図を図 5 に示す。7 種類の材料に対する引張試験応力-ひずみ線図が得られる。

引張応力-ひずみ線図よりヤング率，引張強さ，0.2%耐力および n 値を求め，表 1 にまとめる。引張強さおよび 0.2%耐力はそれぞれ，442~975 MPa，250~635 MPa である。引張強さおよび 0.2%耐力は構造に敏感な性質のため，化学組成の差異により値が広範囲に分布している。一方，構造に不敏感な性質であるヤング率は 98~154 GPa と分布の範囲は引張強さおよび 0.2%耐力よりも分布の範囲が狭い。n 値に関しては機械構造用炭素鋼(S25C, S35C, S45C および S55C)がクロムモリブデン鋼(SCM415, SCM435 および SCM440)と比べて大きい。

#### 3.2 ハーバート硬さ試験

実験的に得られたハーバート硬さ試験機の典型的な自由減衰曲線として，0.2%耐力および引張強さのもっとも低い S25C およびもっとも高い SCM440 上でハーバート硬さ試験機を揺動させた際のハーバート硬さ試験機の自由減衰曲線を図 6 に示す。ハーバート硬さ試験機の揺動による試験片表面の変形は 0.2%耐力および引張強さの小さい S25C の方が，SCM440 と比べて大きいと考えられる。揺動中のハーバート硬さ試験機が有する力学的エネルギーは，圧子と接触している試験片表面の変形により減少するため，変形が大きくなる柔らかい材料ほど早く減衰する。つまり，S25C の自由減衰曲線は SCM440 に比べて早く減衰する。これらのハーバート硬さ試験機の自由減衰曲線は明確な差異が確認できる。すべての試験片について，得

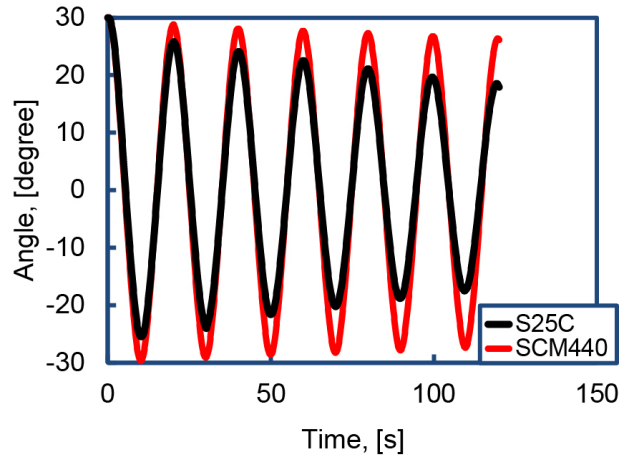


図 6 ハーバート硬さ試験機の自由減衰曲線(S25C と SCM440)。

表 2 各試験片の平均角速度硬さ。

S25C	S35C	S45C	S55C	SCM415	SCM435	SCM440
0.0461	0.0499	0.0537	0.0576	0.0481	0.0529	0.0557

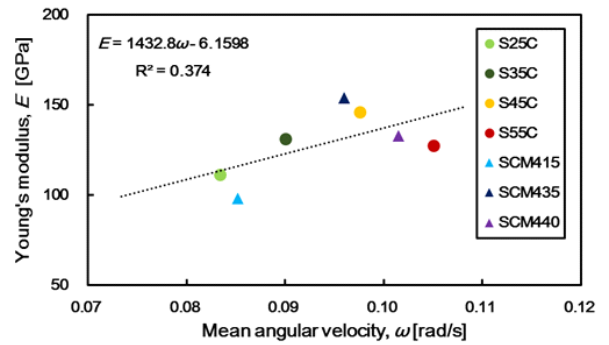


図 7 ヤング率と平均角速度硬さ関係。

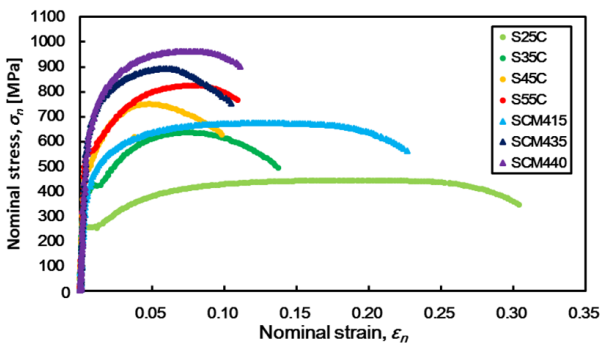


図 5 引張応力-ひずみ線図。

表 1 引張試験結果。

Material	Tensile strength [MPa]	Young's Modulus [GPa]	0.2% proof stress [MPa]	n-value [-]
S25C	442.3	111.2	249.5	0.279
S35C	665.9	131.3	438.7	0.227
S45C	766.6	146.2	500.0	0.249
S55C	867.7	127.5	597.3	0.272
SCM415	684.6	98.0	440.3	0.182
SCM435	894.1	153.8	634.6	0.162
SCM440	974.7	132.8	635.2	0.192

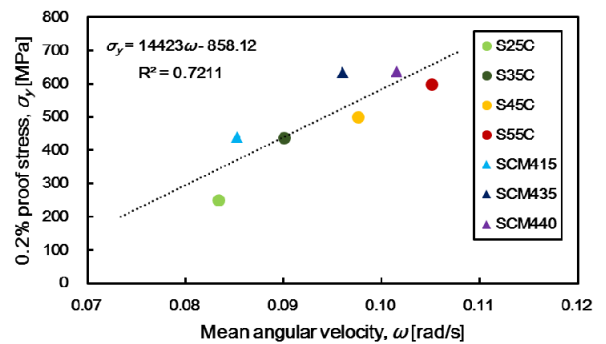


図 8 0.2%耐力と平均角速度硬さの関係。

られた自由減衰曲線から平均角速度硬さを求め表 2 にまとめる。

#### 3.3 引張試験結果と平均角速度硬さの比較

ヤング率，0.2%耐力，引張強さ，および n 値を平均角速度硬さの関数として図 7~図 10 に示す。図中には引張試験によって得られた特性値と平均角速度硬さの関係を線

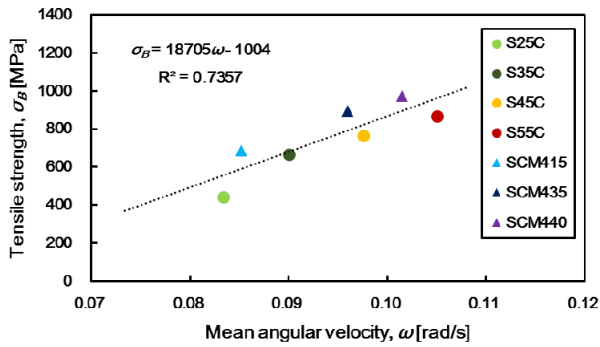


図 9 引張強さと平均角速度硬さの関係。

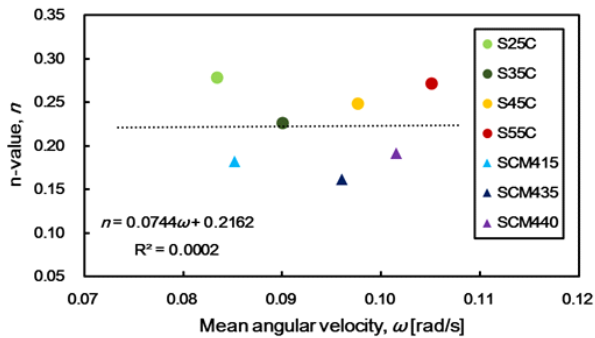


図 10 n値と平均角速度硬さの関係。

表 3 引張特性と平均角速度硬さ間の決定係数。

Tensile strength	Young's modulus	0.2%proof stress	n-value
0.3740	0.7211	0.7357	0.0002

形近似した場合の関係式および決定係数も記載する。引張特性と平均角速度硬さ間の決定係数について表 3 にまとめる。材料の強さを表す 0.2%耐力および引張強さと平均角速度硬さの決定係数は 0.7 を超えており、両者は強い相関を示している。一方で、剛性を示すヤング率や加工硬化指数である n 値と平均角速度硬さ間の決定係数は低い。特に、n 値と平均角速度硬さ間の決定係数は 0.0002 と極めて低い。この数値は n 値と平均角速度硬さの間には相関関係が全くないことを意味している。

一方、既存の研究では n 値と平均角速度硬さの間には相関関係が確認されている<sup>3)</sup>。本研究において平均角速度硬さと n 値の間に相関関係がみられなかった原因は、ハーバート硬さ試験機の揺動減衰におよぼす n 値の影響が、0.2%耐力や引張強さといった材料強度の影響と比較して小さいためと考えられる。ハーバート硬さ試験機の揺動特性におよぼす材料強度と n 値の影響を分離することができれば平均角速度硬さを用いて n 値を推定することが可能と考えられる。

ここで、平均角速度硬さにおよぼす材料強度と n 値の影響を分離するために、図 9 に示す引張強さと平均角速度硬さの関係に注目する。図 9 では実験結果を直線一本で近似した。しかしながら、機械構造用炭素鋼とモリブデン鋼

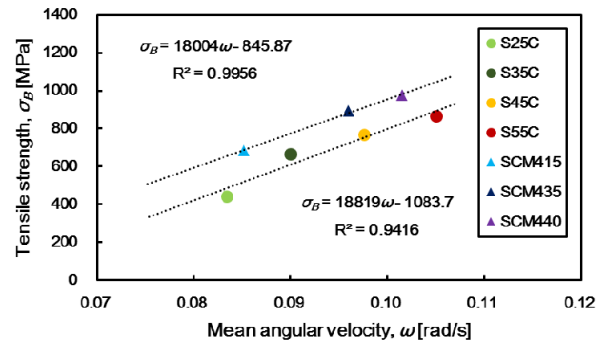


図 11 機械構造用炭素鋼とモリブデン鋼で分けて考えた場合の引張強さと平均角速度硬さの関係。

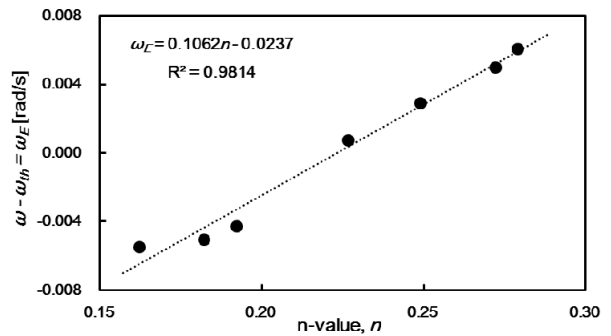


図 12 ω\_E と n 値の関係。

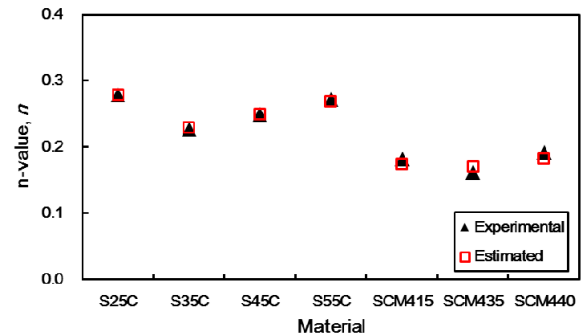


図 13 ω\_E と n 値の関係。

で別の直線に乗っているようにも見える。そこで、機械構造用炭素鋼とモリブデン鋼の引張強さと平均角速度硬さの関係に分けて近似直線を引いた結果を図 11 に示す。機械構造用炭素鋼およびモリブデン鋼と平均角速度硬さ間の決定係数は 0.9 を超えている。機械構造用炭素鋼とモリブデン鋼は表 1 のように n 値において大きな差がある。ここで、図 9 における引張応力 σ\_B と近似式における平均角速度硬さ ω<sub>th</sub> の関係は次式で表される。

$$\sigma_B = 18706 \omega_{th} - 1004 \quad (1)$$

平均角速度硬さの実験値を ω とすれば ω<sub>th</sub> との差 ω\_E は、

$$\omega_E = \omega - \omega_{th} \quad (2)$$

n 値に対して平均角速度硬さの実験値と近似値の差 ω\_E を

図 12 にプロットする。  $\omega_E$  と  $n$  値の間には決定係数 0.98 を超える相関関係が存在する。これを踏まえた  $n$  値を次式に示す。

$$n=9.42\omega-5.04\times 10^{-4}\sigma_B-0.283 \quad (3)$$

この式を用いて推定した  $n$  値を実験値と図 13 で比較する。推定値の  $n$  値は実験値と良い一致を示す。ハーバート硬さ試験を用いて  $n$  値を推定することが可能と考えられる。

#### 4. まとめ

引張試験を行うことが難しい材料に関して、塑性加工にとって重要なパラメータである  $n$  値を、ハーバート硬さ試験を用いて推定可能か調べることを目的として研究を行った。平均角速度硬さと  $n$  値の間には直接的には関係性が認められない。これはハーバート硬さ試験機の揺動挙動におよぼす材料強度の影響が  $n$  値に比べて強いためと

考えられる。引張強度合わせて考えることにより、平均角速度硬さを用いて  $n$  値を推定できる。

#### 謝 辞

本研究を支援してくださった公益財団法人天田財団に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Edward G. Herbert: THE ENGINEER, 135 (1923), 686.
- 2) R. Suzuki・T. Kaburagi・M. Matsubara・T. Tashiro・T. Koyama: EXPERIMENTAL TECHNIQUES, 40-2 (2016), 2.
- 3) M. Matsubara・K. Sakamoto: EXPERIMENTAL TECHNIQUES, 36-3(2012), 75.