

解説

反発硬さ試験の新しい展開\*

New Development of Rebound Hardness Test

松田 健次\*\*  
(Kenji MATSUDA)

**Key Words** : rebound hardness, material testing, impact, restitution coefficient, vickers indenter

1. はじめに

材料を正しく使用するためには、その機械的性質を把握することが不可欠である。引張試験は、代表的な材料試験法であり、得られる応力-ひずみ線図から、降伏応力、引張強さ、ヤング率等、設計に使用される重要な事項を把握することができる。一方、硬さ試験も古くから行われている試験法である。その特徴は、試料を特別な形状に加工する必要が無く、ある程度平滑な面があれば容易に結果が得られることであり、セラミックスのような加工が困難なものや、表面被覆材や微小領域のように引張試験が困難なもの、あるいは製品や設備のように引張試験が実施できないものの機械的特性を評価できる手法としても期待されている。

さて、上記では一口に「硬さ試験」と記載したが、これまでに数多くの硬さ試験法が考案されており、それらの大部分は、下記の3つに大別されている<sup>1),2)</sup>。

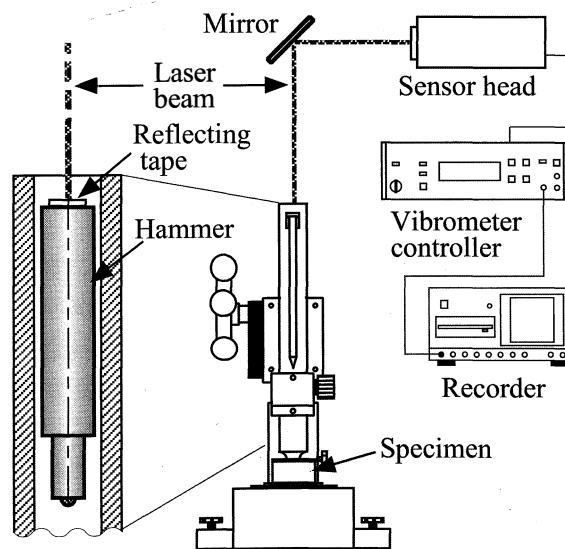
- ① 押し込み硬さ試験：試料どうしを押し付けたり、剛体に近い圧子を試料に押し込むときの変形に対する抵抗の大きさを表す。例：ビッカース硬さ、ブリネル硬さ
- ② 引っかき硬さ試験：試料相互で、あるいは試料を剛体に近い圧子で引っかいたときの傷のつき方で硬さを比較する方法。例：モース硬さ
- ③ 動的(反発)硬さ試験：試料に対して剛体に近い圧子(ハンマ)を衝撃的に押し込むときの変形に対する抵抗の大きさ、あるいは圧子(ハンマ)の反発挙動により硬さを表す方法。例：ショア硬

さ、リーブ硬さ

本稿では、反発硬さ試験に注目し、その特徴と今後の新しい分野への展開の可能性を、主としてビッカース硬さとの比較の観点から期待も込めて記載した。

2. 反発硬さ試験におけるハンマ反発挙動の把握

広く普及している指示形(D形)ショア硬さ試験では、試験片をセットした後につまみを回すと、高さ  $h_0 = 19\text{mm}$  からハンマが自由落下し、試験片に衝突後の跳ね上がり高さ  $h$  を指示部で捉えて、 $HS = 140(h/h_0)$  で定義されるショア硬さ  $HS$  が表示される。ハンマは装置内に収められ、そのままでは外部からその挙動を観測できないため、図1に示すよう



Shore hardness tester (Type D)

図1 ハンマ挙動測定装置図  
[文献3]から転載]

\* 原稿受付 2019年9月1日  
\*\* 非会員, 九州工業大学大学院工学研究院  
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

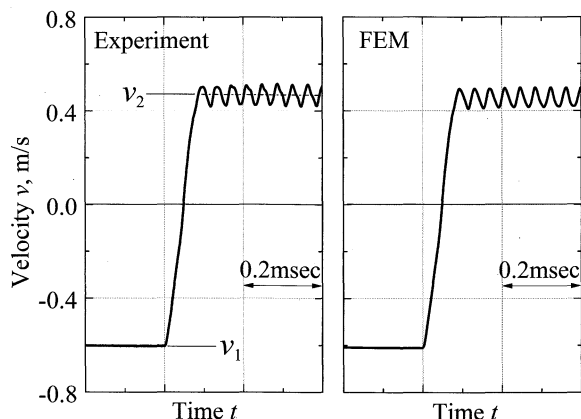


図2 ハンマ挙動の測定例と解析結果  
(試験片：マルエージング鋼)  
[文献3]

に、試験機に付属の指示部を除去し、レーザドップラー振動系のレーザをハンマ上端部に当てることによりハンマの速度変化を調べた<sup>3)</sup>。図2にその測定例を示す。同図には、下記で説明する解析の結果も示している。衝突後のハンマは衝突時に生じた弾性変形によりかなり振動しており、解析結果はハンマ振動も含めて測定結果をよく再現できていることが分かる。なお、最小二乗法により得られた衝突後の波形の平均線から求めた衝突直後の速度 $v_2$ と、衝突直前の速度 $v_1$ を用いて、ショア硬さは $HS = 140(v_2/v_1)^2$ で見積もられる。

図3～6は、さらに反発挙動を詳しく検討するために、有限要素法を用いて、ビッカース硬さの大きく異なる3つの金属、すなわち、7:3黄銅(HV≒60)、S55C炭素鋼(HV≒210)およびマルエージング鋼(HV≒700)を試験片とした場合の結果を比較したものである<sup>3)</sup>。図3は、ハンマ変位の経時変化である。試験片の種類によってハンマの跳ね上がり高さが異なるが、同図の時間スケールで示すと、試験片に衝突している時間は一瞬である。

図4に、衝突荷重の経時変化を示す。ここで、図中の $Ft_1$ 、 $Ft_2$ 、 $Ft_{1,2}$ はそれぞれ、接触してから最大荷重点に達するまでの力積、最大荷重点から完全除荷に達するまで力積、およびその両者の合計の値(= $Ft_1 + Ft_2$ )を示している。最大衝突荷重は、試験片の硬さが増加するに従い増加し、HV≒700のマルエージング鋼を試験片とした場合には、600N程度に達する。なお、最大荷重点ではハンマ速度は0であるため、いずれの試験片の場合も $Ft_1$ はほぼ一致しており、その値は衝突直前のハンマ運動量(= $22.9 \times 10^{-3} \text{Ns}$ (ハンマ質量の実測値37.5gを用いて

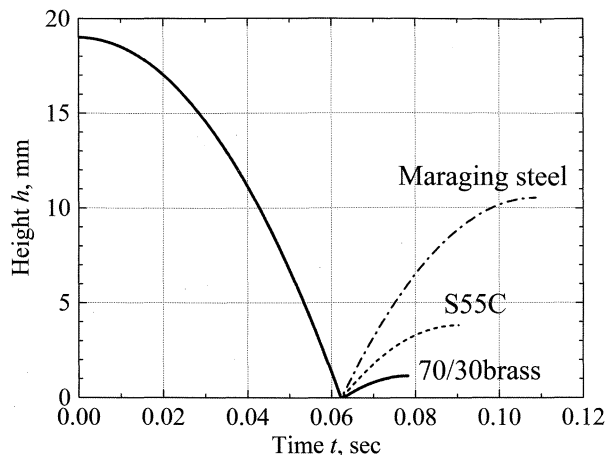


図3 ハンマ変位の経時変化(解析結果)

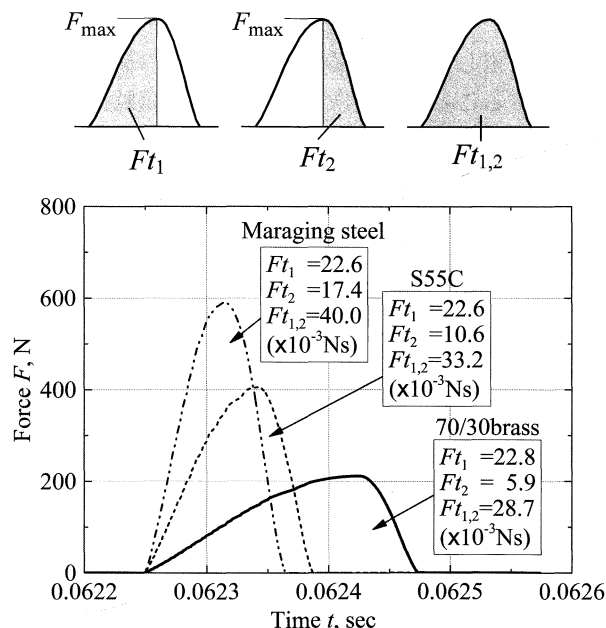


図4 衝突荷重の経時変化(解析結果)  
[文献3]

算出)に近い値となっている。また、試験片硬度が低下するほど負荷・除荷曲線の非対称性が強くなり、除荷過程で得られる力積 $Ft_2$ が小さくなることが分かる。

図5は、圧子先端の押し込み変位と衝突荷重の関係である。図中の $U_1$ 、 $U_2$ 、 $\Delta U$ はそれぞれ、負荷過程で試験片の変形に費やされるエネルギー、除荷過程での弾性回復エネルギー、および試験片の変形によって失われたエネルギー(= $U_1 - U_2$ )を示している。試験片硬度が低下するほど $\Delta U$ が増加し、多くのエネルギーが塑性変形に費やされていることが分かる。ここで注目いただきたいのが、 $U_1$ である。最大荷重点ではハンマ速度は0すなわち運動エネル

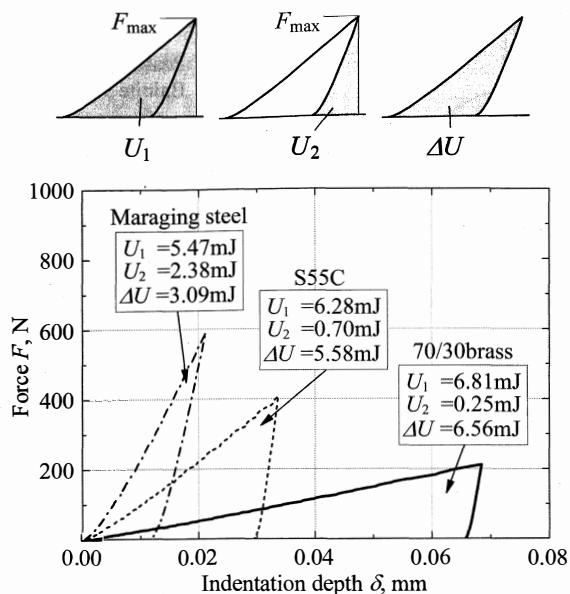


図5 ハンマ先端の押込み変位と衝突荷重の関係 (解析結果)

[文献3]

ギーは0である(衝突時にもハンマは振動しているが、反発後の振動エネルギーの大きさは反発後のハンマが有する全エネルギーの0.5%未満であり、実用上無視できる程度に小さいことが明らかになっている<sup>3)</sup>)ので、衝突前のハンマが有したエネルギー(≒7.0mJ)が全て試験片の変形に費やされるのであれば、いずれの試験片においても、 $U_1 \approx 7.0\text{mJ}$ となるはずである。しかし、 $U_1 < 7.0\text{mJ}$ であり、その差は試験片硬度が大きくなるに従い増加している。この原因は、衝突前にハンマが有していたエネルギーの一部が、ひずみエネルギーとしてハンマに蓄えられているためである。図5から分かるように、 $(7.0\text{mJ} - U_1)$ の値は $U_2$ に近い値となっている。すなわち、シヨア硬さ試験における反発後のハンマが有するエネルギーの半分程度は試験片の弾性回復エネルギーから供給され、残りは衝突時にハンマ自身が蓄えたひずみエネルギーから供給されていることになる。Taborはその著書に、ハンマの反発は圧子と圧痕の弾性回復によって生じると記述している<sup>4)</sup>が、細長い形状をしたシヨア硬さ試験用ハンマにおいては、ハンマの弾性回復の影響が極めて大きいことが分かる。もしハンマが剛体であると仮定して解析を行うと、得られるシヨア硬さは測定値の半分程度にまで小さくなることが明らかになっている<sup>3)</sup>。

シヨア硬さ試験のように、試験中ハンマが試験機から独立して運動している場合には、普遍的な物理法則に基づいて現象を理解することができることも

特徴の一つだと言える。

### 3. ハンマ振動の材料評価への応用

図2に示したように、反発後のハンマはその固有振動数で自由振動している。この振動を定量化するために、図2の速度波形を時間で微分することにより加速度波形に変換し(図6(a))、衝突直後から約4msec間の加速度波形に対して高速フーリエ変換(FFT)を実施することにより、図6(b)に示すような振幅スペクトルを求めた<sup>5)</sup>。ハンマの固有振動数(一次は約26kHz)のところに明確なピークが存在する。

図7に、基本振動数における加速度振幅 $A_{H1}$ とシヨア硬さHSの関係を示す。同図には、前章で用いた3種の材料に加え、レール頭頂部より切り出し

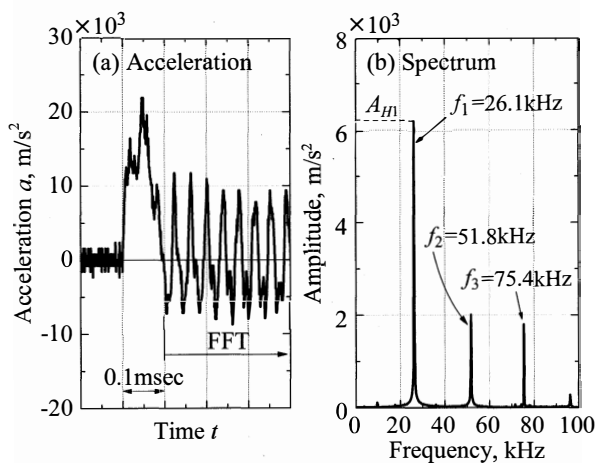


図6 ハンマ上端部の加速度波形と振幅スペクトル (マルエージング鋼)

[文献5]

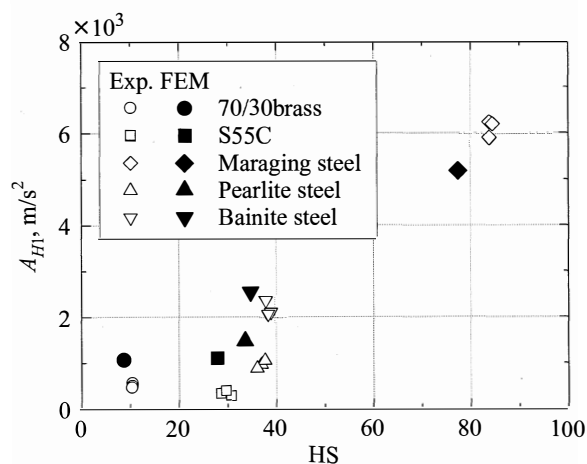


図7 加速度振幅 $A_{H1}$ とシヨア硬さHSとの関係 (実験と解析結果との比較)

たパーライト鋼(HV ≒ 265)と、それとほぼ同じ硬さを有するベイナイト鋼(HV ≒ 276)の結果もプロットしている。実験値と解析値には若干の差が認められるものの、全体的傾向はよく一致しており、いずれも全体的には反発係数が増加するにしたがい振幅も増加している。ただし、硬さがほぼ等しいベイナイト鋼とパーライト鋼を比較すると、ベイナイト鋼の方がパーライト鋼よりも2倍程度大きい。すなわち、反発後のハンマ振動の大きさは、試験片の硬さのみには依存していないことが分かる。

図8<sup>5)</sup>に、引張試験より得られたベイナイト鋼とパーライト鋼の応力-ひずみ線図と、有限要素解析によって得られた衝突荷重の経時変化を示す。ベイナイト鋼の降伏応力は、パーライト鋼よりも30%程度大きいのに対し、降伏以後の加工硬化の程度はかなり小さい。硬さのほぼ等しい両材料の力積 $F_{t,2}$ の差は小さい(ベイナイト鋼の方が約0.6%大きい)が、上記のような応力-ひずみ線図の形態の相違により、ベイナイト鋼の方が最大衝突荷重は約2%大きく、衝突時間は約2%小さくなる。

図9<sup>5)</sup>に、両者の衝突荷重の振幅スペクトルを示す。衝突荷重の山の形態に上記のような変化が生じると、フーリエ変換の性質<sup>6)</sup>により、ベイナイト鋼の振幅スペクトルは周波数軸方向に約2%拡大される。このとき、同図に示すように周波数変化に対する振幅の感度が高い領域にハンマの固有振動数(有限要素解析結果では一次は26.4kHz)が存在すると、衝突荷重に含まれるハンマの固有振動数と一致する振動成分の振幅( $A_{F1}$ )に大きな相違が生じる。衝突後の各振動モードの固有振動数におけるハンマ加速

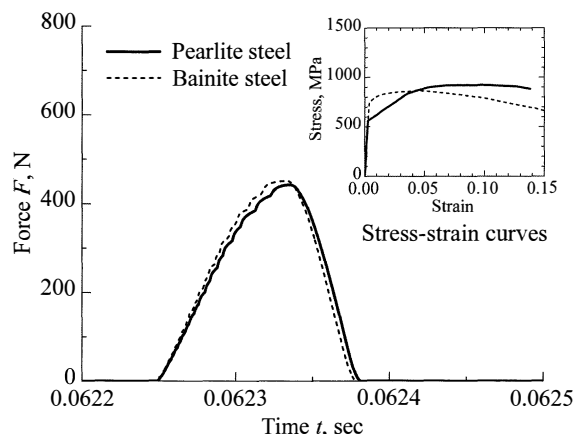


図8 引張試験より得られたパーライト鋼とベイナイト鋼の応力-ひずみ線図と、有限要素解析によって得られた衝突荷重の経時変化 [文献5)]

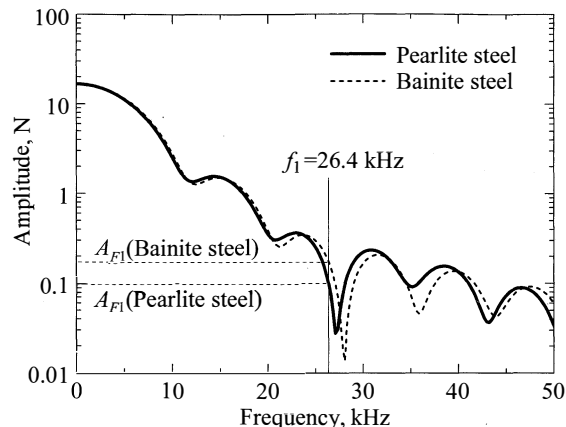


図9 パーライト鋼とベイナイト鋼の衝突荷重の振幅スペクトル(解析結果) [文献5)から転載]

度の振動振幅は、その振動数に一致する衝突荷重の振動振幅に比例するため、ハンマ振動にも顕著な相異が生じることになる。この現象は、測定物の「硬さ」以外の力学的特性の識別に応用できるものと期待され、めっきと下地材との付着強度の評価を試みた例も報告されている<sup>7)</sup>。

#### 4. 新しい反発硬さ試験法の提案

##### 4.1 押し込み硬さ試験法と比較した場合の既存の反発硬さ試験法の特徴と課題

表1は、押し込み硬さ試験と反発硬さ試験のそれぞれの代表として、ビッカース硬さ試験機とショア硬さ試験機の諸元を比較したものである。ここで、ビッカース硬さ試験機の各項目の値は、ウェイト方式を用いた一般的と思われる市販の試験機のカタログ<sup>8)</sup>から引用した。一方、ショア硬さ試験機は、2章で示した解析結果<sup>3)</sup>を利用した。ショア硬さ試験における圧子接近速度はビッカース硬さ試験より4桁程度大きい。また、ビッカース硬さ試験では、試験荷重での保持時間が、日本工業規格(JIS Z 2244:2009)では10~15秒と規定されているが、ショア硬さ試験の場合、圧子が試験片に接触している時間(衝突時間)は試験片の硬さが増加するに従って低下し、2章で示した3試料においては $10^{-4}$ 秒のオーダーであり、ビッカース硬さ試験のJIS規定時間より5桁程度小さい。すなわち、ビッカース硬さ試験では、圧子の負荷開始から除荷の終了まで、上記保持時間+負荷・除荷時間を要するのに対し、ショア硬さ試験では、ハンマが自由落下を開始してから反発後に最大高さに到達するまでに要する時間は0.1秒程度である。押し込み硬さ試験と比較して、反発硬

さ試験は原理上、試験時間を著しく短くすることができるという利点を有している。

なお、シユア硬さ試験機では、ハンマは装置内部に収められ装置本体で試験片を押さえる構造となっているが、ハンマのみが試験片に接触するような構造にすれば、試験機本体が耐えられないような厳しい環境下にある物体も比較的容易に測定できる可能性があり、衝突時間が短いことにより、ハンマのダメージが低減することも期待できる。例えば、小さなセラミックス球を比較的高速で発射し、高・低温の金属の反発係数を測定した例も報告されている<sup>9)</sup>。

一方、表1から既存の反発試験法では限界があることも見えてくる。シユア硬さ試験における最大衝突荷重は試験片の硬さが増加するに従い増加するが、その値は、ビッカース硬さ試験の最大試験荷重(=490.3 N)をも凌駕する。すなわち、シユア硬さ試験においては、最大試験荷重でビッカース硬さ試験を実施する場合のように、比較的広い範囲の平均的な試料の特性が測定値に表れていることになる。より小さい領域や表面被覆材の特性を評価するには、ハンマ質量あるいは衝突速度を低減して、ビッカース硬さ試験のように試験荷重(衝突荷重)を低下させる必要があると考えられる。ただし、シユア硬さもリープ硬さも、所定のハンマを所定の高さからあるいは所定の速度で測定物に衝突させた場合の反発高さあるいは反発速度を尺度として「硬さ」が定義されているため、この条件からはずれた場合には新たに「硬さ」の算出方法を定義する必要がある。ここで、各試験法で独自に定めた「硬さ」の物理的意味が曖昧であると、異なる試験法で測定された硬さ値を比較することは困難になる。

表1 ビッカース硬さ試験機とシユア硬さ試験機の諸元の比較

項目	ビッカース硬さ試験機(ウエイト式) <sup>8)</sup>	シユア硬さ試験機(D形=指示形)
試験荷重(衝突荷重) $F, N$	9.807 ~ 490.3 固定: 8段階	約200 ~ 600 (試料に依存)
圧子接近速度 $v_1, mm/s$	0.060, 0.12	610(落下高さ $h_0=19mm$ )
保持時間(衝突時間) sec	5 ~ 999 (JIS : 10 ~ 15)	約 $(1 \sim 2) \times 10^{-4}$ (試料に依存)
測定対象	くぼみの対角線長さ $d$ (mm)	反発高さ $h$ (mm)
硬さの定義	$HV = 0.1891 \frac{F}{d^2}$	$HS = 140 \frac{h}{h_0}$

## 4.2 反発係数を用いた評価

動きが拘束された試料にハンマを正面衝突させた場合、反発係数 $e$ は次式で定義できる。

$$e = -\frac{v_2}{v_1} = \left| \frac{v_2}{v_1} \right| \quad (1)$$

ここで、 $v_1$ はハンマの衝突直前の速度、 $v_2$ は衝突直後の速度である。反発係数は衝突の運動を解く際に用いられる数値であり、この値がハンマ衝突による試料の変形挙動によってのみに決まるのであれば、反発係数は試料の機械的特性を評価できる有力な因子になると期待できる。

著者が身近にある高校の教科書や物理の辞典・参考書を調査したところ、反発係数は材質によって決まり、速さには無関係であると説明されているものが意外にも多い。しかし、球体が衝突した場合の反発係数は、衝突速度の低下とともに増加し<sup>10)</sup>、極めて低速度においては1に近づく<sup>11), 12)</sup>ことが古くから知られている。この結果は、シユア硬さ試験やリープ硬さ試験のように、先端が球状を呈したハンマを使用すると、衝突条件(例えば衝突速度)の異なる結果を直接比較することや、低衝突速度による評価が理論的に困難であることを示唆している。

異なる観点からも、球状圧子ハンマを用いる場合には留意が必要である。衝突荷重が低下すると、測定精度に及ぼす圧子先端近傍の加工精度の影響が大きくなるが、ダイヤモンドはその結晶構造のために、精確な球面に加工することが困難である。一方、超硬合金のような高硬度金属やセラミックスを用いて圧子を製作すると、圧子と同等以上の硬さを有する試料の測定が困難になる。

## 4.3 先端圧子ハンマの提案

著者らは、球状圧子を用いることによって生じる上記の問題点を一挙に解決する手法として、ビッカース圧子のような角錐ダイヤモンド圧子を先端に付与したハンマの使用を提案している。図10は、市販のシユア硬さ試験用ハンマ(ハンマA)と、これとほぼ同じ形状・寸法を有するステンレス鋼製の軸の先端にマイクロビッカース硬度計用の圧子を取り付けたハンマ(ハンマB)を、種々の高さから自由落下させてベイナイト鋼表面に衝突させた場合の反発係数である<sup>13), 14)</sup>。ハンマAの場合、これまでに報告されていた通り落下高さの低下とともに反発係数は増加しているが、1に近づく前に増加の程度が急減している。おそらく理想的な球面形状からのずれに

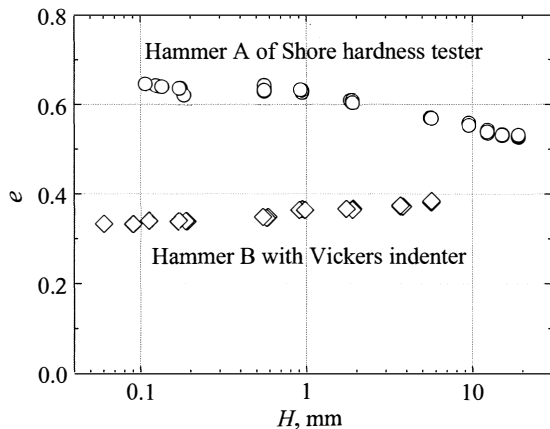


図10 反発係数の落下高さ依存性に及ぼす圧子形状の影響(試験片:ベイナイト鋼)  
[文献13), 14)]

よりこのような結果になったものと考えている。一方、ハンマBの挙動はハンマAの真逆であり、落下高さの増加とともに反発係数は増加する。ハンマBがこのような落下高さ依存性を示す主要因は、図5に示したように、衝突時にハンマに多くのひずみエネルギーが蓄えられるが、ハンマ軸部に蓄えられるひずみエネルギーの落下高さ依存性が、試験片の変形に費やされるひずみエネルギーのそれよりも大きいことと考えられている<sup>13)</sup>。そこで、剛性の高い軸を用いれば、落下高さによらず一定の反発係数が得られる反発硬さ試験が実現できると期待され、高剛性の軸を有するハンマを用いて検証が行われている<sup>14), 15)</sup>。

なお、反発硬さ試験はその特徴から、特に現場での評価手段として強い支持を得ているが、ビッカース圧子ハンマを使用することによりさらに現場での試験の利便性が上がる可能性も明らかになってきた。現場にある設備、機械、部品は、潤滑油や防錆油で覆われていることも少なくないと思われるが、これが測定値に影響を及ぼすのであれば、測定前に試験面を清浄にし、場合によっては試験後に再びそれらを塗布する必要がある。性状の異なる2種類の潤滑油を金属表面に塗布してハンマを衝突させた実験では、球状圧子を付与したハンマの場合、潤滑油性状や衝突速度によって潤滑油の無い場合とは異なる結果が得られるのに対し、ビッカース圧子を付与したハンマでは、潤滑油を塗布しても反発係数に顕著な変化は認められなかった<sup>16)</sup>。

## 5. おわりに

反発硬さ試験は、衝突現象を利用した学問上も興味深い手法である。反発硬さ試験では、「時間」の因子が加わるため押し込み硬さ試験より検討すべき事項が増加する。例えば、試験片の固定方法が測定値に影響を及ぼすメカニズムについても検討されている<sup>17)</sup>。反発硬さ試験はばらつきが大きいとの声も耳にしたことがあるが、硬さ試験時に生じている現象を正しく把握し、それを支配している普遍的な物理法則が理解できれば、これまで実験のばらつきと見なされ注目されていなかったデータから、新たな情報も得られるものと期待される。本稿が何らかの参考になれば幸いである。

## 参考文献

- 1) Tabor, D.: The Hardness of Metals, Oxford Clarendon Press, (1951), 1.
- 2) 山本健太郎, 飯塚幸三: 計量管理技術双書(7) 硬さ, コロナ社, (1974), 11.
- 3) 松田健次・兼田楨宏: 有限要素法によるショア硬さの解析, 日本機械学会論文集(A編), 66, 652 (2000), 2113.
- 4) 文献1)の118ページ.
- 5) 松田健次, 藤榮淳: ショア硬さ試験におけるハンマ振動の解析, 日本機械学会論文集(A編), 70, 700 (2004), 1741.
- 6) たとえば, 佐藤幸男: 図解メカトロニクス入門シリーズ信号処理入門(改訂2版), オーム社, (2000), 126.
- 7) 松田健次, 池田雅美, 都留豊: 反発硬さ試験による表面被覆材のはく離評価, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, 東京, 2003-5 (2003), 287.
- 8) 株式会社ミットヨ: 硬さ試験機総合HM/HV/MZT/HR/HHシリーズ, Catalog No.17001 (11), (2018), 16.
- 9) Yamamoto, T., Yamamoto, M. and Watanabe, M.: Trial of Low-Temperature and High-Temperature Hardness Testing Using the Small-Ball Rebound Test eNM3A10, Journal of Physics: Conference Series 1065 (2018), 062002.
- 10) Hodgkinson, E.: On the Collision of Imperfectly Elastic Bodies. Report Britt. Assoc., (1834), 534.
- 11) Andrews, J. P.: Experiments on impact. Proc Phys Soc, 43, (1931), 8.
- 12) Goldsmith, W.: Impact, Arnold, London,

- (1960), 257.
- 13) 松田健次, 本山秀明: 反発硬さに及ぼす圧子形状の影響, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, 東京, 2007-5 (2007), 83.
- 14) 松田健次, 吉川毅: 先端圧子ハンマを用いた反発硬さ試験, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, 福井, 2010-9 (2010), 197.
- 15) 松田健次, 橋口武尊, 末松正典: 先端圧子ハンマを用いた反発硬さ試験 - 反発係数に及ぼす衝突荷重低減の影響 -, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議2014 春 東京 予稿集, (2014), 139.
- 16) 松田健次, 林田信吾: 球体および先端圧子ハンマによる潤滑面の反発係数の測定, 第43回石油・石油化学討論会予稿集, (2013), 158.
- 17) 松田健次, 浦川大地, 藤原宏太: ビッカース圧子を付与したハンマによるガラスの反発硬さ試験の試料固定法, 材料試験技術, 61, 2 (2016), 79.

松田 健次



1990年3月 九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了. 1990年4月九州工業大学工学部講師. 現在, 九州工業大学大学院工学研究院教授. 硬さ試験, 接触問題の他, トライボロジーに関する研究に従事. 趣味は, 鉄道模型.