

# 衝突式多目的硬さ試験機の基礎的研究 (先端球圧子と試料平面との衝突 その1)

正 石橋達弥(新浮大) 正 下田 茂(新浮大)

## 1. 緒言

衝突式硬さ試験機の代表例はツヨフである。軽量・簡便等の利点を有する反面、プラスチック類に対する指示値が硬い金属とはほぼ同じ<sup>(1)(2)</sup>といった、硬さが弾性係数の顕著な違いの中に埋没する欠点もある。もし、衝突力も同時に測定すれば、この種の問題の解決とか、さらに多くの機械的性質も導出し得る多目的な性格と、測定における全自動化とその容易性、短時間等の工業的利点を持つ試験機が期待できる。

本報告は、試験機の基礎としての先端球圧子と試料平面の衝突を扱ったもので、従来考慮しなかった先端球保持軸の弾性効果を明らかにし、最大衝突力と圧子の跳ね上がり高さの2測定量による、圧子と試料の弾性パラメータの式を示した点、それをプラスチックへ適用した結果等について述べる。

## 2. 記号

w, h<sub>0a</sub>, h<sub>ra</sub>: 圧子の重さ, 落高, 跳高 Ha=h<sub>ra</sub>/h<sub>0a</sub>: 反発率 D: 先端球直径 d<sub>m</sub>: 最大接触直径  
d<sub>p</sub>, δ<sub>p</sub>, D<sub>p</sub>: 永久くぼみ径の直径, 深さ, 曲率半径の2倍 E<sub>i</sub>, E<sub>s</sub>, μ<sub>i</sub>, μ<sub>s</sub>: 球と試料のヤング率, ポアソン比  
f(E)=(1-μ<sub>i</sub><sup>2</sup>)/E<sub>i</sub>+(1-μ<sub>s</sub><sup>2</sup>)/E<sub>s</sub>: 圧子(先端球)と試料の接触点に関する弾性パラメータ  
n: マイヤ指数 F<sub>m</sub>: 最大衝突力 F<sub>r</sub>: 球と試料の弾性回復開始時の衝突力 L<sub>0</sub>, d<sub>0</sub>, E<sub>0</sub>, λ<sub>m</sub>, K<sub>E</sub>, h<sub>k</sub>: 球保持軸の有効長さ, 直径, ヤング率, 最大縮み, 貯せらるる弾性エネルギー, その回復による圧子の跳高相当分

## 3. 提案されている衝突の式とその問題点

球を試料平面へ落下衝突させた時、球は跳ね上がり、試料には永久くぼみが生じ、球の失なうエネルギーは全くくぼみの生成に使われたとする。衝突の後半における接触関係を反転させて、球と凹面との弾性接触問題と考之、Hertzの理論を適用すれば式(3-1)を得る。接触の際にこの部分に貯せらるるエネルギー  
$$d_p = [6DD_p F_m f(E) / 4 \{D_p/2 - D/2\}]^{1/3} \quad (3-1) \quad (\text{by Prescott})$$
が、衝突後の圧子の位置エネルギーに等  
$$w h r a = 0.6 f(E) F_m^2 / d_p \quad (3-2)$$
しいと置けば式(3-2)となる。この時 d<sub>m</sub>=d<sub>p</sub>。今、球と試料が w, h<sub>0a</sub>, D, f(E) の条件で弾性衝突したとすれば、接触径は Hertz の式より  $d_e = [15 w h a f(E) D^2]^{1/5}$  となるので、A<sub>0</sub>=d<sub>p</sub>/d<sub>e</sub> と考之、マイヤの法則: F<sub>m</sub>=(定数) d<sub>p</sub><sup>n</sup> も成り立つとして、A<sub>0</sub> × f(E) の式 (d<sub>p</sub> を消去した) と Tabor の場合<sup>(3)(4)</sup> について示せば次式となる。一方、飯塚は d<sub>m</sub> ≫ d<sub>p</sub>, F<sub>m</sub> ≫ F<sub>r</sub> が認められること、エネルギー収支の点等から別の式を提案している。実際これらの式を用いると、両者による Ha=1 の点での違い [Tabor: A<sub>0</sub>=1 (Hertz の式と一致)<sup>(5)</sup>, 飯塚: A<sub>0</sub><1, (図6参照)], その結果その点での約30%に及ぶ f(E) 値の差が問題となり、Ha>0.6 での A<sub>0</sub> の式の点, n が式に含まれる必要性, 先端球圧子: 以下の式(3-2)がどのような形で成り立つか等の諸点を解決する必要がある。

$$A_0 = d_p / d_e = d_p / [15 w h a f(E) D^2]^{1/5} = [(192/75 H a) \{ (n+2)/4 - (2n-1) H a / 8 \}^2]^{1/5} \quad (3-3)$$

$$f(E) = [2(5/3)^2 (w h a^3) D H a^2 \{ (n+2) \{ 1 - (2n-1) H a / (2n+4) \} \} / F_m^5]^{1/2} \quad (3-4)$$

## 4. 先端球圧子による実験, 結果および考察

4.1 実験について 装置は図1に示す単振子方式のもので、約50kg重の試料受台④は装置台⑤に固定されている。試料押さへ力ほどの試料にも300kgを用いた。圧子懸架部は3軸方向へ移動できるので、試料④を固定後は衝突面を任意に壁せる。角度板④の最小目盛は0.1度である。圧子の種類・寸法を表1に示す。形状は図2のような先端に超硬合金球を接着固定した型である。表2に金属試料を示す。硬さ基準片の E<sub>s</sub> は、断面の硬さ(M.ピッカーズ)測定後、本為等の研究を参考に<sup>(7)</sup>して決めた。他は曲げ試験の値、ポアソン比は、鋼は0.29, 他は0.33とした。試料面のくぼみ径と深さは、工場顕微鏡を用い(13プロム), 倍率

日本機械学会北海道支部 No.782-1 第21回講演論文集 (78-10-15室蘭)

400, 試料面を基準として測定した。衝突力の検出は、球保持軸中央部に貼った歪ゲージにより、歪計の出力はメモリスコープとピーク値ホルド計の2個所で記録した。衝突力の校正は、①黄銅棒を用いたのホフキンソン方式 ②衝突力の写真解析を基にしたの運動量と力積の関係 ③静的圧縮試験の3種を行なった。①による結果が最もバラツキが大きかった(どの圧子でも)が、その平均値は③の場合とほぼ一致したことから、以後の結果の整理・解析には静的圧縮試験の値を用いた。

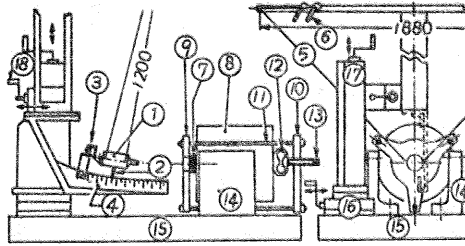


図1 実験装置

Indenter Symbol	Indenter's body					Tip ball		
	Material	$E_0$ $\times 10^4$ kg/cm <sup>2</sup>	W kg	$L_0$ cm	$d_0$ cm	Material	$E_t$ $\times 10^4$ kg/cm <sup>2</sup>	D cm
SS3-I	Steel	2.18	0.663	2.86	0.925	Tungsten carbide (cobalt)	6.2	0.3
SS3-II			0.565					
SS5			0.678	2.98	0.955			0.5

表1 圧子の種類・寸法

Material	Hardness	$E_s$ $\times 10^6$ kg/cm <sup>2</sup>	$f(E)$ $\times 10^4$ kg/ks
The standard block for Shore Hardness (Steel)	100	1.92	0.63
	91.9		
	81.3	1.95	0.62
	69.1		
	52.5	2.00	0.61
VHS	39.4		
	30.8	2.05	0.60
	20.9		
VHN		2.10	0.59
		0.94	1.10
		1.17	0.92

表2 試料

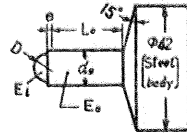


図2 圧子形状

4.2 結果と考察  $C_0'$ を次式のような形で与え、データを整理した結果を図4の○印として示す。

$$C_0' = w(hra + \delta_p) / [f(E)F_m^2/d_p] \quad (4.2.1)$$

これは飯塚と同じく、式(3.2)の校正を意味するが、同じ試料でも  $h_0a$  が高いほど ( $F_m$  が大ほど)  $C_0'$  は大きく、圧子・試料の違いにより  $C_0'$  の値が異なる点に観察され、定数とみなせない。そこで、本実験の圧子は、球図5(a)とは異なり先端に細い軸を有する形状に注意し、落下エネルギーの一部が、衝突面と保持軸の2個所で貯えられるものと考えてみる。今、(1)球と保持軸の接触部とそれ以降の変形は全て軸のみの変形(2)衝突面と軸の2個所に貯えられる弾性エネルギーは同時に解放されるとして図5(b)、以下の式を得る。

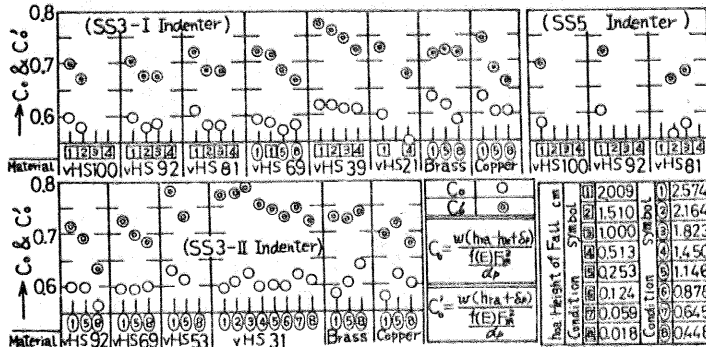


図4  $C_0'$  と  $C_0$  (式(3.2)) について

個所で貯えられるものと考えてみる。今、(1)球と保持軸の接触部とそれ以降の変形は全て軸のみの変形(2)衝突面と軸の2個所に貯えられる弾性エネルギーは同時に解放されるとして図5(b)、以下の式を得る。

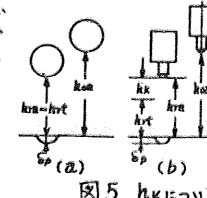


図5  $h_k$  について

$$KE = F_m \lambda w / 2 = 2L_0 F_m^2 / \pi d_0^2 E_0 \quad (\because \lambda w = 4L_0 F_m / \pi d_0^2 E_0)$$

$$h_k = KE / w = 2L_0 F_m^2 / \pi d_0^2 E_0 w \quad (4.2.2)$$

$$hra = hrt + h_k, \quad hrt + \delta_p = C_0' [f(E)F_m^2/d_p] / w$$

$$\therefore C_0' = w(hra - h_k + \delta_p) / [f(E)F_m^2/d_p] \quad (4.2.3)$$

図4の○印で  $C_0'$  を示すが、若干バラツキが目立つものもある。

$$C_0 = 0.6 = w(hra - h_k + \delta_p) / [f(E)F_m^2/d_p] \quad (4.2.4)$$

が、全体的に眺めると(4.2.4)の関係を与えて得る。次に、データを  $A_0$  の形で整理して図6に示す。Tabor, 飯塚の式から、代表値  $n=2.25$  と弾性接触に相当する  $n=3$  の場合を示してあるが、本実験では  $n$  を考慮するだけの結果が得られる、むしろ1本の曲線とみれる。問題となるのは、 $0.7 < Ha < 1$  の範囲であるが、 $Ha = 1 \rightarrow A_0 = 1$  とするより  $A_0 \sim Ha$  の

$$A_0 = Ha \cdot \text{EXP}\{0.29(Ha^2 - 1)\} \quad (4.2.5)$$

$$\delta_p = 1.9w h_0 a \{(1 - Ha) \text{EXP}(5/4)\} / F_m \quad (4.2.6)$$

式と与える。また、 $\delta_p$  はデータを整理するときにより、式(4.2.6)で与えることにした。以上の式を連

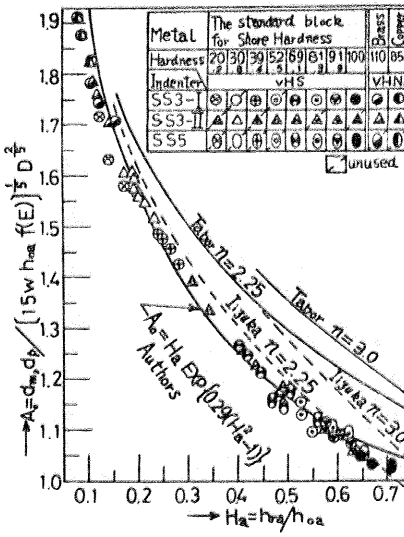


図6  $A_0 = d_0 d_p / d_e \sim Ha$

立すれば、 $dp$ を含まない  $f(E)$ の式が得られるわけ、 $Ha > 0.7$ でも  $dp$ が測定できないと  $hoa$ が極小の場合も念のため計算を行なった。結果を図7に示すが

$$f(E) = \left[ 15(5/3)^{5/4} \{ (whoa)^3 D \}^{1/2} \left\{ 1 - (hk - dp) / hra \right\} \times \left[ Ha \cdot \text{EXP} \left\{ 1 + 0.29(Ha^2 - 1) \right\} \right]^{5/4} / F_m^{5/2} \right] \quad (4.2.7)$$

、図中の破線は表2の  $f(E)$ を示す。SS3-I圧子は VHS100, 92 に対し  $hoa$ が極小の範囲(最大との差が若干フェールで100倍強)まで実験を試みたが、良好な結果が得られた。高  $Ha$ の点では、SS5圧子による  $Ha \approx 0.81$ があり、 $F_m \approx 133\text{kg}$ と衝突力の大きい点でも問題なく、式の妥当性が確認されたといえる。

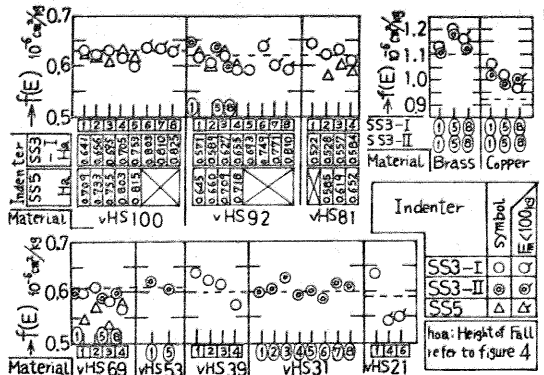


図7  $f(E)$ の式による計算結果

### 5. フラスチック試料に対する $f(E)$ の式の適用

金属の場合と異なり、変形様式・環境条件等の違いにより、その機械的性質が変化する。いわゆるプラスチック(粘弾性物体)に、 $f(E)$ の式(4.2.7)を適用してみる。表3のヤング率は、片持梁( $w:l=1.5$ ,  $h:l=1$ ,  $l:15\text{cm}$ )による曲げ(静的),自由振動(動的)<sup>(10)</sup>の測定から算出した。EstとE<sub>dy</sub>と比べると、フェールは僅か、塩ビは40%弱、アクリルは80%位E<sub>dy</sub>が高い。今、厚2.1, 直径6.5cmの試料と金属と同じ様式による実験を行ない、式(4.2.7)による  $f(E)$ の算出値を図8に示す。塩ビ、アクリルは  $f(E)$ に近いが、フェールは2倍(Eは1/2)の乖離がある。衝突は動的なものであるから、塩ビとアクリルの結果は充分納得のゆくものである。フェールの場合には、その残されたくぼみ面を100倍位で観察すると、他の試料には見られない「ひび割れ」が生じている。したがって、

Material (resin)	Hardness VHN	Static		Dynamic		f <sub>n</sub> : natural frequency / Hz
		Est. $\times 10^4$ / kg/cm <sup>2</sup>	E <sub>dy</sub> $\times 10^4$ / kg/cm <sup>2</sup>	E <sub>dy</sub> $\times 10^4$ / kg/cm <sup>2</sup>	E <sub>dy</sub> $\times 10^4$ / kg/cm <sup>2</sup>	
Phenol	40	12.1	7.1	12.6	6.8	42.9
Acrylic	20	3.2	26.4	5.8	14.5	28.6
Vinyl chloride	13	3.3	25.6	4.5	19	24.1

表3 試料(プラスチック)

$f(E)$ の算出値と  $f(E)$ の大きさの差は、この割れによるヤング率の減少が生じた原因と思われるが、衝突方向と90度異なる方向でヤング率を測定してあり、方向性での検討も必要である。また、アクリルの場合には、衝突後のくぼみ面の変化が著しく、「永久くぼみ」という表現はできない。3種のプラスチックに共通するのは、試料面でのくぼみ形状測定が不可能に近かったことである。

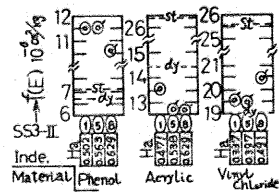


図8  $f(E)$ の式による算出値

### 6. 結論

- (1)先端球圧子による衝突では、先端球保持軸の弾性効果が諸量の関係に大きな影響を与えることが分り、それを考慮することは、 $w, hra, dp, f(E), F_m$ の間に定量的な関係式(4.2.4)が見出された。
- (2)  $A_0 = dp / [15whoa f(E) D^2]^{1/5}$  は  $\pi$ を考慮せよとも、 $Ha$ の簡単な式(4.2.5)で与えることができる。
- (3) これ等の式により、既知である圧子諸元の他に、 $F_m, hra$ の測定により、圧子と試料の  $f(E)$ が算出される式(4.2.7)が求められた。この式はまた、多山に渡る条件下で妥当な結果を示すことが確認された。
- (4)  $f(E)$ の式を3種のプラスチックへ適用した所、塩ビ、アクリルはその動的な  $f(E)$ に近い結果を与えることが分った。フェールは、くぼみ面の割れによるためか、試料の方向性によるためなのか、結果が2倍近く離れた。詳しい検討と多くの試料に対する実験は今後の課題であるが、プラスチック試料のくぼみ面の観察が困難な点、時間の経過でくぼみ形状が変化すること等を考慮すると、この方法は有用であると思われる。

### 参考文献

- (4) Tabor, D. The Hardness of Metals, Oxford, 1951 (5) 機械学会誌, Vol. 63, No. 497 (1960)
- (1) 吉沢編, 硬さ試験法とその応用, 裳華房 (5) 鉱産計量研究所報告, Vol. 20, No. 4 (1971) (9) 植村, 潤滑, Vol. 22, No. 9 (1977)
- (2) 山本編, 硬さ, コロナ社 (6) Goldsmith, IMPACT, Arnold, 1960 (10) S. Timoshenko, 工業振動学, 東京図書
- (3) Tabor, D., Proc. Roy. Soc. A192 (1948) 247 (7) 本多, 田中, 東北理研報告, 15 (11) 山城, 押野, 機械論集(長野) (1974)