

正石 橋達弥(新学大) 正下 田 茂(新学大) 学青 藤 博(新学大)

## 1. 緒言

前報<sup>(1)</sup>においては、先端球圧子と大質量金属試料平面との衝突を扱い、先端球保持軸の弾性を考慮することにより、諸量間の定量的関係を見出した。それに基づき、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提示し、プラスチックにも若干の考察を加えた。

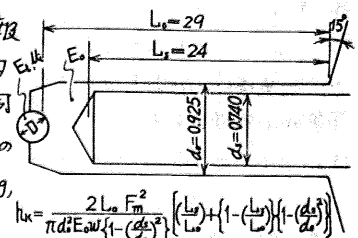
本報においては、金属に対して得られた式を、プラスチックとの衝突に適用した場合の意味を、試料の静的・動的特性、方向性、温度特性に基づいて明らかにし、広範な試料に対する式の有用性を検討した。

## 2. 記号

$w, h_{oa}, h_{ra}, D$ : 圧子の重量, 落高, 跳高, 先端球直径  $L_o, L_s, d_o, d_s, E_o$ : 先端球保持軸の有効長さ(外, 内), 直径(外, 内), ヤング率  $d_p, d_p, D_p$ : 永久径の直径, 深さ, 曲率半径の2倍  $E_t, E_s, \mu_t, \mu_s$ : 球と試料のヤング率, ポアソン比  $f(E) = (1 - \mu_t^2)/E_t + (1 - \mu_s^2)/E_s$ : 圧子(球)と試料の弾性パラメータ  $E_{st}(b), E_{sd}(b)$ : 試料の曲げ, 曲げ振動による静的・動的ヤング率  $E_{st}(I, B)$ : 圧縮時の試料のI(縦), B(横)方向のヤング率  $F_m$ : 最大衝突力  $h_k$ : 保持軸の跳ね上がり弾性エネルギーと圧子の跳高相当分  $H_a = h_{ra}/h_{oa}$ : 反発率  $H_t = (h_{ra} - h_k)/(h_{oa} - h_k)$ : 球と平面との間の反発率

## 3. 圧子, 試料およびヤング率等について

3.1 圧子 金属に比べて、プラスチックの衝突力は、いさゝかで、前報のSS3圧子の出力UPを考へた。図1のように保持軸の中空化を図り、出力は約0.02 volt/kg (B.V.=8 volt)と3倍近く高くなっている。この圧子の $h_k$ は、前報と同様に考へて、図中の式(3.1.1)で示されることになる。先端には直径0.3cmの超硬合金球( $E_t = 6.2 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>,  $\mu_t = 0.21$ )を接着固定し、総重量は0.642 kg, 名称をNSS3圧子とする。圧子重量は可変の構造となっている。



$$h_k = \frac{2L_o F_m^2}{\pi d_s^2 E_{st}(b) \left\{ 1 - \left( \frac{L_s}{L_o} \right)^2 \right\} \left\{ 1 - \left( \frac{d_s}{d_o} \right)^2 \right\}} \quad (3.1.1)$$

図1 NSS3 圧子先端部

3.2 試料 表1に示す金属試料は前報と同じもの。表2に示すプラスチックの衝突用試験片(6.5cm径), ヤング率等の測定用試験片は、1cm厚の板状の採取した。

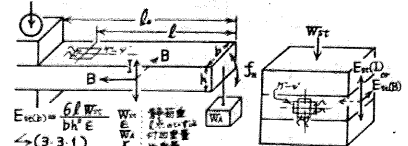
3.3  $E_{st}(b)$ の測定 図2-1の如く、幅高さ約1cmの試料片の固定端近の上下面にゲージを貼り、その自由端に静荷重を加へ( $l \approx 13$ cm), 図中の式(3.3.1)に別値を得た。数値の読みとりは載荷後20秒としている。

試料	材質	重量 (kg)	$E_{st}(b)$ (kg/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比
PE	PE	0.94	0.1	0.39
ABS	ABS	1.02	0.11	0.39
PA6-6	PA6-6	1.13	0.12	0.39
PP	PP	1.10	0.11	0.39
PC	PC	1.19	0.13	0.33
PMMA	PMMA	1.87	0.17	0.28
PS	PS	1.40	0.1	0.39
PC	PC	1.43	0.1	0.32

表2 プラスチック試料

3.4  $E_{sd}(b)$ の測定 図2-1に示す自由端部に付加重量の重心から一致をお工夫したものを用い、 $W_a = 0, 30, 50, 100, 200$ gr を付加し、自由振動を生じさせ、その記録波形の解析より $f_n$ を得、図中の式(3.3.2)に別値を得た。なお、試料が軟いため、均一に固定されるよう工夫した。

3.5  $E_{st}(I), E_{st}(B)$ の測定 試料片を板状の採取して、その方向(縦)向性を考へる必要がある。板状の厚さ方向をI(圧子の衝突方向)とし、それと直角な方向をBとする。曲げ実験に用いたと同じ形状のものを切断し、I方向, B方向に3枚重ねて接着したものに2枚のゲージを張り(ポアソン比の測定のためは、さらにその上に直角に2枚のゲージ), 圧縮試験機により載荷した。数値の読みとりは、20秒後である。なお、これは測定物の弾性係数により、ゲージ率は変化するため、メーカのデータを用いて、ゲージ率の補正を行ない、最終的な $E_{st}(b), E_{st}(I), E_{st}(B)$ を算出してある。また $E_{st}(b)$ と $E_{st}(B)$ の数値差は、PEを除き数%位の差であった。フリーフはPEで非常に大きく、N6でかなりみられた。図3-1, 2に室温(試料温度)と

図2-1  $E_{st}(b), E_{sd}(b)$ の測定図2-2  $E_{st}(I), E_{st}(B)$ の測定

日本機械学会・精機学会北陸信越支部北陸地方講演会(福井)講演論文集('79-6-1) No. 797-1

$E_d(b)$ ,  $E_{st}(D)$  の関係を、図4に自由振動の数  $f_n$  と  $E_d(b \times B)$

について示す。温度に関しては、PH, PCは安定であり、ABS, AC, VC, PAは、6~7%/15℃位の差を生じているが、PE, N6は急変する。 $f_n$  についてもPHは一定であるが、ACはかなりの影響を受けるようだ。この際、 $E_{st}(b)$ ,  $E_d(b)$  では、金属の試験片(偏り、高さ0.4cm,  $b=10$ ,  $l_0=14$ cm)の測定も同時に行なっているが、その安定性には比して、プラスチックが種々の因子により影響を受けるところが明瞭である。

#### 4. 金属に寸する $f(E)$ の式について

4.1 NSS3圧子との関係式 表1の試料に対して得られた結果を図5に示す。図5-1の縦横軸は、球と平面との接触に際してHertzの弾性接触論の結果に一致するとすれば、保持軸の効果は  $h_k$  に差引いて考慮すべきものと整理があり、前報のデータも同様に整理すると実験点は同じ位置に分布する。接触部に見えらるエネルギーの観点からの式(図5-2中の式(4.1.1), (4.1.2)であるが、 $h_k$  を考慮した式(4.1.2)の結果は前報と同じ約0.6の値となる。図5-3は凹球面と球の弾性接触時にあけるHertzの関係式を直線で記入し、実験点はよく近くに在る。以上、式(4.1.2), (4.1.4)に対する値らると、先端球圧子と大量金属試料平面との衝突にあつては、保持軸の弾性効果を考慮する必要は、Hertzの弾性接触の式を適用して得られる結果と一致するところから明らかなである。鉄、銅、黄銅、HS21の試料は、 $h_{oa}(\approx 2, 1, 0.5, 0.25$ cm)が大いに、 $C_0=0.6$ よりずれる傾向を示しているが、これは、(1)ばねの縁の盛り上がりか  $h_{oa}$  が大ほど極端なため、と考へられる。さらに、HS21は想定した  $f(E)$  の値との相違を認めているところから、検討の要がある。Taborによる球と平面との衝突実験の結果も、 $A_t \sim H_t$  の曲線上に分布する。以上から、 $F_m, h_{ra}$  の2測定量による  $f(E)$  の式を次に示す。

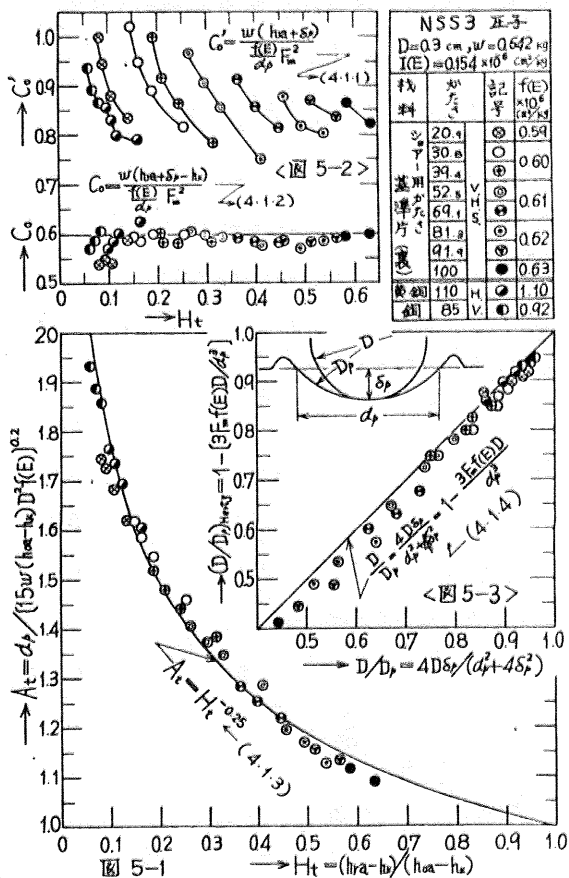
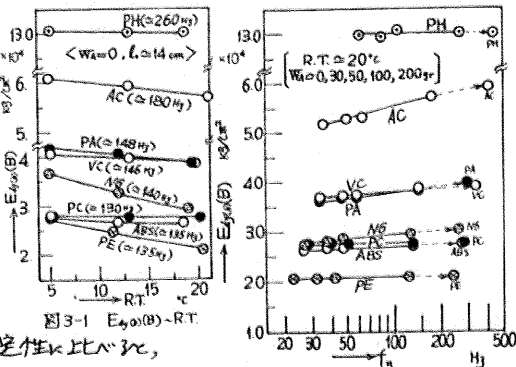
$$f(E) = 3.7 \frac{w^{1.5} D^{0.5}}{H_t^{0.3125}} \left[ \frac{(h_{ra} - h_t + \delta_p \times h_{oa} - h_k)^{0.25}}{F_m^2} \right]^{1.25} \quad \text{--- (4.1.5)}$$

$$\text{ただし、} \delta_p = 1.86 w (h_{oa} - h_k) (1 - H_t)^{1/2} / F_m \quad \text{--- (4.1.6)}$$

#### 5. プラスチックへの衝突実験と $f(E)$ の式の適用結果について

5.1 衝突実験 装置は前報と同じであるが、ヤング率の低い材料は150kgとした。試料の温度依存性が顕著なため、実験の5~6時間前、室温(R.T.)を一定に保つておき、また、試料温度と考へる。衝突後、試料面上のくぼみは観察のみに止めた。(表3)

5.2  $f(E)$  式の適用 金属と異なり、機械的諸性質が多種の因子に強く影響を受けるため、式の適用結果の判定も厳密にするには困難であるが、比較の際のデータの補正は以下の方法に依った。①  $E_d$  の周波数依存性に対して、衝突波形を振動



材料	寸法	記号	$f(E)$
NSS3	20.4	○	0.59
鉄	30.8	○	0.60
銅	39.4	○	0.61
黄銅	52.4	○	0.62
HS21	69.4	○	0.63
鋼	81.4	○	1.10
銅	91.4	○	0.92

の周期の一部のみを得た結果が図6である。これから衝突時の周波数の概略値を知ることができ、図4中の矢印がその時の $E_{dy}$ を示している。②温度依存性に対して 衝突実験時の室温に基づき図3に補正する。③試料の方位向性に対して 衝突方向 $E_{st}(I)$ と $E_{st}(B)$ に直交な $E_{st}(B)$ の比を表2に示している。PHの大きいから目立つが、原因はおそらく基材(紙等)によると思われる。ABS, N6の場合は、圧延が結晶の方向性として考えられる。この $E_{st}(B)/E_{st}(I)$ により方位向性を補正する。以上の補正を行って得たヤング率を $E_{dy}(I, f)$ とした。さらに測定したポアソン比(表2)から求め、金属と同じく、 $\nu = 0.9$ と仮定して、 $f(E) = 0.9 / E_{dy}(I, f)$ の値を示している。一方、衝突時の $F_m$ ,  $h_{ra}$ を式(4.1.5)に代入して得られた値を、その種の欄に記入している。両欄と比較すると次のようなことが言える。

試料	RT=20°C			RT=20°C			衝突時の周波数 (約10 <sup>4</sup> cps)	方位向性 (約10 <sup>4</sup> cps)	変位 (約10 <sup>-4</sup> cm)
	$E_{st}(I, f)$	$f(E)$	$F_m$	$E_{st}(I, f)$	$f(E)$	$F_m$			
	10 <sup>4</sup> cps	10 <sup>4</sup> cps	10 <sup>4</sup> cps	10 <sup>4</sup> cps	10 <sup>4</sup> cps	10 <sup>4</sup> cps			
ABS	2.4	3.5	51	2.1	3.9	47	2.1	3.9	点
N6	2.6	3.5	35	2.5	3.6	37	2.5	3.6	点
PE	3.0	3.0	90	2.5	3.6	37	2.5	3.6	点
PA	2.7	3.5	55	2.7	3.5	55	2.7	3.5	点
PP	6.2	1.8	18	2.4	3.9	47	2.4	3.9	点
PS	7.6	1.2	12	2.4	3.9	47	2.4	3.9	点
PC	4.3	2.1	21	2.4	3.9	47	2.4	3.9	点
PMMA	4.2	2.2	21	2.4	3.9	47	2.4	3.9	点

表3  $f(E_{st}(I, f))$ と $f(E)$ の値の比較、表2(1)の値を基に

式(4.1.5)による値は、RT=20°Cの場合、ほぼ図3に示した温度依存性の比率で得られていることから、10°C位の温度差による試料の性能の変化を表わすことが数値的にはPE, PAを除くと良好一致がみられる。衝突時の周波数近辺での動的ヤング率を表現していると言える。さらに、異なる周波数での $E_{dy}$ を求めたことにより、圧子条件の変化(大幅な)に可能であることも図6が示す。PEに関しては、応力が大きいほどそのヤング率の低下が激しいことから、衝突における(ほぼ)周辺の平均ひずみの大きさ等との関連も今後考慮が必要である。PAについては、測定上におよぼすが、さらに他の因子におよぼすなど考慮が必要である。PHは方位向性を考慮して始めて一致したことに注目したい。

図7には同じ圧子条件下でのプラスチックと金属に対する $H_t$ ,  $F_m$ を示すが、 $H_t$ のみでは高硬度試料とプラスチックに差がみられ(例: PA)が、 $F_m$ の開きは大きく、 $h_{ra}$ ,  $F_m$ の2量、あるいは $f(E)$ 値を考慮することにより、明確な区別が可能となる。「硬さ」という点を考慮するに、この明確な $f(E)$ 値の差を基礎として、平均接触圧力等の観点から考えよることが必要であり、次報以後で示すべく。

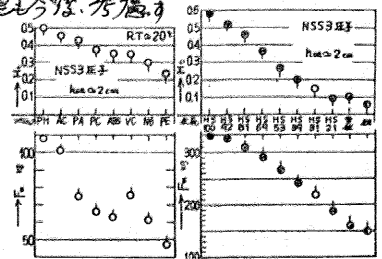


図7 プラスチックと金属の $H_t$ ,  $F_m$ の比較

## 6. 結論

以上の結果を総合すると、次に示すようにまとめられる。

- (1) 金属に比べ顕著な温度依存性、周波数依存性、基材の有無等による方位向性を持つプラスチック試料に対し、若干の温度条件、周波数条件下でのヤング率等の測定を行ない、その試料特性を求めた。
- (2) プラスチック用に出力を高めた圧子を作り、金属に対する衝突実験を行ない、前報に同じような諸条件式を得た。この際、先に求め得た軸の弾性効果における考慮事項は、Hertzの弾性接触論による結果と一致することを確認し、 $F_m$ ,  $h_{ra}$ の2測定量による圧子と試料の弾性パラメータの式 $f(E) : (4.1.5)$ を再提示した。
- (3) 前項の圧子によるプラスチックの衝突実験を行ない、測定された $F_m$ ,  $h_{ra}$ を用いた式(4.1.5)による $f(E)$ 値を算出した。その値を試料特性を基にした種々の補正を行なって得られた $f(E)$ 値と比較した所、PE, PAを除き定量的な一致がみられた。PE, PAについては、たとえ(ほぼ)周辺の平均ひずみとの関連や、他の因子によるものかと検討する必要があるが、温度依存性に関しては定性的な一致が見られている。さらに衝突時の金属との比較という点からすれば、 $H_t$ のみでは差がみられず、 $F_m$ の差、あるいは $f(E)$ 値を考慮することにより両者の明確な区別が可能であり、今後、試料の「硬さ」を考慮する上での基礎となるものである。
- (4) プラスチックの機械的性質は全時間依存性であることから、時間の項を無視した量の表示は意味をなさず、この点からすれば、衝突方式は、むしろ決めた条件(時間)下で得られること、短時間で、自動的に測定が可能であり、かつ簡便であり、広範な試料に適用して同一方式を採用することができるとの点から、工業的にも意義を有し、大いなる利用が期待される。

## 参考文献

- (1) 石橋・下田, 材料力学(室蘭) 1978 (3) S. TIMOSHENKO, 工業振動学(東京) (5) TABOR, D., Proc. Roy. Soc., A192 (1948), 他
- (2) 材料学会編, 材料力学(上), 1964 (4) GOLDSMITH, IMPACT, ARNOLD, 1960 (6) 材料学会誌, Vol. 63, No. 497, 1960, 他