

着水衝撃荷重について

平 野 陽 一・三 浦 公 亮

Water Impact Loads of Axially Symmetric Bodies

By

Yoichi HIRANO and Koryo MIURA

Abstract: Analytical and experimental studies have been made to determine the impact accelerations of axially symmetric bodies during landing on water surface. The formulas for the maximum impact accelerations are derived and the history of the acceleration can be calculated easily by the present analytical results. Spherical and conical models were used for the present experiments. The water impact accelerations of these models were measured by accelerometers. The agreements between the experimental and the theoretical results are satisfactory.

概 要

軸対称底面を有する物体の着水時の衝撃荷重についての解析ならびに実験結果を報告する。解析の特徴は着水後に発生する最大加速度を closed form の形で得たことであり、着水後の加速度特性も簡単に計算することができる。実験は球状ならびに円錐状底面を有する試験体を使って行なった。この実験は解析に対応しての系統的なものであり、実験値と解析結果とはよく一致した。

記 号

- F : Froude 数, (6)式
- m : 物体の質量
- m_v : 仮想質量 (virtual mass)
- v_0 : 着水速度
- v : 速 度
- h : 静水面よりの沈下距離
- t : 着水後の時間
- ρ : 水の密度
- r : 静水面内における物体断面 (円形) の半径
- R : 球状底面の半径または代表長さ
- θ : 円錐の半頂角

W : 物体の重量

δ, τ : 無次元長ならびに時間, (6)式

μ : 質量比, (6)式

1. 序 論

物体がある速度を持って水面に衝突する現象はいくつかの分野で重要な問題となっている。たとえば (a) 飛行艇の着水時, (b) 宇宙船の海上回収, (c) 船舶のスラミング等である。これらの各分野で問題としているのは主として着水時の衝撃加速度 (荷重), 圧力である。

(a) 飛行艇の着水: この問題はくさび形断面の物体が着水する問題と考えられ, Kármán [1] により最初にとりあげられた。Kármán は衝突現象における運動量保存則を着水現象に適用し, さらに仮想質量の概念を使うことにより現象を明確かつ簡明にとらえることに成功した。以来 Wagner [2], Pabst [3], Bisplinghoff and Doherty [4] らがこの研究を発展させた。

(b) 宇宙船の着水: 米国では大気圏外より宇宙船を回収する際に海上で行なっている。この問題は軸対称底面を有する物体の着水衝撃の問題であり, 主として NASA で研究が行なわれた。多数の報告が出ているが最初の論文が McGee, Hathaway, and Vaughan [5] のものであり, 最近のものとしては Stubbs and Hathaway [6] のものがあげられる。これらの研究は主として実験的なものであり, 直接設計に役立てることを目的としている。

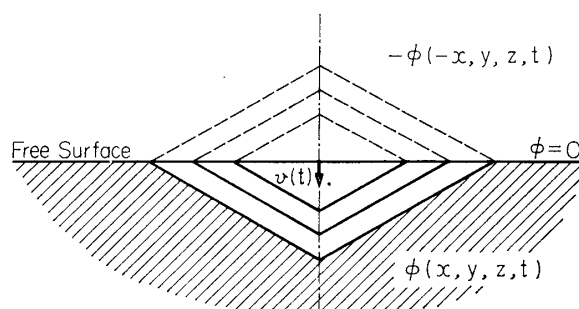
(c) 船舶のスラミング: この領域については筆者は調査不十分であるが Review として Chu and Abramson [7] をあげておきたい。

本報告では軸対称底面を有する物体の着水衝撃荷重についての解析ならびに実験結果を述べる。前述したように NASA で行なわれた研究は直接設計に役立てるためのものであったため, やや一般性に欠けていると考えられる。そこで筆者らは円板が流体中を動くときの仮想質量を使って着水後の衝撃加速度を求め, さらに最大加速度を closed form の形で求めた。この解析結果に対応して円錐状, 球状底面の試験体各 3 種類を使って系統的に実験を行なった。

2. 解 析

2.1 軸対称底面を有する物体の着水衝撃

着水の問題は自由表面のある非定常流れとして取扱われるべきものである。しかし, 着水後微小時間内においては (1) 自由表面の形状は変化しない, (2) 自由表面上で速度ポテンシャル $\phi=0$ と近似的に考えることができる [8]。それで, 自由表面を境にして水面下の物体ならび



第 1 図 着 水 現 象

に速度ポテンシャルを上面に reflect した流れを考えることが可能になる。この状態を第 1 図に示す。ある時刻 t における物体の形状と速度が与えられれば仮想質量（見かけの質量）を求めることができる。この仮想質量を使えば問題を簡明に取扱うことができる。着水における実際の流れは自由表面の下部だけであるので物体の運動に關与する仮想質量は流体が全域にあるとしたときの半分ということになる。

さて、質量 m なる物体が速度 v_0 で着水した場合、物体の失う運動量は物体と接する物体と等速のある体積の水に伝達されると考えられる。運動量保存則より

$$mv_0 = (m + m_v)v \quad (1)$$

いま第 2 図に示す軸対称物体を考える。この仮想質量 (m_v) として水面と同一平面内にある物体断面（円形）の半径 r を半径とする円板の持つ仮想質量の $1/2$ をとる。円板の仮想質量は Lamb [9] によれば

$$M_v = 2m_v = \frac{8}{3}\rho r^3 = \frac{2}{\pi}\left(\frac{4}{3}\pi\rho r^3\right) \quad (2)$$

物体の形状が与えられれば (1) 式より衝撃加速度を求めることができる。

2.2 球状底面を有する物体の着水衝撃

第 3 図より

$$r = \sqrt{h(2R - h)} \quad (3)$$

$$m_v = \frac{4}{3}h^{3/2}(2R - h)^{3/2}\rho \quad (4)$$

(1) 式と (4) 式より

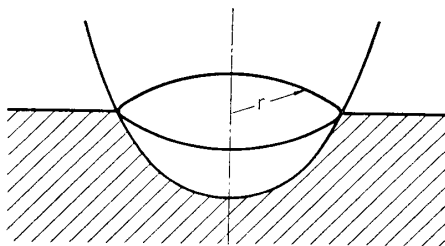
$$\frac{dh}{dt} = \frac{Wv_0}{W + \frac{4}{3}\rho gh^{3/2}(2R - h)^{3/2}} \quad (5)$$

次の無次元量を導入する。

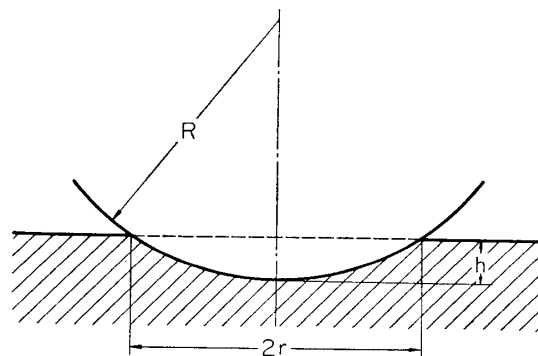
$$\delta = \frac{h}{R}, \quad \tau = \frac{gt}{v_0}, \quad F = \frac{v_0}{(gR)^{1/2}}, \quad \mu = W \left/ \left(\frac{4}{3}\pi\rho gR^3 \right) \right. \quad (6)$$

$\delta \ll 1$ とすると (5) 式は積分されて

$$\tau = \frac{\delta}{\mu F^2} \left(\mu + \frac{2^{5/2}}{5} \frac{1}{\pi} \delta^{3/2} \right) \quad (7)$$



第 2 図 軸対称物体



第 3 図 球状底面

無次元加速度は(7)式を τ で微分して求める.

$$\frac{d^2\delta}{d\tau^2} = -\frac{3 \times 2^{1/2} \mu^2 F^4 \delta^{1/2}}{\pi(\mu + 2^{3/2} \pi^{-1} \delta^{3/2})^3} = -F^2 n \quad (8)$$

ここで n は荷重倍数である. (8)式の極値は

$$\delta_m = \frac{1}{8} \pi^{2/3} \mu^{2/3} \quad (9)$$

のとき

$$\left(\frac{d^2\delta}{d\tau^2}\right)_m = -\frac{256}{243} \pi^{-2/3} \mu^{-2/3} F^4 = -F^2 n_m \quad (10)$$

である. (9)式を(7)式に代入すると

$$\tau_m = \frac{21\pi^{2/3} \mu^{2/3}}{160 F^2} \quad (11)$$

以上の結果をまとめると

$$n = \frac{3 \times 2^{1/2} \mu^2 F^2 \delta^{1/2}}{\pi(\mu + 2^{3/2} \pi^{-1} \delta^{3/2})^3} \quad (12)$$

$$\tau = \frac{\delta}{\mu F^2} \left(\mu + \frac{2^{5/2}}{5} \frac{1}{\pi} \delta^{3/2} \right) \quad (13)$$

$$n_m = \frac{256}{243} \pi^{-2/3} \mu^{-2/3} F^2 \quad (14)$$

$$\tau_m = \frac{21\pi^{2/3} \mu^{2/3}}{160 F^2} \quad (15)$$

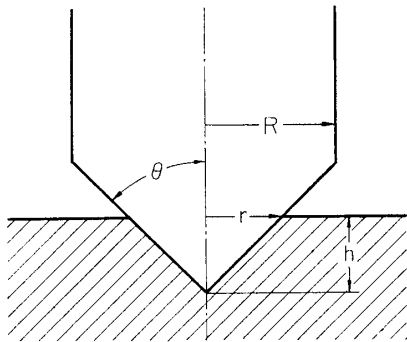
$$\delta_m = \frac{1}{8} \pi^{2/3} \mu^{2/3} \quad (16)$$

2.3 円錐状底面を有する物体の着水衝撃

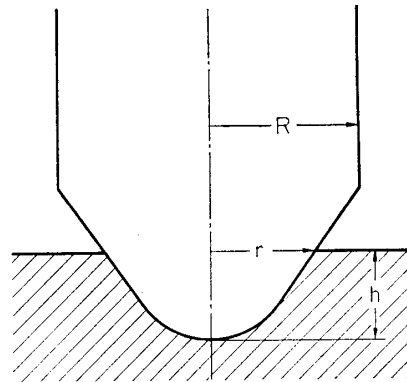
第 4 図より

$$m_v = \frac{4}{3} \rho h^3 \tan^3 \theta \quad (17)$$

(1)式と(17)式より



第 4 図 円錐状底面



第 5 図 一般軸対称底面

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{\mu F^2}{\mu + \frac{1}{\pi} \tan^3 \theta \delta^3} \quad (18)$$

τ で微分して

$$\frac{d^2\delta}{d\tau^2} = -\frac{3}{\pi} \frac{\mu^2 F^4 \tan^3 \theta \delta^2}{\left(\mu + \frac{1}{\pi} \tan^3 \theta \delta^3\right)^3} = -F^2 n \quad (19)$$

(19)式より前節と同様にして以下の諸式を得る.

$$n = \frac{3 \tan^3 \theta \mu^2 F^2 \delta^2}{\pi \{\mu + (\tan^3 \theta \delta^3 / \pi)\}^3} \quad (20)$$

$$\tau = \frac{1}{\mu F^2} \left(\mu \delta + \frac{\tan^3 \theta}{4\pi} \delta^4 \right) \quad (21)$$

$$n_m = \frac{7^{7/3} \times 2^{2/3}}{3^5 \pi^{1/3}} \tan \theta \mu^{-1/3} F^2 \quad (22)$$

$$\tau_m = \left(\frac{2\pi}{7} \right)^{1/3} \left(\frac{15}{14} \right) \frac{\mu^{1/3}}{F^2 \tan \theta} \quad (23)$$

$$\delta_m = \left(\frac{2\pi}{7} \right)^{1/3} \frac{\mu^{1/3}}{\tan \theta} \quad (24)$$

2.4 一般軸対称底面の場合

第5図での r は次式で与えられるものとする.

$$r = f(\delta)R$$

次の2式を得る.

$$\tau = \frac{1}{\mu F^2} \int \left\{ \mu + \frac{1}{\pi} f(\delta)^3 \right\} d\delta \quad (25)$$

$$\frac{d^2\delta}{d\tau^2} = -\frac{3\mu^2 F^4}{\pi} \frac{f(\delta)^2 \frac{df(\delta)}{d\delta}}{\left\{ \mu + \frac{1}{\pi} f(\delta)^3 \right\}^3} \quad (26)$$

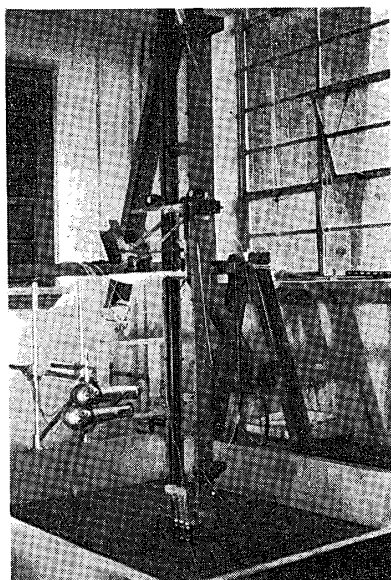
3. 実 験

実験は前章の解析結果に対応して行なった. 球状底面, 円錐状底面の試験体各3種類ずつ計6個を静水面に 3~5 m/s の着水速度で落下させその加速度を測定した.

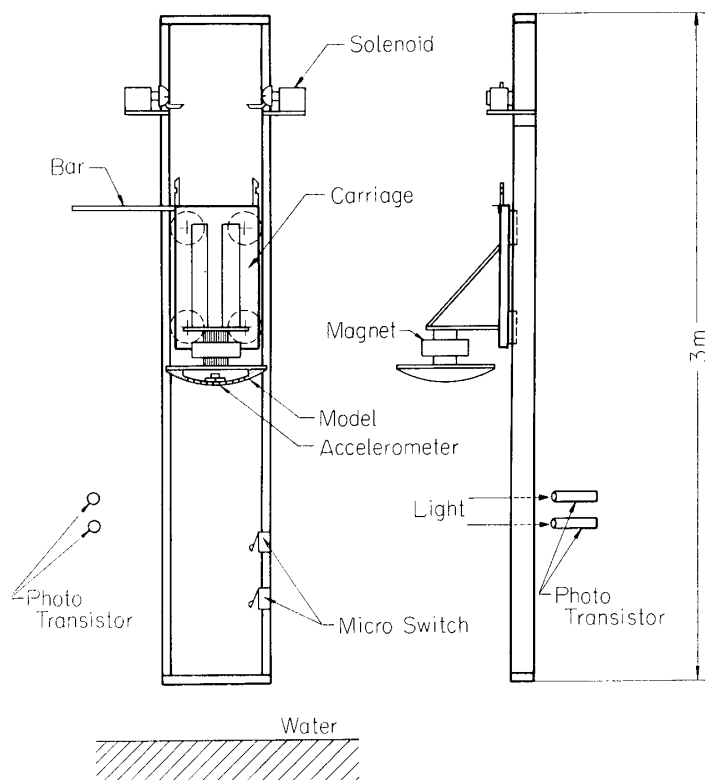
3.1 実験装置

着水衝撃実験装置は第6図, 第7図に示すとおりのものである. 加速度計をとりつけた試験体を台車についた電磁石で支持し, この台車をガイドレールに沿って落下せしめ, 水面到達直前に電磁石の電流を遮断して試験体を自由落下させる. この方式は試験体を定姿勢で着水させるためと着水速度をできるだけ正確に求めるために考えたものである. 着水速度は台車を切離すソレノイドの位置をガイドレールに沿って上下することにより変えることができる. 測定事項は着水速度と加速度である.

(a) 着水速度測定: 2個の光源と2個のフォト・トランジスタを使い, 台車に附属の光



第 6 図 着水衝撃実験装置全景



第 7 図 実験装置概略図

線しゃへい棒が上下 2 本の光線をよぎる時間間隔をエレクトロニック・カウンタで測定し、これより光線通過時の速度を計算する。ただし試験体の切離しと下の光線を棒が通過するのが同時になるように附属装置をあらかじめ調整しておく。光線通過時の速度に試験体切離し後の自由落下分 (150~200 mm) の補正を加えて着水速度を求める。

(b) 加速度測定：加速度は試験体にとりつけたひずみゲージ型の加速度計と動ひずみ測定器を接続し、動ひずみ測定器の出力をシンクロスコープ Y 軸に入れ単掃引（または遅延単掃引）させて映像を写真撮映する。単掃引のトリガーにはフォト・トランジスタを利用する。

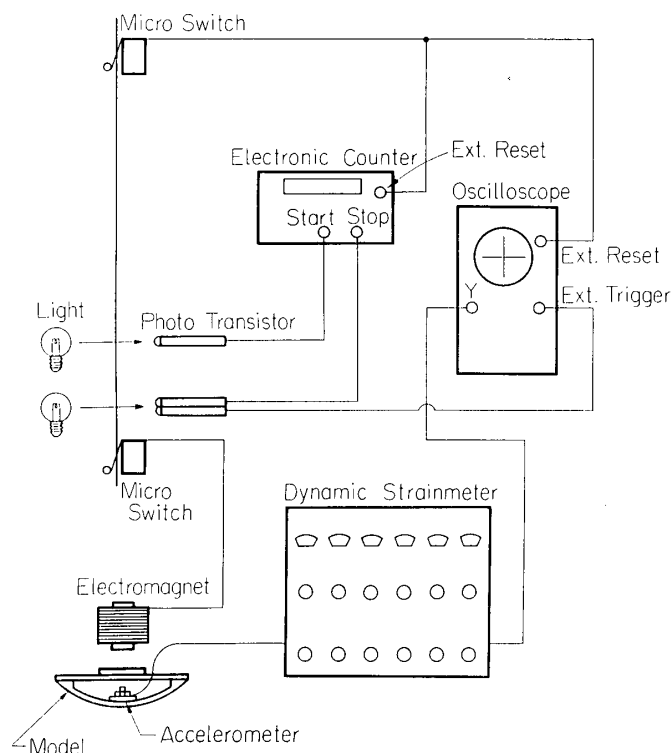
測定システムのブロックダイアグラムを第 8 図に示す。測定器、変換器の諸特性は以下のとおりである。

(1) ひずみゲージ型加速度変換器：共和電業(株) AS-A 型；容量 $\pm 100\text{ g}$ ；固有振動数（標準値）2,000 Hz，制動比 0.65，測定周波数範囲 0~1,600 Hz，校正係数 $0.0855\text{ g}/1.0 \times 10^{-6}$ 。容量 $\pm 200\text{ g}$ ；固有振動数（標準値）3,000 Hz，制動比 0.65，測定周波数範囲 0~2,500 Hz，校正係数 $0.1869\text{ g}/1.0 \times 10^{-6}$ 。

(2) 動的ひずみ測定器：共和電業(株) DM-6 J 型，20 kc 搬送波，応答周波数 0~4,000 Hz。

(3) メモリスコープ：岩崎通信機(株) MS-5103 B (Ext. Reset 端子を増設)

(4) エレクトロニック・カウンタ：松下通信工業(株) VP-455 A



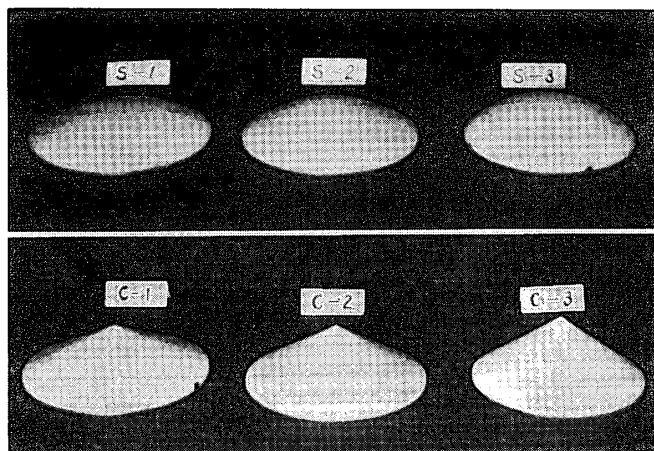
第 8 図 測定装置系統図

第 1 表 試 験 体

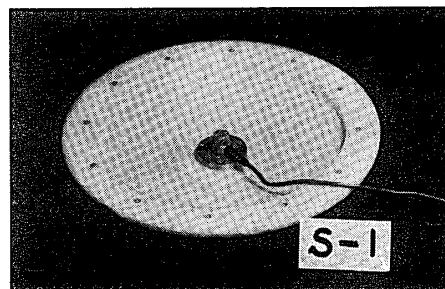
Sphere	Radius (mm)	Weight (kg)		Natural frequency
		(a)	(b)	(cps)
S-1	239	1. 429	1. 399	1040
S-2	203	1. 374	1. 344	1230
S-3	156	1. 300	1. 270	1140
S-4	200		1. 100	—
	a : with a 100 g accelerometer			
	b : with a 200 g acceleremeter			
Cone	Semivertex angle	Weight(kg)		
C-1	65°	1. 530		
C-2	60°	1. 383		
C-3	55°	1. 349		

3.2 試 験 体

6 種類の試験体を製作し、これを実験に供した。材料はアセタール・コポリマー「ジュラコン」〔ポリプラスチック(株)〕($E=280 \text{ kg/mm}^2$, 比重=1.41)である。なお後述する現象の解明のために木製(ひめこまつ)の試験体 1 個を追加した。第 1 表に試験体の形状, 寸法等を示す。S は球状底面, C は円錐状底面を示す。「S-4」は木製の試験体である。さらに同表中に 0~1,500 cps の間にはっきりした固有振動数を持つものについてはその最低次の固有



第 9 図 試 験 体



第 10 図 加速度計取付状況

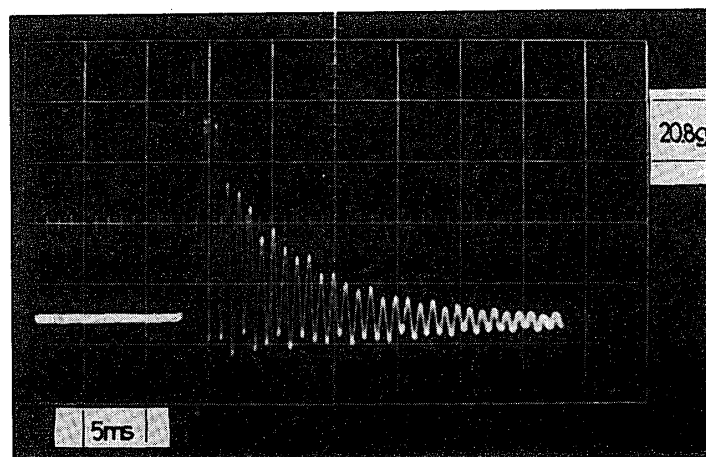
振動数を記入してある．第 9 図に試験体の写真を示す．試験体端面の外径は 230~250 mm ϕ である．加速度計は直径 40 mm, 肉厚 5 mm のアルミまたは軟鋼アダプターに接着取付後ネジ 4 本で試験体に固着した．加速計取付状況を第 10 図に示す．

3.3 実験結果

実験結果を第 2 表にまとめて示す．表中の実験値（着水速度，最大加速度等）は同一ケース（3~5 回）の平均値である．各値の間のばらつきは 5% 内である．

(a) 球状底面の場合

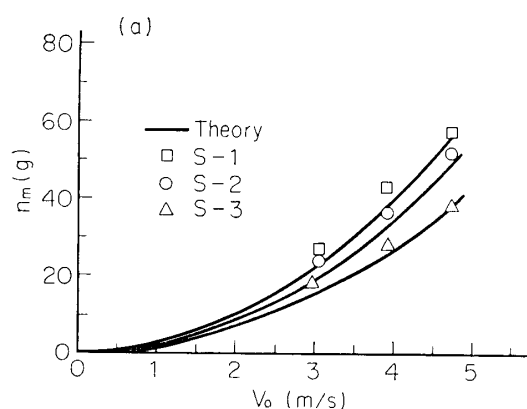
第 2 表中の理論値は(14), (15)式より求めたものである．着水衝撃加速度の写真を第 11 図に示したが，振動的波形を示している．それで最大加速度として二とおりのものを求めた．一つは純粋な最大加速度 (n_m') であり，もう一つは fairing 後の最大加速度 (n_m) である．fairing とは具体的には振動的波形の各振幅の中点を通る滑らかな曲線を引くことである．第 12 図に実験結果 (fairing 後の最大加速度 n_m) を理論値と比較して図示してある．第 12 図 (a) は最大加速度を着水速度に対してプロットしたもの，第 12 図 (b) は(14)式の右辺係数

第 11 図 球状底面の着水加速度 [S-2 ($R=203$), $v_0=3.06$ m/s]

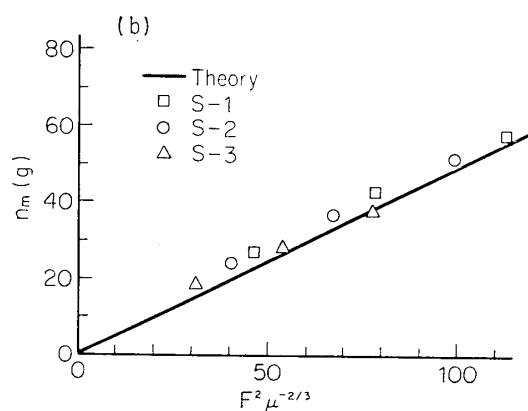
第 2 表 実 験 結 果

Model	Experimental				Theoretical		Observed frequency	
	v_0	n'_m	n_m	t_m	n_m	t_m	cps	mean
	m/sec	g	g	msec	g	msec		
S-1	3.06	67.1	27.0	2.99	23.0	1.88	819	805
	3.94	144	42.8	2.69	38.7	1.44	805	
	4.74	210	57.8	2.68	55.9	1.20	790	
S-2	3.06	80.1	24.2	2.40	20.0	2.16	1100	1073
	3.93	103	36.4	2.32	33.1	1.68	1080	
	4.74	177	51.8	1.43	48.8	1.37	1040	
S-3	3.01	38.4	18.1	2.99	15.5	2.68	993	964
	3.95	58.6	27.7	2.23	26.7	2.04	954	
	4.74	81.8	37.4	2.20	38.3	1.70	946	
S-4	2.92	52.7	23.4	(2.40)	21.2			
	3.79	68.4	31.9	(2.32)	35.9			
	4.59	100	48.6	(1.43)	52.6			
C-1	2.97		11.9	9.72	11.3	11.6		
	3.78		18.3	7.67	18.3	9.10		
	4.75		28.9	6.60	28.9	7.23		
	5.33		38.4	5.90	36.3	6.45		
C-2	2.91		9.09	11.9	9.07	14.2		
	3.80		15.1	8.33	15.4	10.8		
	4.61		22.8	7.13	22.7	8.95		
C-2	2.91		7.16	12.1	7.51	17.1		
	3.90		12.0	10.0	13.5	12.8		
	4.77		18.1	8.77	20.2	10.5		

注：各測定値は各ケース 3～5 回の平均値

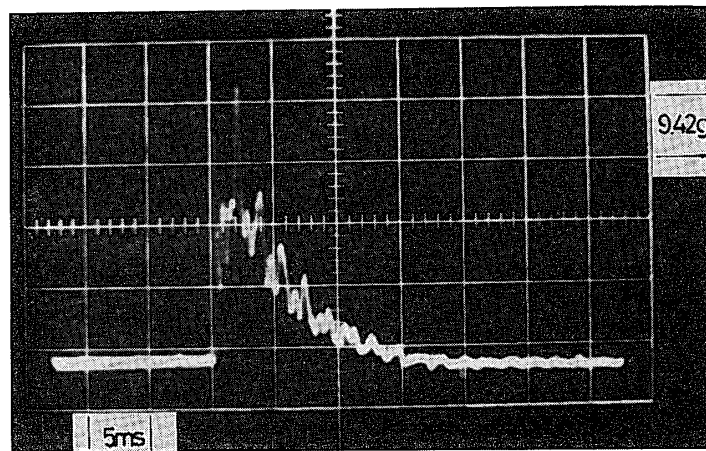


(a)



(b)

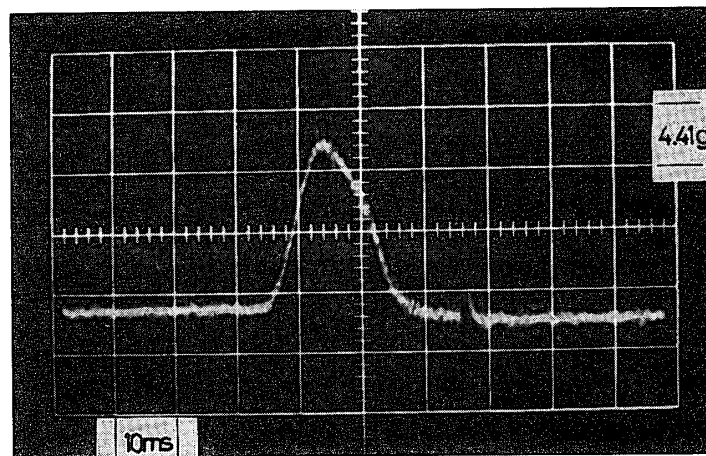
第 12 図 球状底面の場合の実験値と理論値の比較



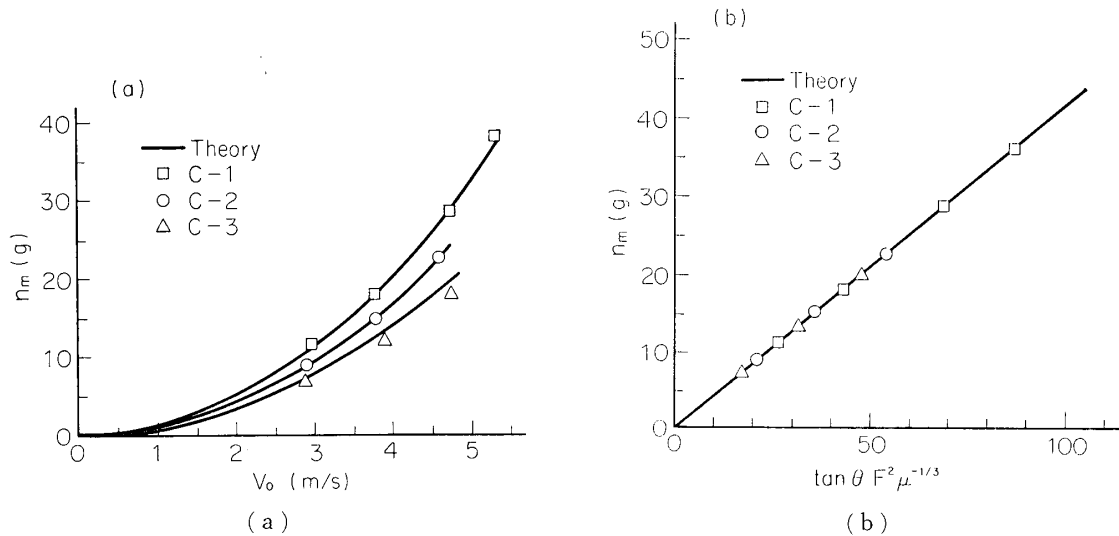
第 13 図 球状底面（木製）の着水加速度
〔S-4 ($R \cong 200$), $v_0 = 2.91 \text{ m/s}$ 〕

の比較を行なったものである．理論値は実験値と概略一致していることがわかる．

振動的波形が生じる原因は種々考えられるが，筆者は構造振動と考えている．その根拠二つを以下に示す．（１）第 11 図のような振動現象の振幅最大時から 5 msec ないしは 10 msec の間の振動数を数えて第 2 表中に observed frequency として記入してあるが，この振動数と第 1 表に示す試験体の固有振動数とはほぼ一致しており，ある相関が見られる．observed frequency は固有振動数の 80% 位であるが，これは現象が過渡的なものであるためと思われる．（２） $R=200$ の「S-4」なる木製モデルの実験結果も第 2 表に示してあるが，fairing 後の最大加速度 n_m は理論値とよく一致している．また，第 13 図に「S-4」モデルの加速度を示すが，これを第 11 図と比較してみる．曲率半径が同じ，着水速度が同じ，重量もほぼ同じの二つの試験体「S-2」と「S-4」の着水加速度特性の著しい差異は何に起因するのであろうか．これは試験体の構造特性によると言わざるを得ない．以上二つの理由で物体が完全剛なときの加速度波形にその試験体の固有振動が重畳していると推論される，これより



第 14 図 円錐状底面の着水加速度〔C-1 ($\theta = 65^\circ$), $v_0 = 2.97 \text{ m/s}$ 〕



第 15 図 円錐状底面の場合の実験値と理論値の比較

fairing することが妥当であると言えるであろう。

(b) 円錐状底面の場合

第 2 表中に実験結果を示してあるが、理論値は(22), (23)式より求めたものである。第 14 図に円錐状底面の着水加速度を示す。この場合には振動的波形を示していないが、これは試験体自体 1,500cps 位までに固有振動数を持たないことと t_m の値が球状底面の場合に比して大きいことによると考えられる。すなわち、現象に対して試験体は十分に剛であるためと言える。第 15 図に実験値をプロットしてあるが理論値と非常によく一致している。

4. 結 論

軸対称底面を有する物体の着水時の衝撃加速度を求める計算式を導いた。さらに、球状底面、円錐状底面の物体の着水後の最大衝撃加速度を closed form で求めることができた。この解析結果に対応して系統的に実験を行ない、解析値は実験値ときわめてよく一致することを見出した。解析は簡単なものであるが軸対称底面を有する物体の着水衝撃荷重を求めるのに十分な精度を持っているものと考えられる。

ところで、実際の構造物において完全に剛と考えられる場合は少なく、その flexibility の影響を考慮する必要がある。前述した球状底面の場合に着水衝撃加速度が第 11 図のような特性を示したが、これもその影響の一つと考えられる。この場合には底面の変形は微小であり水との間に interaction がないと考えてよいと思う。しかし、もし底面が十分に flexible であれば当然水との間の interaction を考慮する必要がある。今後、この方向にも本研究を発展させていきたいと考えている。

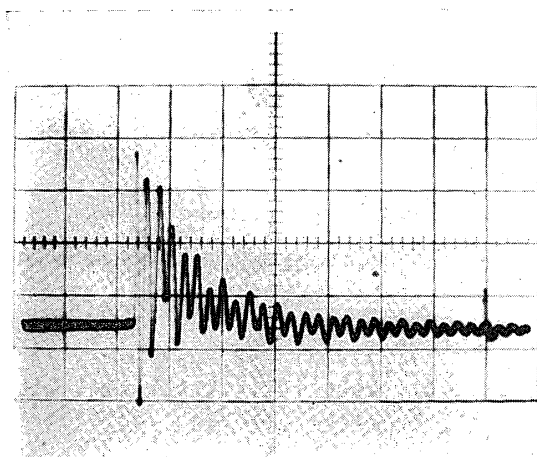
末尾ながら本実験を行なうにあたり助力を得た加藤光弘、鎗木孝美両君に謝意を表する次第である。

1970 年 7 月 17 日 航空力学部

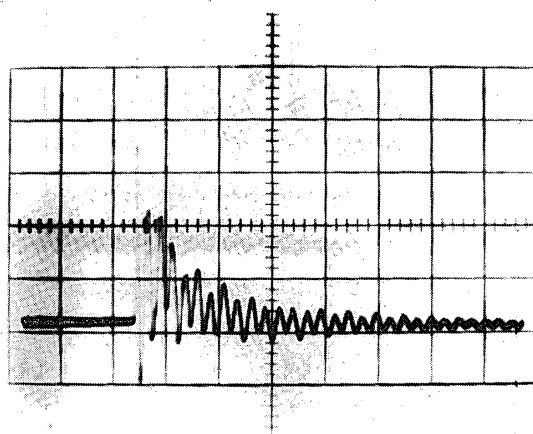
参 考 文 献

- [1] von Kármán, T.: The Impact an Seaplane Float during Landing, NACA TN 321 (1929).
- [2] Wagner, H.: Über Stoß- und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten, ZAMM, Band 12 (1933), pp. 193~215.
- [3] Pabst, W.: Über den Landestoß von Seeflugzeugen, ZFM, 22 Jahrg. (1931), pp. 13~28.
- [4] Bisplinghoff, R. L. and Doherty, C. S.: Some Studies of the Impact Vee Wedge on a Water Surface, J. Fr. Inst., Vol. 253 (1952), pp. 547~561.
- [5] McGehee, J. R., Hathaway, M. E., and Vaughan, V. L.: Water-Landing Characteristics of a Reentry Capsule, NASA MEMO 5-23-59 L (1959).
- [6] Stubbs, S. M. and Hathaway, M. E.: Effect of Bottom-Structure Flexibility on Water Landing Loads of Apollo Spacecraft Models, NASA TN D-5108 (1969).
- [7] Chu, W. H. and Abramson, H. N.: Hydrodynamic Theories of Ship Slamming-Review and Extension, J. of Ship Research, Vol. 4 (1961), pp. 9~21.
- [8] Parr, W. E.: The Water Entry Problem with Bibliography, NOLTR 66-173 (1966).
- [9] Lamb, H.: Hydrodynamics, Cambridge Univ. Press, 6th ed. (1932).
- [10] Hirano, Y. and Miura, K.: Water Impact Accelerations of Axially Symmetric Bodies, J. of Spacecraft and Rockets, Vol. 17 (1970), pp. 762~764.

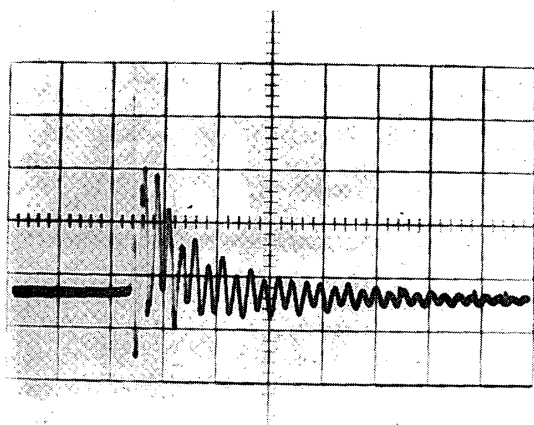
付録 各試験体の各着水速度における衝撃加速度



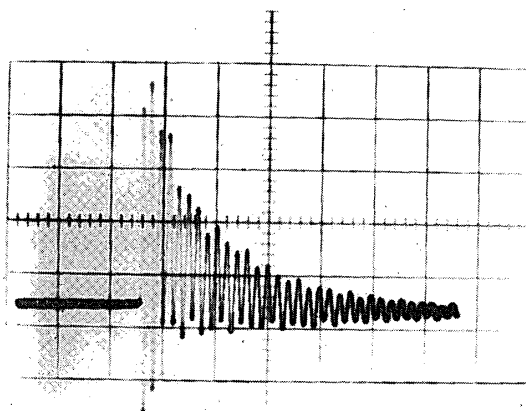
第 A-1 図 S-1, $v_0=3.05$ m/s;
X軸, 5 ms/major division;
Y軸, 20.5 g/major division



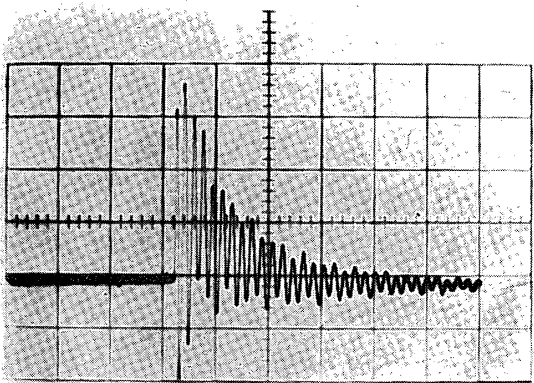
第 A-2 図 S-1, $v_0=3.96$ m/s;
X軸, 5 ms/maj. div.;
Y軸, 43.8 g/maj. div.



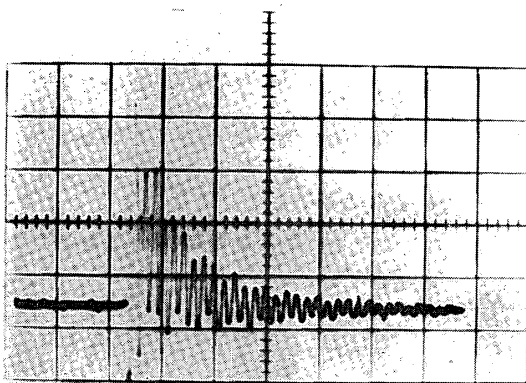
第 A-3 图 S-1, $v_0=4.74$ m/s; X轴, 5 ms/maj. div.; Y轴, 58.0 g/maj. div.



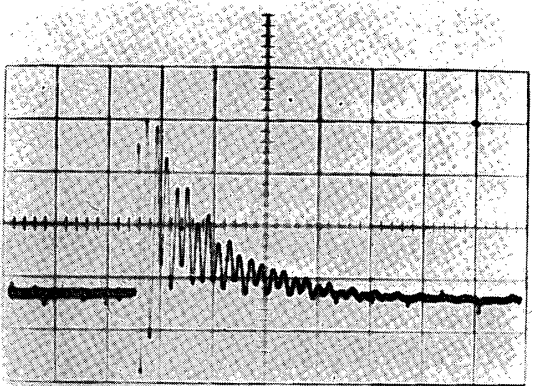
第 A-4 图 S-2, $v_0=3.06$ m/s; X轴, 5 ms/maj. div.; Y轴, 20.8 g/maj. div.



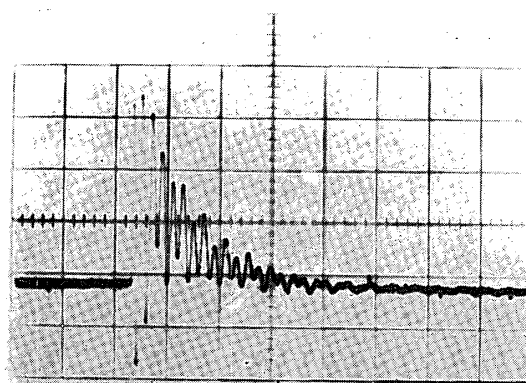
第 A-5 图 S-2, $v_0=3.93$ m/s; X轴, 5 ms/maj. div.; Y轴, 27.4 g/maj. div.



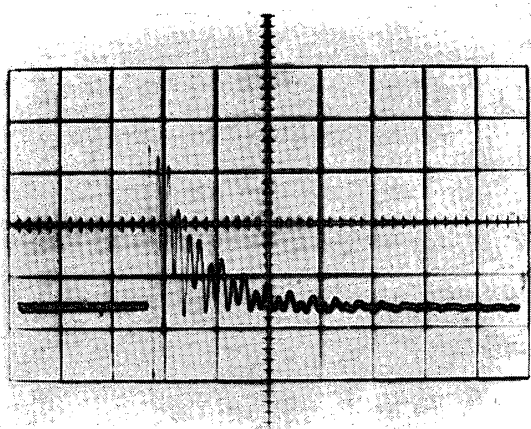
第 A-6 图 S-2, $v_0=4.74$ m/s; X轴, 5 ms/maj. div.; Y轴, 44.4 g/maj. div.



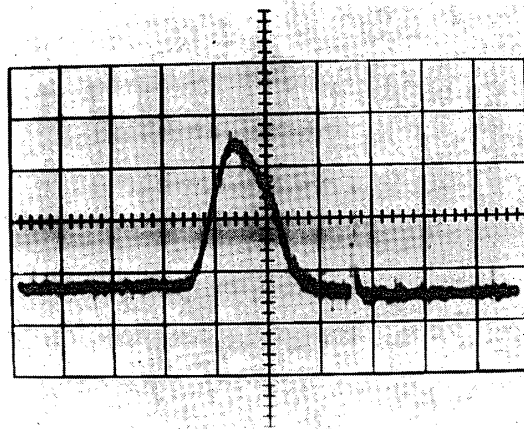
第 A-7 图 S-3, $v_0=3.02$ m/s; X轴, 5 ms/maj. div.; Y轴, 11.5 g/maj. div.



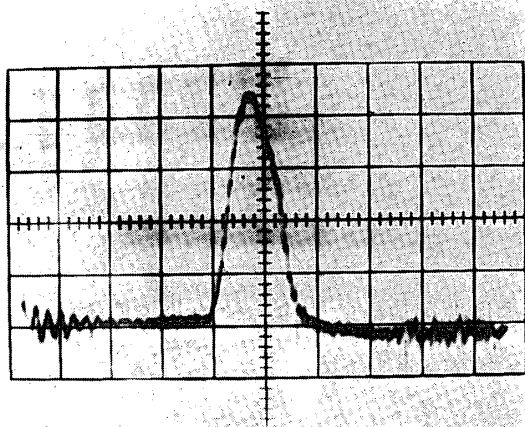
第 A-8 图 S-3, $v_0=3.96$ m/s; X轴, 5 ms/maj. div.; Y轴, 16.9 g/maj. div.



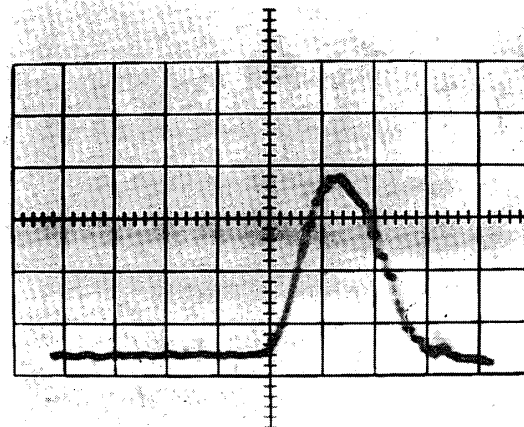
第 A-9 図 S-3, $v_0=4.77$ m/s; X軸, 5 ms/maj. div.; Y軸, 27.8 g/maj. div.



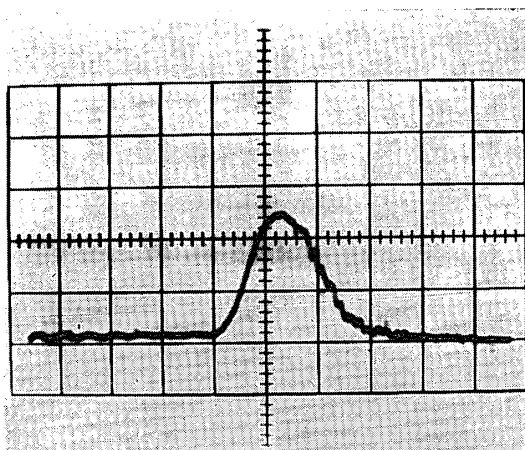
第 A-10 図 C-1, $v_0=2.97$ m/s; X軸, 10 ms/maj. div.; Y軸, 4.41 g/maj. div.



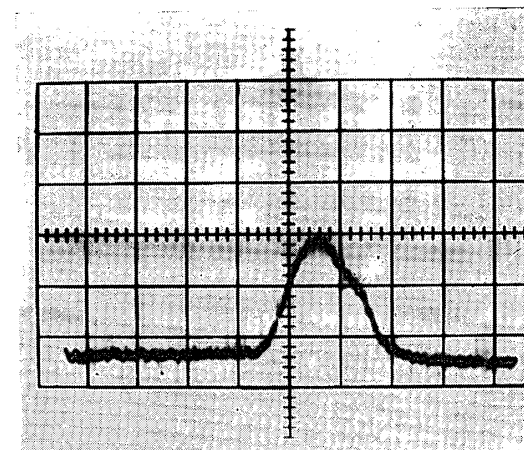
第 A-11 図 C-1, $v_0=3.79$ m/s; X軸, 10 ms/maj. div.; Y軸, 4.32 g/maj. div.



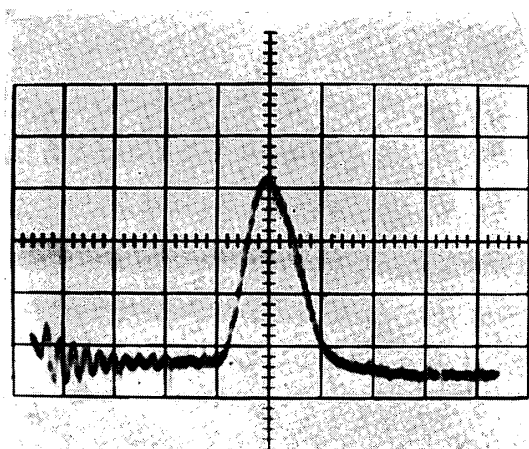
第 A-12 図 C-1, $v_0=4.77$ m/s; X軸, 5 ms/maj. div.; Y軸, 8.75 g/maj. div.



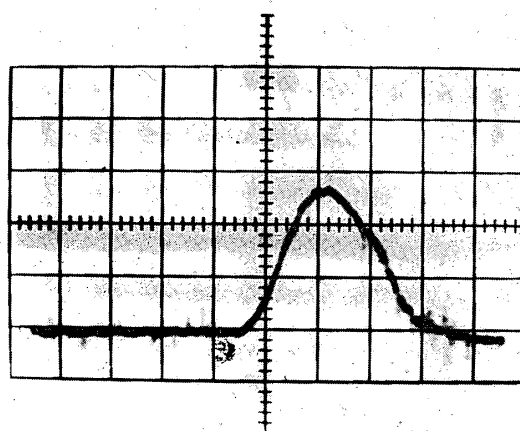
第 A-13 図 C-1, $v_0=5.32$ m/s; X軸, 5 ms/maj. div.; Y軸, 17.1 g/maj. div.



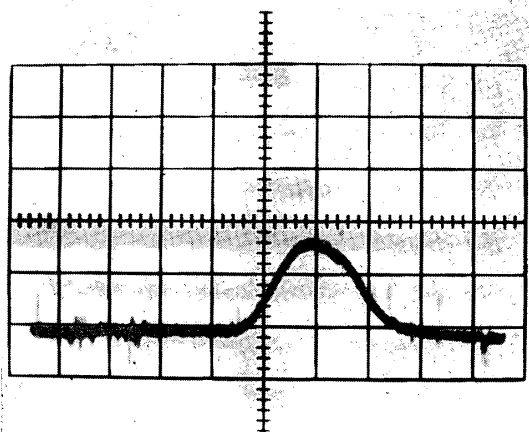
第 A-14 図 C-2, $v_0=2.92$ m/s; X軸, 10 ms/maj. div.; Y軸, 4.18 g/maj. div.



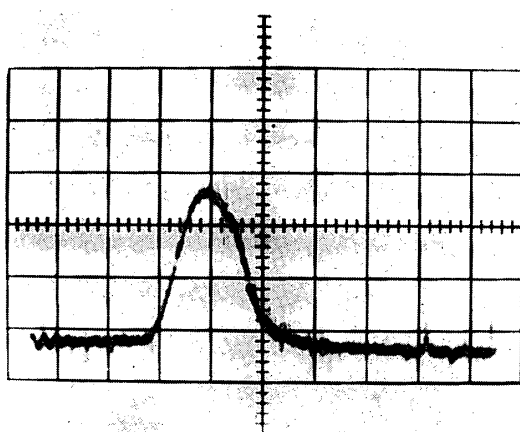
第 A-15 图 C-2, $v_0 = 3.79 \text{ m/s}$; X 轴, 10 ms/maj. div.; Y 轴, 4.25 g/maj. div.



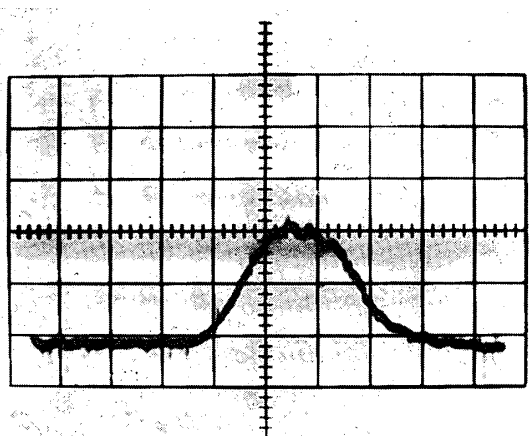
第 A-16 图 C-2, $v_0 = 4.64 \text{ m/s}$; X 轴, 5 ms/maj. div.; Y 轴, 8.26 g/maj. div.



第 A-17 图 C-3, $v_0 = 2.90 \text{ m/s}$; X 轴, 10 ms/maj. div.; Y 轴, 4.26 g/maj. div.



第 A-18 图 C-3, $v_0 = 3.92 \text{ m/s}$; X 轴, 10 ms/maj. div.; Y 轴, 4.18 g/maj. div.



第 A-19 图 C-3, $v_0 = 4.78 \text{ m/s}$; X 轴, 5 ms/maj. div.; Y 轴, 8.36 g/maj. div.