

衝撃的な電磁力による飛び板の平面加速

高橋, 清
九州大学応用力学研究所 : 教授

小松, 治男
九州大学応用力学研究所 : 技官

<https://doi.org/10.15017/4743634>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 55, pp.27-36, 1981-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



衝撃的な電磁力による飛び板の平面加速

高 橋 清*
小 松 治 男**

概 要

平面コイルによる瞬発的な電磁力を利用して金属および非金属製飛び板を平面的に加速することを試みた。銅およびアクリル樹脂の薄い飛び板を用い、後者については 100 m/s 以上の速度が得られた。飛び板の飛しょう姿勢は良好であった。ポリスチレンのスボール破壊実験に応用し、この方法が簡易な短時間矩形形状平面応力波発生手段として有用なことを示した。

Key words: Electromagnetic Force, Plane coil, Flyer Plate, Spall Fracture

1. は じ め に

制御された振幅と時間幅をもつ高圧応力波を固体内に得る方法として飛び板衝突法がある。板試料に飛び板が平面的に衝突することにより生じた矩形形状圧縮波は板の自由表面で反射の後稀薄波に変るが、波の時間幅が十分に短かければ（≪板厚）試料内部で正味の張力波が現われる。この張力波の波頭は非常に高いひずみ速度をもつので極端に高いひずみ速度下における固体の破壊挙動を研究するうえで役に立つ。我々は現在低エネルギーキャパシターバンクによる箔の放電爆発を利用した方法¹⁾で飛び板を真空中で加速してこの種の破壊（以下スボール破壊と呼ぶ）実験を高分子材料について行っている。この方法は通常の実験室内で高圧応力波を固体内に容易に得られる利点がある反面、箔爆発ブロックの製作の手間がかかるという難点がある。また飛び板速度が低速になると飛しょうの 1 次元性がそこなわれる傾向がある。そこで、能率的にこの種の実験が行えて、しかも低速域でも飛しょうの 1 次元性が確保できる簡易な手段の開発が望まれていた。また、そのような方法があれば単にスボール破壊実験のためだけでなく、短時間矩形形状応力波による他のインパクト試験法への応用も考えられよう。以上のような理由でここに報告するような 1 次元飛び板加速法に関する試験研究を行った。

ここで試験した方法は平面コイルに衝撃電流を流すことにより発生する電磁力の利用によるものである。Eisenmenger²⁾は液体中に大振幅の衝撃波を得るために平面コイルを利用した。液体に代って固体を配置すれば固体中に応力インパルスが得られる³⁾⁻⁵⁾。しかしこのようにして得られる応力波は指数関数的な形状の波尾をもち、またその持続時間は放電回路の回路定数に依存するので、短時間（せいぜい

* 九州大学教授，応用力学研究所

** 九州大学技官，応用力学研究所

$2\mu\text{s}$ 以下) 持続の矩形状応力波を得るという目的には適さない. そこでこの研究では平面コイルによる電磁力でいったん薄い飛び板を加速し, それを試料板に衝突させることを試みた. この方法によるならば持続時間が $1\mu\text{s}$ 以下の矩形状応力波も発生し得る.

この方法の実用性の有無を判断することが目的なので, どの程度の飛び板加速が可能かを知ること, 飛しょう姿勢がどうなっているかを知ることの2点を中心にして実験を行った.

2. 実 験 法

写真1にここで用いた平面コイルを示した. コイルはいずれも上縁が露出するようにしてアクリルブロック中にエポキシ接着剤により埋め込まれている. このコイル上に薄い絶縁シートを介して導板(飛び板)をのせる. コイルに衝撃電流を流すと導板に2次電流が誘起される. このときにコイルと導板の間に発生する反撥力により導板(飛び板)が加速されることになる. この回路は等価的には2次側をショートした状態の変圧器と同じである. いま一次側(平面コイル)と二次側(導板)との間隔がわずかで, 両者のカップリングが理想的な場合を考えると1次側のインダクタンス(2次側開放時のインダクタンス)はもれインダクタンス L_l に等しく, L_l は平面コイルと2次側導板の間隔 a の関数であるので, 平面コイルと導板の間に働く電磁力 F は

$$F = \frac{I^2}{2} \frac{dL_l(a)}{da} \quad (1)$$

で与えられる. ここで I は電流である. 平面コイルの巻き数を n , コイルと導板の間の透磁率を μ とすると $L_l(a)$ は

$$L_l(a) = \mu n^2 a \pi \quad (2)$$

で表わせる²⁾. (2) 式を(1) 式に代入し, コイルの面積 πr^2 (r はコイルの半径) で割るならば, 導板単位面積当りに発生する平均的な反撥力 p は

$$p = \mu \frac{n^2}{r^2} \frac{I^2}{2} \quad (3)$$

と表わせる. (3) 式からわかるように電磁力 p はコイルの巻き線密度 (n/r) の2乗, 電流の2乗に

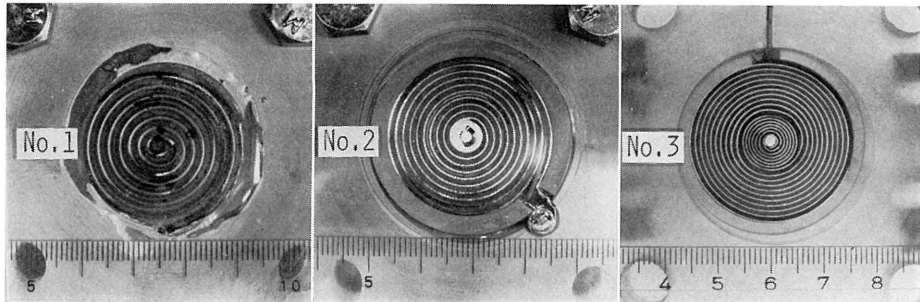


写真1 実験に用いた平面コイル

比例するので、なるべく密に巻いたコイルに大電流を流すことが大きい μ を得る条件となる。一方大電流を流すために高電圧をかけるとコイル（特に中心部）が絶縁破壊しやすい⁵⁾ ため、コイル線の太さや巻き線密度に制約が加わることになる。この実験では表 1 に示すような仕様のコイルを用いてみた。絶縁シートには以前の実験結果⁵⁾ を参考にして厚さ 0.25 mm のポリエステルフィルムを用いた。導板としての飛び板には $20 \times 20 \times 1 \text{ mm}^3$ の銅板片と、同じ大きさの亚克力片の底面に厚さ 0.1 mm の銅箔を接着したもの 2 種類を用いた。

図 1 には放電回路を示した。また写真 2 には装置の配置を示した。キャパシターバンクの容量は $5 \mu\text{F}$ である。飛び板が試料板に当たるまでの飛しょう距離は約 5 mm である。飛び板の速度は、長さが約 1 mm 程異なった 2 対の細銅線（ $50 \mu\text{m}\phi$ ）を試料の衝突側の面の近くに露出させ*、飛び板との接触をパルス信号として検出した¹⁾。亚克力飛び板の衝突側の面には金属蒸着膜をつけて導電性をもたせた。2 対の細銅線間隔はあらかじめ顕微鏡により正確に測定しておく。図 1 の回路の電圧、電流の測定にはそれぞれ高圧プローブおよびロゴスキーコイル（中心直径 105 mm、太さ 10 mm、ターン数 100、積分回路の時定数 1 ms）を用いた。飛び板の飛しょう姿勢の撮影はマルチスパークカメラ RIAM-MC1⁶⁾ によった。

表 1 平面コイルの仕様

コイル No.	導線	線の径 (mm)	リボンの幅×厚さ (mm)	外径 (mm)	巻数	ピッチ (mm)
1	ワイヤー	2.0		30	7	2
2	リボン		10×0.2	31	9½	1
3	リボン		7×0.2	31	16½	1~7 ターン 0.35 7~16½ ターン 0.7

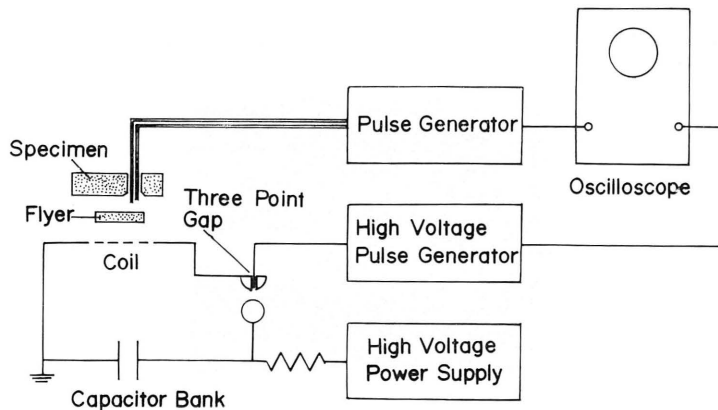


図 1 実験のブロック図

* 衝突時の噛み込みを防ぐため、短い方が望ましい。

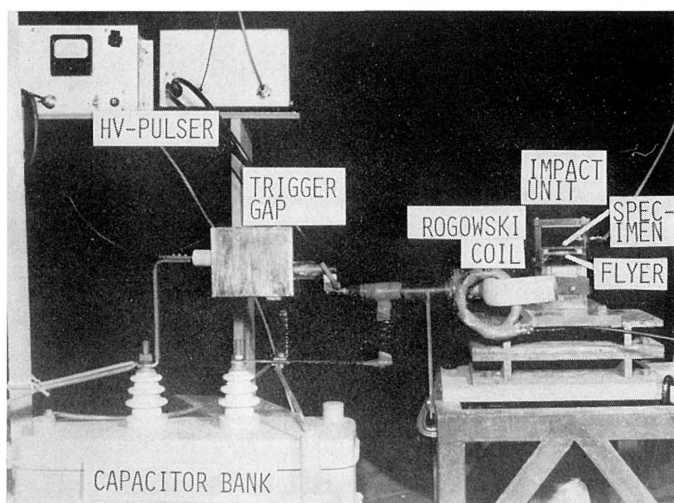


写真 2 実験装置

3. 実験結果と考察

写真3に平面コイル通電時の電圧，電流波形を示した．53 kHz の周波数で減衰振動しており，理想からはかなりはずれた波形になっている．今回は予備的な研究なのでこのままの回路条件で以降の実験を行った．（放電実験時の回路の諸定数は後の付録でまとめた．）図2に飛び板に銅片を用いたときに得られたキャパシターバンク充電電圧 (V_0) と飛び板速度 (v_{fl}) の関係を示した． $V_0 = 5 \sim 10$ kV のわずかな範囲内ではあるが， v_{fl} と V_0 の関係はほぼ直線的となっている．No. 1, 2 に比べ予想通り No. 3 の効率がよい．これは中央付近の巻き線密度が高いことによる．もともと平面コイルによってひき起こされる反発力はコイルに対向している導電板の全面にわたって均一なものではなく，コイルの中心部にあたる部分が弱い．この点が改善されていることが関係している．しかし巻き線のピッチが密になれば当然隣接する線間の絶縁性が悪くなる．このコイルは $V_0 = 8$ kV で絶縁破壊してしまった*．No. 1 と

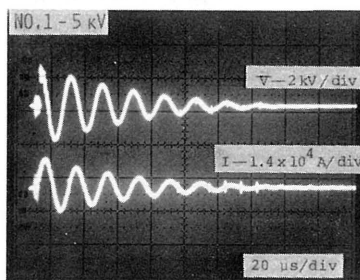


写真 3 放電時の電圧，電流波形の例

* コイルの埋め込みにあたっては絶縁性について特に留意しなかった．この点に留意するならば絶縁性はもっと向上しよう．

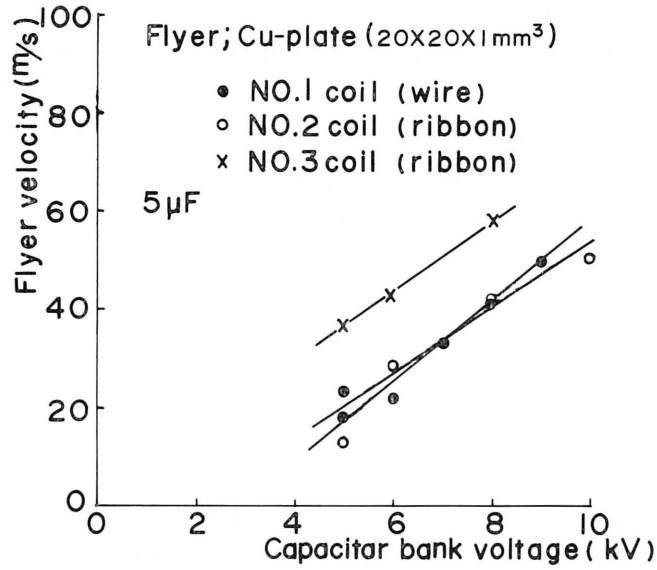


図 2 銅製飛び板の速度とキャパシターバンク電圧の関係

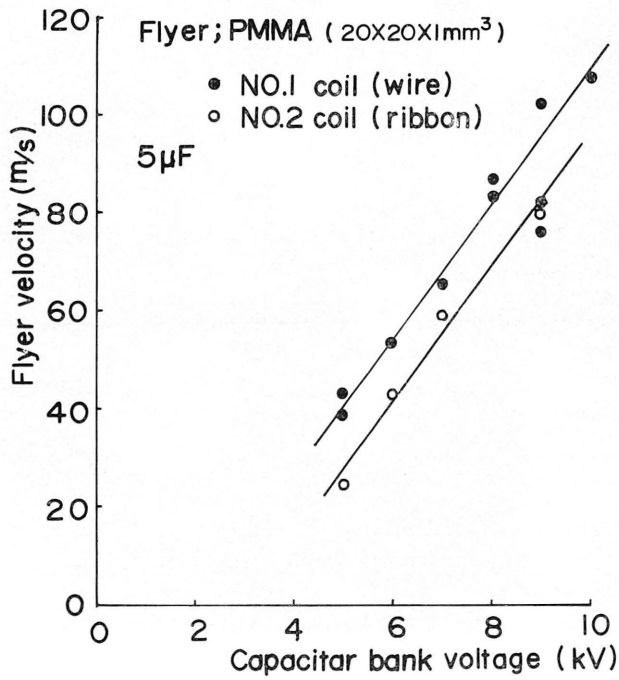


図 3 アクリル製飛び板の速度とキャパシターバンク電圧の関係

2とではほとんど差がみられない。なるべく中心部までコイルを巻きこむ技術、縁面放電を防止するための絶縁性の確保などの問題が解決できるならば、大電流を流しうるのでこの種のリボンコイルは有利であろう。

図3は飛び板にアクリル片を用いた場合の $v_{fl}-V_0$ 特性である。同じ電圧条件に対して図2の場合に比べて v_{fl} が約2倍になっている。銅とアクリル樹脂とでは密度の比は約5なので、(3)式にしたがって同じ電磁力が発生していたと仮定すれば、飛び板の体積は等しいのであるから図3の v_{fl} は図2の約5倍程になるはずである。したがって図3の場合、効率が大幅に低下したことになる。この原因として、アクリル飛び板のコイル側の面に導電性を持たせるために接着した銅箔が薄すぎたことが考えられる*。実験後に回収した銅箔をみると正方形の四辺から中心に向かって半円状に溶けた跡がある。このことは通電時に「平面コイルー導電板」トランスの二次側（導電板）のオーミックな抵抗が無視できない位の値になったであろうことをうかがわせる。図3でNo. 2が1に比べて効率が低いのもこの薄い銅箔が関係しているかも知れない（No. 2のコイルは中心の巻きこみが不足している）。しかしたとえ効率が低下しても、図3で実現している速度は今までの箔爆発によるスポール破壊実験の結果から推定すると、ポリスチレンのような弱い脆性高分子材料の内部にスポール破壊を生ぜしめるに足る速度である。

試料板として厚さ3mmのポリスチレンの圧縮成型板（三菱油化KKの好意により提供された）を用

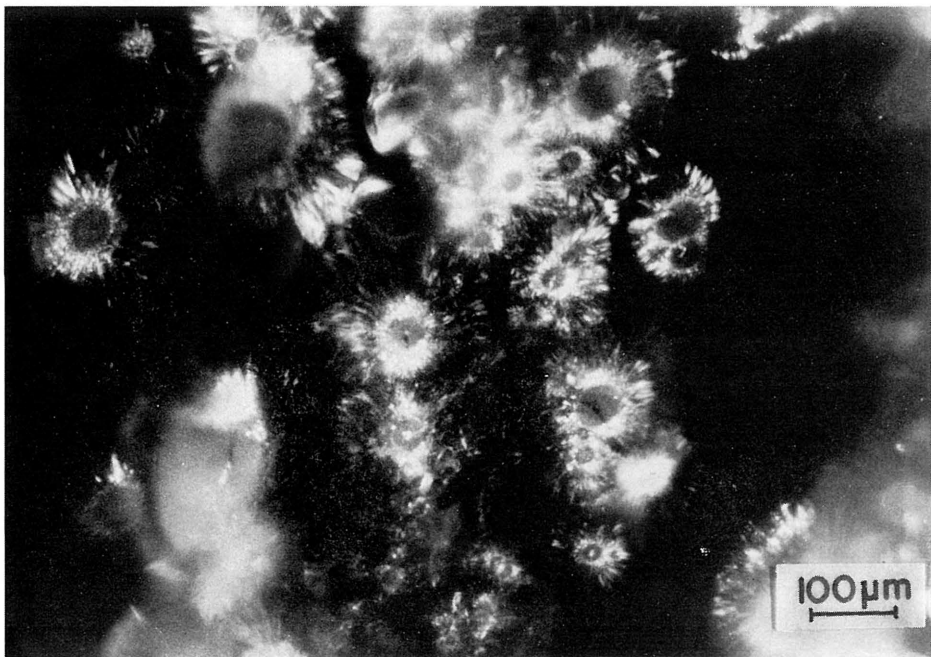


写真4 ポリスチレンの内部に発生したスポール破壊群

* インパクト実験の立場からはこの導体の厚さは飛び板の厚さに比べて無視できる程に薄いことが望ましい。

いて、アクリル片飛び板によるインパクト試験を行ってみた。写真4はその際に試料内部に発生したス
 ポール破壊群の顕微鏡写真である。アクリル試料の場合¹⁷⁾ と同じような基本的形態をもった単位クラ
 ック群が見られる。図3および写真4は衝突時の飛び板の飛しょう姿勢の平面性にさえ問題がなければ、
 この方法が有望であることを示している。

そこで第1には飛しょう姿勢を調べることに、そして第2には飛び板速度測定に現在用いている細銅線
 ピンの精度を検定することを目的として、高速度撮影による飛び板の観察を行った。写真5にその撮影
 結果の一例を示した。5 kV の電圧で No. 1 のコイルにより加速された銅の飛び板を5万駒/秒で撮影
 した。飛しょうの平面性は非常によい。次の写真6はアクリル飛び板を加速したときの組み写真の1部
 で、“離陸”直後(左)および衝突時(右)の姿を示した(No. 1 コイル, 5 kV, 40 m/s)。この場合も
 平面性は良好である。しかしアクリル飛び板の場合には V_0 (つまり v_{fl}) が大になると板にわずかな
 波うち状の変形が起こっているように見うけられる。写真7 (No. 1 コイル, 8 kV, 85 m/s) にその例



写真5 飛び板(銅板)の飛しょう姿勢

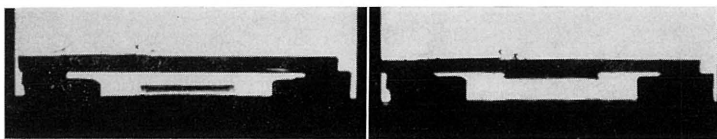


写真6 低速時のアクリル飛び板

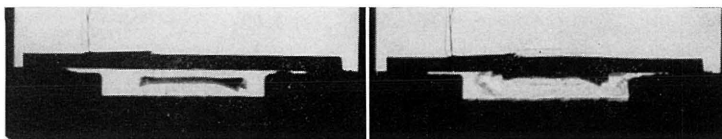


写真7 高速時のアクリル飛び板

を示した．ここではコイル側の面に貼った銅箔は飛しょう中に縁の方で部分的にはく離しているようである．銅箔の部分的なはく離は問題ないにしても，飛び板に生じる波うちは，その程度にもよるが，もし実際に生じているとするならばこの手法を応用しようとするときの目的如何では問題になることがあり得よう．しかしながら，他の例も含め高速度撮影観察の結果からは，この手法による飛び板加速時の“巨視的”な一次元性が予想以上に良好であることがわかった．

細銅線対による飛び板速度測定と高速度撮影による測定の比較が図4および表2でなされている．図4はアクリル飛び板の場合の測定例（No. 1 コイル，5 kV，43 m/s）である．横軸の時間は離陸時（0 μ s）から試料板への衝突（80 μ s）までをとってあり，途中で細銅線対で測定された値が白ぬきの丸印として示されている．表2にはすべての測定結果のまとめを示した（ただし細銅線による計測値が著しく大きな値を出したデータひとつは割愛した）．No. 20 の測定を除き，両者の一致は良好というべきであろう．比較的低速時の測定ではあるが，現在箔爆発によるスポール破壊実験で用いている飛び板速度

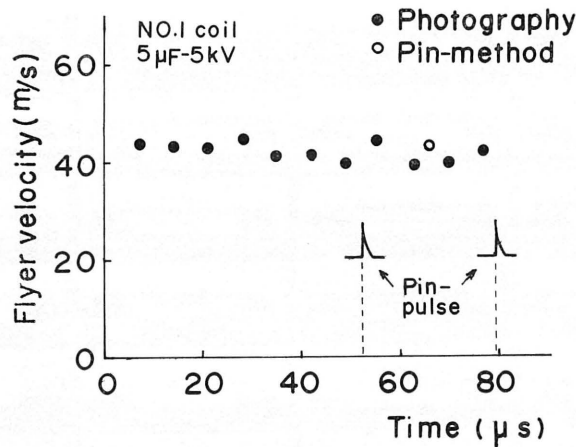


図 4 写真計測による飛び板速度の時間的変化と電気的計測によるデータの比較

表 2 電気的計測および写真計測による得られた飛び板速度

No.	コイル No.	電圧 (kV)	飛び板	細銅線対の 間 (mm)	パルス計測 による速度 (m/s)	撮影による 速度 (m/s)
1-2	1	5	銅	0.74	24	21
1-3	"	"	アクリル	1.05	41	45
1-4	"	"	"	0.72	39	40
1-5	"	"	"	1.10	43	42
1-14	"	8	"	1.03	88	93
1-17	"	"	"	0.80	84	84
13	2	5	銅	0.59	22	20
20	"	"	アクリル	1.11	24	33
6-2	3	6	銅	1.14	42	43

計測法がますますの精度をもっていることがこの結果確められた。

4. 結 論

通常の実験室における空気中および真空中での飛び板の1次元的加速手段として今回試みた平面コイル法は、固体内に高圧の短時間矩形状平面圧縮波を得る方法として有望である。この方法でポリステレン内部にスポール破壊を発生させた。飛び板速度測定法として従来から用いている細銅線対による電気的計測法の精度を高速度写真によって調べ、この実験の速度範囲内では問題の無いことを確めた。

謝 辞

高速度撮影には桜田助手、馬田技官の助力を得た。また栖原研の皆さんにはキャパシターの借用その他でお世話になった。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) 高橋 清: 箔爆発を利用した 衝撃負荷装置と そのスポール破壊発生への 応用, 応用物理 40 (1971) 1335.
- 2) W. Eisenmenger: Elektromagnetische Erzeugung von ebenen Druckstößen in Flüssigkeiten, Acustica 12 (1962) 185.
- 3) Y. Yasumoto, A. Nakamura and R. Takeuchi: Developments in the Use of Acoustic Shock Pulses in the Study of Elastic Properties of Solids, Acustica 30 (1974) 260.
- 4) 安本義正, 杉本孝一, 竹内龍一: 音響衝撃波パルスによる高減衰能合金の減衰特性, 材料科学 15 (1978) 116.
- 5) 高橋 清, 兵藤申一: 放電を用いた 固体中平面圧縮波の生成, 第14回応用物理学連合講演会前刷 (1967).
- 6) K. Takahashi and T. Mada: An Ultra-High Speed Multi-Spark Camera of a Pulse-Control Type, Rep. Res. Inst. Appl. Mech., 28 (89) (1980) 21.
- 7) K. Takahashi: Cracking of Poly (methyl Methacrylate) Caused by Plane Stress Waves, J. Macromol. Sci.-Phys., 8 (1973) 673.

(昭和56年5月30日 受理)

〔付 録〕

以下に使用した平面コイルの諸定数をまとめておく。平面コイル, 導電板を含む放電回路は $L-C-R$ の等価的な直列回路で表わすことができる。この場合, $L=L_l+L_0$, $R=R_1+R_2$ となる。ここで L_0 は平面コイル部以外の通電路のインダクタンス, R_1 , R_2 はそれぞれ平面コイル+導電板をトランスと見たときの1次側および2次側のオーミックな抵抗である。よく知られているようにこの直列回路の減衰振動電流 $I(t)$ は

$$I(t) = \frac{V_0}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (\text{付1})$$

で表わすことができる。ここで ω は角周波数 ($=2\pi f$, f はリング周波数) で, 減衰定数 α は $R/2L$ となる。また L および R は

$$L = (4\pi^2 f^2 C)^{-1} \quad (\text{付2})$$

$$R = \frac{-\delta}{2\pi^2 C f} \quad (\text{付3})$$

で表わせる。ここで δ は減衰振動する電流波形の相隣るピークの振幅の比の自然対数を意味する。一方電流の最大値 I_0 は (付1) 式で $t=T/4$ ($T=1/f$ は周期) として

$$I_0 = 2\pi f C V_0 e^{-\alpha T/4} \quad (\text{付4})$$

となる。付表1には各コイルの電流波形をもとに (付2)~(付4) 式から求まった L , R , I_0 の各値をまとめた。なお, ここでは参考のためにログスキーコイルにより測定された最大電流値 (I_R) ものせておいた。各場合とも飛び板は銅板で, C は $5\mu\text{F}$, V_0 は 5kV である。 I_R の値は I_0 に比べいく分大きめにでるようである。

付表 1 各平面コイルに関する放電回路定数

コイル No.	f (kHz)	L (μH)	R (Ω)	I_R (10^3A)	I_0 (10^3A)
1	53	1.8	0.06	11	7.7
2	50	2.1	0.05	11	7.4
3	40	3.1	0.08	8.4	5.8