

UDC 533.6.013:
533.666.2:
629.76.077.4

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-368

回収用パラシュートの空力特性に関する風洞試験

和田 勇 ・ 久保田弘敏

戸田 亘 洋 ・ 海老沼幸成 ・ 野 中 修

桑野 尚 明 ・ 室 田 勝 一 ・ 星 野 秀 雄

渡 辺 篤 太 郎 ・ 秋 元 敏 男 ・ 松 原 彰 士

1978 年 10 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

回収用パラシュートの空力特性に関する風洞試験*

和田 勇** 久保田 弘敏**

戸田 亘洋*** 海老沼 幸成*** 野中 修***

桑野 尚明*** 室田 勝一*** 星野 秀雄***

渡辺 篤太郎**** 秋元 敏男**** 松原 彰士****

1. まえがき

宇宙空間での無重力、高真空を利用して新しい材料を作るという宇宙材料実験^{1),2)}では、打ち上げビークルの整備とともに、生成物を安全に地上に回収することが必須の条件である。

これら回収計画の第一段階として、宇宙開発事業団では小型ロケット(TT-500A型)を用いることを考えており、その第1号機打ち上げを昭和55年度前期に予定している。この計画では、ペイロードを内蔵するロケット頭胴部は、ロケット本体から切り離されたあと、高度約250km(ペイロードを含んだロケット頭胴部重量約290kgに対し)から落下を始め、空気力学的減速を受けながら高度5~6kmまで降下し、パラシュートによって更に減速されながら海上に到達する。実験生成物の保護のためには、最大減速度ができるだけ小さく、また、回収作業を容易にするためには、落下軌道の分散ができるだけ小さいことが望ましい。このとき、軌道を安定させ、減速を円滑にする目的と、メイン・シュート引き出しの目的のためにドログ・シュートが用いられ、さらに、これによって引き出されたメイン・シュートは、リーフィング(縮傘)と称する抗力調節過程を経て開傘する。リーフィングとは、傘体をリーフィング・ラインと呼ばれるひもで縛り、抗力を受ける面積を小さくすることにより、満膨張までの抗力増加を円滑にする方法である。(4.3.総合評価の項参照)

回収過程中には、各過程に付随する問題点が存在するが、パラシュートによる減速過程は、生成物回収の成否のカギをにぎるものの一つであり、使用するパラシュー

ートの性能(抗力、安定性、開傘信頼性、等)に関する基礎的な研究結果をもとに、適当なパラシュートを選定しなければならない。これらの基礎的なデータを得るため、航空宇宙技術研究所と宇宙開発事業団は、昭和52年度に共同研究を行った。本資料では、この共同研究の結果について報告する。

パラシュートに関する文献は、歴史的にみて、西ドイツ、イギリス、アメリカ、ソ連等に多く、AIAAでは2年ごとに“Aerodynamic Deceleration Systems Conference”が開かれるほどで、パラシュートの開傘理論、風洞実験、投下実験、運動・強度のコンピュータ・シミュレーション等の研究の推移を見ることができる。最近の研究の解説は文献3に詳しい。日本では、中村⁴⁾による解説がある。

風洞実験に関しては、Sandia研究所(アメリカ)における一連の低速、遷音速の試験方法、結果が公表されており⁵⁾、火星探査計画の遂行の必要上、遷音速での試験がNASAラングレー研究所でも行われている⁶⁾。

本共同研究は、これらの研究結果を参考にしつつ、通常実用に供される平面傘、リングスロット傘、リブレスガイド傘、及び、最近、火星突入カプセルの制動用としても注目され始めているディスク・ギャップ・バンド(DGB)傘の4種類のパラシュートを取りあげ、その性能を調査することによって、ドログ・シュート及びメイン・シュートに適当なものを選定する資料を得ることを目的としている。この研究により、各パラシュート固有のデータが得られたので、今後、高空投下等の試験結果をも加味すれば、小型ロケット・ペイロード回収システム開発に十分寄与するものと思われる。

2. 記号

C_D : 抗力係数(3)式参照)

C_K : リーフィング解除時の荷重係数

* 昭和53年8月25日 受付

** 空気力学第一部

*** 空気力学第二部

**** 宇宙開発事業団

$$C_K = D_m / D_{op} = D_m / \frac{1}{2} \rho V^2 (C_D S)_{op}$$

- D : 抗力 (kg)
- d : パラシュート直径 (m)
- m : 傘体を受ける空気質量 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$)
- Δm : リーフィング解除によって傘体を受ける空気質量の増分 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$)
- S : パラシュート面積 (m^2)
- t : 時間 (s)
- Δt : リーフィング解除時からピーク抗力発生時までの時間 (s)
- t_{fill} : 準静的過程によって、リーフィング解除時から満膨張状態に達するまでの時間 (s)
- V : 風速 (m/s)
- λ_g : パラシュート布のポロシティ (%)
- ϕ : リーフィング度 (%) ((1)式参照)

添字

- C : リブレスガイド傘の満膨張状態
- m : 最大荷重の状態
- O : 展開された状態
- op : 満膨張の状態
- P : 投影された状態
- r : リーフィング状態

3. 試験内容

3.1 試験の目的

パラシュート性能に影響を与えるパラメータは次のとおりである。パラシュート各部名称は図1に示した。

① パラシュートの種類

- ② パラシュートの大きさ
- ③ パラシュート布のポロシティ
- ④ ゴアの数
- ⑤ 吊索の長さ
- ⑥ ライザー・ラインの長さ
- ⑦ リーフィング・ラインの長さ
- ⑧ 回収装置(海面浮揚用浮袋等)の大きさ及び重さ
- ⑨ 前置物体(回収ベイロード)の大きさ及び形状
- ⑩ 速度

この試験では、②、③、④、⑤、⑥、⑨を一定にして、①、⑦、⑧、⑩を変化させることにより、その効果をしらべることにした。

試験の内容は、3.5で後述するように、風速、リーフィング度を一定にしたときの抗力を測定し、かつ傘体運動の安定性を観察する静的試験と、リーフィング状態にあるパラシュートがリーフィング・ライン切断により、リーフィングを解除される時の過渡特性をしらべる動的試験とから成る。

3.2 供試体

試験に供するパラシュートは、回収システムに使用できると考えられる4種類のものを選択し、メイン・シュートとして適当と思われる平面傘、リングスロット傘、ディスク・ギャップ・バンド(DGB)傘に対しては、ダミーフロート付きのものも準備した。ダミーフロートは、前記⑧の効果を見るためのものであり、各傘体の上部に縫いつけた直径約15cmの球状の布袋である。この7種の供試パラシュート(藤倉航装製)を表1に、各パラシュートの模式図を図2に示す。傘体の直径はそれぞれ1

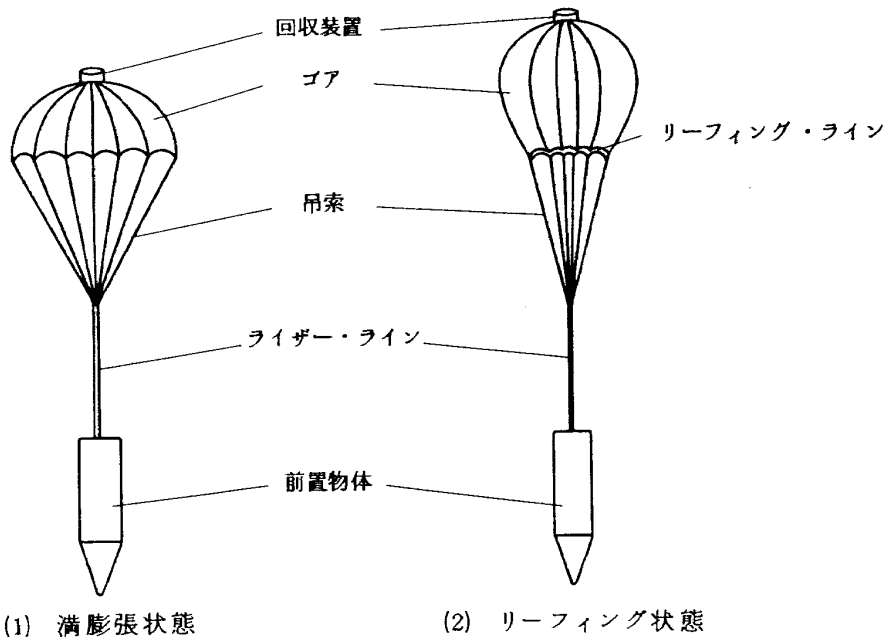


図1 パラシュート各部名称

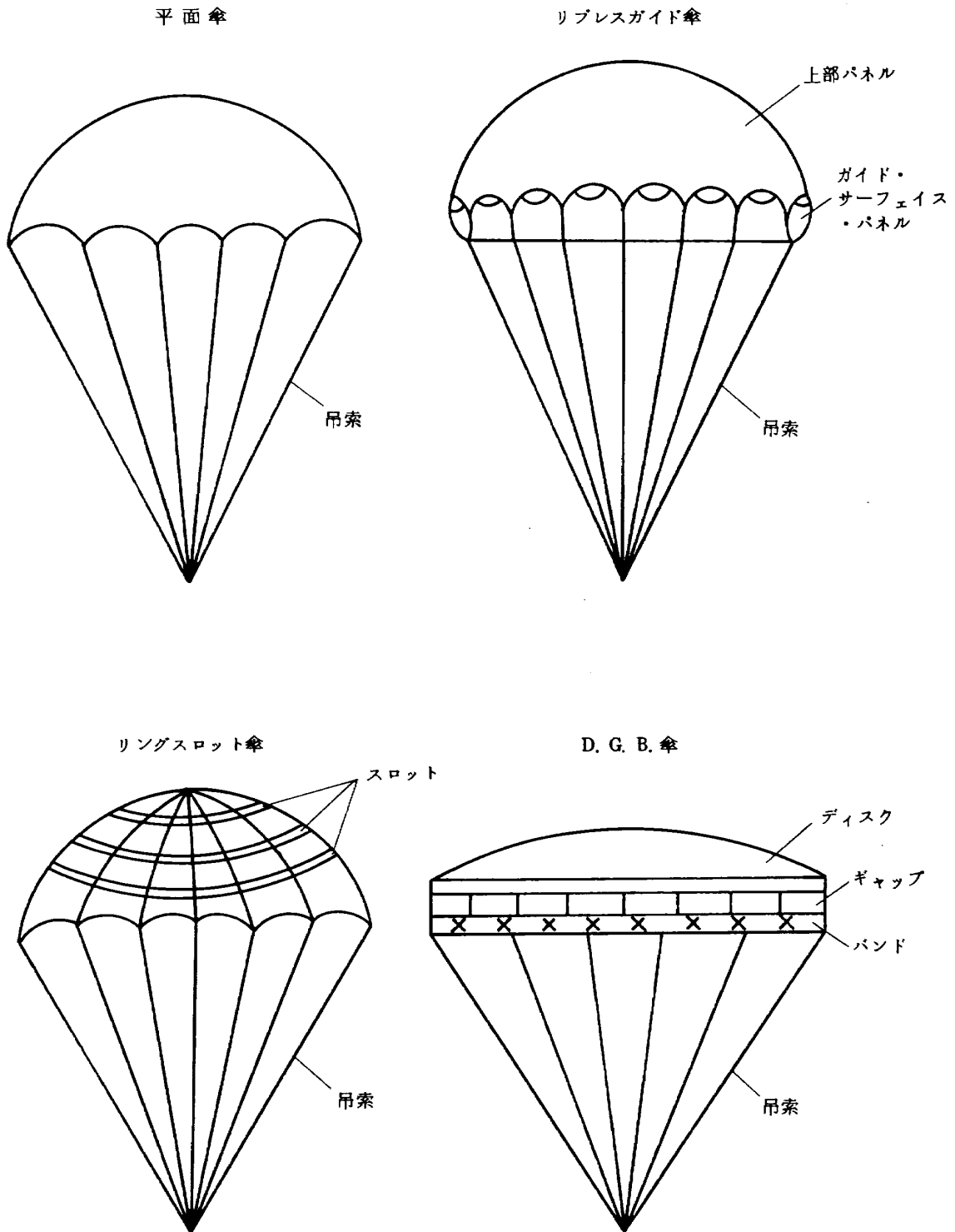
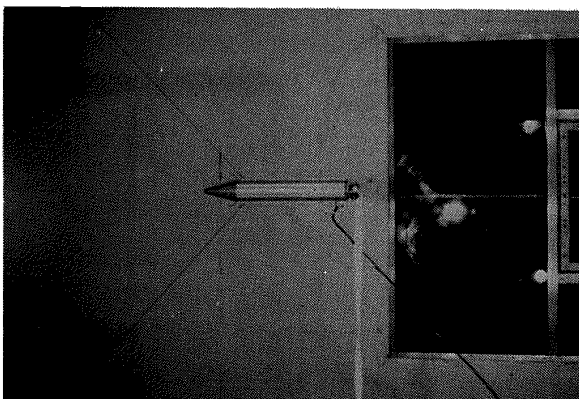


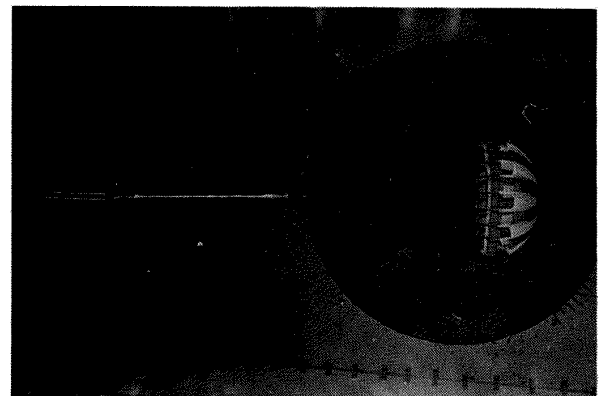
図2 試験パラシュートのタイプ

表 1. 供試パラシュート

パラシュート(略号)		個数
1. 平面傘	(SFC)	1
2. ダミーフロート付平面傘	(SFC&F)	1
3. リブレスガイド傘	(RGS)	1
4. リングスロット傘	(RS)	1
5. ダミフロート付リングスロット傘	(RS&F)	1
6. ディスク・ギャップ・バンド傘	(DGB)	1
7. ダミーフロート付ディスク・ギャップ・バンド傘	(DGB&F)	1



(1) ロケット頭胴部



(2) 全体系

図 3 パラシュート支持方式

mで、これはメイン・シュート(約6m)の1/6の大きさである。

各パラシュートは、ライザー・ラインを通じて、前置物体に内蔵された一分ロードセル(新興通信製U2M1型200kg級(校正係数22.226kg/V))に接続した(図3)。実飛行条件に相似させるために、前置物体形状はTT-500A型ロケット頭胴部とし、パラシュートと同じ1/6の縮尺比としている。ロケット頭胴部は、風胴の中心に位置するように、前部を4本、後部を2本のピアノ線(直径1.6mm)で支持した。風胴へのセット状況は図4(1)に示した。

3.3 風胴

航空宇宙技術研究所の大型低速風胴⁷⁾を用い、風速を10m/sから60m/sまで10m/sおきに変化させた。風胴使用期間は昭和53年2月1日から同2月16日までの2

週間であった。

3.4 計測及び記録装置

測定系のS/N比を改善するため、一分ロードセル出力は、直接歪増巾器で500倍に増巾され、計測室でビジュグラフ及びデジタル・プリンタに記録される。ビジュグラフには、ロードセル出力の他に、リーフィング・ライン・カッタ点火スタート信号、及びリーフィング・ライン切断信号も記録する。測定系の総合精度は、ロードセル容量の±0.6%以内である。計測ブロック図を図4(2)に、点火コントローラ回路図を図4(3)に示す。

16mmムービーは、測定部天井または測定部横(Aムービー)、および風胴内上流の集合胴下隅(Bムービー)に各一台を設置し、白黒あるいはカラーのフィルム撮影を行う。これと平行し、35mmスチール写真(測定部横:Aカメラ、集合胴:Bカメラ)の撮影を行

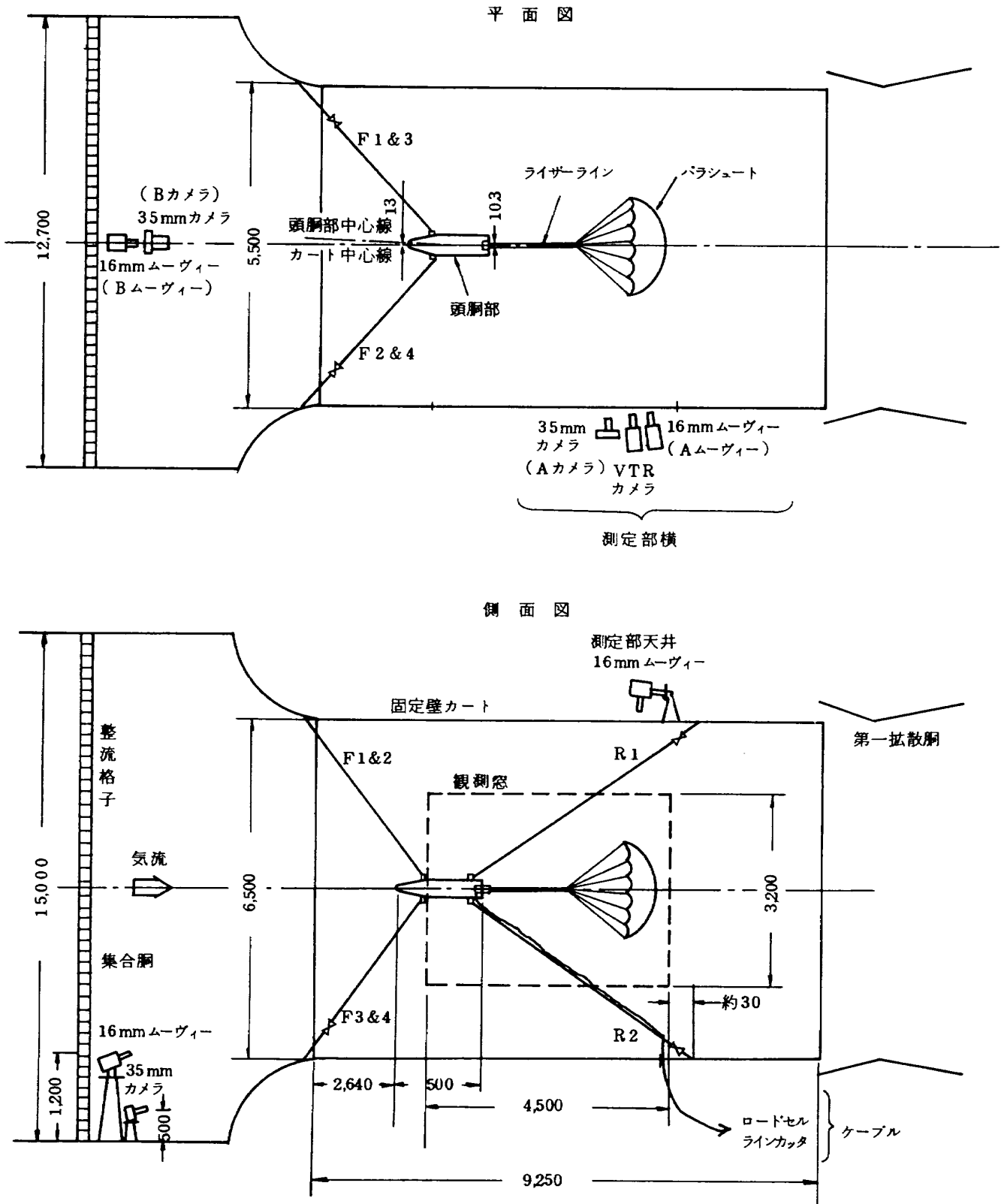


図4(1) 供試体及び記録装置セット状況(単位 mm)

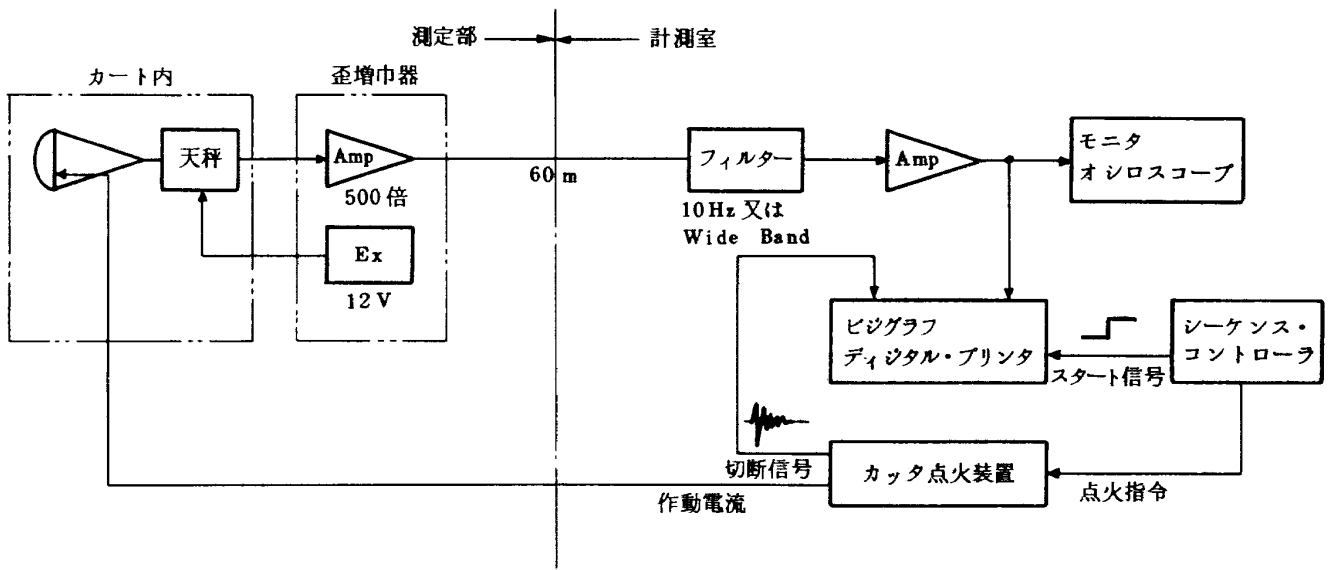


図 4(2) 計測ブロック図

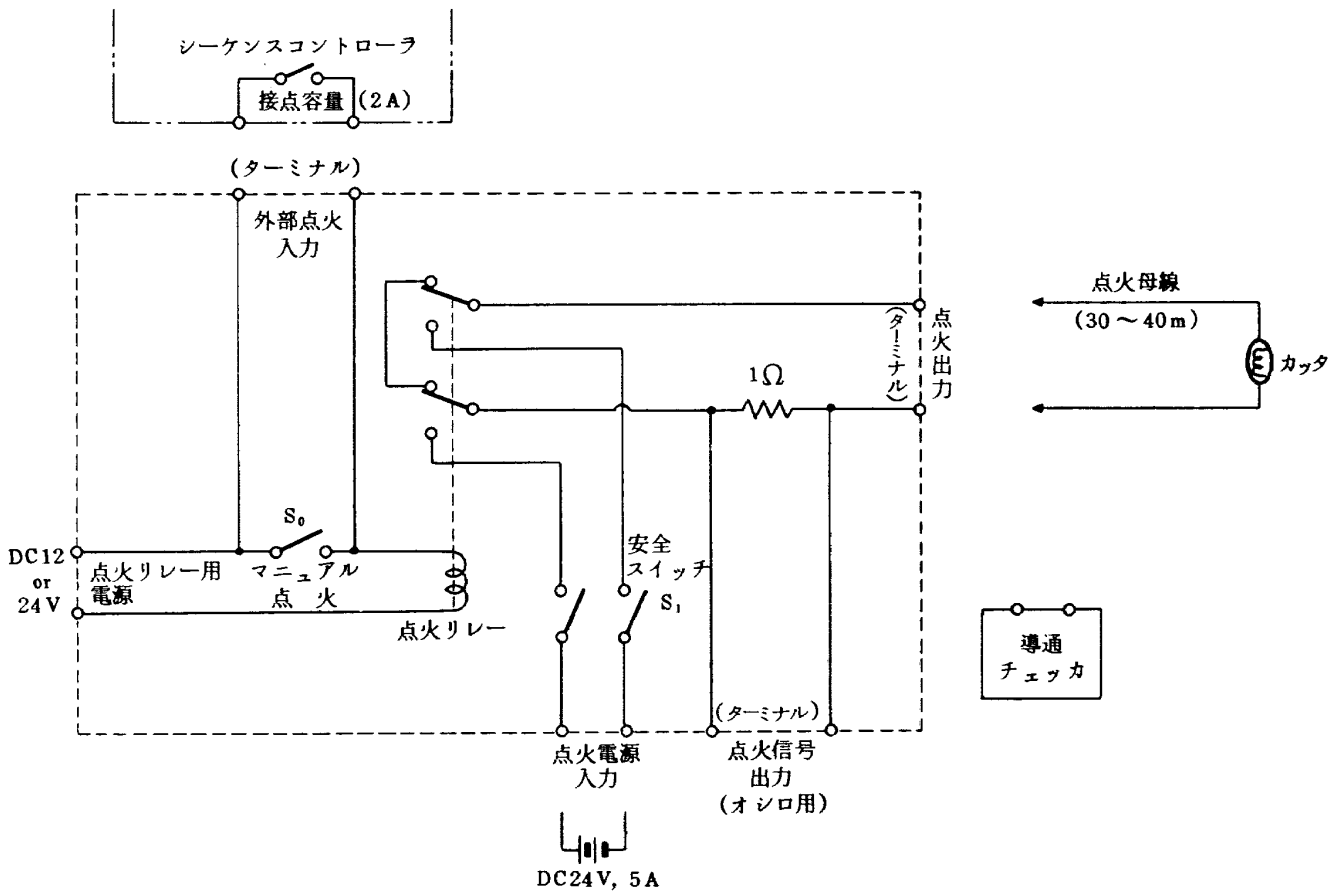


図 4(3) 点火コントローラ回路図

い、同時にVTRの採録も行い。これらのおおよその位置は図4(1)に示してある。

3.5 試験ケース

1) 静的試験

各々のパラシュートについて、風速(10m/sから60m/sまで)、および、リーフィング度(70%、40%)をパラメータとして、抗力を測定し、抗力係数を得る。風速は、リブレスガイド傘については10m/sから10m/sごとに、他傘については20m/sから10m/sごとに上昇させ、ヒステリシス効果をみるために、風速降下中、40m/sおよび20m/sでも測定を行うこととした。

ムーヴィー、スチール写真は、パラメータ毎に全て撮影し、ムーヴィーのコマ送り速度は、Aムーヴィー、Bムーヴィーともに、24コマ/sとした。

2) 動的試験

あらかじめリーフィングされたパラシュートが、リーフィングを解除される時の過渡特性を、抗力測定、ムーヴィー、および、目視観測により調査する。リーフィング解除には、リーフィング・ライン・カッター(Hi-shear製SL1021)を使用し、リーフィング・ラインを切断する方法を採用した。このときの点火コントローラ回路図は図4(3)に示されている。初期リーフィング度は70%、および40%とし、風速は40m/sとした。

ムーヴィーのコマ送り速度は、Aムーヴィーで32コマ/s、Bムーヴィーで24コマ/sとした。

3) カッター作動試験

試験に先立ち、ダミーのパラシュート片(カッター取付部)を使い、カッターの作動、ならびに点火コントローラの作動を確認した。

上記の内容の試験ケースを表2に示す。

表2. パラシュート風洞試験

RUN NO	静的試験		RUN NO	動的試験	
	パラシュート	リーフィング度(%)		パラシュート	リーフィング度(%)
RUN-1	SFC	-	D1	SFC	70
2	SFC&F	-	D2	SFC&F	70
*3 3-1	RGS	-	D3	RGS	70
*4 4-1	RS	-	D4	RS	70
*5 5-1	RS&F	-	D5	DGB	70
*6 6-1	DGB	-	D6	DGB&F	70
*7 7-1	DGB&F	-	D7	SFC	40
8	SFC	70	D8	SFC&F	40
9	SFC&F	70	☆D9	RGS	40
*10 10-1	RGS	70	D10	RS	40
*11 11-1	RS	70	D11	DGB	40
*12 12-1	RS&F	70	D12	DGB&F	40
13	DGB	70			
14	DGB&F	70			
15	SFC	40			
16	SFC&F	40			
17	RGS	40			
18	RS	40			
19	RS&F	40			
20	DGB	40			
21	DGB&F	40			

D9-1……予備試験 RGS 40%

D9-2……☆吊索ネジレの為カッター作動するも開傘せず。再試験

(注)
SFC; 平面傘
RGS; リブレスガイド傘
RS ; リングスロット傘
DGB; ディスクギャップバンド傘
&F; ダミーフロート付

*印はロードセル支持法不良のため再試験-1を付したものを正データとする。

4. 試験結果とその検討

4.1 静的試験

7種のパラシュートについて、風速 40 m/s での試験中の写真を図 5(1)~(7)に示した。いずれも、左側はAカメラ、右側はBカメラによる写真である。

各試験ケースで得られた抗力値Dを図6に示す。ロードセル出力からみると、各パラシュートともに4~5Hzの振動をしている⁸⁾。また、パラシュートの種類にもよるが、風速が増すにつれて、出力値の振巾も大きくなる。ここでは、抗力は、出力値の時間的平均量から得ることとした。図6(1), (2), (3)は、それぞれリーフィングなし、リーフィング度70%、40%に対する結果である。

図7にリーフィング直径 d_r による結果を示す。リーフィング度 ϕ は、リーフィング・ラインによって作られる円形断面積(パラシュート空気入口面積)と満膨張時のそれとの比で定義されるから、

$$\frac{\phi}{100} = \left(\frac{d_r}{d_{rop}} \right)^2 \quad (1)$$

と書ける。これから、リーフィング直径は

$$d_r = d_{rop} \sqrt{(\phi/100)} \quad (2)$$

となり、リーフィング度の平方根に比例する。リーフィングなしのときのリーフィング直径 d_{rop} は、パラシュート布から成る半球の直径に等しい、とした。

抗力係数 C_D は

$$C_D = D / \frac{1}{2} \rho V^2 S \quad (3)$$

で得られる。各パラシュートの諸元は表3に示したとおりであり、通常用いられる基準面積として、平面傘、リ

ングスロット傘に関しては展開された面積 S_0 をとる(リングスロット傘ではスロット面積も含む)のに対し、リブレスガイド傘に関しては投影面積 S_p をとり、DGB傘に関しては構成された面積 S_C (ディスク面積+バンド面積)をとることになっている。この基準面積を用いて整理された抗力係数 C_D は図8(1), (2), (3)に示され、それぞれ、リーフィングなし、リーフィング度70%、40%に対するものに対応する。図8(1)には、各パラシュートの公称抗力係数との比較も行っている。

本試験で明らかになった特徴的な点は次のとおりである。

1) 平面傘は安定性が悪く、振れ、振動が大きすぎるため風速上昇は50 m/sで打ち切らざるを得なかった。リブレスガイド傘、リングスロット傘は極めて安定でありDGB傘は比較的安定と判断される。但し、平面傘もリーフィングすると比較的安定である。

2) 抗力は風速が増すと大きくなる。パラシュート種類によって、リーフィング時の抗力の特性が異なり、抗力値の順に並べると

リーフィングなしのとき：

$$RGS > SFC > RS > DGB$$

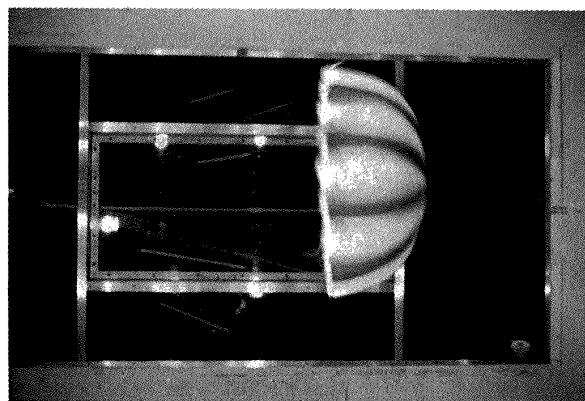
リーフィング度70%のとき：

$$RGS > DGB > SFC > RS$$

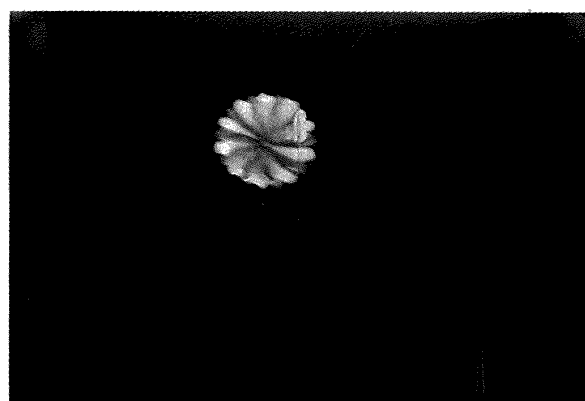
リーフィング度40%のとき：

$$RGS > DGB > RS > SFC$$

となる。これからわかるように、リブレスガイド傘はリーフィング度を変えても常に他傘より大きな抗力を有する。DGB傘は、リーフィング度を小さくしたとき、他傘にくらべて大きな抗力を生じる。逆に、平面傘は、リ



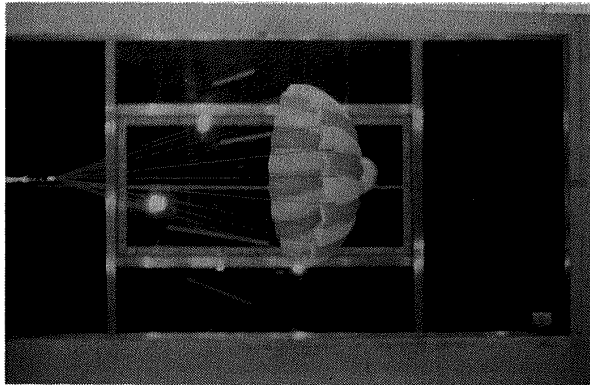
Aカメラで撮影



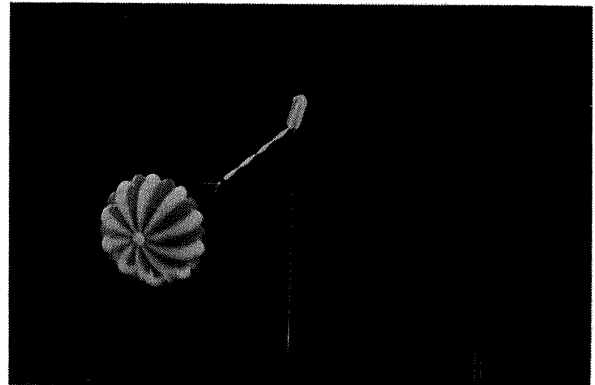
Bカメラで撮影

(1) 平面傘

図5 静的試験中のパラシュート(風速 40 m/s)

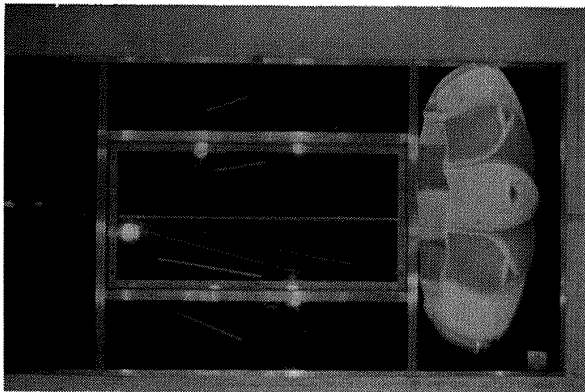


Aカメラで撮影

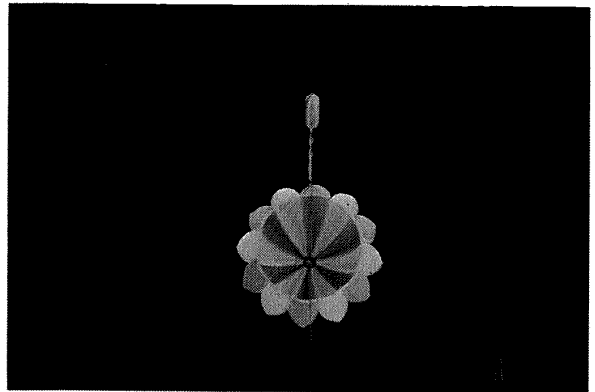


Bカメラで撮影

(2) ダミーフロート付平面傘



Aカメラで撮影

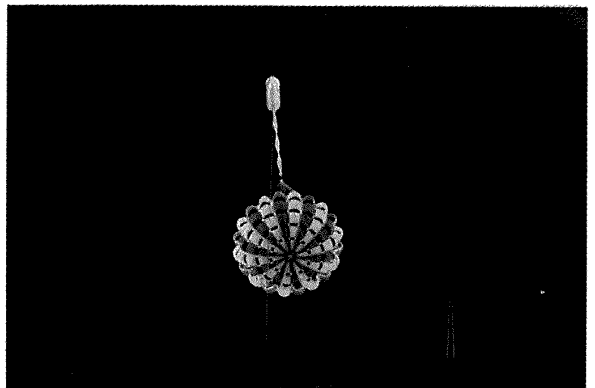


Bカメラで撮影

(3) リブレスガイド傘



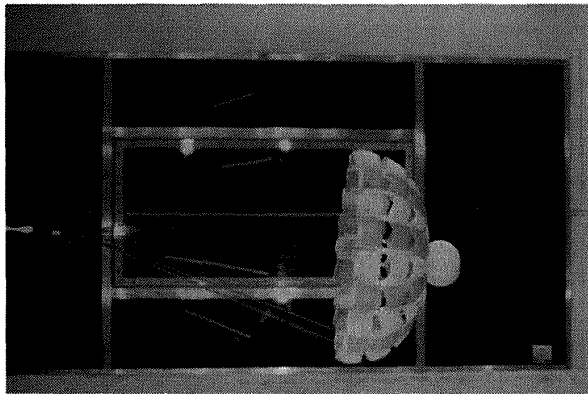
Aカメラで撮影



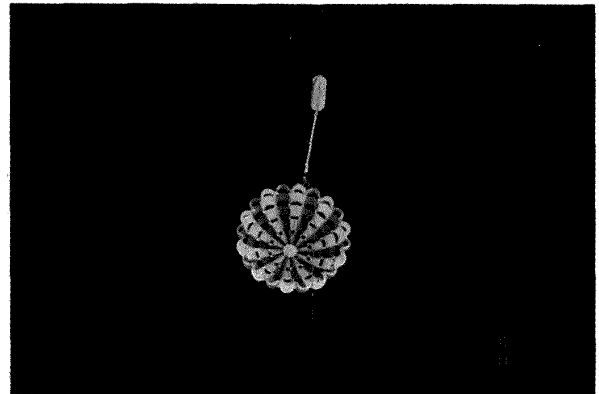
Bカメラで撮影

(4) リングスロット傘

図5 静的試験中のパラシュート(風速 40 m/s) つづき

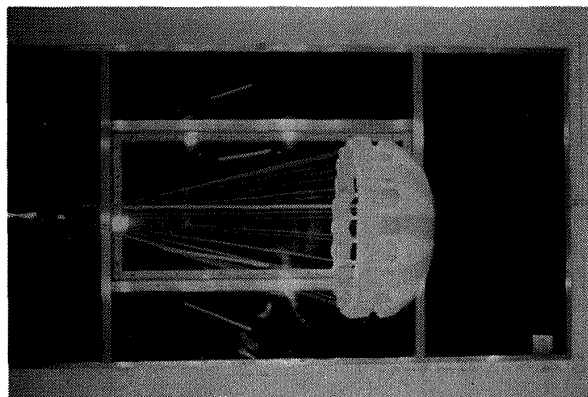


Aカメラで撮影

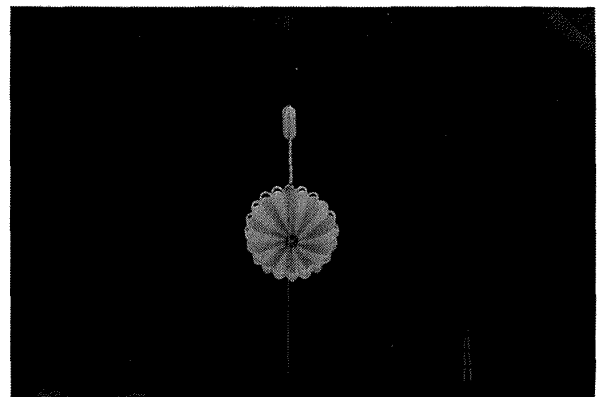


Bカメラで撮影

(5) ダミーフロート付リングスロット傘

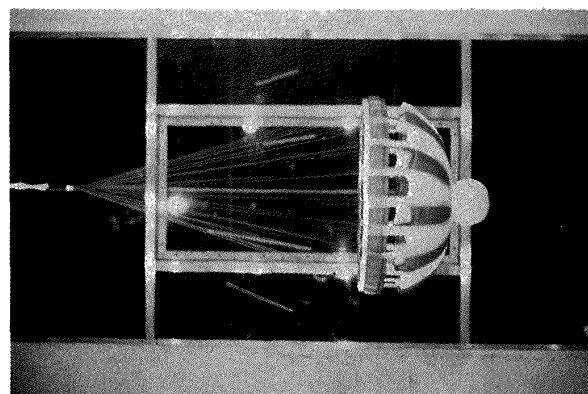


Aカメラで撮影

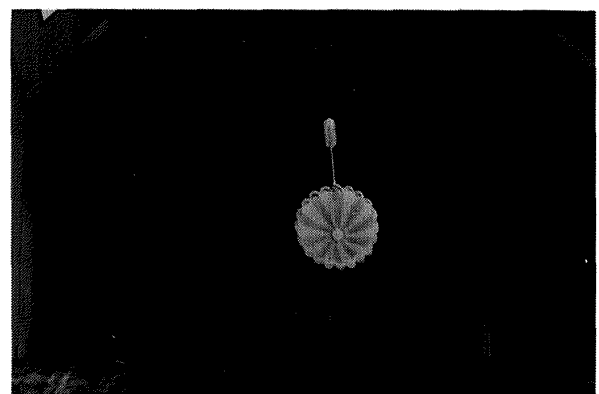


Bカメラで撮影

(6) DGB傘



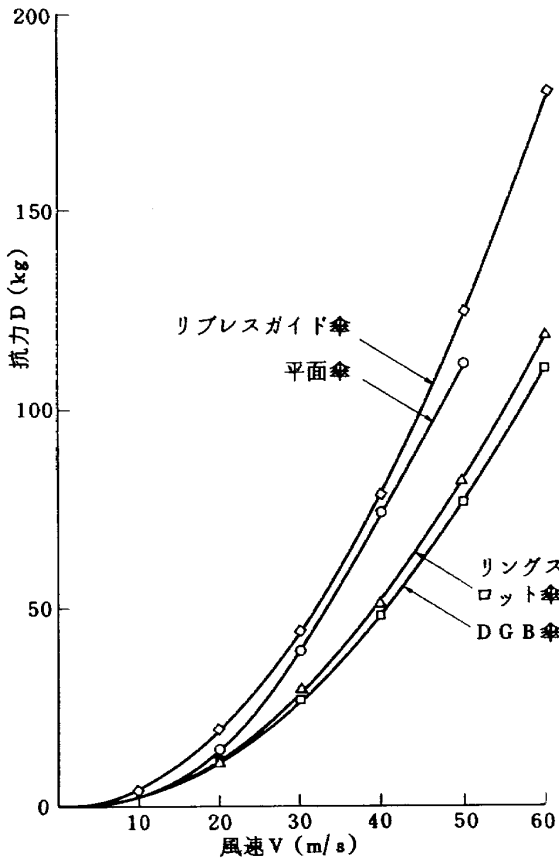
Aカメラで撮影



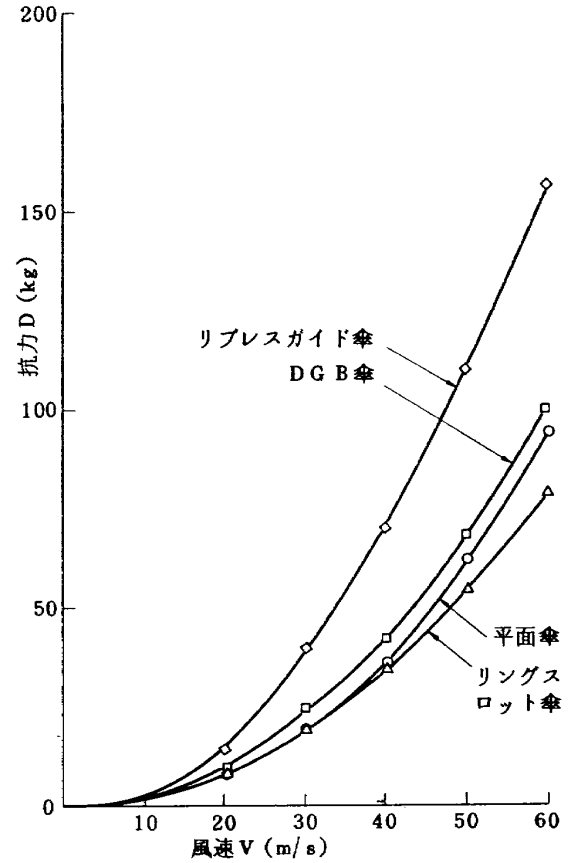
Bカメラで撮影

(7) ダミーフロート付DGB傘

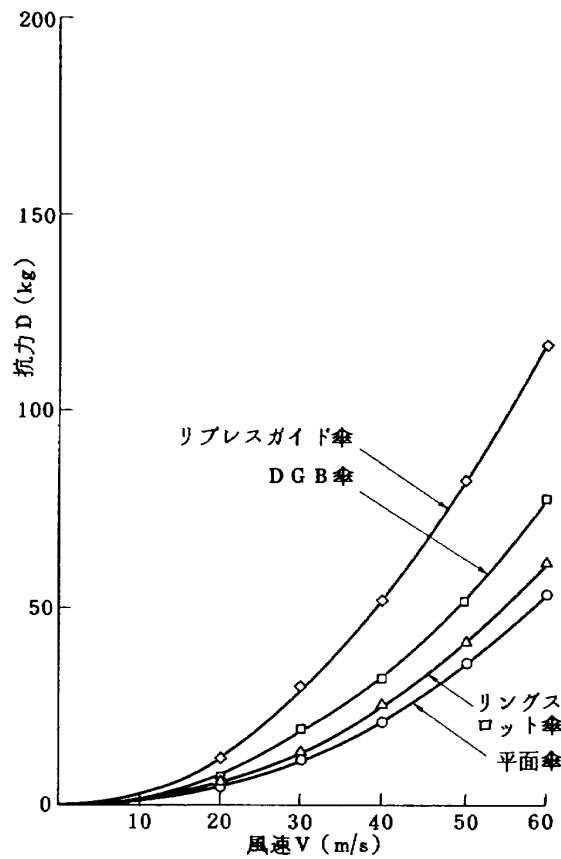
図5 静的試験中のパラシュート(風速 40 m/s) つづき



(1) リーフィングなし

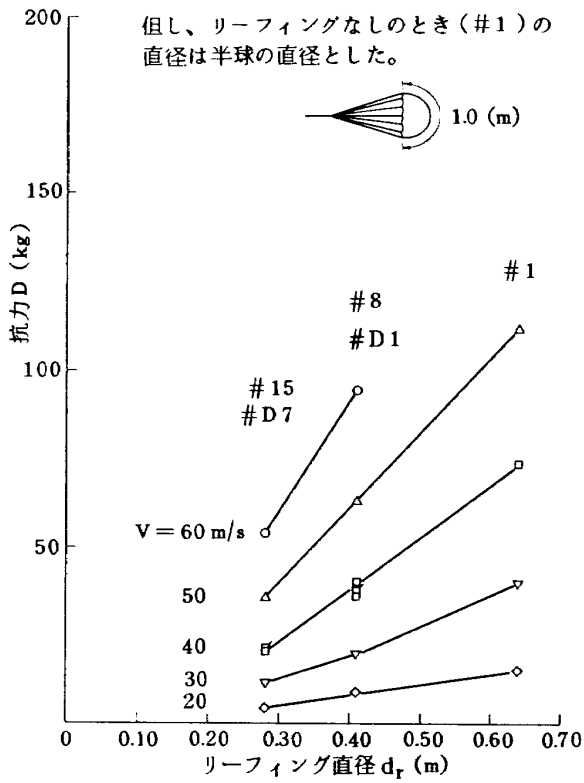


(2) 70%リーフィング

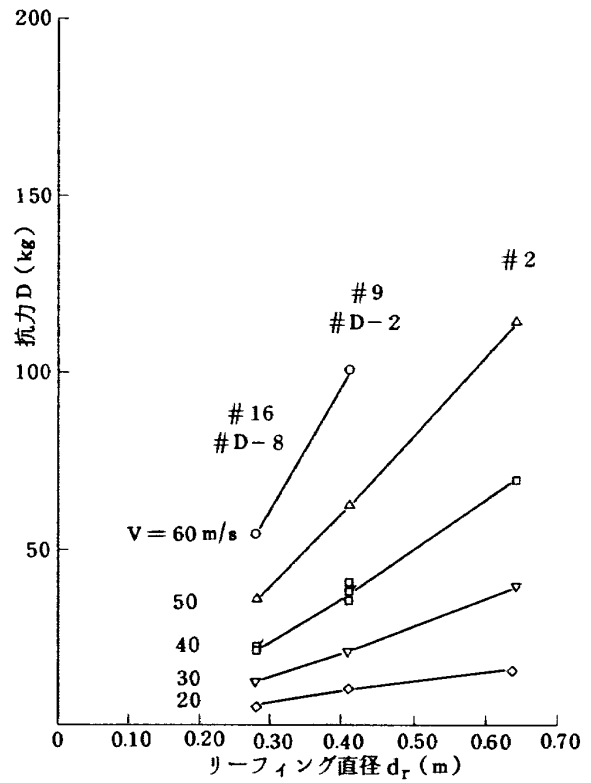


(3) 40%リーフィング

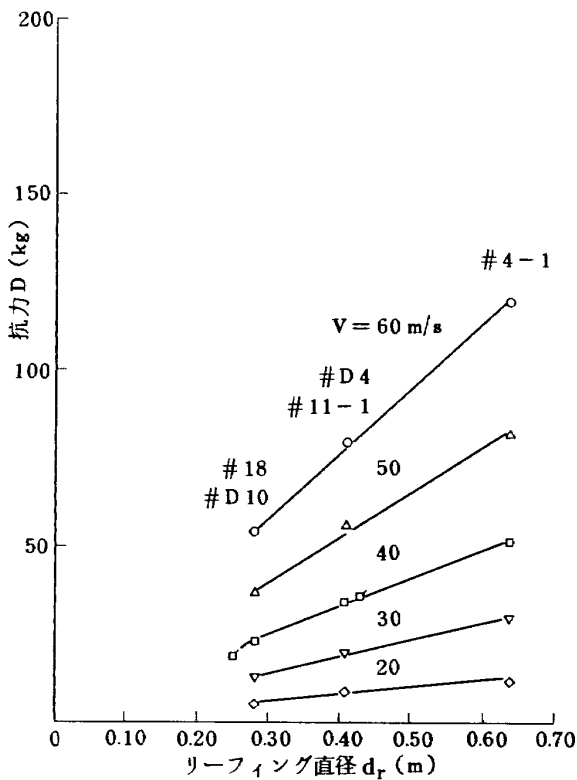
図6 抗力と風速の関係



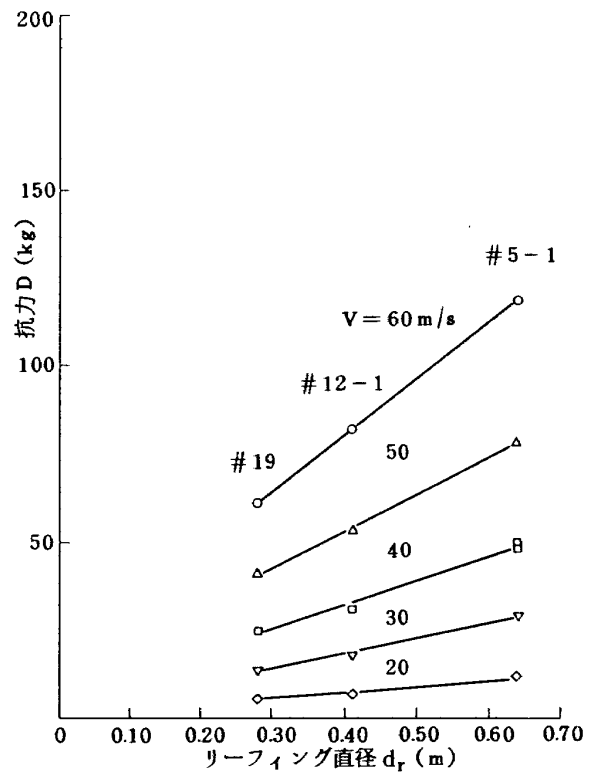
(1) 平面傘



(2) ダミーフロート付平面傘

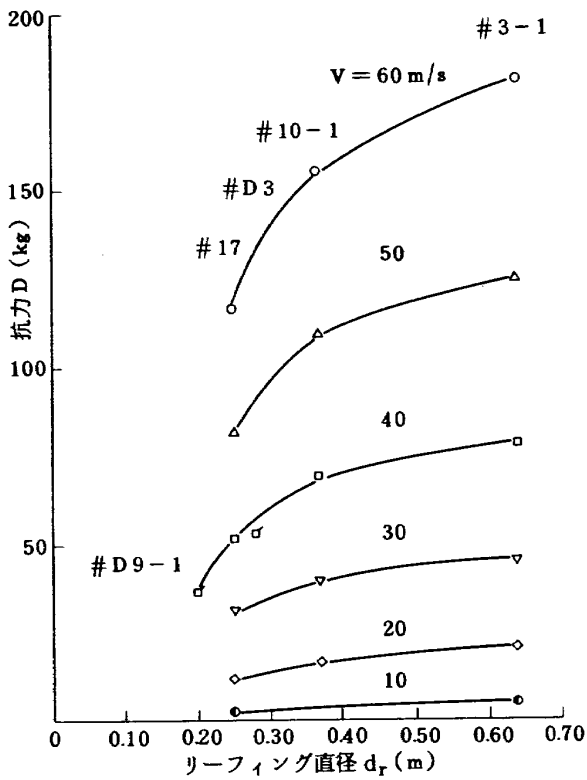


(3) リングスロット傘

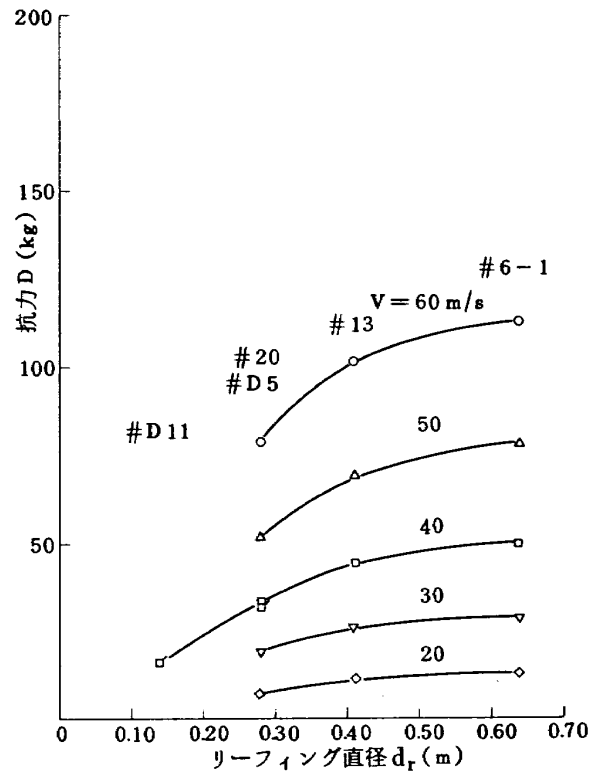


(4) ダミーフロート付リングスロット傘

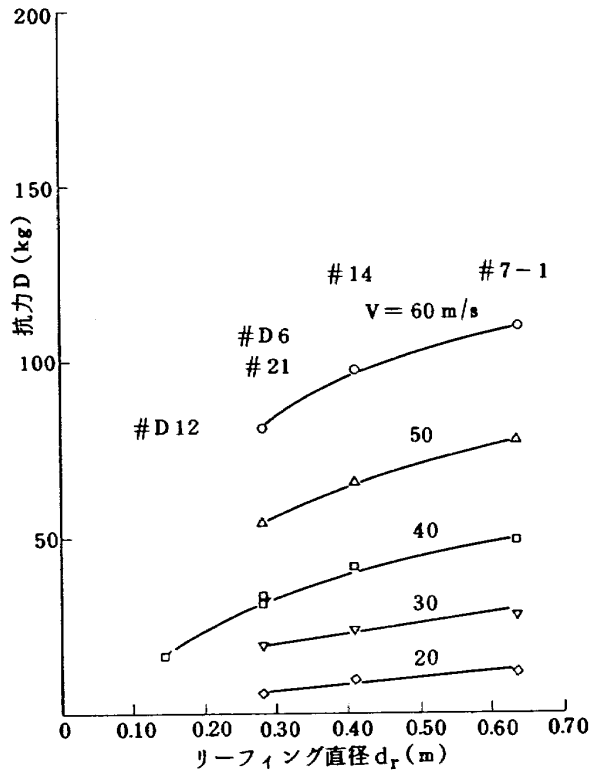
図7 リーフィング直径 d_r と抗力Dとの関係



(5) リブレスガイド傘



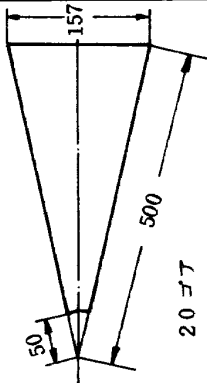
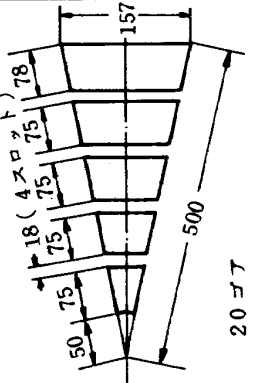
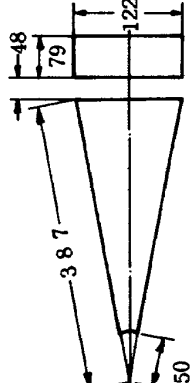
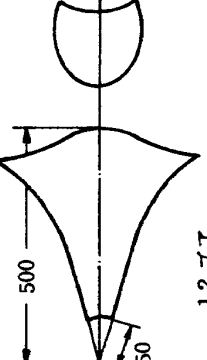
(6) DGB傘

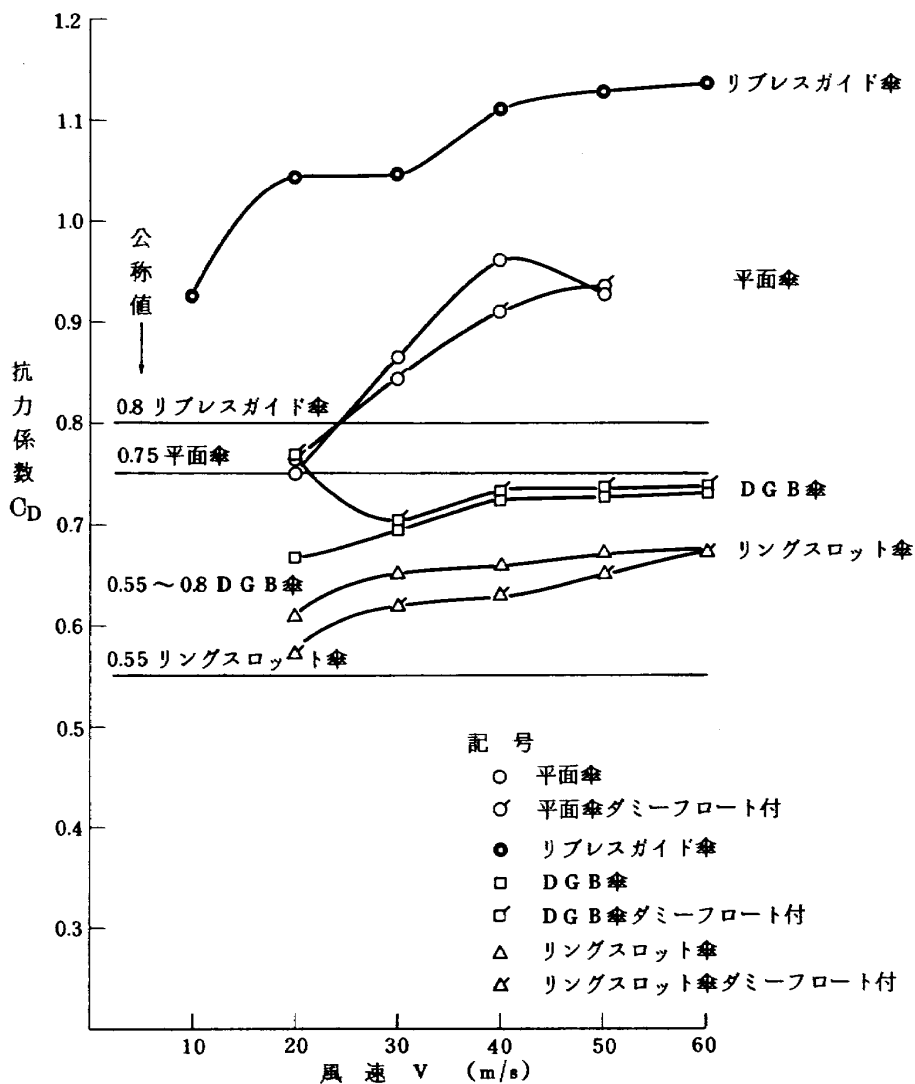


(7) ダミーフロート付DGB傘

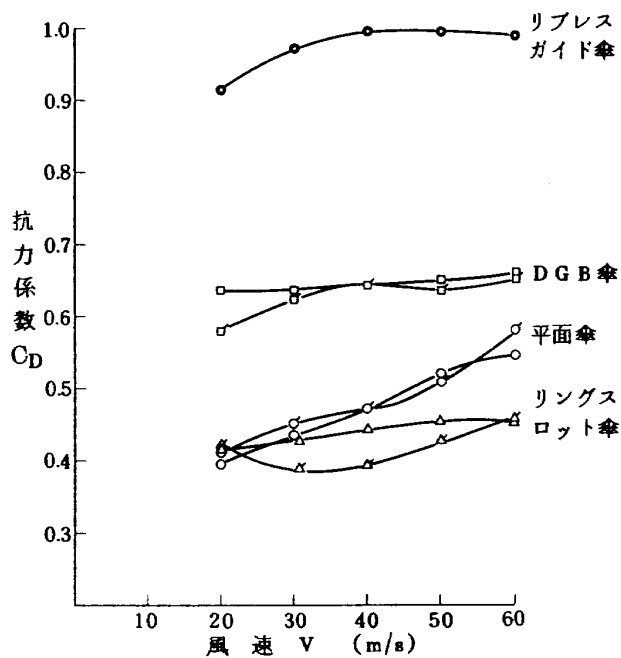
図7 リーフィング直径 d_r と抗力 D との関係

表 3. 風洞試験供試品の概要

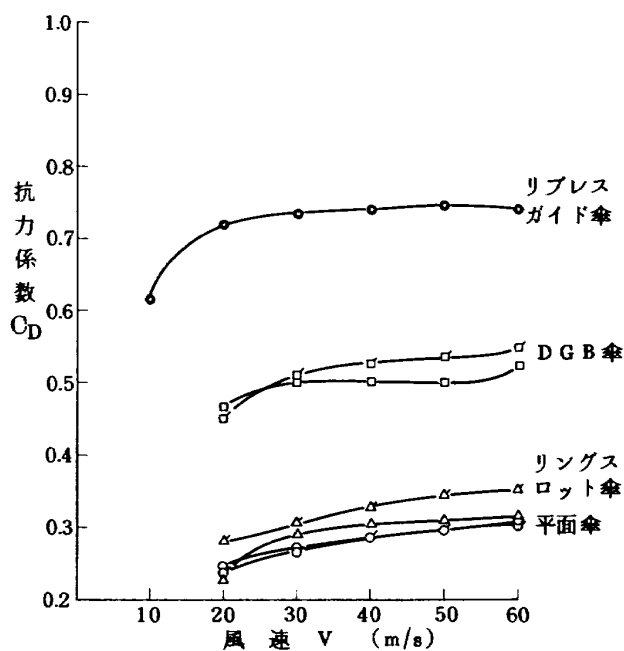
No. 名称	パネルパターン (単位: mm)	直径 d (m)	面積 S (m ²)	ポロシティ λg (%)	備 考
1. 平面傘		d ₀ = 1	S ₀ = 0.785		◦ 通常使用される抗力係数 C _{D0} ≒ 0.75 ∴ C _{D0} S ₀ ≒ 0.59 m ²
2. 平面傘 (ダミーフロート付)		同上	同上		同上
3. リングスロット傘		d ₀ = 1	S ₀ = 0.785	17	◦ 通常使用される抗力係数 C _{D0} ≒ 0.55 ∴ C _{D0} S ₀ ≒ 0.43 m ²
4. リングスロット傘 (ダミーフロート付)		同上	同上	16	同上
5. ディスクギャップバンド傘		d ₀ = 1	S ₀ = 0.785 S _c = 0.668	16	◦ C: cloth ◦ 抗力係数 C _{Dc} = 0.55~0.80 程度と考えられる ∴ C _{Dc} S _c = 0.37~0.53 m ²
6. ディスクギャップバンド傘 (ダミーフロート付)		同上	同上	15	同上
7. リブレスガイド サーフェイス傘		d _c = 1 d _p = 0.95	S _c = 0.785 S _p = 0.709		◦ 通常使用される抗力係数 C _{Dp} ≒ 0.8 ∴ C _{Dp} S _p ≒ 0.57 m ² ◦ C: construction ◦ P: project



(1) リーフィングなし



(2) リーフィング度 70%



(3) リーフィング度 40%

図8 抗力係数 C_D と風速 V の関係

リーフィングなしのときの抗力は大きい、リーフィング度70%で第3位となり、リーフィング度40%では最下位になってしまう。

3) 抗力係数は、各パラシュートの公称値にほぼ近いものが得られたが、リブレスガイド傘では、それを大きく上まわっている。これは基準面積の取り方にもよると思われるが、他傘に比べて抗力係数が大きいことは明らかである。

抗力係数の高い順に並べると

リーフィングなしのとき：

$$RGS > SFC > DGB > RS$$

リーフィング度70%のとき：

$$RGS > DGB > SFC > RS$$

リーフィング度40%のとき：

$$RGS > DGB > RS > SFC$$

となり、抗力値の順とほぼ一致している。

4) 抗力係数の風速による変化は比較的少ないが、平面傘では風速増加による抗力係数の増加は著しく、風速50m/sのときの抗力係数は風速20m/sのときより26%も増加する。これは、風速によって、傘体の形状が変わり、空気力の大きさが変わってくるためであろうと予想される。⁹⁾

5) リーフィングは、抗力を調節する有効な手段である。リブレスガイド傘を除いては、抗力はリーフィング直径に対してほぼ比例的傾向を示す(図7)。リブレスガイド傘をリーフィングすると、リーフィング度が小さくなるにつれ、全体としての形状を失い、振動が発生する。このことから、リブレスガイド傘は、満膨張(リーフィングなし)時に使用するには適しているが、リーフィング時の使用には不適當である、といえる。リングスロット傘は、リーフィングの有無にかかわらず抗力値が小さすぎる。平面傘は、リーフィング時の抗力が小さくなりすぎる。DGB傘はリーフィング時の特性が良好である。

6) ダミーフロートが抗力係数、安定性に及ぼす影響は小さい。

4.2 動的試験

表2に示したような12種類の試験を行なった。リーフィング度70%および40%からのリーフィング解除時の連続写真を図9に、抗力の過渡特性データを図10に示す。この結果の特徴的な点は次のとおりである。

1) ラインカッターの作動は全て正常であり、信頼性の高いことが証明された。

2) リーフィング解除による開傘は、リーフィング・ライン切断後20~30msの間に起こる。リーフィング

を解除された傘体は一時過大に膨張し、その後減衰振動を繰返しながら定常状態に入る(定常状態に入るまでの時間はパラシュートの種類、リーフィング度によって異なるが、100msから400ms程度である—表4参照)ことが、16mmムービーおよび抗力データから知られた。

3) リーフィング解除前後の抗力値、開傘に要する時間等のデータも表4に示した。図10と表4のデータから次のことがわかる。

平面傘はシャープな立ち上がり(開傘に要する時間は20~30ms)と、大きな抗力ピーク値(開傘後の定常値との比は1.70~1.90)を示す。

リブレスガイド傘は、平面傘に匹敵する程のシャープな過渡特性を有するが、リーフィング度の小さいときは、傘体のつぶれが回復するための開傘遅れが目立ち、40%リーフィングの場合には、リーフィング・ラインが切断されたにもかかわらず開傘せず、再試験を余儀なくされた。

リングスロット傘は、抗力のピークが発生せず、なだらかに、定常状態に移行し、リーフィング解除前後の振動も少ない。

DGB傘は、開傘衝撃後の減衰特性、安定性も非常に良好であり、リーフィングの必要のある場合に使用するのに適していることがわかる。

4) リーフィング解除時の荷重係数 C_K (リーフィング解除時のピーク抗力と解除後の定常抗力との比)は、Mickyら¹⁰⁾によって、次のように見積られる。すなわち、リーフィング解除時にライザー・ラインにかかる力 $D(t)$ (すなわち、ロードセル出力値)は

$$D(t) = \hat{D}(t) + \frac{d(mV)}{dt} \quad (4)$$

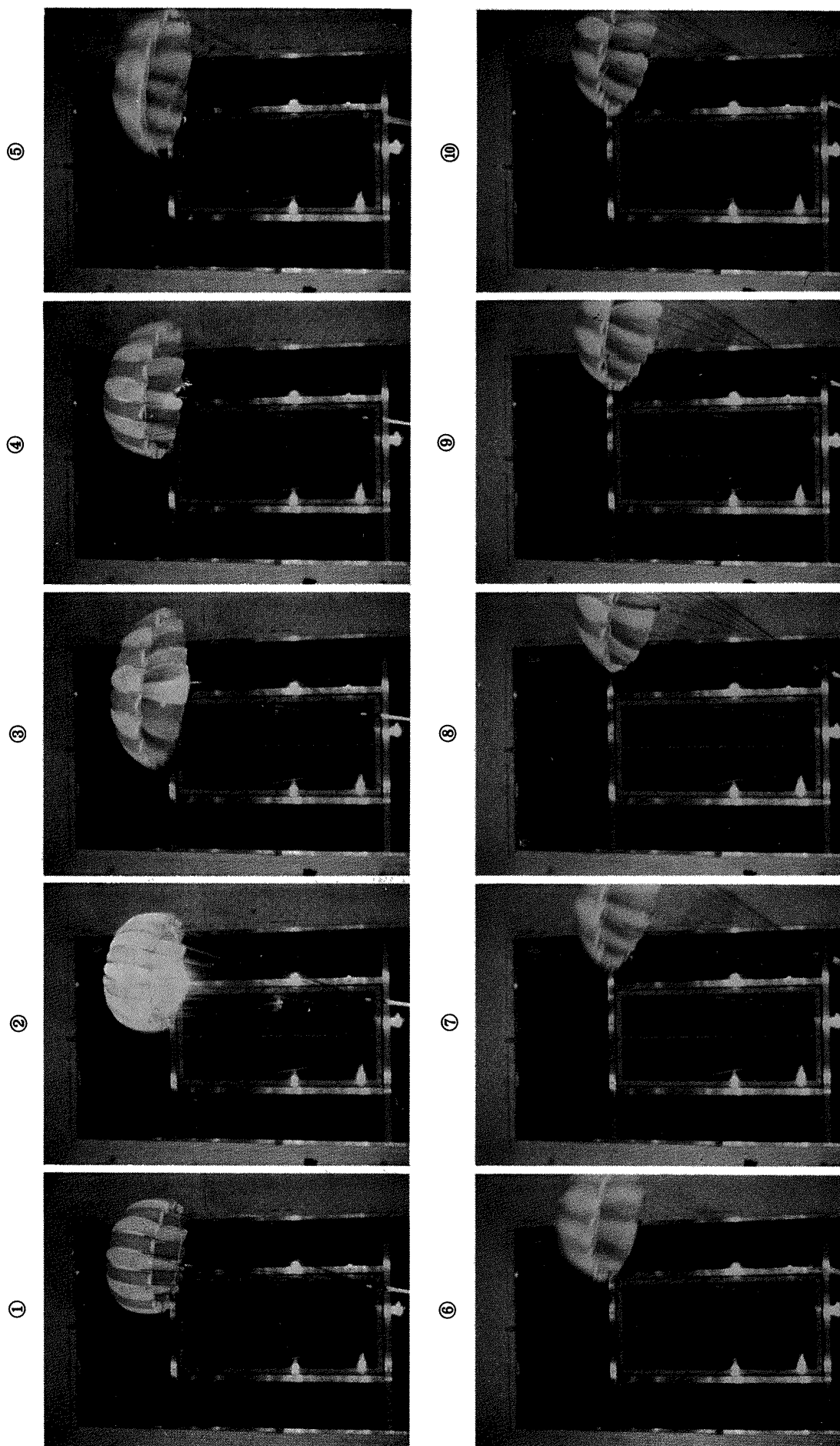
であらわされる。(図11参照)

ここで、 $\hat{D}(t)$ は傘体が受けている抗力、 $\frac{d(mV)}{dt}$ は、リーフィング解除による運動量の増加分である。(4)式をリーフィング解除時からピーク抗力発生時まで(Δt 間)積分すると、

$$(mV)_{\Delta t} - (mV)_0 = \int_0^{\Delta t} D(t) dt - \int_0^{\Delta t} \hat{D}(t) dt \quad (5)$$

右辺第一項は、リーフィング解除時の力積であり、図11の斜線部の面積であらわされる。 Δt 間の抗力の増加は直線的であると仮定して、

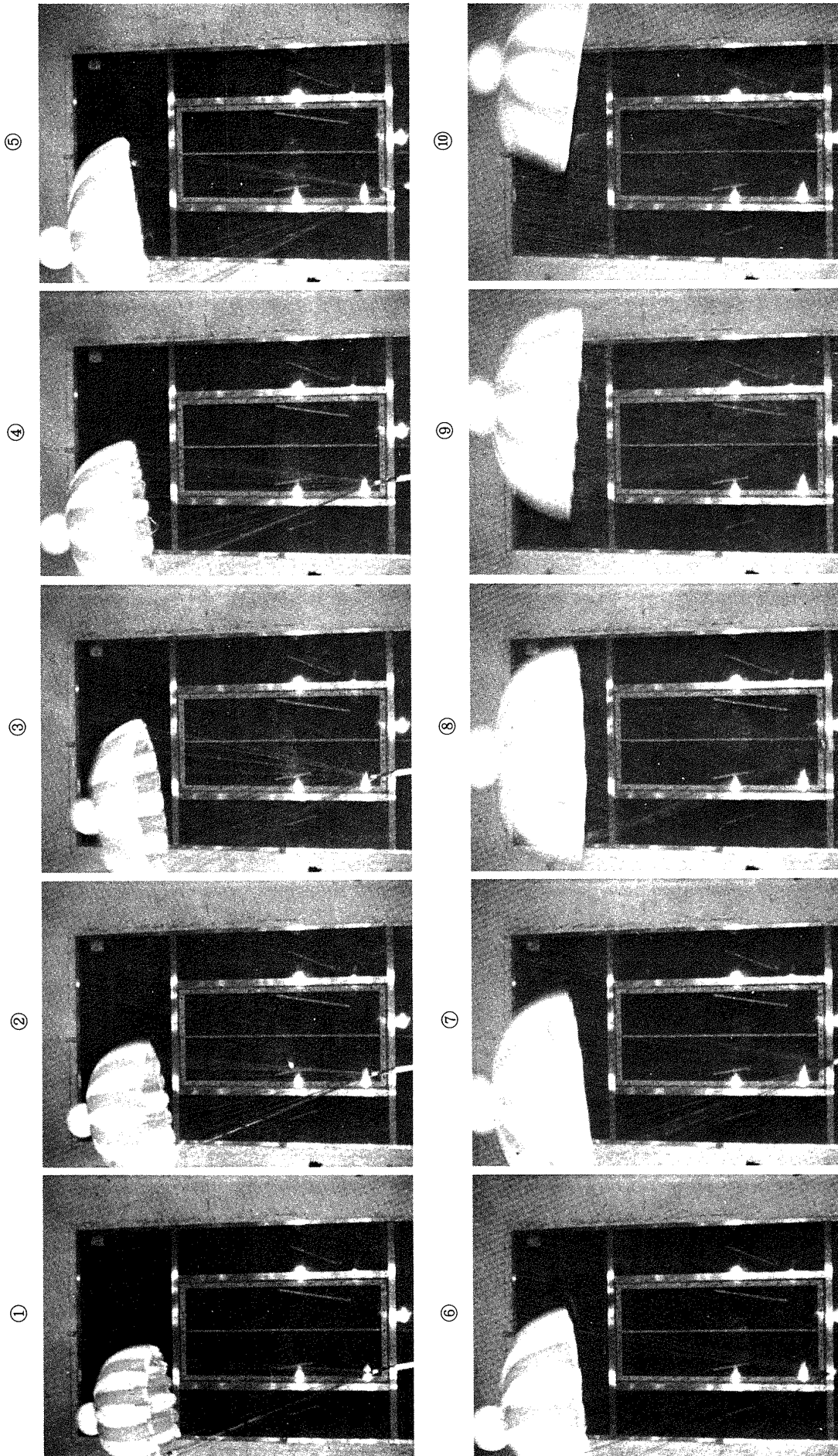
$$\int_0^{\Delta t} D(t) dt = D_r \Delta t + \frac{1}{2} (D_m - D_r) \Delta t$$



①：リーフイング状態，②：リーフイング解除（リーフイング・ライン切断），③→⑩：リーフイング解除後の動的応答

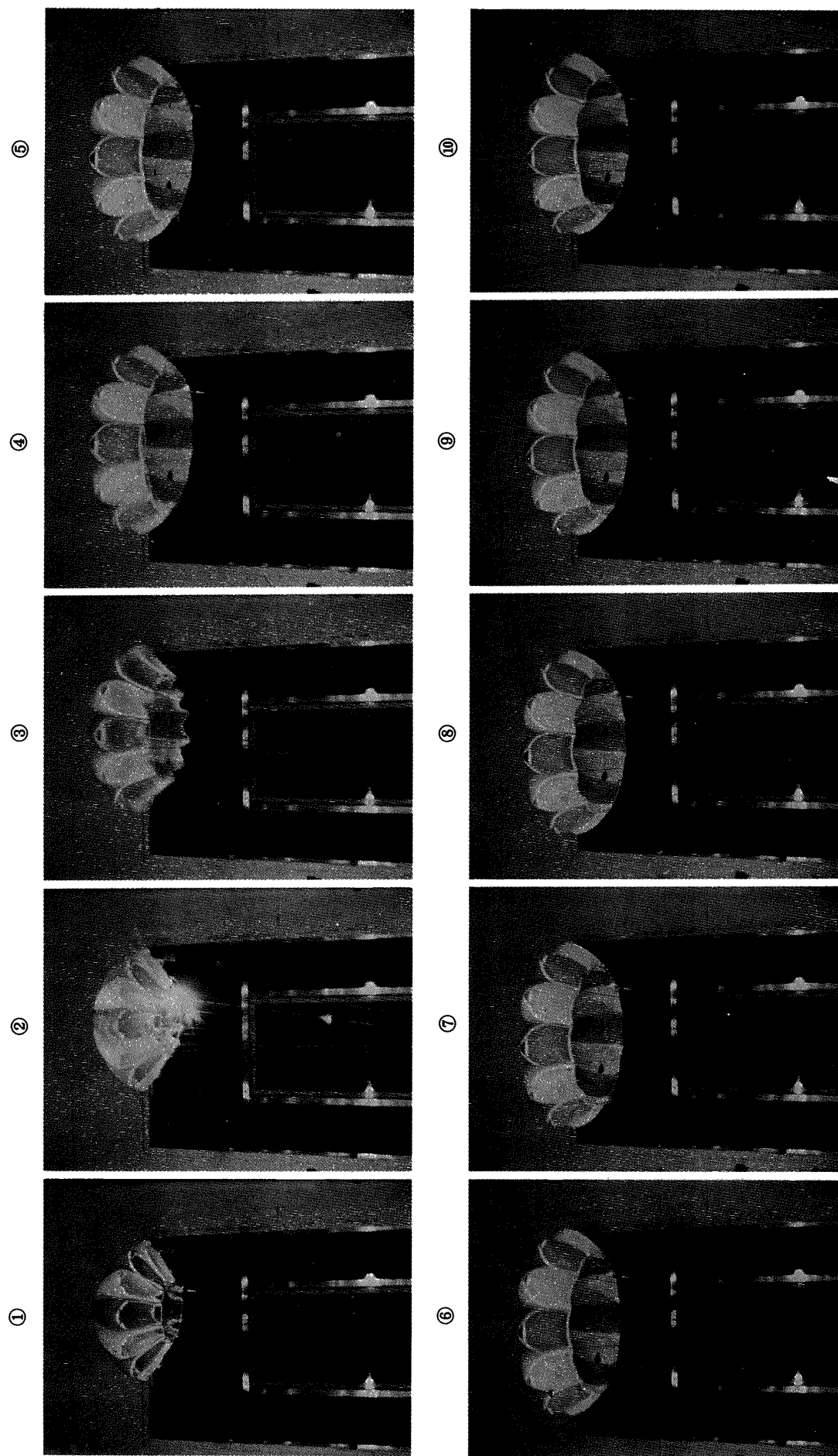
(1) 平面傘70%リーフイング

図9 動的試験連続写真（A.ムーヴィーで撮影）（ $V = 40 \text{ m/s}$ ，コマ送り速度32fps）



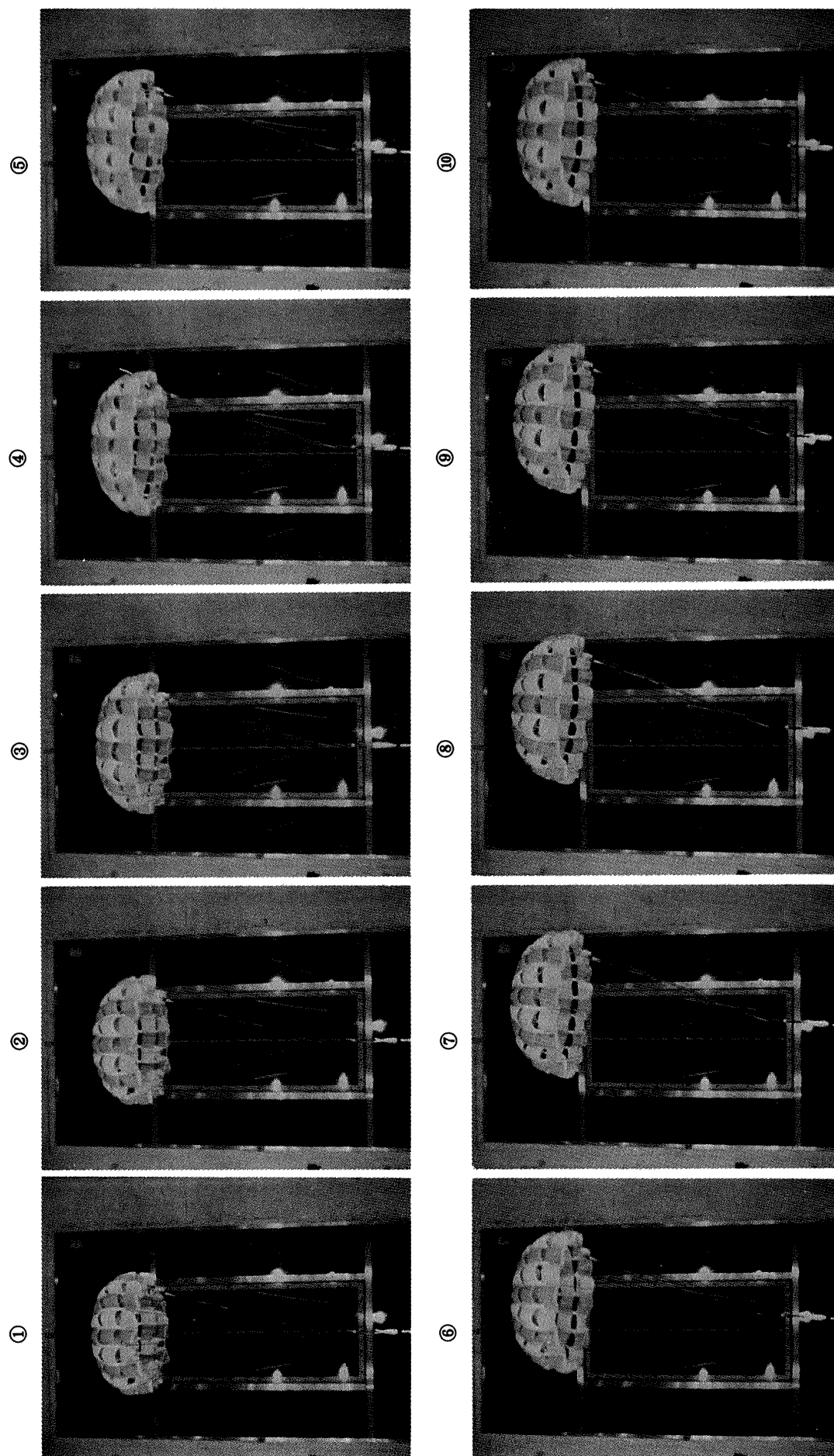
①：リーフイング状態，②：リーフイング解除（リーフイング・ライン切断），③→⑩：リーフイング解除後の動的応答
 (2) ダミーロボット付平面傘 70%リーフイング

図 9 動的試験連続写真（A ムービーで撮影）（ $V = 40\text{m/s}$ ，コマ送り速度 32fps）



①：リーフイング状態，②：リーフイング解除（リーフイング・ライン切断），③→⑩：リーフイング解除後の動的応答
 (3) リブレスガイド傘 70%リーフイング

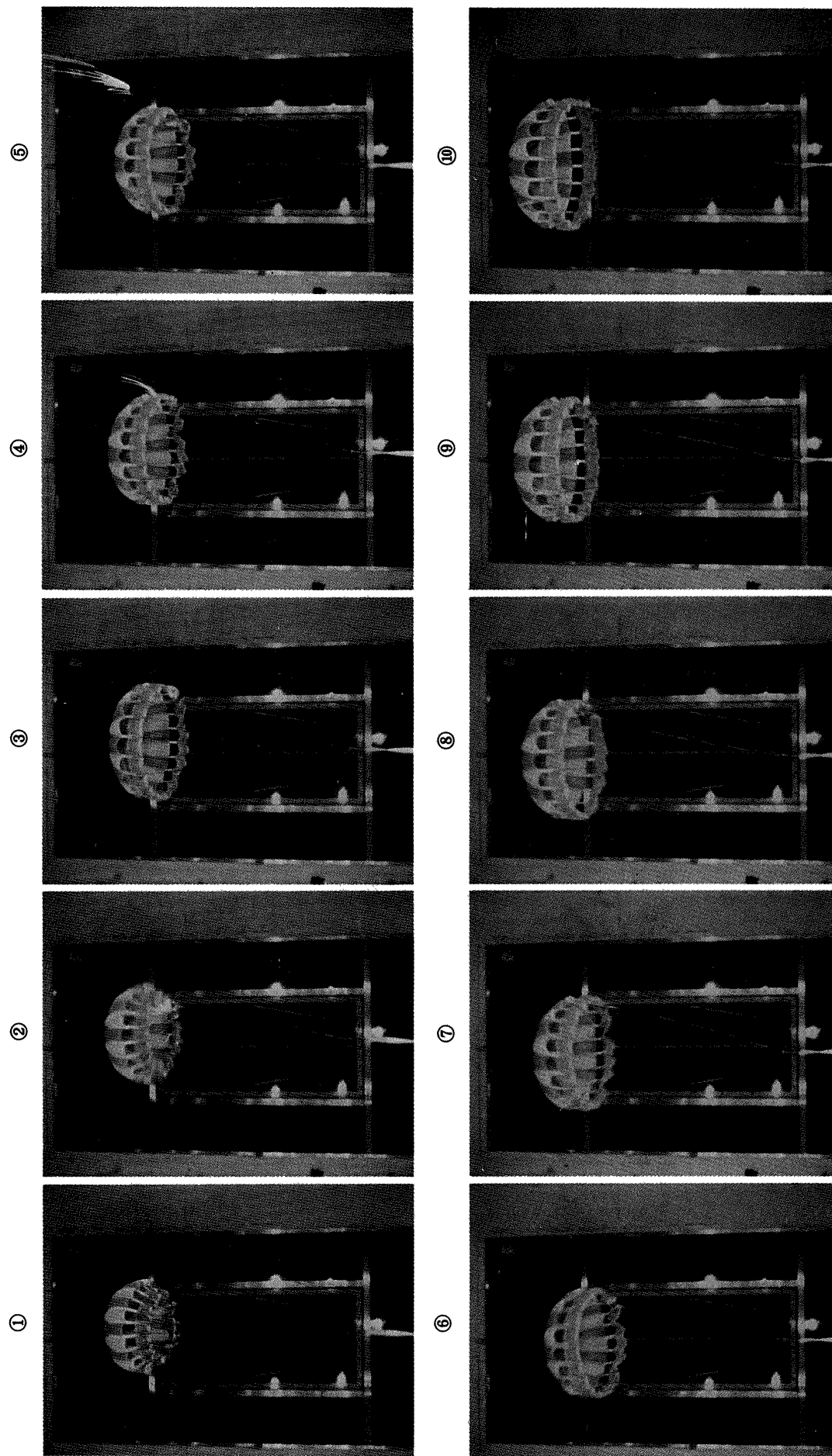
図 9 動的試験連続写真（A ムービーで撮影）（ $V=40\text{m/s}$ ，コマ送り速度 32fps ）



①：リーフイング状態，②：リーフイング解除（リーフイング・ライン切断），③→⑩：リーフイング解除後の動的応答

(4) リングスロット傘 70%リーフイング

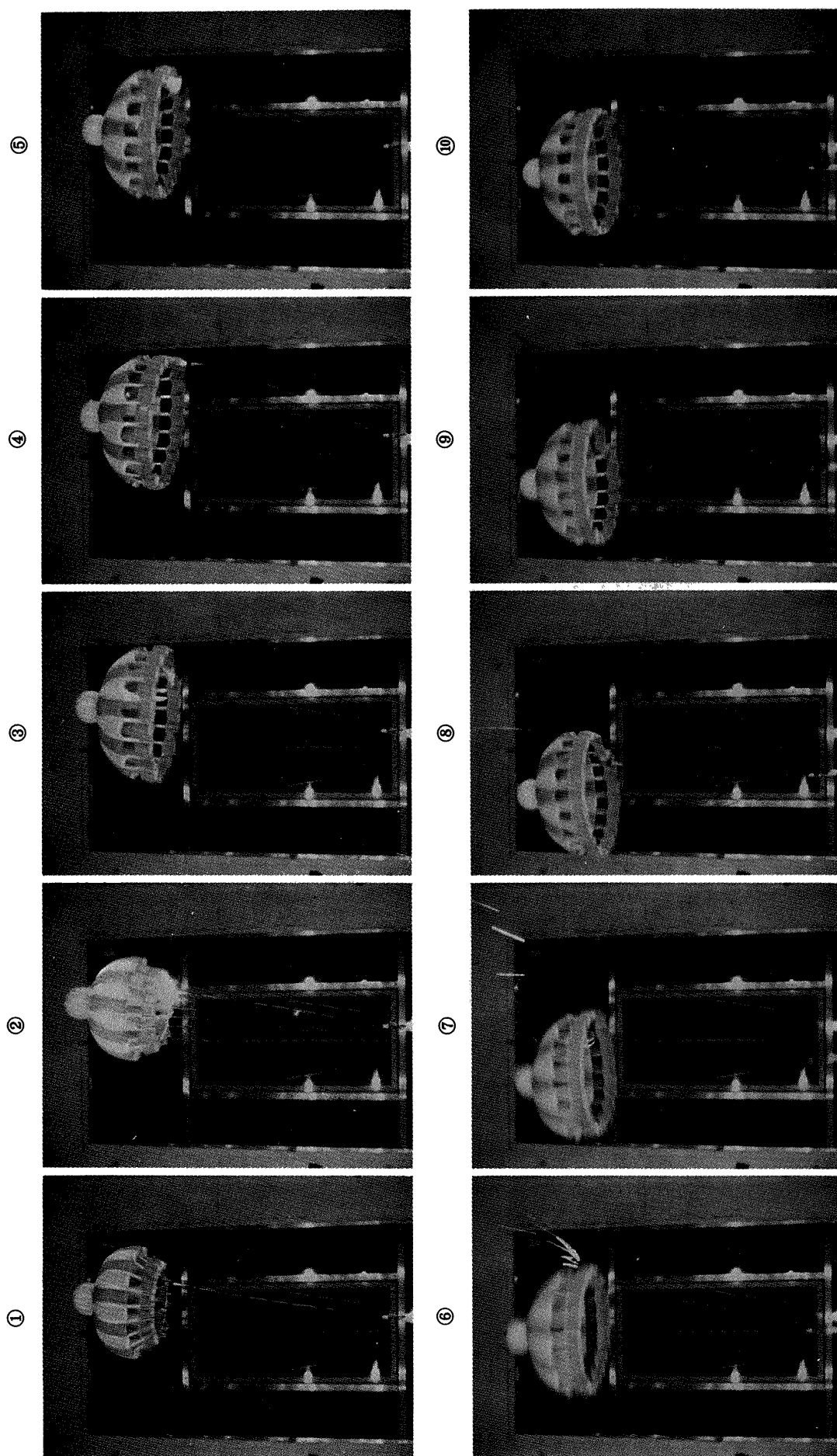
図 9 動的試験連続写真 (A ムービーで撮影) (V=40m/s, コマ送り速度 32fps)



①：リーフイング状態，②：リーフイング解除（リーフイング・ライン切断），③→⑩：リーフイング解除後の動的応答

(5) DGB傘 70%リーフイング

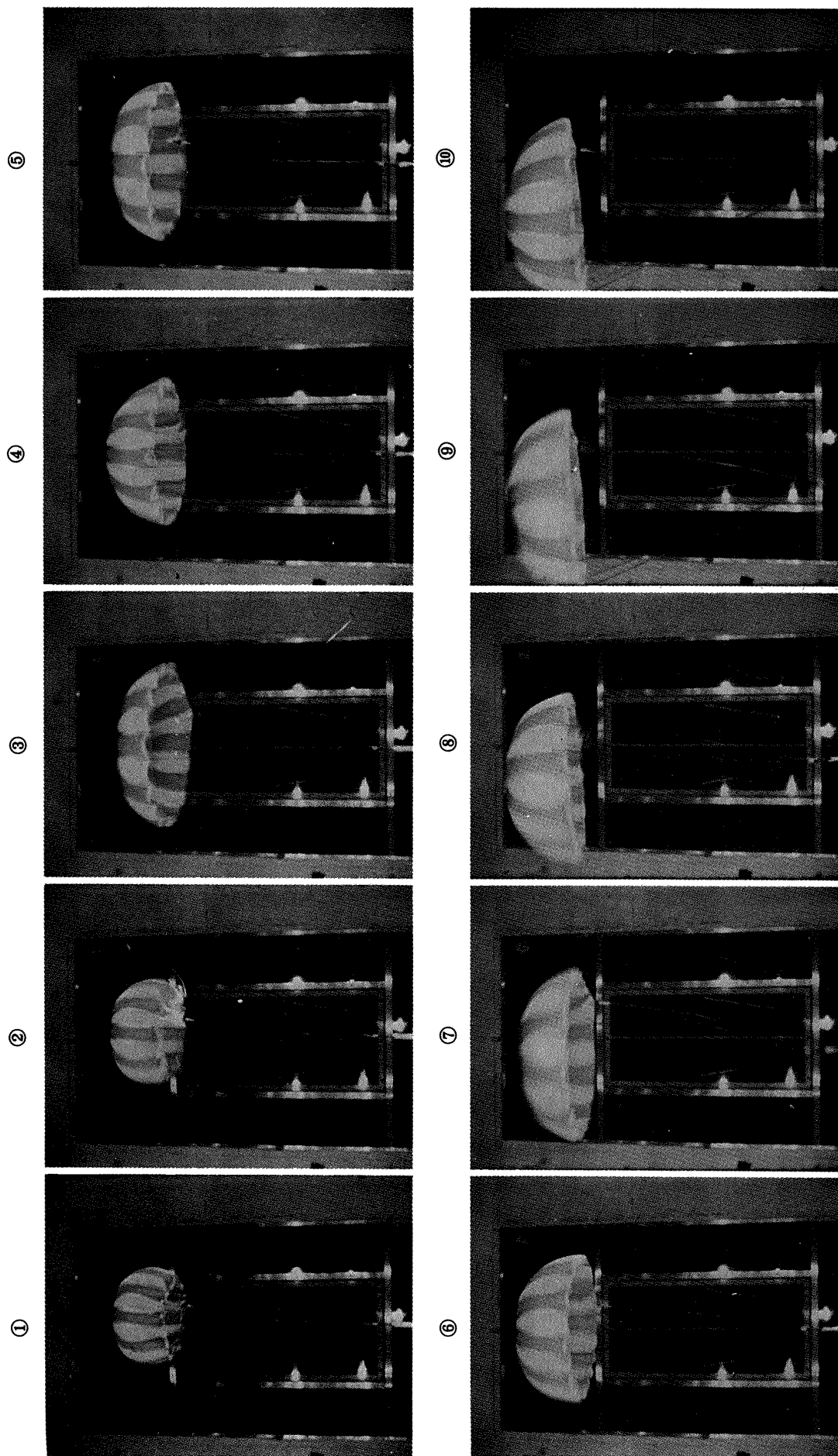
図9 動的試験連続写真（A ムービーで撮影）（ $V=40\text{m/s}$ ，コマ送り速度32fps）



①：リーフイング状態，②：リーフイング解除（リーフイング・ライン切断），③→⑩：リーフイング解除後の動的応答

(6) ダミープロローブ付DGB傘 70%リーフイング

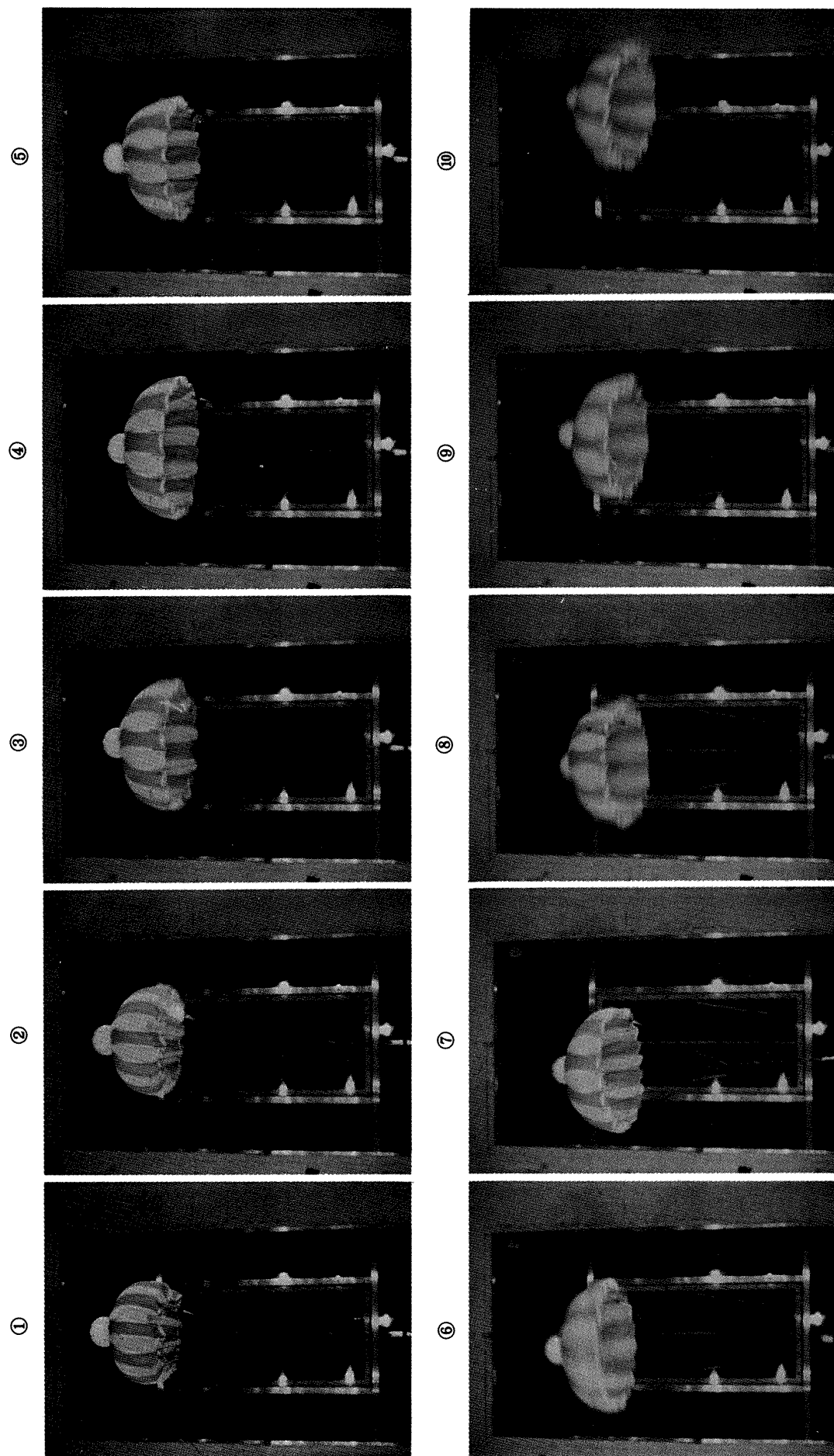
図9 動的試験連続写真（Aムービーで撮影）（ $V=40\text{m/s}$ ，コマ送り速度32fps）



①：リーフイング状態，②：リーフイング解除（リーフイング・ライン切断），③→⑩：リーフイング解除後の動的応答

(7) 平面傘 40%リーフイング

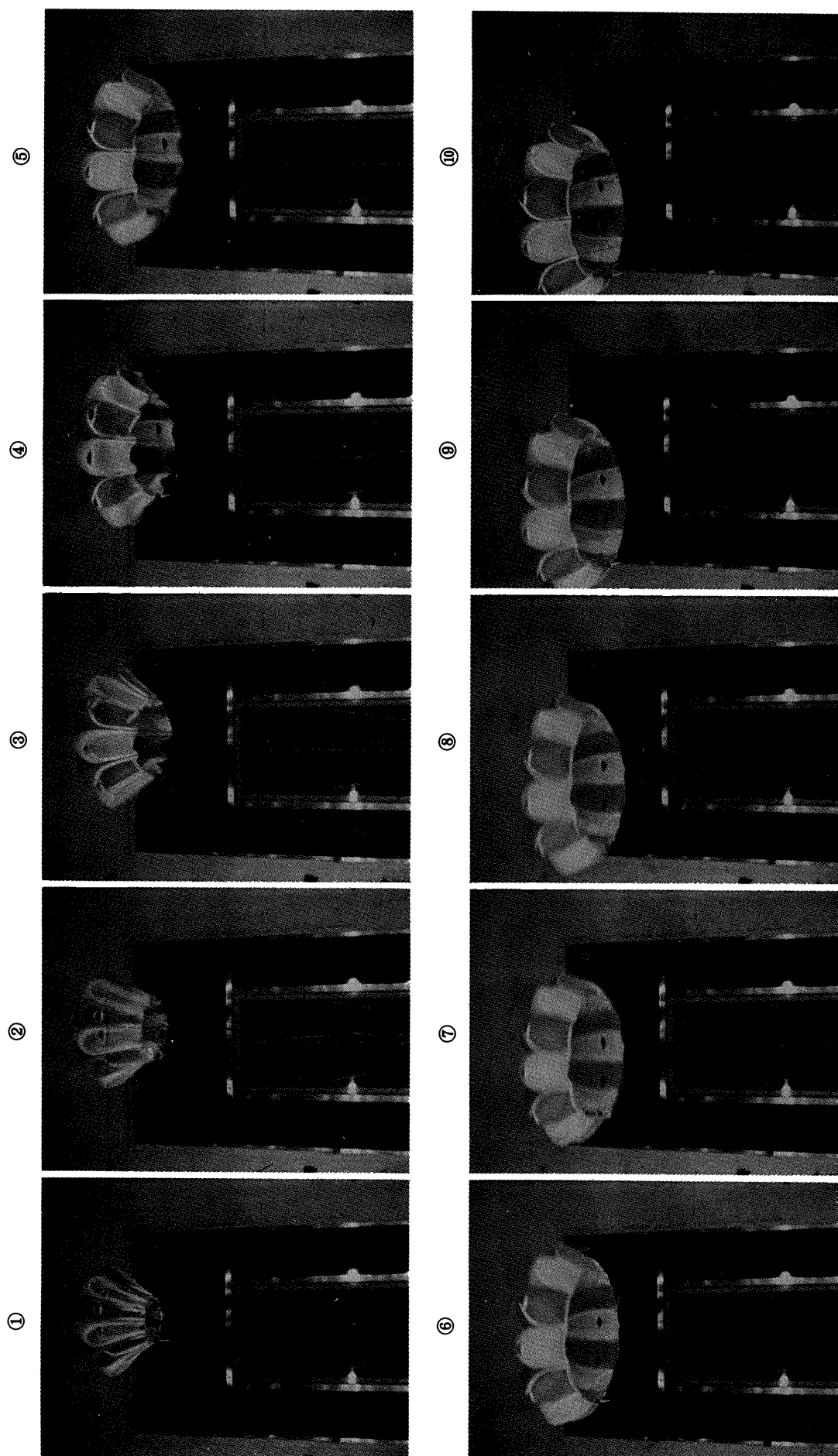
図9 動的試験連続写真（A ムービーで撮影）（ $V = 40\text{m/s}$ ，コマ送り速度 32fps ）



①：リーフイング状態，②：リーフイング解除（リーフイング・ライン切断），③→⑩：リーフイング解除後の動的応答

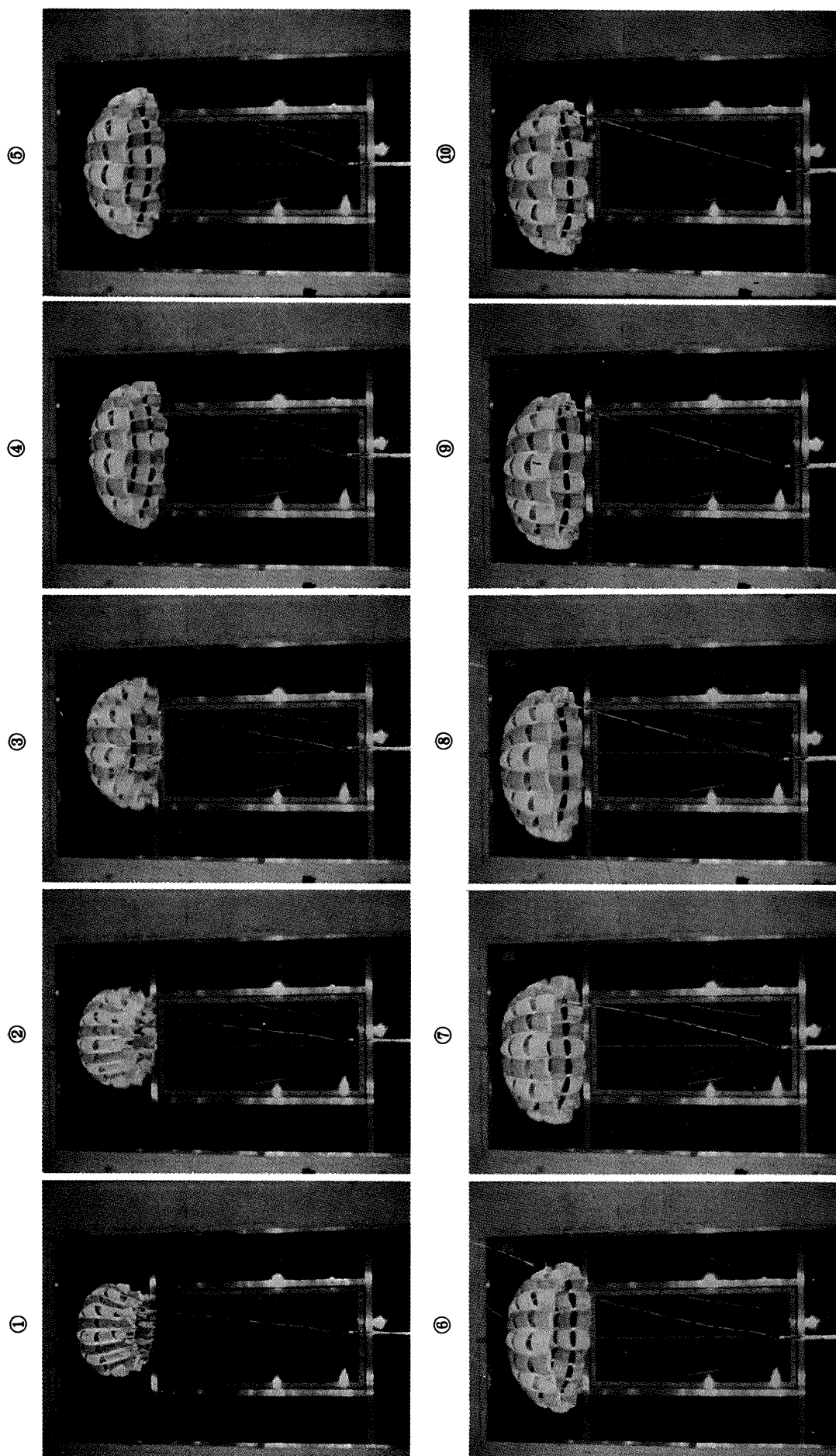
(8) ダミープロト付平面傘 40%リーフイング

図 9 動的試験連続写真(Aムービーで撮影) ($V=40\text{m/s}$, コマ送り速度 32fps)



①：リーフイング状態，②：リーフイング解除（リーフイング・ライン切断），③→⑩：リーフイング解除後の動的応答
 (9) リブレスガイド傘 40%リーフイング

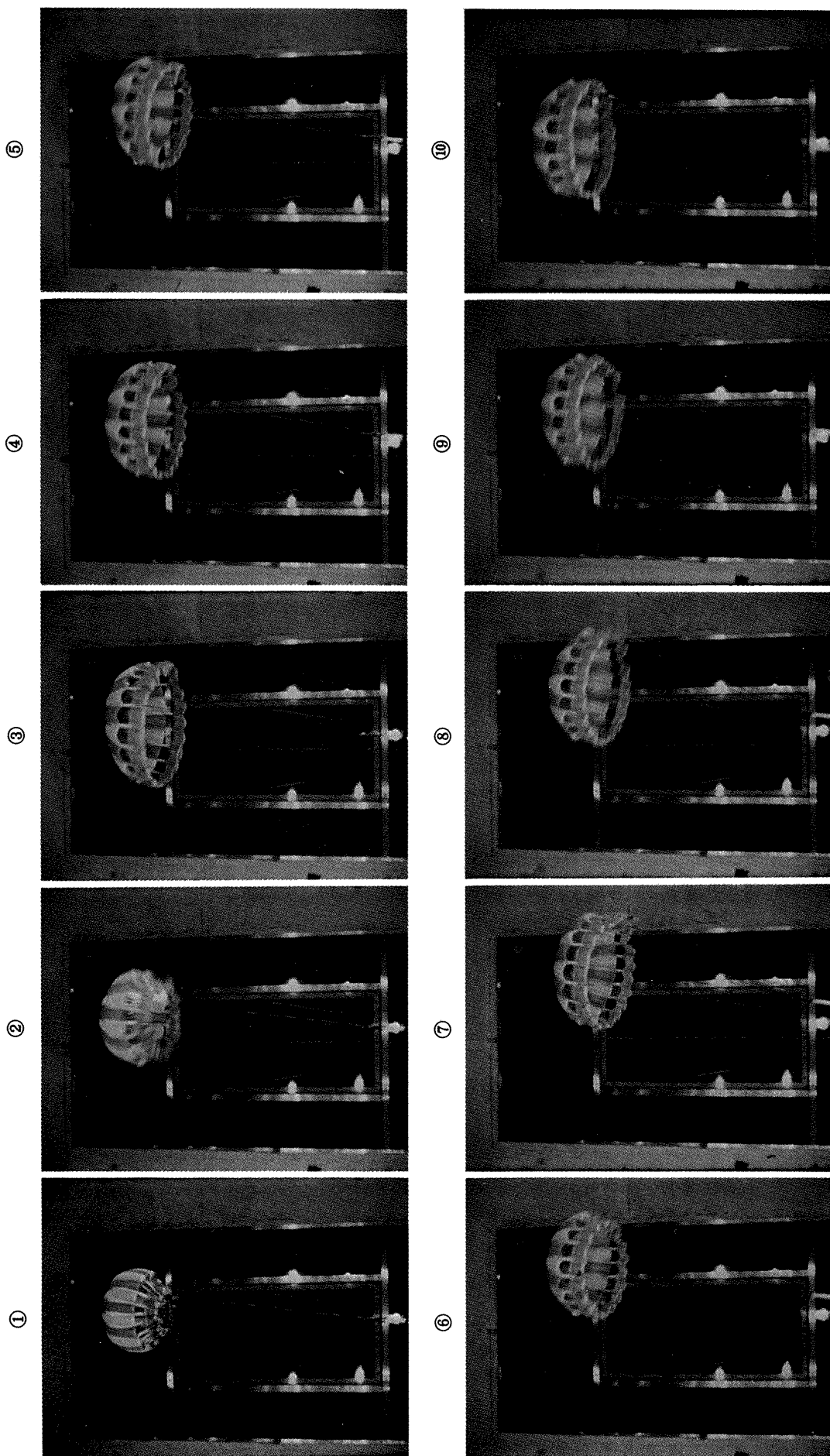
図9 動的試験連続写真（A ムゼィーで撮影）（ $V=40\text{m/s}$ ，コマ送り速度32fps）



①：リーフイング状態，②：リーフイング解除（リーフイング・ライン切断），③→⑩：リーフイング解除後の動的応答

(10) リングスロット傘 40%リーフイング

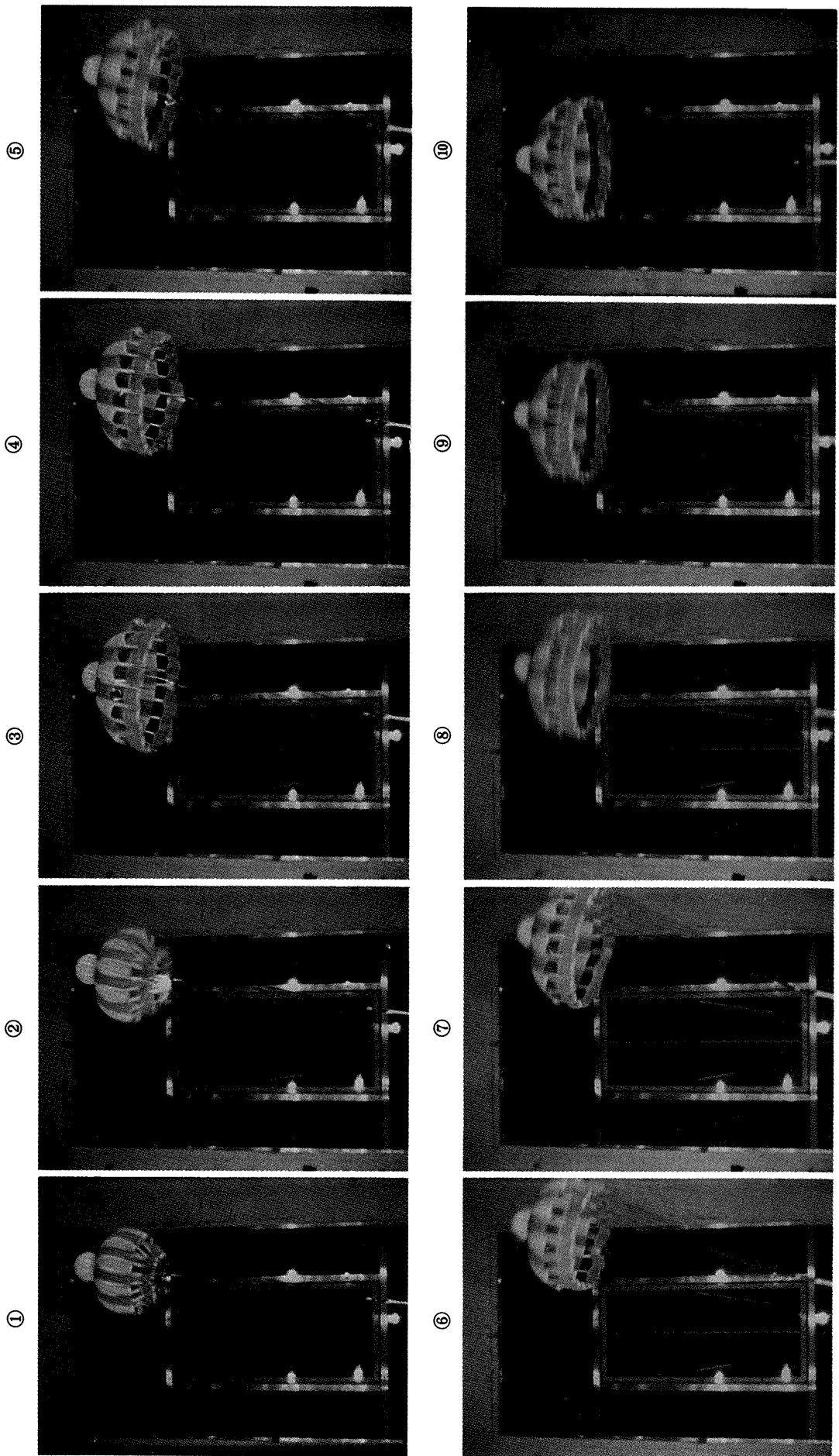
図 9 動的試験連続写真（A ムーブイーで撮影）（ $V = 40\text{m/s}$ ，コマ送り速度 32fps ）



①：リーフイング状態，②：リーフイング解除（リーフイング・ライン切断），③→⑩：リーフイング解除後の動的応答

(11) DGB傘 40%リーフイング

図9 動的試験連続写真（Aムービーで撮影）（ $V=40\text{m/s}$ ，コマ送り速度32fps）



①：リーフィング状態，②：リーフィング解除（リーフィング・ライン切断），③→⑩：リーフィング解除後の動的応答

(12) ダミーフROOT付DGB傘 40%リーフィング

図 9 動的試験連続写真（A ム ヴ ィ ー で撮影）（ $V = 40\text{m/s}$ ，コマ送り速度 32fps ）

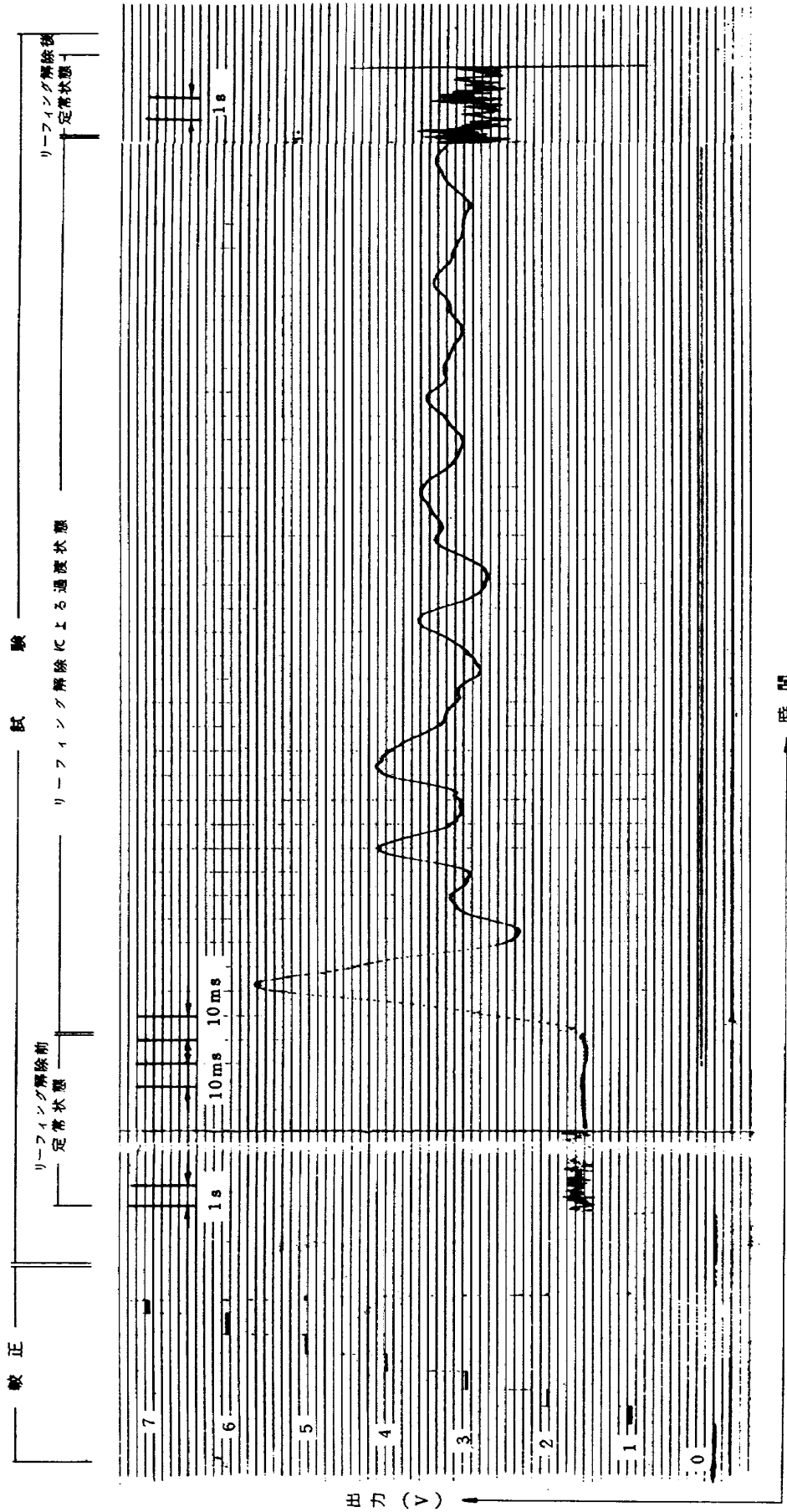


図 10 (1) Run #D1. 平面傘 70%リーフィング

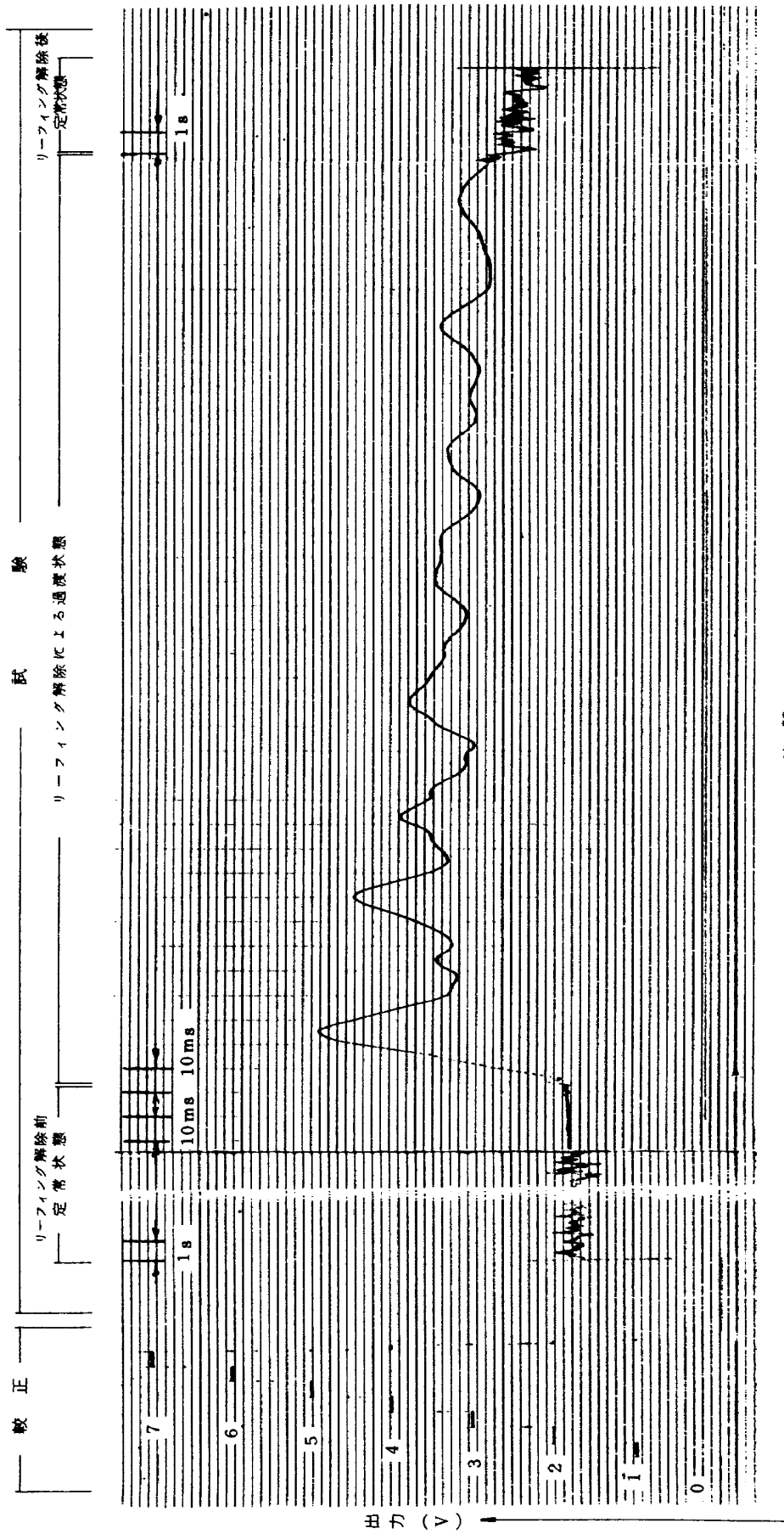


図 10. (2) Run #D2. ダミーフロート付平面傘 70% リーフィング

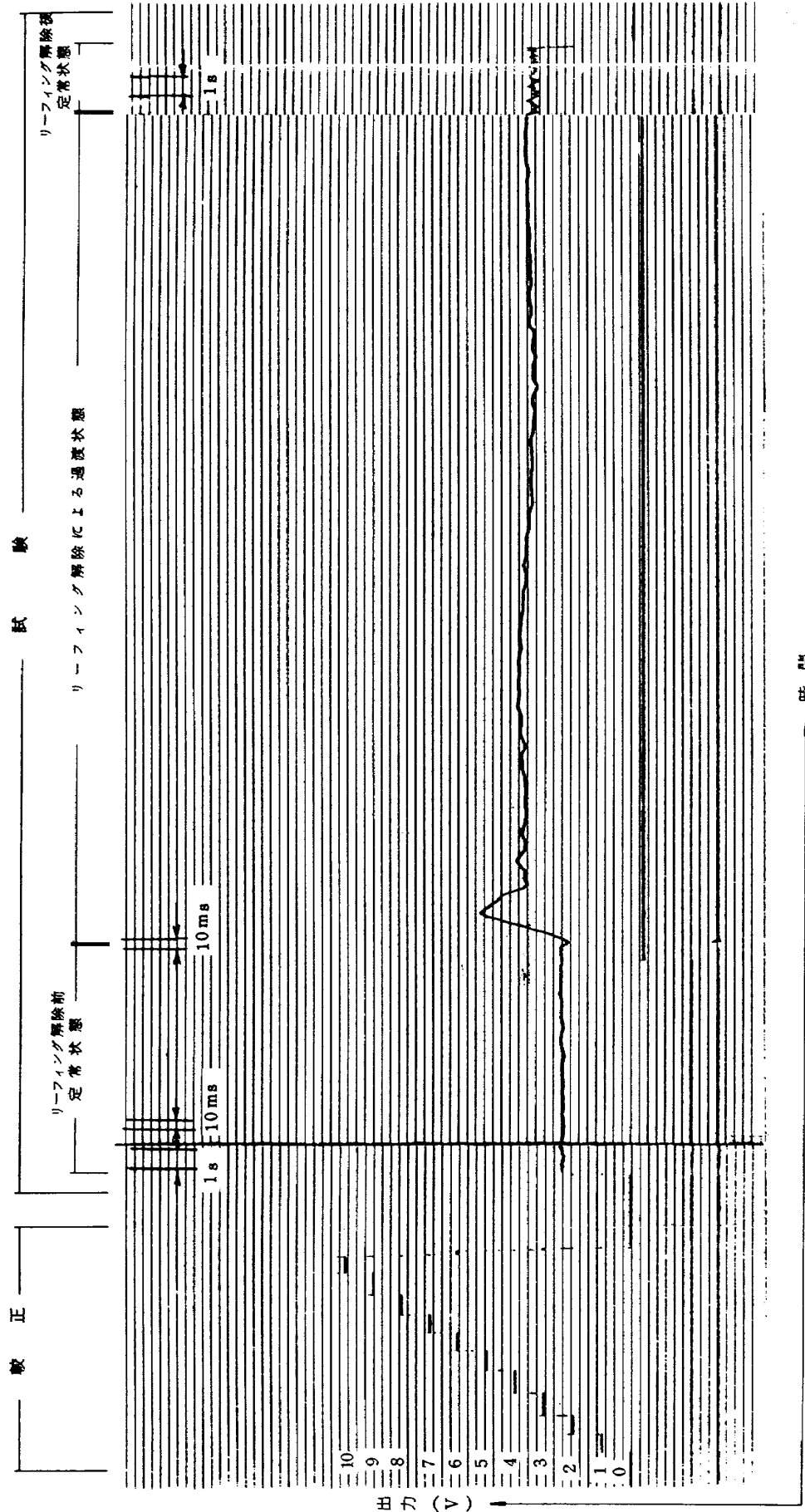


図 10. (3) Run #D3. リブレスガイド傘 70% リーフイング

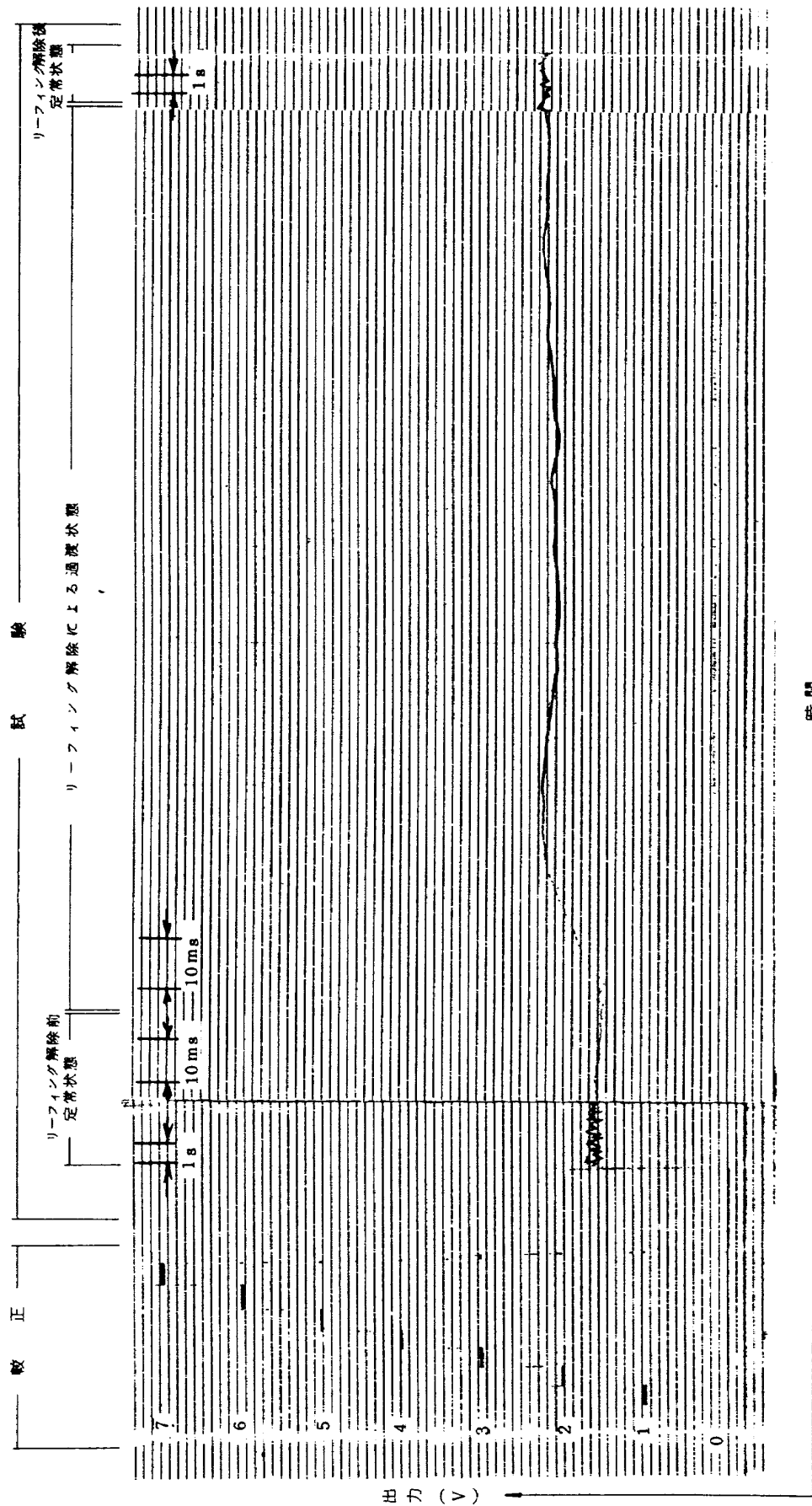


図 10. (4) Run #D4. リングスロット傘 70% リーフイング

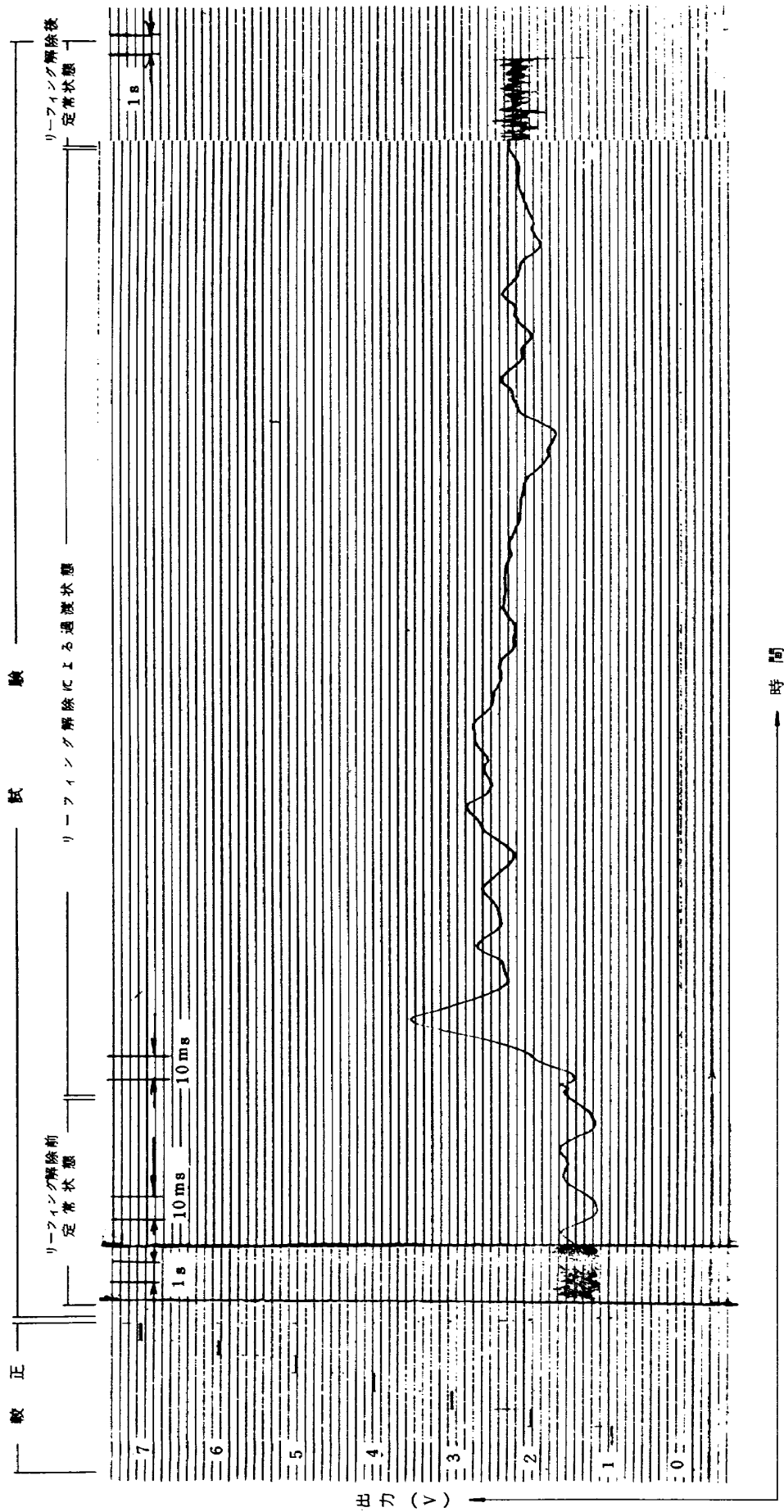


図 10. (5) Run #D5. DGB傘 70% リーフイング

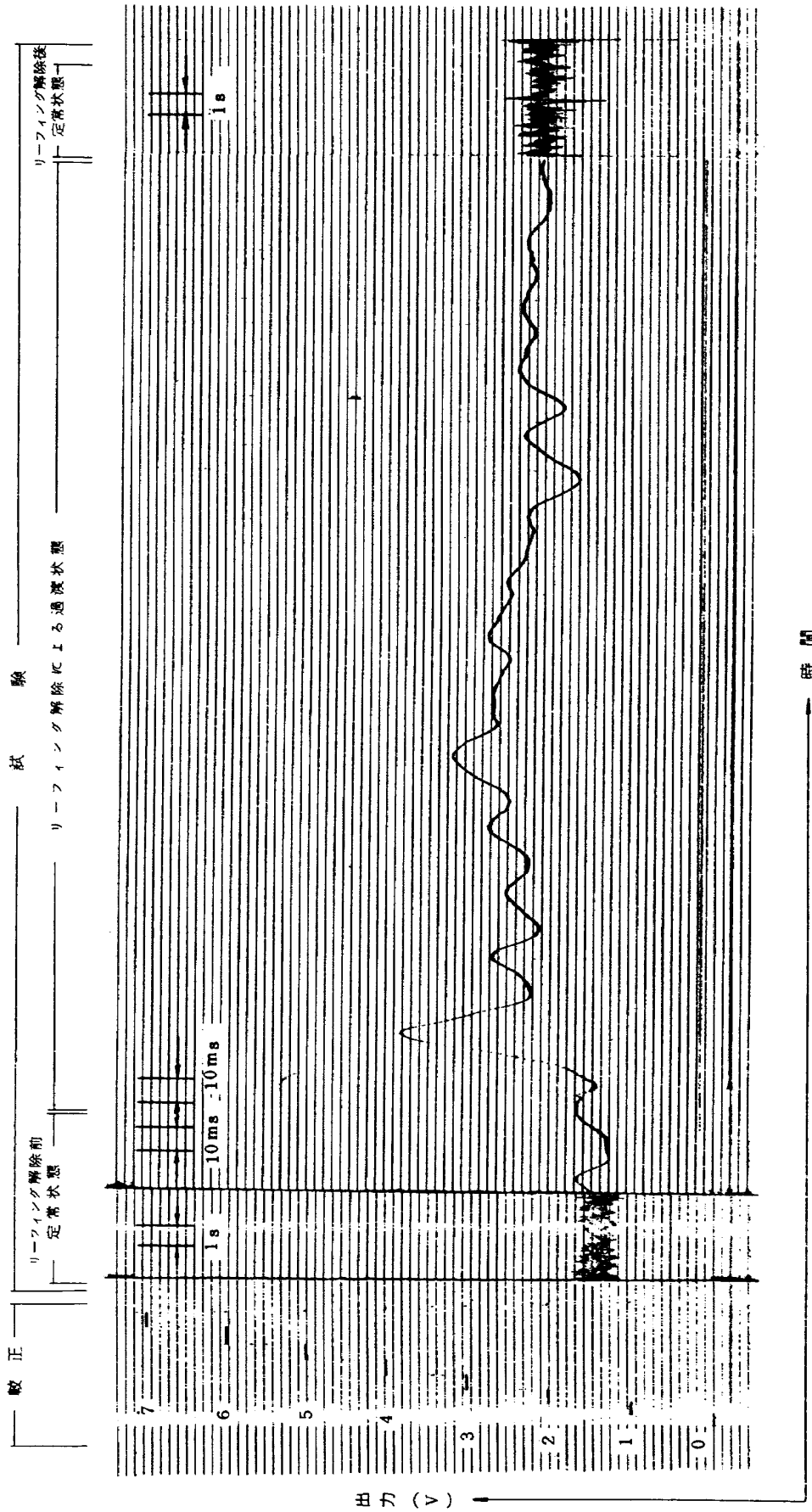


図 10. (6) Run #D6. ダミーフロート付 DGB 傘 70% リーフイング

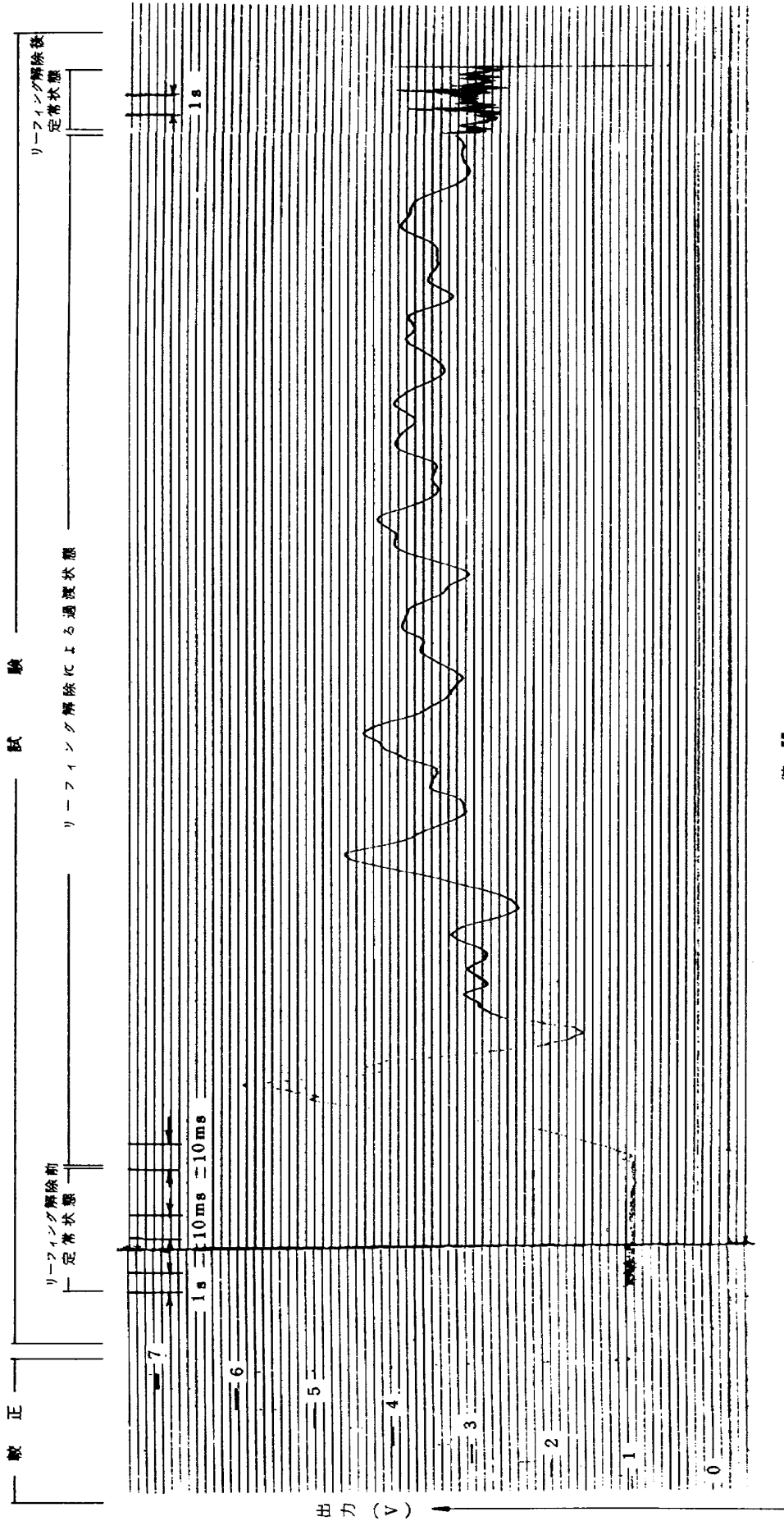


図 10. (7) Run #D7. 平面傘 40% リーフイング

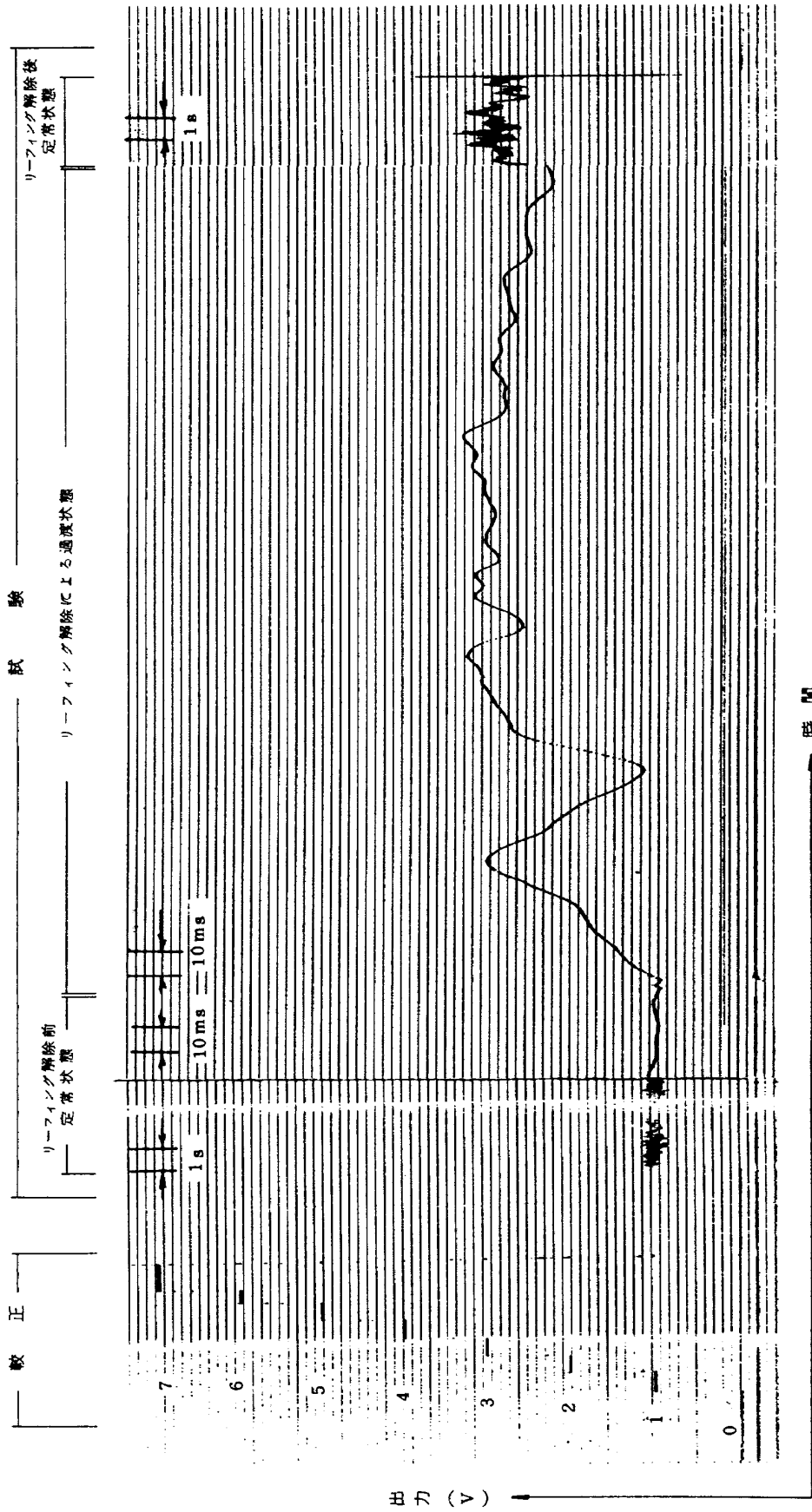


図 10. (8) Run #D8. ダミーフロート付平面傘 40% リーフイング

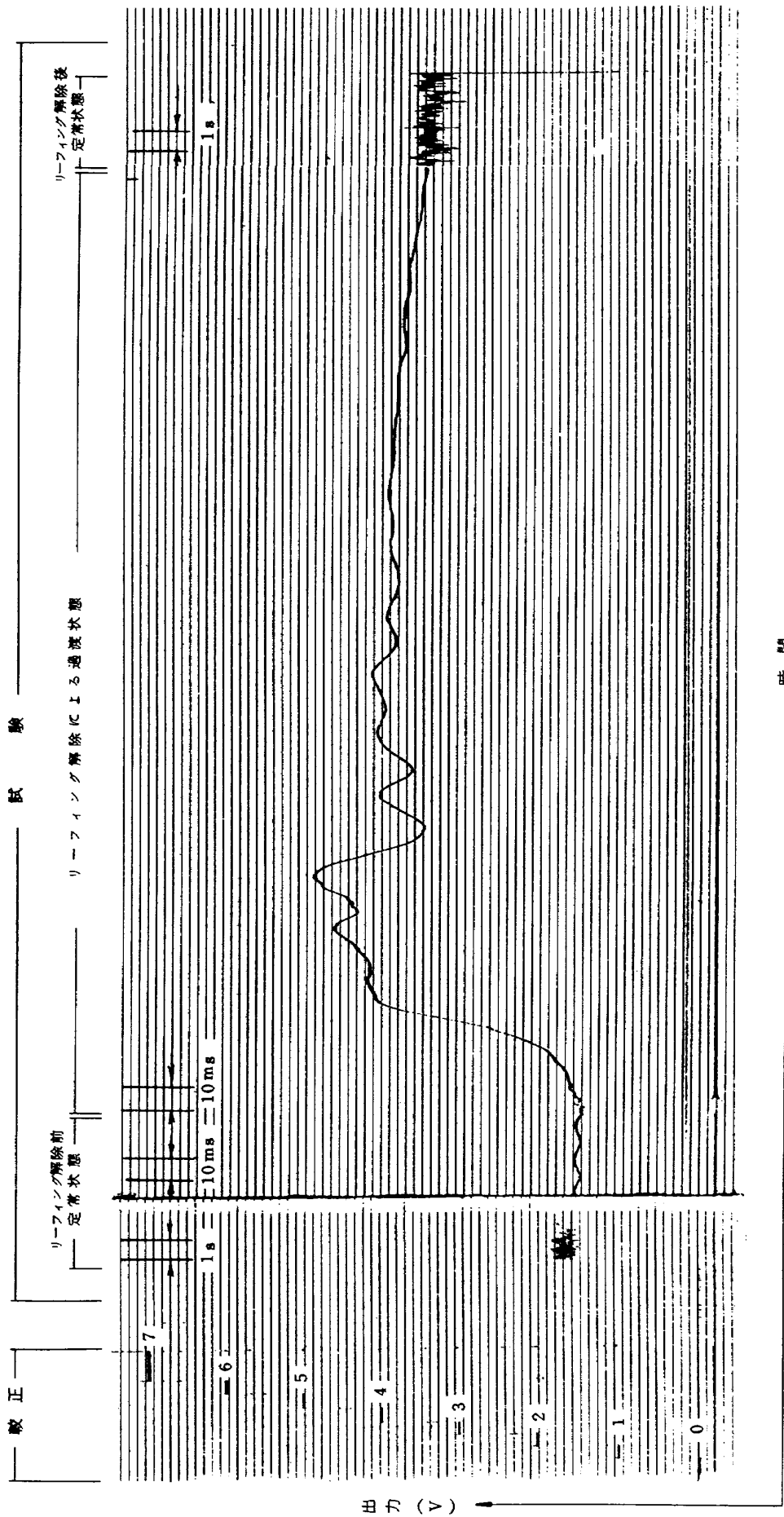


図 10. (9) Run #D9-2. リブレスガイド傘 40% リーフイング

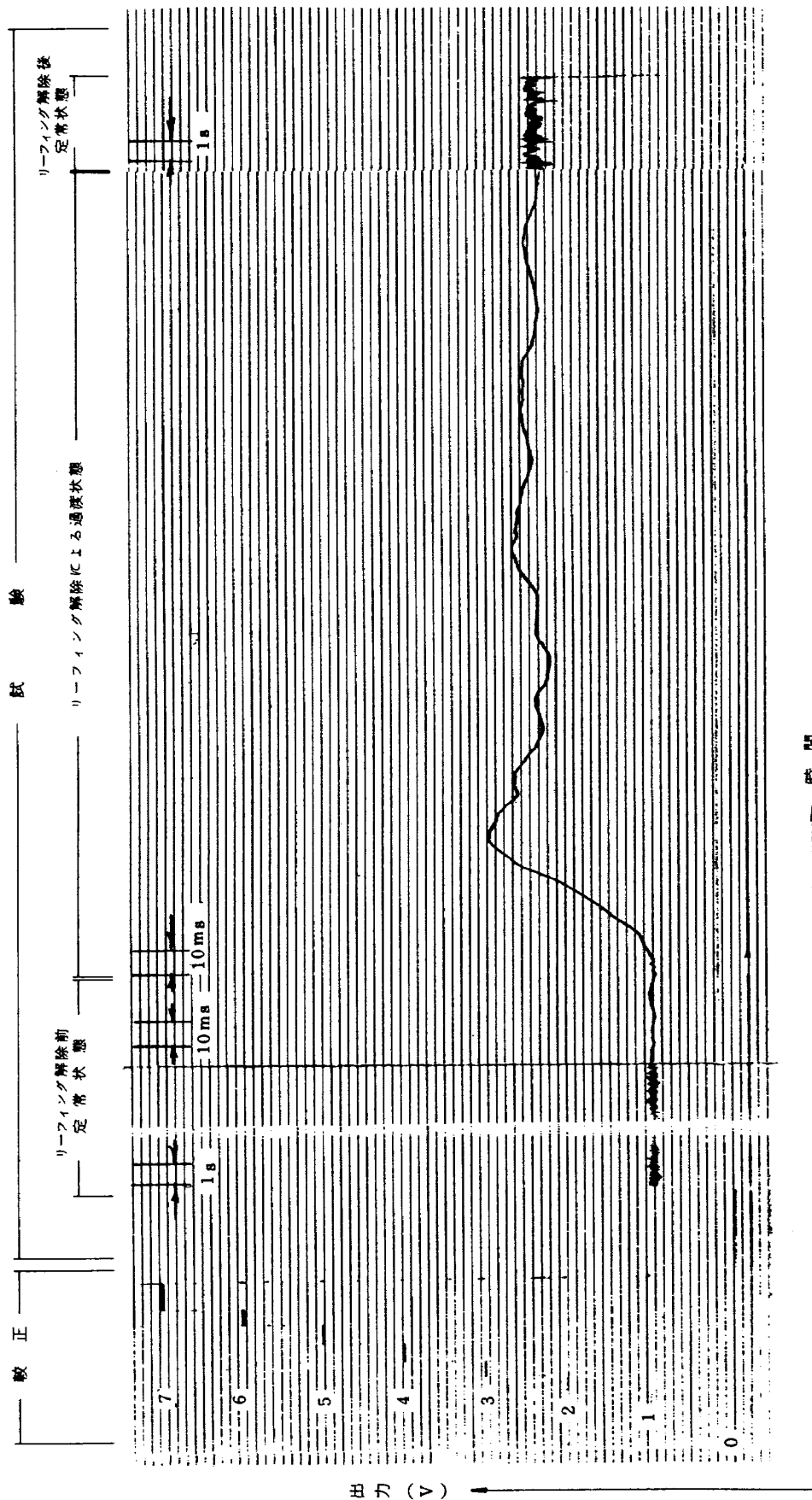


図 10. (10) Run #D10. リングスロット毎 40% リーフイング

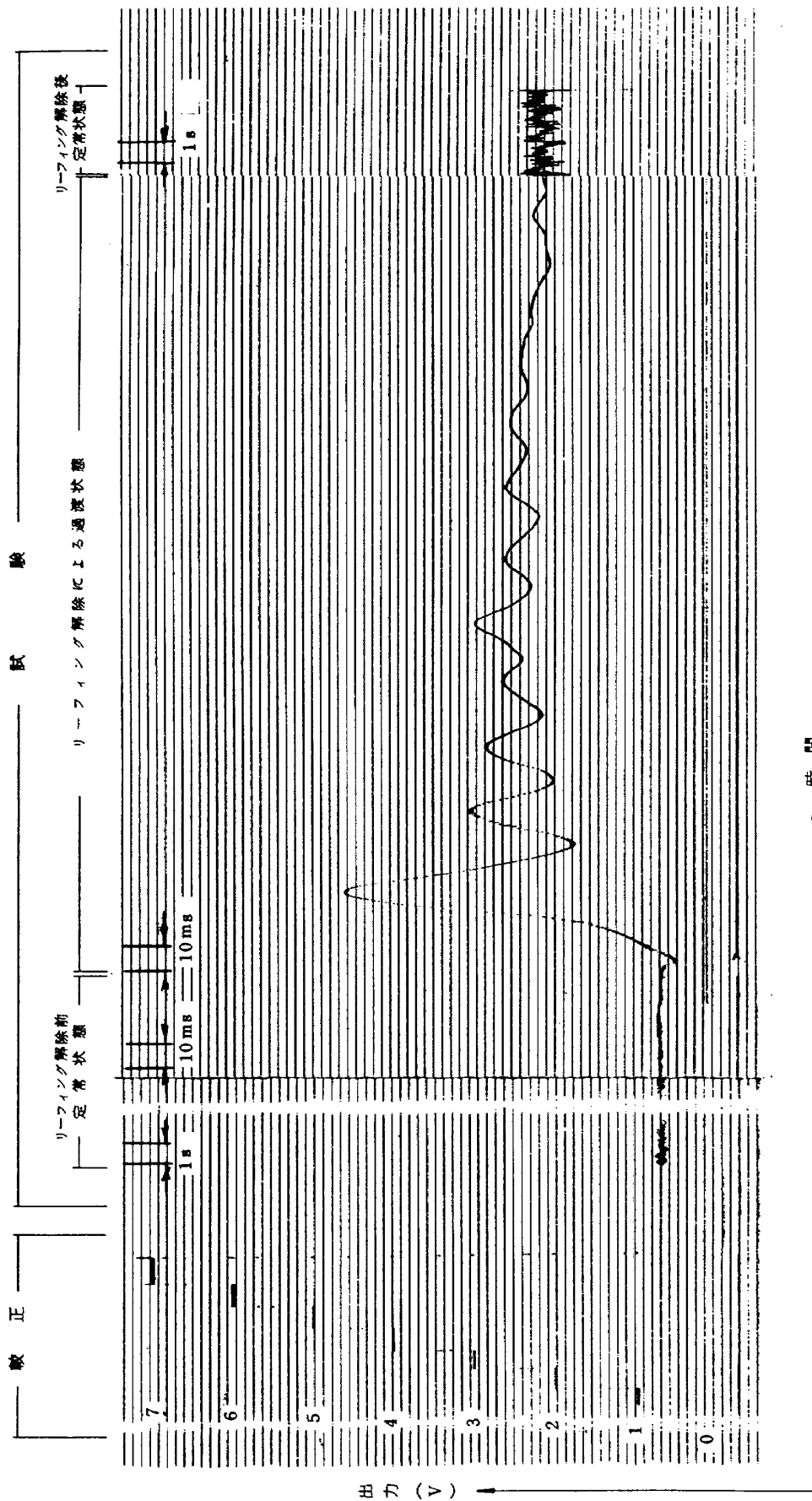


図 10. (1) Run #D11. DGB傘 40%リーフィング

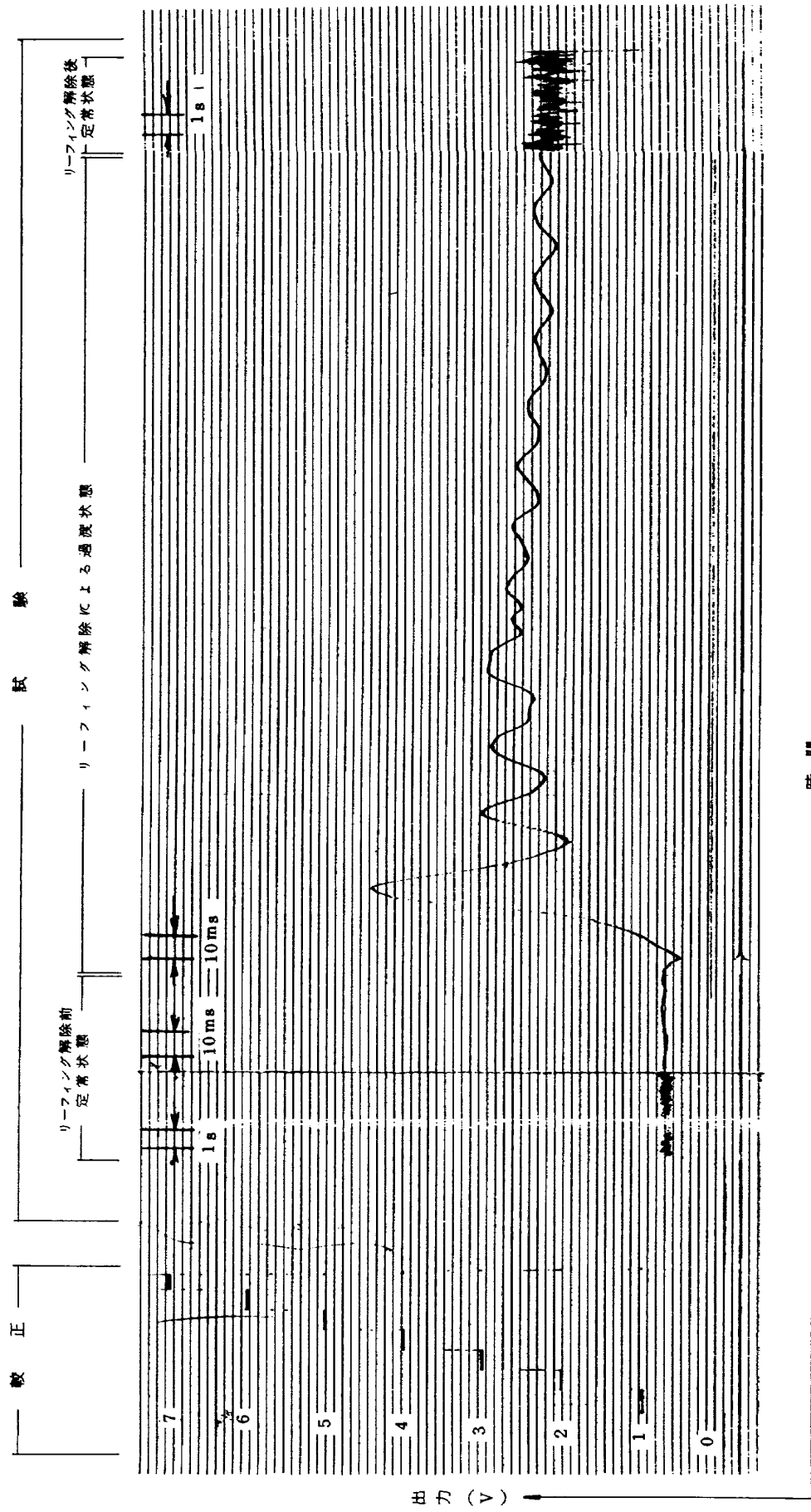


図 10. (12) Run #D12. ダミーフロート付 DGB 傘 40% リーフイング

表4 動的試験データ

項目	パラシュート		平面傘 (SFC傘)				リブレスガイド傘 (RGS傘)		リングスロット傘 (RS傘)		ディスク・ギャップ・バンド傘 (DGB傘)			
	リーフィング度 (%)				ダミーフロート付								ダミーフロート付	
	70	40	70	40	70	40	70	40	70	40	70	40	70	40
リーフィング時抗力 (kg)	37	22	38	23	53	36	36	19	31	16	31	16	31	16
開傘時ピーク抗力 (kg)	121	127	104	63	120	105	50	62	76	97	81	80	81	80
開傘後定常抗力 (kg)	65	67	61	58	77	76	50	51	47	47	48	49	48	49
開傘時ピーク抗力と開傘後定常抗力との比, C_K	測定値	1.86	1.90	1.70	1.09	1.56	1.38	1.00	1.22	1.62	2.06	1.69	1.63	1.63
	予測値	1.67	1.56	1.67	1.37	1.53	1.17	1.62	1.50	2.02 (1.64)	1.92 (1.70)	2.11 (1.56)	1.92 (1.70)	1.92 (1.70)
開傘に要する時間 (ms)	20	30	20	45	30	98	30	50	25	30	23	30	23	30
開傘後定常状態に達するまでの時間 (ms)	360	420	300	400	100	300	110	360	250	350	260	250	260	250

$$= (C_D S)_r \frac{1}{2} \rho V^2 dt$$

$$+ \frac{1}{2} [C_K (C_D S)_{op} - (C_D S)_r] \frac{1}{2} \rho V^2 dt \quad (6)$$

右辺第二項は

$$\int_0^{dt} \hat{D}(t) dt = \frac{1}{2} \rho V^2 \int_0^{dt} C_D S(t) dt \quad (7)$$

$C_D S(t)$ は、時間 t_{fill} の間に、 $(C_D S)_r$ から $(C_D S)_{op}$ まで直線的に増加すると仮定すると、

$$C_D S(t) = (C_D S)_r + \left[\frac{(C_D S)_{op} - (C_D S)_r}{t_{fill}} \right] t \quad (8)$$

$(0 \leq t \leq t_{fill})$

(7), (8)式より

$$\int_0^{dt} \hat{D}(t) dt = (C_D S)_r \frac{1}{2} \rho V^2 dt + [(C_D S)_{op} - (C_D S)_r] \frac{1}{2} \rho V^2 \times \left[\frac{(dt)^2}{2t_{fill}} \right] \quad (9)$$

リーフィング解除時の速度変化は小さいとして無視すると、(5)式の左辺は、

$$(mV)_{dt} - (mV)_0 = V [(m)_{dt} - (m)_0] = V \Delta m \quad (10)$$

(6), (9), (10)式を(5)式に代入することにより、

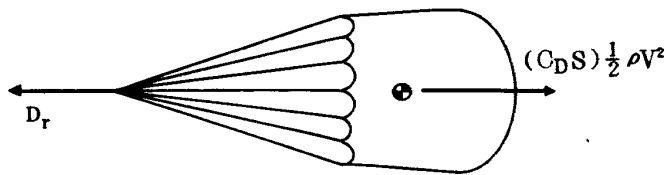
$$C_K = \frac{4 \Delta m}{\rho V dt (C_D S)_{op}} + \left[1 - \frac{(C_D S)_r}{(C_D S)_{op}} \right] \frac{dt}{t_{fill}} + \frac{(C_D S)_r}{(C_D S)_{op}} \quad (11)$$

$t_{fill} \cong dt$ であるから、

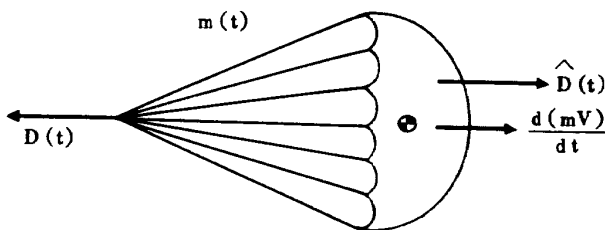
$$C_K \cong \frac{4 \Delta m}{\rho V dt (C_D S)_{op}} + 1 \quad (12)$$

パラシュートに影響する空気質量の増加分 Δm は、パラシュート直径に相当する空気の全球によると仮定する。すなわち、

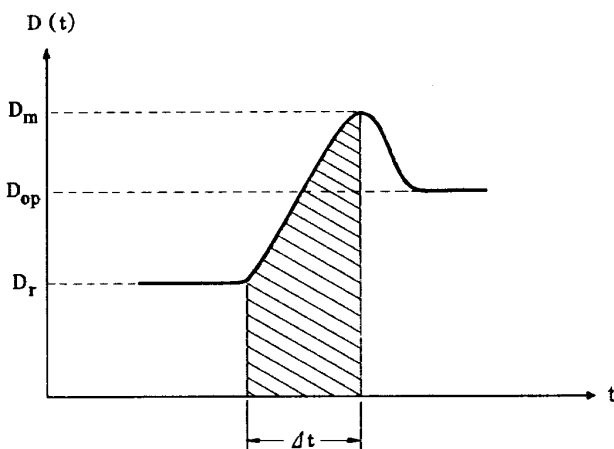
$$\Delta m = \frac{4}{3} \pi \left[\left(\frac{d_{op}}{2} \right)^3 - \left(\frac{d_r}{2} \right)^3 \right] \rho \quad (13)$$



(1) 解除前の力のつりあい



(2) 解除時の力のつりあい



(3) 解除時の抗力

図 11 リーフイング解除時の抗力

である。

(12)式より予測された C_K を表 4 中に示す。図 9 の連続写真に見られるように、DGB 傘にはディスク部とバンド部との間にギャップがあるため、バンド部のリーフィングによってもディスク部の狭まり方は小さく、リーフィング時に受け持つ空気量は、むしろ、ディスク部直径に相当する全球に等しいと考えた方がよい。図 9 の写真より、この直径を読み取り、これを d_r として(13)式に代入し、得た C_K を表 4 中の括弧内に示した。

実験より得られた C_K の値との一致は、概ね良好である。パラシュート各部材の強度の観点から、この C_K の値が小さい方が望ましいことはもちろんである。

4.3 総合評価

以上の試験結果から、試験したパラシュートの性能の評価を行うと表 5 のようになる。評価は、主として抗力係数の大きさ、安定性、リーフィング解除時動特性、加工性・コスト、製造性の各項目について、A：優れている、A'：やや優れている、B：普通、C'：やや劣っている

いる、0：劣っている、の5段階に分けて行った。評価Aの数の多いものが使用に適しているのはもちろんであるが、ロケット頭胴部回収のシーケンスに合致したものを選定し、かつ、開発期間、加工性・コスト、製造性（我が国での製造経験）、適用例、使用経験、等をも考慮し、総合的に判断する必要がある。

パラシュートによるロケット頭胴部回収のシーケンスは、図12に模式的に示したように、

- (1) 高度約6 kmで直径2 m程度のドログ・シュート(1段用シュート)を開傘する(リーフィングの必要なし)。
- (2) ドログ・シュートによってメイン・シュート(直径6~7 m程度)を引き出す。このとき、メイン・シュートは、開傘衝撃を緩和するため、約40%にリーフィングされている。
- (3) メイン・シュートのリーフィングを解除し、減速しながら落下する。

(4) 海面に着水し、フロートを利用して海面に浮場する。

よって、各パラシュートに要求されるのは、
 ドログ・シュート：減速性能、安定性の良いことが最も重要で、リーフィングによる特性は問わない、
 メイン・シュート：減速性能、安定性、リーフィングによる特性が良いこと、
 である。

これらの条件を満たすパラシュートとして、表5の評価によると、ドログ・シュートにリブレスガイド傘、メイン・シュートにDGB傘を用いるのが妥当であると考えられる。リブレスガイド傘は、コストは高いが、直径2 m級の小型では、製造加工上の問題もない。DGB傘は、我が国における製造・使用実績は乏しいが、開発上、特に難点はないと思われる。

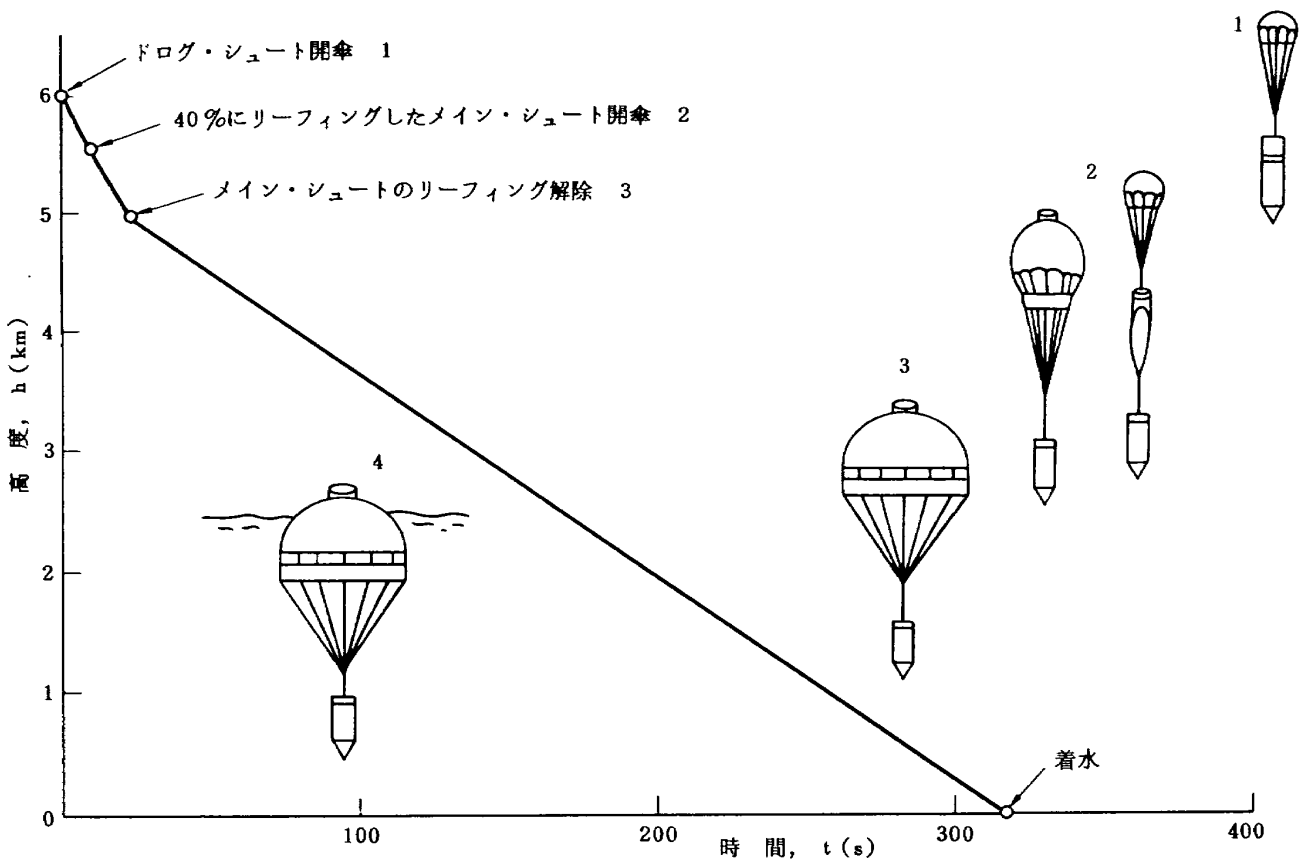


図12 ロケット頭胴部回収シーケンス

表5 パラシュート総合評価表(評価欄 A:優れて C':やや劣

項 目		パラシュート		平面傘 (SFC傘)						リブレスガイド傘(RGS傘)		
		リーフィング度(%)		-	70	40	ダミーフロート付			-	70	40
							-	70	40			
抗力係数	抗力係数	0.75 ~0.95	0.39 ~0.54	0.25 ~0.30	0.76 ~0.93	0.40 ~0.58	0.24 ~0.30	0.93 ~1.13	0.91 ~0.99	0.62 ~0.75		
	公称抗力係数	0.75			0.75			0.8				
	抗力係数値の大きさ	中			中			大				
	評 価	B			B			A				
安定性(目視観測)	振れの大きさ	大	中	小	大	中	小	極小	全体の振動	同左		
	最大振幅(度)	40	20	10	40	20	13	4	4	5		
	回 転	-	-	多い	-	-	多い	-	-	多い		
	安定性全般	不安定	やや安定	同左	不安定	やや安定	同左	非常に安定	傘体がつぶれる	同左		
	評 価	C	C'	C'	C	C'	C'	A	B	C'		
リーフィング解除時動特性	抗力の特性		ピークが大きく、立ち上がりもシャープ、解除後、振れが大きく、安定性悪し					ねじれのため、開傘不良	シャープな特性	傘のつぶれの回復に時間がかかる		
	開傘信頼度		良	良		良	不良	良	不良			
	評 価		C'	C'		C'	C		B	C		
加工性コスト	評 価	A						C'				
製造性	製造経験(6~7mφ級)	有						無				
	評 価	A						B				
適 用 例		人員降下、物量投下用の一般的な傘						軌道安定用				
総 合 評 価								ドログ・シュートに適している				

いる, A' : やや優れている, B : 普通)
 っている, C : 劣っている

リングスロット傘 (RS傘)						ディスク・ギャップ・バンド傘 (DGB傘)					
-	70	40	ダミーフロート付			-	70	40	ダミーフロート付		
			-	70	40				-	70	40
0.61 ~0.67	0.41 ~0.45	0.27 ~0.31	0.57 ~0.67	0.40 ~0.46	0.28 ~0.35	0.67 ~0.73	0.62 ~0.66	0.47 ~0.52	0.70 ~0.77	0.58 ~0.65	0.45 ~0.55
0.55			0.55			0.55 ~0.80			0.55 ~0.80		
小			小			中			中		
C'			C'			A'			A'		
小	極小	極小	小	極小	極小	小	極小	極小	小	小	小
7	4	2	6	4	2	8	3	8	8	8	10
-	少しあり	-	-	少しあり	-	少しあり	-	-	少しあり	-	-
安定	同左 傘体振動	同左	安定	同左 傘体振動	同左	安定	同左 ディスク 部振動	同左	安定	同左 ディスク 部振動	同左
A	A'	A'	A	A'	A'	A	A	B	A	A'	B
	非常におだやかな過渡特性で、解除前後の振動も少ない						ピーク後の減衰も極めて理想的で、解除前後の安定性も良い C _K の値若干大きい			同左	
	良	良					良	良		良	良
	A	A'					A	A'		A	A'
C'						B					
有						無					
A						B					
ジェット機制動用											
						メイン・シュートに適している					

5. あとがき

実物の1/6の4種のパラシュートの風洞試験を行い、4種のパラシュートについて、抗力係数の測定と、16mmムービー、35mmスチール写真、VTR、目視による観測により安定性の考察を行い、試験結果の章で述べたような結果を得た。

パラシュートの風洞試験に関しては、日本ではあまり例がなく、計画初期段階では、風洞への支持方式にも懸念がもたれたが、ロケット頭胴部をピアノ線で懸架する方式は、この試験に対して有効であることがわかった。文献5では、頭胴部からガイド・ラインを後方へ出し、パラシュートの運動を一次的に抑える方法をとっているが、今回の試験ではそういう処置はとらなかった。

全ての試験に対し、パラシュートを横から見る方向と前方から見る方向の二方向から、各風速に対し(静的試験)及びリーフリング解除による開傘時(動的試験)のパラシュートの運動を16mmムービーに記録した。これらは、必要に応じ閲覧することができる。

この報告書では、小型ロケット・ペイロード回収システムに用いるのに適当と思われるパラシュートの選定も行ったが、主として、試験結果を忠実に採録することを目的とした。運動の解析、実機に応用したときの種々の問題点の解明、等は、この結果をもとにして検討が加えられるであろう。

尚、試験計画の実行、データ整理、パラシュート、火工品等の取扱い、等には、次の人々に負うところが多い。深甚の謝意を表するものである。

日産自動車株式会社宇宙航空事業部

土井 恒美

猪合 拓志

白井 弘己

飯田 敏男

藤原 暉雄

藤倉航装株式会社技術管理部

上田 幸昌

また、本試験に関し、終始御支援をたまわった宇宙開発事業団ロケット設計グループ竹中幸彦総括開発部員、

同柴藤羊二副主任開発部員、ならびに、本所宇宙研究グループ山中龍夫第二研究グループリーダーに厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 高橋仙之助：無重力下で複合材料を作る実験 金属物理セミナー, Vol. 1, 465, (1976), pp. 275 ~ 278
- 2) 経団連宇宙開発推進会議：材料実験計画 宇宙467, (1977)
- 3) 1973-74 AIAA Aerodynamic Deceleration Systems TC; Recent Advances and Remaining Voids in Parachute Technology, Astronautics & Aeronautics, (Oct. 1975), pp. 56 ~ 64.
- 4) 中村龍輔：パラシュート 日本航空学会誌, Vol. 14, 46146, (1966), pp. 81 ~ 89
- 5) W. B. Pepper and J. F. Reed; Parametric Study of Parachute Pressure Distribution by Wind Tunnel Testing, AIAA Paper No. 75-1369, (1975).
- 6) J. T. Foughner, Jr. and W. C. Alexander; Wind-Tunnel Test of Modified Cross, Hemisflo, and Disk-Gap-Band Parachutes with Emphasis in the Transonic Range, NASA TND-7759 (1974).
- 7) 海老沼幸成, 戸田亘洋, 白井正孝, 馬場滋夫, 吉田典生：大型低速風洞の特性試験(1) — 気流検定試験 — 航技研資料TM-334 (1977)
- 8) 航空宇宙技術研究所・宇宙開発事業団共同研究成果報告書：回収用パラシュートの空気力学的特性の研究, 昭和53年3月
- 9) 小田 実：第20回風洞研究会議におけるコメント, (1978)
- 10) F. E. Mickey, A. J. McEvan, E. G. Ewing, W. C. Muiyler, Jr. and B. Khajeh-Nouri; Investigation of Prediction Methods for the Loads and Stresses of Apollo Type Spacecraft Parachutes, Volume I-Loads, NASA CR 134230, (1970).

航空宇宙技術研究所資料368号

昭和53年10月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
