バイブロスコープおよびその使用に関する資料* (その2)

会 員 若 山 一 夫**

“ 自 念 栄 一

1. 前 言
2. バイブロスコープの原理および形式
 - (A) 周波数変化方式
 - (B) 張力変化方式
3. バイブロスコープの構成要素
 - (A) 励振方法
 - (B) 共振の検知方法
 - (C) 張力装置
4. 測定の精度について
5. Stiffness の影響
 - (A) 糸の曲げ抵抗を考えた議論
 - (B) 断面形の影響
 - (C) 測定データ
6. クリンプの影響について

〔以上および引用文献前号所載〕
7. ASTM 暫定規格に対する研究報告
8. 繊維の長さに沿った断面積の不均一について
9. 空気による制動効果
10. 振 幅 の 影 響
11. 糸のささえに弾性がある場合
12. 織度測定の応用例
13. オートバイブロスコープ

つの型の代表的な試料が選ばれた。(第8表) これらの試料繊維の断面形は第5図のとおりで、織度は3~10d, ヤング率は20~50 g/d の範囲にわたっている。

(第8表) 試料繊維の種別

織 度	弾性係数	断面形	摘 要
L	L	F	Dinitrile A
L	H	F	Orlon fil. 75-30-0.32 81'
L	L	R	Nylon-du Pont
L	H	R	Rayon-Am. Viscose
H	L	F	Accetate, bright-du Pont
H	H	F	Rayon, dull-du Pont
H	L	R	Nylon-du Pont
H	H	R	Rayon-Am. Viscose

(注) H L F は High denier, Low modulus, Flat cross section を意味する

7. ASTM 暫定規格²³⁾に対する研究報告²¹⁾

さきに引用したバイブロスコープ法の規格が定められるとき編成された委員会の報告が参考になる。ASTM では信頼できる測定をするため、誤差の原因に関する処理, 計算, 設計などおよそ本文のこの節までに述べてきた主旨の事情について記述している。しかし補正などまったくなしで, (2) 式のなまの計算でどのていどの精度の値が得られるかを知らしておく必要があった。

共同研究では織度, かたさ, 断面の3つの効果を統計的に見出すよう, 上記3要素を組み合わせ得られる8

(第5図) 試料繊維の断面図

* Vibroscope and Their Uses. (2)

** K. Wakayama, E. Zinen, Member. 京都工芸繊維大学繊維学部

上の試料について 10 cm 長をとり、天秤による秤量が可能なように織度の大きいものは 5 本、小さいものは 15 本を束にして各型を代表させ、これから平均織度を求めてバイブroscope による測定を評価する。この統計材料として各型で 9 組の束を作り、9 研究所で 8 つの型の試料を独立にバイブroscope できるように計画された。

全部の試料束はあらかじめ 3 試験所で $3\mu\text{g}$ の天秤感度で繰り返して秤量され、それらの値を平均してそれぞれの束の秤量織度 (D_w) を求めて後 9 研究所に配布された。各研究所では ASTM 形のバイブroscope によって、(2) 式の計算だけで織度 (D_v) が求められる。各試料型について 5 本 (15 本束のものでは 5 本が無作為抽出された) の単繊維がそれぞれ 2 回ずつバイブroscope された。

3 試験所での各束の秤量、9 研究所での各単繊維のバイブroscope 織度などのデータが原論文に記載され、それらの偏差の程度について大いに参考になるが、ここには省略する。ただ各束についての平均の D_w 、 D_v および D_v/D_w の記録を第 9 表に示す。これらについて報文にまとめられている結論の中でつぎのものが参考になる。

- 1) D_v/D_w の値が 1 から偏差している中には、織度の小さいものにつき抜きとりでバイブroscope したこと、および測定誤差によるものが原因している。
- 2) 分散を調べると (a) 織度、断面、ヤング率のうち、織度だけが比の値にわずかの効果を与えている。(b) 研究所間にさうとうの有意差がある。
(1 研究所では 1 人が測定した)
- 3) 織度の大きいものは $D_v/D_w < 1$ 、小さいものは

(第 9 表) 統計的解析に用いられた織度のデータ

Fiber type		HLR	HLF	HHR	HHF	LLR	LLF	LHR	LHF
Lab. 1	Wt. d	14.78	14.81	7.45	10.15	2.62	2.65	1.74	2.64
	Vib. d	11.90	13.81	7.10	9.50	2.61	2.93	1.75	2.60
	D_v/D_w	0.805	0.932	0.953	0.936	0.996	1.106	1.006	0.985
Lab. 2	Wt. d	15.08	13.54	7.34	10.03	3.04	2.26	1.96	2.69
	Vib. d	13.48	13.67	6.50	9.59	3.18	2.13	1.85	2.58
	D_v/D_w	0.894	1.010	0.886	0.956	1.046	0.942	0.944	0.959
Lab. 3	Wt. d	15.7	14.2	7.94	10.3	2.94	2.50	1.69	2.65
	Vib. d	14.91	13.51	7.79	10.41	3.21	2.61	1.80**	2.62
	D_v/D_w	0.950	0.951	0.981	1.011	1.092	1.044	1.065	0.989
Lab. 4	Wt. d	12.37	14.96	7.38	10.04	3.04	2.21	1.86	2.68
	Vib. d	11.77	14.88	7.11	10.40	2.93	2.05	1.86	2.56
	D_v/D_w	0.951	0.995	0.963	1.036	0.964	0.928	1.000	0.955
Lab. 5	Wt. d	14.15	14.00	7.52	10.01	3.19	2.27	1.75	2.61
	Vib. d	13.74	14.09	7.32	9.78	2.92	2.35	1.94	2.64
	D_v/D_w	0.971	1.006	0.973	0.977	0.915	1.035	1.109	1.011
Lab. 6	Wt. d	16.86	14.56	6.93	10.22	2.93	2.41	1.74	2.54
	Vib. d	14.78	12.89	6.28	9.58	2.90	2.49	1.62	2.22
	D_v/D_w	0.877	0.885	0.906	0.937	0.990	1.033	0.931	0.874
Lab. 7	Wt. d	12.32	15.01	7.04	10.16	2.53	2.19	1.81	2.58
	Vib. d	13.84	14.58	7.18	10.13	2.62	2.22**	1.86	2.62
	D_v/D_w	1.123	0.971	1.020	0.997	1.036	1.014	1.028	1.016
Lab. 8	Wt. d	14.81	15.03	7.15	10.46	2.49	2.20	1.77	2.59
	Vib. d	15.60	15.23	8.55	11.12	2.62	2.30	1.82	2.67
	D_v/D_w	1.053	1.013	1.196	1.063	1.052	1.045	1.028	1.019
Lab. 9	Wt. d	16.25	14.53	7.52	10.08	2.95	2.44	1.81	2.74
	Vib. d	13.00	13.82	6.87	9.38	2.99	2.46	1.93	2.63
	D_v/D_w	0.800	0.951	0.914	0.931	1.014	1.008	1.066	0.960

$D_v/D_w > 1$ の傾向がある。

- 4) 実験した範囲で(2)式による織度は約5%以内の誤差である。

8. 繊維の長さに沿った断面積の不均一について

繊維の長さに沿っての断面積不均一は避けられないものと考えられ、とくに天然繊維についてはそれがはなはだしく、パイブロスコープ測定におけるわずかなゲージ長の中でも問題になることは早くから気付かれていた。¹⁰⁾その後 Montgomery は理論的考察を、また Voong¹³⁾はそれに対する実験的検証を行なったので、それらの結論的な事柄をまとめる。

問題の不均一が存在すると(1)式の成立しないことはもちろん、繊維の Stiffness がないときでも高調波の調和関係が乱れ、同時に共振のときの定常波の節の位置がずれることも明らかに推定される。

いま繊維軸の方向 x に沿って断面積が

$$S(\xi) = S_0 [1 + \eta(\xi)]; \quad (0 \leq \xi \leq l) \quad \dots\dots (11)$$

で表わされると、 $\eta(\xi)$ は $S(\xi)$ の平均

$$S_0 = \bar{S} \equiv \int_0^l S(\xi) d\xi$$

からの偏差の割合を示し、不均一の1つの表現法である。さらに繊維が一様であるとして、パイブロスコープのデータから Stiffness factor の1次項まで補正して得られる断面積を

$$S_n \equiv \frac{T(1+\alpha)^2}{4 l^2 \rho (f_n/n)^2} \quad \dots\dots (12)$$

として“見かけの面積”と呼ぶことにする。このとき $\bar{S}$ と S_i との間の面積増分 σ_i が次式で定義される。

$$\sigma_1 = \frac{\bar{S} - S_1}{S_1}, \quad \sigma_2 = \frac{\bar{S} - S_2}{S_2} \quad \dots\dots (13)$$

一方 $\eta(\xi)$ を用いてのこれらの理論的表示は、第1近似の範囲でつぎのように求められた。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \int_0^l \eta(\xi) u_1(\xi) d\xi; \quad u_1(\xi) \equiv \cos 2\pi\xi \\ \sigma_2 &= \int_0^l \eta(\xi) u_2(\xi) d\xi; \quad u_2(\xi) \equiv \cos 4\pi\xi \end{aligned} \right\} \dots\dots (14)$$

不均一の影響をみるいま1つの方法は(8)式に示した非調和度 (ε_{21}) である。(9)式は Stiffness によるものであったが、いまの場合 $\eta(\xi)$ によって寄与される分を理論的に導びくと、第1近似で

$$\begin{aligned} \varepsilon_{21} &= \int_0^l \eta(\xi) v_{21}(\xi) d\xi; \\ v_{21}(\xi) &\equiv -\sin \pi\xi \cdot \sin 3\pi\xi \quad \dots\dots (15) \end{aligned}$$

が得られる。

さらに不均一があると、均一な場合に現われるべき定常波の節の位置が変わる。理論によると第1近似で、第2規準振動のゲージ長の中央 ($\xi=0.5$) に現われるべき節が次式の δ_{12} だけずれる。

$$\delta_{12} = \int_0^l \eta(\xi) w_{12}(\xi) d\xi \quad \dots\dots (16)$$

$$w_{12}(\xi) = \begin{cases} -\frac{1}{4}(1 - \cos 4\pi\xi) \\ = -\frac{1}{2} \sin^2 2\pi\xi; & (0 \leq \xi \leq \frac{1}{2}) \\ \frac{1}{2} \sin^2 2\pi\xi; & (\frac{1}{2} < \xi \leq 1) \end{cases}$$

上の理論がだされて後 Voong は、フリース ステーパーから抜いた4本のウールをアルコール抽出したものについて、上の計算をすべて行なった。静電的励振法で周波数変化方式のパイブロスコープを使用し、ゲージ長はカセットメータによる測定である。張力、そのときの長さ、第1、2規準振動数、中央の節の位置(全長に対する割合 $\xi_{12}\%$)などの値を第10表に示す。

つぎに 1 mm 間隔で直角方向からの径を顕微鏡でみた後、断面を円とみなして長さに沿う面積 $S(\xi)$ の変化のグラフが決定される。これによって $\bar{S}$ 、さらに(11)式から $\eta(\xi)$ も求まり(14)、(15)、(16)式によって計算値の σ_1 、 σ_2 、 ε_{21} 、 δ_{12} が算出された。これらに対して(13)、($\bar{S}$ としては秤量した m から求める)(8)式、 $\xi_{12}-50\%$ などによる値が観測値である。最後に 15 μ g 容量のバランスにかけられるていどの大きさに試料を分断して、全質量 m を求めた。これらの値が第11表であって、計算値と観測値との差は測定器の精度限界いっぱい値であると考えられた。また観測値 ε_{21} の中には Stiffness の効果によるものも含まれているはずであるが、不均一のみを考えた計算値 ε_{21} の値と同程度であることは注目すべきことである。(参照第2表)

同様な計算を織度の小さい 3 d のナイロン フィラメント 4 本について行なっている。0.1~1 g の張力でパイブロスコープして得たデータの計算が第12表である。この場合は断面も非常に均一であり、節の変位もほとんど測定にかからなかったほどである。径は秤量の値から密度が 1.146 g/cm³ の円断面として算出された。この例によって Voong は織度の小さい合繊フィラメントでは Stiffness に対する補正だけで充分ではないかと述べている。

上の諸例は理論を検証するもので、実際は未知であるべき平均断面積(または質量)と $\eta(\xi)$ とが、パイブ

(第10表) B.A. ウール単繊維についてのパイブスコープ記録

Fiber No.	Weight (g)	Length (cm)	f_1 (c.p.s)	f_2 (c.p.s)	α (%)	ξ_{12} (%)	$\rho S_1 l$ (μ g)	$\rho S_2 l$ (μ g)
101	0.620	3.82	838	1 690	1.64	51.44	58.6	57.7
	1.060	3.83	1 097	2 205	1.25	51.32	57.8	57.3
	1.620	3.83	1 349	2 718	1.01	51.29	58.1	57.4
	2.092	3.83	1 528	3 075	0.89	51.31	58.4	57.6
	2.652	3.83	1 722	3 460	0.79	51.36	58.2	57.5
	3.092	3.84	1 855	3 730	0.73	51.39	58.2	57.6
ave.						51.35	58.2	57.5
102	0.618	3.76	860	1 748	1.77	51.14	56.4	54.8
	1.057	3.76	1 112	2 266	1.35	51.14	57.2	55.2
	1.618	3.77	1 368	2 796	1.09	51.13	57.4	55.0
	2.089	3.77	1 556	3 185	0.96	51.10	57.2	54.6
	2.650	3.77	1 758	3 564	0.85	51.07	56.7	55.2
	3.089	3.78	1 891	3 851	0.79	51.06	56.9	54.9
ave.						51.11	57.0	55.0
103	0.628	3.77	711	1 420	2.57	49.75	85.1	85.8
	1.067	3.77	919	1 836	1.97	49.76	85.5	85.9
	1.628	3.78	1 126	2 252	1.59	49.76	86.0	86.1
	2.099	3.78	1 282	2 558	1.40	49.76	85.2	85.7
	2.660	3.78	1 440	2 878	1.24	49.74	85.2	85.5
	3.098	3.78	1 547	3 090	1.16	49.76	85.9	86.3
ave.						49.76	85.5	85.9
104	0.627	3.78	852	1 748	1.73	50.58	58.0	55.2
	1.066	3.78	1 104	2 248	1.32	50.61	58.2	56.2
	1.626	3.78	1 358	2 760	1.07	50.66	58.4	56.6
	2.098	3.79	1 537	3 131	0.94	50.69	58.5	56.4
	2.658	3.79	1 733	3 505	0.84	50.67	58.2	57.0
	3.098	3.79	1 865	3 790	0.78	50.66	58.5	56.7
ave.						50.64	58.3	56.4

(Voong, Montgomery)

(第11表) 面積増分 σ_i , 非調和性 ε_{21} , 節移動 δ_{12} の理論値と観測値 (B.A. ウールの単繊維)

No.	質量 (μ g)	σ_1 (%)		σ_2 (%)		ε_{21} (%)		δ_{12} (%)	
		Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.
101	57.3	+ 1.7	+ 1.6	+ 0.7	+ 0.4	+ 0.5	+ 0.6	+ 1.6	+ 1.4
102	55.9	+ 1.4	+ 1.9	- 2.7	- 1.8	+ 2.0	+ 1.9	+ 1.3	+ 1.1
103	86.3	- 1.1	- 0.9	- 0.8	- 0.5	- 0.1	- 0.1	- 0.3	- 0.2
104	56.3	+ 2.9	+ 3.7	+ 0.5	+ 0.7	+ 1.2	+ 1.6	+ 0.1	+ 0.6

(Voong, Montgomery)

スコープで得るデータとどんな関係にあるかを確かめたものである。実用ではパイブスコープによるデータだけで、(2)または(12)式を断面の不均一さについて補正する知見を得たいわけである。Montgomeryは不均一が繊維軸に沿う直線的なテーパと、正弦的なうねりと

の重なりからなるとみられるとき、補正された繊維重量(ρSI)_oとしてつぎの計算式を導びいた。

$$(\rho SI)_o = \rho S_1 l (1 - 2 \frac{1}{2} \varepsilon_{21}) = \rho S_2 l (1 - \frac{1}{2} \varepsilon_{21}) \dots\dots\dots (17)$$

この計算を行なった Voong の実験として、Domestic

(第12表) 3d ナイロンにおける質量増分 σ_i , 非調和性 ε の理論値と観測値

No.	質 量 (μg)	長 さ (cm)	径 (μ)	σ_1 (%)		σ_2 (%)		ε_{21} (%)	
				Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.
3 001	10.4	4.13	22.1	+ 0.5	+ 1.0	- 0.5	+ 0.1	+ 0.5	+ 0.5
3 002	10.9	4.00	18.3	+ 0.7	+ 0.9	- 0.5	- 0.6	+ 0.6	+ 0.7
3 003	22.2	3.96	26.2	+ 0.7	+ 1.2	- 1.0	- 0.2	+ 0.8	+ 0.8
3 004	—	3.98	—	+ 1.5	—	+ 0.3	—	+ 0.6	+ 0.4

(Voong, Montgomery)

58 s ウール トップから抜いた2本の繊維についてのものがある。これらを3部分に切ってバイブロスコープにかけ、後に水晶バランスで秤量した。第13表において m と $(\rho SI)_e$ との差はすべて $0.4 \mu\text{g}$ であり、バイブロスコープ測定が $0.2 \mu\text{g}$ 、バランスが $0.3 \mu\text{g}$ ぐらいの精度であることを考えると充分である。しかし断面についての仮定が任意的であるから、この補正法が常用できるかどうかは断言できないとしている。

(第13表) 58 s ウール単繊維の質量, 非調和度

試 料	$\rho S_1 l$ (μg)	$\rho S_2 l$ (μg)	$(\rho SI)_e$ (μg)	m (μg)	$(\rho SI)_e - m$ (μg)	ε_{21} Obs. (%)
1 root	35.4	34.4	34.1	34.5	- 0.4	1.4
1 center	31.6	31.1	31.0	31.4	- 0.4	0.8
1 tip	29.5	29.1	29.0	28.9	+ 0.1	0.7
2 root	34.9	34.4	34.3	33.9	+ 0.4	0.7
2 center	35.0	34.0	33.8	33.6	+ 0.2	1.4
2 tip	25.6	26.6	26.9	26.7	+ 0.2	-1.9

(Voong, Montgomery)

いま1つ30 d のナイロンを加熱延伸して作った試料の測定が述べられている。この場合処理によるヤング率の変化はほとんどなく、したがって Stiffness 補正の変化も無視された。テーパになったもの4本と、いわゆる不規則のもの2本との測定が第14表で、 m の秤量は $4 \mu\text{g}$ の精度であったが、 $(\rho SI)_e$ はすべてこの範囲の中には

(第14表) 30 d ナイロン フィラメントの質量 (ρSI) , 非調和度 (ε_{21}) , 節移動 (δ_{12})

No.		$\rho S_1 l$	$\rho S_2 l$	$(\rho SI)_e$	m	ε_{21} (%)		δ_{12} (%)	
		(μg)	(μg)	(μg)	(μg)	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.
テ ー パ	30 201	125.2	123.8	123.4	127	+ 0.2	+ 0.6	− 0.7	− 0.3
	30 202	130.4	129.1	128.8	128	0.8	0.5	− 0.3	+ 2.7
	30 203	127.8	127.2	127.1	128	0.2	0.1	+ 0.7	− 0.7
	30 204	137.3	135.1	134.5	132	1.2	0.9	− 0.5	− 0.6
不 規 則	30 301	134.3	133.1	132.8	131	0.3	0.5	+ 0.3	− 0.5
	30 302	118.7	115.3	114.5	119	0.3	1.4	− 2.7	+ 2.8

(Voong, Montgomery)

いっている。

9. 空気による制動の効果

バイブロスコープは外部強制振動で、空気によって制動された振動の共鳴点を観測することに問題がある。これは Montgomery も研究の初期から認めている。後に Voong¹³⁾ と共同で、糸の支持点の運動と繊維の粘弾性または空気の制動が、共振周波数にほぼ無関係であることを示すつぎの実験を行なった。

第5節にも引用したタングステン線を、(a) 一定のゲージ長のままで張力を広い範囲に変え、また (b) 張力を一定にして長さを変えて振動させた。第6図(a), (b) がそれぞれのグラフで、第1, 2 規準振動から得られる試料の全質量および線密度を示している。直線に載る測点は Stiffness factor による補正を行なったもので、補正なしのもの(曲線)と比較した。(a) の場合マイクロバランスによる値 $366 \pm 2 \mu\text{g}$ と比べてこの補正の意義が明らかになるとともに、2つの図における極端な条件のところでの現象が、空気の影響を示すものと解釈された。

上の知見を通して Stauff, Montgomery¹⁶⁾ は、改めて空気の影響を正面から研究した。理論の根拠は Stokes の与えたもので、粘性流体中でよこに単振動する無限長の棒が受ける制動力が

$$-\phi M \gamma \ddot{y} - \alpha \phi M \gamma \dot{y} \dots\dots\dots (18)$$

(第6図) 張力 (T) およびゲージ長 (l) を変えたときのパイプロスコップ測定値の変化 (0.001 in 径のタンゲステン線)

黒印: 補正値 白印: 補正なし

のように表わされることである。ここで $\ddot{y}$, $\dot{y}$ はそれぞれ棒のよこ振動の加速度と速度である。また M は無次元のパラメータで $M=4\mu/a^2\gamma\omega$ で示され、 μ : 流体の粘性係数、 a : 棒の半径、 γ : 流体の密度、 ω : よこ振動

(第7図) 無次元量 M による α , ϕ の変化

の角速度、 S : 棒の断面積である。 α , ϕ は第7図のような M の関数であるが後に近似が用いられる。

(18) 式で流体抵抗の内容、すなわち第1項の慣性項および第2の粘性項のうち前者は、半径が小さく、速度が大きいと渦現象で効果が消滅すると考える論もある。Stauff はこれを無視せず糸のよこ振動の運動方程式の中に組み入れた。この方程式の解に基づいて振幅最大を与える振動数を表示するのに、第7図の α , ϕ の値が問題の範囲において定値と考えてよいとした。その結果空気

$$4f_n = \kappa f_n \approx \frac{2\phi\mu}{\rho S} \dots\dots\dots (19)$$

$$\kappa = \left(\frac{\phi\mu}{f_n \rho S} \right)^2 (\alpha^2 + 1) + \frac{\phi\mu}{f_n \rho S}$$

これによるとふつうの条件のもとでのパイプロスコップ測定では $\phi \approx 0.1$ と考えてよく、検知し得る程度 ($4f_n = 1$ c.p.s.) 以上の周波数偏差は、 $10 \mu\text{g/cm}$ 以下の繊度

(第15表) 排気したときの共振振動数の変化 (ある径の繊維に対して $4f$ はほぼ定値になっている)

称 呼 径 (in)		大 気 中				κ (%)	真 空 中	
		T (mg)	f (c.p.s)	l (cm)	a (半徑) (μ)		+ $4f$ (c.p.s)	
							Calc.	Obs.
金 (19.3g/cm³)	0.0003	72.9	99	10.53	5.18	0.7	0.7	2
	0.0003	25.6	58	10.53	5.24	1.1	0.7	1
	0.0003	25.6	62.5	9.80	5.24	0.9	0.6	1
	0.0002	74.1	261	8.00	2.61	1.0	2.6	7
	0.0002	25.3	119	10.00	2.72	2.0	2.4	3
	0.0001	6.4	239	5.98	1.14	6.9	16.5	20
タンゲステン (19.0g/cm³)	0.0005	36.6	56	10.13	6.77	0.8	0.4	0
銅 (8.9g/cm³)	0.0004	238.4	227	9.45	6.73	0.6	1.3	2
	0.0004	147.5	179	9.45	6.70	0.7	1.3	2
	0.0004	50.9	106	9.45	6.65	1.1	1.1	2
ガラス (2.5g/cm³)	0.0004	51.0	268	10.11	4.62	4.2	11.1	16

(Stauff, Montgomery)

(第8図) 種々の外気条件におけるガラス繊維
(径 10 μ) の共振曲線

(第9図) 真空度の変化に伴うガラス繊維
(10 μ径) の共振振動数 (f) の変化

のものに見られることがわかる。第15表は上のことを検証する実験である。第8図の共振曲線でたて軸は振幅の相対的大きさを示しているが、真空の場合の絶対値はずっと大きい。共振周波数は周囲気体の粘性が少なくなるにしたがって 252, 263 および 268 c.p.s. と変化している。

真空度の変化にともなう共振周波数の変動を示すものは第9図である。一般に物体の大きさが、圧力によって変化する気体分子の自由平均行程の長さに比べて大きく違えば、その物体の動きに逆らう気体の粘性は気体の密度変化に影響されない。このことが図の高、低圧部での一定周波数となって現われていると解釈された。事実空気平均行程は1気圧で 0.1 μ, 0.05 mmHg で 10³ μ くらいであって、これに対する試料のガラス繊維は約 10 μ であるから、0.1 mmHg 以下および 1 気圧以上では繊維の振動に対して空気の粘性の変化がまったくきかなくなると判断される。

以上はすべて基本振動数の測定であるが、結論としては(19)式の示すとおり、測定の設計に無関係に起り得る Δf_n に対して、共振周波数が高くなるように計画すると関係誤差が小さく出ることを利用すべきである。本節のはじめに示した Voong の実験は、このことに当てはまっている。最近 Dusenbury が真空パイプスコープを利用した。彼は曲げとねじり定数とについても、線

密度の測定と同様な振動法を用いることにして、すべてが共用できる形のを工夫した。

10. 振幅の影響

パイプスコープで振動数が(1)式で示される弦の規準振動 $y(x, t)$ は、ゲージ長 l の両端 ($x = 0, l$) において $y = 0$ であるとしてつぎの微分方程式から導かれる。

$$\sigma \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

この右边が糸の単位長に働く復元力を表わす近似は、糸の平衡軸に対する傾きの小さいときだけ成立する。これまでの研究者はこの意味において可能な限りの小振幅で測定したが、近似の成立する程度についての知見は得ていなかった。Downes, Mackay が試料繊維の太さといのの振幅を用いるまでは、測定機構要素の組み合わせの関係上 0.1 mm ほどにとどまり、振幅が大きくなると共振周波数が確かに高くなるといった知見があっただけである。

Stuart はこのとき(1959年)オーストラリアにおけるパイプスコープ研究グループの一員としてはじめてこれを取り上げた。糸の両端が固定されていると、よこ振動のふくらみで張力の増加が必須となる。そこで平衡時の張力 T_0 を用いた(20)式右辺のこの効果による近似の不成立は、先の糸の傾きによるものよりもっときびしい条件になると考えた。そして平衡時の長さ l_0 から弯曲のため δl だけ伸びるとするとき、張力 T が次式で表わされた。(傾きによる効果は無視して)

$$T = T_0 \left(1 + \frac{1}{e} \frac{\delta l}{l_0}\right) \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここで e は第10図の記号を用いて $\Delta l/l_0$ で示される量で、繊維の荷重～長さ曲線上の (T_0, l_0) 点から微小

(第10図) Incremental Strain e の意義
 (T_0, l_0) から δl 伸びるときの張力の増加は
 $T_0(1/e)(\delta l/l_0)$ である

変化するときの伸びの割合である。これを Stuart は Incremental Strain と名付けた。

いま糸の共振波形が $A \cdot \sin \omega t$ であるとする、 $\delta l/l$ (l_0 の代わりに l を用いる) が実際に計算できるから高次項を無視して

$$T = T_0 \left[1 + \frac{1}{8e} \left(\frac{\pi A}{l} \right)^2 + \frac{1}{8e} \left(\frac{\pi A}{l} \right)^2 \cos 2\omega t \right] \quad \dots\dots\dots (22)$$

が得られる。これによって平均の張力増加と、振動張力の増加とが付加されることがわかる。これら2つの張力増加によって、理想条件での共振周波数 ω^0 ($= 2\pi f_0 = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{T}{\sigma}}$) が

$$\omega = \omega_0 \left[1 + \frac{3}{32} \frac{1}{e} \left(\frac{\pi A}{l} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (23)$$

のように変わる。この結果を実際の場合に適用するのに第11図の2つの場合に分けられる。

(第11図) パイブスコープにおける振動系の種類と模様

[I] (a) 図 の 系

分銅による張力は T_0 であるが、糸の設定されたはじめにおけるゲージ長内の張力 T'_0 は、ピンPでの摩擦のため(摩擦係数 μ) 次式で示される不確かさをもっている。

$$T_0 e^{-\mu\theta} \leq T'_0 \leq T_0 e^{\mu\theta} \quad (\text{後に展開形を用いる}) \quad \dots\dots\dots (24)$$

しかし励振の始めに振幅が大きくて、(22) 式で示される T が (24) 式の制限を越えるとき糸を P に抗して引き上げる作用が起る。その後小振幅に調節されて上の作用がなくなった状態での T'_0 は、明らかに (24) 式の左辺の値 $T_0 (1 - \mu\theta)$ を取る。この状態が一般的であるとする、(22) 式の T_0 の代わりに $T_0 (1 - \mu\theta)$ を代入し、したがって (23) 式が

$$\omega = \omega_0 \left[1 + \frac{3}{32} \frac{1}{e} \left(\frac{\pi A}{l} \right)^2 - \frac{1}{2} \mu\theta \right] \quad \dots\dots (25)$$

と書き改められる。

[II] (b) 図 の 系

この場合は (22) 式の第2項までの力が、分銅の平均の高さでその重力と釣り合う。そして第3項の振動張力は弾性糸のたて振動を誘起する。たて振動の固有振動数 ω_L は

$$\omega_L^2 = \frac{g}{el} \quad (g: \text{重力の加速度}) \quad \dots\dots\dots (26)$$

で示されるが、この振動が先の振動張力と結合するときよこ振動の共振は、結合係数 C を用いて次式で示される振動数となる。

$$\omega = \omega_0 \left\{ 1 + \frac{1}{32} \left(\frac{\pi A}{l} \right)^2 \left[\frac{1}{e} C \left(\frac{2\omega}{\omega_L} \right) \right] \right\} \\ C \left(\frac{2\omega}{\omega_L} \right) = \left(\frac{2\omega}{\omega_L} \right)^2 \left[\left(\frac{2\omega}{\omega_L} \right)^2 - 1 \right] \quad \dots\dots (27)$$

(第16表) 金属線における ω/ω_L , 結合係数, 共振周波数の変化

	タングステン	金	銅	ガラス
半 径 a (μ)	6.77	5.24	6.65	4.62
長 さ l (cm)	10.13	10.53	9.45	10.11
分 銅 M (mg)	36.6	25.6	50.9	51.0
共振周波数 f (c.p.s.)	56	58	106	268
密 度 ρ (g/cm ³)	18.8	19.26	8.89	2.6
ヤング率 E (ダイン/cm ² × 10 ¹¹)	35.5	7.85	11.1	7
ひ ず み e ($= 10^{-3} \cdot M/\pi E a^2$)	0.715×10^{-5}	3.78×10^{-5}	3.29×10^{-5}	11.02×10^{-5}
$\frac{2\omega}{\omega_L} = 40 \frac{M}{a^2} \sqrt{\frac{1}{\rho l E}}$	0.385	0.935	1.501	7.04
結合係数 $C = \frac{(2\omega/\omega_L)^2}{(2\omega/\omega_L)^2 - 1}$	-0.174	-6.88	+1.8	+1.02
振幅補正 $f_A - f = \frac{\pi^2}{32} \times 10^{-4} \frac{f_c}{l^2 e}$	-0.41	-3.0	+2.0	+0.76

(Stuart)

Stuart は前節に示した Stauff の金属線についてのデータを利用して(26), (27) 式の計算を行なった. (第16表) これに対して繊維の場合は, ふつう 0.1 g/tex 以上の張力を加え 20 cm 以下のゲージ長であれば, 結合係数 C は 1~1.01の間である. 特別な場合として $2\omega < \omega_L$ の度がひどくなると, 振動張力が系の振子の振動 (第12図) と結合することになるが, 実際はほとんど起らないと思われる.

(第12図) 弦の横振動と振子の振動の結合状態

〔四〕 振幅補正についての計算例
パイプロスコープにかける糸の真の線密度を σ_0 , 振幅ゼロで得られる共振振動数を ω_0 , また実際の有限振幅の測定で得られるものを σ , ω とすると

$$\sigma_0 = \sigma \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \dots\dots\dots (28)$$

が成立する. そこで振動系 a , b に応じて (25), (27) 式を用いるとつぎのような補正係数 k_i が決まる.

$$\sigma_0 = \sigma (1 + k_i) \dots\dots\dots (29)$$

系 I $k_1 = \frac{3}{16} \frac{\pi^2}{e} \left(\frac{A}{l} \right)^2 - \mu \theta$

系 II $k_2 = \frac{1}{16} \frac{\pi^2}{e} \left(\frac{A}{l} \right)^2 \cdot C \quad (C: \text{結合係数})$

ここで Stuart の行なった計算例を示す. 第13図はより数 11 t/cm の 50 tex ウーステッド ヤーンで得られた応力~長さ曲線である. より係数が同じであれば同種の糸について同じ応力~ひずみ曲線が得られるから, この

(第13図) より係数 200 (tex)^{1/2} t/in のウールヤーンについての応力-長さ, 応力-e 曲線

(第14図) 0.1~0.6 g/tex の応力を受けた 200 (tex)^{1/2} t/in ウールのパイプロスコープ測定における振幅に対する補正係数

図からそう入図を得ておけば, 200 (tex)^{1/2} t/in のウールヤーンはすべて応力 p だけで e が求まる. 図は $0.1 < p < 0.6$ g/tex に対して $0.0063 < e < 0.0125$ となる.

(29) 式の k_1 に $\mu = 0.3$ とし, A/l の値との関係を示したのが第14図 (a) で, $\theta = 5^\circ, 20^\circ$ の場合についてそれぞれ p の上記実験範囲の値に対する曲線が描かれている. また (b) 図は系 b についてのものである.

以上は Stuart の研究のすべてであるが, まとめてして大要次のことは実際の場合心得ておかねばならない.

1. 有限振幅での共振は, 一般に古典式で示されるより高い振動数になる. その変動は incremental strain e によって左右される.
2. 系 a の方式ではピンでの摩擦を考慮しなければならない. この効果は振動数を下げる方向に働く.
3. 系 b の方式では, 試料が金属線などであるときたて振動との結合を考えておかねばならない.
4. 繊維では $e \approx 1\%$ とみられ, 線密度に 1% の補正を与えねばならない振幅は, ゲージ長のほぼ 1% 以上とみてよい.
5. これに対し $e \approx 0.01\%$ 位である金属線では, ゲージ長の 0.1% ぐらいの振幅で上の補正が必要になる.

11. 糸のささえに弾性がある場合 ^{1, 31)}

糸のゲージ長を区切るための支持点は完全な剛体では

なく、一般にはその弾性のためわずかながらよこ変位を示すとみなければならない。第15図において支持物には張力 T の y 成分($T \cdot \partial y / \partial x$)によるよこ変位があり、このときの支持物の弾性係数を K とすると、(20)式に対する境界条件の1つは

$$x = 0; y = T \frac{\partial y}{\partial x} / K \quad \text{弾性支持点の効果}$$

で表現されねばならない。さらに実際に近付けて支持物の慣性(質量 M)も考えに入れると

$$x = 0; y = \left(T \frac{\partial y}{\partial x} - M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right) / K$$

が境界条件になる。

前者の場合ゲージ長の一端だけの効果は、規準振動のゲージ長 l が、 $l + T/K$ になったと同等になることであり、後者の場合は K/M と $(m\pi T/\sigma l)^2$ との大小関係により(m :整数)つぎのことがわかる。(第16図)

(第16図) 弾性支持点によるゲージ長の変化

弦の規準振動数 $\leq$ 支持物の固有振動数;

$$l \text{ が } \begin{cases} \text{長くなる効果} \\ \text{短く} \end{cases}$$

一例として Mackay, Downes²⁰⁾は、ピックアップを支持点として吊した分銅付き糸を静電的励振したが、20 μ 径のウールを2.5cmゲージでバイブroscopeしたとき、共振振動数2kcを得た。これによる線密度の値について、本節の誤差として0.3%だけ大きすぎると見積っている。これは支持点の影響がゲージを長くする方向に作用したことを意味しており、彼等がピックアップ

の固有振動数を、試料のものよりずっと高く設計したとことと理論どおりの照合をみせている。

上の例に対し Sproule⁴⁾はゲージ長が短くなった効果を見た。すなわち75mmのゲージ長に対し7mm短くなったことを実測した。この場合は張力変化方式で、振動子の共振を利用するような励振法をとっているから、たまたま振動子の固有振動数が、励振周波数よりわずかに少なかったものと思われる。

おわりに振動子で励振する場合で、それが音叉のような堅固なものであるときは、糸の運動方程式に対する境界条件が

$$x = 0; y = B \cdot \sin \omega t$$

の形で与えられる。この場合は支持点がやはり定常波の節になることに変わりなく、 $x = 0; y = 0$ という条件の場合と同じ振動数が得られる。この点は誤解を生じているおそれもあると思われる。

12. 織度測定の実用例

ヤーンをも含めて繊維の織度または断面積を知ろうとするときは、その目的、精度、所要時間、費用などの点を考えて方法が選択される。そして従来のいろいろの方法に対して、前節までに述べてきたバイブroscopeの構造、機能、精度および計算の補正などの知見によってこの測定法の特長およびそれがどのように利用されるべきかはおよそ判断できる。いまこれを短文で表現する。

“個々の試料繊維について、それが数cmの短かいものでも、続いて行なわれる試験にそなえて破損することなく、早く簡単にその上感度よく、その繊維の物性に直接には無関係なような測定によって織度が求まる。また別に密度が既知であるとき断面積も計算される。”

上に述べたバイブroscope法の特長は個々に利用されることもあるが、いまはこれを分類せずただ年代順に目に止まった応用例を紹介する。

Gonsalves は (a) フィラメントの長さに沿って、(b) マルチヤーン中のフィラメント個々、(c) ステープルファイバなどのバイブroscope測定を行なった。(第17表)そしてとくに(b)については、織度のむらが紡糸機のノズル孔のふさがり、またはそれからケーブル中の、外側と内側とのフィラメントにおける条件の差にもとづくのではないかと述べている。

Dart, Peterson も同様な実験を行なっている。(第18表)ヤーン中のフィラメントの織度分布を求め、それから紡糸工程中に働く諸条件を考えるのによく、またいろ

いろのノズルから紡糸されるとき原液の流動性を調べその機構、粘性などを研究することができると予想した。

(第17表) バイブロスコープによるレーヨンフィラメントの線密度測定

測定数	標準偏差%	
13	2.9	平均 3.7
18	4.5	

レーヨンヤーン中の個々のフィラメントの測定

ヤーン	測定数	平均繊度 (d)	標準偏差 (%)	
100D. 40F.	40	2.45	5.8	平均 7.0%
	40	2.48	8.3	
35D. 8F.	8	4.32	4.7	平均 4.9%
	8	4.12	4.8	
	8	4.17	5.8	
	8	4.12	4.3	
	8	4.15	4.2	
	8	4.21	6.0	
	8	4.19	5.1	
	8	4.16	5.5	
	8	4.19	4.2	
	8	4.21	4.4	

ステープルファイバの測定

試料	測定数	標準偏差 (%)	平均繊度
Dura flox	160	20	—
Flox	35	12.4	1.40
Vistra.	20	10.2	3.55
Phrix	80	18.8	1.57
Fibramin	50	24.8	3.08
Cuprama	50	22.9	1.70
Phrix	80	21.4	1.64
Glauchau	80	13.3	1.39
Courtaulds	80	13.3	1.53
Twentenka yarn K.S.W.	80	14.9	2.19
Courtaulds yarn	80	21.1	1.55
平均 17.5			

(Gonsalves)

(第18表) ヤーンにおける繊度の一様性

試料	Max (d)	Min (d)	平均 (d)	平均偏差	
				フィラメントから フィラメントへ	フィラメントにそつて
poor yarn	5.55	1.71	3.77	0.79	0.05
good yarn	4.25	3.84	4.08	0.08	0.04

プリンストンの T.R.I. におけるバイブロスコープ開発の成果は、直ちに同研究所における他の多くの研究に利用されたようである。繊維の力学的な性質を問題にするとき、必ずその試料の断面積と関連して述べられねばならない事情から、バイブロスコープがこの方面の研究に有力な技術を寄与したものと思われる。事実インストロンテストの出現とあいまって、ごく基本的な繊維引張試験にまでさか上って、新しい精密な考察が加えられた。

その一例が Evans, Montgomery¹²⁾ の研究である。U. S. medium wool top (58 s) からの試料で荷重〜伸び曲線を取り、フック則の成立する部分のこう配 (H) および 20% 伸びを与える荷重 (F₂₀) と、断面積とが両対数紙にグラフされた、(第17図) この実験によって繊維

(第17図) フック則のこう配 (H) および 20% 伸びを与える荷重 (F₂₀) の断面積 (A) に対する関係 (US 58 s ウール)

の力学的性質の変動の大部分が、断面積の違いによって反映されたものではないかという疑いが明らかになった。図の 45° の線は H/A, F₂₀/A が定数であることを示すもので、図 (a) にみられるばらつきの一部はクリンプにともなったものであると解釈された。

^{8,11)} まったく同様のことをスウェーデンの Lindberg も行な

っている。彼のパイプロスコープは張力変化方式に属するもので、インストロンのクロスヘッドにピックアップを取り付け、これに糸の下端を固着して荷重伸長曲線を描かせる。ピックアップに 1200 c.p.s. の定周波数信号を印加しておく、ある荷重で糸が共振を示して曲線に小さなふくらみを記録するから、これから線密度計算に必要なデータがすべて知れる。第 18 図に示す記録は同じ方法で Wakeham¹⁴⁾ が混綿、選別などの処理の影響を調べた報文から再録したものである。

(第 18 図)

インストロン テスタによる荷重伸び曲線(パイプロスコープ共振を示すふくらみがみえる)

(第 19 図) 平均の応力 (S) ~ 伸び ($\Delta l/l$) 曲線および破断点 (黒丸) の分布

Evans は先に述べたことに引き続いて、48本の繊維の内破断以前に少なくとも 36% 伸びを示した 26 本を選び、荷重伸長曲線に沿った各点での平均の応力を計算して第 19 図に示した。(白円の曲線) さらにこの図の上に各繊維の破断点 (試験前のパイプロスコープによる断面積を用いた) を書き入れると、36% 伸びを示したのもそれまでに破断したものも含めて、先の平均の応力曲線に非常によく沿っている。この結果によって破断の際の“くびれ”が案外少ないことが結論できるとした。もしそうとうのくびれが起っているとすると、図の測点の分布は多少右にずれたものになる。

上に述べたような T.R.I. の研究では多くのデータが IBM 計算機で処理されたほどである。こうした意味での例では Morton¹⁹⁾ の研究があり、18 種のステープルファイバのおのおのから 250 本ずつの繊維をとり、各種についてのパイプロスコープによる織度 (Stiffness 補正を行なった) 分布を求めている。こうした研究方法が取り上げられるのは、本節のはじめに述べたパイプロスコープの早く簡便に測定ができる特長によるものであるが、Gonsalves は測定に 2 min, Montgomery は取り付け時間を除いて熟練者では、1 min で測定が完了するといっている。

おわりにオーストラリアにおけるパイプロスコープ利用の研究例を示す。Burgmann²⁵⁾ は羊の飼料による、ウールの機械的性質への影響を調べるのに、ゲージ長の非常に短いパイプロスコープ法を用いた。すなわち 10 cm 前後のウールの長さに沿って、0.865 cm のゲージ長を 2.5 mm 間隔で段階的に移動してその断面積を求めた。(ρ = 1.31 g/cm³) この場合大きな変動はないと考えられるから張力変化方式がとられたことは当を得たことで、5000 c.p.s. の定周波数で励振し、糸の下端を直接 1000 mg のトーション バランスに取り付けて張力を変えた。これで共振したときの応力は常に 10⁵ g/cm² に保たれる。第 20 図は飼料の栄養度を変化させた 3 頭の羊から得ら

(第 20 図) ウールの長さ方向に 2.5 mm 間隔でパイプロスコープ測定して得た断面積 (A) の変化

- (a) 栄養度一定の Merino Sheep
- (b) 高栄養度から悪い方に変えた Corriedal Sheep
- (c) 低栄養度から高い方に変えた Merino Sheep

れたウールの断面変化である。

さらに上図中の一例のように、記号を付けた部分が後に引張試験 (Merino 61 曲線, Corriedal 47 曲線) された。15% 伸びを与える荷重を断面積に対してグラフにしたのが第 21 図である。Merino では原点を通る直線が引けるから、ウールの成長中の変動で生じた断面積変化

(第 21 図) 15% 伸びを与える荷重 (F_{15}) と断面積 (A) とのグラフ (水中)

に無関係に応力が一定であることがわかる。

さて以上に示した諸研究では、Morton のものを除いてすべて補正なしの、すなわち (2) 式による計算値を用いている。前節までにみてきたいろいろな影響はたがいにより打ち消し合い、総合的な意味での誤差は 2~3% までの解釈をとり、研究が大体において相対的な意味での測定値を重視するという立て前を例外なくとっている。

ここで改めて誤差の原因、線密度を (2) 式で計算することによってはいある誤差の方向、さらに実際のパイプロスコープで (周波数変化と張力変化の区別) 観測され

(第 19 表)
パイプロスコープにおける誤差の原因と方向

誤差の原因	誤差の方向		
	(3) 式に周波数変化による線密度	方 式における f	張力変化方 式における T
1 Stiffness	-	+	-
2 空気の制動	+	-	+
3 振幅	-	+	-
4 繊維の伸び	-	+	-
5 支持点の摩擦	+	-	+
6 支持点の弾性	+	-	-
7 繊維断面の不均一	不特定	σ と逆方向	σ と同方向

(注) (7) を除いてはだいたい重要さの順と考えてよい

る変数に効果を及ぼす方向などを第 19 表に総括する。表に示した原因の数はかなり多くその誤差の大きさも、一般に測定の方式、設計、取り扱いなどによって異なった現われ方をする。しかしその方向は理論的推定によって (6) 番までは確定したものであり、しかもいわゆる偶然誤差は 10^{-3} 程度の鋭感さであるから、一度測定法が定まれば同種類の試料の測定については、ほかの方法では得られない特長をもつことになる。ただし (7) はその誤差の不特定さが、いわゆる測定のばらつきに通じるから注意が必要である。

13. オート パイプロスコープ

パイプロスコープによる繊維度測定が所要時間少なく、非常に簡便でしかも鋭感であることは前節にも述べた。これについてつぎの Mackay の実験³⁰⁾をあげなければならない。彼は Watt (T. R. J., 29, 975, 1959) の示した 20μ 径ウールの 105°C 真空中での乾燥曲線に比較して、大気圧 105°C の乾燥空気中でのものを求めた。試料はメリノ ウールの単繊維で 100 cm/sec の気流中に置き、実験開始後 $21^{\circ}\sim 101^{\circ}\text{C}$ 昇温に $0.5, 3\text{ min}$ 後には 105°C に達している。このときの乾燥曲線が第 22 図 D で、乾

(第 22 図) 乾燥曲線

A : 23μ のウールを網目にして 100°C , 1% RH に対するリゲン 20.5% から乾燥を始める (Robert, Haly)
B : “, リゲン 54% から乾燥 (“ “)
C : 20μ のウール, 100°C 真空中で水分飽和から開始 (Watt)
D : 29μ ウール, パイプロスコープで測定, 21°C , 45.6% RH から 105°C , 0% RH において排湿

燥終段での様子がはっきりでている。A, B 曲線は繊維のグリッドを作って行なった Robert, Haly (T. R. J., 24, 261, 1954) の測定で, C は先の Watt のものである。

さて Mackay のこの測定における感度はリゲーンにして 0.02% であって, その変化がみられなくなった平衡状態をゼロ リゲーンと解釈すると, この測定の限りにおいて 20 min で絶乾が得られたと報告している。Watt のような繊維集団でなく純粋な単繊維の状態で, 上記のような測定が行なえるのはバイブロスコープ法以外にないと思われる。しかも彼の曲線にみられる短時間内の多くの測定は, 本節に述べようとするオート バイブロスコープの形式でなくてはもはや不可能である。

オート バイブロスコープは, これまでに述べてきたような外部からの強制振動によるのではなく, 糸に自励

的な発振をうながす方式である。その発振の周波数がそのまゝいまままでに求めようとしたものであるから, 観測者が介入するところは振動数の読み取りだけとなり, 鏡検などによる個人誤差を排除する効果は非常に大きいと思われる。さらに上の発振はほとんど瞬時的であるから, 糸の質量が変わるような場合周波数の変動を追っての読み取りだけで, 質量の変化が簡単に時間の関数として求まる。こうした即応の度合は, フィラメントの連続繊維度^{15, 22)}むら試験機として専用できるものまで研究されたほどであるが, 本稿では省略する。

以上のようなオート バイブロスコープの必要は当然早くから注目されていたが, その完全なものが研究発表されたのは知る限りではオーストラリアの C.S.I.R.O.^{20, 27)}のものだけである。

(引用文献は前号所載)