HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	硬質塩化ビニール管の低温における捩り試験結果について
Author(s)	大浦, 浩文
Citation	低温科學. 物理篇, 14, 135-148
Issue Date	1955-12-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17903
Type	departmental bulletin paper
File Information	14_p135-148.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Hirobumi ÔURA 1955 Torsional Test on a Pipe of Hard Polyvirylchloride at Low Temperature. *Low Temperature, Science, Ser. A. 14.*
(With English résumé p. 147)

硬質鹽化ビニール管の低温における捩り試験結果について*

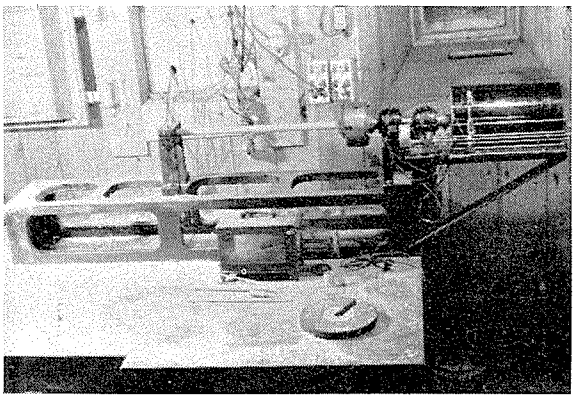
大浦浩文
(低温科学研究所　応用物理学部門)
(昭和30年10月 受理)

I. まえおき

近頃は高分子物質があらゆる分野で利用され，その進出はめざましいものがある。これ等の物質はその組成によつて機械的な性質もさまざまであるが，低温に於ける性質の研究されたものは少ない。ここでは3/4インチの硬質塩化ビニール管（積水化学工業株式会社製のエスロンパイプ）を＋18°C，0°C，−20°C附近の温度で捩つたときの結果について報告する。

II. 測定装置

捩りを与える装置としては第1図に示すようなものを作つて用いた。これによつて1 m，50 cm，15 cmの長さのパイプについて捩り試験をすることができる。写真にみえるようにパイプの左端は台に固定され，右端は3本チャックで摑まれていて，チャックを回転させてパイプを捩るようになつている。チャックとその右側に見えるドラムとは一続きになつていて，2つのボールベアリングで台に取りつけてある。チャックに回転力を与えるために，ドラムの左の端面を作つている厚い真鍮円板の円周にワイヤーを巻きつけ，その先に錘りを吊した。チャック，したがつてドラムの回転を自記するために，ドラムの回転軸に平行に一定速度で鉛筆を移動させた。これによりドラムに巻きつけた自記紙上にパイプの捩りの角度の時間的変化が記録される。若し回転が無ければ，鉛筆は自記



第 1 圖

* 北海道大学低温科学研究所業績　第305号

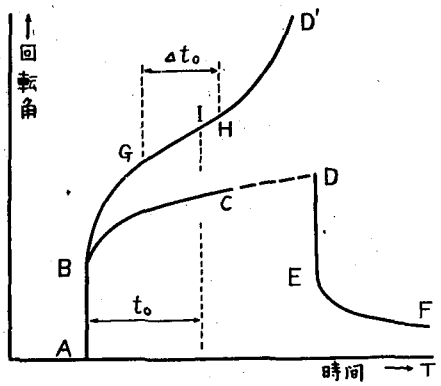
紙上にドラムの回転軸に平行な一直線を描くにすぎないが，その後ドラムがθだけ回転すれば，ドラムの半径をr(約10 cm)として$r\theta$の距離だけ前の直線から離れた点を記録する。したがつて記録紙をはがしたときには，横軸には経過時間をとり，縦軸には$r\theta$を取つた1つの曲線が得られる。鉛筆の移動速度は1分間に5 mmか，或いは1時間に10 mmかで，必要に応じて何れにでも直ちに切り換えられるようになつている。鉛筆は同期電動機によつて回転するネジを切つた長い棒で送られるようになつている。鉛筆がドラムの端に近ずくと鉛筆自身の動きによつて切換スイッチのレバーが押され，電気回路が切換り，電動機は今までと逆に回転をはじめ鉛筆はドラムの他の端に向つて動き出す。こうしてドラムの長さ30 cmの間を，鉛筆は同じ速さで往復運動する。

パイプを摑むには次のようにした。先ずパイプの内径にあわせて，丁度パイプの中に入るような外径を持つた金属の丸棒を入れ，外からは長さ約4 cmの真鍮パイプ(但し軸に平行に約2 mmの幅の切れ目があり，パイプの内面には軸に平行なたくさんの溝が切つてある)をかぶせて，その上からチャックで摑んだ。低温で大きなモーメントを掛けたときには，それでもすべるので真鍮パイプ，ビニールパイプ，中の丸棒をつらぬいてピンをさした。それでも尚真鍮パイプとチャックの間がすべるので外にかぶせる真鍮の外形を三角形にした(第8図参照)。ピンをさすのは具合が悪いので試料 No. 5 からはビニールパイプの中に太目の金属棒を突込み，ビニールパイプがふくらんで，外側から摑んでいる真鍮の内面に刻んだ溝に食い込む様にし，こうして内外からしつかり押えたものをチャックで摑んだ。

III. 測 定 結 果

実験の多くは，一つの測定の間に錘りの重さを変えずに，したがつて回転力を一定にしてパイプを捩り，捩れの角度と，経過時間との関係を調べた。

錘りを掛けて，回転力を与えるとパイプは第2図のように捩じられる。錘りを掛けた瞬間に，$\overline{AB}$だけ捩じれ，あとはBC曲線にみられるように時間とともにゆつくりと変形する。BC曲線のB点における切線はABに一致するため，錘りの重さが大きく，BC曲線の曲率が小さいときにはB点の位置を正確に定めることがむずかしい。又錘りを外した瞬間には$\overline{DE}$だけねじれがもどり，あとはEF曲線のようにゆつくりもとにもどつてゆく。E点の決定がむずかしいことはB点と同様である。BCDであらわされる変形が行われる間に塑性変形があれば，EF曲線の漸近線は必ずしもAT軸に一致せず，F点とAT線との距離によつて残留歪の大きさがわかる。

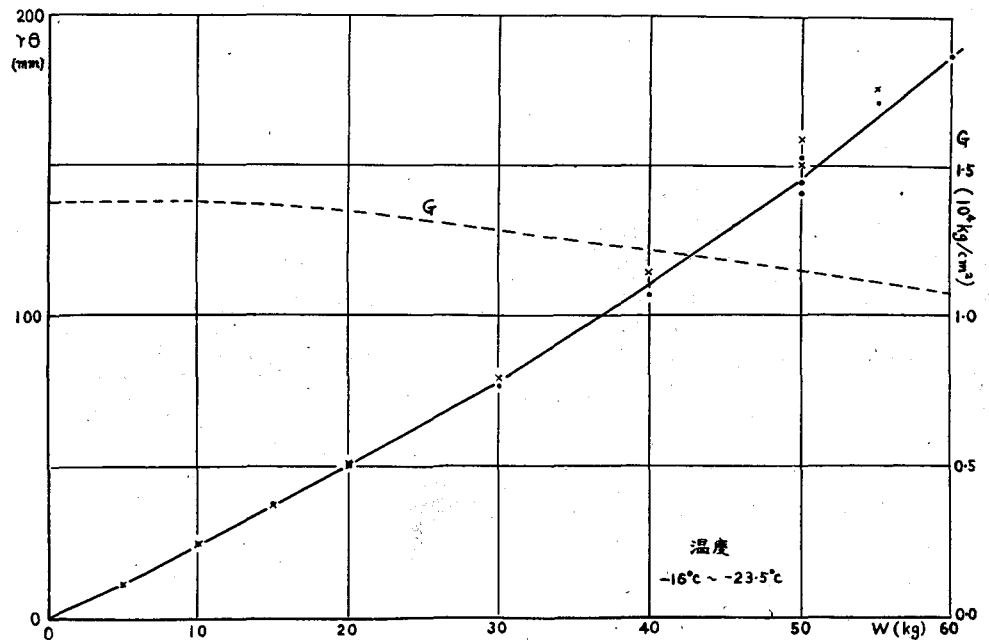


第 2 圖　歪一時間曲線の模式図

錘りが非常に重いときには歪曲線はBGIHD′の形となる。この場合にも$\overline{AB}$は主として弾性歪によるものであるが，遅延時間のかなり短い弾性余効のえいきようがあるため，錘りを掛ける速さに気をつけないと正しい弾性係数を得ることができない。すなわち，錘りを掛けるのに手間どると，弾性余効の部分が$\overline{AB}$に加わるため，見かけの$\overline{AB}$が長くなり，したがつて見かけの弾性係数は小さくなる。I点はBID′曲線の変曲点で，この点附近でクリープ速度は極小になる。第2図にΔt_0であらわしたクリープ速度が極小値をとる範囲は，回転力が比較的小さい場合にはかなり長い。こうしてBID′曲線はB点からクリープ速度が減少して速度が極小に達する迄の段階$\overset{\frown}{BG}$と，速度が極小で且つ一定である段階$\overline{GH}$と，破壊が始まつて速度が再び大きくなり，加速度的に増加する段階$\overset{\frown}{HD'}$との3段階に分けることができる。I点を過ぎH点に近ずく頃，試料の形に明らかな変化があらわれはじめる。すなわち，への字形になるとか，螺旋状に凹みができるとかいう異状の初期の状態があらわれはじめる。

a) 弾　性　歪

回転力の大きさと第2図の$\overline{AB}$，及びそれにほぼ等しい値の$\overline{DE}$との関係を，−20℃附近で行つた測定についての一例を第3図に示す。黒丸印が$\overline{AB}$，×印が$\overline{DE}$である。横軸には回転力を与えるために掛けた錘の重さWkgをとり，縦軸には(回転角θ)×(ドラムの半径r)すな



第3圖　掛けた錘りWkgと弾性的回転$r\theta$mmとの関係(実線)及びWと剛性率Gとの関係(点線)。試料No. 4, 温度 −16～−23.5℃

パイプに対する回転モーメントは$9.7\times W$ kg·cm
パイプの材質に対する剪断応力は$6{,}3\times W$ kg/cm²に当る
$r\theta$の100.8 mmが回転角θの1 radに当る
又$r\theta$の53 mmが材質の剪断歪0.01 radに当る

わちドラムの上に記録された $\overline{AB}$, $\overline{DE}$ の実さいの長さをそのままとつてある。第3図からわかるように W の小さな範囲では，W と $\overline{AB}$, $\overline{DE}$ とは比例して測定点は原点を通る一直線上に乗るが，W の値が大きくなるとこの直線の延長上からはずれ，回転角の大きい方にずれてくる。すなわち，大きな応力に対しては弾性係数が小さくなつていることがわかる。

以上は，ある値の W による測定と，他の値の W による測定とを独立に行つて得た結果であるが，次に同一の試料に錘りを5kgずつ，次々に追加しつつ回転角の変化の様子をしらべてみた。錘りを乗せるたびに時間——歪曲線には第2図の ABC に相当する曲線がつけ加わつた。そして，BC 曲線が充分落着いて，クリープ速度がほぼ一定になつて来たところで次の錘りをかけた。それで，錘りは15秒乃至2分の間隔で追加することになつた。結局ひとつの ABC 曲線の終点 C に次の錘りによる ABC 曲線が連続するという階段状の曲線が得られたわけである。

今，これまでかかつていた錘りの重さを W とし，次に追加した5kgに対する回転 $\Delta\overline{AB}$ と W との関係をしらべると，W の大きい場合ほど $\Delta\overline{AB}$ がわずかばかり大きくなることがわかつた。これは第3図の曲線の微分を実験的に行つた事に相当し，W が大きい程，微分値の大きい事，曲線の傾斜が急になつてくることを証明したことになる。$\Delta\overline{AB}$ の増加が W に対して直線的で $\Delta\overline{AB}/5=a+2bW$ で表わされるとすれば，第3図の曲線は2次曲線となり，$aW+bW^2$ であらわされることになる。実際に試料 No. 5 について行つた結果 $\Delta\overline{AB}/5 = 2.3+0.0072W$ となつた。但し，$\Delta\overline{AB}$ の単位は mm，W の単位は kg である。したがつて一度に W kg を掛けたときの AB の長さは $\overline{AB} = 2.3W+0.0036W^2$ となるはずで，此の式に $W=40$ を入れて計算した値は，実際に一度に 40 kg をかけて測定された $\overline{AB}$ の値とは，測定誤差の範囲内で一致した。更に錘りを 40 kg から 5 kg ずつ増して 60 kg まで実験したが，その結果も計算値とよく一致した。

パイプの外径を $2a$，内径を $2b$，長さを l とし，錘りを掛けた瞬間に現われる回転角の増加 $\overline{AB}$，あるいは錘りを外した瞬間に現われる回転角の減少 $\overline{DE}$ を radian で表わしたものを θ とすれば，材質の剛性率 G と，錘りによる外からのモーメント M との間には

$$M = G\frac{\theta}{l}\cdot\frac{\pi}{2}(a^4-b^4)$$

の式がなりたつ。錘りを吊すワイヤーを巻きつけた円板の半径を R とすれば，$M=R\cdot W$ なので，剛性率は

$$G = \frac{2l\cdot W\cdot R}{\pi\theta(a^4-b^4)}$$

であらわされる。更に，パイプの肉厚を d，肉厚の中心までの半径を c とすると上式は

$$G = \frac{l\cdot W\cdot R}{2\pi\theta c^3 d\left(1+\frac{1}{4}\frac{d^2}{c^2}\right)}$$

と変形される。第3図に点線で示してある G の値はこの式によつて計算して求めたものである。試料に対する剪断応力 τ kg/cm² は管の外側に近い部分と，内側に近い部分とでは異なるが，その平均は

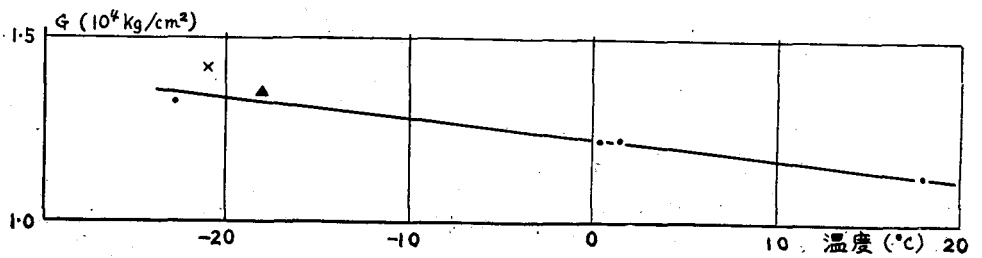
$$\tau = G\frac{\theta}{l}\frac{(a+b)}{2} = \frac{W\cdot R}{2\pi}\cdot\frac{1}{c^2 d\left(1+\frac{1}{4}\frac{d^2}{c^2}\right)}$$

であらわされる。

パイプの肉厚，外径等は試料によつて異なるが，試料 No. 4 では $c=0.950$ cm, $d=0.266$ cm で，R は 9.74 cm であつたから，W kg の錘りは試料に対して $6.34\times W$ kg/cm² の剪断力を与える事になる。パイプの長さを 50 cm にとつたので回転の記録 $r\theta$ の 53 mm が材質の 0.01 radian の剪断歪に相当する。

b) 剛性率 G と温度との關係

G の値が温度によつてどの程度変化するかを調べるために，各温度で行われた測定から得られた G の値をその温度に対して示したものが第4図である。但し，上に述べたように G の値は W の値で変るので，W が 20 kg 程度或いはそれ以下の場合，τ が 120 kg/cm² 程度或いはそれ以下の場合における G の値のみについて較べた。第4図からわかるように，温度が下ると G の値がかなり大きくなる。



第 4 圖　剛性率 G と温度との関係 (剪断応力が 120 kg/cm² 程度或はそれ以下の場合)

図の×印と▲印とは同一試料についてのものであるが，×印はこの試料を1年間 −15°C 乃至 −25°C の低温室に保存しておいた後に測定して得た値であり，▲印は他の試料と同様に低温室に入れてから数日乃至 20 日程度しか日の経つていないものについて得られた値である。

G と温度との関係が，図に示した直線で示されるとすれば，温度を t°C として，G は

$$G = (1.23 - 0.0055\,t)\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$$

であらわされる。

c) クリーピング

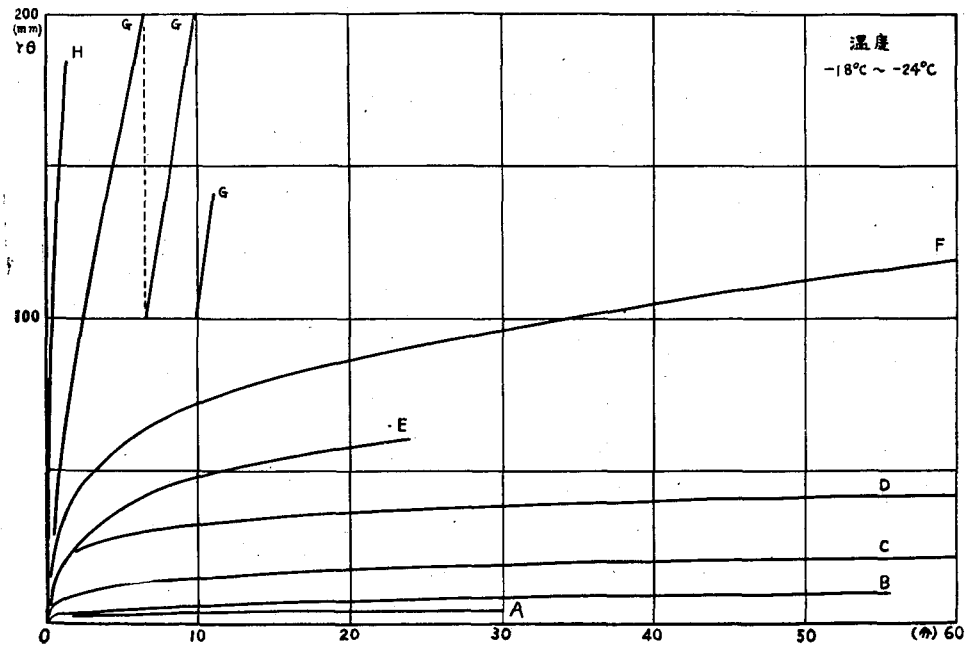
第2図の曲線から AB 部を取り去り，BC に相当する部分だけを，いろいろな W の値に対して示したものが第5図である。又 EF に相当する部分について $r\theta$ の小さくなる方向を＋に取つて示したものが第6図である。両図は試料 No. 5 について，−20°C 附近の温度で得られたも

のである。

これに対し，第7図にはBC曲線に対する温度のえいきようをみるために，ほとんど等しい W (No. 1の試料についてのみ $W=45$ kg，他のものはすべて $W=50$ kg) に対するBC部分をちがつた温度について，示してある。まえに述べたように，弾性も温度によつて変るが，それにくらべてこのクリーピングに対する温度の影響は著しく大きい。尚第7図に点線で示した曲線は，前に実線で示したようなクリープをさせ錘りを外して充分落着かせた後に，再び錘りを掛けて得られた曲線である。かなりの疲労がみられる。

温度が一定で，W が小さい場合，ABC曲線或いはDEF曲線は，遅延時間 λ のいろいろなフォークトモデル (スプリングのみで，ダッシポットの無い $\lambda=0$ のものから，ダッシポットのみで，スプリングの無い $\lambda=\infty$ のもの迄) を直列に継いだ模型によつて説明することができるであろう。しかし，各フォークトモデルの常数を変化させずに，W の大きな場合まで包含させることはできない。このような模型による説明は今後の研究にゆずることにして，いまはただ測定事実を示すにとどめる。

第1表には錘り W kgにより回転モーメント $R\cdot W$ kg·cmをパイプに与えたとき，すなわ

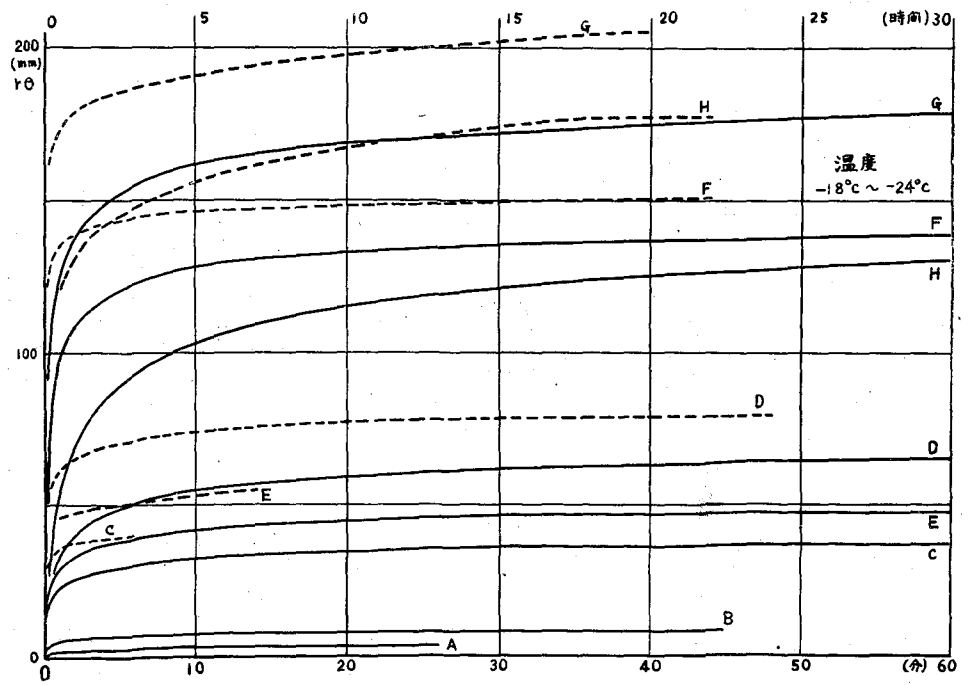


第5圖 錘りを掛けたときの回転—時間曲線 (弾性部分を除く)。試料 No. 5
(1年間 −20°C附近の温度にて保存されたもの) 温度 −18～−24°C

A: $W=30$ kg (この前に $W=10$ kg, 20 kg の実験あり)
B: $W=40$ kg (A の実験に引続き行う)　　C: $W=50$ kg (B の実験に引続き行う)
D: $W=60$ kg (C の実験に引続き行う)　　E: $W=50$ kg (H の実験に引続き行う)
F: $W=70$ kg (D の実験後 $W=70$ kg を掛け直ぐに降した，それに引続いて行う)
G: $W=75$ kg (F の実験に引続き行う)　　H: $W=75$ kg (G の実験に引続き行う)

ち，τ kg/cm^2 の剪断応力をパイプの材質に加えたとき，パイプの変形が第2図における変曲点Iの位置に達するまでの時間 t_0 分と，I点における変形量 ε_0 とを示してある。記録ドラム上の移動 $r\theta$ mm そのものであらわした $\varepsilon_0(r\theta)$ mm，材質の平均の剪断歪を辷り角 γ rad であらわした $\varepsilon_0(\gamma)$ rad を並記した。回転角 θ であらわした $\varepsilon_0(\theta)$ rad は $\varepsilon_0(r\theta)/100.8$ であらわされる。又，クリープ速度としては極小値であるところの，I点附近のクリープ速度 $\dot{\varepsilon}_0$ をも $\dot{\varepsilon}_0(r\theta)$ mm/min，$\dot{\varepsilon}(\gamma)$ rad/min であらわした。上と同様に $\dot{\varepsilon}(\theta)$ rad/min は $\dot{\varepsilon}_0(r\theta)/100.8$ であらわされる。Δt_0 は，そのクリープ速度極小の範囲の継続時間である。その右の欄には，その測定における最終の歪 ε_f 及びその歪に達するまでの時間 t_f を示してある。I点のみとめられない場合には測定の最終点のクリープ速度並びにその範囲を示した。それは，この場合には，最終点がクリープ速度の最小を示すからである。測定時間を延せばそのままの速度で変曲点に達する場合もあるが，更に速度が小さくなる場合も含まれる。

この表を見ると，各温度において，W が大きくなる程クリープ速度が大きくなることがわかる。試料 No. 6 乃至 No. 9 について，−22℃ 乃至 −25℃ の温度で行われた実験結果についてみると，応力が大きくなるほど変曲点に達するまでの時間 t_0 が短くなること，変曲点におけるクリープ速度が速くなること，クリープ速度が一定である時間の範囲 Δt_0 が短くなることが明瞭にわかる。



第 6 圖　錘りをはずしたときの回転—時間曲線（彈性部分を除く），実線は時間軸に（分）をとり，点線は時間軸に（時間）（目盛は図の上部にある）をとつたものである。

A, B, 等の曲線の附号は第5図に同じ。

第 1 表

試料番号	W kg	τ kg/cm²	変曲点 t_0 min	変曲点 $\varepsilon_0(r\theta)$ mm	変曲点 $\varepsilon_0(r)$ rad	最小クリープ速度 $\dot{\varepsilon}_0(r\theta)$ mm/min	最小クリープ速度 $\dot{\varepsilon}_0(r)$ rad/min	Δt_0 min	最終点 t_f min	最終点 $\varepsilon_f(r\theta)$ mm	最終点 $\varepsilon_f(r)$ rad	温度 ℃	
					$\times 10^{-2}$		$\times 10^{-4}$				$\times 10^{-2}$		
No. 1	25.4	161				0.042	0.078	30	50	83	1.57	18	
	35.4	224				0.166	0.314	42	62	125	2.37	19	
	40.4	256				0.25	0.47	58	94	180	3.41	15	
	45.4	287	8	246	4.66	5.05	9.57	4	22	514	9.73	17	◎破損第9図参照
No. 2	40.4	266				0.050	0.095	100	133	153	2.89	1.8	註1.
	45.4	299				0.083	0.157	16	76	188	3.55	1.5	
	50.4	332	50	279	5.28	0.92	1.74	28	90	318	6.02	1.5	
	50.4	332	20	339	6.41	3.55	6.71	15	51	486	9.19	0.8	◎への字に曲る
No. 3	50.4	320	10.5×60	387	7.17	0.189	0.357	3×60	21×60	567	10.7	0.5	◎わずかに曲る
	20.4	129				0.0019	0.0036	7×60	18×60	74	1.40	1.0	註2.
	30.4	193				0.0157	0.0296	8×60	12×60	118	2.23	1.0	
No. 4	50	317				0.080	0.151	30	89	177	3.34	−20	註3.
	55	349				0.0617	0.117	11×60	17×60	292	5.51	−18	
	30	190				0.067	0.127	30	55	90	1.70	−22	註4.
	40	254				0.085	0.161	25	74	136	2.57	−20	
	60	380	錘りの紐が切れたショックで破断									−19.5	第10図，第11図参照
No. 5	60	364				0.0817	0.155	3×60	9×60	260	4.92	−18	註5.
No. 5*	50	309				0.0083	0.0157	12×60	17×60	163	3.08	−18	註6.
	60	371				0.024	0.045	9×60	16.5×60	234	4.42	−23	
	70	433				0.050	0.095	30	140	370	7.00	−21	◎註7.
	75	464	4.2	426	8.04	23.2	43.5	3.1	11.7	646	12.1	−19.5	◎への字に曲る

	75	464				95	180	0.8	1.8	450	8.51	−20	◎への字に曲る第8図参照
	50	309				0.67	1.27	7	24	190	3.59	−24	
No. 6	74	476	8.4	371	22.9	21.9	136	5	13.8	519	32.1	−25	◎第9図型破損
No. 7	74	467	5.3	255	15.8	18.4	114	3.6	9.8	371	23.0	−23.5	◎わずかに認められる程度の破損
No. 8	69	444	20.1	292	18.1	5.6	34.5	9.5	22.7	308	19.1	−22.2	◎ 〃
No. 9	65	424	4×60	272	16.9	0.4	2.5	1×60	6×60	343	21.3	−23	◎ 〃
	65	424	21.5	242	15.0	2.95	18.3	7.6	24.6	251	15.6	−23.7	◎しわがパイプの全長に亘る

試料　No. 1 乃至 No. 5　　灰色のエスロンパイプ　　長さ　50 cm

No. 6 乃至 No. 9　　乳白色　　〃　　長さ　15 cm

No. 5* は No. 5 を 1 年間室温 −15°C 乃至 −25°C の低温室に保存してあつたもの。

No. 6 は常温から低温室に入れてすぐ実験したもの。最初の 2～3 分錘りが台にひつかかつていた。

他の試料はすべて実験以前に実験温度近くの温度に少くとも 12 時間以上放置してあつた。

表には，実験の順序に従つて並べてある。

註 1.　この実験以前に，$W=5.4$，10.4，15.4，20.4，25.4，30.4，35.4 による実験あり。

2.　この実験と上の行の実験との間に $W=5.4$，10.4，15.4 による実験あり。

3.　この実験以前に $W=50$ による実験あり。

4.　この実験と上の行の実験との間に $W=5$，10，15，20 による実験あり。

5.　この実験以前に，W を 5 kg ずつ追加して $W=55$ 迄，50 迄，45 迄各 1 回づつの弾性実験あり。

6.　この実験以前に，$W=10$，20，30，40 による実験あり。

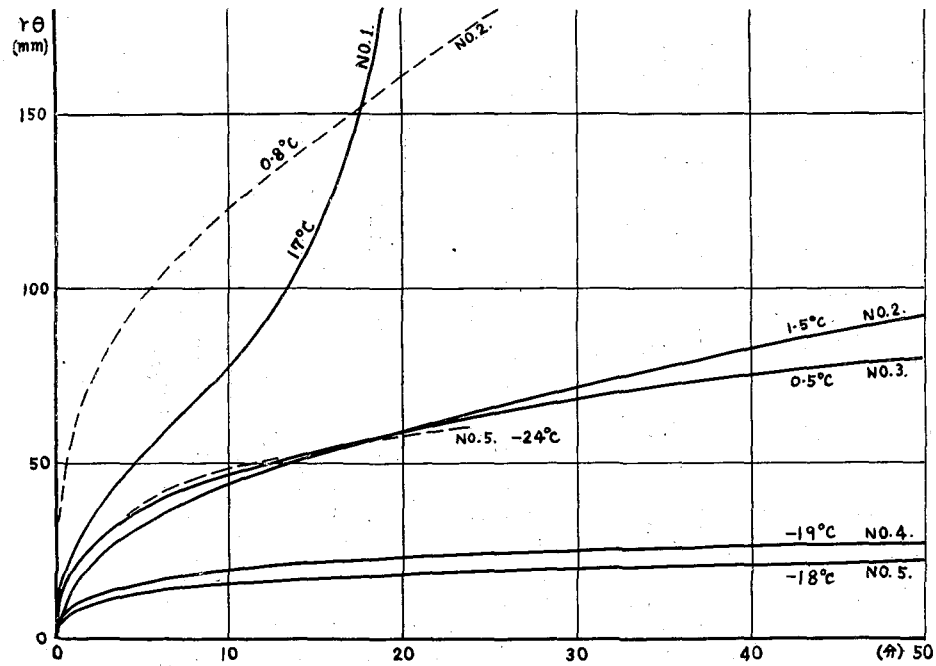
7.　この実験と上の行の実験との間に $W=70$ による弾性実験あり。

◎　錘りが床に着いたため実験を中止したもの。

前に剛性率について述べたとき，同一試料 No. 5 を 1 年間 −20°C 附近の温度に入れておいたところ，その前後で剛性率に変化があり，後の方がわずかではあるが増加していることをグラフによつて示した。ここではクリープ速度についても，1 年間低温にあつたえいきようが現われていることを示す。すなわち，$W=60$ kg の実験について云えば，前には $t=9\times60$ 分におけるクリープ速度が 0.155×10^{-4} rad/min であつたものが，後では 0.045×10^{-4} rad/min で約 1/3 になつている。又，後の値は，試料 No. 4 について $W=55$ kg の場合のクリープ速度（やはり $t=9\times60$ 分における値）0.117×10^{-4} rad/min の約 1/2 である。実験が行われた温度が，低温室に長期保存されたものについては −23°C であつたのに，他のものについては −18°C であつた事も，クリープ速度が小さくなつた原因であるかも知れない。

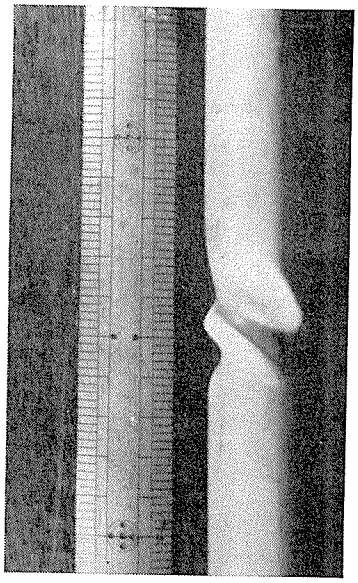
$W=50$ kg を掛けた場合について云えば，試料 No. 4 は −20°C で実験され，試料 No. 5 は −18°C で実験されているが，No. 4 の 90 分後のクリープ速度は 0.151×10^{-4} rad/min であるのに No. 5 では 0.115×10^{-4} rad/min（表には出ていない）で No. 4 の場合の約 3/4 である。

以上のことから，低温室に 1 年間保存されたえいきようがたしかにあり，クリープ速度を

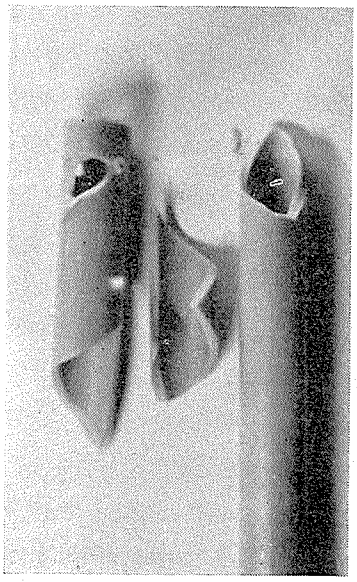


第 7 圖　錘りを掛けたときの回転—時間曲線

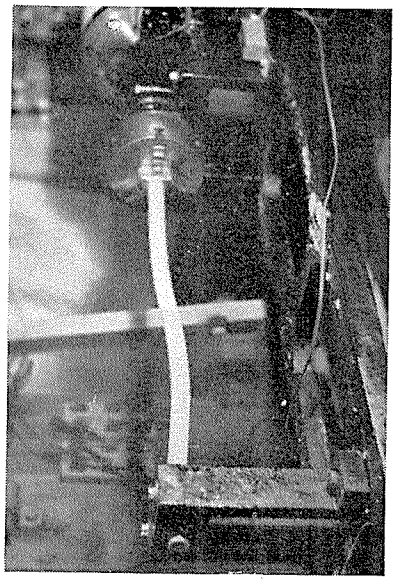
試料 No. 1：	$W=45.4$ kg	温度 +17°C
〃 No. 2：	$W=50.4$ kg	+1.5°C
〃 No. 2（点線）：	$W=50.4$ kg（上の実験に引続いて行つたもの）	+0.8°C
〃 No. 3：	$W=50.4$ kg	+0.5°C
〃 No. 4：	$W=50$ kg	−19°C
〃 No. 5：	$W=50$ kg（第 5 図 C 曲線に相当）	−18°C
〃 No. 5（点線）：	$W=50$ kg（第 5 図 E 曲線に相当）（$W=75$ kg による変形の後で行つたもの）	−24°C



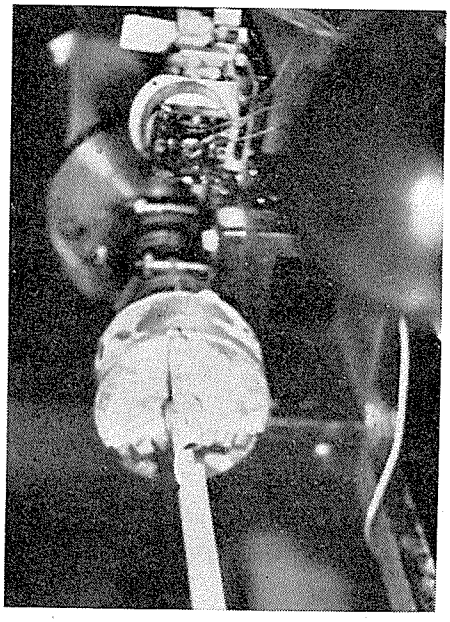
第 9 圖



第 11 圖



第 8 圖



第 10 圖

遅くしていると考えられる。

d) 破　　損

第1表から，捩りモーメントを加えてから20分程度で破損を起す場合，温度が＋17°Cでは約290 kg/cm² の剪断応力で足りるのに，0°C近くでは320 kg/cm² の剪断応力では未だ足りず，−20°Cになると440 kg/cm² 程度の剪断応力が必要であるというように，破損に対しては温度のえいきようが非常に大きいということがわかる。

破損の状況は−20°Cの低温においても，＋17°Cの常温に於ても塑性変形をするのが普通で，第8図，第9図に示してあるような変形がみられ，最終の剪断歪の平均値が0.2～0.3 radになつても，ひび割れ等は生じなかつた。

変形破損には第9図のように管の一局部が降伏する場合もあるが，又このしわが管の全長に亘つて一様に分布することもある。これ等の場合しわの山の部分の軌跡は，軸に平行な直線に対して約35～60°の角をもつていた。はじめに管の表面に，軸に平行な直線を引いておくと，その直線は捩れとともに変形するが，その変形した直線に対して考えると，山の軌跡は15～35°傾いていることになるようであつた。

第10図，第11図は試料No. 4に錘りをかけたとたんにワイヤーが切れ，チャックやドラムがパイプの弾性力によりもとに戻つたとき，パイプにひびが入つて割れた有様を示す。このひび割れは，パイプをチャックで摑むためにかぶせた真鍮のパイプと，ビニールパイプがずれないように差込んだピンの穴を通つていることから，この点からひび割れが発生したものと考えられる。このひび割れの方向は，軸の方向に対して，平均50°で，最小40°，最大60°であつた。金属の薄肉の中空円筒を捩つて試験した場合にできるひび割れの45°にほぼ近い値を示している。

IV. パイプは，その中の水の凍結で割れるか

この問題に対しては，パイプ中の水の凍結の仕方でかなり変つてくると思う。長いパイプの両端からパイプの軸の方向に凍結が進行するとすれば，両端は塞がれ，パイプの中央部に水が残ることになる。この水が最後に氷になるときの体積の膨張による圧力は，パイプの一部である中央部にかかることになるので，この場合はパイプが果して耐え得るかどうかということは疑問になる。しかし，パイプの壁からパイプの中心にむかつて凍るときは，パイプの水は自由にパイプの両端を破つて逃げてしまうので割れることはない。ただ，パイプの両端が閉されていて水が逃げられない場合には，水が氷になつたための体積膨張による圧力は，パイプの全長にかかり，パイプの断面積は平均1.09倍に増えればよいことになる。すなわち，パイプの円周が1.05倍に延びればよい。この円周の伸びによる歪は伸張歪であるが，いまこのパイプの材質には歪による体積変化は無いものとして，剪断歪に換算すると0.1 radの歪になる。すなわち，剪断歪が0.1 radになつても，破壊が起らない材質のパイプならば，水の凍結のために破

損しないわけである。ところで，以上の捩りの実験では，−20°C になつても，剪断歪が 0.2 rad 程度では目立つた破損は生じていないし，歪が 0.3 rad でも破断することは全然なかつた。材質が脆くなると思われる低温でも尚破断しないのであるから，0°C 附近ではなお安全であろう。したがつて水の凍結に際してパイプは膨張はするが，破断はしないということが云える。

V. あとがき

硬質塩化ビニール管を +20°C，0°C，−20°C 附近で捩つたところ，特別の衝撃を与えないかぎり破断することなく，ただ塑性変形するだけであつた。

弾性部分から剛性率 G を求めたら，温度 t が $-20°C < t < 20°C$ の範囲で，剪断応力が 120 kg/cm² 程度或いはそれ以下の場合

$$G = (1.23 - 0.0055\,t) \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$$

となつた。大きな剪断応力に対しては，この値は小さくなる。

同一の応力に対するクリープ速度は，低温ではかなり小さくなる（第 7 図参照）。

同一温度で応力を増やしてゆくと，歪—時間曲線の変曲点に達する時間 t_0 が短くなり，極小クリープ速度 $\dot{\varepsilon}_0$ は大きくなり，その範囲 Δt_0 は短くなる。すなわち −23°C 附近で剪断応力 424 kg/cm² では $t_0 = 4 \times 60$ min，$\dot{\varepsilon}_0 = 2.5 \times 10^{-4}$ rad/min，$\Delta t_0 = 60$ min であるのに，剪断応力 467 kg/cm² では $t_0 = 5.3$ min，$\dot{\varepsilon}_0 = 114 \times 10^{-4}$ rad/min，$\Delta t_0 = 3{\cdot}6$ min であつた。

応力を掛けてから 20 分程度で変形破損を示す剪断応力は +17°C 附近では 290 kg/cm² であるのに，−22°C 附近では 440 kg/cm² 程度が必要であつた。

この稿を終るに当つて，この実験についていろいろ御指導下さつた吉田順五教授に厚く感謝する。又，実験に多くの御援助をいただいた当研究所の村井五郎氏にお礼を申し上げる。

Résumé

Pipes made of hard polyvinylchloride were put to the torsional test in the neighbourhood of each of three temperatures 20°C, 0°C, −20°C, the tests at the last two temperatures having been perfomed in the cold room attached to the Institute. A metal disc was attached firmly to one end of the pipe of which the other end was cramped, and a string with a heavy weight hanging at its one end was wound along the periphery of the disc. In this way a torsional moment of force which was equal in magnitude to the product (radius of the disc) × (weight of the hanging weight) was applied to the pipe. Since the angle of twist continued to increase for a long time a self-recording devise was used to register automatically on a sheet of a paper the angle of twist against time. The angle of twist increased elastically by an amount θ_0 at the moment when the twisting moment was applied and after this came the long lasting period of creeping in which the angle of twist continued to grow very slowly. In the first part of the period of creeping, the rate of increase in the angle of twist was gradually diminished to attain a minimum value at the end of this part of the period. After this, in the second part of the period, the angle of twist began to increase at an increasing rate.

The rigidity G of the material composing the pipe can be calculated from the value of elastec twist θ_0 and the magnitude of the twisting moment applied. In the range of temperature from $-20°C$ to $+20°C$ and for the twisting strees less than about 120 kg/cm², the rigidity G is expressed by the formula:

$$G = (1.23-0.0055\,t)\times 10^{-4}\ \text{kg/cm}^2.$$

It should be noted that the value of G changes only slightly with the changing temperature. For the twisting stress larger than the above indicated value, G showed a value somewhat smaller than that given by this formula.

Contrary to the case of elastic twist, the twist by creeping was found to depend largely on the temperature. For the same twisting stress, the rate of increase in the shearing strain which was proportional to the angle of twist was diminished strikingly as the temperature was lowered. For example, when a twisting stress of about 300 kg/cm² was applied, the minimum rate of creeping at the end of the first part of the creeping period was more than 10^{-3} rad/min at 17°C, $0.3\sim 2\times 10^{-4}$ rad/min at about 0°C and less than 2×10^{-6} rad/min at about −18°C.

At one and the same temperature, as the twisting stress τ was increased, the first part t_0 of the creeping period was shortened, and minimum rate $\dot{\varepsilon}_0$ of increase in the shearing strain was increase while the time interval Δt_0 during which the rate of increase in the shearing strain kept the minimum value $\dot{\varepsilon}_0$ was diminished. These changes caused by the change in the twisting stress τ are very conspicuous as shown by the following table:

τ kg/cm²	t_0 min	$\dot{\varepsilon}_0$ rad/min	Δt_0 min
467	5.3	114×10^{-4}	3.6
444	20	34.5×10^{-4}	9.5
424	4×60	2.5×10^{-4}	60

The twisting stress sufficiently large to deform and damage the pipe about 20 minutes after the application of the stress was found to be about 290 kg/cm² at 17°C, more than 320 kg/cm² at about 0°C and about 440 kg/cm² at −22°C. Damaged pipes are shown in the photographs of Figs. 8 and 9 of the text. No sign of difference was found in the mode of damage throughout the whole range of temperature from −25°C to 20°C. A special case of damage is shown in the photographs of Figs. 10 and 11. In this case, the wire upon which weight was suspended was snapped by chance and the massive chuck grasping the end of the pipe sprang back suddenly towards its original position, imparting to the pipe a large shock of twist. A spiral crack grew along the surface of the pipe as shown in the photographs.