

水を満たして密封した鋼管が凍結する際に 生ずる歪みおよび破壊について

(第 1 報)

追 分 重 義

金 山 公 夫

(昭和 38 年 10 月 21 日受理)

Strains and Failure of Pipes Filled with Water and Sealed at Ends as Water Freezes and Expands

(1st Report)

By Shigeyoshi OIWAKE and Kimio KANAYAMA

Abstract

When a pipe filled with water and sealed at the ends is exposed to a low temperature, it shows progressing strains on the outer wall and failure in the end, due to the low temperature and pacing with the congelation and expansion of the contents.

Our experiment reports in this paper how the yield condition of the pipe is affected by the size and the treatment of pipes in those atmosphere. A brief result is as follows.

1) It is likely that the pipes not annealed after machining give in the elastic region stress and strain behaviors qualitatively resembling to those when they were under uniform hydrostatic pressure.

2) Yield condition of annealed pipes seems basically to follow the relation: $p_y = 2\tau_y \ln r$, where p_y = internal pressure to give the yield, τ_y = shear strength of the material of the pipe, and r = ratio of thickness of the pipe. This experiment recommends that τ_y be valued a little less than the shear strength corresponding to the lower yielding point on the tensile test diagram of the actual pipe as a whole.

1. ま え が き

寒冷地において、水その他の液体をパイプ輸送する際に大きな問題となるのは、内部の液体が凍結して輸送を困難にしたり、ときには輸送管を破壊させたりすることである。その単近な例として水道管の凍結現象をあげることができよう。こうした事例にしばしば遭遇し、産業的にも、また日常生活においても障害をうけているにもかかわらず、地域的に限られた特殊な問題であるためか、凍結にともなう諸現象の解析あるいは凍結防止対策等について、あまり積極的な研究が行なわれていないのが現状である。

そこで、著者らはこの点に注目して、水を満たした鋼管が凍結したときに管壁に生ずる歪

みならびに破損の現象をとりあげ、実験室における基礎的な研究に着手したので、これまでの研究で明らかになった諸点をとりまとめてここに中間報告をし、大方の御批判を仰ぎたい。

従来、厚肉円管に内圧を加えたときの管壁に生ずる歪みおよび応力の関係は、軸対称問題の最も簡単な例題として、一般の弾性学の書物に理論的に解かれており、いわゆる Lamé の解として知られている。また、実験的研究としては、古くは Cook¹ によってなされた実験が有名であり、その後多くの人々²⁾ によって行なわれている。さらに塑性学的取扱いもなされ、円管の強度と降伏内圧との関係が示されており³⁾、これについての実験的証明も行なわれている⁴⁾。

しかし、これらの実験はいずれも流体圧力を意識的に作用させたもので、凍結という自然現象の結果、内部の水が状態を変えて氷になるときの体積膨脹に起因した内圧、すなわち氷の層を媒介として円管に内圧が作用する場合については明らかになっていない。

2. 基礎理論

2.1 弾性解

力学的に等方性材料でできた内半径 r_1 、外半径 r_2 の円管に内圧 p が作用した場合の圧力と応力の関係は Lamé によって次のように導かれている。

いま、任意の半径 r における半径方向の圧縮応力を σ_r 、円周方向の引張応力を σ_θ とし、長さ l 、半径 r 、厚さ dr の基礎円管を考えると、平衡の条件から

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{r} = 0 \quad (1)$$

が成立する。ここで圧力が作用しても円管の横断面が平面を保つと仮定すれば、軸方向の歪み ϵ_z は r に無関係に一定であり、軸方向の応力も一様に分布し、かつ引張応力とすれば

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \text{const.} \equiv 2a \quad (2)$$

となり、(1)式と(2)式とから

$$\frac{d\sigma_r}{\sigma_r + a} = -\frac{2dr}{r}$$

となる。これを積分すると

$$\ln(\sigma_r + a) = -\ln r^2 + \ln c$$

$$\therefore \sigma_r = \frac{c}{r^2} - a \quad (3)$$

(2)式から

$$\sigma_\theta = \frac{c}{r^2} + a \quad (4)$$

となり、定数 a および c は境界条件 $r=r_1$ において $\sigma_r=p$ 、 $r=r_2$ で $\sigma_r=0$ から(3)式によつ

て決定される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{r_1^2 p}{(r_2^2 - r_1^2)^2} \left(\frac{r_2^2}{r^2} - 1 \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{r_1^2 p}{(r_2^2 - r_1^2)^2} \left(\frac{r_2^2}{r^2} + 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

また、円管の軸方向の応力 σ_z は両端の状態によってきまり、両端が閉鎖されている場合には引張応力で

$$\sigma_z = \frac{r_1^2 p}{r_2^2 - r_1^2} \quad (5')$$

となる。したがって特別な場合として円管外壁における表皮応力を考えると、 $r=r_2$ において $\sigma_r=0$ の条件から (5) および (5') 式は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= 0 \\ \sigma_\theta &= \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot p \\ \sigma_z &= \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot p \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となる。

故に、円周方向の表皮応力または軸方向の表皮応力を測定することにより内圧が算定されそのときの両応力の比 $\sigma_\theta/\sigma_z=2$ でなければならない。

2.2 降伏開始の条件

円管の材料が弾完全塑性体であり、破壊が最大剪断応力説に従って起るものと仮定すると降伏を開始する内圧 p_y と材料固有の剪断強度 τ_y との関係は次のように誘導される。

最大剪断応力説より

$$\sigma_\theta + \sigma_r = 2\tau_y \quad (7)$$

これを (1) 式に代入して積分すると

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\tau_y}{r} &= 0 \\ \sigma_r &= -2\tau_y \ln r + c \end{aligned} \quad (8)$$

$r=r_2$ において $\sigma_r=0$ であるから積分定数 c は

$$c = 2\tau_y \ln r_2$$

となり、

$$\sigma_r = 2\tau_y \ln \frac{r_2}{r}$$

を得る。ここで $r=r_1$ において $\sigma_r=p_y$ であるから、求める関係式は

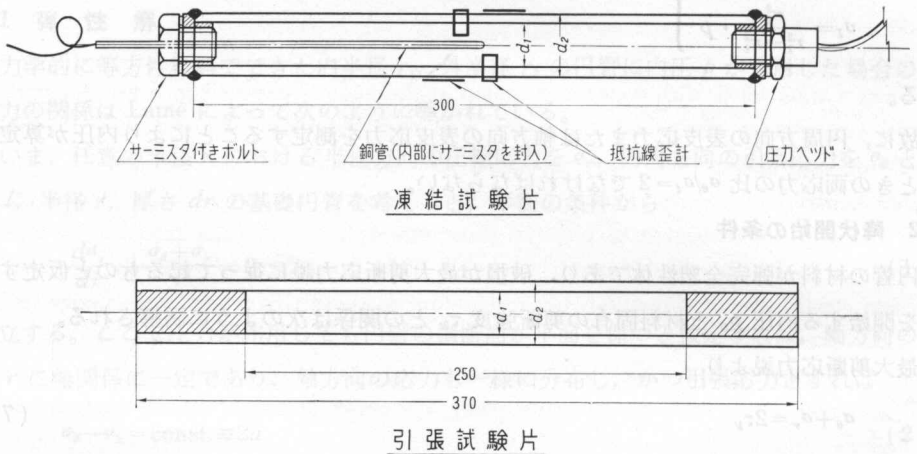
$$p_y = 2\tau_y \ln \frac{r_2}{r_1} = 2\tau_y \ln r^* \quad (9)$$

となる。ただし r は円管の肉厚比を表わす。

(9)式は、円管の剪断強度と肉厚比が与えられたときの降伏開始内圧を示すもので、降伏開始後は変形があまり大きくない範囲では内圧は一定に保たれるが、変形が進み肉厚比が小さくなると内圧はかえって減少することになる。しかし、鋼は一般に変形がすすむと歪み硬化を起すから、全域の降伏が完了すると内圧は徐々に上昇するはずである。

3. 実験装置および方法

試験に供した円管は、日本鋼管製の継目なし引抜き鋼管(内径 24 mm ϕ 肉厚 5.5 mm)で、素材の外径を削って肉厚に変化を与え、機械加工をしたままのものと、完全焼鈍を行なって残留応力と加工硬化をとりさり材質を調整したものとを用意した。また、供試材の力学的諸特性



第1図 試験片

第1表 試験片の概略寸法

試験片	内径 (mm)	外径 (mm)	肉厚 (mm)	
凍結試験片	薄手	24	27	1.5
	中手	24	29	2.5
	厚手	24	31	3.5
引張試験片	24	28	2.0	
	24	32	4.0	

* 中西氏は、中肉円管の降伏を、安定問題、剪断応力の附重平均値一定の条件および降伏部と未降伏部の平衡の条件などから、これと同じ関係式を導いている³⁾。

を求めるために引張試験も合わせて行なった。凍結試験片および引張試験片の寸法と形状を、それぞれ第1表と第1図に示す。炭素含有量については特に分析を行なわなかったが、焼鈍試片の引張強度から推察して0.2%前後とおもわれる³⁾。

凍結試験では、試験片の両端面に雌ねじを溶接し、一端に圧力ヘッド(エンジン指圧計)を、他端にボルトをゴムパッキンを介してねじ込み内部に水を満たして密封した。ボルトは軸に穴をうがって中空とし、これに先端を閉鎖して水密にした銅パイプ(外径10 mmφ, 肉厚1.5 mm)を貫通ろう付けをほどこし、鋼管内温度を測定するためサーミスターを封入した。管の中央部には、円周方向と軸方向に一对の抵抗線歪計を対称的に合計4枚貼って、外壁の表皮歪みを動歪計—ペン書きオッシロで個々に測定記録した。加工したままの試験片は弾性範囲の実験に、焼鈍したものは弾性、塑性両域の実験に用い、塑性域の実験では特に塑性域用の抵抗線歪計を使用した。管内圧力は圧力ヘッド—モニター—陰極線オッシロで観測し、管内温度および低温室温度はサーミスターをホイートストンブリッジの一辺に組入れ、不平衡電圧として検出し、電子管式自動平衡記録計で自記させた。

凍結実験の手順は、まず試験用円管に低温室外(常温)で圧力ヘッドとサーミスター付ボルトで水を密封し、それぞれ測定器に接続し、同時に抵抗線歪計を結線して平衡をとってから低温室にこれを投入して実験が開始される。したがって低温室内外の温度差が約30°Cになるので、抵抗線歪計の温度補償が問題になる。そのために試験用円管(アクティブ)と全く同一の試験片(ダミー)を準備し、ダミーには水を満すが一端を開放しておき、凍結時に内圧が作用しないようにして、温度に関してのみアクティブとダミーがほぼ同じ状態を保って冷却され、凍結が進行するように、それぞれアクティブとダミーの相対応する歪計を2ゲージ法で接続することにより、満足すべき温度補償を行なうことができた。ダミーには最初アルコール水溶液(約15%)を用いたが、水との差がなかったので以後水だけで行なった。

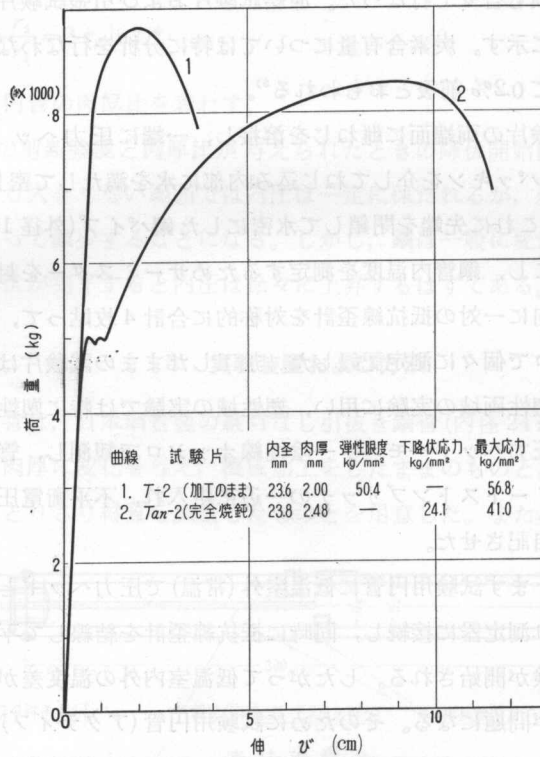
加工したままの円管に対する弾性域の測定では、圧力ヘッドの能力限界(550気圧)に達したとき、また焼鈍円管に対する測定では、ダミーが完全に凍結したときに実験を中止した。

引張試験では、降伏応力、最大応力の他に、試験片中央部に抵抗線歪計を貼って縦歪み、横歪みを静歪計で測定し、ヤング係数、ポアソン比を算出した。

4. 実験結果

4.1 引張試験

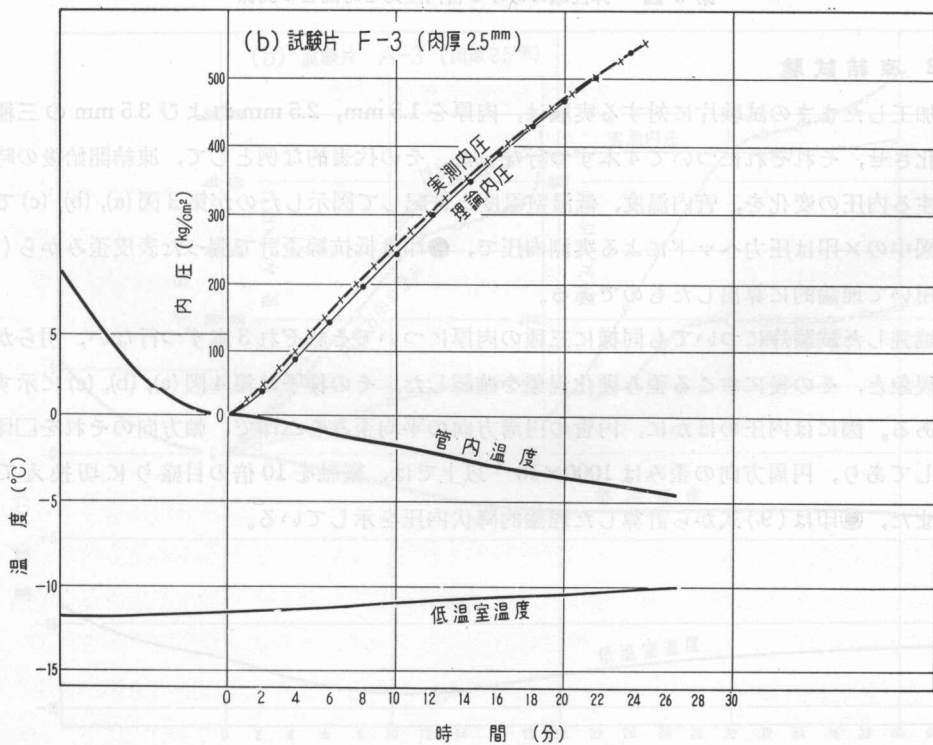
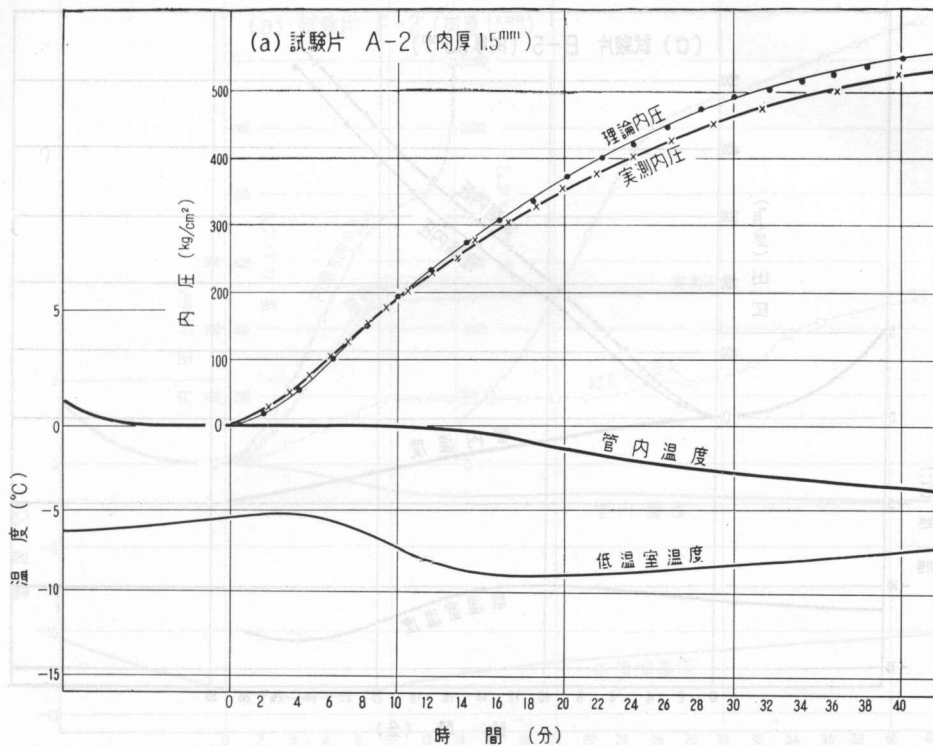
加工したままの試験片は管製作時における引抜きと、その後の機械切削時における加工硬化のため、引張試験の荷重—歪み線図には降伏点は現われず、伸びも少なく第2図-1に示すような特異な形状を呈した。加工後完全焼鈍を行なうことによって、第2図-2の荷重—歪み線図のごとく、明瞭な降伏点が現われ、伸びも増加し材料が回復していることを示している。引張試験の結果を第2表にあげる。

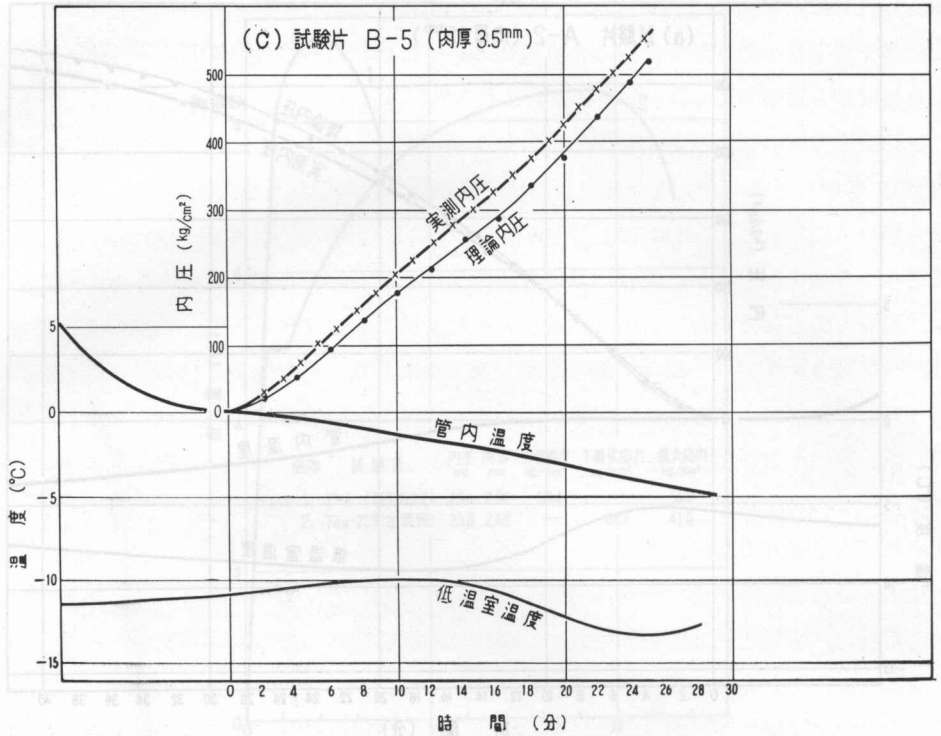


第2図 供試材の引張荷重—伸び線図

第2表 引張試験の成績

試験片	肉厚 (mm)	降伏応力 (kg/mm ²)	最大応力 (kg/mm ²)	ヤング係数 (kg/cm ²)	ポアソン比	備考	
加工したままの試験片	T-1	2.00	50.2	57.0	2.14×10 ⁶	0.328	降伏応力は弾性限度の応力を示す。
	T-2	2.00	50.4	56.8	2.14	0.336	
	T-3	2.00	50.4	54.4	2.07	0.339	
	T-4	1.95	50.5	56.3	2.09	0.332	
	(平均)		50.4	56.1	2.11	0.331	
	T-5	3.95	43.1	58.1	2.12	0.307	
	T-6	3.85	47.4	62.3	2.14	0.305	
	(平均)	3.85	45.3	58.5	2.12	0.315	
		45.3	60.0	2.13	0.309		
焼鈍した試験片	Tan-1	2.40	24.8	39.7	2.16	0.300	降伏応力は降伏点を示す。
	Tan-2	2.48	24.1	41.0	2.15	0.311	
	Tan-3	3.45	23.6	37.3	2.21	0.303	
	Tan-4	3.45	23.3	37.3	2.14	0.288	
	Tan-5	3.42	23.4	—	2.15	0.298	
	(平均)		23.9	38.8	2.16	0.300	



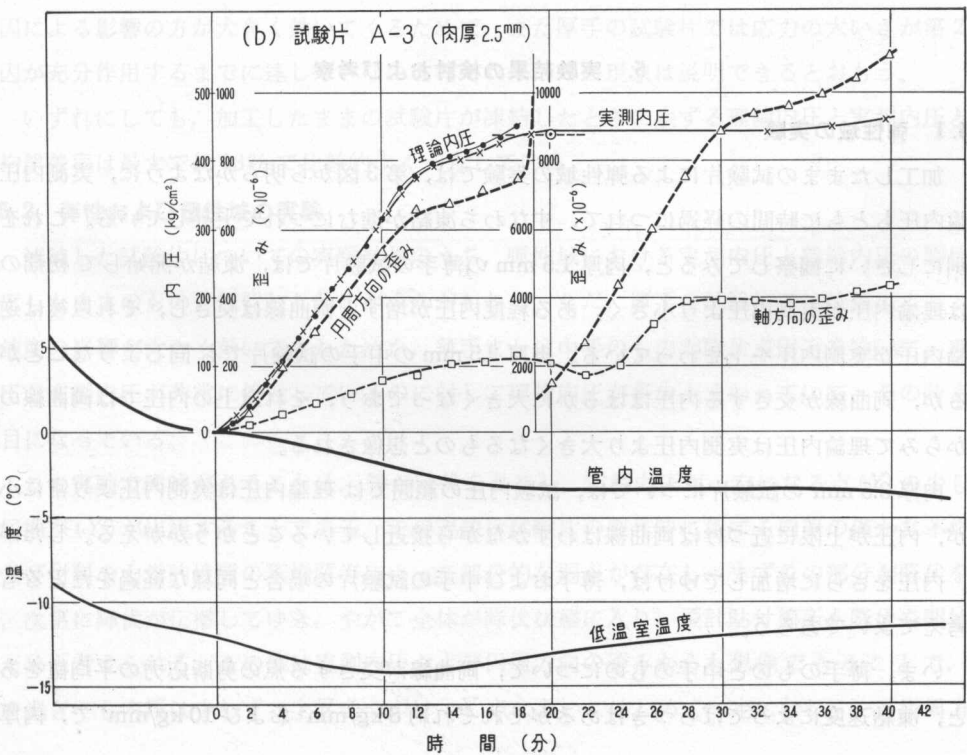
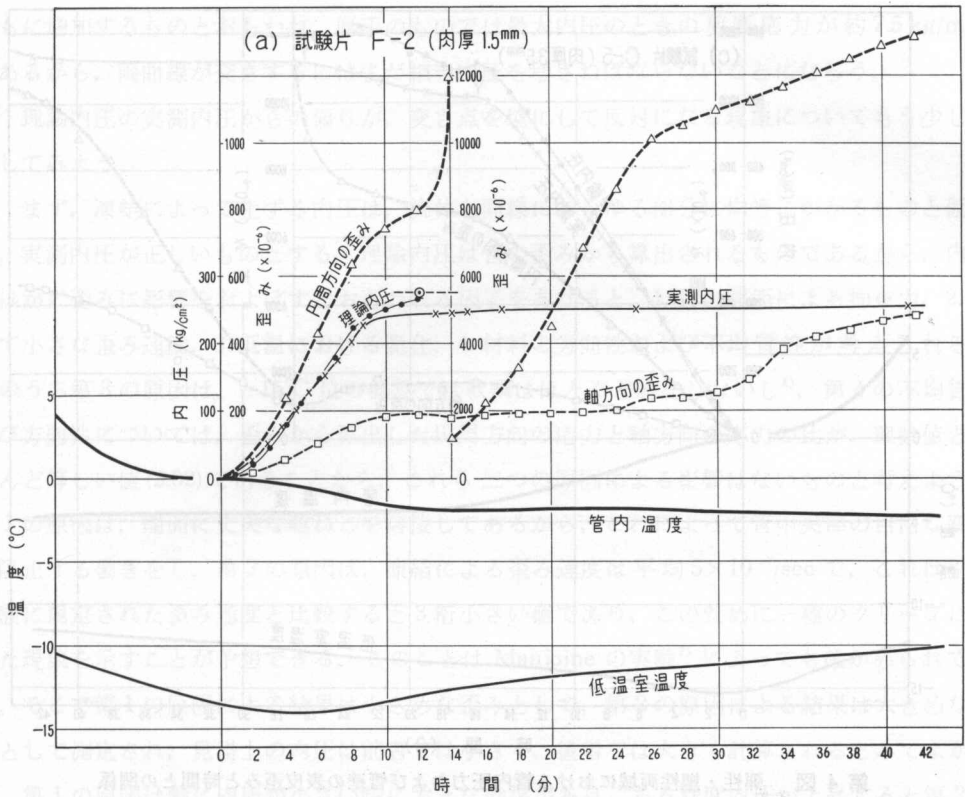


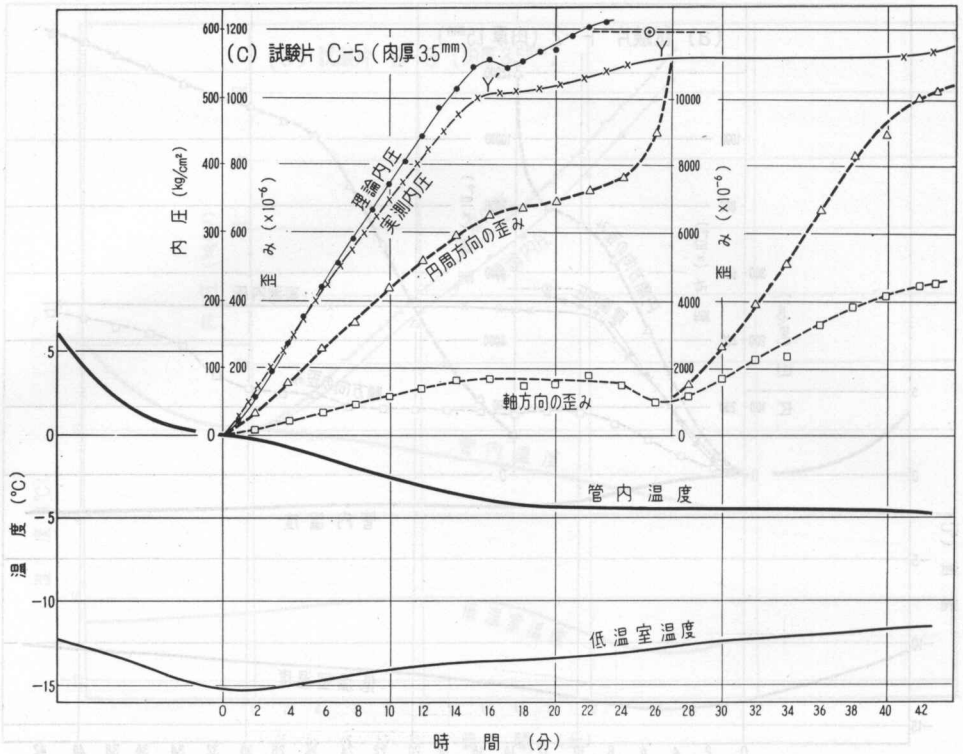
第 3 図 弾性域における管内圧力と時間との関係

4.2 凍結試験

加工したままの試験片に対する実験は、肉厚を 1.5 mm, 2.5 mm および 3.5 mm の三種類に変化させ、それぞれについて 4 本ずつ行なった。その代表的な例として、凍結開始後の時間に対する内圧の変化を、管内温度、低温室温度と併記して図示したのが第 3 図 (a), (b), (c) である。図中の×印は圧力ヘッドによる実測内圧で、●印は抵抗線歪計で測った表皮歪みから (6) 式を用いて理論的に算出したものである。

焼鈍した試験片についても同様に三種の肉厚についてそれぞれ 3 本ずつ行ない、明らかな降伏現象と、その後におこる歪み硬化現象を確認した。その様子は第 4 図 (a), (b), (c) に示す通りである。図には内圧のほか、円管の円周方向の平均歪みを△印で、軸方向のそれを□印で打点してあり、円周方向の歪みは 1000×10^{-6} 以上では、縦軸を 10 倍の目盛りに切換えてある。また、●印は (9) 式から計算した理論的降伏内圧を示している。





第 4 図 弾性・塑性両域における管内圧力および管壁の表皮歪みと時間との関係

5. 実験結果の検討および考察

5.1 弾性域の実験

加工したままの試験片による弾性域の実験では、第 3 図から明らかなように、実測内圧も理論内圧もともに時間の経過につれて、すなわち凍結が進むにつれて上昇している。これを肉厚別にしさいに観察してみると、肉厚 1.5 mm の薄手の試験片では、凍結が開始して初期のうちは理論内圧が実測内圧より小さく、ある程度内圧が増すと両曲線は交差し、それ以後は逆に理論内圧が実測内圧を上まわっている。肉厚 2.5 mm の中手の試験片でも同じようなことが言えるが、両曲線が交さる内圧ははるかに大きくなっており、それ以上の内圧では両曲線の傾向からみて理論内圧は実測内圧より大きくなるものと想像される。

肉厚 3.5 mm の試験片については、試験内圧の範囲では理論内圧は実測内圧より常に小さいが、内圧が上限に近づけば両曲線はわずかながら接近していることがうかがえる。したがって、内圧をさらに増加してゆけば、薄手および中手の試験片の場合と同様な経過をたどるものと考えてよいであろう。

いま、薄手のものと中手のものについて、両曲線が交さる点の剪断応力の平均値をあげると、凍結速度によってばらつきはあるがそれぞれ約 8 kg/mm² および 10 kg/mm² で、肉厚と

ともに増加するものとおもわれ、厚手のものでは最大内圧のときの剪断応力が約 7.5 kg/mm^2 であるから、両曲線が交さするにはまだ相当内圧を増さねばならないことになる。

理論内圧の実測内圧からの偏りが、交差点を境にして反対になる現象についてもう少し考察してみよう。

まず、凍結によって生ずる内圧は、流体と同様にあらゆる部分に均等にかかるものと仮定し、実測内圧が正しいものとする。理論内圧は管の歪みから算出されるものであるから、内圧のほか歪みに影響をおよぼすとおもわれる因子をあげると、1. 管の端面による拘束力、2. 極めて小さな歪み速度、3. 低温における脆化、4. 材料の方向性および不均質等が考えられる。このうち第3の原因は、 -15°C 位の低温では軟鋼はほとんど脆化しないし⁹⁾、第4の不均質および方向性については、歪みから算出した円周方向の応力と軸方向の応力の比が、理論値とほとんど等しい値 (2.02) であることから、これら二つの原因による影響はないものと考えよう。第1の原因は、端面に丈夫な雌ねじを溶接してあるから、これによって管中央部の自由な変形を阻止する働きをし、第2の原因は、凍結による歪み速度は平均 $5 \times 10^{-7} / \text{sec}$ で、これは引張試験に規定された歪み速度と比較すると3桁小さい値であり、このために一種のクリープに類した現象を示すことが予想できる。このことは Manjoine の実験⁹⁾ によっても確かめられている。そこで第1の原因による結果は小さな歪みとして、第2の原因による結果は大きな歪みとして測定され、見掛上の内圧は前者では小さく、後者では大きく計算されるとみてよからう。第1の原因は特に内圧が小さい時に大きな効果があり、ある程度内圧が上昇すると第2の原因による影響の方が大きく効いてくるため、また厚手の試験片では応力の大きさが第2の原因が充分作用するまでに達していないと考えれば、この現象は説明できるとおもふ。

いずれにしても、加工したままの試験片が凍結したときに生ずる理論内圧と実測内圧との平均誤差率は最大で約 13% で比較的良好に一致している。

5.2 弾性および塑性域の実験

焼鈍した試験片についての実験結果のうち、弾性域における実測内圧と理論内圧の関係は加工したままのものと類似した傾向がうかがわれる。ただ、厚手の試験片では焼鈍によって歪み速度の影響が大きく効いてきたためか、薄手または中手のものが降伏点附近を除いて、理論内圧と実測内圧が非常に接近しているのに対して理論内圧が多少上まわっていて、その時点も早目になっている。

この実験で興味があることは、管が降伏をおこし、実測内圧が一定になる点 (Y) の少し前に屈曲点 (Y') が出現することである。この現象は試験片の製作時に生ずる肉厚の僅かな不均質および材料の力学的性質の不均質等によって部分的な弱点が存在し、まずこの部分が降伏を起し、次第に降伏が伝播してゆき、やがて全体が降伏状態に入り、歪計貼付箇所も降伏を開始するためと考えられる。この事は実測内圧および円周方向の歪みからも想像できることで、Y' 点を過ぎても内圧は少しずつ上昇をつづけ、Y 点においてはじめて一定になり、一方円周方向

の歪みも Y 点から極めて急激な上昇を示しているのは、この考えを正当づけるものであろう。内圧一定の状態がしばらくつづいて、材料全体が一様に降伏を完了すると、今度は歪み硬化をおこして再び内圧は緩慢に上昇し、円周方向の歪みの増加割合が減少する様子が明瞭に観察することができる。軸方向の歪みは、降伏点において円周方向の歪みが急増するときにはむしろ減少するが、それ以外では絶対値と増加割合が小さいだけで、円周方向と同様な傾向をたどる。

また、実測内圧 p_{yi} と肉厚比 r とから (9) 式によって降伏時の剪断応力 τ_{yi} が算定されるが、これと引張試験で得られた材料固有の剪断強度 τ_y とを比較し、推計学的に処理したのが第 3 表である⁹⁾。これによると τ_{yi} は概して τ_y よりも小さく、 τ_y が正しいものとして t 検定をほどこすと、有意水準 5% 以下でこの仮説は棄却しなければならず、(9) 式から降伏内圧 p_y を求めるときには τ_y としてももう少し小さい値をとらなければならないことになる。ここでい

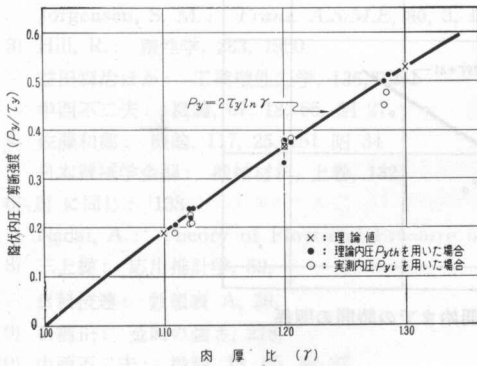
第 3 表 τ_y と τ_{yi} の 比較

試験片	n	p_{yi}	$\ln r$	τ_{yi}	τ_{yi}^2	τ_y	t 検 定
A - 1	1	227	0.104	10.91	119.0	11.95	$\frac{\sum \tau_{yi}}{n} = 11.30$ $(\sum \tau_{yi})^2 = 10340$ $\frac{(\sum \tau_{yi})^2}{n} = 1149$ $t = \frac{\tau_y - \frac{\sum \tau_{yi}}{n}}{\sqrt{\frac{\sum \tau_{yi}^2 - \frac{(\sum \tau_{yi})^2}{n}}{n(n-1)}}}$ $= \frac{11.95 - 11.30}{\sqrt{\frac{1152 - 1149}{9 \times 8}}}$ $= 3.184 > 2.306$
A - 2	2	250	0.120	10.42	108.6		
B - 2	3	268	0.116	11.55	133.4		
F - 2	4	250	0.116	10.78	116.2		
A - 3	5	438	0.184	11.90	141.6		
D - 3	6	455	0.187	12.17	148.1		
E - 3	7	443	0.184	12.04	145.0		
C - 5	8	560	0.251	11.16	124.9		
D - 5	9	535	0.249	10.74	115.3		
(Σ)	9			101.67	1152.1		

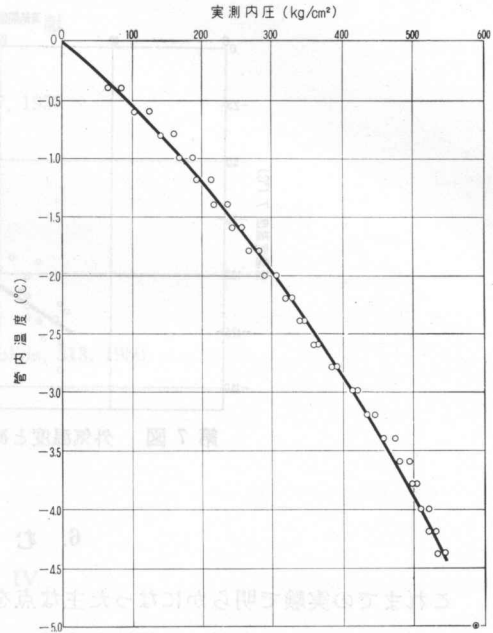
註 n: 試験片の数, p_{yi} : 実測内圧 (kg/cm²), r: 肉厚比, τ_{yi} : 実測内圧が正しいものとして (9) 式より算出した剪断強度 (kg/mm²), τ_y : 引張試験で求めた剪断強度 (kg/mm²)

ま一つの問題は、一般に軟鋼丸棒の剪断応力強度は試験法によって異なった値となり、引張応力強度の 1/2 より大きいのが普通である⁹⁾。しかし、この実験で行なった鋼管の引張試験において露出した破断面を観察すると、中実丸棒の引張試験による破断面とは様相を異にして、全断面にわたって荷重方向にたいしてほぼ 45° の迂り面で剪断破壊をしており、下降伏点における引張応力の 1/2 を中西博士のいう¹⁰⁾ 均等剪断応力下の剪断強度とみなしてよいであろう。

つぎに、第 5 図の曲線は (9) 式より求めた p_y/τ_y と r との関係を示しており、図中の●印は理論内圧 p_{yth} をとった場合を、○印は実測内圧 p_{yi} をとった場合を表わしている。厚手の試験片についての実測内圧から計算した点が、曲線からいくらか隔っているが、 τ_y を適当な値にとると総じて (9) 式の降伏条件が適用できるものとおもう。



第5図 P_y/σ_y と r の関係



第6図 管内圧力と温度との関係

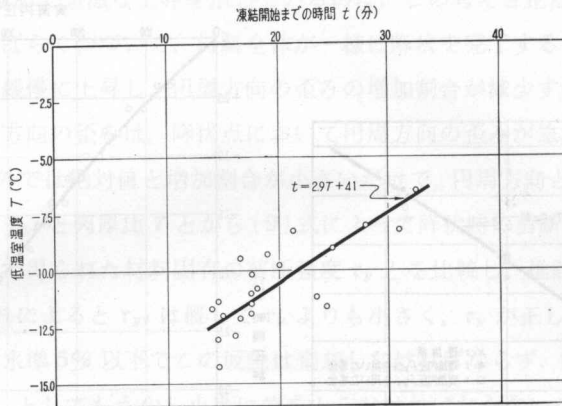
円管内の水の凍結は、外気温度が低いことから管壁に接した部分から始めて、次第に中心部に向って求心状に氷が成長し、発達してゆくものと考え、内部の圧力は氷の層を媒介して管壁に作用することになるから、氷の弾性的性質にも留意してみる必要がある。しかし -15°C における氷のヤング係数は $7.5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ で¹¹⁾、鋼のそれに比べて2桁小さく、また氷は流動性に富んでいるから¹²⁾、応力の増加速度が小さいこの種の実験では、氷層の存在は無視できるであろう。

5.3 円管内の温度と圧力

管内の水が凍結を開始して内圧が上昇し始めると、内部の氷と水が平衡を保つためには管内温度は降下しなければならない。この状態を焼鈍した試験片について測定した結果を第6図に示す。内圧の上限と下限付近で多少弯曲しているが、この範囲では管内温度は圧力の増加に従ってほぼ直線的に降下している。図中の●印は水と氷の状態平衡図から求めた点で¹³⁾、実験から得た実線を延長すればおおよそこの点を通る。

5.4 外気温度と凍結開始までの時間

管内の水が凍結を開始するまでの低温室平均温度 (T) と、実験開始時の管内水温を 15°C に換算したときの、凍結開始までに要した時間 (t) との関係を示す。両者の関係は双曲線 $t = T^{-n}$ で表わされるものとおもうが、実験温度の範囲が狭いので、直線関係とみなして最小二乗法を適用して求めたのが図中の実線である。



第 7 図 外気温度と凍結開始までの時間の関係

6. む す び

これまでの実験で明らかになった主な点をまとめると次のようになる。

(1) 水を満たして密封した鋼管が凍結したときに管壁におよぼす内圧と歪みの関係は、最大13%の誤差率を含む場合があったが、定性的には流体圧が作用したときと同様に弾力学的に取扱うことができる。

(2) 鋼管を直接引張試験を行なって算定した下降伏点における剪断応力は、均等剪断応力下の剪断強度に近似しているものとおもわれる。

(3) 鋼管の降伏条件は、流体圧による理論式(9)が定性的に適用できるが、降伏剪断応力の大きさは前項の引張試験による値よりも少し小さな値をとるべきであろう。

しかし、今回の報告では実験回数も多くはないし、上にあげた結果もあくまで定性的のものであって、最終的な結論を得るためにはさらに実験を重ねなければならない。

そこで今後の方向として、塑性域に関する実験に重点をおいて、多少の危険はともなうことを覚悟で、鋼管が破断するところまで追求するつもりである。そのほか円管自体および内外の条件を変化させて、いろいろな場合について実験を行なってその関連性を明らかにしてゆきたい。例えば、管の材質を変えた場合、特に高分子材料等の新しい材料でできた円管について、管内の充水割合について、管内の水が流水の場合について、水が微粒の固形物を含む場合について、外気の温度範囲を大幅に変え、また風速を変えた場合の凍結の進行速度および機構について等々である。

最後に、この実験を行なうにあたって心よく低温実験室を使用させていただき、また低温科学的な事柄についていろいろ助言をいただいた本学の犬野助教授に感謝の意を表したい。

なお、本研究の費用の一部は北海道科学研究費の補助をうけたことを附記する。

文 献

- 1) Cook, G.: *Engg.*, Dec. 15, 1911.
- 2) たとえば Steele, M. C.: *Trans. A.S.M.E.*, **79**, 7, 1957
Jorgensen, S. M.: *Trans. A.S.M.E.*, **80**, 3, 1958
- 3) Hill, R.: *塑性学*, **263**, 1950
益田森治ほか: *工業塑性力学*, **136**, 1961
中西不二夫: *機論*, **67**, **18**, 65, 昭 27
- 4) 佐藤和郎: *機論*, **117**, **25**, 151 昭 34
- 5) 日本機械学会編: *機械材料*, 上巻, **132**,
- 6) 5) に同じ: **138**.
- 7) Nadai, A.: *Theory of Flow and Fracture of Solids*, **313**, 1950
- 8) 三上操: *応用推計学*, **59**,
日科技連: *数値表 A*, **20**,
- 9) 石橋正: *金属の強さ*, **278**,
- 10) 中西不二夫: *機論*, **18**, 65, 昭 27
- 11) 黒岩大助: *低温科学(物理編)*, **18**, 1959
- 12) 若浜五郎: *低温科学(物理編)*, **227**, **16**, 1957
- 13) *International Critical Tables on Numerical Data*, **IV**

of cutting speed, machinability of materials and tool life were analysed to a large extent based upon the machining theory of tool-chip contact length. According to these researches, we know the fact that tools with artificially restricted tool-chip contact length have good influence upon machining of metals. Here in this report, surface roughness which is one of the most important factors in machinability is discussed while changing the contact length and cutting speed respectively. Roughness focused on in this report is that in the direction of feed mark, as it is not influenced upon the feed mark and is more emphasized by tool-chip contact length than that perpendicular to the feed mark. This time we make little reference to the built up edge, which is seriously affected to surface finish, and the experimental results lead us to the deduction that variation in surface finish is probably concerned with drop of cutting temperature and decrease of harmful relative motion, tool and chip, caused by restriction of tool-chip contact length.

1. 総 論

切屑と切削工具すくい面の接触長を人為的に短く拘束せしめた場合、切屑の発生量が増し、切屑厚さが薄くなり、その結果切削温度が著しく減少、切削面における発生歪みの低下を生じ、研削切屑の色が黄白色になる等、切削状態が変化するなどは経験によって知られている。このような切屑長短長さ拘束工具としては、特 Klopsack の Klopsack 工具および類似のものとして、星の S.W.C 工具¹⁾などが有名だが (Fig. 1)、二段すくい角を有する工具を用いた際の切屑の生成、切削温度、切削抵抗、切削屑の被削性、工具寿命などについては B. T. Chan および K. J. Trigger²⁾、竹山³⁾、石井および菊池⁴⁾、中島⁵⁾などの諸氏によって、広範囲な研究が行なわれているが、そのうち被削性のみならず電鋳を要する仕上げ面粗さについての効果に関しては、著を得た研究は比較的少ない。