

P  
223

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS Vol. 12 No. 4 OCT. 1971

---

論 文

けい光X線によるアルミニウムの化成皮膜の測定について

一 柳 昭 成

住友軽金属工業株式会社

# 論文

## けい光X線によるアルミニウムの化成皮膜の測定について\*

一 柳 昭 成\*\*

### On the Measurement of Film Thickness of Chemical Conversion Coatings for Aluminium with Fluorescent X-Ray

by Akinari Ichiryu

The relationship of X-ray fluorescent intensity to the chemical conversion film on aluminium has been investigated. In the case of thin film, it was found that the intensity of the element in the film had linear relation to the thickness, the coating weight and the including weight of the measuring element, and this linear coefficient was varied with the film composition in the both cases of intensity-thickness and intensity-coating weight, but for intensity-including weight, this coefficient was a constant without depending chemical composition. For Alodine film, the upper limit of linearity in intensity was theoretically estimated, under some conditions, 3 $\mu$  as thickness or 100 $\mu\text{g}$  of Cr/cm<sup>2</sup> as including weight. These relations were justified by measurement with CrK $\alpha$  for the films which were made by Alodine, S.T.C., M.B.V. or L.W. treatment.

As the including weight could be decided more precise than the other values; thickness and coating weight, the appointment of including weight instead of thickness was seemed to be convenient for process controll of chemical conversion films.

### 1. 緒 言

アルミニウムに化成皮膜をほどこした製品は近時増大の傾向にあり、この化成皮膜処理工程の管理の一つとして、皮膜の厚さを測定することが必要となる。実用化されている化成皮膜の厚さはかなり薄く、したがって膜厚を測定することはむつかしい。エリプソメトリーの利用<sup>1)</sup>が考えられるが、通常は皮膜のみを化学的に溶解し去り、その重量減からの皮膜重量が用いられている。しかし、化成皮膜として重要なことは皮膜の耐食性や上塗り塗膜との密着性であって、これらの物性の指標として膜厚とか膜重量があるわけである。したがって工業的には膜厚あるいは膜重量の絶対値が必要ではないのである。その意味において、本報で提唱する付着量は、たとえ膜厚あるいは膜重量との関係が不明確であっても、皮膜管理として使用できることをはじめに強調しておきたい。

本報でいう付着量とは、皮膜中の特定元素の含有量であり、皮膜を溶解し、皮膜組成のある元素を定量することによって求まる。化学処理をするのでは迅速性に欠けるので、けい光X線で測定することを検討し、膜厚および膜重

量との関係をみることにした。化成皮膜はメッキと異なり、皮膜が化合物で形成されていることに特徴があり、そのため皮膜組成とけい光X線強度との関係は興味深いものがある。

まず、理論的に導かれる関係について述べ、ついでこれを確かめるために、アルミニウムのクロメート皮膜についての実験結果を記すことにした。

### 2. 膜厚とけい光X線強度との理論的関係

照射X線が monochromatic で、励起効果を受けないけい光X線の強度を  $I_i$  とし（ただし、 $i$  は皮膜中の元素とする）、膜厚を  $x$  とすると Beattie の式<sup>2)</sup> より  $I_i$  と  $x$  の関係が導かれる。なお、皮膜組成は膜厚に関係なく均一な組成とする。

$$I_i = \frac{I_0 Q_i N_i A d\omega}{\mu_e \csc \theta + \mu_f \csc \varphi} [1 - \exp\{-(\mu_e \csc \theta + \mu_f \csc \varphi)x\}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

$I_0$  : 照射X線の強度

$Q_i$  : 元素  $i$  についてのけい光X線への変換効率

$N_i$  : 元素  $i$  の単位体積あたりの原子数

$A$  : 試料の照射面積

$d\omega$  : けい光X線の測定方向のみに発生する割合

$\mu_e$  : 照射X線に対する試料の線吸収係数

\* 第7回X線工業分析討論会（1970年10月）に一部発表

\*\* 研究部 主任研究員

$\mu_f$  : けい光X線に対する試料の線吸収係数

$\theta$  : 照射X線と試料との角度<sup>3)</sup>

$\varphi$  : けい光X線と試料との角度<sup>3)</sup>

ここで  $N_i = \rho W_i / M_i$  の関係がある。ただし、 $\rho$  : 密度、 $W_i$  : 元素  $i$  の重量百分率、 $M_i$  : 元素  $i$  の原子 1 個の重量を示す。(1) 式を簡略にするため

$$F = \frac{\mu_e}{\rho} \csc \theta + \frac{\mu_f}{\rho} \csc \varphi$$

$$K = I_0 Q_i A d \omega / M_i$$

とおくと、(1) 式は (2) 式となる。

$$I_i = \frac{K W_i}{F} \{1 - \exp(-\rho F x)\} \dots \dots \dots (2)$$

なお、 $F$  はマトリックスの関数であり、 $K$  は測定元素のみに關係する定数であることに注意する必要がある。

膜厚が薄い場合の関係式は

$$I_i^{x \rightarrow 0} = \rho K W_i x \dots \dots \dots (3)$$

となり、けい光X線強度は膜厚と比例関係にあるが、膜の密度と測定元素  $i$  の含有率によって比例定数が決まるることを示している。

単位面積あたりの測定元素の重量、これを付着量と名付けて  $C_i$  とすると  $C_i = \rho W_i x$  の関係になるから (3) 式に代入して、

$$I_i^{C_i \rightarrow 0} = K C_i \dots \dots \dots (4)$$

となる。この式は膜厚が薄い場合、特定元素の付着量はけい光X線強度と比例関係にあり、しかも皮膜組成が変っても比例定数は変化しないことを意味している。具体的な例を述べれば、アルミニウムのクロメート皮膜はアロジン、MBV 等、種々の方法があって、それぞれ皮膜組成は異なるが、このようなものであっても付着量と  $\text{CrK}\alpha$  のけい光X線強度とは一義的に決まる。また、アロジン膜といつても処理液の濃度によって膜組成が変動するかも知れない疑いがあるが、付着量とけい光X線強度の関係には何ら影響を及ぼさないという特徴ある関係が成立することを示すものである。

つぎに工業的に慣用されている膜重量とけい光X線強度の関係を求める。単位面積あたりの膜重量を  $S$  とすると  $S = \rho x$  の関係にあるから、(3) 式により

$$I_i^{S \rightarrow 0} = K W_i S$$

が得られる。したがって膜重量とけい光X線の関係は測定元素の含有率によって比例定数が決まる。すなわち、膜重量と強度との関係は、膜厚と強度との関係と同様に、膜組成に左右された関係線が得られることになる。

(3) 式が成立する条件、すなわち、膜厚とけい光X線強度が比例関係にあるとみなしえる範囲を求めてみる。膜厚  $x_a$  の時の強度を  $I_a$  とし、薄膜の場合成立する直線関係で  $I_a$  に相当する膜厚を  $x_b$  とする。(2) 式と (3) 式により、

$$I_a = \frac{K W_i}{F} \{1 - \exp(-\rho F x_a)\}$$

また

$$I_a = \rho K W_i x_b$$

となる。膜厚の測定に 10% の誤差を許すとすれば、

$$(x_a - x_b) / x_a = 0.1$$

以上の 3 式より

$$x_a = \frac{1}{5\rho F} \dots \dots \dots (6)$$

また、

$$C_a = \frac{W_i}{5F}, \quad S_a = \frac{1}{5F} \dots \dots \dots (7)$$

が得られる。 $x_a$ 、 $C_a$ 、 $S_a$  ともに膜組成に左右される値をとるので、クロムの酸化物、リン酸クロム化合物について計算してみた。計算するために設けた条件は①照射X線は 1.937 Å ( $\text{FeK}\alpha$ ) の単色X線とする、②測定するけい光X線は  $\text{CrK}\alpha$  (2.291 Å) とする、③  $\csc \theta = 1.22$ 、 $\csc \varphi = 1.74$  とする<sup>3)</sup>。計算の結果は Table 1 に示した。アロジン膜は  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CrPO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$  の組成<sup>4)</sup> とされているので、この場合、膜厚 3.4 μ 以下であれば関係線は直線になるものと推定される。

Table 1 Estimated upper limits of linearity in intensity — film thickness ( $x$ ), including weight ( $C$ ) and coating weight ( $S$ )

Composition	$\rho, \text{g/cm}^3$	$W_{cr}, \%$	$x_a, \mu$	$C_a, \mu\text{g of Cr/cm}^2$	$S_a, \mu\text{g/cm}^2$
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	5.21	68.5	0.70	250	364
$\text{CrO}_3$	2.70	52.0	1.70	230	459
$\text{CrPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2.12	20.4	3.31	143	702
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CrPO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$	2.23	15.6	3.41	119	761

つぎに皮膜が板の両面にある場合、裏面の皮膜から発生するけい光X線強度の影響を考えてみる。板の厚さを  $m$  とし、膜厚を  $l$  として、表面膜から発生するけい光X線強度を  $I_i^s$ 、裏面膜から発生するけい光X線強度を  $I_i^b$  とすると (8) 式が成立立つ。

$$I_i^b = I_i^s \exp\{-(\rho_l \cdot F_l \cdot l + \rho_m \cdot F_m \cdot m)\} \dots \dots \dots (8)$$

膜厚は板厚よりはるかに小さいとすると、

$$m = \frac{\log(I_i^b / I_i^s)}{\rho_m F_m \log e} \dots \dots \dots (9)$$

純アルミニウム板にクロム化合物の皮膜があり、Table 1 と同様の条件で  $I_i^b / I_i^s = 10^{-3}$  のとき、 $m = 70 \mu$  が得られる。これは板の厚さが 70 μ 以上あれば裏面膜の影響は無視できることを意味し、したがって板材の化成皮膜では問題なく影響を受けない。

膜厚が厚すぎる場合には、厚さによるけい光X線強度の変化がなくなる。これを考慮するために、まず膜厚が無限大のときの強度に対して半分の強度を示す膜厚を  $x_{1/2}$  とすると、(2) 式と (5) 式より

$$x_{1/2}^{1/2} = 3.45 x_a \dots \dots \dots (10)$$

この  $x_{1/2}$  の 10 倍の厚さがあれば、その強度は無限厚さの強度に対し差は 1/1000 しかなく、もはや膜厚の測定はできない。この値は皮膜がリン酸クロムの場合で約 100 μ になる。アルミニウムの化成皮膜では数 μ 以下であるから、この心配はない。

以上、けい光X線強度と膜厚、付着量、膜重量との関係式を導き、特に付着量との関係は特異であることがわかった。さらに、比例関係の成立する範囲を求めておいた。また裏面膜の影響、測定不能になる膜厚について検討し、いずれの場合も実際の試料では問題とならないこと、したがって、けい光X線で膜厚管理が可能であることを明らかにした。

### 3. 実験方法

アルミニウム板は純度 99.7% で  $50 \times 100 \times 0.5\text{mm}$  のものをあらかじめアルカリ洗浄し、水洗して風乾したのち化成皮膜処理を行なった。この処理はクロムを含み、膜組成ができるかぎり異なるような条件を Wernick<sup>5)</sup> から選んだ。また膜についての測定を容易にするため、厚い皮膜が得られるようにした。その条件については Table 2 に示す。

Table 2 Preparing conditions for chemical conversion

Treatment	Composition, per 1.5l	Temp., °C	Time, min	Sealing
Alodine	$\text{H}_3\text{PO}_4$ 7.5g $\text{NaF}$ $\text{CrO}_3$ 15g	20	5~60	0.05% $\text{CrO}_3$ 20°C 10min
S.T.C.	$\text{H}_3\text{PO}_4$ 19ml $\text{NaF}$ 7.5g $\text{CrO}_3$ 3g $\text{H}_3\text{BO}_3$ 3g	22	5~30	—
M.B.V.	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 52.5g $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ 3.5g	85	5~60	—
L.W.	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 45g $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 75g $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ 22.5g	87	5~90	2% $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 100°C 10min

得られた皮膜についてけい光X線強度、クロム付着量、膜重量、膜厚の測定を行なった。その測定条件、方法について以下に記す。

けい光X線強度：理学電機製けい光X線装置 D-3型を用い、タンクステン対陰極のX線管で 40kV-6mA、Differential 方式により  $\text{CrK}\alpha$  の強度を60秒の定時法で測定した。

クロム付着量：試片 ( $25 \times 50\text{mm}$ ) を (1+10) 硫酸 60ml で加熱溶解する。板を取り去り、硫酸白煙が発生するまで加熱濃縮して完全に皮膜物質を溶解する。250ml メスフラスコに移し、定容としたのち 1/10 分取し、過マンガン酸カリ溶液 (3%) で酸化する。冷却したのち尿素溶液 (10%) 20ml を加え、亜硝酸ナトリウム溶液 (1%) で過マンガン酸の色を消す。Diphenylcarbazide 溶液 (アセトン:水が 1:1 の溶媒で 1% 浓度) 2ml で発色し、100ml の定容としてから  $540\text{m}\mu$  の吸光度を測定する。これにより単位表面積あたりの皮膜に含まれるクロム量を求める。

膜重量：試片 ( $30 \times 50\text{mm}$ ) を膜溶解液 (無水クロム酸 20g とリン酸 ( $d=1.7$ ) 35ml を水で 1l にしたもの) の煮沸液中に 20 分間浸漬する。水洗したのち綿で残留する膜を拭い去り、再び水洗し乾燥する。この処理前後の重量変化を

秤量し、単位表面積あたりの膜重量を求める。

膜厚：試片にアルミニウムの蒸着膜をつけ、顕微鏡 (倍率 400 倍) で 2~4 回繰り返し厚さを測定する。

### 4. 実験結果

#### 4.1 クロム付着量と膜重量の関係

クロム付着量と膜重量との間には  $C_i = W_i S$  の関係があり、比例定数は膜中のクロム含有率となる。実測されたデータより両者の関係をみると Fig. 1 となる。関係線は 3 本得られ、アロジンと STC, MBV, LW に分かれている。このことは、化成皮膜処理方法が異なれば膜組成を異にすること、同じ処理方法では同一組成を示すとみなすことができる。Fig. 1 より皮膜中のクロム含有率を求めるとき、アロジンと STC では約 20%, MBV は 13%, LW では 6% となった。

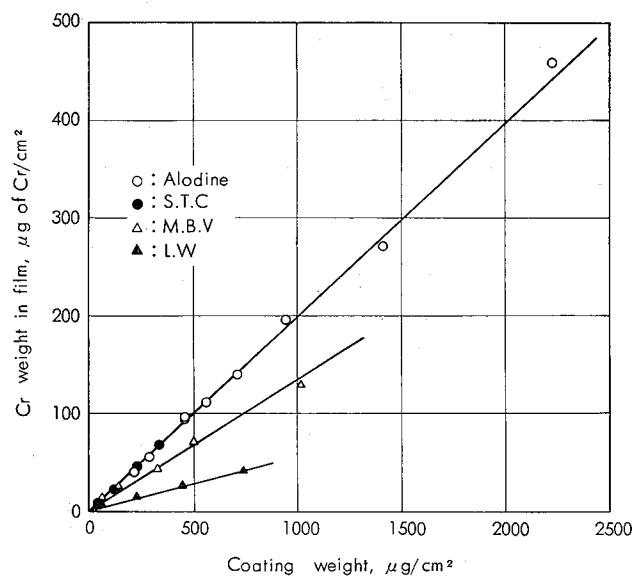


Fig. 1 Relationship of chromium weight in film to coating weight.

#### 4.2 $\text{CrK}\alpha$ の強度とクロム付着量の関係

Fig. 2 に示すように化成皮膜処理方法に関係なく、1 本の関係線が得られた。化成皮膜処理の方法に応じて膜組成が異なるのであるから、結局、けい光X線強度と付着量との関係は膜組成によることなく、一義的な関係にあるといえる。けい酸ナトリウムまたはクロム酸による封孔処理の影響をみたが、本報の実験条件ではこれによる変動もなかった。クロム付着量約  $100\mu\text{g}/\text{cm}^2$  以下では直線関係が成立していることが認められる。以上により理論計算による推定が正しいことを確認できた。

#### 4.3 $\text{CrK}\alpha$ 強度と膜重量の関係

Fig. 3 に結果を示す。アロジンと STC は同一関係線となったが、MBV, LW とはそれぞれ異なり、3 本の関係線が得られた。これは 4.1 と同様膜組成が各々異なるた

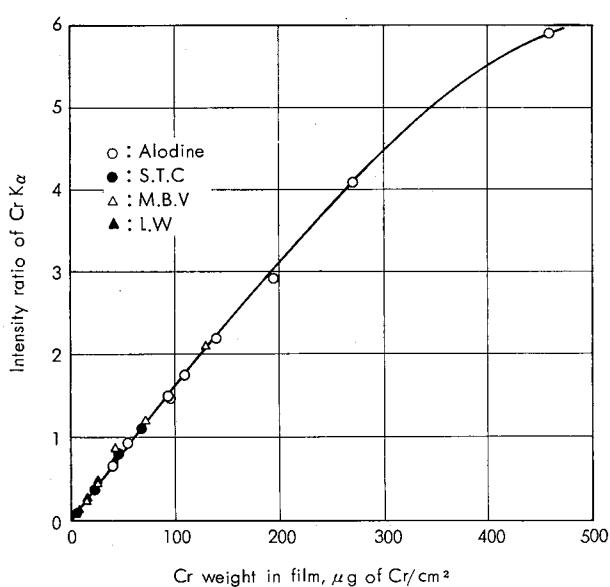


Fig. 2 Calibration curve for chromium weight in film.

めである。膜重量はけい酸ナトリウムによる封孔処理によっても大きく変化することが認められた。しかし、クロム酸による封孔処理は膜重量に変化を及ぼしていないかった。Fig. 3 にはアロジンをけい酸ナトリウムで封孔処理したもの、LW で封孔処理しなかったものの測定値を併記しておいた。

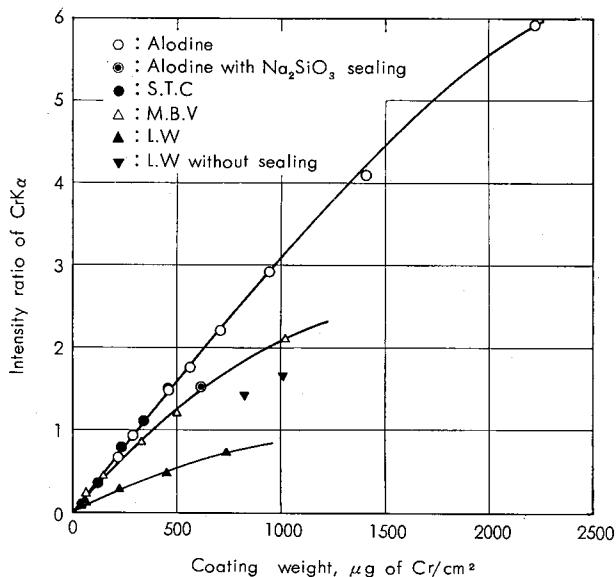
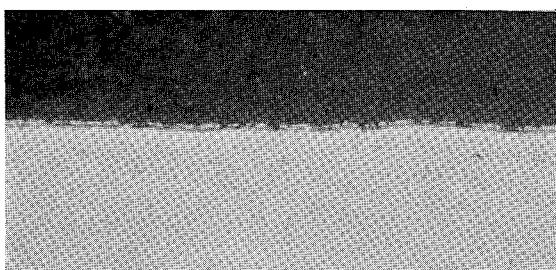
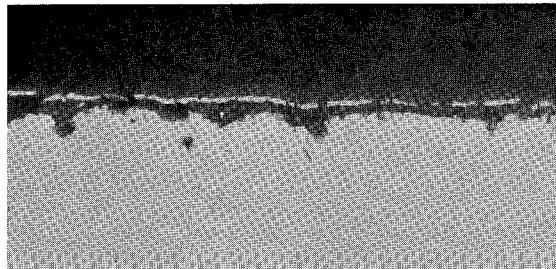


Fig. 3 Calibration curves for coating weight.

#### 4・4 CrK $\alpha$ の強度と膜厚の関係

膜厚の測定精度はよくなかった。その原因として、まず膜厚の測定が局部的であって、CrK $\alpha$  の強度、クロム付着量、膜重量のようにある表面積の平均値を得るわけではないことが考えられる。つぎに皮膜の状態が考えられる。Photo. 1 に示したように、MBV, LW において皮膜が母材に侵食するような状態で形成されており、工業的に利用されるときの有効な厚さとしてどのように厚さを定義する

かが問題である。本報では侵食部分を無視し、表面とそれに平行にある母材との間隔を膜厚とすることにした。したがってこのような皮膜では膜厚の測定精度は当然悪くなる。

a) Alodine ( $2.7\mu$ )b) S.T.C. ( $1.3\mu$ )c) M.B.V. ( $1.9\mu$ )d) L.W. ( $2.9\mu$ )Photo. 1 Cross sections of chemical conversion film ( $\times 500$ )

CrK $\alpha$  の強度と膜厚の関係は Fig. 4 に示した。厚さの測定値の変動をアロジンについてのみ示すこととした。Fig. 4 ではアロジン、STC, MBV はほとんど差がなく、LW とは異った関係線が得られている。また、けい酸ナトリウムによる封孔処理を行なえば、膜厚は厚くなる方へ移行することが認められる。

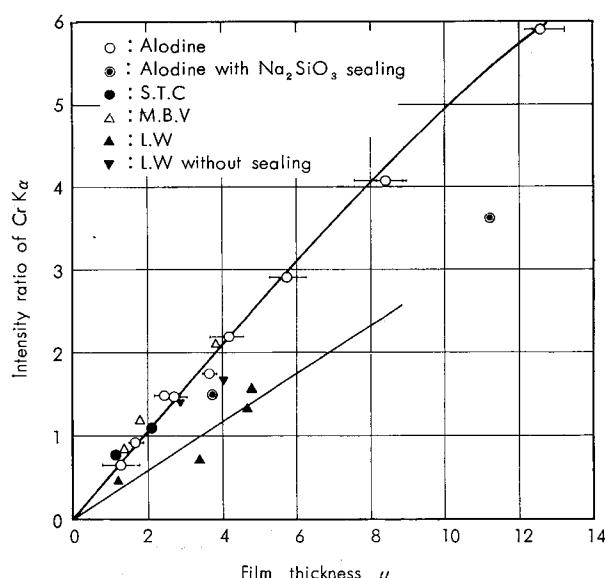


Fig. 4 Calibration curves for film thickness.

## 5. 結 語

本報の結果をまとめてみると、

(1) けい光X線強度式より、膜厚が薄い場合の膜厚、付着量、膜重量とけい光X線強度との関係を求め、特に付着量とは膜組成に依存することなく、一義的で、比例関係にあることを見出した。

(2) 薄膜の関係式、すなわち比例関係が成立するための膜厚または付着量、膜重量を求める式を導いた。例えばアロジン皮膜のCrK $\alpha$ を測定する場合には、膜厚3.3 $\mu$ 以下または付着量約100 $\mu\text{gCr}/\text{cm}^2$ 以下で比例関係になることを概算して求めた。

(3) 板の両面に皮膜がある場合の裏面皮膜のけい光X線の影響、膜が厚くなつて厚さとけい光X線が対応しなくなる厚さについて計算したが、実用的なアルミニウム板の化成皮膜では問題視する必要のないことを認めた。

(4) アロジン、STC、MBV、LWの化成皮膜を形成させた試料でCrK $\alpha$ の強度とクロム付着量を測定した。この結果一義的な関係にあること、また比例関係が約100 $\mu\text{gCr}/\text{cm}^2$ 以下で成立することがわかり、上述の理論的関係式が正しいことを証明し得た。

(5) 強度と膜重量および膜厚との関係は、化成皮膜処理法、すなわち膜組成に応じた関係線が得られた。

またけい酸ナトリウムの封孔処理を行なうと、これらの関係線より逸脱した。

以上実験は厚い皮膜について行なったが、実用的に用いられる化成皮膜はかなり薄く、したがつて膜厚の測定は困難であるし、膜重量の測定精度は悪くなる。けい光X線強度から膜厚または膜重量を求めるには、化成皮膜処理方法に応じた基準値を求める必要があり、この決定が難題である。いっぽう付着量はこれらのうち最も正確に求めることができ、この付着量がけい光X線強度と一義的関係にある

ということは、けい光X線分析の基準値を一つ求めればよいということになる。よつて、けい光X線分析により付着量を求めて膜厚を管理することがじん速で簡便で、しかも正確な方法であるといえる。

けい酸ナトリウムによる封孔処理は膜厚を増大させる。したがつて、単に表面の性質を変えるだけではなく、付着して表皮を形成するものと考えられる。封孔処理は元來アルマイトに対する言葉であり、化成皮膜に対しては機構を異にするものかもしれないが、注目すべき現象と思われる。

## 文 献

- 1) 内田 弘、門 智、山田光二、加藤忠一：日本金属学会誌，33 (1969), 1286
- 2) H.J. Beattie, R.M. Brissey : Anal. Chem., 26 (1954), 980
- 3) 沢田敏男、一柳昭成：本誌, 6(1965), 62
- 4) R.F. Reeves, N.J. Newhard : The Aluminium Finishing Seminar, No. AP-3 (1968)
- 5) S. Wernick, R. Pinner : The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and its Alloys, Robert Draper Ltd., 3rd. ed. (1964), p. 194

P

224

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS Vol. 12 No. 4 OCT. 1971

---

論 文

---

アルミニウム板のしごき加工に関する実験的研究

西 村 嘉 彦

住友軽金属工業株式会社

# アルミニウム板のしごき加工に関する実験的研究

西 村 嘉 彦\*

## The Experimental Investigations on Ironing of Aluminum Sheets

by Yoshihiko Nishimura

An investigation has been made to clarify the quantitative effect of ironing technique to the deep drawing of the industrial pure aluminum sheets and the influence of variable factors such as forming velocity, thickness of sheets and tool profile in ironing.

Furthermore the effect of multiple-stage ironing was examined and the optimum ironing processes using the Round and Taper die were established.

The results obtained were as follows.

1. In comparison with the ordinary deep drawing, ironing of 0~30% in thickness reduction ratio increases the value of L.D.R as much as 0.05~0.1, where as that of more than 30% decreased the value of L.D.R rapidly.
2. The formability of ironing is affected remarkably by forming velocity, thickness of sheets and especially tool profile.
3. More reduction ratio is applicable by using Taper die than by using Round die and the optimum condition are obtained in two-stage ironing process by the Round die and in four-stage by the Taper die. Details of the processes are as follows.

Die profile	Blank diameter $\phi$ mm	Reduction ration % in the first stage	Reduction ratio% in the second stage	Reduction ratio % in the third stage	Reduction ratio % in the fourth stage
Round die	92.5	28	52		
Taper die	92.5	28	58	64	70

### 1. 緒 文

近年金属板のプレス加工用途は急激に増加しており、その加工製品は寸法的、形状的に増え複雑になり加工形態も単純な深絞り、張出しといったものから再絞り、しごきなどが加味された複雑で技術的に加工困難なものへと拡大している。したがって金属板のプレス加工性を正しく予知し評価するには再絞り、しごきなどの二次的な加工要因についてもその現象を正しく認識しておくことが必要である。特にしごきに関しては材料の加工性評価基準がまだ確立しておらず試行錯誤的に加工条件を設定しているのが実情である。本来このしごき加工 (ironing) は深絞り加工に付随して筒状容器の側壁を剛体工具 (ポンチとダイス) でしごいて板厚を薄く一定にする一種の定寸加工であり加工形態としては管の引抜きに類似している。このしごき加工はしごき回数により一段しごきと多段しごきに分類され、さらに一段しごき加工は平板絞りの段階で深絞りとしごきを同時にこなす同時加工と深絞りで成形された容器を別工程でしごきだけをおこなう分離加工に区別される。同時加工に関しては平板絞りの段階で工具間のクリアランスを板厚以上にするよりもある程度のしごきを加える方が深絞り

限界が向上することが定性的にいわれている。

またしごき加工に影響をおよぼす要因は平板絞りの場合と同様な被加工材料の諸性能、工具形状と寸法、加工速度、潤滑条件などのほかにしごき回数としごき率の関係などが考えられる。このしごき加工に関しては Swift 以来かなりの実験がおこなわれているがそのほとんどが工具形状および加工力に関するものであり、例えば深絞り加工における限界絞り比 (L.D.R) のように成形可能なプランク寸法をしごき加工性の評価基準に加味したものはないみられない。

以上の諸点より本実験は工業的純アルミニウム板、軟質材を使用してまず平板絞り加工におけるしごきの効果を定量的に把握し、さらにしごき加工に影響をおよぼす諸要因について検討をすすめて限界絞り比的な手法によってしごき加工性を評価する。また多段しごき加工の場合は最適しごき加工条件の設定の目安をつけることを主眼とする。

### 2. 実験方法

#### 2・1 実験方針

本実験の方針はしごき加工の諸特性を解明し加工性を正しく評価する手段を確立することである。しごき加工に関して加工性が良好な条件とはより大きな径のプランクをよ

\* 開発部兼研究部

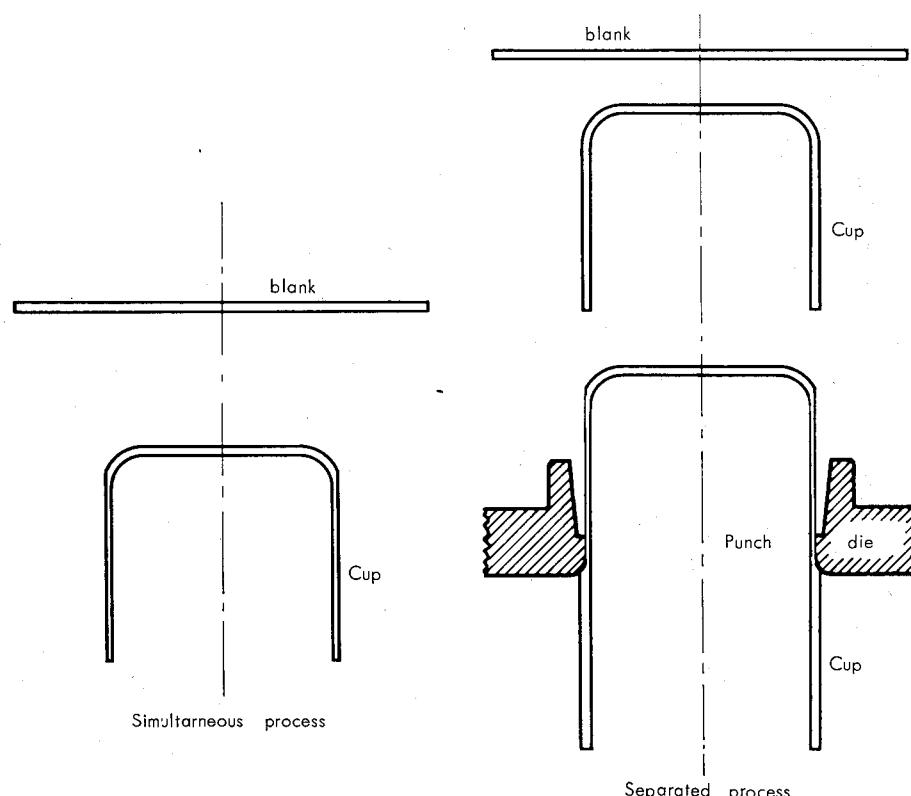


Fig. 1 Draw and Ironing Mechanism.

り大きなしごき率で加工できる場合である。本実験はまず一段しごき加工の実験をおこなって平板絞りに対するしごきの効果を定量的に把握する。その方法として Fig. 1 に示す同時加工と分離加工の比較を R ダイス (ダイス肩部形状が R) とテーパーダイス (以後 T ダイスと呼称) 各々についておこなう。変動要因としてしごき率、加工速度および材料の板厚を採用した。評価方法は限界絞り比でおこなう。また測定項目として [荷重一ポンチ行程] 線図の作製、荷重線図から最大加工力と仕事量の算出、製品容器から板厚分布および加工硬化の測定をおこなう。多段しごき加工に関してはしごき回数としごき率および成形可能なプランク径との関係を中心に実験をすすめて最適加工工程の設定をおこなう。したがって実験項目は以下である。

1. 各条件での限界絞り比の測定
2. 荷重曲線の作製と最大加工力、仕事量の算出
3. 製品容器の板厚分布と加工硬化の測定
4. 多段しごき加工の最適工程の設定

## 2・2 実験条件

- 供試材：供試材として工業的純アルミニウム1100の軟質材、板厚 2.0, 1.0, 0.5 (mm) の3種類を使用した。

Table 1 Mechanical properties of test specimens

Thickness	Proof stress, kg/mm <sup>2</sup>	Tensile strength, kg/mm <sup>2</sup>	Elongation, %	Vickers hardness (5kg)
0.5mm	3.5	10.4	42	21.7
1.0	3.6	9.2	45	22.0
2.0	3.3	10.0	46	22.8

Table 1 に供試材の機械的性質を示す。

• 機械：実験はエリクセン社製金属薄板成形試験機 140型でおこなった。外観を Photo. 1 に示す。これは油圧駆動であり、ブルドン管によって加工力を検出し [X-Y] レコーダーによって [荷重一ポンチ行程] 線図の自動記録ができる。加工速度は 3mm/sec である。なお速度効果に関する実験は 55Ton のクランクプレスを使用した。加工速度は 200mm/sec と 400mm/sec である。



Photo. 1 Appearance of Erichser tester.

- 工具：Fig. 2 に成形工具の概略を示す。詳細な寸法は Table 2 に示す。ポンチは直径 50mm $\phi$  の円柱、頭部半径 7 mm の平底で工具鋼 (SKD-5) を使用した。ダイスは同じく SKD-5 で製作し熱処理を施した。形状は大別して肩部形状が R (3R) とテーパー状 (角度 10°)

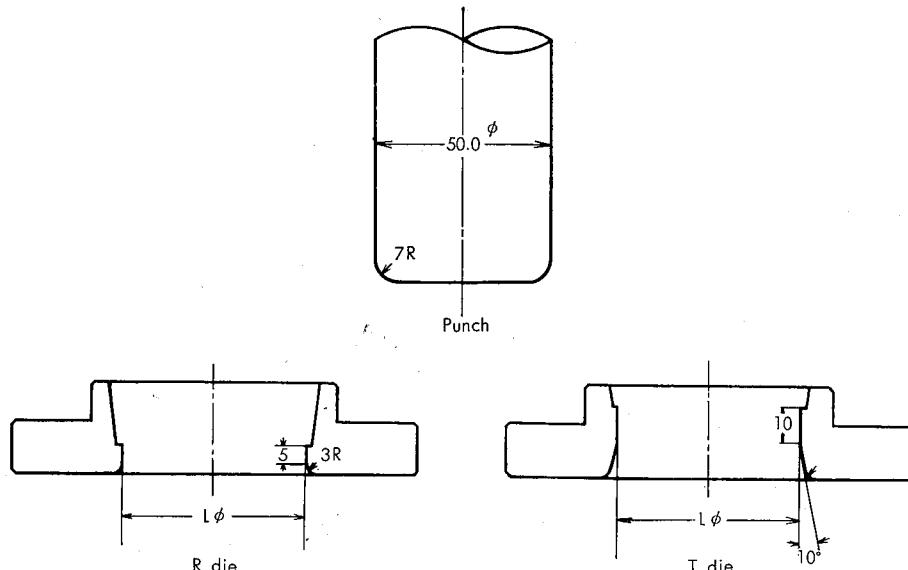


Fig. 2 Details of forming tools.

Table 2 Details of tool dimensions

Punch	Diameter, Lmmφ	Punch Radius, mm
	50.00	7

Die	Diameter, Lmmφ			Die Radius, mm	Taper angle, degree	Reduction Ratio, %
Thickness	0.5t	1.0t	2.0t			
Drawing	51.20	52.40	54.80	3		-20
	50.96	51.92	53.84	3	10	0
	50.84	51.68	53.36	3	10	4
	50.72	51.44	52.88	3	10	16
	50.60	51.20	52.40	3	10	28
	50.48	50.96	51.92	3	10	40
		51.68	3	10	52	
		51.44	3	10	58	
		51.20	3	10	64	
		50.66	3	10	70	
		50.84	3	10	76	
		0.725	3	10	79	
		50.60	3	10	82	
						85

の2種類を使用した。しごき率が決定されるダイスの有効内径の詳細はTable 2に示す。

・潤滑剤、しわ押え：潤滑剤はジョンソンワックスNo. 150の稀釀液（ワックス：水=1:1）をプランクの両面に塗布して使用した。平板絞りのしわ押え力はエリクセン機、クラシックプレスともプランクにしわが発生しない最低限を使用した。しわ押え方式は前者は油圧であり、後者は空気圧によるダイクションでいずれも定圧式である。

### 2.3 使用記号一覧

- $d_p$  : ポンチ直径 mm
- $d_d$  : ダイス穴直径 mm
- $D$  : プランク直径 mm
- $D_{max}$  : 成形可能な最大プランク直径 mm
- $t_0$  : 加工前板厚 mm
- $t$  : 加工後板厚 mm

$h$  : 容器高さ mm

L.D.R : 限界絞り比 =  $D_{max}/d_p$

$R_e$  : しごき率 (板厚減少率) =  $\frac{t_0 - t}{t_0} \times 100 (\%)$

$F_{max}$  : 最大加工力 kg

$W$  : 仕事量 kg·m

$S$  : ポンチストローク mm

## 3. 実験結果

### 3.1 一段しごき加工

平板絞りに対するしごきの効果を定量的に把握するため、またしごき加工の基本的な諸特性を理解するために一段しごき加工の実験をおこなった。

#### 3.1.1 限界絞り比の測定

変動要因として〔A〕工具形状：RダイスとTダイス  
〔B〕加工速度：3mm/sec, 200mm/sec および 400mm/sec の3種類  
〔C〕板厚：2.0, 1.5, 0.5 (mm) の3種類を採用し各々について同時加工、分離加工をおこなった。結果をそれぞれ Fig. 3, 4, 5 に示す。なお比較基準の通常絞りのクリアランスは板厚の1.2倍を使用した。したがってしごき率の定義から通常絞りのしごき率は-20%となる。また分離加工のL.D.R は前段の平板絞り加工のそれに規制されるために通常絞りに比べて L.D.R の向上が期待できるのは同時加工の場合である。まず Fig. 3 の工具形状に関して、Rダイスではしごき率0~20(%)の範囲で L.D.R は0.05ほど増加するが40%以上のしごき率になると L.D.R は急激に低下する。分離加工ではしごき率20~30(%)で L.D.R の低下がはじまりしごき率の増加とともにあって急激に低下する。いっぽうTダイスでは同時加工の場合でも L.D.R の向上はみられずしごき率40%まで通常絞りの L.D.R とまったく等しい値を示す。分離加工ではし

しごき率50%まで同じように通常絞りのL.D.R.が持続する。したがって工具形状に関しては20%までの低いしごき率の範囲ではRダイスの同時加工を、またしごき率40%以上ではTダイスを使用するのがよい。つぎにFig. 4の加工速度の影響については、同時加工の場合、加工速度の影響は低いしごき率の範囲ではそれほど顕著でなく、しごき率30%以上になると速度3mm/secの低速加工のL.D.R.低下が他に比べて大きくなる。分離加工ではしごき率30%以上での低速加工のL.D.R.低下がさらに大きくなり、速度200mm/secと400mm/secとの差はほとんど認められない。またしごき率30~40(%)の範囲で高速加工のL.D.R.は低速

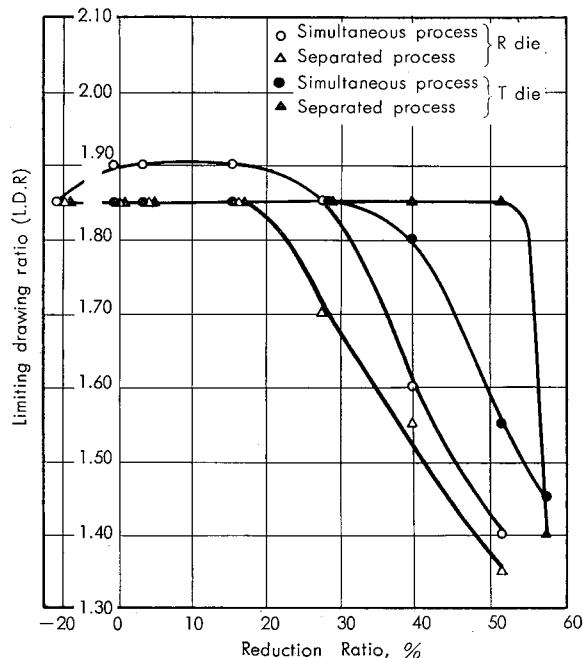


Fig. 3 Effect of tool profile on the L.D.R.

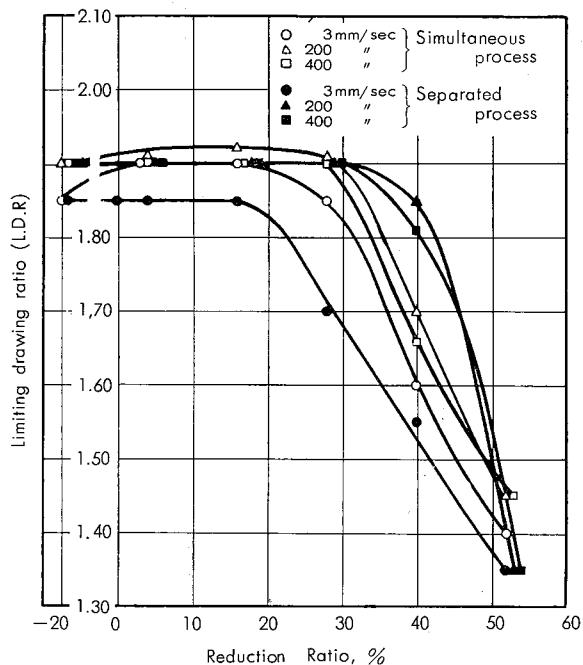


Fig. 4 Effect of forming velocity on the L.D.R.

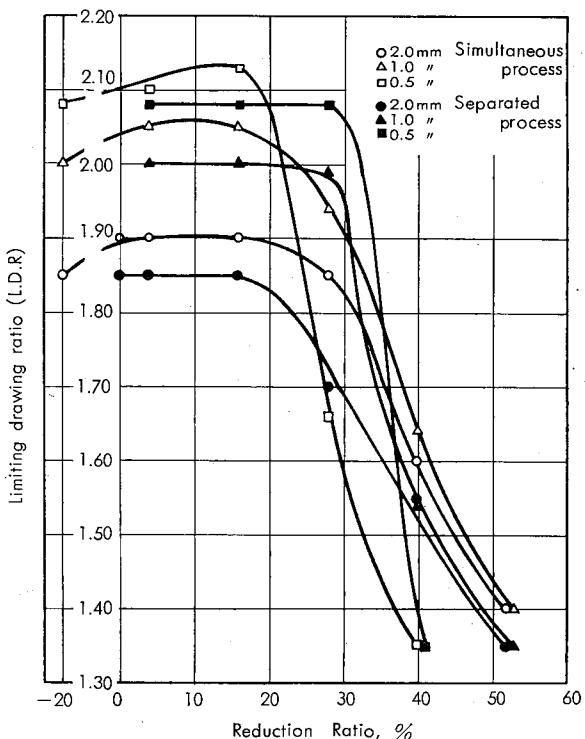


Fig. 5 Effect of thickness on the L.D.R.

加工のそれに比べて低下の度合が著しく減少する。以上加工速度の結果の総括として、まず平板絞りにおいて低速加工のL.D.R.は高速加工の場合より0.05ほど低い値を示すがしごき率30~40(%)の範囲ではほぼ同じ値になり、40%以上になるとL.D.R.低下の度合が大きくなる。したがって速度効果に関しては低速加工の場合ほどしごき率の影響を敏感に受けるものと考えられる。Fig. 5の板厚の影響に関してはまず平板絞りのL.D.R.は板厚の薄いものほど値は大きくなっている。これは深絞り加工における寸法効果の現象を示している。しごき率4~20(%)の範囲で各板厚とも0.05ほどL.D.R.は増加するが20%以上のしごき率になると減少がはじまり30%以上になるとこの傾向はさらに強調される。分離加工では同時加工におけるほど板厚の影響は顕著ではない。

### 3.1.2 荷重線図、最大加工力および仕事量

板厚2mm、プランク径80mm $\phi$ 、加工速度3mm/secで求めた荷重線図をFig. 6, 7, 8, 9に示す。まず同時加工でのRダイスとTダイスの比較ではRダイスの場合、最大荷重に到達して後の挙動が単調であるのに対してTダイスでは挙動が非常に複雑である。特に行程末期における荷重の増加がRダイスでは瞬間的であるのに対してTダイスではある範囲内で持続するのが大きな特徴である。つぎに分離加工ではRダイスの最大荷重範囲がより極値的である事以外はR、T両ダイス間に傾向的な差異は認められない。また同時加工と分離加工の比較では同時加工の最大荷重が全行程のほぼ半分にわたる範囲で持続するのに対して分離加工のそれは非常に極値的である。なおFig. 6~7

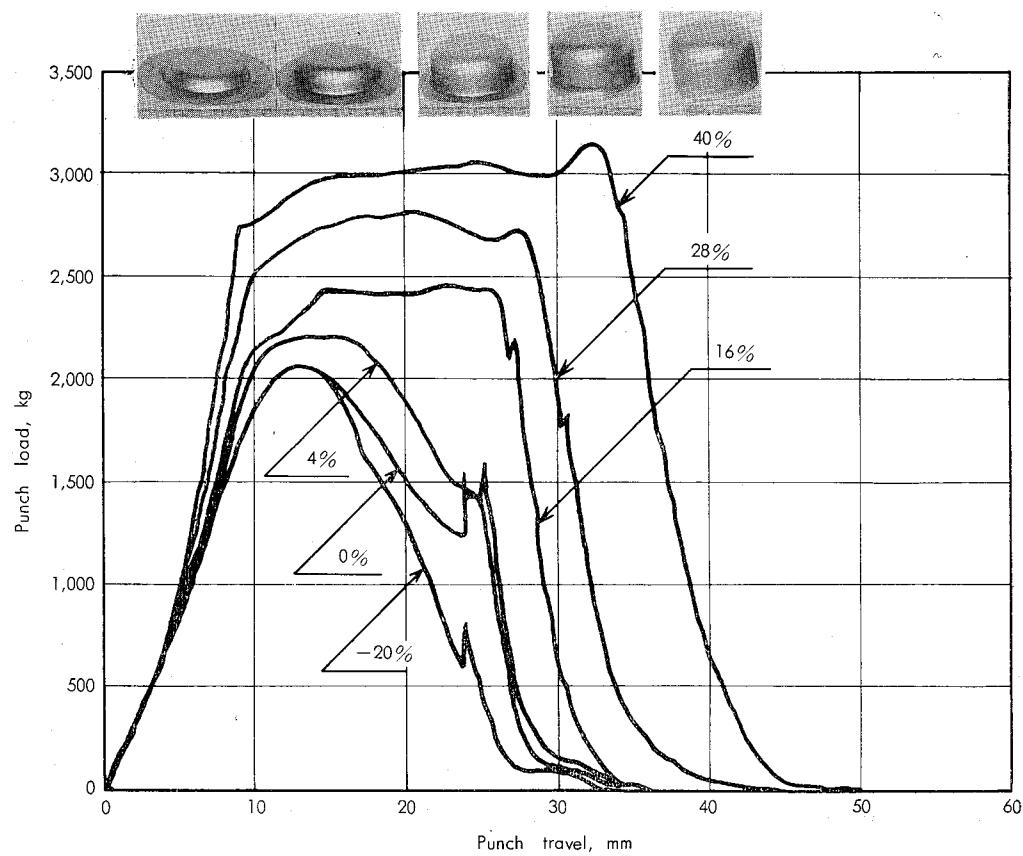


Fig. 6 Punch load/travel diagrams of simultaneous process using R die.

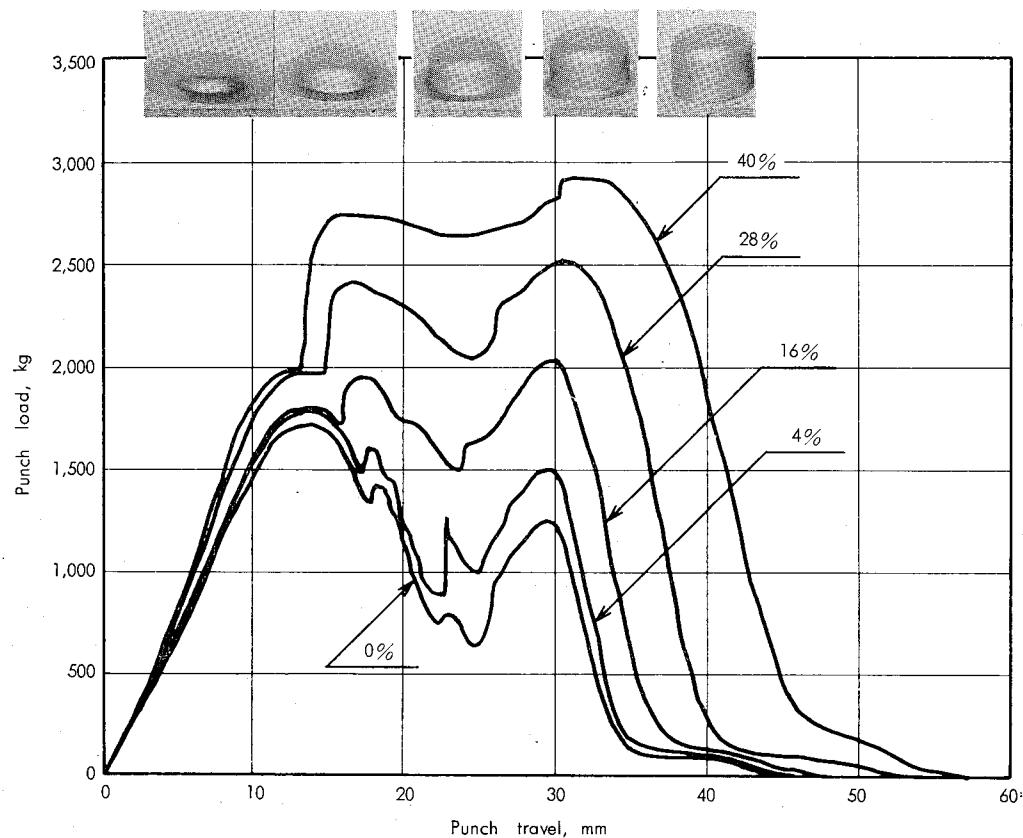


Fig. 7 Punch load/travel diagrams of simultaneous process using T die

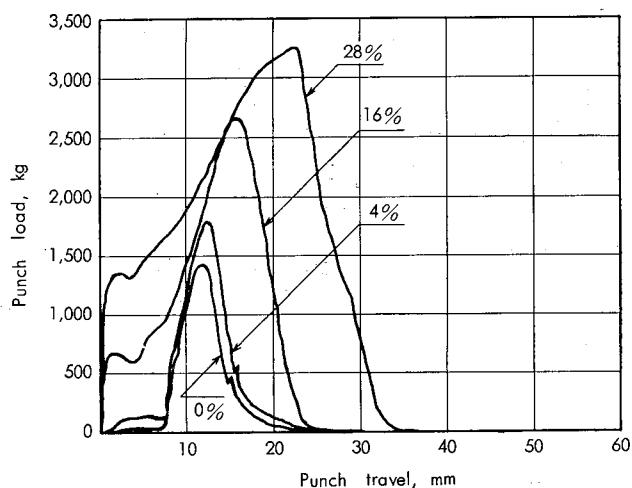


Fig. 8 Punch load/travel diagrams of separated process using R die

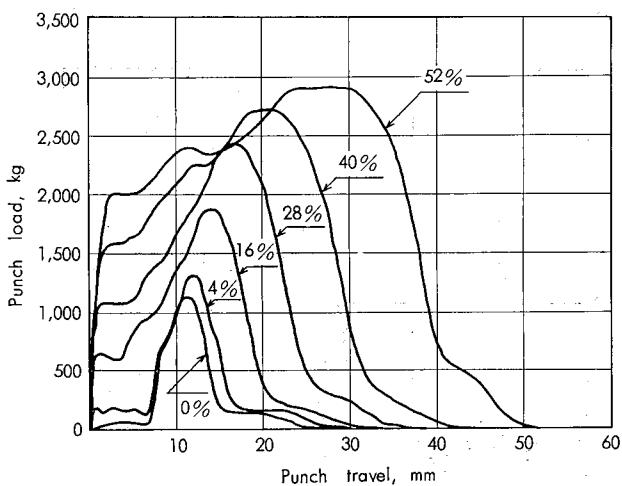


Fig. 9 Punch load/travel diagrams of separated process using T die

の荷重曲線から算出した最大加工力および仕事量の結果を Fig. 10, 11 に示す。Fig. 10 が同時加工、Fig. 11 が分離加工の結果である。図中に示した分離加工の値はしごき加工単独のものであり、総仕事量を考える場合はこれに平板絞り段階の値を加える必要がある。まず同時加工の場合、最大加工力は R, T 両ダイスともしごき率の増加にともなって比例的に増加する。(その範囲は 1200kg~3200kg である。) R ダイスと T ダイスの比較ではしごき率 20% 以下の低しごき率の範囲では 400kg, 30~40% の範囲で 200~300kg ほど R ダイスの方が大きな値を示す。つぎに加工に要する仕事量はしごき率の 2 乗にほぼ比例しており 35kg·m から 95kg·m の範囲である。R ダイスと T ダイスとの間にはほとんど差が認められない。いっぽう分離加工の場合は、最大加工力、仕事量ともにその値の変動形態は同時加工のそれに類似しているが、R ダイスと T ダイスの比較においては大きな差が認められる。すなわち最大加工力、仕事量ともしごき率が増加するのにともなって R ダイスの値は T ダイスのそれに比べて大きく増加している。なお同時加工と分離加工の総仕事量の比較ではすべてのしごき率に

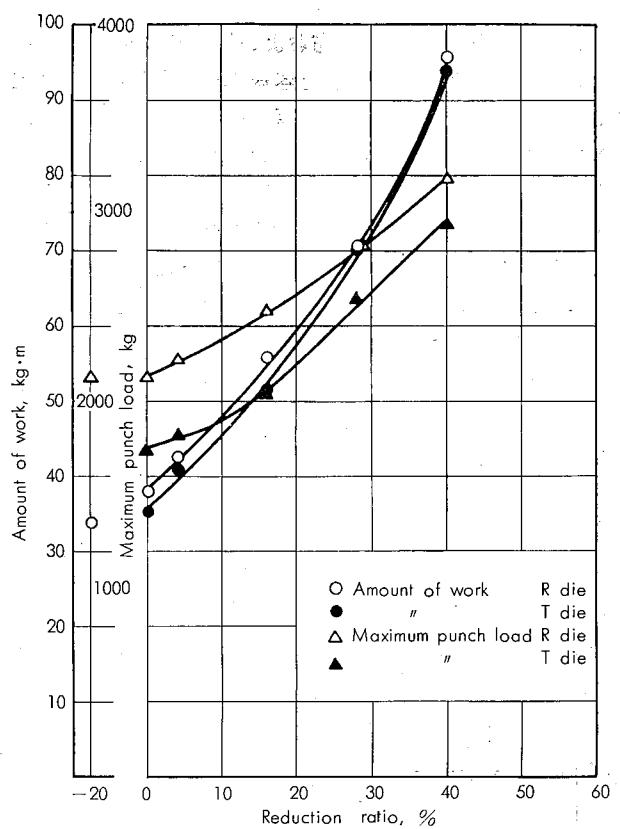


Fig. 10 Maximum punch load and the amount of work in the simultaneous process

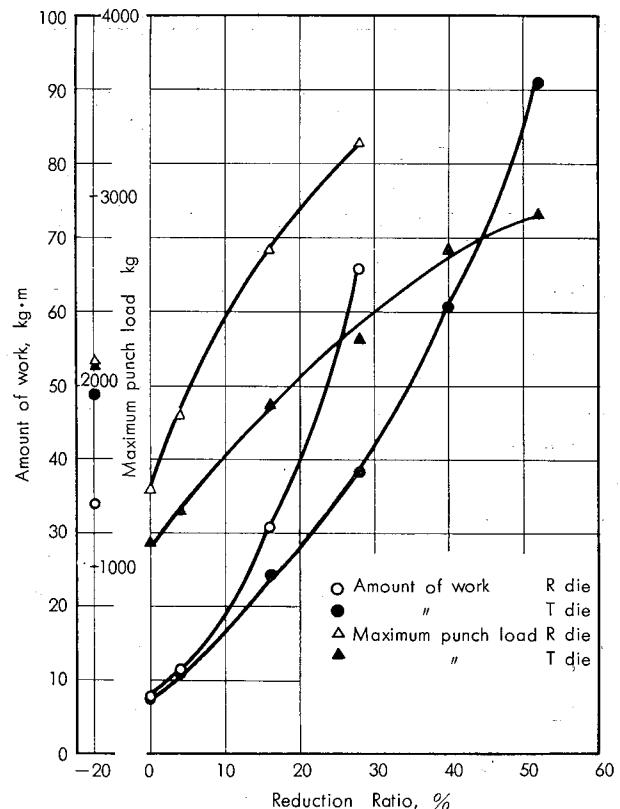


Fig. 11 Maximum punch load and the amount of work in the separated process

79%でこのときの平板絞りのしごき率は58%, L.D.R. は1.35である。Tダイスの最適加工条件は平板絞りのしごき率30~40(%)で最終しごき率は60~70(%), L.D.R. は1.85である。以上の結果より2段しごき加工ではTダイスの方がRダイスに比べてはるかに有利である。

### 3・2・2 3段しごき加工

3段しごき加工の実験結果をFig. 21, 22に示す。Fig. 21がRダイス, Fig. 22がTダイスである。3段しごき加工の実験では平板絞りを0%の条件でおこなってのち2段、3段のしごき率を変化させた。まずRダイスの場合、2段しごき加工に比べてL.D.R. およびしごき率にほとんど変化はみられない。すなわち3段しごきによる加工性の向上はなく2段しごき加工で加工性の劣った条件のものがある程度改善されるにすぎない。Tダイスについては2段しごき加工よりも全体的にわずかに加工性は向上している。

結局3段しごき加工において平板絞りの加工条件をしごき率0%にするかぎり2段しごき加工に比べて加工性が飛躍的に増加することはなく3段しごき加工の意義は認められない。

### 3・2・3 最適加工条件の設定

本項では3・2・2までの実験結果、および4段以上のしご

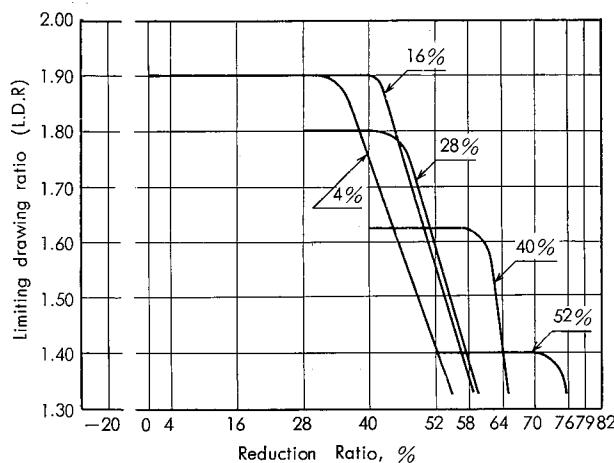


Fig. 21 L.D.R. in three-stage process using R die

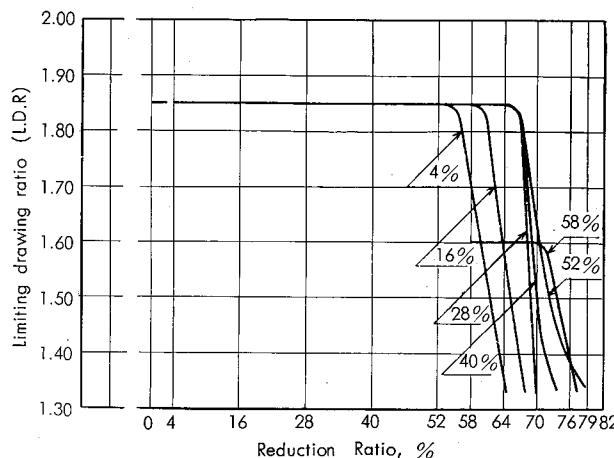


Fig. 22 L.D.R. in three-stage process using T die

き加工をおこなって最適加工条件(L.D.R. しごき率の大きいもの)の設定をおこなった。結果から加工性のすぐれた加工条件を数種類選んでTable 3, 4 およびFig. 23, 24に示す。Table 3, Fig. 23がRダイス、Table 4, Fig.

Table 3 Optimum ironing process using R die

Condition Notation	Blank diameter, mm $\phi$	First ironing, %	Second ironing, %	Third ironing, %	Cup height, mm
A	92.5	-20	16		41.0
B	92.5	4	40		55.0
C	95.0	16	40		60.0
D	92.0	29	52		68.5
E	95.0	0	4	28	49.5
F	95.0	0	16	40	59.5
G	82.5	0	40	58	53.0
H	70.0	0	52	70	41.5

Table 4 Optimum ironing process using T die

Condition Notation	Blank diameter, mm $\phi$	First ironing, %	Second ironing, %	Third ironing, %	Fourth ironing, %	Cup height, mm
a	92.5	0	4	52	—	68.5
b	92.5	0	16	58	—	77.0
c	92.5	0	52	64	—	89.0
d	92.5	-20	52	—	—	68.5
e	92.5	4	58	—	—	77.0
f	92.5	28	64	—	—	89.0
g	70.0	58	79	—	—	54.5
h	92.5	16	58	64	—	89.0
i	90.5	28	58	64	70	96.0
j	87.5	40	64	70	—	86.0
k	77.5	52	70	76	79	81.0
l	70.0	58	76	82	—	63.0

24がTダイスである。まずRダイスについて、Fig. 23より容器高さが一番高いのは実験記号Dの68.5mmであり、この加工工程は平板絞りで28%, 2段しごきで52%のしごきをえたものである。また最大しごき率が付加できる加工条件は記号Hの70%でありこのときのL.D.R. は1.4、容器高さは41.5mm、工程は平板絞り0%，2段しごき52% 3段しごき70%の3段しごき加工である。つぎにTable, Fig. から明らかなように2段しごき加工と3段しごき加工との間に加工性の有意差は認められない。したがって本実験の範囲ではRダイスのしごき加工は2段しごき加工が限度と考えられるが途中に軟化工程を採用する場合などはこの限りでない。いっぽうTダイスについては容器高さが一番高い条件は記号iであり、加工工程は平板絞り28%, 2段しごき58%, 3段しごき63%, 4段しごき70%である。

そのほか3段しごき加工でも記号c, f, h のように相当高い容器が得られる。また最大しごき率は記号k, l で値はほぼ80%である。全般的にTダイスの場合はRダイスに比べて広範囲にわたる加工条件で秀れた加工性が得られる。加工回数については回数の増加とともに加工性も向上する傾向にありRダイスの場合とは異なった結果である。

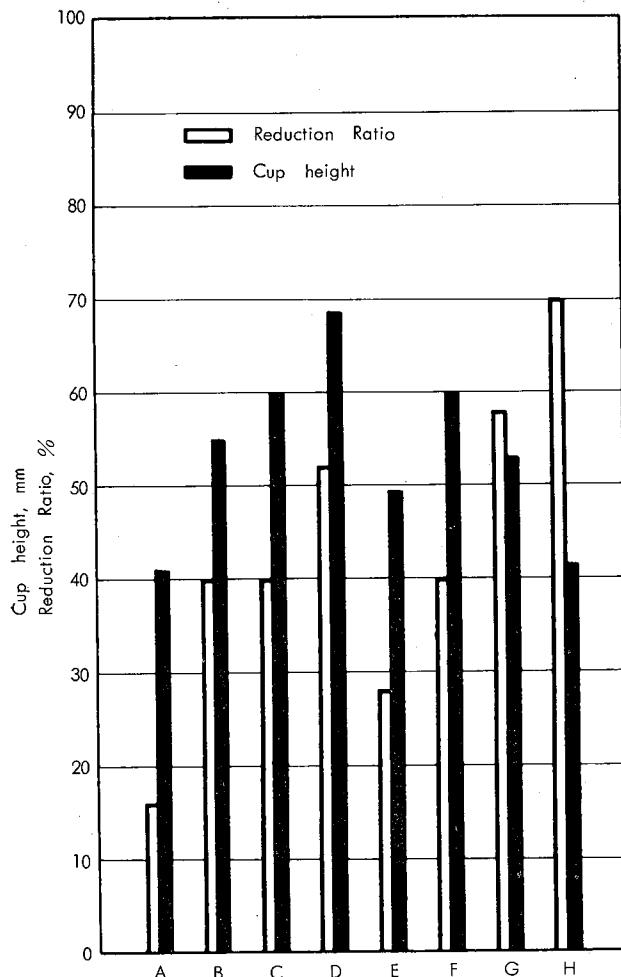


Fig. 23 Maximum value of cup height and reduction ratio on the optimum process. R die

#### 4. 考 察

工業的純アルミニウム板のしごき加工実験結果について考察する。まず1段しごき加工について、平板絞りの段階で0~20(%)のしごきを付加した場合 L.D.R が 0.05ほど増加しているが、これは通常絞りのクリアランスを採用した場合、行程末期に容器側壁部上端の板厚増加が著しくなって抵抗が大きくなり荷重牽引部に過大な加工力が集中して破断する。これに対してある範囲内のしごきを付加した場合は板厚の増加を妨げること、およびしごきによる摩擦力の作用によって荷重牽引部に加工力が集中するのを緩和することなどにより L.D.R が増加すると考えられる。しかしながらしごき率がある範囲以上の値になると抵抗が過大になってその箇所で破断する。この両者の兼合いによって最適なしごき率範囲が存在することになる。つぎに工具形状に関して、Rダイスの場合、しごきはダイスのR状肩部によって、Tダイスではダイスの有効径に至るテーパー部分の長さと角度によって規制される。本実験条件（ダイス肩部半径3, テーパー角度10°）の場合は明らかにTダイスの方が連続してしごきを被る容器側壁部の範囲は広い。すなわち同じしごき率の場合でもTダイスの方が広範

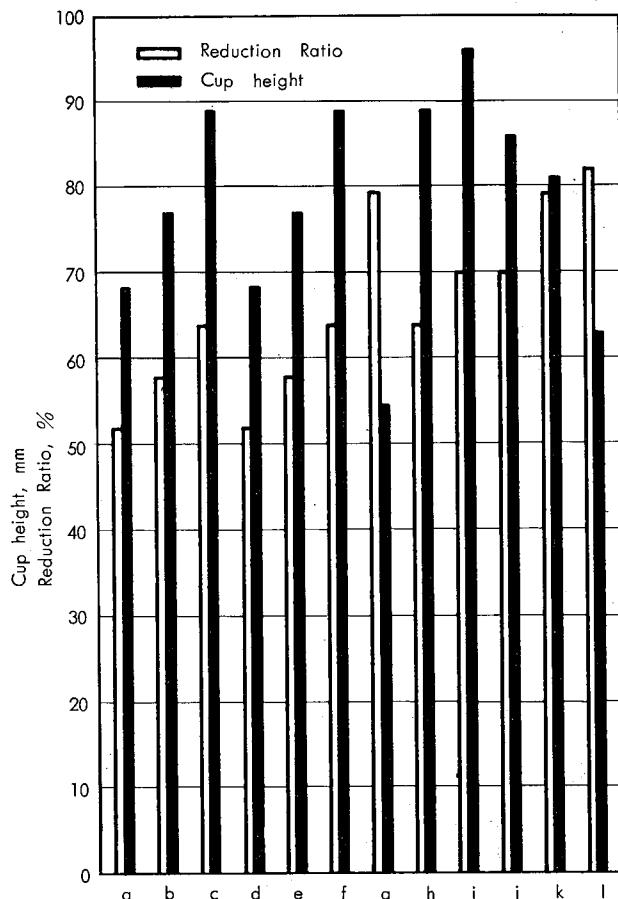


Fig. 24 Maximum value of cup height and reduction ratio on the optimum process. T die

団にわたって段階的にしごき作用を受けるために局部的に、瞬間にしごき作用を受けるRダイスに比べて有利であり、加工力の集中緩和という見地からもTダイスの方が同時に加工を受ける部分が大きいためにより効果的である。もちろん以上の考察はRダイスの肩部半径の増大あるいはTダイスのテーパー角度の変化などによって変動し得るものである。各種条件下における本実験結果は上記考察を満足するものである。

加工速度の影響については本実験で採用した速度範囲において高速の方が加工性は良好であったがこれは速度効果によって潤滑条件に差異が生じたためと考えられる。すなわち高速になるほど加工面にひきこまれる潤滑剤の量が増加する。

供試材の板厚に関しては、通常絞りおよび低いしごき率の範囲で板厚の薄い方が加工性が秀れた結果が得られたがこれは寸法効果（ポンチ直徑に対する板厚比）によるものである。したがって本実験で使用したポンチ直徑 50mmφよりも大きなポンチで加工する場合は本実験結果は変動する可能性がある。

同時加工と分離加工の比較において、同時加工の方が秀れた結果が得られたが、これも加工速度の場合と同様に潤滑条件の差に基づくものと考えられる。すなわち同時加工

の場合は材料とダイス間の潤滑剤がそのまま封入されて加工面にスムースに移動されるのに対して分離加工の場合は容器側壁部につけられた潤滑剤がダイスとの初期の接触段階でこさぎ落されて加工面に移動する潤滑剤の量が極端に減少する。

つぎに最大加工力、仕事量の結果について、各種条件下においてRダイスの方がTダイスよりも最大加工力が大きいのは先に考察した両者の加工形態の差に基づくものと考えられる。仕事量について同時加工の場合R、T両ダイス間に差はないが分離加工でRダイスの仕事量が大きく増加するのは先述の潤滑条件の差が主原因と考えられる。

板厚分布、加工硬化の測定結果から分離加工のRダイスである範囲以上のしごきを付加した場合、容器底部の板厚が減少して加工硬化が大きくなっているが、この現象についても先述の工具形状による加工形態の相違が主原因と考えられる。すなわちRダイスでは瞬間的、局部的に加工がおこなわれるために大きなしごき率を付加する場合、容器底部がダイス肩部に接触した段階で半径方向に強い引張変形をうけることになる。

つぎに多段しごき加工については1段しごき加工で考察した諸項が重畠されて、Rダイスの場合の経済的な加工条件は2段しごき加工までであり、しごき率も50%が限度である。これに対してTダイスの場合は経済的な加工条件は4段しごきまで可能であり、しごき率も70~80(%)まで付加できる。

なおPhoto. 3に最適条件で加工した容器を、Photo. 4にその板厚変化の状態を示す。

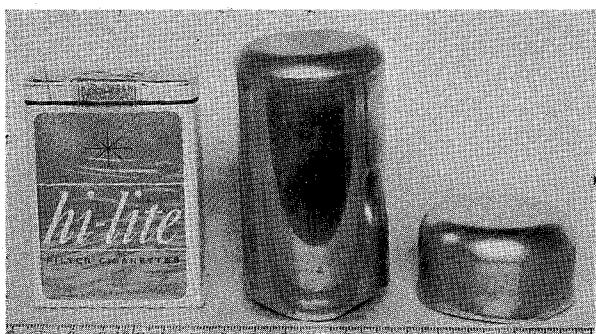


Photo. 3 Appearance of products

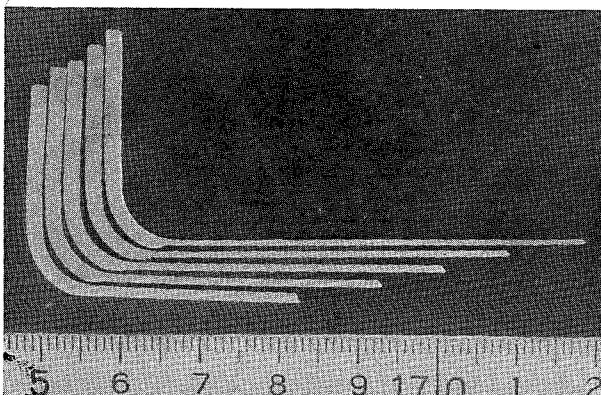


Photo. 4 Appearance of cross-sections of products

## 5. 結論

純アルミニウム板のしごき加工に関する実験をおこなった結果以下の事が明らかとなった。

1. 深絞り加工において工具間クリアランスを変化させた場合の限界絞り比(L.D.R)の変動を定量的に把握できた。一般にしごき率0~30(%)の範囲で通常絞りに比べてL.D.Rは0.05~0.10増加する。また板厚比(板厚/ポンチ直径)、加工速度が加工限界に相当影響することがわかった。

2. 多段しごき加工の最適加工条件の設定をおこなった。Rダイスの場合は2段しごき加工が限度である。工程は1段しごき28%、2段しごき52%のしごき率で、L.D.Rは1.85である。Tダイスの場合は4段しごき加工まで可能であり、L.D.R 1.85で加工工程は、1段28%，2段58%，3段64%，4段70%のしごき率である。また2段および3段しごき加工でもRダイスよりも秀れた加工性を示しておりしごき加工に関してはTダイスの方がはるかに有利である。

3. 荷重曲線の作製、最大加工力および仕事量の算出結果からRダイスとTダイスの変形形態が異なることがわかった。所要最大加工力、仕事量の面でもTダイスの方が有利である。

4. 製品容器の板厚分布、加工硬化度の測定結果から、Rダイスの場合、しごき率が30%以上になると容器底部の板厚が10%ほど減少する。また側壁部の加工硬化量もTダイスの場合に比べて大きくなっている。この現象もRダイスの加工限界が低下する一要因と考えられる。

## 文獻

- 1) 春日保男、音田一造: *Ia metallurgia italiana n. 8 (1868)*, 745
- 2) G.S.A. Shawki, BEng. PhD, Amimeche: *Sheet Met. Ind.* Sept (1970), 855

R140

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS Vol. 12 No. 4 OCT. 1971

技 術 資 料

各地区の水道水によるアルミニウム板材の腐食

萩 原 理 樹

住友軽金属工業株式会社

# 各地区の水道水によるアルミニウム板材の腐食

萩 原 理 樹\*

## 1 はじめに

アルミニウムの水による腐食が、水質によって大きく影響されることは広く知られているが、実際の腐食現象が地域によってどのように異なるか、また、水を対象とした場合の有効な表面処理としてはどのようなものが良いかなどについて総合的に調査した資料は少ない。

本資料は温水器、浴桶、タンクなど室温の水または温水を対象とした場合の腐食現象を調査する目的で、全国各地の水道水を用いて、各種板材について2年間試験した結果をまとめたものである。

## 2 試 料

材質 A70 (JIS 1070), AO (JIS 1200),  
3S (JIS 3003), 52S (JIS 5052),  
3SC (AA Alclad 3003)

寸法 1×50×80

- 処理 1). 無処理 (3SC のみ溶接材も含む)  
2). 9μ硫酸アルマイト→沸騰水封孔 (AO については硅酸ソーダ封孔も実施)  
3). MBV→硅酸ソーダ封孔 (AO については沸騰水封孔も実施)  
4). ベーマイト (3SC のみ実施)

- 5). テフロンコート (AO のみ実施)
- 6). 電着塗装 (AO のみ実施……下地処理は 9μ 硫酸アルマイトと MBV)
- 7). オイルシリコン樹脂塗布 (AO のみ実施)

## 3 試 験

条件	1). 室温および 80°C 水道水中に半浸漬 (ただし、80°C 水道水は恒温槽を用い、1日 8h 加熱、16h 放冷し、休日は室温に保持)
期間	2). 水は 3 日に 1 度更新、 6か月、1年、2年
地区	札幌、東京、静岡、名古屋、大阪、広島、新居浜、福岡

## 4 結 果

試験地区の水道水の分析結果は表 1 のごとくであった。2 年間までの試験で、腐食を生じたものは、室温では無処理材のすべてと一部表面処理材で、80°C では無処理材および表面処理材のごく一部であった。発生したピットの最大深さを各期間毎に測定した結果を図 1~3 に示した。また、表面に腐食その他の異常を生じた試料のすべてについて、表面外観状況を図 4~17 に示した。

表 1 各地区使用水の分析結果

地 国 成 分	札幌	東京	静岡	名古屋	大阪	広島	新居浜	福岡
PH	6.7	6.7	7.5	6.5	6.5	6.6	7.2	6.6
Mアルカリ(CaCO <sub>3</sub> ) ppm	56.0	25.5	49.0	7.0	22.5	5.5	32.5	7.5
硬度(CaCO <sub>3</sub> ) ppm	91.5	60.0	83.3	20.4	43.7	12.2	54.9	19.3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ppm	24.6	31.6	35.6	18.8	18.8	3.3	1.4	4.9
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ppm	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr
Cu <sup>++</sup> ppm	<0.003	0.014	<0.003	0.02	<0.003	0.009	<0.013	0.013
SiO <sub>2</sub> ppm	25.9	10.2	9.0	9.9	2.2	4.9	8.7	12.0
Fe ppm	0.01	0.13	0.02	0.13	0.23	0.09	0.03	0.26
Cl <sup>-</sup> ppm	27.1	11.9	3.9	5.5	16.8	8.0	9.0	10.8
蒸発残留物 ppm	213.5	125.2	138.3	47.4	102.8	30.2	91.4	50.0
導電率 μΩ/cm	298	184	201	70	163	48	147	71

\* 研究部

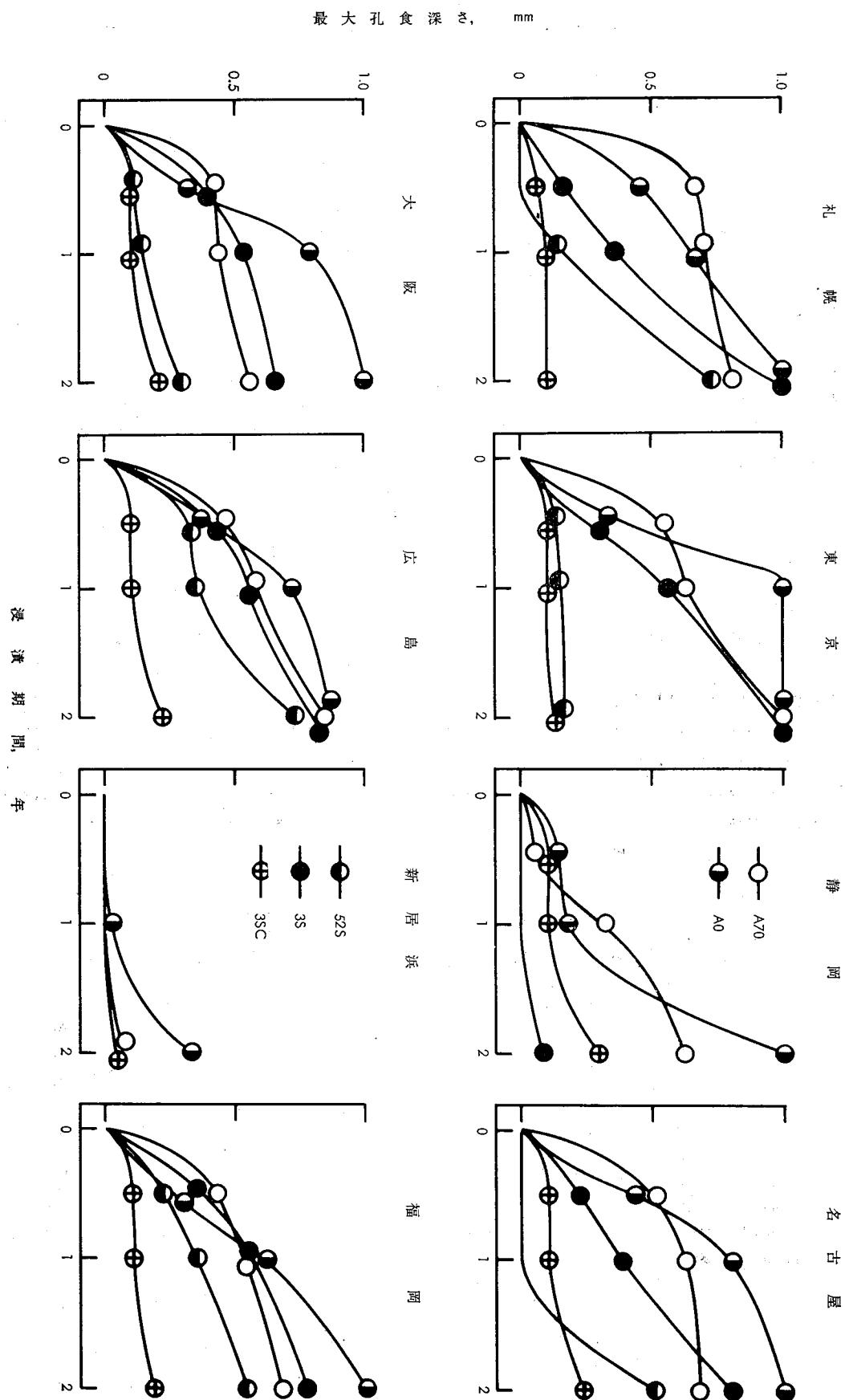


図1 無処理材の室温での最大孔食深さ

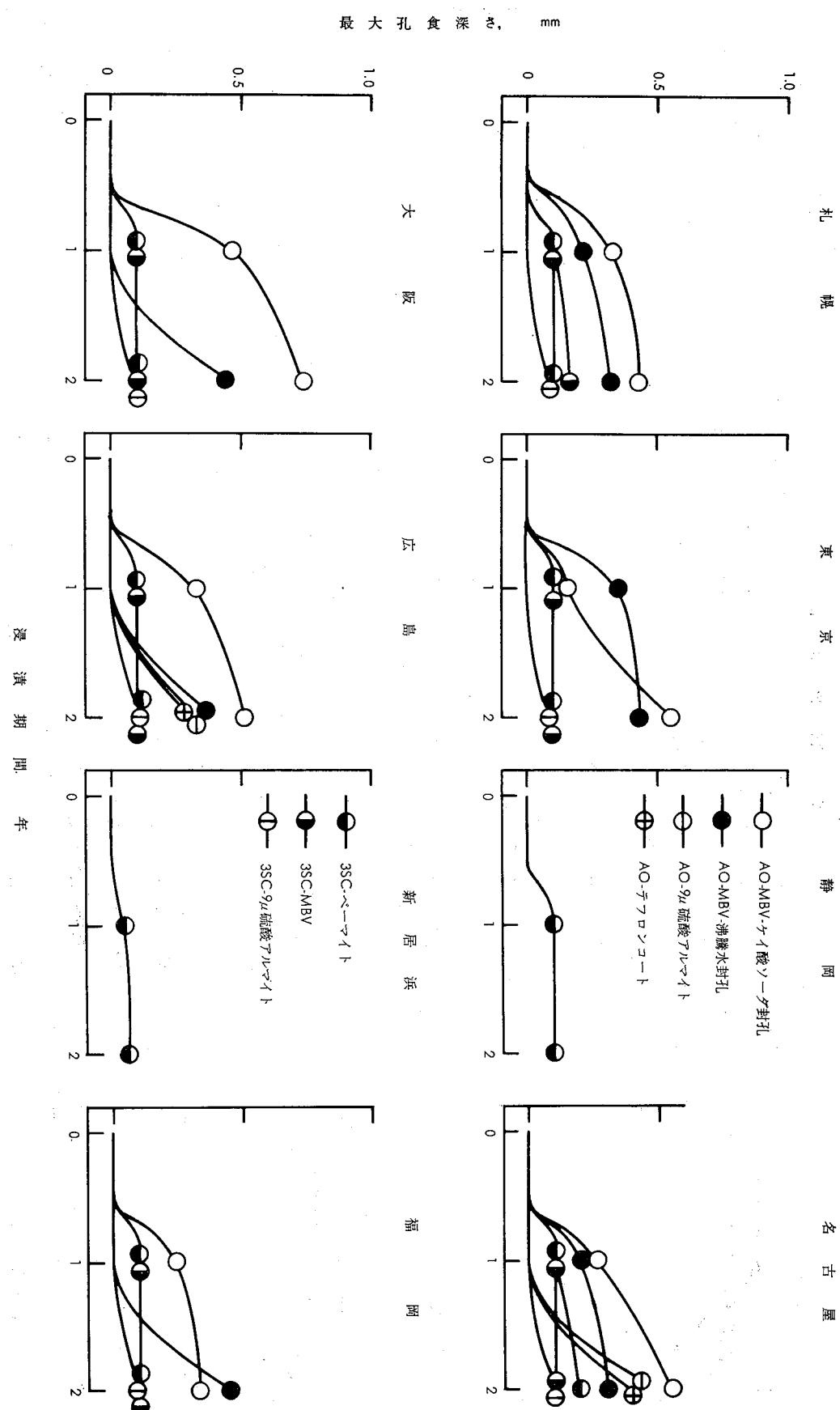


図2 表面処理材の室温での最大孔食深さ

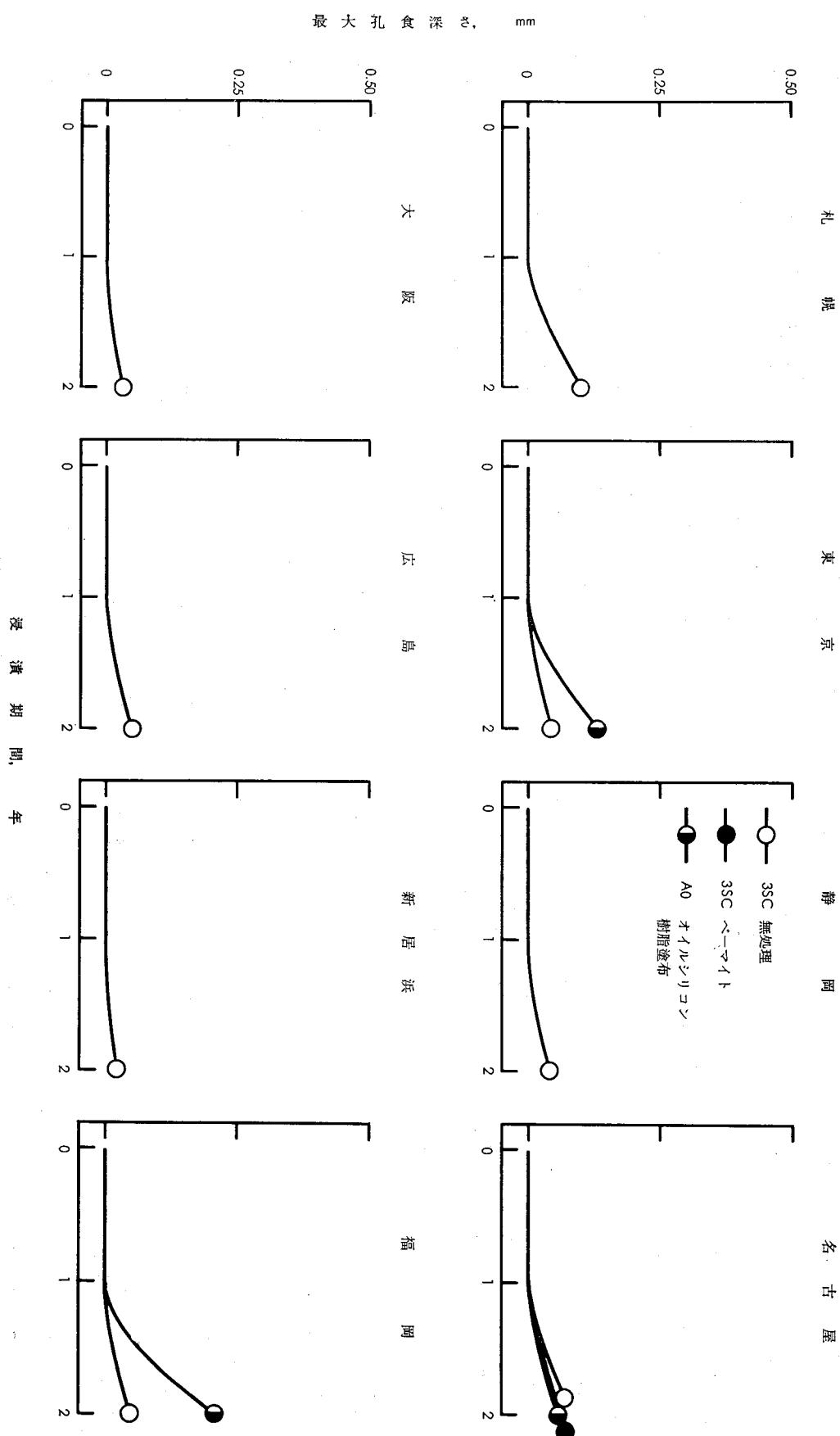


図3 80°Cにおける最大孔食深さ

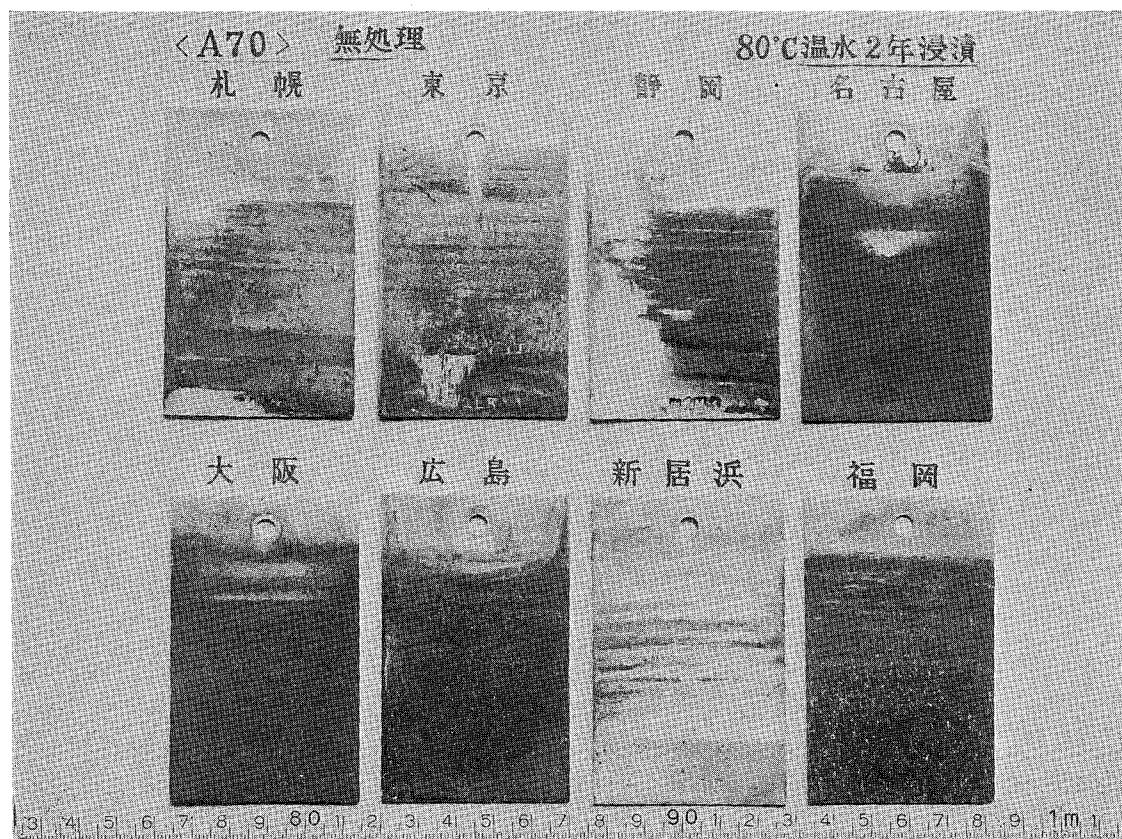
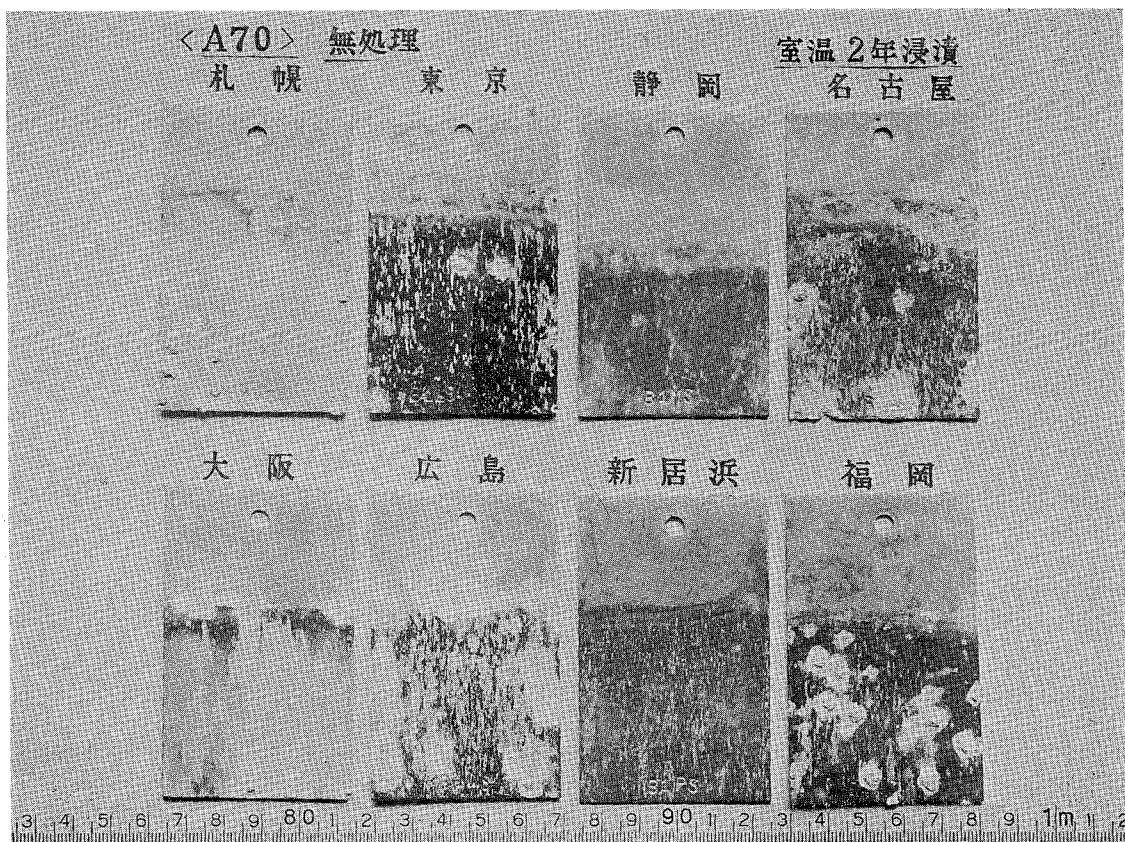


図4 A70 無処理材の外観状況

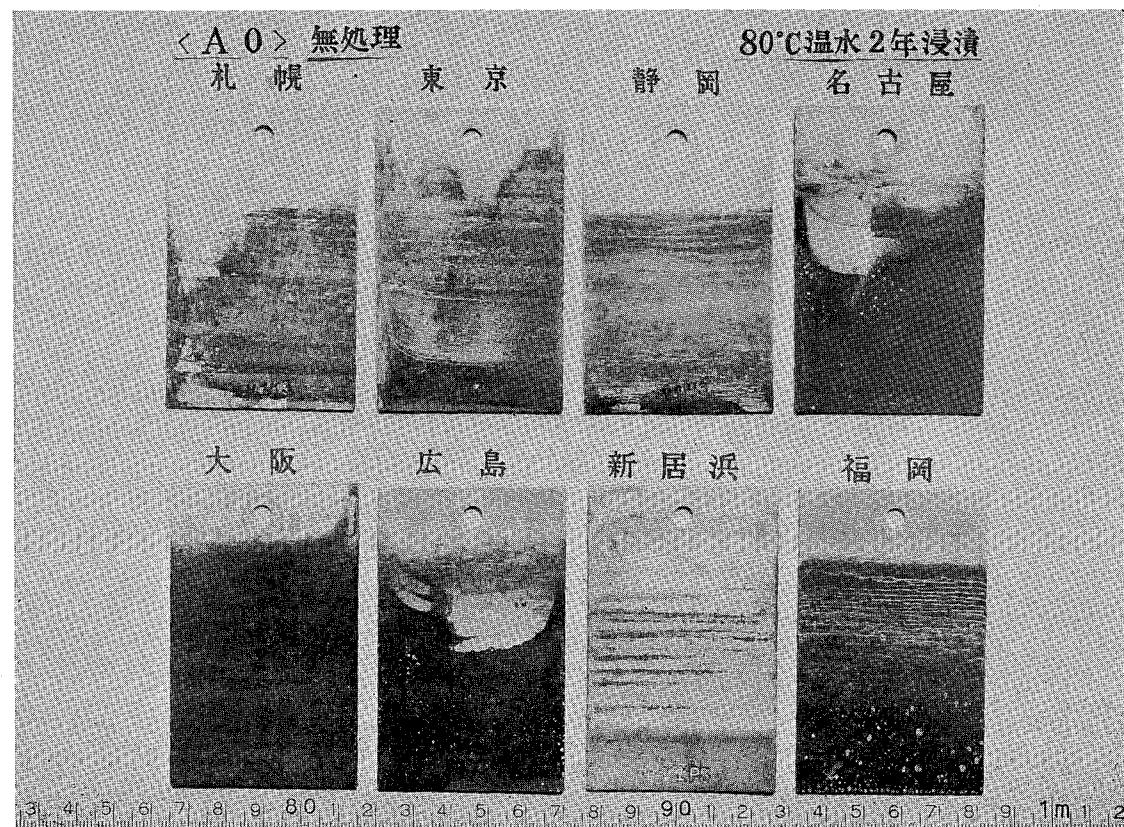
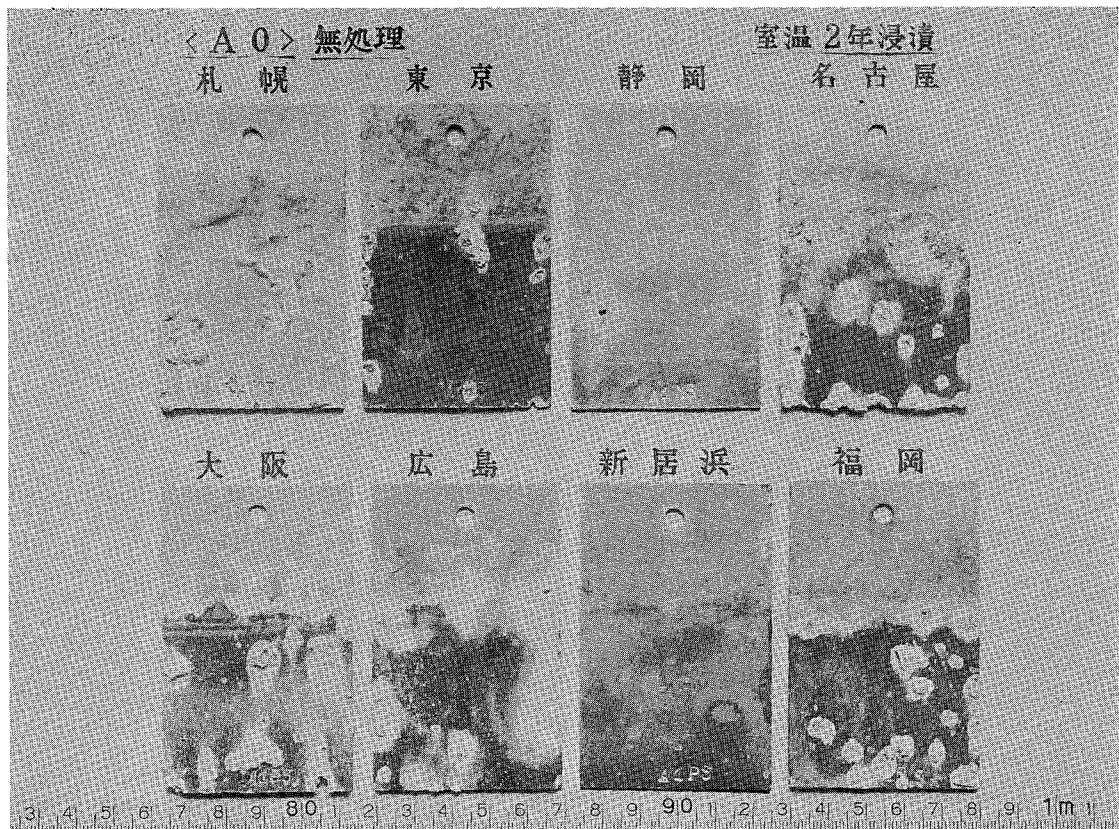


図5 AO 無処理材の外観状況

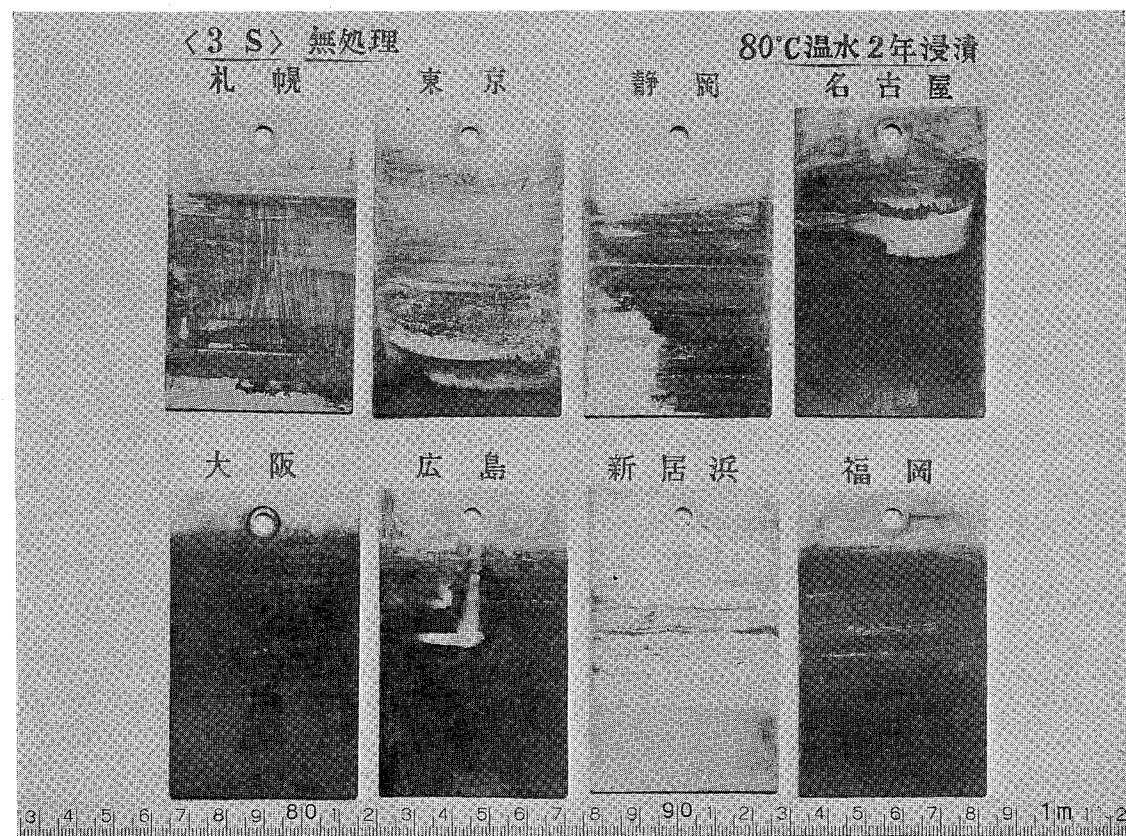
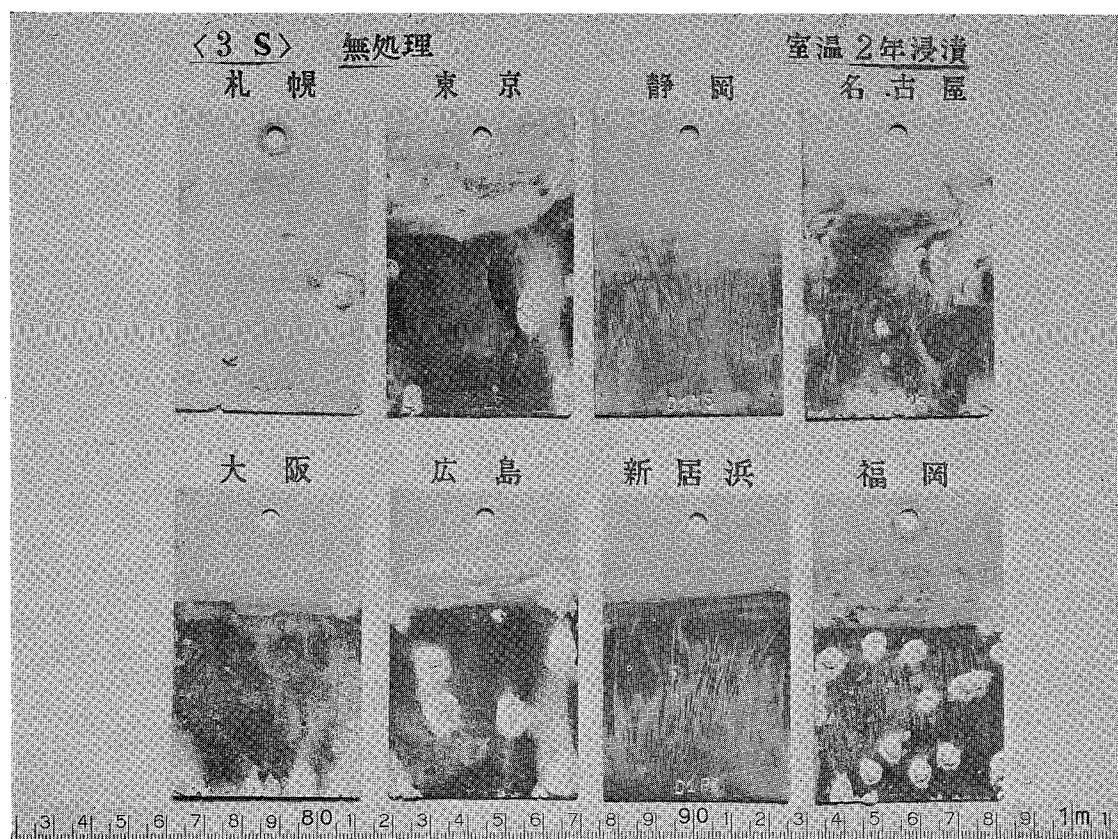


図6 3S 無処理材の外観状況

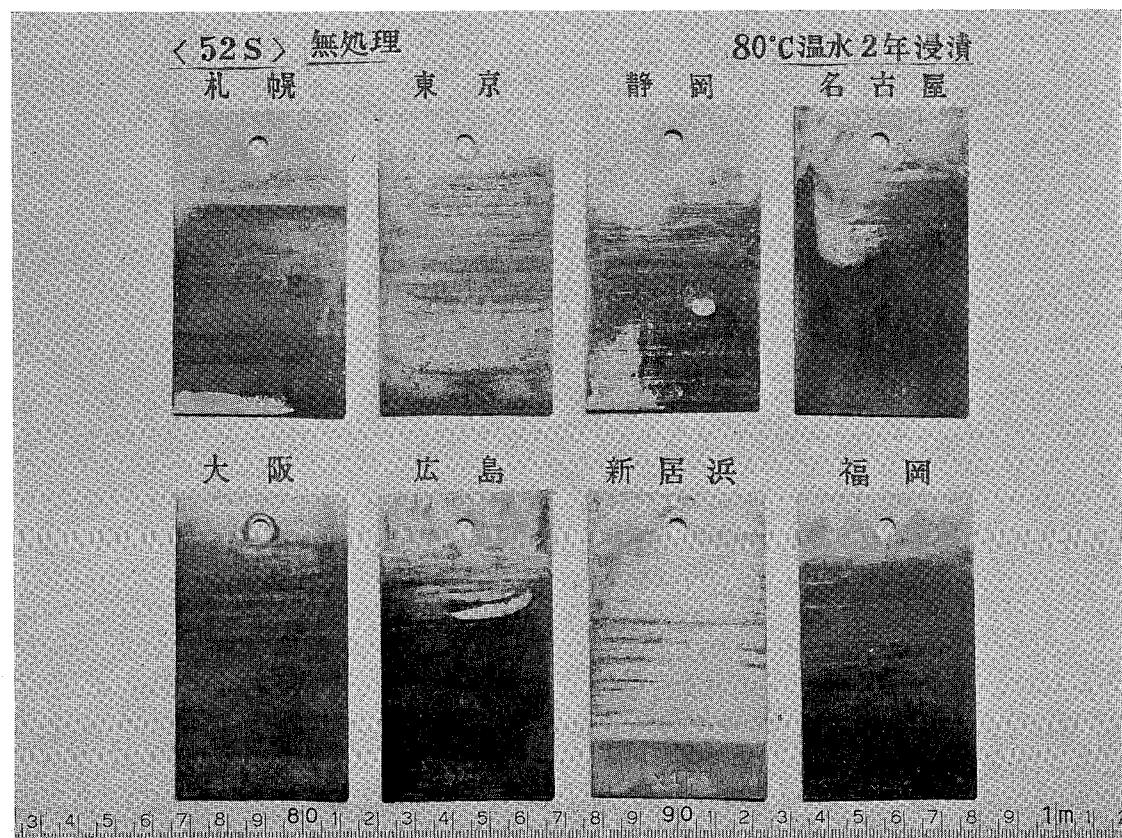
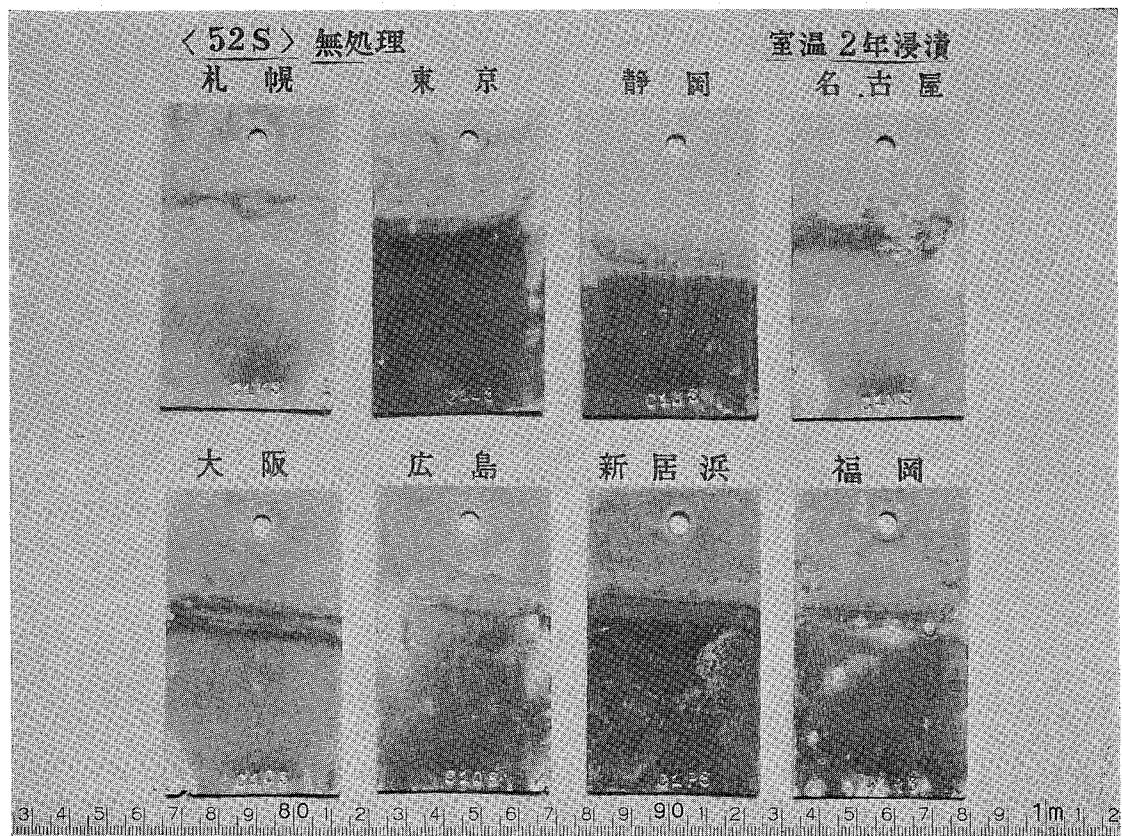


図7 52S 無処理材の外観状況

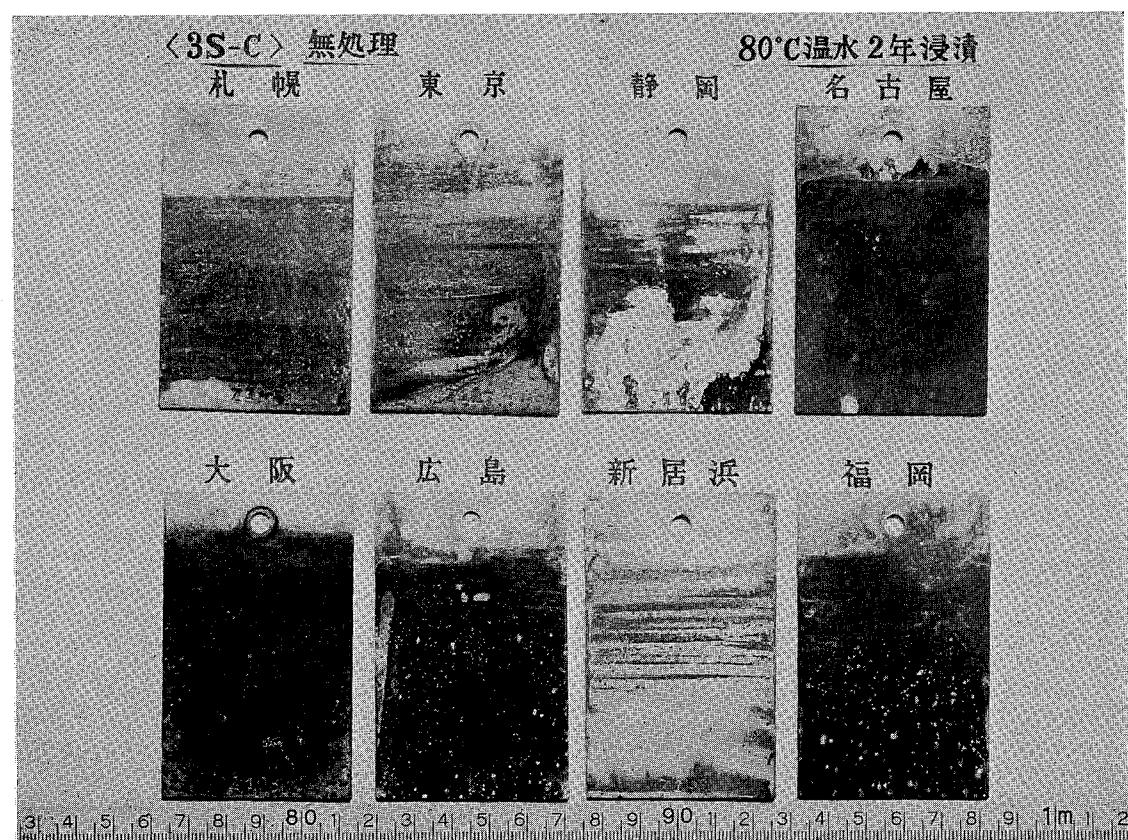
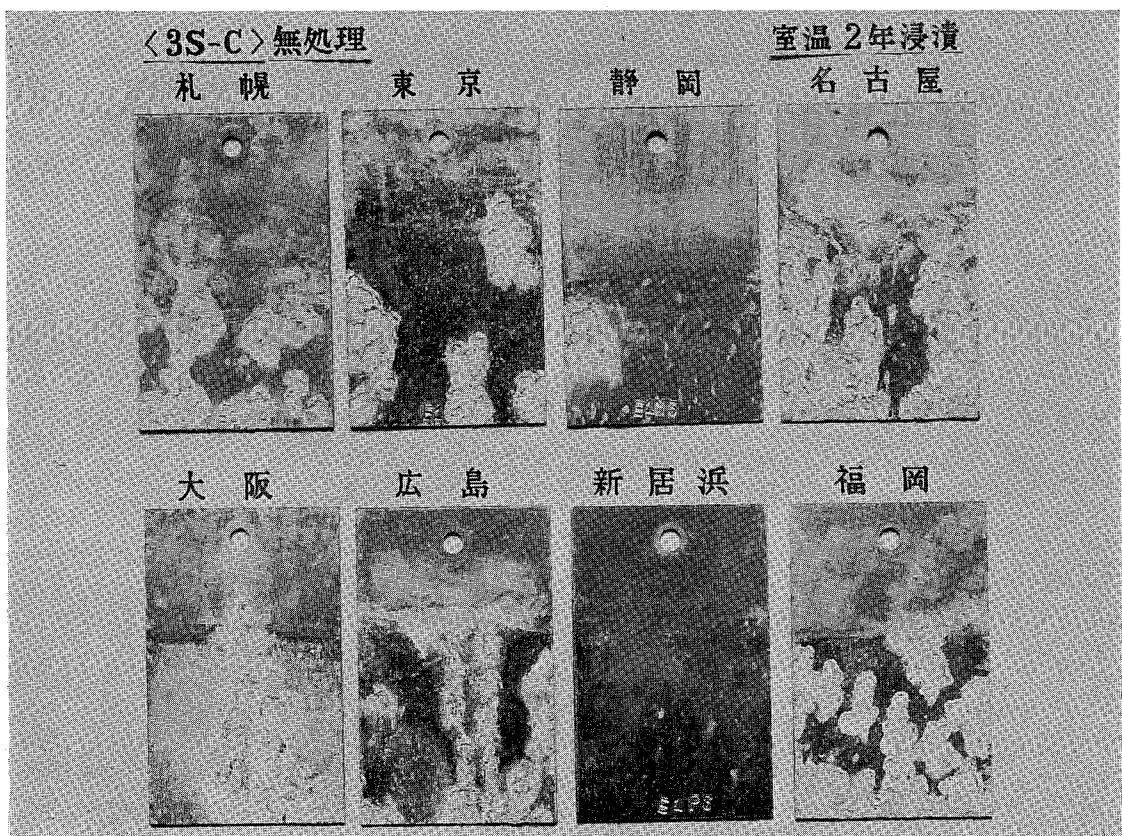


図8 3SC 無処理材の外観状況

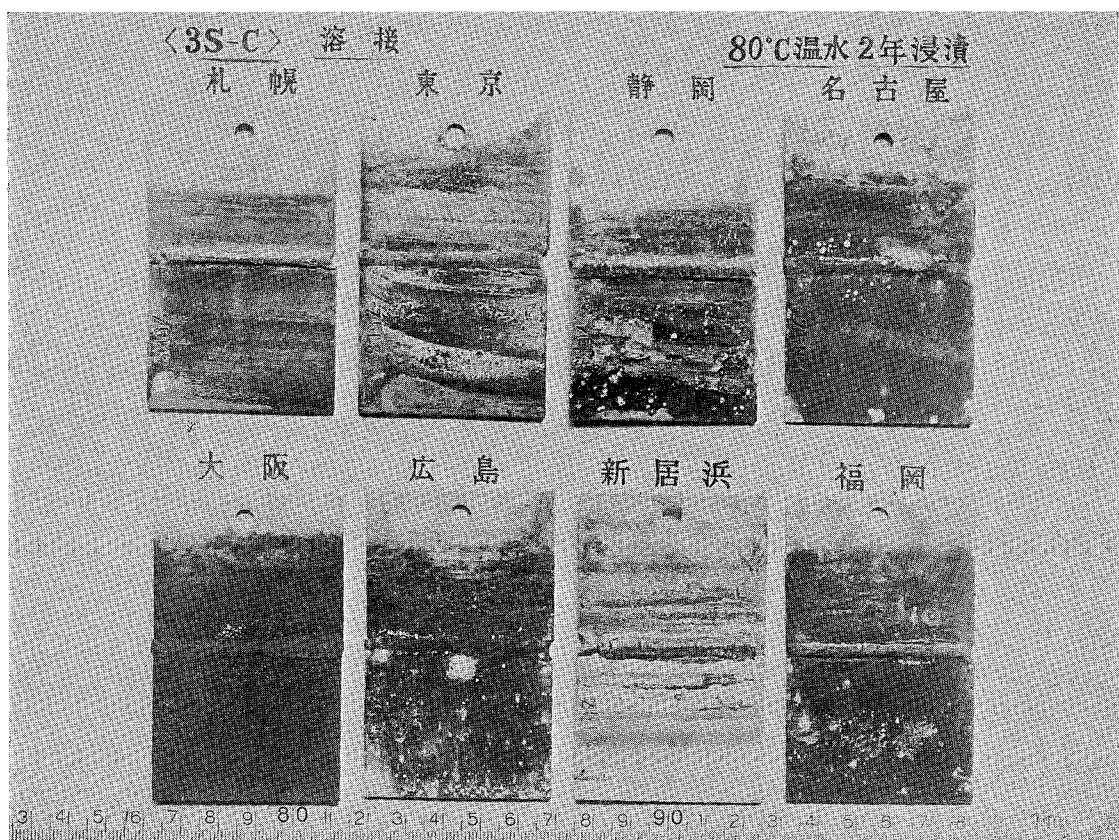
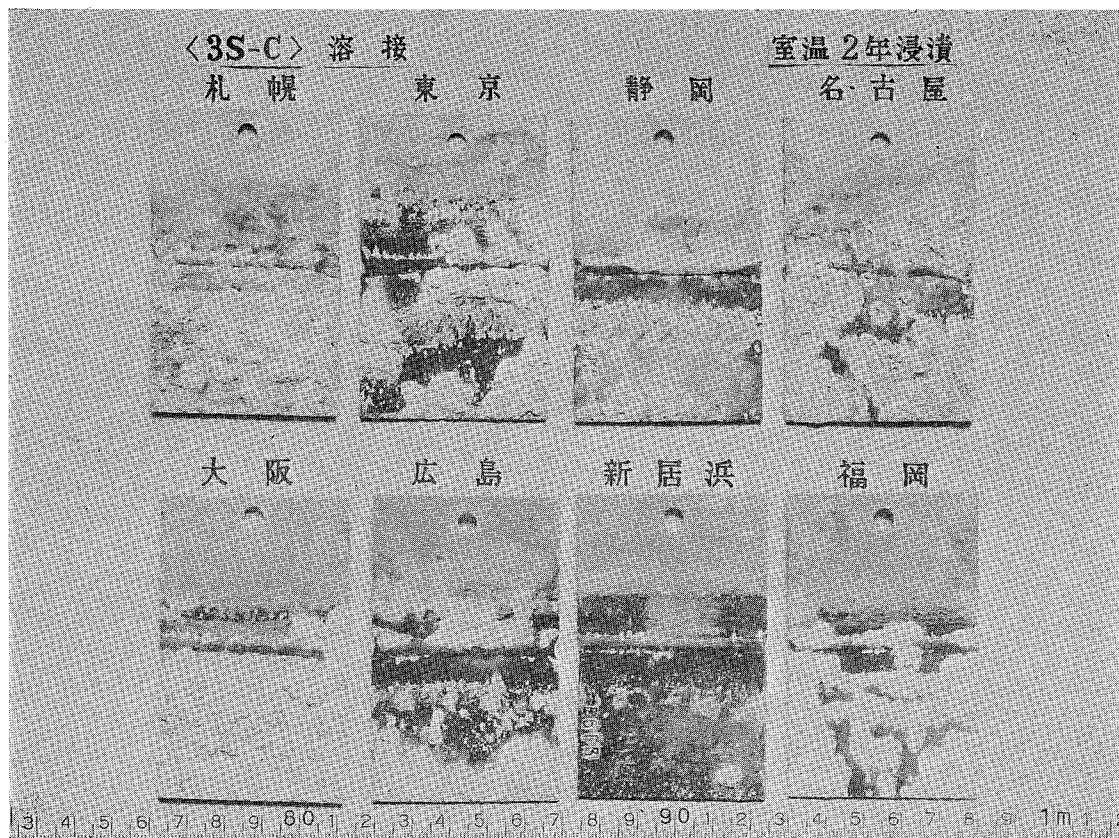


図9 3SC 無処理溶接材の外観状況

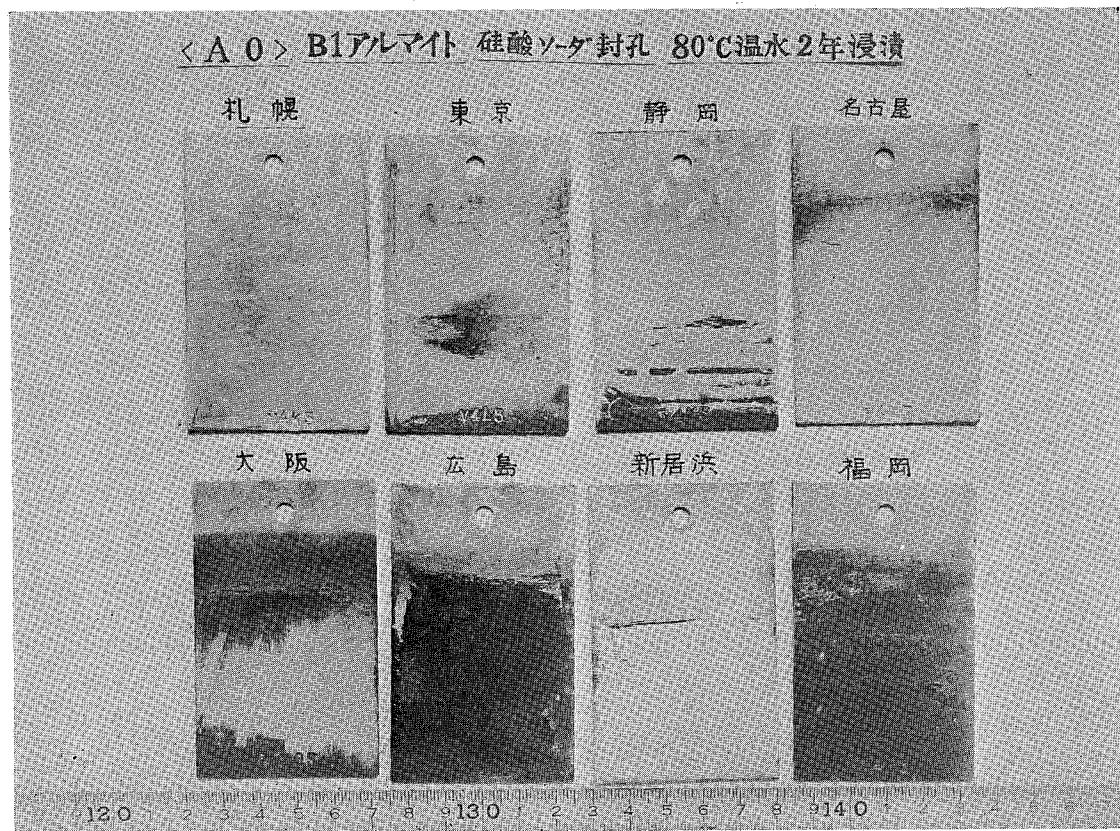
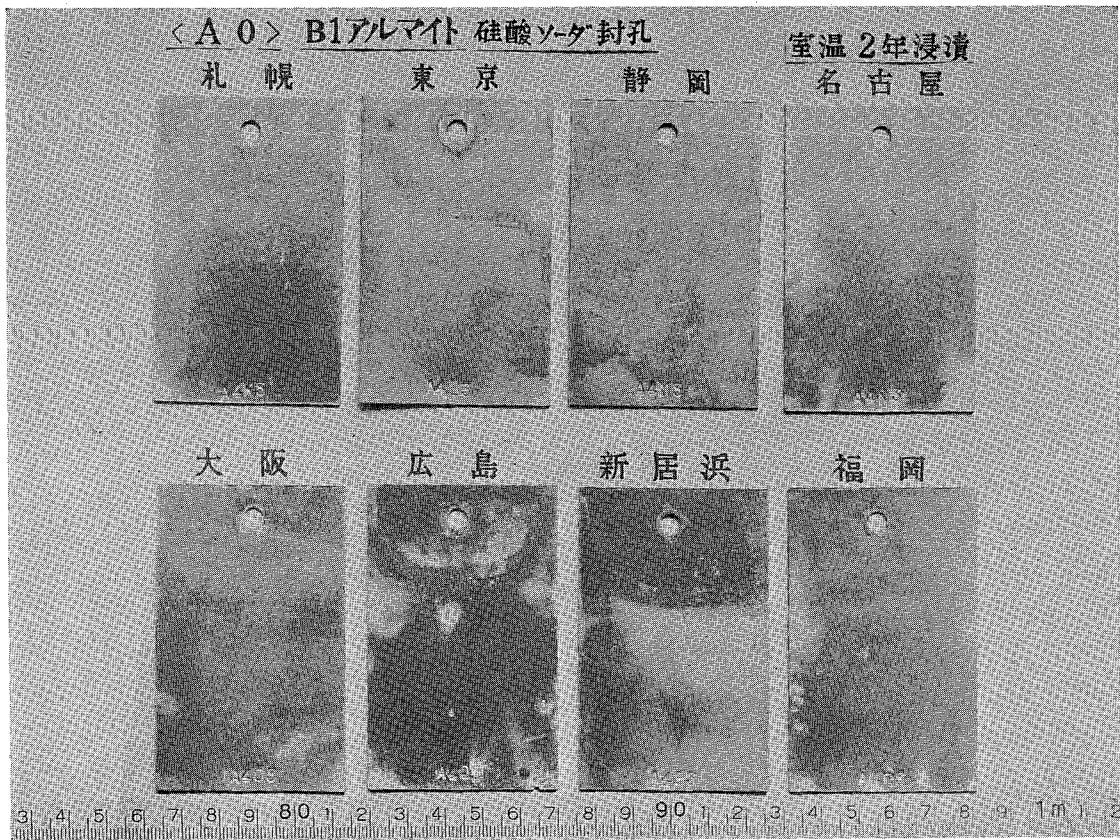


図10 AO 9 $\mu$  硫酸アルマイト→硅酸ソーダ封孔処理材の外観状況

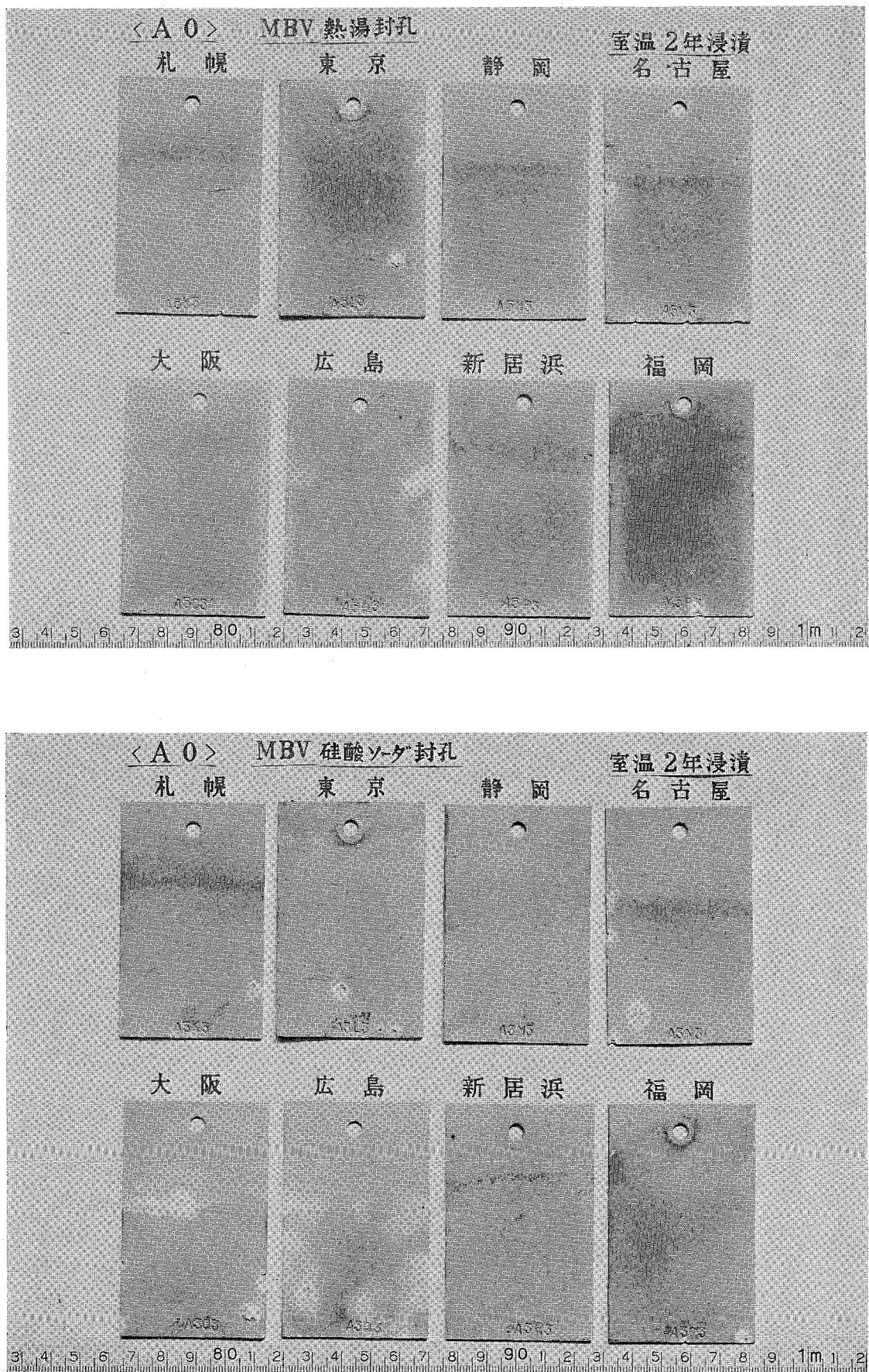


図11 A0 MBV処理材室温試験後の外観状況

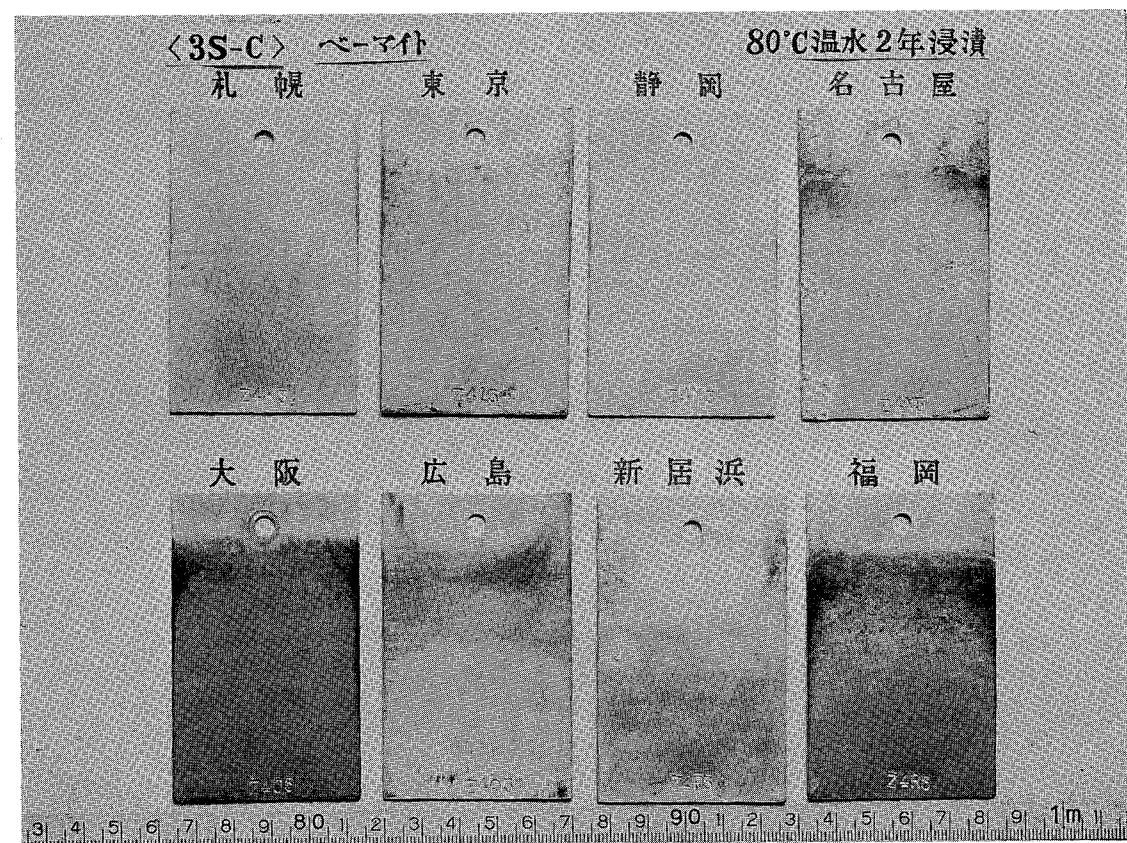
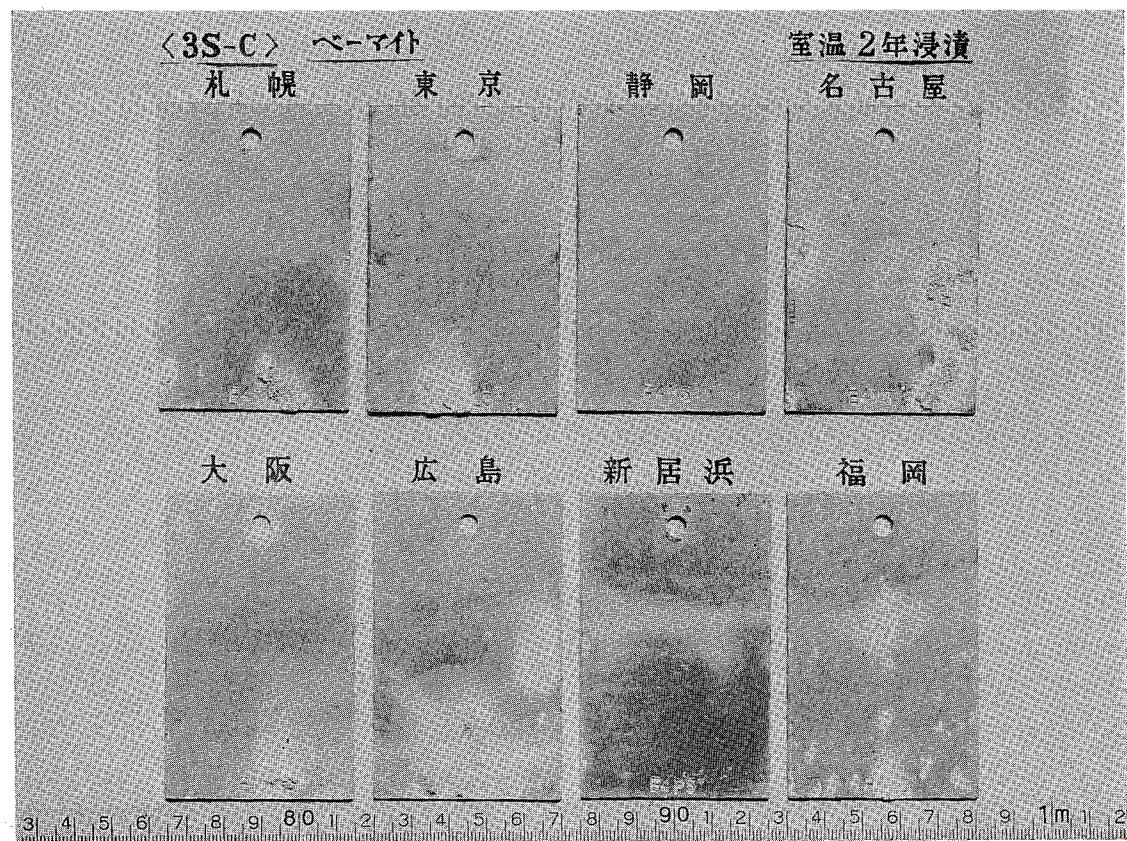


図12 3 S C ベーマイト処理材の外観状況

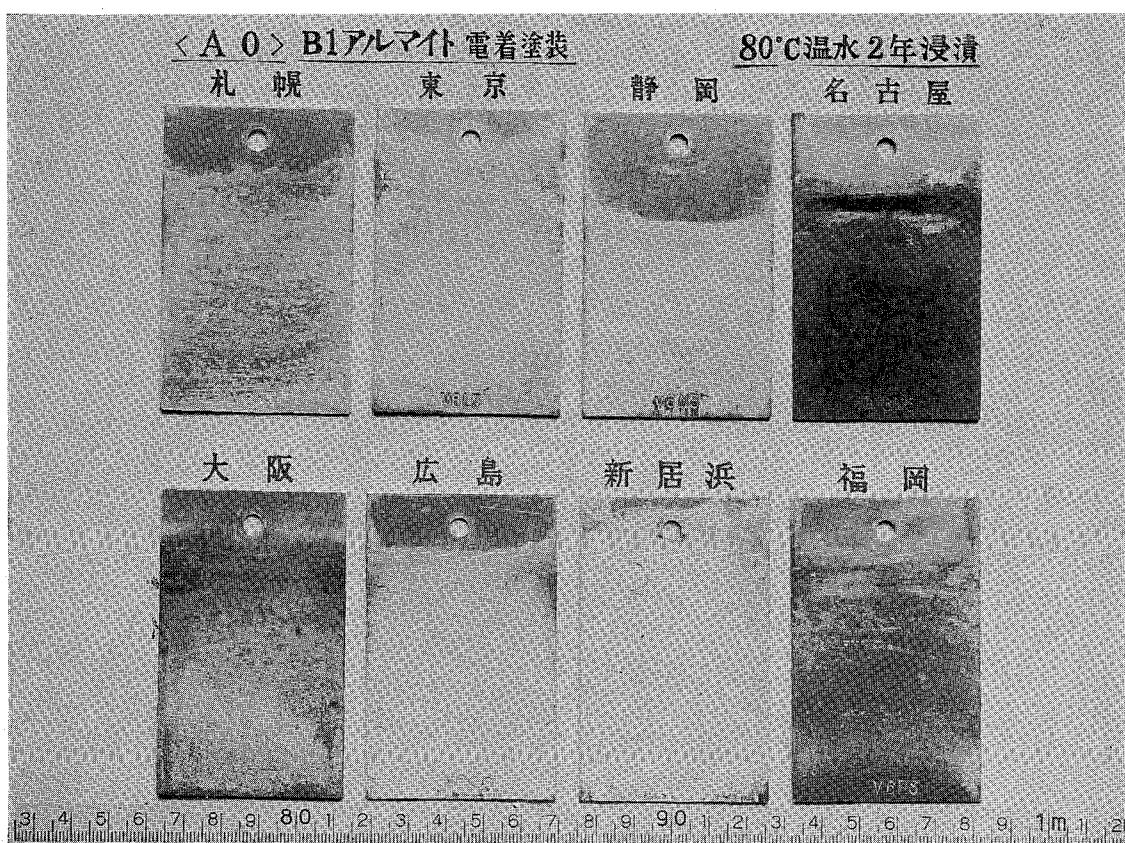
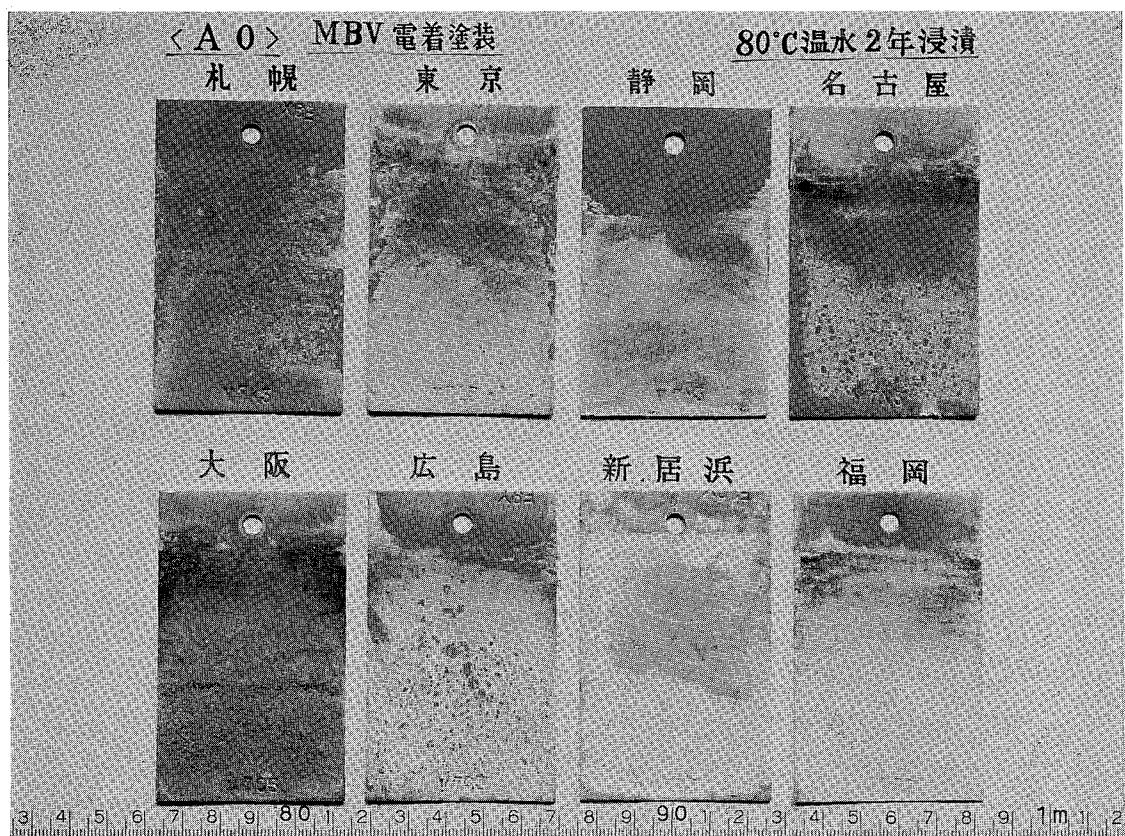


図13 AO 電着塗装材 80°C 試験後の外観状況

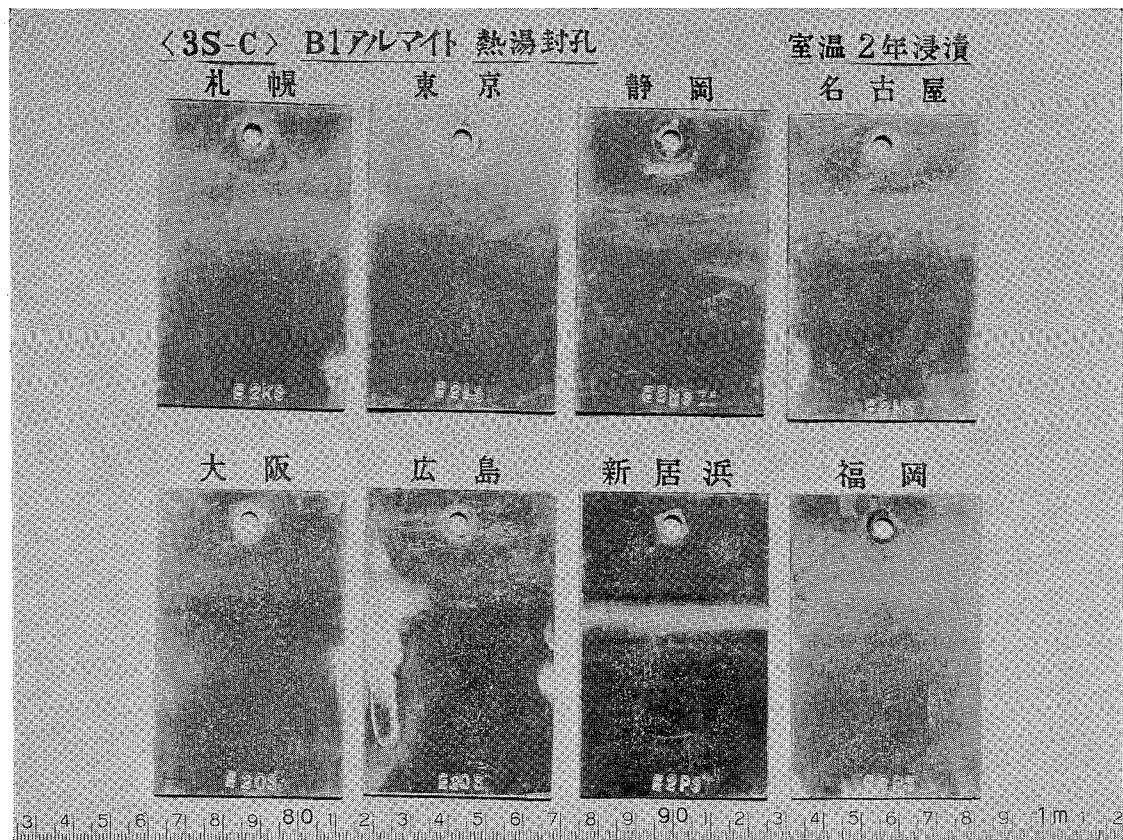


図14 3SC 9μ 硫酸アルマイト→沸騰水封孔処理材室温試験後の外観状況

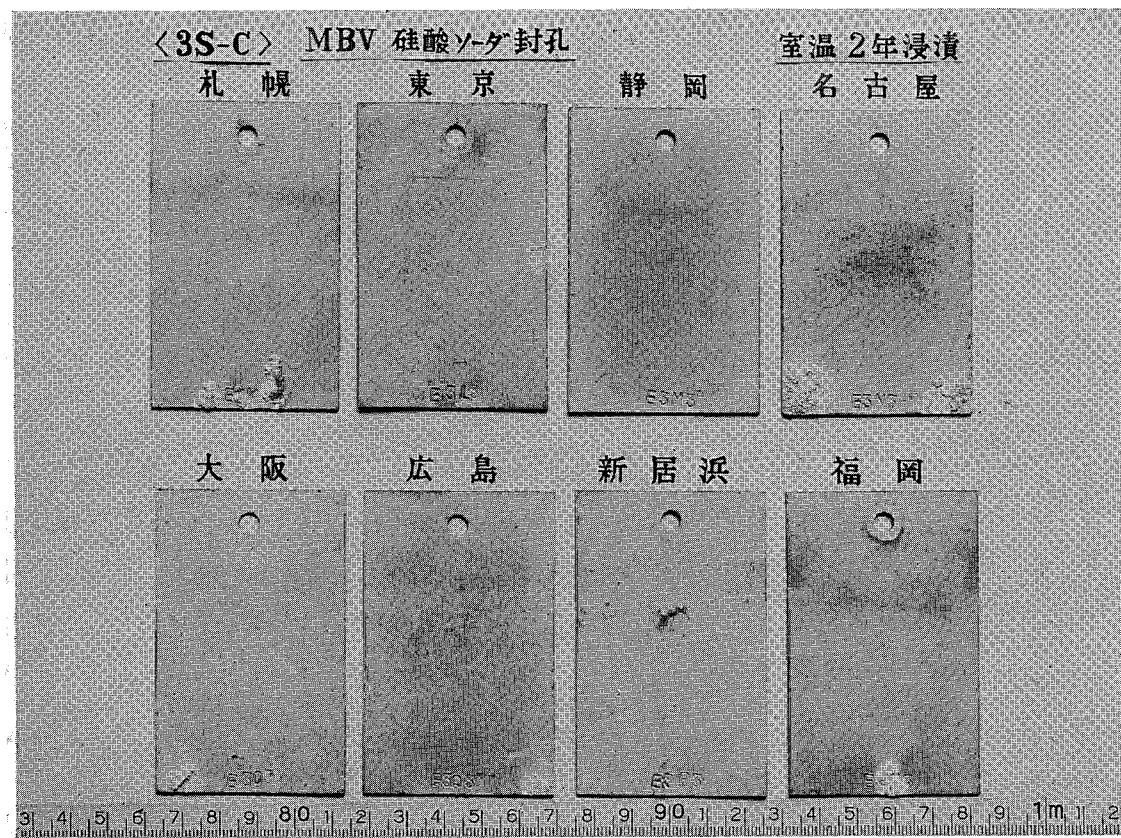


図15 3SC MBV→硅酸ソーダ封孔処理材室温試験後の外観状況



図16 AO テフロンコート材室温試験後の外観状況

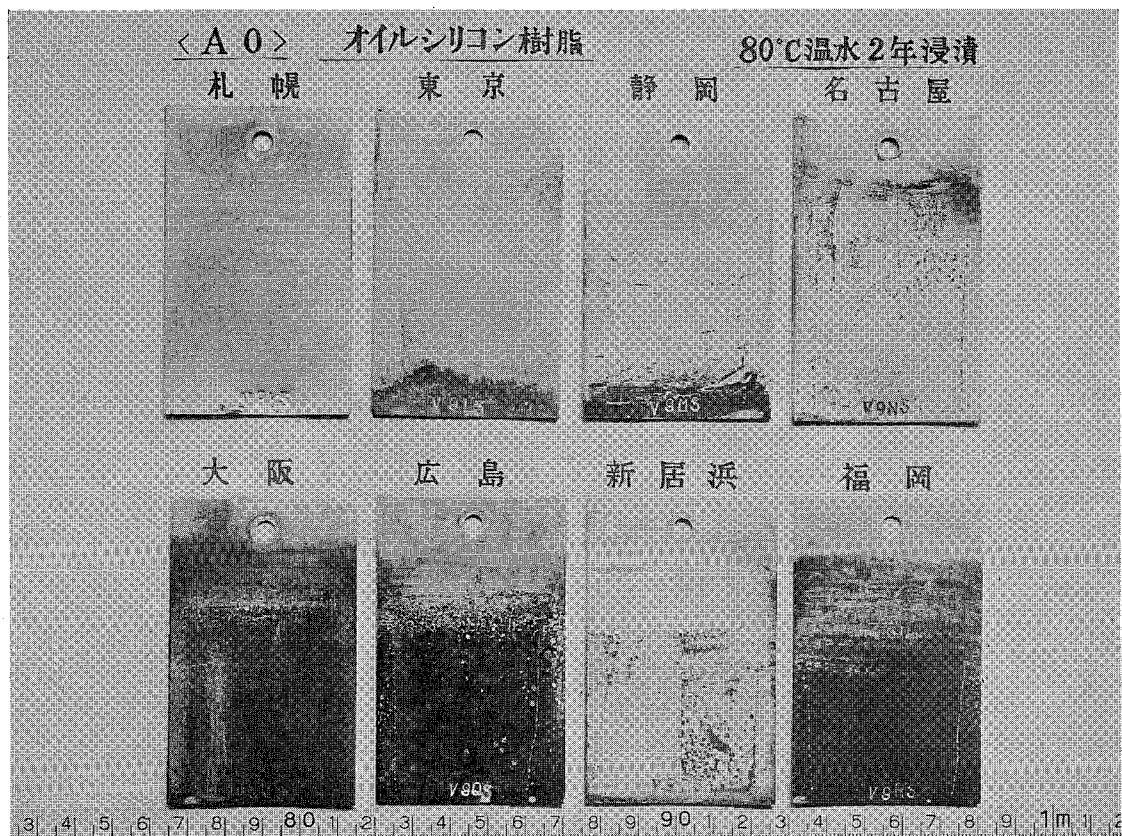


図17 AO オイルシリコン樹脂塗布材 80°C 試験後の外観状況

R141

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS Vol. 12 No. 4 OCT. 1971

技 術 資 料

変位法による骨組構造解析

中 村 授

住友軽金属工業株式会社

# 変位法による骨組構造解析

中 村 授\*

## 1. 緒 言

一般に構造物の弾性解は平衡条件式、ひずみの適合条件式および応力—ひずみの関係式を満足していれば微小変形理論の範囲内で一義的に定まることが Kirchhoff によって証明されている。したがって、変位あるいは応力に関する偏微分方程式と境界条件を与え、それを解くことが課題となる。しかし、実際に遭遇する複雑な構造物については解析的に解を求めることがむつかしい。そこで微分方程式を用い直接近似解を求める数値解法、なかでもマトリックス法が電子計算機とともに1950年代の初期から急速に発展してきた。

数値解法に変位または応力を未知量にとる二つの方法、すなわち変位法または応力法がある。前者は後者に比べ一般性があり任意な形状、荷重状態に対しても適用でき、より組織的性格をもつ解析法である。

マトリックス法を用いる構造解析も骨組構造解析と連続体解析とに分けることができ、後者は連続体を有限個の特性づけられた要素からなるとみなして解析するもので、構造解析の分野だけでなく、種々な方面で利用されている。

しかし、ここではマトリックス法の基本である変位法による骨組構造解析についてのみ述べる。

骨組構造解析用計算プログラムとして、まず1962年に STAIR および STIFF EIG、1963年に STRESS が公表され、1965年には FRAN が発表された。STRESS はマサチューセッツ工科大学 (MIT) が、FRAN は MIT と IBM が共同で開発したものである。当時の FRAN はいわゆる 7090 FRAN と呼ばれるもので、現在は 360 FRAN に改められている。この 360 FRAN は計算機コアの中で 400 元の連立 1 次方程式が処理できるようになっており、2000 節点、15000 部材の立体骨組構造まで解析しうる能力をもっている。その後、この種の計算プログラムの規模は大きくなり、1967年に Wright Patterson Air Force Base で作られた FORMAT II および NASA が University of Georgia に開発させた SAMIS はそれぞれ 2000 元、10000 元の連立 1 次方程式まで取扱える能力をもっているといわれる。これらの計算プログラムの出現は静的微小変形問題としての骨組構造解析の守備範囲を大幅に拡大した。

以下、変位法による骨組構造解析法の概略と著者らが開発した二つの計算プログラム SLISTAN 1, SLISTAN 2 およびその計算例を紹介する。

\* 研究部

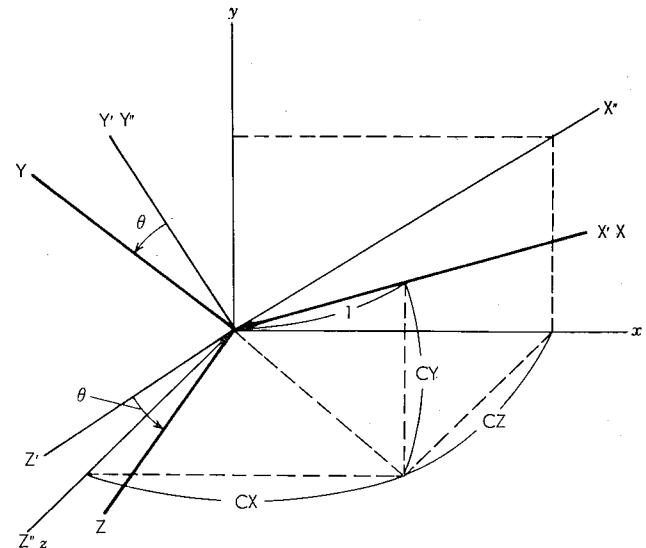
## 2. 変位法による解析理論

変位法は剛性マトリックス法とも呼ばれ、構造物の節点変位を基本的な未知量と考え、すべての節点における平衡方程式によりそれぞれの節点の変位を求めるところから出発する。

骨組構造解析において、部材の物理的特性はその部材について一定であること、部材の長軸に垂直な断面は 2 軸直交対称であること、およびこの断面は変形後も中立軸に垂直であることの工学的仮定がなされる。

部材の長軸を X、断面の 2 つの主軸をそれぞれ Y, Z 軸とする右手座標系を部材座標系と呼ぶ。

部材座標系 XYZ は同じ右手座標系である構造座標系 xyz に対し第 1 図に示すよう定める。X 軸の構造座標系に



第 1 図 部材座標系と構造座標系の関係

対する方向余弦は部材の長軸の構造座標系に対する方向余弦 CX, CY, CZ に等しく、Y, Z 軸は部材の 2 つの主軸と一致させる。すなわち、構造座標系 xyz をまず z 軸まわりに回転させ X'' Y'' Z'' 座標とし、これを Y'' 軸まわりに回転させて X' Y' Z' 座標とする。このとき Z' 軸は xy 平面に対し、z 軸と同じ側にとる。また、Y' 軸は xy 平面内にあることは明白である。ただし、X' 軸が z 軸と平行である場合は Z' 軸と y 軸を平行にとる。つづいて、Y, Z 軸が部材断面の主軸に一致するよう X' 軸のまわりに  $\theta$  だけ回転させ、部材座標系 XYZ 軸を定める。この  $\theta$  はコードアルゲルと呼ばれている。したがって、構造座標系から部材座標系への変換の回転マトリックス [R] は

$$\begin{pmatrix} CX & CY & CZ \\ -\frac{CY \cos \theta + CX \cdot CZ \sin \theta}{\sqrt{CX^2 + CY^2}} & \frac{CX \cos \theta - CY \cdot CZ \sin \theta}{\sqrt{CX^2 + CY^2}} & \frac{(CX^2 + CY^2) \sin \theta}{\sqrt{CX^2 + CY^2}} \\ \frac{CY \sin \theta - CX \cdot CZ \cos \theta}{\sqrt{CX^2 + CY^2}} & \frac{CX \sin \theta + CY \cdot CZ \cos \theta}{\sqrt{CX^2 + CY^2}} & \frac{(CX^2 + CY^2) \cos \theta}{\sqrt{CX^2 + CY^2}} \end{pmatrix}$$

となる。ただし、X 軸すなわち部材の長軸が Z 軸と平行な場合、いわゆる  $CX = CY = 0$  のときは

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & CZ \\ CZ \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -CZ \sin \theta & \cos \theta & 0 \end{pmatrix}$$

である。

部材荷重のない部材の両端  $j$  および  $k$  の作用力および変位の列マトリックスをそれぞれ  $\{\alpha_j\}$ ,  $\{\alpha_k\}$  および  $\{d_j\}$ ,  $\{d_k\}$  とすれば、部材平衡マトリックス方程式

$$\begin{pmatrix} \alpha_j \\ \alpha_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{jj} & s_{jk} \\ s_{kj} & s_{kk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_j \\ d_k \end{pmatrix} \quad (1)$$

が成立する。これは部材座標系 XYZ 軸で表現され  $\{\alpha_j\}$ ,  $\{\alpha_k\}$  および  $\{d_j\}$ ,  $\{d_k\}$  は未知量である。

マトリックス

$$\begin{pmatrix} s_{jj} & s_{jk} \\ s_{kj} & s_{kk} \end{pmatrix}$$

は正方対称であり、部材剛性マトリックスと呼ばれ部材の

特性を表わす既知な量である。立体骨組の場合の部材剛性マトリックスは第1表に示すようになる。ここに、

- L : 部材長さ
- E : 縦弾性係数
- G : 橫弾性係数
- $A_x$  : 部材断面積
- $I_x$  : 部材座標軸 X に関するねじり常数
- $I_y$  : 部材座標軸 Y に関する断面 2 次モーメント
- $I_z$  : 部材座標軸 Z に関する断面 2 次モーメント

である。

解析すべき全節点の平衡方程式を作るには部材平衡マトリックス方程式である(1)式を構造座標系で表わす必要がある。部材座標系への変換の回転マトリックスを  $[R]$  とし、構造座標系における部材端作用力(モーメント)および変位(回転角)をそれぞれ  $\{A_j\}$ ,  $\{A_k\}$  および  $\{D_j\}$ ,  $\{D_k\}$  とすれば(1)式は

第1表 立体骨組の部材剛性マトリックス

	$\frac{EA_x}{L}$	SYM.					
0	$\frac{12EI_z}{L^3}$						
0	0	$\frac{12EI_y}{L^3}$					
0	0	0	$\frac{Glx}{L}$				
0	0	$-\frac{6EI_y}{L^2}$	0	$\frac{4EI_y}{L}$			
0	$\frac{6EI_z}{L^2}$	0	0	0	$\frac{4EI_z}{L}$		
$-\frac{EA_x}{L}$	0	0	0	0	0	$\frac{EA_x}{L}$	
0	$-\frac{12EI_z}{L^3}$	0	0	0	$-\frac{6EI_z}{L^2}$	0	$\frac{12EI_z}{L^3}$
0	0	$-\frac{12EI_y}{L^3}$	0	$\frac{6EI_y}{L^2}$	0	0	$\frac{12EI_y}{L^3}$
0	0	0	$-\frac{Glx}{L}$	0	0	0	$\frac{Glx}{L}$
0	0	$-\frac{6EI_y}{L^2}$	0	$\frac{2EI_y}{L}$	0	0	$\frac{6EI_y}{L^2}$
0	$-\frac{6EI_z}{L^2}$	0	0	0	$-\frac{2EI_z}{L}$	0	0

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_j \\ \mathbf{A}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{jj} & s_{jk} \\ s_{kj} & s_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_j \\ \mathbf{D}_k \end{bmatrix}$$

となる。したがって

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_j \\ \mathbf{A}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} s_{jj} & s_{jk} \\ s_{kj} & s_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_j \\ \mathbf{D}_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

が導かれる。マトリックス

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{jj} & \mathbf{S}_{jk} \\ \mathbf{S}_{kj} & \mathbf{S}_{kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} s_{jj} & s_{jk} \\ s_{kj} & s_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix}$$

は構造座標系に関する部材剛性マトリックスである。

(2)式で表わされる部材平衡マトリックスをすべての部材について総和することにより解析すべき構造物全体の平衡マトリックス方程式

$$\{\mathbf{A}\} = [\mathbf{S}] \{\mathbf{D}\} \quad (3)$$

を得る。(3)式は自由に生じうる節点変位の成分である自由変数と拘束された節点変位の成分である拘束変数に分けて

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_F \\ \mathbf{A}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{FF} & \mathbf{S}_{FR} \\ \mathbf{S}_{RF} & \mathbf{S}_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_F \\ \mathbf{D}_R \end{bmatrix} \quad (4)$$

とすることができる。すなわち、節点変位成分の列ベクトルである  $\{\mathbf{D}\}$  は未知の自由変数  $\{\mathbf{D}_F\}$  と既知の拘束変数  $\{\mathbf{D}_R\}$  とに分けられる。作用力成分の列ベクトル  $\{\mathbf{A}\}$  は外部作用力および拘束反作用力の総和であり、 $\{\mathbf{A}_F\}$  は自由節点に直接加わる作用力と自由節点に結合している部材に加えられる荷重によって部材端すなわち自由節点に生じる固定端作用力の和である。 $\{\mathbf{A}_R\}$  はさらに拘束反作用力が加えられたものとなる。

全体の節点剛性マトリックス  $[\mathbf{S}]$  は正方対称であり、 $[\mathbf{S}_{FF}]$  は構造物の自由節点の剛性係数を表わす。 $[\mathbf{S}_{FR}]$  は支持拘束点における単位の変位によって生じる自由節点の作用力を要素とし、 $[\mathbf{S}_{RF}]$  はその転置マトリックスである。 $[\mathbf{S}_{RR}]$  は支持点の単位の変位を与えることにより生じる作用力を要素とする。 $[\mathbf{S}_{FF}]$  および  $[\mathbf{S}_{RR}]$  は正方対称マトリックスとなる。

(4)式において  $\{\mathbf{D}_R\} = \{0\}$  とすれば

$$\{\mathbf{A}_F\} = [\mathbf{S}_{FF}] \{\mathbf{D}_F\} \quad (5)$$

$$\{\mathbf{A}_R\} = [\mathbf{S}_{RF}] \{\mathbf{D}_F\} \quad (6)$$

となり、未知であった  $\{\mathbf{D}_F\}$  は

$$\{\mathbf{D}_F\} = [\mathbf{S}_{FF}]^{-1} \{\mathbf{A}_F\} \quad (7)$$

で求めることができ、 $\{\mathbf{D}_F\}$  が求まれば(6)式から拘束節点の作用力  $\{\mathbf{A}_R\}$  が算出できる。したがって、(4)式の小行列すべてが既知となる。 $\{\mathbf{A}_R\}$  は節点荷重  $\{\mathbf{P}\}$ 、部材に加えられる荷重による固定端作用力  $\{\mathbf{q}\}$  および拘束支持反作用力  $\{\mathbf{F}\}$  の和であり、

$$\{\mathbf{A}_R\} = \{\mathbf{P}\} + \{\mathbf{q}\} + \{\mathbf{F}\}$$

で表わすことができるから、未知の拘束支持反作用力  $\{\mathbf{F}\}$  は

$$\{\mathbf{F}\} = \{\mathbf{A}_R\} - (\{\mathbf{P}\} + \{\mathbf{q}\}) \quad (8)$$

によって求めることができる。

いっぽう、部材端作用力は(1)式にもどって求める。すなわち節点  $j, k$  における固定端作用力および材端作用力を

$\{\mathbf{q}_j\}, \{\mathbf{q}_k\}$  および  $\{\mathbf{f}_j\}, \{\mathbf{f}_k\}$  とすれば

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_j \\ \mathbf{f}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_j \\ \mathbf{a}_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{q}_j \\ \mathbf{q}_k \end{bmatrix} \quad (9)$$

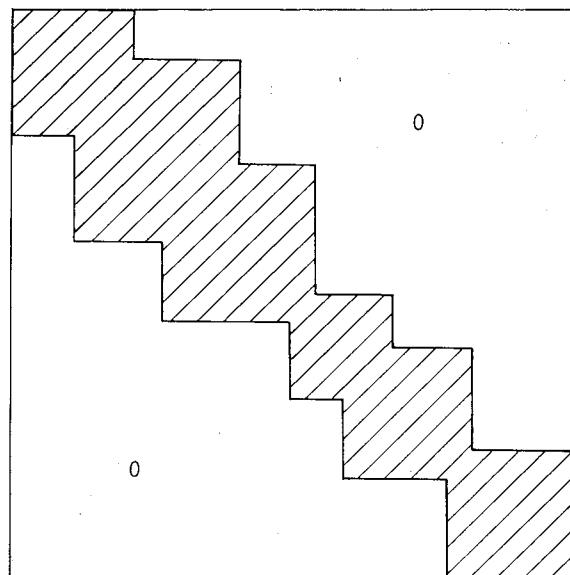
であるから、(2)式に(7)式で求めた  $\{\mathbf{D}_F\}$  の要素を用いて

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_j \\ \mathbf{a}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_j \\ \mathbf{A}_k \end{bmatrix}$$

を算出し、(9)式から部材端作用力を求める。この計算をすべての部材について行なえば全部材の部材端作用力を得る。

自由節点の剛性マトリックス  $[\mathbf{S}_{FF}]$  は大形になることが多いため(7)式の計算が最も問題となる。実用的な計算法には直接法および反復法がある。前者は Gauss の消去法に代表され、変換過程を変えた方法に Cholesky 法あるいは掃き出し法があるが本質的には同種の解法である。後者は Gauss-Seidel 法に代表され、計算手順が簡潔で記憶容量が必要最小限ですむので大形行列の計算に好都合である。しかし、収束速度と収束条件には問題があり、このため緩和法あるいは SOR 法などの提案がある。

また、剛性マトリックスの形状が第2図に示すようにゼロでない要素が対角線を中心帯状に集まる擬3対角配列となることを利用することで演算量と記憶容量を減少させることができる。本質的には大行列をいくつかの小行列に分割して解く方法であり、Unit分割法やSubstructure法などさまざまな方法が考えられている。このときは当然補助記憶装置を用いることになる。



第2図 剛性マトリックス（正方対称擬3対角配列）

### 3. 計算プログラム

二つの骨組構造解析用プログラム SLISTAN 1 および SLISTAN 2 の概略を紹介する。両者ともに FORTRAN IV (E) 言語で組まれており、入出力データ形式は可能な限り統一している。入力はカード、出力は印刷を行い、出力はまず入力データを、つづいて計算結果を打出させていく。両プログラムの計算精度はほとんど同じで、倍精度演

算を行なっているため精度は極めてよく、各部材の剛性に極端な差がない限り計算結果の最大値の  $10^{-10}$  倍以上の誤差が生じることはまれである。

### 3・1 SLISTAN 1

このプログラムは電算機コアのみを用い、補助記憶装置を用いない、すなわち分割を行なわず剛性マトリックスを処理する。前節(7)式の計算では直接法の Cholesky の平方根法を用い、正方行列を帶行列に置き換えて記憶容量を節約している。また計算時間の節約のため、連続ばかり、平面トラス、平面骨組、格子構造、立体トラスおよび立体骨組の 6 種類に分けて計算されるようにしている。したがつ

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 &= \mathbf{S}_{11}\mathbf{D}_1 + \mathbf{S}_{12}\mathbf{D}_2 \\ \mathbf{A}_2 &= \mathbf{S}_{21}\mathbf{D}_1 + \mathbf{S}_{22}\mathbf{D}_2 + \mathbf{S}_{23}\mathbf{D}_3 \\ \mathbf{A}_3 &= \mathbf{S}_{32}\mathbf{D}_2 + \mathbf{S}_{33}\mathbf{D}_3 + \mathbf{S}_{34}\mathbf{D}_4 \\ &\vdots &&\vdots \\ \mathbf{A}_{n-1} &= \mathbf{S}_{n-1,n-2}\mathbf{D}_{n-2} + \mathbf{S}_{n-1,n-1}\mathbf{D}_{n-1} + \mathbf{S}_{n-1,n}\mathbf{D}_n \\ \mathbf{A}_n &= \mathbf{S}_{n,n-1}\mathbf{D}_{n-1} + \mathbf{S}_{n,n}\mathbf{D}_n \end{aligned}$$

と分割することができる。したがって直列消去法により前進代入の過程で変位成分が消去される。(10-a) 式から

$$\mathbf{D}_1 = \mathbf{S}_{11}^{-1}(\mathbf{A}_1 - \mathbf{S}_{12}\mathbf{D}_2) \quad (11)$$

を得て、これを (10-b) 式に代入すると

$$\mathbf{S}_{22}^* = \mathbf{S}_{22} - \mathbf{S}_{21}\mathbf{S}_{11}^{-1}\mathbf{S}_{12}$$

$$\mathbf{A}_2^* = \mathbf{A}_2 - \mathbf{S}_{21}\mathbf{S}_{11}^{-1}\mathbf{A}_1$$

とおいて

$$\mathbf{A}_2^* = \mathbf{S}_{22}^*\mathbf{D}_2 + \mathbf{S}_{23}\mathbf{D}_3 \quad (12)$$

となる。同様に  $i$  番目の部分構造の変位成分ベクトル  $\mathbf{D}_i$  を消去するための漸化式は

$$\mathbf{D}_i = \mathbf{S}_{i,i}^{-1}(\mathbf{A}_i^* - \mathbf{S}_{i,i+1}\mathbf{D}_{i+1}) \quad (13)$$

および

$$\mathbf{S}_{i+1,i+1}^* = \mathbf{S}_{i+1,i+1} - \mathbf{S}_{i+1,i}\mathbf{S}_{i,i}^{-1}\mathbf{S}_{i,i+1}$$

て、最初の入力カードにこの構造の種類をパンチしてやらねばならない。IBM S/360(Model 50) の使用コア 100k バイトの場合、立体骨組以外の構造で節点数 40、部材数 60 まで解析でき、立体骨組では節点数 20 が限度である。

### 3・2 SLISTAN 2

補助記憶装置である磁気テープを使い、Substructure(部分構造) 法によって計算する。すなわち、すべての節点が 3 つ以上の部分構造に属さないよう構造物全体を適当に分割すれば前節の(6)式は第 2 図にも示した擬 3 対角配列となるから

$$\begin{array}{c} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \\ \vdots \\ \mathbf{m} \\ \mathbf{n} \end{array} \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_{i+1}^* = \mathbf{A}_{i+1} - \mathbf{S}_{i+1,i}\mathbf{S}_{i,i}^{-1}\mathbf{A}_i^*$$

とおいて

$$\mathbf{A}_{i+1}^* = \mathbf{S}_{i+1,i+1}^*\mathbf{D}_{i+1} + \mathbf{S}_{i+1,i+2}\mathbf{D}_{i+2} \quad (14)$$

を得る。したがって最後の消去は

$$\mathbf{D}_{n-1} = \mathbf{S}_{n-1,n-1}^{-1}(\mathbf{A}_{n-1}^* - \mathbf{S}_{n-1,n}\mathbf{D}_n) \quad (15)$$

および

$$\mathbf{S}_{n,n}^* = \mathbf{S}_{n,n} - \mathbf{S}_{n,n-1}\mathbf{S}_{n-1,n-1}^{-1}\mathbf{S}_{n-1,n}$$

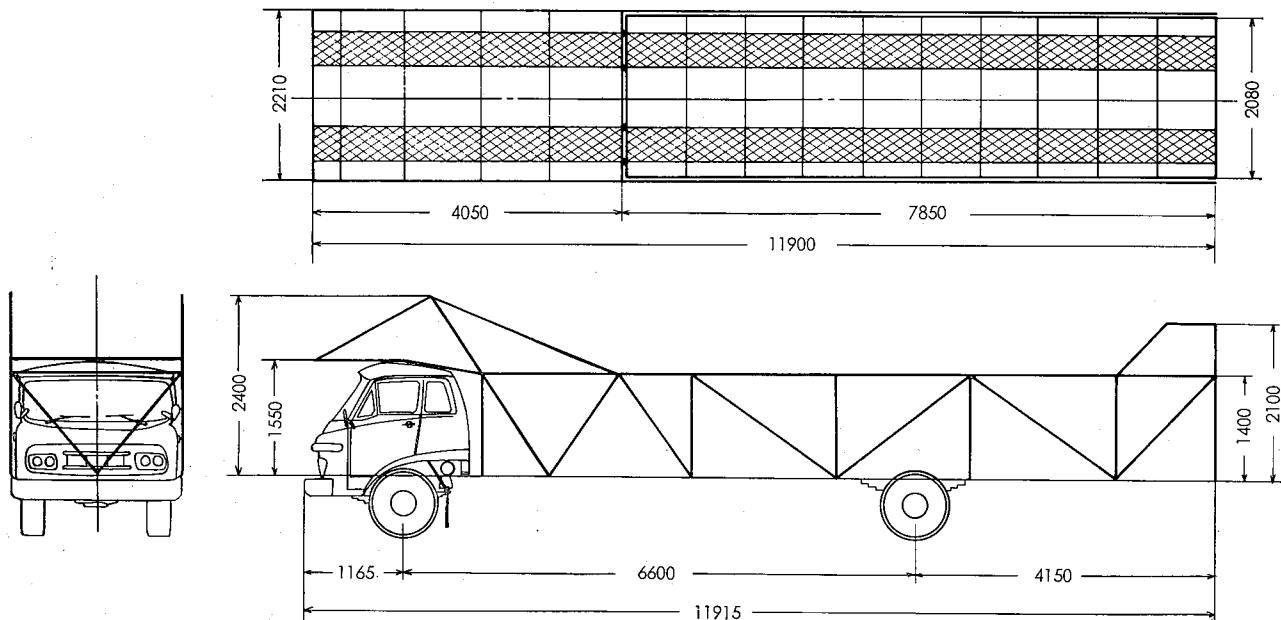
$$\mathbf{A}_n^* = \mathbf{A}_n - \mathbf{S}_{n,n-1}\mathbf{S}_{n-1,n-1}^{-1}\mathbf{A}_{n-1}^*$$

とおいて

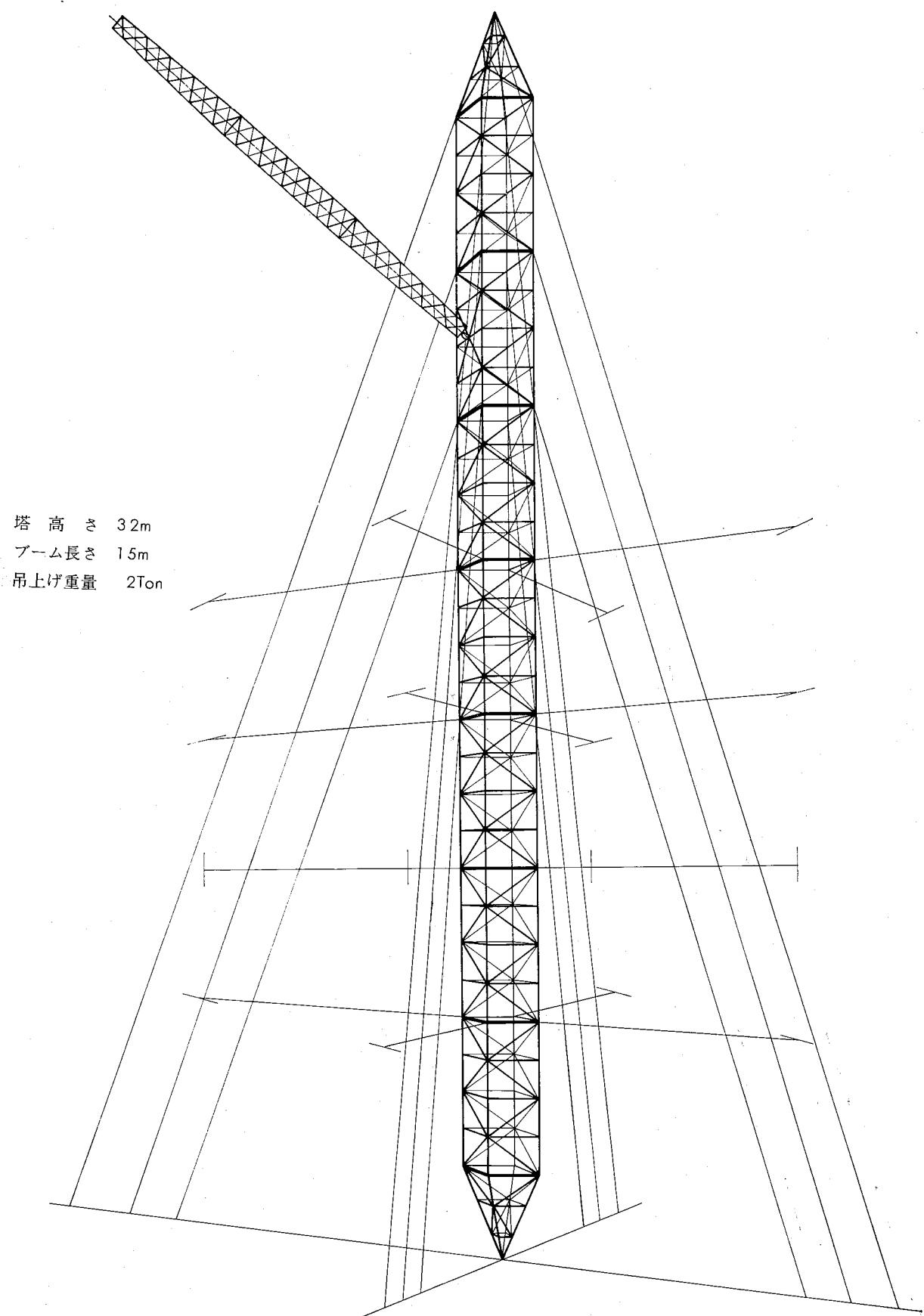
$$\mathbf{A}_n^* = \mathbf{S}_{n,n}^*\mathbf{D}_n \quad (16)$$

となる。(16)式では未知の変位成分ベクトル  $\mathbf{D}_n$  しか現われないので

$$\mathbf{D}_n = \mathbf{S}_{n,n}^{-1}\mathbf{A}_n \quad (17)$$



第3図 車両運搬車ボディ



第4図 送電鉄塔建造用塔形クレーン

第2表 SLISTAN 2 による解析例（送電鉄塔建造用塔形クレーン）

```

* ANALYSIS OF FRAMED STRUCTURES =SLISTAN2=
* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* STRUCTURE NO. 2 DIVIDED INTO * *
* 33 SUBSTRUCTURE UNITS WITH * *
* 1 LOADING SYSTEMS * *
* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* -SPACE FRAME- * *
* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *

*** DATA FOR SUBSTRUCTURE 1 ***
*** NM NJ NR NRJ N ***
20 9 28 5 26

* COORDINATES OF JOINTS *
JOINT X Y Z
1 0.0 817.70 817.70
2 600.00 817.70 1040.80
3 600.00 594.70 817.70
4 600.00 817.70 594.70
5 600.00 1040.80 817.70
6 1400.00 817.70 1338.10
7 1400.00 297.40 817.70
8 1400.00 817.70 297.40
9 1400.00 1338.10 817.70

* MEMBER INFORMATION *
MEMBER JJ JK AX IX IY IZ CA L E G
1 1 2 3.4780E 03 3.5960E 05 1.4070E 06 4.4730E 06 0.0 640.14 7000.0 2650.0
2 1 3 3.4780E 03 3.5960E 05 4.4730E 06 1.4070E 06 0.0 640.10 7000.0 2650.0
3 1 4 3.4780E 03 3.5960E 05 1.4070E 06 4.4730E 06 0.0 640.10 7000.0 2650.0
4 1 5 3.4780E 03 3.5960E 05 4.4730E 06 1.4070E 06 0.0 640.14 7000.0 2650.0
5 2 3 7.4786E 02 0.0 0.0 0.0 0.0 315.44 7000.0 0.0
6 3 4 7.4786E 02 0.0 0.0 0.0 0.0 315.37 7000.0 0.0
7 4 5 7.4786E 02 0.0 0.0 0.0 0.0 315.44 7000.0 0.0
8 2 5 7.4786E 02 0.0 0.0 0.0 0.0 315.51 7000.0 0.0
9 2 6 1.2777E 03 3.4263E 04 2.7835E 05 1.0365E 06 0.0 853.46 7000.0 2650.0
10 3 7 1.2777E 03 3.4263E 04 1.0365E 06 2.7835E 05 0.0 853.46 7000.0 2650.0
11 4 8 1.2777E 03 3.4263E 04 2.7835E 05 1.0365E 06 0.0 853.46 7000.0 2650.0
12 5 9 1.2777E 03 3.4263E 04 1.0365E 06 2.7835E 05 0.0 853.46 7000.0 2650.0
13 2 7 7.4786E 02 0.0 0.0 0.0 0.0 980.04 7000.0 0.0
14 4 7 7.4786E 02 0.0 0.0 0.0 0.0 980.02 7000.0 0.0
15 2 6 7.4786E 02 0.0 0.0 0.0 0.0 980.07 7000.0 0.0
16 2 9 7.4786E 02 0.0 0.0 0.0 0.0 980.10 7000.0 0.0
17 6 7 7.4786E 02 0.0 0.0 0.0 0.0 735.89 7000.0 0.0
18 7 8 7.4786E 02 0.0 0.0 0.0 0.0 735.82 7000.0 0.0
19 8 9 7.4786E 02 0.0 0.0 0.0 0.0 735.89 7000.0 0.0
20 6 9 7.4786E 02 0.0 0.0 0.0 0.0 735.96 7000.0 0.0

* JOINT RESTRAINTS *
JOINT D-X D-Y D-Z R-X R-Y R-Z
1 2 2 2 2 2 0
6 1 1 1 1 1 1
7 1 1 1 1 1 1
8 1 1 1 1 1 1
9 1 1 1 1 1 1

*** LOADING NO. 1 ***
NLJ NLM
1 0

* ACTIONS APPLIED AT JOINT *
JOINT F-X F-Y F-Z M-X M-Y M-Z
1 4.91070E 03 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

*** DATA FOR SUBSTRUCTURE 2 ***
*** NM NJ NR NRJ N ***
12 8 24 4 24

* COORDINATES OF JOINTS *
JOINT X Y Z
6 1400.00 817.70 1338.10
7 1400.00 297.40 817.70
8 1400.00 817.70 297.40
9 1400.00 1338.10 817.70
10 2200.00 817.70 1625.50
11 2200.00 0.0 817.70
12 2200.00 817.70 0.0
13 2200.00 1635.50 817.70

```

*MEMBER INFORMATION*											
MEMBER	JJ	JK	AX	JX	IY	IZ	CA	L	E	G	
21	6	10	1.2777E 03	3.4263E 04	2.7835E 05	1.0365E 06	0.0	853.49	7000.0	2650.0	
22	7	11	1.2777E 03	3.4263E 04	1.0365E 06	2.7835E 05	0.0	853.49	7000.0	2650.0	
23	8	12	1.2777E 03	3.4263E 04	2.7835E 05	1.0365E 06	0.0	853.49	7000.0	2650.0	
24	9	13	1.2777E 03	3.4263E 04	1.0365E 06	2.7835E 05	0.0	853.49	7000.0	2650.0	
25	10	7.4778E 02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
420				1.4730E 06	1.4070E 06	0.0					
421	148			0.0	0.0	0.0		36719.45	0.0	0.0	
422	149	152	9.2000E 01	0.0	0.0	0.0	0.0	36719.41	6500.0	0.0	
423	148	153	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36719.41	0.0	0.0	
*JOINT RESTRAINTS*											
JOINT	D-X	D-Y	D-Z	R-X	R-Y	R-Z					
151	2	2	2	2	2	2					
152	2	2	2	2	2	2					
153	2	2	2	2	2	2					
**LOADING NO. 1 **											
NLJ	NLM										
5	0										
*FORCES APPLIED AT JOINT*											
JOINT	F-X	F-Y	F-Z	M-X	M-Y	M-Z					
146	-4.61350E 02	-5.50000E 00	2.50000E 02	0.0	0.0	0.0					
147	-4.61350E 02	-2.55500E 02	0.0	0.0	0.0	0.0					
148	-4.61350E 02	-5.50000E 00	-2.50000E 02	0.0	0.0	0.0					
149	-4.61350E 02	2.44500E 02	0.0	0.0	0.0	0.0					
150	-1.02810E 03	-4.07760E 03	0.0	0.0	0.0	0.0					
***											
***RESULTS FOR SUBSTRUCTURE 33 ***											
***											
**LOADING NO. 1 **											
*JOINT DISPLACEMENTS*											
JOINT	D-X	D-Y	D-Z	R-X	R-Y	R-Z					
146	-1.43364E 01	-1.00662E 02	6.29950E 01	-8.35317E 02	-4.28684E 03	-2.37278E 02					
147	-1.86220E 01	-1.20492E 02	8.25071E 01	-8.86888E 02	-4.13893E 03	-2.34532E 02					
148	-1.24677E 01	-1.40226E 02	6.30464E 01	-8.88515E 02	-4.09084E 03	-2.37300E 02					
149	-8.16654E 00	-1.20403E 02	4.32431E 01	-8.86988E 02	-4.18879E 03	-2.37214E 02					
150	-1.34081E 01	-1.39923E 02	6.55428E 01	-8.86888E 02	-4.18884E 03	-2.43307E 02					
151	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
152	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
153	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
*MEMBER END-REACTIONS*											
MEMBER	JOINT	F-X	F-Y	F-Z	M-X	M-Y	M-Z				
417	146	6.80589E 02	1.07178E 02	5.31210E 01	-9.35973E 01	-1.67771E 03	6.46226E 04				
	150	-6.80689E 02	-1.07178E 02	-5.31210E 01	9.35973E 01	1.33766E 03	3.98478E 03				
418	147	5.34522E 03	2.28920E 01	-8.84600E 03	-3.30772E 03	-1.71654E 00	2.08281E 04				
	150	-5.34522E 03	-2.28920E 01	3.84600E 03	3.30772E 03	7.37388E 00	-6.17496E 03				
419	148	6.80942E 02	1.07206E 02	-5.28983E 01	8.45018E 01	1.67772E 03	6.46258E 04				
	150	-6.80942E 02	-1.07206E 02	5.28983E 01	-8.45018E 01	-1.33862E 03	3.99706E 03				
420	149	-5.61164E 03	2.54010E 01	1.18033E 02	3.32736E 03	-1.19532E 00	1.75047E 04				
	150	5.61164E 03	-2.54010E 01	-1.18033E 02	-3.32736E 03	6.35036E 00	-1.24457E 03				
421	148	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
	151	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
422	149	-8.65240E 02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
	152	8.65240E 02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
423	146	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
	153	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
*SUPPORT REACTIONS*											
JOINT	F-X	F-Y	F-Z	M-X	M-Y	M-Z					
151	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
152	-7.49321E 02	4.32617E 02	0.0	0.0	0.0	0.0					
153	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
***											
***RESULTS FOR SUBSTRUCTURE 32 ***											
***											
**LOADING NO. 1 **											
*JOINT DISPLACEMENTS*											
JOINT	D-X	D-Y	D-Z	R-X	R-Y	R-Z					
142	-1.55409E 01	-5.72247E 01	5.94701E 01	-8.82921E 02	-4.14831E 03	-2.08762E 02					
143	-2.43045E 01	-1.03607E 02	1.05823E 02	-8.86888E 02	-4.18894E 03	-2.02468E 02					
144	-1.11816E 01	-1.43523E 02	5.98367E 01	-8.90880E 02	-4.22963E 03	-2.08773E 02					
145	-2.20553E 00	-1.03187E 02	1.35234E 01	-8.86888E 02	-4.18869E 03	-2.04148E 02					
146	-1.43364E 01	-1.00662E 02	6.29950E 01	-8.85317E 02	-4.20684E 03	-2.37278E 02					
147	-1.36220E 01	-1.20492E 02	8.28071E 01	-8.86888E 02	-4.18893E 03	-2.34532E 02					
148	-1.24677E 01	-1.40226E 02	6.30640E 01	-8.88515E 02	-4.09084E 03	-2.37214E 02					
149	-8.14654E 00	-1.20403E 02	4.92431E 01	-8.86888E 02	-4.18879E 03	-2.37214E 02					

MEMBER	END-REACTIONS*	F-X	F-Y	F-Z	M-X	M-Y	M-Z
405	142	1.035100 03	-9.652280 01	-4.672700 00	-8.178590 01	2.310230 03	-1.775490 04
	146	-1.035100 03	9.652280 01	4.672700 00	8.178590 01	1.677710 03	-6.462370 04
406	143	5.917060 03	-3.165460 01	-3.965700 03	-3.244970 03	1.668010 00	-6.187660 03
	147	-5.917060 02	3.165460 01	3.965700 03	3.244970 03	1.716540 00	-2.082810 04
407	144	1.035210 03	-9.652890 01	4.672970 00	8.213930 01	-2.310950 03	-1.775740 04
	148	-1.035210 03	9.652890 01	-4.672970 00	-8.213930 01	-1.677220 03	-6.462580 04
	145	-4.301570 03	-2.333040 01	-1.046240 03	-3.108890 03	-3.023970 01	-2.406790 03
	149	4.301570 03	2.333040 01	1.046240 03	-3.108890 03	1.195320 00	-1.750470 04
408	143	2.6222820 02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	146	-2.6222820 02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	148	2.6242420 02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

\*\*\*  
\*\*\*RESULTS FOR SUBSTRUCTURE 1 \*\*\*  
\*\*\*

JOINT	D-X	D-Y	D-Z	R-X	R-Y	R-Z
1	0.0	0.0	0.0	3.247630 04	1.121010 03	
2	-2.143190 01	1.126030 01	1.349750 01	-1.043250 02	-3.226620 04	2.3596eD-02
3	2.494340 01	1.004690 00	1.015530 01	-1.026450 02	-2.170180 02	1.564880 03
4	-3.472270 01	-9.389870 00	-5.229280 01	-1.039610 02	9.571860 04	-2.123580 02
5	-2.065470 01	3.617680 01	-1.054770 01	-1.027100 02	2.235240 02	8.118920 04
6	-2.939760 01	3.235990 01	-1.154450 00	-1.531840 02	5.969650 04	1.244740 02
7	-1.713180 01	1.071930 00	3.011430 01	-3.538280 02	-1.105240 02	4.198780 04
8	-5.640260 01	-2.374700 01	2.906140 01	-3.524370 02	-1.095820 04	-9.552040 03
9	-1.643540 00	2.539960 00	-3.098430 01	-3.538910 02	1.156560 02	2.582200 03

MEMBER	END-REACTIONS*	F-X	F-Y	F-Z	M-X	M-Y	M-Z
1	1	5.858750 03	-3.843150 03	-9.103840 01	2.898730 03	3.909960 04	-2.438070 06
	2	-5.868750 03	3.843150 03	9.103840 01	-2.898730 03	1.917720 04	-2.206860 04
2	1	4.419580 03	-7.617000 01	-3.721450 03	2.899780 03	2.375920 06	-3.120800 04
	3	-4.419580 03	7.617000 01	3.721450 03	-2.899780 03	6.184410 03	-1.754840 04
3	1	5.475150 03	3.862720 03	9.061930 01	2.912130 03	-3.873360 04	2.438520 06
	4	-5.475150 03	-3.862720 03	-9.061930 01	-2.912130 03	-1.927190 04	3.401020 04
4	1	5.4222870 03	8.094490 01	3.722540 03	2.902830 03	-2.376440 06	3.066330 04
	5	-5.4222870 03	-8.094490 01	-3.722540 03	-2.902830 03	-6.489730 03	2.115190 04
5	2	-2.708380 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3	2.708380 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	3	2.539760 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4	-2.539760 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	4	-2.715720 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	2.715720 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	2	2.522220 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	-2.522220 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	2	5.424710 03	1.632620 01	4.002030 01	2.894690 03	-1.917720 04	2.206920 04
	5	-5.424710 03	-1.632620 01	-4.002030 01	-2.894690 03	-1.497830 04	-8.135490 03
10	3	4.378610 03	3.499750 01	-1.006120 01	2.899560 03	-6.184520 03	1.754840 04
	7	-4.378610 03	-3.499750 01	1.006120 01	-2.899560 03	1.477130 04	1.232040 04
11	4	5.092770 03	-3.394990 01	-3.945480 01	2.910890 03	1.927190 04	-3.401030 04
	8	-5.092770 03	3.394990 01	3.945480 01	-2.910890 03	1.440100 04	5.035610 03
12	5	5.377510 03	-4.009850 01	1.212020 01	2.901640 03	6.490260 03	-2.115190 04
	9	-5.377510 03	4.009850 01	-1.212020 01	-2.901640 03	-1.683430 04	-1.306870 04
13	2	7.372040 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	-7.372040 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	4	-6.922100 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	6.922100 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	4	7.417020 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	-7.417020 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	2	-6.375920 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	6.375920 03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	5	-6.653420 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	6.653420 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	7	-2.377880 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	8	2.377880 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	8	-9.051140 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	9.051140 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	20	6. -5.021900 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	5.021900 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

JOINT	F-X	F-Y	F-Z	M-X	M-Y	M-Z
1	1.495670 04	3.741770 02	1.386270 02	3.366100 06	0.0.0.	0.0

\*THE END\*

で最後の部分構造の節点変位成分を求めることができる。これを(5)式に代入することにより  $(n-1)$  番目の部分構造の節点変位成分が求まる。おのおのの部分構造について、この逆向き代入の過程を繰返す。すなわち、 $i$  番目の部分構造に対しては(3)式、最初の部分構造については(1)式を用いる。このようにして構造物のすべての節点変位成分が解かれる。SLISTAN 2 では前進消去のとき、積み重ね法を用いコア内での計算を有効に行なっている。また、本プログラムは立体トラスと立体骨組に分けて計算するよう作られており、SLISTAN 1 と同様につぎのような制限がある。コア 100K バイト、磁気テープ 2401-2 (9 トラック) 1 台を使用する場合、部分構造数 250 以下、荷重系の数 3 以下、1 部分構造の節点数 20 以下 (立体骨組の場合 10 以下) および 1 部分構造の部材数 30 以下である。

#### 4. 計算例

プログラム SLISTAN 1 および SLISTAN 2 を用いて解析し、強度検討あるいは基本設計を行なったものに、橋梁架設工事用マット、ローリングタワー用階段枠、変電所用断路器架台 (本誌、12 (1971), 161)、車両運搬車ボディおよび送電鉄塔建造用塔形クレーンなどがある。そのうち SLISTAN 2 で解析した車両運搬車ボディおよび送

電鉄塔建造用塔形クレーンの構造の概略を第 3 図および第 4 図に掲げる。また、後の出力データの抜粋を第 2 表に示す。これは 33 の部分構造に分割して計算されている。

#### 5. 結言

変位法による骨組構造解析法の概要を述べるとともに、著者らが開発した骨組構造解析プログラム SLISTAN 1 および SLISTAN 2 とその適用例を紹介した。両プログラムは直接法を用い、倍精度演算を行なっているので精度はよいが、比較的コア記憶を多く使うため解析できる構造物の大きさが限定される。今後、機会があればこの点に改良を加えたいと考える。

おわりに、本プログラムを作るにあたり、ご便宜とご教示を仰いだ当社事務管理部に深く謝意を表す。

#### 文 献

- 1) W. Weaver, Jr. 著、山本善之訳：構造物解析のプログラム、共立出版、(1968)
- 2) H. C. Martin : *Introduction to matrix methods of structural analysis*, Mc Graw-Hill, (1966)
- 3) 日本 IBM (株) データセンター：骨組立体構造物の解析プログラム FRAN (User's Guide), (1968)

R 142

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS Vol. 12 No. 4 OCT. 1971

技 術 資 料

アルミニウム合金製足場板の開発

竹内勝治  
畠山章  
菊地昭雄

住友軽金属工業株式会社

# アルミニウム合金製足場板の開発

竹内勝治\* 畠山 章\*\* 菊地昭雄\*\*

## Development of Aluminum Alloy Scaffolding Plate

by Katsuzi Takeuchi, Akira Hatakeyama and Akio Kikuchi

This paper is described about the development of aluminum alloy scaffolding plates used for construction of shipbuilding and other construction works. The following test were performed:

- (1) Application of  $25 \times 10^3$  cycles of centrally concentrated loading of 250kg and a static bending test thereafter.
- (2) Application of  $10^7$  cycles of centrally concentrated loading of 300kg.
- (3) Drop test from the height of 12 meters.
- (4) Investigation of damage rate after exposing to fire.

The developed scaffolding plates were used in the shipbuilding yard under a comparatively severe condition for a year, then fatigue test described under (1), was performed on these plates.

Test results were satisfactory in all respects. An almost ideal scaffolding plate was thus developed, having the following characteristics:

1. Half the weight of wooden scaffolding and it will float in water.
2. Good heat and flaming resistance.
3. High strength.

### 1. 緒 言

現在、造船をはじめとして大型構築物の建造作業用の架設足場板は、杉材から製材された足場板が一般に使用されている。この種の足場板は木製の特長を發揮した多くの長所もあるが、また、木製であるためつぎのような欠陥が最近では問題となっている。

(1) 重い。乾燥状態によってじやっかんの相違があるが、長さ4mの足場板が35~40kg、5mもので55~60kg、6mものでは75~80kgである。最近では足場作業職の確保が困難となってきていると共に、とくに大型化されてきた構築物の足場の架設・撤去作業においては、このように重い足場板は取扱いの面からも危険なものとなっている。

(2) 燃えやすい。木製なので当然のことである。特に造船のように、ガス切断、溶接などを多く行なう作業場では足場板の火災防止が重要な問題となっている。

(3) 強度の散らばりが大きくなっている。住宅産業その他への需要の増大から資源が払底し、最近では足場板となる原木の質も低下しており、節疵が少なく良質の足場板の入手はますます困難となっている。

以上のようなことから、当社は石川島播磨重工業株式会社と共同でつぎの特長をもつアルミニウム合金製足場板を

開発した。

- (1) 軽い。
- (2) 火に強い。
- (3) 強度が均一。
- (4) 水に浮く。
- (5) 滑りにくい。

本足場板はすでに石川島播磨重工業株式会社船舶事業部横浜第二工場において実用に入っており、前述した木製足場板の欠陥を補い、かつ、木製の特長を具備するほぼ理想的な足場板であることが確認された。本報はその構造および静荷重、疲労、落下、火気などの諸試験の結果、実用試験などについてまとめたものである。

### 2. 設 計

#### 2.1 足場板の荷重条件

法規関係では足場に関する規定はあるが、足場板の荷重条件を明確に規定したものはない。たとえば、「労働安全衛生規則」の第107~108条には足場に使用する鋼管ならびに木材の各種許容応力が定めてあり、また、鋼管足場については同規則の第109条ならびにJIS A 8951-1961“鋼管足場”に規定されている程度である。

造船関係では、造船協会鋼船工作法研究委員会編の鋼船工作法にもっとも普通に用いられている杉材について足場板の幅、厚さ、およびスパンの関係<sup>1)</sup>が示されている。通

\* 開発部兼研究部 工学博士

\*\* 開発部

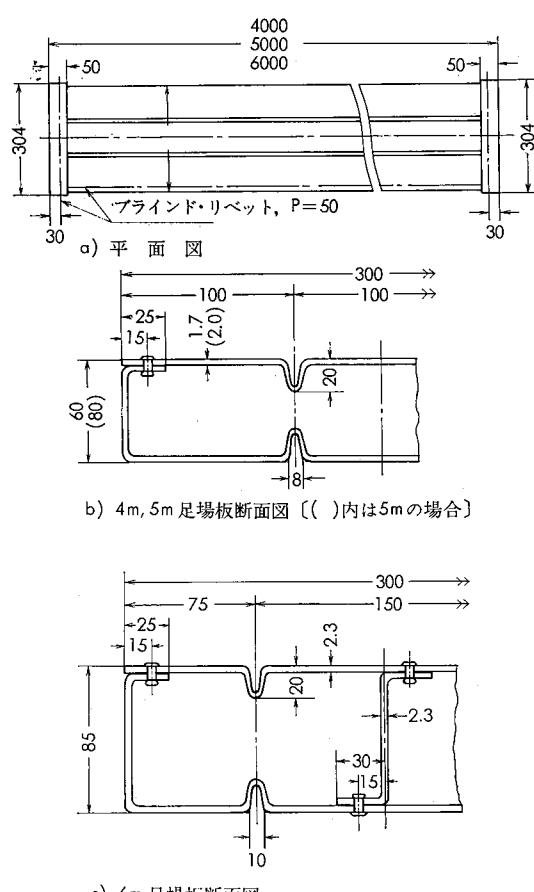
常の4m足場板(幅30cm, 厚さ6cm, スパン3.8m)を例にあげると、試験基本荷重は中央集中荷重183kgで、破壊に対する安全率が2以上、動的荷重試験ではたわみが試験基本荷重負荷時の2倍になるまで振ればよく、最大たわみが12cmである。また、荷重としては100kg/mの等分布荷重がスパン4m以下の場合にはスパン全長に、4mをこえる場合は4m区間のみに活荷重としてそれぞれ作用し、他に死荷重として板の自重がスパン全長にわたって作用するとみなすわけで、この場合の安全率は2.5~3.5である。

以上のことから、アルミニウム合金製足場板の設計荷重条件は、等分布荷重100kg/mで安全率3、または中央集中荷重200kgで安全率が2.5以上を目標とした。

## 2-2 足場板の構造

足場板の幅は取扱いの面から現在一般に用いられている30cmに統一し、長さを4, 5および6mの3種類とした。板厚がそれぞれ1.7, 2.0および2.3mmの5052-H14板をプレス・プレーキによって第1図に示す形状に成形し、その両端には板厚2mmの5052-H14板から成形した深さ5cmの蓋を被せ、各接合にはすべて0.5cmφのアルミニウム合金製ブラインド・リベット(ピッチ5cm)を用いた。

足場板は第1図に示したように表裏両面に縦通したリブをもち、6m足場板ではさらに補強材を断面中央部に縦通させている。足場板の内部には自己消火性の高い発泡ポリウレタンを充てんし、表裏両面には滑り止めとしてサンド



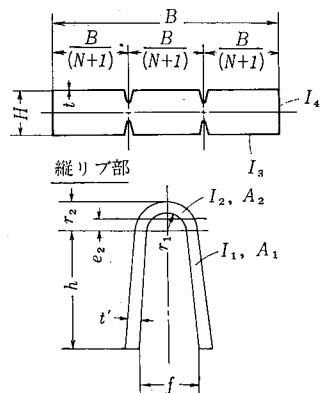
第1図 足場板の形状ならびに寸法

・プラス処理が施してある。

## 2.3 強度計算

強度計算はもっとも広く使用されている4および5m足場板について述べる。

**2.3.1 断面性能** 足場板の断面について第2図のように各部の記号を定めると、断面二次モーメント $I$ と断面係数 $Z$ はそれぞれ(1)および(2)式から得られる。



第2図 記号

$$I = 2N(I_1 + I_2) + 2N \left[ A_1 \left( \frac{H}{2} - \frac{h}{2} \right)^2 + A_2 \left\{ \frac{H}{2} - (h + e_2) \right\}^2 \right] + 2(I_3 + I_4) + 2Bt \left( \frac{H}{2} \right)^2 \quad (1)$$

$$Z = \frac{2I}{H} \quad (2)$$

ここに、  
B: 足場板の幅  
H: 足場板の厚さ  
N: 縦リブの数

$A_i$ : 縦リブ各部の断面積,  $A_1 = 2t'h$ ,

$$A_2 = \frac{\pi}{2} (r_2^2 - r_1^2)$$

$r_1$ : 縦リブ先端の内側半径,  $r_2 = r_1 + t$

$t$ : 板厚,  $t' = t/\cos \theta$

$$\text{ただし, } \theta = \sin^{-1} \left\{ \left( \frac{f}{2} - r_1 \right) / h \right\}$$

$f$  は縦リブの根本の幅

$h$ : 縦リブの半円部 $r_2$ を除いた深さ

$$I_1 = 2 \cdot \frac{t'h^3}{12}$$

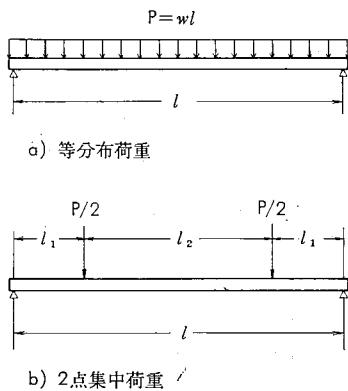
$$I_2 = 0.1098(r_2^4 - r_1^4) - \frac{0.283r_2^2r_1^2(r_2 - r_1)}{r_2 + r_1}$$

$$I_3 = \frac{Bt^3}{12}$$

$$I_4 = \frac{tH^3}{12}$$

$$e_2 = \frac{4(r_2^2 + r_2r_1 + r_1^2)}{3\pi(r_2 + r_1)}$$

**2.3.2 曲げモーメントおよびたわみ** 足場板が第3図のように等分布荷重、または2点集中荷重を受けるときの最大曲げモーメント $M$ はそれぞれ(3)および(4)式で、また、たわみ $\delta$ は(5), (6)式から得られる。



第3図 負荷条件

$$M_a = \frac{wl^2}{8} \quad (3)$$

$$M_b = \frac{Pl_1}{2} \quad (4)$$

$$\delta_a = \frac{5wl^4}{384EI} \quad (5)$$

$$\delta_b = \frac{P}{2EI} \left\{ \frac{l_1^3}{6} \left( \frac{3l_2}{l_1} + 2 \right) + \frac{l_1 l_2^2}{8} \right\} \quad (6)$$

ここに,  $P$ : 集中荷重

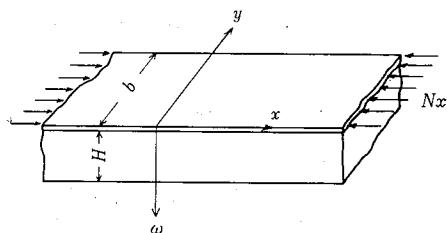
$w$ : 単位長さ当りの荷重

$l$ : スパン

$E$ : 縦弾性係数

### 2.3.3 ポリウレタン充てんの場合の皮板の局部座屈

ポリウレタンがある場合の座屈に対する効果を検討するため、第4図に示すように記号を定めて一方向圧縮を受ける薄板の弾性体上の座屈強度を求めた。仮定はつぎのようである。



第4図 記号

- 1) 弾性体の反力  $R$  はたわみ  $\omega$  に比例する。  

$$R = k\omega$$

ただし,  $k$ : バネ定数
- 2) 弾性体の変形エネルギーはバネ定数によるものだけとする。
- 3) 境界条件は帯板の幅対辺で単純支持とし、たわみ形をつぎのようにとる。

$$\omega = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{\lambda} \sin \frac{n\pi y}{\lambda} \quad (7)$$

(7)式で、 $\lambda$  は座屈変形の半波長であり、長さ方向に波長に  $\lambda$  でもって周期的にたわむと考えることができるからである。 $\lambda$  はさしあたって任意に固定しておき、最小の座屈値を与える条件より後で定めるものと

する。

板の曲げ剛性  $D$  を次式で示すと

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

ただし、 $\nu$ : ポアソン比

板の曲げエネルギー  $\Delta V$  は(8)式のようになる。

$$\Delta V = \frac{D}{2} \int_0^{\lambda} \int_0^b \left[ \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) \right] dy dx \quad (8)$$

単位当たりの軸力を  $N_x$  とすると、 $N_x$  がなすエネルギー  $\Delta W$  は(9)式となる。

$$\Delta W = \frac{1}{2} N_x \int_0^{\lambda} \int_0^b \left( \frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 dy dx \quad (9)$$

弾性体の変形エネルギー  $\Delta E$  は(10)式で表わされる。

$$\Delta E = \frac{1}{2} \int_0^{\lambda} \int_0^b k \omega^2 dy dx \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial a_{mn}} (\Delta V + \Delta E - \Delta W) = 0$$

ただし,  $n=1, 2, 3, \dots$

に(7)式を代入し、 $n=1$  とすれば極小値を与えるから

$$N_x = \frac{\pi^2 \lambda^2 D}{m^2} \left( \frac{m^2}{\lambda^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 + \frac{\lambda^2}{\pi^2} \cdot \frac{k}{m^2}$$

となり、 $m=1$ 、すなわち、座屈の半波長  $\lambda$  における座屈応力  $\sigma_{cr}$  を求めると(11)式のようになる。

$$\sigma_{cr} = \frac{N_x}{t} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2 \left( \frac{b}{\lambda} + \frac{\lambda}{b} \right)^2 + \frac{\lambda^2}{\pi^2} \cdot \frac{k}{t} \quad (11)$$

$\lambda/b = \beta$  とすると

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2 \left( \frac{1}{\beta} + \beta \right)^2 + \frac{\beta^2 b^2}{\pi^2} \cdot \frac{k}{t} \quad (11)'$$

$\beta$  に対する  $\sigma_{cr}$  の極値を求めるため、 $\partial \sigma_{cr} / \partial \beta = 0$  より  $\beta_{min}$  は(12)式のようになる。

$$\beta_{min} = \left( \frac{1}{1+A} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (12)$$

$$\text{ただし, } A = \frac{b^2}{\pi^2} \cdot \frac{k}{t} / \left\{ \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2 \right\}$$

したがって、(13)式が得られる。

$$\lambda_{min} = b \beta_{min} \quad (13)$$

なお、バネ定数  $k$  を求めるため、ポリウレタンの3軸状態における応力とひずみの関係を弾性学にしたがって次のように表わす。

$$\sigma_u = \frac{E_u \nu_u}{(1-2\nu_u)(1+\nu_u)} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_w) + \frac{2E_u \varepsilon_u}{2(1+\nu_u)}$$

ただし、 $\nu_u$ : ポリウレタンのポアソン比

$E_u$ : ポリウレタンの縦弾性係数

足場板の場合、周囲がアルミニウムで囲まれているからひずみを  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$  とすれば

$$\sigma_u = \frac{(1-\nu_u) E_u \varepsilon_u}{(1-2\nu_u)(1+\nu_u)} = k\omega$$

となる。 $\varepsilon_u$  は曲げ変形後、座屈が起ると考えて

$$\varepsilon_u = \omega/H$$

とすれば、前2式から(14)式が得られる。

$$k = \frac{(1-\nu_u)}{(1-2\nu_u)(1+\nu_u)} \cdot \frac{E_u}{H} \quad (14)$$

**2.3.4 側板の座屈強度** 周辺単純支持の場合の曲げ座屈応力  $\sigma_{1c}$  は (15) 式で表わされ、 $\lambda/b > 2/3$  に対し  $C_1 = 23.9$  である<sup>2)</sup>。また、剪断座屈応力  $\tau_{1c}$  は (16) 式で示され、 $\lambda/b = \infty$  に対し  $C_2 = 5.35$  である<sup>3)</sup>。

$$\sigma_{1c} = C_1 \frac{E\pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{H}\right)^2 \quad (15)$$

$$\tau_{1c} = C_2 \frac{E\pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{H}\right)^2 \quad (16)$$

**2.3.5 計算値** 前項までの各式に数値を代入し、4 m足場板の場合を第1表に示す。ただし、4 m足場板は幅  $B=30 \text{ cm}$ 、厚さ  $H=6 \text{ cm}$ 、板厚  $t=0.15, 0.17, 0.20 \text{ cm}$  の3種類、縦リブは両面に2または3本とし、その形状はすべて同じとした。代入した数値を次に示す。

- 1) 断面性能  $r_1=0.25 \text{ cm}$ ,  $f=0.8 \text{ cm}$ ,  $h=1.55 \text{ cm}$
- 2) たわみ  $E=0.70 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

$$P=wl=1000 \text{ kg} \quad (\text{弾性域の延長として便宜上このようにした})$$

$$l=380 \text{ cm}, l_2=100 \text{ cm}$$

- 3) 皮板の座屈  $\nu=0.33$ ,  $\nu_u=0.2$ ,  $E_u=30 \text{ kg/cm}^2$

縦リブが2本の場合、 $b=9.2 \text{ cm}$ 、3本の場合は $b=6.7 \text{ cm}$ とした。なお、第1表に示した座屈時の曲げモーメント  $M_{cr}$  は  $M_{cr}=\sigma_{cr} \cdot Z$  である。

なお、(11)および(12)式において  $k=0$  とすれば、(11)式は次のようになり、周辺単純支持の一方向圧縮による座屈応力が得られる。

$$\sigma_{cr}=4 \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

1例として、 $t=0.17 \text{ cm}$ 、縦リブ2本の場合についてポリウレタンの有無による座屈応力の計算値の比較をすると

$$\gamma=\frac{1132}{908}=1.25$$

となり、座屈に対してポリウレタンが有効なことがわかる。

つぎに、側板の座屈応力は  $t=0.17 \text{ cm}$  の場合について計

算すると  $\sigma_{1c}=17647 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\tau_{1c}=3950 \text{ kg/cm}^2$  となつて、非常に大きな値である。

### 3. 性能試験

#### 3.1 静荷重試験

足場板は4 mのものを用いてスパン  $l=3.8 \text{ m}$  の両端回転支持とした。等分布荷重試験は等分布荷重に近い20等分割荷重負荷装置およびヒッパラーを用いて負荷し、写真1に示す。2点集中荷重試験は荷重点間隔1 mの対称2点荷重曲げとし、荷重点には厚さ 0.3 cm のゴム板4枚を重ね、その上に 5 cmφ 鋼棒をおいた。荷重はロードセルを用い、たわみはカセットメータによってそれぞれ測定した。

試験結果は前掲の第1表に示した。第1表の最大応力  $\sigma$  は最大荷重  $P_E$  から算出した最大曲げモーメント  $M_E$  を  $Z$  で除した値である。安全率は使用荷重条件  $w=100 \text{ kg/m}$  から算出した曲げモーメント  $M_d (=wl^2/8=0.18 \times 10^5 \text{ kg-cm})$  で除して得たものである。

以上の結果からつぎのことがいえる。

(1)  $w=100 \text{ kg/m}$  の条件に対して安全率が3前後となるのは  $t=1.7 \text{ mm}$  で縦リブが2本の場合である。 $t=2 \text{ mm}$  の場合は2点集中荷重の場合も含めて安全率がじゃっかん高すぎるようである。

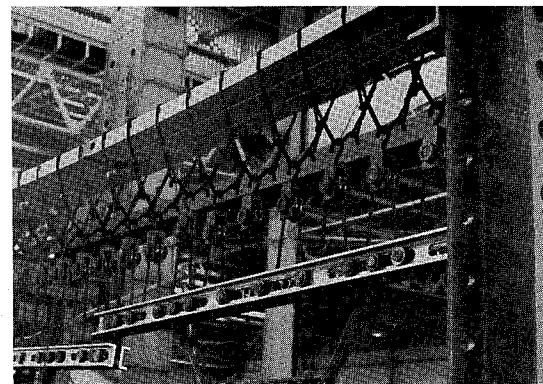


写真1 20等分割荷重試験装置

第1表 4 m足場板の計算値ならびに実験値

負荷方式	断面形状 <sup>(1)</sup> (B=30cm) H=6cm	計算値				実験値		最大応力 $\sigma$ , kg/cm <sup>2</sup>	安全率 <sup>(5)</sup> $\frac{M_E}{M_d}$
		断面二次モーメント $I_z$ , cm <sup>4</sup>	断面係数 $Z$ , cm <sup>3</sup>	最大たわみ $\delta$ , cm	皮板の座屈応力 $\sigma_{cr}$ , kg/cm <sup>2</sup>	座屈時の曲げモーメント $M_{cr}$ , kg-cm	最大荷重 $P_E$ , kg		
等分布荷重	$t=1.5 \text{ mm}$ リブ数 3 $\rho=70 \text{ g/l}$	102.3	34.1	9.70	1483	$0.506 \times 10^5$	1000	$0.475 \times 10^5$	1392 <sup>(2)</sup> 2.63
	$t=1.7 \text{ mm}$ リブ数 2 $\rho=50 \text{ g/l}$	110.0	36.7	9.02	1132	$0.416 \times 10^5$	1230	$0.583 \times 10^5$	1590 <sup>(2)</sup> 3.23
	$t=1.7 \text{ mm}$ リブ数 2 $\rho=30 \text{ g/l}$	110.0	36.7	9.02	1132	$0.416 \times 10^5$	1110	$0.525 \times 10^5$	1430 <sup>(2)</sup> 2.91
	$t=2.0 \text{ mm}$ リブ数 2 $\rho=70 \text{ g/l}$	129.4	43.1	7.67	1461	$0.631 \times 10^5$	1650	$0.782 \times 10^5$	1812 <sup>(2)</sup> 4.33
二点集中荷重	$t=1.5 \text{ mm}$ リブ数 3 $\rho=70 \text{ g/l}$	102.3	34.1	12.87	1483	$0.506 \times 10^5$	480	$0.366 \times 10^5$	1072 <sup>(3)</sup> 1.86
	$t=2.0 \text{ mm}$ <sup>(4)</sup> リブ数 2 $\rho=70 \text{ g/l}$	129.4	43.1	10.95	1461	$0.631 \times 10^5$	983	$0.66 \times 10^5$	1530 <sup>(3)</sup> 3.66

注. (1)  $\rho$  はポリウレタンの密度  
(2) リブ材間皮板の座屈  
(3) 荷重点の局部座屈

(4)  $l_2=106.8 \text{ cm}$   
(5)  $M_d=wl^2/8$ ,  $w=100 \text{ kg/m}$

(2) 等分布荷重の場合、座屈位置は写真2に示すようにほとんど足場板の中央であり、リブ間皮板の座屈がおきている。 $\sigma_{cr}$  と、 $P_E$  から求めた値 $\sigma$ を比較すると、後者のほうが平均値で24%ほど高い。これは座屈時の応力が弾性範囲にあり、座屈後の破壊まではモーメントの増加があること、また、計算の仮定は単純支持であるが、実際には縦リブなどの影響による固定条件が多少入ってきたためであろう。なお、2点集中荷重の場合の座屈は荷重点の直下の皮板におきている。

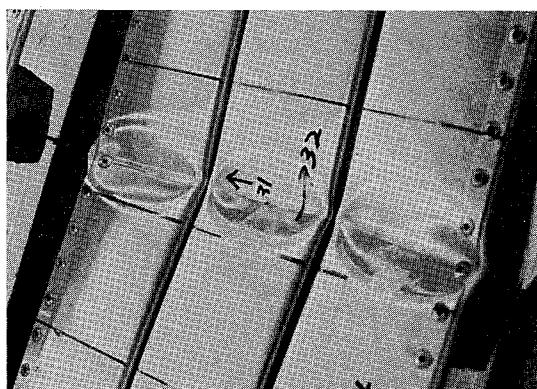
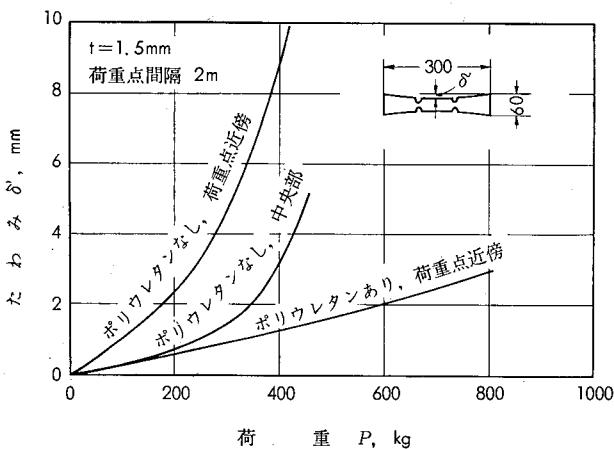


写真2 座屈状況

(3) ポリウレタン充てんの効果はその縦弾性係数がアルミニウムと比べて非常に小さいから曲げ剛性への影響がほとんどないが、2.3.5項で述べたように座屈荷重に対してはかなり有効に作用する。さらに上下皮板の二次変形による近接を防止し、その距離を保つことによって曲げ剛性の低下を防ぐ役目をなしている。また、皮板に縦リブをつけることによってポリウレタンとの接触面積の増加により相互の安定化ならびに皮板の座屈強度の向上がはかられる。すなわち、ポリウレタン、皮板および縦リブ相互間の拘束作用によって生じる効果をねらったものであり、つぎに述べる実験で顕著に現われている。

$t=1.5 \text{ mm}$ , 縦リブ2本の4m足場板について、スパン $l=3.8 \text{ m}$ , 荷重点間隔2mの対称2点荷重曲げ試験を行なった結果は、 $P_E$ で比較するポリウレタン非充てん足場板

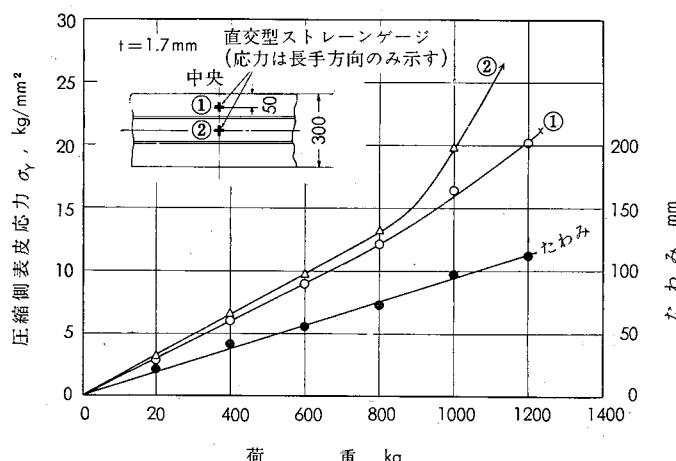


第5図 4m足場板の荷重と幅方向のたわみの関係

が460と470kg, 充てん足場板(ポリウレタン密度 $\rho=70 \text{ g/l}$ )が755と805kgでおよそ68%向上し、第5図はその場合の幅方向のたわみを荷重との関係で示した。

(4) ポリウレタンの密度の影響はあまり明らかでなく、別に行なった実験においても $\rho=30\sim70 \text{ g/l}$ の範囲で最大荷重にとくに差があるとはいがたかった。

(5) 第6図は板厚 $t=1.7 \text{ mm}$ , 縦リブ2本、ポリウレタン密度 $\rho=50 \text{ g/l}$ の足場板の荷重と圧縮面側表皮応力、およびたわみとの関係を示す。表皮応力は第6図に示すように足場板の中央に直交型ストレーンゲージを貼り、静ひずみ計を用いて測定したひずみから、平面ひずみ状態として算出した値である。この数値は初期試作時の足場板についての測定値のためか計算値とじゃっかんの差があり、断面形状と縦リブの拘束が影響したものと考える。



第6図 4m足場板の等分布荷重試験における荷重と応力またはたわみの関係

以上の結果から、4m足場板は $t=1.7 \text{ mm}$ 、縦リブ2本、ポリウレタンの密度は $50 \text{ g/l}$ を標準とすることとした。第2表は第1図の断面形状の足場板について実施した中央集中荷重試験結果であり、5および6m足場板も安全率が3である。

第2表 中央集中荷重試験結果

足場板	曲げ剛性 $EI, \text{kg}\cdot\text{cm}^2$	中央集中荷重試験		安全率 <sup>(1)</sup> $M_E/M_d$
		最大荷重 $P_E, \text{kg}$	最大曲げモーメント $M_E, \text{kg}\cdot\text{cm}$	
4m	1	$6.824 \times 10^7$	600	$0.570 \times 10^5$
	2	$6.447 \times 10^7$	604	$0.574 \times 10^5$
	3	$6.824 \times 10^7$	570	$0.542 \times 10^5$
	4	$7.144 \times 10^7$	608	$0.578 \times 10^5$
5m	1	$1.247 \times 10^8$	686	$0.823 \times 10^5$
	2	$1.245 \times 10^8$	700	$0.840 \times 10^5$
	3	$1.263 \times 10^8$	740	$0.888 \times 10^5$
	4	$1.300 \times 10^8$	748	$0.898 \times 10^5$
	5	$1.300 \times 10^8$	745	$0.894 \times 10^5$
	6	$1.272 \times 10^8$	755	$0.904 \times 10^5$
6m	1	$2.36 \times 10^8$	990	$1.44 \times 10^5$
	2	$2.31 \times 10^8$	930	$1.35 \times 10^5$

注。(1) 安全率は $M_E$ を $M_d = wI^2/8$ で除した。 $w=100 \text{ kg/m}$ ,  $I$ は足場板の全長より20cm短かい。

### 3.2 疲労試験

**3.2.1 中央集中荷重 200 kg 繰返し試験** この種のアルミニウム足場板は中央集中荷重 200 kg で 25,000 回程度の繰返しに耐えることが必要と考えた。供試足場板は第 1 図に示した 4, 5, および 6 m の 3 種類（ポリウレタン密度  $\rho = 50 \text{ g/l}$ ）であり、スパンはそれぞれ 3.8, 4.8 および 5.8 m の両端回転支持である。各足場板はあらかじめ 200 kg の中央集中荷重をたわみとの関係を求めながら 2 回負荷したのち、繰返し試験に供した。これは 1 回目の負荷で 2 mm 程度以下の残留たわみを生じ、それが 2 回目の負荷によって無くなることが確認されているからである。

疲労試験は油圧ジャッキと油圧脈動装置を用いて中央集中荷重とした。試験は最大荷重 200 kg で 25,000 回繰返すことを目指したが、油圧ジャッキを使用する関係上、下限荷重を 0 とすることができないので、荷重比が  $1/6$ 、すなわち、下限荷重 40 kg で上限荷重 200 kg、下限荷重 50 kg で上限荷重 250 kg の 2 条件とした。繰返し速度は 250 cpm である。

実験結果は第 3 表に示し、25,000 回繰返し後の残留たわみと、その後に実施した中央集中荷重曲げ試験における最大荷重もあわせて示した。また、写真 3 は疲労試験状況を示す。

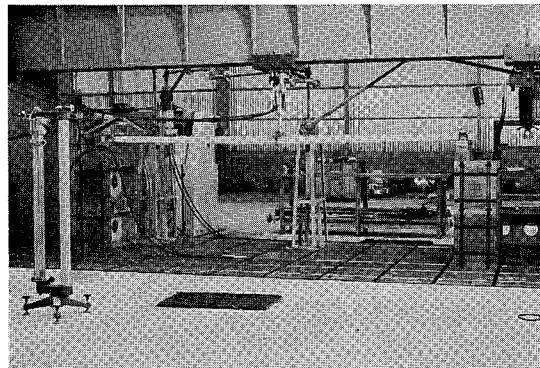


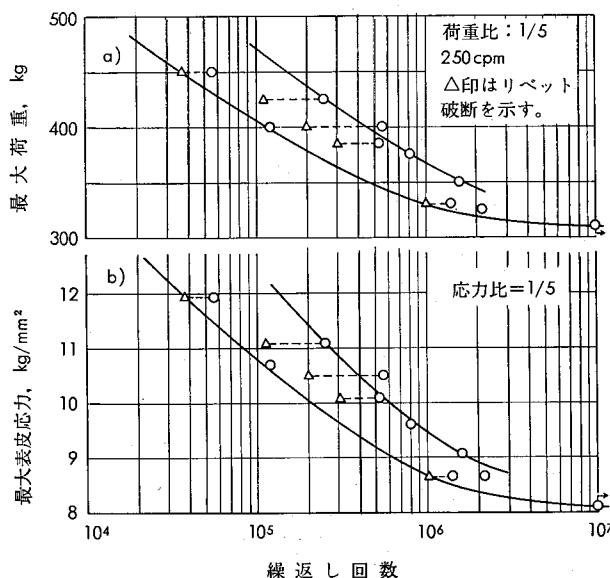
写真 3 疲労試験

以上の結果によると、各足場板は中央集中荷重 200 kg の 25,000 回の繰返しにじゅうぶんに耐え、また、試験後の残留たわみも無視できるほどわずかである。しかも、曲げ試験における最大荷重も前掲の第 2 表の値と比べて遜色がない。

**3.2.2 疲労試験** 前項と同じ条件で製作した 4 m 足場板について疲労強度を測定した。試験方法も前項とまったく同じであり、荷重比は  $1/6$  とした。

第 7 図(a)は最大荷重一繰返し回数曲線を示す。第 7 図(b)は個々の供試足場板について疲労試験前に求めた中央集中荷重一たわみ曲線および実測した断面寸法から最大表皮応力一繰返し回数曲線に換算したものである。

4 m 足場板は中央集中荷重 300 kg で繰返し回数  $10^7$  に耐え、そのときの最大表皮応力は  $8 \text{ kg/mm}^2$  である。疲労き裂は荷重点直下の引張側面に生じ、長手方向にはほぼ直角であった。また、供試足場板の半数近くはき裂発生前に



第 7 図 4 m 足場板の S-N 曲線

第 3 表 足場板の中央集中荷重繰返し試験および静的曲げ試験結果

足場板 の種類	静的試験		繰返し回数 25000 <sup>(2)</sup>				静的曲げ試験 <sup>(3)</sup> 最大荷重, kg	
	第 1 回 荷重, kg/残留 たわみ, mm	第 2 回 動的荷重相当下の 中央たわみ <sup>(1)</sup> 下限/上限, mm	下限荷重/上限荷重 kg	平均荷重, kg	荷重振幅, kg	疲労試験後の 残留たわみ, mm		
	荷重, kg/残留 たわみ, mm	下限/上限, mm						
4 m	1 2 3	200/2.1 200/0.6 200/1.5	5.1/29.2 5.2/28.8 5.1/29.4	40/200 40/200 40/200	120 120 120	80 80 80	1.0 0.4 0.5	572 562 618
	4 5	250/2.0 250/0.4	6.5/34.9 7.1/37.7	50/250 50/250	150 150	100 100	1.0 0	598 601
5 m	1	200/0.5	4.6/24.7	40/200	120	80	0.2	730
6 m	1	200/0.4	6.8/34.4	40/200	120	80	0.3	990
	2	250/0.5	8.9/44.0	50/250	150	100	0.6	930

注. (1) 残留たわみはいずれも 0。

(2) 静的試験後実施, 250 cpm, 応力比  $1/6$ 。

(3) 繰返し試験後実施, 中央集中荷重。

ラインド・リベットの破断を一部に生じているが、その後でもおよそ倍以上の寿命をもっていることがわかった。

### 3.3 落下試験

落下試験は4 m 足場板を高さ 12 m からほぼ垂直に、また、5 m からおよそ 60° の角度で、それぞれコンクリート床上で行なった。

結果はいずれも足場板の端部、すなわち、蓋と本体との境目付近が変形する程度であり、その1例として比較的損傷の大きなものを写真4に示す。その場合でも、変形部を丸鋸盤などによって切断し、蓋を取り替えることにより再使用が可能であった。内部のポリウレタンがこの種の落下に対して大きく寄与しているものと考えられる。木製足場板であれば、その大半はひびわれが生じるところである。

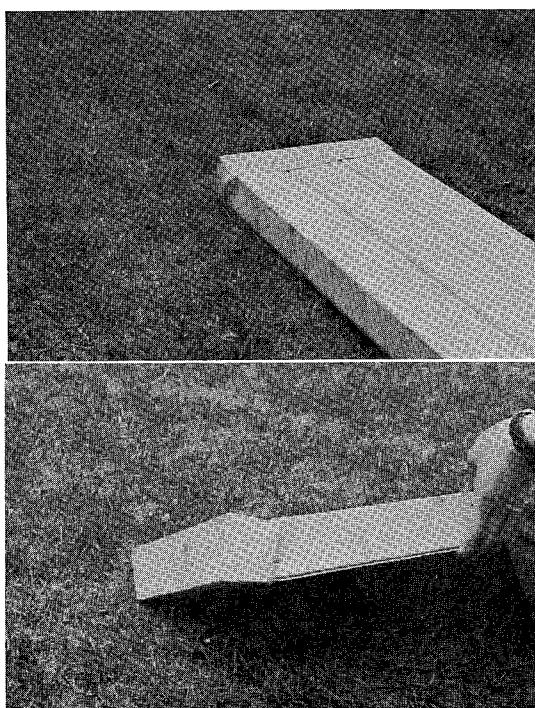


写真4 高さ12mからの落下試験による変形

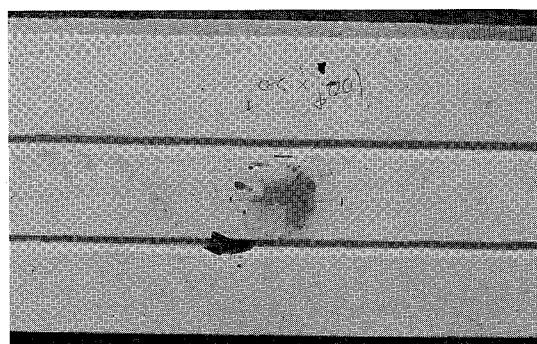
### 3.4 火気試験

足場板はその使用箇所により火気に対してきわめてきびしい条件にさらされることがある。たとえば、ガス切断作業では赤熱したノロが集中的に足場板に落ちることがあり、木製足場板などの場合には往々にして火災がおきるので、その予防に苦慮しているのが現状である。本報の足場板の場合でも皮板の溶解、ポリウレタンの燃焼などもおこるわけであり、これに対して二、三の実験を行なった。

まず、溶断した鉄片などが足場上に落下した場合を考慮し、 $10\phi \times 10\text{ mm}$  から  $100\phi \times 20\text{ mm}$  厚さまでの計11個の軟鋼円板を、 $1200^{\circ}\text{C}$  に加熱し、これを足場板面にのせてそれによる損傷の程度を調べた。その1例を写真5に示す。結果は熱応力によって接触部がわずかにふくらむ程度で、皮板が溶ける兆しはまったくなかった。



a)  $100\phi \times 20\text{ mm}$  軟鋼円板 ( $1200^{\circ}\text{C}$ ) 放置



b) 除去後

写真5 火気試験(その1)

つぎに、もっともきびしい条件として、写真6に示すように厚さ 2.5 cm の鋼片をおよそ 300 cm の高さに垂直におき、その端面をトーチを用いて連続して溶かし、ノロを足場板面上に集中して連続落下させた。足場板の内部に充てんしたポリウレタンはSE型 (Self Extinguish Type) とSNB型 (Super Non-Burning Type) の2種類とし、発火までの時間を調べた。

実験結果はSNB型ポリウレタンの場合、3 min 5 secで発煙と発火がおこり、SE型では1 min 5 secに発煙して10 sec後に発火した。

この実験では同時に耐火性塗料の効果やアスベストによる被覆の影響なども調査したが、いずれもSNB型ポリウレタンを充てんした場合に及ばなかった。

以上のように、厳しい条件下では3 min程度で局部的に皮板が溶けて発火するが、同一条件で比較した木製足場板(幅300×厚さ50 mm)が20 sec、合板製足場板(同)は15 secで発火したことと比べると格段に優れている。

### 3.5 損傷足場板の性能

**3.5.1 供試足場板** 石川島播磨重工業㈱東京第二工場でもっともきびしい条件下で6か月間および1年間連続して使用された4 m 足場板について調査した。足場板の架設場所は曲り外板のガス切断による切り合わせ作業用となるところで、かつ、同社フリーダム貨物船の連続建造であるため、ガス切断によるノロは同じ場所に連続落下する条件で使用された。

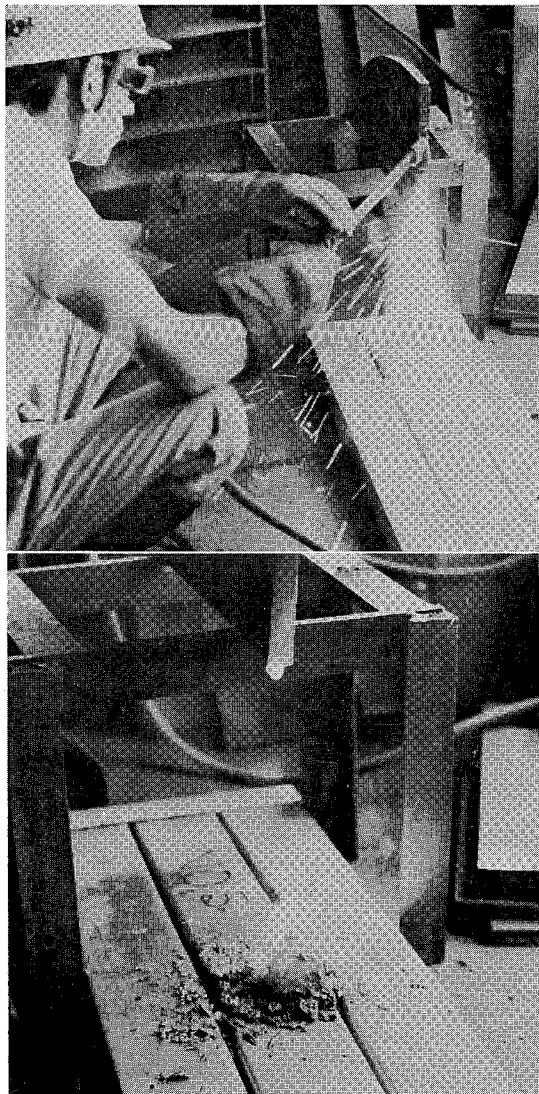


写真6 火気試験(その2)

### 3.5.2 中央集中荷重 250kg 繰返しおよび静的曲げ試験

落下物による損傷その他により 19~53 mm の変形が生じていた足場板をえらび、3.2.1 項と同じ方法で試験を行なった。変形があるので、凹面側は圧縮となるように支持し、下限荷重を 50 kg、上限荷重を 250 kg とした。結果は第4表に示し、第8図は繰返し試験前の荷重とたわみの関係を示す。

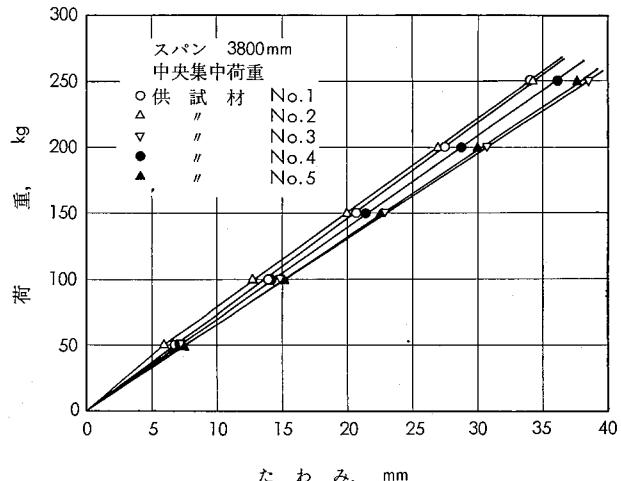
第4表 4m損傷足場板の中央集中荷重繰返し試験および静的曲げ試験結果

足場板番号	静的試験		繰返し回数 25000 (2)		静的曲げ試験最大荷重、kg (3)
	第1回荷重、kg/残留たわみ、mm	第2回動的荷重相当下の中央たわみ(1)、mm	下限荷重/上限荷重、kg	繰返し試験後の残留たわみ、mm	
1	250/0.4	6.8/34.1	50/250	2.1	384
2	250/0.1	5.9/34.2	50/250	1.0	380
3	250/2.1	7.3/38.5	20/250	2.1	310
4	250/0.5	6.9/36.2	50/250	0.5	454
5	250/1.5	7.6/37.7	50/250	0.9	390

注. (1) 残留たわみはいずれも 0。

(2) 静的試験後実施、250cpm、応力比 1%。

(3) 繰返し試験後実施、中央集中荷重。



第8図 4m損傷足場板の荷重とたわみの関係

各足場板は中央集中荷重 250 kg の 25,000 回の繰返しに耐え、繰返し試験後の残留たわみもわずかであり、この程度の損傷は問題ないと考える。しかし、繰返し試験後の最大荷重が 310~454 kg (平均 384 kg) で、3.2.1 項の 562~618 kg (平均 590 kg) にくらべておよそ 65% である。溶解穴などの損傷は圧縮面側にあるので、その影響よりもむしろ 19~53 mm のたわみをもつ変形の影響のほうが大きいと考えられる。足場板にどの程度までの損傷が許されるかについては重要な問題なので、今後も検討を行なうことにしている。

**3.5.3 表面の腐食状況** 足場板の表面はガス切断作業時のノロや溶接時の火花により鉄錆が表面に付着して外観が茶色になるが、表面をワイヤ・ブラシでこすって鉄錆を除去するとサンド・ブラストされた地肌が現われ、肉眼観察では腐食の兆候がない。そこで、50ml/l H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>+30g/l CrO<sub>3</sub>水溶液で 95°C × 3 min 洗浄後、表面を検鏡したが、特に問題となるような腐食は認められなかった。

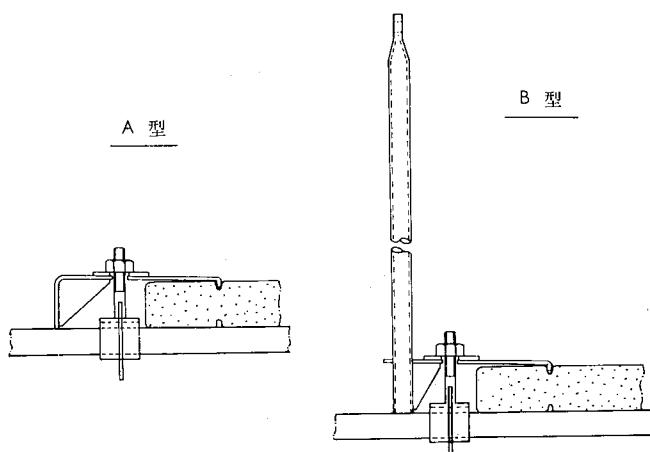
以上のように、腐食がほとんど進行していないので、表面の鉄粉による変色は問題とならず、アルミニウムの表面に鉄粉や鉄片が付着した場合、大気中では鉄の腐食の進行のほうが早いので、接触腐食は考慮しなくてもよい<sup>4)</sup>と考える。

## 4. 実用試験

前述した各種の試験ならびに調査の結果に基づいて実用足場板を製作し、石川島播磨重工業(株)横浜第二工場において実用に入り、現在、5 m 足場板を中心に使用中である。

### 4.1 足場板の固定方法

足場板の固定方法は実用上重要な問題で、いろいろな種類について試作研究を行なった結果、第9図および写真7に示す固定金物を完成した。第9図の A 型は単なる固定金物、B 型は手摺柱を組込んだ固定金物である。足場板の縦リブを利用して締付けるため、固定度はきわめて高い。なお、木製足場板で用いている番線方式では、シノの締付け



第9図 固定金物

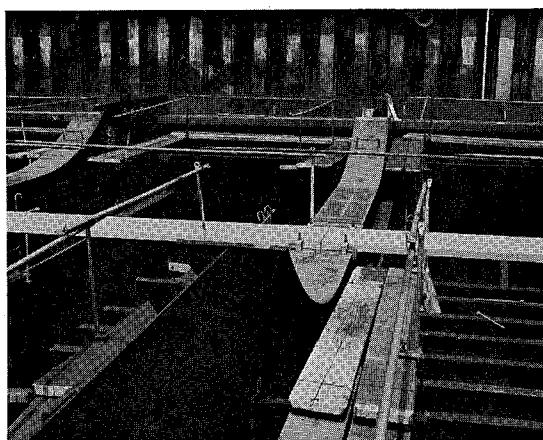


写真7 固定方法

力によりアルミニウム皮板が損傷するので好ましい方法ではない。

#### 4.2 実用結果

比較的広い範囲で実用に入つてから日も浅いのであるが、同社横浜第二工場の結果では省力の効果が予想以上に大きく、重量は木製足場板の約 $\frac{1}{2}$ に軽減されたので、運搬架設作業、特に高所作業においては安全の面からも好評を頂いている。現在は軽量という特長に主眼をおいて5m足場板を主に用いているが、耐火性のよいことも合せて考えれば将来その使用範囲は拡大してゆくものと考えられる。

### 5. 結論

木製足場板の $\frac{1}{2}$ と軽量で、火に強く、かつ、強度の高い足場板として、アルミニウム合金製足場板の開発を行ない、ほぼ満足して御使用頂けるものを完成した。

(1) 重量は4mで20kg, 5mで30kg, 6mで44kgであり、木製の $\frac{1}{2}$ である。

(2) 火に強い。

(3) 強度が高い。中央集中荷重200kgで25000回繰返し後の曲げ試験結果も繰返し試験前の数値と遜色がない。また、4m足場板で行なった中央集中荷重300kgの試験では繰返し回数 $10^7$ に耐え、そのときの最大表皮応力は8kg/

mm<sup>2</sup>である。

(4) 足場板の全周にサンドブラストを施して滑り止めとしているので雨にぬれても滑らず、また、ロープによる目通し方式での運搬もできる。

(5) 損傷した足場板は損傷部を丸鋸盤などで切りとり、端部の蓋をブラインド・リベットで止めることにより再使用が容易である。

(6) 内部にポリウレタンが充てんされているので、足場板は水に浮き、また、高所から落しても損傷が軽微である。

なお、5および6m足場板は厚さが8および8.5cmでは運搬時につかみずらい恐れもあるので、厚さが7(重量30kg)および7.5cm(36kg)となるように中央集中荷重200kgにおける安全率が3で設計した足場板も製作販売している。

足場板は安全の面からきわめて重要な架設資材である。開発にあたりあらゆる角度からご指導とご協力をいただき、かつ、実用化についてご協力賜わった石川島播磨重工業株式会社の関係各位に衷心より厚く御礼申し上げるしだいである。

### 文 献

- 1) 造船協会鋼船工作法研究委員会編：鋼船工作法，p. 141 (昭35-5)，日本工業経済連盟出版局
- 2) 長柱研究委員会編：弹性安定要覧，p. 412 (昭36)，コロナ社
- 3) 同上，p. 407
- 4) 馬場義雄，荻原理樹：本誌，9(1968)，208

R 143

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS Vol. 12 No. 4 OCT. 1971

Vol. 13 No. 1 January., 1972

技术資料

建築および建築設備用銅管の最近の問題点

その 1. 給水給湯用銅管について

その 2. 空調および衛生用銅管とその配管施工について

佐 藤 史 郎

勾 坂 喜 代 治

住友軽金属工業株式会社

# 建築および建築設備用銅管の最近の問題点

## その1 給水給湯用銅管について

佐藤 史郎\* 勾坂喜代治\*\*

## Recent Topics of Copper Tubes for Modern Buildings and Its Accessories

by Shiro Sato and Kiyoji Sagisaka

### 1. 緒 言

建築面における銅管の主たる用途は、(1) 給水給湯用配管、(2) 機器用およびその配管(空調用など)、ならびに(3) 排水用配管であって、その他に(4) ガス配管や(5) 医療用配管などもあり、これらを総合して建築用銅管と称している。

最近の傾向として、ビルの高層化、需要および施工面での要求の高度化、その他の水質をはじめとする環境の変化などのために、従来主として用いられてきた鋼管にかわって、銅管が多く利用される方向にある。とくに、最近におけるビルの高層化は銅管の利用増大に拍車をかけている。

すなわち、ビルの高層化にともなって、配管材の軽量化、工期短縮のため施工の能率向上化、および寿命の恒久化などが強く要望されているが、銅管は他の材料にみられない優れた多くの性質を有しているので、それらに対して十分満足できる成果をもたらすことができる。たとえば、水質の多岐にわたる変化に対して銅管は広汎にわたって安定した耐食性を有するので、寿命の恒久化の要求に応じ得るばかりでなく、さらに肉厚の薄い銅管を用いることが可能となり、軽量化への成果をもたらす。また、銅管は曲げや切断ならびに接合などの加工が容易であるため、施工は簡便かつ迅速にできるので工期の短縮や工事費の低廉化などに大きな役割を果すことができる。しかも、最近開発されたプレハブ工法を採用することによって一層成果を上げることができる。

しかし、これらの用途に銅管を用いることによって全く問題を生じないわけではなく、稀にはトラブルを伴うこともある。たとえば使用時に腐食による漏洩事故を生ずることがある。これらの大半は銅管内を流れる冷温水の水質に

起因するものであるが、関与している因子が多くはなはだやっかいな問題である。また、配管施工上に起因する問題も少數ながら発生することもある。本稿においては、建築用銅管として(1) 給水給湯用、(2) 空調用および(3) 排水用に用いられる場合において、その耐食性を支配する基本事項、施工上の問題およびその対策などについて述べる。

### 2. 給水給湯用銅配管

給水給湯用銅配管における問題点としては、施工に関するものと、使用時における腐食に関するものがある。前者は章を改めて述べることとし、本章では使用時の問題である腐食について述べる。

#### 2・1 水質と銅管の腐食

銅は化学的に水素よりも貴な金属であるため、純粋な水により直接腐食を受けることはない。銅が水によって腐食を受けるのは溶存酸素の作用によるものである。

水質との関係において提起されている銅管の問題点は、大別して銅の溶出によるものと孔食の発生によるものが知られており、かなりの研究が実施されてきている。しかし、両問題点は単純な水質との相関のみによって解決されるものとも限られず、たとえば流速や温度などの他の因子の作用も受けるものとみられ、はなはだ複雑な現象である。そのため、今日でもその全貌は必ずしも明らかにされているとはいえない状況下にあるように考えられる。以下に関連事項を概説する。

##### (1) 水質基準

対象とされる水は一般に上水であるが、その性状は広汎なものである。参考までに、わが国をはじめ、米国、西ドイツなどの水質基準を Table 1 に示す。

##### (2) pH

銅は Fig. 1<sup>1)</sup> に示すように、微アルカリ性において最も安定した状態を保つが、中性近傍においても腐食速度は

\* 研究部 工学博士

\*\* 研究部

Table 1 世界各国における上水の水質基準

項目	WHO(世界保健機構)基準	日本基準	アメリカ基準	西ドイツ基準	ソ連基準	フランス基準	オランダ基準	スエーデン基準
色度, 度	—	5.0	15	—	—	—	20*	20~40
濁度, 度	—	2.0	500(1000)	—	—	—	0.5	微
蒸発残留物, ppm	—	500	—	—	—	—	—	—
pH 値	7.0~8.5 (6.5~9.2)	5.8~8.6	—	—	—	—	—	—
総硬度, ppm	100~500*	300	—	350	—	—	—	100
KMnO <sub>4</sub> 消費量, ppm	10	10	—	20	—	—	20	20~40
塩素イオン, ppm	200(400)	200	250	20	—	250	250**	300
硫酸イオン, ppm	200(400)	—	250	—	—	250	200	—
アンモニア性窒素, ppm	0.5	同時に検出しあつてはならない	—	—	—	—	0.2	0.5
亜硝酸性窒素, ppm	—		—	—	—	—	0.1	0.02
硝酸性窒素, ppm	40(80)**	10	45*	50*	—	10	10.0	3.0
鉄, ppm	0.3(1.0)	0.3	0.3	0.2	0.5	0.1	0.1	0.2~0.4
マンガン, ppm	0.1(0.5)	0.3	0.05	0.1	—	0.05	0.05	0.1
フッ素, ppm	1.0(1.5)	0.8	0.6~1.7	0.5	1.5	1.0	—	—
鉛, ppm	0.1	0.1	0.05	0.3	0.1	0.05	0.1	—
砒素, ppm	0.2	0.05	0.01(0.05)	—	0.05	0.05	0.2	—
セレンウム, ppm	0.05	—	0.01	—	0.01	—	0.05	—
クロム, ppm	0.05	Cr <sup>6+</sup> 0.05	Cr <sup>6+</sup> 0.05	—	Cr <sup>6+</sup> 0.5 Cr <sup>6+</sup> 0.1	0	0.05	—
銅, ppm	1.0	1.0	1.0	3.0	0.1	0.05	—	—
亜鉛, ppm	5.0(15.0)	1.0	5.0	—	1.0	5.0	—	—
フェノール類, ppm	0.001(0.002)	0.005	0.001	—	—	0.001	—	—
シアソン, ppm	0.01	検出しないこと	0.01(0.2)	—	0.1	0	0.01	—
水銀, ppm	—	タ	Ag 0.05	0.05	0.005	—	—	—
バリウム, ppm	—	—	1.0	—	4.0	—	—	—
カドミウム, ppm	—	—	0.01	—	0.1	—	—	—
陰イオン活性剤, ppm	—	0.5	0.5	—	—	—	—	—
放射能, $\mu\text{m}/\text{l}$	$\alpha$ 線 $10^{-9}$ $\beta$ 線 $10^{-8}$	—	年間 Ra225.3 $\mu\text{mc/l}$ , Sr90.10 $\mu\text{mc/l}$	100 $\mu\text{mc/l}$	—	—	$\beta$ 線 年間 $10 \mu\text{mc/l}$	—
有機リシン, ppm	—	検出しないこと	—	—	—	—	—	—
遊離残留塩素, ppm	—	0.1 以上	0.05~0.1	0.3まで注入必要な時0.6	検出してはならない	0.1 以下	—	—
マグネシウム, ppm	50(150)	—	—	—	—	125	—	—
カルシウム, ppm	75(200)	—	—	—	—	—	—	—
大腸菌群	年間を通じてMPN10以下	50ml 中検出しあつてはならない	月間の陽性管数10%以下	100ml中0	—	陰性	地下水1/l以下 表流水2/l	100cc中2コ以下 (ヨリエロゲネス)
一般細菌	—	1ml中100コ以下	—	—	—	—	—	1cc中100コ以下
臭気	—	異状あつてはならない	3°	—	—	—	不快な臭気があつてはならない	微
味	—	同上	異常あつてはならない	—	—	—	2倍稀釈して不快な臭気があつてはならない	—
備考	( )はやむを得ない場合 *CaCO <sub>3</sub> として **NO <sub>3</sub> として	*NO <sub>3</sub> として( )はやむを得ないとき活性炭クロロホルム抽出量0.2ppm	*NO <sub>3</sub> として各州によつて異なる上表はハングル州	上表は源水中Ni 0.1ppm Co 1.0ppm	—	—	水温5~15°C 酸素2ppm以上 *できれば $10^3$ 以下 **100以下ならなおよい	—

(表中の数値で範囲を明示していないものは上限値を示す)

大きくな。

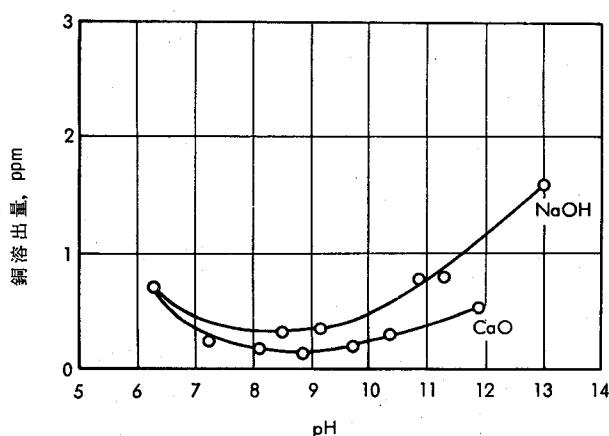
わが国的一般の上水はpH 6.5以上であることが多く、銅は実用上十分な耐食性を示す。そのため、耐用年数の観点から腐食が問題にされることはまず稀である。

pHが低いと腐食速度が大きくなるのは銅の表面に安定な皮膜が形成され難くなるためである。地下水や鉱山の排水あるいは特殊な河川水などでpHが著しく低い場合には必然的に銅の腐食速度は増大する。対策としてはアルカリ

性の物質、たとえば焼石灰(CaO)や苛性ソーダ(NaOH)や各種のソーダ塩などの添加によってpHを上昇させることができある。

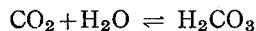
### (3) 炭酸物質

炭酸ガスはガス相の分圧に応じて水中に溶解する。通常の大気中のCO<sub>2</sub>濃度0.0003 atmに対する純水中の平衡CO<sub>2</sub>濃度は0.5ppmであり、CO<sub>2</sub>が1 atmのときの純水中の平衡濃度は1,500ppmであるとされている。水中の炭

Fig. 1 銅の溶出におよぼす pH の影響<sup>1)</sup>

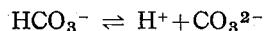
酸はつぎに述べるように種々の平衡関係下において存在し、それらは水中における生物の同化作用やまた接している土や岩石の性質によっても影響される。

水中の  $\text{CO}_2$  の一部は炭酸を形成する。なお遊離炭酸と称されるものは水中の  $\text{CO}_2$  と  $\text{H}_2\text{CO}_3$  の和のことである。



$$[\text{H}_2\text{CO}_3]/[\text{CO}_2] = 0.003$$

炭酸 ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) は重炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) に解離し、重炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) はさらに炭酸イオン ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) に解離する。



$$[\text{H}^+] [\text{HCO}_3^-] / ([\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{CO}_2]) = K_1$$

$$[\text{H}^+] [\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-] = K_2$$

25°Cにおいて、

$$K_1 = 4.45 \times 10^{-7}$$

$$K_2 = 4.69 \times 10^{-11}$$

したがって、水中における各炭酸成分の存在比率は pH 値によって定まり、Fig. 2 のように Speller による図表

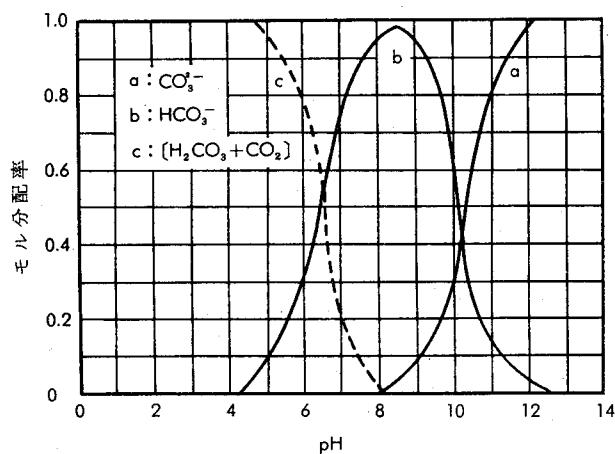


Fig. 2 水中の遊離炭酸と結合炭酸の分配率

で示される。Fig. 2 によれば pH 8.5 以下においては炭酸イオン ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) はほとんど存在せず、遊離炭酸と重炭酸イオンのみを考慮すればよいこととなる。具体的な

数値は重炭酸イオンに該当するものとして M アルカリ度を用いることにより Fig. 3 で与えられる。

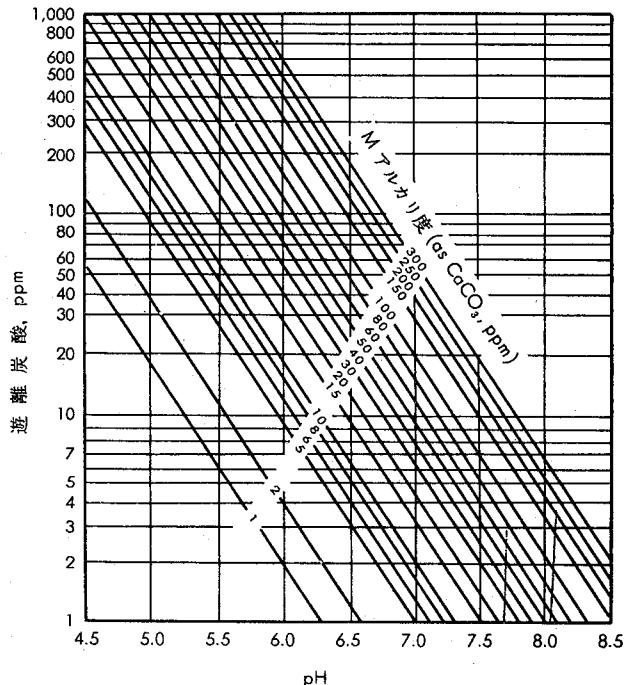
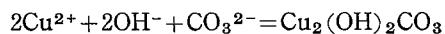


Fig. 3 M アルカリ度, pH および遊離炭酸の関係

一般に遊離炭酸を多く含む水は銅を多く溶解することが知られている。水中の遊離炭酸の多寡は水の銅溶解性 (cupro-solvency) を示す重要な指標とみられている。

炭酸イオンは第二銅イオンと反応して塩基性炭酸銅を形成する。これがいわゆる緑青である。



塩基性炭酸銅は難溶性であるため、その形成は以後の腐食の進行を阻止し、一般に有益であるとされている。

Table 2 に代表的な銅塩の溶解度積を示す。同時に、pH を 7.0 とし、各陰イオンの活量を 1 m equiv に仮定したときの  $\text{Cu}^{2+}$  の溶解度をも示す。

Table 2 代表的な銅塩の溶解度積と各陰イオンの活量  
が 1 m equiv のときの  $\text{Cu}^{2+}$  の溶解度 (equiv)

銅 塩	溶 解 度 積	$\text{Cu}^{2+}$ の溶解度
$\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$	$[\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^-][\text{CO}_3^{2-}]^{0.5} = 10^{-16.0}$	$10^{-8.4}$
$\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$	$[\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^-]^{1.5}[\text{SO}_4^{2-}]^{0.25} = 10^{-17.2}$	$10^{-5.6}$
$\text{Cu}_2(\text{OH})_6\text{Cl}$	$[\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^-]^{1.5}[\text{Cl}^-]^{0.5} = 10^{-17.8}$	$10^{-5.8}$
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	$[\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^-]^2 = 10^{-19.8}$	$10^{-5.8}$

#### (4) 硫酸イオン

わが国の水道法水質基準では硫酸イオン許容量を規定していないが、世界保健機構 (WHO) では 200 ppm 以下、米国では 250 ppm 以下と定めている。

一般にわが国の上水に含有されている硫酸イオンは 20 ppm 以下であることが多い。この程度の硫酸イオンが中性硫酸塩として含有されている限りその作用は顕著なもの

でないといえる。

しかし、単純なイオウ酸化物として混入し、それが酸化されて生じた硫酸イオンは当然pHを低下させ、腐食増大の有力な原因となりうる。たとえばいわゆる大気汚染により亜硫酸ガス( $\text{SO}_2$ )を含む空気と接した水はまず亜硫酸ガスを吸収し、それが酸化されて硫酸イオンとなり酸性化する。そして銅の腐食を促進するように作用する。

以上は酸としての硫酸の作用であって、それによって生ずる腐食は主として全面的な溶解を主体とするものと考えられる。

しかし、最近になって以上のような硫酸の作用とは異なった作用が指摘されるようになってきた。すなわち、給湯用銅管の孔食の発生が硫酸イオンによって起りうる場合のあることが、ドイツとスウェーデンにおける実績の検討から示された<sup>2),3)</sup>。Mattssonら<sup>3)</sup>はまず給湯銅管の孔食発生例について検討し、孔食の発生がpH 7以下で、さらに重炭酸イオン量に比して硫酸イオン量が多い場合に生ずることを明らかにした。換言すれば、 $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}] \geq 1$ でpH $\geq 7.4$ のときは孔食が生じていないという。さらにこのようなときに生じた孔食部の特徴として孔食部の近傍に塩基性硫酸銅 $[\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4]$ が形成されていることを挙げているが、筆者らも全く同一の例を2件最近になって経験している。

この現象は給湯銅管の実用面からみて極めて重要な問題であるので、詳細は孔食の章において改めて述べる。

#### (5) 塩素イオン

わが国の上水は塩素イオンを約10~40ppm含有していることが多いが、この程度の濃度では銅の耐食性に影響をおよぼさない。しかし、一般に水中の可溶性塩分としての塩素イオン濃度が増大すれば、銅の腐食進行速度は大きくなる傾向があるが、潰食が生じない限りにおいて銅の耐食性は著しく脅されることがない。しかし、河海水あるいは海岸近くの地下水などにおいて可溶性塩分濃度が著しく増大しているような場合には、潰食を生じ易くなる傾向があらわれてくる。淡水と海水の分岐点に相当する塩分濃度は、銅および銅合金の潰食発生傾向からいえば、ほぼ2,000ppm程度とみられる。このことは海水が淡水によって稀釀されている場合、その稀釀度(海水/淡水)が $1/15$ 以上であれば、海水に近い潰食現象を生ずる可能性があることを意味する。したがって、上記の塩分濃度が2,000ppmを越えるような場合には、潰食現象の観点から海水と同じ配慮が必要とされる。したがって、管内を流れる冷却水の速度が1m/secを越える場合などにおいては、銅にかわってアルミニウム黄銅やキュプロニッケルのような海水に対する耐潰食性が大きい合金管を採用することが望まれる。

#### (6) 酸度、アルカリ度

酸度は水中の炭酸、鉛酸、有機酸および加水分解によって酸性を呈する塩類などの酸分を中和するために要するア

ルカリ分を、炭酸カルシウムに換算してあらわしたものであり、全酸度と鉛酸度がある。普通わが国の水で酸度を示すのは遊離炭酸とされている。pHが高くても酸度が高いと銅の腐食速度を増す。酸度が腐食反応の進行に伴なうpHの上昇、したがって腐食の減少の傾向を抑止する方向に作用するためであろうことは容易に考えられるところである。水中における銅イオンの溶出におよぼす酸度の影響をTable 3<sup>4)</sup>に示す。

Table 3 銅管内の湛水中への銅の溶出量と水質(酸度)との関係を示す実験例<sup>4)</sup>

酸度, ppm as $\text{CaCO}_3$	3	5	7	10	13	15
pH	7.3	7.1	7.1	6.9	6.6	6.6
$\text{CO}_2$ , ppm	1.3	2.2	3.1	4.4	5.7	6.6
溶出銅イオン, ppm	新管 0.7	0.7	0.8	1.2	1.5	2.3
ppm	旧管 0.7	0.5	0.7	1.0	1.4	2.2

アルカリ度とは水中に含まれる水酸化物、炭酸塩、重炭酸塩などのアルカリ分を、これに対応する炭酸カルシウムに換算してあらわしたものであり、全アルカリ度、Mアルカリ度、Pアルカリ度などに区分され、この中ではMアルカリ度が実用上重要である。

Mアルカリ度は水酸イオン( $\text{OH}^-$ )、炭酸イオン( $\text{CO}_3^{2-}$ )および重炭酸イオン( $\text{HCO}_3^-$ )などからなり、飽和指数の項で述べるごとく、pH、カルシウムイオン、溶存塩類および温度などと関連して、硬度成分(炭酸カルシウム)による保護皮膜の生成やさらには硬度成分による管の閉塞に重要な因子として作用する。硬度成分による付着物の発生有無については飽和指数の項で詳細に述べる。上水のMアルカリ度は普通20~50ppmであるが、地下水ではこの値以上の場合もある。

#### (7) 塩 素

上水の浄化処理の一つとして、主として殺菌のために注入される塩素は水中に溶解して次亜塩素酸(HClO)となり、強い酸化作用をなすためにその効果を發揮する。

銅イオンの溶出におよぼす塩素の影響はFig. 4<sup>5)</sup>のよ

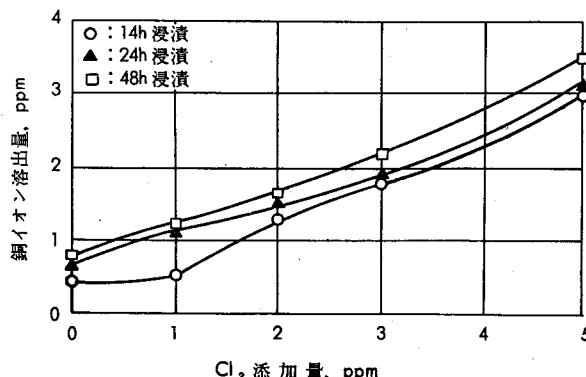


Fig. 4 銅イオンの溶出におよぼす塩素の影響<sup>5)</sup>

うであり、塩素濃度が高くなると銅イオンの溶出量は増大する。

しかし、上水における塩素濃度範囲では銅イオンの溶出および腐食に大きな影響をおよぼさない。

#### (8) 鉄、マンガン

上水に含まれる鉄分には、浄水場での水処理で除去されない鉄分と、鉄製の配管から溶出する鉄分がある。鉄化合物の皮膜は鉄管の補助的保護作用をなすが、厚く付着して局部的に剝離した場合には、その個所に腐食を生ずることも考えられる。また、銅管面に十分な保護皮膜が育生されていない時点に、ある種の鉄化合物 [ $\text{Fe(OH)}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ] が部分的に付着すると、それが陰極として作用し、鉄化合物の非付着部に局部腐食を生ずることもある<sup>10)</sup>。ただし、銅管壁に耐食上保護作用をなす塩基性炭酸銅のごとき皮膜が形成されている場合には影響がない。

水中に含まれる鉄分は衛生的にはあまり問題がないが、水を茶褐色に混濁せめたり、お茶を黒褐色に変色せめたりする問題を有するので、上水の水質基準では鉄の許容量を 0.3ppm 以下に定めている。そして、この点が鋼配管に対する銅配管の極めて重要な利点であることはいうまでもない。

マンガンの炭酸塩や水酸化物は水中への溶解度が小さいので、一般には自然水中にはごく微量しか存在することがないが、最近は化学肥料の影響によって土壤が酸性化しているので、浅い地下水や河川水ではマンガンが増大する傾向にある<sup>11)</sup>。マンガン化合物が銅管面に付着すると局部腐食を生ずる原因となる。これは二酸化マンガンとしての付着物が高度に陰極的であるためとされている。またマンガン分は黒い水の原因にもなる場合がある。さらに飲料水中にマンガンを含有することは有毒であるので注意しなければならない。

現在わが国ではマンガンの許容量を 0.3ppm 以下に規定しているが、世界保健機構 (WHO), 西ドイツおよびイギリスでは 0.1ppm 以下、米国およびフランスでは 0.05ppm 以下に定めており、わが国よりもかなり低い許容値であることは注目しなければならない。

#### (9) 硬度、硅酸

硬度は水中のカルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ ) およびマグネシウムイオン ( $\text{Mg}^{2+}$ ) の量を、これに対応する炭酸カルシウムであらわしたものである。

硬度は直接的に銅イオンの溶出および腐食速度を支配する要因にならないが、飽和指数との関係において重要な因子の一つであることは当然である。空調器の冷却水でクリーリングタワー方式が採用されているような時には、水が濃縮して硬度成分が多くなって、カルシウム塩あるいはマグネシウム塩などを析出して、冷却水の流れを阻害したり、伝熱性を著しく低下せしめたりすることがある。

わが国の水道法水質基準では硅酸の許容量を設けていないが、上水に含有される硅酸は平均約 30ppm が多いこと

ろでは 50~70ppm に達する。水への硅酸の溶解度は pH によって支配される。硅酸も直接的には銅の腐食に影響をおよぼさないが、含有量が多く、硬度も高く、しかも pH が低い場合には水に不溶な硬い硅酸塩、たとえば硅酸カルシウム ( $\text{CaSiO}_3$ ) などを銅管内に生ずることがあって問題になる場合もある。

#### (10) 飽和指数 (Langlier Index)

銅が水と接触した時、水中へ溶出する銅イオン量は銅表面に保護皮膜が形成されるかどうかによって大きく支配され、保護皮膜が形成される時の方が皮膜が形成されない場合に比して溶出する銅イオンは少なく、腐食速度は減少する。このことは銅に限らず金属材料の水中における腐食現象を支配する根本的な因子の一つである。給水給湯用銅管内面に形成される皮膜は酸化銅および塩基性炭酸銅などのようないかに腐生成物からなる場合の他に、硬度成分であるカルシウムやマグネシウムの炭酸塩、硅酸塩、鉄化合物ならびにスライムなどが考えられ、これらの多くは、程度の差はあるけれども保護皮膜として作用することが多い。

皮膜構成因子のうち、硬度成分とくにカルシウム塩 (炭酸カルシウム) が皮膜として析出するかどうかを理論的に求めたのが、飽和指数 (Langlier Index: Is) であり、炭酸カルシウムが析出するための水素イオン濃度指数 (pHs) とその pH の関係を次式によって定義したものである。

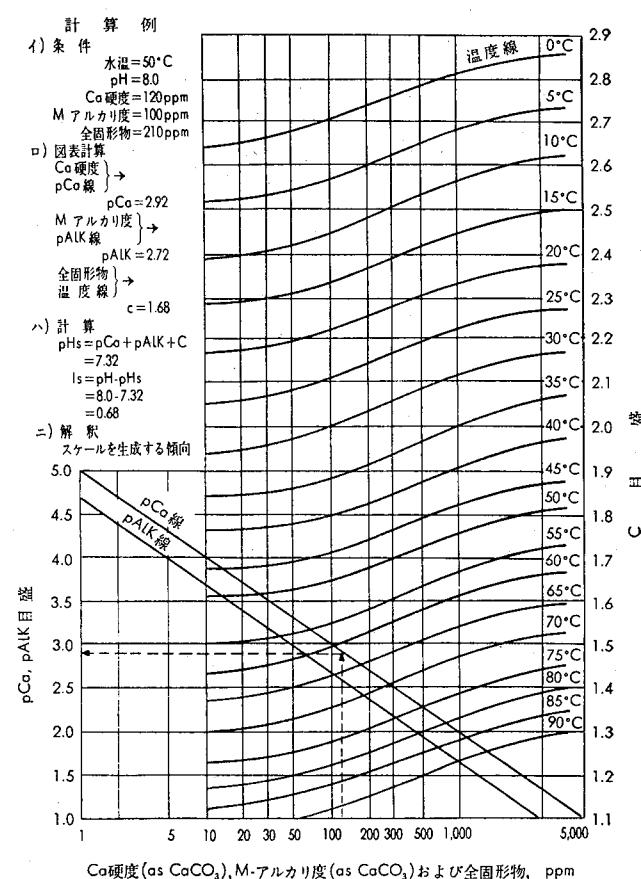
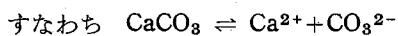
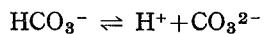


Fig. 5 飽和指數表<sup>8)</sup>

$$Is = pH - pH_s$$



$$[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = L$$



$$[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-] = K$$

$$pH_s = p\text{Ca}^{2+} + pH\text{CO}_3^- + (pK - pL)$$

$(pK - pL)$  を温度の函数として与えておけば、カルシウム硬度と M アルカリ度から  $pH_s$  は求められるわけである。Fig. 5 に Powell<sup>8)</sup> による図表を示す。

$Is$  が負の場合、とくに -2 以下のときは炭酸カルシウム皮膜は形成されないために、銅イオンの溶出が増大することになる。しかし、このことが直接銅管の腐食による漏洩事故につながるわけではなく、このような水のもとでは、ある種の堆積物が存在したり、異常な流速による衝撃作用が加わった時に管肉厚を穿孔するような腐食事故を生ずる可能性があることを意味する。

飽和指数と類似の考え方で、水の特性を示す指数として安定度指数 ( $S$ ) が用いられることがある。安定度指数は飽和指数 ( $pH_s$ ) により、次式によって求めたものである。

$$S = 2pH_s - pH$$

安定度指数 ( $S$ ) について、つぎの傾向があるといわれている。

$S=6$  : 化学的安定状態

$S<6$  : スケール形成の傾向

$S>6$  : 腐食の傾向

## 2・2 溫度の影響

冷水と温水における銅の挙動には基本的に差異がないが、温水における方が電気化学的反応は早く進行し易く、温水においては塩基性炭酸銅皮膜がより緻密になり、炭酸カルシウムが共存すると本皮膜は幾分透明になる。<sup>9)</sup>

表面状態のきれいな銅管から溶出する銅イオン量におよぼす水温と時間の影響は Fig. 6<sup>5)</sup> および Fig. 7<sup>5)</sup> のようであって、流动状態では水の温度が高い方が銅イオンの溶出は多く、湛水状態では温度が高い程銅イオンの溶出量は早期に最大に達し、しかも、再析出して減少するのも早い。これらのこととは、水温が高いほど、反応が早く進行することを示すものとみられる。

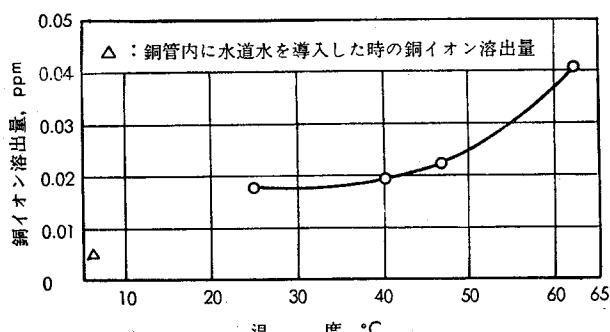


Fig. 6 温水を銅管内に導入した際、銅イオンの溶出におよぼす温度の影響<sup>5)</sup> (銅管: 内径10mmφ×長さ1m, 流速: 1m/sec)

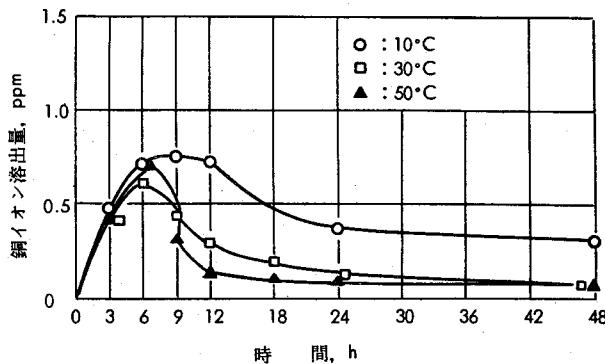


Fig. 7 銅管内に水を充填した時、銅イオンの溶出におよぼす水温と湛水時間の影響<sup>5)</sup>

水温が高くなると空気などのガスの溶解度が小さくなるので、そのために温水には分離された空気などの気泡を多く混入し易い。気泡の含有量が著しく多い場合には潰食を助長する要因になり易いので、温水の配管過程には空気抜き装置を設置し、気泡の混入をできるだけ少なくする配慮が望まれる。

## 2・3 銅イオンの溶出による問題

給水や給湯用配管を使用したビルや一般家庭において、水や温水が青色を呈する事態、いわゆる“青い水”問題を提示されることが時折ある。これらについてその状況を調査してみると、銅イオンが溶出して水や温水自体が青い色を帯びたという実体はまだ確認されていない。浴槽や洗面器あるいはタオルなどに不溶性の青色を呈する物質が付着することがあり、浴槽や洗面器に水や温水を満した時、これらの付着物の青い色が透視されて、そのために水や温水が青いといわれているようである。

浴槽や洗面器あるいはタオルなどが青くなることの原因については、溶出した銅イオンが石鹼に含まれる脂肪酸と反応して銅石鹼を生成することによるものと考えられる。なお銅石鹼は水に不溶で青い色を帯び、ねばねばした性状を呈す。また、その他に溶出した銅イオンが空気中の炭酸ガスと反応して塩基性炭酸銅、いわゆる緑青のごとき化合物を形成することも考えられる。

銅イオンの溶解によって水や温水自体がわずかに青味を帯びるのには、銅イオンが約 20ppm 程度含まれねばならない。しかし、銅管から溶出する銅イオンはかなり水質が悪い上水の場合でも 1 ppm 前後であるので、水や温水自体が銅イオンの溶解のために青くなることはまずないと考えてよからう。

銅配管内に長時間留められていた水(湛水)を放水する際、ごく初期の水には Fig. 8<sup>5)</sup> のごとく多くの銅イオンを含有していることがある。その他に亜鉛イオンや鉄イオンなどを多量に含むこともある。これらのこととは、銅管から溶出した銅イオンが湛水として留められている間に、銅管壁に再析出するにもかかわらず、不安定な状態にあるため、水を放出し始めて新たな水と接触した時、この再析出

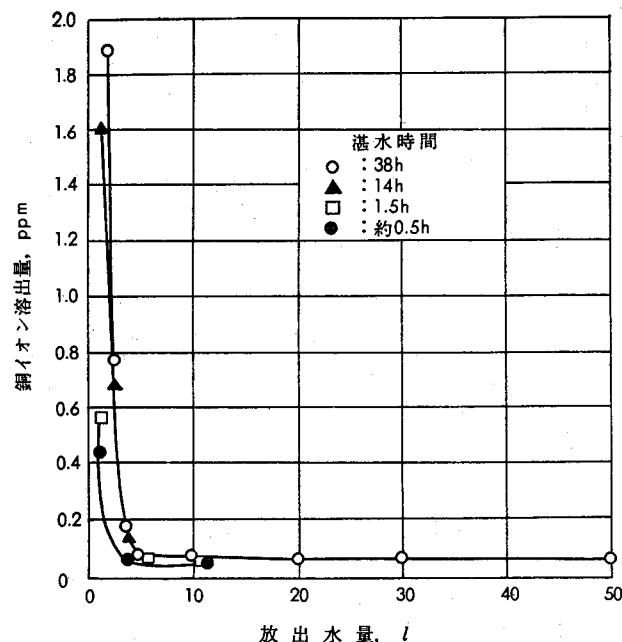


Fig. 8 数年間使用された銅管に水道水を充填した際の銅イオンの溶出におよぼす湛水時間と放出水量との関係<sup>5)</sup>

銅が短時間に再溶出することに原因するものと考えられる。

他の金属イオンについても同様なことが考えられるが、鉄化合物のあるものは一時的に沈殿し、それが短時間に放出されることも考えられる。このため、朝一番に用いる水や使用頻度の少ない個所では、水を少し放出してから飲料用および炊事用に用いた方がよい。

銅管、鉄管および鉛管内を流通する水および湛水に溶出する各金属イオン量の一例を Table 4<sup>5)</sup> に示す。銅イオンの溶出量は許容量以下であるが、鉄イオンは許容量を著しく超過しており、また鉛イオンも有毒であるにもかかわらず許容量を超過する場合も生じている。本試験結果からもわかるように、金属イオンの溶出の観点からも銅管は鉄管や鉛管よりもすぐれているといえる。

Table 4 銅管、鉄管および鉛管における湛水および流動水へ溶出する各金属イオン量の比較<sup>5)</sup>

管No.	水温, °C	各金属イオン溶解量, ppm					
		銅管		鉄管		鉛管	
		湛水	流動水	湛水	流動水	湛水	流動水
1	20.8	0.53	0.02	24.0	4.0	0.65	0.29
2	19.5	0.66	0.06	24.0	4.0	0.62	0.04
3	19.5	0.47	0.02	19.0	6.0	0.76	0.08
4	18.0	0.61	0.05	25.0	6.0	0.78	0.04
5	20.5	0.73	0.02	25.0	2.0	0.88	0.01
6	18.5	0.73	0.04	20.0	6.0	0.92	0.01
7	19.3	0.64	0.03	21.0	6.0	1.01	0.01
8	19.0	0.46	0.03	19.6	3.9	0.30	0.02
9	18.8	0.67	0.02	19.6	5.9	1.50	0.06
10	19.0	0.82	0.05	33.9	11.6	1.19	0.21

(各管の内径: 13mm<sup>ø</sup>, 長さ: 10m)  
(湛水: 24時間, 流動水: 放水後30分)

なお、銅イオンは衛生的な見地から有益な効果をもたらし、また人体の健康を維持する上で欠くことのできない重要なミネラルの一つであり、給水給湯配管に銅管を用いても水質を衛生的になんらそこなうことがない。

#### 2・4 銅と鉄との接触腐食

銅は鉄に比して一般に貴であるため、銅管と鋼管を直接に接合した時、接触腐食 (Galvanic Attack) により鋼管が腐食される可能性は確かにあり得る。

しかし、水道水の配管系において、実用上重大な支障となるようなほどの接触腐食電流が生ずることは、Fig. 9<sup>10)</sup> に示す実験例からみても、容易に起りうるとは考え難い。さらに、温水が対象となるセントラルヒーティング系において、銅と鋼の電位が著しく接近したり、僅かに逆転したりすることが実験により示されているので、銅配管の接触腐食が実用上重大な支障となる程まで生ずると考え難い。Cotton<sup>11)</sup> もセントラルヒーティング系統において、一見して接触腐食の可能性が考えられるところが多くみられるが、現実にはほとんど事故例がないことを述べている。

水道水による給水給湯配管において、钢管や亜鉛メッキ钢管に銅管や銅合金製バルブを直結していることは日常よく見掛けることであるが、これらの場合においても接触腐食による障害はほとんど経験されていないようである。

このことは、まれに誤って海水配管において、钢管に銅合金製のバルブを直結し、苛烈な接触腐食を経験していることと好対照である。

以上のことから、一般に冷温水の配管においては銅管と钢管との直接接合を接触腐食の故に避けねばならないとする根拠は乏しいものと考える。強いて注意を要する場合としては、水の電導度が高い場合、流速が大きく管表面に皮膜形成が阻害される場合を考えられる。

#### 2・5 銅管の許容流速

銅配管における冷水および温水の管内流速は 1 m/sec 前

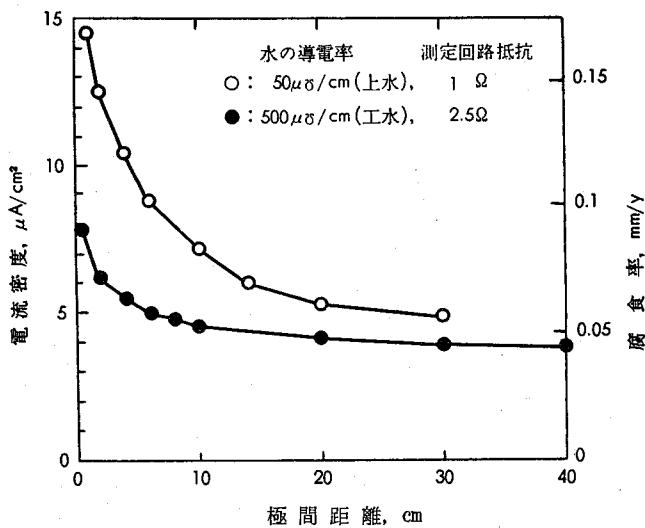


Fig. 9 水中における銅と鉄の接触電流におよぼす極間距離の影響<sup>10)</sup> (水: 名古屋市上水と工水)

後を採用していることが多い。銅配管における淡水の許容流速に関するデータはあまりみあたらないが、 $3 \text{ m/sec}$  としている文献もある<sup>9)</sup>。また、軟水化した冷温水では流速 $1.5 \text{ m/sec}$  までは銅の腐食量が変化しないが、それ以上の流速になると腐食量は増大するというものもある<sup>12)</sup>。

名古屋市の上水および工水を用いて銅管の潰食発生につき約1年間にわたり通水試験をおこない、それらの結果を要約すると Table 5 のようである。潰食は上水を用いて流速が $7 \text{ m/sec}$  以上の場合および工水での試験においては潰食を生ずることがなかった。本試験結果から、潰食はかなり早い流速でないと発生しないことがわかり、同時に上水と工水との違い、すなわち水質の違いにより潰食の発生に大きな差異を示すことがわかった。

Table 5 名古屋市の上水および工水による銅管の潰食試験結果

水	流速, m/sec	内面腐食状況
上水	8	潰食を多数発生。とくに曲り部に多く生じていた(潰食深さ: 最大 $0.15 \text{ mm}$ )。
	7	管軸方向に長く延びた形態の潰食が発生(潰食深さ: 最大 $0.06 \text{ mm}$ )。
	5	肌荒れ状腐食を発生。
	3	肌荒れ状腐食を僅かに生じている程度で、とくに問題なし。
工水	8	全域に肌荒れ状腐食を生じている。
	7	〃
	5	〃
	3	肌荒れ腐食を多少生じている程度で、とくに問題なし。

銅管における淡水の許容流速は水質に依存することが大であるが、上水を用いた冷温水では特別なことのない限り、水質に大きな変化が考えられないので、潰食発生すなわち許容流速の観点からは現在多く採用されている設計流速約 $1 \text{ m/sec}$  よりも大幅に速くすることが可能と考えられる。

なお、現在採用されている設計流速約 $1 \text{ m/sec}$  は、銅管の耐食面よりも損失水頭の観点から制約されているようみなされる。銅管の損失水頭と寸法および流量の関係を Fig. 10 に示す。

## 2・6 銅管の損傷例

給水給湯用銅管の損傷例としては腐食に起因するものと、配管施工の不適正たとえばロウ接不良などによる場合があるが、本報告では前者について述べる。

### (1) 潰 食

銅管は冷温水の管内流速がかなり速くても容易に潰食を生ずることがなく、潰食を生ずる限界流速は給水給湯配管に採用されている設計流速(約 $1 \text{ m/sec}$ )よりも大幅に速いものと考えてよい。

銅管において今までに経験されている潰食は、イ) 水質の影響がとくに関与しない状態において、銅管の形状や構造による局部的な流速の过大や乱流の発生に起因する場合と、ロ) pH が著しく低い水や可溶性塩分を多量に含む水の作用、すなわち水質の影響によって生ずる場合とがあ

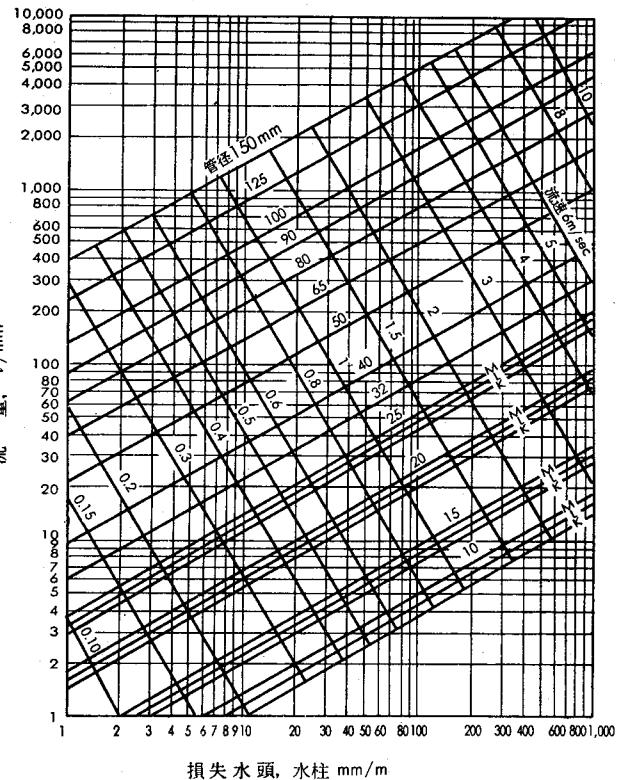


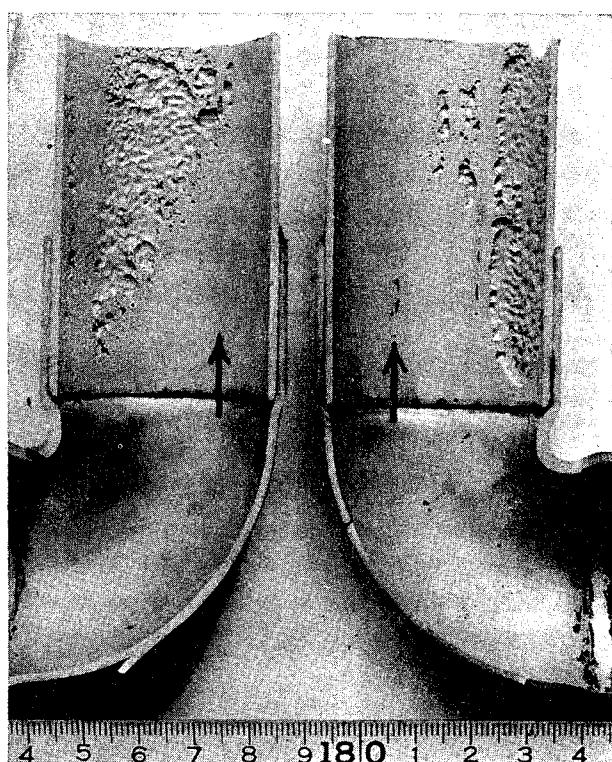
Fig. 10 銅管における水の流量によれば損失水頭の影響

る。

前者の場合、潰食の発生は局部的な個所に限られ、たとえば曲り部の下流側やバルブの直ぐ下流などで乱流が生じ易い部分、あるいは管径の変化で流速が過大となるような位置などに生じている。銅管に生じた潰食例を Photo. 1 に示す。

このことは局部的な乱流の発生や過大流速の影響により、銅管内壁に形成されている耐食的に有効な保護皮膜が部分的に破壊され、金属地肌が露出するためにその部分は陽極となり、腐食が促進されるためである。本潰食は冷水配管において、ほとんど経験されておらず、大半が温水配管に生じており、その場合には温水中に気泡を多量に含有していることが多い。このことから、気泡を多く含むことは乱流作用をより助長せしめるように考えられるため、気泡を混入し易い温水配管においては空気抜き装置などを取り付けて、気泡の混入をできるだけ少なくしなければならない。

後者の場合、潰食の発生は流速や乱流の影響も無視することができないが、前者の場合のごとく特定な部分にのみ潰食を生ずるとは限らない。潰食の発生に大きな影響をおよぼす水質因子として pH の低いことが挙げられ、かような水においては銅管に耐食上有効な保護皮膜が生成され難いために、流速や乱流の作用あるいは異物の充塞などの影響があると潰食を容易に生ずる。pH が低い水としては遊離炭酸を多く含んだ地下水、特定地域における酸性河川水、あるいは大気汚染の影響で亜硫酸ガスを多く吸収したクー

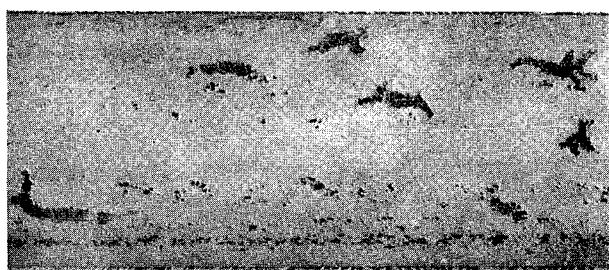


研磨のまま, ×20

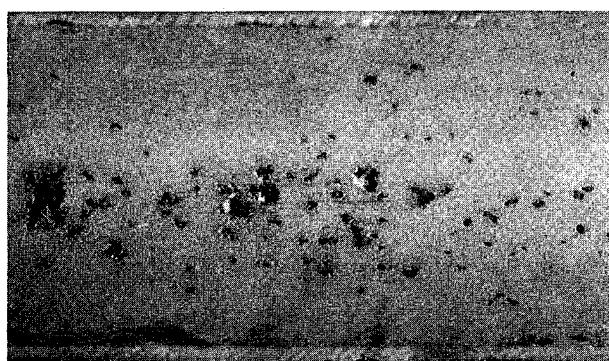


エッティング後, ×100

Photo. 1 給湯用銅管の曲り部に生じた潰食の外観および断面状況。



研磨のまま, ×20



酸洗浄後

エッティング後, ×100

Photo. 2 給湯用銅管に生じた孔食の外観および断面状況。

リングタワー水などがある。

また、海岸近くの地下水や河海水などのごとく可溶性塩分を多量に含んだ水などにおいても潰食を生ずる。

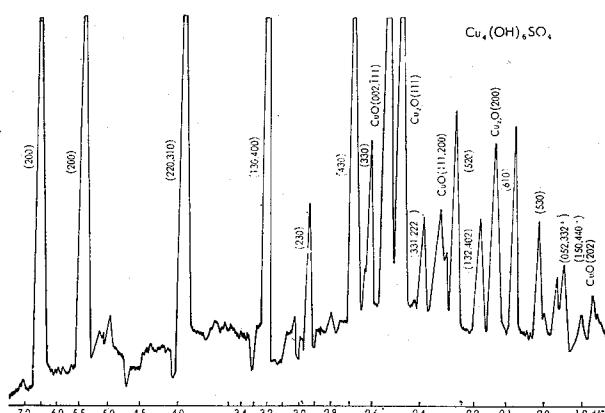
したがって、銅配管における潰食の発生については、流速や乱流の影響のみならず、水質の観点からも重視する必要がある。遊離炭酸を多く含有する地下水については、石灰処理などによって中和したり、クーリングタワー水においては水質管理をじゅうぶんおこなって、異常な濃縮をさけることなどが必要である。可溶性塩分が多い場合には、銅管にかわって海水用の耐食材料を用いるべきである。

## (2) 孔食

銅配管において孔食に起因する漏洩事故はほとんど生ずることがなかったが、最近に至り本用途に銅管が多く使用されるようになったことも関連してか、時折孔食による損傷を経験するようになった。孔食は配管施工後2~3年経過した銅管に生じており、その形態はPhoto. 2に示すようであって、局部的に斑紋状もしくは異形模様をなしており、肉厚方向には半円球状に深く腐食されている。孔食の上層には緑青色を帯び腐食生成物とみなされるものが盛り上がり付着しており、孔食内部には褐色を呈する銅化合物が堆積していることが多い。また、場合によると孔食の上層に盛り上がっている付着物の外表面は暗褐色皮膜で覆われていることもある。このような孔食例における特徴の一つは、孔食部の緑青色を帯びた腐食生成物から極めて明瞭な塩基性硫酸銅の結晶が検出されることであり、その例をFig. 11に示す。

Franqué<sup>2)</sup>およびMattsson<sup>3)</sup>らは孔食の発生について水質との関係を述べており、水中に存在する炭酸イオン( $\text{CO}_3^{2-}$ )に比して硫酸イオン( $\text{SO}_4^{2-}$ )を多く含み、pHが低い場合には孔食を生じ易いといっている。

Campbell<sup>13), 14)</sup>は、銅管の製造過程における抽伸工程で残存した潤滑油が焼なまし工程で焼付いて生じた炭素皮膜が孔食の発生原因になるとしており、炭素皮膜は陰極面となって作用し、炭素皮膜に生ずる亀裂部などが陽極面と



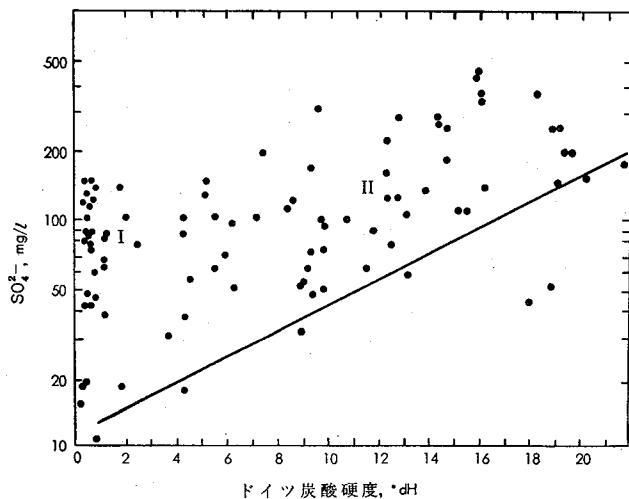
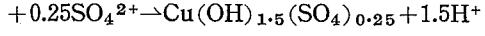
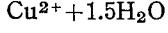


Fig. 13 銅管に孔食を生じた92の例における水の炭酸硬度と $\text{SO}_4^{2-}$ の関係 (Franqué)<sup>2)</sup> (1 ドイツ硬度は  $1\text{mgCaO}/100\text{ml}$  に相当)

から検討し、水質上の特徴として Fig. 13 に示すように、炭酸硬度に対する硫酸イオンの比が一定値以上のときに孔食が生じていることを示した。

Mattsson<sup>3)</sup> らはスウェーデンの Svenska Metallwerken 社において集められた30件にのぼる銅管の腐食事例について検討し、15件が孔食によるものであり、10件が潰食に、そして6件が腐食疲労によるものであることを明らかにした(一件は重複)。ついで孔食の事例につき水質上の特徴として、イ) pH が低いこと(7以下)、ロ)  $\text{HCO}_3^-$  含有量が  $\leq 100\text{mg/l}$  であり多くは  $<50\text{mg/l}$  であること、ハ) 負の Langelier Index を有すること、二)  $\text{SO}_4^{2-}$  が  $20\sim70\text{mg/l}$  であることなどを認めた。

さらに、Mattsson らは上記の条件下における孔食の発生機構について研究し、つぎのような結論を得た。すなわち、イ)  $\text{SO}_4^{2-}$  の添加は、 $\text{Cl}^-$  の添加に比して著しく孔食電流を増加させる (Fig. 14)<sup>3)</sup>。この理由として、 $\text{SO}_4^{2-}$  の存在は  $\text{HCO}_3^-$  の輸率を減少させ、孔食部(陽極部)の  $\text{SO}_4^{2-}$  の濃度を増大させる。その結果として、孔食部の  $\text{HCO}_3^-$  濃度は著しく減少する。ロ) 孔食部において塩基性銅塩を生ずることにより pH が低下する。たとえば



ハ) 孔食部において  $\text{HCO}_3^-$  が減少して  $\text{SO}_4^{2-}$  が増加することは、 $\text{Cu}^{2+}$  の溶解度を大幅に増すこととなる。以上のような現象により、 $\text{SO}_4^{2-}$  の存在 ( $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}] \leq 1$ ) が孔食と塩基性硫酸銅からなる腐食生成物の発生に寄与するものであると結論されている。

つまり、孔食部において塩基性炭酸銅が沈殿できなくなり、 $\text{Cu}^{2+}$  の溶解度の大きい塩基性硫酸銅が沈殿することが孔食の原因であるとしているわけである。このことは、実例をよく説明しているが、より安定な塩基性炭酸銅が沈殿しなくなることについて定量的な検討が必要であり、こ

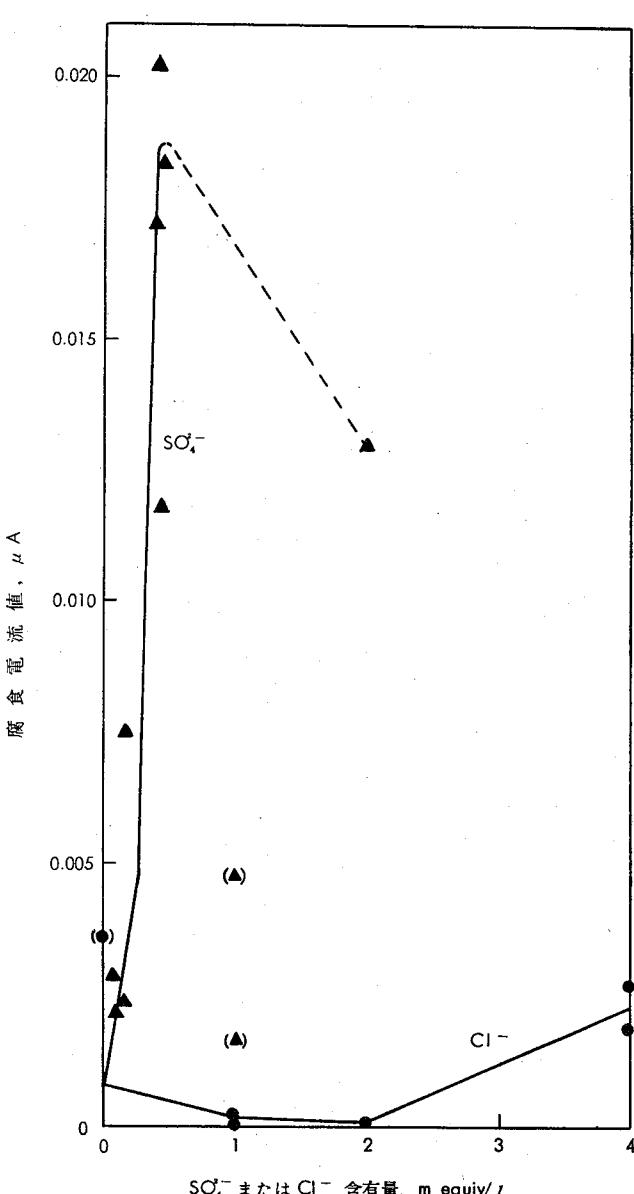
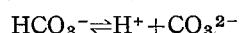


Fig. 14 腐食電流値におよぼす  $\text{SO}_4^{2-}$  と  $\text{Cl}^-$  の影響、(Mattsson, Fredriksson) pH: 7, ドイツ硬度:  $3^\circ\text{dH}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ :  $1\text{m equiv}^3)$

の点については Mattsson らの説明はじゅうぶんではない。この点について、補足説明をおこなえばつぎのようである。

ある与えられた水において全炭酸物質  $T\text{CO}_2$  が一定濃度だけ含まれていれば、 $[\text{CO}_3^{2-}]$  は pH 値の変動により移行する。



$$[\text{H}^+] [\text{HCO}_3^-] / [\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3] = K_1$$

$$K_1 = 4.45 \times 10^{-7}$$

$$[\text{H}^+] [\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-] = K_2$$

$$K_2 = 4.69 \times 10^{-11}$$

$$[\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] = [T\text{CO}_2]$$

$$\therefore [\text{CO}_3^{2-}] = [T\text{CO}_2] / \{ [\text{H}^+]^2 / K_1 K_2 + [\text{H}^+] / K_2 + 1 \}$$

$T_{CO_2}$  が 1 m equiv 含有されているとき, pH 値の変動に伴なう  $CO_3^{2-}$  の濃度の変化を上式より計算し, この値を用いて Table 2 に記載の溶解度積値, すなわち,

$L_{[Cu^{2+}][OH^-][CO_3^{2-}]^{0.5}} = 10^{-10.0}$  により,  $[Cu^{2+}]$  を求めてみた。さらに Table 2 記載の他の塩基性銅塩について, それぞれ陰イオンの活量を 1 m equiv と仮定したときの  $[Cu^{2+}]$  を各 pH 値について求め, それぞれ Fig. 15 に一括して図示した。この結果によれば, 塩基性炭酸銅は pH 5 以上において安定であるが, pH 5 以下では塩基性硫酸銅の方が安定であることとなる。すなわち, 銅管の孔食発生例において, 孔食発生部の近傍に塩基性硫酸銅が形成されていたことは孔食部の pH が著しく低下し, 従ってその部分において銅イオンの溶解度が増し, 孔食の進行を可能にし, さらにこの銅イオンが輸率にもとづいて孔食近傍に濃縮した硫酸イオンと反応して塩基性硫酸銅を形成したことを見ているものと考えられる。

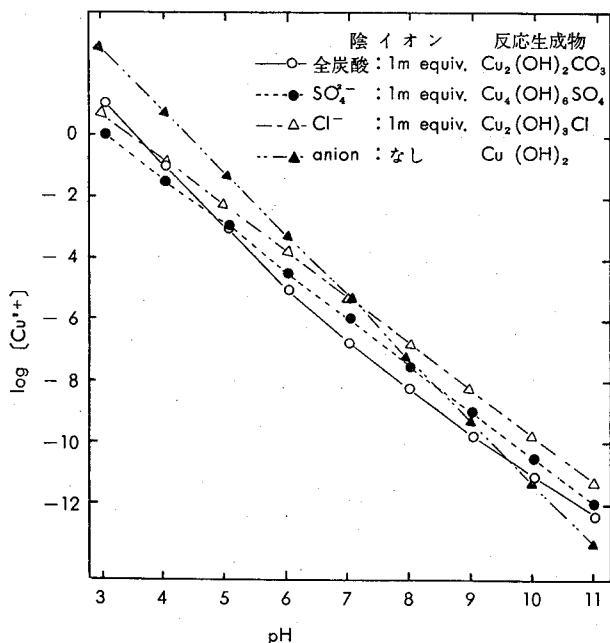


Fig. 15 全炭酸,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ , のいずれかを 1 m equiv 含む水における  $Cu^{2+}$  の溶解度 (計算値)

### (3) 応力腐食割れ

銅管は応力腐食割れに対する感受性がきわめて小さいので, 給水給湯用配管に使用されても, 本原因によって破断するようなことはほとんどない。しかし, 配管材として用いられた銅管においても特殊な環境では応力腐食割れを生ずることがある<sup>19), 20)</sup>。

給水給湯用配管において今までに経験されている銅管の応力腐食割れに起因する破損は, 少数ではあるが厨房の床面下に埋設されたものに限って生じている。本原因によって破損をきたした銅管の外観状況および断面状況の一例を Photo. 3 に示す。割れは管軸方向に生じていて, 結晶粒界に沿って外面から内面に向って進行する形態をなすも

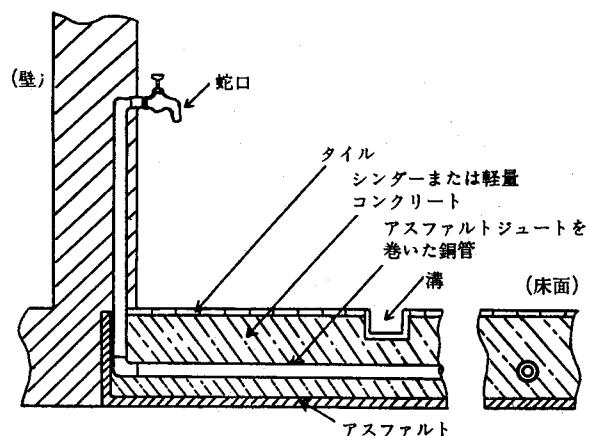


Fig. 16 廚房の床面下における銅配管の埋設状況例

のである。

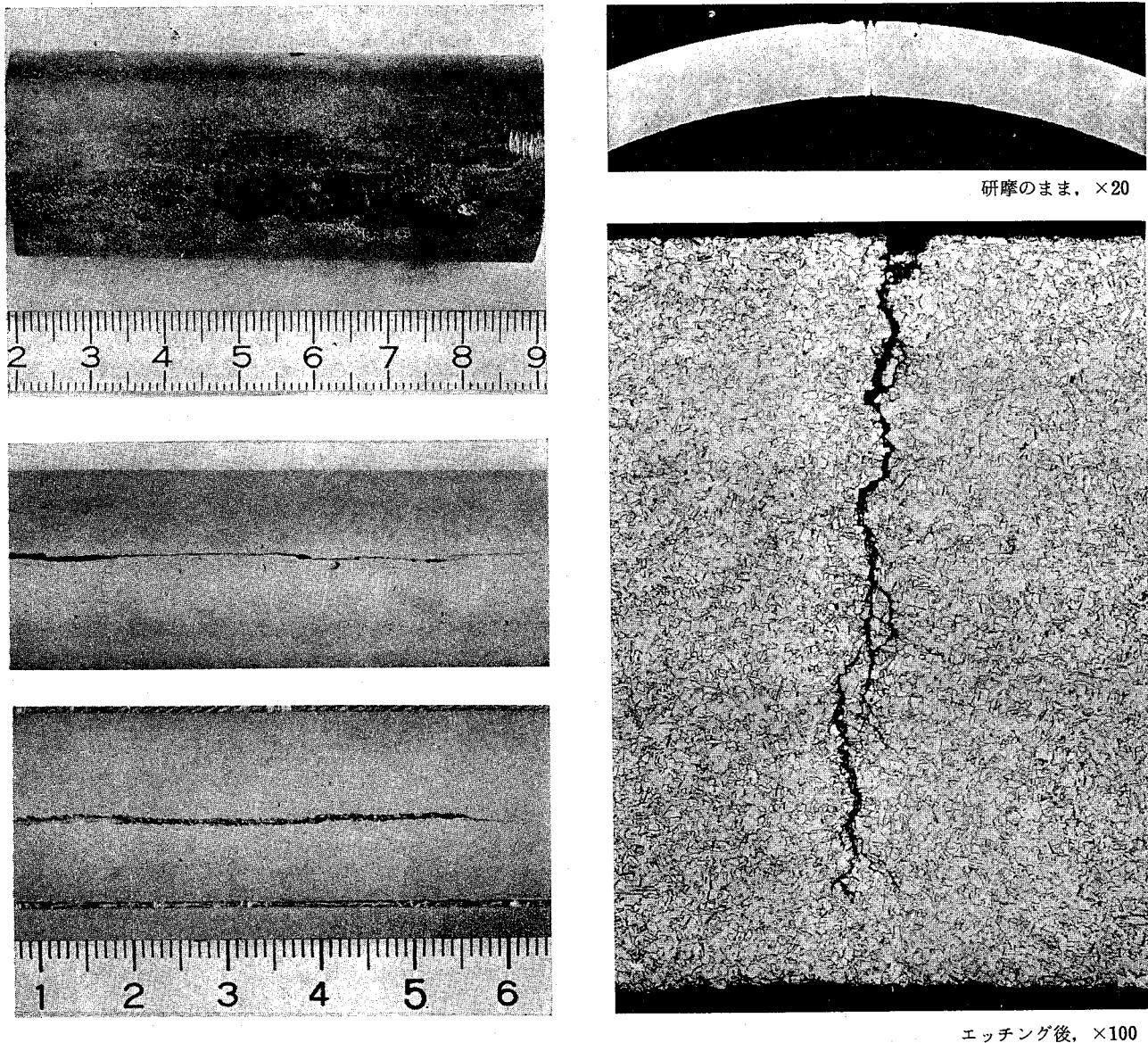
厨房の床面に埋設された銅管に応力腐食割れを生ずることの理由についてはつぎのように考えられる。本個所における銅管の埋設は Fig. 16 のごとき構造によることが多い。

すなわち, 銅管の外面にはアスファルトジュートを巻付けてあって, その周囲をシンダー (自然火山灰) や軽量セメント (発泡コンクリート) などで固められており, その上面 (床面) にはタイルが張られていて, 下面や側面にはアスファルトによる防水処理が施されている。厨房においては作業上や衛生的な管理などのために床面に水を流すことがしばしばあるはずであり, このために床面から水が浸透して銅管の周囲環境を湿潤な状態にすることが多々あるものとみなされる。シンダーとジュートに塗布されているアスファルトには硫黄分, 軽量セメントにはアンモニア分を含んでいることがあるため, 水が浸透して銅管の周囲を湿潤な状態にすることによって, 硫黄分やアンモニアが銅管に作用することが考えられる。本用途に用いられる銅管は主として冷間加工仕上げされた半硬質または硬質であるため, 銅管にはある大きさの応力が残存しているはずであり, 本内応力を応力源として硫黄分やアンモニアの腐食作用によって応力腐食割れを生ずるに至ったものとみられる。

なお, 廚房床面下に埋設された銅管のうち, 本現象によって破損をきたしたものはごく少数にすぎないことから, これらについてはとくに腐食作用が厳しく影響した異常事態のようにも考えられる。しかし, 本用途に同じ工法で埋設配管されている銅管については本現象を生ずる懸念が多少なりとも考えられるため, 今後における本現象による破損事故の発生状況によっては配管施工法について検討することが必要になるかも知れない。

### (4) 腐食疲労

給水給湯用銅管において腐食疲労割れに起因する損傷事例はほとんど経験されてない。このことは, 銅管内をほぼ一定温度の水や温水が常時流れている場合が多いため, 温度の変化にもとづく熱応力の繰返し作用が少ないと想定される。



**Photo. 3** 廚房床下に埋設され、応力腐食ワレを生じた給湯用銅管の内外面および断面状況。  
(銅管内面側におけるワレ部には漏洩水の影響により漬食を生じている。)

大きな熱応力を生じ易い温水配管については、配管過程に膨脹継手などを取付けて熱応力を吸収する策などが講ぜられていることによるものと考えられる。

なお、銅管に振動などによる繰返えし応力が作用するような状態にある時には、本現象による破損を生ずる可能性が十分考えられるので、この場合にはこの種の応力が作用しないように構造的に検討される必要がある。

##### (5) 接触腐食

銅管と鋼管あるいは亜鉛メッキ鋼管とを直接ロウ接などによって接合することは、よく見掛けることであるが、銅管と鋼管との間において接触腐食を生じたという事態は今のところ経験されていない。本接触腐食については本章の2.4項に述べたごとく、本用途において実用上ほとんど問題にならないものと考えられるが、確実なことは今後の実績によって判断したい。

(以下次号)

##### References

- 1) L. Tronstad and R. Veimo : J. Inst. Metals, **66** (1940), 17
- 2) O. Franqué : Werkstoffe Korrosion, **19** (1968), 377
- 3) E. Mattsson and A. M. Fredriksson : Brit. Corrosion J., **3** (1968), 246
- 4) 相沢金吾：銅の衛生学的研究、日本銅センター、(1970), 149
- 5) 田中礼次：本誌, **3** (1962), 73
- 6) L. W. Haase : Metall, **24** (1970), 113 (日本銅センター訳：銅と技術, **6** (1970), 70)
- 7) 水谷正美：冷凍と空調, No. **124** (1970), 38
- 8) S. T. Powell, H. W. Bacon and S. R. Lill : Indust. and Eng. Chem., **40** (1948), 435
- 9) Deutsches Kupfer Institut : *Kupferrohre im Wasserfach*, (1967), (日本銅センター訳：銅と技術, **5** (1969), 7)

- 10) 田部善一：未発表
- 11) J. B. Cotton and W. R. Jacob : Brit. Corrosion J., 6 (1971), 42
- 12) M. F. Obrecht : Corrosion, 18 (1962), 189t
- 13) H. S. Campbell : J. Inst. Metals, 77 (1950), 345
- 14) H. S. Campbell : The British Non Ferrous Research Association, *Recent Investigation of Pitting Corrosion of Copper*, T. E. S. 66/489, September (1967)
- 15) H. S. Campbell : J. Appl. Chem., 4 (1954), 633
- 16) R. May : J. Inst. Metals, 82 (1953-54), 65
- 17) M. Pourbaix : Corrosion, 25 (1969), 267
- 18) V. F. Lucey : Brit. Corrosion J., 2 (1967), 175
- 19) C. Breckon and P. T. Gilbert : Metal Ind., 93 (1958), 89
- 20) H. L. Logan and G. M. Ugiansky : Mat. Protection, 4 (1965), May 79

R 143

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS Vol. 12 No. 4 OCT. 1971  
Vol. 13 No. 1 January., 1972

技 術 資 料

建築および建築設備用銅管の最近の問題点

その 1. 給水給湯用銅管について

その 2. 空調および衛生用銅管とその配管施工について

佐 藤 史 郎

匂 坂 喜 代 治

住友軽金属工業株式会社

# 建築および建築設備用銅管の最近の問題点

## その1 給水給湯用銅管について

佐藤史郎\* 勾坂喜代治\*\*

### Recent Topics of Copper Tubes for Modern Buildings and Its Accessories

by Shiro Sato and Kiyoji Sagisaka

#### 1. 緒 言

建築面における銅管の主たる用途は、(1) 給水給湯用配管、(2) 機器用およびその配管(空調用など)、ならびに(3) 排水用配管であって、その他に(4) ガス配管や(5) 医療用配管などもあり、これらを総合して建築用銅管と称している。

最近の傾向として、ビルの高層化、需要および施工面での要求の高度化、その他の水質をはじめとする環境の変化などのために、従来主として用いられてきた鋼管にかわって、銅管が多く利用される方向にある。とくに、最近におけるビルの高層化は銅管の利用増大に拍車をかけている。

すなわち、ビルの高層化にともなって、配管材の軽量化、工期短縮のため施工の能率向上化、および寿命の恒久化などが強く要望されているが、銅管は他の材料にみられない優れた多くの性質を有しているので、それらに対して十分満足できる成果をもたらすことができる。たとえば、水質の多岐にわたる変化に対して銅管は広汎にわたって安定した耐食性を有するので、寿命の恒久化の要求に応じ得るばかりでなく、さらに肉厚の薄い銅管を用いることが可能となり、軽量化への成果をもたらす。また、銅管は曲げや切断ならびに接合などの加工が容易であるため、施工は簡便かつ迅速にできるので工期の短縮や工事費の低廉化などに大きな役割を果すことができる。しかも、最近開発されたプレハブ工法を採用することによって一層成果を上げることができる。

しかし、これらの用途に銅管を用いることによって全く問題を生じないわけではなく、稀にはトラブルを伴うこともある。たとえば使用時に腐食による漏洩事故を生ずることがある。これらの大半は銅管内を流れる冷温水の水質に

起因するものであるが、関与している因子が多くはなはだやっかいな問題である。また、配管施工上に起因する問題も少數ながら発生することもある。本稿においては、建築用銅管として(1) 給水給湯用、(2) 空調用および(3) 排水用に用いられる場合において、その耐食性を支配する基本事項、施工上の問題およびその対策などについて述べる。

#### 2. 給水給湯用銅配管

給水給湯用銅配管における問題点としては、施工に関するものと、使用時における腐食に関するものがある。前者は章を改めて述べることとし、本章では使用時の問題である腐食について述べる。

##### 2・1 水質と銅管の腐食

銅は化学的に水素よりも貴な金属であるため、純粋な水により直接腐食を受けることはない。銅が水によって腐食を受けるのは溶存酸素の作用によるものである。

水質との関係において提起されている銅管の問題点は、大別して銅の溶出によるものと孔食の発生によるものが知られており、かなりの研究が実施されてきている。しかし、両問題点は単純な水質との相関のみによって解決されるものとも限らず、たとえば流速や温度などの他の因子の作用も受けるものとみられ、はなはだ複雑な現象である。そのため、今日でもその全貌は必ずしも明らかにされているとはいえない状況下にあるように考えられる。以下に関連事項を概説する。

###### (1) 水質基準

対象とされる水は一般に上水であるが、その性状は広汎なものである。参考までに、わが国をはじめ、米国、西ドイツなどの水質基準をTable 1に示す。

###### (2) pH

銅はFig. 1<sup>1)</sup>に示すように、微アルカリ性において最も安定した状態を保つが、中性近傍においても腐食速度は

\* 研究部 工学博士

\*\* 研究部

Table 1 世界各国における上水の水質基準

項目	WHO(世界保健機構)基準	日本基準	アメリカ基準	西ドイツ基準	ソ連基準	フランス基準	オランダ基準	スエーデン基準
色度, 度	—	5.0	15	—	—	—	20*	20~40
濁度, 度	—	2.0	500(1000)	—	—	—	0.5	微
蒸発残留物, ppm	—	500	—	—	—	—	—	—
pH 値	7.0~8.5 (6.5~9.2)	5.8~8.6	—	—	—	—	—	—
総硬度, ppm	100~500*	300	—	350	—	—	—	100
KMnO <sub>4</sub> 消費量, ppm	10	10	—	20	—	—	20	20~40
塩素イオン, ppm	200(400)	200	250	20	—	250	250**	300
硫酸イオン, ppm	200(400)	—	250	—	—	250	200	—
アンモニア性窒素, ppm	0.5	同時に検出しきてはならない	—	—	—	—	0.2	0.5
亜硝酸性窒素, ppm	—		—	—	—	—	0.1	0.02
硝酸性窒素, ppm	40(80)**	10	45*	50*	—	10	10.0	3.0
鉄, ppm	0.3(1.0)	0.3	0.3	0.2	0.5	0.1	0.1	0.2~0.4
マンガン, ppm	0.1(0.5)	0.3	0.05	0.1	—	0.05	0.05	0.1
フッ素, ppm	1.0(1.5)	0.8	0.6~1.7	0.5	1.5	1.0	—	—
鉛, ppm	0.1	0.1	0.05	0.3	0.1	0.05	0.1	—
砒素, ppm	0.2	0.05	0.01(0.05)	—	0.05	0.05	0.2	—
セレンium, ppm	0.05	—	0.01	—	0.01	—	0.05	—
クロム, ppm	0.05	Cr <sup>6+</sup> 0.05	Cr <sup>6+</sup> 0.05	—	Cr <sup>6+</sup> 0.5 Cr <sup>6+</sup> 0.1	0	0.05	—
銅, ppm	1.0	1.0	1.0	3.0	0.1	0.05	—	—
亜鉛, ppm	5.0(15.0)	1.0	5.0	—	1.0	5.0	—	—
フェノール類, ppm	0.001(0.002)	0.005	0.001	—	—	0.001	—	—
シアノ, ppm	0.01	検出しないこと	0.01(0.2)	—	0.1	0	0.01	—
水銀, ppm	—	✓	Ag 0.05	0.05	0.005	—	—	—
バリウム, ppm	—	—	1.0	—	4.0	—	—	—
カドミウム, ppm	—	—	0.01	—	0.1	—	—	—
陰イオン活性剤, ppm	—	0.5	0.5	—	—	—	—	—
放射能, $\mu\text{m}l$	$\alpha$ 線 $10^{-9}$ $\beta$ 線 $10^{-8}$	—	年間 Ra225.3 $\mu\text{mc/l}$ , Sr90.10 $\mu\text{mc/l}$	100 $\mu\text{mc/l}$	—	—	$\beta$ 線年間 10 $\mu\text{mc/l}$	—
有機リン, ppm	—	検出しないこと	—	—	—	—	—	—
遊離残留塩素, ppm	—	0.1 以上	0.05~0.1	0.3まで注入 必要な時0.6	検出してはなら ない	0.1 以下	—	—
マグネシウム, ppm	50(150)	—	—	—	—	125	—	—
カルシウム, ppm	75(200)	—	—	—	—	—	—	—
大腸菌群	年間を通じて M PN10以下	50ml 中検出 してはならない	月間の陽性管数 10%以下	100ml 中0	—	陰性	地下水1/l 以下 表流水2/l	100cc中2コ以下 (ヨリエロゲネス)
一般細菌	—	1ml中100コ以下	—	—	—	—	—	1cc中100コ以下
臭気	—	異状あつてはな らない	3°	—	—	—	不快な臭気があ つてはならない	微
味	—	同上	異常あつてはな らない	—	—	—	2倍稀釈して不 快な臭気があつ てはならない	—
備考	( )はやむを得 ない場合 *CaCO <sub>3</sub> として **NO <sub>3</sub> として	*NO <sub>3</sub> として( ) はやむを得ない とき活性炭クロ ロホルム抽出量 0.2ppm	*NO <sub>3</sub> として各 州によって異なる 上表はハング ブルグ州	上表は源水中 Ni 0.1ppm Co 1.0ppm	—	—	水温5~15°C 酸 素2ppm以上 *できれば10°以 下 **100以下な らなおよい	—

(表中の数値で範囲を明示していないものは上限値を示す)

大きくな。

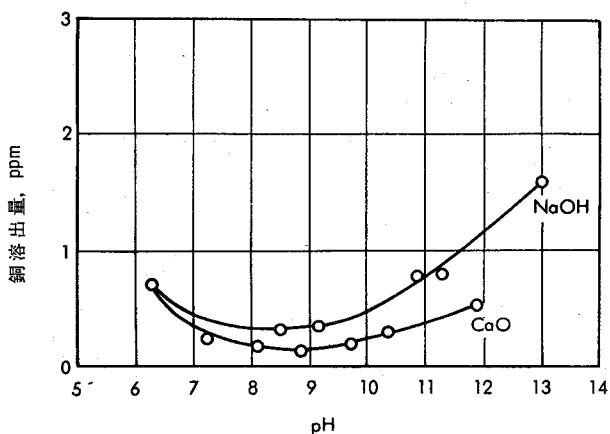
わが国的一般の上水は pH 6.5 以上であることが多く、銅は実用上十分な耐食性を示す。そのため、耐用年数の観点から腐食が問題にされるることはまず稀である。

pH が低いと腐食速度が大きくなるのは銅の表面に安定な皮膜が形成され難くなるためである。地下水や鉱山の排水あるいは特殊な河川水などで pH が著しく低い場合には必然的に銅の腐食速度は増大する。対策としてはアルカリ

性の物質、たとえば焼石灰 (CaO) や苛性ソーダ (NaOH) や各種のソーダ塩などの添加によって pH を上昇させることが有効である。

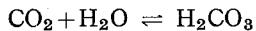
### (3) 炭酸物質

炭酸ガスはガス相の分圧に応じて水中に溶解する。通常の大気中の CO<sub>2</sub> 濃度 0.0003 atm に対する純水中の平衡 CO<sub>2</sub> 濃度は 0.5ppm であり、CO<sub>2</sub> が 1 atm のときの純水中の平衡濃度は 1,500ppm であるとされている。水中の炭

Fig. 1 銅の溶出におよぼす pH の影響<sup>1)</sup>

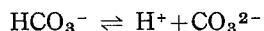
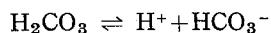
酸はつぎに述べるように種々の平衡関係下において存在し、それらは水中における生物の同化作用やまた接している土や岩石の性質によっても影響される。

水中の  $\text{CO}_2$  の一部は炭酸を形成する。なお遊離炭酸と称されるものは水中の  $\text{CO}_2$  と  $\text{H}_2\text{CO}_3$  の和のことである。



$$[\text{H}_2\text{CO}_3]/[\text{CO}_2] = 0.003$$

炭酸 ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) は重炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) に解離し、重炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) はさらに炭酸イオン ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) に解離する。



$$[\text{H}^+] [\text{HCO}_3^-] / ([\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{CO}_2]) = K_1$$

$$[\text{H}^+] [\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-] = K_2$$

25°Cにおいて、

$$K_1 = 4.45 \times 10^{-7}$$

$$K_2 = 4.69 \times 10^{-11}$$

したがって、水中における各炭酸成分の存在比率は pH 値によって定まり、Fig. 2 のように Speller による図表

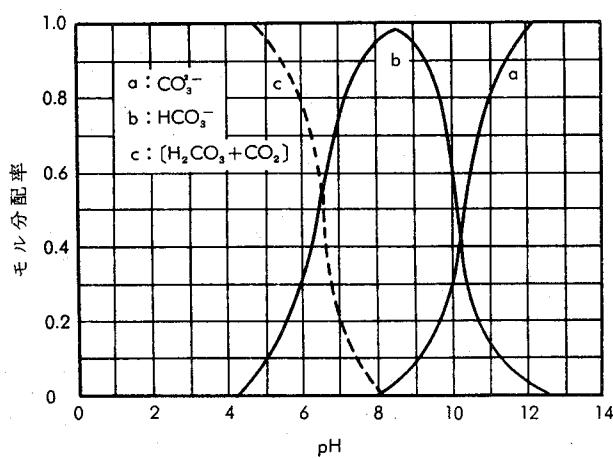


Fig. 2 水中の遊離炭酸と結合炭酸の分配率

で示される。Fig. 2 によれば pH 8.5 以下においては炭酸イオン ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) はほとんど存在せず、遊離炭酸と重炭酸イオンの平衡のみを考慮すればよいこととなる。具体的な

数値は重炭酸イオンに該当するものとして M アルカリ度を用いることにより Fig. 3 で与えられる。

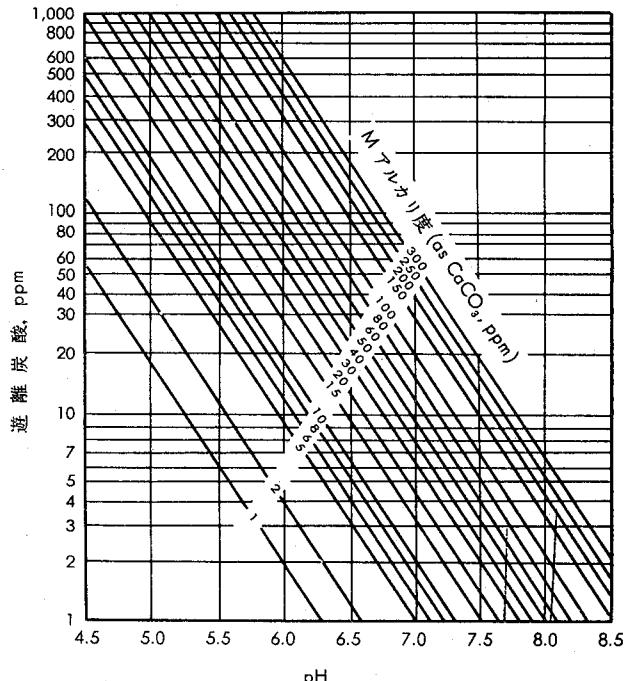
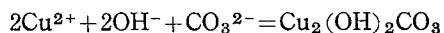


Fig. 3 M アルカリ度、pH および遊離炭酸の関係

一般に遊離炭酸を多く含む水は銅を多く溶解することが知られている。水中の遊離炭酸の多寡は水の銅溶解性 (cupro-solvency) を示す重要な指標とみられている。

炭酸イオンは第二銅イオンと反応して塩基性炭酸銅を形成する。これがいわゆる緑青である。



塩基性炭酸銅は難溶性であるため、その形成は以後の腐食の進行を阻止し、一般に有益であるとされている。

Table 2 に代表的な銅塩の溶解度積を示す。同時に、pH を 7.0 とし、各陰イオンの活量を 1 m equiv に仮定したときの  $\text{Cu}^{2+}$  の溶解度をも示す。

Table 2 代表的な銅塩の溶解度積と各陰イオンの活量  
が 1 m equiv のときの  $\text{Cu}^{2+}$  の溶解度 (equiv)

銅 塩	溶 解 度 積	$\text{Cu}^{2+}$ の溶解度
$\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$	$[\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^-][\text{CO}_3^{2-}]^{0.5} = 10^{-16.9}$	$10^{-8.4}$
$\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$	$[\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^-]^{1.5}[\text{SO}_4^{2-}]^{0.25} = 10^{-17.2}$	$10^{-5.9}$
$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	$[\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^-]^{1.5}[\text{Cl}^-]^{0.5} = 10^{-17.8}$	$10^{-5.8}$
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	$[\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^-]^2 = 10^{-19.8}$	$10^{-5.8}$

#### (4) 硫酸イオン

わが国の水道法水質基準では硫酸イオン許容量を規定していないが、世界保健機構 (WHO) では 200 ppm 以下、米国では 250 ppm 以下と定めている。

一般にわが国の上水に含有されている硫酸イオンは 20 ppm 以下であることが多い。この程度の硫酸イオンが中性硫酸塩として含有されている限りその作用は顕著なもの

でないといえる。

しかし、単純なイオウ酸化物として混入し、それが酸化されて生じた硫酸イオンは当然pHを低下させ、腐食増大の有力な原因となりうる。たとえばいわゆる大気汚染により亜硫酸ガス( $\text{SO}_2$ )を含む空気と接した水はまず亜硫酸ガスを吸収し、それが酸化されて硫酸イオンとなり酸性化する。そして銅の腐食を促進するように作用する。

以上は酸としての硫酸の作用であって、それによって生ずる腐食は主として全面的な溶解を主体とするものと考えられる。

しかし、最近になって以上のような硫酸の作用とは異なった作用が指摘されるようになってきた。すなわち、給湯用銅管の孔食の発生が硫酸イオンによって起りうる場合のあることが、ドイツとスウェーデンにおける実績の検討から示された<sup>2),3)</sup>。Mattssonら<sup>3)</sup>はまず給湯銅管の孔食発生例について検討し、孔食の発生がpH 7以下で、さらに重炭酸イオン量に比して硫酸イオン量が多い場合に生ずることを明らかにした。換言すれば、 $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}] \geq 1$ でpH $\geq 7.4$ のときは孔食が生じていないという。さらにこのようなときに生じた孔食部の特徴として孔食部の近傍に塩基性硫酸銅 $[\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4]$ が形成されていることを挙げているが、筆者らも全く同一の例を2件最近になって経験している。

この現象は給湯銅管の実用面からみて極めて重要な問題であるので、詳細は孔食の章において改めて述べる。

#### (5) 塩素イオン

わが国の上水は塩素イオンを約10~40ppm含有していることが多いが、この程度の濃度では銅の耐食性に影響をおよぼさない。しかし、一般に水中の可溶性塩分としての塩素イオン濃度が増大すれば、銅の腐食進行速度は大きくなる傾向があるが、潰食が生じない限りにおいて銅の耐食性は著しく脅されることがない。しかし、河海水あるいは海岸近くの地下水などにおいて可溶性塩分濃度が著しく増大しているような場合には、潰食を生じ易くなる傾向があらわれてくる。淡水と海水の分岐点に相当する塩分濃度は、銅および銅合金の潰食発生傾向からいえば、ほぼ2,000ppm程度とみられる。このことは海水が淡水によって稀釀されている場合、その稀釀度(海水/淡水)が $1/15$ 以上であれば、海水に近い潰食現象を生ずる可能性があることを意味する。したがって、上記の塩分濃度が2,000ppmを越えるような場合には、潰食現象の観点から海水と同じ配慮が必要とされる。したがって、管内を流れる冷却水の速度が1m/secを越える場合などにおいては、銅にかわってアルミニウム黄銅やキュプロニッケルのような海水に対する耐潰食性が大きい合金管を採用することが望まれる。

#### (6) 酸度、アルカリ度

酸度は水中の炭酸、鈎酸、有機酸および加水分解によって酸性を呈する塩類などの酸分を中和するために要するア

ルカリ分を、炭酸カルシウムに換算してあらわしたものであり、全酸度と鈎酸度とがある。普通わが国の水で酸度を示すのは遊離炭酸とされている。pHが高くて酸度が高いと銅の腐食速度を増す。酸度が腐食反応の進行に伴なうpHの上昇、したがって腐食の減少の傾向を抑止する方向に作用するためであろうことは容易に考えられるところである。水中における銅イオンの溶出におよぼす酸度の影響をTable 3<sup>4)</sup>に示す。

Table 3 銅管内の湛水中への銅の溶出量と水質(酸度)との関係を示す実験例<sup>4)</sup>

酸度, ppm as $\text{CaCO}_3$	3	5	7	10	13	15	
pH	7.3	7.1	7.1	6.9	6.6	6.6	
$\text{CO}_2$ , ppm	1.3	2.2	3.1	4.4	5.7	6.6	
溶出銅イオン, ppm	新 管	0.7	0.7	0.8	1.2	1.5	2.3
ppm	旧 管	0.7	0.5	0.7	1.0	1.4	2.2

アルカリ度とは水中に含まれる水酸化物、炭酸塩、重炭酸塩などのアルカリ分を、これに対応する炭酸カルシウムに換算してあらわしたものであり、全アルカリ度、Mアルカリ度、Pアルカリ度などに区分され、この中ではMアルカリ度が実用上重要である。

Mアルカリ度は水酸イオン( $\text{OH}^-$ )、炭酸イオン( $\text{CO}_3^{2-}$ )および重炭酸イオン( $\text{HCO}_3^-$ )などからなり、飽和指数の項で述べるごとく、pH、カルシウムイオン、溶存塩類および温度などと関連して、硬度成分(炭酸カルシウム)による保護皮膜の生成やさらには硬度成分による管の閉塞に重要な因子として作用する。硬度成分による付着物の発生有無については飽和指数の項で詳細に述べる。上水のMアルカリ度は普通20~50ppmであるが、地下水ではこの値以上の場合もある。

#### (7) 塩 素

上水の浄化処理の一つとして、主として殺菌のために注入される塩素は水中に溶解して次亜塩素酸(HClO)となり、強い酸化作用をなすためにその効果を發揮する。

銅イオンの溶出におよぼす塩素の影響はFig. 4<sup>5)</sup>のよ

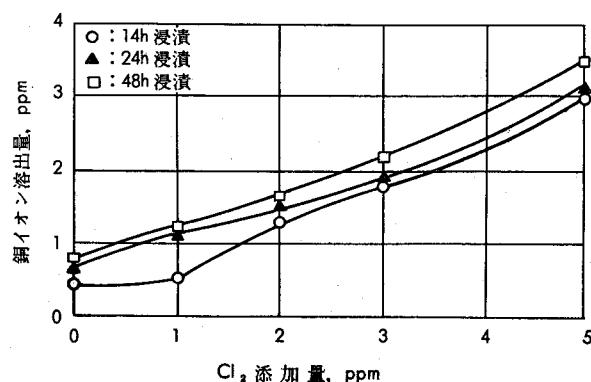


Fig. 4 銅イオンの溶出におよぼす塩素の影響<sup>5)</sup>

うであり、塩素濃度が高くなると銅イオンの溶出量は増大する。

しかし、上水における塩素濃度範囲では銅イオンの溶出および腐食に大きな影響をおよぼさない。

#### (8) 鉄、マンガン

上水に含まれる鉄分には、浄水場での水処理で除去されない鉄分と、鉄製の配管から溶出する鉄分がある。鉄化合物の皮膜は鉄管の補助的保護作用をなすが、厚く付着して局部的に剝離した場合には、その個所に腐食を生ずることも考えられる。また、銅管面に十分な保護皮膜が育生されていない時点に、ある種の鉄化合物 [ $\text{Fe(OH)}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ] が部分的に付着すると、それが陰極として作用し、鉄化合物の非付着部に局部腐食を生ずることもある<sup>1)</sup>。ただし、銅管壁に耐食上保護作用をなす塩基性炭酸銅のごとき皮膜が形成されている場合には影響がない。

水中に含まれる鉄分は衛生的にはあまり問題がないが、水を茶褐色に混濁せしめたり、お茶を黒褐色に変色せしめたりする問題を有するので、上水の水質基準では鉄の許容量を 0.3ppm 以下に定めている。そして、この点が鋼配管に対する銅配管の極めて重要な利点であることはいうまでもない。

マンガンの炭酸塩や水酸化物は水中への溶解度が小さいので、一般には自然水中にはごく微量しか存在することがないが、最近は化学肥料の影響によって土壤が酸性化しているので、浅い地下水や河川水ではマンガンが増大する傾向にある<sup>2)</sup>。マンガン化合物が銅管面に付着すると局部腐食を生ずる原因となる。これは二酸化マンガンとしての付着物が高度に陰極的であるためとされている。またマンガン分は黒い水の原因にもなる場合がある。さらに飲料水中にマンガンを含有することは有毒であるので注意しなければならない。

現在わが国ではマンガンの許容量を 0.3ppm 以下に規定しているが、世界保健機構 (WHO)、西ドイツおよびイギリスでは 0.1ppm 以下、米国およびフランスでは 0.05ppm 以下に定めており、わが国よりもかなり低い許容値であることは注目しなければならない。

#### (9) 硬度、硅酸

硬度は水中のカルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ ) およびマグネシウムイオン ( $\text{Mg}^{2+}$ ) の量を、これに対応する炭酸カルシウムであらわしたものである。

硬度は直接的に銅イオンの溶出および腐食速度を支配する要因にならないが、飽和指数との関係において重要な因子の一つであることは当然である。空調器の冷却水でクリーニングタワー方式が採用されているような時には、水が濃縮して硬度成分が多くなって、カルシウム塩あるいはマグネシウム塩などを析出して、冷却水の流れを阻害したり、伝熱性を著しく低下せしめたりすることがある。

わが国の水道法水質基準では硅酸の許容量を設けていないが、上水に含有される硅酸は平均約 30ppm が多いところでは 50~70ppm に達する。水への硅酸の溶解度は pH によって支配される。硅酸も直接的には銅の腐食に影響をおよぼさないが、含有量が多く、硬度も高く、しかも pH が低い場合には水に不溶な硬い硅酸塩、たとえば硅酸カルシウム ( $\text{CaSiO}_3$ ) などを銅管内に生ずることがあって問題になる場合もある。

#### (10) 飽和指数 (Langlier Index)

銅が水と接触した時、水中へ溶出する銅イオン量は銅表面に保護皮膜が形成されるかどうかによって大きく支配され、保護皮膜が形成される時の方が皮膜が形成されない場合に比して溶出する銅イオンは少なく、腐食速度は減少する。このことは銅に限らず金属材料の水中における腐食現象を支配する根本的な因子の一つである。給水給湯用銅管内面に形成される皮膜は酸化銅および塩基性炭酸銅などのようないかに保護皮膜からなる場合の他に、硬度成分であるカルシウムやマグネシウムの炭酸塩、硅酸塩、鉄化合物ならびにスライムなどが考えられ、これらの多くは、程度の差はあるけれども保護皮膜として作用することが多い。

皮膜構成因子のうち、硬度成分とくにカルシウム塩 (炭酸カルシウム) が皮膜として析出するかどうかを理論的に求めたのが、飽和指数 (Langlier Index: Is) であり、炭酸カルシウムが析出するための水素イオン濃度指数 (pHs) とその pH の関係を次式によって定義したものである。

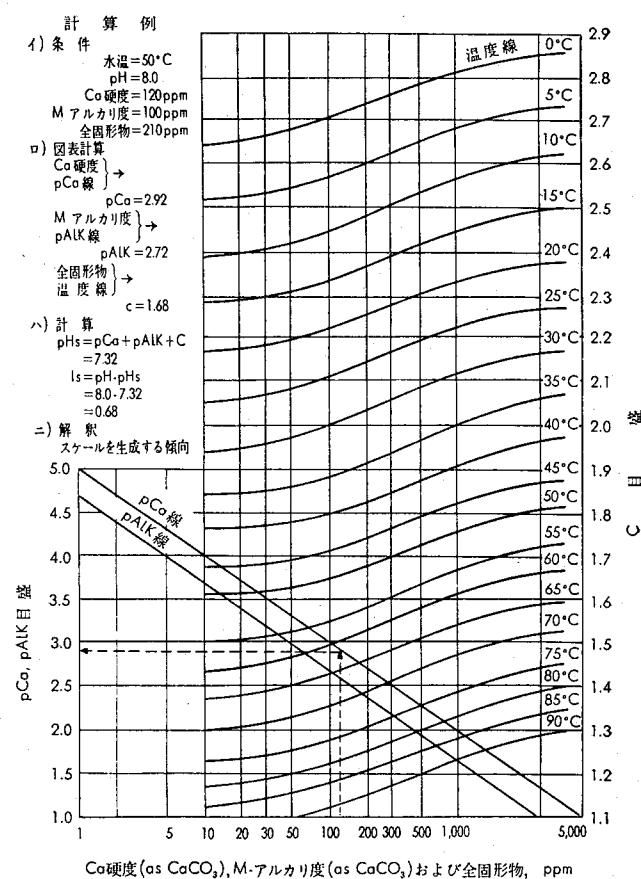
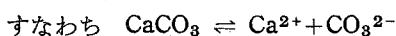
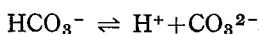


Fig. 5 飽和指数表<sup>3)</sup>

$$Is = pH - pHs$$



$$[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = L$$



$$[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-] = K$$

$$pHs = p\text{Ca}^{2+} + p\text{HCO}_3^- + (pK - pL)$$

$(pK - pL)$  を温度の函数として与えておけば、カルシウム硬度と M アルカリ度から  $pHs$  は求められるわけである。Fig. 5 に Powell<sup>8)</sup> による図表を示す。

$Is$  が負の場合、とくに -2 以下のときは炭酸カルシウム皮膜は形成されないために、銅イオンの溶出が増大することになる。しかし、このことが直接銅管の腐食による漏洩事故につながるわけではなく、このような水のもとでは、ある種の堆積物が存在したり、異常な流速による衝撃作用が加わった時に管肉厚を穿孔するような腐食事故を生ずる可能性があることを意味する。

飽和指数と類似の考え方で、水の特性を示す指数として安定度指数 ( $S$ ) が用いられることがある。安定度指数は飽和指数 ( $pHs$ ) により、次式によって求めたものである。

$$S = 2pHs - pH$$

安定度指数 ( $S$ ) について、つぎの傾向があるといわれている。

$S=6$  : 化学的安定状態

$S<6$  : スケール形成の傾向

$S>6$  : 腐食の傾向

## 2・2 溫度の影響

冷水と温水における銅の挙動には基本的に差異がないが、温水における方が電気化学的反応は早く進行し易く、温水においては塩基性炭酸銅皮膜がより緻密になり、炭酸カルシウムが共存すると本皮膜は幾分透明になる。<sup>9)</sup>

表面状態のきれいな銅管から溶出する銅イオン量におよぼす水温と時間の影響は Fig. 6<sup>5)</sup> および Fig. 7<sup>5)</sup> のようであって、流动状態では水の温度が高い方が銅イオンの溶出は多く、湛水状態では温度が高い程銅イオンの溶出量は早期に最大に達し、しかも、再析出して減少するのも早い。これらのこととは、水温が高いほど、反応が早く進行することを示すものとみられる。

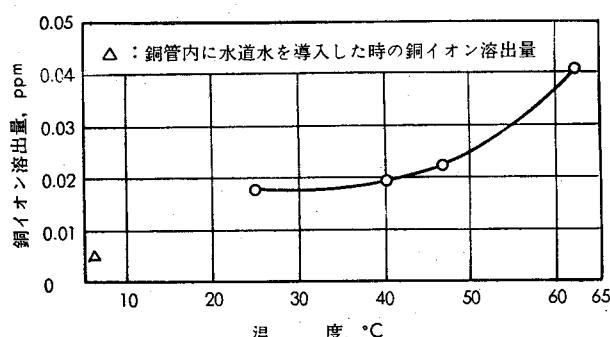


Fig. 6 温水を銅管内に導入した際、銅イオンの溶出におよぼす温度の影響<sup>5)</sup> (銅管: 内径10mmφ×長さ1m, 流速: 1m/sec)

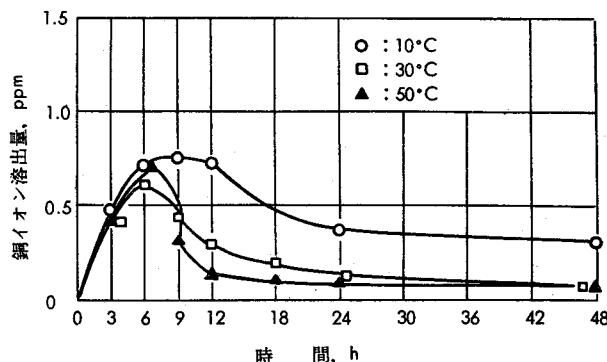


Fig. 7 銅管内に水を充填した時、銅イオンの溶出におよぼす水温と湛水時間の影響<sup>5)</sup>

水温が高くなると空気などのガスの溶解度が小さくなるので、そのために温水には分離された空気などの気泡を多く混入し易い。気泡の含有量が著しく多い場合には潰食を助長する要因になり易いので、温水の配管過程には空気抜き装置を設置し、気泡の混入をできるだけ少なくする配慮が望まれる。

## 2・3 銅イオンの溶出による問題

給水や給湯用配管を使用したビルや一般家庭において、水や温水が青色を呈する事態、いわゆる“青い水”問題を提示されることが時折ある。これらについてその状況を調査してみると、銅イオンが溶出して水や温水自体が青い色を帯びたという実体はまだ確認されていない。浴槽や洗面器あるいはタオルなどに不溶性の青色を呈する物質が付着することがあり、浴槽や洗面器に水や温水を満した時、これらの付着物の青い色が透視されて、そのために水や温水が青いといわれているようである。

浴槽や洗面器あるいはタオルなどが青くなることの原因については、溶出した銅イオンが石鹼に含まれる脂肪酸と反応して銅石鹼を生成することによるものと考えられる。なお銅石鹼は水に不溶で青い色を帯び、ねばねばした性状を呈す。また、その他に溶出した銅イオンが空気中の炭酸ガスと反応して塩基性炭酸銅、いわゆる緑青のごとき化合物を形成することも考えられる。

銅イオンの溶解によって水や温水自体がわずかに青味を帯びるのには、銅イオンが約 20ppm 程度含まれねばならない。しかし、銅管から溶出する銅イオンはかなり水質が悪い上水の場合でも 1 ppm 前後であるので、水や温水自体が銅イオンの溶解のために青くなることはまずないと考えてよからう。

銅配管内に長時間留められていた水(湛水)を放水する際、ごく初期の水には Fig. 8<sup>5)</sup> のごく多くの銅イオンを含有していることがある。その他に亜鉛イオンや鉄イオンなどを多量に含むこともある。これらのこととは、銅管から溶出した銅イオンが湛水として留められている間に、銅管壁に再析出するにもかかわらず、不安定な状態にあるため、水を放出し始めて新たな水と接触した時、この再析出

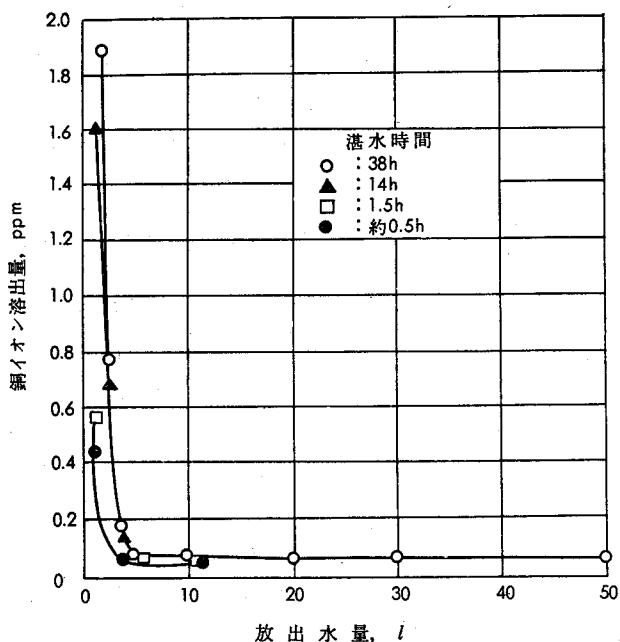


Fig. 8 数年間使用された銅管に水道水を充填した際の銅イオンの溶出におよぼす湛水時間と放出水量との関係<sup>5)</sup>

銅が短時間に再溶出することに原因するものと考えられる。

他の金属イオンについても同様なことが考えられるが、鉄化合物のあるものは一時的に沈殿し、それが短時間に放出されることも考えられる。このため、朝一番に用いる水や使用頻度の少ない個所では、水を少し放出してから飲料用および炊事用に用いた方がよい。

銅管、鉄管および鉛管内を流通する水および湛水に溶出する各金属イオン量の一例を Table 4<sup>5)</sup> に示す。銅イオンの溶出量は許容量以下であるが、鉄イオンは許容量を著しく超過しており、また鉛イオンも有毒であるにもかかわらず許容量を超過する場合も生じている。本試験結果からもわかるように、金属イオンの溶出の観点からも銅管は鉄管や鉛管よりもすぐれているといえる。

Table 4 銅管、鉄管および鉛管における湛水および流動水へ溶出する各金属イオン量の比較<sup>5)</sup>

管No.	水温, °C	各金属イオン溶解量, ppm					
		銅管		鉄管		鉛管	
		湛水	流動水	湛水	流動水	湛水	流動水
1	20.8	0.53	0.02	24.0	4.0	0.65	0.29
2	19.5	0.66	0.06	24.0	4.0	0.62	0.04
3	19.5	0.47	0.02	19.0	6.0	0.76	0.08
4	18.0	0.61	0.05	25.0	6.0	0.78	0.04
5	20.5	0.73	0.02	25.0	2.0	0.88	0.01
6	18.5	0.73	0.04	20.0	6.0	0.92	0.01
7	19.3	0.64	0.03	21.0	6.0	1.01	0.01
8	19.0	0.46	0.03	19.6	3.9	0.30	0.02
9	18.8	0.67	0.02	19.6	5.9	1.50	0.06
10	19.0	0.82	0.05	33.9	11.6	1.19	0.21

(各管の内径: 13mm<sup>φ</sup>, 長さ: 10m)  
(湛水: 24時間, 流動水: 放水後30分)

なお、銅イオンは衛生的な見地から有益な効果をもたらし、また人体の健康を維持する上で欠くことのできない重要なミネラルの一つであり、給水給湯配管に銅管を用いても水質を衛生的になんらそこなうことがない。

## 2.4 銅と鉄との接触腐食

銅は鉄に比して一般に貴であるため、銅管と钢管を直接に接合した時、接触腐食 (Galvanic Attack) により钢管が腐食される可能性は確かにあり得る。

しかし、水道水の配管系において、実用上重大な支障となるようなほどの接触腐食電流が生ずることは、Fig. 9<sup>10)</sup> に示す実験例からみても、容易に起りうるとは考え難い。さらに、温水が対象となるセントラルヒーティング系において、銅と鋼の電位が著しく接近したり、僅かに逆転したりすることが実験により示されているので、銅配管の接触腐食が実用上重大な支障となる程まで生ずると考え難い。Cotton<sup>11)</sup> もセントラルヒーティング系統において、一見して接触腐食の可能性が考えられるところが多くみられるが、現実にはほとんど事故例がないことを述べている。

水道水による給水給湯配管において、钢管や亜鉛メッキ钢管に銅管や銅合金製バルブを直結していることは日常よく見掛けることであるが、これらの場合においても接触腐食による障害はほとんど経験されていないようである。

このことは、まれに誤って海水配管において、钢管に銅合金製のバルブを直結し、苛烈な接触腐食を経験していることと好対照である。

以上のことから、一般に冷温水の配管においては銅管と钢管との直接接合を接触腐食の故に避けねばならないとする根拠は乏しいものと考える。強いて注意を要する場合としては、水の電導度が高い場合、流速が大きく管表面に皮膜形成が阻害される場合が考えられる。

## 2.5 銅管の許容流速

銅配管における冷水および温水の管内流速は 1 m/sec 前

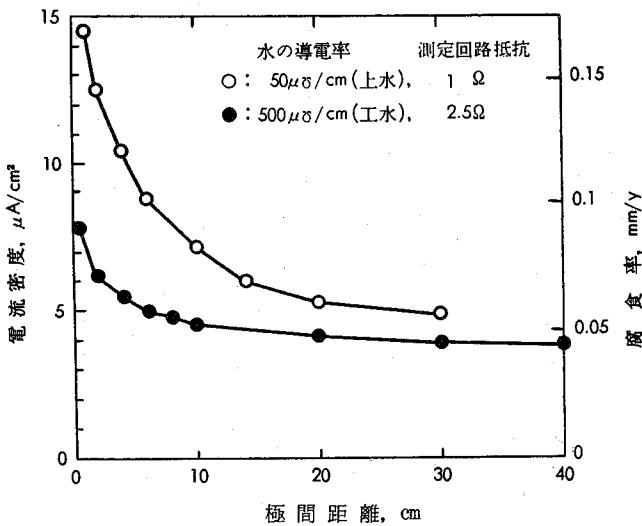


Fig. 9 水中における銅と鉄の接触電流におよぼす極間距離の影響<sup>10)</sup> (水: 名古屋市上水と工水)

後を採用していることが多い。銅配管における淡水の許容流速に関するデータはあまりみあたらないが、 $3 \text{ m/sec}$  としている文献もある<sup>9)</sup>。また、軟水化した冷温水では流速 $1.5 \text{ m/sec}$  までは銅の腐食量が変化しないが、それ以上の流速になると腐食量は増大するというものもある<sup>12)</sup>。

名古屋市の上水および工水を用いて銅管の潰食発生につき約1年間にわたり通水試験をおこない、それらの結果を要約すると Table 5 のようである。潰食は上水を用いて流速が $7 \text{ m/sec}$  以上の場合および工水での試験においては潰食を生ずることがなかった。本試験結果から、潰食はかなり早い流速でないと発生しないことがわかり、同時に上水と工水との違い、すなわち水質の違いにより潰食の発生に大きな差異を示すことがわかった。

Table 5 名古屋市の上水および工水による銅管の潰食試験結果

水	流速 m/sec	内面腐食状況
上水	8	潰食を多数発生。とくに曲り部に多く生じていた(潰食深さ:最大 $0.15 \text{ mm}$ )。
	7	管軸方向に長く延びた形態の潰食が発生(潰食深さ:最大 $0.06 \text{ mm}$ )。
	5	肌荒れ状腐食を発生。
	3	肌荒れ状腐食を僅かに生じている程度で、とくに問題なし。
工水	8	全域に肌荒れ状腐食を生じている。
	7	〃
	5	〃
	3	肌荒れ腐食を多少生じている程度で、とくに問題なし。

銅管における淡水の許容流速は水質に依存することが大であるが、上水を用いた冷温水では特別なことのない限り、水質に大きな変化が考えられないので、潰食発生すなわち許容流速の観点からは現在多く採用されている設計流速約 $1 \text{ m/sec}$  よりも大幅に速くすることが可能と考えられる。

なお、現在採用されている設計流速約 $1 \text{ m/sec}$  は、銅管の耐食面よりも損失水頭の観点から制約されているようにみなされる。銅管の損失水頭と寸法および流量の関係を Fig. 10 に示す。

## 2・6 銅管の損傷例

給水給湯用銅管の損傷例としては腐食に起因するものと、配管施工の不適正たとえばロウ接不良などによる場合があるが、本報告では前者について述べる。

### (1) 潰 食

銅管は冷温水の管内流速がかなり速くても容易に潰食を生ずることがなく、潰食を生ずる限界流速は給水給湯配管に採用されている設計流速(約 $1 \text{ m/sec}$ )よりも大幅に速いものと考えてよい。

銅管において今までに経験されている潰食は、イ) 水質の影響がとくに関与しない状態において、銅管の形状や構造による局部的な流速の過大や乱流の発生に起因する場合と、ロ) pH が著しく低い水や可溶性塩分を多量に含む水の作用、すなわち水質の影響によって生ずる場合とがあ

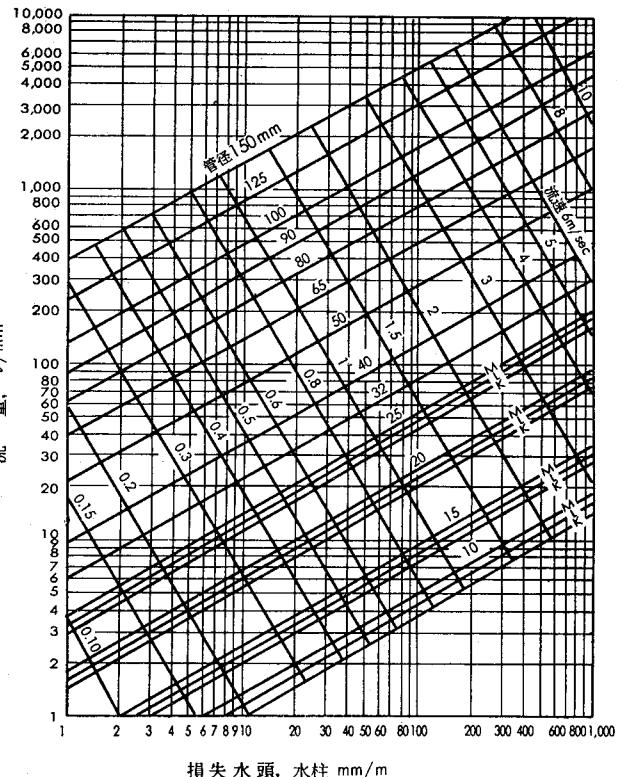


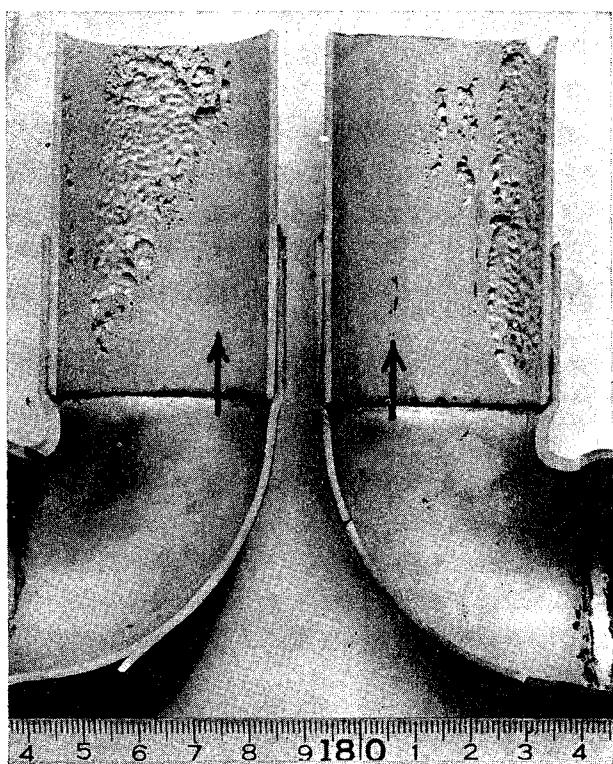
Fig. 10 銅管における水の流量によれば損失水頭の影響

る。

前者の場合、潰食の発生は局部的な個所に限られ、たとえば曲り部の下流側やバルブの直ぐ下流などで乱流が生じ易い部分、あるいは管径の変化で流速が過大となるような位置などに生じている。銅管に生じた潰食例を Photo. 1 に示す。

このことは局部的な乱流の発生や過大流速の影響により、銅管内壁に形成されている耐食的に有効な保護皮膜が部分的に破壊され、金属地肌が露出するためにその部分は陽極となり、腐食が促進されるためである。本潰食は冷水配管において、ほとんど経験されておらず、大半が温水配管に生じており、その場合には温水中に気泡を多量に含有していることが多い。このことから、気泡を多く含むことは乱流作用をより助長せしめるように考えられるため、気泡を混入し易い温水配管においては空気抜き装置などを取り付けて、気泡の混入をできるだけ少なくしなければならない。

後者の場合、潰食の発生は流速や乱流の影響も無視することができないが、前者の場合のごとく特定な部分にのみ潰食を生ずるとは限らない。潰食の発生に大きな影響をおよぼす水質因子として pH の低いことが挙げられ、かような水においては銅管に耐食上有効な保護皮膜が生成され難いために、流速や乱流の作用あるいは異物の充塞などの影響があると潰食を容易に生ずる。pH が低い水としては遊離炭酸を多く含んだ地下水、特定地域における酸性河川水、あるいは大気汚染の影響で亜硫酸ガスを多く吸収したクー

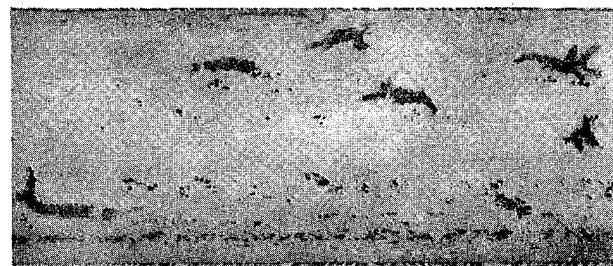


研磨のまま, ×20

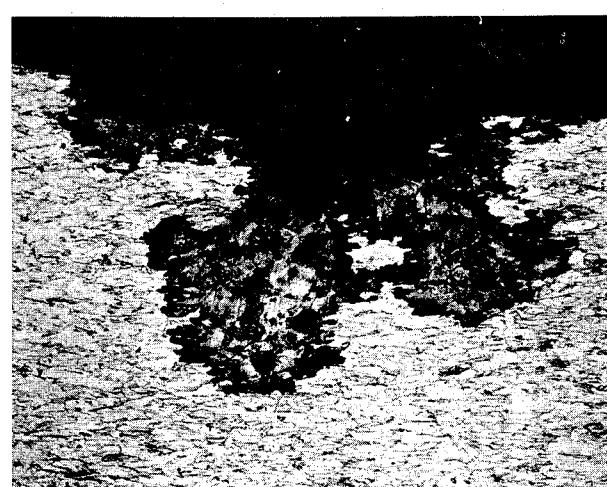
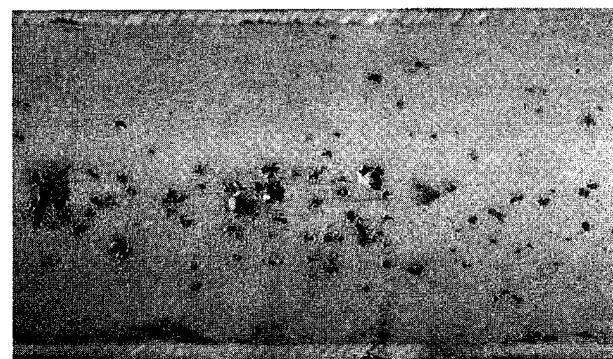


エッティング後, ×100

Photo. 1 給湯用銅管の曲り部に生じた潰食の外観および断面状況。



研磨のまま, ×20



エッティング後, ×100

Photo. 2 給湯用銅管に生じた孔食の外観および断面状況。

リングタワー水などがある。

また、海岸近くの地下水や河海水などのごとく可溶性塩分を多量に含んだ水などにおいても潰食を生ずる。

したがって、銅配管における潰食の発生については、流速や乱流の影響のみならず、水質の観点からも重視する必要がある。遊離炭酸を多く含有する地下水については、石灰処理などによって中和したり、クリーニングタワー水においては水質管理をじゅうぶんおこなって、異常な濃縮をさけることなどが必要である。可溶性塩分が多い場合には、銅管にかわって海水用の耐食材料を用いるべきである。

## (2) 孔食

銅配管において孔食に起因する漏洩事故はほとんど生ずることがなかったが、最近に至り本用途に銅管が多く使用されるようになったことも関連してか、時折孔食による損傷を経験するようになった。孔食は配管施工後2~3年経過した銅管に生じており、その形態はPhoto. 2に示すようであって、局部的に斑紋状もしくは異形模様をなしており、肉厚方向には半円球状に深く腐食されている。孔食の上層には緑青色を帯び腐食生成物とみなされるものが盛り上がって付着しており、孔食内部には褐色を呈する銅化合物が堆積していることが多い。また、場合によると孔食の上層に盛り上がっている付着物の外表面は暗褐色皮膜で覆われていることもある。このような孔食例における特徴の一つは、孔食部の緑青色を帯びた腐食生成物から極めて明瞭な塩基性硫酸銅の結晶が検出されることであり、その例をFig. 11に示す。

Franqué<sup>2)</sup>およびMattsson<sup>3)</sup>らは孔食の発生について水質との関係を述べており、水中に存在する炭酸イオン( $\text{CO}_3^{2-}$ )に比して硫酸イオン( $\text{SO}_4^{2-}$ )を多く含み、pHが低い場合には孔食を生じ易いといっている。

Campbell<sup>13), 14)</sup>は、銅管の製造過程における抽伸工程で残存した潤滑油が焼なまし工程で焼付いて生じた炭素皮膜が孔食の発生原因になるとしており、炭素皮膜は陰極面となって作用し、炭素皮膜に生ずる亀裂部などが陽極面と

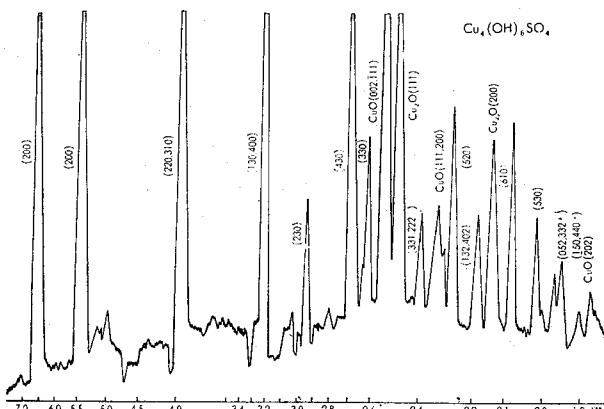


Fig. 11 給湯用銅管に生じた孔食部に形成された腐食生成物のX線回折図

なって孔食を生ずることを述べている。しかし、本現象を筆者らは経験したことがないうえに、他の著者による類似報告が見当らないので、本現象が普遍的な現象であるとする根拠には乏しいものと考えている。

また、冷水における場合、ある種の有機物を含有することによって銅管に生成される皮膜はより緻密になって、孔食は生じ難くなるという説<sup>15)</sup>もあるが、このことは逆説的ない方をすれば有効なある種の有機物を含まない水は孔食を生じ易いこととなるが、その実態はよくわかっていない。

May<sup>16)</sup>は塩素イオンと溶存酸素が存在する水における銅管に生ずる孔食について述べている。この種の水中においては銅管面にまず塩基性銅塩を生じ、続いて酸化第一銅を生成するが、これらの皮膜が局所的に破壊されたり、不完全にしか形成されていないと、この部分は陽極面となって条件によって孔食へ進展する。すなわち、孔食の底部まで酸素の拡散が十分おこなわれないようなときには、安定な不溶性の塩基性銅塩を生じ難くなるために孔食が進行するとされている。

Pourbaix<sup>17)</sup>らは銅の孔食内部に塩化第一銅と酸化第一銅が共存することを認めており、孔食内部に酸素が存在しないと塩化第一銅は加水分解して塩酸と酸化第一銅を生じ、これらの反応は平衡に達するまで続くとしている。

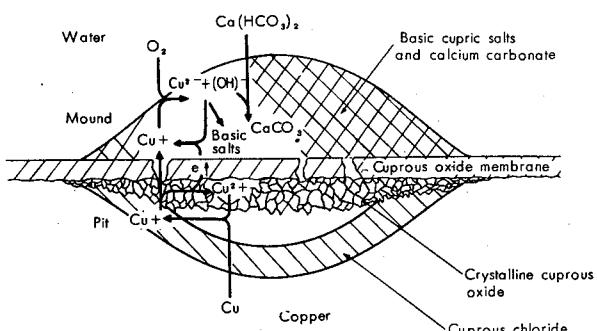


Fig. 12 銅の孔食部における腐食反応図<sup>18)</sup>

また、Lucey<sup>18)</sup>は孔食の発生についてFig. 12に示す機構を提示しており、陽極としての孔食内部および孔食の上層に存在する腐食生成物の影響下において腐食反応は促進することを述べている。

銅管の孔食発生に関するこのような種々の見解の中で、FranquéによるものならびにMattsson, Fredrikssonによるものが最も重要な事実を指摘している可能性が強い。それは少数ながら筆者らが経験した孔食例と塩基性硫酸銅の形成がみられた点において一致するばかりでなく、両論文がいづれも豊富な銅管の孔食の事例について水質上の特徴を追求し、互いに一致した結論に到達しているからである。

すなわち、Franqué<sup>2)</sup>はドイツKabel und Metallwerke社において集められた92の孔食発生例について種々の角度

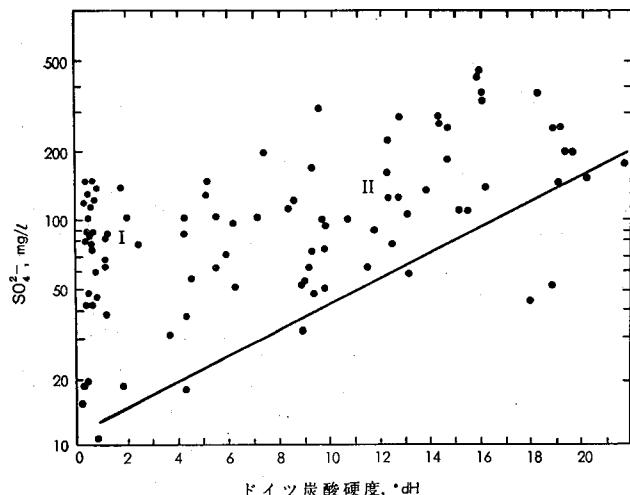
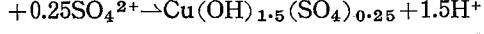
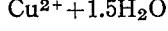


Fig. 13 銅管に孔食を生じた92の例における水の炭酸硬度と $\text{SO}_4^{2-}$ の関係 (Franqué)<sup>2)</sup> (1 ドイツ硬度は  $1\text{mgCaO}/100\text{ml}$  に相当)

から検討し、水質上の特徴として Fig. 13 に示すように、炭酸硬度に対する硫酸イオンの比が一定値以上のときに孔食が生じていることを示した。

Mattsson<sup>3)</sup> らはスウェーデンの Svenska Metallwerken 社において集められた30件にのぼる銅管の腐食事例について検討し、15件が孔食によるものであり、10件が潰食に、そして6件が腐食疲労によるものであることを明らかにした(一件は重複)。ついで孔食の事例につき水質上の特徴として、イ) pH が低いこと(7以下)、ロ)  $\text{HCO}_3^-$  含有量が  $\leq 100\text{mg/l}$  であり多くは  $<50\text{mg/l}$  であること、ハ) 負の Langelier Index を有すること、ニ)  $\text{SO}_4^{2-}$  が  $20\sim70\text{mg/l}$  であることなどを認めた。

さらに、Mattsson らは上記の条件下における孔食の発生機構について研究し、つぎのような結論を得た。すなわち、イ)  $\text{SO}_4^{2-}$  の添加は、 $\text{Cl}^-$  の添加に比して著しく孔食電流を増加させる (Fig. 14)<sup>3)</sup>。この理由として、 $\text{SO}_4^{2-}$  の存在は  $\text{HCO}_3^-$  の輸率を減少させ、孔食部(陽極部)の  $\text{SO}_4^{2-}$  の濃度を増大させる。その結果として、孔食部の  $\text{HCO}_3^-$  濃度は著しく減少する。ロ) 孔食部において塩基性銅塩を生ずることにより pH が低下する。たとえば



ハ) 孔食部において  $\text{HCO}_3^-$  が減少して  $\text{SO}_4^{2-}$  が増加することは、 $\text{Cu}^{2+}$  の溶解度を大幅に増すこととなる。以上のような現象により、 $\text{SO}_4^{2-}$  の存在 ( $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}] \leq 1$ ) が孔食と塩基性硫酸銅からなる腐食生成物の発生に寄与するものであると結論されている。

つまり、孔食部において塩基性炭酸銅が沈殿できなくなり、 $\text{Cu}^{2+}$  の溶解度の大きい塩基性硫酸銅が沈殿することが孔食の原因であるとしているわけである。このことは、実例をよく説明しているが、より安定な塩基性炭酸銅が沈殿しなくなることについて定量的な検討が必要であり、こ

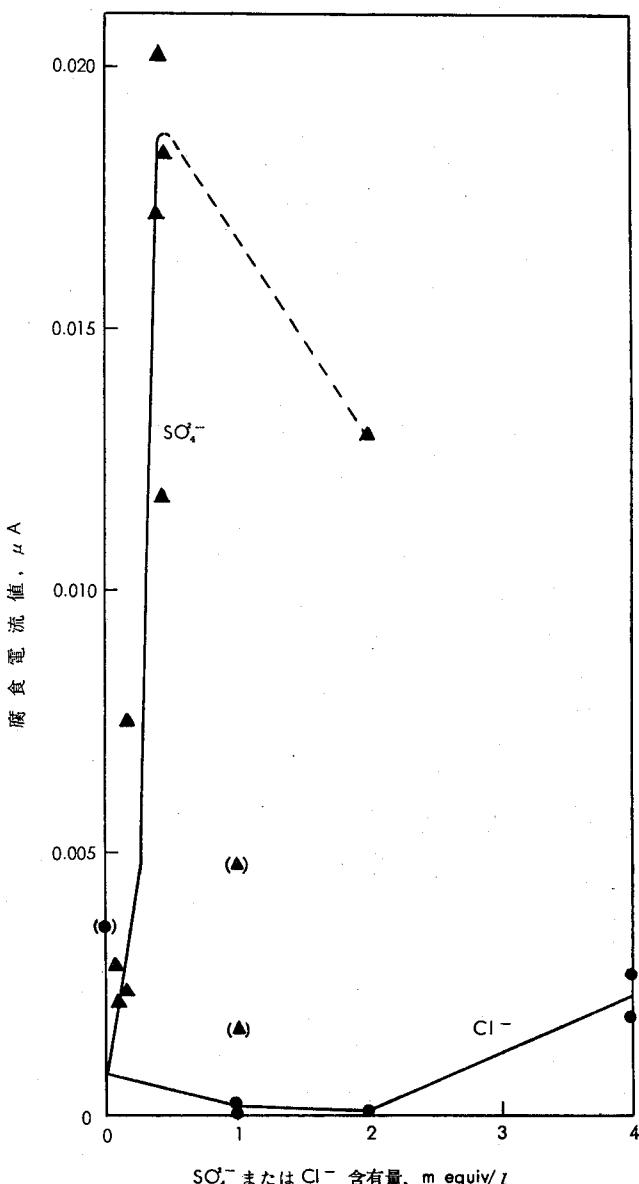
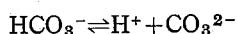
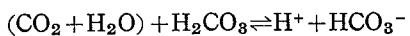


Fig. 14 腐食電流値にわよばず  $\text{SO}_4^{2-}$  と  $\text{Cl}^-$  の影響、(Mattsson, Fredriksson) pH: 7, ドイツ硬度:  $3^\circ\text{dH}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ :  $1\text{m equiv}^3)$

の点については Mattsson らの説明はじゅうぶんではない。この点について、補足説明をおこなえればつきのようである。

ある与えられた水において全炭酸物質  $T\text{CO}_2$  が一定濃度だけ含まれていれば、 $[\text{CO}_3^{2-}]$  は pH 値の変動により移行する。



$$[\text{H}^+] [\text{HCO}_3^-] / [\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3] = K_1$$

$$K_1 = 4.45 \times 10^{-7}$$

$$[\text{H}^+] [\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-] = K_2$$

$$K_2 = 4.69 \times 10^{-11}$$

$$[\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] = [T\text{CO}_2]$$

$$\therefore [\text{CO}_3^{2-}] = [T\text{CO}_2] / \{ [\text{H}^+]^2 / K_1 K_2 + [\text{H}^+] / K_2 + 1 \}$$

$T_{CO_2}$  が 1 m equiv 含有されているとき、pH 値の変動に伴なう  $CO_3^{2-}$  の濃度の変化を上式より計算し、この値を用いて Table 2 に記載の溶解度積値、すなわち、

$L_{[Cu^{2+}][OH^-][CO_3^{2-}]^{0.5}} = 10^{-10.0}$  により、 $[Cu^{2+}]$  を求めてみた。さらに Table 2 記載の他の塩基性銅塩について、それぞれ陰イオンの活量を 1 m equiv と仮定したときの  $[Cu^{2+}]$  を各 pH 値について求め、それぞれ Fig. 15 に一括して図示した。この結果によれば、塩基性炭酸銅は pH 5 以上において安定であるが、pH 5 以下では塩基性硫酸銅の方が安定であることとなる。すなわち、銅管の孔食発生例において、孔食発生部の近傍に塩基性硫酸銅が形成されていたことは孔食部の pH が著しく低下し、従ってその部分において銅イオンの溶解度が増し、孔食の進行を可能にし、さらにこの銅イオンが輸率にもとづいて孔食近傍に濃縮した硫酸イオンと反応して塩基性硫酸銅を形成したことを見ているものと考えられる。

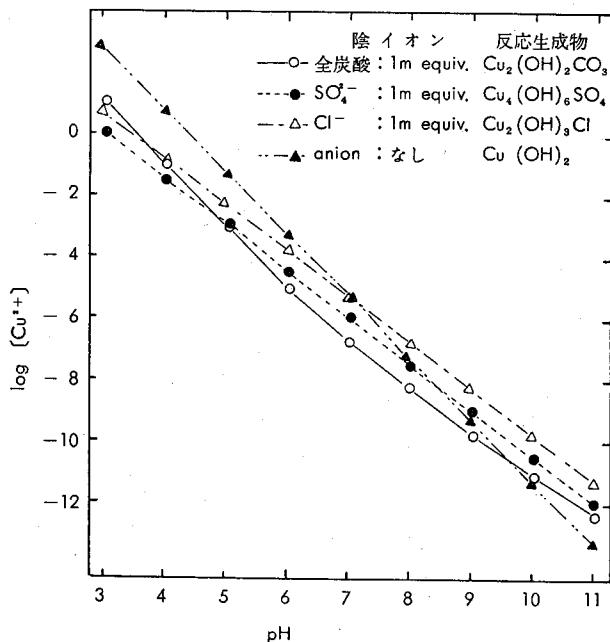


Fig. 15 全炭酸、 $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$  のいずれかを 1 m equiv 含む水における  $Cu^{2+}$  の溶解度（計算値）

### (3) 応力腐食割れ

銅管は応力腐食割れに対する感受性がきわめて小さいので、給水給湯用配管に使用されても、本原因によって破断するようなことはほとんどない。しかし、配管材として用いられた銅管においても特殊な環境では応力腐食割れを生ずることがある<sup>19), 20)</sup>。

給水給湯用配管において今までに経験されている銅管の応力腐食割れに起因する破損は、少数ではあるが厨房の床面下に埋設されたものに限って生じている。本原因によって破損をきたした銅管の外観状況および断面状況の一例を Photo. 3 に示す。割れは管軸方向に生じていて、結晶粒界に沿って外面から内面に向って進行する形態をなすも

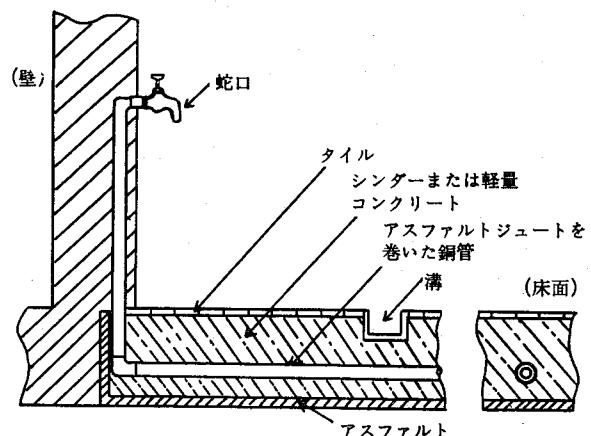


Fig. 16 廚房の床面下における銅配管の埋設状況例

のである。

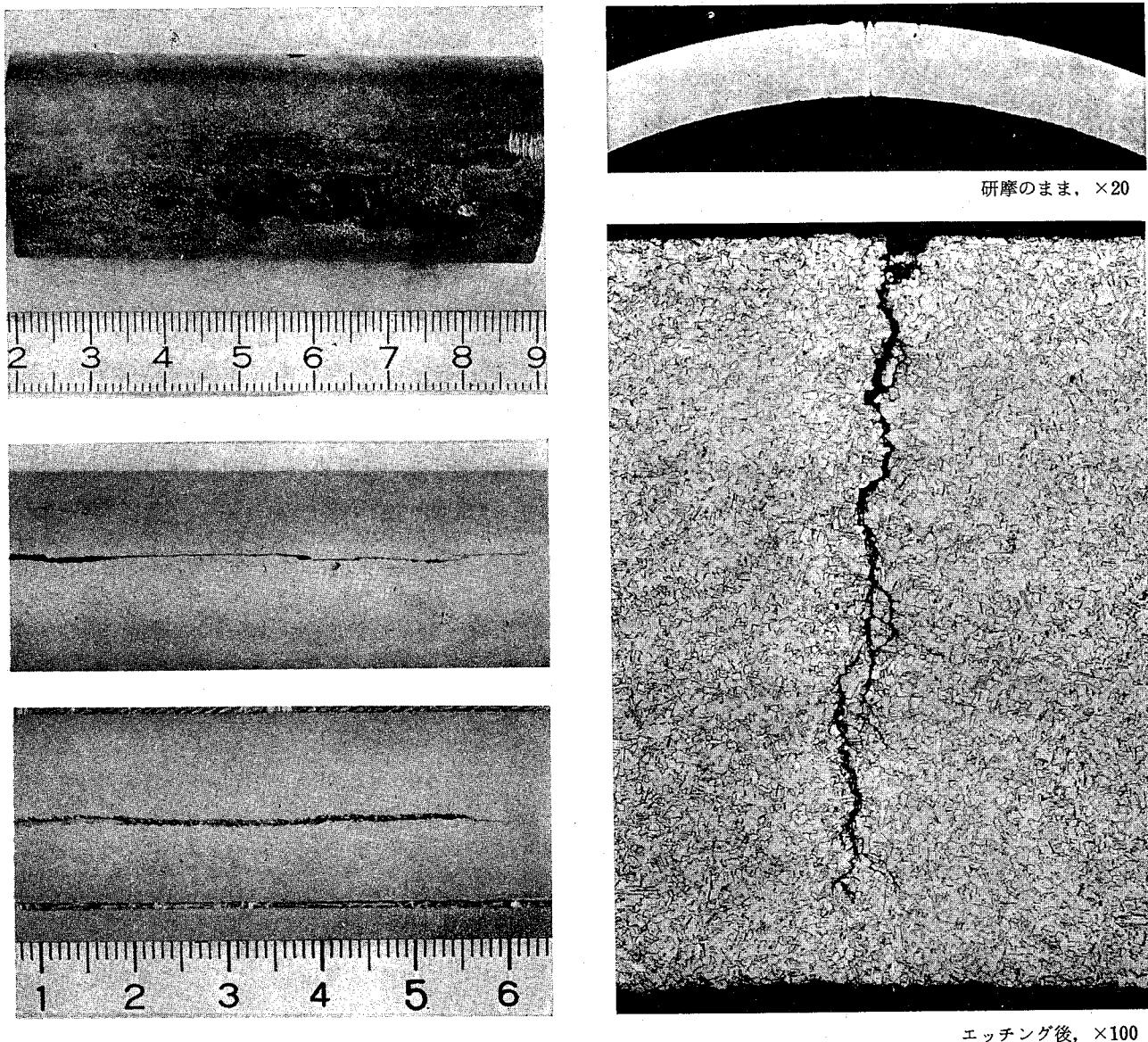
厨房の床面に埋設された銅管に応力腐食割れを生ずることの理由についてはつぎのように考えられる。本個所における銅管の埋設は Fig. 16 のごとき構造によることが多い。

すなわち、銅管の外面にはアスファルトジュートを巻付けてあって、その周囲をシンダー（自然火山灰）や軽量セメント（発泡コンクリート）などで固められており、その上面（床面）にはタイルが張られていて、下面や側面にはアスファルトによる防水処理が施されている。厨房においては作業上や衛生的な管理などのために床面に水を流すことがしばしばあるはずであり、このために床面から水が浸透して銅管の周囲環境を湿潤な状態にすることが多々あるものとみなされる。シンダーやジュートに塗布されているアスファルトには硫黄分、軽量セメントにはアンモニア分を含んでいることがあるため、水が浸透して銅管の周囲を湿潤な状態にすることによって、硫黄分やアンモニアが腐食媒として銅管に作用することが考えられる。本用途に用いられる銅管は主として冷間加工仕上げされた半硬質または硬質であるため、銅管にはある大きさの応力が残存しているはずであり、本内応力を応力源として硫黄分やアンモニアの腐食作用によって応力腐食割れを生ずるに至ったものとみられる。

なお、厨房床面下に埋設された銅管のうち、本現象によって破損をきたしたものはごく少数にすぎないことから、これらについてはとくに腐食作用が厳しく影響した異常事態のようにも考えられる。しかし、本用途に同じ工法で埋設配管されている銅管については本現象を生ずる懸念が多少なりとも考えられるため、今後における本現象による破損事故の発生状況によっては配管施工法について検討することが必要になるかも知れない。

### (4) 腐食疲労

給水給湯用銅管において腐食疲労割れに起因する損傷事例はほとんど経験されてない。このことは、銅管内をほぼ一定温度の水や温水が常時流れている場合が多いため、温度の変化にもとづく熱応力の繰返し作用が少ないと想定される。



**Photo. 3** 廚房床下に埋設され、応力腐食ワレを生じた給湯用銅管の内外面および断面状況。  
(銅管内面側におけるワレ部には漏洩水の影響により漬食を生じている。)

大きな熱応力を生じ易い温水配管については、配管過程に膨脹継手などを取付けて熱応力を吸収する策などが講ぜられていることによるものと考えられる。

なお、銅管に振動などによる繰返えし応力が作用するような状態にある時には、本現象による破損を生ずる可能性が十分考えられるので、この場合にはこの種の応力が作用しないように構造的に検討される必要がある。

##### (5) 接触腐食

銅管と鋼管あるいは亜鉛メッキ鋼管とを直接ロウ接などによって接合することは、よく見掛けることであるが、銅管と鋼管との間において接触腐食を生じたという事態は今のところ経験されていない。本接触腐食については本章の2.4項に述べたごとく、本用途において実用上ほとんど問題にならないものと考えられるが、確実なことは今後の実績によって判断したい。

(以下次号)

##### References

- 1) L. Tronstad and R. Veimo : J. Inst. Metals, 66 (1940), 17
- 2) O. Franqué : Werkstoffe Korrosion, 19 (1968), 377
- 3) E. Mattsson and A. M. Fredriksson : Brit. Corrosion J., 3 (1968), 246
- 4) 相沢金吾：銅の衛生学的研究、日本銅センター、(1970), 149
- 5) 田中礼次：本誌, 3 (1962), 73
- 6) L. W. Haase : Metall, 24 (1970), 113 (日本銅センター訳  
:銅と技術, 6 (1970), 70)
- 7) 水谷正美：冷凍と空調, No. 124 (1970), 38
- 8) S. T. Powell, H. W. Bacon and S. R. Lill : Indust. and Eng. Chem., 40 (1948), 435
- 9) Deutsches Kupfer Institut : *Kupferrohre im Wasserfach*, (1967), (日本銅センター訳:銅と技術, 5 (1969), 7)

- 10) 田部善一：未発表
- 11) J. B. Cotton and W. R. Jacob : Brit. Corrosion J., 6 (1971), 42
- 12) M. F. Obrecht : Corrosion, 18 (1962), 189t
- 13) H. S. Campbell : J. Inst. Metals, 77 (1950), 345
- 14) H. S. Campbell : The British Non Ferrous Research Association, *Recent Investigation of Pitting Corrosion of Copper*, T. E. S. 66/489, September (1967)
- 15) H. S. Campbell : J. Appl. Chem., 4 (1954), 633
- 16) R. May : J. Inst. Metals, 82 (1953-54), 65
- 17) M. Pourbaix : Corrosion, 25 (1969), 267
- 18) V. F. Lucey : Brit. Corrosion J., 2 (1967), 175
- 19) C. Breckon and P. T. Gilbert : Metal Ind., 93 (1958), 89
- 20) H. L. Logan and G. M. Ugiansky : Mat. Protection, 4 (1965), May 79

# 建築および建築設備銅管の最近の問題点

## その2 空調および衛生用銅管とその配管施工について

佐藤 史郎\* 勾坂喜代治\*\*

### Recent Topics of Copper Tubes for Modern Buildings and Its Accessories

#### Part 2 Copper Pipes and Tubes for Air Conditioning and Drainage

by Shiro Sato and Kiyoji Sagisaka

##### 3. 冷凍冷房用銅管

冷凍および冷房用機器において銅管が多く用いられる部分は、(1)冷媒の凝縮器ならびに(2)蒸発器である。凝縮器に使用される銅管は、冷却水の影響により腐食などに起因する損傷を生ずることがあるが、蒸発器については腐食などの問題を生ずることがほとんどない。このため、本章においては凝縮器用銅管における腐食をはじめとする主なる問

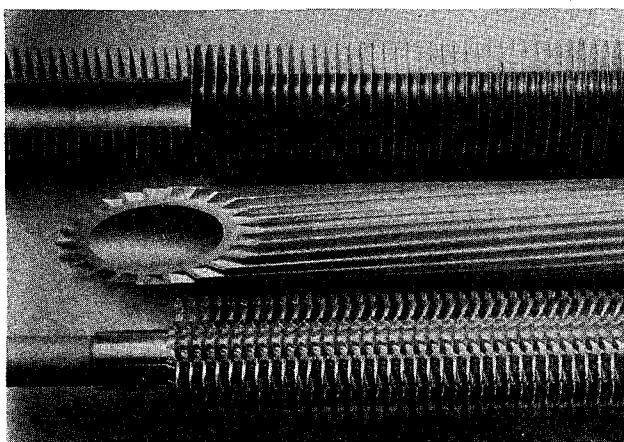
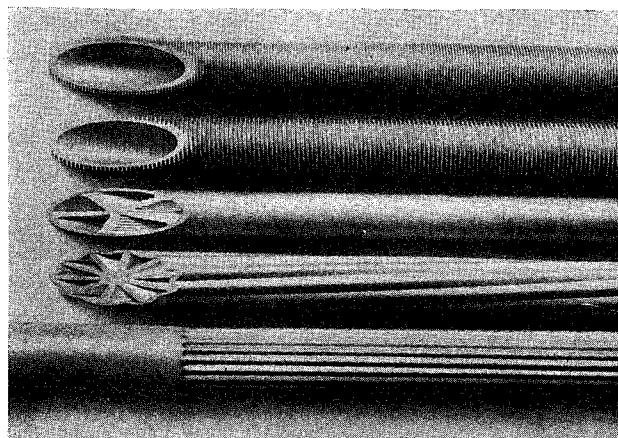


Photo. 4 各種のフィン付き銅管

題点について述べる。

なお、凝縮器や蒸発器に用いられる銅管としては、冷媒側の伝熱性能を向上させるために、各種のフィン付き銅管が使用される。たとえば、外表面を大きくするために外表面にフィンを巻き付けたエローフィンチューブ、フィンを転造加工したローフィンやハイフィンチューブ、あるいはフィンを銅管内に挿入して内面積を大きくしたスターインサートチューブなどがある。これらのフィン付き銅管の例を Photo. 4 に示す。

##### 3・1 大気汚染による腐食問題

ビルなどにおいては空調用冷却水を循環して用いる方式、いわゆるクーリングタワー式が多く採用されている。クーリングタワー式においては、大気汚染のために大気中の亜硫酸ガスなどの汚染成分を吸収して冷却水は酸性化し、このことが原因して銅管を腐食せしめ、漏水問題を生ずることがある。

亜硫酸ガス公害によって酸性化したクーリングタワー水の硫酸濃度と、pH および冷媒凝縮器銅管の破損事故との関係を Fig. 17<sup>21)</sup> に示す。また、冷媒凝縮器銅管の腐食損

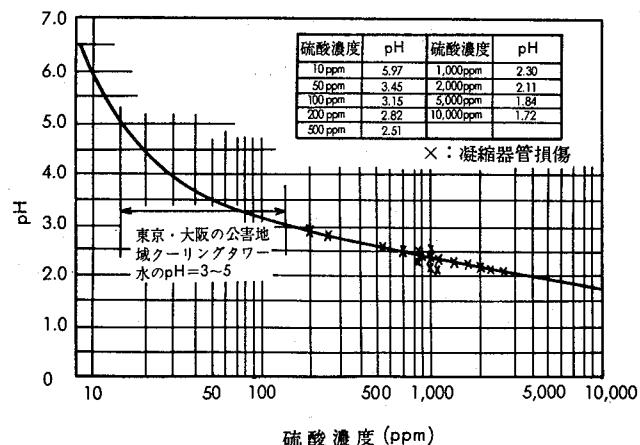


Fig. 17 冷媒凝縮器銅管の損傷におよぼす硫酸濃度と pH の影響<sup>21)</sup>

\* 研究部 工学博士

\*\* 研究部

**Table 6** 空調機器における冷媒凝縮器銅管の腐食漏洩事故と冷却水水質<sup>22)</sup>

地区	pH	全硬度 CaCO <sub>3</sub> (ppm)	全酸度 CaCO <sub>3</sub> (ppm)	硫酸イオン (ppm)	塩素イオン (ppm)
東京	4.3	—	610	380	78
大阪	3.2	—	472	1,400	<10
大阪	5.7	85	28	450	<10
大阪	5.5	172	698	875	<20
東京	5.2	<10	531	121	<20
大阪	4.6	252	100	200	71
東京	4.6	276	140	250	91
東京	3.9	514	250	610	162
広島	7.7	794	106	85	2,089
大阪	7.4	265	46	55	536
大阪	5.2	1,942	1,316	3,400	1,148
大阪	5.2	1,066	404	1,420	525
大阪	7.8	142	76	1,800	231
大阪	5.2	2,300	688	940	578
大阪	5.0	464	260	300	251

傷事例と、使用されたクーリングタワー水の水質分析値例を Table 6<sup>22)</sup> に示す。損傷事故15例のうち2例を除いて、いずれも冷却水中に多量の硫酸イオンを含み、pHはかなり低い。これらの事態は大気汚染成分である亜硫酸ガスをクーリングタワーにおいて吸収し、それが酸化して硫酸に

**Table 7** 冷却水の水質基準値案（社団法人日本空調工業会）<sup>23)</sup>

項目	基準値	傾向*	
		腐食	スケール生成
pH (25°C)	6.0~8.0	○	○
導電率 (25°C) (μΩ/cm)	500以下	○	
塩素イオン (ppm)	200以下	○	
硫酸イオン (ppm)	200以下	○	
全鉄 (ppm)	1.0(0.5)**以下	○	○
Mアルカリ度 (ppm)	100以下		○
全硬度 (ppm)	200以下		○
硫酸イオン (ppm)	検出しないこと	○	
アンモニウムイオン (ppm)	検出しないこと	○	
硅酸 (ppm)	50以下		○

冷却水とは冷媒凝縮器を通過する水をいう。

\* : 案内の○印は腐食またはスケール生成傾向の何れか関係する因子を示す。  
\*\* : 合成樹脂配管の場合の基準値。

**Table 8** 補給水の水質基準値案（社団法人日本空調工業会）<sup>23)</sup>

項目	基準値
pH (25°C)	6.0~8.0
導電率 (25°C) (μΩ/cm)	200以下
塩素イオン (ppm)	50以下
硫酸イオン (ppm)	50以下
全鉄 (ppm)	0.3以下
Mアルカリ度 (ppm)	50以下
全硬度 (ppm)	50以下
硫酸イオン (ppm)	検出しないこと
アンモニウムイオン (ppm)	検出しないこと
硅酸 (ppm)	30以下

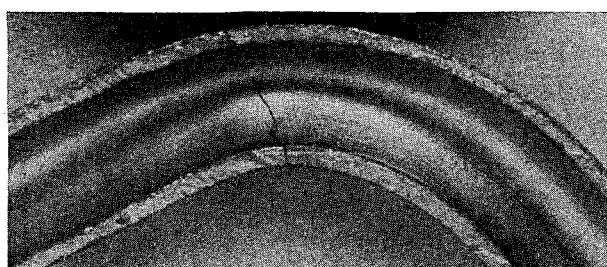
なったためのものであることは明白である。個々の例について検討してみると、単なる大気汚染の影響によるもの以外に、クーリングタワーが煙突の近くにあって、そのため異常に濃度の高い亜硫酸ガスを吸収して問題化することも経験されている。

これらの対策としては、(1)循環水への補給水を増すことによって濃縮を避けること、(2)生石灰 (CaO) や苛性ソーダ (NaOH)などを添加して pH の低下を避けること、および(3)煙突の近くを避けるとともに風向きなどにも留意し、亜硫酸ガス濃度が大である所から遠ざけることなどが挙げられる。水質との関係に着目すれば、補給水の全硬度やMアルカリ度が高い場合には、亜硫酸ガスを吸収しても中和作用によって pH の低下を抑制し、しかもカルシウム分が硫酸イオンと反応して硫酸カルシウム (CaSO<sub>4</sub>) を生成し、銅管壁に付着して腐食に対する保護作用をなすこともある。

なお、最近社団法人日本空調工業会では冷凍空調機器用の冷却水水質基準を作成しつつあり、Table 7<sup>23)</sup> および Table 8<sup>23)</sup> に示すような冷却水および補給水の水質基準値案を提示している。

### 3・2 硬度成分の析出による影響

クーリングタワー式の冷却水においては、冷却水の濃縮により硬度成分や硅酸などが異常に多く含まれるようになることがある。このような場合には、水質状態によって冷媒の凝縮器用銅管に非溶解性の硬い析出物（多くの場合カルシウム塩）が付着して、そのために凝縮器の冷却能力を低下させ、使用できなくなることがある。これらの析出物の生成はカルシウム塩の水に対する溶解度によって支配されるわけであるが、とくに硅酸カルシウム (CaSiO<sub>3</sub>)



エッティング後、 $\times 100$

**Photo. 5** クーラーにおける冷媒配管用銅管の曲り部に生じた疲労破壊の外観と断面状況

は溶解度が小さく、しかも硬いため凝縮器の冷却性能の低下や閉塞などの支障をきたし易い。また、硫酸カルシウム( $\text{CaSO}_4$ )も硬く不溶性のため、いったん析出したものを除去することは容易でない。

したがって、この種の析出物を生じせしめないために、冷却水の水質管理を十分おこなって、冷却水が異常に濃縮することを避けるようにしなければならない。

### 3・3 塩分濃度の影響

河海水や海岸近くの地下水、あるいは臨海地におけるクーリングタワーの冷却水などにおいて、可溶性塩分濃度が著しく高いことがあり、この場合には銅管に漬食を生ずることがある。このような水に対しては、銅管にかわって海水用耐食材料を用いる必要がある。なお、銅の耐食性におよぼす塩分濃度の影響については2章の2・1項(5)において述べているので、本章ではこれ以上詳しく述べない。

### 3・4 振動による問題

冷凍冷房機器においては圧縮器やファンによる振動のために、機器内の冷媒配管用銅管や、凝縮器用銅管などに疲労破壊を生じて問題になることがある。冷媒配管用銅管においては応力集中が生じ易いとみられる曲り部、または螺旋状などに巻かれた凝縮器用銅管のろう接部などに疲労破壊をきたすことが経験されている。このため、これらに対し振動による影響が作用しないように、構造的に策を講ずる必要がある。

冷房機器における冷媒配管用銅管の曲り部において、疲労破壊をきたした損傷事例を Photo. 5 に示す。また、銅管の疲労特性を Fig. 18<sup>24)</sup> に示す。割れは粒内および粒界を通るものであり、明瞭な変形帯を伴っている。

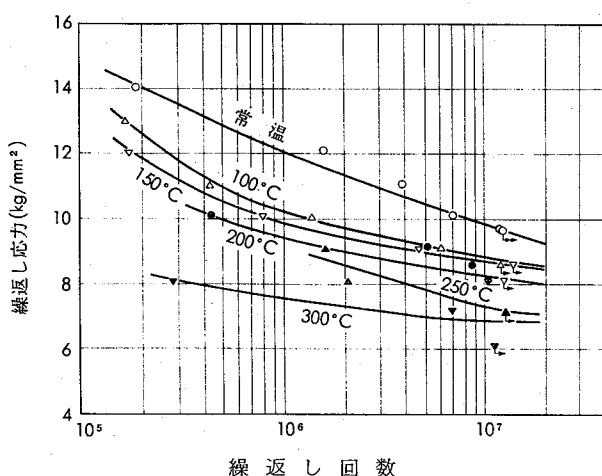


Fig. 18 りん脱酸銅の S-N 曲線<sup>24)</sup>

## 4. 給湯暖房用銅管

建築物における給湯暖房用には銅管が多く使用されているので、これらの銅管の問題点について述べる。

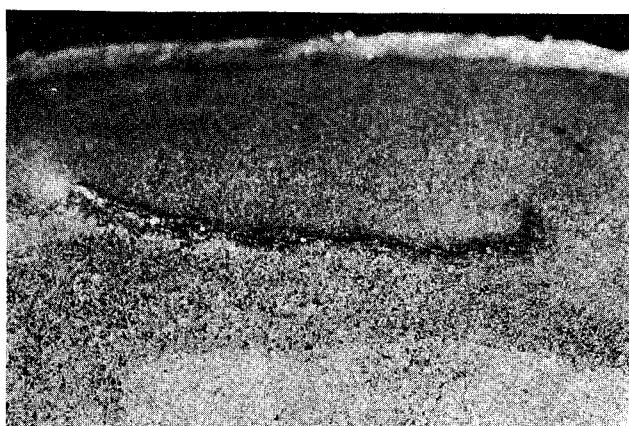
### 4・1 ガス瞬間湯沸器

個別式給湯法のガス瞬間湯沸器に用いられる銅管において、今までに経験されている主な問題としてはつぎのよ

うなことがある。

缶胴と銅管とのろう接部や、その後のはんだどぶ付けめつき時において、それらの熱影響のために給水給湯用銅管内面にはく離性の薄い皮膜を生ずることがある。本皮膜の生成原因について調査した結果、本皮膜は銅管内面がわずかに酸化することに起因していることがわかった。このため、ろう付けやはんだめつきをおこなう場合には、銅管内に窒素ガスあるいは炭酸ガスなどの不活性ガスを封入するか、あるいは水蒸気などを通じて、銅管内面を酸化せしめないようにすることが必要である。

また、缶胴と銅管との点付けろう接部においては、熱応力の繰返し作用のために、銅管に Photo. 6 のごとき疲労破壊をきたすことがある。本疲労破壊が生ずることを防ぐ



(内面)

$\times 6 \times 8/7$



(横断面) エッチング後,  $\times 6 \times 8/7$

Photo. 6 ガス瞬間湯沸器において、缶胴へ点付けろう接された銅管に熱応力が繰返し作用したために、疲労破壊をきたした銅管の内面および断面状況

ためには、ろう接個所をより多くして熱応力を分散せしめ、しかもろう材がノッチ効果をもたらさないような溶着形状にすることが肝要である。とくに、ガス瞬間湯沸器においては熱応力の繰返し頻度が多いため、熱応力に対する十分な配慮が望まれる。

#### 4・2 温水加熱コイル

間接加熱式中央給湯法のストレージタンクにおける加熱コイルとして用いられる銅管には、耐食上の難点からすくめつき銅管が使用されることもある。しかし、銅管は一般に上水に対して十分耐食性を有しているので、表面処理をとくに施さなくても使用に十分耐えることができる。本加熱コイルとしての銅管は損傷事故をほとんど生ずることがないが、数少ない損傷事例として、冷水の入口部に近い銅管の外面に Photo. 7 のごとき潰食形態の腐食痕を生ずることがある。このことは、主として冷水入口部の構造が適切でないために、冷水の衝撃や乱流作用によって銅管外面の保護皮膜が除去され、潰食を生じたものと考えられる。

この対策として、銅管への冷水の衝撃や乱流作用などを緩和する構造に冷水入口部を改造し、場合によってはマグネシウム陽極板を取付けるなどの策を講ずることで、本腐食問題は解決されているようである。

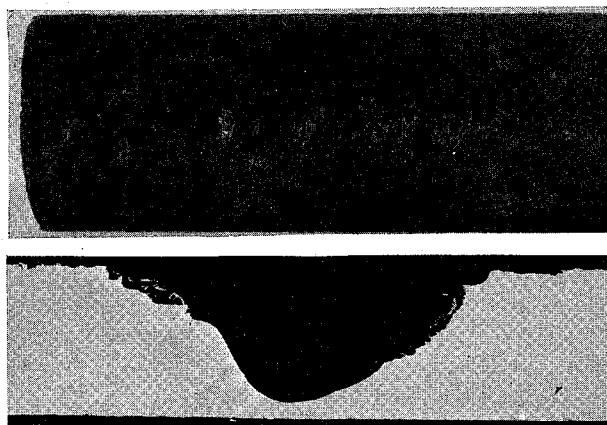


Photo. 7 ストレージタンクの銅管製加熱コイルの外面に生じた潰食状況

#### 4・3 暖房用銅管

温水ならびに蒸気による暖房用として銅管が多く使用されるものに、ファンコイルのごとき放熱器や、Photo. 8 のような床暖房（輻射暖房またはパネルヒーティング）の放熱管ならびにそれらの配管などがある。

温水による暖房の場合、これらの暖房用銅管の腐食問題などについては、2章で述べたことと同じであるので、本章では省略する。

蒸気による場合には、ドレンの影響によって銅管を腐食することもある。このことは、ボイラ水の水質処理剤として添加されるアンモニアやヒトラジンが分解蒸発してドレン中に吸収されるために、アンモニア濃度が著しく高いドレンになることに主として起因するようである。

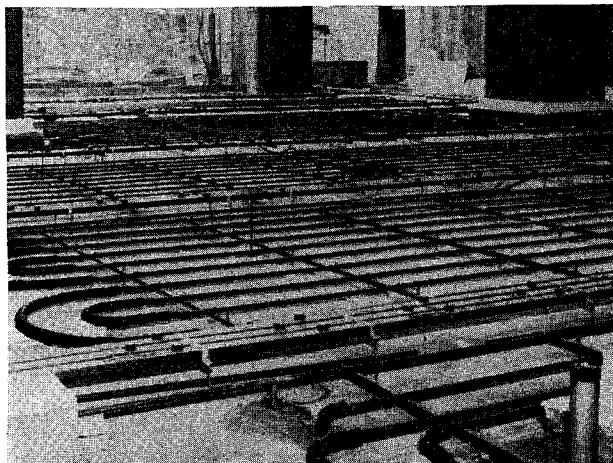


Photo. 8 床暖房における銅配管状況

したがって、ボイラ水の水質処理のためにアンモニアやヒトラジンを無闇に多く添加して、pHを著しく高くすることは好ましくないので注意を要する。

床暖房において銅管をコンクリート中に埋め込む施工の場合には、銅管の熱膨脹を逃がすために、曲り部に少し隙間を設けることが必要である。

#### 5. 排水および通気配管用銅管

建築物屋内における排水管は、建物内に設置された洗面所、台所、浴室、便所などから流される雑排水、汚水ならびに床排水や雨水などを排水することを目的とする。排水管には各階における各器具のトラップに接続される器具排水管と、各器具排水管から放出される排水を床面に沿って流す横走管（排水横枝管）、および各階の排水横枝管を集合して流下する立管（排水立管）とがある。これらの排水管は重力の作用による自然流下で排水することを通常とするので、排水管における排水の流下やトラップの封水機能を完全に果すために、排水管と平行して通気横枝管ならびに通気立管を設けている。ただし、2階建程度の比較的低い建家においては排水立管を屋上まで延長し、頂部を開口して通気管を兼ねることが多い。また、中高層ビルにおいてもソベント排水立管方式を採用する場合には、当然のことながら通気管を必要としない。

これらの排水管に要求されることは、(1)耐食性がすぐれていて、耐久性があること、(2)管内部が滑めらかで流れに対する抵抗が少なく、管がつまらないこと、および(3)配管施工が容易であることなどであり、通気管についてもほぼ同様なことが要求される。

銅管は亜鉛引き鋼管や鋳鉄管ならびにプラスチック管などに比して、これらの要求される事項に対してよりすぐれた性能を有している。とくに、銅管は耐食性がすぐれているために肉厚の薄いものを使用することができ、また銅管内壁が滑めらかであることから排水や通気に対する抵抗が小さいので、他の材料よりも管径の細い管を用いることが可能である。さらに、銅管は配管施工において毛細管作用

を利用したろう接工法によって容易に接続することができ、曲げや拡管も簡単であって、しかも近年開発されたプレハブ工法でもって配管施工することにより、工期を大幅に短縮できるなど多くの利点を有している。

以下においては排水用としての銅管の使用実績、腐食問題ならびに最近脚光を浴びているソベント排水立管方式などについて述べる。

### 5・1 使用実績

わが国においては、従来排水管ならびに通気管に銅管を用いることはほとんどなかったが、最近になって銅管の利点が認識されるようになり、本用途にも銅管が使用されるようになってきた。その例として、最近東京都新宿区に建設された超高層ビルの京王プラザホテルには給水給湯用配管、空調用配管のみならず排水用配管にも銅管がプレハブ工法によって多く採用された。Photo. 9 にその例を示す。

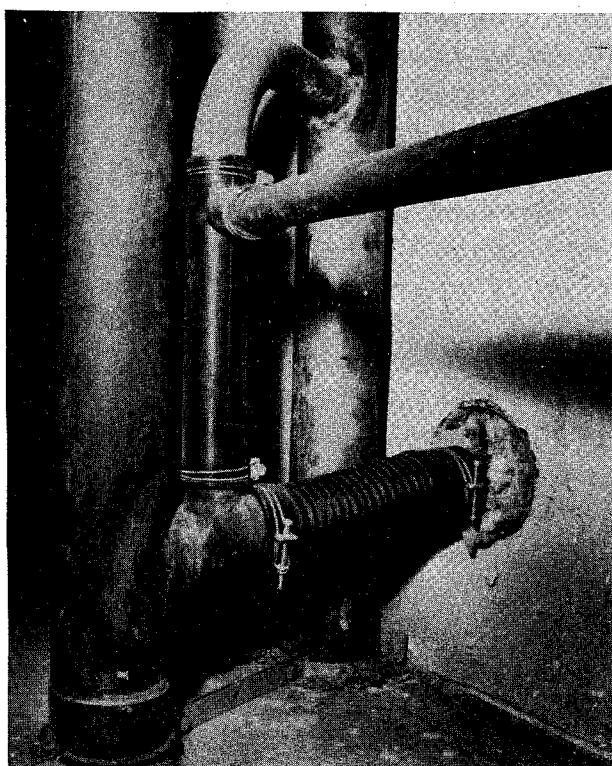


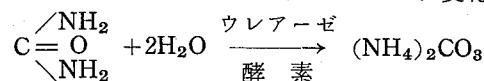
Photo. 9 排水管用銅配管

米国およびカナダにおける排水管ならびに通気管への銅管の使用実績は多くあり、本用途の銅管は他の競合材料よりも耐食性をはじめとする多くの面で大幅にすぐれた結果を示している<sup>25,26)</sup>。カナダにおいては1935年に排水管として銅管がろう接工法によって使用されており、現在までに住宅、学校、病院あるいはビルなどの排水および通気管として数10万個所の配管に銅管が使用されている<sup>25)</sup>。また、米国の大部においては排水管や通気管に銅管が用いられてきており、ほとんどの場合は適当な材料であるとされている。しかし、失敗した事例は皆無でないが、その数は鋼管や鉄管ならびに鉛管などの失敗例に比すれば至って少なく、Houstonにおいては汚水による腐食問題に対処する

ために、銅管にかわって銅管が使用される傾向にある<sup>26)</sup>。

### 5・2 腐食問題

排水用銅管において問題化する腐食現象は、排水中に含まれるアンモニアと硫化水素および硫化水素が酸化して生ずる硫酸に起因するとみられる。排水される汚水の一つである小便のアンモニア濃度は0.04~0.08%であり、尿素は酵素の作用により、次式のごとくアンモニアに変化する。



また、排水中のたんぱく質もバクテリアの作用により、アンモニアを生ずる。

アンモニアが濃縮され易い排水管として、小便器の排水管をあげることができるが、本個所においては一定の時間間隔もしくは使用時に水を流して洗浄するのが普通であるから、アンモニアの濃縮はほとんど考えられず、本用途の排水管として銅管を用いてもアンモニアによる腐食問題の心配はいらないものとみられる。米国のある学校の小便器に連結している排水用銅配管において、水による洗浄を3ないし4時間ごとにしか実施しなかったために、濃縮した小便が排水立管に付着し、このために銅配管は腐食をきたしたので取替えたことが報告されている<sup>26)</sup>。このことは濃縮した小便が腐敗して、アンモニアを形成したことによるものと考えられている。したがって、この種の排水用銅配管においては水による洗浄を十分おこなって、アンモニアによる腐食を防ぐことが必要である。

排水中に硫酸塩が含まれる場合、硫酸塩は排水管などにおいて還元性雰囲気が形成されると、嫌気性バクテリアの作用を受けて硫化水素を生ずる。硫化水素は銅管に対して腐食を促進させる有力な要因となり得る。

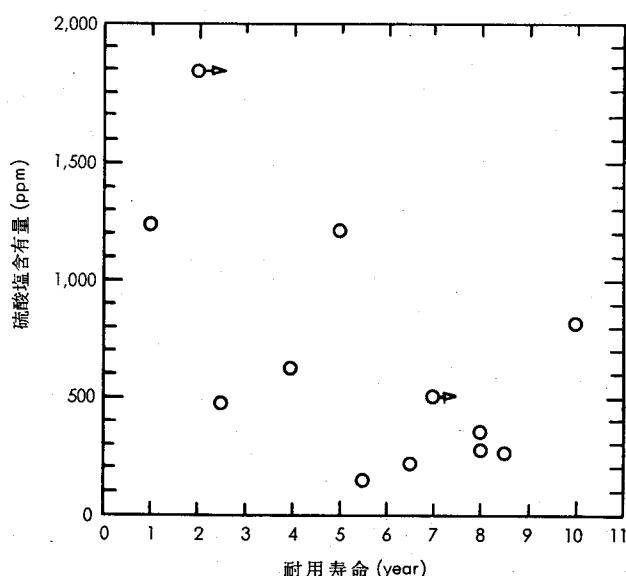
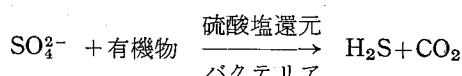


Fig. 19 排水管用銅管の耐用寿命におよぼす排水中の硫酸塩濃度の影響<sup>27)</sup>

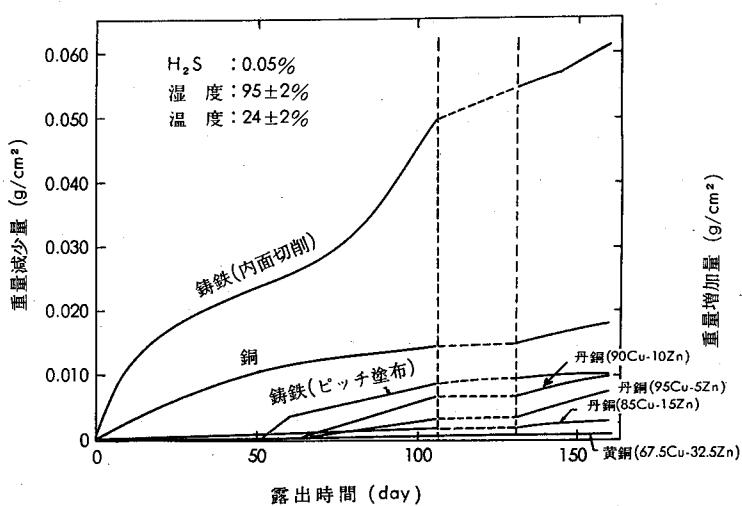


Fig. 20 硫化水素中における各種材料の腐食におよぼす露出時間の影響<sup>27)</sup>

たとえば、排水用銅配管が下水浄化槽に直結され、下水浄化槽のガスが逆流するような構造になっている場合には、いわゆる Spetic Gas によって管は腐食を受け易くなる。

ここにおいても硫酸塩の有無が有害ガス発生の要因の一つであることは間違いないが、関与する要因が少なくないこともあって、硫酸塩の含有のみから耐用寿命を定めるることは必ずしも妥当ではない。カナダのオンタリオ州の Stony Creek Areaにおいて、INCRAによって調査された排水用銅配管の耐用寿命と排水中の硫酸塩含有量の関係を Fig. 19<sup>27)</sup> に示す。一見両者間に相関関係は存在しないよううにみなされるが、これらの事故例においていずれも硫酸塩含有量がある水準以上 (100ppm 以上) であり、一概に相関関係を否定することも妥当とは考え難い。

本腐食対策としては、1) 浄化槽からの逆流を防止すること、2) 硫酸塩還元性バクテリア (Desulfovibrio) に抵抗する硫化物酸化性バクテリア (Thiobacillus thioxidans) の繁殖を促進させること、および3) 添加剤たとえば Sodium molybdate を加えることなどが考えられる。

排水用銅配管の耐食特性と他の材料とを比較検討するため、硫化水素雰囲気で実施された腐食試験結果を Fig. 20<sup>27)</sup> に示す。銅一亜鉛合金が耐食性にすぐれしており、本合金についてまとめた試験結果を Fig. 21<sup>27)</sup> に示す。丹銅よりも亜鉛含有量の多い合金の耐食性が著しく優れている。

以上のような実績や実験データから、排水用として銅管は十分に実用性のある耐久材料とみなされるが、耐食性の観点からは銅一亜鉛合金の方がよりすぐれているようである。

しかし、銅一亜鉛合金の実用性については、応力腐食割れによる障害について配慮することが必要であり、さらに検討する必要があるものと考える。

### 5・3 热応力の問題

排水管においては、冷水や温水がかなり多くの頻度で間

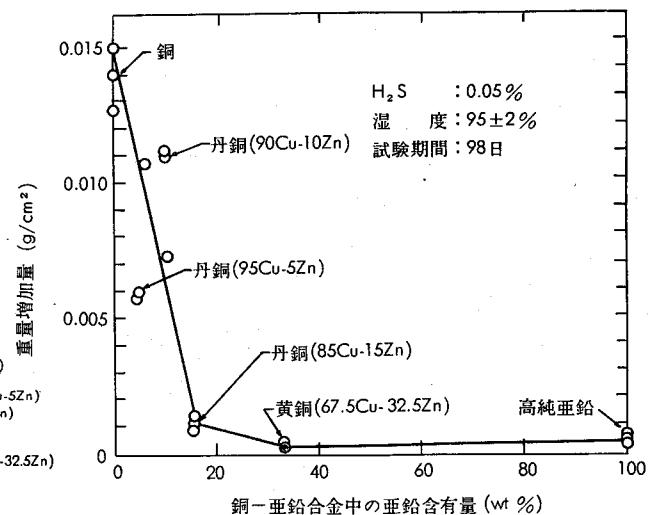


Fig. 21 硫化水素中における銅合金材料の腐食におよぼす添加亜鉛量の影響<sup>27)</sup>

欠的に管内を通過することや、気温の変化などの影響も加わって、排水用銅管に熱応力が過度に作用する場合がある。構造的に応力が集中し易い枝管継手部に座屈現象とそれにもとづく腐食疲労割れを生じた例が経験されている。

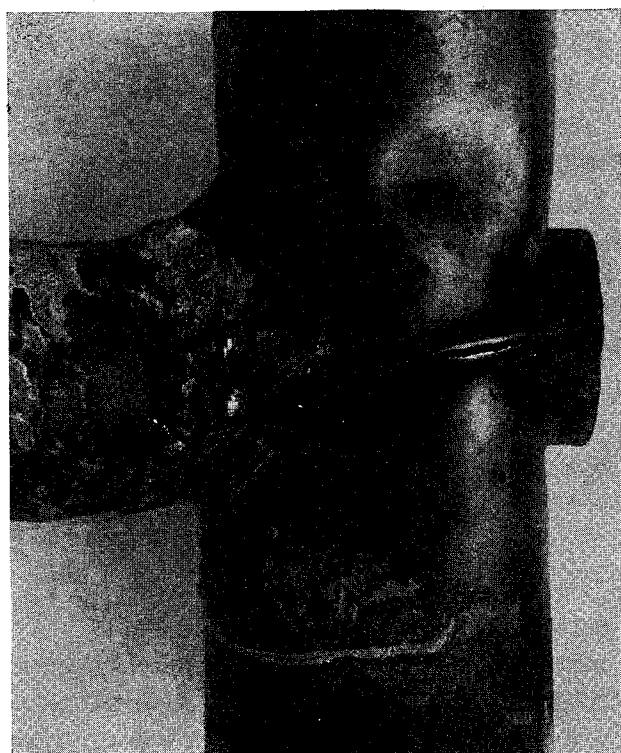
その損傷事例は、4階建アパートでの雑排水用銅管において、管軸方向に作用する熱応力に対し構造的になんらの策も講じていなかつたために、排水横枝管と排水立管との接続部、すなわち銅管製枝管継手部に Photo. 10 のごとき座屈現象をともなった腐食疲労割れを生じたものである。

排水用銅配管における排水横枝管と排水立管との接続は、通気管方式またはソベント排水立管方式のいずれにおいても、銅管製枝管継手や銅製ソベント継手を用いてろう接によっておこなわれている。このため、接続箇所の強度はろう接時の熱影響によって幾分低下をきたしているのが一般的である。とくに、その影響が硬ろう接による場合に著しいことはいうまでもない。

枝管で硬ろう接加工した銅管製の枝管継手について、主管ならびに枝管軸方向の座屈強度を求めた結果は Table 9 のごとくである。片側枝管継手における主管軸方向の座屈応力 (単位断面積当り) は、Mタイプ銅管製とNタイプ銅管製とがほとんど同じであり、その強度は温度差 30~35°C 前後において作用する熱応力にはほぼ相当することがわかった。また、両枝管継手の主管軸方向ならびに各継手における枝管軸方向の座屈強度は、片側枝管継手の主管軸方向の座屈強度に比してかなり小さいが、このことは形状の差によるものと考えられる。

以上の試験結果からわかるように、雑排水で予測され得る排水温度の変動にともなう熱応力によって、排水用銅配管において銅管製枝管継手部は座屈する可能性が十分考えられる。

とくに、枝管継手部は構造的に応力の集中をきたし易い状態にあるので、継手部における座屈はより生じ易いとみられる。したがって、排水用銅配管においては排水温度の



研磨のまま, ×10



エッティング後, ×100

Photo. 10 排水用銅管の接続継手として用いられ座屈ならびに腐食疲労割れを生じた銅管製継手の外観と断面状況

Table 9 銅製枝管継手の主管軸方向および枝管軸方向の座屈試験結果

応力方向	接続継手	主管の呼称寸法とタイプ	主管の横断面積 (mm <sup>2</sup> )	座屈強さ	
				荷重(kg)	応力(kg/mm <sup>2</sup> )
主管軸方向	片側枝管ろう接	Mタイプ 4"	774.7	4,630	6.0
	ク	Nタイプ 4"	396.7	2,020	5.1
	両側枝管ろう接	Nタイプ 4"	396.7	1,400	3.5
枝管軸方向	片側枝管ろう接	Mタイプ 4" (445.7)*	774.7 (445.7)*	1,800	2.3 (4.0)*
	ク	Nタイプ 4" (245.4)*	396.7 (245.4)*	540	1.4 (2.2)*
	両側枝管ろう接	Nタイプ 4" (245.4)*	396.7 (245.4)*	520	1.3 (2.1)*

各主管に接続されている枝管は主管と同タイプの呼称寸法が3"の銅管。

\*: 枝管軸方向の座屈荷重と枝管の断面積でもって計算した座屈応力。

変動にともなう熱応力を構造的に吸収するために、配管途中に滑動式伸縮継手などを取付ける必要がある。

また、排水管を固定する工法においても、熱応力を十分吸収できるよう構造的に考慮すべきである。

#### 5・4 ソベント排水立管方式

従来、わが国においては排水管として通気配管方式が採用されてきたが、最近高層ビルが多く建設されるようになったことも関係して、ソベント排水立管方式による配管工法が脚光を浴びるようになった。

ソベント排水立管方式はスイスベルン市立職業訓練衛生設備主任教授の F. Sommer の発明によるもので、その名称ソベント (Sovent) は自己通気式衛生配管方式 (F. Sommer's Self Ventilation Stack System) に由来する。ソベント排水立管方式は排水横枝管と排水立管との接続に Fig. 22 のごとき通気継手 (Aerator Fitting), ならびに排水立管の最下部の建物排水横主管の曲り接続部に

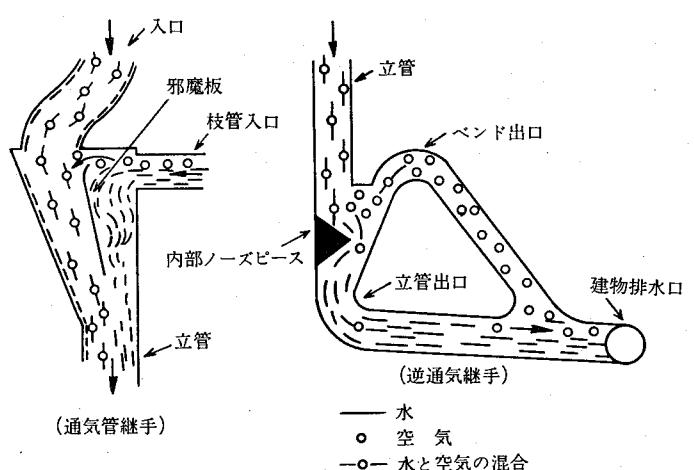


Fig. 22 ソベント通気継手および逆通気継手

逆通気継手 (Deaerator Fitting) を用いることによって通気管を不要とした排水配管方式であり、多くの利点を有

している<sup>28,29)</sup>。

欧洲においては1961年以降、既に200以上の高層ビルに本排水方式が採用されており、スイスにおいてはFig. 23<sup>29)</sup>

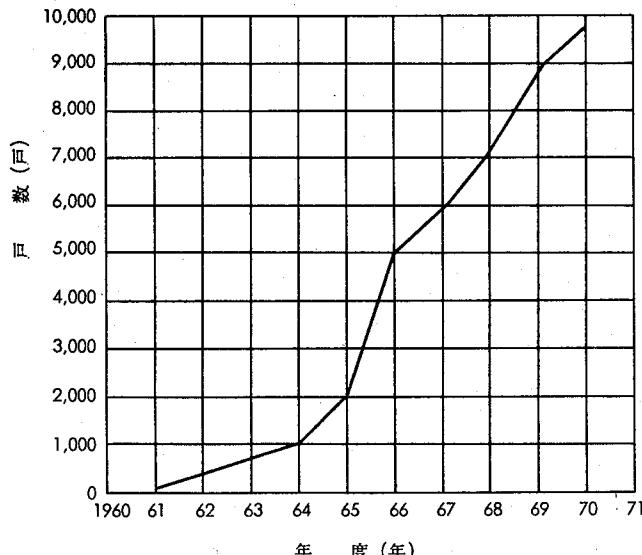


Fig. 23 スイス国内におけるソベント排水立管方式を採用した建設戸数の推移<sup>29)</sup>

のように本方式を採用するビルが多くなっている。北米では1967年に万国博覧会の宿舎に最初に本方式が使用され<sup>30)</sup>、その後急速に多く採用されるようになり、米国のニューヨーク州都市開発公社では1970年以降の中高層アパートにこの方式を採用することになっているという<sup>29)</sup>。

わが国においては欧米ほどソベント排水立管方式が普及していないが、その検討は急速にすんでおり、既に一部のビルにおいて採用されている。今後建設を予定されているビルにはこの方式を採用することになっているといふ<sup>29)</sup>。

ソベント排水立管方式における通気継手ならびに逆通気継手の材料は銅に限られるわけではないが、加工性、耐食性および配管施工などにすぐれた銅製もしくは銅合金製のものが多く用いられている。このことは、銅製の継手の利用が排水用銅配管との組合せによって、多くの利点をもたらすことが可能と考えられているためである。

## 6. 銅管の配管施工

銅配管の施工において最も重要な事項の一つである銅管の接合は、(1)フランジ継手およびフレヤー式やフェルール式圧縮継手を用いて機械的におこなう方法と、(2)銅管継手を用いて軟ろうや硬ろうによってろう接する方法がある。

銅管においては後者のろう接による接合がきわめて容易におこなうことができるので、最近においては大半がろう接部によって接合されている。このため、銅配管の施工はきわめて簡単で容易になり、しかも迅速におこなうことができるので、その結果施工費が著しく低廉になる。これらのことから、銅管が広く使用されるようになった大きな要因の一つになっているものとみなされる。

本章においては、銅管の切断、曲げ、接合方法ならびに

配管施工における問題点などについて述べる。

### 6.1 銅管の切断および曲げ加工

銅管の配管工事に際して、銅管を所定の長さに切断することは、(1)手のこ、および(2)パイプカッターなどで容易に工事現場においてもできる。手のこによる切断は切口にばりが出たり、変形を生じたり、あるいは切りくずで管をつまらせる恐れがあるので、できるだけパイプカッターを用いることが望まれる。

銅管の曲げ加工は軟質材につき常温においてきわめて容易におこなうことができ、とくに呼称管径が1"以下程度のものについては、工事現場で特別な工具を用いないで簡単に曲げることが可能である。

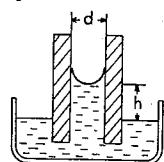
硬質管は直管部の配管に用いることを主目的としているが、どうしても曲げ加工を要する場合には一旦焼なましをおこなって、軟質状態にしてから曲げ加工をおこなうべきである。

### 6.2 ろう接

銅管の接合はストレートに拡管された継手端部に銅管を挿入し、ラップろう接するものであり、きわめて容易におこなうことができる。このことは銅配管の重要な長所である。

継手によるろう接は、溶融したろうが銅管と継手との間隙へ毛細管現象により浸透することによって、間隙をろうで充填することによる。そのため、ろうは母材とのぬれ性がよく、継手間隙の奥深くまで浸透し、継手部に要求される機械的および化学的性能を十分満す必要がある。

溶融ろうの母材に対するぬれ性は、ろうと母材との界面エネルギーによって支配されるものであるが、継手部の間隙の大きさや、表面状態および溶剤、ならびに加熱温度の適否なども重要な因子として作用する。ろうの母材に対する浸透性については、つぎのような関係で示すことができる。



$h$ : ろうの浸透高さ

$\rho$ : ろうの密度

$g$ : 重力の加速度

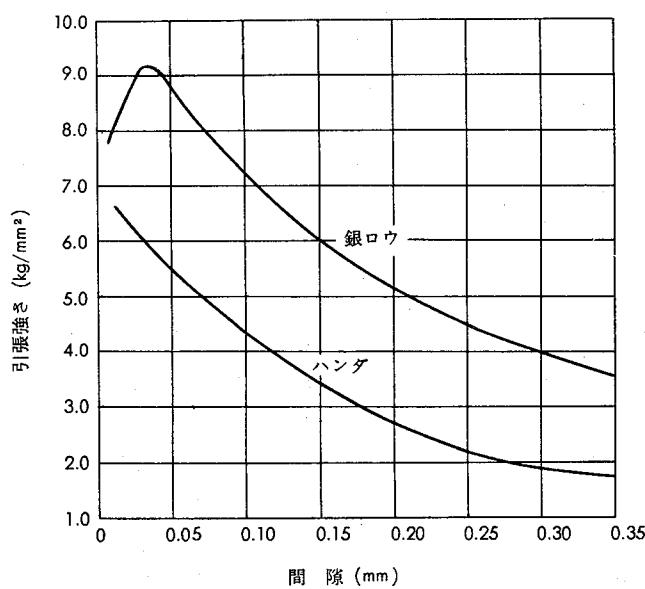
$d$ : 間隙

$\gamma$ : 界面張力

すなわち、間隙が小さい方がろうは深く吸収される傾向にあることがわかる。したがって、銅管のろう接においては銅管と継手との間隙がきわめて重要な因子となる。

一般に、ろう材自体の機械的強度は銅管に比して小さいにもかかわらず、ろう接部において十分な強度を示すことは、継手間隙へろうが浸透することによって周囲の強い材料の拘束力を受けるためである。継手を用いて強い接合を得るために、銅管と継手とのラップ深さを十分大きくするとともに、継手間隙を適当な大きさにしなければならない。

ろう接部における間隙の大きさと、引張強さの関係をFig. 24<sup>31)</sup>に示す。

Fig. 24 ろう接強度におよぼす間隙の影響<sup>81)</sup>

### 6・3 接合準備

接合される鋼管の管端は、運搬や切断などによって変形する場合があるので、サイジングツールを用いて管端を矯正し、正円にして継手部の間隙を適正にする必要がある。

また、鋼管はエキスパンダーやレデューサーでもって、管端部を拡大したり、縮少したりして寸法調整をおこなうことも容易にできる。

### 6・4 溶 剤

溶剤は、鋼管や継手およびろうの表面に形成される酸化皮膜を溶解して除去し、ろうが鋼管や継手の表面へ直接に接触することを容易にし、ろう接作業中はろう接部の酸化を防ぐなどの作用をなす。ろう材の適否や塗布要領ならびに塗布量などの適正如何は、ろう接部の健全性に大きな影響をもたらすので注意しなければならない。

### 6・5 ろう材の種類と特長

ろう材の種類は、軟ろう（融点 450°C 以下）と硬ろう（融点 450°C 以上）とに大別される。

軟ろうは低温で作業できる利点があるが、強度に不足する欠点がある。これに対し、硬ろうは作業温度が高いが、強度が大きい利点がある。したがって、軟ろうと硬ろうとは用途に応じて使いわけされる必要がある。

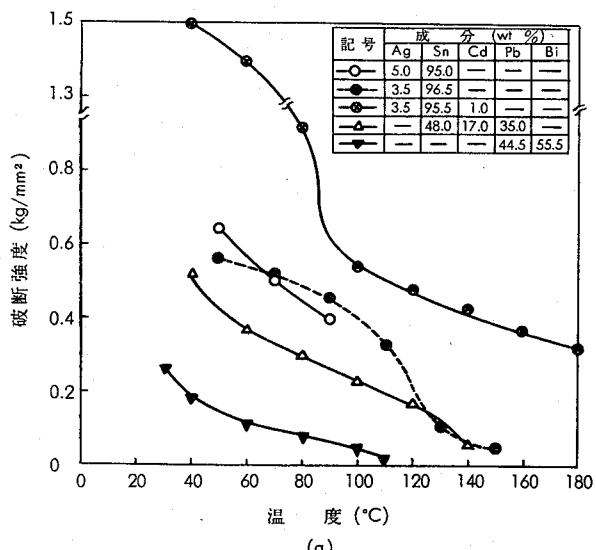
軟ろうの常温から180°Cまでの温度域におけるクリープ特性を Fig. 25<sup>82)</sup> に示す。

給水給湯用配管、空調用配管ならびに排水用配管として用いる鋼管においては、呼称管径が 1½" 以下のものには軟ろう、1½" 以上のものについては硬ろうを用いるよう概略区分されているが確定的なものではない。

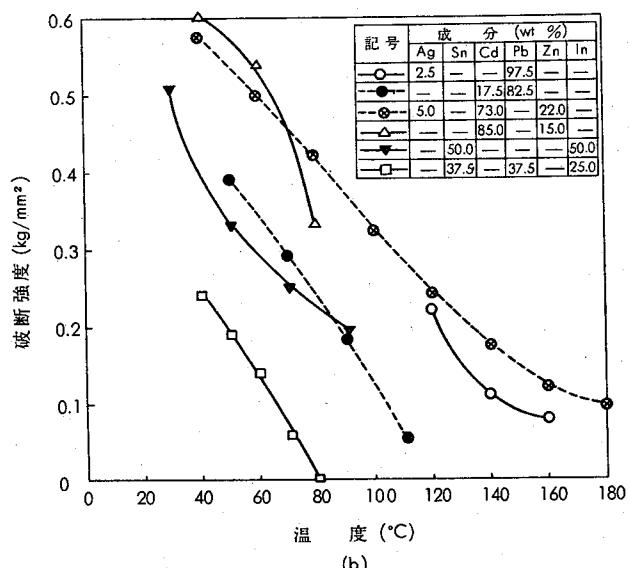
銅配管において、最もよく使用されている軟ろうは錫一

銀合金であって、その他錫一鉛合金も一部使用されている。これらの作業温度は約 300~350°C であるので、熱源として都市ガスやプロパンガスを用いて、容易に接合することができる。

硬ろうとして代表的なものは Table 10 に示すような銀ろうであるが、最近の銅配管においては Table 11 のようなりん銅ろうが主として使用されている。銅配管に多く使用されるりん銅ろうとしては BCuP-3 もしくは BCuP-5 であり、銀ろうとしては BAg-1 または BAg-1A である。銀ろうは多くのすぐれた特性を有するが高価である。りん銅ろうは強度的にもすぐれていて、溶剤を必要としない利点などを有しているが、作業温度がやや高い欠点がある。作業温度は、銀ろうが約 650~800°C、りん銅ろうが約 700~850°C である。



(a)



(b)

Fig. 25 軟ろう材の高温における破断特性  
(保持時間 : 100h)<sup>82)</sup>

Table 10 銀ろうの化学組成とろう接温度 (JIS Z 3261)

種類 (記号)	化 学 成 分 (wt %)						参考			
	Ag	Cu	Zn	Cd	Ni	Sn	Pb+Fe	固相線温度 (°C)	液相線温度 (°C)	ろう接温度 (°C)
BAg-1	44~46	14~16	14~18	23~25	—	—	0.15以下	約 605	約 620	620~760
BAg-1A	49~51	14.5~16.5	14.5~18.5	17~19	—	—	0.15以下	約 625	約 635	635~760
BAg-2	34~36	25~27	19~23	17~19	—	—	0.15以下	約 605	約 700	700~845
BAg-3	49~51	14.5~16.5	13.5~17.5	15~17	2.5~3.5	—	0.15以下	約 630	約 690	690~815
BAg-4	39~41	29~31	26~30	—	1.5~2.5	—	0.15以下	約 670	約 780	780~900
BAg-5	44~46	29~31	23~27	—	—	—	0.15以下	約 675	約 745	745~845
BAg-6	49~51	33~35	14~18	—	—	—	0.15以下	約 690	約 775	775~870
BAg-7	55~57	21~23	15~19	—	—	4.5~5.5	0.15以下	約 620	約 650	650~760
BAg-8	71~73	27~29	—	—	—	—	0.15以下	約 680	約 780	780~900

Table 11 リン銅ろうの化学組成とろう接温度 (JIS Z 3264)

種類 (記号)	化 学 成 分 (wt %)				参考		
	P	Ag	その他の元素合計	Cu	固相線温度(°C)	液相線温度(°C)	ろう接温度(°C)
BCuP-1	4.8~5.3	—	0.2 以下	残部	約 705	約 900	785~925
BCuP-2	6.8~7.5	—	0.2 以下	残部	約 705	約 805	735~840
BCuP-3	5.8~6.7	4.7~6.3	0.2 以下	残部	約 640	約 805	705~840
BCuP-4	6.8~7.7	4.7~6.3	0.2 以下	残部	約 640	約 720	705~815
BCuP-5	4.8~5.3	14.5~15.5	0.2 以下	残部	約 640	約 815	705~815

## 6・6 銅管継手

従来、銅管接合に多く用いられていた各種の圧縮継手はねじ込み式の機械的接合によるもので、本体が鋳物または鍛造品からなっており、そのために厚肉であったり、耐気密性に不足したり、あるいは一度使用して喰い込み不良になった場合には、配管ロスを生ずるなどの欠点を有していた。

その後、画期的な銅管継手、いわゆる毛細管継手 (Capillary Fitting) が開発されて、銅管のろう接接合がきわめて容易になった。この銅管継手は、継目無銅管の内部に特殊な方法で強圧力を加えて塑性加工 (バルジ工法) により成形されるものである。最近における建築用銅管の接合は、大半が本継手を用いてろう接している。銅管継手の一例を Photo. 11 に示す。

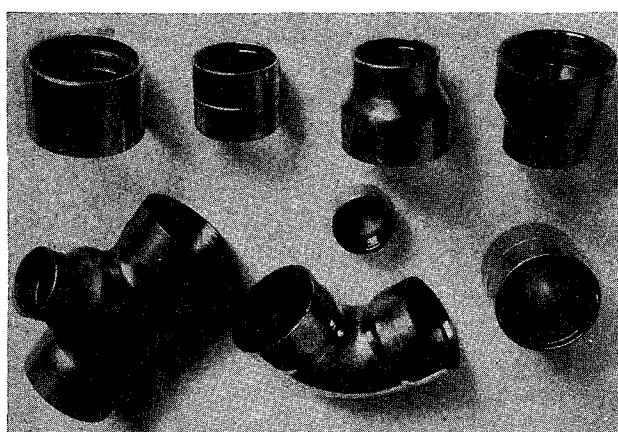
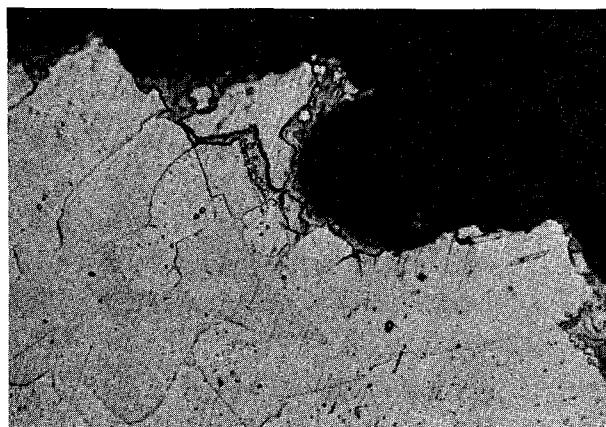


Photo. 11 銅管継手の一例

## 6・7 ろう接時の割れ問題

溶融ろうと母材との界面エネルギーは、母材の粒界エネルギーに比してかなり小さい。このため、ろう接時において



エッティング後, ×100

Photo. 12 銅管のろう接作業において、外的応力が作用したために、溶融ろうが浸透して、脆性破断をきたした銅管破断部の断面状況

て母材に対してある大きさ以上の引張応力が作用するような事態があると、溶融ろうが母材の結晶粒界に浸透し、脆性破断をきたすことがある。本現象によって破断をきたした銅管の断面状況例を Photo. 12 に示す。

これらの破断現象を防ぐために、ろう接時には母材に対し、引張方向の応力が作用しないように注意しなければならない。

## 6・8 ろう接不良に伴うエロージョン

銅管と継手とのラップ部にろうが十分浸透しないために、

その間隙からわずかな漏洩をきたすことがある。漏洩する水の通路においては乱流や冷温水の吹き出しによる衝撃のためにエロージョンを生じ、銅管や継手に新たな貫通孔を生ずることがある。

銅管のラップろう接は簡単で容易におこなうことができるけれども、不完全なろう接はさらにつぎの事故へと伝播することもあり得るので、確実なろう接作業が必要である。

#### 6・9 伸縮および膨張環継手

銅は鉄や鉄鉱などに比して熱膨脹係数が大きいために、銅配管において温度の変化によって生ずるひずみも鉄管や鉄鉄管の場合よりも大きい。配管材に熱応力がかなりの頻度で作用すると、作用を受けた個所が疲労破壊または腐食疲労破壊を生ずることがあるため、給水給湯および暖房をはじめとする銅配管には、予測される熱による膨脹収縮の大きさに応じて、それを吸収するための伸縮継手および膨張環継手などを取付ける必要がある。

伸縮継手には(1)スリープ型と(2)ペロー型がある。スリープ型は滑り伸縮継手ともいい、本体の内部に滑動するスリープを有し、配管の伸縮をこのスリープの滑りによって吸収するものであり、主として温水配管や低圧蒸気配管に使用する。ペロー型はパックレス伸縮継手ともいわれ、本体内部の滑動するスリープをペローズで包み、スリープの滑りに応じてペローが伸縮し、パッキングを要しないで、滑り面からの温水や蒸気の漏洩をなくしたものである。

膨張環継手は伸縮曲管ともいわれ、Fig. 26 のごとき形状をなしており、銅管をループ状に曲げることによって製

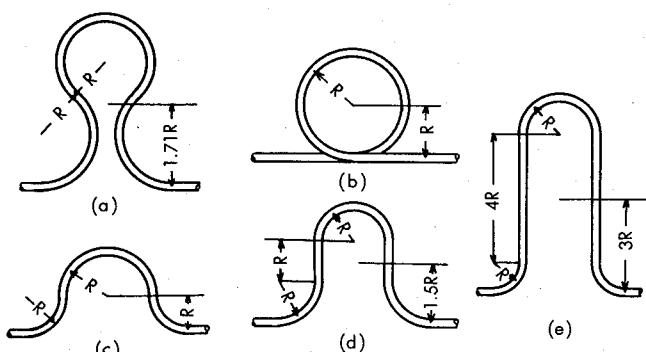


Fig. 26 膨張環継手の例

作したものであるため、故障もなく、高温高圧にも耐える。

#### 6・10 プレハブ配管工法

工場にて予め配管ユニットを生産し、工事現場へ直送して組立てる配管工法をプレハブ配管工法と称している。

Photo. 13 に配管ユニットの例を示す。

本工法の利点は工事の迅速かつ簡便化に加えて、工事現場の繁雑を避けることができ、しかも配管材料をより計画的に使用できるなどが挙げられ、工事費の低廉化に大きな役割を果している。

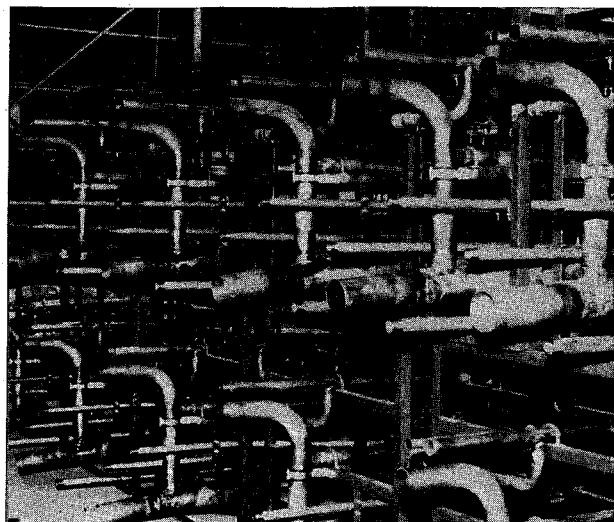


Photo. 13 給水給湯および排水用銅管のユニット例

## 7. 結 び

最近の建築設備においては給水給湯配管をはじめ、各種の空調機器や排水管などに銅管が広く用いられるようになっており、将来はさらに需要の拡大があるものと期待されている。

本稿はこのような建築用の銅管において知られている問題点を前号に統一して、実例と最近の研究にもとづいて明示しようとしたものである。

しかし、このような報告は、断片的なものを除けばこれまでにもほとんど例がなく、また、当研究室においても、必ずしも十分な調査例が収集されていたわけでもないので、遗漏や針小棒大なところも避け難く、粗雑な記事になってしまった可能性が少なくないように思われる。今後の需要家各位の問題点提示と、それに伴う御教示および御鞭撻に期待するところが大である。

ただ、使用例が多数であるにもかかわらず事例が少ないことは、それだけ建築用銅管が今日のところ、よくその要求に応じている証拠であろうかと思われる。

本稿において、問題として提示されている事例には、幸にして、難解で致命的なものはない。ただし、内容が多岐にわたるため、デザインのときのみならず、施工やメンテナンスにおいても事態に応じてバランスのとれた広範で適切な配慮が望ましいものと考えられる次第である。

## 文 献

- 21) 社団法人日本冷凍空調工業会：冷凍と空調，No. 105 (1969), 18
- 22) 社団法人日本冷凍空調工業会：冷凍と空調，No. 108 (1969), 16
- 23) 社団法人日本冷凍空調工業会：冷凍と空調，No. 127 (1971), 37
- 24) 竹内勝治：未発表
- 25) CCBDA : Copper Drainage Tube DWV, Publication No. 3E(1970)

- 26) R. F. Taylor and J. E. Meginness : Air Conditioning, Heating, Ventilating, April(1964) (前島 健訳: 空気調和・衛生工学, 39(1965), 59)
- 27) P. Chollet and W. C. Cooper : *Investigation of Gas Corrosion*, INCRA Project No. 80
- 28) F. Sommer and R. Hanslin : 衛生及び暖房技術, 12月(1968) (日本辨管工業株式会社, ソベント資料 No. SOV-0010/70)
- 29) 追分道生 : 建築設備と配管工事, 9(1971), 47
- 30) CDA : *Creative Design in Architecture, Sovent Plumbing System*, Dec. (1970)(日本銅センター訳・銅と技術, 7(1971), 32)
- 31) N. Bredzs : Welding Research Supplement, Nov. (1954), 545S
- 32) K.Th. Haug : Schweißen und Schneiden, 17(1965), 200