トンネル窯におけるさやの熱破壊傾向

稲垣 甲子郎・坂 部 隆 夫

(愛知県工業指導所)

Thermal Fracture of Sagers in the Tunnel Kiln

By

Kineo INAGAKI and Takao SAKABE

(Industrial Research Institute, Aichi Prefecture, Nagoya)

In order to improve the life of sagers, three kinds of material were studied as for the sager bodies. The physical properties of trial manufactured sagers, thermal stress for sagers of large size, and temperature gradients between the outer and inner sides of sagers in the tunnel kiln were examined. The mechanical strengths, thermal expansion, specific heat, and thermal conductivity of sagers of chamotte, cordierite, or semi silicon carbide type were measured.

The suitable heating or cooling rate for sagers were found to be 1.5°C/min for chamotte type, and 6°C/min for cordierite or semi silicon carbide type sagers, from thermal stress analysis.

[Received July 30, 1968]

1. 緒 言

陶磁器の製造原価に大きな比重を占めるさや（匣鉢）の耐久性を向上させることは急務である。さやは熱的、機械的に充分耐えることが必要であり、安価でなければならない。

従来から、熱衝撃の激しい場所での使用中における急熱急冷による破壊現象¹⁾および最大許容温度差²⁾の決定などについては多数の研究が認められるが、トンネル窯内における条件での材料の熱破壊を予知する研究は少なく、僅かに高津³⁾らの報告がみられるのみで、この条件での窯業品の加熱、冷却速度の決定とか、耐火材料の選定方法は経験的な結果をもとにしている場合が多い。

したがって、あらかじめさや中に発生する熱応力分布とか、それぞれのさや材質に応じた安全な加熱、冷却速度を求めることができれば、陶磁器生産上経済的に有益である。

本報告では、まず某社の食器製造用トンネル窯内の温度上昇、降下速度と窯内で使用中におけるさやの内外面温度差とをしらべ、実用に供して比較的耐久性がよく、また、よく普及した 30 cm 肉皿用コーディエライト質、半炭化珪素質さやが、トンネル窯内で使用されたときにさやに生ずる温度勾配と熱応力とを計算によって求め、それぞれの材質のさやが破壊しないような最大の加熱または冷却速度について検討した。同時に、比較のためシヤモット質についても試みた。

2. さや素地の物理性質

さや素地の基本調査⁴⁾は既に報じたが、ここで用いた調査を表-1に示す。

表において炭化珪素はS社製黒色を用い、コーディエライト質骨材の調整方法は朝鮮カオリン 3、枝下木節1の重量比の混合物に水酸化マグネシウムを外枠へ16%加えたものをトンネル窯でSK 13に焼成した。ここで煅焼ボーキサイト粉末を加えたのは、使用中における底下がり防止の役目である。この素地のX線回折結果はコーディエライトが主体で、ムライト、スピネルも認められる。

Table 1. Mixing rate of raw materials.

1) Semi SiC sagger body

Kinds of aggregate	SiC	0~0.2 mm	12%
		0.2~0.5 mm	8%
		0.5~1.5 mm	8%
		1.5~3 mm	12%
	Shidare Kibushi clay fired at SK 13	0~0.2 mm	5%
Combining clay	Al ₂ O ₃ powder	0.5~1 mm	5%
		# 100~	10%
	Shidare Kibushi clay	# 100~	25%
		Korean Kaolin	# 100~ 15%

2) Cordierite sagger body

Grain of cordierite aggregate	0~0.3 mm	15%
	0.3~0.8 mm	7%
	0.8~2 mm	10%
	2~5 mm	23%
Combining clay	Shidare Kibushi clay	# 100~ 25%
	Korean Kaolin	# 100~ 10%
	Bauxite	# 100~ 7%
Addition	Magnesium hydroxide	# 220~ 3%

成形条件は、15%の成形水量と1t/cm²圧でそれぞれの物理試験に適した寸法に成形し、トンネル窯でSK

Table 2. Physical properties of sagger body fired at SK 13.

	Semi SiC type	Cordierite type	Chamotte type
Compressive strength (kg/cm ²)	486	394	175
Modulus of rupture (kg/cm ²)	180	150	50
Coefficient of thermal expansion at 900°C (%)	0.25	0.33	0.75
Young's modulus (kg/cm ²)	7.7×10^4	9.0×10^4	7.0×10^4
Thermal conductivity (cal/cm ² ·°C·sec)	13×10^{-4}	15×10^{-4}	2.52×10^{-3}
Specific heat (kcal/kg)	0.19	0.18	0.23
Bulk specific gravity	2.5	2.0	2.0

13 に 2 日間かけて焼成した。本実験で測定した物理試験項目とその結果は表-2 に示すが、このために使用した装置と方法は既報³⁾ のとおりである。

表には、市販のシャモット質さやで比較的耐久性のよいものをそれぞれの物理試験用に切り出して測定した結果も参考として示す。

3. 食器焼成用トンネル窯内における シャモット質さやの温度分布

さやの熱破壊条件を求める目的で、某社の食器焼成用トンネル窯を用いて、図-1 に示す位置に台車方向から熱電対を差し込み電子式自動平衡温度計を用いて温度を測定した。これに用いたさやは 30 cm 食皿用のもので外径 34 cm、側面の肉厚 1.5 cm、底の厚さは薄いところで 0.7 cm である。図-2 には台車上に積み重ねた一たての中央部のさや内の温度上昇と降下速度を調べた結果を示す。また、さやの中に火にあたる側とその反対側（図-3 における×印）に熱電対をたて、焼成時におけるさやの外側と内部の温度差を測定した結果を図-3 に示す。図-2 から、窯の予熱部ではさや内の温度上昇速度は最高 4°C/min であり、また冷却速度は最高 3°C/min で普通 2°C/min である。図-3 から、さやの内側と外側とは窯の予熱部で最大 120°C の温度差を示し、冷却部では最大 90°C の温度差で、いずれも 400°C 附近が一番大きい。

4. さやの温度分布式

加熱および冷却が一定速度でおこなわれる場合におけるさやの温度分布は半無限固体の熱伝導方程式⁶⁾ を解くことによって表わされる。すなわち、温度 (u) は x のみの関数であるとし、初めの温度を 0°C とすると (1) 式の微分で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

ただし、 k : 温度拡散率 t : 時間 x : 方向

u : ある地点における温度

(1) 式を $\left. \begin{array}{l} (u)_{t=0} = 0 \\ (u)_{x=0} = nt \\ (u)_{x=\infty} = 0 \end{array} \right\}$ の初期条件で解くと (2) 式で示される。

Fig. 1. Position of the thermocouple fixed on the carriage in the tunnel kiln.

Fig. 2. Heating curve of the sagger in tunnel kiln.

$$u = n \left[\left(t - \frac{x}{2k} \right) \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2k\sqrt{t}}} e^{-\beta^2} d\beta \right) - \frac{x\sqrt{t}}{k\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4k^2t}} \right] \quad (2)$$

また $k^2 = \frac{\lambda^2}{C_p \cdot \rho}$ である。

ここで λ : 熱伝導率 C_p : 比熱 ρ : 密度

× : Position of thermocouple in the sagger
Fig. 3. Temperature difference between the tunnel kiln and the sagger.

n : 距離

(2) 式において、表-2 に示したさやの物理性質を代入し、それぞれのさや素地の $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 当りの加熱速度における経過時間 (h) に対する温度分布を計算した結果を図-4 に示す。図-4 はさやの壁の厚みは厚いものでも 2 cm 以下であるために、この距離まで求めた。また、図はそれぞれの時間経過後は、熱はさや内部へ流れるので、一般にはさや内部の空気への伝熱を考えに入れる必要があり、各温度分布曲線は厳密なものではない。図の温度分布曲線は直線的であり、コーディエライト質、半炭化珪素質、シャモット質の順序で $x=0$ と $x=$

Fig. 4. (1) The variation of temperature gradients in the condierite body at heating rate of $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$: In the sagger body of 30 cm in diameter, and wall thickness of 2 cm .

Fig. 4. (2) The variation of temperature gradients in the Semi-SiC body at heating rate of $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$: In the sagger body of 30 cm in diameter, and wall thickness of 2 cm .

Fig. 4. (3) The variation of temperature gradients in the chamotte body at heating rate of $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$: In the sagger body of 30 cm in diameter, wall thickness of 2 cm .

2 cm 間の温度差が大きい。 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の一定速度における冷却の場合も同じである。

次に、タイルなど一度焼き用のさや形状では、さやのふちに生地からの水蒸気を逃がす溝などをつけることがある。このような形状で、側壁が薄いものではさやの内側と外側とが同じ温度であると仮定すると熱伝導方程式を a の厚みの板において両面の温度変化が等しいとした解。

$$(u)_{x=0}=F(t)$$

$$(u)_{x=a}=F(t)$$

$$(u)_{t=0}=f(x)$$

の条件で解いた式 (3) で表わされる。

$$u = \frac{2}{a} \sum_{s=1}^{\infty} \left\{ e^{-\frac{k^2 s^2 \pi^2}{a^2} t} \cdot \sin \frac{s \pi x}{a} \int_0^a f(\lambda) \sin \frac{s \pi \lambda}{a} d\lambda \right.$$

$$+ \frac{k^2 s \pi}{a} \int_0^t e^{-\frac{k^2 s^2 \pi^2}{a^2} (t-\lambda)} \cdot (F(\lambda) - F(\lambda)(-1)^s) d\lambda \} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 s ：整数

この式で第2項は表面からの距離 x に無関係である。いま、第1項にシャモット質の物理測定値を代入すると $e^{-\frac{k^2 s^2 \pi^2}{a^2} t}$ の値は $s=1, t=50$ 秒で $1/e^5$ となり、50 秒以上経過した場合は u は表面温度の時間的变化に等しいことになる。その結果として $3^\circ\text{C}/\text{min}$ の温度変化では、さやの側壁とさや素地の中央とでは $2.5^\circ\text{C}/\text{min}$ の差しか生じないことがわかる。

5. さやを急冷した際の温度分布

トンネル窯において、 $1200^\circ\sim 1400^\circ\text{C}$ の焼成温度に保持されたさやは、経済的問題その他から $800^\circ\sim 700^\circ\text{C}$ 付近まで急冷されることがある。

この条件での温度分布を調べる目的で、半無限固体における熱伝導方程式を次の条件で解く。(4) 式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} (u)_{x=0} &= u_0 \\ (u)_{t=\infty} &= u_0 \\ (u)_{t=0} &= u' \end{aligned} \right\} \text{の条件}$$

$$u = u_0 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} (u' - u_0) \int_0^{\frac{x}{2k\sqrt{t}}} e^{-\beta^2} d\beta \dots\dots\dots (4)$$

(4) 式において、 1000°C 以下の低温度ではさやの側壁を管とみなしてその管外強制対流伝熱を考慮する必要がある。これについては一応トンネル窯冷却帯の炉壁の冷却穴から冷たい空気の流れがさやに対して直角におかれたとき、すなわち単一円管の外面の伝熱式を適用するとヌセルト数 $N_u = hD/k_f$ とレイノルズ数 $Re = uD/V_f$ との間には、 $5 \times 10^4 > Re > 10^3$ の範囲で $N_u = 0.26 Re^{0.6} Pr^{0.3}$ の実験式がある。ただし、 $Pr = C_p \cdot u_f / k_f$ で与えられる。

ここで、 C_p, u_f はそれぞれの流体の定圧比熱と粘度である。

N_u ：ヌセルト数 h ：境界伝熱係数 D ：管外径
 k_f ：流体の熱伝導度 u_0 ：遠方の流速

V_f ： $\frac{t_w + t_0}{2}$ における運動粘度

t_w ：壁（管表面）の温度 t_0 ：遠方の流体温度

本研究では、 $D=30 \text{ cm } \phi, u_0=500 \text{ cm}, V_f=1.665 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ とすると

$$k_f = 1.8 \times 10^{-4} \text{ (cal/sec} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$Re = 9063$$

$$Pr = 1.667$$

$$Nu = 71.76$$

故に $h = 4.305 \times 10^{-4} \text{ cal/sec} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ となる。

この h の値がさやの温度分布に与える影響について検討してみる。境界の厚さ δ は $\delta = \lambda/h$ で与えられる。

$$\text{ただし、} \lambda = k_f ((t_w + t_0)/2) \quad \delta = 0.42 \text{ cm}$$

この境界を(4)式に代入すると、二、三の経過時間後の

(4) 式中の $\int_0^{\frac{x}{2k\sqrt{t}}} e^{-\beta^2} d\beta$ 項は表-3の値となる。したがって 0.42 cm のところでは、1 秒以上の経過時間で $(u' - u_0)$ の 9% 以下しか温度変化がない。この境界と輻射放熱を無視してさやが急冷された際の温度分布を求めた結果が図-5である。図-5 から、急冷時において 2 cm 厚さのさや側壁で、半炭化珪素質、コーディエライト質では 128 秒、シャモット質では 256 秒経過後で

Table 3. Value of $\int_0^{\frac{x}{2k\sqrt{t}}} e^{-\beta^2} d\beta$ term.

Lapse of time	$\int_0^{\frac{x}{2k\sqrt{t}}} e^{-\beta^2} d\beta$
1	0.085
2	0.056
3	0.04

Fig. 5. (1) The variation of temperature gradients in the body of cordierite when cooled rapidly.

Fig. 5. (2) The variation of temperature gradients in the body of Semi-SiC when cooled rapidly.

Fig. 5. (3) The variation of temperature gradients in the body of chamotte when cooled rapidly.

はさやの内面と外面との温度差がなくなり、さや内部の空気の伝熱を考慮しなければならないので、各曲線は厳密なものではない。しかし、後述のように熱応力の最高が表われるのはさや内部の空気に伝達する直前であるので、あまり時間が経過したときの温度差についてはくわしく吟味の必要もないので略した。

6. さや素地の内部に発生する熱応力

内径 a 、外径 b の円筒状素地内に温度の不等分布が生ずる場合に発生する熱応力は内外圧をうける場合と同様に半径、切線、軸の3方向の主応力であり、この応力は次式で表わされる。

中空円筒の熱応力（無限円筒）：

$$\left. \begin{aligned} \text{半径} \quad \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \left\{ \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b \alpha \theta r dr - \int_a^r \alpha \theta r dr \right\} \\ \text{切線} \quad \sigma_\phi &= \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \left\{ \frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b \alpha \theta r dr - \int_a^r \alpha \theta r - \alpha \theta r^2 \right\} \\ \text{軸} \quad \sigma_z &= \frac{E}{1-\mu} \cdot \left\{ \frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b \alpha \theta p r dr - \alpha \theta \right\} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

E ：ヤング率 μ ：ポアソン比

α ：円筒の任意半径 b ：円筒の外径

a ：円筒の内径 r ：中心からの任意距離

R ：円板半径 θ ：温度（時間、距離の関数）

この3熱応力のうち、半径応力 σ_r は円筒の内外面で0、切線と軸の両応力 σ_ϕ , σ_z は内外面で最大値をとり、同じ値である。したがって、さやの急熱急冷による亀裂など、破壊に関与する主たる応力である切線応力のみを取りあげる。また、さや底部の熱応力、すなわち円板熱応力は

$$\sigma_{\phi 1} = \alpha E \left(-\theta + \frac{1}{R^2} \int_0^R \theta r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r \theta r dr \right) \dots (5)$$

さきにえた温度分布を上式に代入して熱応力を求めるにあたっては、耐火物においても弾性と熱間塑性の両性質をもっている。すなわち、塑性域ではさやは温度不等分布による歪を発生することが少ないので熱応力の発生は弾性域のみを考えればよいことになる。そうして弾性と熱間塑性の両域間の臨界温度については、Roberts, Booze ら多数の報告⁹⁾があり、一般には540°C附近で弾性を失うと言われている。したがって、この臨界温度以上では応力の発生がないとした。

熱間塑性を加味した応力式は上記の式を変形して次のようになる。すなわち、トンネル窯内の温度上昇過程では、さや外側の面から600°Cの塑性域下限までの距離を y とすると、さや側壁では内外両面からの場合を問題にしなければならないが²⁾、底円板では外面から半径方向の中心に向う場合しかないので(4)、(5)式は次のようになる。

r に $b-y-x$, b に $b-y$, a に $a+y$ を入れる。

ただし、 x ：表面からの任意距離

予熱帯では

$$\sigma'_{\phi} = \frac{E \alpha}{1-\mu} \cdot \frac{1}{(b-y-x)^2} \left\{ \frac{(b-y-x)^2 + (a+y)^2}{(b-y)^2 - (a+y)^2} \int_{b-a-2y}^0 \theta (x+y-b) dx + \int_{b-a-2y}^x \theta (x+y-b) dx - \theta (b-y-x)^2 dx \right\} \dots\dots\dots (4')$$

$$\sigma'_{\phi 1} = 2E \left\{ -\theta + \frac{1}{(R-y)^2} \int_{R-y}^0 (x+y-R) dx + \frac{1}{(R-y-x)^2} \cdot \int_{R-y}^x \theta (x+y-R) dx \right\} \dots (5')$$

また、冷却帯において、円筒部（さや側壁）では2つの同心円柱が存在し、各場合について(4)式に $r=b-x$, $a=b-y$ を入れる。

$$\sigma''_{\phi} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{\alpha}{(b-x)^2} \left\{ \frac{(b-x)^2 + a^2}{b^2 - (b-y)^2} \int_y^0 \theta (x-b) dx + \int_y^x \theta (x-b) dx - \theta (b-x)^2 dx \right\} \dots\dots\dots (4'')$$

$$\sigma''_{\phi 1} = \frac{E \cdot \alpha}{(1-\mu)(b+y-x)^2} \left\{ \frac{(b+y-x)^2 + a^2}{(a+y)^2 - a^2} \int_{b+y-a}^0 \theta (x-b-y) dx + \int_{b+y-a}^x \theta (x-b-y) dx - \theta (b+y-x)^2 dx \right\} \dots (4''')$$

さやの底の部分では、 R と $R-y$ との間には円柱であり、円板式が適用できず、(4''')式が用いられる。

(5)式に $R=a+Y$ を代入する。 Y ： a から600°Cの臨界温度までの距離。

$$\sigma''_{\phi 2} = \alpha E \left\{ -\theta + \frac{1}{(a+Y)^2} \int_{a+Y}^0 \theta (-a-Y+x) ax + \frac{1}{(a+Y-x)^2} \int_{a+Y}^x \theta (x-a-Y) dx \right\} \dots (5''')$$

上記の熱応力式にしたがって、それぞれのさやのトンネル窯内での使用にともなう応力分布の計算をした結果を、予熱帯と冷却部分とに分けて検討する。

6.1 温度上昇時における熱応力分布

それぞれのさやの熱応力分布を側壁（円筒部）と底（円板）部分とに分けて図-6と7に示す。この図と表-2とから、 $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の昇温速度条件では半炭化珪素質、コーディエライト質さやでは熱応力よりも機械強度が大きいことから推定して熱的破壊はおこらないであろう。しかし、シャモット質さやでは底部は亀裂をおこさないであろうが、側壁では加熱2時間後（ 480°C ）のとき、ひび割れする恐れがある。このひび割れの時期は 240°C （1時間後）から 600°C （2.5時間後）の間であり、そ

Fig. 6. The variation of tangential thermal stress in the side of sagger bodies with time when heated.

Fig. 7. The variation of tangential thermal stress in the base of chamotte body with time when heated.

れ以後は熱間塑性域に入り、熱応力を生じないとすれば $4^{\circ}\sim 8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の昇温速度でもよいであろう。

6.2 冷却時における熱応力

予熱帯と同様にさやを側壁と底の部分とに分け、窯の最高温度を 1440°C 、冷却速度を $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ としたときのさやに発生する応力分布を図-8と9に示す。

半炭化珪素質さや、コーディエライト質さやの側壁は、引張応力に関しては比較的急冷をおこなってもひび割れをしないが熱間塑性限界の 600°C 以下で圧縮強さの限界を $200\text{ kg}/\text{cm}^2$ とすれば $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の冷却速度が

Fig. 8. The variation of tangential thermal stress in the side of sagger bodies with time when cooled.

Fig. 9. The variation of tangential thermal stress in the base of chamotte sagger body with time when cooled.

限界であろう。また、シャモット質ではさやの表面温度が 240°C 附近で引張応力が 100 kg/cm² となり、表-2 と比較して破壊の恐れがある。従来、冷却帯の温度降下速度は 600°~480°C 間では、できるだけゆっくり下げたほうがよいと言われているのは、被焼成素地中の混入不純物としての石英の存在による異常膨脹もさることながら、熱間塑性限界がこの上限附近にあり、さやが弾性体領域に入る際、その変移速度に比例して内部ひずみ（永久ひずみ）を発生¹⁰⁾し、これが加成されるためではないかと思われる。また、この温度附近は冷却空気の接触による温度差もでき易い。

底円板部の熱応力は、図からシャモット質では引張り応力が極めて大きい。この引張り応力は同じ条件のもとにおける側壁に発生した応力よりも大きいために、このものの亀裂は底の縁の切線に対して垂直に半径方向に進行することが推定される。半炭化珪素質、コーディエライト質さやでは、亀裂の発生は側壁、底の何れも同じ程度の条件で発生すると思われるが、強いて言えば、やや側壁部で起こり易いのではないだろうか。

以上の結果から推定して、それぞれのさやの安全使用条件はシャモット質 1.5°C/min、半炭化珪素質、コーディエライトは 6°C/min の範囲内の窯の加熱、冷却速度であろう。

実際に、コーディエライト質、半炭化珪素質の 30 cm 食皿用さやをそれぞれ 20 個あて試作して前述の図-2 に示した条件でのトンネル窯を利用して 70 回までの耐用状況を調べた結果、その破損はそれぞれ 5 個と 3 個であり、また、シャモット質では、僅かに 6 個が 5 回以上の使用に耐えた。

7. 総 括

トンネル窯で使用するさやの耐久性向上を目的として半炭化珪素、コーディエライト質さや素地の物理性質を測定した。かつ、これらのさやがトンネル窯内で使用さ

れたときに、さや素地に生ずる温度勾配と熱応力とを計算によって求め、30 cm 径の大きさのそれぞれのさやの安全な使用条件はシャモット質 1.5°C/min、半炭化珪素質とコーディエライト質は、ともに 6°C/min の昇温、冷却速度が限界であることを推定した。

文 献

- 1) 佐々木茂式, 窯協 68 [11] 255-67 (1960); S.S. Manson, W. Smith, *J. Am. Ceram. Soc.* 38 [1] 18-27 (1955).
W.D. Kingry, *J. Am. Ceram. Soc.* 38 [1] 3-14 (1955).
- 2) 原 隆治, 鉄と鋼 49 [11] 1669-1675 (1963) など.
- 3) 鈴木弘茂, 窯協 72 [11-2] C 813 (1964).
- 4) 高津 学, 高見昭雄, 窯協 75 [11] 315 (1967).
- 5) 稲垣甲子郎, 材料試験 10 [93] 451 (1961).
稲垣甲子郎, 材料試験 10 [95] 617 (1961).
稲垣甲子郎, 材料試験 11 [103] 253 (1961).
稲垣甲子郎, 鳥居高夫, 窯協 73 [1] 9 (1965).
- 6) 稲垣甲子郎, 窯協 66 [12] 305 (1958).
稲垣甲子郎, 材料試験 10 [97] 753 (1961).
稲垣甲子郎, 材料試験 10 [93] 451 (1961); 窯協編, 窯工ハンドブック, p. 1313, p. 1340 (1966) (技報堂).
- 7) 小平吉男, “物理数学”, Vol. 2, p. 322 (1952), 岩波書店. 川下研介, “熱伝導論”, p. 65 (1966), オーム社.
- 8) 化工協編, “化学工学便覧”, p. 178 (1964), 丸善.
- 9) B.A. Boly, J.H. Weiner, “Theory of thermal stress”, John Wiley & Sons (1960).
S. Timoshenko, T.N. Goodier, “Theory of elasticity 2nd Ed.” p. 401 (1951).
- 10) A.L. Roberts, *Trans. Brit. Ceram. Soc.* 36, 326 (1937).
M.C. Booze, S.M. Phelps, *J. Am. Ceram. Soc.* 8, 361 (1925).
K. Eendell, *Ber. Deut. Keram. Ges.* 14, 16 (1933).
D.A. McGraw, *J. Am. Ceram. Soc.* 35 [1] 22 (1952).
- 11) 渡辺正紀, 佐藤邦彦, 造船協会論文集 86 [3] 185 (1954).
渡辺正紀, 佐藤邦彦, 造船協会論文集 88 [9] 155 (1955).
渡辺正紀, 造船協会論文集 86 [3] 173 (1954).

(7/30/1968 受付)