

セラミックス／金属 積層板中の残留応力発生過程のシミュレーション

徳島大学・齒 正

浅岡憲三

1. 緒 言

鋳造された歯科用合金に、地の金属色を消すためのオベーク陶材と天然の歯牙の色調をもつボディー陶材を重ねて焼き付けた陶材／合金積層材料が歯科補綴材料として汎用され始めている。この補綴物が珪瑯製品と異なる点は歯牙としての色調を整えるために、陶材が厚く盛られる点にある。従って、合金と陶材の主に熱膨張係数に関する適合性が良くないと焼成過程あるいは口腔内へ装着後に陶材の破損が生じる。歯科補綴物は単品生産であるところから、過熱／冷却速度等の焼成方法に関する問題と同時に鋳造用合金と陶材をどのような基準で選択すべきかを明確にすることは上記のような事例を防ぐ意味からも重要な問題である。

本研究では合金と陶材を積層した平板を陶材のSag温度より高温から、一定速度で冷却したときの内部応力の変化、残留応力の発生機構を数値シミュレーションにより明らかにし、合金と陶材の物理・機械的性質に関する適合性について検討した。

2 材料及び方法

シミュレーション・プログラムでは以下の5点について考慮した。

- 1 熱膨張／収縮係数の温度依存性
- 2 弾性係数の温度依存性
- 3 陶材の粘性係数の温度依存性
- 4 陶材の転移温度 (T_g) の冷却速度依存性
- 5 冷却速度により決まる材料内温度分布

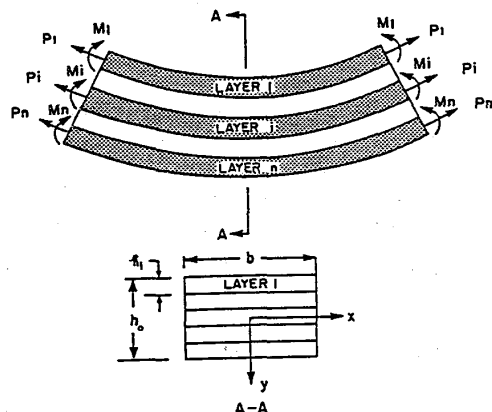


図1 応力解析方法の説明図

材料内応力分布—陶材は図1に示すような仮想的なN層 ($N=50$) よりなるものとする。過熱／冷却過程では、各層はそれぞれ異なった温度にあるため、異なった弾性率、熱収縮係数、粘性係数をもつ。積層材全体には外力が加わっていないので

$$\sum_{i=1}^n P_i = 0$$

ここで、 P_i はi層に加わる外力モーメントの釣り合い条件より

$$\sum_{i=1}^n k_i P_i = \sum_{i=1}^n E_i I_i / \rho$$

ここで

$$k_i = \frac{h_0 - h_i}{2} - \sum_{j=1}^{n-1} h_j$$

$$I_i = b h_i^3 / 12$$

E_i 、 I_i はi層の弾性率と断面二次モーメント； ρ は積層板の曲率半径； h_0 、 h_i は陶材の全体の板厚及びi層の板厚； b は板幅

各層の界面では熱収縮による歪 ε_1 、垂直応力による歪 ε_2 、曲げによる歪 ε_3 、粘性流れによる歪 ε_4 の総和が一致していなくてはならない。

mステージまでのk層の $\varepsilon_1 - \varepsilon_4$ の歪は次のように表される。

$$\varepsilon_1 = \sum_{i=1}^m \alpha_i (T_{i-1} - T_i)$$

ここで、 T_0 は初期温度； T_i 、 α_i はiステージの温度、及び熱収縮係数

$$\varepsilon_2 = P_m / (E_m b h_k)$$

$$\varepsilon_3 = h_k / 2 \rho_m$$

$$\varepsilon_4 = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i$$

$$= \sum_{i=1}^m \frac{P_i}{E_i b h_k} (1 - \exp(-G_i \Delta t / \eta_i))$$

ここで、 Δt はステージ間の時間間隔； G_i 、 η_i はk層のiステージでの剛性率、粘性係数

以上の $n+1$ 個の方程式から $P_1 - P_n$ 及び $1/\rho$ を求め、次式へ代入してk層の応力を求めた。

$$\sigma_{k1} = -E_k h_k / 2\rho + P_k / h_k b$$

$$\sigma_{k2} = E_k h_k / 2\rho + P_k / h_k b$$

熱収縮係数—相変態や転移がない温度範囲では材料の温度変化に対する伸び／縮み、 ΔL 、は次式で表される。

$$\Delta L/L = \sum_{i=1}^n C_i T^i$$

ここで、 L は長さ； C_i は定数； T は絶対温度
 C_i の値は i が2以上では無視できる。従って、熱膨張／収縮係数 α は

$$\alpha = \partial(\Delta L/L) / \partial T$$

$$= C_1 + C_2 T$$

歯科焼付用陶材及び歯科鑄造用合金の C_1 、 C_2 の測定値を表1に示した。 T_g より高温での熱収縮係数を測定することは困難な問題である。そこで、ここでは $30 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ で一定であると仮定した。

弾性係数—Kase et al. は2種の歯科用陶材、3種の焼付用合金について、弾性率、剛性率を室温から600°C附近まで測定している。ここでは、このデータをシミュレーションに利用した。

粘性係数—歯科用陶材の $10^8 \sim 10^{15}$ poise 範囲の粘性係数は Bending Beam Viscometer による測定及び体積緩和現象からの推定により調べられている。ここでは、オベーク陶材、ボディー陶材に対する Bertolotti et al. 及び Tesk et al. のデータを利用した。すなわち、陶材の粘性係数は次式で示される。

$$\eta = \eta_0 \exp(Q/RT)$$

ここで、 η_0 は定数； Q は活性化エネルギー； R はガス定数

オベーク陶材は $\eta_0 = 3.6 \times 10^{-8}$ 、 $Q = 80.4 \text{ kcal/mol}$

ボディー陶材は $\eta_0 = 5.3 \times 10^{-8}$ 、 $Q = 75.9 \text{ kcal/mol}$

転移温度—冷却速度 q と転移温度 T_g との関係については Moynihan et al. の関係式に従うとした。

$$d(\ln|q|)/d(1/T_g) = -\Delta h^*/R$$

表1 陶材及び合金の熱収縮係数

Code letter	Trade name	Constants		Calculated average value $\times 10^{-6}$	Measured value by WHITLOCK et al. $\times 10^{-6}$
		$C_1 \times 10^{-6}$	$C_2 \times 10^{-8}$		
I	Ceramco body	3.82	1.71	13.30	13.07
II	Ceramco opaque	4.11	1.62	13.10	12.92
A	Ceramalloy	7.71	1.19	14.39	14.63
B	Pentillium	7.81	1.08	13.92	14.14
C	Microbond NP-2	8.98	1.08	15.11	15.28
D	Biobond C&B	8.37	1.08	14.49	14.27
E	Jelenko-O	10.18	0.78	14.69	14.71
F	SNG-2	10.94	0.81	15.61	15.73

* Average thermal contraction coefficient was calculated for temperature range 40–500°C.

ここで Δh^* はせん断粘性のエンタルピーであり粘性係数の活性化エネルギーに等しい。

T_g の参照温度には Fairhurst et al. の冷却速度 $0.05 ^\circ\text{C/sec}$ でオベーク、ボディー陶材に対する測定値 579 、 558°C を利用した。

温度分布—初期温度分布が 0°C で一様である厚さ $2l$ の平板の両面を一定速度 q (q は定数； t は時間)で加熱／冷却したときの、平板の中心から x にある面の時間 t における温度 v は

$$v = qt + \frac{q(x^2 - l^2)}{2\kappa}$$

$$+ \frac{16ql^2}{\kappa\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3} e^{-\kappa(2n+1)^2\pi^2 l^2 / ql^2} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2l}$$

で示される。従って、保持温度 T_0 から一定速度 q で加熱／冷却したときの温度 T は次式で表示できる。

$$T = T_0 + v$$

3. 結果

800°C から一定速度 q ($^\circ\text{C/sec}$)で陶材／オベーク陶材／合金積層板を冷却したときの残留応力発生過程をシミュレートした。図2—図4は陶材Ⅰ、陶材Ⅱ、合金A中の Transient 応力を示している。ここで、各板の板厚は 0.8 、 0.2 、 0.5 mm であり、冷却速度は $1 ^\circ\text{C/sec}$ である。 T_g 温度は陶材Ⅰ、Ⅱに対して、 612 、 633°C となった。この温度で陶材中の熱収縮係数が急激に変化するため、この温度に対応する点で積層板中の応力も大きく変化している。陶材Ⅰの歪点、徐冷点、軟化点はそれぞれ、 488 、 544 、 800°C であり、Sag 点は $634 - 686^\circ\text{C}$ である。陶材Ⅰの室温での残留応力は 13 MPa 、オベーク陶材との界面では -21 MPa となった。合金中の応力は、積層板が図5に示すように陶材側に反ることに起因して、 T_g 温度まで急激に高くなる。保持温度を 800°C より高温にしても、 T_g 温度以下での変形挙動、残留応力には全く影響がなかった。 T_g と徐冷温度の間では陶材中の応力はほぼ零であり、合金中には曲げ応力が生じている。

図6に室温での積層板中の残留応力分布を示した。冷却速度が $1 ^\circ\text{C/sec}$ では積層板中の温度差は 0.25°C であり、材料内温度分布の影響は無視できる。陶材Ⅱは T_g が陶材Ⅰよりも高温であり、熱収縮係数が T_g から室温近くの温度範囲で陶材Ⅰよりも小さいため、図3にも示されているように、高い圧縮応力状態にある。

図7には合金A及び陶材Iの熱収縮曲線をした。

実線は合金の熱収縮を、細線は陶材Iの熱収縮を示している。上側の破線は陶材IIとの界面、下側の破線は表面での陶材Iの熱収縮と粘性流れの量を示している。すなわち、細線と破線の差が粘性流れの量を表している。室温では合金よりも陶材の収縮量が小さくなるので、積層板は図5に示されるように、合金側に反る。

シミュレーションを合金B、合金Cと陶材I、IIを組み合わせた積層板について試み、熱膨張係数間の適合性、Transient 応力の変化について比較考察をした。

参考文献

- R.L.Bertolotti and J.E. shelby, J Dent Res, 58, 2001 (1979).
 C.W.Fairhurst, D.T.Hashinger and S.W.Twiggs, J Dent Res, 60, 995 (1981).
 H.R.kase and J.A.Tesk, J Dent Res, 63, Abst No. 791 (1984).
 H.R.Kase, J.A.Tesk and E.D.Case, J Mat Sci, 20, 524 (1985).
 C.T.Moynihan, A.J.Easteal, J.Widera and J. Tucker, J Phy Chem, 78, 2673 (1974).
 J.A.Tesk, R.W.Hinman, R.P.Whitlock, A.Holmes and E.E.Parry, J Dent Res, 60, Abst No.839 (1981).

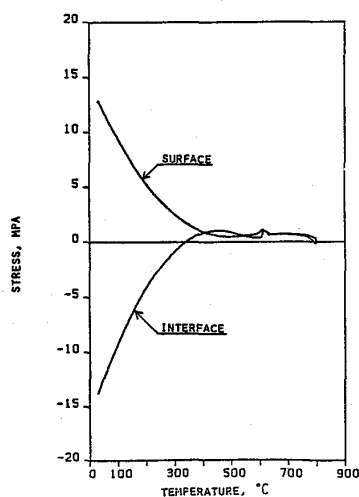


図2 陶材I中の応力

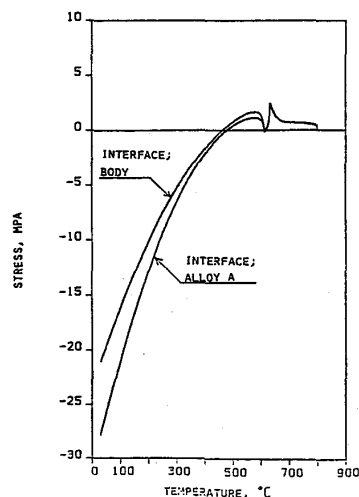


図3 陶材II中の応力

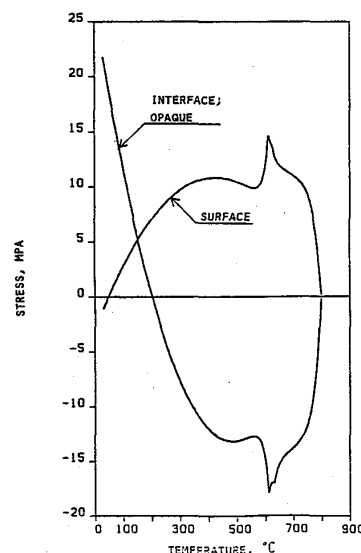


図4 合金A中の応力

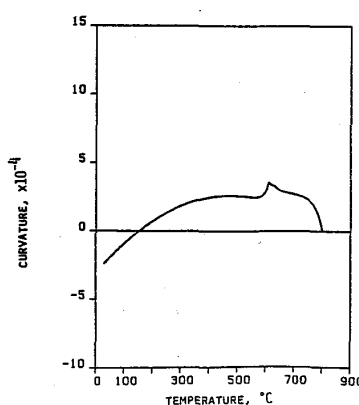


図5 積層板の曲率の変化

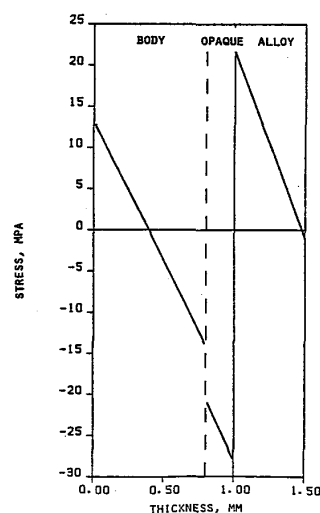


図6 残留応力分布

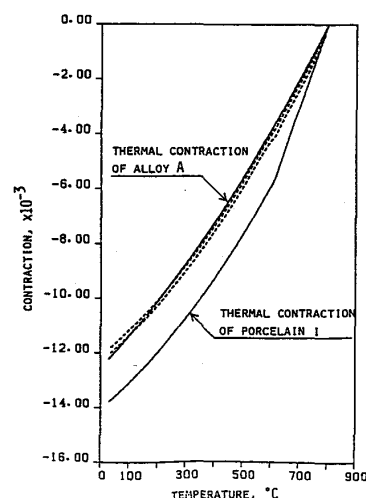


図7 熱収縮曲線