原

著

歯科鑄造体の仕上げと熱処理による寸法変化について

西 村 文 夫

東京医科歯科大学第一歯科理工学教室（主任・指導 野本 直 教授）

Distortion of Dental Castings by Finishing and Heat Treatment

Fumio Nishimura

The First Dept. of Dental Technology, School of Dentistry

Tokyo Medical and Dental University

1. 緒 言

この論文は、鑄造後に起こる鑄造体の寸法および形状の変化をとりあつかっている。即ち、鑄造後埋没材の中からとりだされた鑄造体が、口腔内に装着されるまでの間に受ける種々の操作によってどのように変形するかを追求することを目的としている。鑄造直後から口腔内に装着されるまでの間に鑄造体の受ける操作の中で、鑄造体の寸法変化に多少とも関与すると思われるものに次のようなものがある。

1. スプルー線の切断
2. 鑄造体表面の切削と研摩
3. 熱処理
4. ろう付け、陶材焼付け等
5. 酸洗い

このうち、この論文でとりあげたのは1, 2, 3で、4と5は除いてあるが、1, 2, 3の結果から4, 5による変化もある程度推察することが可能である。スプルー線を切断したときの鑄造体の寸法変化とは、線切鉗子などで不注意に切断したために生ずる変形、即ち外部から加えられた応力による変形ではなくて、鑄造体の持つ鑄造応力（内部応力または残留応力の一種）がスプルー線を切断することによって一部分解放され、そのために生ずる変形を意味する。鑄造体表面の切削および

研摩による寸法変化も、切削や研摩によつて直接削りとられたための寸法の減少ではなく、鑄造体表面の切削によつて鑄造応力が一部分解放されそのために生ずる寸法変化を意味する。熱処理による鑄造体の寸法変化の中にも熱処理の際の加熱によつて鑄造応力が解放され、そのために生ずる寸法変化が含まれている。これら鑄造応力の解放による鑄造体の寸法変化を各章前半でとりあつかい、後半では熱処理による寸法変化をとりあつかっている。

鑄造応力の解放による鑄造体の寸法変化について考えてみると、鑄型に鑄造された鑄造体は凝固してから常温まで冷却する間に収縮するが、その収縮量は鑄造体の形状や大きさによつても変わる。実際の収縮では鑄造体の各部分が自由には収縮しえないで、他の部分から拘束を受ける。何らかの原因で収縮が妨げられるときは、一つの鑄造体の中でも場所によつて収縮量に相違がおこり、そのため冷却後になつても各部分の間に無理が残ってくる。これを鑄造応力という。鑄造応力の存在は、真直ぐに鑄造したはずの棒の一侧を削り去るとき、削らない側に曲つたりするような工作上の経験や、鑄造体を使用している際にとくに衝撃的な外力に対し著るしい脆さを示すことなどによつてもわかる。

ところで、われわれが普段行なっている歯科精

密鑄造法（一名ロストワックス法ともいう）の多くの特長の中で、鑄型を加熱した状態で鑄造を行なうため鑄造体に生ずる内部（残留）応力が少なく、寸法の恒久性が得られることも一つの利点と考えられている。ロストワックス法における鑄型の予熱温度は、鑄造体の寸法精度、表面の状態、す等にも大いに影響するため、これらの点を総合して最適の鑄型温度が決められなければならないが、最近ではこの鑄型温度がやや低くなる傾向を示している。例えば、Nielsen, O'Brien らは、石膏を結合材とした埋没材を 700°C 以上に加熱した場合、硫酸カルシウムがワックス不完全燃焼の残留炭素によつて急速に還元され、その結果できる二酸化イオウによつて金合金が汚染され非常に脆くなるという理由で、鑄型温度は 700°C を越えてはならないといっている¹⁾。また総山は、銅合金プロゴールドの鑄造の場合、鑄型温度が 700°C を越えると、すが発生しやすいという理由から 600°C で鑄造することを推賞している²⁾。また加水調節式埋没材を用いて鑄造する場合には 450~500°C の鑄型温度で鑄造するようにならわれている³⁾。また高溶のコバルトクロム合金を石膏系埋没材で鑄造するため 700°C 以下の予熱温度で鑄造する方法も、合金の融解温度に比し著しく低い鑄型温度と云える。

このように低い鑄型温度で鑄造した場合には、鑄造体に生ずる内部応力は大きくなるおそれがある。大きな内部応力があると、鑄造体に機械的な加工がなされた場合（スプルーの切断、切削研磨など）とか、熱処理、ろう付け、陶材焼付けなどの目的で再加熱された場合に、内部応力の解放による変形が起こることは多分に予想される。

内部応力の解放による鑄造体の変形について歯科鑄造の見地から検討した文献は少なく、わずかに Roydhouse, Skinner らの報告があるにすぎない⁴⁾。それによると、大型の鑄造床においてスプルーの切断および焼鈍によつて明らかに変形を認め、またスプルーの立て方によつてその変形量が変わることを認めている。しかしながら、鑄型温度のちがいによる差や鑄造後放冷したときと水冷

したときとの差などのいわゆる鑄造条件と内部応力との関係についての検討は行なわれていない。また、鑄造体表面の切削および研磨が鑄造体の寸法形状変化に及ぼす影響については、歯科における鑄造体の切削や研磨が鑄造体の一侧あるいは片側だけに限られて行なわれる場合が多いという事実からも、検討を要するところであるが、歯科鑄造の立場からこの問題を取り上げた研究は全くない。そこで、実験の前半では、これらの点を調べる目的で単純化したリング型鑄造体およびパラトルバー型鑄造体を用いて鑄造体の内部応力と鑄型温度との関係および鑄造後の放冷、水冷の影響を検討し、また六角棒状鑄造体を用いて、表面の切削および研磨による長さの変化を検討した。

熱処理による鑄造体の寸法変化については、一般に金属を熱処理すると、機械的性質や電気伝導度などが変化すると同時に形状や寸法にも変化が起こるといわれている。例えば、鋼を熱処理する際に起こる寸法変化については良く知られておりまた文献も多い⁵⁻⁷⁾。

歯科用金属材料の中でも、白金合金、14~18K 金合金、銀パラジウム合金などには機械的性質の改善を目的とした熱処理を行なっているが、その際の寸法変化に関しては文献もほとんどなく、わずかに Co-Cr 合金についての Harcourt の報告があるにすぎない⁸⁾。いわゆる熱処理に限らず、歯科で用いられる鑄造体は、酸洗い、ろう付け、陶材焼付けなどの目的で、種々な条件の加熱・冷却が繰り返される。この場合も寸法変化に対する不安がつきまとっている。特に鑄造用合金については、鑄造のときに生じた内部応力が再加熱によつて解放され鑄造体に寸法変化を生ずることも考えられるので、この意味からも鑄造体を再加熱したときにあらわれる寸法変化について調べておく必要がある。

歯科用合金の熱処理は主に規則-不規則転移を利用して行なわれているが、その基礎となるものに金・銅の二元合金がある。金・銅二元合金には種々の規則格子の存在が知られているが、その中で歯科用としては AuCu 規則格子が重要であ

る。AuCu 規則格子の生成によつて結晶格子は面心立方から面心正方に変わり、そのときの格子常数も測定されている⁹⁾。AuCu 規則格子生成による格子常数の変化から計算される体積の変化は約0.7%の収縮になるが、これに関しての実験的な研究報告はみあたらず、わずかに茅の報告している Ni₃Fe, Ni₃Mn, Cu₃Pd についての実験的研究があるだけで、それによると規則格子生成によつて長さの変化で0.1%前後の収縮がみられたと報告している¹⁰⁾。金・銅合金の中で、原子%で金50%, 銅50%の組成のものは理論上規則格子の生成に伴う体積変化が最も大きく現われると考えられる。まずこの組成の合金を用いて AuCu 規則格子生成に伴う寸法変化を測定し、次に市販の歯科用合金の代表的なものについて熱処理したときの寸法変化を測定した。

熱処理の際の寸法変化に影響を及ぼす因子には、加工によつて生じた応力、加熱・冷却のときの熱応力、容積変化に伴う相転移による応力、そして熱処理しようとするものの形態などがある。この“形態”は、加熱・冷却速度に影響するだけでなく、寸法変化 (size distortion) と対をなす変形 (shape distortion) に対して特に大きな影響力を有する。この実験においては、加工による影響を除くため試片は鑄造体に限り、また形態による影響をできるだけ少なくするため試片は単純な棒状のものを選んだ。固相における相転移があつて熱処理の効く合金については主に相転移にもとづく寸法変化を測定し、固相における相転移がなく熱処理の効かない合金については鑄造応力の解放にもとづく寸法変化を測定することを目的としている。

2. 実験方法

内部応力を量的に測定する方法には、(1) 供試物体をそのままの状態では測る方法と、(2) 表面を切削し、または周囲を切離してその場合に生ずる変形から求める方法がある。(1)の方法はX線による測定であつて、表面から100分の数mm程度の深さにおける内部応力がわかり、複雑な構造物

の表面の内部応力を知るにはこの方法がよい。(2)の方法については、Sachs のくわしい研究がある¹¹⁾。ここでは(2)を応用した方法を主として行ない、X線による測定は参考までに行なつた。

鑄造体に生ずる鑄造応力の大小は、鑄造体の大きさ、形(スプルーの数と立て方を含めて)、金属の種類、鑄型の性状、鑄造後の冷却のしかたなどに影響されるので、次のように条件を統一した。

鑄造体の大きさはやや大型のものと中型のものとの二種類を選び、形は図1のようなパラタルバーにスプルーを2本立てたループ状のものと、図

図1 パラタルバー型鑄造体

図2 リング型鑄造体

2のようなリング状のものをを用いた。図1の鑄造体の大きさは実際臨床で作製する場合とほぼひとしい寸法で、長さ約55mm、バーの幅は中央で約5mm、両端で約10mm、厚さは1.5mmでこれに直径2mmのワックススプルーを両端に立てた。図2の鑄造体の寸法は、太さが2mm、内径が約20mmのリングに直径1.4mmのスプルーを一本立てた。鑄造体の形としてこのようなループ状のものを選んだ理由は、鑄造体にスプルーを二本以上立てた場合には必ずどこかにこのようなループ状になるところが生じ、しかも必ず切断されることと、ループ状の鑄造体に鑄造応力が存在するときにはループの一部を切断することによりループは変形し、この変形によつて鑄造応力の存在が直観的にわかると同時に、変形の程度により鑄造応力の大小もある程度推察できると考えたからである。なお、念のためにことわつておくが、図2のリング型鑄造体は決して鑄造鉤などを意味するものではなく、あくまで切断による変形を測定するために選んだ便宜的な形態にすぎない。

鑄造体には、図1、図2に示す場所にあらかじめ約2mmの間隔で二カ所に標点を付けておき、この標点間でループを切断する(図3)。切断は厚

図3 投影機で見た cut 部

さ0.3mmのレジンジスクにより注水のもとに注意深く行ない、切断前と切断後の標点間距離の差 ΔC (C字型 Cut部の意)を測定した。同時にループの外径の変化 ΔD (Diameterの意)も測定した。標点間距離および外径の測定には100~50倍の万

能投影機を用いた。

試片作製のための鑄造条件および使用材料は次のとおりである。

埋没材：而至製石英埋没材(混水率0.30)

松風製クリストパライト埋没材(混水率0.35)

埋没方法：一回練和、挿入埋没

鑄造リング：18・8ステンレス鋼製(厚さ1mm)
リング型試片の時、内径30mm、長さ40mm

パラタルバー型試片の時、内径80mm
長さ65mm

アスベスト裏装：松風アスベストリボン二層、ワゼリン塗布

鑄造機：小貫製遠心鑄造機(いわゆる別皿横型で廻転軸は垂直、金属の融解は鑄造リング上でなく水平にとりつけられたるつぼ中で行なわれる 図4参照)、スプーリング2.5回捲き

図4 使用した遠心鑄造機

予熱：埋没の翌日、電気炉で毎分 10°C の速度で加熱

鑄造後の冷却法：放冷(石綿板上に放置)

水冷(リング型は鑄造後35~45秒、

パラタルバー型は3分後に水中急冷)

金属および合金：

コバルトクロム合金 三菱金属製ステライト

D-2 溶融温度 $\sim 1410^{\circ}\text{C}$ 記号(D-2)

白金加金 石福製 鑄造鉤用 PGA-2
 ~900°C(P-2)
 銀パラジウム合金 而至製アローキャスト
 ~1040°C (A)
 銅合金 林合金製プロゴールド ~870°C (P)
 18K金銅二元合金 自家製 ~890°C
 純金 1063°C
 鑄型の予熱温度は埋没材の変態点を考慮に

図 5-A 使用した石英埋没材の熱膨脹曲線
 W/P 0.30

図 5-B 使用したクリストバライト埋没材
 の熱膨脹曲線 W/P 0.35

いて、室温、250、450、600、700、800°C の六種類を選び、いずれの場合も一度 800°C まで加熱して 10 分間保持した 後炉冷し、下降途中の各温度においてさらに 10 分間保持した 後鑄造を行なった。

図 5-A、図 5-B は、使用した石英埋没材とクリストバライト埋没材の加熱冷却による膨脹曲線、図中の鎖線は使用した銅合金 P の膨脹曲線を示す。

焼鈍実験は、切断したリング型試片をインソライト製台上に水平に置き、電気炉で毎分 10°C、700°C まで加熱、5 分間保持後炉冷した。

標点間を測定して ΔC 、 ΔD を求め、主に鑄造前の鑄型予熱温度による相違を調べた。

X線による試験はリング型試片についてのみ行なったが、要領および結果はまとめて考察の 4.7 に記載する。

図 6 六角棒状鑄造体
 (一端同軸にスプルー)

図 7 六角棒状鑄造体
 (中央部直角にスプルー)

鑄造体表面の切削による寸法変化の測定には図 6、図 7 のような六角棒状の鑄造試片を用いた。試片は、対角 6 mm の六角棒状のインレーワックスを長さ 25 mm に両端を平行に仕上げ、図の位置に熔融ワックスで半球状の標点をつけて蠟型を作り、蠟型一端の中心部に直径 2.5 mm のスプルーを立て、図 6 の一端同軸スプルー型鑄造体は直径 30 mm、長さ 45 mm、図 7 の中央直角スプルー型鑄造体は長さ 40 mm、長径 45 mm、短径 35 mm の楕円形鑄造リングに前述の方法に従って埋没、鑄造して作製した。鑄造体の標点間距離を、スプルー切断前、スプルー切断後、および表

面切削後に測定し比較した。鑄造体表面の切削は而至カーボラダムポイントの11番(車輪状)を用いて図の相接する三面 a, b, c についてほぼ均等に0.1mmになるように行なつた。切削量の測定は、各面切削後重量の減少を測定し厚さに換算してほぼ0.1mmになるようにした。金属は銅合金P、銀パラジウム合金A、18K金・銅二元合金の三種類を用いた。

熱処理による寸法変化の測定に用いた試片は同じく図6、図7に示す形のもので、埋没、鑄造の方法もすべて同じである。金属は市販の歯科用合金の中から銅合金P、銀パラジウム合金A、白金加金P-2の三種類を選び、基礎実験用に18K金・銅二元合金を合金して用い、対照として純金を用いた。

鑄造試片の熱処理は450Wの電気炉を用いて行ない、製造家の指示のある場合はそれに従い、指示のないものについてはJIS、A.D.A規格などを参照して表1のような条件で行なつた。水冷の方

表1 熱処理の条件

	軟化熱処理	硬化熱処理
18K 金 銅 合金	700°C に3分間保持の後水冷*	450°C に20分間保持の後炉冷**
白 金 加 金	750°C "	"
銀パラジウム合金	800°C "	"
銅 合 金	700°C "	700°C まで徐熱し5~10分間保持の後炉冷

* 25°C、5lの水中に急冷

** 450→250°Cに約15分、250→室温に約2時間、この実験の室温は21±5°C

法は、所定の温度に所定時間加熱した棒状試片を25°C、5lの水中に投じて急冷した。軟化熱処理と硬化熱処理はくり返し数回行ない、各熱処理後に標点間距離を測定すると同時に熱処理の効果判定の一法としてマイクロビツカース硬さ計による硬さの測定を行なつた。

3. 実験結果

3.1) リング型試片の切断による変化

3.1.1) 図8は、図2のリング型試片をクリストバライト埋没材で鑄造し、放冷後切断したときの寸法変化と鑄型温度の関係を示すものである。金属は銅合金Pである。(+)は切断によつてリングが開いたもの、(-)は閉じたものを意味する。

図8 鑄型温度対 cut による変形(クリストバライト埋没材の場合) 実線 ΔC 、破線 ΔD

実線は切断部附近の寸法変化(ΔC)を示し、破線はリングの外径の寸法変化(ΔD)を示す。

この結果から、当初に予想したような鑄型温度のちがひによる差はあまり認められず、250°C以上では全体として(-)になる傾向を示してはいる。

が、ほとんど寸法変化はない。室温の鑄型に鑄造した場合になつてはじめて切断による寸法変化があらわれ、切断部変化 ΔC が-43 μ 、直径変化 ΔD が-18 μ (約0.1%)とやや問題になる程度リングは小さくなっている。それと同時に、ばらつきも他のものに比較して最も大きい。

3.1.2) 図9には他の条件は全く同一にし、埋没材のみを変え、クリストバライト埋没材のかわりに石英埋没材を用いたときの結果が示されている。この場合も、クリストバライト埋没材を用いたときとほとんど同じで全体として(-)になる傾向は示すが250°C以上ではほとんど寸法変化は認められず、室温の場合にのみ大きな寸法変化を示している。

図9 cut による変形(石英埋没材の場合)

表2 リング型試片

	Progold	Stellite-D2
溶 融 温 度	~870°C	~1410°C
鑄 型 温 度	20°C	20°C
寸法変化 ΔC	-45±16	-29±2
(μ) ΔD	-21±2	-16±4

3.1.3) 表2には、コバルトクロム合金 D-2 を用いて鑄造した場合の結果を示す。埋没材はクリストバライト埋没材を用いた。上記の銅合金 P の場合から推測して、最も大きな寸法変化を示すと考えられる室温の鑄型に鑄造した場合について調べてみたが、切断による寸法変化は銅合金 P の場合よりも小さい値を示した。

3.2) パラタルバー型試片の切断による変化

表3には、図1のパラタルバー型試片についての結果を示す。金属は銅合金 P を、埋没材は石英埋没材を用いた。この場合には、切断による寸法

表3 スプルー2本をもつパラタルバー型鑄造体の場合

鑄 型 温 度	20°C	800°C
寸法変化 ΔC	-43 (83)*	-58
(μ) ΔD	-19	-1

変化は切断部 (ΔC) でとくに大きく現われるようである。例えば鑄型温度が 800°C の場合、ΔC は 58 μ も変形しているがリングの場合の直径に相

当するバーの部分はほとんど変形を示していない。また室温の鑄型に鑄造した場合には切断部は立体的に変形し、閉じるだけでなく 80 μ 以上*のくい違いが認められ、バーの部分でも 20 μ 近く変形していることがわかる。

3.3) 鑄造後水冷された試片の切断による変化

以上の実験結果はいずれも鑄造後放冷したものであるが、次に鑄造後水冷した場合についての結果を表4に示す。鑄造後に水冷する方法は埋没材がとりやすく鑄造体がきれいに仕上るということと、金合金などでは軟化状態でとりだせるという二つの利点のために広く行なわれ、Skinner らも残り湯が暗赤色になつたらすぐ水中に入れるようにいつている。この実験では残り湯の赤みがなくなつたときを一応のめやすに選び、中型のときは鑄造後 35~45 秒後に、大型のときは 3 分後に水中に入れた。そのときの結果は表4に示したように、放冷の時とはかなり傾向が異なっている。即

表4 鑄造直後水冷の場合

	(リング型)			(パラタルバー型)
鑄型温度	20°C	450°C	700°C	700°C
寸法変化 ΔC	-44±3	-7±6	-259±7	-382±29
(μ) ΔD	-22±2	+5±3	-87±1	-160±40

ち、700°C の鑄型温度の時に最も大きな寸法変化を示し、ΔC で約 -260 μ、ΔD で約 -90 μ (約 0.5 %) という極めて大きな変形を示したが、450°C および室温の時には放冷の時とほぼ同じ程度の寸法変化にとどまっていることである。パラタルバー型試片の場合には水冷による影響はさらに大きくあられ、700°C の鑄型に鑄造して水冷したものでは ΔC で約 -400 μ、ΔD でも約 -160 μ (約 0.3 %) の寸法変化が認められた。この場合、厚さ 0.3 mm のジスクで切断した後、切断面が接触してしまっているため、さらに厚いジスクで切断すれば変形は一層大きくでるものと考えられる。

3.4) 焼鈍による変化

ループ型鑄造体の一部を切断した場合に起こるループの変形は明らかに鑄造応力の解放によるためであるが、この場合、鑄造応力の全部が解放さ

れたわけではなく、一部は依然残留していると考えられる。この残留応力は、鑄造体を焼鈍することにより減じうるし、同時に変形を伴うはずであるから切断後の鑄造体を徐熱し700℃で5分保持した後炉冷し、焼鈍前後の寸法を測定した。

図10 焼鈍による変形(クリストパライト埋没材の場合) 実線 ΔC , 破線 ΔD

図11 焼鈍による変形(石英埋没材の場合)

結果を図10、図11に示す。図10はクリストパライト埋没材、図11は石英埋没材を用いた時の結果であるが、両者共ばらつきが極めて大きく、同一温度の鑄型に鑄造したものでも焼鈍によりリングは閉じるものもあれば開くものもあり、一定していない点が特長である。また、各埋没材の変態点に近い温度で鑄造したものの方がばらつきが最も大きいことが認められる。すなわち、クリストパライト埋没材では250℃でばらつきは最大となり、

石英埋没材では600℃で最大となっている。さらに250℃で鑄造したものは、クリストパライト埋没材では平均して(－)になっているが、石英埋没材では(＋)になっていることなどが認められる主な差異である。焼鈍による寸法変化については図6、図7の六角棒状鑄造体を用いてさらに実験検討したが、その結果は熱処理による寸法変化のところで述べる。

3.5) 鑄造体の表面切削による変化

図6の一端同軸スプルー型六角棒状鑄造体について、スプルー切断前、スプルー切断後、表面切削後に鑄造試片の標点間距離を測定してスプルーの切断および表面切削による寸法変化を求めたが、銅合金P、銀パラジウム合金A、18K金・銅二元合金のいずれにおいてもほとんど変化が認められなかつたので結果は省略する。

図7の中央直角スプルー型鑄造体について同じくスプルーの切断と表面切削による寸法変化を測定したが、その結果は表5に示す。この場合のよ

表5 切断、切削、熱処理による寸法変化

	反りの回復 (δ の減少 μ)	長さの変化 (μ)
1. スプルー切断	15	0
2. 表面切削	7	0
3. 軟化熱処理	153	-38
4. 硬化熱処理	0	-30

図12 Y字型に反った鑄造体

うに棒状鑄造体の中央部に直角にスプルーがついているものでは図12のようにY字型に反った鑄造体が得られ、しかもその反りの程度はスプルー切断、表面切削によつて変化するので、鑄造体の標点間距離(長さの変化)と同時に反り(図の δ)も測定した。銅合金Pと銀パラジウム合金Aにおいては反りは起こらず、また長さの変化もほとんど認められないので省略し表5には18K金・銅二元合金の場合についてのみ示す。18K金・銅合金

の場合、鑄造直後の鑄造体にみられる反り(δ)は150~220 μ にもおよぶが、スプルーを切断することによつて15 μ ほど反りは減少し、さらに表面の切削によつて7 μ ほど減少する。この反りは鑄造体を加熱することによつて完全になくなる。長さの変化は18 K 金・銅合金の場合もほとんど認められない。

3・6) 純金鑄造体の熱処理による変化

図13に純金鑄造体の熱処理による寸法変化を

図13 純金鑄造体の熱処理による寸法変化

示す。埋没材はクリストバライト埋没材、鑄型温度700°C、遠心鑄造で鑄造後は放冷して作製した鑄造試片のスプルーを切断し、切断後の標点間距離を測定してこれを基準にし、続いて軟化熱処理および硬化熱処理をくり返して数回行ない、各熱処理後の標点間距離を測定して熱処理前の標点間距離と比較した時の寸法変化を%で示したもの

図14 18 K Au-Cu の熱処理による寸法変化 (圧迫鑄造、鑄造後放冷)

図15 18 K Au-Cu の熱処理による寸法変化 (圧迫鑄造、鑄造後水冷)

図16 18 K Au-Cu の熱処理による寸法変化 (遠心鑄造、鑄造後放冷)

で、(+)は膨脹、(-)は収縮を意味する。純金鑄造体では当然ながら熱処理による寸法変化は認められない。

3・7) 18K金・銅二元合金鑄造体の熱処理による変化

18K 金・銅合金を用いて行なつた結果を図14~図17に示す。図14は圧迫鑄造で鑄造後放冷、図15は圧迫鑄造で鑄造後水冷、図16は遠心鑄造で鑄造後放冷、図17は遠心鑄造で鑄造後水冷して作製した鑄造試片をくり返し熱処理した時の寸法

図 17 18 K Au-Cu の熱処理による寸法変化
(遠心鋳造，鋳造後水冷)

変化を示すもので，スプルー切断後で熱処理前の寸法を基準にし，埋没直前の蠟型寸法および各熱処理後の寸法を比較した時の変化が%で示されている。

これらの結果からいえることは，いずれの場合においても軟化熱処理によつて鋳造試片は膨脹し，硬化熱処理によつては逆に収縮しているということである。しかも軟化熱処理と硬化熱処理を交互にくり返し行なうと，膨脹と収縮は規則正しく交互に現われ，さらに膨脹量（または収缩量）は常に一定ではば0.2%を示している。

図 15 の中に破線で示したものは，五例の鋳造試片中の一例にみられたもので，三回目の熱処理から異常に膨脹しはじめています。これは図 18 に示すように，熱処理のくり返しによつて結晶粒界に集中的に歪と酸化が加わり，遂にはそこに亀裂を生じた結果であつて，このようになってきたものは極めて脆く簡単に手で折ることができる。この現象は熱処理が三回以上にわたつてくり返された場

図 18 熱処理の繰返しによつて生じた亀裂，18 K Au-Cu (全長 25 mm)

合にはしばしば認められることで，肉眼でこのような亀裂がはつきりと認められた場合はそのデータは除外した。それでも，四つのグラフが全てわずかに右上りの傾向を示しているのは，肉眼には認められないような小さな亀裂が熱処理のくり返しによつて生じた結果であると考えられる。

二回目以後の熱処理による寸法変化は，鋳造条件には影響されず，四つのグラフには全く差が認められないが，一回目の熱処理による寸法変化には鋳造応力の解放による寸法変化も含まれているために鋳造条件によつて影響され，四つのグラフの間には明らかに差が認められる。鋳造収縮および最初の熱処理による寸法変化を中心に四つのグラフを比較すると次のようなことがわかる。まず鋳造収縮については，圧迫鋳造の場合は遠心鋳造に比べ鋳造収縮補償不足値が大きいということである。特に遠心鋳造で鋳造後放冷（図 16）の場合は鋳造収縮補償不足値は(－)になっている。すなわち蠟型よりも大きい鋳造体ができていることが第一の特長といえる。次に最初の熱処理による寸法変化の中で特異な現象の見られるのは，同じく遠心鋳造で鋳造後放冷の場合で，最初の軟化熱処理によつて膨脹せず逆に収縮がみられ，続いて硬化熱処理を行なうとさらに0.2%近く収縮していることである。同じ遠心鋳造によるものでも，鋳造後水冷した場合（図 17）には最初の軟化熱処理によつてわずかながら膨脹がみられ，また同じく鋳造後放冷の場合でも圧迫鋳造の場合にはやはり最初の軟化熱処理によつて膨脹が起こっている。

このように遠心鋳造で鋳造後放冷の場合には鋳造収縮補償不足値および最初の熱処理による寸法変化において他の場合とちがった結果を示したが，その原因を追求する目的で二三の実験を追加してみた。図 19 は遠心鋳造で鋳造後放冷して作製した試片 12 例について，鋳造収縮補償不足値と最初の熱処理による寸法変化との関係を示すもので，12 例中 11 例は蠟型より大きい鋳造体ができており，同じく 12 例中 11 例では最初の軟化熱処理で収縮がみられた。

さらに，図 19 からわかる重要な点は，補償不足値と最初の熱処理による寸法変化との間には相関関係が認められ，蠟型と鋳造体の寸法の差の大

図 19 18 K Au-Cu の鑄造収縮補償不足値と熱処理による寸法変化との関係

きいもの、即ち蠟型よりも大きく伸びた鑄造体は熱処理によつて大きく収縮し、差の小さいもの、即ち蠟型よりさほど伸びていない鑄造体では熱処理による収縮も小さいということである。

次に他の条件はすべて同じで埋没材の種類だけをかえた時の結果を図 20、図 21 に示す。図 20 は石英埋没材を用いた場合、図 21 は第一埋没に石

図 20 18 K Au-Cu の熱処理による寸法変化(石英埋没材の場合)

図 21 18 K Au-Cu の熱処理による寸法変化

第 1 埋没：単味クリストバライトをエチルシリケートのゾルで練和

第 2 埋没：クリストバライト埋没材

膏を含み単味のクリストバライトをエチルシリケートのゾルで練和したものを用い、アルコールとアンモニアの飽和雰囲気中でゲル化させた後、第二埋没に従来の石膏系クリストバライト埋没材を用いた場合である。石英埋没材の場合は遠心鑄造で鑄造後放冷の条件にもかかわらず補償不足値は(+)で約 0.5%，最初の軟化熱処理による寸法変化は膨脹という結果で、クリストバライト埋没材の時のような特異な現象は示さなかつた。一方第一埋没に石膏系埋没材を用いず、エチルシリケートを結合材としたクリストバライトを用いた時には、図 21 のように補償不足値は(－)で蠟型より大きい鑄造体ができているが、最初の軟化熱処理では、わずかではあるが膨脹を示し、石膏系クリストバライト埋没材の時のように収縮は示していない。

図 22、図 23 に 18 K 金・銅合金の鑄造試片の熱膨脹(収縮)曲線を示す。図 22 は遠心鑄造で鑄造後放冷して作製した試片、図 23 は鑄造後水冷して作製した試片で、図の左側は鑄造後第一回目の加熱・冷却曲線、右側は左側に続いて行なつた第二回目の加熱曲線を示す。これらのグラフを比較していえることは、放冷の場合も水冷の場合も第一回の加熱の時に 420～430℃ のところで急激な

図 22 18 K Au-Cu の熱膨脹曲線
(鑄造後放冷の試片)

図 23 18 K Au-Cu の熱膨脹曲線
(鑄造後水冷の試片)

収縮(約0.15~0.20%)がみられるが、第二回の加熱時にはそのような収縮はみられず、かわりに同温度のところに不連続点が現われることである。

放冷の場合と水冷の場合のちがいは第一回の加熱の時にだけ 現われ、 しかも 420°C の不連続点

に至るまでの膨脹量のちがいがその主なものである。

以上はいずれも、図 6 の一端同軸にスプルーのある鑄造体についての実験結果であるが、次に図

図 24 18 K Au-Cu の熱処理による寸法変化
(T型、長軸を水平にして鑄造した場合)

図 25 18 K Au-Cu の熱処理による寸法変化
(T型、長軸を垂直にして鑄造した場合)

7の中央にスプルーをつけた鑄造体についてクリストバライト埋没材を用いて遠心鑄造後放冷して作製した試片についての結果を示す。図24には鑄造体の長軸を水平にして鑄造した場合、図25には垂直にして鑄造した場合を示す。これらの場合ばらつきが極めて大きく補償不足値が(+)のあれば(-)もあり、また最初の熱処理による寸法変化も膨脹を示すものもあり収縮を示すものもあつて規則性がないように思われるが、その原因はこの場合鑄造体が図12のように反つたものができるため標点間距離(長さ)を測定するとこのようにばらつくのであろう。図12の δ を測定して反りの具合をみると、最初の軟化熱処理でこの反りは全くみられなくなり、それ以後の熱処理においては δ の変化は全く測定されず、長さの変化の方は軟化熱処理で0.2%の膨脹、硬化熱処理で0.2%の収縮を規則正しく示した。

3・8) 市販合金鑄造体の熱処理による変化

次に市販の歯科用合金三種、銅合金P、銀パラジウム合金A、白金合金P-2を用いて熱処理による寸法変化を測定した。まず、鑄型の予熱温度との関係を調べる目的で、室温、250、450、700℃

表6 焼鈍、焼入れによる寸法変化

鑄型温度(℃)	鑄造収縮補償不足値(%)	第1回焼鈍による寸法変化(μ)	第2回焼鈍による寸法変化(μ)	焼入れによる寸法変化(μ)
A 25 mm 鑄造後放冷				
700	0.41	-1	-3	+4
450	0.57	-3	—	+3
250	0.92	-10	—	0
室温*	1.82	-6	-2	+5
B 25 mm 鑄造後水冷				
700	0.55	-6	-3	+3
室温	1.88	-10	-4	+3
C 50 mm 鑄造後放冷				
600	0.20	-13	—	—
室温	1.29	-16	—	—

鑄造収縮補償不足値(%)

$$= \frac{\text{蠟型の寸法}-\text{鑄造体の寸法}}{\text{蠟型の寸法}} \times 100$$

*室温は $21 \pm 5^\circ\text{C}$

の四種類の鑄型温度で鑄造を行ない試片を作製した。試片の形は図6の一端同軸スプルー型のもので、クリストバライト埋没材、遠心鑄造で鑄造後は放冷または水冷で、銅合金Pを使用した。鑄造収縮補償不足値を算出すると表6Aおよび図26

図26 鑄型温度と鑄造収縮補償不足値の関係
実線は鑄造後放冷、破線は鑄造後水冷

に示すようになり、埋没材の熱膨脹曲線から計算で予想される値にほぼ近い値がえられていることがわかる。このことから、試片作製のための鑄造が予定通り完了したことが確認できた。こうして作製した鑄造試片を熱処理してその寸法変化を測定したが、その条件は焼鈍は電気炉で毎分 10°C 上昇、 700°C まで加熱、10分間保持後炉冷し、焼入れは 700°C の電気炉に3分間保持した後水中急冷した。その時の寸法変化を表6Aに示す。最初の焼鈍による寸法変化をみるとわずかに収縮を示しており、しかも低温の鑄型に鑄造したもののほど収縮の程度は大きく、特に 250°C においては寸法変化もばらつきも最大となつている。しかし変化量としては極めて少なく、線収縮率に換算すると0.05%以下となる。二回目の焼鈍による寸法変化は最初の焼鈍の時と同じく収縮を示したが、鑄型温度のちがひによる差は認められない。焼入れによる寸法変化は焼鈍の時とは逆に膨脹を示している。しかし変化量はやはり少なく、また鑄型温度の違いによる差も認められない。

以上はいずれも鑄造後放冷して作製した試片についての測定であるが、鑄造後水冷して作製した試片についての同様な実験の結果を図26の破線

および表 6 B に示す。図 26 の破線で示した 鋳造収縮補償不足値をみると、平均値は実線で示した放冷のものとはほぼ同じ値を示しているが、ばらつきは極めて大きく、そろった試片の得られにくいことを示している。表 6 B の第一回目の焼鈍による寸法変化をみると A の放冷したものに比しわずかに大きい値となつてはいるが、二回目以後は放冷したものに比較して特に差は認められない。焼鈍により収縮し焼入れにより膨脹する傾向は同じである。

次に試片の長さの違いによる差を調べる目的で、長さ 50 mm の試片について前と同じ実験を行なつた。結果を表 6 C に示す。鋳造収縮補償不足値は 25 mm の試片より小さい。すなわち蠟型に近い大きさの鋳造体が得られていることを示す。焼鈍による寸法変化はやはり収縮で、線収縮率で比較して 50 mm の方がわずかに大きい。

いわゆる熱処理の効く市販の歯科用合金二種類について表 1 の条件で熱処理した時の寸法変化を測定した。試片の長さは 25 mm、鋳型温度 700°C で遠心鋳造し鋳造後は放冷したものと水冷したものの二群について、それぞれ軟化熱処理と硬化熱処理とを交互にくり返し行ない、その時の寸

法変化と、熱処理の効果判定のめやすとしてマイクロビッカースによる硬さの測定を行なつた。結果を図 27 に示す。熱処理による寸法変化の傾向は銀パラジウム合金も白金加金も同じで、軟化熱処理で膨脹し、硬化熱処理により収縮している。この傾向は 18 K 金・銅合金の時の結果と同じである。熱処理の効かない銅合金の場合にもこの傾向はわずかにみられ、軟化熱処理に相当する焼入れで膨脹し、硬化熱処理に相当する焼鈍で収縮している。熱処理による膨脹量（または収縮量）は合金の種類によつて異なり、銀パラジウム合金では 0.05 %、白金加金では 0.2 %、銅合金では 0.05 % 以下であつた。熱処理による硬さの変化は寸法変化の大きい白金加金で大きく、寸法変化の小さい銀パラジウム合金では硬さの変化も小さく、寸法変化のほとんどない銅合金では硬さの変化もほとんどなく逆に焼入れによつて硬さがわずかに増しているほどである。

4. 考 察

4.1) リング型試片の切断による寸法変化について

まず、図 2 のリング型鋳造体の場合、鋳型温度に関係なく切断後リングは閉じる傾向を示しているが、これは次のように説明されよう。鋳型の中の金属と鋳型の熱収縮量を図 4、5 の熱膨脹曲線によつて比較すると、いかなる温度の鋳型に鋳造した場合でも金属の収縮量の方が常に大きい。冷却中、埋没材の変態点において埋没材が急速に収縮する時にも、金属はその温度にまで冷却される間に相当収縮しており、埋没材が鋳型の中の金属を外からしめつけるような状態になることはない。したがつてリング型の鋳造体は常にその芯の埋没材をしめつけるような状態で冷却される。すなわち、リングの外周は鋳型壁と離れる傾向にあり応力を受けることは比較的少なく、内周は大きな引張り応力を受けていることになる（断面内に不均一に分布する応力）。このリングの一方所を切断すれば、リング内周の引張り応力が解放されてリングは閉じる。

図 27 市販合金の繰返し熱処理による寸法変化と硬さの変化、実線は鋳造後放冷、点線は鋳造後水冷

次に切断部の変形量(ΔC)と外径の変形量(ΔD)を比較すると常に ΔC の方が大きく、 ΔD の2~3倍の値を示していることがわかる。このことから、切断によつてリングが小さくなる場合、決して相似的に小さくなるのではなく、スプルー付着部を中心として二つの半円弧が開閉するように変形していることがわかる。このことは、スプルー付着部付近が残り湯との間の埋没材に妨げられて自由に収縮できないため、この部分に大きな鑄造応力(引張り応力)を生ずるためである(断面内に均一に分布する応力)。切断による鑄造応力の解放にさいしては、スプルー付着部と残り湯との間の引張り応力の解放による変形が、上述の断面内不均一分布の応力解放による変形と共に起こっていることを示す。

第三は、鑄型温度が250°C以上の鑄造体では切断による寸法変化がほとんどなく、それ以下になつてはじめて大きな寸法変化を現わすことについてであるが、これは金属の再結晶温度で説明されるようである。用いた銅合金Pの再結晶温度は加工度30%のもので100~150°C間に回復と重なつて現われるようであり、条件が変つてもほぼ250°C以下であると考えられる。再結晶温度以上の温度で受ける応力は内部応力として残留することは少なく、それ以下の温度で受けた応力が内部応力として残留するため、250°C以下の予熱温度で鑄造された試片で、はじめて切断による大きな寸法変化が現われたものと考えられる。

4.2) リング型試片の焼鈍による寸法変化について

4.2.1) 再結晶温度以上での不均衡は、切断によつてはあまり現われないが、この実験や一般に歯科で行なっている鑄造は、工業鑄造にくらべかなり急冷であることと、埋没材が砂型より強いことから、かなりの潜在的な応力が考えられる。

4.2.2) 再結晶温度以下での残留応力は切断によりかなり解放されるが、皆無になつたわけではなく新たな釣合いを保っているにすぎない。したがつて焼鈍によりさらに変形する可能性がある。

4.2.3) 試料として用いた中溶銅合金Pの熱膨

脹曲線には470°C付近にわずかな不連続点があり、これはCu-Zn系の β' - β 転移(order-disorder transition)と考えられる^{12,13)}。焼鈍によりこの温度を経過すると寸法変化の可能性がある。

1)の応力、とくにスプルー付着部付近に分布する引張り応力の解放が焼鈍によつて現われ、これに2),3)による変化が重なつた結果、大きなばらつきを示したものと思われる。平均値のみをみると、各使用埋没材の変態点すなわち石英573°C、クリストバライト180~270°C付近の予熱温度で鑄造された試片が最も変化が少なく、より高温・低温ともやや変化が大きくなつていいるが、ばらつきも極めて大きいため明確にはいえない。

4.3) 六角棒状試片の切断、切削による寸法変化について

図7の中央部直角スプルー型六角棒状試片(T字型試片)においてはY字型に反つた鑄造体ができ、スプルーの切断、表面切削、熱処理の一連の操作によつて鑄造体はその反りを回復しようとする方向(T字型にもどろうとする方向)に変形を示した。反りの回復の程度は各操作によつて異なり、スプルー切断では反りの約10%が回復し、表面切削では5%が回復し、残り85%は第一回の熱処理の時にすべて回復した。これからみると、表面切削による膨縮変形(反りの回復)は極めて小さいとも考えられるが、この実験に用いた鑄造試片の比表面積が小さいこと、および鑄造床のようなものでは棒状よりは比表面積が大きいことなどを考え合せると、むしろたとえわずかにしろ表面の切削によつて鑄造体の寸法形状に変化が生じたという点を強調しておきたい。

Y字型に反つた鑄造試片が、加工および加熱によつてT字型にもどろうとする傾向については、リング型試片の切断および焼鈍による変形と合せ考えると理解しやすい。すなわちT字型試片およびリング型試片共に、鑄造体と残り湯との間にはスプルーを介した引張り応力があり、その結果歪んだ鑄造体ができると考えられる。リング型試片の一部切断によつて、応力の一部が解放され、リング型試片は閉じる方向に変形する。焼鈍にさい

しては、Y字型、リング型試片共にスプルー付着部付近の応力が解放され、Y字型試片はT字型にもどり、リング型試片はスプルー付着部を中心にしてT字型にもどる方向（すなわちリングの開く方向）に変形すると考えられる。したがってスプルーの太さ（この実験に用いたスプルーは棒状試片で2.5 mm、リング型試片で1.4 mm のかなり太いものである）および残り湯の量が铸造応力発生の重要な要因の一つと考えられる。

同じ六角棒状铸造体でも一端同軸にスプルーのついた図6の試片では上述のような反りの現象は認められず、またスプルー切断や表面切削による長さの変化も認められなかったが、このことは铸造応力の発生が、スプルーおよび残り湯を含めた铸造体の形態によっても影響されるということの具体的な一例で、スプルーの立て方に対して一つの示唆を与えるものである。例えば図28 A, B のような場合はスプルーと铸造体とがループを形成するために、スプルーの切断によつて铸造体に変形が起こり、また铸造体に铸造応力による反りの起こる危険があるが、図28 C のような場合には

切断による変形および反りの発生をかなり防止することができよう。

4.4) パラタルバー型試片の切断による寸法変化について

パラタルバー型試片のようにやや大型の铸造体では、スプルーを切断した時の変形量が大きくなるだけでなく変形の様子も複雑になってくる。铸造体が大きくなり、しかも形が複雑になればそこに生ずる铸造応力も複雑になるのは当然で、これの解析は容易ではない。

4.5) 铸造後水冷した場合について

铸造後に水冷した場合には、高温の鑄型に铸造したものを水冷したほうが切断による寸法変化が大きく認められたが、これは次のように考えられる。水冷によつて埋没材が外から急冷される。この際、埋没材は必ずしも崩壊しない。したがって、埋没材は急速に大きく収縮し、鑄型の中の金属をしめつけるような状態で冷却されることが多い。また、鑄型温度の高いほど水冷された場合の埋没材の収縮量は大きいから内部応力も大きくなる。この時、リング型試片に生ずる内部応力は引張り応力であり、切断によつてリングは閉じる。鑄型温度が450℃ および室温の場合、水冷による影響がほとんど認められないのは、その温度からの水冷では埋没材の収縮が鑄型の中の金属をしめつけるに至らず、リング型試片はその芯の埋没材をしめつけるような状態（すなわち放冷した時と同じ状態）で冷却するためと考えられる。

4.6) コバルトクロム合金D-2で铸造されたリング型試片の切断による寸法変化について

銅合金Pとコバルトクロム合金D-2の熔融温度を比較すると、銅合金Pが約870℃、コバルトクロム合金D-2が約1410℃で後者の方が540℃ほど高い(表2参照)。したがって同じ温度の鑄型に铸造した場合、コバルトクロム合金の方が鑄型との温度差が500℃以上大きくなる。鑄型との温度差が大きければ、铸造体に生ずる铸造応力も大きくなると考えられるが、切断による寸法変化はむしろ銅合金の場合よりやや小さくなつてい

図28 スプルーの立て方と埋没方向

図 29 X線カメラと試片, cut 前(1)後(2)の背面反射回折線

る。このような結果が現われた理由の第一は、コバルトクロム合金のように高弾性率の合金では、同じ大きさの鑄造応力があつても、その解放によつて現われる変形は銅合金より小さくするためと考えられる。理由の第二は、Roydhouse らもその報告⁴⁾の中で推察していると同様に、コバルトクロム合金はより熱間強度が高いため、埋没材の熱間強度との関係において、凝固収縮する際には埋没材を破壊または変形させて収縮するため、鑄造体に生ずる鑄造応力は銅合金Pの場合よりも小さいためと考えられる。

4.7) X線試験

太さ 2 mm, 直径 20 mm のリング型銅合金試片についてX線試験を試みた。Cu ターゲット約 30 kV, 10 mA, 約 0.5 mm ϕ のスリットを使用し、平面フィルム, 試料フィルム間 48.3 mm, 背面反射法写真を撮影, 回折リングの line broadening によつて切断前後の比較を行なつた。鑄造組織がかなり粗大なため試片はリング軸を垂直軸として約 30° 振動させ, フィルムは入射X線を水平軸として毎分 1 回転, 露出約 30 分である。図 29 は, 使用したカメラおよび回折線を示す。

Photo tracer によつて回折線の半価幅を比較すると切断前(1)で 0.70 mm, 切断後(2)で 0.68 mm となり, わずかに(2)の broadening が少なく, 切断によりリング外周部の内部応力がわずかに減少

していることを示すようであるが, 実験誤差が大きいため断定はできない。双極 GM 管等を用いたやや精密なX線非破壊検査法もあるが, この研究の主目的はむしろスプルー等の切断や切削・研摩・腐食等による変形の追跡, いわば破壊検査にあるためこの程度にとどめた。

4.8) 18K金・銅二元合金の熱処理による寸法変化について

4.8.1) 18K金・銅二元合金の鑄造試片を熱処理すると, 軟化熱処理で 0.2% の膨脹, 硬化熱処理で 0.2% の収縮が認められた。18K金・銅合金は

図 30 Au-Cu 系状態図

表7 600°C より急冷された金・銅合金の格子常数
(α' 構造の格子常数は α の0.005 kX 以内である)

金, 重量%.....	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
格子常数.....	3.608	3.631	3.655	3.680	3.709	3.743	3.785	3.837	3.894	3.969	4.070

200°C より急冷された金-銅合金の格子常数 (正方晶形 α'')											
金, 重量%.....	65	70	75	80	85						
a, kX 単位.....	3.846	3.914	3.956	3.978	9.950						
c/a	0.976	0.934	0.926	0.933	0.981						

図30の状態図*に示されるように424°C以上の温度においては固溶体(不規則格子)をなし、424°C以下の温度においてはAuCuの規則格子を形成する。700°Cから急冷する軟化熱処理によつて高温で安定な不規則格子の状態が室温にもちこされる。これを424°C以下で焼戻すか、450°Cに再加熱後炉冷する硬化熱処理により不規則格子が規則格子に転移する。この規則-不規則転移に際しては結晶格子の変化を伴い、AuCu規則格子の生成によつて面心立方から面心正方に変わる。そのときの格子常数の変化も測定されている(表7)。表7の格子常数から計算によつて規則格子生成による体積変化を求めると約0.7%の収縮になる。実験に使用した18K金・銅合金は原子%でほぼ1:1で理論上は規則-不規則転移に合金の全容が関与し、したがつて規則格子生成に伴う体積変化は最大となるはずである。実験の結果は線膨脹率で-0.2%となり、格子常数の変化から計算された値と偶然にもよく一致した。もちろん、0.7%の体積変化というのは単結晶が完全に規則-不規則転移を起こしたと仮定した場合の計算値であり、この実験で採用した熱処理条件(700°C 3分加熱後水中急冷、450°C 20分加熱後炉冷)で規則-不規則転移がどの程度おこつたか、また多結晶の場合どの程度になるか等不明の点も多いので、実験値と計算値が一致したからといって簡単に満足は

できない。しかし少なくとも歯科用合金の鑄造体を通常の方法で熱処理した場合の寸法変化についてはこの実験結果から推察することが可能であり、また0.2%という値からさほど大きくはずれた値ではないと云うことができる。この点に関しては市販の歯科用合金についての測定結果についての考察とともに次の4・9)で述べる。

4・8・2) 18K金・銅二元合金を用いての実験結果から、AuCu規則格子生成に伴う寸法変化の他に興味ある結果が二三得られた。その第一は、鑄造後最初に行なう熱処理の際には規則-不規則転移による寸法変化の他に鑄造応力の解放による寸法変化が含まれており、しかもその鑄造応力は鑄造の条件によつて影響されるということである。遠心鑄造と圧迫鑄造、鑄造後放冷と鑄造後水冷の組合わせから得られる四種類の鑄造条件、遠心鑄造で鑄造後放冷、遠心鑄造で鑄造後水冷、圧迫鑄造で鑄造後放冷、圧迫鑄造で鑄造後水冷で作製した各試片について、鑄造後最初の熱処理による寸法変化を測定比較すると明らかに差が認められ、それは結局鑄造応力の差で説明される。たとえば遠心鑄造-鑄造後放冷の場合、鑄造後最初の熱処理として軟化熱処理を行なっている。18K金・銅合金は軟化熱処理で約0.2%膨脹するはずであるが、この場合は逆に軟化熱処理によつて0.1%近くの収縮がおこっている。鑄造試片は鑄造後放冷されたものであるから、規則格子の生成がかなりおこっているはずである(マイクロビッカース硬さ試験の結果、鑄造後放冷したものは硬化熱処理したものより硬さが小さく、軟化熱処理と硬化熱処理のほぼ中間位の硬さを有することがわかつてい。したがつて鑄造後放冷したものは、規則格

* 金・銅の二元状態図にはまだ未確定のところが多い。規則格子にもAuCu, AuCu₃の他にAu₂Cu₃が存在するともいわれ、またAu₃Cuが存在するともいわれている。AuCuも高温で安定なAuCu II相と低温で安定なAuCu I相に分けたものもある¹⁴⁻¹⁶⁾。この状態図は1948年版のMetals Handbookから引用した。

子の生成がかなりおこつていゝと考へられる)。鑄造後放冷してできた試片を軟化熱処理すれば、硬さの変化から考へても放冷の時にできた規則格子は不規則格子になつてゐるはずで、したがつて寸法変化も膨脹がおこるはずである。ところが實際は収縮がおこるということは、規則-不規則転移以外の何か寸法変化に關与する因子の存在を考へなければならぬ。この因子として鑄造応力があり、これが熱処理の際の加熱(この場合は 700°C 3分)によつて解放し収縮をおこさせたと考へられる。したがつてこの場合の鑄造応力は試片の長軸方向に対する引張り応力である。この鑄造応力の発生機構の分析は簡単な問題ではないが、この場合は鑄型の中の溶融金属と鑄型壁との結合による熱収縮の妨害で説明がつくようである。鑄型に鑄込まれた金属はまず鑄型壁に接するところから凝固するがこの凝固層が鑄型壁と強く結合した場合にはそれ以後の金属の自由な熱収縮を妨げ、結局鑄造体は無理に伸ばされた状態のものになる。このようにしてできた鑄造体は鑄造収縮が小さく、鑄造応力として引張り応力を有し、再加熱等の場合鑄造応力の解放により収縮するはずであるが実験の結果もその通りである(図19)。

すなわち、鑄造収縮補償不足値をみると、不足値は(一)で、蠟型よりも大きい鑄造体ができてゐることがわかる。しかもばらつきが大きく $0 \sim -0.6\%$ におよんでいるが、ここで重要なことはこの補償不足値と最初の熱処理による寸法変化(収縮)との間には相関關係が認められることで、蠟型よりも大きく伸びた状態の鑄造体は熱処理によつて大きく収縮し、蠟型よりさほど伸びてゐない鑄造体では熱処理による収縮も小さいということである(図19)。蠟型よりも大きく伸びた鑄造体というのは、鑄型の中での熱収縮の妨害が大きいため無理に伸ばされた状態にあり、大きい鑄造応力を有し、したがつて熱処理の際の加熱によつてそれが解放された時におこる収縮も大きいのであろう。蠟型よりさほど伸びてゐない鑄造体では鑄型内の熱収縮の妨害が少ないために鑄造応力も小さく、熱処理の際の加熱による収縮も小さい

と考へられる。

このような現象は遠心鑄造で鑄造後放冷された試片に特にみられ、他の三つの条件の時には全くみられないか、ほとんどみられない。同じ遠心鑄造でも鑄造後水冷された試片では補償不足値は(+) (鑄造体は蠟型より小さい)になり、最初の軟化熱処理でわずかながら膨脹してゐる。鑄造後に水冷して作製した鑄造体は、マイクロビッカースによる硬さ試験の結果では軟化熱処理と硬化熱処理との中間に位置しており、予想される通りこれを軟化熱処理すればある程度の膨脹がおこるが前の場合ほどはつきりと鑄造応力の解放による収縮は確認できない。圧迫鑄造の場合も鑄造後放冷あるいは水冷した何れの試片にも、再加熱等の場合の鑄造応力の解放による収縮は認められない。鑄造収縮補償不足値は(+)で遠心鑄造の時より一層大きく、鑄造後放冷された試片を軟化熱処理すると、 0.15% の膨脹を示して遠心鑄造試片のような収縮は示さず、また鑄造後水冷したものを硬化熱処理すると、硬化熱処理だけによると考へられる 0.2% の収縮がみられるだけで、鑄造応力の解放による収縮と思われるものは認めれない。

4・8・3) このような鑄造応力の解放による収縮という現象は鑄造試片を加熱した時の熱膨脹曲線にも明らかに認められる(図22, 23)。遠心鑄造後放冷された試片と水冷された試片の熱膨脹曲線を比較すると放冷されたものは 420°C における熱膨脹が 0.72% であるのに対し、水冷されたものは 0.95% で、前者が 0.23% ほど小さい。 $420 \sim 430^{\circ}\text{C}$ の急激な収縮以後 700°C までの膨脹曲線と 700°C からの冷却曲線、さらに第二回目の熱膨脹曲線には、放冷されたものと水冷されたものとの間に差が認められない。 $420 \sim 430^{\circ}\text{C}$ にみられる急激な収縮は、転移点直下における規則格子生成による収縮と考へられるので、放冷されたものと水冷されたものとの 420°C における熱膨脹差 0.23% は鑄造応力の解放による収縮の違いに原因すると考へられる。また、 420°C まで加熱される過程に(約40分費してゐる)、鑄造応力の解放がおこなわれ、放冷されたものと水冷された

ものとの間の違いはここで消失し、それ以後の加熱・冷却によつては両者の間に差が認められないのであろう。鑄造後最初の加熱曲線にみられる420~430°Cの急激な収縮が二回目の加熱曲線にみられないのは、鑄造されたままの試片には多少とも不規則格子があり、これが転移温度直下で規則格子になるため収縮がみられるのに対し、一度700°Cまで加熱後炉冷された試片ではほぼ完全に規則格子化が起こつているものと考えられ、したがつて二回目の加熱曲線には収縮がみられないのである。また加熱曲線では420~430°Cに不連続点があるのに対し冷却曲線では350~360°Cに不連続点があるが、この加熱曲線と冷却曲線のちがいは加熱・冷却の速さにもよるが、温度履歴といわれる現象であろう。一般に冷却時の転移点は加熱時の転移点よりもかなり低く出ることが多いといわれている。

4・8・4) 今まで述べてきたのはすべてクリストバライト埋没材を用いての実験であるが、石英埋没材を用いて同じ実験を行なつてみると遠心鑄造後放冷された試片でもクリストバライト埋没材の場合のような鑄造応力の解放による収縮はみられない(図20)。すなわち、鑄造収縮補償不足値はクリストバライト埋没材との熱膨脹率のちがいが大きく、最初の軟化熱処理でも収縮はみられない。また、クリストバライト埋没材を用いた場合でも第一埋没に単味のクリストバライトをエチルシリケートのゾルで練和したものを用いて鑄型壁に石膏のない状態にして鑄造された試片は石膏系のクリストバライト埋没材の時とはちがつて鑄造後最初の熱処理で膨脹を示した。この場合に補償不足値が(一)になつてゐるがこれには二重埋没法による吸水膨脹などの問題があつて¹⁷⁾、今までの場合と同一に論じることはできない(図21)。石膏系のクリストバライト埋没材を用いて遠心鑄造後放冷された試片でも純金をはじめ銅合金P、銀パラジウム合金A、鑄造鉤用白金合金P-2などの市販歯科用合金を用いた時には18K金・銅二元合金の試片のように再加熱の場合の鑄造応力解放による収縮は確認できなかつた。

4・8・5) 以上のように、鑄造収縮補償不足値が(一)で鑄造によつて蠟型より大きな鑄造体ができしかも加熱によりその鑄造応力が解放されて収縮するという現象は、石膏系クリストバライト埋没材を用いて18K金・銅二元合金を遠心鑄造し鑄造後放冷した場合に限つてみられることがわかつたが、この理由は次のように推察される。第一に考えられるのは遠心鑄造と圧迫鑄造の鑄造圧のちがいである。一般に遠心鑄造の方が鑄造圧は大きく加圧時間も長い^{18,19)}。第二は鑄型に鑄こまれる金属の温度で本実験に用いた形式の遠心鑄造機は鑄造リングとするつばが別になつたいわゆる別皿型であるため圧迫鑄造の時よりもやや過熱される傾向がある。このように遠心鑄造においては、高温の金属が強い圧力で鑄型内に入つてくる。したがつて鑄型壁と金属との結合は、遠心鑄造の方が一層強固におこりうる。第三に鑄型壁の性状が問題になる。鑄造壁と金属との結合は単なる機械的なみ合いだけではなく、埋没材の中の石膏との化学的な結合も考えられる。埋没材の中の石膏は予熱温度700°Cで10分間保持の加熱によつて相当に分解しており^{20,21)}、鑄型壁に接する金属の硫化ないし酸化を促すものである。第四に埋没材の熱伝導度が考えられる。クリストバライト埋没材は石英埋没材に比較して見かけ比重が小さく、混水率も前者が0.35後者が0.30でクリストバライト埋没材の方が大きい。したがつてクリストバライト埋没材でできた鑄型はいわばポーラスで熱の伝導が悪く考えられる。高温の溶湯が鑄型内に入つて来たとき、金属の熱を速やかに放散せずにおくことは鑄型壁と金属との結合をより強固にするものである。第五に金属の性状があげられる。18K金・銅合金の鑄造体の表層は特異な状態を示す(図31)。表面は厚い酸化層ないし硫化層でおおわれ、それが埋没材と結合して埋没材の中から鑄造体を取り出す時に、しばしばはがれその下に樹状組織をみることがある。表面の一層はその下の組織からあまりにも簡単に剝離するため、この一層はすでに遊離していたのではないかと思われるほどである。

図31 18K Au-Cu 鑄造体の表面が剝離した下に見られる樹状組織（クリストパライト埋没材，遠心鑄造放冷の場合に多い。全長 25 mm）

以上のようなことが原因となつて，石膏系クリストパライト埋没材を用いて18K 金・銅二元合金を遠心鑄造し，鑄造後放冷した試片を再加熱した場合に限つて鑄造応力の解放による収縮がみられるのであろうが，この現象は金属の鑄造収縮と関連して考えると極めて興味深い問題で，従来より多数の研究者によつて報告されている鑄造収縮率が試片の大きさや形態（特に表面積を考慮して）および鑄型内面の性状によつてさまざまな値を示し，鑄造体の寸法精度を論ずる際に困惑させられているが，その問題の一参考になりうると考えられる。

4.9) 市販歯科用合金の熱処理による寸法変化について

鑄造体の有する鑄造応力が，鑄造体の再加熱により解放された時に外部にあらわれる寸法変化を測定するため，銅合金Pを用い，最も単純な棒状形態の鑄造体について二三の条件下に実験を行ない次の結果をえた。

4.9.1) まず第一は，室温，250，450，700°C の各鑄型温度で鑄造された試片を焼鈍した場合，低温の鑄型に鑄造したもののほど寸法変化は大きくあらわれたことで，特に用いた埋没材の変態点に相当する250°C で鑄造されたものは寸法変化およびばらつきが最も大きくあらわれた。これはリング型試片の鑄造体を用いて行なつた実験の結果と一致する。すなわち，鑄型温度の低いほど鑄造応力は大きく，またこれを焼鈍した時には埋没材の変態点の鑄型温度で鑄造されたものが最大の寸法変化とばらつきを示すのである。焼鈍した時の寸法変化をみると，一回目の焼鈍では鑄造温度のちがいによる差がでていますが二回目からはその差

が認められない。したがつて一回目の焼鈍による寸法変化には鑄造応力の解放によるものが含まれ，これによつて鑄型温度のちがいによる差がでたが，二回目以後には鑄造応力の解放による寸法変化はもはやほとんど含まれず，専ら以下述べる理由によつて寸法変化がおこつたと考えられる。再加熱による寸法変化は焼鈍により収縮し，焼入れにより膨脹する結果を示した。Cu-Zn 合金には454~468°C に $\beta \rightarrow \beta'$ の変化があり，銅合金Pにも $\beta \rightarrow \beta'$ の存在がほぼ認められているが，いずれにしてもこの規則化は極めて急速であつて，急冷によつて遅滞することなくまた阻止することができないといわれている^{12,13)}。したがつて焼鈍と焼入れによる寸法変化の主な理由を相転移に求めることは無理である。結局これらの機序は，焼入れによつて原子空孔をはじめとする種々の格子欠陥がより多く存在し，このことが密度の減少すなわち膨脹の一因となるのである。格子欠陥の増加による膨脹ということは前述の18K 金・銅合金をはじめ後に述べる銀パラジウム合金および白金加金のような相転移が寸法変化の主な理由である合金の場合にも考えられることで，実際はそれらの相和が結果として現われるものと考えられる。また銅合金Pの場合にも，鑄造応力の解放による寸法変化は収縮で鑄造応力が引張り応力であることを示している。これは18K 金・銅二元合金の場合と全く同じで，このことから鑄造応力の発生機構が同じであると考えられる。

4.9.2) 第二は，同じ断面形態で長さだけ異なる試片を用いて，長さのちがいによる差を測定した結果，長い試片の方がわずかに大きい寸法変化を示すことがわかつた。鑄造収縮補償不足値(%)を算出して比較すると長さ50 mm の試片の方が25 mm の試片の補償不足値より相当に小さく， $2/3 \sim 1/3$ 程度になっている。このように差の理由の一つに鑄型の中で金属が凝固するとき，長い試片の方が鑄型の壁面と接する面積が大きいこと抵抗が大きく，凝固収縮が妨げられやすいことがある。このことは当然鑄造体の鑄造応力発生の原因となりうるもので，したがつて50 mm の試片

の方が大きな鑄造応力を有すると考えざるをえない。実験の結果でも 50 mm と 25 mm との間には鑄造応力の解放によると考えられる寸法変化にわずかに差が認められ、50 mm の方が大きい鑄造応力を有することがわかったがその差はわずかで、これだけでは鑄造収縮補償不足値の差を説明することはできない。50 mm の試片と 25 mm の試片との間に鑄造収縮補償不足値の差のできたもう一つの理由は、埋没材の凝結膨脹に求められる。鑄造の時に用いた鑄造リングの寸法は 50 mm の試片では直径 30 mm、長さ 71 mm、25 mm の試片では直径 30 mm、長さ 45 mm で長さだけが異なるものであった。そして極端に細長い鑄造リングに埋没した時、埋没材の凝結膨脹は長さの方向により大きく膨脹しがちなため、50 mm の試片の方が補償不足値が小さくでたものと考えられる。

4・9・3) 鑄造直後に水冷された試片と放冷された試片とでは生ずる内部応力に差のあることがリング型試片および 18K 金・銅合金を用いての実験からわかっている。この実験においても、鑄造直後に水冷された試片と放冷された試片とについて再加熱（熱処理）による寸法変化のちがいを測定した結果、第一回目の焼鈍によつては鑄造直後に水冷された試片の方が大きな寸法変化を示したが、二回目以後の焼鈍および焼入れによつては寸法変化に差が認められないことから、一回目の焼鈍による寸法変化の差は鑄造試片のもつ鑄造応力の大きさのちがいによるものと考えられる。すなわち、鑄造直後に水冷された試片は鑄造応力が大きく、焼鈍によつて鑄造応力の解放による寸法変化が大きくでるが、放冷された試片は鑄造応力が小さくしたがって寸法変化もより小さくでると考えられる。この結果はリング型試片の切断による寸法変化の結果と矛盾しない。

4・9・4) 固相における相転移があつて熱処理の可能な合金の中から銀パラジウム合金 A と白金加金 P-2 とを選び、これをそれぞれ指定の熱処理条件で、軟化熱処理と硬化熱処理とを繰り返した時の寸法変化を測定した。その結果、軟化熱処理に

より膨脹し、硬化熱処理により収縮することが明らかとなった。両合金とも主に規則-不規則転移を利用して熱処理を行なうものである。白金加金を熱処理した際に生成される規則格子には AuCu をはじめ PdCu, PtCu, などが予想されるが^{22,23)} 量的にも AuCu が最も多く熱処理による寸法変化も AuCu 規則格子生成による寸法変化に準ずるものと考えられる。実験の結果も熱処理による寸法変化は 0.2 % で、18K 金・銅二元合金とほぼ等しい値を示した。銀パラジウム合金の場合にも熱処理によつて種々の規則格子が生成されることが予想されるが、規則格子生成にまったく関与しない銀が 50 % 以上を占めるため、規則格子生成による寸法変化は白金加金より小さいと考えられる。実験の結果も寸法変化は 0.05 % で極めて小さいものであった。

4・9・5) 熱処理の可能な歯科用合金としてはこの他に 14~18 K 金合金があるが、これらの合金の場合でも合金の組成からある程度熱処理による寸法変化を予想することができる。すなわち、14~18K 金合金においても熱処理によつて生成される規則格子は AuCu が主なものであり、したがって寸法変化も 0.1~0.2 % の範囲に入ると予想される。

4・10) 緒言においても述べたように、ろう付け、陶材焼付け、酸洗いなどによる寸法変化についてはこの論文はとりあげていない。しかしこれまでの実験結果ならびに考察から、それらの場合についてもある程度推察することは可能である。まづろう付けの際の寸法変化であるが、ろう付けの際の加熱により鑄造体のもつ鑄造応力の解放あるいは相転移によつてろう付けしようとする鑄造体自身に変形がおこるであろうことは容易に想像される。ろう付けしようとするもの自身の変形の他にろう付けの場合は埋没された状態で加熱されるため鑄造体の熱膨脹と埋没材の熱膨脹とが一致しないところろ付けしようとするものの相対的位置にくるいが生じるので²⁴⁾、ろう付けの時の加熱によつて鑄造体自身に変形するという事は位置のくるいを増加させる原因となる。またろう付け終了後

は埋没材で拘束された状態で金属が収縮するため、新たな内部応力の発生が予想される。したがって、ろう付けしようとする鑄造体は、埋没前に適当な熱処理によつて鑄造応力の解放と相の安定化を計り、位置のくるいを最少に押えると同時に、ろう付け終了後は放冷し新たな内部応力の発生を少なくすべきであろう。

陶材焼付けの際は陶材と金属の性状、ことに膨脹係数の差が最終の歪に影響するであろうが、鑄造体自体は加熱によつて鑄造応力の解放あるいは相転移を経過し、そのために変形する危険性がある。

酸洗いの場合は酸によつて鑄造体表面が溶解しそのために寸法が小さくなることの他に、表面を切削した時と似た機構で鑄造応力の解放による変形の生ずることが予想される。酸液中で鑄造体を加温せずに、旧来しばしば行なわれたような鑄造体を赤熱後、酸に投入する方法ではこの表層の溶解による変形以外に、加熱による変形の方が実際問題としては大きいであろう。

総括と結言

以上のように純金、18K金・銅二元合金、市販コバルトクロム合金、白金加金、銀パラジウム合金および銅合金などを石膏系、エチルシリケート系クリストパライト埋没材、石英埋没材を用い、種々の条件下に鑄造して得た一端同軸スプルー型六角棒状試片、中央部直角スプルー型六角棒状試片、リング型試片、パラタルバー型試片の四形態の鑄造体を試片とし、鑄造後に起こりうる加工、熱処理による寸法形状の変化を追跡し以下の知見を得た。

1) 鑄造体に生ずる鑄造応力は、スプルーの切断や表面切削などの加工、熱処理のための再加熱により解放され、鑄造体の寸法形状に変化が現われるが、それはスプルーの数や立て方などを含めた鑄造体の形態および大小によつて極めて多彩な様相を呈する。すなわち代表的な予熱温度700°Cの場合、対角6mm、長さ25mmの一端同軸スプルー型棒状試片においては、スプルー切断および

表面切削による変化は極めて小さい。中央部直角スプルー型試片においては18K金・銅二元合金では明らかにY字型に反つた鑄造試片が得られ、スプルー切断、表面切削によつては反りの回復としての変形が認められる。切断によつて反りの10%が、表面切削によつて5%がそれぞれ回復する。銅合金Pではこれほどの変化は測定されなかつた。また太さ2mm、直径20mmのリング型試片の一部を切断した時現われる変形は、大体閉じる方向で、その値が問題になるほど(40~50 μ)大きくなるのは室温の鑄型に鑄造された試片のみである。大型のパラタルバー型試片ではスプルー切断による変形は一層大きく、閉じる傾向は同じであるが、同時にねじれが現われ正確な測定は困難である。

2) 鑄造後最初の焼鈍による寸法形状変化は、長さ25mmの一端同軸スプルー型棒状試片では0.01~0.02%の収縮、50mmの試片では0.03%の収縮でわずかに50mm試片の方が変化が大きい。中央部直角スプルー型棒状試片の焼鈍による変化は、18K金・銅二元合金の場合顕著に反りの回復として現われ、切断および表面切削によつて回復した反りの残り全部が焼鈍によつて回復する。切断後のリング型試片を焼鈍した時現われる変形はばらつきが著しく解析は容易でない。以上から鑄造応力は鑄造体の大小およびスプルーを含めた鑄造体の形態によつて影響され、鑄造体が大きいほど、また形態が複雑になるほど生ずる鑄造応力は複雑になることがわかる。

3) 鑄造応力の大小に関係する第二の因子は鑄型の予熱温度で、これが低いほど鑄造応力は増加する傾向がある。一端同軸スプルー型棒状試片を焼鈍した時に現われる収縮は、鑄型温度が低いほど大きく、また用いた埋没材の変態点に近い鑄型温度での寸法変化およびばらつきが最大となつているが平均値は約0.01~0.03%である。リング型試片を切断した時現われる変形は、閉じる方向で、鑄型温度が低いほど変化は大きく、冷型では40~50 μ に及ぶ。切断後のリング型試片を焼鈍した時の変形は、ばらつきが大きく閉じる方向のも

のも開く方向のものもあり一定しないが、平均としては開く方向で前述のY→T型変化と類似の原因が考えられる。また使用埋没材の変態点に近い予熱温度で鑄造された試片が最も大きなばらつきを示した。

4) 鑄造直後の冷却方法も鑄造応力に対し大きな影響を及ぼす。パラタルバー型、リング型鑄造体とも、鑄造直後水冷したものでは切断による変形は鑄造後放冷したものよりも大きく、時には放冷したものの約5倍にもおよび、パラタルバー型試片では切断部が閉じきって測定できぬほどである。この傾向は鑄型温度の高いほど著しい。また六角棒状試片の焼鈍による収縮をみても、鑄造直後に水冷された試片は放冷された試片より1.5～6倍ほど大きく収縮している。

5) 使用金属の種類によつて、鑄造体に生ずる鑄造応力およびその解放による変形に差が認められた。高溶のコバルトクロム合金のリング型試片では、中溶の銅合金より鑄型温度との差は大きいにもかかわらず、切断による変形は少なめであつた。これは熱間強度、弾性率などの相違によるものと思われる。中溶のうち最も大きく変化の現われたのは18K金・銅二元合金であるが、その特異性については7)に述べる。変化の最も少ないものは純金であつた。

6) X線によるリング型試片の背面反射回折線broadeningからは、切断前後の明瞭な差は見出せなかつたが、今回の研究では、切断、加工による変形観測に一層の具体的な意味があるため、非破壊検査はこれ以上追求しなかつた。

7) 18K金・銅二元合金を石膏系クリストバライト埋没材を用いて遠心鑄造し、鑄造後放冷した場合に限つて一端同軸スプルー型棒状試片の鑄造収縮補償不足値が(一)になり蠟型より大きな鑄造体ができ、その分だけ鑄造後最初の加熱によつて収縮する現象が見出された。この現象は、石英埋没材を用いた場合や圧迫鑄造の場合あるいは鑄造後水冷された場合にはみられず、鑄造圧、金属の加熱温度、鑄型壁と金属の性状などの要素が組み、鑄型内に入つた金属が鑄型壁と強固に結合し

て、以後の金属の自由な収縮を妨げる結果、引張り応力としての鑄造応力が生ずるために鑄造収縮補償不足値は(一)になり、加熱によりその鑄造応力が解放して収縮するものと思われる。棒状試片でも、中央直角スプルー型のものでは、1), 2)に述べたようなY字型からT字型への変化が起こるが上の現象と同じ原因と考えられる。この現象は、鑄造応力の発生機構および鑄造収縮の解析のための有力な参考になりうると考えられる。

8) 以上の結果に基づき、熱処理による寸法変化の測定には最も単純な形態の一端同軸スプルー型六角棒状試片を用いた。鑄造後第一回目の熱処理には、相転移に伴う寸法変化の他に、鑄造応力の解放による寸法変化が含まれる。したがつて第一回目の熱処理による寸法変化は鑄造条件によつて変わり一定しない。しかし第二回以後の熱処理に伴う寸法変化は各合金ごとに一定の値を示す。すなわち、18K金・銅二元合金および白金加金P-2の鑄造試片は、軟化熱処理で0.2%の膨脹、硬化熱処理で0.2%の収縮が起こり、銀パラジウム合金Aの鑄造試片は軟化熱処理で0.05%の膨脹、硬化熱処理で0.05%の収縮が起こる。また銅合金Pの鑄造試片は焼入れによりわずかながら(0.05%以下)膨脹し、焼鈍により収縮する。純金鑄造試片は熱処理による寸法変化をまったく示さない。

9) 熱処理により18K金・銅二元合金の鑄造体は0.2%の膨脹および収縮を示す。したがつて白金加金や14～18K金合金などのようにAuCu規則格子生成を基礎とする合金の、熱処理に伴う寸法変化は0.2%までの程度と予想される。この値は銀パラジウム合金の熱処理に伴う寸法変化0.05%と比較すると極めて大きく、特にそれが鑄造応力の解放による寸法変化と共に起こるような場合には、これらの合金の熱処理はじゅうぶんに注意して行なう必要がある。しかしながら、相転移にもとづく寸法変化は、かなり規則正しく膨脹収縮が起こるため、鑄造体の寸法精度を論ずる場合にも、あらかじめこの分を考慮し規制することが可能である。一方、鑄造応力の解放による変形

は鑄造条件により異なつて一定せず、規制することが極めて困難である。したがつて鑄造体に生ずる鑄造応力を極力少なくすることが、より精確な鑄造体を口腔に装着するための第一の条件となる。鑄造応力の発生を少なくするために必要な注意として、本研究の結果から云えることは次の三項目である。

・鑄造体の形態に関しては、スプルーの数、場所、方向などを考慮して、ループの形成をできるだけ避け、また単純な形態に近づけるよう努力する。

・鑄型予熱温度に関しては、鑄造後鑄造体が再加熱されない場合には、実用上予熱温度は700, 600, 450°C のいずれも差がないと判断されるが鑄造後再加熱される場合には450°C 以下の低温鑄型は望ましくない。

・鑄造後の冷却方法に関しては、実際の鑄造操作での水中急冷は大型鑄造体ではもちろん小型でも極力避ける。

謝辞 終りにのぞみ終始懇切なる御指導および御校閲を賜つた野本教授にあつく感謝いたします。また種々御助力下さつた鈴木助手、装置の製作にあたられた山口氏をはじめ、協力下さつた第一理工学教室員の方々に感謝の意を表します。実験装置について便宜を与えられた歯科材料研究所各位に感謝します。

参考文献

- 1) O'Brien, W. J. and Nielsen, J.P.: Decomposition of Gypsum Investment in the Presence of Carbon, J. D. Res., 38 : 541-547, 1959
- 2) 総山孝雄: 新銅合金の基礎的ならびに臨床的性能の研究, 口病誌, 30 : 1, 1963
- 3) Asgar, Mahler and Peyton: Hygroscopic Technique for Inlay Casting Using Controlled Water Additions, J. Pros. Dent., 5 : 711-724, 1955
- 4) Roydhouse and Skinner: The Accuracy of Large Castings, J. D. Res., 5 : 1057-1078, 1961
- 5) 日本金属学会編: 金属便覧, p. 591, 1952
- 6) American Society for Metals: Metals Handbook, 1 : 645, 654, 1948
- 7) A. S. M.: Metals Handbook, 2 : 41, 62, 1964
- 8) Harcourt, H. J.: The Effects of Variation in Cooling Rates and Heat Treatment on Cobalt-Chromium Alloys, B.D.J., 11 : 475-483, 1964
- 9) A.S.M.: Metals Handbook, 1 : 1170, 1948
- 10) 茅誠司: 規則格子生成に関する実験的研究, 学術研究会議編物理学講演集(2), p. 85-104, 1942
- 11) Sachs, G.: Z.f. Metal kunde, 19 : 352, 1927
- 12) A.S.M.: Metals Handbook, 1 : 1206, 1948
- 13) 岩瀬慶三, 岡本正三: 二元合金の標準状態図, 日刊工業新聞社, p. 267, 1953
- 14) Oriani, R.: Thermodynamics of Ordering Alloys, II. The Gold-Copper System, Acta. Met., 2 : 608, 1954
- 15) Roberts, B.W.: X-ray Measurement of Order in CuAu, Acta Met., 2 : 597, 1954
- 16) Newkirk, J. B.: The Order-Disorder Transformation in Cu-Au Alloys Near the Composition Cu₃Au, Acta Met., 2 : 644, 1954
- 17) 三輪博久: 二重埋没法の再検討, 歯材器誌, 4 : 58, 1959
- 18) 金竹哲也: 歯科理工学通論, 永末書店, p. 79-83, 1962
- 19) 武石稔, 伊蔵雅春, 中村健吾: 蒸気圧圧迫鑄造時の鑄造圧力について, 歯理工誌講演プロ, p. 3, 1964
- 20) 野本直, 樋口達也, 布施信義: 予熱鑄造による埋没材の熱分解, 歯材器学会講演要旨, 1964
- 21) 野本直, 樋口達也: ガス検出による埋没材熱分解の観察, 歯材器学会講演要旨, 1965
- 22) 三浦維四, 中村健吾: 最新歯科金属学, アグネ出版, p. 136-140, 1959
- 23) 花沢鼎, 永井一夫: 歯科理工学, 永末書店, . p 19, 1950
- 24) 野本直, 西村文夫, 山口重雄: ろう付け用埋没材とその使用条件, 歯材器誌, 6 : 80, 1961
- 25) 下総高次: 歯科用研摩の理論と実際, 医歯薬出版, 1958