原 著 論 文

ワックスカーバーの熱伝導解析

小坂 茂 片岡 滋 柳田 史城
若松 正憲 倉沢 郁文 甘利 光治

Thermal Conductive Analysis of Wax Carver

Shigeru Kosaka, Shigeru Kataoka, Fumishiro Yanagida,
Masanori Wakamatsu, Ikufumi Kurasawa and Mitsuharu Amari

Abstract : A study was carried out on the analysis of thermal conductiveness of wax carvers by means of the two-dimensional finite element method.

The results obtained were as follows :

1. A comparison of the temperature at the tip of the 1 mm width and the 2 mm width wax carvers revealed that changes in the temperature occurred more rapidly in 1 mm width wax carvers than 2 mm width wax carvers.
2. Thermal changes at the tip of wax carvers showed that as the heat moved to the tip of wax carvers, thermal changes became faster. When the heating area is far from the tip, thermal changes were seen to be slow.
3. In both types of wax carvers, when heat was applied up to 10 mm from the tip of the head, the entire head was found to become uniformly the same temperature.
4. A comparison between when both heads were heated at the same temperature and when they were both heated at different working temperatures while wax covered was conducted. It was seen that the working temperature of the 2 mm width wax carver lasted longer than that of the 1 mm width wax carver.
5. According to the result we obtained, it was concluded that it is necessary to choose a wax carver which has been heated from the 10 mm range to the tip of the wax carver and can maintain the proper range of working temperatures for the specific purpose encountered.

Key words : wax carver, finite element method, thermal conductive, inlay wax

I. 緒 言

松本歯科大学歯科補綴学第2講座（主任：甘利光治教授）
The 2nd Department of Prosthodontics, Matsumoto Dental
College (Chief : Prof. Mitsuharu Amari)
平成6年6月10日受付

従来から、歯冠補綴物の咬合の調和、支台歯への適合度や辺縁封鎖性などは装着物の良好な経過を得るた

めに必須の因子として考えられてきた。このなかで補綴物の適合と辺縁封鎖性についてみると、補綴処置の各ステップにおいて可能な限り精度を向上させることにより、初めて臨床的に満たされるものとなる。

しかしながら、今日、通法によって製作される補綴物は、1 つ寸法変化だけを取りあげても膨縮によるプラスマイナスを印象、作業用模型、蠟型採得、鑄造などの各製作ステップで繰り返す。つまり、このことから日常臨床において良好な適合精度を満たすことが非常に難しいことは容易に理解できる。鑄造歯冠補綴物の製作過程で生じる適合精度に影響する因子としては、印象材^{1,2)}、模型材^{3,4)}、埋没材^{5,6)}、ワックス^{7,8)}、金属の理工学的性質^{9,10)}などのほか、それに付随した製作技術的な種々の問題点^{11,12)}があげられる。

その中で、ワックスパターンの変形¹³⁻¹⁵⁾は、鑄造体の適合精度に直接関係する。ワックスは、手頃な温度で自由に賦形できるという長所をもつ反面、温度変化により膨縮変形するという欠点も併せ持つ。ワックスパターンを調整する方法にはいくつかのものがあるが、いずれの場合もワックスカーバーを使用することは不可欠である。ワックスカーバーは近年、温度制御のできる電熱式のものもあるが、一般的に使用されているものは、旧来よりみられるバーナー加熱式のものである。これは術者の熟練度などによって、その頭部の加熱温度が異なることが考えられ、あまり高温なものを用いるとワックスの温度も過熱状態となる。このワックスを用いてワックスパターンを調整すると変形が生じやすくなり、変形を生じたまま鑄造すると不適合の鑄造体になる¹⁶⁾。

したがって、ワックスパターンを調整するときを用

いるワックスカーバーの温度と経時的な温度変化を把握することは、良好な形態付与を行ううえでわけて重要な因子となる。ワックスカーバーは、その頭部の形態によって様々なものがあり、その使用方法や目的に応じて違いがある。さらにその使用方法については、術者の経験によるところが大きく、その頭部の形態から、使用方法について紹介したもの^{17,18)}はあるが、ワックスカーバー使用時の経時的温度変化について報告されたものはない。

そこで今回は、二次元有限要素法による熱伝導解析手法を用いて、ワックスカーバーの熱伝導の変化を経時的に算出し、その使用方法について検討を行った。

II. 研究方法

1. 解析モデル

解析対象物として、頭部形態のみ異なるワックスカーバー 2 種を選択した。すなわち頭部形態が先端幅 1 mm (以下、1 mm 幅と略す) および 2 mm (以下、2 mm 幅と略す) とし、これを基本解析モデルとした (図 1)。

有限要素モデルは 1 mm 幅のものは節点数 137、要素数 154、2 mm 幅のものは節点数 153、要素数 184 とした (図 2)。なおワックスカーバーの形態および寸法は、数種の市販品を参考にし、決定した (図 3)。

2. 構成材料

ワックスカーバーの材質はステンレス鋼棒とし、ワックスカーバー先端部に間接法用インレーワックスを幅 0.5 mm、長さ 2.0 mm に付着させたものを設定した (図 4)。

先端幅1mmの解析モデル

先端幅2mmの解析モデル

図 1 ワックスカーバーの基本解析モデル

1mm幅

2mm幅

図 2 ワックスカーバーの有限要素モデル

図 3 ワックスカーバーの形態および寸法

図 4 構成材料および温度測定点

構成材料の材料定数^{19,20)}を表 1 に示した。

3. 解析条件

1) 加熱条件

ワックスの溶融に用いる炎は都市ガスを想定し、バーナー口の先端より 10 cm の外火炎を用いる^{17,21,22)}ものとし、その温度は、コンパクトサーモ TVS-2000 ST (日本アピオニクス社製) を用いて実測した結果から 800°C とした。また各材料の初期温度は室温を想定して 20°C とした (表 2)。

またワックスカーバーの加熱時間は、3.0 秒間²¹⁾とした。

熱伝達率の算出は、北山の報告²³⁾を参考にした。

2) 加熱部位

加熱部位は A: 先端, B: 先端から 5 mm, C: 先端から 10 mm, D: 先端から 15 mm とし、加熱範囲

表 1 材料定数

構成材料	ステンレス鋼棒	ワックス
熱伝達率 (cal/sec・cm・°C)	0.059	0.00057
比熱 (cal/g)	0.11	0.69
密度 (g/cm ³)	7.8	0.9

表 2 解析条件

炎の温度	800°C
初期温度	20°C
熱伝達率 (cal/cm ² ・sec・°C)	
加熱時 (3 秒間)	0.9×10^{-1}
放冷時	2.0×10^{-3}

図 5 加熱部位

については、先端については先端から 1 mm の部位を中心に前後 1 mm、すなわち 2 mm の幅を加熱し、その他の部位については、それぞれの部位を中心に前後 1 mm、すなわち 2 mm の幅をワックスカーバー下方より加熱するものとした (図 5)。

3) 温度測定条件

温度測定点は、図 4 に示すようにワックスカーバー外側面の先端、先端から 5, 10, 15 mm の部位とした。ワックスを設定した場合のワックスの温度測定点はワックス中央部とした (図 4)。

以上より 1 mm および 2 mm 幅のワックスカーバーについて先端、先端から 5, 10, 15 mm の経時的温度変化を比較した。

4) ワックス溶融時の解析条件

1 mm 幅と 2 mm 幅のワックスカーバー先端にワックスを付着させ (図 4)、加熱部位は先端から 10 mm の部分を中心に前後 1 mm、すなわち 2 mm の幅とし、ワックスの最高温度が同じになるように 1 mm 幅のものを 1.9 秒、2 mm 幅のものを 3.0 秒間それぞれ

図 6 先端加熱, 1 mm 幅

図 8 5 mm 加熱, 1 mm 幅

図 7 先端加熱, 2 mm 幅

図 9 5 mm 加熱, 2 mm 幅

加熱して、ワックスの軟化温度内にある時間の長さを比較した。

解析プログラムは、統合二次元有限要素法構造解析システム CR-X (くいと社製) を用い、計算はパーソナル・コンピュータ、PC 9801 RA 51 (日本電気社製) にて行った。

III. 成 績

1. 先端加熱の場合

1) 1 mm 幅 (図 6)

先端の温度は、3.0 秒後に最高温度 483.1°C に達した。その後、急速に低下した。

先端から 5 mm の温度は、3.6 秒後に最高温度 245.1°C に達した。先端の温度と同様に急速に低下した。

先端から 10 mm の温度は、6.3 秒後に最高温度 117.2°C に達した。先端、先端から 5 mm のものに比べ、その温度の上昇、下降は緩やかであった。

先端から 15 mm の温度は、9.5 秒後に最高温度に達した。

2) 2 mm 幅 (図 7)

1 mm 幅と同様の傾向を示した。

先端温度は 3.1 秒後に 316.6°C、先端から 5 mm の温度は 3.7 秒後に 167.7°C、先端から 10 mm の温度は 7.1 秒後に 89.2°C、先端から 15 mm の温度は 11.5 秒後に 58.4°C と、それぞれ最高温度に達した。

2. 先端から 5 mm 加熱の場合

1) 1 mm 幅 (図 8)

先端の温度は、3.7 秒後に最高温度 296.2°C に達した。

先端から 5 mm の温度は、3.1 秒後に最高温度 369.3°C に達した。3.6 秒後に先端の温度と、先端から 5 mm の温度が逆転した。

先端から 10 mm の最高温度は、3.9 秒後に 165.9°C、先端から 15 mm の温度は 7.5 秒後に 83.5°C の最高温度に達した。

2) 2 mm 幅 (図 9)

2 mm 幅のものも 1 mm 幅のものと同様の傾向を示し、3.7 秒後に先端の温度と先端から 5 mm の温度は逆転した。

最高温度は、先端は 3.8 秒後に 185.6°C、先端から 5 mm は 3.1 秒後に 218.9°C、先端から 10 mm は 4.1 秒後に 108.8°C、先端から 15 mm は 9.5 秒後に 66.1°C となった。

図 10 10 mm 加熱, 1 mm 幅

図 13 15 mm 加熱, 2 mm 幅

図 11 10 mm 加熱, 2 mm 幅

図 14 ワックス付着, 1 mm 幅

図 12 15 mm 加熱, 1 mm 幅

3. 先端から 10 mm 加熱の場合

1) 1 mm 幅 (図 10)

加熱部位である 10 mm が, 3.0 秒後に 337.7°C と最も高くなった。それぞれの最高温度は, 先端が 6.4 秒後に 137.6°C, 先端から 5 mm が 3.9 秒後に 163.3°C, 先端から 15 mm が 3.6 秒後に 148.6°C となった。

2) 2 mm 幅 (図 11)

加熱部位である 10 mm が, 3.1 秒後に 204.4°C と最も高くなった。それぞれの最高温度は, 先端が 7.2 秒後に 97.7°C, 先端から 5 mm が, 5.0 秒後に 107.9°C, 先端から 15 mm が 3.8 秒後に 103.6°C と

なった。

4. 先端から 15 mm 加熱の場合

1) 1 mm 幅 (図 12)

加熱部位である 15 mm が, 3.1 秒後に最高温度 319.2°C となった。それぞれの最高温度は, 先端が 10.0 秒後に 76.0°C となり, 先端から 5 mm が 7.7 秒後に 83.3°C, 先端から 10 mm が 3.7 秒後に 148.9°C となった。

2) 2 mm 幅 (図 13)

1 mm 幅のものとほぼ同様の傾向を示すが, 加熱部位である 15 mm が, 3.1 秒後に最高温度 193.0°C となった。それぞれの最高温度は, 先端が 12.5 秒後に 61.9°C, 先端から 5 mm が 10.0 秒後に 65.1°C, 先端から 10 mm が 4.0 秒後に 97.5°C となった。

5. 先端にワックス付着した場合

1) 1 mm 幅 (加熱部位 C : 先端から 10 mm, 1.9 秒加熱) (図 14)

45~60°C のワックス軟化温度内²⁴⁾にある時間は, 17.0~24.0 秒までの 7.0 秒間であった。

図 15 ワックス付着, 2 mm 幅

- 2) 2 mm 幅 (加熱部位 C : 先端から 10 mm, 3.0 秒加熱) (図 15)

同様にワックスの軟化温度内にある時間は, 23.0～33.0 秒までの 10.0 秒間であった。

IV. 考 察

臨床的に満足のできる歯冠補綴物を製作するには, その製作時の各過程において, いかに適切な操作が行われるかが大切な因子となる^{11,12)}。その 1 つにワックスアップの作業があげられる。

ワックスパターンの寸法変化は, 鑄造体の適合精度に直接関係し, 技工操作の初期における最も重要な問題の 1 つ¹³⁻¹⁵⁾である。

ワックスパターンの変形の原因はいくつかあるが, その 1 つであるインレーワックスは温度変化に非常に敏感で, 溶けたワックスは凝固する過程で大きな収縮を生じる。ワックスカーバーを熱することによってワックスパターンの形態を付与することから考えると, 適当な形態のワックスカーバーを選択すると同時に, その操作時の温度と経時的な温度変化を把握することは, 非常に大切である。

そこで今回, 二次元有限要素法, 非定常熱伝導解析手法を用いて, ワックスカーバーの熱伝導状態を解析し, ワックスカーバーの形態と加熱温度, 加熱部位との関係およびワックスの軟化時間との関係などについて, 検討した。

1. 1 mm 幅のワックスカーバーについて

1 mm 幅のワックスカーバーは, 2 mm 幅のものと比べ温度が急速に上昇あるいは低下した。すなわち幅の狭いワックスカーバーは, 短時間で暖まりやすい反面, 急冷しやすいという特徴がみられる。

ワックスパターンを操作する際に, 加熱は不可欠の操作であるが, これに伴い温度的寸法変化を生じる。これを防ぐにはワックスをできる限り低温で操作し, 寸法変化を最小にする方法を選ぶことが望ましい。

住井^{13,24,25)}は, ドロップオンテクニック法でワックスパターンを調整する場合, 圧接法で調整したものに比較して収縮変形が大きいと報告している。

また, 花村ら¹⁴⁾は間接模型法を用いる場合, ワックスを軟化温度である 50°C 前後に加熱軟化してワックスアップを行い, これを室温 20°C まで下げると計算では約 1% の収縮を生じると述べている。特に幅の狭いワックスカーバーにおいて, 先端部に近い部位を加熱すると, 先端部の温度上昇が著しく, 本実験でも 1 mm 幅のワックスカーバーでは, 先端を加熱すると先端の温度は約 480°C になった。このような高温のワックスカーバーを用いてワックスパターンの調整を行うと, ワックスパターンが局部的に高温になり, 一方でワックスが 450～550°C で成分が揮散することやワックスの熱伝導率の性質が低いと, ワックスカーバー接触周辺部のワックス成分の一部が融解したり分解したりして²⁶⁾, 結果的に収縮, 変形につながり好ましくないと考えられた。

また逆にワックスカーバーの根元部を熱した場合は, 他の加熱部位と比べ温度の上昇が低く, 軟化温度内にある時間が短い結果となった。このことから加熱したワックスカーバーの先端でワックスをすくい取り, ワックスを添加していく場合は, ワックスの温度が上昇せず操作がしにくいと考えられた。

一方, 先端から 10 mm を加熱した場合は, ワックスカーバー全体の温度差が他に比べて最も小さく, 他の加熱部位に比べワックスカーバー頭部が, 均一に加熱された。

したがって加熱部位に関しては, ワックスカーバー先端部や根元部を加熱するよりも, 頭部中間位を加熱することが望ましいと考えられた。

また, ワックスの軟化温度内にある時間については, 1 mm 幅のものは 2 mm 幅のものと比べて, いずれの条件設定でも短く保温性に劣ることがわかった。

以上のことから, 技工上で幅の狭いワックスカーバーを用いる場合は, 暖まりやすく冷めやすいという特徴から, 咬頭部や辺縁隆線を盛り上げるなどの比較的小範囲の部位で, 少量を多数回用いることが望ましい。

2. 2 mm 幅のワックスカーバーについて

2 mm 幅のワックスカーバーの温度の上昇は、1 mm 幅のものと同様の傾向を示したが、最高温度は 1 mm 幅のものほど上昇しなかった。

加熱部位については、1 mm 幅のものと同様に先端から 10 mm を加熱したものが、それぞれの温度測定部位の温度差が小さく、ワックスカーバー全体が均一に加熱された。

しかし、ワックスの軟化温度内にある時間、つまり保温性の点からみるとその時間は、1 mm 幅のものと比べて先述したように長かった。

以上のことから、技工上で幅の広いワックスカーバーを用いる場合は、保温性が良いという特徴から、ワックスを大量に盛り上げ、操作時間を長く必要とする場合、例えば頬舌面や隣接面などの盛り上げに適していると考えられた。

また幅の広いワックスカーバーを用いる場合は、幅の狭いものよりもバーナーでの加熱時間を長くしないと、幅の狭いものと同じ温度にならないともいえることから、ワックスカーバーの形態的な差異によって加熱時間も考慮するべきであろう。

ワックスカーバーの加熱部位に関しては従来より記載^{17,21,22)}がみられ、ワックスカーバー頭部先端より柄の方向に 10 mm 離れた部分を加熱するほうが、溶融したワックスが柄のほうに流れないので、操作性がよいとされている。これは、先端を加熱すると温度の急上昇と火焰圧によって溶融したワックスが、柄の方向に流れていくので操作しにくいことによるものである。

本実験においても 1 mm 幅のものでも 2 mm 幅のものでも、加熱部位がワックスカーバー頭部先端から 10 mm の部位の場合、ワックスカーバー頭部が加熱部位を中心にほぼ均一に加熱された。

このことから、ワックスパターンの変形やワックスカーバーの操作性の点からすると、ワックスカーバーは先端部や根元部よりもワックスカーバーの頭部中間位を加熱することがよいと考えられた。

しかしながら、ワックスカーバーの形態は必要とされる操作に合うように様々な工夫がなされており、形態と操作の組合せとして経験的にも習熟する必要がある。

いずれにしてもワックスカーバーとワックスを用いて形態を付与するには、それらの特徴や性質を十分に知っておくことが重要である。

V. 結 論

二次元有限要素法による熱伝導解析手法を用いて、ワックスカーバーの頭部先端の形態を 1 mm 幅および 2 mm 幅の 2 種とし、先端部、先端から 5, 10, 15 mm の部分に加熱時の測定部位を設け、熱伝導の変化を経時的に算出し、各々のワックスカーバーについての比較および先端部のワックスを付着したときの軟化状態を観察し、以下の結果を得た。

1. 1 mm 幅と 2 mm 幅のワックスカーバーの先端部の温度を比較すると、1 mm 幅のそれは急速に変化し、2 mm 幅は緩やかであった。

2. 先端部の温度変化は加熱部位が先端部であるほど急速で、先端から離れるほど緩やかであった。

3. 1 mm 幅、2 mm 幅のものともに、先端から 10 mm 加熱のものがワックスカーバー全体が均一に加熱された。

4. 先端部を同一温度に加熱して、ワックスカーバー先端部にワックスを付着させた状態で 2 種を比較すると、2 mm 幅のほうがワックスの操作温度範囲内にある時間が長かった。

5. 以上のことから、ワックス操作時に先端から 10 mm 程度の部位を加熱し、目的に併せて適当な操作温度範囲を持続できる幅を持つワックスカーバーを選ぶ必要があることが判った。

本論文の要旨は、第 89 回日本補綴歯科学会学術大会（1993 年 5 月 29 日、札幌）において発表した。

文 献

- 1) Opel, H.H. and Riechel, V.: 鑄造修復物の精度を高めるための歯科医師の役割 種々の印象材を使用した臨床実験, the Quintessence, 9: 227~237, 1990.
- 2) Craig, R.G.: Restorative Dental Materials, 9th edition, 283~335, The C.V. Mosby Co., St. Louis, 1993.
- 3) 中村健吾, 吉田隆一, 仲居 明ほか: セっこうをテストする, DE, 13: 18~27, 1970.
- 4) R.W. Phillips (三浦維四, 林 一郎, 川上道夫ほか): Skinner's Science of Dental Materials, 8th Edition (スキナー 歯科材料学 (上), 60~84, 医歯薬出版, 東京, 1982), 1982.
- 5) 長谷川二郎: 埋没法の諸問題一特に鋳型作製について一, 神沢康夫, 金竹哲也, 野口八九重ほか編, 歯科鑄造に関する

- る諸問題, 74~84, 医歯薬出版, 東京, 1969.
- 6) 長谷川二郎, 太田克子, 成田洋之: 埋没材をテストする(続), DE, 12: 18~33, 1970.
- 7) R.W. Phillips (三浦維四, 林 一郎, 川上道夫ほか): Skinner's Science of Dental Materials, 8th Edition (スキナー歯科材料学 (中)), 381~392, 医歯薬出版, 東京, 1982), 1982.
- 8) 高橋重雄: 歯科材料・機器の規格—歯科用ワックスについて, QDT, 18: 88~90, 1993.
- 9) 金竹哲也: 歯科理工学通論, 新訂版, 225~239, 永末書店, 東京, 1980.
- 10) Robert, G.C., Willson, J.O. and John, M.P.: DENTAL MATERIALS Properties and Manipulation, 236~253, The C.V. Mosby Co., St. Louis, 1992.
- 11) 井田一夫: 歯科鑄造の話, 219~234, クインテッセンス出版, 東京, 1987.
- 12) 長谷川二郎: 鑄造体の適合精度の向上, 歯科技工, 20: 1152~1159, 1992.
- 13) 住井俊夫: ワックスパターンの調整方法と精度に関する研究, 歯理工誌, 12: 54~71, 1971.
- 14) 花村典之, 水野行博: ワックスアップの要点, 吉田恵夫, 安藤進夫, 菊池弥太郎ほか編, ワックスアップ—クラウンブリッジを中心に—, 41~44, 医歯薬出版, 東京, 1978.
- 15) 荒木吉馬, 片倉直至, 川上道夫ほか: ワックスパターンの熱応力と収縮に関する数値解析 I. 緩和を伴う熱応力の解析法, 歯材器, 2: 456~465, 1983.
- 16) 和久本貞雄, 久光 久: インレーとクラウン 歯科精密鑄造の理論と実際, 140~153, 書林, 東京, 1988.
- 17) 岩下博美: ワキシングマニュアル, 35~46, 書林, 東京, 1985.
- 18) 河野正司: クラウン・ブリッジのファンダメンタルテクニック, 89~150, クインテッセンス出版, 東京, 1986.
- 19) 国立天文台編: 理科年表 机上版 1992, 438~439, 475, 477~479, 丸善, 東京, 1992.
- 20) Craig, R.G.: Restorative Dental Materials, 9th edition, 29~53, The C.V. Mosby Co., St. Louis, 1993.
- 21) 湯田雅士, 田辺 稔, 矢作光昭ほか: 全部鑄造冠のワックスアップとその周辺, 吉田恵夫, 安藤進夫, 菊池弥太郎ほか編, 別冊/ワックスアップ, 57~87, 医歯薬出版, 東京, 1978.
- 22) 横塚繁雄, 亀沢広嗣, 高橋 裕: 歯冠修復理工学 歯冠修復編, 50~57, 医歯薬出版, 東京, 1993.
- 23) 北山直方: 図解熱伝導工学の学び方, 180~183, オーム社, 東京, 1982.
- 24) 住井俊夫: ワックスアップ(1)—ワックスの特性と取扱い—, 河野正司, 安藤進夫, 加賀谷忠樹編, クラウンの適合, 歯科技工/別冊, 72~83, 医歯薬出版, 東京, 1980.
- 25) 住井俊夫: 変形の少ないワックスパターンの取り方, DE, 24: 1~11, 1973.
- 26) 井田一夫: 続・歯科鑄造の話, 171~184, クインテッセンス出版, 東京, 1988.