

## Moiré Topography は歯学の分野でどのように利用されつつあるか

橋本京一, 鷹股哲也

松本歯科大学 歯科補綴学第1講座 (主任 橋本京一 教授)

### Applications of Moiré Topography to Dental Research

KYOICHI HASHIMOTO and TETSUYA TAKAMATA

*Department of Complete and Partial Denture Prosthodontics*

*(Chief: Prof. K. Hashimoto)*

#### I. は じ め に

近年, エレクトロニクスの研究と実用化が目覚ましい進歩を遂げたのに伴い, 医用電子工学 (Medical Electronics: ME) が急速に発展した<sup>1)</sup>。

歯学の研究および歯科医療においても, 検査, 診断, 診療などに利用できる電子工学機器 (ME 機器) が順次開発された。例えば, X線写真の撮影および解析装置, エレクトロサージェリーに用いる器具類, 切削用器具類, 咬合音による咬合診断装置, 筋電図, 顎運動の記録装置およびその解析装置, 等高線モアレ縞撮影および解析装置等の ME 機器は, 歯学の各分野における研究のみならず, 日常の歯科診療体系の中にも取り入れられるようになり, 診療内容の質的向上に役立っている。

等高線モアレ縞撮影装置 (Moiré Topography) は, 物体の3次元的な形状を測定するために考案されたものである<sup>2)</sup>。モアレという言葉はフランス語で, "波形をつけた" という意味であり<sup>3)</sup>, 一般に2種類以上の格子を重ねたときにできる新し

い縞模様に対してモアレ縞という言葉が使われてきた。(図1—A, B) 日常生活の中でも見ることができるもので, 2枚の簾 (すだれ) を重ねて視線を移動させた場合や, ゴルフ練習場などのネットの重なりが風で揺れた場合に現われる縞模様もモアレ縞である。

等高線モアレ縞が形状測定に利用されたのは比較的新しく, Theocaris が Shadow Moiré 法を開発して紹介し (1969)<sup>4)</sup>, 現在用いられている Moiré Topography の基礎を築いた。また, 2つの周期的な構造を持つ直線群を重ねるとモアレ縞が生ずるという現象 (モアレ現象) については, Lord Rayleigh の報告 (1974年) が最初であるが<sup>5)</sup>, その発見はそれよりも古い。Tolenaar (1945年)<sup>6)</sup>, Theocaris (1969年)<sup>4)</sup> らは, 物体の変位, 歪み, 応力変形などの測定にこの方法を用い, 高崎, Meadows らは (1970年) 格子照射法による計測法を<sup>7) 8)</sup>, 吉沢ら, 鈴木らは (1971年), 格子投影型 Moiré Topography<sup>9) 10)</sup> を開発した。さらに同年, 吉野, Hovanesian<sup>11) 12)</sup> らによってその応用が発表され, モアレ縞による3次元的パターン計測法の実用化が具体的に進んできた。

Moiré Topographyの方法には前述したように格子照射型 Moiré Topography および格子投影型 Moiré Topography がある。前者は、物体を格子面に近づけて撮影する方法であるが、後者は、比較的大きい物体を装置から一定の距離だけ離れた位置で撮影するものである。感度は格子照射型の方が高いが、被写体と格子の位置をあまり離すことができないという難点があるので、撮影したい被写体の種類と大きさによって使い分ける必要がある。両者の撮影原理については、松本歯学第2巻、第2号の123頁以下に詳述した<sup>3)</sup>。

## II. 歯学領域によく用いられる Moiré Topography について

Moiré Topography を歯学領域で利用する場合には、格子投影型よりも格子照射型の装置の方がよい。図2は、松本歯科大学補綴学第一講座に設置されている FUJINON Moiré CAMERA FM. 3011<sup>3)</sup> 12)であるが、最近はこれよりコンパクトで、どの方向に置いても測定が可能な FUJINON Moiré CAMERA FM・3013 (図3) が市販

されて用いられている。このタイプの装置は、顔面のモアレ縞写真の撮影に適している。

モアレ縞撮影を正しく行って、優れた写真を得るためには、次のような操作あるいは注意が必要である<sup>6)</sup>。

### 1. 不要縞（偽モアレ縞）の除去

被測定物体から得られる必要なモアレ縞以外に、基準格子、変形格子、条件によっては格子条とその影の高次項同志で、“偽モアレ縞”が発生する(図4—A)。この偽モアレ縞は、格子を移動させれば消失するが、モアレ縞そのものは消失しない(図4—B)。このように格子が静止したままの

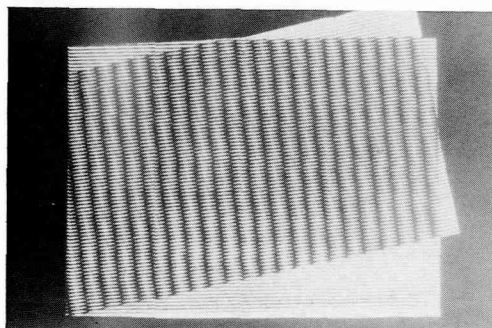


図1：A

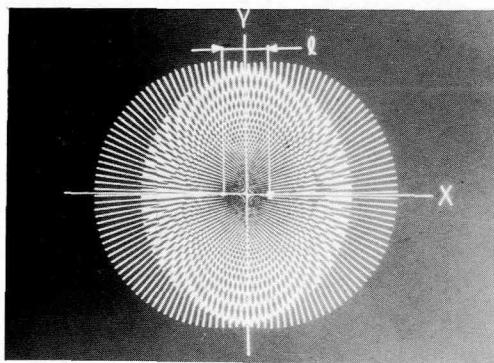


図2：B

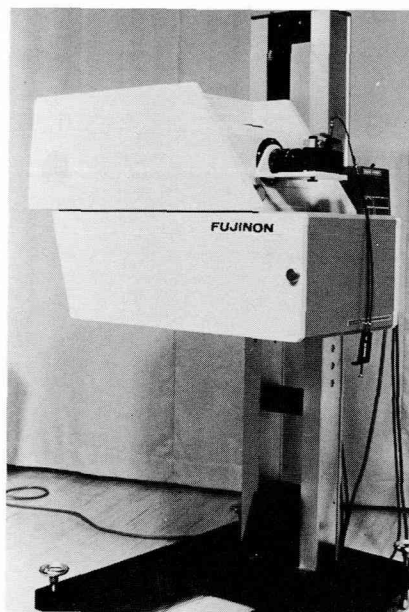


図2：等高線モアレ縞撮影装置FM3011（格子照射型）

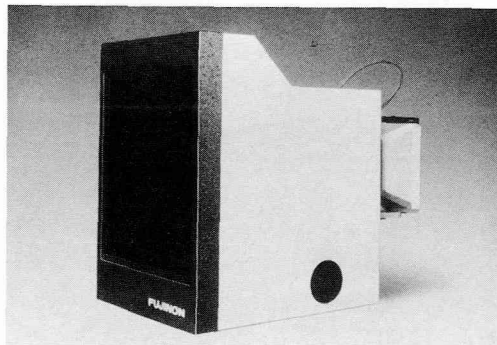


図3：ハンディタイプモアレカメラFM3013（格子照射型）

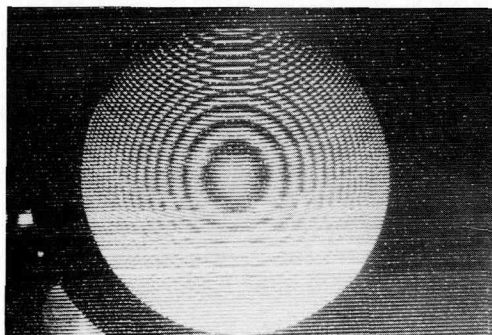


図 4-A : 偽モアレ

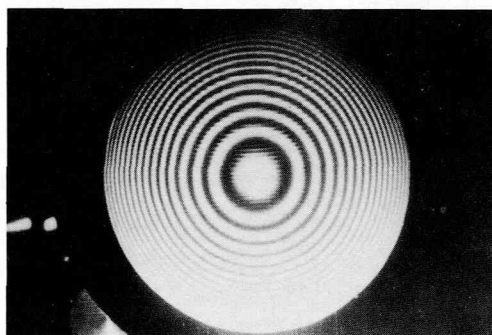


図 4-B : 偽モアレの消去

状態で撮影すると、偽モアレ縞が発現するために真のモアレ縞が不鮮明となり、明瞭な写真を得ることができず、写真の解析が正確に行えない。しかし、一方の格子をカメラの撮影範囲内でゆっくり移動させながらシャッターを切れば、不必要な縞として現われる線は平均化されて消失し、真のモアレ縞のみが残る。

## 2. 変形部分の測定法

変形する物体を被測定体としてモアレ縞写真の撮影を行う場合には、変形前のモアレ縞写真と変形後のモアレ縞写真とを、2枚重ね合わせることによって2次モアレ縞を発生させると、変形の程度、範囲、量、方向などを測定することができる。

## 3. 展開記録法

被測定物体の表面形態を帯状に展開した形で記録し、これに等高線モアレ縞を加えることによって各部分についての高さの情報を与えると、円筒形の物体、連続的に流れている帯状の物体、および大型の物体を高感度に測定することができる。

## 4. 被測定物体の撮影条件に適した位置ぎめ (Positioning)

同じ形態の物体でも、基準を決めずにモアレ縞の撮影を行うと、当然のことではあるが撮影の度毎に異なったパタンのモアレ縞が得られる。しかし、われわれが歯科領域で何らかの比較をするため、あるいは一定の方式に従った測定をするためには撮影基準を一定にしておかなければならない。

歯科領域で顔の形態的測定を行うためにこの等高線モアレ縞写真を利用する場合には、頭部の位置ぎめと固定が必要である。現段階ではそれぞれの装置利用者が独自の固定装置を考案して用いて

いるようであるが、多くは頭部X線規格写真撮影時に用いるイザーロッド式の固定装置に似たものである。この場合、頭部を垂直にして眼耳平面を床面と平行に保つように固定することが必要条件となる。また、石膏模型を用いて歯列あるいは顎堤、口蓋などの測定をしようとする場合は、模型上に基準点を求めるか、規準平面を設定するしなければならない。いずれの場合も一定の規準を設けて、常に格子面と撮影面との位置関係が同じでなくてはならない。

## 5. 被測定物体表面の撮影条件

モアレ撮影によって得られるモアレ縞は、被撮影物体の表面が光を拡散反射させるような状態のときに、最も鮮明な像として現われる。したがって、光沢があつて強く反射する面や、透明性をもっている物体表面などからは鮮明なモアレ縞の写真を得ることはできない。このような場合には、被撮影部分の光沢や透明性を抑制するための表面処理を施すことによって撮影条件を良好にすればよい。例えば、顔面の撮影に際しては、撮影直前に顔面皮膚の油性物質を十分に拭いとして光沢を減少させてから、さらに光を拡散させるように顔料を用いて薄く化粧を施すとよい。また、天然歯のエナメル質は光沢を有しているだけでなく、透明性をも有しているので、何らかの拡散性塗料を薄く塗布するか、あるいは印象採得を行って白色の石膏模型にしてから撮影するとよい。

## III. Moiré Topography 写真の解析<sup>6)</sup>

Moiré Topography によって得られたモアレ縞の写真を解析するには、一般に次の3つの方法が用いられる。

- 1 手描きによる解析
- 2 アナログ処理による解析
- 3 デジタル処理による解析

#### 1. 手描きによる解析

撮影された被測定物体のモアレ縞写真には、黒白の縞模様ボタンとして現われた物体表面の高低差の情報が含まれている。これを地図のような線画に描き替えたり、あるいは被測定物体の表面積、断面積、断面形態、断面線長などを求めたりするときに、手描きで行うと複雑な操作と多くの時間を必要とする。この方法によって断面を描くときには次のような注意を払わなければならない。

- 1) 被測定物体の凹凸に注意する。
- 2) 等高線モアレ縞の縞次数を間違えないようにする。
- 3) モアレの縞模様で1本の連続した縞の線上の点はすべて、同じ高さあるいは同じ深さを示しているので注意する。
- 4) モアレ縞の各線は、多少の幅をもっているため、同一測定操作については、その幅の中の一定の点（例えば幅の中央）を選んで正しくプロットすることが大切である。

また、この手描きの方法によって得た断面図から、被測定物体の断面積および、体積を求めることができる。断面積を求めるには、基準面を設定してプランメーターを使用し、体積は各断面積の総和から求める。

#### 2. アナログ処理による解析

作製されたモアレ縞の画像を、特殊なキルビーペンを用いて読み取る解析方法で、断面図を描きたい部分のモアレ縞にスケールを当てて、手動によりキルビーペンを移動させ、モアレの縞を形成している線の位置で処理装置へ信号を送る。この操作を繰り返して行くと断面が描かれるので、断面を描き終った時点で断面積が計算され、操作盤上に表示できる仕組みになっている。アナログ処理による解析法は簡便である反面、解析システムとしての補充強化および拡張が困難である。

#### 3. デジタル処理による解析

等高線モアレ画像をI・T・Vカメラで撮影して得られた映像信号をデジタル信号に変換し、所定のプログラムに基づきマイクロコンピューターで演算処理する。その結果として得られた

データを、プリンターあるいは、テープパンチャーに打ち出して記録するか、X-Yプロッターに等高線モアレ縞の指定位置の断面図を描くことのできる機能を備えた装置を用いて解析する方法である。このような装置はFUJINON OPTICAL PATTERN ANALYZER MC5000として市販されている。この装置の特徴は、

- 1) モアレカメラと組み合わせて用いるとリアルタイム測定が可能になる。すなわち、出力表示のスピード化がはかれる。
  - 2) コンピューターの専門的知識を備えていなくても簡単に操作できる。
  - 3) システムに互換性があるため、装置の変更あるいは追加が可能で、機能性を増大させることができる。
  - 4) テレビ入力用の形をとっているため、一度にデータを入力することができる。
- などである。

### IV. Moiré Topography の医学および歯学領域への応用について

#### 1. 医学領域への応用<sup>3) 6)</sup>

基礎医学の分野では、解剖学や人類学における計測、病理学における標本の形状記録などに応用されている。

臨床医学の分野では基礎医学よりも応用範囲が広く、次のような応用が行われている。

- ①外科学では、炎症、腫脹などの大きさ、範囲、形状、内容積、手術前後の記録と比較など、
- ②整形外科では、骨格の計測、脊柱彎曲症の計測による診断と治療評価、
- ③産婦人科では、妊婦の形態的診断、
- ④内科では、腫脹あるいは浮腫などの定量的検査と診断、
- ⑤神経科では、運動機能異常あるいは神経変性などによる筋の形態的变化、
- ⑥呼吸器科では、胸部外形の形態異常に関する診断、
- ⑦麻酔科では、呼吸機能の診断あるいは、ブロック前後の診断など、
- ⑧眼科では、乳頭部の計測、
- ⑨運動医学における動態解析、
- ⑩予防医学における定期検診、
- ⑪法医学における計測と診断、

など極めて広範囲に応用され、今後さらにその応用は広く、深くなるとともに装置や計測方法の急速な進歩発展が予想される。

## 2. 歯学領域への応用

基礎歯学では、口腔解剖学の分野で頭蓋骨とくに顎骨、歯牙、歯列弓、口蓋などの形態学的研究に応用し<sup>13)~17)</sup>、法歯学の分野で歯列弓や口蓋の形態的計測による結果を鑑定の一助に利用している。<sup>18) 19)</sup>

臨床歯学では、

①口腔外科学では、腫脹の大きさ、形態、範囲、内容積、術前と術後の形態の比較、兔唇・口蓋裂患者の術前、術後の形態変化に対する診断と評価、顔面の左右対称性の診断など、<sup>6)</sup> 20)~27)

②歯科矯正学では、顔面の形態的計測、頭蓋骨あるいは顎骨の発育と形態との関係診査、口蓋および歯列弓の形態と矯正治療との関連など、<sup>28) 29)</sup>

③小児歯科学では、乳歯列の三次元的な検索、小児の口蓋容積の測定、乳幼児の歯列及び口蓋の発育に関する研究など、<sup>30)~34)</sup>

④歯科補綴学では、義歯装着前後の外貌の形態的变化<sup>35)</sup>、顔面の動的観察<sup>36) 37)</sup>、無歯顎歯槽堤ならびに口蓋の形態的観察<sup>38)</sup>、抜歯後の顎堤の形態的变化の観察<sup>39)</sup>、天然歯牙の形態的観察<sup>40)</sup>、無歯顎模型の寸法精度<sup>41)</sup>など、

各分野にわたって応用されているだけでなく今後、その応用範囲も広がることが考えられる。

## V. 歯科補綴学と Moiré Topography

歯科補綴学の分野では、患者の失われた歯、軟組織および歯槽骨や顎骨などを形態的に修復するとともに、喪失あるいは低下した機能を回復し、また審美性の回復あるいは改善を計り、さらには顎関節や歯周組織の健康を維持し、正しい咬合関係を保つような修復物を製作して口腔内に装着することを目的としているが、これらの目的と顎口腔系の形態学的知識とその表現方法や技術とは極めて密接な関係をもっている。そして補綴物と顎口腔系の機能との調和は、目的に叶った補綴物として絶対に備えていなければならない必須条件である。例えば、歯の咬合面形態と下顎運動および咀嚼能率、歯の側面形態と食物の流れおよび歯肉

の健康保持、義歯床辺縁の形態と義歯の維持および機能、維持歯の解剖学的形態と維持装置ならびに生物学的障害、顎堤形態と人工歯の排列状態および排列方法、人工歯列と顔の審美性などはすべて、それぞれの条件が調和してこそすばらしい補綴物と云うことができる。

このように、歯科補綴学における形態と機能の調和をより満足なものにするために、形態学の研究を含めて、Moiré Topography が応用されはじめたのは比較的新しい。したがって、これに関する業績も数多くはないが、現在、松本歯科大学補綴学第 I 講座で手掛けている等高線モアレ縞を応用した研究の概要と、今後の発展と問題点について簡単に述べてみたい。

### 1. 総義歯補綴に関連して

総義歯は形態と機能との密接な関連が極めて重要な問題点となることは勿論であり、多くの研究者あるいは臨床家によって、総義歯製作に関係のある形態学的研究が数限りなく行われてきた。しかし、これまでの研究では上顎あるいは下顎の石膏模型についてそれぞれ単独の計測的研究が大部分であった。そこでわれわれは、Moiré Topography を応用して、上下顎単独の計測を始めると同時に、上下顎の正しい相対的位置関係を、関連づけた形態分析を行うべく研究を続けている。これがある程度解明すれば、総義歯の人工歯排列の理論的条件が比較的容易に実現できる可能性があり、より機能性の高い総義歯が製作されることになろう。すなわち、上下顎一対として、臼歯部人工歯排列の基準を求めるために、歯槽頂線および歯槽頂間線を含む“歯槽頂帯”を上下顎それぞれの模型上に求め、さらに上下顎の相対する歯槽頂帯に挟まれる空間と臼歯部人工歯の排列されるべき位置との間に密接な関係があるものとの考えから研究を進めている。

### 2. パーシャルデンチャーおよび Cr・Br に関して

歯冠形態の研究は古くから各種の方法によって数多く行われているが、近年 Moiré Topography を利用した研究がいくつか発表されてきた。しかし、これらの研究は主として解剖学的形態に関するものが多い。われわれは、それをさらに発展させて、維持歯の歯冠形態とくにサーベイレインより歯頸部側の形態を明らかにすることによって、

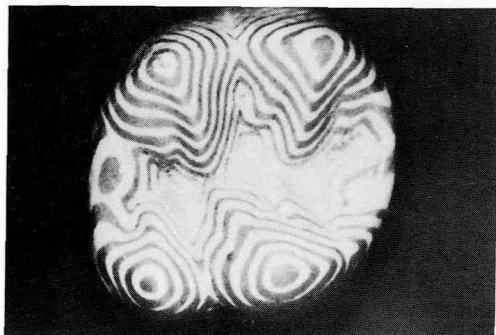


図5-A：6咬合面のモアレ縞焼付け模型

維持装置の種類，走向位置，維持力の求め方などと歯冠形態との関係を研究して，パーシャルデンチャーの合理的な設計の一助としたい。

また，歯冠彫刻を行う場合の基本的形態の把握，形態不良箇所の適確な発見と修正の適切な指示なども Moiré Topography を応用すれば極めて好都合であるが，被撮影体が小さいので精度の高い，良好な画像を得ることに困難性が残っている。

3. 石膏模型表面へ直接モアレ縞を焼きつける新しい方法の試み

一般の Moiré Topography は写真撮影により被測定物体のモアレ縞をプリントして観察，測定を行う方法をとる。しかし，われわれは被測定物体が石膏模型の場合に限り，特殊な方法でモアレ縞を直接石膏模型に焼きつけることに成功した<sup>42)</sup>。(図5-A, B)。さらに研究を進めて，迅速，安価で精度の高いモアレ縞焼きつけ模型ができれば，学生の模型実習および研究に一層大きな成果が期待できる。

## VI. む す び

Moiré Topography が歯学の分野で応用されるようになってから約10年余を経過したに過ぎず，今後の研究開発に期待するところが大きい，物体の三次元的形状測定としては，非接触方式という特長をもち，簡単でしかも測定精度もかなり高いことから，最近急激に利用度が増大してきた。しかし，一方では光学機械のもつ欠点も備えているので，測定の対象，目的などをはっきりさせて利用することが望ましい。

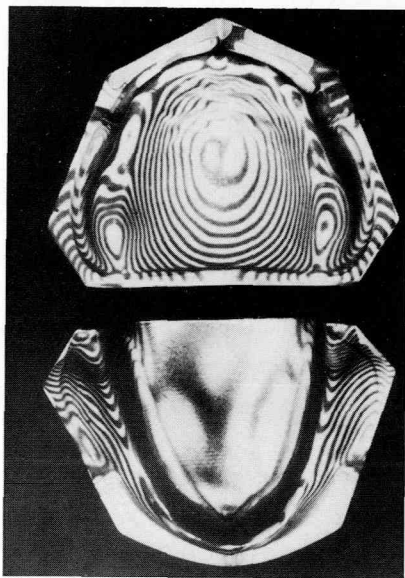


図5-B：上下顎無歯顎模型のモアレ縞焼付け模型

## 文 献

- 1) 高崎 宏(1970)モアレ縞による等高線の図化——立体形状をとらえる新しい手段として——. 科学朝日, 7: 132—135.
- 2) 高崎 宏(1971)モアレトポグラフィ. 画像技術, 1月号, 27—41.
- 3) 鷹股哲也, 橋本京一(1976)等高線モアレ縞による立体計測法の歯学への応用について. 松本歯学, 2: 122—128.
- 4) P. S. Theocaris (1969) Moiré Fringe in Strain Analysis. 219—278. Pergamon Press, London.
- 5) Sayca, L. A. (1972) Gratings in metrology. J. Physics E. 5: 193—198.
- 6) 富士写真光機, 光学機器部研究課編(1974)モアレトポグラフィ計測法. 1—19.
- 7) Takasaki, H. (1970) Moiré Topography. Appl. Opt. 9: 1457.
- 8) Meadows, D. M. (1970) Generation of surface contours by Moiré patterns. Appl. Opt. 9: 942.
- 9) 吉沢 徹, 清水茂久(1971)投影法によるモアレトポロジーとその応用. 昭和46年度精機学会春季大会学術講演会前刷, 245.
- 10) 鈴木正根, 鈴木喜義(1971)モアレトポロジーによる球面の測定. 昭和46年度精機学会春季大会学術講演会前刷, 239.
- 11) 吉野洋一(1972)投影型モアレ等高線図化法. 昭和47年度応用物理学会春季大会前刷, 32.
- 12) Hovanesian, J. D. (1971) Moiré contour-sum contour difference and vibration analysis of arbitrary objects. Appl. Opt. 10: 2734.

- 13) 尾崎 公, 他 3 名 (1976) モアレトポグラフィーの口腔領域の形態学への応用例. 映像情報, 2: 26—31.
- 14) 若月英三, 斎藤光正 (1976) モアレ稿による口蓋の形態学的研究, 1) 歯列弓の形態と口蓋各部との関係について. 歯科学報, 76: 1413—1425.
- 15) 若月英三, 他 4 名 (1979) モアレ稿による口蓋の形態学的研究, 2) 歯列弓の形態と口蓋弯曲の形態および口蓋最深部の外形との関係について. 歯科学報, 79: 587—599.
- 16) 上條雍彦 (1973) 臨床解剖学の立場からみた咀嚼・嚥下運動時の顎・顔面・口腔粘膜の形態変化について (その 2), 表情筋とモダイオラスの補綴学的意義について——臨床解剖学の研究から——. 歯科学報, 73: 1507—1560.
- 17) 上條雍彦 (1974) 臨床解剖学の立場からみた咀嚼・嚥下運動時の顎・顔面・口腔粘膜の形態変化について (その 2), 表情筋とモダイオラスの補綴学的意義について——臨床解剖学の研究から——. 歯科学報, 74: 1491—1501.
- 18) 生田輝久 (1977) 判別函数による口蓋形態の性別判定. 日大歯学, 51: 313—320.
- 19) 宮沢富雄, 他 (1978) 口蓋穹窿および歯列弓の形態からみた性別判定. 第 4 回モアレ研究会論文集, 7—8.
- 20) 山本 忠, 他 2 名 (1974) 顔面形態の立体的計測法に関する考察. 形成外科, 17: 58—59.
- 21) 河合 幹, 他 7 名 (1974) 顔面形態の立体的計測法に関する考察. 日口外誌, 20: 598—604.
- 22) 河合 幹, 他 7 名 (1975) モアレ等高線による顔面形態の立体的計測法のシステム化について. 日口外誌, 21: 419—425.
- 23) 塩入重彰 (1978) モアレトポグラフィー法による正常人顔面の対称性に関する検討. 口病誌, 45: 147—169.
- 24) 塩入重彰, 瀬戸皖一 (1979) モアレトポグラフィー法による顔表面形態の観察. 顎顔面補綴, 2: 57—62.
- 25) 兼松緋佐子 (1980) 顔の対称性に関する研究——モアレトポグラフィー法による側貌像の撮影および計測. 日大歯学, 54: 202—209.
- 26) 高橋 健 (1980) 顔の対称性に関する研究——表面積および体積について——. 日大歯学, 54: 461—474.
- 27) 北條健三 (1981) モアレ稿による顔面の対称性に関する研究. 歯科学報, 81: 1203—1237.
- 28) 莊 仁智 (1978) 矯正治療による口蓋形態の変化に関する研究——モアレ稿による検討—— 1. 成人女子上顎前突者について. 日大歯学, 52: 501—510.
- 29) 松本光生, 他 4 名 (1978) モアレトポグラフィーによる顔面形態の把握. 福歯大誌, 5: 139—147.
- 30) 古田美子 (1976) 乳歯列の三次元的検索. 第 1 報, 上顎乳歯列弓長径と幅径および口蓋高径について. 歯学, 64: 337—346.
- 31) 古田美子, 他 1 名 (1976) 乳歯列の三次元的検索. 第 3 報, 上顎乳歯列における口蓋最大高径部の形態および位置について. 歯学, 64: 357—358.
- 32) 前田隆秀 (1977) モアレ等高稿による小児の口蓋容積の研究. 小歯誌, 15: 180—188.
- 33) 市川泰右 (1977) モアレトポグラフィ法による乳幼児の上顎歯槽弓ならびに口蓋の成長発育に関する研究. 歯科学報, 77: 107—148.
- 34) 大里重雄 (1977) 乳歯列の三次元的検索. 第 4 報, 上顎第二乳臼歯萌出に伴う上顎乳歯列および口蓋形態の経年的推移について. 歯学, 64: 1094—1140.
- 35) 太田是男 (1971) 義歯による顔面の変化. 歯科学報, 71: 395—420.
- 36) 橋本 淳 (1973) モアレ稿応用による顔面の動的観察——表情運動の変化について——. 歯科学報, 73: 1507—1560.
- 37) 橋本 淳 (1973) モアレ稿応用による顔面の動的観察——咀嚼運動の変化について——. 歯科学報, 73: 1818—1847.
- 38) 鷹股哲也 (1980) 等高線モアレ稿による上顎無歯顎堤ならびに口蓋の形態的研究. 昭和 54 年度日本補綴歯科学会関東支部例会講演要旨. 日補誌, 24: 374.
- 39) 永田康文, 他 5 名 (1980) モアレトポグラフィ応用による抜歯後の顎堤形態の変化について——第 1 報——. 神奈川歯学, 15: 149—150.
- 40) 鍵和田 豊, 他 5 名 (1980) モアレトポグラフィ応用による歯冠及び歯肉形態に関する研究(1). 神奈川歯学, 14: 320—330.
- 41) 松本洋一, 他 7 名 (1978) 全部床義歯製作時における石膏模型の寸法変化に関する研究, モアレトポグラフィ計測法による一考察. 福岡歯誌, 5: 89—100.
- 42) 橋本京一, 鷹股哲也, 倉沢郁文 (1981) 石膏模型に写真乳剤封入による等高線モアレ稿直焼き法について (第 II 報). 松本歯学, 7: 308—309.