

学位論文内容の要旨

愛知学院大学

論文提出者

永井 秀典

論文題目

三次元有限要素法を用いた磁性アタッチメント最適
構造の検討

I. 緒言

歯科用磁性アタッチメントは、磁石の吸引力を利用して補綴装置を維持する装置である。

歯科用磁性アタッチメントの吸引力は、吸着面の面積と磁束密度が大きく関係し、特に、磁束密度の影響を強く受ける。そのため、歯科用磁性アタッチメント内の磁気回路を見直すことで、より効率的に吸引力を上昇させることが可能であると考えられる。すなわち、最適な磁気回路を導入することで、臨床価値のより高い歯科用磁性アタッチメントの開発が可能であると考えられる。

そこで、本研究は、現在臨床応用されている歯科用磁性アタッチメントを用いて内部構造を変化させ、磁気回路の違いが吸引力に及ぼす影響について三次元有限要素法を用いて解析を行い、磁性アタッチメント最適構造の検討を行った。

II. 材料と方法

1. 解析モデル

解析モデルは歯科用磁性アタッチメント (GIGUSS D600、ジーシー) を参考にした。

寸法は、磁石構造体が、半径 1.8mm、高さ 1.3mm、磁石が、半径 1.3mm、高さ 0.5mmの円型とし、シールドリングは、幅 0.2mm、高さ 0.2

mmとした。ディスクヨークは、半径1.1mm、高さ0.2mmとした。また、キーパーは、半径1.8mm、高さ0.7mmの円型とした。今回、軸対称であることを考慮し、解析1~3においては解析モデルを1/4モデル、解析4、5においては解析モデルを1/2モデルとし、2種類構築した。1/4モデルを基本モデル1、1/2モデルを基本モデル2とした。

2. 解析条件

磁石は、Ne-Fe-Bであり、その磁気特性については、磁石の熱特性とメーカーの発表値をもとに算出した。また、ヨークおよびキーパーは、SUS XM27であり、その磁気特性については実測値と近似式を用いて算出した。

3. 解析項目

まず、以下の解析1~3において最適構造の模索を行った。次に、解析4、5では解析1~3で算出された最適構造を付与した最適モデルにおける磁石構造体のキーパーに対する垂直、水平的変位が吸引力に及ぼす影響について検討を行った。

1) 解析1

ディスクヨーク中心部に設定した非磁性体の半径を0mmから1.0mmまで0.05mmずつ変化させた計20種類の解析を行った。

2) 解析2

キーパー吸着面中心部に設定した非磁性体の半径を0mmから1.0mmまで0.05mmずつ、深さは0.1mmから0.6mmまで0.1mmずつ変化させた

計 120 種類の解析を行った。

3) 解析 3

ディスクヨーク中心部の非磁性体の半径を 0.05mm から 0.5mm まで 0.05mm ずつ変化させた計 10 種類、キーパー吸着面中心部に非磁性体の半径を 0.05mm から 1.0mm まで 0.05mm ずつ、深さは 0.1mm から 0.6mm まで 0.1mm ずつ変化させた計 120 種類、それぞれを組み合わせた計 1200 種類の解析を行った。

4) 解析 4

磁石構造体の垂直的変位が 0mm から 0.2mm まで 0.01mm ずつ変化させた計 21 種類の解析を行った。比較対象の基本モデル 2 においても同様の解析を行った。

5) 解析 5

磁石構造体の水平的変位が 0mm から 1.8mm まで 0.1mm ずつ変化させた計 19 種類の解析を行った。比較対象の基本モデル 2 においても同様の解析を行った。

解析結果の評価は、吸引力および磁束密度分布とした。

III. 結果

1. 解析 1 磁石構造体のディスクヨーク中心部に非磁性体を設定した場合

1) 吸引力

非磁性体の半径が 0.3mm で吸引力が最大となり、約 560gf を示し、約 103% に上昇した。

2) 磁束密度分布

非磁性体の半径が大きくなると、磁束密度の上昇が確認された。0.6mm 以上になると、過飽和状態が確認された。

2. 解析 2 キーパー吸着面中心部に非磁性体を設定した場合

1) 吸引力

非磁性体の半径が 0.6mm、深さが 0.1mm で吸引力が最大となり、約 582gf を示し、約 107% に上昇した。吸引力に及ぼす非磁性体の深さの影響は少ないことが確認された。

2) 磁束密度分布

非磁性体の半径が大きくなると、磁束密度の上昇が確認された。0.8mm 以上になると、過飽和状態が確認された。

3. 解析 3 磁石構造体のディスクヨーク中心部とキーパー吸着面中心部両方に非磁性体を設定した場合

1) 吸引力

ディスクヨーク中心部に設定した非磁性体の半径が 0.15mm、キーパー吸着面中心部に設定した非磁性体の半径が 0.5mm、深さが 0.1mm で吸引力は最大となり、約 598gf を示し、約 110% に上昇した。吸引力に及ぼす非磁性体の深さの影響は少ないことが確認された。

2) 磁束密度分布

ディスクヨーク中心部に設定した非磁性体の半径が 0.15mm、キーパー吸着面に非磁性体の半径が 0.5mm、深さ 0.1mmになるまでは、磁束密度の上昇が確認された。それ以上になると、過飽和状態が確認された。

4. 解析 4 最適モデルにおける磁石構造体の垂直的変位の影響

1) 吸引力

基本モデル 2、最適モデルともに垂直的変位が増加するとともに、大幅な吸引力の減少が確認された。垂直的変位が 0.06mmまでは、基本モデル 2 より最適モデルの方が、吸引力が大きいのが確認された。垂直的変位が 0.06mm以上になると、ほぼ同等程度であるのが確認された。

2) 磁束密度分布

基本モデル 2、最適モデルともに垂直的変位の増加に伴い、磁束密度の減少が確認された。

5. 解析 5 最適モデルにおける磁石構造体の水平的変位の影響

1) 吸引力

基本モデル 2、最適モデルともに垂直的変位と比較すると吸引力の減少は、全体的に緩やかであった。水平的変位が 0.4mmまでは、基本モデル 2 より最適モデルの方が、吸引力は大きくなった。水平的変位が 0.5mm以上になると、基本モデル 2 より最適モデルの方が、吸引力は小さくなるのが確認された。

2) 磁束密度分布

基本モデル 2、最適モデルともに水平的変位の増加に伴い、磁束密度の減少が確認された。また水平的変位量の増加とともに、漏洩磁場の増加が確認された。

IV. 考察

1. 吸引力について

磁石の吸引力は下記の式で示される。

$$F = (1/2 \mu_0) \cdot S \cdot B^2$$

{ μ_0 : 真空の透磁率、S: 吸着面の面積、B: 磁束密度}

磁束密度は磁性体固有の磁束密度の限界である飽和磁束密度に達すると上昇しなくなる。さらに、過飽和状態となると磁気回路における磁気抵抗が上昇し、結果的に磁束密度が減少していくことになる。そのため、吸引力を上昇させるためには、吸着面の面積と磁束密度の適切なバランスが重要であると考えられる。

2. 解析方法について

磁石が生み出す吸引力を実測、観察することは容易ではない。これらを検証する方法として有限要素法は、複雑な境界値問題に対する理論解析値を与えることを可能にしている。このことから、本研究において有限要素法を用いた解析は有用であると考えられる。

3. 解析モデルについて

解析モデル構築時にアスペクト比の悪い要素が含まれると、計算精度を落とす原因となる。そのため、アスペクト比に留意して要素分割を行った。また、漏洩磁場の出現する範囲を確認し、要素分析を行った。その上で最適化を行った。

4. 解析条件について

今回の解析では、磁性ステンレス鋼である SUSXM27 の磁気特性の実測を行い、実測不可能なところに関しては、近似式より B-H 曲線を算出した。磁石に関する磁気特性は、未だ不明な点が多く、今後更に詳細な検討が必要であると考えられる。

5. 解析結果について

1) 解析 1

吸引力の上昇率が低かった原因として、カップヨーク型はキーパー中心部における磁束密度の集中が少ないという特徴がある。また、ディスクヨークに設定した非磁性体が直接磁石と接していることにより、磁石から出た磁束は非磁性体にも流れてしまう。そのため、その内部構造を変化させても影響が少なかったものと考えられる。

2) 解析 2

解析 1 よりも吸引力の上昇率は大きくなった。これは、設定した非磁性体がキーパー中心部であるため、解析 1 よりも磁束が効率的に絞られたも

のと考えられる。次に、非磁性体の深さの影響が少なかった理由は、キーパー中心部において磁束密度の集中が起こりにくいカップヨーク型の磁気回路を用いたことに起因するものと考えられる。

3) 解析 3

解析 3 は解析 1、2 と比較して吸引力の上昇率は最も高くなった。これは、磁石から出た磁束が、まず、ディスクヨーク中心部にて絞られ、次に、その磁束がキーパー吸着面中心部でさらに絞られ、より効果的に磁束密度を上昇させることが出来たものと考えられる。

4) 解析 4

垂直的変位が 0.06mm までは、最適モデルの方が基本モデル 2 と比較して、磁気回路の違いによる吸引力の低下に対して抵抗したものと考えられる。しかし、垂直的変位が 0.06mm 以上になると、垂直的変位における空隙による影響を強く受け、磁気回路の違いによる吸引力の差が少なくなったと考えられる。

5) 解析 5

水平的変位が 0.5mm までは、最適モデルの方が基本モデル 2 と比較して、吸引力の低下に抵抗したものと考えられる。しかし、水平的変位が 0.5mm 以上になると、ディスクヨーク中心部とキーパー吸着面中心部に設定した非磁性体両方によって最適モデルの吸着面積が減少するため、最適モデルよりも基本モデル 2 の方が吸引力の値が大きくなったと考えられる。

V. 結論

歯科用磁性アタッチメント構造の最適化について三次元有限要素法を用いて解析、検討を行ったところ、以下の結果を得た。

1. 歯科用磁性アタッチメント内部に非磁性体を設定し、磁気回路を変更させることにより吸引力の上昇が確認された。
2. ディスクヨーク中心部に非磁性体を設定するよりも、キーパー吸着面中心部に非磁性体を設定した場合の方が吸引力の上昇が確認された。
3. キーパー吸着面中心部に設定した非磁性体の深さは、半径の大きさと比較して吸引力へ与える影響が少ないことが確認された。
4. 最適化構造を付与した歯科用磁性アタッチメントは、磁石構造体の垂直、水平的変位において歯科用磁性アタッチメントと比べ、同等以上の吸引力を維持できる可能性が示唆された。