

令和 3 年 6 月 30 日現在

機関番号：22701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2020

課題番号：16K11758

研究課題名（和文）骨結合型チタンスキャホールドによるヒト下顎骨再建シミュレーション

研究課題名（英文）Mandibular reconstruction simulation with osseointegrated titanium scaffold

研究代表者

高須 曜（Takasu, Hikaru）

横浜市立大学・附属市民総合医療センター・助教

研究者番号：60647999

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：顎骨切除後の下顎骨は骨の形態が非対称であり、特に正中部は応力がかかりやすく、咬合負荷をする場合には骨の強度を考慮する必要がある。チタンインプラントは顎骨機能の回復に有用であるが、顎骨切除後症例では残存骨やインプラント周囲への負荷を考慮する必要がある。本研究では、骨再建用スキャホールドによる再建を念頭におき、咬合応力をどのように分布させることが最適であるかインプラントシミュレーションを実施して検討した。インプラントを作用点とした下顎応力解析ではそれぞれを結合させることで3点分布においても4点分布と同等の応力軽減を図ることが可能であり、その分布は切除部から離れた片側1点、反対側2点が最適であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

辺縁切除後の下顎ではインプラント埋入が困難であり、骨結合型スキャホールドなど新規材料の開発が望まれる。切除された下顎では咬合を4点で受ける場合には切除部から離れた後方に作用点（インプラント）を置くことで応力が減少し、切除部およびインプラント周囲にかかる応力が最小になると考えられた。また、3本埋入した場合は1本側のインプラントを切除部から離れた位置に埋入することで、インプラント周囲の応力が許容可能な範囲になることが実証され、解剖学的に作用点を4点おけない場合でも、3点で上部構造が固定されていれば安定した咬合負荷が可能になる可能性が本シミュレーションから示唆された。

研究成果の概要（英文）：This study was conducted to determine the secure mechanical stress distribution on the marginally resected mandible using implant simulation to assume reconstruction with bone-integrated scaffold. Three or four implants were placed at near, middle, or far position from the resected margin in a simulation model with a symmetric marginal defect in the mandibular symphysis. When the isolated implant was placed at the middle position, the von Mises stress was < 10 MPa irrespective of bone height and was significantly lower than at the far position and was generally equal to that of the symmetric pattern. These results suggest that the asymmetrically positioned three-implant-supported fixed denture is an alternative option without increasing the stress on both the resected and peri-implant bone, as compared to the symmetrically positioned four-implant-supported fixed denture, when an isolated long implant is placed neither too close to nor too far from the resected margin.

研究分野：顎骨インプラント

キーワード：インプラントシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

下顎辺縁切除後の下顎骨は、その不安定な咬合関係や咬合力により切除部に病的骨折を引き起こす応力が集中する可能性がある。切除部の残存骨高さが 9mm 以下の場合に、切除部での病的骨折を起こしうるとされ、さらに残存骨の高さや咬合状態によっては 100MPa を越える応力が切除部に生じることが有限要素法解析 (FEA) により実証されている。FEA は特定の条件下での顎骨やインプラントにかかる機械的ストレスを外科的な侵襲を加えることなく評価でき、顎骨にかかる負荷をインプラントの形状や上部構造の設計、荷重条件などの様々なパラメーターが周囲の応力分布に及ぼす影響を評価するためのツールとして広く使用されてきた。また、インプラントそのものへの機械的ストレスに対する強度を評価することにも使用されている。先行研究において、無歯顎患者の下顎辺縁切除後の下顎骨を用いて、左右対称に配置した 4 本のインプラントによる固定性義歯が、2 本のインプラントによる可撤性義歯の場合よりも切除部の応力を 50% 程度減少させることができることを FEA を用いて実証した。すなわち下顎にかかる応力の作用点を 4 点とし、これらを連結することで下顎にかかる応力を分散させることが明らかになった。しかしながら、広範囲の下顎切除後では 4 本のインプラントを埋入することができない場合も存在する。これまでの研究成果で応力を緩和できるチタンファイバースキャホールドが開発され、将来的にこのスキャホールドの応用を想定した場合、インプラントに代わる顎骨に直接結合する咬合支持装置となりえるが、この場合でも何点かの応力作用点が必要となる。本研究では下顎辺縁切除後の無歯顎患者を想定したモデルを作成し、4 本のインプラントが埋入できないような下顎欠損、すなわち 4 点の応力作用点の確保ができないような欠損を想定し、より少ない作用点においても切除部にかかる機械的ストレスを最も緩和して安定させられる応力作用点の分布をインプラントシミュレーションによる FEA を用いて検討した。

2. 研究の目的

解剖学的な理由により咬合を支持するための応力作用点の確保が困難となるヒト下顎欠損モデルとインプラントシミュレーションを組み合わせ、有限要素法解析によって最適な応力作用点を解析し、咬合力緩衝能を有するような顎骨結合型チタンファイバースキャホールドの効果的な応用方法を検討するための基礎的データを構築すること。

3. 研究の方法

・下顎切除モデルおよび歯科インプラントモデル

無歯顎患者の DICOM データとコンピュータ支援設計ソフトウェア (3-Matic; Materialize NV, Leuven, Belgium) を用いて正中部位辺縁切除後無歯顎下顎骨モデルを作成した。骨欠損は下顎正中部位に作成し、切除部位の残存骨の高さ (5mm, 10mm, 15mm) に応じた 3 種類の下顎欠損モデルを作成した。

歯科インプラントは直径 3.75mm の円筒形に設計し、長さは 10mm, 15mm の 2 種類を作成した。歯科インプラントの上部構造はすべてのインプラントを連結するように設定した。歯科インプラントの埋入位置は切除断端から 5mm の位置を Near position (N), 15mm の位置を Middle position (M), 25mm の位置を Far position (F) と左右対称に設定した (図 1)。下顎の両側に 3 本、または 4 本を左右対称もしくは非対称に配置した。

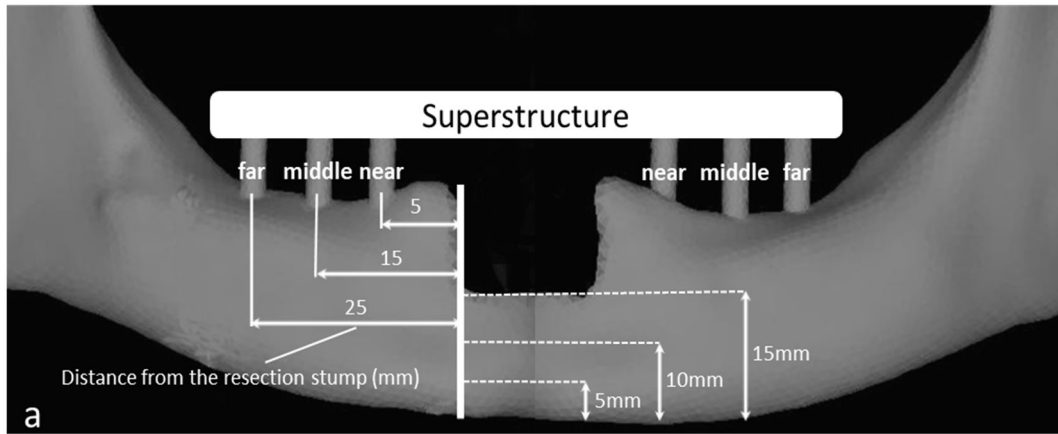


図1 下顎切除モデルおよび歯科インプラントモデル

・FEA

咬合負荷に対する切除部応力とインプラント周囲骨の機械的ストレスを測定するために、有限要素法解析ソフト：Mechanical Finder(Research Center of Computational Mechanics, Inc. Tokyo, Japan)を使用した。歯科インプラントは純チタン材料を想定し、Poisson 比は 0.40、Young 率は 10800kgf/mm² とした。下顎骨の Poisson 比は 0.19 とし、Young 率は Keyak の公式を用いてソフトウェア上で自動計算された値を用いた。インプラントに装着する上部構造は歯科インプラントと同様の物性を与え、歯科インプラントと骨は 100%のオッセオインテグレーションを得ていると仮定した。FEA モデルの総要素数は 242,033~281,384、総接点数は 52,079~57,700 であった。

歯科インプラントに加わる咬合力は 500N と仮定し、上部構造の両側大臼歯部と中切歯部の 3 点に 500N の並進荷重を均等に分けて咬合面に垂直に負荷した(図2)。荷重条件を制限するため、下顎枝後方を X, Y, Z 軸方向から拘束した。残存骨および歯科インプラント周囲骨にかかるフォンミーゼス応力を MPa で測定し、以下に示すようなインプラント配置パターンについて解析した。各群のインプラント配置パターン数はそれぞれ 9, 3, 9, 3 パターンとなった。また、パターン 1 では切除部残存骨高さは 5mm, 10mm, 15mm の 3 パターン使用し、その他のグループでは切除部残存骨高さを 10mm として検討を行った。

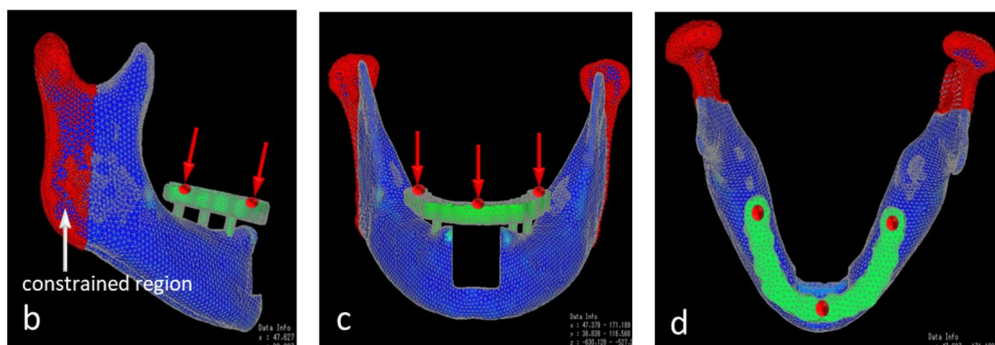


図2 拘束範囲及び荷重負荷点と荷重方向

・インプラント配置パターン

3本のインプラント(10mm)を左右非対称に配置(図3a)

4本のインプラント(10mm)を左右非対称に配置(図3b)

3本のインプラントを左右非対称に配置, 1本側に長いインプラント(15mm)を使用(図3c)

4本のインプラント（10mm）を左右対称に配置（図3d）

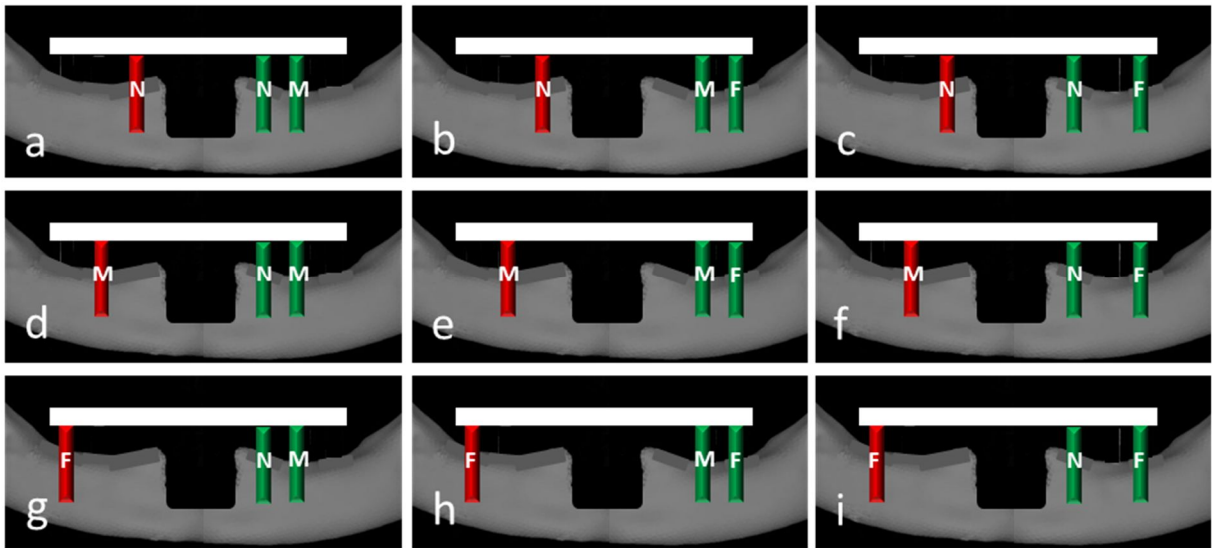


図3a インプラント配置パターン

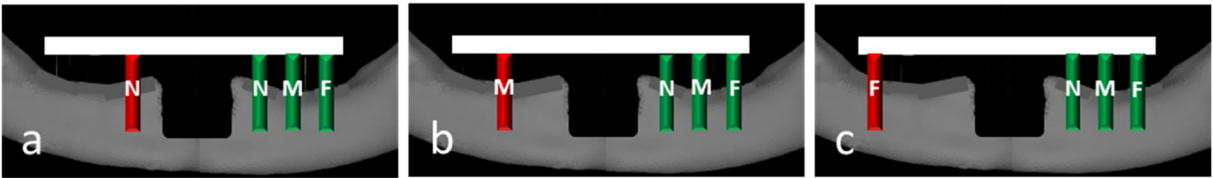


図3b インプラント配置パターン

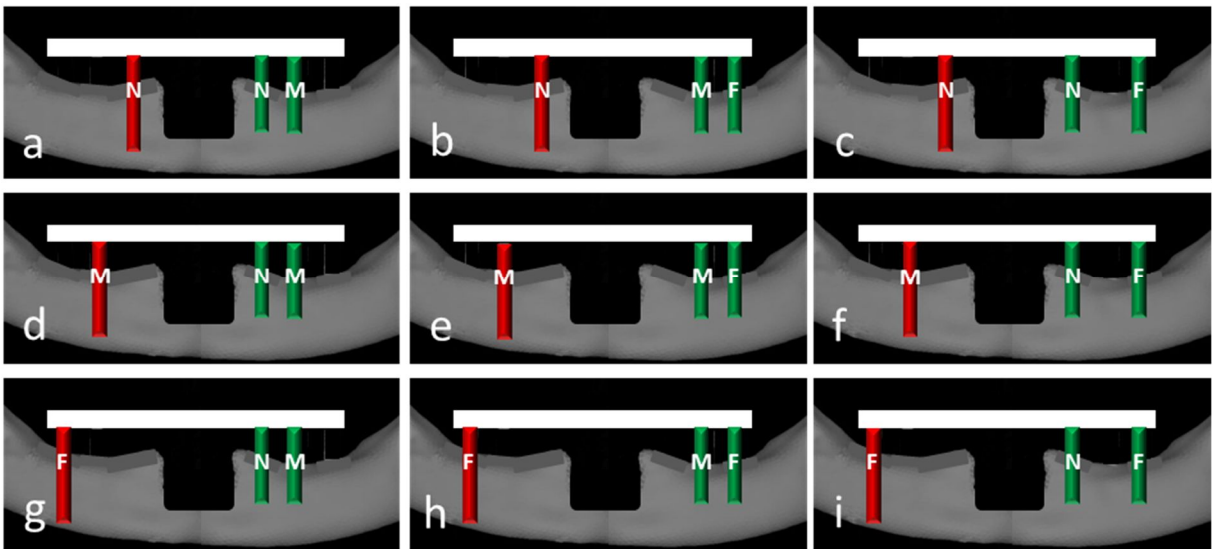


図3c インプラント配置パターン

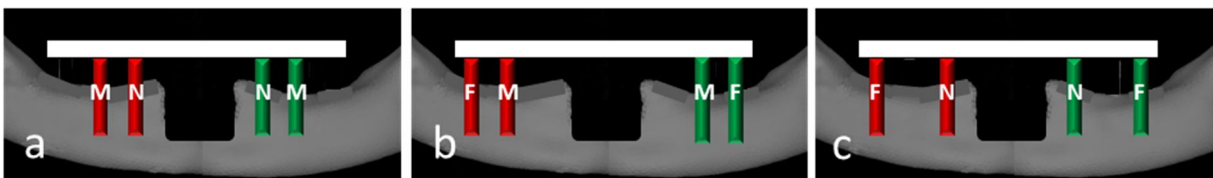


図3d インプラント配置パターン

・統計分析

2群間の比較には student's t-test を使用し，多群比較は ANOVA 後に Bonferroni 補正を行い，有意水準は5%未満とした。

4．研究成果

1 本側のインプラントが欠損側に最も近接した Near の位置にあるとき、インプラント周囲応力は残存骨の高さや反対側のインプラント配置に関わらず、20MPa 以上になった。

一方、1 本側のインプラントを Middle もしくは Far に配置した場合のインプラント周囲応力は 15.4~17.3MPa に低下した。1 本側のインプラント周囲応力は残存骨の高さに影響を受けなかった。

切除部応力は残存骨の高さの減少に伴い増加した。1 本側のインプラントを Near, Middle, Far に配置した時の切除部応力はそれぞれ $16.79 \pm 3.80\text{MPa}$, $8.70 \pm 0.80\text{MPa}$, $13.46 \pm 2.68\text{MPa}$ となり 1 本側のインプラントを Middle に配置した場合に Near, Far と比較し切除部応力は有意に低下した

パターン において 1 本側のインプラントが Near, Middle, Far に位置する時のインプラント周囲応力は $21.03 \pm 0.17\text{MPa}$, $16.30 \pm 0.08\text{MPa}$, $15.73 \pm 0.17\text{MPa}$, 切除部応力はそれぞれ $16.73 \pm 3.71\text{MPa}$, $8.53 \pm 0.12\text{MPa}$, $12.83 \pm 1.37\text{MPa}$ となった。インプラント周囲応力や切除部応力はパターン とほぼ同様の結果となった。

パターン において 1 本側の長い(15mm)インプラントが Near, Middle, Far に位置している時のインプラント周囲応力は、 $18.53 \pm 0.56\text{MPa}$, $13.53 \pm 0.19\text{MPa}$, $13.87 \pm 0.39\text{MPa}$ であり、パターン の場合よりもインプラント周囲応力を減少させることができた。加えて、1 本側のインプラントが Middle, Far に配置されたときは、パターン の 4 本対称性配列と同等のレベルまで応力が低下した。切除部応力は $12.97 \pm 0.66\text{MPa}$, $8.27 \pm 0.05\text{MPa}$, $10.57 \pm 0.74\text{MPa}$ となり、1 本側のインプラントが Near と Far に配置した場合に対応するパターン の場合と比較して、切除部応力を減少させることができた。

パターン において、Near, Middle, Far のインプラント周囲応力の平均は $6.55 \pm 0.48\text{MPa}$, $14.32 \pm 1.74\text{MPa}$, $13.62 \pm 0.35\text{MPa}$ で、切除部応力の平均は $8.73 \pm 1.10\text{MPa}$ となった。

これらの結果から、切除された下顎では咬合を 4 点で受ける場合には切除部から離れた後方に作用点(インプラント)を置くことで応力が減少し、切除部およびインプラント周囲にかかる応力が最小になると考えられた。また、3 本埋入した場合は 1 本側のインプラントを切除部から離れた位置に埋入することで、作用点の応力が許容可能な範囲になることが実証され、解剖学的に作用点を 4 点おけない場合でも、3 点で上部構造が固定されていれば安定した咬合負荷が可能になる可能性が本シミュレーションから示唆され、今後咬合緩衝能を有する顎骨結合型チタンファイバースキャホールドが応用可能になった場合に顎骨に結合させる部位、すなわち応力作用点の分布方法の参考になると考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kosugi Yasufumi、Hirota Makoto、Tamai Naohito、Takasu Hikaru、Iwai Toshinori、Mitsudo Kenji	4. 巻 -
2. 論文標題 A three-dimensional finite element analysis of resected mandibular bone to determine the most stable implant positions for a fixed prosthesis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Oral Implantology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1563/aaid-joi-D-20-00180	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小杉泰史
2. 発表標題 有限要素法解析を用いた顎骨切除後インプラントの応力解析
3. 学会等名 日本顎顔面インプラント学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	廣田 誠 (Hirota Makoto) (20347305)	横浜市立大学・市民総合医療センター・准教授 (22701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------