

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：32667

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12064

研究課題名(和文) オーラルフレイルの予防に寄与する咬合支援ロボットの開発とその動作解析

研究課題名(英文) The development and the movement analysis of an occlusion support robot contributing to the prevention of oral frailty

研究代表者

亀田 剛 (Kameda, Takashi)

日本歯科大学・新潟生命歯学部・講師

研究者番号：30277610

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)：口腔機能の低下(フレイル)は全身機能の低下の危険ファクターであり、その防止のための口腔リハビリテーション/トレーニングのためにウェアラブル型支援機器を開発し、筋電位と唾液分泌量からその効果を評価した。本装置を装着することにより、開口筋のトレーニングとしてその筋活動を25%増加させ、閉口筋の筋活動を15%アシストし、さらに唾液分泌を15%増加させることができた。本装置およびその駆動メカニズムを応用することにより、来たるべき超高齢化社会において、口腔機能の維持や強化によりオーラルフレイルの予防に寄与することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

咀嚼から嚥下への連続した口の機能は摂食する上で重要である。この口腔機能の低下(オーラルフレイル)は全身の機能低下に移行し、寝たきりへ移行する可能性がある。本開発装置は装着者の開口トレーニングと閉口アシストを行うことにより、咀嚼筋の活動の維持・強化や唾液の分泌量の増加に寄与し、口腔機能の賦活化に加えて、口腔衛生状態を良好にし、オーラルフレイルや全身機能低下の予防に結びつくと考えられる。口腔の健康向上を通して、全身の健康を維持し、国民の健康の保持・増進(QOLの向上・健康寿命の延伸)により、社会的・個人的な活動を活発化させ、将来的な医療費削減を含めた経済効果の向上に寄与すると確信する。

研究成果の概要(英文)：The sequential oral functions of mastication and swallowing are well tuned. To prevent oral hypofunction as a risk factor for systemic frailty, we developed a semi-powered exoskeleton for oral rehabilitation/training and evaluated its loading/assist effects by monitoring electromyography signals and saliva secretion in healthy persons. The actuator of the driving unit combined mechanical and powered mechanics and was driven alternatively by an unpowered stainless-steel spring system for jaw-opening training by loading and a powered shape-memory alloy spring system to assist jaw closing. Sequential device movement was controlled by two electronic circuits. This exoskeleton realized a 25% increase of jaw-opening muscular activity for training, 15% saving of jaw-closing muscular activity for assistance, and 15% enhancement of saliva secretion, which could contribute to the prevention of oral frailty by maintenance and strengthening of oral function in the upcoming super-aging society.

研究分野：社会系歯学

キーワード：支援機器 顎運動 予防 オーラルフレイル 健康寿命 医工学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

顎を動かす事は、顎や歯列の正常な成長を促し、唾液分泌を促し、消化吸収力や免疫力を上げ、全身の健康を向上させる(Bull World Health Organ83: 661-669,2005)。成人や高齢者では噛むことで体全体のバランスや筋肉の衰えを防ぎ、脳の活性化、認知症や転倒予防、唾液の分泌の促進、口腔周囲筋の賦活化、嚥下の衰えの遅延が誤嚥性肺炎の罹患率を下げる。これには、噛むことによる口腔清掃状態の向上も関係している(Lancet 354:515,1999)。2011年以降、肺炎は我国の死因の上位であり、その大半が高齢者である。高齢者の肺炎の7~9割の原因が誤嚥と報告されている(J Am Geriatr Soc 56:577-579, 2008)。さらに、日本歯科医師会では、平成27年よりオーラルフレイル(歯・口の機能の虚弱)の予防の重要性を積極的に発信し、啓蒙活動を活発に推進している。

歯の喪失は、記憶力等の認知機能の低下や歩くスピードの低下等の運動能力の低下を引き起こす(J Am Geriatr Soc 63:91-99,2015)。これは、顎を動かすことが直接的な効果のみならず、装着者の活動範囲拡大にも寄与することを意味する。つまり、顎を動かすことに関係する口腔清掃状態の向上やオーラルフレイルの予防などを行うことにより、食欲を増進させるだけではなく、それに付随した体全体の機能維持や寝たきりの防止と健康寿命の延伸が期待され、直接または間接的に医療費削減や経済効果が期待できる。そこで、装着者の咀嚼筋群をターゲットに開口トレーニングと閉口運動をアシストするウェアラブル型咬合支援ロボットを開発することは、オーラルフレイルを予防し、QOLの向上や健康寿命の延伸に寄与すると考えられ、これからの超高齢化社会において重要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、オーラルフレイルの予防を念頭に、装着者の咬合のリハビリテーションを支援する顎外に装着するウェアラブル型咬合支援ロボットを開発することであった。しかし、試作を重ねるうちに、当初の咬合支援ロボットから、開口トレーニングと閉口アシストを行う支援ロボットへコンセプトを変更した。これにより、口腔機能の賦活化や口腔衛生状態を良好にし、オーラルフレイルの予防により、良好な全身の機能維持などを図ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 開口トレーニングと閉口アシストを実現する装置の開発

機械的メカニズムのみで開口を妨げずに閉口をマイルドにアシストするという当初のコンセプトに沿って試作を行ってきた結果(図1)から、その駆動装置およびその支援ロボットの外骨格への設置位置、その駆動メカニズムなどについて検討した。その結果、開口トレーニングと閉口アシストの組み合わせが重要であることが判明し、コンセプトを変更した(図2)。このコンセプト実現のため、2つのステンレスパネと2つのカスタムメイドしたニッケルチタン製形状記憶合金(SMA; shape memory alloy)パネ(株KRI)を組み合わせ、さらに2つの磁気スイッチシステムと冷却ファンを駆動装置として装着者が頭部に装着する外骨格に設置し、その駆動装置は2つの電子回路と3つの電源(4.5V, 12V, 12Vに変圧)をパッキングしたコントローラにより駆動部分にコネクタターミナルを介して接続され、コントロールされる。このコントローラには、オン/オフの他に非常時のために緊急停止モードを設けた(図2, 3)。駆動装置の外骨格部分は、強度、低摩擦と軽量化を考慮して、PFA、PTFE、PMMAを組み合わせで作製した。頭部装着の外骨格は、ヘッドホン用のアルミ材を加工し作製した。下顎を上へ引き上げるチンカップ部分は歯科用常温重合レジン(オストロンII, 株ジーシー)にて作製し、駆動装置からの駆動力のチンカップへの伝達には、自転車用シフトの金属ケーブル(フレックスライン, クエイサー)を流用した。

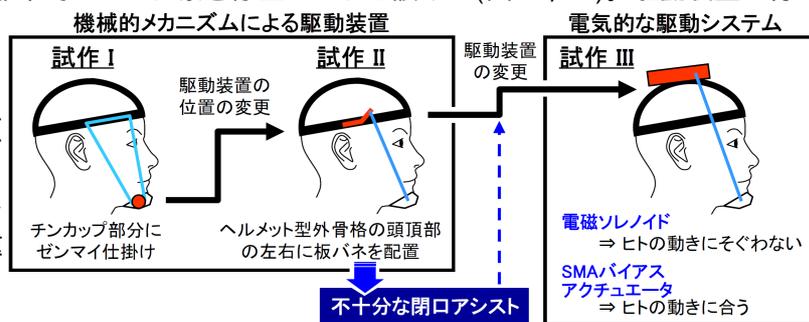


図1 当初のコンセプトに基づいた試作

(2) 健常者への装置装着によるEMGシグナルと唾液分泌量の計測

EMGシグナルの計測は、開口筋として顎二腹筋前腹部、閉口筋として咬筋相当部の左右側の皮膚表面に電極を設置して行った。これらの筋のEMGシグナルは、装着者に開口と閉口を5回行い、ワイヤレスEMGセンサ(OE-WS1223, 有追坂電子)でサンプリング周波数100Hzにて計測した。EMGシグナルは、装置未装着、装着時の駆動モードI(開口トレーニングのみ)、駆動モードIII(開口トレーニング+閉口アシスト)、駆動モ

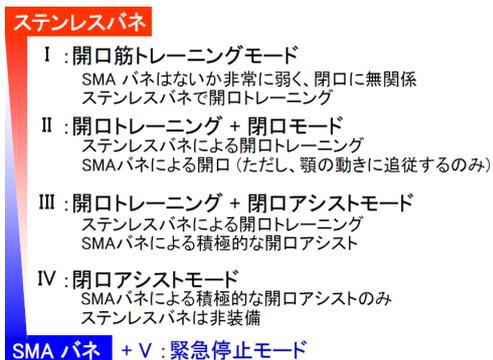


図2 最終試作の駆動モード

ード IV(閉口アシストのみ)について計測した。得られたデータは積分し、実験参加者ごとに左右側のデータを平均した上で、さらに装置未装着時のデータに対して正規化して(BIMUTAS-Video LITE, (株)キッセイコムテック)、装置の効果の評価とした。得られた筋電図については、同時に計測した顎運動と同期させた。顎運動の評価には、歯科矯正学のセファロ分析で用いる Or(オルビターレ：眼窩骨縁の最下点), Po(ポリオン：骨外耳道の上縁), Pog(ポゴニオン：フランクフルト平面(Po-Or)に対する下顎オトガイ隆起の最突出点)をランドマークとして用い、録画した動画データからそれらの動きをトレースし、その角度の変化($\Delta\angle Or-Po-Pog$)を計測(Image Tracker PTV, (株)ディグモ)した。

唾液分泌量はSaxonテストの変法で行った。分泌量は、舌下に滅菌した脱脂綿を設置し、装置を装着、10回稼働させたのちに増加した重量で評価した。装置未装着時の分泌量については、10秒静置したものと閉口と閉口を10回繰り返したものについて計測した。計測後の脱脂綿は滅菌し、医療ゴミとして廃棄した。

以上の計測は、ホルモンによる影響と想定した装着者の年齢を考慮して、全身疾患がなく、重篤な歯科的欠損のない40代後半以降の健康男性10名(平均年齢 54.7 ± 5.12 歳)について、インフォームドコンセントの後に、日内変動を考慮して15時~16時の間に行った。データは計測に関係しない研究者により統計処理された。

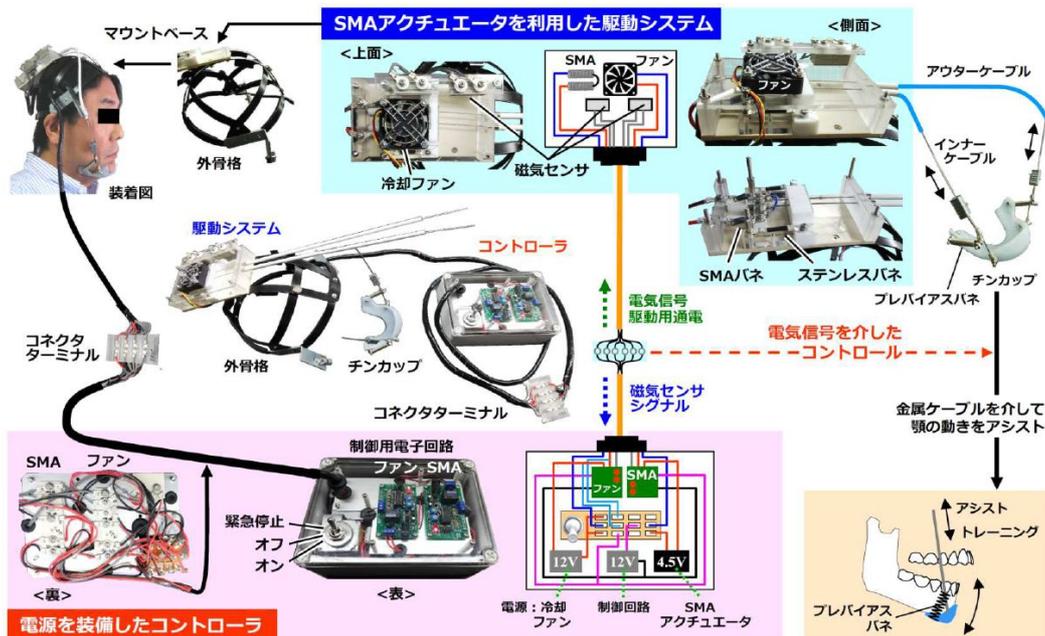


図3 試作 IV の外観とその構成

4. 研究成果

(1) 最終試作 IV までの経緯：試作 I~III

試作 I ではチンカップ部分に駆動部分を設置したため、その重量のために閉口運動に追従することが出来なかった(図1)。そのため、試作 II では駆動部分を頭部に装着する外骨格部分に設置した。まずは、その設置位置の是非を調べるために板バネを外骨格部分の左右に設置して、簡単に筋電位を計測したが、閉口のアシストは認められなかった。そこで、駆動装置を機械的メカニズムから電気的メカニズムに変更した。試作 III では、駆動装置として、使用できる大きさの電磁ソレノイドと SMA バイアスアクチュエータを用意した。駆動させたところ、電磁ソレノイドの動きは唐突過ぎ、ヒトの動きには合わなかった。SMA バイアスアクチュエータはヒトの動きには合っていた。しかし、双方ともヒトに使用できる大きさのデバイスでは閉口をアシストするには駆動力が弱すぎた。

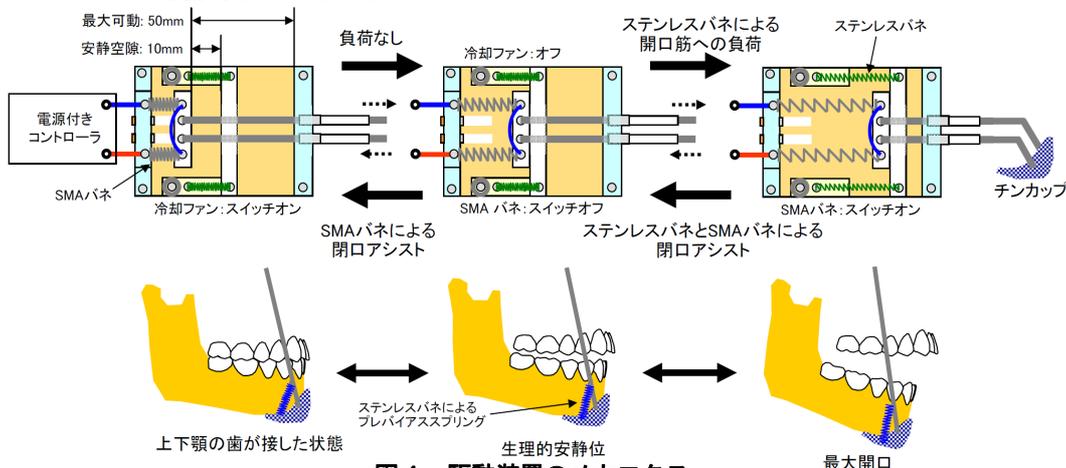


図4 駆動装置のメカニクス

(2) 開口トレーニングと閉口アシストを実現する装置(試作 IV)の開発

試作 I~III の結果から、図 2 に示すコンセプトに沿って、駆動装置を装着する外骨格部分(頭部)と電子回路と電源を有するコントローラに分け、試作 IV を設計した。駆動モード I としてステンレスバネによる開口トレーニングのみ、駆動モード II としてステンレスバネによる開口トレーニングと SMA バネによる閉口時の顎の動きに追従するだけの消極的な閉口、駆動モード III としてステンレスバネによる開口トレーニングを SMA バネによる積極的な閉口アシスト、駆動モード IV として閉口アシストのみの 4 モードに加えて、緊急時に動きを止めることができる緊急停止モードを設置した(図 2、3)。駆動のメカニズムについては図 4 に示す。安静空隙として、切歯部分で 10 mm を設置し、最大可動域をその 10 mm を含めた 50 mm とした。また、計測に当たっては、各実験参加者に合わせた細かい設定を 2 つの電子回路と磁気センサの位置の調整で行った。安静位を越えて開口しようとする時、ステンレスバネにて負荷が与えられ、開口トレーニングとなる。最大開口位置に近くなると、SMA バネに通電が開始される。これにより、最大開口時付近で閉口アシストが始まる。これにより、安静位まではステンレスバネと SMA バネが、安静位から上下の歯が接する咬合位までは SMA バネにより閉口がアシストされる。安静位付近で SMA を強制空冷する冷却ファンがスイッチオンになり、咬合位までに SMA は不活性化される。この繰り返しで本装置は駆動され(図 4)、設定したコンセプトはほぼ実現できた。

(3) 装置(試作 IV)装着による EMG シグナルへの影響

装置を装着し、その EMG シグナルと唾液分泌量の変化を計測し、装置の効果の評価とした。EMG シグナルについては、装置未装着時をコントロールとし、駆動モード I(ステンレスバネのみ)、III(ステンレスバネ+SMA バネ)、IV(SMA バネのみ)について評価した。まず、筋電図と顎の動きを同期させたところ、開口時に開口筋である顎二腹筋のシグナルが、閉口時に閉口筋である咬筋のシグナルが交互に検出された(図 5)。開口時の負荷によりシグナルが大きくなり、閉口アシストによりシグナルは小さくなった。EMG シグナルはコントロールでの値が実験参加者によりバラバラであるため、積分した後に正規化して比較した(表 1、図 6)。その結果、開口トレーニングについては装置により負荷されているとき(駆動モード I および III)のみ有意にシグナルが増加し(約 25% 増)、閉口アシストについては装置のアシスト時(駆動モード III および IV)のみ有意にシグナルが減少(約 15% 減)した(図 6)。

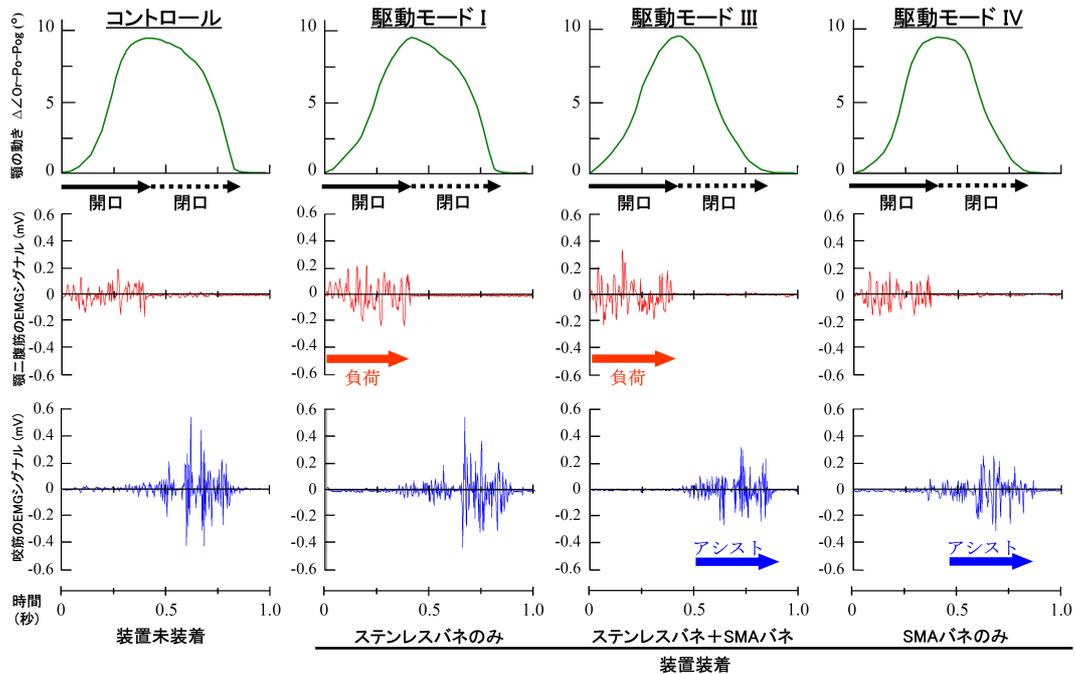


図 5 顎の動きと筋電位

表 1 顎の動きと EMG シグナル(積分値)および唾液分泌量

装置	駆動モード	装置の働き	顎の動き(°)	EMGシグナル(積分値; $\mu V \cdot s$)		唾液分泌量(g)
				開口時(顎二腹筋)	閉口時(咬筋)	
未装着	—	—	—	—	—	0.04 ^a (0.021)
			9.6 ^a (0.63)	23.5 ^a (5.76)	39.6 ^a (8.26)	0.31 ^{ab} (0.159)
装着	I	開口負荷	9.4 ^a (0.67)	29.7 ^a (7.94)	39.2 ^a (8.48)	0.36 ^{ab} (0.178)
	III	開口負荷	9.2 ^a (0.56)	28.9 ^a (6.21)	34.1 ^a (6.87)	0.37 ^{ab} (0.196)
		閉口アシスト	9.3 ^a (0.68)	23.3 ^a (5.27)	34.0 ^a (7.07)	0.33 ^{ab} (0.177)
	IV	閉口アシスト	—	—	—	—

n=10, 有意差については Tukey-Kramer テストにて検定した(p<0.05)。

(4) 装置(試作 IV)装着による唾液分泌量への影響

EMG シグナル同様、唾液分泌量についてもコントロールでの値が実験参加者によりバラバラであるため、正規化して装置の効果を比較した(表 1、図 7)。唾液の分泌は、装置未装着で顎を動かした時に動かしていない状態と比較して約 8 倍に増加していた。開口時に負荷を与えたとき(駆動モード I および III)、未装着で顎を動かした時と比較して、有意に唾液分泌量が増加(約 15%増)した。これに対して、閉口アシストのみ駆動モード IV においては、未装着で顎を動かした時と比較して、唾液分泌量に有意な変化は認められなかった。

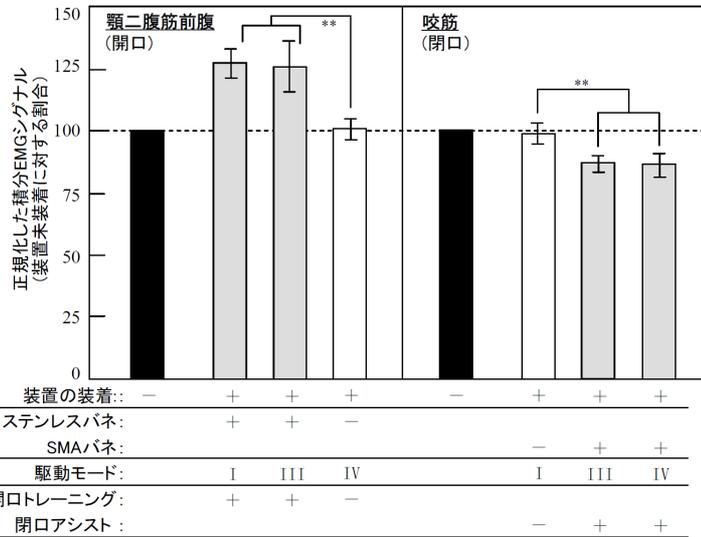


図 6 正規化した筋電位(積分値)

n=10, *p < 0.05, **p < 0.01

有意差については Tukey テストにて検定した。

(5) 総括：本研究成果から得られた結論

本研究で開発した咬合支援ロボットは、開発の経緯から、そのコンセプトを変更し、開口トレーニングと閉口アシストの機能を持つ機械的および電気的メカニズムを組み合わせたメカクスとして開発した。その装着により、開口トレーニング時の開口咬筋への 25% 増の負荷と、閉口アシスト時の閉口筋への 15% のアシスト、そして、開口トレーニング時には 15% の唾液分泌量の増加が認められた。

以上の結果は、本開発装置を装着することにより、咀嚼や嚥下などの口腔機能の維持強化とオーラルフレイルの予防に寄与できる可能性を示している。

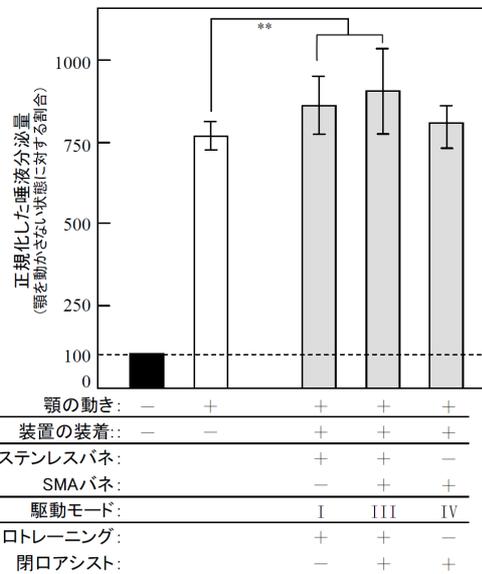


図 7 正規化した唾液分泌量

n=10, *p < 0.05, **p < 0.01

有意差については Tukey テストにて検定した。

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 1件）

1. 著者名 Kameda Takashi, Sakamoto Makoto, Terada Kazuto	4. 巻 -
2. 論文標題 Semi-powered exoskeleton that regulates the muscular activity of jaw movement for oral functional rehabilitation /training	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Dental Materials Journal	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） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Kameda Takashi, Sakamoto Makoto, Terada Kazuto
2. 発表標題 Development of an occlusion-training /rehabilitation assist robot preventing from oral frailty and its motion analysis
3. 学会等名 The 78th Annual Meeting of the Japanese Orthodontic Society(日本矯正歯科学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀田 剛, 大熊一夫
2. 発表標題 オーラルフレイル予防のための咬合訓練支援ロボットの駆動装置の開発
3. 学会等名 平成30年度秋期第72回日本歯科理工学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀田 剛, 工藤 慈, 池田富士雄
2. 発表標題 ウェアラブル受動咬合支援ロボットの駆動装置のメカニズムの開発
3. 学会等名 日本矯正歯科学会第76回学術大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 開口筋訓練装置	発明者 亀田 剛, 大熊一夫, 池田富士雄, 工藤慈	権利者 亀田 剛, 大熊 一夫, 独立行政 法人国立高等専
産業財産権の種類、番号 特許、特開 2020-031986	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

2020年11月1 2日に台北(台湾)にて開催予定のInternational Dental Materials Congress 2020 (国際歯科材料会議2020)にて発表予定で、既に抄録は提出済みである。
--

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	池田 富士雄 (Ikeda Fujio) (30353337)	長岡工業高等専門学校・機械工学科・教授 (53101)	平成29～30年度
研究 分担者	工藤 慈 (Kudo Mitsuru) (60756584)	長岡工業高等専門学校・機械工学科・助教 (53101)	平成29～30年度
研究 分担者	坂本 信 (Sakamoto Makoto) (80215657)	新潟大学・歯学部・教授 (13101)	令和元年度(平成31年度)