



簡易型咬合力測定装置の開発とその応用に関する研究

Development and Application of a Simplified Occlusal Force Measuring Device

青木辰磨¹⁾, 櫻井翔¹⁾, 広田光一¹⁾, 野嶋琢也¹⁾

Tatsuma AOKI, Sho SAKURAI, Koichi HIROTA and Takuya NOJIMA

1) 電気通信大学 大学院情報理工学研究科情報学専攻 (〒182-0035 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
{tatsuma_aoki, sho, hiroya}@vogue.is.ucc.ac.jp, tnojima@nojilab.org)

概要：子供の咬合力増強手段として、チューブを適切な力とリズムで噛む咀嚼トレーニングの実施が推奨されている。しかし、子供にトレーニングを継続させるのは容易ではなく、保護者が常に監視することも難しい。そこで、咬合力を測定・記録できる家庭用チューブ型咬合力測定装置を開発し、次いで計測した咬合力を入力としたシリアスゲームを作成した。本ツールにより、子供が適切な噛み方で楽しくトレーニングできることを目指す。

キーワード：咀嚼トレーニング, 咬合力, 計測装置, ゲーミフィケーション, ヒューマンインターフェース

1. はじめに

歯列の矯正は、歯並びを整える審美的改善効果のみならず、顔の歪みや、顎運動、口腔機能の改善、社会適応性の向上にまで影響を及ぼしうる治療である[1]。とくに小児期は成人後よりも矯正治療の効果が高く[2]、関心を集めている。実際に 2017 年から 2020 年にかけて矯正治療を受けた 5~14 歳の患者数は約 2 倍に増加し、2020 年には 5~14 歳が全体の約 51%を占めるほどになっている[3][4]。矯正治療では、マウスピースなどによる歯列の移動と並行して、とくに小児期にはチューブトレーニングに代表される咀嚼訓練が実施されることがある。チューブトレーニングとは、直径 6mm 程度の適切な硬さの中空チューブを用いて、一定間隔でチューブを噛みしめてパッと力を抜く動作を 5 分間繰り返す運動であり、1 日に 2 回以上の実施が推奨されている[5]。チューブトレーニングを行うことで、咬合力の増強や咬合バランスの均衡化、顎位の移動、顎骨の成長促進といった効果が見込め、これらの効果は矯正治療における歯列移動の促進や、治療後の歯列安定化に貢献する[5]。

チューブトレーニングは、矯正治療における効果が期待される一方、十分な効果を得るためには数か月～数年間のトレーニング継続が望ましい[5]。しかしこのようなトレーニングを、とくに低年齢の子供に毎日継続して行わせることは容易ではない。また保護者が監視するとしても、外部からではチューブをきちんと噛んでいるかどうかの

判断は難しく、またトレーニング中ずっと目を離さないということも現実的ではない。

そこで本研究では、子どもたちがトレーニングを自発的に実施し、かつトレーニングが適切に実施されているかについて外部からの容易な検証可能とする技術の実現を目指す。この実現にむけては、まずチューブ咬合時の咬合力を計測可能な装置を開発し、ついでその装置を用いた、咬合動作を入力としたシリアスゲームを開発する。咬合力計測装置を用いて噛む強さやリズムといった咬合情報を可視化し、保護者等に提供するとともに、その情報を用いてゲーム化することで適切なトレーニング行動の自発的・継続的遂行の実現を狙う。本報告では、開発したチューブトレーニング用咬合力計測装置の詳細について報告するとともに、試作したトレーニングゲームについて紹介する。

2. 関連研究

2.1 既存の計測装置との比較

現行の治療現場で使用されている咬合力計測装置として、「デンタルプレスケール II (以下 DB2)」が挙げられる[6]。DB2 は、感圧シートを咬合し、専用のスキャナとソフトを使用して解析することで、咬合力分布などを高精度で計測することが可能である。一方で、DB2 をはじめとした現行の計測装置は、医療従事者の使用を前提としていることから専門的な扱いが必要であり、機器の導入コストが高価で入手難易度が高いという問題がある。また、咀嚼訓練

との併用という観点では、感圧シートはその薄さから歯へ適度な大きさの刺激を与えることは難しく、本研究の目的と適合する形状とは言えない。よって本研究の目的を達成するためには、安価で入手しやすく、かつ歯に適度な刺激を加えられる咬合力計測装置が必要となる。

2.2 咬合運動のゲーミフィケーションについて

ゲーミフィケーションとは、ゲームデザイン要素やゲームの原則をゲーム以外の物事に応用する取り組みであり、近年では教育分野をはじめとした様々な IT サービスへの組み込みが試みられている。

その中でも、咬合運動にゲーミフィケーションを組み込んだ研究はいくつか存在する。小坂らは、咀嚼をトリガーに設定したシリアスゲームを開発した[7]。咀嚼をゲーム内トリガーに設定することで、子供の咀嚼行動を誘発し、咀嚼回数の増加を促進できる可能性を指摘している。

また、咀嚼改善手法として咀嚼運動情報の可視化に着目した研究も存在する。黒澤らは、咀嚼の筋電情報を用いた咀嚼改善アプリケーションを提案している[8]。筋電計にて計測した情報から咀嚼回数や咀嚼バランス、食事時間を取得し、アプリケーション上でユーザーにフィードバックを行った。結果、食事における咀嚼回数と偏咀嚼率に改善が見られたことを報告している。

以上のように、食育や咀嚼回数増加を目的として食事に対し咬合運動にゲーミフィケーションやアプリケーションを組み込んだ事例は数多く存在するものの、咀嚼訓練に対しゲーミフィケーションを組み込んだ事例は存在しない。本研究では、ゲーミフィケーションによって子供の咬合運動を適切な方式へと誘導を試みるとともに、咬合情報を可視化し、第三者がいつでも確認できるようにすることで、子供のトレーニング実施状況を管理しやすい状況の構築を目指す。

3. 咬合力測定装置の提案

3.1 開発装置の要件

本研究で開発する咬合力計測装置は、日々家庭で実施するチューブトレーニングに用いることが前提である。よって非専門家も簡便に使用できることが求められる。またチューブトレーニングの適切とされる手法は参考書籍によって様々存在するものの、「軽い咬合と強い噛みしめをメリハリ良く繰り返す」という動作が共通要素として挙げられる[5][9]。よってこの咬合力計測装置には、咬合力の強弱判定が実時間で可能であることが求められる。

3.2 装置概要

咬合力計測装置として図 1(a)のような装置を開発した。チューブはシリコンゴム栓で密封されており、チューブ内圧変動を気圧センサ AP40R-100KG-2 を用いて測定する仕様になっている。このチューブを図 1(b)に示すように噛みこむことでチューブ内圧が変化し、その変化からチューブトレーニング中の咬合力を判定する。咬合時のチューブ内圧は M5StickC Plus の Bluetooth にて PC へと送信される

とともに、M5StickC Plus のディスプレイに表示される。

M5stickC Plus の電源を入れるだけで、計測した咬合力がリアルタイムで表示されるようになっていたため、ユーザーは専門知識なしで容易に使用することが可能である。

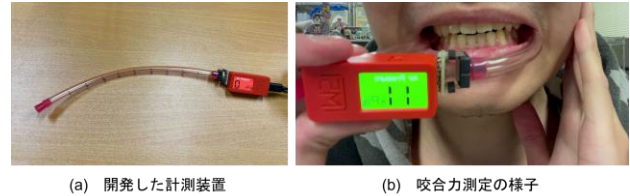


図 1 デバイス概要

4. 実験

4.1 実験概要と目的

歯列模型に開発した咬合力計測装置を適用し、咬合時の咬合力と計測されたチューブ内圧値を比較し、提案装置による咬合力の計測能力を検証する。

4.2 実験環境

実験装置概要を図 2(a)に示す。歯列模型(Angzhili), の上顎部分にクランクアームを経由してモータ(RDS5160)を取り付け、Arduino UNO からモータドライバ(TB6643KQ), を通じて、所定の咬合力が実現されるよう上顎の咬合動作を制御する。咬合力は下顎部分に搭載したロードセル(LCC21N500)から、ロードセル用 AD コンバータモジュール(AE-HX711-SIP), Arduino UNO を通じて PC に記録される。同時にチューブ内圧情報が M5StickC Plus より同一 PC に送信、記録される。ロードセルを第 1 小臼歯の位置に搭載し、その出力値を咬合力とした。また、同時並行して株式会社ジーシー製の薄膜型咬合力計測装置 DB2 による咬合力計測も試行している。ただし本実験での咬合力が DB 2 にとって適正計測範囲ではない可能性が指摘されたため、本実験の結果・考察に DB 2 の結果は使用していない。実験の様子を図 2(b)に示す。

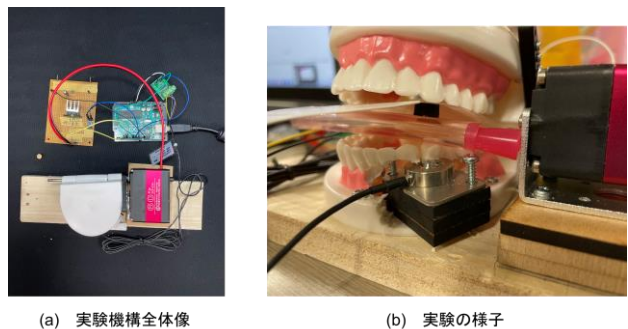


図 2 実験環境

表 1 周辺環境の気温・気圧

	研究室	チューブ内
気温(°C)	23.26	23.74
気圧(kPa)	101.33	105.43

表 2 チューブの加圧条件

チューブの長さ(cm)	20.6
加圧-計測位置(cm)	5.8
加圧物体の直径(cm)	0.75

4.3 実験手順

実験に先立ち、まず実験の周辺環境について測定する。実験開始直前の5分間に、周辺環境の気温と気圧、チューブ内部の温度と気圧をそれぞれ計測した。さらに、開発装置のチューブ部から栓を除いた部位の長さ、および加圧位置-計測位置間の長さを計測した。これらの計測結果を表1、表2に示す。なお、気温の計測には温度計(watch logger)を、チューブ内温度の計測にはサーモカメラ(FLIR E54)を、気圧の計測には気圧センサ(AP40R-100KG-2)を用いた。

図3のように上顎が開いた状態で、加圧する歯の上に開発装置のチューブ部、ダミーの歯、およびDB2のチューブ部を設置し、シートと軽く接触する程度に上顎を軽く閉じた。この時のロードセル出力値基準値とし、そこから差を咬合力として記録した。目標加圧力は16N~19Nまで1.0Nごとに設定し、計4回の測定を行った。ロードセルの出力値が目標加圧値に到達すると、3秒後に加圧を終了した。これら一連の工程を3試行繰り返した。

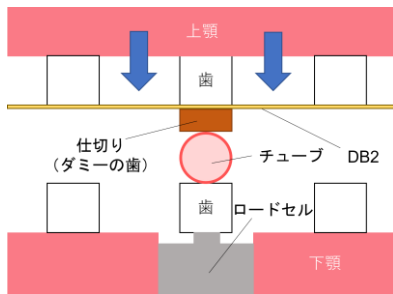


図3 実験での咬合模式図

5. 結果

本来の用途ではチューブ内圧から咬合力を推定する必要があるため、チューブ内圧に対する咬合力の関係を調査した。その結果の一部を図4に示す。図4は目標加圧力16Nの3試行目の結果を抜粋したグラフである。咬合力が約4.5N~14.5Nの範囲において、グラフの近似直線の回帰式は $y = 20.295x + 2.8947$ 、決定係数は $R^2 = 0.9705$ となった。さらに、回帰式にチューブ内圧を代入して求めた咬合力の理論値と、計測された咬合力を比較したところ、平均誤差は $E = 0.5103N$ (相対平均誤差率5.32%)となった。また、咬合力チューブ内圧チューブ内圧の微増に対して咬合力が減少する逆転現象が、チューブ内圧0.59~0.62kPaおよび0.78~1.00kPaの2区間で確認できた。

なお、実験中のチューブ内温度については、初期温度23.74℃から±0.4℃程度の変化であった。これに伴う圧力変動は±0.01kPa程度しか生じないことから、チューブ内の温度変化がチューブ内圧に及ぼす影響は無視できるものとする。

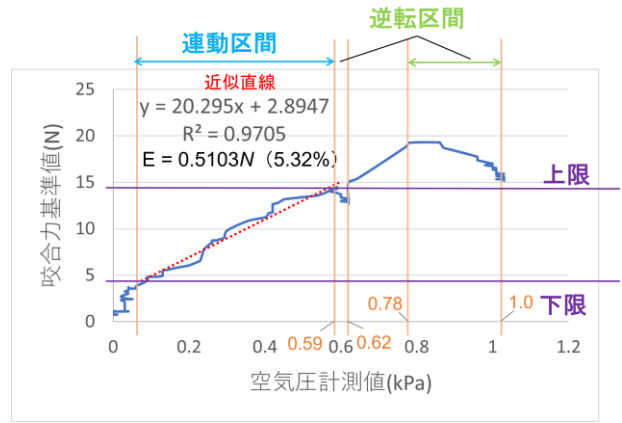


図4 咬合力とチューブ内圧の対応

6. 考察

咬合力が約4.0N~14.5Nの範囲において、決定係数よりチューブ内圧と咬合力の間に強い相関が認められ、咬合の強弱判定ができる可能性が示された。よって、たとえば開発装置の咬合力計測上限とした14.5N以下を弱い咬合、それ以上を強い咬合と判定することで、提案装置のチューブトレーニングへの適用(咬合の強弱判定)自体は可能と期待される。ただしこの区間でも平均誤差が $E = 0.5103N$ とかなり大きく、たとえば医療用など高精度計測を求められる条件での利用は難しいと考えられる。

ここで、図4のグラフ中の2区間で確認された逆転現象について考察する。実験における咬合力の推移を調査した結果、逆転区間における咬合力の減少速度は一定であることが確認された。このことから、逆転区間においては、摩擦力などの一定の大きさの外力がかかった状態でロードセルへの負荷が減少した状況が推測される。この状況は、ロードセルと歯の固定部が加圧によってずれてしまったことに起因するものと考えられる。その際、歯と固定具の接触によって生まれた摩擦力と、ロードセルとの反発力により、歯がゆっくりと浮いてしまう現象が起こったと推測される。従って、この逆転現象は計測機材の行動的要因に起因するものであり、開発装置の計測性能評価の観点では重要ではないと考えられる。

また実験では、周辺温度が23.26℃の状態に加圧を行ったが、実際に噛んで加圧する際には、口腔内の温度が周辺温度となる。一般的に、人間の口腔内温度は約36~37℃とされており、実験環境とは約12~13℃異なる。実験環境におけるチューブ内初期気圧を105.43kPaとして、口腔内における初期気圧をボイル・シャルルの法則を用いて計算したところ、初期気圧は約109.96kPaと4.53kPa程度大きくなると考えられる。実験における内圧変動が最大1.1kPa程度だったことを考慮すると、温度変化が気圧に及ぼす影響はかなり大きいことが伺える。よって将来的には、計測に際して口腔内温度による補正についても考慮する必要があると考えられる。

今回の咬合力計測範囲である約4.0N~14.5Nは、チャー

ブトレーニングの適性年齢である3~5歳の小児の最大咬合力が約160~250Nであることを考慮すると[10], かなり弱い咬合力であると判断される。著者の体感でも, 軽い咬合時でもチューブが完全に潰れてしまうことが多く, 計測可能範囲の拡大が必要であると考えている。計測可能範囲の拡大手段としては, より固い素材のチューブを利用する, 初期内圧を大きくするなど考えられる。一方で, 計測範囲拡大に伴い, チューブの感触が固くなることで, 歯や顎にかかる負荷の増大が想定され, 長期的な影響については別途考慮する必要がある。そもそもチューブトレーニングに際しての適切な負荷範囲については具体的検証事例が乏しく, 医師の経験則によるところが大きいようである。そのため適正な計測範囲の実現にむけて, 引き続きの検証が必要と考える。

7. 作成したシリアスゲーム

本研究では, チューブトレーニングと併せて遊べるゲームとして, 以下の図5のような咬合動作を入力としたシリアスゲームを開発した。開発装置が本ゲームのインターフェースとなっており, チューブトレーニング時のチューブ内圧を取得して, その変動量によって咬合を検出している。咬合によって画面中の男の子をジャンプ操作し, 画面右からスクロールしてくる障害物を避けていくゲーム性となっている。また, チューブの噛み方によってジャンプ力を2段階に切り替えることができ, 咬合の強さや咬合時間の長さによってジャンプ力の強弱を操作できる。障害物についても, 弱いジャンプでも跳び越えられる岩オブジェクトと, 強いジャンプでしか跳び越えられない木オブジェクトの2種類が用意されており, プレイヤーは障害物の種類によってジャンプの強弱を使い分ける必要がある。

本ゲームは, 2.2 で前述したチューブトレーニングにおけるゲーミフィケーション組み込みの目的を意識して設計した。適切な咬合方式を子供自身が特に意識せずともトレーニングにて再現できるよう, ゲームの進行過程で咬合方式を誘導する工夫を組み込んでいる。咬合方式誘導の工夫として, オブジェクトが持つ出現パラメータの調整が挙げられる。障害物の種類や出現間隔, 移動速度を適切に調整することで, 咬合の強さやタイミング, 咬合時間の長さがある程度ゲーム側で誘導することが可能であると考えられる。本ゲームでは, 「3回リズムカルに軽く噛んだ後, 1回深く噛みしめる」運動を繰り返し行うことを考慮して, 岩オブジェクト3個と木オブジェクト1個をこの順番かつ均等な間隔で配置し, 一連の配置を一定の間隔を開けて繰り返し出現させる, という出現法則で配置を行った。また, 一連の配置の中でのオブジェクト間隔は, 1秒間に1回の間隔で咬合が必要となるように調整した。さらに, ゲーム終了後, ゲーム中の咬合力や咬合タイミング, 咬合時間といった情報をcsvファイルに出力する機能を有している。これにより, 第三者がトレーニング状況をいつでも確認することが可能となっている。

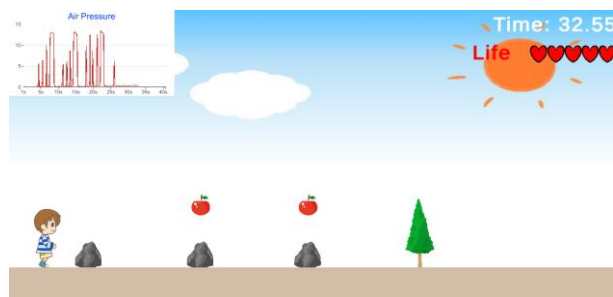


図5 シリアスゲームのゲーム画面

8. 結論と今後の展望

本研究では, チューブトレーニングにおける噛み方の適切性判定, および適切な噛み方への誘導を目的として, チューブ型咬合力計測装置と咬合力を入力としたシリアスゲームを開発した。実験では, 開発装置の計測性能を評価した。結果, 咬合力が約4.5N~14.5Nの範囲において, 咬合の強弱判定ができる可能性が示された。

今後は, 開発装置の計測精度および計測可能範囲の向上を試みる。さらに開発したゲームによるトレーニング効果検証を目指す。

参考文献

- [1] 増田純一: 子どもの知能と身体を発達させる「噛む力」, WAVE 出版, 2019, pp. 122-145.
- [2] 浜野美幸: 子供の口腔機能を育てる本, 医歯薬出版, 2022, pp. 20.
- [3] 厚生労働省: 統計表 統計表3 推計患者数, 総数—入院—外来—年齢階級—傷病大分類別 (令和2年度), <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/kanja/20/dl/toukei.pdf>, pp. 24, (参照日 2023-07-21).
- [4] 厚生労働省: 統計表 統計表3 推計患者数, 総数—入院—外来—年齢階級—傷病大分類別 (平成29年度), <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/kanja/17/dl/toukei.pdf>, pp. 24, (参照日 2023-07-21).
- [5] 鈴木設矢: 臨床医のための床矯正・矯正治療 基礎編, 弘文堂, pp. 241-252, 2007.
- [6] 株式会社ジーシー: デンタルプレスケール II, <https://www.gc.dental/japan/products/professional/small-instrument/dentalprescale>, (参照日 2023-07-21).
- [7] 小坂崇之: 咀嚼タン:咀嚼をトリガーに設定したシリアスゲームの開発, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015, 2015.
- [8] 黒澤紘生: Cami-log:咀嚼の改善を促す筋電情報を用いたアプリケーションの提案, インタラクション 2017 論文集, 2017, pp. 907-912.
- [9] Oral Academy: パナリング, <https://oral-academy.com/products/training/panaring/>, (参照日 2023-07-21).
- [10] 小野芳明: 幼児の咬合力増加訓練に関する研究, 口病誌, 59巻, 2号, 1992, pp. 512-517.