

簡易型咬合力測定装置の開発とその応用に関する研究

青木辰磨^{†1}, 櫻井翔^{†1}, 広田光一^{†1}, 野嶋琢也^{†1}

概要: 子供の歯列矯正治療において、チューブを所定のリズムで強弱織り交ぜた力で噛むチューブトレーニングにより、咬合力を増強する手法が推奨されている。しかし、トレーニングは単調な動作の繰り返しのため、子供に毎日確実に継続させることは容易ではない。また、子供が適切な噛み方でトレーニングを実施できているかについて外部から判断することは難しく、保護者などが実施状況を管理しにくいという問題もある。そこで我々は、子供が適切な噛み方で楽しくトレーニングを継続できるようになることを目標に、咬合力を入力としたインタラクティブなシリアスゲームの作成を目指す。本発表では入力装置として開発した咬合力の強弱を判定記録できる簡易的なチューブ型咬合力測定装置について紹介するとともに、実際に開発したトレーニングゲームの詳細について報告する。

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。咀嚼訓練とは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を期待する訓練手法であり、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と考えられている[5]。チューブトレーニングはその代表として挙げられる、直径6mm程度の適切な硬さの中空チューブを用いた訓練手法である。一定の間隔でチューブの噛みしめと脱力動作を5分間繰り返す、などの運動の集合であり、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、小児期の子供に毎日継続させることは現実問題として容易ではない。また仮に子供がトレーニングを実施しているように見えても、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困難である。

そこで本研究では、家庭で手軽に、子供たちに自発的なトレーニングを促し、かつトレーニングの適切な実施を外部から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 既存の計測装置について

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、歯列全体での静的な咬合力分布の高精度な計測が可能である。その一方で、繰り返しの咀嚼動作に対する実時間での計測には対応していない。本研究で開発するトレーニングゲームでは実時間での咬合力計測が必須であり、その観点からこの装置の利用は難しい。また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おり、価格面からみても家庭での手軽な利用には適さないという問題がある。

2.2 インタラクティブ技術による咬合・咀嚼能力の改善

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。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。これらの取り組みには

咀嚼行動・咀嚼能力の改善に一定の効果が期待できる一方で、歯科治療で適切とされる咀嚼訓練との併用については十分検討されているとは言い難い。本研究では、咀嚼訓練に対してゲーミフィケーションを導入することで、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、咬合情報の可視化に取り組む。このことにより、プレイする子供のみならず、実施状況を管理する保護者等もトレーニング状況の確認が容易となる環境の構築を目指す。

3. 咬合力測定装置の提案

3.1 提案装置の要件

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。よって非専門家が簡便に使用できることが求められる。なおチューブトレーニングの手法はいくつか提案されているが、それらの間でも「軽い咬合と強い咬合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。

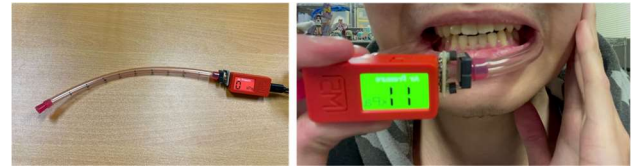
また、咬合時に左右歯の咬合力がどちらか一方だけ極端に強い状況を偏咀嚼と呼ぶ。偏咀嚼は、顎の歪みなどを引き起こし、矯正中の歯並びを歪めてしまう原因となってしまうことから[10]、適切に是正されることが望ましいとされている。よって咬合力計測装置は、この偏咀嚼の検出が可能であることが望ましい。

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 にて測定する構造になっている。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。また、チューブは簡単に電子機器類から取り外すことができるようになっており、チューブの洗浄や交換が容易で、衛生を保ちやすくなるよう配慮している。なお本装置を以降では TBMS-S (Tube-based Bite-force Measurement System - Single) と呼ぶものとする。

上述のシステムはチューブの洗浄や交換の容易さを優先した構成になっており、残念ながら偏咀嚼の検出能力を有していない。そこで偏咀嚼を検出可能とするため、噛みこんだ際の左右歯の咬合力をそれぞれ測定できるような改良を施し、図 2 のような装置を開発した。チューブは中央を境に左右で密閉されており、左右それぞれのチューブ内

圧変動を同型の気圧センサ 2 個で測定する仕様になっている。咬合時に左右歯それぞれの咬合力を測定できるようになり、偏咀嚼の検出が可能となっている。TBMS-S に倣い、本装置を TBMS-D (TBMS- Dual) と呼ぶものとする。ただしチューブの中央部壁面を接着する加工が必要となるために、前述のとおりチューブ交換の手軽さが損なわれてしまっている点は問題であり、今後の改良が必要であると考えられる。



(a) 開発した計測装置

(b) 咬合力測定の様子

図 1 計測装置(TBMS-S)概要



図 2 片噛み検出可能な提案装置(TBMS-D)概要

3.3 提案装置の計測性能

提案装置がチューブトレーニングにおける咬合強弱判定装置として利用する際の妥当性を評価するために、咬合時の咬合力と計測されたチューブ内圧値を比較し、本装置による咬合力の計測能力の検証を実施した。なお、検証には TBMS-S を使用した。結果、咬合力が約 4.5N~14.5N の範囲で、咬合力とチューブ内圧値に線形性が確認できたことから、この範囲において咬合強弱が判定できることが示された。一方で、本装置の計測範囲である約 4.5N~14.5N は、チュ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[11]、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。一方でより固い素材のチューブを用いることで、歯や顎にかかる負荷の増大が想定されるため、長期的な影響については別途考慮が必要であると考えられる。

4. 作成したシリアスゲーム

4.1 ゲームの設計要件

チューブトレーニングと併せて遊べるシリアスゲームを作成する上で、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たゲームを設計する必要がある。この目的を踏まえ、作成するシリアスゲームの設計要件として、以下2点が考えられる。

1 つ目の要件は、適切な咬合方式を子供自身が特に意識せずともゲーム中に再現できるようにすることである。このために、ゲームの進行過程で咬合方式を誘導する工夫が必要となる。なお、誘導先となる適切な咬合方式は、3.1で前述した「適切なチューブトレーニング手法」すなわち「軽い咬合と強い咬合をメリハリ良く繰り返す」を採用する。この共通要素を遵守しつつ、咬合方式に複数の追加要素を組み合わせ、誘導先となる咬合方式を複数パターン作成する。咬合方式のバリエーションを複数用意することで、ゲーム性を拡張しやすくなり、ゲームをプレイする子供のモチベーション向上に寄与することが期待される。

2 つ目の目的は、ゲーム中の咬合情報の可視化である。ゲームプレイ中に咬合情報を可視化することで、ユーザがリアルタイムで適切な咬合方式へと行動を修正可能となることが期待される。また、トレーニング後にトレーニング中の咬合情報を可視化することで、咬合の頻度や程度に関する状況を事後評価可能になると期待される。

4.2 開発したゲームの詳細

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 3、図 4 のような咬合動作を入力とした 2 種類のシリアスゲームを開発した。TBMS-S/TBMS-D が両ゲームのインターフェースとして使用可能である。また両ゲームとも咬合情報可視化のため、ゲームプレイ中の咬合力のリアルタイムグラフ表示、およびゲーム終了後の咬合情報ファイル出力機能が実装されている。ゲームプレイ中に咬合力をリアルタイム表示することで、ユーザは強い咬合と弱い咬合、あるいは瞬間的な咬合と持続的な咬合の視覚的な区別が可能となり、咬合の使い分けがしやすくなると考えられる。また、ファイル出力された咬合情報をユーザ自身、保護者ならびに歯科専門家と共有することで、より適切なトレーニング状況検証が可能になると期待される。

一方、それぞれのゲームで異なる咬合方式への誘導を狙い、ゲームの装飾やプレイ内容について異なる方式を採用した。以下それぞれについて詳細を記す。

4.2.1 かみかみジャンプ

図 3 のゲーム（以下、「かみジャンプ」と呼称）は、咬合によって画面中のキャラクタをジャンプ操作し、画面右からスクロールしてくるオブジェクトを避けていくゲームである。ゲーム中のキャラクタは、ユーザが咬合（TBMS-S 利

用時、TBMS-D 利用時には左右均等に咬合）する都度ジャンプし、向かってくるオブジェクトを避けられる。ただし向かってくるオブジェクトごとに、それを避けるために必要な咬合動作が異なっている。つまり、出現するオブジェクトの種類とタイミングを操作することで、適切な咬合動作を所望のタイミングで実施するような誘導を狙う。咬合の種類とゲームでの動作の対応を表 1 に示す。岩オブジェクトで弱いジャンプ、木オブジェクトで強いジャンプ、そして池オブジェクトは飛び出す魚に当たらないタイミングで強いジャンプを行う必要がある。本ゲームではまず、咬合が 1 回/秒となるようにオブジェクトを均等配置した。その上でゲーム中に行う咬合の強弱の回数がおおよそ同数となるよう、出現させるオブジェクトの調整を行っている。具体的には、ゲーム中に行った咬合の強弱の回数を監視し、弱い咬合の回数が多い際には岩オブジェクトの出現確率を高め、強い咬合の回数が多い際には木・池オブジェクトの出現確率を高めるという補正を実装している。



図 3 「かみジャンプ」のゲーム画面

表 1 「かみジャンプ」の咬合対応表

咬合の種類	咬合情報	ゲーム内動作	障害物
瞬間的な 軽い 左右同時咬合	咬合力：2.0~4.0kPa 咬合時間：0.5 秒以下	弱い ジャンプ	岩
持続的な 強い 左右同時咬合	咬合力：4.0kPa 以上 咬合時間：0.5 秒以上	強い ジャンプ	木 池

4.2.2 ぱくぱくフルーツ

図 4 のゲーム（以下、「ぱくフル」と呼称）は、咬合時に左右の噛み分けによって画面中のキャラクタの移動を操作し、画面上から落下してくる果物を食べてスコアを獲得するゲームとなっている。本ゲームでは「適切なチューブト

レーニング手法」に左右噛み分け、瞬間的な咬合の要素を追加している。具体的には「0.5~0.8 秒に 1 回の咬合周期 [12]で、片噛みと同時咬合を織り交ぜた、瞬間的な強い咬合と瞬間的な弱い咬合をランダムに繰り返す」という咬合方式が実現されるような設計を目指している。

本ゲームでは TBMS-D のチューブ部の左右どちらかを軽く噛むことにより、キャラクタの左右移動を実現している。なお TBMS-S を利用する場合にはキーボード等代替手段にて左右移動を実施する。この操作を用いてキャラクタを果物の落下位置に移動させ、果物がキャラクタに接近したタイミングで装置のチューブ部を左右同時に複数回咬合することで、果物を食べることができるようになっている。果物を食べるのに必要な咬合回数は、果物の種類によって異なる。咬合の種類とゲームでの動作の対応を表 2 に示す。ここに示されたりんご、梨、食べかすについて、ユーザの咬合動作が 0.5~0.8 秒に 1 回程度となるよう果物の出現間隔が調整されている。また、左右の片噛みと同時咬合を織り交ぜて実施できるように、果物の出現ごとに出現位置を必ず変化させることで、位置移動操作と果物を食べる操作が交互に必要な設計にしている。なお左右の片噛みについては、偏咀嚼の習慣化防止のために、ゲーム中に行う左側での片噛み回数と右側での片噛み回数がおおよそ同数となるよう、果物が左右の出現位置で交互に出現するよう設計されている。さらに咬合の強弱についても両者の回数が同程度となるよう、4.2.1 で述べた「かみジャンプ」と同様の方法で、りんごと梨の出現確率が 2:1 になるよう調整している。

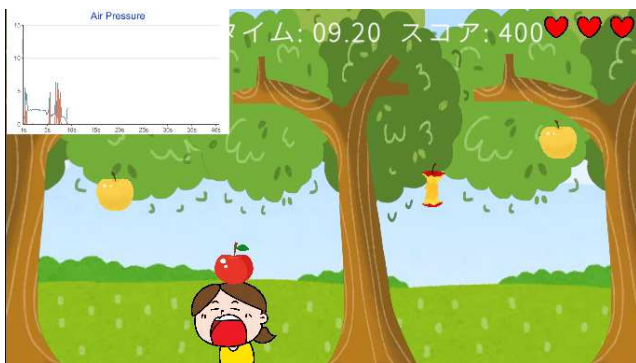


図 4 「ばくフル」のゲーム画面

表 2 「ばくフル」の咬合対応表

咬合の種類	咬合情報	ゲーム内動作
瞬間的な 軽い 左右同時咬合	咬合力：2.0~4.0kPa 咬合時間：0.5 秒以下	りんごを食べる 食べ滓を食べる (ライフ減少)
瞬間的な 強い 左右同時咬合	咬合力：4.0kPa 以上 咬合時間：0.5 秒以下	2 回連続咬合で 梨を食べる (ライフ回復)
瞬間的な 軽い 左側での片噛み	咬合力(左)：2.0kPa 以上 咬合力(右)：0.5kPa 以下 咬合時間：0.5 秒以下	キャラクタを 左に移動
瞬間的な 軽い 右側での片噛み	咬合力(左)：0.5kPa 以下 咬合力(右)：2.0kPa 以上 咬合時間：0.5 秒以下	キャラクタを 右に移動

5. 展示

4.1 で前述したゲームプレイを通じてチューブトレーニングにおける咬合方式を誘導できる可能性を検証するため、大学のオープンラボにて展示を行った。展示では 3.2 で述べた TBMS-D/TBMS-S の両装置を使用した。ただし衛生面の問題から、装置を口内に含むことはせず、指で加圧することで提案装置を操作し、ゲームをプレイしてもらった。

ゲームを初めてプレイした際、体験者は障害物を避ける、あるいは果物をよりたくさん食べるために、ゲーム側で設定していた加圧タイミングよりも過剰に加圧を行ってしまう傾向が両ゲームで確認できた。特に「かみジャンプ」では、不必要なタイミングで加圧を行うことで、かえって障害物に当たりやすくなっている体験者が多く見られた。そこで展示の途中から、展示者がゲームプレイ中に加圧の強弱やタイミングについてリアルタイムで指示を出すようにした。すると、体験者は適切なタイミングを掴み、最終的にはゲームの設定通りに、強弱織り交ぜたりズミカルな加圧が実施できるようになった。指示が無くとも体験者が加圧動作を調整しやすいよう、適切な咬合方式に従った際のキャラクタの動きを提示するなどの工夫が必要であると考えられる。

一方「ばくフル」では、「かみジャンプ」と比較して、加圧のタイミングを調整しようと努める体験者が少なかった。これは、「ばくフル」の特性として、不要なタイミングで加圧を行うことに対するデメリットが存在しなかった点が影響していると考えられる。すなわち高頻度な加圧動作がゲーム進行に悪影響を及ぼさず、クリアできてしまうことが要因であると推測される。加圧の頻度、タイミングは咬合トレーニングにおける重要な要素であることから、不要な

タイミングでの咬合にペナルティを課すなどして、トレーニングとしての改善を実現する必要があると考えられる。

[12] 神庭光司, 嶋村一郎, 岸正孝: 咀嚼運動リズムの随意的調節に関する実験的研究, 歯科学報, 105 巻, 3 号, pp. 187-172.

6. 考察

ユーザへフィードバックする咬合情報の形式について、改善の余地があると考えている。現状では咬合情報を数値としてユーザにフィードバックしているものの、その数値が適切な咬合方式と比較して良いものなのかについて、ユーザ自身が判断することは困難であると考えられる。よって今後は、ユーザが咬合の適切性を判断しやすい咬合情報の提示手法について検討していく予定である。

7. 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。

今後の展望として、改良後の提案装置におけるチューブデザインの改良、および計測可能範囲の向上を試みる。また、開発したゲームにおける咬合情報の提示手法検討やトレーニング効果検証を目指す。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 22H03629 の助成を受けたものである。ご協力頂いた皆様に、謹んで感謝の意を表す。

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] 正月凌介, 寺田努, 塚本昌彦: センサを用いた偏咀嚼防止及び咀嚼回数促進の検討, 電子情報通信学会, 118 巻, 95 号, 2018, pp. 133-138.
- [11] 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.