

自転車競技トレーニングシステムのための 咬合力センサの開発

佐藤 永欣^{1,a)} 田邊 憲昌² 佐々木 毅³ 檜山 稔⁴ 浅沼 和彦⁵ 猿舘 貢⁶ 佐藤 清忠⁷

概要: 自転車競技では元々自転車という機械を使うスポーツでありセンサも車体に取り付けるだけですむため、選手に装着する必要がある他のスポーツよりもセンサや情報機器の導入が進んでいる。例えば、車速センサ、クランク回転センサ、GNSS、心拍計、カメラなどである。我々はリアルタイムで選手の状態を把握できる自転車トレーニングシステムを開発し、高等学校の自転車競技部で使用して選手育成に効果をあげている。走行中に使用できることを目標に咬合力を直接計測できるセンサを試作した。咬合力はスプリント競技などでのスパートの際に踏ん張る力の目安として有効と言われている。本稿では咬合力センサの設計、開発と試作した結果について述べる。

キーワード: 自転車, トレーニング, センサ, 咬合力, 測定

Development of an Occlusion Force Sensor for Bicycle Competition Training System

NOBUYOSHI SATO^{1,a)} NORIMASA TANABE² TAKESHI SASAKI³ MINORU HIYAMA⁴ KAZUHIKO ASANUMA⁵
MITSUGU SARUDATE⁶ KIYOTADA SATO⁷

Abstract: In the bicycle sports, sensors and other devices are widely introduced in competition scenes because bicycle itself is machine, and sensors and devices are easily equipped to the bicycle rather than human bodies on other sports. For example, speed sensor, crank rotation sensor, GNSS, heart rate monitor, camera and so on. We developed a bicycle training system, and we applied it on a training at a bicycle team in a high school. As a part of bicycle training system, we are developing a tooth occlusion force sensor. It is said that occlusion force of tooth is effective as an indicator for maximum power of whole body muscle. In this paper, we describe design, implementation and trial manufacture of the tooth occlusion force sensor.

Keywords: bicycle, training, sensor, occlusion force, measurement

¹ 岩手県立大学
Iwate Prefectural University, Takizawa, Iwate, 020-0693, Japan
² 岩手医科大学
Iwate Medical University, Morioka, Iwate, 020-8505, Japan
³ TKR マニュファクチャリング・ジャパン株式会社
TKR Manufacturing Japan K.K., Hakoshimizu, Minami-Hidume,
Shiwa, Iwate 028-3317, Japan
⁴ 有限会社ホロニック・システムズ
, Holonic Systems, Ltd., Baba, Kamihirasawa, Shiwa, Iwate 028-
3441, Japan
⁵ 株式会社東北パワープロジェクト, Tohoku Powerject, K.K., Hirasawa,
Shiwa, Iwate 028-3308, Japan
⁶ 岩手県立紫波総合高等学校, Shiwa Comprehensive Senior High
School, Hidume, Shiwa, Iwate 028-3305, Japan
⁷ 岩手県盛岡広域振興局, Morioka Promotion Bureau, Iwate Pref.

1. はじめに

自転車競技は自転車を利用したスポーツであって、主に着順やタイムを競う。トラック、ロード、未舗装路で行うマウンテンバイクといった種類に分類されている。自転車と選手が一組となり競技の全行程で自転車を使用するのが原則である。元々自転車という機械の使用が前提のスポーツであるため、スポーツとしては早くからセンサ類の使用が進んでいた [1]。センサは主に自転車に取り付けられ、自

Government
a) nobu-s@iwate-pu.ac.jp

転車を漕いでいる本人がサイクルコンピュータや専用の表示機によってセンサのデータを見る。センサによっては競技中も装着を認められているものもある。

現在、主に使用されているセンサ類としては、磁石を用いた車速センサ、ケイデンス(クランク回転数)センサ、クランクに装着またはクランクと交換するトルクセンサ、心拍計、GNSSによる高度と車速を含む走行ログなどがある。現在これらのセンサはサイクルコンピュータとともに市販され、実用に供されている。

このような状況のもと、我々は自転車に搭載するセンサ類とコーチ用のPCなどからなる、自転車トレーニングシステムを開発してきた[2]。

自転車選手がタイヤを駆動するトルクは、一般的にはクランクに取り付けた歪センサ、や車輪に取り付けた加速度センサなどによって計測されており、選手の脚力を測定する重要な目安である。ここでいう「脚力」は特定の筋肉の筋力そのものではなく、下半身を中心とした全身の筋肉を使った結果としてのペダルにかかる力である。ペダルにかかる力が変化する要因として上腿の筋肉が支配的ではあるが、ペダルを適切に踏むことも含まれるため、クランク等にかかるトルクを計測することは、筋力だけではなく技術も評価することになる。

一方で高校生年代や初心者・中級者の指導では技術も評価の必要があるが筋力そのものを評価したい場面がある。自転車乗車中の筋力を測定するには筋電センサなどを用いればよいが、比較的高価なうえに取り付けが複雑であったり再現性が低い、汗の影響を受けるといった問題がある。そこで、自転車を漕ぐ際に使用する筋肉の筋力そのものではないが、咬筋の筋力を測定することを考えた。力をいれる時に「歯をくいしばる」等というように、全身の筋力と関係がある。咬筋の筋力は歯を噛みしめる力そのものであり、歯にかかる力を測定すればよい。

咬筋の筋力、すなわち歯にかかる力は、歯科では特に重要視されて来た。歯科の分野ではインプラントや入れ歯の製作等にかかわる補綴学に分類される領域で主に扱われている。重いものを持ち上げるとき、ダッシュするときなどは歯を強く噛みしめるが、逆に噛みしめないと力が入らないことがほとんどである。歯を噛みしめた時の力の大きさは、もっとも大きな力がかかる第一大臼歯にかかる力を測定することで測定できる。

今回、第一大臼歯にかかる力の大きさを測定できるマウスピースを開発した。このマウスピースは簡単に製作できること、安価であること、運動しながらも使用できること等を特徴とする。

本論文では、関連研究と自転車トレーニングシステムについて述べた後、咬合力の歯科の診療における咬合力測定方法やスポーツ歯学との関係、測定に利用されているセンサやデバイスの例などについて述べ、開発した咬合力セン

サの設計等について述べる。

2. 関連研究

自転車競技とセンサ類の親和性は高く、割合に古いものでは文献[1]などがある。自転車競技と関係ない部分でも、電動アシスト自転車のアシスト出力制限に対応するために歪トルクセンサを使用してクランクに対する入力を計測しているもの[3]、交通安全と関連があるもの[5][6][8][7][9]が多い。車体運動に関しては自動二輪車を対象としたもの[8]がある。スマートフォンを用いて自転車外部とのデータ共有も行われている[4]がスポーツに特化したものではない。シミュレータも作られているが交通安全が主眼である[10]。

文献[4]で斉藤らは自転車に取り付けた地磁気センサ、加速度センサ、GPS受信機から得られたデータを用いて自転車の基本的な操作状態を認識し、障害物や人ごみに起因する蛇行や停止時間の長い交差点の認識を行っている。文献[5][6]はどちらも高齢者に見られるふらふらとした走行を検出することを主眼としている。文献[6][7]は走行状態を機械学習により認識することを主眼としている。文献[8]は自動二輪車を対象としているが、走行、すり抜け、右左折の挙動を識別できることを示している。文献モーションセンサを用いた自転車違反運転検知システムは二人乗り、傘さし運転、手放し運転、自転車スマホの検出を目指している。このように、現在行われている自転車にセンサを取り付けた研究は交通安全を主眼としており、スポーツとしての自転車の競技力向上を目指したものではない。

自転車競技に関する可能性もあるものとしては、クランクシャフトへの弾性ねじりを検出することでトルクを測定するもの[13]、伝達トルクを計測する機構を内蔵した自転車等用車輪[12][11]がある。その他、製品として[14][15][16]などがある。

このように、自転車とセンサに関しては古くから研究が行われており、実際に製品が販売されている。ただ、これらの市販品は自転車に乗っている選手自身が自分の状態をモニタすることが主な目的である。これは、市販品が趣味等で自転車に乗る人を対象にしているためである。広範囲に渡る大規模な競技会では通信機器とセンサの組合せが使われることもあるが、一般に市販されているわけではない。

これらの自転車とセンサに関する製品では、速度や位置情報、トルクといった自転車そのものに関する情報のほか、心拍数や脈拍などの、自転車選手本人の生体情報を測定するセンサも一般的に使用されている。スポーツ・フィットネス用で一般的な心拍センサや脈拍センサは腕時計タイプであるが、自転車の場合、胸に直接バンド等で取り付けるタイプが以前から一般的であった。

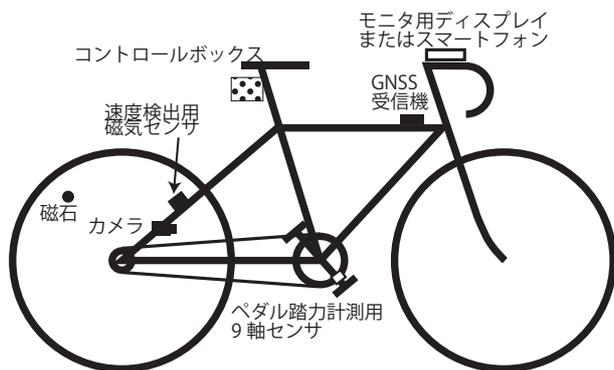


図1 自転車トレーニングシステム
 Fig. 1 Overview of a Bicycle Training System



図2 車載中継器
 Fig. 2 Cycle Data Relay Device

3. 自転車競技トレーニングシステム

3.1 自転車競技トレーニングシステムの概要

上記のような背景から、我々は主にトラックとロードの自転車競技を対象とした自転車競技トレーニングシステムを開発した [2]。本システムは高校生などのトレーニングを対象としているため、できるだけ安価に実現する必要がある。そのため、近年安価になったセンサデバイスや汎用品のマイコンボード類を使用する。図1に本システムの概要を示す。市販されているサイクルコンピュータとセンサにならない、自転車内ネットワークといえる構成を取っている。本システムは主に次のコンポーネントから構成される。

- 車載中継器。安価で能力のあるマイコンボードとして Raspberry Pi 3 Model B を使用する。今回の実装では Rasbian を OS として用いる。おもに、搭載したセンサ類の情報を統合して記録したり、コーチの PC に送ったりする機能を有する。コントロールボックスの USB コネクタには次のものが接続される
 - Wi-Fi アダプタ。主にトラック競技においてコーチの PC との接続を行う。
 - Bluetooth アダプタ。主に自転車に搭載したセンサ類との通信を行う。

この他に有線通信を行うセンサ類が接続される。なお、コントロールボックスの電源はリチウムイオン電池内蔵の USB ポータブルバッテリーとする。車載中継器の試作品を図2に示す。

- 車輪用センサ。バッテリー、地磁気・加速度・ジャイロセンサなどを内蔵する。試作品を図3に示す。
- カメラ。Raspberry Pi 専用カメラも考えられるが、筐体を製造する必要性等を考慮して USB 接続の汎用の Web カメラを利用した。車載中継器に直接接続される。
- 車速センサ。市販の自転車用車速センサをそのまま使用した。車輪の回転によりパルスが発生するので Raspberry Pi の GPIO を使用して読み取る。
- コーチ表示用 PC。コントロールボックスから送られ



図3 車輪用センサ
 Fig. 3 Wheel Sensor

て来たセンサのデータやビデオ画像を表示する。また、データベース内に蓄積し、個々の選手同士の比較、同じ選手の過去のデータとの比較などの機能を有する。

- Wi-Fi アクセスポイント。システムの一部というよりは単なる通信機器であるが、自転車競技トラックは一周 333m または 500m あるため、通信可能な距離が重要である。今回は水平面は無指向性、鉛直面内は指向性が強いアンテナをアクセスポイントに取り付けて通信可能な距離を確保した。

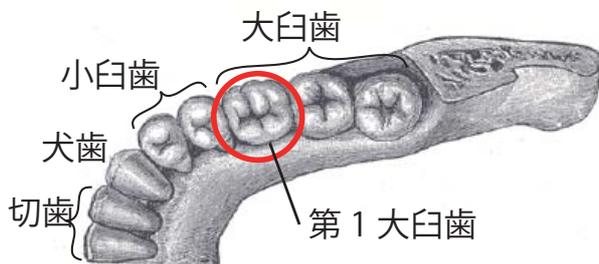
製作した自転車トレーニングシステムをトラックにおける練習で使用している様子を図4に示す。図4では、車輪用センサをサドルに固定して車体の傾きを測定し、ペダリングの際に車体がブレて力が逃げないように走る練習をしている。

4. 咬合力とスポーツ歯科

歯科では歯の治療後などに噛み合わせの状態を確認することがよくある。このとき、歯同士の当たり面の確認や調整の場合と咬合力そのものの測定で、異なる器具が利用さ



図4 トラックでの自転車トレーニングシステム使用の様子
Fig. 4 Using Bicycle Training System at a Track



Picture of jawbone and teeth: Henry Gray,
Anatomy of the Human Body, 1918. を改変

図5 顎骨と歯列
Fig. 5 Jawbone and Teeth

れている。

まず、図5に顎骨と歯列の構造と名称を示す。噛み合わせを確認するには全ての歯の噛み合わせを確認するが、咬合力を測定するには全ての歯を測定する必要は通常はなく、上下の第1大白歯にかかる力を測定すれば十分とされている。第1大白歯は別名6歳臼歯とも呼ばれ、一番最初に生える永久歯の臼歯である。噛み合わせを調整するには第1大白歯の噛み合わせを基準にする。このほか、正常な歯並びであれば第1大白歯にかかる力が一番大きい。

歯科で咬合力を確認するには、デンタルプレスケールや引き抜き試験フィルムが用いられる。歯の当たり面を確認するには咬合紙が用いられる。デンタルプレスケールは感圧フィルム的一种で、かかった圧力により微小なカプセルが壊れ、カプセルの中のインクが浸み出すことでかかった圧力を判定する器具である。原理上使い捨てであるほか、かかった最大圧力はわかるが経時的な変化はわからない、圧力も数段階で測定できるのみというのが一般的である。引き抜き試験は厚さが一定の試験フィルムを引き抜く際の力の大きさを測定することで咬合力を測定する。原理上、圧力を直接測定できないが、噛みあっているかどうかの確認は取れる。咬合紙は歯科の治療後にもっとも良く使

われる確認手段であり、噛みあっているかどうか、噛み合う面積や位置が適正かどうかを、咬合紙により歯の当たり面が着色されることで判定する。

上記の器具よりも使用頻度は低いが、正確な咬合力を測定する必要がある場合、古くは機械式歪ゲージを使用していた。現在ではフィルム状の圧力センサが用いられる。代表例として Tekscan 社の T-Scan Novous などがある。歯列全体の噛み合わせの測定・分析が可能であるが、診察室で使用するだけを考えているため、センサに付随する電極や測定器本体が片手で持てるサイズではあるものかなり大きい。スポーツをしながら咬合力を測定するのは困難を究める。また、圧力センサが使い捨てという問題がある。

次にスポーツ歯科学と咬合力に関することを述べる。

スポーツ歯科学では歯やあごの保護、パフォーマンスの向上や、運動時の歯の噛みしめに起因する歯科疾患を取り扱う。歯の噛みしめに起因する疾患として、歯の異常摩耗や割れ、顎関節周辺の痛み、歯根や顎骨周辺の異常などがある。特に人間の永久歯は生えかわることがないため、異常摩耗による表面のエナメル質の喪失や衝撃による歯の割れは大きな問題である。さらに歯根部や象牙質が障害されたり顎骨が障害されたりすると入れ歯やインプラントといった治療をせざるを得なくなるので可能な限り保護する必要がある。このほか、顎関節症などの予防もスポーツ歯科の範疇に入る。

上記の歯の保護や顎骨、顎関節症の予防などは、マウスピースを製作し、これを必要なときに装着することで行われる。マウスピースの形状や機能、保護する部位はスポーツによって異なる。一般に、スポーツのようなマウスピースには衝撃吸収のための構造が必要なため、歯軋りなどの治療や緩和に用いられるマウスピースよりも大型であり厚みもある。一方、装着時に呼吸を阻害しないことといった、スポーツならではの要求もある。

最大で体重の2倍の力が歯にかかるといわれており、この力は上顎と下顎をつなぐ咬筋が出す。咬筋の筋力と、噛み合わせにかかる力は、全身の筋力と関係があるとされており、これもスポーツ歯科の範疇である。

5. 咬合力センサつきマウスピース

ここでは、開発した咬合力センサについて述べる。

圧力、または力の測定方法には様々なセンサが適用できるが、ここでは安価であること、口内にいれること、噛み合わせ面にはさむためあまりに厚いと問題となることを考慮し、フィルムタイプの圧力センサを用いることにした。また、付け外しが容易、口内に入れるものを他人と共有するには抵抗がある、歯列は個人によりかなり異なるといったことを考慮し、全体をマウスピース型とする。このほか、製作が容易であること、壊れない限りは(洗浄して)再使用

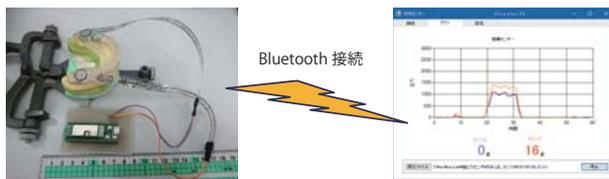


図 6 センサ部分のシステム構成
 Fig. 6 Sensor System Overview

できること、スポーツ等の場面でも使用できることを目標とした。このうち、製作が容易であること、は、二つの意味がある。一つはマウスピースの大まかな形状の作成とセンサを固定する作業が容易であること、二つ目は個々人の歯型に合わせる作業が容易であること、である。開発段階では歯科医による製作が容易であること、すなわち一つ目の作業が容易であることを目標とする。実用化する段階では市販のスポーツ用マウスピースと同様に、使用者が自分で自分の歯型に合わせることを想定している。

マウスピース型咬合力センサと測定データを表示している様子を 6 に示す。運動時にも使用できるという目標から、センサから読み出したデータを Bluetooth 接続した PC で表示する構成で試作を行った。自転車トレーニングシステムに組み込む際には、車載中継機でセンサのデータを一旦受信し、無線 LAN や 3G/LTE 回線を経由してコーチ用 PC に転送する。

次に、使用したセンサデバイス自体について述べる。今回はフィルム状の圧力センサとして、Tekscan 社製の Flexi-Force A201-100 を使用した。このセンサは piezo-resistive 式の圧力センサであり、最大で 4448N (1000lbs) までの力に耐えられる。カタログ上では 500lbs 以下の力の印加であれば 3% のリニアリティがあり、印加した圧力と電気抵抗が反比例する。圧力の測定エリアは直径 9.53mm の円形である。第一大臼歯よりも若干大きい。

第 1 段階の試作として、石膏で製作した歯型に熱可塑性樹脂の板を乗せ、加熱しながら真空引きするという、保険診療などでマウスピースの製作に一般的に用いられる方法でマウスピースを製作し、作成したマウスピースの左右の第一大臼歯の部分に上記の圧力センサを接着した。製作したマウスピースを図 6 の左側に示す（ここでは歯列模型と咬合器にセットされている）。使用した熱可塑性樹脂の板は軟化剤の入っていないものである。マウスピースを装着した歯型を噛みあわせて試験を実施したところ、カタログ値とは異なる大幅なヒステリシスがあった。さらに、左右で 2 倍近い測定値の違いが見られるなどの問題があった。この原因として、歯の当たり面の面積はさほど大きくない（臼歯の咬合面は凸凹しておりごく一部しか当たらない）ためセンサの許容圧力を越えてしまった、マウスピースの素材が硬いため圧力を分散できなかった、などの原因が考えられる。このことから、センサの感圧面にかかる圧力を分

散させ、できるだけ均等に圧力がかかる構造を取る必要があると思われる。

センサにかかる圧力を分散させる方法として二つの方向が考えられる。一つはマウスピースの素材を厚く、柔らかいものにすることである。もう一つはマウスピースの素材を硬く、剛性のあるものにすることである。これらは単独で用いるよりも必要に応じて組み合わせるとマウスピース全体を薄く仕上げるのに効果的と考えられる。すなわち、センサの感圧面に当たる部分を硬く、歯に触れる部分を厚く柔らかくすることにする。つまり、歯に近い側で圧力を分散させ、センサに近い側でセンサの変形を抑えて分散した圧力が噛み合わせることによるマウスピースの変形によって部分的に集中しないようにする。

手始めに、咬合力の測定が安価な圧力センサを用いて簡単に作れるかどうかを検証するため、厚みが増えることによる装着時の快適さの低下を一旦無視することにして、市販のスポーツ用マウスピースを改造して圧力センサを取り付けることにした。スポーツ用マウスピースとして、入手が容易な Shock Doctor GEM MAX を使用した。Shock Doctor GEL MAX は軟質なフレームに 80 度程度の低温で柔らかくなる樹脂を貼りつけた構造となっており、高温のお湯につけてから噛むことで自分の歯型に合わせるという製品である。まず、Shock Doctor GEL MAX から低温で 80

程度で柔らかくなる樹脂を剥がし、フレームだけにする。フレームにセンサを貼りつけ、さらにセンサの感圧部に直径 10mm のステンレス板を貼りつける。その後、歯科診療で歯型の採取に使用される 2 液硬化型シリコン樹脂により、歯型をつける。フレームだけにしたマウスピースに圧力センサを貼りつけた様子を図 7 に、その後、シリコンにより歯型をつけた状態を図 8 にしめす。この際、歯列模型ではなく、著者らの一人（佐藤）の生体を使用して歯型をつけた。



図 7 スポーツ用マウスピースの改造（センサ貼りつけ・歯型成形前）
 Fig. 7 Sports Mouthpiece (The sensor stuck on, before tooth mark formed)



図 8 スポーツ用マウスピースの改造（歯型成形後）
Fig. 8 Sports Mouthpiece Sensor

使用した圧力センサは圧電式であるため、なんらかの方法でアナログ的に抵抗値を読み取る必要がある。今回は Bluetooth 機能付きのマイコンである BlueNinja を使用して、抵抗と圧力センサを直列接続して電源電圧を印加し、圧力センサの電圧を読み取った。

6. 評価

作成したマウスピースを用いて著者（佐藤）自身を被験者として、いくつかの評価を行った。

まず、スポーツ用マウスピースを改造したセンサを装着した様子を図 9 に示す。左襟に BlueNinja をテープで固定している。



図 9 スポーツ用マウスピースタイプ咬合力センサを装着した様子
Fig. 9 Sports Mouthpiece Sensor worn

装着感はマウスピース全体の厚みがあるため良いとは言えない。また、長時間装着したまま下を向くとマウスピースと唇のすき間から涎が垂れるなどの問題がある。

正確な咬合力を測定できるかどうかが本来の興味の対

象であるが、生体を用いて歯型をつけたため、大きさがわかっている力をマウスピースに掛けるには歯列模型が必要である。ここで歯列模型がないため、やむを得ず実際に使用して評価を行うこととした。

まず、マウスピース型センサを装着して、食物を咀嚼するときのリズムで意識して強めに噛んだ様子を図 10 に示す。縦軸、及び画面キャプチャ中の数字は BlueNinja で読み取った圧力センサの両端の電圧を、FlexiForce A201-100 のデータシートの計算式にしたがって圧力に変換したものであるが、適切な定数を乗する必要があり、正確な圧力ではない。一般的に、強く噛み合わせた時には最大で体重の 2 倍程度の力がかかると言われているので、明らかに小さい。絶対的な測定値は不明であるものの、グラフのカーブ

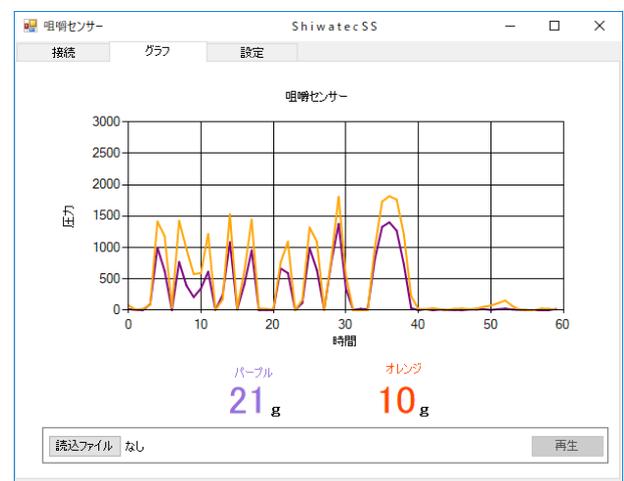


図 10 スポーツ用マウスピースを装着し咀嚼するリズムで噛んだ様子
Fig. 10 Chews in Mastication Rhythm using Sports Mouthpiece Sensor

からは噛んでいる様子をうかがうことができる。また、左右差もあることがわかるが、これはセンサに起因するものが被験者の咬筋や歯列によるものなのか不明である。

次に 50kg のバーベルでベンチプレスを行った時の測定結果を図 11 に示す。このとき、3 回バーベルを持ち上げたが、3 回目は意識して口を空けたまま持ち上げた。グラフの 10 秒～22 秒、27 秒～36 秒付近の 1 回目と 2 回目は通常どおり口を綴じて持ち上げたため十分な咬合力がセンサにかかっている。3 回目は 50 秒～60 秒であるが、口を空けたままだと力が入らず、どうしてもわずかに噛んでしまった様子が観察できる。

図 10 と図 11 に示すように、咬合面にかかっている力を正確に測定できているかは検証できていないものの、かかっている力の経時的な変化を観察するとはできている。歯科の診察に使用するごく一般的な器具等では測定せず高価なセンサを必要とするため、歯科の診療でも意味のある結果である可能性がある。

