

# 下肢障害者のための車いす用FESサイクリングユニットの開発

鎌田 大地\*・小林 義和

## Development of the Cycling Unit for Wheelchair using Functional Electrical Stimulation Driven by the Lower Limbs

Daichi KAMADA\* and Yoshikazu KOBAYASHI

(平成23年11月25日受理)

This paper describes the proposed front wheel unit for wheel chair using functional electrical stimulation driven by the lower limbs. EMG measurement result indicates that hamstring and quadriceps should be stimulated for FES cycling motion. Moreover, new type front wheel unit was designed for safety and practical use. In future, the method developed in this study will have to be checked widely by experiments.

### 1. はじめに

#### 1.1 FES(Functional Electrical Stimulation) とは

本研究はFESを用いるので、まずFESについて説明する。脊椎損傷や脳血管障害により脊髄や脳に障害が起きた場合、脳からの指令が筋肉に伝わらないために四肢を随意的に動かすことができなくなってしまう。しかしこの場合、脊椎などに損傷があっても末端神経などは無事なので、筋肉に電氣的刺激を与えることで筋収縮を引き起こすことが可能である。FESにより、麻痺している神経に電気刺激を与え、失われた身体機能の再建を行うことが可能である。近年の医用工学技術の発展により、複数の筋肉を刺激することにより下肢のサイクリング動作や

起立歩行動作などの再建が可能になっている。動作を再現するにはその動作を行う場合の筋肉の活動を記録した筋電図を用いてFESにより再現する。図1はFESの概略図である。

#### 1.2 緒言

車いすは脊椎損傷や脳血管障害などにより歩行が困難になった場合に、歩行機能の代替として使われる移動支援機器である。しかし車いすは機器への依存性が高くなる傾向があるため、下肢の筋をほとんど使用しない従来の車いすを使用し生活を続けた場合、下肢の筋萎縮や血行障害などでさらに歩行能力が低下する。これらを予防するためには、使用していない下肢の筋を運動させてやる必要がある。だが、脊椎損傷や脳血管障害を患っている患者では自力で下肢の運動をすることは困難である方も多く、医学の分野では前述のFES（機能的電気刺激）が用いられている。FESを用いたリハビリテーションにはFESサイクリング（図2）やFESローイング（図3）があり、FESサイクリングは旋回半径が大きいことから屋内での使用は比較的困難であると考えられるため、屋外で使用されることが多く、その場合には屋内で使用される車いすから屋外で使用されるFESサイクリングへ移乗しなくてはならない。そのため、使用者や介助者への負担が増加し、リハビリテーションが長く続かず症状が悪化してしまうことも多い。この負担となる移乗動作を行うことなくFESサイクリングリハビリテーションを行う

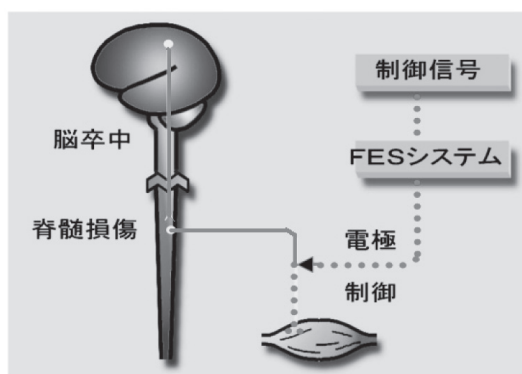


図1 FES概略図

\* 秋田高専専攻科学生



図2 FESサイクリング



図3 FESローイング

ことが可能となる新しいリハビリ機器の開発が進められている。

### 1.3 背景

下肢駆動前輪ユニット車いす（以下FESサイクリングと呼ぶ）とは通常の車いすと、下肢でクランクを漕ぐ事を目的とした前輪ユニットを合体させたものをいう。図4は本研究で製作するFESサイクリングの完成予想図である。前輪ユニットは通常の車いすの前方部分に取り付け、麻痺患者がFESの刺激を用いて下肢でペダルを漕ぐためのものである。国内外のFESサイクリングに関する先行研究<sup>(1)(2)</sup>では前輪と車いすが一体となったものがほとんどであり、本研究のように使用場所に応じて使い分けられるようなFESサイクリングは少なく、一般の障害者の方が手軽にサイクリング運動をできるものがなかった。これまで考案されてきたFESサイクリングは、日本人の体格に対して比較的サイズが大きかった。また、ペダルの位置が座面よりも上部に位置しているものが多かった（図2参照）。これは海外の研究では、自転車的一种である「リカンベントトライク：寝そべった形でサイクリング運動をする3輪自転車」をFESサイクリング



図4 FESサイクリングの完成予想図

として改造して転用する例が多いためと考えられ、図2に示すような高いペダル位置は自転車の走行時の空気抵抗を軽減する目的からあらかじめ設定されていると考えられる。

### 1.4 目的

移乗の際の使用人や介助者への負担を減らすためには屋内では従来の操作性の良い車いすを使い、そこから移乗を行うことなく屋外でのFESサイクリングによるリハビリテーションをできるようにする必要がある。そこで本研究では障害を持つ場合の問題点を考慮したアタッチメント式の下肢駆動前輪ユニットの製作・改良を目的とする。

また本研究は、私が所属する秋田高専、秋田大学、ミナトエンジニアリング株式会社との共同研究である。主に秋田大学工学資源学部及び医学部がFES駆動回路・FES駆動装置の開発と障害者を対象にしたFES実験を担当し、ミナトエンジニアリング株式会社が二号機の開発と製作、そして秋田高専では一号機的设计・製作、改良、二号機的设计コンセプトの立案、三号機的设计・製作、改良を行った。その中で私が関わったのは一号機と三号機的设计・製作、改良である。詳細を後述するが、図5～7に一号機、二号機、三号機の外観を示す。

### 1.5 FESサイクリングの制御

FESサイクリングの制御システムは、自転車のペダルにつながるクランク軸にロータリーエンコーダを取り付け、そこからクランク角度を検出しコンピュータに送る。そして得られた角度に応じた筋に表面電極を通して刺激を送りサイクリング運動を生み出す。FESサイクリングは屋外で行うためFES装置はユニットに取付けられるような小型で携帯可

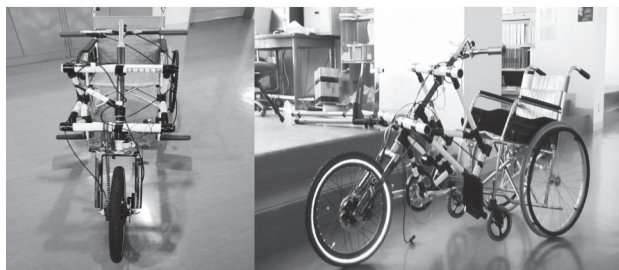


図5 一号機の外観

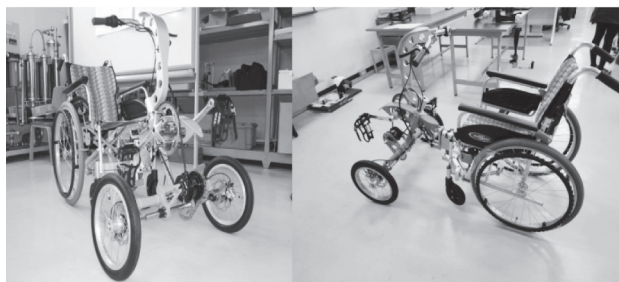


図6 二号機の外観



図7 三号機の外観

能なものではなくてはいけない。そのためパルスキューア・プロ KR-7（オージー技術株式会社製）を用いている。秋田高専では前輪ユニットに、ロータリーエンコーダを取り付けるところまでを行っている。FESで用いる電極は大きく分けて埋め込み電極、経皮的埋め込み電極、表面電極の三つに分けることができる。今回はFESサイクリングで使用される筋が体表付近にあり表面電極で十分刺激できるため、生体を傷つける恐れがないこともあわせ、表面電極を使用している。FESは医療行為であるので、秋田大学医学部と工学資源学部に依頼して実験を行ってもらっている。

## 2. FESユニットの設計・製作と改良

### 2.1 ユニットの設計にあたって

前輪ユニットを設計するにあたり、リハビリテーションに従事している秋田大学の医師の先生方の意

見もあり、障害者や下肢筋力の低下が著しい高齢者が円滑にFESサイクリングリハビリを行えるよう以下のような条件を設定した。

#### (1) 容易な取り付け

取り付け作業が複雑では使用者や介助者への負担が大きくなる。また、取り付けに割かれる時間が多くなり、リハビリに費やすことのできる時間が少なくなってしまう。車いすに乗ったまま取り付けをすることが前提となっているため、より簡単な作業で取り付け可能な機構にする必要がある。

#### (2) サイズの調節が可能

身体的特徴は人によって様々であり、使用される車いすもものによりサイズが違う。車いすの幅や使用者の足の長さなどはそれぞれ異なり、場合によってサイズを変更しなければならない。したがって個人や車いすの形状によって異なる部分での伸縮が可能である構造が求められる。

#### (3) クランクの位置を低くする

国内外で研究されているFESサイクルは、上肢が後方へ倒れた状態で足を前方に伸ばして行うため全身が伸びた状態になる。しかし、今回製作するユニットは従来の車いすに取付けて使用するため上肢が起きた状態になっている。そのためクランクの位置が高くなるほど、運動を行ったときの足と体とのスペースが少なくなってしまう。このスペースが少なくなるほど窮屈な姿勢となってしまう使用者に負担のかかる姿勢になる。そこでクランク位置をより低く前方にすることで使用者にあまり負担をかけないような構造にしなければならない。

#### (4) 安全性に配慮する

走行中に転倒や破損を起こして、使用者に怪我を負わせないように、十分な強度と安全性をもったものを製作しなければならない。

#### (5) 軽量であること

将来的に障害者一人でも取り付け取り外しができるように(4)の安全性を留意しつつ軽量なものの製作することを心がける必要がある。

## 2.2 一号機の評価及び改良

### 2.2.1 一号機について

2.1節の条件に従い、FESサイクリングを設計した(図5)。図8に示すような種々の長さの鋼製コーティングパイプを組み合わせることで市販のイレクター、メタルジョイントが主なフレーム部分を構成している。イレクターを使用した理由は、2.1

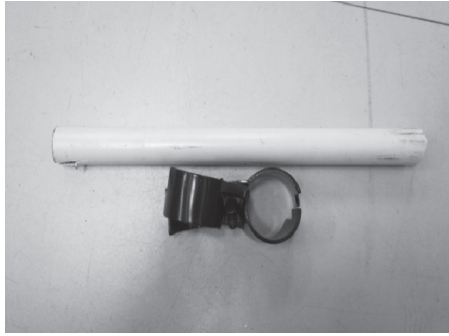
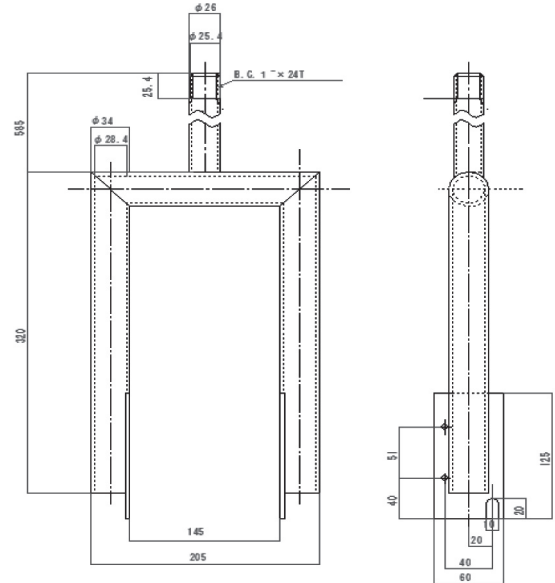


図8 イレクターとメタルジョイント

節の(2),(3)に関連するが、様々な体格の人に対応すること、大きさの異なる車いすに取り付け可能とするために、いわばオーダーメイドできるという目的から採用した。設計の容易さと、雨天の使用なども考慮し、ディスクブレーキを採用し、安全性にも配慮されている。構成部品については前輪ユニットのタイヤ、車輪、ペダルおよびクランク部は市販の自転車用部品が用いられている(図9)。一例としてフロントフォーク部の図面を図10に示す。フロントフォーク部の接続部は安全のために溶接した。フロントフォークの軸受けであるヘッドパーツは競輪用(SHIMANO HP-7410JIS)を使用することとした(図11)。そのため、B.C. 1"×24Tという自転車特有のねじを切る必要があり、フォーク部製作には、一般の自転車用の薄肉パイプの入手が難しく、比較的容易に入手できるJIS鋼管の外径34mm(肉厚2.8mm)と外径27.2mm(肉厚3.2mm)を使用した。また、クランク位置測定用のエンコーダはプリーと丸ベルトにより、連動させている。さらに、リハビリ時の負荷の変更を可能にするため変速機を取り付けた。サイズは車いすとあわせて1900mm×600mm×1000mm(全長×全幅×前高)となった。フォーク部にJIS鋼管を用いたこともあり、結果と



図9 一号機FESユニットの詳細



フロントフォーク

図10 フロントフォーク部の図面



図11 ヘッドパーツ

して前輪ユニットは比較的重い17.5kgの重量となってしまった。

### 2.2.2 評価と実験方法<sup>(3)</sup>

実際に製作したFESサイクルを秋田大学医学部でFESを用いてスムーズにFESサイクリング運動を行うことができるか実験した。図12に実験の様子を示す。将来、障害者を対象とした実験をする予定であるが、今回の実験では安全のため健常者で実施した。ここでFESサイクリング運動とは、大腿四頭筋(大腿の前部の筋肉)およびハムストリング(大腿の後部の筋肉)の二ヶ所に表面電極を貼り付け、使用者が足の筋肉にまったく力を入れない状態で電気刺激のみでサイクリング運動できるかどうかを確かめる運動である。本研究では当初先行研究<sup>(2)</sup>を参考に、大臀筋、大腿四頭筋、ハムストリングスの三ヶ所の筋肉を順番に刺激し、サイクリング運動を動作させる予定であった。しかしながら、大臀筋(GL)は体幹(体の内部中央部)にあり、表面電極の設置が難しいこと、また、図13に示すような秋田大学工

学資源学部における予備実験の筋電計測により大臀筋 (GL) の筋電結果は他と比較して小さく、大腿四頭筋 (QL)、ハムストリングス (HAM) の二ヶ所の筋刺激のみで十分なことが分かったので本実験では二ヶ所のみでの刺激とした。なお大腿四頭筋、ハムストリングスに与える刺激タイミングも筋電計測により調べ、図14のような刺激タイミングで刺激を与えれば良いことが分かった。



図12 駆動実験の様子

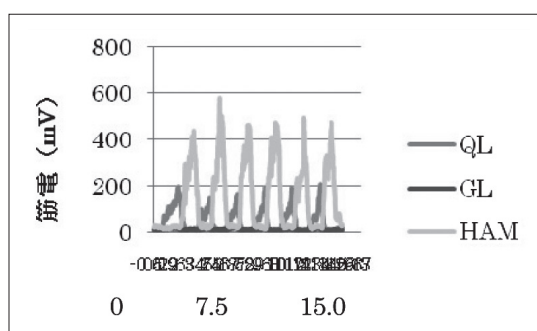


図13 筋電計測結果

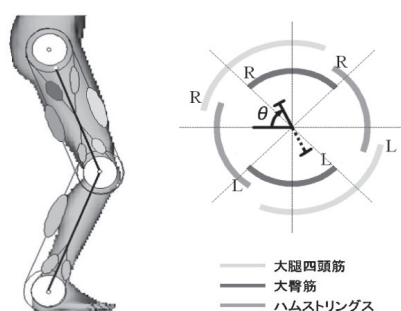


図14 刺激タイミング

## 2.2.4 一号機の改良について

先の問題点を解決するため、以下のように改良した。

これまでは車いすとの接続部分にメタルジョイントを用いたが、リプレースメントクランプ (parktool:#100-2C) (図15) に変えることによって取

り付けの簡易化を図った (図16)。本来は自転車を作業台に取り付けるために用いるものであり、1個約2kgと重量が大きいですが、使用者の安全性を考慮して採用した。これまでボルトとナットで接続していたものをワンタッチで取り付け取り外しができるようになったため、2人で30分程度かかっていた着脱が1人で3分程度になり、労力の軽減と時間の短縮ができた。2.1節の(1)の「容易な取り付け」が達成されたと考える。



図15 リプレースメントクランプ

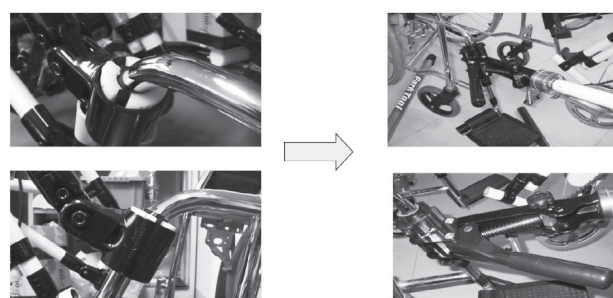


図16 接続部分の簡易化

これまでのユニットでは、イレクターの本数が比較的多かったため、イレクターの量を減らした。具体的には、図17のようにイレクターを3角形に組み合わせることで、ユニット部の剛性強化と、わずかながらではあるが、軽量化にも貢献していると考えられる。FESサイクリング実験を行った際、医師の先生より、ペダルを踏む足とフレームがぶつかり、狭いと指摘があった。そこで図18のように、足を囲むフレームを四角形ではなく、逆台形のような形にすることにより、内部空間が拡張されスムーズなペダリングが可能になり、わずかながらではあるがペダル周りの空間を改善することができたと考える。

図19に改良後のFESサイクルユニットを示す。一号機はクランク位置を低くとることができるために、使用者が楽な姿勢でペダリングすることができ、

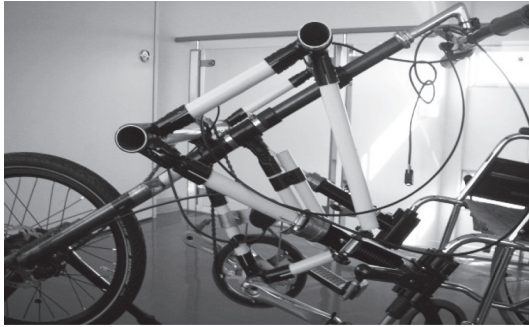


図17 イレクター使用の工夫

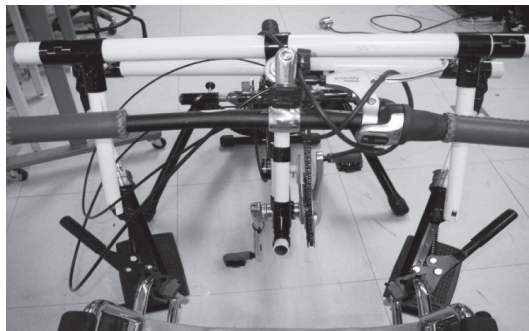


図18 内部空間の拡大



図19 改良後の一号機

様々な体格の人が使用できるようサイズの変更も比較的容易である。

今後は改良案として足を囲むようなフレーム構造ではなく、フレームが股下を通るような構造にし、車いすとの接続も、より容易にできるものを考案することが必要であると考えます。

### 2.3 二号機の紹介

二号機は一号機の問題点を考慮し、なおかつより安全性に配慮し、生活空間で使用できる実用化を目指したユニットとしてミナトエンジニアリング株式会社が開発した(図6及び図20)。特長としては、

転倒防止の目的から、車輪を車いすのものと合わせて4輪設けた2輪型ユニットとし安全性に配慮している。また、車いすとの接続装置(図20及び図21)にはクイックリリース式のレバーを用い、これによって前輪ユニットとの接続を容易にし、且つロックをピンとレバーの2段機構として安易に脱落しないよう配慮している。この接続装置をあらかじめ車いすに取り付けておくことで、様々な大きさの車いすに対応可能であり、また角度調整機構(図20)を装備して車いすの補助輪が走行中に引っ掛からないように浮かせる機能を有している。これらは着座の状態でも、使用者自らが操作可能である。

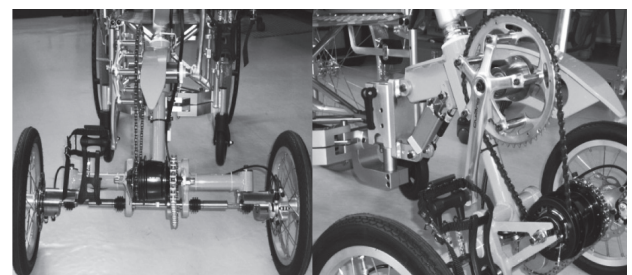


図20 二号機詳細



図21 接続装置の詳細

## 2.4 三号機の設計・製作と改良

### 2.4.1 選定理由

三号機は、車いすに取り付ける前輪ユニットとしてPERFORMER社のリカンベント自転車Front Wheel Drive (2009 model)の前輪部を使用した(図22)。この前輪駆動二輪車は前輪部と座席、後輪部が取り外せるようになっている。もともと人が乗るためのものであるため強度も充分にあり、軽量(前輪部のみで約7kg)であるので、設計条件を容易に満たせるのではないかと考え、この自転車を選定し、FESサイクリングの前輪ユニットとすることにした。

### 2.4.2 三号機の設計・製作

今回は改良後の一号機のようにリプレースメント

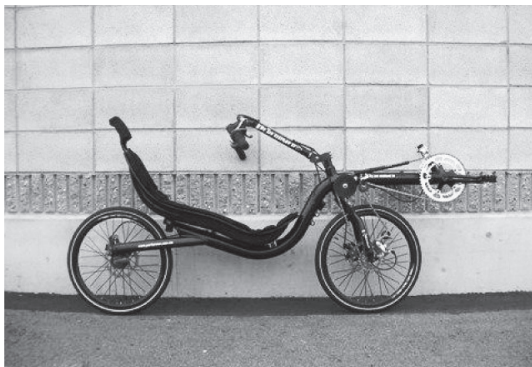


図22 Front Wheel Drive (2009 model)

クランプを用いて車いすと接続するのではなく、車いす側にアダプタ (図23の丸部) を取り付け、そのアダプタとFront Wheel Drive (2009 model) の前輪部を接続する形とした。図23が三号機の試作一号である。この三号機を秋田高専の学生、秋田大学の学生に試乗してもらった結果、次のような意見が挙げられた。

- ・漕ぎやすいが、ユニットを車いすに取り付けた状態だと、ユニットと車いすとの間が狭すぎて乗り降りしづらい。
- ・車いすとの接続方法が、アダプタとユニットを数個のねじ止めによるものであるため、ドライバー等の道具が必要であり、着脱が困難である。
- ・ユニットを外した状態でも、車いすにアダプタ部分 (図23丸部) が残ってしまい、車いすを通常使用する際に足がぶつかるなど、邪魔になってしまうのではないかと。



図23 三号機の接続

これらを改善して、それに加え今までロータリーエンコーダとペダルとの連動は丸ベルトとプーリーを使用していたが、滑ることにより正確にクランク位置を特定出来ず、誤ったタイミングで電気刺激が与えられる恐れがあり、危険であると秋田大学からの指摘もあり、併せて改善することとした。

### 2.4.3 三号機の改良

前節で挙げられた問題点及び丸ベルトとプーリーの部分を改良した。改良後の三号機を図24に示す。改良した箇所は以下の通りである。

- ・改良前は車いす側に取り付けてあったアダプタのアルミ円柱を車いすのフレーム間に渡された鋼管から取り外し、図25のようにユニットに付けたままで固定しユニット側のアダプタとした。また、円柱の底部に手回しのねじを取り付けた。
- ・図26のようにT字に鋼管を溶接し改良前のアダプタの鋼管と付け替えた。また、その位置を改良前より後ろ側に取り付け、自由に回転するようにしたので車いすを通常使用する際も、邪魔にならないようにした。
- ・図27のように上記のユニット側のアダプタ (アルミ円柱) に車いす側のアダプタ (鋼管) を差し込み、アルミ円柱底部についた手回しのねじを回し、鋼管に空いた穴 (図26丸部) を貫通させれば固定できるようにした。これにより道具を使わず容易にユニットを接続することができ、ユニットと車いすの間の空間も広がった。また、鋼管の穴 (図26丸) の位置を変えることにより様々な体格の人に合わせられるようにした。



図24 改良後の三号機



図25 改良後の前輪ユニット



図26 改良後の車いす側アダプタ

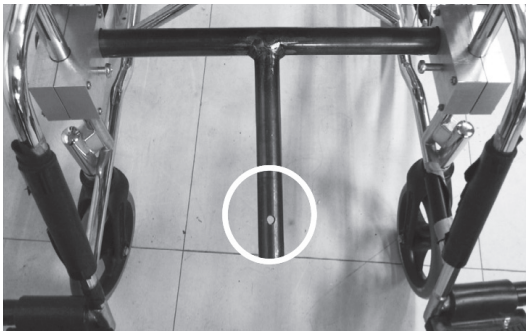


図27 改良後のユニット接続

- ・丸ベルトとプーリーの代わりにラダーチェーンとラダーチェーン用のスプロケットを使用することとした。ラダーチェーンはピッチ4.8の市販のもので、スプロケットは適度な大きさのものが市販されていなかったため、クランクへの取り付けを考慮し、外径を70mmとして以下の式を計算した結果、外径70mmでピッチ4.8の場合ピッチ円直径67mm、歯数44のスプロケットを製作すればよいことが分かったため、設計し製作した。これにより、改良前のような滑りがなくなり、FESサイクリングをより安全に使用できるようになった。

$$m = P / \pi \quad \dots (1)$$

$$da = d + 2m = m(z + 2) \quad \dots (2)$$

このとき  $m$  はモジュール、 $P$  はピッチ、 $da$  は外径、 $d$  はピッチ円直径、 $z$  は歯数とする。

### 3. 結言

本研究では、一号機、二号機、三号機と、計三台のFESサイクリングが開発された。

改良前の一号機は、クランク位置の低さとサイズの調整のしやすさという面は良かったものの、取り

付けの困難さ、17.5kgもの重さ、内部空間の狭さ、という問題点があった。改良後の一号機はリプレースメントクランプの使用や、イレクターの取り付けの工夫により、取り付けや内部空間の問題はわずかではあるが解決できたと考えられる。しかし、障害者の方に使ってもらうには、まだまだ困難な部分が多いため、今後は使用材料の変更や取り付け機構及びフレーム構造（股下を通すような構造）の再考等が必要だと考えられる。二号機は今後秋田大学にて健常者および障害者によるFESサイクル運動実験を行う予定である。改良前の三号機であるが、運転のしやすさは良かったのだが、車いすへの取り付け取り外しの困難さ、ユニットと車いすの間の空間の狭さ、接続用アダプタが邪魔になってしまう、プーリーとゴムベルトとの滑りが危険である等、様々な問題点も多かった。接続用アダプタの構造の再考やラダーチェーンとスプロケットの採用により、取り付け取り外しも道具を使わずにでき、内部空間も広がった。また、危険であったゴムベルトの滑りも改善することができた。今後はT字の鋼管の穴（図26の丸部）を位置を変えて増やし、使用者とペダルの間の距離を変えられるようにし、様々な人へ対応可能としたり、車いす側のアダプタのT字の鋼管を様々な角度でロック出来るようにして、クランクの位置を変更可能にする予定である。また二号機と併せて、秋田大学にてFESサイクル運動実験を行う予定である。三号機では市販の自転車を使用したため、クランクの位置がやや高く、変更するにも限度がある。そのため三号機のフレーム等を参考に、今後はよりクランク位置が低くなるように新たなフレームを設計する必要があるだろう。

### 参考文献

- (1) C.G.A.MacRae, T.E. et al., "Cycling for children with neuromuscular impairments using electrical stimulation-Development of tricycle-based system", Medical engineering & Physics, vol.31, pp.650-659, 2009.
- (2) K.J. Hunt et al., "Comparison stimulation patterns for FES-cycling using measures of oxygen cost and stimulation cost", Medical engineering & Physics, vol.28, pp.710-718, 2006.
- (3) 秋山雄介ほか4名：機能的電気刺激を用いた下肢駆動前輪ユニット車いすの開発，日本機械学会東北支部第46期秋季講演会講演論文集，pp.175-176, 2010.