

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。

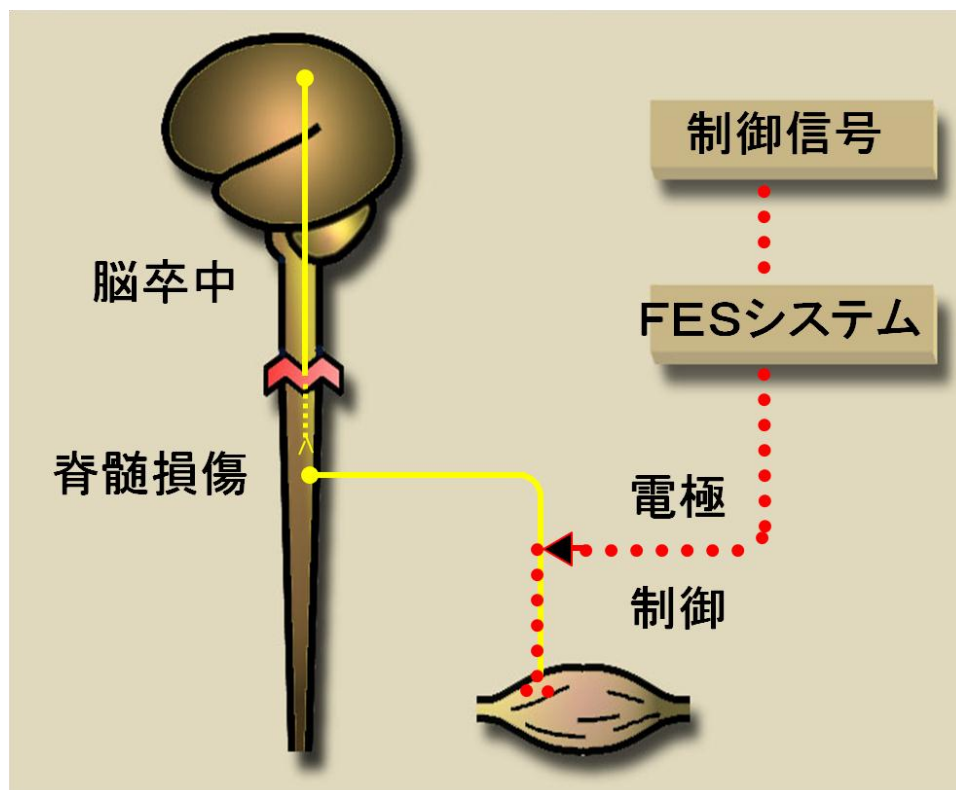


図1 FES 概略図

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われる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に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。



図2 FES サイクリング



図3 FES ローイング

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⁽¹⁾⁽²⁾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いことが挙げられた。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。



図 4 FES サイクリングの完成予想図

1-4 目的

移乗の際の利用者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の設計・製作、改良、二号機の設計コンセプトの立案、三号機の設計・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の設計・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。



図 5 一号機の外観



図 6 二号機の外観



図 7 三号機の外観

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能なものでなくてはならない。そのため図 8 のパルスキューア・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。



図 8 パルスキューア・プロ KR-7

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(図 9)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。



図 9 表面電極

2. FES ユニットの設計・製作と改良

2-1 ユニットを設計するにあたって

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 10 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たことのできる市販のイレクター，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 章 2-1 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 11)．一例としてフロントフォーク部の図面を図 12 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 13)．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ー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．



図 10 イレクターとメタルジョイント



図 11 一号機 FES ユニットの詳細

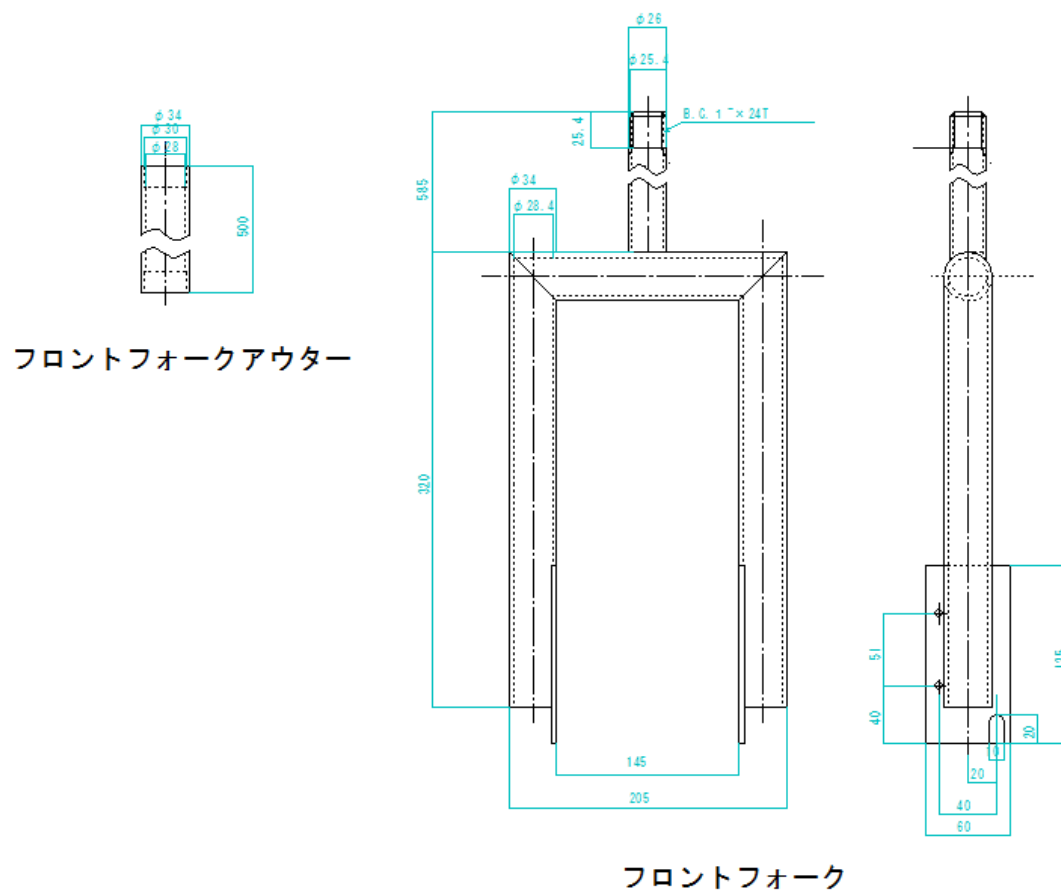


図 12 フロントフォーク部の図面



図 13 ヘッドパーツ

2-2-2 評価と実験方法⁽³⁾

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 14 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(太腿の前部の筋肉) およびハムストリング(太腿の後部の筋肉) の二ヶ所に図 9 の表面電極を貼り付けた。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⁽²⁾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 15 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の刺激とした。なお大腿四頭筋、ハムストリングに与える刺激タイミングも筋電計測により調べ、図 16 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 14 実験の様子

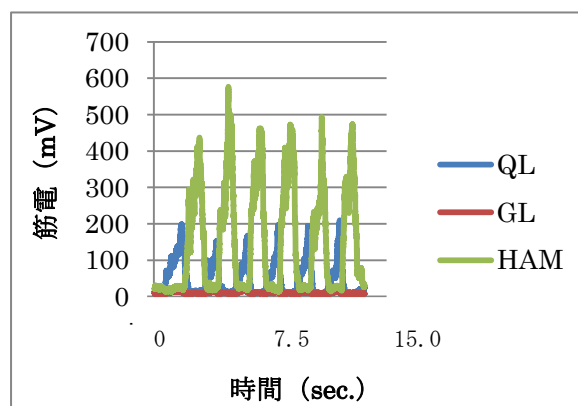


図 15 筋電計測結果

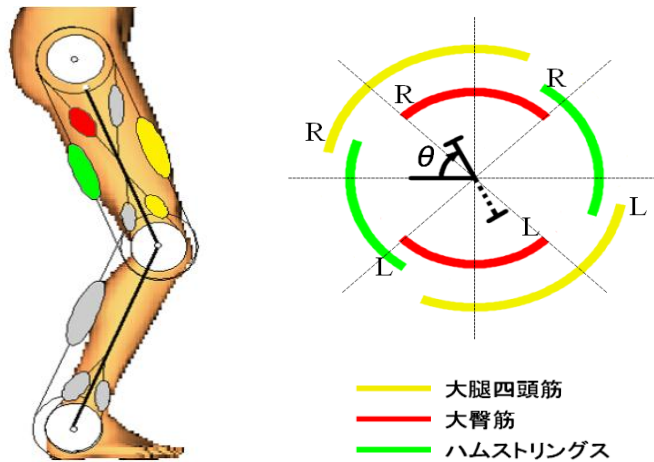


図 16 刺激タイミング

2-2-3 実験結果

秋田大学医学部で実際に FES を用いて FES サイクルを動かしてみた結果、使用者はスムーズに FES サイクリング運動を実現することができた。しかし実験をする中で以下のような問題点が明らかとなった。

①複雑な機構で取り付けが難しい

車いすとの接続部がねじ止めのため、取り付け取り外しが困難で時間がかかること。

②ユニットが重いこと

多数のイレクターとメタルジョイント、さらにフロントフォークに JIS 鋼管を用いているためにアタッチメント自体が重いこと。

③パーツが多く、剛性に劣る部分がある

パーツが多くなった結果、接合部が増え可動部が多くなり剛性が劣る部分が出てくること。

④内部空間が狭く、ペダリング中に足とユニットが干渉する

足を囲む構造のため、乗り込みにくく、十分な内部空間が確保されていないためにペダリング中に足がユニットにぶつかり漕ぎづらいこと。

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 17)に変えることによって取り付けの簡易化を図った(図 18). 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出来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 章 2-1 節の(1)の「容易な取り付け」が達成されたと考える。



図 17 リプレースメントクランプ



図 18 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く、いわば無駄があったと考えられるため、イレクターの量を減らした。具体的には、図 19 のようにイレクターを3 角形に組むことで、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。



図 19 イレクター使用の工夫

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、狭いとの指摘があった。そこで図 20 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 20 内部空間の拡大

図 21 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、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。



図 21 改良後の一号機

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 22)。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 22 青丸部分及び図 23)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 22 赤丸部分)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、使用者自らが操作可能である。

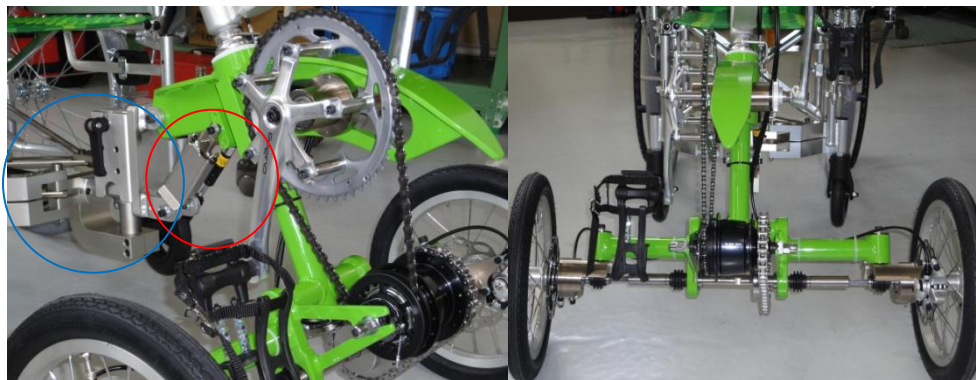


図 22 二号機詳細



図 23 接続装置の詳細

2-4 三号機的设计・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 PERFOMER 社のリカンベント自転車 Front Wheel Drive(2009 model)の前輪部を使用する(図 24)．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．



図 24 Front Wheel Drive(2009 model)

2-4-2 三号機的设计・製作

今回は改良後の一号機のようにリプレースメント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 25 の黄丸部)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 25 が三号機の試作一号である．



図 25 三号機の接続

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 25 黄丸)が残ってしまい、車い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。

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 26 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 27 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 28 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 29 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 28 緑丸)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 28 緑丸)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。
- ・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。(図 30) 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。



図 26 改良後の三号機



図 27 改良後の前輪ユニット



図 28 改良後の車いす側アダプタ



図 29 改良後のユニット接続



図 30 製作したスプロケットとラダーチェーン

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ブ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(JIS 鋼管が重いため)や取り付け機構及びフレーム構造(足を囲むような構造ではなく、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、内部空間も広くなった。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 28 の緑丸部分)を位置を変えて増やし、使用者とペダルと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.