

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008 ～ 2011

課題番号：20360118

研究課題名（和文）極限環境下における電気刺激 Hybrid 運動法の整備に関する研究

研究課題名（英文）Research on General Approach to Hybrid Training in Extreme Environment

研究代表者

田川 善彦（TAGAWA YOSHIHIKO）

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70122835

研究成果の概要（和文）：

Hybrid 運動法は、自発筋収縮と電気刺激収縮の混合運動であり、効果的身体トレーニングや麻痺運動の改善を実現した。Hybrid運動は自家筋の収縮力を利用するため小型・軽量の装置で、臥床や微小重力の宇宙など、極限環境下での廃用萎縮軽減にその日常利用は効果的である。この技術は人間と長時間接するため、本研究で行った操作性や構造の柔軟性、さらに安全性の付与は、臨床リハや宇宙医学での廃用萎縮への進んだ対策として貢献する。

研究成果の概要（英文）：

The hybrid training method combines voluntary and electrically induced muscle contractions. In clinical settings, this method could increase the effectiveness of strength training programs for the elderly and improve the mobility of paralyzed limbs. We designed a new system for applying this method in extreme environments, such as bed-rest and the microgravity of space, with the goal of reducing disuse muscle atrophy. The hybrid training method is performed using a compact system that is controlled by the user and delivers an electric current to induce muscle contraction, and the equipment comes in prolonged close contact with the human body. However, the systems currently used for hybrid training are cumbersome, not user-friendly, and not sufficiently safe. In this report, we present the preliminary results of the development of a user-friendly, flexible, and safe system designed for daily use in extreme environments. We anticipate that this integrated system will aid the performance of hybrid training in extreme environments and will help reduce disuse atrophy in clinical rehabilitation and space medicine.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2009 年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2010 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度	0	0	0
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：バイオメカトロニクス

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：医療福祉、極限環境、廃用性萎縮、電気刺激、トレーニング、運動支援、スマートウェア、ユビキタス

1. 研究開始当初の背景

| (1) 電気刺激の生体応用例は古くから存在す

るが、現在では電気刺激による脊損者の機能改善や脊髄や脳への電極埋込によって完全自律型運動機能再建を目指す研究など、報告されている。一方では電気刺激による筋力の維持・増強に関わる研究も行われており、理学療法でのTESなどはこの応用である。旧ソ連ではオリンピック選手の強化に向けた筋力増強に電気刺激を積極的に応用した経緯がある。しかし電気刺激のみの訓練では、骨格筋の廃用防止などの効果に対しては、臨床の場においてあまり認められておらず、ほとんど用いられていない。

(2) 提唱した Hybrid 運動法の原理は、自発筋収縮と電気刺激収縮の混合運動であるので、Type I と II の両線維が活動する特異な運動様式を持つ独創的な運動法であり、国内外に例を見ない。

(3) Hybrid 運動法に対して、電気刺激効果の皮下深達度の評価法、上肢への効果、下肢への効果、パラボリックフライトでの装置稼働、微小重力模擬実験での効果、生化学的評価、体幹運動制御などを通して検証を行い、効果を確認してきた。

2. 研究の目的

微小重力の宇宙やそれと類似の臥床は、人間にとって極限環境である。本研究は、極限環境における長期滞在者の筋・骨の廃用防止や刺激モード変更による運動機能障害者の運動支援、さらにスポーツ選手の効果的筋力増強などを可能とする自家筋駆動型電気刺激 Hybrid 運動法の整備とユビキタス利用を目指す。このために以下の項目を明らかにする。

- (1) 刺激電圧の周波数・強度の選定
- (2) 刺激用表面電極の特性
- (3) Hybrid 運動法に適した表面電気刺激装置の開発
- (4) Hybrid 運動法の末梢神経への影響
- (5) ウェアラブルスーツのインテリジェント化
- (6) バーチャルリアリティ(VR)による Hybrid 運動法
- (7) 極限環境下滞在者への Hybrid 運動法の適用
- (8) 運動支援

3. 研究の方法

2. の検討項目に対して、極限環境下で電気刺激を生体に長期に与える場合の影響やそのときの刺激条件、トレーニング内容、訓練動機の維持・向上、小型・軽量・高信頼性の刺激システムの構築、などを行う。

- (1) 刺激周波数の相・周波数の選択が重要であるが、まだ不明な点もあり、感覚神経と電気刺激の相・周波数の関連について調査・整理・基礎実験を行う。
- (2) 安定した長期貼付を可能とする刺激用電極の開発と検証を行う。

(3) 安全、狭隘な環境での使用、精密機器への影響などを考慮して、以下の事項を検討する。

- ① 耐ノイズ性にすぐれた簡便・軽量の関節角変位センサの開発
- ② 筋疲労センサの開発
- ③ 身体を制約しない無線化と身体に装着可能な小型・軽量化
- ④ 電磁環境適合性 (EMC) 評価の実施
- (4) 脊損者や高齢者に長期 Hybrid 運動法を適用し影響を検証する。
- (5) ウェアラブルなスマートスーツを製作し、日常利用に向けた検証を行う。
- (6) ゲーム感覚と電気刺激を利用した力覚提示による臨場感を付与する。臨場感には視覚フィードバックを利用する錯覚現象を活用する。
- (7) 機能減弱者に対し Hybrid 運動法を適用し効果を検証する。また ISS 日本実験モジュールきぼう (JEM) 内で同運動法を想定して、身体や ISS に与える影響についてシミュレーションを行い評価する。
- (8) 上肢や下肢の電気刺激による運動制御システムの構築や脳賦活効果を検証する。

4. 研究成果

計画達成のため解明すべき事項として、8項目を上げた。各項目に対して記述する。

(1) 刺激電圧の周波数・強度の選定 (図 1)

① Hybrid 運動法では刺激による筋収縮力を利用するため、それが減少する刺激条件は好ましくない。

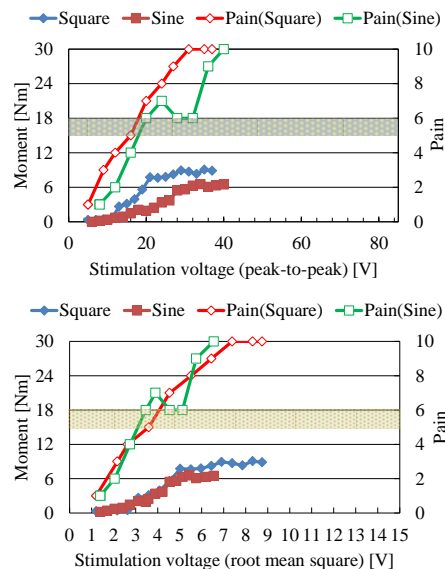


図 1 定電圧刺激波形の違いによる筋出力 (左縦軸) と主観的痛み (右縦軸)。網掛け部分が長時間刺激時に許容できる痛み (5 ~ 6)。痛みを評価したが、長時間刺激を許容できる痛み指数は 5~6 となった (指数 1: 通電を自覚、指数 10: 耐え得る最大の痛み)。

- ② 刺激波形が矩形波では筋出力が大きい。正弦波では痛み軽減が顕著だが、矩形波と同程度の筋収縮力を得るには刺激強度を上げるため痛みは同程度となった。
- ③ 両波形の実効値ではほぼ同等の作用であった。
- ④ 健常成人男性 6 名による強度と主観的痛み
- ⑤ 回路素子の耐圧の関係上、矩形波刺激を採用した。

(2) 刺激用表面電極の特性

刺激電極の長期の使用を前提に、使い捨てゲル電極に代わる含水可能な構造（高吸水繊維維セルオアシスを使用）の銀織布製電極を試作し、含水時にハイドロゲル型と同等の性能を有することを確認した（図2）。図中の電圧は、感覚：刺激の感じ始め、収縮：筋の収縮開始、運動：関節運動開始、の各事象に対する閾値である。これにより繰り返し使用、短時間装着を可能とするウェアのプロトタイプを製作した。装着例を図6に示した。

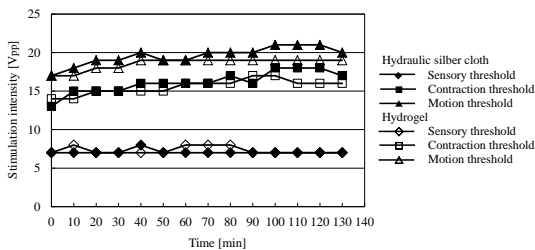


図2 長時間電気刺激と閾値の変動

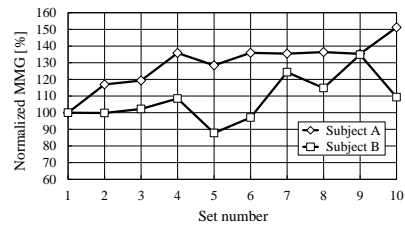
(3) Hybrid 運動法に適した表面電気刺激装置の開発

- ① 安全面から電流制限（JIS規格 20mArms）を設定し、定電圧または定電流を選択可能とした。定電流刺激は、定電圧と比較して筋疲労時の収縮力の低下が小さかったが、実運用では筋損傷の点から留意すべきである。
- ② 小型・軽量の関節角変位センサとして曲げ損失式光ファイバーやリンク式エンコーダを開発し、VRとの交信円滑化のため無線通信を高速化した。
- ③ 宇宙仕様電磁環境適合性評価により、刺激電極部からの電界放射（RE02）が観察されたが、シールドによってその影響を遮蔽することができた。
- ④ 無線通信は電界放射感受性（RS03）に対し脆弱であった。
- ⑤ 生体通電時の電界放射は、姿勢の違いやシールドウェアの着用有無によらず個人差が大きく、JAXA基準超えが観察された。各個体の導電性の差異が関与していると推察している（図3）。
- ⑥ 電気刺激時の疲労を機械量である筋音で計測するため、マイクロフォンセンサを開発した。図4は上腕の Hybrid 運動の電気刺激

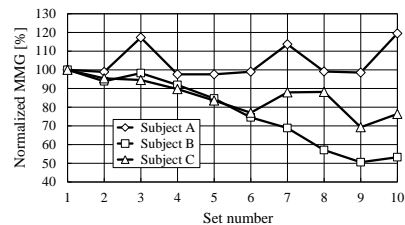
を低強度、高強度で行った場合の上腕二頭筋側の筋音特性の差異を示した。高強度では翌日まで疲労感が残存しており、その差異に基づく疲労対策への可能性を示唆した。



図3 上肢姿勢とシールド効果のRE評価試験（計測用アンテナから供試体までの距離は1m）



(1) 低強度 (18~24 V_{pp})



(2) 高強度 (18~42 V_{pp})

図4 上肢 Hybrid 運動時の筋音図（1回目のRMSで正規化。屈曲2秒・伸展2秒の10回を1セットとし、60秒の休憩を挟んで10セット繰り返す）

(4) Hybrid 運動法の末梢神経への影響

- ① C6レベル脊損者の前腕にHybrid様式の長期電気刺激を加えた結果（20分/回、2~3回/週、12週）、刺激時の伸展可動域や前腕部筋量の増大を認めたが、随意運動の改善はなかった（図5）。

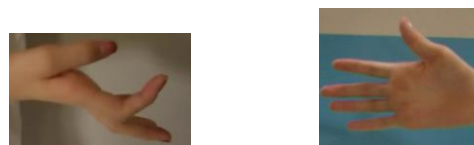
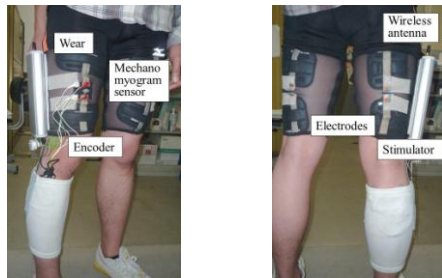


図5 脊損C6レベル患者への手指伸展TES効果の評価（伸展刺激印加時）

- ② 身体機能の減弱が想定される高齢者にHybrid運動を試み、活動性や筋力が増大した（(7)参照）。
- ③ 何れの場合にも機能の改善がみられ、抹消神経の効果的関与が示唆され、負の面は確認できなかった。

(5) ウェアラブルスーツのインテリジェント化

主動筋・拮抗筋上の含水性刺激電極への通電端子や筋音センサ設置をウェア前面にまとめ、配線の煩わしさを改善したため、短時間で着用できた。このウェアへの小型・軽量の刺激装置の設置により日常生活での利用（図6）、さらに今後のユビキタス利用を目指す。



前面 後面
図6 電気刺激の日常的利用

(6) バーチャルリアリティ(VR)による Hybrid 運動法

JEM 内での Hybrid 運動を効果的に行うためにVRを併用できるよう、刺激装置との機能分担を想定した（図7）。しかし実運用を簡素化するため、JEMでは図中のメインPC（VRシステム）を使用せず、刺激装置単体で運動感知、刺激のタイミングおよび強度を制御する方式を検討した。

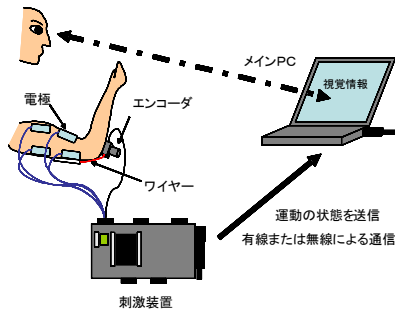


図7 Hybrid運動法のシステム構成

(7) 極限環境下滞在者への Hybrid 運動法の適用

- ① 身体機能が減弱した高齢者を対象にハイブリッド運動法を適用した。姿勢保持や大腿部屈曲に重要な腸腰筋や膝屈伸の筋力を強化し、転倒防止や活動性向上の検証を試みた。
- ② 腸腰筋は深部にあり表面電気刺激が困難なため、エルゴメータハイブリッド運動を導入した（図8）。エルゴ運動時において、腸腰筋を使用する大腿部屈曲期の大殿筋と反対側の膝伸展期にあるハムストリングスの両拮抗筋に電気刺激を印加し、主動筋の強化を試みた。表1に示すように活動性が向上し、立位動作反復、階段昇降、10 m 歩行、膝屈曲力に有意な改善が見られた。
- ③ 高齢者の膝筋力の強化に、座位による Hybrid 膝屈伸運動を適用し、ウェイトマシン（249 kg）によるトレーニングと同等の増強を

認めた（表2）。小型・軽量のHybrid 運動システム（1kg）の優位性を指摘できた。

④ ISSでは微小重力を利用した各種実験が行われるため、Hybrid 運動のJEM内運用には、四肢の運動が身体、ISSにどのような影響を与えるか、見積もっておく必要がある。

⑤ Hybrid 運動の半周期でジャークの二乗積分を最小化する運動軌跡を定め、浮遊状態での上肢の往復運動をシミュレーションした場合、身体質量中心は不動であるが、誘発される回転運動、例えば、頭部運動には最大で 4 mm の振幅がみられた。

⑥ 空間浮遊での運動ではなく、背中をJEM内の壁に固定した運動を想定し、ISS全体に対する加速度の影響を評価した。ISSのマクロな構造モデルを用いてJEM内の加速度への影響を模擬したところ、 10^{-6} m/s^2 のオーダーであり影響は無視できると判断したが、今後、精緻な検証が必要である。



電極貼付



運動風景

図8 エルゴメータを用いたHybrid運動

表1 エルゴメータハイブリッド運動の効果（15分/回、2回/週、6週間のトレーニング）

	Pre-training	Post-training	Relative change	P value
10-repetition sit-to-stand	12.2 [s]	10.4 [s]	-14.8 [%]	0.041
Stair-case stepping	7.4 [s]	6.4 [s]	-14.0 [%]	0.011
10-meter walk	8.0 [s]	5.9 [s]	-26.3 [%]	0.046
Hip flexion torque at 60 [°/s]	48.4 [Nm]	51.3 [Nm]	5.8 [%]	0.477
Hip extension torque at 60 [°/s]	63.5 [Nm]	70.5 [Nm]	11.0 [%]	0.418
Knee flexion torque at 60 [°/s]	34.4 [Nm]	60.2 [Nm]	74.9 [%]	0.011
Knee extension torque 60 [°/s]	76.6 [Nm]	86.4 [Nm]	12.7 [%]	0.181

表2 膝伸展の等尺性最大モーメント（19分/回、2回/週、12週間のトレーニング）

モーメント [Nm]	Hybrid群 (10名)			ウェイトマシン群 (10名)			群間 P
	実験前	実験後	P	実験前	実験後	P	
膝伸展	79.88	110.65	0.002	80.90	114.55	0.002	0.26
中央値	(63.65-	(97.20-		(64.10-	(93.80-		
四分位範囲)	80.75)	113.50)		137.45)	169.70)		

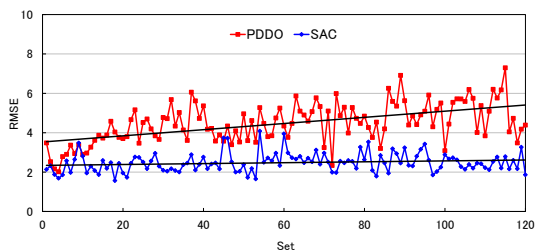
(8) 運動支援

- ① 下肢では、電気刺激足こぎエルゴ運動制御システムを構築し、高齢者に適用した（(7)参照）。さらにニューラルネットワーク（NN）を用いて、屋内外での歩行の支援や機能強化を図るため、歩行様相に応じた電気刺激を目指した。歩行時の加速度と角速度を無線センサで計測

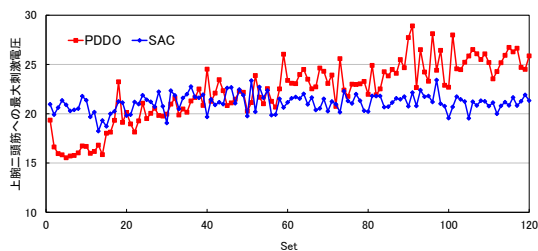
する構成であり、屋内実験段階では高認識と刺激システムの正確な動作を確認した（表3）。
 ② 歩行時のHybrid訓練、蹴り出し補助や足部背屈改善のための刺激システムを構築した。
 ③ 下肢関節や腰関節に障害を仮定した立ち上がり動作のシミュレーションを行い、補償動作の差異や限界と対策について示唆を与え、FESの可能性に定性的見解を与えた。
 ④ 上肢では、TESによる脊損患者手部の機能改善とスーパーチャネル自動マッピングシステムによる手部のTESとFESの効率化を実現した。
 ⑤ 前腕FES位置決め単純適応制御SACを適用したところ、長時間の軌道追従性向上や最大刺激強度の低減化が実現できた（図9）。
 ⑥ 刺激装置のスポーツ矯正利用を試みた。
 ⑦ エルゴ運動を電気刺激、随意、モータ駆動で実施し、脳賦活を近赤外分光法により検証したが、三通りの差異を明瞭に認めることができなかった。個体差や計測条件による差異もみられ、分光法の使用には留意が必要と判断された（図10）。

表3 NNによる歩行様相（4分割例）の認識

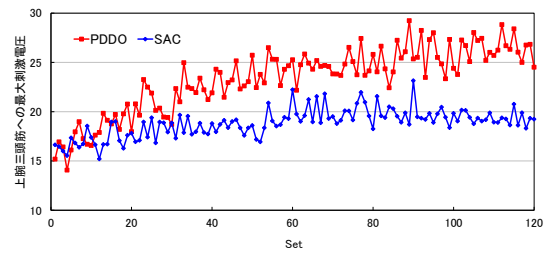
センサ貼付位置	片足外果直上
教師データ	ジャイロ（外果直上）
学習データ	加速度2軸+ジャイロ（外果直上）
入力層	9
中間層	14
出力区間	認識率
①	98.3%
②	97.0%
③	94.6%
④	96.1%
平均	96.6%



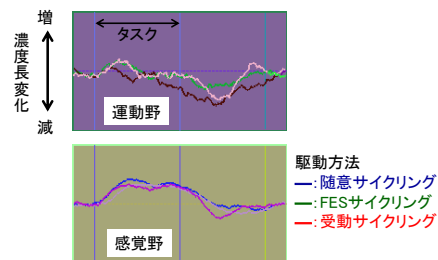
(1) 台形目標軌道（15秒間で立ち上がり、一定（90度）、立ち下がり、前後の一定区間（30度）を含む計30秒波形）の1時間反復追従性能（RMSE平均二乗誤差）



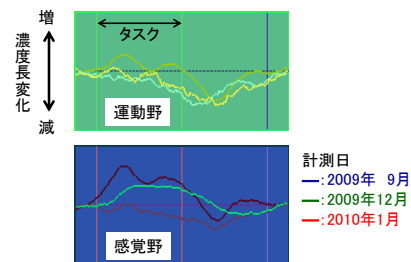
(2) 上腕二頭筋への最大電気刺激電圧



(3) 上腕三頭筋への最大電気刺激電圧
 図9 最大刺激電圧の変化（PDDO：PD制御と外乱オブザーバ、SAC：外乱オブザーバを併用した単純適応制御。SACによる安定な制御系の実現）



(1) 同一計測日（2010年10月1日）



(2) FESサイクリング計測日変更

図10 サイクリングタスクと脳賦活状況（タスク20秒後のレスト30秒を1セットとし、計測開始時レストを15秒設けた後に2〜3セット繰り返すサイクリング動作）

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計17件）

- ① 浅井智也、田川善彦、手指等尺性屈曲保持における負荷タイプの違いによる疲労差、日本機械学会論文集（C編）、掲載決定、2012、査読有
- ② 田川善彦、FESへの工学的アプローチ、特集「FESの現状と将来展望」、総説、運動療法と物理療法、22(1)、2-13、2011、査読無
- ③ 田川善彦、志波直人、筋骨格系の減弱防止に適した訓練システム、解説、バイオメカニクス学会誌、34(1)、29-35、2010、査読無
- ④ Takuya Watanabe, Yoshihiko Tagawa, Naoto

Shiba, Mapping Method Using A Super Multi-Electrical Stimulation Device, Proceedings of the 15th IFESS Annual Conference, 121-123, 2010, 査読有

- ⑤ Yoshihiko Tagawa, Naoto Shiba (他 6 名、7、8 番目), Increasing Muscle Strength and Mass of Thigh in Elderly People with the Hybrid-Training Method of Electrical Stimulation and Volitional Contraction, Tohoku J. Exp. Med., 221, 77-85, 2010, 査読有
- ⑥ Naoto Shiba, Yoshihiko Tagawa (他 6 名、2、7 番目), Development of a Training Method for Weightless Environment Using Both Electrical Stimulation and Voluntary Muscle Contraction, Tohoku J. Exp. Med., 220(1), 83-93, 2010, 査読有
- ⑦ Ken Suetsugu, Yoshihiko Tagawa, Naoto Shiba, FES Position Control of Forearm Using EOG, LNCS5506, 494-503, Springer-Verlag, 2009, 査読有

[学会発表] (計 58 件)

- ① 高村直樹、田川善彦、単純適応制御を用いた上肢 FES システムの開発、第 18 回日本 FES 研究会学術講演会講演論文集、53-58、岡山理科大学 (岡山)、2012 年 2 月 12 日
- ② 田川善彦、極限環境下での筋骨格系減弱防止に適した訓練システム、第 23 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集、基調講演、6-7、熊本大学 (熊本)、2011 年 1 月 8 日-9 日
- ③ 田川善彦、志波直人 (他 3 名); 拮抗筋への電気刺激による腸腰筋と下肢筋の強化、第 17 回日本 FES 研究会学術講演会、久留米大学 (福岡)、2010 年 12 月 4 日
- ④ 田川善彦 (他 3 名); FES サイクリング時の脳活動の計測、第 28 回計測自動制御学会九州支部学術講演会、2009 年 11 月 28 日、九州大学 (福岡)
- ⑤ 末継 憲、稲田智久、田川善彦、前腕の EOG による位置決めと FES 制御、第 47 回日本生体医工学会大会、神戸国際会議場 (兵庫)、2008 年 5 月 8 日-10 日

[図書] (計 1 件)

- ① 志波直人、田川善彦、電気刺激療法、神経疾患 最新の治療 (小林祥泰、水澤英洋編集)、65-71、2009、南江堂

[その他]

ホームページ情報

<http://lab.cntl.kyutech.ac.jp/~tagawa/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田川 善彦 (TAGAWA YOSHIHIKO)
九州工業大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：70122835

(2) 研究分担者

志波 直人 (SHIBA NAOTO)
久留米大学・医学部・教授
研究者番号：20187389

松尾 重明 (MATSUO SHIGEAKI)
久留米工業大学・工学部・講師
研究者番号：70258599