

下野 智史

株式会社地球快適化インスティテュート フューチャーデザイン室 シニアリサーチャー

勝つための複合材料

-材料の複合と異分野の融合のススメ-

化学と教育 69(6), 232-235, 2021

要旨

複合材料はスポーツ分野において先駆的に採用され、トップアスリートのパフォーマンス向上に大きく寄与してきた。本稿では、複合材料の弾性や異方性といった力学的特性を最大限引き出し、各選手の固有の動作特性に応じたパーソナライゼーション技術を構築することに主眼をおいた技術開発について紹介する。本取り組みは、化学の分野のみならず異分野の研究と融合することで実現できた成果である。

- ・掲載後1年未満につき著者最終稿をこちらに公開します。
- ・著作権は公益社団法人日本化学会に帰属します。

Satoshi Shimono

Senior Researcher, Future Design Division, The KAITEKI Institute, Inc.

Composite materials to win -

Recommendation of materials composition and interdisciplinary fusion

Chemistry & education 69(6), 232-235, 2021

Abstract

Composite materials have been pioneered in the field of sport and benefitted enhanced performance of top athletes. This paper introduces technological development which maximizes mechanical properties of composite materials such as elasticity and anisotropy and which also focuses on creating personalization technology for each athlete based on individual motion properties. The result of this project was achieved by integrating researches not only in the field of chemistry but also in different fields.

(Available in Japanese only.)

勝つための複合材料 -材料の複合と異分野の融合のススメ-

SHIMONO Satoshi

下野 智史

株式会社地球快適化インスティテュート

フューチャーデザイン室 シニアリサーチャー

複合材料はスポーツ分野において先駆的に採用され、トップアスリートのパフォーマンス向上に大きく寄与してきた。本稿では、複合材料の弾性や異方性といった力学的特性を最大限引き出し、各選手の固有の動作特性に応じたパーソナライゼーション技術を構築することに主眼をおいた技術開発について紹介する。本取り組みは、化学の分野のみならず異分野の研究と融合することで実現できた成果である。

1 はじめに

複合材料は、その名の通りいくつかの素材を複合させて得られる材料である。代表的な複合材料として、炭素繊維強化樹脂（以下、CFRP）が挙げられるが、2011年に航空機の主翼に採用され、「軽くて強い」というイメージが世間に定着した。しかし、CFRPが民生品として普及した背景には、スポーツ分野での先駆的な導入があった。1980年代にはすでに、ゴルフシャフト、テニスラケット、ロードバイクのフレーム等で採用され、トップアスリートのパフォーマンス向上に大きく貢献してきた。これは、CFRPの軽くて強いというイメージだけでなく、その本質的なメリットである「弾性と異方性を自在に制御できる」という特性によるところが大きい。つまり、適切な方向に必要な分だけ用具をたわませ、そのたわみ戻りをコントロールすることにより従来の材料にない性能が得られるのである。

本稿では、このCFRPを競技用義足の板バネ足部（以下、義足ブレード）に用い、トップパラアスリートと共に、東京2020パラリンピック競技大会（以下、東京2020）での活躍を目指す取り組みについてお伝えしたい。

2 炭素繊維強化樹脂（CFRP）とは

CFRPは、Carbon Fiber Reinforced Plasticsの略であり、その名の通りプラスチック（樹脂）を炭素繊維で強化した複合材料である。炭素繊維は大きくPAN系とピッチ系の2種類があるが、本検討ではPAN系を用いた。PANとはpolyacrylonitrileの略であり、図1に示す通り、PANを耐炭化、炭化、黒鉛化させることで炭素繊維が得られ、この特徴的な構造により高い曲げ弾性率と引張強度が実現される。



図1 炭素繊維の生成過程

PANを耐炭化、炭化、黒鉛化することで炭素繊維を得る。

この炭素繊維で樹脂を強化することで、比類のない物性を有するCFRPが生成される。ただし、この特性は繊維の配向角で大きく異なる。一般的にCFRPを用いて作られる製品は、所望の性能を得るためにその形状だけでなく繊維配向角^{*1}までもが緻密に計算され、設計に反映される。CFRPが「設計できる材料」と呼ばれる所以でもある。一例として、応力、繊維配向角、ひずみの関係を定式化すると、式(1)のように書くことができる。

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & Q_{44} & 0 & 0 \\ & & & & Q_{55} & 0 \\ \text{Sym.} & & & & & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 σ_i は垂直応力とせん断応力、 Q_{ij} は複合材料分野で剛性マトリックスと呼ばれる繊維配向角 θ の関数、 ε_i は垂直ひずみとせん断ひずみ、添え字 i, j は力が加わる軸を基準とした方向を示す。また、式(1)では繊維配向角を 180° 回転させたときは同一の性質となることを考慮し、対称性を持つ項は0と記載される。

この行列式を見た際、化学の道を志す多くの方はアレレギー反応を示すのではないだろうか。しかし、よく見るとこの行列式は、 $F = kX$ というフックの法則に過ぎない。複

化学と教育 ヘッドライン<化学/材料も競う東京オリンピック・パラリンピック>

合材料を深く理解するには多少の数学や力学の基礎知識が必要になるが、じっくり考えればそれほど難しいものではない。化学だけでなく、‘科学’として材料や事象を捉え、より広範囲に渡る興味を持つことが重要である。以下、筆者らが取り組んでいるパラリンピック・レガシープロジェクトについて説明する。

3 パラリンピック・レガシープロジェクト

3.1 プロジェクト概要

本プロジェクトは、トップパラアスリートのパフォーマンスを最大化すべく、そのアスリートにパーソナライズされた義足ブレードを開発し、東京 2020 での活躍を目指しているが、本来の目的はさらにその先にある。実は近い将来、オリンピックの記録をパラリンピックが上回るのではないかとされている¹⁾。これは義足技術の発達によるものと考えられている。一方、超高齢社会においては、誰もが何らかの身体的な制約を受け得る。そのため、トップパラアスリートと培った個人の動作特性に応じて用具を最適化するパーソナライゼーション技術を、高齢者の歩行アシストに応用することで、この大きな社会課題の解決に寄与したいと考えている。

本プロジェクトは 2016 年に発足し、図 2 に示すメンバーで構成されたチーム KAITEKI が中心となって実施している。図に示す通り、メンバーの専門性はそれぞれ異なり、バイオメカニクス、計算科学、化学、エンジニアリング、リハビリテーション工学、トレーニング等、多岐に渡る。この多様な専門性を融合することで、より大きな成果を目指すものである。

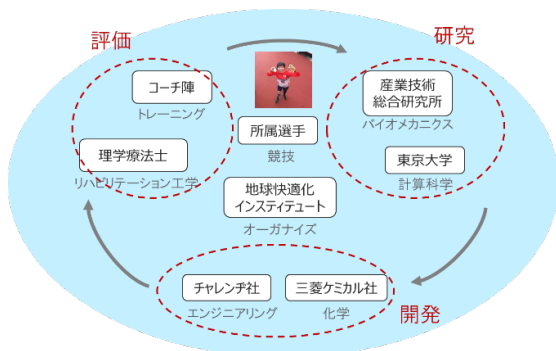


図 2 チーム KAITEKI

それぞれのメンバーはその専門性を遺憾なく発揮し、研究・開発・評価のサイクルを素早く、正確に回す。

3.2 パーソナライゼーション技術概要

一般的に、パーソナライズするためには最適化計算技術が用いられる。製品のシミュレーションモデルを構築し、その特性を少しずつ変化させながらシミュレーションを繰り返し、パフォーマンスが最大となる特性を探す技術である²⁾。これを義足ブレードに当てはめて考えてみる。義足ブレードは人間が使う用具であるが、ぜひ次の場面を想定

して頂きたい。皆さんが非常に重いフライパンで料理をしているとする。このときの動きは、通常のフライパンを使う時と比較してどうであろうか。恐らく、ほとんどの方が、重いフライパンをなんとか振り上げようと、全身の動きに変化が生じるものと思われる。義足によるランニングも、本質的にはこれと全く同じ現象が起こる。

すなわち、「人間は用具の特性が変わると無意識下で動作を変える」のである³⁾。この特性を踏まえ、以下の 4 つのステップで義足ブレードのパーソナライゼーションを目指すこととした。

Step1: トライアルブレードの設計と製作

Step2: モーションキャプチャ

Step3: 応答曲面法による動作の予測

Step4: デジタルアスリートの構築

3.3 Step1: トライアルブレードの設計と製作

上述の通り、人間は用具が変わると無意識のうちに動作までも変化させる。特に、義足ランニングの場合は義足の性能に応じて健足（義足を装着していない非切断側）の動作が顕著に変化する。この動作変化は人によって異なり、どのように変化させるかをあらかじめ予測することはできない。そのため、多くの異なる義足ブレードでのランニング動作の計測を必要とする。しかし、義足ブレードを多数製作しその動作を計測することは、被験者の負担や費用を考えると現実的には難しい。そこで、実験計画法^{*2)}を用いて代表的なトライアルブレードを設計・製作し、それらを着用した際の動作変化から全体の傾向を掴むこととした。実験計画法とは、最小限の実験回数で最大限の効果を得るための手法である。ここでは L9 型直行表と呼ばれるフォーマットを用い、9 種のトライアルブレードを実際に製作した。

3.4 Step2: モーションキャプチャ

上記 9 種のトライアルブレードをチーム KAITEKI でサポートする選手に装着してもらい、産業技術総合研究所のモーションキャプチャシステムを用いて選手のランニング動作を計測した(図 3)。モーションキャプチャシステムでは、複数の赤外線カメラにより身体に貼り付けたマーカーの三次元位置座標を検出し、全身の細やかな動作を捉えることができる。

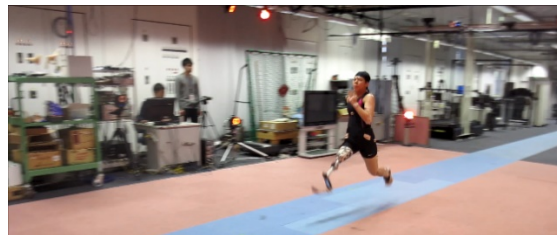


図 3 モーションキャプチャ

VICON MX system (Oxford Metrics 社製) にて計測した。(産業技術総合研究所提供)。

3.5 Step3 : 応答曲面法による動作の予測

以上の9種のトライアルブレードでのランニング動作データから、応答曲面法³⁾を用いることで9種以外の任意の義足ブレードでのランニング動作データを予測する。応答曲面法とは、ある目的関数を設計変数の関数で表現する手法である。ここでは、選手の9種のランニング動作データ $f_1(t) \sim f_9(t)$ を義足性能 $w_{1-9}, x_{1-9}, y_{1-9}, z_{1-9}$ の二次の多項式で式(2)のように表現する。すると、 $a_1(t) \sim a_9(t)$ は義足ブレードの性能によって変化する変数となり、選手に特有の動作変化の‘クセ’を表すものと解される。なお、 w, x, y, z , などの義足ブレードにおける設計変数は、CFRPの設計自由度を活かしそれぞれ独立となるように構成している。

$$\begin{cases} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \vdots \\ f_9(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & w_1 & x_1 & y_1 & z_1 & w_1^2 & x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 \\ 1 & w_2 & x_2 & y_2 & z_2 & w_2^2 & x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & w_9 & x_9 & y_9 & z_9 & w_9^2 & x_9^2 & y_9^2 & z_9^2 \end{bmatrix} \begin{cases} a_1(t) \\ a_2(t) \\ \vdots \\ a_9(t) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)は9つの連立方程式を示し、 $f_1(t) \sim f_9(t)$ 及び w, x, y, z は既知、 $a_1(t) \sim a_9(t)$ は未知数である。方程式が9つ、未知数も9つのため、単純な連立方程式の問題として $a_1(t) \sim a_9(t)$ を求めることができる。一旦 $a_1(t) \sim a_9(t)$ が求まれば、式(3)より任意の性能 w_i, x_i, y_i, z_i を持つ義足ブレードを装着した際の選手のランニング動作データ $f_i(t)$ を算出できる仕組みである。

$$f_i(t) = a_1(t) + a_2(t)w_i + a_3(t)x_i + a_4(t)y_i + a_5(t)z_i + a_6(t)w_i^2 + a_7(t)x_i^2 + a_8(t)y_i^2 + a_9(t)z_i^2 \quad (3)$$

3.6 Step4 : デジタルアスリートの構築

得られたランニング動作データから、身体と義足を含む選手のランニング動作の解析モデルを構築した。本稿では、図4に示すものを‘デジタルアスリート’と呼ぶこととする。義足ブレードの性能に応じてランニング動作データが対応付けられており、義足ブレードが変わるとランニング動作データも自動的に変更される。

このようにデジタルアスリートは、選手の無意識下にある動作変化のクセまでも忠実に再現する。しかも、選手の疲労や危険を心配することなく、何度でも走行を試すことができる。このデジタルアスリートによる走行シミュレーションの反復が、選手のパフォーマンスを最大化する義足ブレード性能の追及を可能にする。



図4 デジタルアスリート

義足ブレードの違いによる選手の無意識下での動作変化の癖までも再現するためのシミュレーションモデルを構築した(東京大学提供)。

4 結果

4.1 デジタルアスリートによる解析結果

選手に最適な義足ブレードを特定するため、様々な義足ブレードを履いたデジタルアスリートが‘試走’した。図5に、それぞれの義足ブレードでの進行方向速度を100m走のタイムに換算した結果を示す。本結果は、ある前提を置いた仮の比較ではあるが、従来品よりも約0.7秒の記録向上を狙うことができる可能性を示すものである。これは、異なる義足ブレードを用いることで健足の動作までもが変化し、それらの相乗効果でピッチとストライドが向上したことで得られたものである。

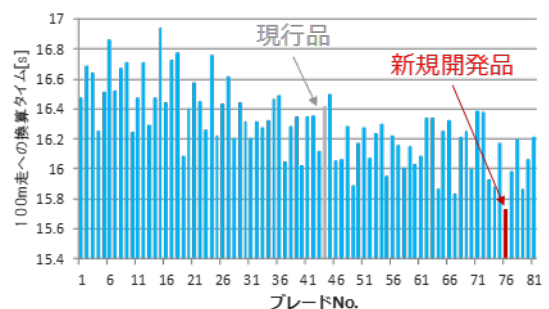


図5 デジタルアスリートでの試走結果

疲労や危険のないデジタルアスリートが、81種類の異なる義足ブレードで走った際の100m走への換算タイムを算出した(計測地点22m付近の速度から換算)。

4.2 選手による検証結果

次に、計算により導き出された最速の義足ブレードを制作し、実際に選手に履いてもらうことで、そのパフォーマンスを検証した。その結果、従来品よりも約0.6m/sの速度向上が見られた。この数値は、100mに換算すると約0.15sの記録向上に相当する。選手が十分に義足ブレードを履きこなすには時間がかかるため、デジタルアスリートの理論値には及ばないものの、100m走の記録としては大きな改善と見ることができる。

4.3 各種競技会での結果

本ブレードを実際に選手に着用してもらい、いくつかの競技会にて検証を行った。2019年7月、本ブレードのデビュー戦となった関東パラ陸上競技選手権大会は、雨が降る中、決してベストコンディションと言える状況ではなかったものの、選手は自己ベストを0.14s上回るタイムで100mを走りきった。この日は追い風参考のため公式記録とはなかったが、続く日本パラ陸上競技選手権大会では、自身の記録を0.12s上回るタイムで走り、公式記録として自己ベスト更新を果たすことができた。この記録は、当時の女子100m走(T63クラス)の世界ランキング6位の好記録でもある。

また、本選手は次に出場した11月にドバイで行われた

化学と教育 ヘッドライン<化学/材料も競う東京オリンピック・パラリンピック>

世界パラ陸上選手権大会で、見事、東京 2020 の女子走り幅跳び(T63)クラスの日本代表に内定したことを付記しておく(図 6)。本手法で開発した義足ブレードは 100m 走用であるため、現在はこの方法論を走り幅跳びにも応用することで、東京 2020 でさらなる好記録を生み出すための義足ブレードを開発中である。

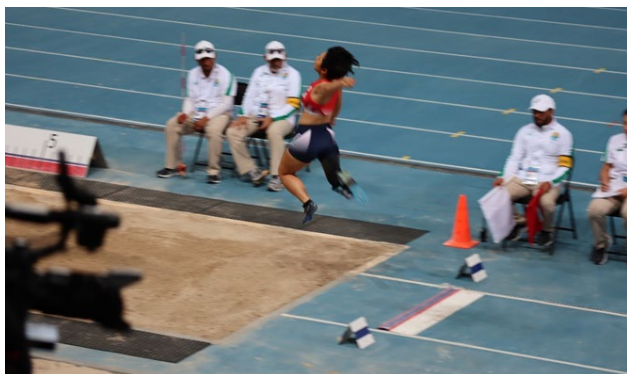


図 6 世界パラ陸上選手権大会での様子
女子走り幅跳び (T63) クラス決勝、我々のサポートする選手が 4 位入賞を果たし、東京 2020 の切符を手にした。

5 おわりに

本稿では、化学の領域に捉われない様々な専門家と共に取り組むことで、パーソナライゼーション技術を構築することが可能となった例を紹介した。異分野の研究者と共に研究を行い、その結果を化学メーカーとして製品に落とし込み、選手からのフィードバックをまた研究に活かすというサイクルは、チーム KAITEKI の各々のメンバーが普段と異なる気づきを得る絶好の機会となったように思う。またこの一連の取り組みによって、サポート選手が東京 2020 に内定するという素晴らしい結果にも繋げることができた。もちろん、選手自身の不断の努力があつてのことであるのは言うまでもない。2021 年にパラリンピックが開催できるかどうか予断を許さない状況にあるが、異分野融合で得られた本取り組みの手法と技術が、今後のパラスポーツの発展とその後のレガシーに寄与するものと信じている。現在は、このパーソナライゼーション技術を高齢者の歩行アシストへ応用するための研究を進めている。

昨今では Materials Informatics に代表されるように、化学が他の領域と結びつくことで大きなイノベーションに繋がるチャンスが増えたように思われる。また、教育面においても複数の専門領域を学ぶためのカリキュラムが増えつつある。これから研究を志す方々には、ぜひとも化学だけではなく‘科学’に興味を持って頂き、その専門性にとられることなく、勇気を持って異分野融合への一歩を踏み出して頂ければと思う。

最後に、僭越ながらノーベル化学賞受賞者の田中耕一氏の言葉を引用させて頂き、本稿の結びとしたい。

「イノベーションには天才は不要、異分野融合の場こそが重要である。」⁴⁾

謝辞

産業技術総合研究所人工知能研究センターの保原浩明主任研究員、東京大学大学院工学系研究科の鈴木克幸教授、同博士課程学生の Cem Guzelbulut 氏は、本研究活動の中心としてこの取り組みをリードして頂いている。ここに感謝の意を表す。また、義足の評価には選手だけでなく模擬義足走者兼理学療法士として、医療法人社団大和会日下病院の堀田貴弘氏、伊藤大知氏、加藤詩生氏に参加頂いている。3 氏には研究面だけでなく、チーム運営面でも多大なる協力を頂いた。改めて、お礼申し上げたい。また、チーム KAITEKI の所属選手であり、見事に我々の期待に応えてくれた東京 2020 女子走り幅跳び (T63 クラス)、日本代表の前川楓選手の今後のさらなる発展を願ってやまない。

参考文献

- 1) H. Hobara, Y. Kobayashi, T. A. Helder, M. Mochimaru, *Prosthetics and Orthotics International*, **2015**, *39* (6), 519-520.
- 2) K. Suzuki, N. Kikuchi, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **1991**, *93*.
- 3) 下野智史, 児玉斎, 鈴木克幸, 日本機械学会論文集, **2016**, *82*, 843
- 4) 田中耕一, 日経 BP インタビュー記事, **2018**, <https://project.nikkeibp.co.jp/atclmono/vision/060500031/?P=2>

用語解説

- *1 繊維配向角: 基準線からみた繊維方向の角度。炭素繊維強化樹脂は、繊維方向を引き揃えることで従来の材料にない性能を生み出している。
- *2 実験計画法: 最小限の実験回数で最大限の情報を引き出すための実験条件の設定手法。タグチメソッドと呼ばれることもある。
- *3 応答曲面法: ある目的関数(物理定数)を設計変数(変更可能なパラメータ)の関数で表現する数学的手法。補完を論理的かつ精度よく行うために用いられる。

しもの・さとし



[経歴]2006年広島大学大学院教育学研究科修士課程修了, 工学博士。2017年より三菱ケミカルホールディングスのシンクタンク兼研究組織である地球最適化インスティテュートに所属[専門]スポーツ工学等。[趣味]読書。[連絡先]100-8251 東京都千代田区丸の内 1-1-1(勤務先)