

工業科目「工業材料」と「機械設計」分野に対する スポーツ工学の教育効果

—— バドミントンラケットに関する学生自主研究からの報告 ——

水野 衛・須知 成光・猿田 和樹
(システム科学技術学部)

1. はじめに

本学は学部1、2年生を対象に学生自主研究制度を実施している。学生自主研究の対象に特に制約はなく、実際様々な内容で研究が行われている(秋田県立大学, 2010)。ただし、入学直後の1年生は高校までの知識しか無く、大学での学習と並行して学生自主研究に取り組むことになる。また、2年生であっても未履修の専門科目に関連する研究分野においては同様である。したがって、このような場合、高校までの学習内容と大学での学習内容をうまく橋渡しするような学生自主研究のテーマを設定することにより、学生の知的好奇心を刺激しながら、学習意欲も持続的に向上させられる効果が期待できる。

システム科学技術学部機械知能システム学科には、工業高校を卒業し機械材料に興味を持って入学してくる学生がいる。マスコミ報道を賑わせるような最先端の材料に興味を持っていることが多いが、そのような材料であっても身近な用具に応用されていることが多い。そこで、このような学生に対して、高校での工業科目「工業材料」と「機械設計」分野の学習内容を応用し、高校時代所属していた運動部でのスポーツ競技を学生自主研究の対象に選び、スポーツ工学を援用することを考えた。そのことにより、身近な研究テーマによって学生の知的好奇心を刺激しながら、大学での専門科目として必修である機械材料学と材料力学の内容の一部を先取りして学習させることができる。また、実験をすることによって、専門科目で学習する内容を

実体験として経験しながら理解させることが可能となる。

本論文では、高校の工業科目「工業材料」と「機械設計」に関連する内容で実施した平成21年度学生自主研究の成果を報告し、スポーツ工学のこの分野に対する教育効果について考察する。

2. スポーツ工学と機械工学の接点

普段楽しむスポーツの多くは用具を使う。用具をそろえたり整備したりするのも、スポーツの楽しみの一部である。第一線で活躍するスポーツ選手にとっては、用具の性能が成績を左右する場合もあり、スポーツ用具の開発・改良は最先端の「モノづくり」のテクノロジーとも密接に関連する。また、スポーツ競技そのものは、頭脳や精神力も重要であるが、人間が生み出す“力”を有効に利用して身体能力を競うことも多い。このような観点から医学、体育学、心理学、工学など様々な分野の研究者がスポーツ、特に、ハードウェア面(用具、設備、施設など)を科学的に研究する「スポーツ工学」という学際的研究分野を形成している(宇治橋, 1998; 丸山, 2010)。

一方、工学の中でも機械工学は、主に機械や構造物を設計・製作したり、保守・点検したりすることに関連する内容が研究されている。具体的な専門科目名でいえば、材料力学、熱力学、流体力学、機械力学、制御工学などが主なものとして挙げられる。ただ、これらの専門分野の応用・適用範囲は機械や構造物に限定されず、

医療や福祉、生体や自然界の生物など多方面に渡っている。例えば、流体力学は心臓の働きや血液の流れに、材料力学は血管や骨、歯の強度に、制御工学は各種医療機器に応用され、例を挙げれば枚挙に遑が無い。

スポーツもまた機械工学の研究成果が応用できる一分野である。例えば、野球やサッカーのボールの回転による移動方向の変化は流体力学で解析がなされ（姫野，2010）、ゴルフボール表面のディンプルの効果も同じく流体力学で説明がなされる。また、テニスやバドミントンのラケット、ゴルフクラブのスイング、ボート漕ぎ、スキーの体重移動、陸上競技など、人間の動きと力の伝わり方を解析する際に、力学を基礎とする各種機械工学の専門分野が応用されている（太田と室伏，2010）。材料力学に関連する分野では、自動車の衝突や飛行機の墜落など衝撃荷重による材料の変形と破壊を研究する衝撃工学を、空手の試割り（木板、瓦、レンガなどを空手の技で割る）に応用し、その力学的メカニズムを解明しようとする例もある（臺丸谷ら，1998）。

また、スポーツ用具の開発と機械工学の発展も、「モノづくり」という観点から非常に関係が深い。超音波溶着を利用して縫い目を無くし、水の抵抗を減らした水着「レーザーレーサー」の出現は記憶に新しい（仰木，2010）。この超音波溶着は、工学的にはプラスチック（熱可塑性樹脂）の接合に使用されている（Qiuら，2009）。他にも、新材料の開発はスポーツ用具の性能を飛躍的に向上させる。特に「カーボン」と呼ばれることの多い炭素繊維強化高分子基複合材料（CFRP）は多くのスポーツ用具に利用され、従来の金属材料に置き換わりつつある。CFRPの特徴は、軽くて強く（比強度が高い）、繊維の配向方向により材料の特性を設計でき、振動を抑える性質（制振性）も持つことである。これらの特性を活かし、ゴルフクラブ、テニスやバドミントンのラケット、自転車のフレームやホイールなどに使われている。なお、航空機では、従来のアルミニウム合金に換えてCFRPを使うことにより機体を軽量化し、燃費の向上をはかり、化石燃料の節約を目指している（吉岡と北野，2009）。

比較的安価なガラス繊維を使用したガラス繊維強化高分子基複合材料（GFRP）も含めて、繊維強化複合材料（FRP）が機械材料として機械・構造物、スポーツ用具、日用品などに使用されている。複合材料は、異種材料を組み合わせることにより単体では発現できない特性を複合材料として得ることができる。その反面、異種材料間に界面が存在し、界面の強度が複合材料としての特性や強度に影響を及ぼす。CFRPは航空機材料としてその使用量が増えていることもあり、このような界面や強化繊維の強度と複合材料全体としての特性や強度との関係が実験的、理論的に最新のトピックスとして研究されている（日本材料学会と日本複合材料学会，2010）。

3. 自主研究におけるスポーツ工学の効用

本学では学部1、2年生を対象に学生自主研究制度を実施している。実際に研究費が支給され、入学前にやりたいと思っていた研究が教員の指導を仰ぎながら入学後すぐに始められる。また、指導教員の研究室を利用したり、学部3、4年生、大学院の学生支援スタッフの支援も受けられたりし、学部・学科の垣根を越えた学生グループ・教員での研究も可能である。実際、学生自主研究を行う学生の興味の対象は多種多様である（秋田県立大学，2010）。入学直後の新入生にとっては、学生自主研究の対象が高校時代の部活動に向けられることもある。特に運動部に所属していた学生にとっては、興味の対象が、先述のスポーツ工学で扱う分野と合致することが多い。

一方、機械工学を専攻する学生にとって機械材料学と材料力学は専門科目の中でも基礎的で、かつ、多くの大学で必修に指定される科目である。これらの専門科目、あるいは、専門分野が扱う最先端の成果は、前出の通りスポーツ用具にも応用されている。したがって、学生が入学前に部活動を通して慣れ親しんだスポーツ用具を通して、最新の機械材料学や材料力学に関連するテクノロジーに触れ、知的好奇心を刺激しながらそのテクノロジーを科学的に分析することは、基礎的専門科目の学習意欲を高めること

に効果的である。また、大学で勉強する学問と社会の接点や社会での有用性を身近なスポーツ用具の中に見出すことができる。

特に、工業科の高校を卒業した学生にとっては、大学での機械材料学や材料力学で扱う内容は、高校の工業科目「工業材料」や「機械設計」の中の“材料の強さ”として学ぶ機会がある。今回、学生自主研究で取り扱ったスポーツ工学の一分野のように、テーマをうまく設定することにより、専門科目を学ぶ前の入学直後の学生が、高校時代に学んだ知識を大学での研究にも活かせることを知るよい機会となり、大学での勉学に漠然と不安を抱く学生には自信を与えることができる。また、入学後早い時期に、高校で学んだ知識が大学での専門科目へとどのようにつながっていくのか、将来どのように役に立つのか、その道筋がスポーツ工学を題材にした学生自主研究で見出せることは、勉学意欲を持続させるためにも重要である。

4. 学生自主研究のテーマ設定

平成21年度に「バドミントン用カーボンシャフトの変形・振動特性の研究」という課題で学生自主研究を実施した（秋田県立大学，2010）。以下にその経緯を記す。

平成21年度に機械知能システム学科に入学した1年生2名から学生自主研究の申し出があり、テーマを検討した。両名とも同じ秋田県内の工業高校の出身で、高校時代バドミントン部に所属していた。また、両名ともバドミントンラケットの研究をしたいとの希望があったので、研究対象は容易に決定することができた。

バドミントンラケットも入門用からプロが使用する高級モデルまで多種多様であるが、最新のラケットはカーボン製であり、前述の通り、これは機械材料学における最新の研究動向とも合致している。カーボン（CFRP）の特徴はその軽さと強さであるが、強度を調べるための破壊試験に必要な本数のラケットを購入することは予算的に難しいため、ラケットのシャフトの変形（しなり）と振動を実験により測定することにした。これは高校での工業科目「機械設計」で習う“ひずみ”を測定するものであり、ひず

みの測定からシャフトの振動も評価できる。また、この“ひずみ”は、大学で学ぶ材料力学でも授業の最初に扱う基礎的で重要な概念である（日本機械学会編，2005）。

学生には、プロが使用する最高級モデルで実験ができるという研究に対する動機もあったが、高級モデルと初心者用モデルとで性能にどのような差があるのかという初歩的な疑問も持っていたようである。そのため、ラケットの選定にあたっては、上級者用高級モデルと初心者用モデルとで実験を行い、比較することにした。また、テーマ設定の話し合いの段階では、スポーツ工学の紹介も行い、研究分野として確立しており、その成果は実際の製品作りにも役立っていることを説明した。実際に、論文誌に掲載された論文（Teuら，2005）も学生に渡した。大学レベルでの学術論文に触れる機会もこれまでなく、バドミントンラケットの研究が論文になることにも興味を覚えたようであった。

また、カーボンシャフトの特性はその素材や製法にも依存するため、素材や製法についても紹介した。これは機械材料学や機械加工学とも関連する内容であり、通常、製品を使い込んでいてもその製造過程までは知る機会がないため、その製造過程を知り、製法にも興味を持ったようである。

さらに、バドミントンラケットに用いられる素材の歴史についても調べ、検討を行った。バドミントンラケットの素材は木、金属、カーボンと変遷しておきており、素材の特性や加工法の開発とも関連している。これらの材料の特性については、高校の工業科目「工業材料」でも習う内容であるが、実際に製品化される段階で、素材の調達地域や方法・価格、ラケットへの加工法、最終的な製品価格とも素材の選定は関連してくる。製品化の過程ではラケットの性能のみならず価格面からの検討も重要であることを知り驚いていた。素材の変遷、ラケットの重さや性能の向上により、選手のスイングやシャトルのスピード、それにとまなうゲーム展開も変化してきたことも調査の結果わかった。

5. 実験方法と実験条件

研究対象が決まったので、次にどのような実験を行うかを検討した。まずは、バドミントンの練習風景と試合の様子をDVDで鑑賞した。部活動としてバドミントンを行ってきた学生の視点は未経験者とは異なり、一番注目を集めたのがやはりスマッシュの際の腕の振りとラケットの動きである。また、ラケットの性能差が一番現れるのがスマッシュだろうとの結論から、スマッシュ時のバドミントンラケットの変形と振動を測定することに決定した。

実験用のラケットには、ヨネックス製の上級者用高級モデル・ナノスピード9900（以下、NS9900と記す）を選択した。また、同じモデルでも重さ（硬さ）の違いによる特性を調べたいとの希望から、2U（フレーム重量：90～94g）と3U（同：85～89g）を比較することにした。ラケット面に張るガットの張力はフレーム重量（硬さ）により異なるが、3Uの最高値である24lbsに統一した。一方、初心者用ラケットとして、同じくヨネックス製のカーボネックス13（以下、CN13と記す）を選択し、ガットは推奨張力の最高値18lbsとした。

実験方法として2種類検討することにした。一つは、カーボンシャフトの静的変形特性を検討するものであり、ラケット面の中央に静的荷重を負荷し、荷重を少しずつ増やしながらシャフトのしなり（曲げ変形）を測定するものである。

もう一つは、シャトルをスマッシュしたときのカーボンシャフトのしなり（変形）と振動を測定するものである。ラケットは素振りをしてもしなると、素振りをした場合と実際にシャトルを打った場合とで測定し、比較することにした。また、シャトルがラケット面のスイートスポットに当たった場合と外れた場合とで変形や振動にどのような影響を与えるかも測定することとし、何回かシャトルを打って、そのときの打球感も記録することにした。さらに、ある程度バドミントンを練習した者と初心者とでシャフトの変形や振動に違いがあるのかを検討するため、初心者にもシャトルを打ってもらい、同

様の測定を行った。

カーボンシャフトの変形と振動の測定にはひずみゲージを用いた。ひずみゲージの使用は機械材料の変形を測定する一般的な方法であり、ひずみゲージを貼るのに技術と慣れを要するが、経験が将来役に立つ技術の一つである。材料が変形するとひずみゲージも変形し、ひずみゲージに埋め込まれた金属線も変形する。金属線が変形すると長さや断面積の変化から金属線の電気抵抗が変化する。この金属線の抵抗変化から変形量を定量的に測定するのがひずみゲージの原理であり、物理学で習う電気抵抗の概念が応用されている。また、ひずみゲージは応答性がよく、振動のような動的な高速変形も精度良く測定が可能である。測定データはパソコンに取り込み、そのままエクセルでデータ処理が可能である。エクセルでの数値データの処理は1年次のコンピューターリテラシーの授業で習得する内容であり、その復習と応用にもなる。

6. 実験結果

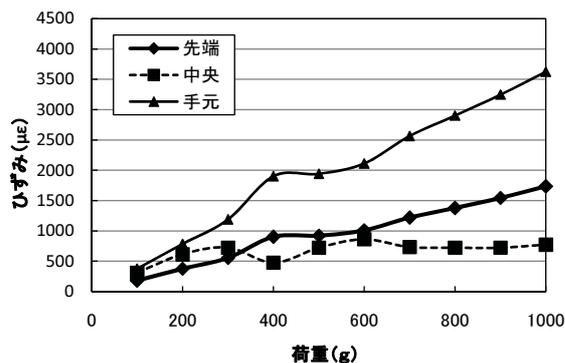
この章では、学生自主研究により得られた成果（秋田県立大学，2010）の一部を紹介する。

カーボンシャフトのしなりを測定するひずみゲージは、シャフトの先端（ラケット面近く）、中央、手元（グリップ近く）の3ヶ所に貼り、ラケットの変形と振動を測定した。ひずみゲージを貼付したラケットを図1に示す。

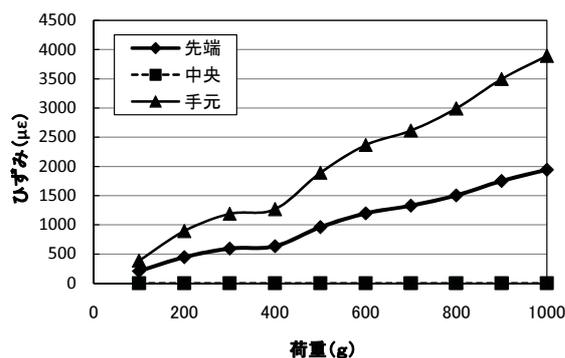


図1 ひずみゲージを貼付したバドミントンラケット（カーボンシャフトの先端近くの拡大写真）

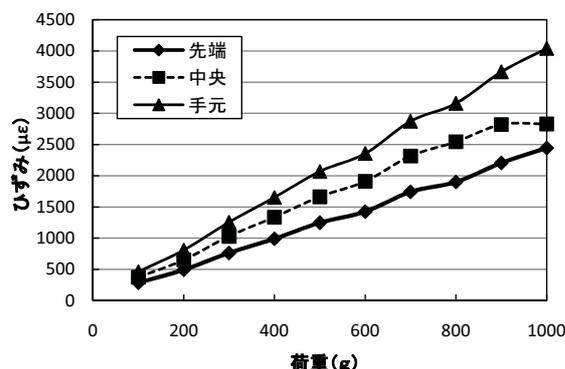
図2には、ラケット面の中央に静的荷重を負荷したときのカーボンシャフトのしなりを測定した結果を示す。図の縦軸がひずみゲージによ



(a) NS9900/2U



(b) NS9900/3U



(c) CN13

図2 ラケット面中央に静的荷重を負荷したときのカーボンシャフトの変形

り測定したひずみ値 ($\mu\epsilon$) であり、横軸がラケットに荷重した錘の重さ (g) である。

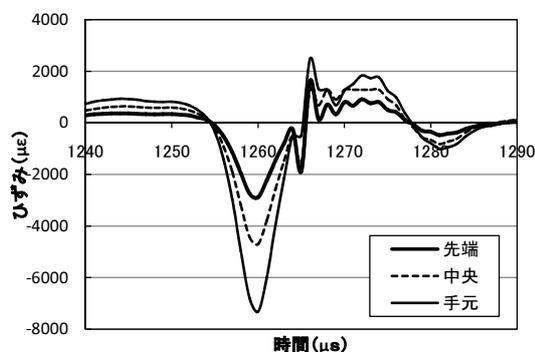
図2 (a)、(b) からわかるように、NS9900は、2Uより3Uの方がわずかであるが変形量が多い。また、カーボンシャフトの先端と手元では、手元の方が大きく変形している。なお、後出のラケットの素振り時にひずみゲージに不具合が生じ、図2 (b) ではシャフト中央部の変形が測定できていない。

一方、図2 (c) に示すCN13のカーボンシャフト先端での変形量はNS9900/3Uの先端と

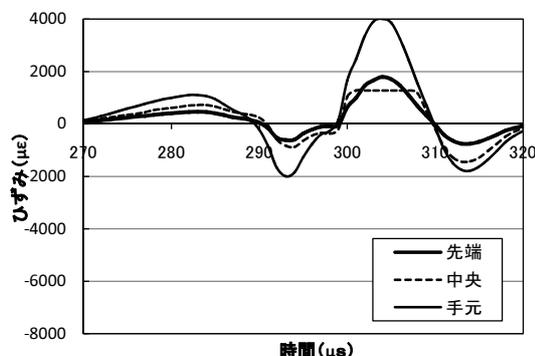
ほぼ同等であるが、CN13はひずみの測定位置による変形量に差が無く、シャフト全体が同じようにになっているのがわかる。これは、上級者は手首のスナップや腕のひねりを巧みに利用してスマッシュしており、学生との議論の結果、よりシャトルの威力が増すようにシャフトの長さ方向の硬さが調整してあるのではないかとの結論に至った。

図3には、バドミントン経験者がNS9900/2Uで素振りをしたときとシャトルを打ったときのカーボンシャフトの変形と振動を示す。縦軸がシャフトのひずみ値 ($\mu\epsilon$) であり、正の値がスイング方向と逆方向へのそり (たわみ) を、負の値がスイング方向へお辞儀をするようなたわみ (曲げ変形) を表わす。また、横軸は測定をした際の経過時間を表わし、いずれの場合もスイングの前後0.05秒を表示している。

まず、図3 (a) に示す素振りをした場合、手首のスナップを利かせることにより、ラケットはスイング方向にお辞儀をするようにたわんでおり、その後、反動で反対側にそり、振動をしている。また、カーボンシャフトは先端より



(a) 素振り



(b) シャトルを打ったとき

図3 経験者がNS9900/2Uを使用した場合

手元が大きいたわんでいる。

一方、図3 (b) に示すシャトルを打った場合を見ると、ラケットがシャトルに当たったとき、スイング方向と逆方向にシャトルがラケットを押すため、スイング方向へお辞儀をするようなたわみは抑えられている。したがって、図3 (a) と (b) の差がシャトルによってカーボンシャフトに与えられた変形量となる。図3 (b) を見る限り、シャトルを打ったときのシャフトのしなりは最小限に抑えられている。すなわち、シャトルが当たることによってラケットはほぼ真っ直ぐな状態になり、シャトルを打つ方向のコントロールが精度良くできるように設計されていると考えられる。

図4には、バドミントンの初心者がNS9900/2Uを使用してシャトルを打ったときの測定結果を示す。初心者が素振りをしたとき、カーボンシャフトのスイング方向へお辞儀をするようなたわみ量も小さいため、シャトルに与えられる力もそれ程大きくなく、シャトルが当たった後のシャフトの振動も経験者に比べて不規則な変化が見られる。特に、シャフト中央部で他とは異なる反対方向への変形が見られる。これは、学生との議論の結果、シャトルがラケット面のスイートスポットに当たらず、シャフトがねじれるように変形したためではないかとの結論に至った。今後の課題として、シャフトのねじれも測れるようにひずみゲージを貼ること、さらに、ラケット面のスイートスポットに当たったときと外れたときとでシャフトの振動にどのような変化が見られるかを測定することが挙げられた。

図5には、経験者がNS9900/3UとCN13で

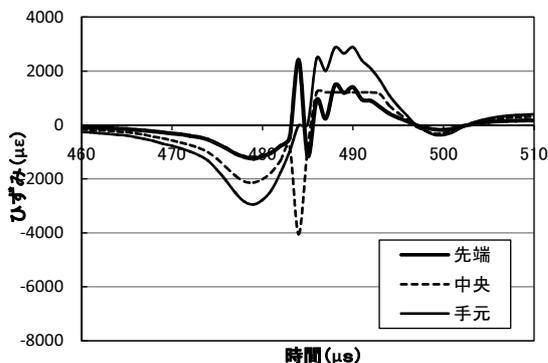
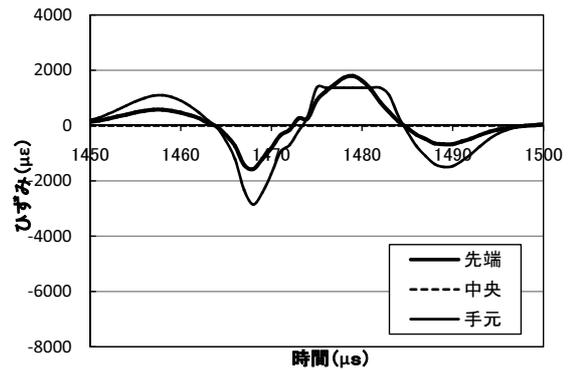
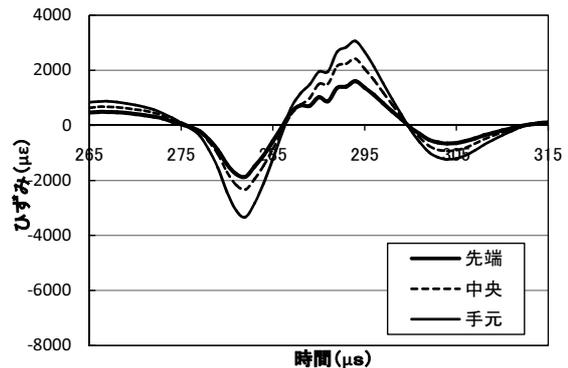


図4 初心者がNS9900/2Uでシャトルを打った場合



(a) NS9900/3U



(b) CN13

図5 経験者がシャトルを打った場合

シャトルを打ったときのカーボンシャフトの変形と振動の様子を示す。図2に示した実験結果からもわかるように、シャフトはNS/2U、NS/3U、CN13の順番に軟らかくなっている。図3 (b) と図5を比較しても、シャトルがラケット面に当たる前のスイング方向にお辞儀をするようなたわみ量や、シャトルが当たった後のスイング方向と逆方向へのそりもこの順番に大きくなっている。

なお、ラケットでシャトルを打つ測定は何回か行い、極端な打ち損じは検討から除外しており、代表的な結果を採集している。しかし、必ずしも毎回同じ条件でシャトルを打っているわけではない。実験方法の検討の段階では、ラケットを振りシャトルを打つ条件を同じにするため、ロボットアームにラケットを固定しシャトルを打つ案も学生からは出された。ただし、入学直後の1年生にはロボットアームの制御など必要な知識が不足しているため、この方法は見送られた。

また、図3 (a) で記した素振り時のスイン

グ方向にお辞儀をするようなたわみや、図4の初心者に見られるシャフトのねじれなどは、実験結果を検討している際に学生から出された考察である。このことから、学生はスマッシュのスイング中にラケットのシャフトにどのような力が働き、どのようにシャフトがたわむかを頭の中でイメージし、実験結果と結び付けて考察することができたことがわかる。材料力学においては、材料に負荷される力とそれにより材料がどのように変形するかを頭の中でイメージし、力学的に考察し、理論的に結論付けられる能力が非常に重要である。学生自主研究においてこのような能力が訓練できたことは、身近なスポーツ用具を取り扱うスポーツ工学の研究を通して得られる成果の一つといえる。

7. おわりに

平成21年度に本学の学生自主研究として、機械知能システム学科の1年生とともにバドミントンラケットのカーボンシャフトの変形と振動を実験により測定した。その一連の過程と実験結果を基に、本論文ではスポーツ工学の教育効果について報告を行うとともに考察を行った。機械工学の研究対象となる機械や構造物に使用される機械材料は、身近なスポーツ用具にも使用されている。また、機械材料の変形と破壊を扱う材料力学は、機械工学を専攻する学生にとっては必修科目であるが、身近な用具を題材として扱うことにより知的好奇心を喚起しつつ、実験を通して学習内容を体験し、理解させることができた。特に工業科の高校を卒業した学生にとっては、「工業材料」や「機械設計」など、大学でも習う内容を一部ではあるが高校時代に学習してきており、その知識を活用できることは有効である。入学直後の1年生に対しては、入学前に得た学習知識を活かし、入学後に大学で習う内容へとつながるテーマを学生自主研究として設定することにより、高校から大学への学習内容の接続がスムーズに行くよう指導することが可能である。

「工業材料」や「機械設計」分野で学習する内容と大学での専門科目との接続を配慮したとき、スポーツ工学以外にも吹奏楽などで使用さ

れる楽器を題材にした学生自主研究も考えられる。一般にブラスバンドと呼ばれるときの"brass"は真鍮（黄銅）のことであり、銅と亜鉛の合金である。その特徴は、塑性加工性が良いこと（加工による大きな変形が可能である）、耐食性に優れること（腐食に強い）などが挙げられるが、真鍮はまさしくこれらの特徴を活かして金管楽器に加工され、使用されている。また、管楽器が出す音は物理学的に言えば楽器の中の空気の振動であり、その周波数を変化させて音程を作り、音楽を奏でる。このように高校時代に慣れ親しんだ用具を題材に、機械材料学、材料力学、機械加工学などの専門科目へとつながるテーマを設定することが、機械工学を専攻する学生が本学の学生自主研究に取り組むテーマとして教育効果が高いといえる。

参考文献

- 秋田県立大学、学生自主研究報告集、第11号（2010）。
- 臺丸谷政志、小林秀敏、J.T.Pearson、J.L.Perez、齊藤文護、「空手道試割りの力学的解析」、日本機械学会論文集（C編）、Vol.64、No.623（1998）、pp.2417-2423。
- 姫野龍太郎、「計算力学でひもとく魔球の秘密」、日本機械学会誌、Vol.113、No.1095（2010）、pp.93-95。
- 丸山剛生、「スポーツ工学の活動と今後の展望」、日本機械学会誌、Vol.113、No.1095（2010）、pp.84-87。
- 日本機械学会編、機械工学便覧基礎編α3 材料力学、丸善（2005）。
- 日本材料学会、日本複合材料学会、「第1回日本複合材料合同会議 JCOM-39/JSCM 2010講演プログラム」、材料、Vol.59、No.2（2010）、pp.2-8（会告）。
- 仰木裕嗣、「競泳水着の性能と流体力学」、日本機械学会誌、Vol.113、No.1095（2010）、pp.105-108。
- 太田憲、室伏広治、「ハンマー投げの力学と新しいトレーニング方法の開発」、日本機械

- 学会誌、Vol.113、No.1095 (2010)、pp. 109-112.
- J.Qiu, G.Zhang, Y.Wu, "Proposal of ultrasonic welding technique and weld performances applied to polymers", Polymer Engineering & Science, Vol.49, No.9 (2009), pp.1755-1759.
- K.K.Teu, W.Kim, J.Tan and F.K.Fuss, "Using dual Euler angles for the analysis of arm movement during the badminton smash," Sports Engineering, Vol.8 (2005), pp.171-178.
- 宇治橋貞幸、「スポーツ工学研究10年の歩みと将来展望」、日本機械学会論文集（C編）、Vol.64、No.623（1998）、pp.2312-2317.
- 吉岡健一、北野彰彦、「炭素繊維複合材料とその航空機構造への適用」、日本機械学会誌、Vol.112、No.1088（2009）、pp.540-543.