

平成 22 年 4 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18206014
 研究課題名（和文） 生物の構造・組織の力学的最適性の評価とその構造・材料設計法への応用研究
 研究課題名（英文） Evaluation of Mechanical Optimality of Structural and Material Composition of Living things and its Application to Structural and Material Design Techniques
 研究代表者
 尾田 十八（ODA JUHACHI）
 金沢大学・名誉教授
 研究者番号：30019749

研究成果の概要（和文）：本研究は、自然・生態系と調和した新しい材料、構造、機器、システム等の創生法を、生物に学ぶことによって確立することを目的としている。その方法は多様な生物の中で、特異性を有する生物にまず注目する。本研究では動物の例として繰返し衝撃負荷に耐える「キツツキ」を、植物の例としては、軽量であるが不燃性を示す「桐材」に注目した。そしてこれらの特性がどのようなメカニズムによって生じているのかを、主として力学的視点より明らかにした。これらの結果と、代表者らがすでに行って来ている竹や卵殻の構造・組織分析結果を含め、新しい構造設計および材料設計法の基本原理を提示した。

研究成果の概要（英文）：This research object is to propose the new techniques that creates the engineering materials, structures, machines and systems adjusting the natural environment. The research technique is learning the creating systems of living thing. That is, in this study the skeletal structure and tissue of the woodpecker are evaluated as the optimum example of shock absorbing system. Moreover, the flame reterdancy mechanism of paulownia wood is analyzed experimentally.

In addition these results, using the our past studies of bamboo and egg shell the new fundamental principles for the structural and material designs are proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	17,600,000	5,280,000	22,880,000
2007 年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
2008 年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2009 年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
総計	36,800,000	11,040,000	47,840,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：バイオニックデザイン、バイオメカニクス、最適設計、軽量構造、複合材料、耐衝撃性、キツツキ、桐

1. 研究開始当初の背景

資源・エネルギーが有限であり、その中で持

続可能な工学技術を確立するには、自然・生態系と調和した材料・構造、機器・システム

等を創生することが最も重要な課題となつて来ている。これを可能にするには、時間的にも空間的にもその自然・生態系と共生・調和している生物の構造・組織、さらにはその発生、進化、消滅に至る全プロセスを、それらの機能との関係で精査に分析し、そこから新しい物造りの方法論としての設計法を確立することが重要である。

これはすなわち、生物に学ぶものづくり法の研究と言えるが、これまでのこれに関連した研究を国内・外でみると、次のようなものがある。まず人工骨に対する研究としてのアパタイト/コラーゲン複合体の開発や、人工血管、人工筋肉等の医用材料開発中心の研究が活発である。またロボットやマイクロマシンの開発と関連して人体や昆虫、微生物の運動機構を調べるバイオミメティクスの研究も多い。しかしこれらのほとんどが、ある事象解析を目的とした生物機能を模倣する単一目的型の研究であって、幾つかの生物に共通した普遍的物造りの方法論、すなわち本研究が目的としている設計原理的なものを導出しようとする研究ではない。このような研究状況を背景として、本研究が企画され、実施された。

2. 研究の目的

省資源、省エネルギーで環境調和型機器創生が強く要請されている今日、そのヒントを生物界に求めることは、生物自身が自然・生態系に調和した超複雑系システムであるが故に、多くの新しい知見を我々に与えてくれることの期待できる分野と言える。

本研究ではこのような考え方を基本に、まず具体的な研究対象として、生物の中でも動物に関し超軽量であるにもかかわらず力学的条件の過酷な例として「キツツキ」に注目する。そしてその骨格構造、筋組織が各種運動機能、特に過酷な繰返し衝撃負荷を受ける力学的条件とどのように関連しているかを、実験的、理論的に精査に分析する。また植物に関しては、その堅牢性（硬さと強さ）では日本の木の中でトップである黄楊と、これと対照的な軽量で弱いが、難燃性を有している桐材に注目する。そしてこれらの各種力学的特性試験と組織分析から、これら材料の有する特性発現のメカニズムを明らかにする。

以上の生物の具体的研究事例とこれまで研究代表者がすでに行って来ている竹材、卵殻等の力学的分析例を通して、各種機器の構造・メカニズム設計法や材料設計法を確立することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究は、具体的生物事例としての「キツツキ」、「黄楊と桐材」を対象とした実験的な力学分析研究と、それから得られる知見を確

認するための力学的理論解析研究がまず中心となる。その後それらを含めて工学的な構造・材料設計法の確立の研究を進める。その手順は次のとおりである。

- (1) 「キツツキ」のドラミング挙動分析とその力学的評価およびそれらの応用研究
 - ① 「キツツキ」の生息環境におけるドラミング挙動の把握
 - ② CT, MRI および解剖による「キツツキ」の骨格構造および筋組織の状況把握
 - ③ 「キツツキ」のコンピュータを用いた3次元構造モデルの作製
 - ④③のデータを用いて「キツツキ」の光造形法による膨脹モデル作製、またそれによる力学的衝撃負荷による動ひずみ分布の測定実験
 - ⑤③のデータを用いて「キツツキ」頭部の動的FEM解析とその力学的挙動の評価および耐衝撃機器設計上の指針の検討
- (2) 「黄楊と桐材」の機能的特性試験とその評価およびそれらの応用研究
 - ① SEM等を用いた黄楊・桐材の材料組織分析と各種強度試験の実施
 - ② 黄楊・桐材の化学成分分析とその評価
 - ③ 黄楊における堅牢性保持のメカニズムの確定と検証
 - ④ 桐材における軽量で耐熱性（難燃性）を有するメカニズムの把握とその検証
 - ⑤ 強度や熱特性の優秀な材料の材料設計方法の検討とそのためのコンピューターシミュレーション法の確立
- (3) 構造設計・材料設計法の確立研究
 - (1), (2)の研究に加え、代表者らがすでに行っている「竹材」、「卵殻」の力学的分析結果等をすべて統合して、工学的な構造設計や材料設計法としての普遍的な方法や原理を確立する研究

4. 研究成果

3. の研究方法で示した具体的手順に従い、次のような成果を得ている

- (1) 「キツツキ」のドラミング挙動分析とその力学的評価およびそれらの応用研究
 - ① ドラミング動作の実写データの収集、分析より、これが1日500~600回、1秒間に18~22回もの速さで行われ、その衝撃負荷は1000Gにも達することが分った。
 - ② 白山山系に生息しているアオゲラ、アカゲラを対象として、その解剖を行った。またこれと比較のためにスズメ目クロジの解剖も行い、両者の骨格および筋組織状態の相違点を確認し、その力学的評価を行った。図1は解剖で明らかとなった、キツツキとクロジの舌骨を示したものである。これよりキツツキのそれが頭部全体を縦型に2重鉢巻きのように包み補強している特異なものであることが分かる。

③②のキツツキ試料に対し、特にその頭部のCT画像撮影とそれによる3次元FEM用構造モデルを作成した。

④③の構造データを用いて、光造形法によりキツツキ頭部の樹脂モデルを作製し、それによるドラミング模擬実験を行い、全域での動ひずみ分布を求めた。

⑤④の実験に加え、先の構造データを用いて、衝撃負荷を受けるキツツキ頭部の応力波の伝ば挙動を動的FEM解析により明らかにした。これよりキツツキの嘴を含む頭部の特異な形状が、ドラミングによって発生した衝撃応力波を分散させ、その大部分を下顎を通して首へと逃していることが分った。さらに嘴を一軸の棒モデルに近似し、ドラミングサイクルと応力波の透過・反射挙動の影響を調べた。また脳周辺部を2次元モデルとして、キツツキ特有の大きな舌骨や脳脊髄液の脳に与える影響を明らかにした。これらよりキツツキ全体の耐衝撃システムがその構造・組織はもちろんだらミング時の姿勢からそのサイクル数まで含めた多様なものであることが明らかとなった(図2参照)。

⑥ドラミング動作は、キツツキにとって餌を取り、また巣穴を作るなどの機能に強く関連しているが、この事は見方を変えればキツツキ自身はダメージを受けず、一方で木には巣穴加工にみられるように効率的加工を行なっているものと解釈できる。この理由はドラミングのような高サイクルの繰返し負荷は、キツツキには、それが止まっている木に比較して小さな領域での応力波の反射・透過効果から、発生する引張応力を抑えるものであり、一方逆に木材のような無限大に近いものは、



図1 キツツキとクロジの舌骨

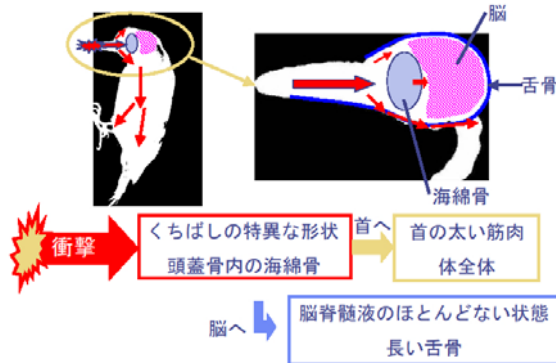


図2 キツツキの耐衝撃システム

高い引張応力場を作っていることが分った。これはお互いに衝突する物体同志の大きさのみでなく、その形状、材質にも左右されることが分った。それでこれを工学的な衝撃破砕機器への設計原理へ応用する方法を考えた。

(2)「黄楊と桐材」の機械的特性試験とその評価およびそれらの応用研究

①SEMによる黄楊、桐材、杉材の組織観察を行った(図3参照)。またその各種材料試験を行った。結果として黄楊が桐材に比較して引張・圧縮強さが3~5倍大きく、ヤング率も4~5倍も大きいこと、そしてそれは主として細胞壁のリグニン厚さの相違によるものと考えられた。またこの種の生物材料の材料試験方法として、これまで小型試験片を用いた簡便な「ねじり試験法」が存在していないことから、図4に示すように引張圧縮試験機に専用の装置を取りつけて行う方法を開発し、特許申請を行った。

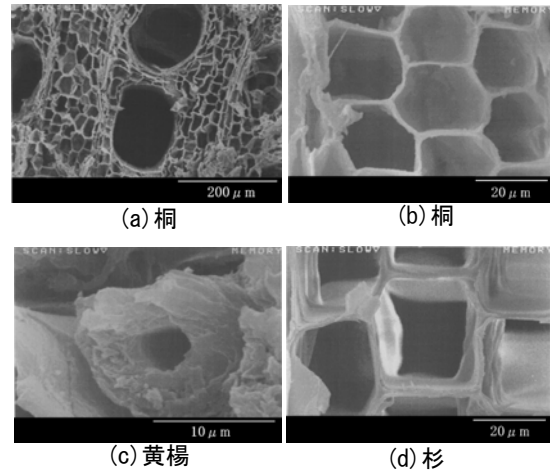


図3 桐、黄楊、杉のSEM写真

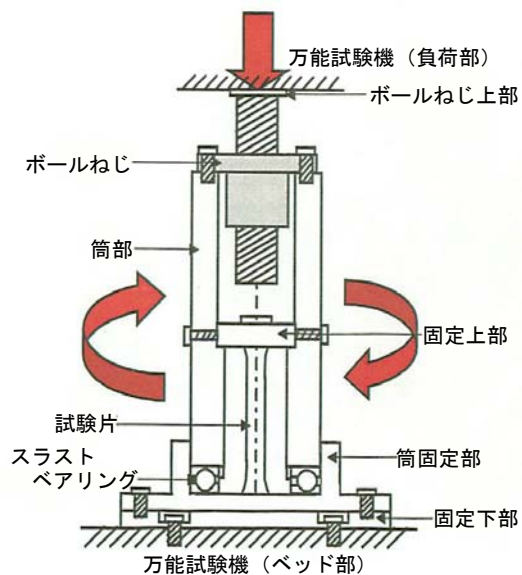


図4 発明したねじり試験機

②桐材と杉材の組織成分としてのセルロース、ヘミセルロース、リグニンの成分割合を求めた。桐材ではそれらが45%、25%、29%であるのに対し、杉材では49%、16%、34%であった。つまり桐材では杉材よりリグニンの成分がかなり少ないことが分った。

③桐材と杉材に対し、その板モデルおよび箱モデルによる燃焼実験を行った。図5はその箱型モデルの燃焼実験装置であり、また図6(a)、(b)はこの実験での、桐箱、杉箱内、外の測定温度の時間変化を示す。これより燃焼までの時間は、桐箱の方が杉箱に比較して約30分間長いことが分かる。この傾向は板モデルの場合も同様であり、結果として、桐材の方が炭化はし易いが、なかなか発火しないことが分った。つまり桐材の難燃性が明らかとなった。

④桐材の難燃性は基地組織成分自身が不燃性を示すこと（リグニン成分が少ないなど）と、ミクロな材料組織としての導管部が一般木材と相違し、太く、3次元的にお互い独立していることで、燃焼ガスの流通の為難しいことが主たる理由と考えられた。

⑤①～④の結果から、黄楊や桐材の特異性は、主としてその細胞や導管部などの形状や分布の仕方等に基づくことが明らかとなった。そこでそのような材料の物理的、機械的特性

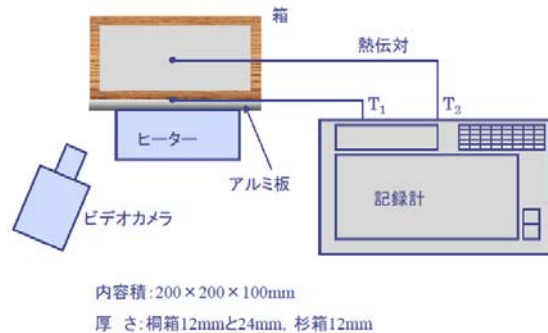
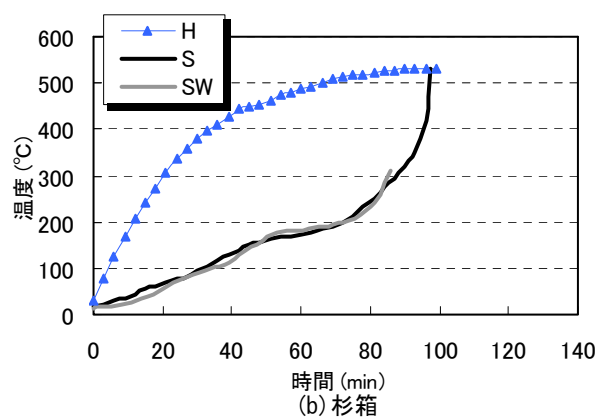
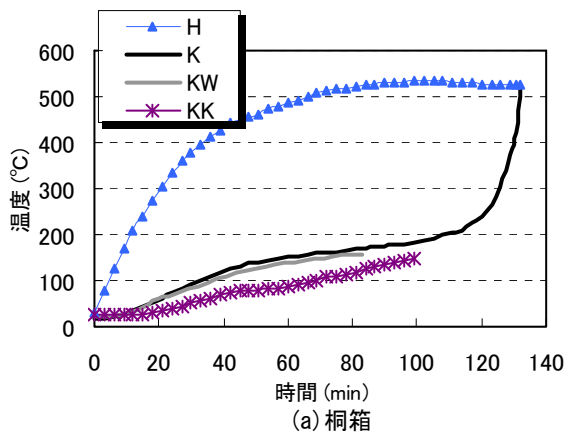


図5 箱加熱実験装置



記号 H:加熱面温度, KとS:桐箱と杉箱内部の温度
KWとSW:水分を懸けた桐箱と杉箱内部の温度
KK:厚さ24mmの桐箱内部の温度

図6 桐・杉箱の温度変化

をシミュレートする方法論を、対象材料を複合材料とみなし、セラオートマトンと遺伝的アルゴリズムを用いて行う手法を提案した。具体的には、基地組織中に第2相、第3相成分が含有率一定の下で、どのように分布するとその複合材料としてのヤング率や熱伝導率等が最大あるいは最小となるのかなどを明らかにした。

(3) 構造設計・材料設計法の確立研究

(1)、(2)の具体的な生物としての「キツツキ」、「黄楊・桐材」などの研究により得られた知見に加え、分担者らが別個に行っている、「植物の根の分岐網のエネルギー的最適性評価」および「はじける植物のメカニズム探索」の結果、さらに代表者らが過去に行った「竹材」、「卵殻」の構造・組織分析を通して、生物自身のものづくりの特徴を考え、次のものがあることを指摘した。

- ①変化する自然環境への適応能力・適応機能
- ②多目的・多機能な構造・組織
- ③省資源・省エネルギーシステム
- ④構造・組織等の形態・質・量の変化
- ⑤材料・構造等の組合わせの多様化
- ⑥機能終了時への対策

これらの事から、生物を1つの設計物とみなすとき、その設計原理は、次のように定義できると考えた。

生物は、その生命の維持と種族の繁栄を目的とし、省資源・省エネルギー的制約の下で、その形態・組織およびそれら維持するシステムを、多目的・多機能に創造している。

そして、このような超最適化されている造形物（生物）の造り方のメカニズムを追求したところ、結局次の2点が最重要なものと考えられた。

- ①生物における進化のシステムの存在
 - ②ものづくりにおける細胞の働きの重要性
- これらを工学的な設計へ応用する具体的な方法として、図7に示すものを提示した。

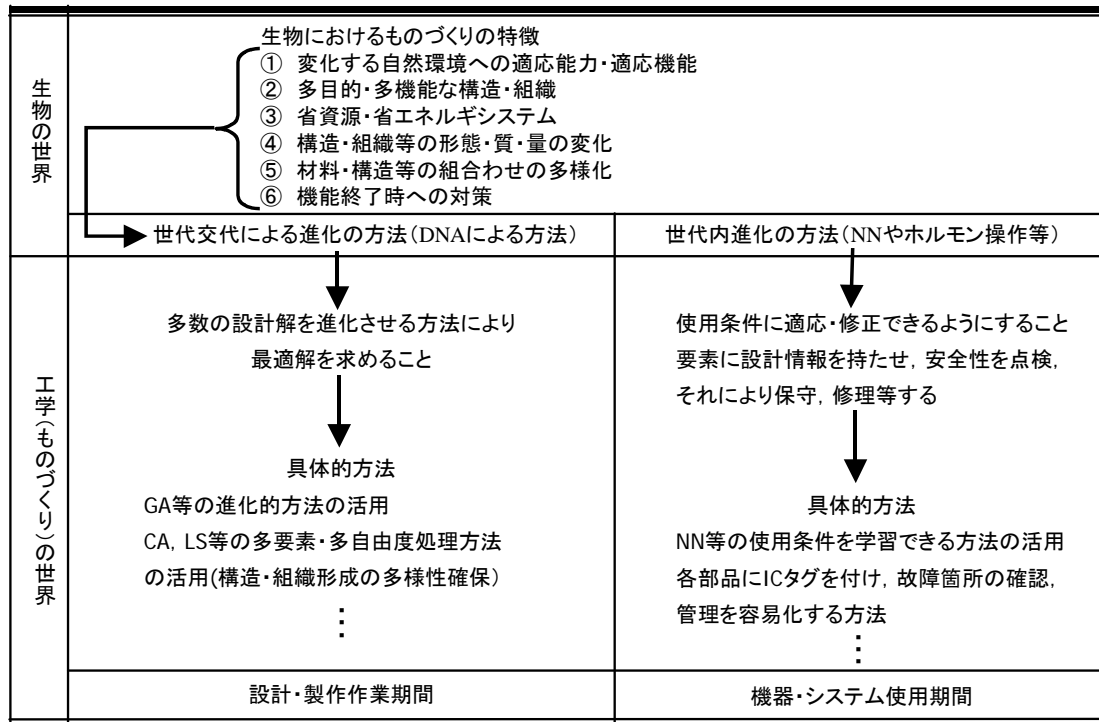


図7 生物に学ぶ工学設計技術

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 27 件)

1. Tawara, D., Sakamoto, J., Murakami, H., Kawahara, N., Oda, J., Tomita, K., Mechanical Evaluation by Patient-specific Finite Element Analyses Demonstrates Therapeutic Effects for Osteoporotic Vertebrae, Journal of The Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Vol. 3, 31-40, 2010, 査読有.
2. 尾田十八, 田中千尋, 進化的セルラ・オートマトンによる複合材料組成の最適化, 日本機械学会論文集(A), 75 巻, 95-100, 2009, 査読有.
3. 尾田十八, (他 2 名, 1 番目), 3 次元 DEM による合わせガラスの衝撃貫通破壊解析, 日本機械学会論文集(A), 75 巻, 170-175, 2009, 査読有.
4. Kitayama, S., Yamazaki, K. (他 1 名), Adaptive Range Particle Swarm Optimization, Vol. 10, 575-597, 2009, 査読有.
5. 尾田十八, (他 3 名, 1 番目), 3 次元 DEM による合わせガラスの衝撃貫通破壊解析, 日本機械学会論文集(A), 74 巻, 106-111, 2008, 査読有.
6. Kitayama, S., Yamazaki, K., Global Optimization by Generalized Random Tunneling Algorithm, J. Computational Science of Technology, Vol. 2, 258-267,

2008, 査読有.

7. Li, P., Oda, J., Flame Retardancy of Paulownia Wood and its Mechanism, J. Material Science, Vol. 42, 8544-8550, 2007, 査読有.
8. Sakai, S., Oda, J., Research on the Development of Baseball Pitching Machine Controlling Pitch Type using Neural Network, J. System Design and Dynamics, 682-690, 2007, 査読有.
9. Ding, X., Yamazaki, K., Constructal Design of Cooling Channel in Heat Transfer System by Utilizing Optimality of Branch System in Nature, Tran. of ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 129, 245-255, 2007, 査読有.
10. 金井亮, 尾田十八, 改良型免疫アルゴリズムの提案と評価, 日本機械学会論文集(C), 73 巻, 92-98, 2007.

[学会発表] (計 72 件)

1. 越村勇太, 尾田十八, 坂本二郎, (他 2 名), 多成分系複合材料における材料組織の最適化, 日本機械学会北陸信越支部第 47 期総会・講演会, 2010 年 3 月 10 日, 新潟大学(新潟市)
2. 金井亮, 尾田十八, 田中千尋, ECA を用いた構造部材の材料組織最適化, 日本機械学会北陸信越支部第 47 期総会・講演会, 2010 年 3 月 10 日, 新潟大学(新潟市)
3. 酒井陽平, 遠藤安浩, 坂本二郎, (他 1 名), 種子を自動散布する植物, 果実におけるらせん運動発生メカニズムについて, 日本機械学

会第 22 回バイオエンジニアリング講演会，2010 年 1 月 10 日，岡山理科大学（岡山市）。

4. 坂本二郎，（他 3 名，1 番目），CT データに基づくキリン頸椎のモデリングとその強度評価，日本機械学会第 22 回バイオエンジニアリング講演会，2010 年 1 月 10 日，岡山理科大学（岡山市）。

5. Sakamoto, J.，（他 2 名，1 番目），A Biomechanical Study on Bursting Plant Fruit and Its Optimality, 6th Plant Biomechanics Conference, 2009. 11. 17, Cayenne (French- Guiana)。

6. 北出浩平，尾田十八，衝撃負荷によるコンクリートの効率的破壊の研究，日本機械学会 2009 年度年次大会，2009 年 9 月 16 日，岩手大学（盛岡市）。

7. 坂本二郎，（他 2 名，1 番目），キリン頸椎の力学的適応性に関する研究，日本機械学会 2009 年度年次大会，2009 年 9 月 16 日，岩手大学（盛岡市）。

8. Sakamoto, J.，（他 2 名，1 番目），A Study On Optimality of Pre-Burst Stress of Plant Fruit to Scatter Seed, 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization(WCSMO-8)，2009. 6. 1, Lisbon (Portugal)。

9. Sakai, S.，Oda, J.，（他 3 名，1, 2 番目），Throw Performance and its Optimization of Roller-type Baseball Pitching Machine, 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization(WCSMO-8)，2009. 6. 1, Lisbon (Portugal)。

10. 田中千尋，尾田十八，坂本二郎，進化的 CA を用いた複合材料組成の最適化，日本機械学会第 8 回最適化シンポジウム，2008 年 11 月 27 日，東京工業大学（東京）。

11. 山崎光悦，電子基板用分岐網型冷却チャンネル設計法の開発，日本機械学会第 18 回設計工学・システム部門講演会，2008 年 9 月 25 日，京都国際会議場（京都）。

〔図書〕（計 7 件）

1. 尾田十八，田中昭文堂，生物に学ぶものづくり，2010 年，1 頁～93 頁。

2. 酒井忍，坂本二郎，他，日本工業新聞社，3 次元 CAD・CAE・CAM を活用した創造的な機械設計，2009 年，157 頁～196 頁。

3. 尾田十八，他，日本機械学会編（丸善），機械工学便覧基礎編 α 6（計算力学），2007 年，177 頁～180 頁。

4. 尾田十八，他，培風館，機械設計工学 2（システムと設計）改訂版，2006 年，94 頁～151 頁。

5. 坂本二郎，他，エヌ・ティー・エス，“ファイバー”スーパーバイオミメティクス～近未来の新技術創成～，2006 年，91 頁～95 頁。

〔産業財産権〕

○出願状況（計 4 件）

名称：ねじり試験装置

発明者：尾田十八，永野耕也，近藤唯

権利者：金沢大学

種類：特許

番号：特願第 2007-118046

出願年月日：2007 年 4 月 27 日

国内外の別：国内

名称：簡易式桐炭と燻製品の同時製造装置

発明者：尾田十八，李鵬

権利者：尾田十八，李鵬

種類：特許

番号：特願第 2006-160401

出願年月日：2006 年 6 月 9 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾田 十八 (ODA JUHACHI)

金沢大学・名誉教授

研究者番号：30019749

(2) 研究分担者

山崎 光悦 (YAMAZAKI KOUETSU)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：70110608

坂本 二郎 (SAKAMOTO JIROU)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：20205769

北山 哲士 (KITAYAMA SATOSHI)

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号：90339698

酒井 忍 (SAKAI SHINOBU)

金沢大学・機械工学系・助教

研究者番号：80196039

金井 亮 (KANAI RYO)

金沢工業高等専門学校・講師

研究者番号：10436826

(3) 研究協力者

李 鵬 (LI PENG)

株 YKK・研究開発センター・研究員

研究者番号：40401939

(H18→H19：研究分担者)