めちゃくちゃ硬い！『ヤシガニ』のハサミの驚くべき内部構造

～生物の謎に迫るハサミ内部の３D 表示に成功、究極の強靭化材料の組織・構造を探求～

配布日時：２０２１年5月２４日１４時
国立研究開発法人　物質・材料研究機構
一般財団法人　沖縄美ら島財団

概要

１．国立研究開発法人物質・材料研究機構 構造材料研究拠点は一般財団法人沖縄美ら島財団総合研究センターと共同で、甲殻類最強の挟む力を持つ「ヤシガニ」（**用語解説１**）の強靭なハサミが持つ組織・組成・硬さを調べるとともに複雑な組織構造の３次元（３D）可視化に成功しました。めちゃくちゃ硬いヤシガニのハサミが、なぜ同じように硬いガラスや陶器と違って壊れにくいのか？ハサミは鉄鋼並みの薄い層とそれより軟らかいクッションのような役割を担う多孔質層による「剛」と「柔」の複合構造であり、軽さと強靭さを兼ね備えていました。希少生物の謎に迫るだけでなく、究極の材料強靭化を実現する組織・構造に大きなヒントを与えることが期待されます。

２．『ヤシガニ』は、国内では沖縄県周辺のみに生息し、“貝殻をもたないヤドカリ”に進化した甲殻類陸上最大級の希少生物です。貝殻を失ったことで、外敵から身を守る鎧のような甲羅で覆われています。沖縄の一部地域では食べられていますが、ズワイガニやタラバガニなど他の甲殻類に比べとにかく殻が硬いのが有名です。実はこのヤシガニ、NETFLIX において「アジアに棲む危険生物 72 種」の一つとして紹介されるほど危険な生物です。単位体重あたりの挟む力（把持力：はじりょく）は体重の約 90 倍以上と生物界最強クラスであり、最大サイズの 4 kg のヤシガニの把持力は約 360 kg と、ライオンの噛む力に匹敵します。そんな巨大な力がかかっても壊れないハサミを所有し、軽量でありながら、究極の組織・構造をしていることに違いないのですが、この点は全くの未知でした。

３．そこで、本研究チームは、ハサミの内部組織と構造に着目し、体重約 1 kg のヤシガニのハサミを調べ、内部の組成および硬さの変化とともに、複雑な微細積層構造（ねじれ合板構造（**用語解説２**））の３D 表示に成功しました。ポイントは以下となります。

・ハサミ表面の硬さは鋼鉄レベルだった。
・その硬い部分は薄くて硬い石灰化された層で作られており、それぞれの層は厚さ方向に水平に回転するねじれ構造となっていた。それらの層が 100 枚ほど積層していることで、一部の層が壊れても硬い層全体が一気に壊れない仕組みになっていた。
・硬い部分の内側は、外側より軟らかく多孔質でクッションのような役割となって力を吸収し、ハサミ全体の破壊を免れていた。
・このような一連の構造を、材料工学の最先端の顕微鏡装置と手法を用いて３D 表示したことは世界初。

４．軽量で強靭な材料の開発は、構造用材料にとって永遠の課題です。軽量でありながら、甲殻類最強の把持力に耐えうる強靭性を兼ね備えているヤシガニのハサミの組織・構造は、現状を打破する究極の強靭化材料へのヒントを与えます。自動車・航空機などの輸送機器用素材や部材への適用により、二酸化炭素排出量削減に貢献することが期待されます。また、大把持力を有する強靭な極細径鉗子などの小型医療機器への展開も見据えています。

５．本研究は、主に NIMS 構造材料研究拠点の井上忠信グループリーダー、原徹グループリーダー、一般財団法人沖縄美ら島財団総合研究センターの岡慎一郎主任研究員らの研究チームにより、NIMS 自由発想研究支援制度（2019 年度提案力強化プログラム）及び上原記念生命科学財団 2020 年度研究助成（新領域４．０）の一環として行われました。

６．本研究成果は、Materials & Design 誌の 2021 年 4 月 28 日にオンラインで掲載されました。

研究の背景

鉄鋼などの構造材料は強く（硬く）すると脆く（壊れやすく）なります。構造材料における“高強度化”と“高靭性化”はトレードオフの関係にあり、これを打破するアイデアは希薄な状態にあります。

ヤシガニは、インド太平洋の熱帯域から亜熱帯域に生息する“貝殻をもたないヤドカリ”に進化した甲殻類陸上最大級（これまで発見された最大体重 4.0 kg）の生物です。一般に生物の飛ぶ、泳ぐ、噛む、挟むなどの力（F）は体重（BW）と正の相関性を持ちます。すなわち、身体が大きいほど大きな力を発揮します。しかし、単位体重あたりの力（F/BW）で整理すると、F/BW は逆に体重と負の相関性を持ちます。沖縄に生息するヤシガニの一般的な BW は約 1 kg であり、その体重近傍における生物の F/BW を**図１**に示します。甲殻類は最上位に属し、その中でヤシガニは突出しており、驚くことに体重の 90 倍以上の挟む力（把持力：はじりょく）を持ち、生物界最強クラスです。すなわち、ヤシガニは超強靭なハサミとそのための最適な構造を所有していなければなりません。どのような組織・構造で生物最強の把持力でも壊れない軽量なハサミを有し、既存の構造材料と何が違い、これらは成長とともにどう変化するのかなど、謎だらけでした。

図１　様々な動物群における体重 1kg での単位体重あたりの最大力の比較

研究内容と成果

沖縄で入手した全長 30 cm 程、体重約 1,070 g のヤシガニを対象にし、左側の大きなハサミを対象としました（**図２**）。一般に、生物や植物の表面はクチクラ（**用語解説３**）で体表が保護されています。ハサミ内部は、表面側から外クチクラ、中間層、内クチクラで構成されているのが光学顕微鏡で観察できます。中間層を境にコントラストが変わっており、外クチクラの組織は薄い板状のものが積層している構造となっているように見えました。

図２　検体とした体重 1,070 g のヤシガニ

その後、ハサミを破断させた面（破断面）と機械的に研磨した面（研磨面）を対象に、走査電子顕微鏡（SEM）による観察を実施しました。厚さ 2.2 mm くらいの内クチクラ（図３(c)、(d)）では、石灰化したマトリックスに深い溝に沿って細孔（**用語解説４**）管が表面に向かって存在し、それと直角な 2 方向に比較的細い管や細孔が観察できました。特に、小さな細孔は 0.75 マイクロメートル（**用語解説５**）ピッチで規則的に存在していることがわかります。小さな細孔は、図３(f)で見られる研磨面の白い点に相当し、0.75 マイクロメートルピッチで凹となって表れています。一方、外クチクラ（図３(b)）では、細孔などが観察できず、非常に密な構造となっており、石灰化したマトリックスが高さ 2.3 マイクロメートルで階段状に壊れていることがわかりました。この高さは、図３(e)で見られる白い筋状のピッチと一致しています。このような破壊形態は、高強度材の靭性向上に極めて優れており、破壊に要するエネルギを向上させる、すなわちモノが瞬間破壊しない優れた壊れ方と言われています。

図３　ヤシガニのハサミの破断面と研磨面

２次元観察結果をより明確にするために、３D 観察を行った結果を**図４**に示します。NIMS が所有する直交配置型集束イオンビーム―走査型電子顕微鏡複合装置 FIB-SEM を活用することで、ハサミの表面側から 15 ナノメートル（**用語解説６**）ピッチで組織を削りながら２次元画像（921 枚）を連続的に取得し、これらを連結することで組織の３D 表示を行いました（ここでは､外クチクラの結果のみを示しています）。(a)は３D 表示した組織そのままの姿であり、この３D 組織の高輝度の部分のエッジを金色に着色したものが(b)です。(a)で何となく見える約 2.3 マイクロメートルピッチの積層構造が(b)で明確となっており、薄板が積層している合板構造を形成していることがわかります。そして、1 つの薄板を取り出し、３D 組織の黒色部分を灰色にし、厚さ方向に 6 分割で２次元表示したのが(c)です。1 枚の板中で、白い筋が 180°回転している様子がわかります。この筋はキチン（**用語解説７**）ファイバーの束であり、厚さ方向に水平に回転しながら積層しています。すなわち、厚さ 0.25 mm の外クチクラでは、高さ約 2.3 マイクロメートルの薄層が約 100 枚積層したねじれ合板構造をしていることがわかりました。そして、ねじれ合板構造の間を細孔管が表面方向とそれと直角な２つの方向に存在していることがわかりました。これらの組織構造の詳細は、図 3 に示した従来のような２次元観察ではわからなかったことです。なお、内クチクラでは、ねじれ合板構造は観察されませんでした。３D 組織の可視化は、動画で見ることでより理解を深めることができます。以下のサイトで３D 動画をお楽しみください。
https://www。sciencedirect。com/science/article/pii/S026412752100318X

図４　外クチクラにおける３次元組織解析の結果

ハサミ断面のビッカース硬度（**用語解説８**）では、外クチクラでは約 250HV（鉄鋼材料の高強度鋼並み）であり、内クチクラでは約 50-65HV（マグネシウム合金並み）となります。驚くことに中間層を境に 5 倍もの硬度変化があります。厚さ 0.25 mm の硬い外クチクラではカルシウムが多く、厚さ 2.21 mm の内クチクラでは炭素が多くなっていました。すなわち、外クチクラでははねじれパターンの層状構造で密に強く石灰化されているのがわかり、これが鋼鉄並みに硬いハサミを実現していました。生物でありながら、硬いヤシガニのハサミは高強度鋼並みの薄い層とそれより 1/5 倍の硬さと 10 倍弱厚いクッションのような役割を担う多孔質層による「剛」と「柔」の複合構造であり、軽さと強靭さを兼ね備えていることがわかりました（**図５**）。このような硬度差の複合構造は，我が国の伝統工芸品の日本刀にも見られるものです．しかし，ヤシガニのハサミは，日本刀のような人工物をはるかに上回る複雑な微細組織を有しています．

図５　ヤシガニのハサミの内部構造の模式図

今後の展開

・軽量で強靭な材料の開発は、構造用金属材料の中で永遠の課題となっています。生物界最強の把持力に耐えうるハサミの組織・構造は、軽量と強靭性を兼ね備え、現状を打破する究極の強靭化材料へのヒントを与え、自動車・航空機などの輸送機器用素材や部材への適用により、二酸化炭素排出量削減に貢献することが期待されます。また、大把持力を有する強靭な極細径鉗子などの小型医療機器への展開も見据えています。低侵襲手術の推進により、医療機器のより一層の小型化が求められていますが、安全な部材・部品の小型化の実現には、素材そのものの機能・特性をより一層向上させる必要があります。

・沖縄では、“ヤシガニの力は驚異的で殻はめちゃくちゃ硬い”と言われています。「なぜ？どうして？」の素朴な疑問は身近にあります。これらの疑問について、研究者が最先端の解析装置と手法を活用して生物の謎を解明することは、人々の知識や興味を高めるとともに、思いもよらない発見に出会えるかもしれません。ハサミの構造を３Ｄプリンタで模倣したらどうなるのか？本当にヤシガニが最強なのか？地球上で最も硬い生物は何か？など、ワクワク感を広げて取組む予定です。

掲載論文

題目：Three-dimensional microstructure of robust claw of coconut crab, one of the largest terrestrial crustaceans
著者：Tadanobu INOUE, Shin-ichiro OKA, Toru HARA
雑誌：Materials & Design
掲載日時： 2021 年 4 月 28 日（オンライン）、 Vol. 206 (2021) 109765
DOI：10.1016/j.matdes.2021.109765

用語解説

(1) ヤシガニ：軟甲綱十脚目オカヤドカリ科に分類され、英語ではココナッツクラブ（Coconut crab）と言われています。他の生物が食べないココナッツなどを食べる雑食性です。国際自然保護連合（ＩＵＣＮ、本部スイス）が 2020 年公表した最新版のレッドリストで、絶滅危惧Ⅱ類（危急）に認定している希少生物の一つです。

(2) ねじれ合板構造：昆虫や甲殻類の外骨格で見られる組織構造の一つ。主にキチンファイバーの束が水平に回転しながら重なり合って層を構成しており、その層が積層することで強固な外殻を形成している。層厚さは、生物で異なることがわかり始めている。

(3) クチクラ：生物体の最外層の細胞表面を覆う丈夫な膜であり角皮とも言う。英語ではキューティクル cuticle という。

(4) 細孔（ポア）：生物や多孔質・多孔質材料が持つ微細な空孔のことです。

(5) マイクロメートル：1mの 100 万分の 1 を表す長さの単位。μm で表現される。

(6) ナノメートル：1mの 10 億分の 1 を表す長さの単位。nm で表現される。

(7) キチン：N-アセチルグルコサミン（アミノ糖の一種）が連なった非常に長い直鎖構造で、甲殻類・昆虫・無脊椎動物の外骨格を構成する高分子多糖（分子式は $C_8H_{13}NO_5)n$）です。

(8) ビッカース硬さ：対面角 136°ダイヤモンド製の四角すいの圧子を、既定の試験力で試験体に押し込み、残される圧痕の対角線長さを測定することで算出される硬さの指標の一つです。試験前に、試験体を平滑にする必要があります。

本件に関するお問い合わせ先

（研究内容に関すること）
国立研究開発法人 物質・材料研究機構　構造材料研究拠点　設計・創造分野　塑性加工プロセスグループ
分野長　井上　忠信（いのうえ　ただのぶ）
E-mail: INOUE.Tadanobu@nims.go.jp
TEL:029-859-2148
URL: https://www.nims.go.jp/inoino/

一般財団法人 沖縄美ら島財団　総合研究センター　動物研究室
岡　慎一郎（おか　しんいちろう）
E-mail: sh-oka@okichura.jp
TEL: 0980-48-2266

（報道・広報に関すること）
国立研究開発法人 物質・材料研究機構　経営企画部門　広報室
〒305-0047　茨城県つくば市千現 1-2-1
E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp
TEL: 029-859-2026、 FAX: 029-859-2017

一般財団法人 沖縄美ら島財団　企画広報課　企画広報係
E-mail: oki-pr@okichura.jp
TEL: 0980-48-3649、 FAX: 0980-48-3122