枝サンゴ骨格の曲げ特性と内部構造の相関性の調査

上里優貴^{*1}, 政木清孝^{*2}, 磯村尚子^{*3}, 山本広美^{*4}

Investigation of Relationship between Bending Property and Internal Structure of Branch Coral's Skeletons

Yuki UEZATO^{*5}, Kiyotaka MASAKI, Naoko ISOMURA
and Hiromi YAMAMOTO^{*5}Okinawa National College of Technology, Dept. of Mechanical Systems Engineering,
905 Henoko, Nago-shi, Okinawa, 905-2192, Japan

The coral reef is the important producer in the eco system. It is known that formation of skeleton in branching coral is affected by environmental factors. However, bending strength property of the skeleton is not really investigated in the field of biological engineering. In this study, branching coral(*Acropora nobilis*) was conducted 4-point bending test based on JIS R 1601 standard. And internal structure of skeleton in branching coral was investigated by using the X-ray CT technique. The results show that the bending characteristics depend on the inhabiting environments of polyps and density of the branching coral.

Key Words : Strength, Bending, Porous Material, Branching Coral, Biological Engineering

1. 緒 言

サンゴ礁を形成する造礁サンゴ(以下“サンゴ”)は生態系において重要な生産者である⁽¹⁾。特に枝サンゴは他の生物に棲み場所を提供するなど重要な役目を果たす。その骨格形成は光や波などの生育環境の影響を受けることが知られ⁽²⁾、主に種の分類同定や過去の気候変動の調査にサンゴ骨格が用いられてきた⁽³⁾。しかし、その折損挙動は詳しく調査されておらず、著者らはサンゴ骨格の折損挙動について検討を行っている。これまでの研究では、1本の枝から複数の試験片を切出して、試験片の採取位置や曲げ方向によって強度特性が異なることを明らかにした⁽⁴⁾⁽⁵⁾。本研究では、生育環境が既知の飼育環境下にある複数の群体を実験対象として、強度特性の評価を行った。また、X線CTにより内部構造を調査し、曲げ特性と内部構造の相関性について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材及び試験片 供試材は、図1に示す美ら海水族館の屋上に設置された水槽内で飼育されたトゲスギミドリイシの骨格である。飼育にあたり、近海から

汲み上げた海水を利用し、水質調整・水温調整なども施していない。海水は水槽の矢印の方向から注ぎ込み、掛け流しの状態である。群体間の育成環境が偏らないよう、定期的に群体を回転させながら位置替えをしている。本研究では、全部で6群体を対象とし、1群体から無作為に2本の枝(群体5は1本のみ)を採取して調査を行った。サンゴ骨格の外観例を図2に示す。サンゴの分類には、先端から50mmの付近を調査することが推奨されているため、図中枠で示した先端側から50mmの位置(Tip)を基

Fig.1 Breeding pool of coral.

Fig.2 Over view of sample(*Acropora muricata*).^{*1}学生員, 沖縄工業高等専門学校専攻科機械システム工学コース
(〒905-2192 沖縄県名護市辺野古905番地)^{*2}正員, 沖縄工業高等専門学校 機械システム工学科^{*3}非会員, 沖縄工業高等専門学校 生物資源工学科^{*4}非会員, 沖縄美ら島財団 総合研究センター

E-mail: masaki-k@okinawa-ct.ac.jp

準とし、比較のために根元側(Root)についても調査を行った。試験片は根元側と先端側について、それぞれ群体の外側を向いている面 (Front) と内側を向いている面 (Back) から切出し、1つの枝から最大4体を採取した。試験片寸法は、後述する JIS R 1601 に基づく $3 \times 4 \times 36$ mm の短冊形である。図にはサンプル名の付け方を記述した。

2・2 内部構造観察 サンゴ骨格の内部構造調査のために、東芝製の産業用 X 線 CT (TOSCANER 32300 μ hd) を用いて非破壊観察を行った。X線発生条件はタングステンを X 線ターゲットとして使用し、フィラメントの管電流を 60 μ A、管電圧を 100kV とした。再構成像の最小ボクセルサイズは 0.052mm/pixel である。

2・3 4点曲げ試験 4点曲げ試験は、島津オートグラフ (AG-IS MS 形シリーズ) を用い、JIS R 1601 「ファインセラミックスの室温曲げ強さ試験方法」の規格に従って実施した。試験条件はクロスヘッド速度 0.5mm/min、上部支点間距離 10mm、下部支点間距離 30mm である。

3. 実験結果および考察

3・1 曲げ試験結果 曲げ試験によって図3示するようなクロスヘッド位置-荷重関係を求め、試験片寸法と最大曲げ強度から公称の最大曲げ強度を求め、さらに荷重の1/2以上におけるグラフの勾配を求めた。例として、群体2に関する試験結果を表1に示す。

3・2 群体間の強度比較 群体ごとに曲げ強度の平均値を求め、さらにワイブル分布を求めることで、群体間の強度差について調査した。得られた平均曲げ強度と

Fig.3 Relationship between bending load and stroke of crosshead.

Table 1 Result of bending test of colony No.2.

No.	Gradients [kN/mm]	Bending strength [MPa]
2-1-R-F	0.701	27.3
2-1-R-B	0.762	30.6
2-1-T-F	0.680	29.0
2-1-T-B	0.670	27.7
2-2-R-F	0.779	32.1
2-2-R-B	0.774	27.1
2-2-T-F	0.717	21.9
2-2-T-B	0.510	19.0

ワイブルパラメータを表2に、ワイブルプロットを図4に示す。サンゴ骨格の平均曲げ強度は群体2が最大で、最小となった群体5よりも約1.94倍高い値となった。また、曲げ強度のワイブル係数は2.01~5.34となり、群体によって強度のばらつきも大きく異なった。最も平均曲げ強度が高くなった群体2(2-2-R)と、最低となった群体5(5-2-R)の横断面像を図5に示す。群体5は群体2に比べて明らかに疎な構造となっており、種の同じサンゴであっても、群体間で骨格の形成様相に差が生じ、曲げ特性の差が生じたと考えられる。

3・3 枝の根元側と先端側との比較 各枝の群体の外側に面している試験片と内側に面している試験片ごとに、枝の根元側と先端側について曲げ特性の比較を行い、傾きの勾配と曲げ強度が高くなる試験片の割合を調査した。図6(a)に傾きを、図6(b)に曲げ強度についての結果をそれぞれ示す。枝の根元側は先端側に比べて相対的に荷重-変位グラフの傾きおよび曲げ強度が大きくなる傾向がある。この理由を調査するため、枝の内部構造を調査した。図7に群体(2-2)の根本側と先端側の CT 観察結果を示す。同じ枝でも、根元側と先端側では横断面像の

Table 2 Result of bending test.

Colony No.	n	Bending strength [MPa]	m[-]
1	6	26.1 $\pm$ 5.97	5.18
2	8	26.8 $\pm$ 7.78	5.34
3	8	22.3 $\pm$ 7.94	3.63
4	7	24.0 $\pm$ 8.83	3.87
5	3	13.8 $\pm$ 5.14	2.01
6	8	15.9 $\pm$ 5.40	4.6

Fig.4 Weibull statistics of bending strength.

Fig.5 Trans axial plane (CT image)

様子が異なり、根本側の内部構造が密になっていることが分かる。サンゴは成長とともに枝を先方に伸ばしていくが、一方で根元側では骨の密度を高めることにより骨の強度を高め、枝の折損を防いでいるものと考えられる。

3・4 群体の表面側と内面側との比較 続いて各枝の先端側および根元側で、群体の外側に面している試験片と内側に面している試験片について曲げ特性の比較を行い、傾きの勾配と曲げ強度が高くなる試験片の割合を調査した。図 8(a)に傾きを、図 8(b)に曲げ強度についての結果をそれぞれ示す。群体の外側に面している試験片は、内側に面している試験片に比べて傾きの勾配が相対的に大きく、曲げ強度が高くなる傾向が認められる。骨の採取場所が先端から同一長さである場合、群体の外側と内側とで骨の密度には顕著な差が生じないと考えられるため、枝の曲げ特性を特徴づけるものは、放射サンゴ個体（ポリプ）が生息している“莖”と呼ばれる空孔にあると考えられる。

3・5 ポリプの育成状況と骨格強度 図 7 に示した枝 2-2 における根元側と先端側の縦断面 CT 像から、ポリプの生育状況調査した。試験片の内スパンを含む約 11mm の範囲内（図中の四角部分）で試験片中の空孔の体積を求め、試験片の寸法から求めた見かけ上の体積との比を空孔率として算出した。算出した空孔率をワイブル分布により整理した結果を図 9 に示す。外側に面して

Fig.6 Comparison between Root and Tip.

Fig.7 Internal structure of skeleton of coral (2-2).

いる試験片の空孔率が明らかに低く密な構造であり、曲げ特性が優れる事と良く対応する。なおポリプの育成状況に違いが生じていても、中軸個体の偏心量は図 10 に示すようにわずかであった。ポリプは一般的に中軸個体（骨格の中心）から上方へと成長するが、群体の外側に面した部分では、図 7 に示した丸で囲まれたポリプのように下方へと成長するものが観察された。飼育環境下の水流にポリプの成長が影響を受けた結果と考えられる。今後、水流の影響が顕著でない天然のサンゴについても同様の調査を行い、飼育環境下のものと比較検討することで、外的要因によるポリプの育成状況の偏りと曲げ強度特性との関係を調査する予定である。

4. 結 言

- (1) 枝サンゴの群体間を比較した場合、骨格の形成に顕著な差を生じ、曲げ特性も大きくばらついた。
- (2) 枝の先端側と根元側の曲げ特性を比較すると、枝の根元側の骨密度が高く、強度特性に優れることが分かった。
- (3) 放射サンゴ個体の生育状況に関連して、骨格の曲げ強度は変化する。今回の飼育環境下での試料では、水流の影響を受けた結果、群体の外側に面する側が内側に面するものより優れた曲げ特性を示した。

Fig.8 Comparison between Front and Back.

Fig.9 Weibull statistics of porosity.

Fig.10 Position of the center pole individual.