

放散虫 *Mirifusus* 属 (海洋プランクトン) の進化と 骨組構造の力学的最適化 — 骨組形状遷移の構造力学的検証 —

Evolution of Radiolarian *Mirifusus* (Marine Plankton) and Mechanical Optimization of
Frame Structure

— Structural Mechanical Verification of Succession of Its Skeleton Shape —

吉野隆*・石田直人**・岸本直子***・松岡篤****・栗原敏之†・木元克典‡・松浦執§

Takashi YOSHINO, Naoto ISHIDA, Naoko KISHIMOTO, Atsushi MATSUOKA, Toshiyuki
KURIHARA, Katsunori KIMOTO, and Shu MATSUURA

*正会員 博(工) 東洋大学准教授 理工学部 (〒350-8585 埼玉県川越市鯉井 2100)

**非会員 博(理) 新潟大学博士研究員 自然科学研究科

***非会員 博(工) (独) 宇宙航空研究開発機構招聘研究員 宇宙科学研究本部

****非会員 理博 新潟大学教授 理学部

†非会員 博(理) 新潟大学助教 自然科学研究科

‡非会員 博(理) (独) 海洋研究開発機構主任研究員 地球環境変動領域

§非会員 理博 東京学芸大学 教育学部

We discussed the evolution of the skeleton of radiolaria (marine plankton) from a viewpoint of optimization process of frame structure. The genus *Mirifusus*, a group of Mesozoic radiolaria, has a character of detailed and geometric frame between segments. The geometric framework was evolved from combination of pentagon and rhombus to triangle through pentagon. We treated such frameworks as two dimensional rigid frames with periodic boundary condition. We obtained normalized displacement of upper-side under the condition of compress or torsional force for each framework. The results show that the triangle structure is most effective if the 2-D frame is applied both of compress and torsional forces in most cases. Such a structure corresponds to final frame structure of genus *Mirifusus* during its evolution process.

Key Words : radiolaria, genus *Mirifusus*, frame structure, structural mechanics, evolution

1. はじめに

海洋性原生生物プランクトンは、海洋に生息する大きさ数十 μm から数千 μm 程度の微小な生物である。地球史において多様な形態が出現するため、地球科学においては、その骨格化石が古環境の推定や地質時代の特定などに用いられる。しかし、生物学的には解明されていないことが多く、捕食行動などの生態についての研究は始まったばかりである¹⁾。また、宇宙構造物の設計に応用しようという試みも始められており²⁾、その重要性は増すばかりである。

海洋性原生生物プランクトンの中でも放散虫はその骨格形状の多様性が広く知られている。放散虫の骨格はシリカ (SiO_2) で形成されている。シリカは海水中に豊富に存在するが、シリカを骨格とするプランクトンが他にもあるために、リソースを競合している可能性もある。そのため、限られたリソースを用いてどのように骨格を形成しているのかを検討することは放散虫の生態を研究する上でも重要である。

本研究では放散虫骨格の模様に注目して単純な力学問題を構築し、その変遷理由を力学的な視点から検討

する。トムソン³⁾は放散虫骨格全体の形態が力学的に説明できると指摘した。しかし、これまでに放散虫骨格に対して構造力学を用いた解析が行われた例はない。骨格形状全体の問題を解くためには、それを構成する部分がどのような性質を持っているのかを理解することが不可欠であると考えられる。そこで、本研究では、節が重なった形状の放散虫について、節間を連結する骨組構造に着目し、その力学的性質を探ることとした。

本研究で解析の対象としたのは *Mirifusus* 属である。この属は、中生代ジュラ紀から白亜紀にかけて生息した、放散虫の進化史上で最大級の殻をもつグループである。*Mirifusus* 属の例を図-1に示す。左は全体の形状を表し、右は下から上にかけて殻の模様の進化過程を表している。*Mirifusus* 属は環状の節が細い骨格によって幾重にも連結され、全体として紡錘形をしている。このグループは、進化を通じて紡錘状の外形に目立った変化はないが、節を連結する細い骨格構造は変化していくことが知られている⁴⁾。このグループの中で、進化の最終段階に出現する *Mirifusus dianae baileyi* (図-1 左および右最上部) は節の間が組み合った三角形によ

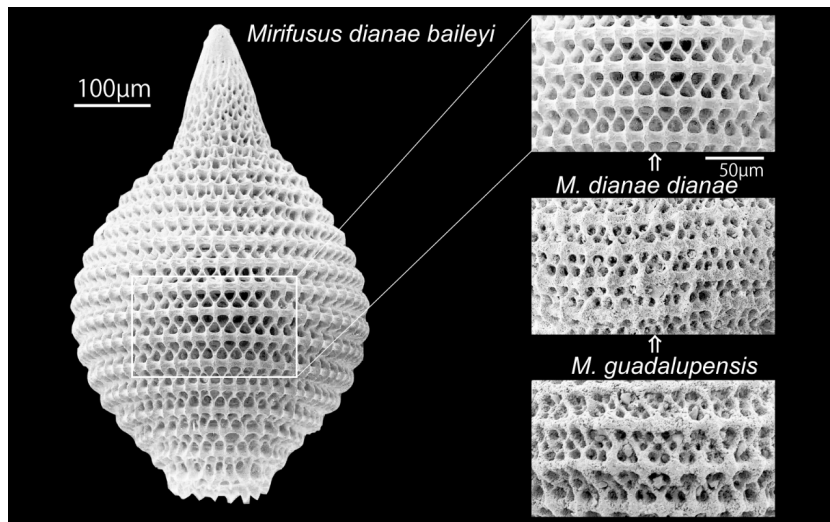


図-1 *Mirifusus* 属の例とその骨格構造の変遷.

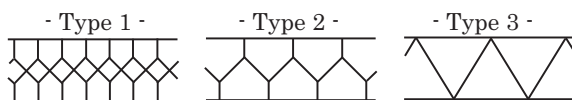


図-2 *Mirifusus* 属の骨格モデル.

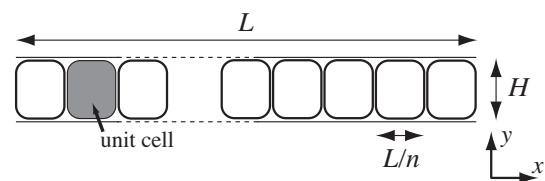


図-3 本研究で解析する周期境界構造および座標系の定義.

て連結されている。この三角形を基本としたフレーム構造は現在の建築物にも広く採用されるなど、力学的に効果的な選択肢であることを想起させる。本研究では、*Mirifusus* 属の骨格構造の構造力学的な特性について検討し、力学的適応過程という観点から骨格の進化過程を解釈することを試みる。

2. 骨格構造の力学

2.1 基本的な考え方

骨格はシリカで構成されているために、変形は少ないとみなすことができる。そこで、線形弾性解析を用いて、骨格の変形について検討する。側面に見える骨格を「長柱部材を剛接合した骨組構造物」、すなわち、非直交ラーメンとして解析を行った。

図-2 に骨組構造の模式図を示す。この模式図に示した骨組構造についてその構造力学的な性質を検討することで、*Mirifusus* 属の骨格構造の変遷について考察する。Type 1 は *Mirifusus guadalupensis* の殻構造を模式的に表したものである。この種の外殻は構造が上下部の五角形と中央部のひし形で構成されている。上下の五角形は、節と作る辺の他に、節に対して垂直な二本の辺とひし形を作る二本の辺からなる。上下について線対称であり、五角形の繰り返しは上下で同位相である。Type 2 は *Mirifusus diana diana* の殻構造を模式的に表したものである。Type 1 とは異なり中央のひし形が見られず、上下にある半位相ずれた五角形

によって構成されている。Type 3 は前述の *Mirifusus diana bailey* の模式図である。Type 1 と Type 2 について、節点荷重をかけたときの変形を計算し、変形が少ない構造を探ることで、*Mirifusus* 属の骨格の変遷を構造力学的に検討する。ここでは、実際に見られる骨格の構造の出現順に準じて、Type 1 から Type 2 を経て Type 3 へと変遷していると仮定して議論する。

注目している骨格構造は紡錘形状なので、周期境界条件を適用し、さらに曲率を無視して2次元平面上の問題に近似する。網目の部分がユニットセルの連結によって構成されているとみなす。図-3 にその考え方を示す。本研究では、*Mirifusus* 属の骨格の回転対称軸方向に y 軸をとり、それに直交する断面の外周における接線方向に x 軸をとる。これらは重力の向きとは無関係である。

全体の x 方向の長さを L とおき、高さを H とおく。マクロな構造を特徴づけるパラメータとして、ひとつの層の縦横比 $\alpha = H/L$ を導入する。これは、もとの紡錘形の骨格構造にもとづいて言うならば、「高さ」と円周長さとの比」である。同時に、ひとつの層は n 個のユニットセルで構成されているので、ユニットセルの縦横比 (アスペクト比) $a = nH/L$ も定まる。ユニットセルの x 方向の長さが n に依存してしまうの

で、セルを代表する長さとして H を採用する。

ユニットセル上端にある節点群に等しい力をはたらかせて節点変位を求めることにより、*Mirifusus* 属の骨格の変形を比較する。層全体にはたらく力が常に P となるように、ユニットセルにはたらく力を P/n とする。 n を大きくすると1ユニットセルあたりにはたらく力は小さくなるが、後に述べる材料コストの制限のために部材の断面が小さくなる。ユニットセルの下端にある節点群には固定端条件を用い、最下部においては変位が生じないものとする。

ユニットセルにはたらかせる力を y 軸方向で負の向き、または、 x 軸方向で正の向きにとる。前者は軸方向に押しつぶそうとする力を表し、後者は層と層の間に生じる捩りを表している。以下では便宜的に、前者を圧縮荷重、後者をせん断荷重と呼ぶ。

骨格構造の力学問題を考えるためには、実際の放散虫にどのような力が骨格にはたらいているのかを論じる必要がある。*Mirifusus* 属の骨格にはたらいたと考えられる力のうち、全体形状や骨組構造を決定する上で重要になる要素が何か化石殻からは不明なためである。我々は、*Mirifusus* 属の骨格が回転対称性をとる理由のひとつがこの対称軸と平行な方向にはたらく力によるものと考え、第一にこの方向の力に注目することにした。同時に、この力と垂直な方向にはたらく力についても検討した。生体膜の内外における圧力は等しいので（放散虫は水の中を漂っているだけなので）、水圧に相当する力（ xy 平面に垂直な力）は本研究では検討しない。

本研究で検討する力がはたらくとする理由の第一に挙げられるのは、捕食や逃避時の放散虫の行動である。例えば、*Mirifusus* 属のように節が重なった形状に代表される *Nassellaria* という種類は軸足を下方に伸ばし、瞬間的に収縮する運動をすることが観察されている¹⁾。このような生態から、反力や海水の粘性抵抗による回転対称軸方向の力（本研究でいう圧縮荷重）の存在が考えられる。また、骨格の回転対称性が十分でない場合には、軸方向以外の力も生じることが予想される。

2.2 問題設定

ユニットセルを構成するすべての部材の剛性マトリクスからユニットセル全体の剛性マトリクスを求め、剛性方程式を解くことによって、ユニットセル内の節点変位が求められる。部材のヤング率を E 、断面積を A 、断面二次モーメントを I とする。計算では $P/EH = 1$ となる単位系を用いて無次元化した変位を求め、この値を用いて *Mirifusus* 属の骨格変形を議論する。ユニットセル最下部は固定しているため、検討する二種類の力において変位が最大になるのは外力がはたらくユニットセル最上部である。そのため、以下に示す計算結果はすべて最上部の節点変位である。この変位は作用す

る力と同じ方向が卓越するので、その方向の変位成分にのみ注目する。

構造解析は単体のユニットセルに対して行う。それぞれの構造におけるユニットセルの定義はその都度示す。ユニットセル単体で計算を行うためには、部材を切断して適切な支点条件を設定しなければならない。そのため、 x 方向について周期境界条件を用いた。すなわち、注目するユニットセルの一方にはたらく力はそのユニットセルからもう一方にはたらく力であるとした。

計算に用いた所量の関係について以下に示す。断面の形状はどのフレームにおいても円であるとする。断面の半径 r は部材材料の総量 V によって決定する。無次元パラメータ β を用いて $V = \beta H^3$ と表すと、

$$r^2 = \frac{\beta H^3}{n\pi l} \quad (1)$$

である。ここで、 l はユニットセルにおける部材の長さの総和であり、 H 、 α 、 n の他に、ユニットセルの形状を表すパラメータに依存する。さらに、 H を用いて無次元化した長さ $r' = r/H$ および $l' = l/H$ を用いることによって、

$$r'^2 = \frac{\beta}{n\pi l'} \quad (2)$$

となる。

節点番号 i と j の節点を両端にもつ部材 ij の剛性マトリクス K_{ij} は、

$$K_{ij} = \frac{AE}{k_{ij}H} K_{ij}^a(\theta_{ij}) + \frac{EI}{(k_{ij}H)^3} K_{ij}^b(\theta_{ij}, k_{ij}) \quad (3)$$

と表せる。ここで、 K_{ij}^a と K_{ij}^b は、それぞれ軸力および曲げモーメントに関係する無次元数で構成されたマトリクスである。 $k_{ij}H$ は部材 ij の長さを表し、 θ_{ij} は x 軸の正の方向と部材 ij がなす角である。円の面積と断面二次モーメントを用いて、

$$K_{ij} = EH \frac{\pi r'^4}{4k_{ij}^3} \left(K_{ij}^a(\theta_{ij}) + \frac{4k_{ij}^2}{r'^2} K_{ij}^b(\theta_{ij}, k_{ij}) \right) \quad (4)$$

が導かれる。式(4)と式(2)を用いることによって、ユニットセルの剛性マトリクスを表現することができる。

3. Type 2 の解析モデルとその結果

3.1 モデル

図-4 に Type 2 構造の模式図と構造を決定するパラメータを示す。数字は節点番号を表している。角度 θ は部材 23 が x 軸の正の方向となす角の大きさである。単純化のために、部材 12 の長さとなす部材 34 の長さを等しいとした。これは *Mirifusus* 属の骨格から見る限り問題がない仮定である。部材 23 と部材 32 は周期境界条件という制限から長さが等しくなる。そのため、ユニットセルの構造は、高さ H 、アスペクト比 a 、そして、角度パラメータ θ の組み合わせで決定される。 θ

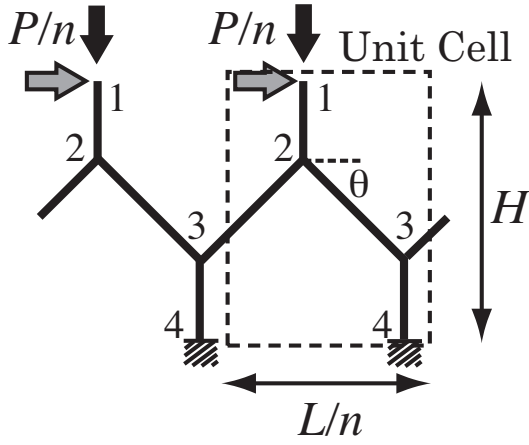


図-4 Type 2 の模式図. 2 種類の外力 (黒: 圧縮荷重, 灰: せん断荷重) それぞれについて節点 1 の変位を調べた.

がもっとも大きくなる時, Type 2 は Type 3 と同じ形になる. すなわち, Type 3 は Type 2 の特殊なケースである.

単純な計算から, 部材 12 および部材 34 の長さは,

$$\frac{H}{2} \left(1 - \frac{\tan \theta}{2a} \right)$$

であり, 部材 23 (および部材 32) の長さは,

$$\frac{H}{2a \cos \theta}$$

であることが導ける. 従って, 無次元化されたユニットセルあたりの部材長さの総和 l' は,

$$l' = \frac{1}{a \cos \theta} + 1 - \frac{\tan \theta}{2a} \quad (5)$$

である.

前節で述べたように, 二種類の外力を節点 1 にはたらかせ, その変位を求めた. ひとつ目のケースでは, 部材 12 と同一直線上的になるように荷重 P/n をはたらかせて節点 1 の y 軸方向の変位の大きさを調べた. もうひとつのケースでは, 部材 12 に垂直になるように荷重 P/n をはたらかせて節点 1 の x 軸方向の変位の大きさを調べた. α , n , θ , そして β を与えることによって, 節点 1 の無次元化した変位が求められる. この変位は解析解が求められるが, 式のままではその性質がわかりづらいので, 以下ではいくつかの視点からその結果を見ることにする.

n には構造によって決定される範囲がある. 下限は部材 12 と部材 34 の長さがゼロになるときで, 不等式,

$$\tan \theta \leq 2n\alpha \quad (6)$$

で制限される. これは等号のときに Type 3 の構造を表していると同時に, n が与えられたときの θ の上限を決める式でもある. 上限は部材 12 や部材 34 の太さがユニットセルの幅を超えないことで,

$$2r < L/n \quad (7)$$

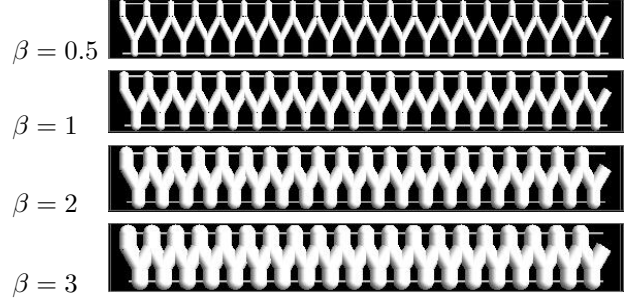
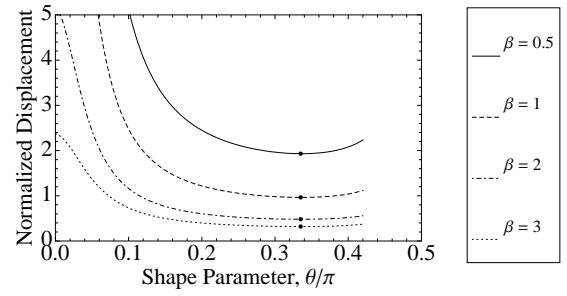


図-5 Type 2 における部材の総量による変位の角度依存性の違い. 上は角度依存性を表し, 黒丸は変位が最小になる点 θ^* を表している. 下の図は, 上の図で示したそれぞれの β において θ^* を用いたときの構造を示している.

である. このふたつの制限から, n の範囲,

$$\frac{\tan \theta}{2\alpha} < n < \frac{\gamma\alpha + \sqrt{(\gamma \cos \theta)^2 + 4\gamma(1 - \sin \theta)}}{2\alpha \cos \theta} \quad (8)$$

が定まる. ここで,

$$\gamma = \frac{\pi}{4\alpha^3\beta}$$

である.

3.2 角度依存性

α , n , そして β を固定したときに鉛直方向の変位がもっとも小さくなる θ を求める問題を検討した. θ の範囲は最も広い場合で, $0 \leq \theta \leq \pi/2$ であるが, 上に述べたように, 式 (6) による構造上の制限があり,

$$0 \leq \theta \leq \arctan(2n\alpha) \quad (9)$$

である. 以下では変位を最小にする角度パラメータ θ を θ^* と表すことにする.

はじめに, 圧縮荷重のもとで, n を固定して β の値を変え, それぞれの場合の変位の θ 依存性を調べた.

図-5 に, $\alpha = 0.1$, $n = 20$ のもとで, $\beta = 0.5, 1, 2$, そして 3 の場合の変位の角度依存性を示す. 部材が太いほど変位は小さいことは自明であるが, 改めてそれが確認できた. また, θ^* は β に敏感ではなく, すべて同じ値をとることがわかった. 図-5 では, 同時に θ^* を用いたときの構造も示している. あとで示すように, θ^* 付近で変位がほぼ一定になることは, Type 2 構造に圧縮荷重をはたらかせたときに共通してみられる特徴である.

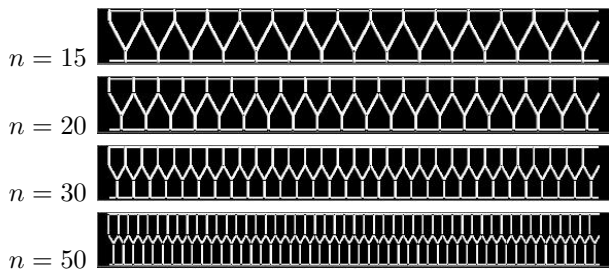
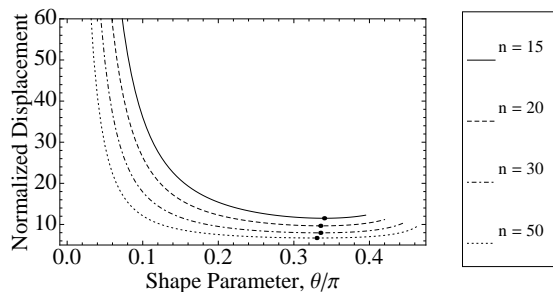


図-6 Type 2 における n による変位の角度依存性の違い (圧縮荷重). 上は角度依存性を表し, 黒丸は変位が最小になる点 θ^* を表している. 下の図は, 上の図で示したそれぞれの n において θ^* を用いたときの構造を示している.

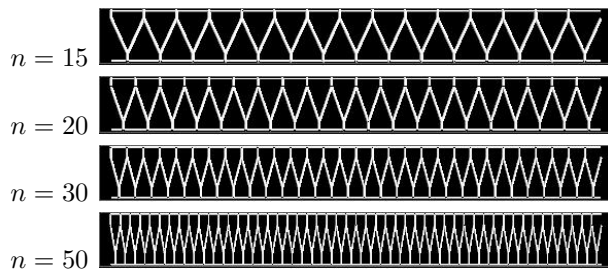
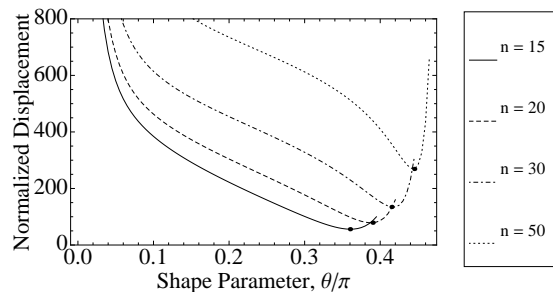


図-7 Type 2 における n による変位の角度依存性の違い (せん断荷重). 上は角度依存性を表し, 黒丸は変位が最小になる点 θ^* を表している. 下の図は, 上の図で示したそれぞれの n において θ^* を用いたときの構造を示している.

次に, 圧縮荷重のもとで, $\alpha = 0.1$ かつ $\beta = 0.1$ に固定して, 式 (8) の範囲内で n を変え, 変位の角度依存性を調べた. 結果を図-6 に示す. 部材が細くなるという短所を含めても n が大きいほど変位が小さくなることがわかった. また, n が大きい時には, 変位が最小になる θ^* 付近で変位はほぼ一定になること, すなわち, 角度依存性が小さくなることもわかった. θ^* はどの場合も $\pi/3$ を少し超えた値にあり, n が大きいほど $\pi/3$ に近づく. n が大きくなるとユニットセルのアスペクト比 a が大きくなるため, 部材 12 および部材 34 が全体の大部分を占めることになる. これは, 部材 23 (および部材 32) の y 成分の長さが小さくなるのが理由であると考えられる. その結果として座屈を生じる可能性がある. 本研究では座屈解析を行っていないが, n が大きいために座屈を生じやすくなると推測される構造は生物の殻としては適していないと考えられる.

圧縮荷重の結果とは逆に, せん断荷重の場合には, n が大きいほど変位が小さくなることがわかった. $\alpha = 0.1$ かつ $\beta = 0.1$ のもとで, n の値による変位の角度依存性を計算した結果を図-7 に示す. 圧縮荷重の場合に比べると, 角度依存性は大きく, θ^* 周辺でもフラットとは言えない. n が大きいほど θ^* は大きくなり, 部材 12 や部材 34 といった y 軸と同じ向きをもつ部材の長さを減らすことでせん断に対する抵抗を効率よく実現することがわかった.

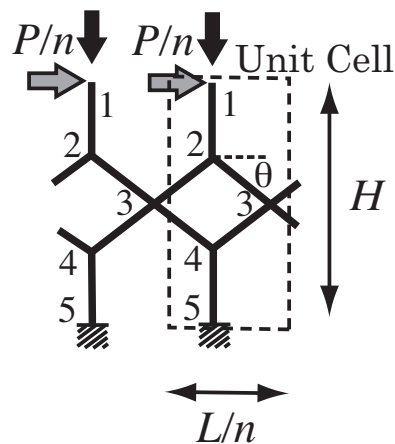


図-8 Type 1 の模式図. 2 種類の外力 (黒: 圧縮荷重, 灰: せん断荷重) それぞれについて節点 1 の変位を調べた.

4. Type 1 の解析モデルとその結果

4.1 モデル

図-8 に Type 1 構造の模式図と構造を決定するパラメータを示す. 節点の数が 1 だけ増えるものの Type 2 と幾何学的な類似性が確認できる. 大きく異なる点は y 軸方向に平行な部材が, Type 1 の場合には同一直線上にある (同じ位相にある) ことである. そのため, Type 1 と Type 2 はパラメータの値を変えるだけでは移行することができない. θ の大きさは, 中央のひし形がどの程度卓越するのを示すのみであり, その極限ではひし形のみから構成される骨組構造ができ

るだけである。そのため、Type 1 と Type 2 の関係は、Type 3 が Type 2 の特殊なケースであることは少し事情が異なる。

観察結果から以下に示す対称性を仮定して、構造を決定するパラメータの数を減少させた。はじめに、Type 2 と同じように、部材 12 と部材 45 が等しいとした。さらに、部材 12 と部材 23 がなす角度と部材 34 と部材 45 がなす角度が等しいとした。これらの仮定によって、Type 2 の場合と同様に、ひとつの構造パラメータのみで全体の構造が決まる。

部材長は Type 2 と同じ方法で計算することができ、無次元化されたユニットセルあたりの部材長さの総和 l' は、

$$l' = 2 \left(\frac{1}{a \cos \theta} + 1 - \frac{\tan \theta}{a} \right) \quad (10)$$

である。

アスペクト比を決める分割数 n の範囲も Type 2 と同様に求めることができ、

$$\frac{\tan \theta}{\alpha} < n < \frac{\gamma' \alpha + \sqrt{(\gamma' \cos \theta)^2 + 4\gamma'(1 - \sin \theta)}}{2\alpha \cos \theta} \quad (11)$$

が定まる。ここで、

$$\gamma' = \frac{\pi}{2\alpha^3 \beta}$$

である。

4.2 角度依存性

Type 2 の場合と同様に、 α 、 n 、そして β を固定したときに鉛直方向の変位がもっとも小さくなる θ を求める問題を検討する。Type 1 の場合も構造上の制限から、構造パラメータ θ の範囲は、

$$0 \leq \theta \leq \arctan(n\alpha) \quad (12)$$

となる。この範囲で変位の θ 依存性を調べ、変位の大きさを最小にする構造パラメータ θ^* を求めた。

圧縮荷重のもとで、 $\alpha = 0.1$ かつ $\beta = 0.1$ に固定して、Type 2 の場合と同じ n を用いて、変位の角度依存性を調べた。結果を図-9 に示す。Type 2 の場合とは異なり、結果は単調減少関数であり θ^* は θ の最大値になっている。図-9 の下に示した構造からもわかるように、これは中央にあったひし形が全体を占めることに相当している。

圧縮荷重と同じ条件のもとでせん断荷重をはたらかせたときの結果を図-10 に示す。 θ 依存性は大きく、 θ^* 周辺はフラットとは言えない。すべての n において θ^* は θ の最大値よりも少し小さな値を取る。図からもわかるように、この場合もほぼ中央のひし形が卓越する構造になる。従って、Type 1 の場合は Type 2 とは異なり、変位最小化という観点からみたときに圧倒的に有利な構造が存在すると言える。

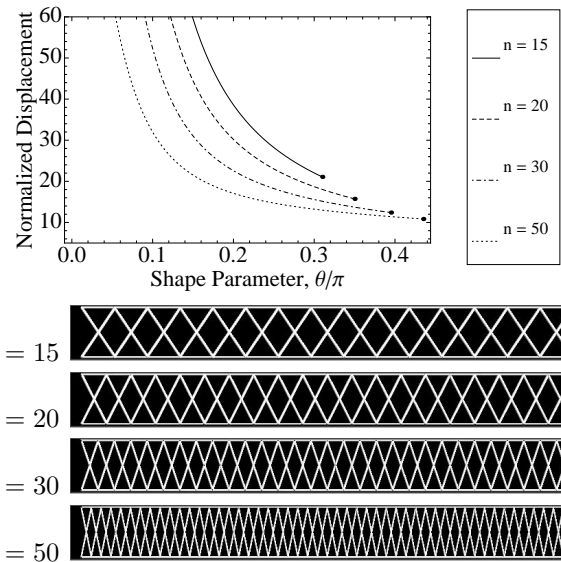


図-9 Type 1 における n による変位の角度依存性の違い (圧縮荷重)。上は角度依存性を表し、黒丸は変位が最小になる点 θ^* を表している。下の図は、上の図で示したそれぞれの n において θ^* を用いたときの構造を示している。

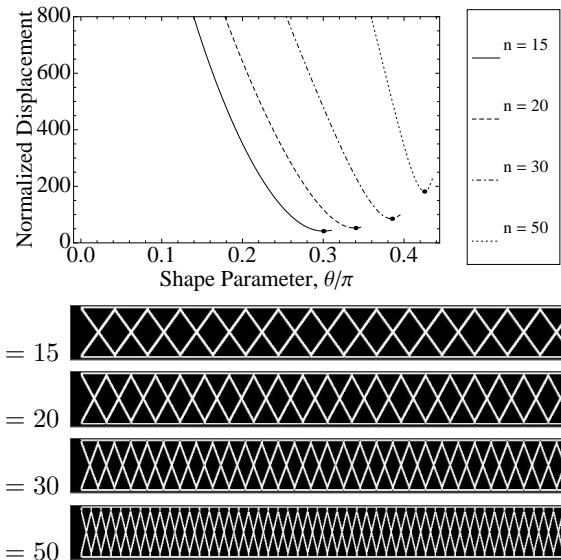


図-10 Type 1 における n による変位の角度依存性の違い (せん断荷重)。上は角度依存性を表し、黒丸は変位が最小になる点 θ^* を表している。下の図は、上の図で示したそれぞれの n において θ^* を用いたときの構造を示している。

次に、 α を 0.1 に固定し、 n と β を与えたときの Type 1 と Type 2 の最小変位の比を求めた。これによって、設計条件を同一にして最適条件を求めたときに、どちらの構造のほうが変位が小さくなるのかを調べた。図-11 に Type 1 の最小変位に対する Type 2 の最小変位の比を示す。 β の値を 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 と変えて、変位の比の n 依存性を調べた。 n の範囲は、 $10 \leq n \leq 100$ としている。圧縮荷重の場合には β 依存

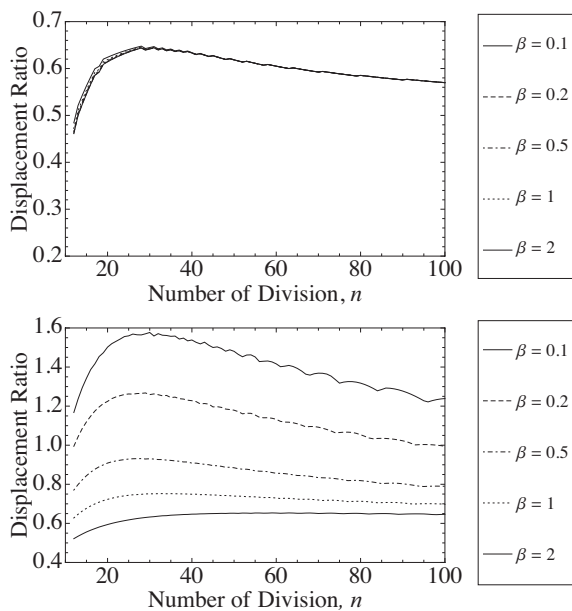


図-11 Type 1 の最小変位に対する Type 2 の最小変位の比。上：圧縮荷重。下：せん断荷重。

性が見えず、常に Type 2 の方が小さな変位となることがわかった。また、せん断荷重の場合には β の値によって、Type 2 が有利な場合とそうでない場合があることがわかった。 β の値が 0.1 や 0.2 と小さい場合、Type 1 構造の方が有利になる。しかし $\beta \geq 0.5$ の場合のように、部材がある程度太い状態になると、Type 2 構造の方が有利となる。また、 n が小さい値をとる場合、Type 2 構造の優位性が際立つこともわかった。

5. 議論

構造力学的な視点から見ると、Type 2 構造から Type 3 構造への進化には、ふたつの要因が考えられる。ひとつ目の要因は、*Mirifusus* 属の骨格が回転軸方向にはたらく力だけではなく捩じれのような力に対しても適応した結果であることである。Type 2 構造において、圧縮荷重のみがはたらくのであれば、*Mirifusus* 属の進化は n を無限大にする構造、すなわち、薄い板状の構造に特化する可能性があった。しかし、これは捩じれの力に弱いことの他に、もうひとつの要因である座屈に対して弱い構造となることも意味している。アスペクト比を大きくすること (n を大きくすること) は捩じれの力や座屈に対して弱い構造となるという制約が、薄板状の構造になることを妨げたのだと解釈できる。このような要因に対して構造力学的に最適化した結果として、アスペクト比が 1 に近い三角形構造 (Type 3) が選ばれたものと推論される。

Type 1 から Type 2 への進化については、Type 2 から Type 3 に移行したようには明快に解釈することができない。Type 1 構造の中で圧縮荷重とせん断荷

重の両方に対して最適化される、大きな θ を持つ構造 (ダブルワーレントラス型構造) は化石記録に見られていない。この構造がなぜ採用されなかったのか、あるいはこの結果を予測として将来発見されるのかについては、今後の放散虫研究の進展に期待したい。

Type 1 の構造は力学的には必ずしも最適化されたものではなかった可能性は高い。生物はパラメータの数をひとつに限定して、その範囲内で最適解を選ぶようなことはしていない。おそらく、Type 1 構造における最適化過程を行ううちに、部材 12 と部材 45 を同一直線上にしない (位相をずらす) という設計を見つけ、Type 2 にたどり着いたものと考えられる。位相のずれという観点からみると、Type 1 は位相が半周期ずれた Type 2 の重ね合わせであり、Type 1 の最適解は位相が半周期ずれた Type 3 の重ね合わせである。そのため、Type 1 の最適解は Type 3 と関係づけられる可能性がある。本研究で検討した Type 1 構造は実際の骨格を単純化したものであり、今後はより実際に近づけた構造で検討すること、および構造を決定するパラメータの数を増やして、Type 1 から Type 2 への遷移を確かめる計算が必要だろう。

実際に生じた進化は、ここで解析した力学的な要因以外の寄与も想定する必要がある。しかしながら、力学的な最適化過程という捉え方によって、骨格構造の進化について新たに解釈が可能になった点は注目すべきである。この進化的変化が、漸進進化的かあるいは断続平衡的か化石記録から検証し、その成果を力学的検証にフィードバックすることで、骨格の進化と力学との関連の妥当性の検証や、より実際に即した解釈が可能になると考えられる。

6. おわりに

海洋性プランクトンの一種である放散虫 *Mirifusus* 属について、節を連結する骨組構造の変遷を構造力学的に検証した。実際に存在した骨格構造を出現順に Type 1 から Type 3 で示した構造で近似し、網目構造の最上部に圧縮荷重やせん断荷重をかけ、最上部における変位の大きさが最小になる構造を線形弾性解析によって調べた。Type 2 について圧縮荷重およびせん断荷重の両方による変形が最小になる構造を求めると、アスペクト比が小さい場合において Type 3 に似た形状が現れた。Type 1 についての同様な計算では、中央のひし形が卓越する構造 (ダブルワーレントラス型) が得られた。同一条件のもとで得られた構造について、Type 1 と Type 2 で変位の大きさを比較したところ、Type 2 のほうが小さく、より力学的に有利な構造であると考えられる。

謝辞

筆者らは査読者の有意義な意見に感謝する。本研究は新潟大学コア・ステーション形の科学研究センターからの補助を受けている。

参考文献

- 1) Matsuoka, A.: Living radiolarian feeding mechanisms: new light on past marine ecosystems, *Swiss J. Geosci.*, Vol. 100, pp. 273–279, 2007.
- 2) 岸本直子ほか：横断型プランクトン研究プロジェクトについて, 形の科学会誌, Vol. 21, pp.37–38 (シンポジウム要旨), 2006
- 3) ダーシー・トムソン著, 柳田友道ほか訳: 生物のかたち, 東京大学出版会, 1973.
- 4) Baumgartner, P.O., O'Dogherty, L., Gorican, S., Urquhart, E., Pillevuit, A., and De Wever, P.: *Middle Jurassic to Lower Cretaceous Radiolaria of Tethys: Occurrences, Systematics, Biochronology*, Mémoires de Géologie (Lausanne), No. 23, 1995.

(2009年4月9日 受付)