

# A01 ラティス円筒構造におけるリブ配置の座屈特性への影響

清水耀裕(東京大学・院), 青木隆平(東京大学)

Yosuke Shimizu(東京大学・院), Takahira Aoki(東京大学)

## 1. 序論

航空宇宙分野において、構造の軽量化は燃料消費削減やペイロード増加等につながる重要な要素である。近年では、従来の金属材料よりも比剛性・比強度に優れる CFRP が注目されており、Boeing 787 や Airbus A350 XWB の一次構造に適用されている。金属材料の材料特性が等方性であるのに対し、CFRP の材料特性は異方性であり、繊維方向で高い剛性・強度を持つ。そのため、CFRP を用いた軽量構造では従来の金属材料を想定した構造ではなく、CFRP の異方性を考慮することが求められる。

CFRP の異方性を活かした構造として注目されている構造の一つが、ラティス円筒構造である[1-5]。ラティス構造は、一方向 CFRP 製リブが格子状に組まれた網目構造である。Fig.1 のように、リブはらせん方向リブと周リブの二種類に分けられる。軸方向圧縮力に対して、らせんリブが一方向圧縮で全体の軸方向荷重を受け持ち、それに伴うらせんリブの円筒面外への変形を周リブの一方方向引張で抑制する。このとき、リブにかかる支配的な荷重は一方方向の圧縮・引張であり、繊維方向の高い剛性・強度を活かした構造である。

製造法は、フィラメントワインディングやテープレイニングでの一体成型が可能である。一体成型によって、部品接合に伴うコストが削減される。また、繊維が連続的に巻かれているため、繊維の切れ目に

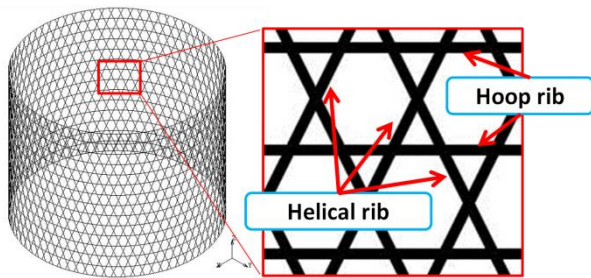


Fig.1 Lattice structure

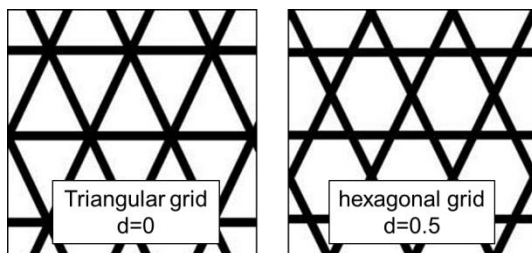


Fig. 2 Triangle grid and hexagonal grid

よる材料特性の低下を防ぐことができる。上述の構造上・製造上の利点から、ロシアの Proton-M ロケットでは、ロケット段間部にラティス構造が適用されている[1]。

Fig.3 に示されているように、ラティス構造には多くの設計変数があり、構造の耐荷性能との関係が研究されている[2-5]。その中で、リブの配置は Fig.2 左のように、三角形セルから成るパターン(正三角形ならばアイソグリッド)と Fig.2 右のように、六角形セル(Kagome グリッド)から成るパターンが考えられてきた[1-5]。三角形セルのパターンはらせんリブ同士の交点で周リブがらせんリブと交差し、六角形セルのパターンはらせんリブ同士の交点間の midpoint で周リブがらせんリブと交差する。しかし、この 2 パターン以外で周リブがらせんリブと交わるリブ配置は考えられていない。本研究ではらせんリブに対する相対的な周リブ配置を設計変数として有限要素解析によってパラメトリックスタディを行い、全体構造の座屈荷重への影響を評価し、耐荷性能の向上することを目的とする。

## 2. FEM 基準モデルと設計変数

### 2.1 基準モデル

Table.1 に、FEM の基準モデルの設計変数の値を示す。変数の値は比較を行うために、先行研究[3,4]で用いられていた値を用いた。リブにかかる荷重は主に一方方向の荷重であることから、リブは全て等方性のはり要素とし、リブの交差部はリブ同士の節点を共有することでモデル化した。

解析時の境界条件は、円筒下端の節点を全自由度拘束し、円筒上端の節点と剛体接続された負荷節点に軸方向圧縮荷重を負荷した。

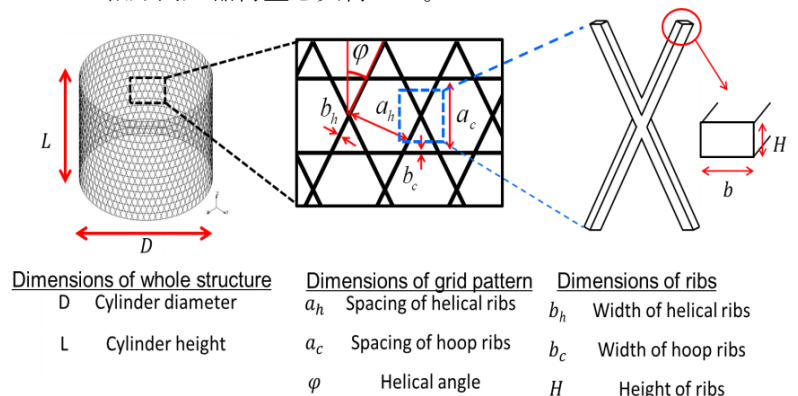


Fig. 3 Design parameters of lattice structure

Table 1 Design parameters of basic model

Cylinder Diameter	$D$	2500 mm
Cylinder Height	$L$	2000 mm
Number of Helical Rib	$N_h$	71
Number of Hoop Rib	$N_c$	15
Helical Angle	$\varphi$	21.2 deg
Helical Rib Width	$b_h$	5.0 mm
Hoop Rib Width	$b_c$	5.0 mm
Rib Height	$H$	10 mm
Young's Modulus of Ribs	$E$	80 GPa
Poisson's Ratio of Ribs	$\nu$	0.3

全重量は 33.2 kg であり、基準モデルの座屈荷重は 642 kN であった。本研究では、全重量は全てのモデルにおいて一定であり、この条件の下で座屈荷重の比較を行った。

## 2.2 設計変数

### 2.2.1 周リブ配置

リブ配置をらせんリブ同士の交差点に周リブが交わる配置(Fig.4 左)かららせんリブ同士の交差点間の midpoint に周リブが交わる配置(Fig.4 右)まで周リブのらせんリブに対する相対的な配置を変化させた。リブ配置を表す変数を  $d$  として、らせんリブ交差点から周リブまでの距離  $l$  を周リブ間隔  $a_c$  (一定値) で割った値で式(1)のように定義した。これより  $d$  の定義域は  $0 \leq d \leq 0.5$  となる。

$d = 0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5$  の 5 つの場合について解析を行った。

$$d = \frac{l}{a_c} \quad (1)$$

### 2.2.2 リブアスペクト比

既存の設計変数であるリブアスペクト比  $H/b$  を補助的なパラメータとした。リブ幅はらせんリブと周リブで同一とし ( $b = b_c = b_h$ )、リブ断面積は全てのモデルで基準モデルでの値と同一とした。 $H/b = 5.6, 3.1, 2.0, 1.4, 0.20$  の 5 つの場合について解析を行った。

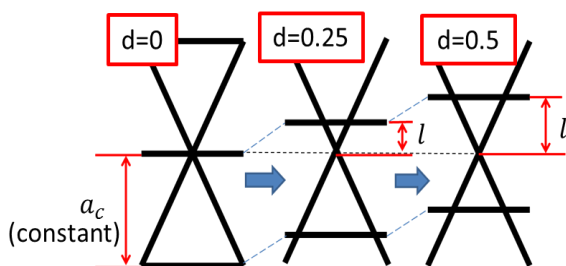


Fig. 4 Variation of hoop rib placement

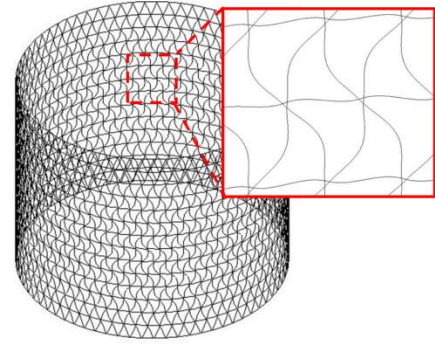


Fig. 5 In-plane buckling mode

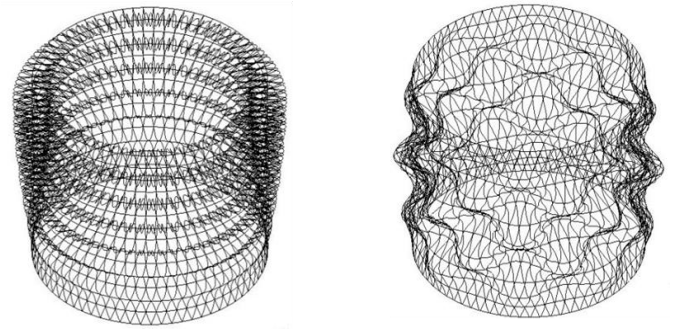


Fig. 6 Out-plane buckling mode

## 3. 座屈モードの分類と解析結果

### 3.1 座屈モードの分類

解析結果を分析するにあたり、座屈モードを「面内座屈」と「面外座屈」の二つに分類した。Fig.5 のように、「面内座屈」はリブが局所的に円筒面内で回転変形し、円筒面外への変形を伴わない座屈モードである。また、「面外座屈」は Fig.6 のように、円筒面外への変形を伴う座屈モードであり、構造全体が円筒座屈する場合(Fig.6 左)と、円筒座屈とリブの局所変形がカップリングする場合(Fig.6 右)があることが示されている[4]。3.2, 3.3 節で、それぞれ「面内座屈」と「面外座屈」の 1 次座屈荷重の変化を調べた

### 3.2 面内座屈荷重の変化

面内座屈の 1 次座屈荷重の変化を Fig.7 に示す。 $H/b = 1.4, 0.20$  の場合は、計算機の都合上 1 次面内座屈荷重を得ることができなかった。Fig.7 より、いずれのリブアスペクト比においても、面内座屈荷重はリブ配置  $d$  について単調増加している。これは、らせんリブが局所回転する面内座屈の場合、座屈はらせんリブ同士の交差点が固定端となる二次の座屈モードで生じると考えられており、座屈荷重は以下の式で与えられる[3]。

$$P_{cr} = 4 \frac{(4.49)^2 EI_{in}}{l_h^2} \quad (2)$$

また、Fig.8 から、 $d$ が増加するとリブの局所座屈での座屈長さ $l_h$ が小さくなるのがわかる。以上より、 $d$ の増加に伴い、座屈長さ $l_h$ が減少するため、面内座屈荷重も増加していると考えられる。

リブ配置 $d$ が一定の場合、リブアスペクト比 $H/b$ が大きくなると面内座屈荷重は減少していることがわかる。これはリブ断面積一定でリブアスペクト比 $H/b$ が増加する場合、リブ幅 $b$ が減少し、リブ高さ $H$ が増加する。面内変形についての断面二次モーメント $I_{in}$ は断面積を $A$ とすると、

$$I_{in} = \frac{b^3 H}{12} = \frac{b^2 A}{12} \quad (3)$$

式(2),(3)からリブアスペクト比が増加すると面内変形についての断面二次モーメントが減少するため、面内座屈荷重も減少すると考えられる。

### 3.3 面外座屈荷重の変化

面外座屈荷重の1次座屈荷重の変化を Fig.9 に示す。 $H/b = 5.6$ と $3.1$ の一部の1次面外座屈荷重は、計算機の都合上得ることができなかった。座屈モードは $H/b = 0.2, d = 0$ の場合 Fig.6 左のような全体円

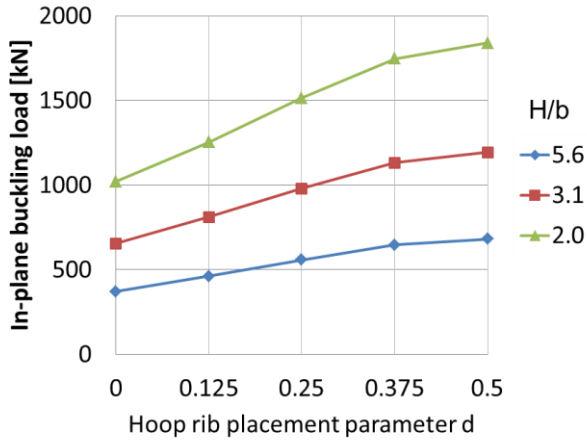


Fig. 7 Effect of hoop rib placement on in-plane buckling load

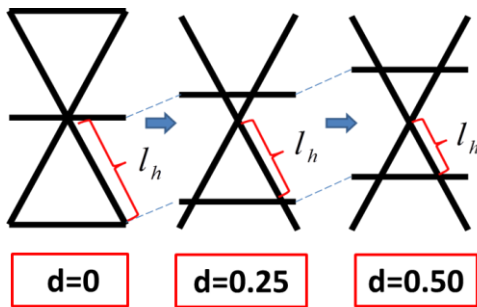


Fig. 8 Variation of buckling length

筒座屈であり、その他の場合では全て Fig.6 右のような円筒座屈とリブの局所回転のカップリングモードであった。

Fig.9 より、いずれのリブアスペクト比においても、面外座屈荷重はリブ配置 $d$ について単調減少していることがわかる。座屈変形の様子に注目すると、Fig.10 からリブ配置 $d$ が大きくなると、面外カップリング座屈モードでの円筒周方向の波の数が減少しており、座屈長さが大きくなっていることがわかる。このことから、 $d$ の増加に伴い、面外座屈の座屈長さが大きくなり、面外座屈荷重が減少すると考えられる。

リブ配置 $d$ が一定の場合、リブアスペクト比 $H/b$ が大きくなると面外座屈荷重は増加していることがわかる。面外変形についての断面二次モーメント $I_{out}$

$$I_{out} = \frac{bH^3}{12} = \frac{A}{12b^2} \quad (4)$$

よって、リブアスペクト比が大きくなると面外変形についての断面二次モーメントが増加するため、面外座屈荷重も増加すると考えられる。

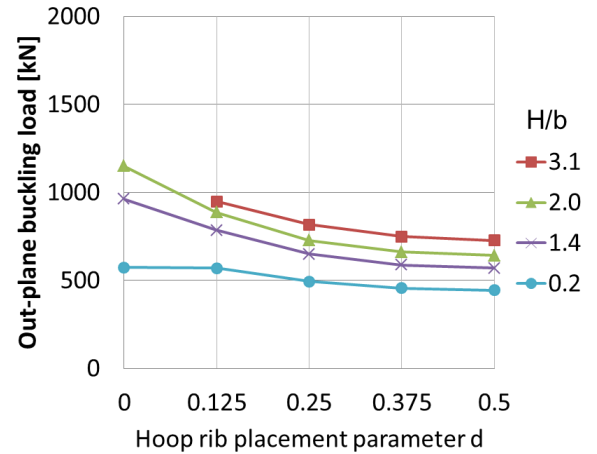


Fig. 9 Effect of hoop rib placement on out-plane buckling load

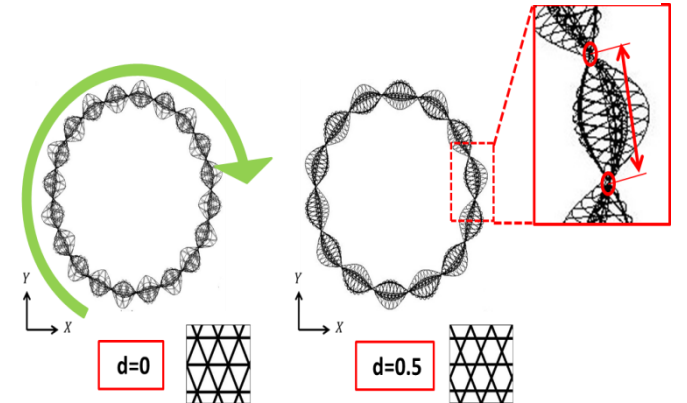


Fig. 10 Effect of hoop rib placement on out-plane buckling deformation



### 3.4 全体座屈荷重の変化

面内座屈と面外座屈のうち、1次座屈荷重が低い方が全体の座屈荷重として実際に表れると考えられる。全体の座屈荷重の変化を Fig.11 に示す。 $H/b = 0.2, 1.4$ の場合、座屈モードはいずれのリブ配置でも面外座屈であるため、座屈荷重は $d$ について単調減少している。 $H/b = 2.0, 3.1$ の場合、リブ配置 $d$ によって座屈モードが変化し、面内座屈から面外座屈に切り替わる点で座屈荷重が最大となっている。 $H/b = 5.6$ の場合、座屈モードはいずれのリブ配置でも面内座屈であるため、座屈荷重は $d$ について単調増加している。

$d = 0.5$ の Kagome グリッドについてはリブアスペクト比 $H/b \cong 5$ で座屈荷重が最大になることが示されている[4]が、Fig.11 より、座屈荷重が最大となるリブアスペクト比はリブ配置 $d$ によって変化しているため、リブ配置を新たなパラメータとして考える必要があると言える。

### 4. 座屈荷重を最大にする設計値

3節の解析結果と Fig.11 より、座屈荷重が最大となる設計値はリブ配置 $d$ については $0 \leq d \leq 0.125$ の範囲で、リブアスペクト比 $H/b$ については、 $H/b = 2.0$ 付近の範囲であると考えられる。そこで、リブ配置 $d$ は $0 \leq d \leq 0.125$ の範囲で4分割し、リブアスペクト比 $H/b$ は $H/b = 2.0$ でのリブ幅 $b = 5.0$  mmより、 $4.5 \leq b \leq 5.5$ の範囲で10分割し、最大の座屈荷重となる設計値を求めた。

座屈荷重が最大となる設計値は、 $d = 0.125/4$ ,  $H/b = 1.9$ のときで、座屈荷重は1096 kNであった。このときの座屈モードは面外座屈であり、リブの局所回転と円筒座屈のカップリングモードであった。座屈モードを Fig.12 に示す。最大座屈荷重は基準モデルでの座屈荷重642 kNから約71%向上している。

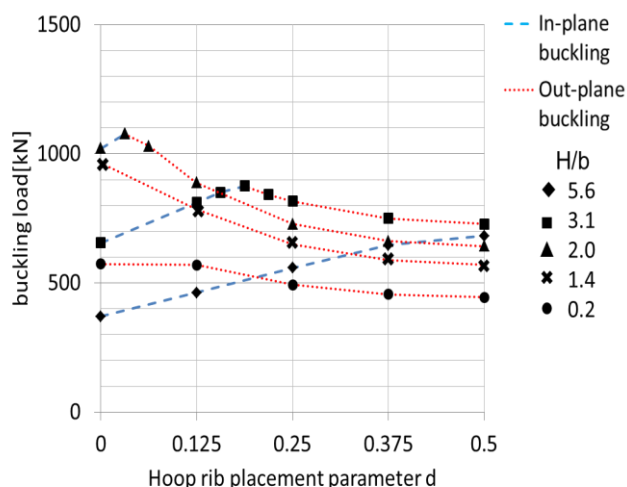


Fig. 11 Effect of hoop rib placement on buckling load

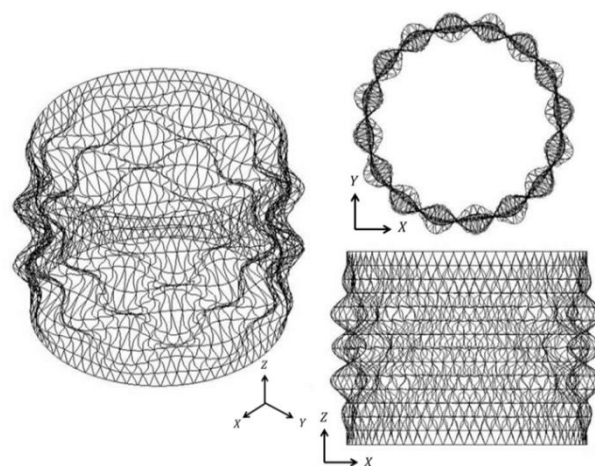


Fig. 12 Buckling mode in maximum buckling load  
 $d = 0.125/4$ ,  $H/b = 1.9$

### 5. 結言

周リブの配置によるラティス円筒構造の座屈特性への影響を評価するため、リブ配置のパラメータ $d$ を定義し、有限要素法解析を行った。

変形が円筒面内に限られる面内座屈の場合、座屈荷重は $d$ について単調増加し、面内座屈に対しては三角形セル( $d = 0$ )よりも六角形セル( $d = 0.5$ )の方が、優れた耐荷性を示すことがわかった。面外座屈の場合、座屈荷重は $d$ について単調減少し、面外座屈に対しては三角形セル( $d = 0$ )の方が六角形セル( $d = 0.5$ )よりも、耐荷性が優れていることがわかった。

面内座屈と面外座屈双方を含めた座屈荷重は、座屈モードが面内変形から面外変形に変わる設計値付近で最大となると考えられる。そこで、パラメータの刻み幅を細かくして解析を行った結果、最大の座屈荷重が、基準モデルから約71%向上することができた。このことから、ラティス構造の耐荷性能を向上するにあたり、周リブの配置を新たなパラメータとして考慮することの意義が示された。

### 参考文献

- [1] V.V. Vasiliev, V.A. Barynin, and A.F. Razin, "Anisogrid composite lattice structures –Development and aerospace applications," *Composite Structures*, Vol.94, 2012, pp.1117-1127
- [2] G. Totaro, "Local buckling modeling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with triangular cells," *Composite structures*, Vol. 94, 2012, pp.446-452
- [3] G. Totaro, "Local buckling modeling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with hexagonal cells," *Composite structures*, Vol. 94, 2012, pp.446-452
- [4] 山崎肇, "ラティス円筒構造の圧縮座屈", 東京大学大学院修士論文(2013)
- [5] 吉野駿祐, "スキン付きラティス構造の座屈特性", 第56回構造強度に関する講演会(2014)