

132 Weaire-Phelan オープンセルフォームの微視的座屈解析

名古屋大学 ○奥村 大 名古屋大学[院] 正木豊久
名古屋大学 大野信忠

Microscopic Buckling Analysis of Weaire-Phelan Open-Cell Foams

Dai OKUMURA, Toyohisa MASAKI and Nobutada OHNO

1 緒 言

著者らは前報¹⁾において、単軸圧縮を受けるケルビンオープンセルフォームの微視的座屈解析を行い、セル構造を構成する支柱(リガメント)の形状を実験結果に基づいて決定したモデルの解析結果が半実験式²⁾とよく一致することを示した。また、優先的な座屈モードは負荷方向によって短波長である場合と長波長である場合があり、すなわちケルビンセルの微視的座屈挙動は異方性を有することがわかった。しかしながら、実際のフォーム材料は不均一なセル構造を有しており、上述のような力学的応答は等方的であると考えられる。したがって、オープンセルフォームの理想化されたセル構造として、ケルビンセルを用いる場合には注意が必要である。

そこで本研究では、著者ら^{3),4)}の均質化理論を用いて、ケルビンセルよりも不均一性の高い Weaire-Phelan セル⁵⁾によって構成されるオープンセルフォームの微視的座屈挙動を有限要素解析する。このためまず、Weaire-Phelan セルの解析モデルについて説明する。本解析では、セルを構成するリガメントを弾性体であるとし、その形状が微視的座屈挙動に及ぼす影響を詳細に調べるために、3つの異なるモデルをそれぞれ解析する。また、微視的座屈挙動の負荷方向に対する異方性を調べるために、負荷条件として代表的な3つの異なる方向への単軸圧縮をそれぞれ考える。最後に、得られた座屈応力を半実験式と比較することによって考察を行う。

2 Weaire-Phelan セル

Fig. 1(a)は Weaire-Phelan セル⁵⁾の基本周期単位である。このセルは、6個の十四面体と2個の十二面体によって構成されており(Fig. 1(b),(c))、1種類の十四面体によって作られるケルビンセルより不均一性が高いが、[100]、[010]、[001]方向への並進対称性を有する。本研究ではオープンセルフォームのセル構造として、Weaire-Phelan セルの周期的な配列を考える。したがって、それぞれの多面体が接することによって作られる辺がリガメントとなり、それらの交点が接合部となる。

いくつかの研究での詳細な観察より、リガメントの形状について、その長さ方向の中心部には断面積が一定となる領域があり、断面形状は三角形かつ中心部と端部の断面積比はおおよそ一定値をとるということが知られている。また、前報によって、微視的座屈挙動を調べる上で、リガメント形状のモデリングの重要性が示されている。したがって、本研究ではさらに詳細な検討を行うために、断面一様モデルと2つの断面非一様モデルAと

Bをそれぞれ解析する。Fig.2にはこれらのモデルが示されており、それぞれのモデルとリガメント形状の実験計測^{6),7)}の結果との対応関係を Table 1 に示す。

形状を決定するパラメータは、リガメント全体長さと断面積一定の中央部長さの比 l/L と端部と中央部の断面積比 a/A であり、本解析では文献^{6),7)}を参考にしてそれぞれの値を 0.5, 0.15 とした。なお、解析に用いるモデルの相対密度 ρ は、断面一様モデルが 0.010, 0.050, 断面非一様モデルAが 0.010, 0.014, 0.020, 断面非一様モデルBが 0.006, 0.025, 0.058 であった。

3 解析結果

前章に示した Weaire-Phelan オープンセルフォームを、著者ら^{3),4)}の構築した有限変形の均質化理論を用いて解析した。負荷条件として、Fig.1(a)に示される[001]方向の

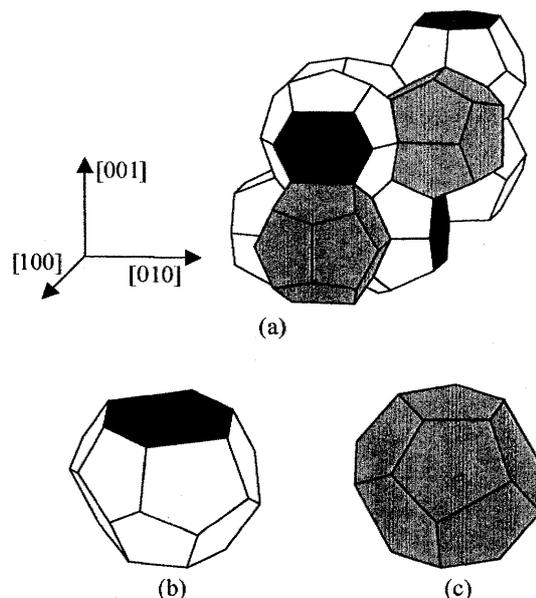


Fig. 1 Weaire-Phelan structure; (a) Basic unit consisting of 6 tetrakaidecahedron and 2 irregular dodecahedron cells, (b) tetrakaidecahedron cell, and (c) irregular dodecahedron cell.

Table 1 Consistency of model ligaments with experimental measurement.

Ligament model	Length ratio of uniform area	Area ratio of cross-section
Uniform	×	×
Non-uniform A	○	×
Non-uniform B	○	○

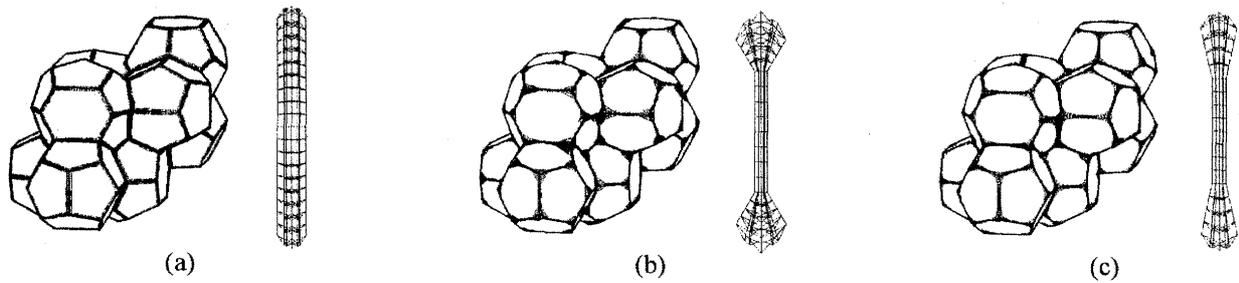


Fig. 2 Basic unit of Weaire-Phelan open-cell foams and a representative ligament shape; (a) uniform model for $\rho = 0.010$, (b) non-uniform model A for $\rho = 0.010$, and (c) non-uniform model B for $\rho = 0.006$.

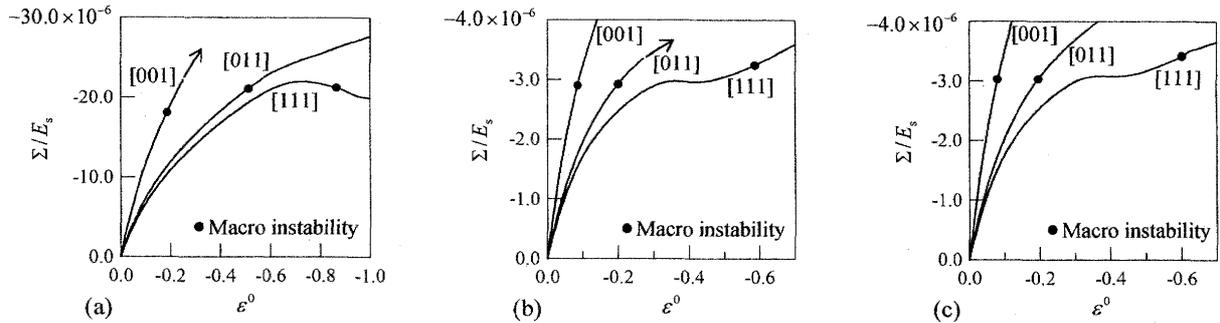


Fig. 3 Macroscopic stress-strain relation under [001], [011], and [111] compressions of (a) uniform model for $\rho = 0.010$, (b) non-uniform model A for $\rho = 0.010$, and (c) non-uniform model B for $\rho = 0.006$.

ほかにも[011], [111]方向への単軸圧縮をそれぞれ考えた。また、本研究では簡単のため、基本周期単位の微視的分岐条件と巨視的不安定条件の解析をそれぞれ行い、微視的分岐の周期単位依存性⁴⁾について解析しなかった。なお、セルを構成する材料は弾性体であるとして、ヤング率 E_s は応力を無次元化するために用い、ポアソン比 ν は 0.3 とした。

Fig.3 は、それぞれのモデルに対して解析を行った結果であり、巨視的な応力-ひずみ関係を示す。図中の●印は巨視的不安定条件が最初に満足された点を示し、微視的分岐条件は解析の範囲内において満足されなかった。巨視的不安定の開始点では非常に大きな周期単位に微視的分岐の生じることが理論的に示されており、すなわち、これらの結果から、いずれのモデルおよび負荷条件においても、長波長座屈が優先的に生じることが推察される。また、このほかの相対密度の結果も同様の傾向を示した。したがって、Weaire-Phelan オープンセルフォームの定性的な微視的座屈挙動は負荷方向に依存せず、等方的であるといえ、巨視的不安定の開始応力は最小座屈応力とみなすことができる。

Fig.4 は相対密度の関数として座屈応力をプロットしたものであり、実線は Gibson-Ashby²⁾によって導かれた半実験式 $\Sigma/E_s = 0.05\rho^2$ である。これに対して、記号は一様モデル、非一様モデル A、非一様モデル B の結果であり、いずれのモデルも負荷方向に対しては定量的にも等方的な挙動を示すことがわかった。しかしながら、モデル間には大きな違いが現れた。まず、一様モデルは半

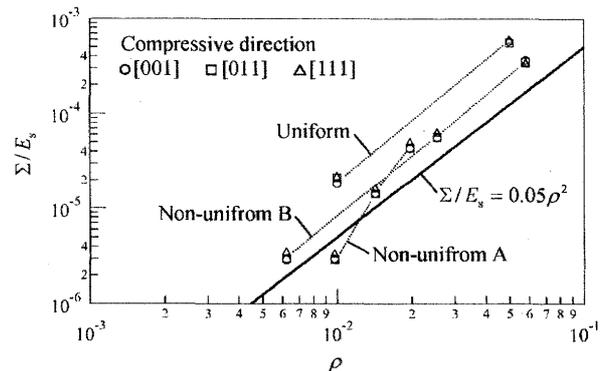


Fig. 4 Buckling stress as a function of relative density.

実験式と定性的には同じ傾向を示すが、定量的には座屈応力を過大評価した。つづいて、非一様モデル A の結果は、解析した範囲内において半実験式と定量的に近いものの、定性的には異なる傾向であった。これに対して、非一様モデル B は半実験式と定性的なだけでなく定量的にも最もよく一致する結果を示した。

非一様モデル A と B の違いは、Table 1 に示すように、非一様モデル B のリガメント断面の中央部と端部の面積比を実験結果に基づいて決定していることにある。したがって、オープンセルフォームの微視的座屈挙動を評価するためには、リガメント形状のモデリングの中でも、その中央部と端部の断面面積比の値の設定がとりわけ重要であるといえる。

参考文献 (省略)