

ヘリンボーンパターン形成に及ぼす纖維充填の影響

The Effect of Fiber Filling on Herringbone Pattern Formation

岩田 直大¹⁾, 松原 成志朗²⁾, 永島 壮¹⁾, 奥村 大¹⁾,
Naohiro Iwata, Seishiro Matsubara, So Nagashima and Dai Okumura

1) 名古屋大学 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

2) 東北大学 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

When compressive stress is applied to a hard film on a soft substrate, a characteristic deformation pattern develops on the surface of the film, and a herringbone pattern appears preferentially, especially when the compressive stress is high. In this study, axial fibers are filled into the base, and the effects on the occurrence and development of herringbone patterns are analyzed by sequential buckling eigenvalue analysis and post-buckling analysis.

Key Words : Surface instability, Buckling, Bifurcation analysis, Herringbone pattern

1. 緒言

表面不安定現象は生体システムの進化や形態形成を理解する上で重要なテーマであり、特に哺乳類の脳における皮質の折り畳みと密接に関連していると考えられている[1]。その基本的なモデルは軟質基盤に拘束された圧縮負荷を受ける硬質膜として構成される[2]。このモデルでは、圧縮応力が臨界座屈応力を超えると表面に多様なパターンが発生し、過応力の増加に伴いさらに発達することが知られている。具体的には、過応力が小さい場合には六角形や正方形のディンプルパターンが発生し、過応力が大きい場合にはヘリンボーンパターンやラビリンスパターンが形成されることが報告されている。

一方で、Chavoshnejadら[3]は、実際の脳における皮質の折り畳みは単純な膜と基盤の2層構造だけでは説明できず、白質内における纖維の密度が形成に重要な役割を果たしていることを示した。この知見は脳のしわの構造を解明するためには、軟質基盤に拘束された圧縮応力を受ける膜の2層構造モデルに加え、纖維の影響を考慮する必要があることを示唆している。

本研究では、纖維構造がヘリンボーンパターンの形成に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 解析手法

本研究では分岐座屈固有値解析と座屈後解析により分岐点と分岐経路を解析する。逐次的の座屈固有値解析ではAbaqusのBuckleオプションを用いることで、経路上の分岐点を検出することが可能である[4]。また、座屈後解析はImperfectionオプションを用いて座屈モードを導入することで実施する。

3. 解析モデル

纖維を有する軟質基盤に拘束された圧縮負荷を受ける

膜について軟質基盤、膜、纖維のすべてが非圧縮性のNeo-Hookeanモデルに従うと考える。軟質基盤のヤング率を E_s 、膜のヤング率を E_f 、纖維のヤング率を E_a とする。温度 T の増加は膜の面内圧縮応力を増加させ、主経路で等二軸負荷を引き起こす。膜と軟質基盤のヤング率比は $E_f/E_s = 10$ で固定とし、軸索纖維と軟質基盤のヤング率比を $E_a/E_s = 0.1, 5, 10, 100$ と変化させ解析を行う。

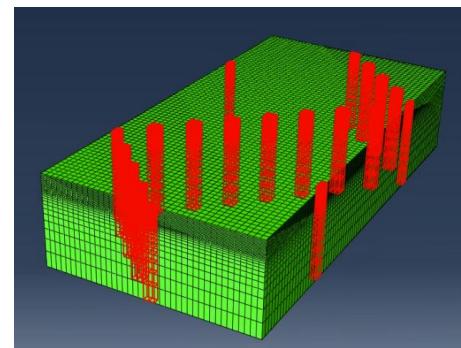


図-1 解析モデルの例

4. 解析結果

(1) 分岐応力への影響

図-2 で $E_a/E_s = 0.15, 10, 100$ の条件における第1分岐過応力と充填した纖維の数との関係を示す。 $E_a/E_s = 0.1$ の条件では、充填する纖維の数が増加に伴い分岐過応力の値は小さくなっていることがわかる。これは基板より小さいヤング率の纖維を充填するほどモデルが座屈しやすくなっていることを示している。 $E_a/E_s = 5, 10, 100$ の条件では、充填する纖維の数が増加に伴い分岐過応力の値も大きくなっていることがわかる。これは基板より大きいヤング率の纖維を充填するほどモデルが座屈しにくくなっていることを示している。また纖維の数にかかわらずヤング率比が大きいほど分岐過応力も大きくなる。

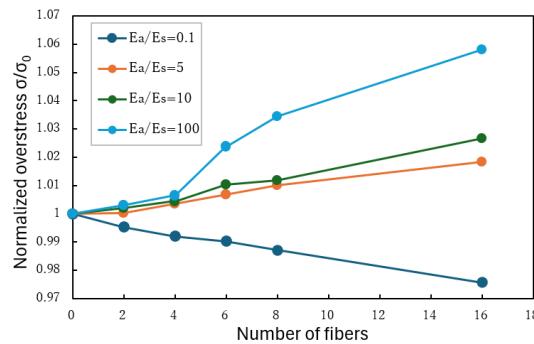


図-2 分岐過応力と纖維の充填数の関係

5. 結言

本研究では軟質基板に拘束された膜の2層構造体において第1分岐モードを正方形ディンプルモードに固定したときに、纖維の導入によってヘリンボーンパターンの形成に与える影響について調査した。経路上の優先的な分岐点を探索するために逐次的な座屈固有値解析を実施し、優先的な分岐モードによって規定される初期不整を用いて分岐経路の解析を行った。

第1分岐座屈応力はヤング率比 $E_a/E_s = 5, 10, 100$ の纖維を充填すると値が大きくなり、 $E_a/E_s = 0.1$ の纖維を充填すると値が小さくなる。纖維充填による分岐応力は軸索の数をより多く充填するほど変化の幅が大きくなる。

参考文献

- [1] D.P. Richman, R.M. Stewart, J.W. Hutchinson, V.S. Caviness Jr., 1975; Mechanical model of brain convolutional development, *Science*, Vol.189, 18-21
- [2] Z.Y. Huang, W. Hong, Z. Suo, 2005; Nonlinear analyses of wrinkles in a film bonded to a compliant substrate, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.53, 2101-2118
- [3] P. Chavoshnejad, X. Li, S. Zhang, W. Dai, L. Vasung, T. Liu, T. Zhang, X. Wang, M.J. Razavi, 2021; Role of axonal fibers in the cortical folding patterns: A tale of variability and regularity, *Brain Multiphysics*, Vol.2, 100029
- [4] D. Okumura, J. Sugiura, H. Tanaka, Y. Shibutani, 2018; Buckling and post buckling of etching-induced wiggling in a bilayer structure with intrinsic compressive stress, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.141, 78-88