

令和元年6月12日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18826

研究課題名（和文）軟質基盤上の硬質膜に生じる凸凹パターン変態の探索的分岐不安定解析

研究課題名（英文）Step-by-step eigenvalue buckling analysis of dimple pattern transformation in hard film on soft substrate

研究代表者

奥村 大（Okumura, Dai）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：70362283

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、軟質基盤上の硬質ゲル膜に生じるパターン変態の再現と機構解明を目的として、探索的分岐不安定解析のための指導原理構築と効率的な解析手順考案を行った。このため、探索的分岐不安定解析の解析手順を構築し、その手法を真性圧縮応力を有する2層構造のエッチング誘起うねり変形の座屈・座屈後解析に適用した。構築された手法は、凸凹パターン変態の解析にも適用され、その効果が検証された。チェッカーボード問題は膨潤効果に依存するだけでなく第1分岐座屈後の再分岐にも依存して解決されることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで凸凹パターン変態の解析は、板の大変形理論を用いて解析的に行われることが多かった。このため近似をいくつか含んでおり、実験と対応しない点における影響因子の特定に困難があった。これに対して、本研究では、有限要素法を用いた解析を実施しており、探索的分岐不安定解析によって分岐点の同定も行っているため高精度な解析が可能となった。これまでと異なる影響因子が特定されるなど新しい知見を得るための方法が整備されるようになり、今後、より大規模な解析を進めることによって全容が解明される期待があり、挑戦的研究（萌芽）の研究成果として役割を果たしたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In the present study, we analyzed the pattern transformation occurring in hard gel films on a soft substrate to elucidate its mechanism. To this end, we first developed the computational procedures of step-by-step eigenvalue buckling analysis, applying it to buckling and postbuckling of etching-induced wiggling in a bilayer structure with intrinsic compressive stress. The developed procedures were applied to the dimple pattern transformation analysis, and the efficiency was validated. It was successfully found that the checkerboard problem depends on the swelling effect and the bifurcation subsequent to the first bifurcation.

研究分野：固体力学

キーワード：固体力学 材料力学 分岐座屈 パターン変態

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

軟質基盤上の硬質膜には、面内圧縮応力を駆動力として凸凹パターン変態が生じる。先行研究では、Föppl-von Kármán の板理論を用いて異なるパターン間のエネルギー的比較解析が行われており、チェッカーボード問題に行き詰まることが知られている。この原因として、硬質膜の薄板近似や発現パターンの仮定方法に問題があると考えられる。したがって、この問題は非線形有限要素法に基づく分岐不安定解析によって解決できると考えられる。しかしながら、パターン形状を事前に仮定せず、パターン変態の発生と結果としての分岐モードを網羅的に探索するための指導原理の構築が必要不可欠であり、それに基づく効率的な解析手順が考案できれば、チェッカーボード問題と呼ばれる難問題は解明できると考えられる。また、その後の凸凹パターンの発達分化の再現及び機構解明のための解析基盤構築もさらに有意義であり、材料力学分野のさらなる発展にも直結すると考えられる。さらに、凸凹パターン変態の観察は、高分子ゲル膜を用いた実験によって最近、飛躍的に発展してきた。この理由として、ゲル膜表面には UV 照射等で比較的容易に硬質ゲル膜を作成可能であり、この膜には膨潤によって量的に十分な体積膨張を与えることができ、膨潤誘起型の分岐不安定変形によって、パターン変態の発達分化の繰り返しを最終段階まで詳細に観察できるようになったことが挙げられる。凸凹パターン変態は、生命の神秘にも関わる非常に奥深い現象であるから、解析的な再現や機構解明は至急遂行すべき研究課題であるといえる。

2. 研究の目的

本研究では、軟質基盤上の硬質ゲル膜に生じるパターン変態の再現と機構解明を目的として、探索的分岐不安定解析のための指導原理構築と効率的な解析手順考案を行う。非線形有限要素法に基づく分岐不安定解析では、膜表面に長波長座屈が発生することによってパターン変態が開始し、波の方向や分岐の多重性は解析領域の取り方に依存することを示す。さらに、硬質膜の厚さや基盤と膜の材料定数に依存して、優先的な波長が同定されることを確認する。これらの結果から、解析領域の寸法を決定することによって、優先的な長波長座屈の生じる方向と分岐の多重性が決定されるという重要な指導原理を導く。すなわち、解析領域の寸法をパラメータ化することで、分岐不安定点における優先的な分岐モードの網羅的探索が可能になる。パターンは分岐の多重性によって多様化し、これらの中にチェッカーボードパターンや六方ディンプルパターンも含まれることになる。分岐後解析では、多様なパターンがいずれも生じ得る可能性があることを示し、実験で観察される六方ディンプルパターンの発現機構を明らかにするとともに、先行研究において、チェッカーボード問題が生じた理由についても考察する。さらには、その後のパターン変態についても解析を進め、構築された指導原理及び解析手順の拡張を図り、最終的にラビリンスパターンに至る段階的なパターン変態の再現と機構解明を目指す。

3. 研究の方法

軟質基盤上の硬質ゲル膜に生じるパターン変態の再現と機構解明を目的として、以下の研究項目 ~ を設定してそれぞれについて研究方法を検討し、研究を遂行した。次章では研究成果について述べる。

探索的分岐不安定解析によるエッチング誘起うねり座屈の解析[1],(4,5,6)

硬質ゲル膜の凸凹パターン変態に及ぼす膨潤効果解析[1],(2,7)

ポーラスゲル膜に生じるドメインウォール欠陥の座屈・座屈後解析(3)

4. 研究成果

探索的分岐不安定解析によるエッチング誘起うねり座屈の解析[1],(4,5,6)

図1はエッチング誘起うねり座屈を有限要素解析するためのモデル化を図示している。この

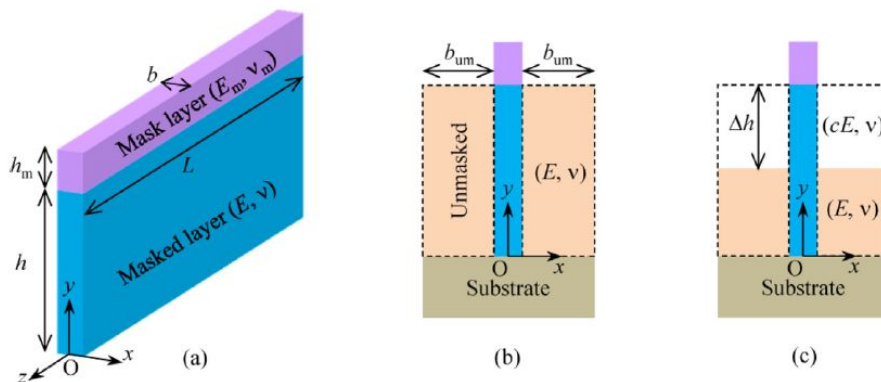


図1 エッチング誘起うねり座屈の有限要素解析モデル

問題では、mask layer に真性圧縮応力が作用しており、unmasked layer がプラズマエッチングされることによって、真性応力を駆動力とした分岐座屈としてうねり変形が生じる。したがって、単純な問題ながら、どのような波長が生じるのか未知であり、曲げ変形を表現できるように要素分割を達成するためには、大規模な解析対象を考える必要が生じる。さらに、unmasked layer がエッチングされる過程で分岐座屈が生じるため、エッチング過程を代替的な負荷パラメータに置き換えての探索的な座屈固有値解析が必要となり、これらの課題を解決する形でモデル化と計算手法開発は行われた。図2は探索的な座屈固有値解析の結果を示しており、板厚に依存して大きく異なる波長のうねり座屈が異なるエッチング過程において生じ得ることを示している。図3は座屈後に再分岐が生じ、パターンが複雑化することを示している。

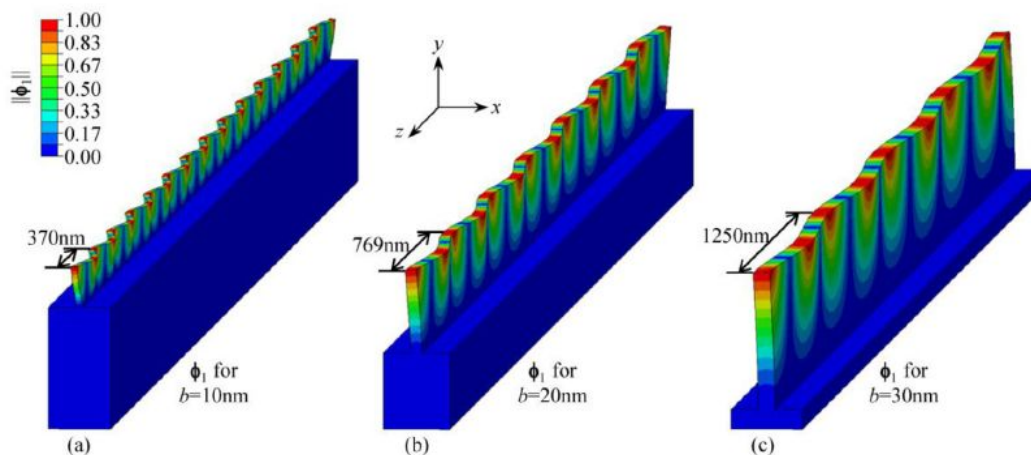


図2 エッチング誘起うねり座屈の探索的な座屈固有値解析の結果

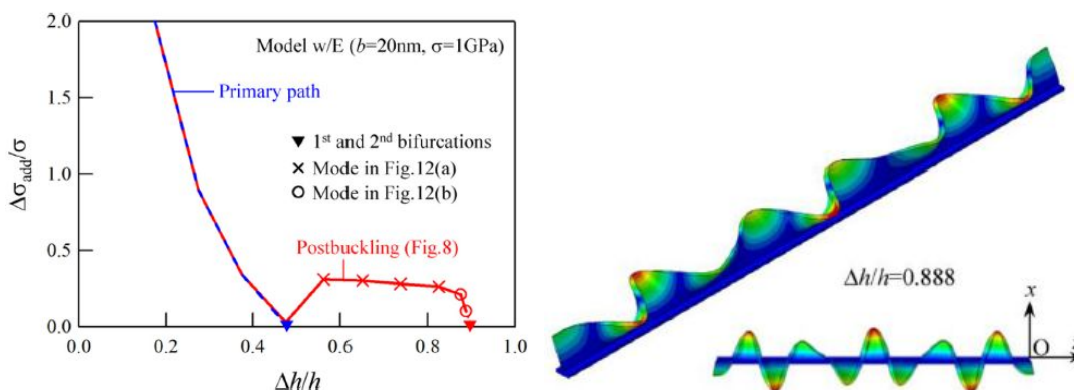


図3 再分岐の発生とうねり座屈の複雑化

硬質ゲル膜の凸凹パターン変態に及ぼす膨潤効果解析(1,2,7)

図4は軟質基盤上の硬質ゲル膜が膨潤することによって生じる凸凹パターン変態を解析した結果である。化学ポテンシャルが増加するにしたがって、面内圧縮応力が増加し、この力を駆

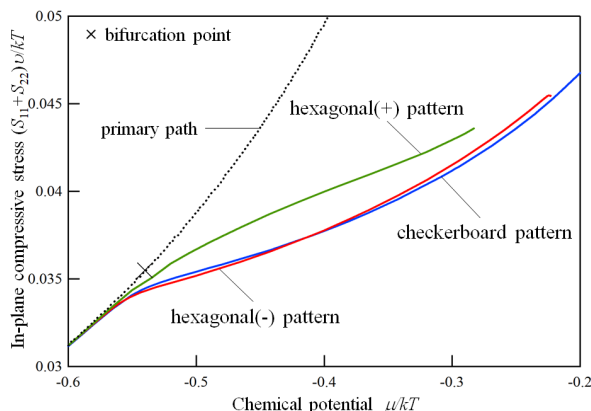


図4 軟質基盤上の硬質ゲル膜の第1分岐点と座屈後挙動のパターン依存性

動力としてパターン変態は生じる．この図では第1分岐点では、特定の優先的な波長をともなったリンクル変形が生じ、その組み合わせによってチェッカーボードパターンや六方ディンプルパターンが生じ得ることを確認した．また、六方ディンプルパターンについては、モードの符号の取り方によって、異なるパターンとなり、座屈後解析によって、六方ディンプルの逆モードは不安定であることがわかった．一方、チェッカーボードパターンと六方ディンプルパターンはほとんど等価な応答を示しており、優劣の区別をつけることは難しいこともわかった．これらの結果は先行研究とは異なっており、膨潤効果を考慮した解析の結果として明らかとなった．さらに第2分岐点の解析を進めたところ、図5に示すように特徴的な座屈モードが発生し、座屈後の挙動では、六方ディンプルパターンからの経路の方が安定化することがわかった．また、六方ディンプルパターンからの座屈後の変形は実験でも一部観察されており、このような階層的な分岐座屈現象の解析を進めることによって、凸凹パターン変態の未解明問題の解明は進むことが期待できる．

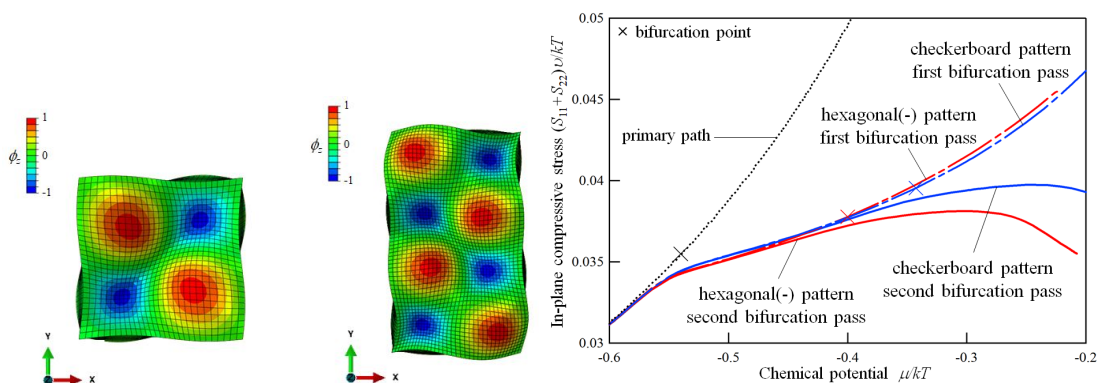


図5 第2分岐点の座屈モードとチェッカーボードパターンと六方ディンプルパターンの比較

ポラスゲル膜に生じるドメインウォール欠陥の座屈・座屈後解析(3)

本研究課題で開発された探索的座屈固有値解析の手法をポラスゲル膜のパターン変態解析に適用したところ、これまで明らかではなかったドメインウォール欠陥の形成機構を説明することのできる分岐座屈挙動を解析することに成功した(図6).ダイヤモンドプレートパターンが優先的であることはよく知られていたが、長波長座屈は波長が長くなるにつれてこの優先的なパターンの座屈荷重に漸近することがわかり、その座屈モードはダイヤモンドプレートパターン中に位相差を含む形で現れることがわかった．その結果として、座屈後解析ではドメインウォール欠陥が形成されることが確かめられ、このような欠陥の導入は一般的に生じ得ることがわかった．

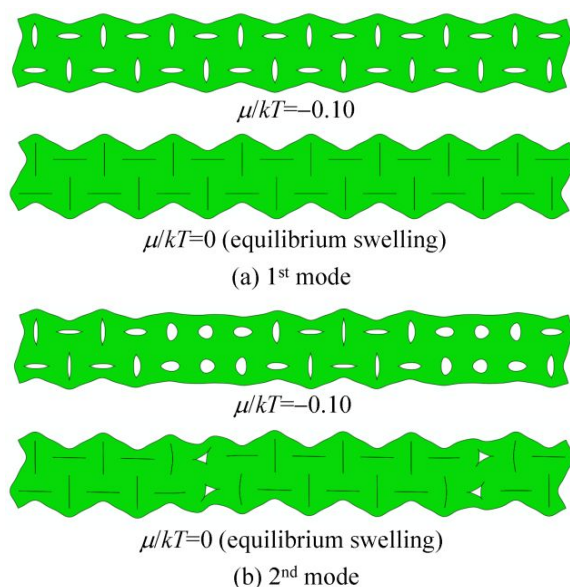


図6 ダイヤモンドプレートパターンの発達とドメインウォール欠陥の形成

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- [1] D. Okumura, J. Sugiura, H. Tanaka, Y. Shibutani, Buckling and postbuckling of etching-induced wiggling in a bilayer structure with intrinsic compressive stress, International Journal of Mechanical Sciences, Vol.141, pp.78-88 (2018), 査読有.

〔学会発表〕(計8件)

- (1) 三好宏明, 奥村 大, 大野信忠, 硬質ゲル膜の凸凹パターン変態に及ぼす膨潤効果解析, 第24回計算工学講演会, (2019).
- (2) 三好宏明, 川端宏典, 奥村 大, Flory-Rehner モデルの高度化と凸凹パターン変態解析への適用, JSME-TEC19, (2019).
- (3) 奥村 大, 春日井彰志, ポーラスゲル膜に生じるドメインウォール欠陥の座屈・座屈後解析, 第23回計算工学講演会, (2018).
- (4) D. Okumura, Finite element analyses of pattern transformation induced by external stimulus, 9th Asia CMD Workshop (国際会議), (2018) (招待講演).
- (5) D. Okumura, J. Sugiura, H. Tanaka, Buckling analysis of out-of-plane undulation in microscopic patterned structure using FVK and FEM approaches, SES2017 (国際会議), (2017) (招待講演).
- (6) 杉浦順哉, 奥村 大, 田中 展, 微細パターン構造のうねり座屈に及ぼす板厚と真性応力の影響, JSME-CMD2017, (2017).
- (7) 奥村 大, 寺井喜彦, ゲル膜に生じるディンプルパターンの膨潤誘起座屈解析, 第22回計算工学講演会, (2017).

〔その他〕

ホームページ等

- ・ ホームページ (Dai Okumura)
<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/mml/okumura.html>
- ・ Research Gate (Dai Okumura)
https://www.researchgate.net/profile/Dai_Okumura
- ・ Google Scholar (Dai Okumura)
<https://scholar.google.com/citations?user=uY5i9UkAAAAJ&hl=en>
- ・ ORCID (Dai Okumura)
<https://orcid.org/0000-0002-4020-8258>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。