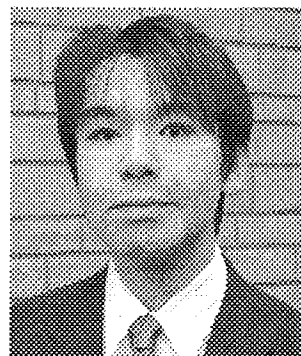


## 新任教員紹介

# 航空宇宙学科 航空宇宙学専攻・講師 中篠恭一

### 略歴

- 1971.7 埼玉県生まれ
- 1990.3 埼玉県立浦和高校卒業、1995.3 東京大学工学部航空宇宙工学科卒業
- 1997.3 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 修士課程修了
- 2002.3 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 博士課程満期退学
- 2002.4 文部科学省宇宙科学研究所 共同利用研究員
- 2003.4 文部科学省宇宙科学研究所 研究機関研究員
- 2003.10 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 宇宙航空プロジェクト研究員
- 2005.4 現職



### 担当科目

- 材料力学、軽構造力学、振動工学特論、航空宇宙基礎実験（共担）、
- 航空宇宙応用実験（共担）、航空宇宙特別プロジェクト（共担）、航空宇宙学通論（共担）

### 研究活動内容

#### 膜面のリンクリング解析

膜面は軽量・柔軟かつ優れた収納効率をもつ素材であり、古来より天幕等の仮設住宅に利用されるなど、人類にとっても馴染み深い構造要素となっている。ところで宇宙構造物の分野では、近年膜面を主体とした大型宇宙構造物が注目を集めており、Gossamer Spacecraft と呼称され各国で研究が進められている。Gossamer Spacecraft を対象とした一連の膜面構造解析の研究においてまず問題となったのが、膜面に発生するリンクル（しわ）の影響をどのように扱えばよいか、ということであった。膜面はシェルのような剛構造要素に比べて曲げ剛性が極端に小さく、ほぼ零に近い。そのため膜面に圧縮荷重が作用した場合、膜面は面外方向に局所座屈を引き起こし、圧縮力は直ちに解放される。その際に形成されるのがリンクルである。そこで、リンクリング現象をどのように構造解析に組み込めばよいか、特に数値構造計算のデファクトスタンダードである有限要素解析に対して、どのようなリンクリングアルゴリズムを組み込めばよいか、という点が宇宙構造物工学における研究課題のひとつとして浮上した。この問題に対し、本研究では Roddeman 等による張力場モデルに注目し、膜面の構成則に形式的な変更を加えることで、リンクリング解析が効率的かつ安定的に行えることを明らかにしている。

#### [参考論文]

K.Nakashino, M.C.Natori, "Efficient Modification Scheme of Stress-Strain Tensor for Finite Element Analysis of Wrinkled Membranes," Proceedings of 44<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Norfolk, 7-10 April, VA, 2003, AIAA Paper 2003-1981.

K.Nakashino, M.C.Natori, "Efficient Modification Scheme of Stress-Strain Tensor for Wrinkled Membranes," AIAA Journal, Vol.43, No.1, pp.206-215, 2005. など

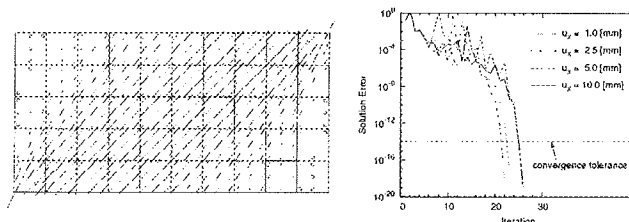


図1. 矩形膜面を剪断変形させた際のリンクリング解析  
(左図：主応力分布、右図：反復計算における残差)

#### 有限要素法による膜構造物の大変形解析

膜面は曲げ剛性を殆どもたないため、少しの荷重に対しても容易に大変形が生じ、その構造応答は本質的に非線形となる。現在、構造物の数値解析手法としては有限要素法が確固たる地位を築いており、大規模な非線形解析も実用的な計算コストで実施できるようになっているが、膜面の大変形解析を行うにあたってはいくつかの問題点もあり、一般に解析は困難である。事実、膜面の非線形構造解析を有限要素法で行った場合、多くのケースで数値的不安定性が生じ、解析は破綻する。これに対し、本研究では先のリンクリングアルゴリズムと擬似動解析手法を組み合わせることで、膜面の有限要素解析における数値不安定性の問題が解消できることを明らかにした。以下に簡単な解析事例をひとつ紹介する。

図2は4頂点で支持され、自重によりたわんでいる方形膜面を示したものである。ここでは、この膜面の中央部に集中荷重Pを作用させた場合の変形形状を有限要素法により求めてみる。手順としては、1) まず、自重のみが作用した場合の釣合い形状を求める、2) 1)で求めた解を初期形状として、集中荷重Pが作用した場合の変形形状を求める、という2段階で解析を行う。リンクリングアルゴリズムを組み込んで解析を行った場合の結果を図3に示す。膜要素には6節点の三角形要素を用い、これ

にリンクリングアルゴリズムを組み込んで解析を行っている。集中荷重  $P$  の増加に伴い、中央部と4頂点を結ぶ線上の形状が変化していく様子が観察できる。一方、図4は同じ解析を通常の膜要素で行った場合の結果である。この場合、解析手順の1)自重のみが作用した場合の釣合い形状を求める、の段階で既に解析が破綻し、有意な結果を得ることができない。一般に膜構造物の大変形解析には深刻な数値不安定性が伴うが、本例が示すようにリンクリングアルゴリズムを用いることによって不安定性を効率的に回避することが可能である。なお、リンクリングアルゴリズムを用いた場合の安定性は、剛性マトリクスの正定値性に起因していることが明らかになっている。

[参考論文]

K.Nakashino, M.C.Natori, "Three-Dimensional Analysis of Wrinkled Membranes Using Modification Scheme of Stress-Strain Tensor," AIAA Journal (to be published). など

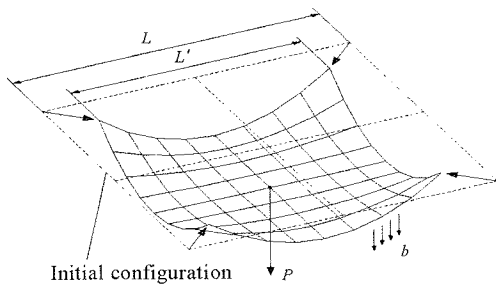


図2. 4頂点で支持された方形膜面

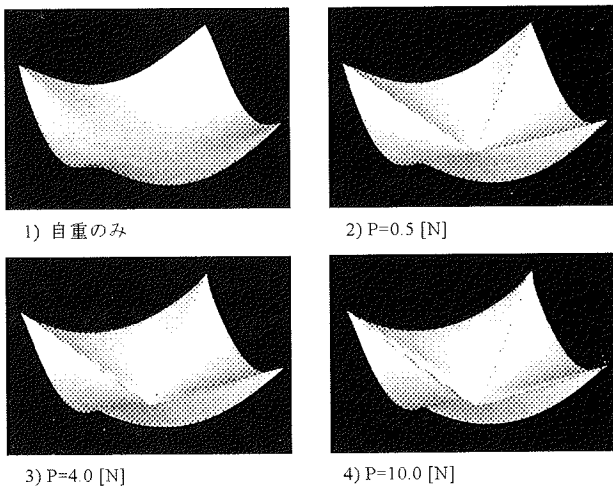


図3. リンクリングアルゴリズムによる解析結果

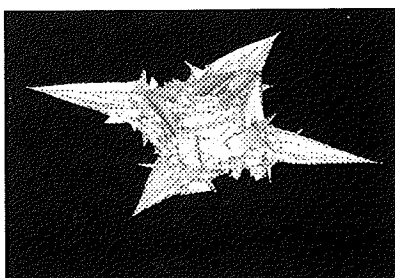


図4. 通常の膜要素を用いた場合の解析結果

### 膜面に発生する kinking の数値構造解析

膜面は非常に柔軟な構造要素であり、トラス構造やシェル構造等のリジッドな構造物には見られない、いくつかの特徴的な構造応答がある。そのひとつがリンクルの発生であることは先に述べた。しかし、膜面に特徴的な構造応答はリンクリングのみではなく、もうひとつ興味深い構造応答として kinking (深い折目) の発生がある。例えば、細長のゴム風船の両端を持って折り曲げると、ゴム風船の表面には深い折目が生じる。また、球形の空気膜構造に集中荷重を加えると、載荷点を中心として放射状に数本の折目が発生する。図5は半球形の空気膜構造の頂点に集中荷重を載荷した際の変形形状を有限要素解析により求めた結果である。荷重の増加に伴い、kinkingの本数や発生パターンが変化しようすが観察できる。本解析では、kinkingの本数が、ある荷重値を超えると突然変化することが確認されており、この現象が分岐・座屈問題に深く結びついていることを示唆している。ここで紹介した解析例には未だ問題点も多く、現段階では、実際の物理現象としての kinking を計算機上で再現できるまでには至っていない。現在は kinking を忠実にシミュレートできる数値解析法を模索中の段階である。図6は、剛性マトリクスが特異となる点において固有値解析を行い、発生する可能性のある kinking パターンを抽出したものになっている。図に示すように二つの異なる kinking パターンが得られており、この現象が本質的に分岐現象であることを裏付ける結果となっている。

[参考論文]

K.Nakashino, M.C.Natori, "Finite Element Analysis of Flexible Membranes with Deep Folds," Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Computation of Shell & Spatial Structures, Salzburg, Austria, 1-4 Jun, 2005. など

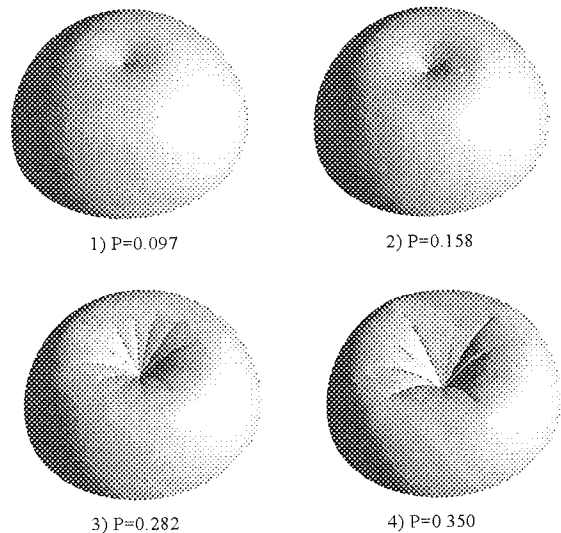


図5. 集中荷重を受ける半球形膜面

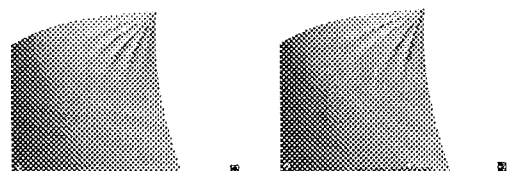


図6. 抽出された異なる kinking パターン