

平成21年 5月30日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18760088

研究課題名（和文） 膜面に生じる kinking の構造特性に関する基礎研究

研究課題名（英文） Fundamental Study on Structural Characteristics of Membrane Kinking

研究代表者

中篠 恭一（NAKASHINO KYOICHI）

東海大学・工学部・講師

研究者番号：60408028

研究成果の概要：膜面に発生する特徴的な構造応答である kinking（深い折目の発生）に関して、有限要素法を中心に、その構造特性を考察した。本研究では、有限要素法の他、多粒子系モデルによる膜面の構造解析も行い、膜面接触判定およびダイナミクス解析のための計算コードの開発を完了した。また、具体的な解析対象として、パラシュート開傘過程、次世代型圧力気球の膨張時形状解析を行い、数値解析コードの安定性を確認するとともに、上記解析対象の物理実験も行い、数値解の妥当性について確認した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	600,000	0	600,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	150,000	2,350,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：有限要素法・膜構造物・張力場

1. 研究開始当初の背景

膜面は軽量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して、人類にとっても馴染みの深い構造部材となっている。近年では、大型ドームに代表される大空間構造物や、果ては宇宙構造物にまで膜面が利用されるようになってきており、膜面の構造応答を効率的かつ的確に予測する解析手法を確立することは、計算力学分野における重要な課題のひとつであると考えられる。

ところで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。そのひとつは、リンクル（しわ）の発生であり、近年有限要素法を用いたリンクル解析に関して多くの研究報告が寄せられている。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1）。本研究では、膜面に発生するこれ

らの折目を **kinking** と呼称する。膜面のリンクル解析に関しては、有限要素法を中心に数多くの研究が報告されているが、上述の **kinking** に関する研究事例は研究開始当初、全く報告事例がなく、その状況は現在も続いている。本研究は、以上のような背景のもと、膜面の **kinking** 現象に関して考察したものである。

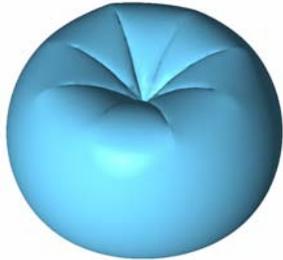


図 1. 球形膜面に生じる **kinking**

2. 研究の目的

第 1 項で述べたように、膜面に発生する **kinking** の基本的な構造特性を把握することが本研究の目的である。そのための解析手法として、本研究では 3 次元の非線形有限要素法を用いる。より具体的には、下記の 3 点を本研究の目的として掲げる。

- (1) 膜面の **kink** 部周辺では膜面同士の接触が生じる場合が多い。接触解析に関しては多くのアルゴリズムが存在するが、膜面の接触問題に対して、どの手法が効率的であるかは明らかではない。そこで、本研究では既存の接触解析技術を広範に調査し、膜面の有限要素解析に対して最適なアルゴリズムの選定を行う。
- (2) 前述の修正スキームを利用すると、膜面に **kinking** が発生するようすを現時点でも一応は再現できる。しかしながら、**kinking** 発生箇所が有限要素メッシュに大きく依存する、という深刻な問題がある（この点については、研究計画で詳述）。そこで、本研究では通常とは異なる離散化手法を採用することによってメッシュ依存性の問題を解決する。
- (3) 構造力学の観点から言えば、**kinking** の発生は分岐現象と強く結びついている、と考えられる。例えば、前頁の図 1 を例にとると、**kinking** の本数は荷重の増加に伴って変化し、さらに、その発生箇所や本数は膜面の初期不整量にも大きく左右されると考えられる。そこで、本研究では、座屈分岐理論の立場から **kinking** の構造特性の解明を図る。

3. 研究の方法

前述の通り、本研究着手時においては、**kinking** 現象を有限要素解析によって考察し、さらに数理的立場から、その発生メカニズムを捉えることを研究目的としていた。なお、通常の有限要素法を用いた場合、**kinking** 発生箇所が有限要素メッシュに依存する問題がある。そのため、本課題の研究計画ではメッシュ依存性の問題の解決を優先的に解決する予定であった。

しかしながら、その後 **kinking** 現象を把握するためには、メッシュ依存性の問題に加え、**kinking** を時間依存の現象として考えることが不可欠であるとの観点に立ち、研究着手時に完成していた独自計算コードにダイナミクス解析の機能を付与し、膜面の非線形動解析を通じて **kinking** 現象を考察することとした。

同時に有限要素法の他、膜面のモデル化によく利用されている「多粒子系膜モデル」に基づいた計算コードも開発し、「多粒子系近似モデル」を用いて、第 2 項 (1) の膜面接触問題に関して研究を行った。なお、多粒子系膜モデルとは、図 2 に示すとおり、本来は 2 次元連続体である膜面を集中質量とバネで置き換えたモデルとなっている。集中質量によって膜面の慣性力を、バネによって膜面の弾性特性を模擬してダイナミクス解析を行う手法である。

また、**kinking** が支配的となる解析事例として、1. パラシュートの開傘ダイナミクス、2. 柔軟インフレータブル・エアロシェル（再突入回収システム）のダイナミクス、3. 次世代型圧力気球の膨張時形状の解析、の 3 例を対象に数値解析を行った。

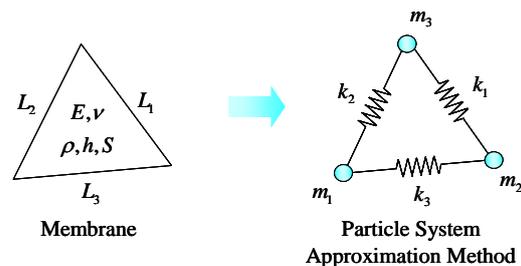


図 2. 多粒子膜モデルの概念図

以上から、本課題の研究方法は以下の 3 点に要約できる。

- (1) 「有限要素法による膜面の非線形動解析」

膜面の大変形構造解析に関しては、静解析・動解析の双方とも、確立された手法は現在のところ存在していない。本研究では、静解析に関しては、研究着手時に完成していた独自計算コードを用いたが、これに動解

析の機能を付与して膜面のダイナミクス解析を行った。有限要素法における動解析のための時間積分スキームには、Newmark- β 法が一般的に用いられているが、非線形問題に関しては十分な安定性が得られず、解析が困難となる。この理由から、膜面のダイナミクス解析に関しても、過去の研究事例は少なく、時間積分スキームにHHT- α 法、Energy Momentum法を利用した2例のみが報告されているにとどまる。本研究では、計算効率・数値安定性の両者を勘案し、時間積分スキームにGeneralized- α 法を採用して非線形動解析を行った。Generalized- α 法を用いた膜面ダイナミクス解析自体、過去に報告例がないため、解析手法自体にも新規性のあるものとなっている。

(2) 「多粒子系膜モデルによるダイナミクス解析」

本研究では、有限要素法による解析の他、膜面のモデル化によく用いられている多粒子系膜モデルに基づく解析コードも開発して、膜面のダイナミクス解析を行った。また、本解析においては、膜面同士の接触を考慮できるアルゴリズムを組み込み、膜面の接触解析も行った。

(3) 「パラシュート開傘過程解析・柔軟インフレーターブル・エアロシエルのダイナミクス解析・次世代型圧力気球の膨張時形状解析」

kinkingが支配的となる解析事例として、上記3例を取り上げて、多粒子系膜モデル、および有限要素膜モデルを用いて解析を行った。パラシュート開傘過程は、多粒子系モデルを用いて、接触解析を取り入れた解析を行った。また、エアロシエルのダイナミクス解析に関しては、

(1)項の結果を受けて、有限要素法による動解析を行った。次世代型圧力気球の膨張時形状解析は、有限要素法による静解析となっている。いずれの事例に関しても、数値解析結果を対応する物理実験と比較して、解析の妥当性について検討した。

4. 研究成果

(1) 「有限要素法による膜面の非線形動解析」

Generalized- α 法の時間積分スキームは時刻 t_n における有限要素各節点の変位、速度、加速度をそれぞれ $\mathbf{u}_n, \mathbf{v}_n, \mathbf{a}_n$ と置いた場合、次式によ

って表される。

$$\mathbf{u}_{n+1-\alpha_f} = (1-\alpha_f)\mathbf{u}_{n+1} + \alpha_f\mathbf{u}_n$$

$$\mathbf{v}_{n+1-\alpha_f} = (1-\alpha_f)\mathbf{v}_{n+1} + \alpha_f\mathbf{v}_n$$

$$\mathbf{a}_{n+1-\alpha_m} = (1-\alpha_m)\mathbf{a}_{n+1} + \alpha_m\mathbf{a}_n$$

上式のパラメータ α_m, α_f の選定にはある程度の任意性があるが、解析対象の問題が線形問題である場合は、数値減衰やスペクトル半径、あるいは安定性や精度を勘案して、適当な値を決定することができる。しかしながら、膜面のような柔軟構造物の非線形解析に対して、どのようなパラメータ値が適当であるのか、その選定の基準となる理論は現在のところ確立されていない。そこで、本研究では、パラメータ α_m, α_f が非線形問題に対してどのような影響を与えるのか、という点に注目して解析を行った。

図3は矩形膜面に重力のみを作用させた場合の動解析結果の1例である。一般にこのような動解析では、膜面周囲に抵抗力を生じさせる媒体(気体・流体等)がある場合は、数値計算が安定化する傾向があるが、本研究では、パラメータ α_m, α_f が安定性に与える影響も調査するため、膜面には重力以外の外力は一切与えていない。

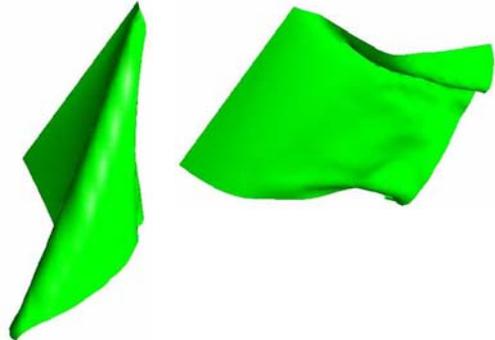


図3. 矩形膜面のダイナミクス解析

なお、本解析事例に関しては、解析結果に対して α_m の影響は殆ど見られず、 $\alpha_f \geq 0.9$ の範囲において、膜面代表点の変位がほぼ一致したため、 $\alpha_f \geq 0.9$ という条件が上記のダイナミクス解析に対して有効であるとの結論を得た。ただし、他事例に関しても詳細に調査した上でパラメータ選定を行う必要があり、本件に関しては引続き研究・考察を行っていく予定である。

(2) 「多粒子系膜モデルによるダイナミクス解析」

本研究では、多粒子系膜モデルに接触アルゴリズムを組み込んで、その有効性に関して検討を行った。図4は、パラシュートの開傘途中過程の解析結果であるが、接触アルゴリズムにより、膜面同士の「すり抜け」現象(self-penetration)が発生していないことが確認できる。

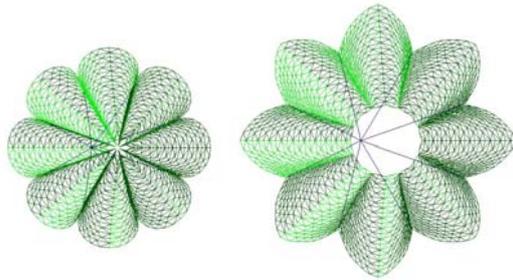


図4. パラシュートの開傘ダイナミクス

(3) 「パラシュート開傘過程解析・柔軟インフレータブル・エアロシエルのダイナミクス解析・次世代型圧力気球の膨張時形状解析」

kinking が支配的となる解析事例として上記の3事例に関して、数値解析を行い、その結果を物理実験と比較・検討した。

○パラシュート開傘過程解析

図4にあるように、多粒子系膜モデルを用いて、パラシュート開傘過程解析を行った。図5は、風速をパラメータにとり、パラシュートの最大衝撃力について数値解析と物理実験との比較を行ったものである。

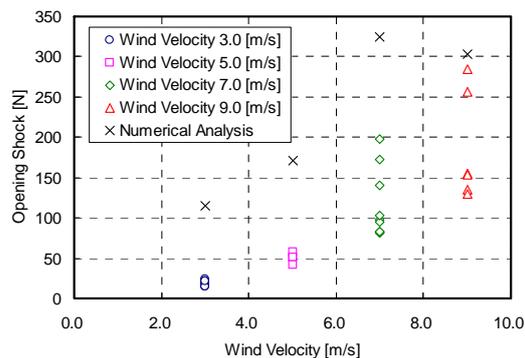


図5. パラシュート最大衝撃力の比較

上記グラフから明らかなように、物理実験に関しては未だ再現性に問題があり、同一条件下においても最大衝撃力にかなり大きなばらつきが見られる。しかしながら、数値解析

結果とはオーダー的に一致する傾向を見せており、本解析の有効性が確認できる。

○柔軟インフレータブル・エアロシエルのダイナミクス解析

柔軟インフレータブル・エアロシエルは、現在 ISAS/JAXA を中心に開発されている再突入回収システムであり、大面積の膜面を展開して空力加熱を避け、緩降下・軟着陸を行う回収システムである。現在までの風洞試験や大気球を利用したの降下実験等が行われているが、構造解析に関しては軸対称性を考慮した多粒子系膜モデルの解析が行われているのみで、有限要素法による詳細な数値解析は行われていない。

本研究では、(1)項で得られた結果をもとに、Generalized- α 法のパラメータ選定を行い、同回収システムの動解析を行った。図6は、エアロシエルの軸方向に一樣流を与えた際の解析結果である。構造物、および外力条件ともに軸対称性を持っているにもかかわらず、エアロシエル構造体に非対称な変形が発生するとともに、トーラス部に kinking が発生している様子が確認できる。このような変形は風洞試験においても観察されており、今後、定量的な比較、および非対称変形・kinking 発生メカニズムについて考察する予定である。

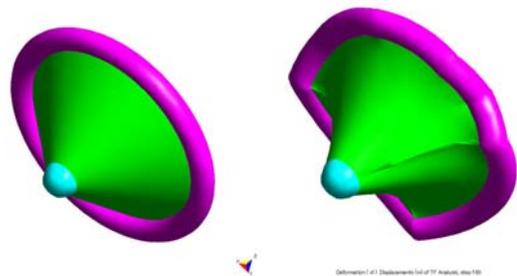


図6. エアロシエルのダイナミクス解析

○次世代型圧力気球の膨張時形状解析

次世代型圧力気球は高度 30km 以上を長期間に渡って飛翔する構造物として現在、ISAS/JAXA を中心に開発が進められている。同気球は、膨張時、ゴアフィルムにリンクルを発生させることで、フィルム応力の大幅な緩和を実現しており、将来の宇宙観測システム・無重力実験システムとして有力視されている。次世代型圧力

気球のコンセプトが学会で発表されるや否や、NASA がいち早く本システムに関心を持ち、現状では NASA においても同一形式の気球開発が行われている。次世代型圧力気球は、その構造様式からリンクルを考慮した構造解析が必須であるが、現在までのところ、NASA においてはシェル要素を用いた有限要素解析が行われているのみで、リンクルを考慮した膜要素による解析は行われていない。

本研究では、研究代表者が開発した独自計算コードを用いて、次世代型圧力気球の膨張時形状について解析を行った。図 7 に解析結果の一例を示す。



図 7. 次世代型圧力気球の膨張時形状

また本研究では、圧力気球の設計パラメータとなっているフィルムゴア、境界線長さが、応力分布に与える影響についても考察した。図 8 がその結果である。グラフ横軸の Loosing Rate が、境界線長さに関するパラメータとなっている。同図をみると、Loosing Rate がある閾値を超えた時点でフィルム最大応力の大幅な急増がみられる結果となっており、今後の気球設計において、有用となる結果が得られたといえる。

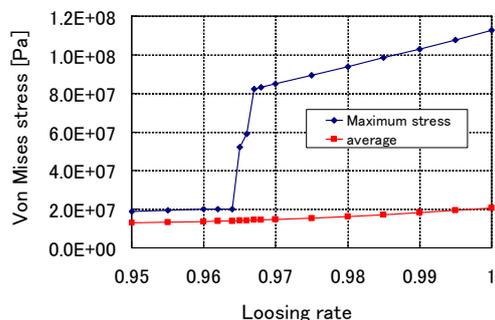


図 8. ゴア境界線長さと応力の関係

次世代型圧力気球に関しては、今後もゴア形状の最適化を行って応力緩和を行うための方策等について数値解析を通じて考察していく予定で

ある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① K. Nakashino and M.C. Natori, “Three-Dimensional Analysis of Wrinkled Membranes Using Modification Scheme of Stress-Strain Tensor,” AIAA Journal, No. 44, Vol. 7, pp.1498-1504, 2007. (査読有)
- ② T. Akita and K. Nakashino, “A simple computer implementation of membrane wrinkle behaviour via a projection technique,” International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.71, No.10, pp.1231-1259, 2007. (査読有)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 杉田俊哉、パラシュート開傘挙動に関する研究 — 初期縮傘形状が開傘衝撃に与える影響、第 24 回・宇宙構造材料シンポジウム、2008 年 12 月 12 日、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部
- ② 志村友章、Super Pressure Balloon の数値構造解析、第 52 回・宇宙科学技術連合講演会、2008 年 11 月 6 日、兵庫県立淡路夢舞台国際会議場
- ③ 志村友章、Lobed-pumpkin 型気球のフィルム応力分布に関する考察、第 24 回・宇宙構造材料シンポジウム、2008 年 12 月 12 日、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部
- ④ 杉田俊哉、パラシュート開傘時の荷重履歴に関する数値解析および実験的研究、第 52 回・宇宙科学技術連合講演会、2008 年 11 月 5 日、兵庫県立淡路夢舞台国際会議場
- ⑤ 中篠恭一、張力場理論に基いたスーパープレッシャー気球の有限要素解析、平成 20 年度・大気球シンポジウム、2008 年 9 月 26 日、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部
- ⑥ 杉田俊哉、パラシュート開傘挙動に関する数値解析および実験的研究、第 50 回・構造強度に関する講演会、2008 年 8 月 1 日、北九州国際会議場

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中篠 恭一 (NAKASHINO KYOICHI)

東海大学・工学部・講師

研究者番号：60408028

(2)研究分担者
無し

(3)連携研究者
無し