

膜面曲率を考慮した二重空気膜構造の形状決定

— 落とし糸を有する場合 —

河端昌也*1

梗概

落とし糸を有する二重空気膜構造は、隣り合う落とし糸の間隔が大きくなると内圧の作用によって膜面に生じる曲率が大きくなる。その様な場合には形状決定および構造解析時に膜面曲率を考慮することが構造特性を正しく評価するうえで不可欠と考えられる。本論文は膜面の曲率変化の考慮の必要性和その方法を示すことを目的とする。前半では、平板型二重膜を置換した6種類の解析モデルを用いて、インフレーションにより安定形態へ移行する過程の挙動をパラメトリックに比較し、後半では境界フリーとした平板型二重膜構造の形態成立条件に関する考察を行い、条件式を誘導する。

序

二重空気膜構造は膜材料を用いて気密性のある袋状の膜体を製作し、インフレーション等の方法で内外圧力差を与えることにより膜面に張力を発生させ、剛性を確保する構造方式である。落とし糸と呼ばれるつなぎ材を2枚の膜材の間に配置して膜体の形状を変えることも可能である。Frei Ottoは、その著書¹⁾の中で二重膜構造の概念を示し、模型やスケッチ(図-1)によりその様々な可能性を紹介している。落とし糸を非常に密にしたものは膜面の曲率を抑え平板状とすることも可能でエアマットと呼ばれる。

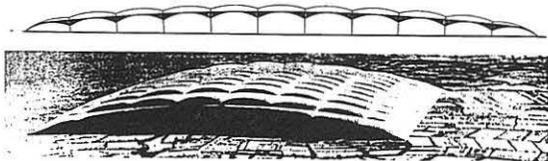


図-1

1960年代前半には、アメリカ航空宇宙局(NASA)においてこのエアマットを機体の翼や胴体として用いる大気圏再突入用宇宙船(Reentry Vehicle)の開発が行われ、研究が盛んに行われた。その様な流れの中で

二重膜構造の研究はエアマットに関するものが主流であった。^{2,3,4,5)}

一方、落とし糸の間隔が比較的大きな場合には内圧によって生じる膜面の曲率が大きくなり、初期形状や構造特性に与える影響が無視できなくなると考えられる。しかし膜面の曲率を考慮した二重膜構造に関する研究は少なく、構造的に未解決な問題も残されている。

例えば、落とし糸間隔を長くした結果インフレーション時に膜間厚の増大を招き、設計形状が得られなかったケースもある。二重膜構造の形状は、膜面に作用する圧力と膜張力や落とし糸張力のバランスにより決まる性質上、安定形態への移行時にこのような形状変化を伴う場合がある。

本論文では落とし糸を有する二重膜構造の形状決定について言及し、膜面曲率考慮の必要性和形態成立条件を明らかにしていく。

数値解析法

前記の問題の取扱いは、形態変化とこれに伴う外力と内力の変化を考慮することが不可欠な幾何学的非線形問題となる。本論文では幾何学的非線形性を考慮し

*1 横浜国立大学 工学部 建設学科 助手

た有限要素法によるシミュレーションを中心に二重膜構造の形状解析を行った。 落し糸を有する二重空気膜構造の釣合形状は、落し糸周りの膜面に応力の偏りが生じるため等張力曲面にならないと予想される。つまり本構造の形状決定には膜張力の偏りを考慮する必要がある。したがって幾何剛性と弾性剛性から全体剛性マトリックスを構成し、変位法によりインフレーションに伴う各節点の変位を求めることで形状解析を行う。

解析モデル

二重膜構造の形態成立条件を解明する足掛りとして下に示すような最も単純な板状のモデルを取り上げ、形状解析を行う。

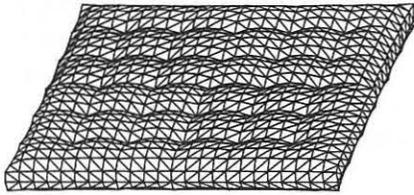


図-2 解析モデル概要

モデルの構成要素は図-3に示すように、中間節点の数と次元に応じてA~Fの3タイプを用いる。3次元モデルは、膜部分と落し糸材をそれぞれ三角形平面要素と線材要素で置換する。2次元モデル落し糸を含む断面を線材要素で置換する。線材要素は曲げ剛性を持たないものとする。

表-1に出発形状のパラメータを示す。曲率考慮型モデルは内圧に対する釣合状態での形状と応力が既知ではないため、出発形状は落し糸の通りの膜間厚 d_{20} と膜間厚が最大となる点での厚さ d_{30} が落し糸長さ d_{10} に対して0.2m大きくなるよう仮定した。したがって曲率考慮型モデルは、膜部分の形状が同じで落し糸長さが異なる出発形状となっている。内圧は4段階、境界条件はフリーと剛の2種類とする。また解を安定させるために、不安定状態である出発形状に対して微小の張力を与える。

表-2に解析諸元を示す。通常膜構造に用いられる膜材料は、ガラス繊維または合成繊維を縦糸および横糸として織った織布に樹脂コーティングを施したものが一般的で、異方性を示す。また膜材を圧縮側に変形させるような外力に対しては実質的に剛性が無いためリンクリングが発生する。解析ではこのような膜材料特有の性質を考慮して、材料を直交異方性弾性体、

非抗圧縮性として扱い、リンクリングが発生した場合にはその部分の応力を他に再配分するようにした。なお膜材料と落し糸の重量は、内圧力に対して微小なものとして無視する。

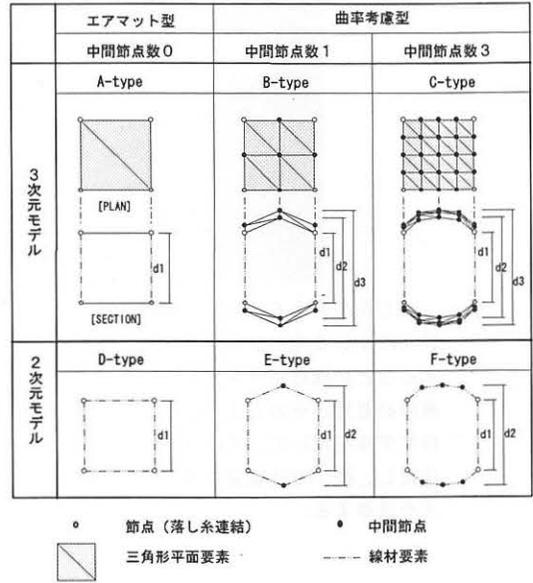


図-3 解析モデルの構成要素

表-1 解析パラメータ

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
落し糸間隔:b0	2.0m										
形落し糸長さ:d10	0.2m	0.4m	0.8m	1.2m	1.6m	2.0m	2.4m	2.8m	3.2m	3.6m	4.0m
状膜間厚:d20, d30	0.4m	0.6m	1.0m	1.4m	1.8m	2.2m	2.6m	3.0m	3.4m	3.8m	4.2m
d20/b0比	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1
内圧:p	500, 1000, 2000, 3000 kgf/m ²										
境界条件	境界フリー、境界剛										

表-2 解析諸元

膜材料C種 (PVCコーティング・ポリエステル繊維布)	(縦糸方向)		(横糸方向)
	引張剛性	59600 kg/m	39600 kg/m
ポアソン比	0.220	0.146	
面内剪断剛性	1000 kg/m		
落し糸	引張剛性 EA=1000000 kg		

3次元モデルによる形状解析

図-4、図-5に各モデルのインフレーション後の釣合形状を示す。エアマット型(A-type)の場合、垂直方向には上下膜面に作用する内圧力と落し糸張力のつりあい、水平方向には側壁面に作用する内圧力と膜面張力のつりあいが各々独立に成立して形状が安定する。

ゆえに出発形状から釣合形状への移行において形状がほとんど変化しない。曲率考慮型(B, C-type)の場合には、インフレーションに伴って膜面曲率が変化している。B-type、C-typeには断面形状に顕著な相違は見られず、落とし糸長さ最大膜間厚はほぼ一致している。膜張力分布は、フラット型がほぼ等張力状態であるのに対して、曲率考慮型では落とし糸の周囲の膜面に張力の偏りが見られる。応力の偏りは要素分割の精度が細かいほど大きくなっており、落とし糸周辺の膜面に応力集中が生じているのが分かる。

図-6は出発形状の膜間厚-落とし糸間隔比 $d2_0/b_0$ と釣合形状の $d2/b$ の関係を表したものである。境界フリー(a)とした場合には $d2/b$ はほぼ1.0以上となっている。換言すれば、出発形状で落とし糸間隔 b_0 を膜間厚 $d2_0$ より大きく設定しても、インフレーションの結果落とし糸間隔 b は膜間厚 $d2$ よりも小さくなる。これに対して境

界剛(b)とした場合の $d2/b$ は1.0以下の値と成り得る。これは境界部反力が落とし糸間隔と膜面曲率の変化を制限しているためと言える。

図-7は、 $d2/b$ -サグ比関係を表すグラフである。境界フリー(a)、境界剛(b)共に落とし糸間隔が小さくなるに従ってサグ比が減少する傾向は同じであるが、境界剛の方が内圧による影響を大きく受けている。

図-8は $d2_0/b_0$ と L/L_0 もしくは $d3/d3_0$ の関係を表したものである。縦軸の値が1.0に近いほど釣合形状への移行の時の形状変化が小さい。境界フリー(a)の場合 $d2_0/b_0$ が1.0未満ではスパンおよび膜間厚が大きく変動し、1.0~2.0では主に膜間厚が変動、2.0以上では膜間厚およびスパンの変動が10%以下となる。境界剛(b)の場合の関係は境界フリーの場合と同傾向であるが、落とし糸間隔 b_0 が大きくなるほど内圧に対する膜間厚 $d3$ の差が大きくなるという特徴を持つ。

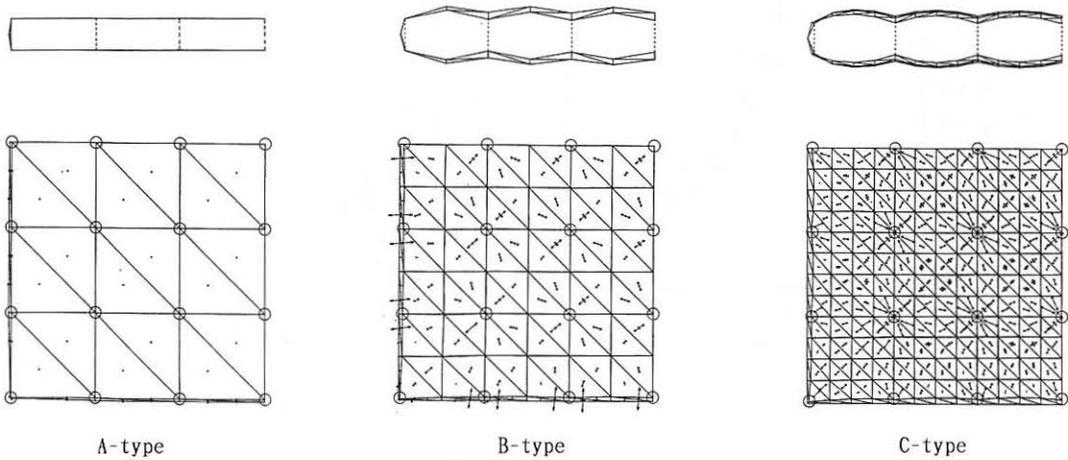


図-4 釣合状態における断面形状と膜面主応力分布 (境界剛、 $d2/b_0 = 0.5$)

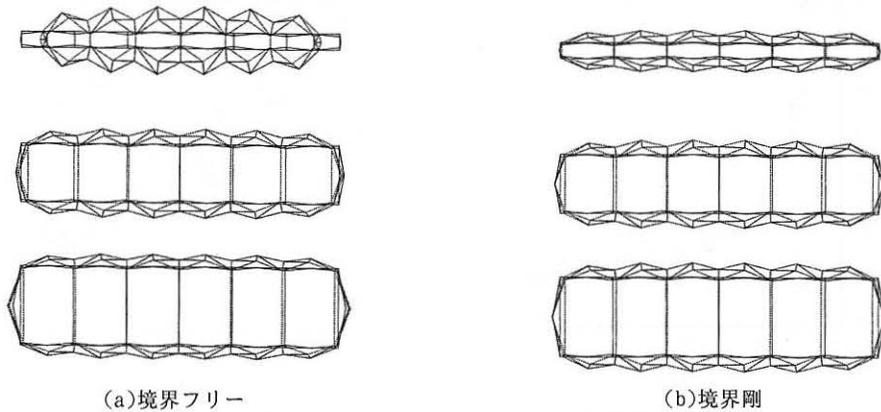
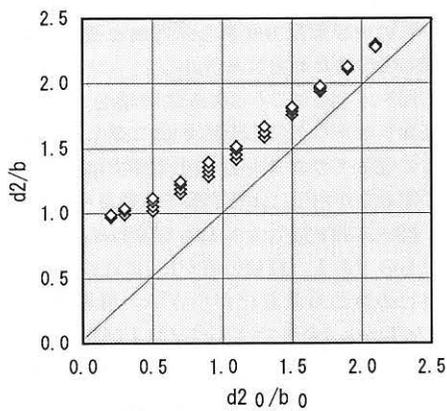
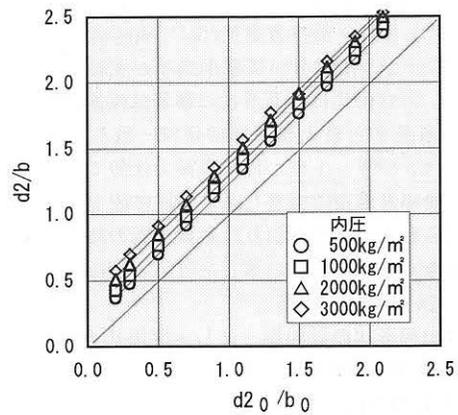


図-5 インフレーションに伴う形状変化 (B-type)

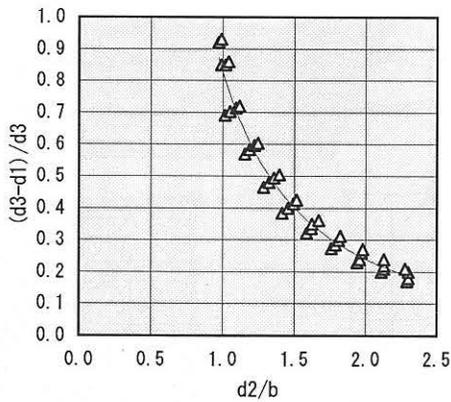


(a) 境界フリー

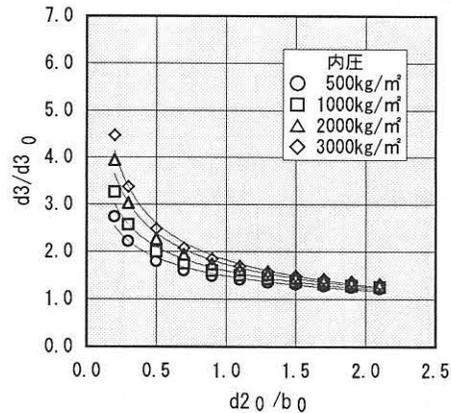


(b) 境界剛

図-6 $d2_0/b_0$ - $d2/b$ 関係 (B-type)

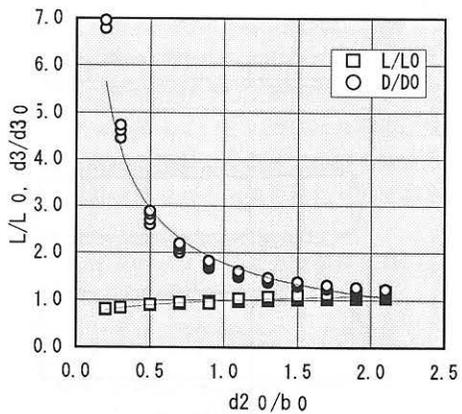


(a) 境界フリー

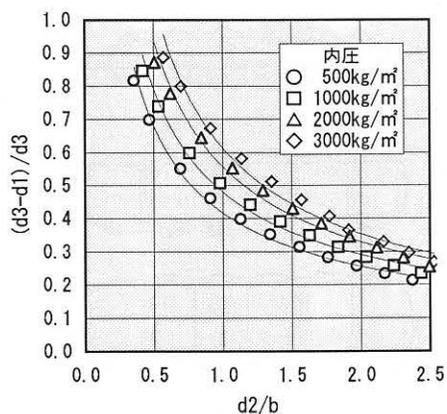


(b) 境界剛

図-7 $d2/b$ -サグ比 関係 (B-type)



(a) 境界フリー



(b) 境界剛

図-8 $d2_0/b_0$ - L/L_0 , $d3/d3_0$ 関係 (B-type)

2次元モデルによる形状解析

次に2次元モデルを用いた平板型二重膜の形状解析について述べる。2次元モデルは図-3に示すように落とし糸を含む断面をモデル化したものである。

図-9に各モデルの出発形状および釣合形状を示す。これらの形状はいずれも図-5に示した3次元モデルの断面形状と良好に一致している。

図-10、図-11、図-12はそれぞれ、境界フリーとした場合の $d2_0/b_0-d2/b$ 関係、 $d2/b$ -サグ比関係、 $d2_0/b_0-L/L_0, d2/d2_0$ 関係を表している。膜間厚-落とし糸間隔比 $d2/b$ が1.0以上となる傾向や、 $d2/b$ とサグ比の関係はより明瞭になっており、いずれも3次元モデルの結果と非常に良く合っている。

したがって形状が単純な二重膜構造は、落とし糸を含む断面を線材要素で2次的に置換したモデルを用いれば、膜面の曲率変化を考慮した形状解析が可能と言える。

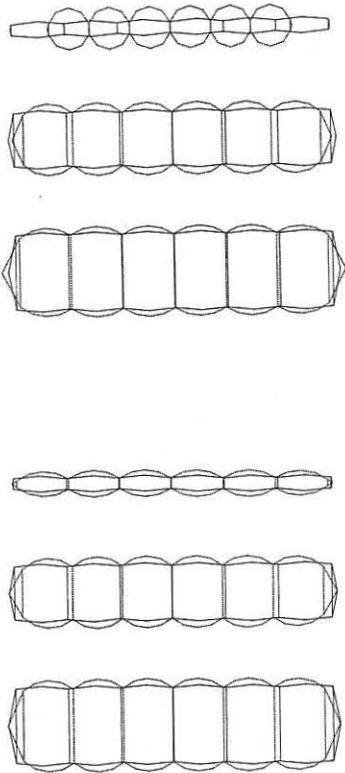


図-9 インフレーションに伴う形状変化

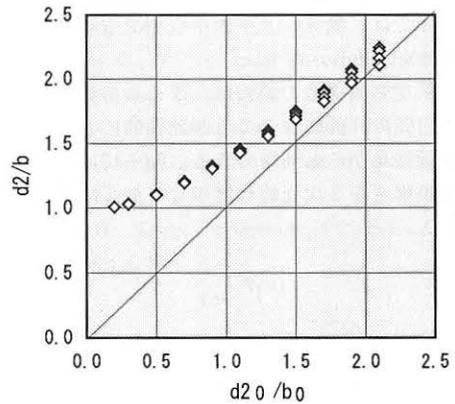


図-10 $d2_0/b_0-d2/b$ 関係
(F-type、境界フリー)

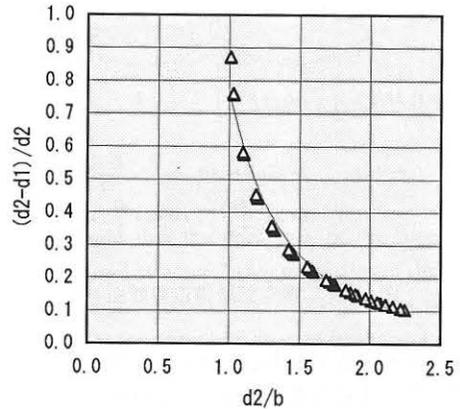


図-11 $d2/b$ -サグ比 関係
(F-type、境界フリー)

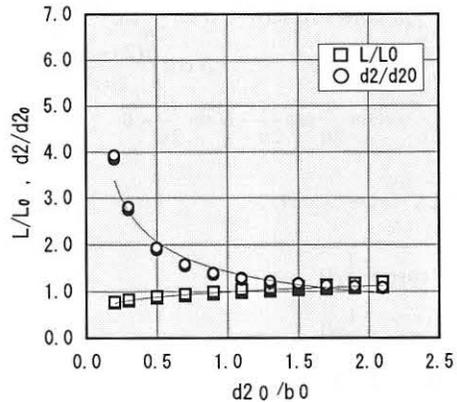
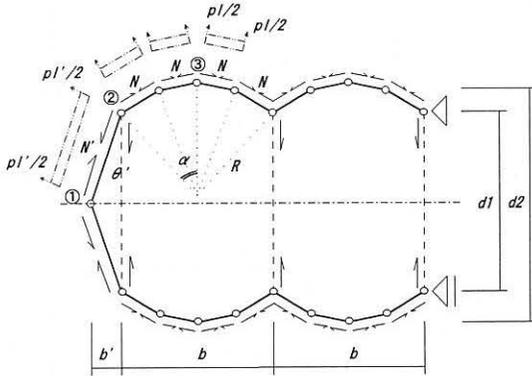


図-12 $d2_0/b_0-L/L_0, d2/d2_0$ 関係
(F-type、境界フリー)

二重膜構造の形態成立条件

本章では、境界フリーの平板型二重膜構造の形態成立条件を求める。

二重空気膜構造の膜面は、落し糸を含む断面内において円弧の一部になることが理論的にも3次元モデルの解析結果からも判断できる。図-13は境界フリーの二重膜構造を2次元的な簡単なモデルに置換したものである。



ただし、
$$2R \sin \alpha = b, R(1 - \cos \alpha) = \frac{d^2 - d_1}{2}$$
$$r = \sqrt{b^2 + \left(\frac{d_1}{2}\right)^2}, r \cos \theta = \frac{d_1}{2}, r \sin \theta = b'$$

図-13 二重空気膜構造の断面モデル

いま上膜面の曲率の中心に対する半開角を α とし、これを n 等分するとき、節点①、②の水平方向、節点③の鉛直方向に関してそれぞれ釣合式を立てると、

$$-\frac{1}{2} p l \cos \theta' + N' \sin \theta' = 0 \quad (1)$$

$$-\frac{1}{2} p l \cos \theta' - N' \sin \theta' - p R \sin \frac{\alpha}{2n} \sin \frac{\alpha(2n-1)}{2n} + N \cos \frac{\alpha(2n-1)}{2n} = 0 \quad (2)$$

$$p R \sin \frac{\alpha}{2n} \cos \frac{\alpha}{2n} - N \sin \frac{\alpha}{2n} = 0 \quad (3)$$

となる。(1)~(3)より、

$$R \cos \alpha = \frac{1}{2} d_1 \quad (4)$$

$$R = \frac{1}{2} d_1 \quad (5)$$

$$d_1^2 = d^2 - b^2 \quad (6)$$

の関係が導かれる。式(4)、(5)は上下膜面の曲率の中心

が一致することを示す。式(6)の左辺 ≥ 0 より、 $d_2 \geq b$ となることは明らかである。これらの関係は、図-6(a)と図-10に示した数値解析結果と良好に一致している。以上のような簡単な幾何学により膜間厚 d_2 が落し糸間隔 b よりも常に大きくなることが説明される。

アーチ形式の二重膜構造への適用

最後に、二重膜構造の一般的な形式として連続型アーチ(ヴォールト)の形状解析についてふれる。出発形状では上下の膜と落し糸の結節点がそれぞれ円弧上にあるものとし、内圧に対する釣合形状を求めた。(図-14)

平板型の場合と同様に、釣合形状時には膜間厚が落し糸間隔よりも常に大きくなって安定している。この性質と膜材料の伸びの影響のため落し糸間隔の大きなモデルではライズの確保が困難になっている。

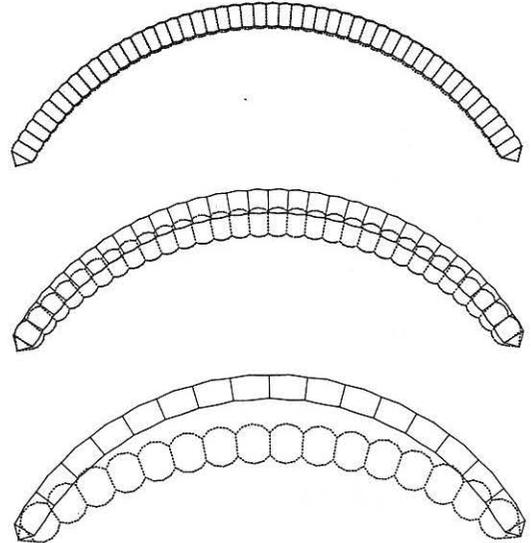


図-14 出発形状から釣合形状への移行

まとめ

境界条件をフリーとした平板型二重空気膜構造は、内圧力と膜面張力および落し糸張力がバランスし自己釣合系を形成する。このとき上下の膜間厚が落し糸間隔より大きく、上下膜面の曲率の中心が一致することが形態成立条件となる。 d_2/b_0 が2.0未満の場合には、釣合形状への移行の過程で膜面の曲率変化が大きいため、曲率変化を考慮した形状決定が必要である。

謝辞

本研究は平成5年度能村膜構造技術振興財団の研究助成を受けて実施された成果である。ここに能村膜構造技術振興財団に深く感謝の意を表します。

参考文献

1. Otto, F., "Tension Structures", vol. I and II, MIT Press, 1967, 1969
2. Leonard, R. W., Brooks, G. W., and McComb, Jr., H. G., "Structural Considerations of Inflatable Reentry Vehicles", NASA-TN D457, 1960
3. McComb, H. G., Jr., "A Linear Theory for Inflatable Plates of Arbitrary Shape", NASA TN, D-930, 1961
4. Stroud, J. W., Experimental and Theoretical Deflections and Natural Frequencies of an Inflatable Fabric Plate, NASA TN, D-931,
5. Haight, C. H., "Large Deflections of Circular Airmat Plates", AIAA J, Vol. 7,

FORM FINDING OF DUAL WALL AIR-INFLATED MEMBRANE STRUCTURE IN CONSIDERATION OF SURFACE CURVATURE

Masaya KAWABATA*1

SYNOPSIS

When the distance between drop cords is relatively large, it is thought that the curvature of the membrane surface caused by the internal pressure has a great influence on the shape and structural characteristics of dual wall air-inflated structures. In such cases, curvature of membrane surface must be considered in the process of form finding and structural analysis. The paper refers to the necessity to consider the curvature change in shape analysis.

Firstly, the differences of structural behavior of 6 types of flat dual membrane structure models are shown through shape analysis(inflation).

Secondly, the shape stabilizing conditions of flat dual membrane structure which has free boundary are represented by some equations.

*1 Assistant, Faculty of Engineering, Yokohama National University