

空気膜構造インフレート過程の3次元形状測定

川口健一^{*1}

高田雅之^{*2}

梗概

空気膜構造のインフレート時の膜面挙動は今日でもなお数値シミュレーションが困難な問題の1つである。本研究では、数値シミュレーションとの比較データとするために行った空気膜構造のインフレート・デフレート過程の3次元形状測定結果について報告する。測定方法は複数台のデジタルカメラを用いた静止画像による3次元測定である。内包分子数を増分パラメータとしたトラス要素による数値解析もあわせて行い、インフレート過程における形状変化を比較考察した結果についても述べる。

1. はじめに

空気膜構造は構造材として気体(空気)を用いるもっとも軽量の建築屋根構造システムであり、その歴史は1918年のF.W.Lanchesterの特許などにまでさかのぼることができるが(Herzog, T. 1976), 近年、航空宇宙の分野ではインフレーター構造として着目され(Beukers, A. et al. 2000), 建築土木の分野でも張力材と併用した新しい構造システムが提案されるなど(Luchsinger, R.H. et al. 2004), 再評価される気運にある。空気膜構造が他の構造システムと大きく違うもう1つの点は、特に正圧タイプの空気膜構造の建設過程においてインフレートと呼ばれる膨張緊張過程を経験する点である。インフレート過程においては、膜や補強ケーブルの自重と空気内圧とが微妙な釣り合い状態を保ったまま体積のみが増加していくという大変位過程を経験し、この間に膜面の反転やケーブルのキンク等が生じる。過去のわが国における大規模空気膜構造として、東京ドームや熊本ドームが挙げられるが、いずれの施工の際にも、そのインフレート過程における膜面および補強ケーブルの挙動が事前に問題にされた(Hangai Y, et al. 1988, 奥村他 1995)。結局、数値解析的なシミュレーションには困難が生じ、スケールモデルによる事前実験などによって確認しているが、実大の実挙動に関して数値解析的に事前を知ることは今日でも難しい問題となっている。

本研究では、空気膜構造のインフレート過程の数値解析手

法を開発することを最終目標としているが、本報告では、その際の基礎データとするために、空気膜構造のインフレート過程における3次元形状を測定する実験を行った結果について報告する。3次元測量には複数のデジタルカメラを用いた3次元測量手法を用いている。また、後半では、トラス要素によって空気膜構造をモデル化し、内包分子数を増分パラメータとした解析結果との比較を紹介する。不安定状態の挙動についてより詳細に知るため、直径6mの空気膜構造モデルを作成し、そのインフレート過程における3次元形状を測定することを試みた。

2. デジタルカメラを用いた3次元測量

写真データを用いたステレオ写真測量技術は古くからあるが、これらは高価で歪の少ない測量用のカメラ及びガラス乾板や、立体視から3次元座標を読み取るステレオコンパレータ等の特殊装置を必要とする高価で専門性の高いものであった。汎用性の一般カメラを用いた簡易な写真測量法は1980年代に開発され、一眼レフカメラとデジタイザ及びPCと特殊なプログラムがあればある程度の精度の測量が可能となった。近年ではデジタルカメラやPCの発展により、既製のソフト等も整備され、簡便な3次元測量が可能となりつつある。(日本写真測量学会, 1983)

現在ではその他にも非接触の3次元測量技術は様々な方法

*1 東京大学生産技術研究所 助教授

*2 東京大学大学院工学系研究科 修士課程

が提案されており、レーザーを用いた方法や擬似ランダムパターンを用いた方法等が膜構造等の測量技術として提案されている。しかし、空気膜等の立体的でかつ全体的な挙動を測定する場合には、いずれの方法もコスト的に高価なものとなる可能性が高いため、本研究では複数のデジタルカメラを用いた写真データによる3次元測量法を採用することとした。

2.1 予備実験

本研究ではまず予備実験として4台のデジタルカメラを用いて立体モデルの3次元測定を行った。写真データの解析には既製品の三次元解析ソフト (DIPP-MotionXD: DITECT 社) を用いた。このプログラムの場合、測定には基準となる立方体 (キャリブレーター) を写し込む必要があり、この条件を変えて下記の2ケースについて予備実験を行った。

ケース1. モデルよりも小さな立方体 (1辺100mm) を写真に写し込む。(図1(a))

ケース2. モデルを内包する形で大きな立方体 (1辺350mm) を写し込む。(図1(b))

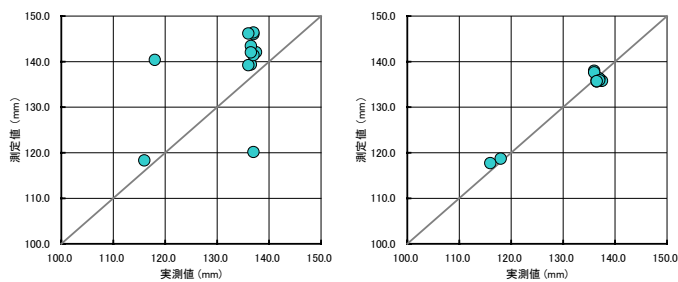
それぞれの実験の写真と結果を図1, 2と表1に示す。



(a) ケース1 (b) ケース2

図1: 予備実験に用いたモデル

図2, 表1より明らかなように、モデルを内包する形で大きな立方体を写し込む方が、精度が高いことが分かる。実測値と3次元測定値の差は、最大でケース1では22.37mmであり、ケース2では2.01mmである。実験実施上はケース2の方がわずかに準備の手間はかかるが、良好な測定値を得るために、本実験ではケース2の方法を採用することとした。



(a) ケース1 (b) ケース2

図2: 予備実験結果

表1: 予備実験結果

単位:mm		
	ケース1	ケース2
誤差の平均	8.1393	1.1131
誤差の標準偏差	6.0702	0.5153

2.2 実験モデル

測定対象のモデルとして直径6mの半球エアドームを製作した。(図3) 膜材料は立体裁断を行わない、一辺12mの塩化ビニルシート (ポリエステルネット補強) 平面膜を用いた。エアドームは十二角形の平面形状として計画し、ドーム形状を半球状に整形するために金剛ロープ (φ12mm) と園芸用ネット (110mm 格子) を用いて補強している。図4にセッティング風景、表2に主な使用材料を示す。

基準点 (キャリブレーター) は、モデルの外周部4箇所配置した塩ビパイプの柱頭と柱脚の計8点を採用した。このうち1点をX, Y, Z座標の原点として選び、基準値はXY方向6000mm角, Z方向2300mm高として設定した。

測定点として、膜面上49点, 底辺周りに12点の計61点に、膜面にステッカーを貼り付け、標点とした。図5に基準点とモデルの測定点を示す。

撮影方法は合図に従い4人の撮影者がそれぞれ同時に三脚にセットされたデジタルカメラのシャッターを押した。撮影に用いたカメラを表3に示す。

1回当たりの撮影回数は、実験開始から終了までの時間を7分と設定し、初期形状と最終形状で各1回、実験中は1分毎に6回の計8回とした。但し、本実験2の1回目デフレートのみ10分間計測したため、撮影回数は11回となっている。

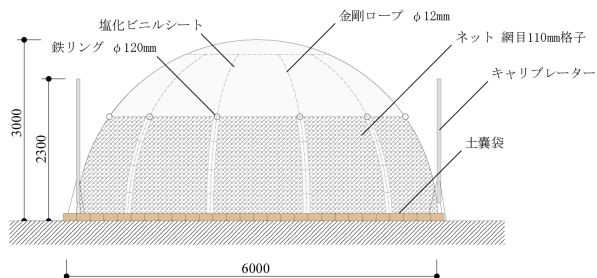


図3: モデル概要 (立面図)

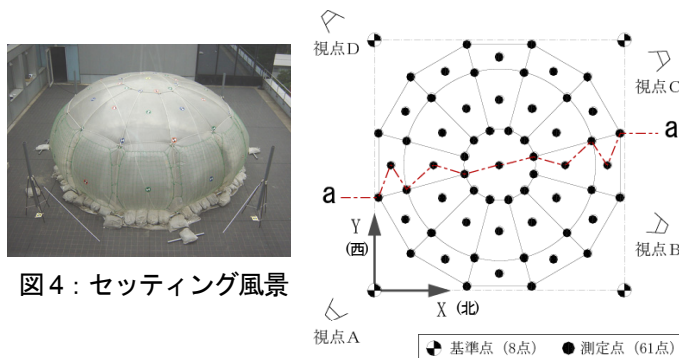


図4: セッティング風景

図5: モデル概要 (平面図)

表 2：使用材料

材料概要	
膜材料	塩化ビニル(12m x 12m, t=0.5mm) (ポリエステルネット補強)
ロープ	ナイロン製 Φ12mm
ネット	ポリエチレン、110mm目
ブローア	最大風量 15m ³ /min 最高静圧 118mmAq 電源電圧 100V

表 3：デジタルカメラ一覧

機種名	解像度
Sony Cyber-shot	2272 x 1704
Sony Cyber-shot	1600 x 1200
Ricoh Caplio	2272 x 1704
Canon Power Shot	2272 x 1704

2.3 本実験

本報告では、2004年4月9日(本実験1)と2004年5月18日(本実験2)に行った2回の実験結果について報告する。各々の実験条件を表4に示す。

本実験1では比較的風の強い条件の下、インフレート・デフレート各1回ずつ実験を行った。デフレートはブローアからの強制排気より行った。

本実験2は無風の条件の下インフレート・デフレート各2回ずつ行い、デフレート1回目はブローアを止め、給気孔からの自然排気により行い、10分で形状の変化が少なくなったと判断し終了と見なしている。2回目はブローアによる強制排気により行った。

インフレート実験は膜の初期形状に影響されることが予想される。本実験ではロープやネットによる整形効果が偏らないようにするため、全体を均等に広げ、周辺部分に余った膜面は、下側に折り返した初期状態としている。

表 4：実験条件

		本実験 1	本実験 2
日時		2004/4/9	2004/5/18
		13:00-15:00	10:00-12:00
場所		東京大学生産技術研究所 B棟7Fテラス	
気温 °C	ドーム内	25.0	29.3
	ドーム外	19.0	24.7
気圧 hPa	内圧	1015.0	1011.0
	外圧	1009.5	1008.0
風 m/s	風向	南西	無風
	風速	9.0	-

※風は気象庁の観測データより(東京・府中)

2.3.1 本実験 1



(a) 初期形状 (b) 途中形状 (c) 最終形状

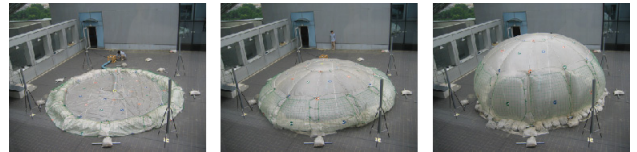
図 6：本実験 1 (インフレート)



(a) 初期形状 (b) 途中形状 (c) 最終形状

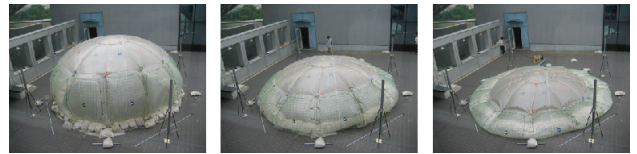
図 7：本実験 1 (デフレート)

2.3.2 本実験 2



(a) 初期形状 (b) 途中形状 (c) 最終形状

図 8：本実験 2 (インフレート 1 回目)



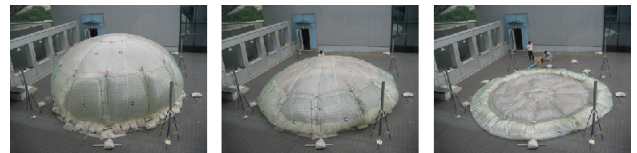
(a) 初期形状 (b) 途中形状 (c) 最終形状

図 9：本実験 2 (デフレート 1 回目・自然排気)



(a) 初期形状 (b) 途中形状 (c) 最終形状

図 10：本実験 2 (インフレート 2 回目)



(a) 初期形状 (b) 途中形状 (c) 最終形状

図 11：本実験 2 (デフレート 2 回目・強制排気)

2.4 実験結果

以上より得られた実験の画像データに対し、3次元測定を行った結果を以下に示す。図5に示す断面線 a-a' に沿った断面図による挙動の変化を図12-14に示す。

本実験1では、風が強かったため空気膜全体が大きく変形しながらインフレートされていく様子が良く分かる。本手法は風荷重を受けて変形した膜構造の形状測定にも有効であることが分かる。しかし、測定点が補強材や膜面のしわの影響で見え隠れするため、測定上の精度は低下する傾向がある。本実験では、測定点が隠れて撮影できなかった点については、測定点の位置を目視より推測して実測を行った。

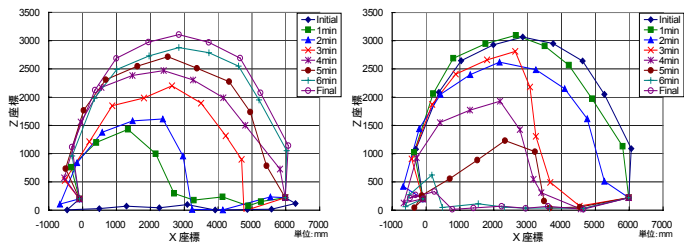
本実験2では、無風状態であったため、安定した対称性の高いインフレート・デフレート形状が得られており、実験は2回ともほぼ同様の経路をたどりながら変化していることが分かる。

また、座標算出結果の精度を検証するために、予め長さを測定した単管(1000mm)5本をエアドーム周辺に配置し、実測値と3次元測定値を比較した結果を表5に示す。表中の「補正あり・なし」とは、カメラのレンズ歪補正の有無を示している。この結果から、1000mmに対して平均で5.30mmの誤差

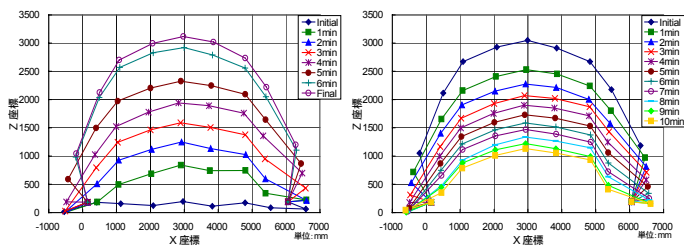
があり、長さに対する比として約1/200と、エアドームの規模と比べると十分な精度があると考えられる。今回の測定では、使用したデジタルカメラの機種が全て異なり、解像度やレンズの歪の度合いに差があるため、機種の一斉や、より高い解像度を使用すれば、更に誤差は小さくなると考えられる。

献11参照)。図15に解析モデルを示す。解析モデルは対称性から全体のうち1/4の部分を対象としている。補強ロープのモデル化はエアドームの設計と同じ長さを初期部材長とし、膜面のモデル化は、測定結果からおおよその曲率を算出し、トラス部材として初期部材長を決定している。

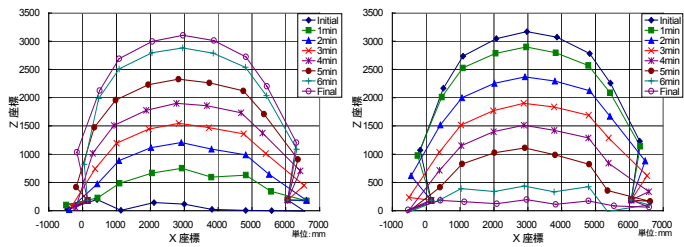
自重は膜材料やロープ、ネットを考慮し、10N/m²とした。また、補強ロープの接合部(12箇所)に用いた鉄リング(図中の●印部分の節点)の鉛直下方向にリングの重さ2Nを与える。大気圧は1008.0hPa、気温は27°Cとする。これらは、本実験2の条件を用いている。解析フローを図16に示す。



(a)インフレート (b)デフレート
図12: 本実験1の結果



(a)インフレート (b)デフレート
図13: 本実験2の結果(1回目)



(a)インフレート (b)デフレート
図14: 本実験2の結果(2回目)

表5: 精度検証結果

単位:mm		
	補正なし	補正あり
実測値	1000.00	1000.00
測定値(平均)	984.30	1005.30
誤差の標準偏差	16.7982	9.0038

※上表中の「補正」とは、決められた格子点を予め撮影し、レンズ歪補正を行うパラメータを設定する補正プロセスである。

3. トラスモデルによる解析概要

本実験結果を比較するため、川口等により提案されている内包分子数をパラメータとする空気膜構造のインフレート解析を実施した。解析の詳細についてはここでは触れない(文

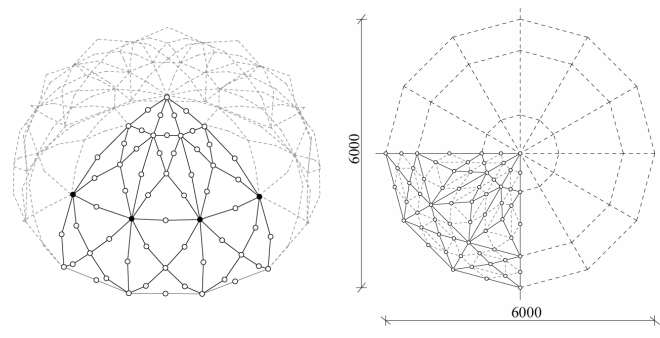


図15: 解析モデル

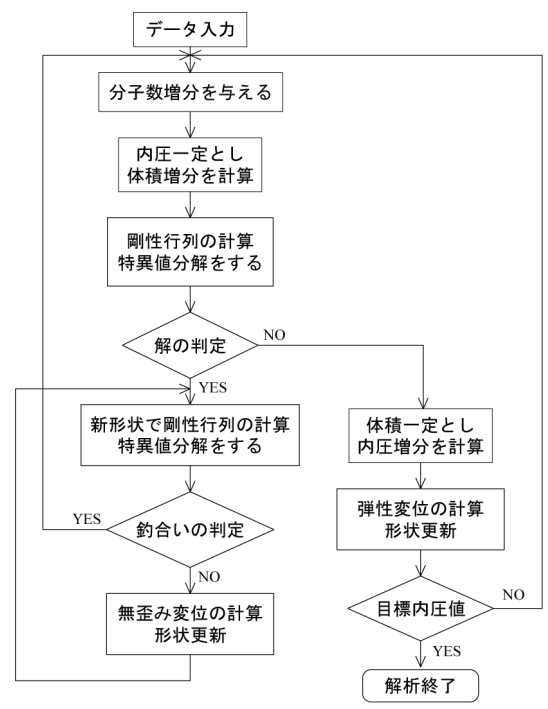
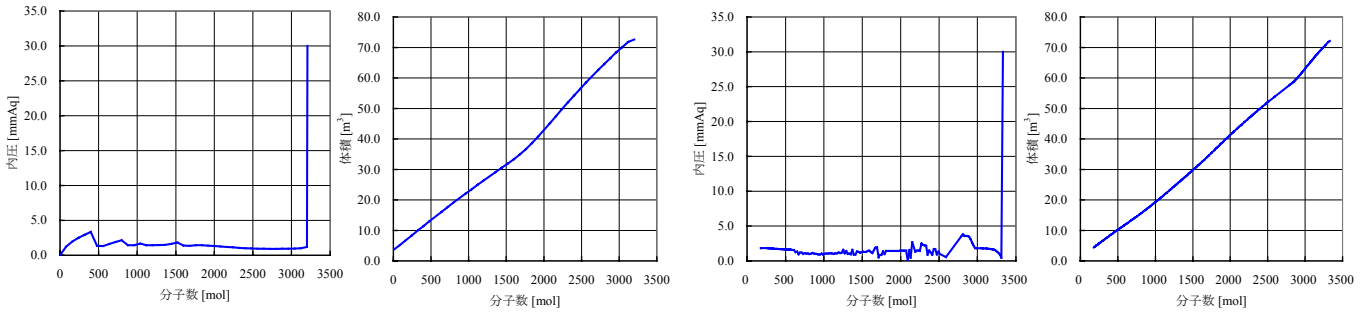


図16: 解析フロー

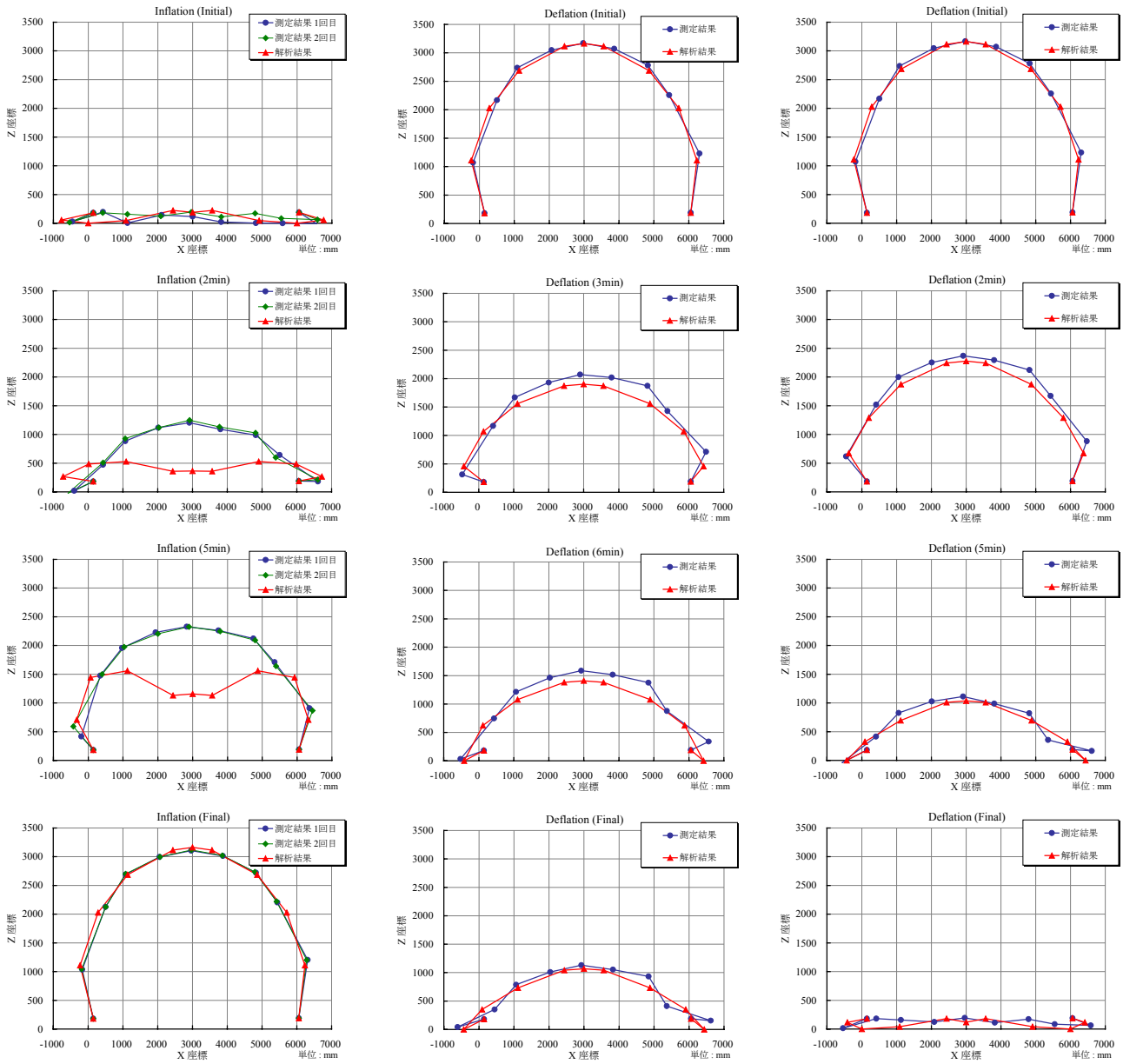
解析結果における分子数変化と体積、内圧変化のグラフを図17に示す。

外力の安定していた本実験2(2回試行)について上述の解析を行い、内包体積がほぼ等しいステップについて断面図を比較する(図18)。



(a) 内圧変化(インフレート) (b) 体積変化(インフレート) (c) 内圧変化(デフレート) (d) 体積変化(デフレート)

図 17 : 解析結果



(a) インフレート

(b) デフレート (自然排気)

(c) デフレート (強制排気)

図 18 : 実験結果と解析結果の比較

4. 考察

インフレーション過程とデフレーション過程を比較する。まず、デフレーション過程から比較すると、自然排気、強制排気に拘らず実験結果と解析結果が良く一致していることが分かる。これに対して、インフレーション過程は実験結果では中央部が先に上がっていく傾向があるが、解析結果では周辺部が先に上がっていくという傾向の違いが認められる。この違いは、本実験モデルにおいては初期状態で膜が周辺部で折り返されている部分があり、この部分に空気が行き渡りにくいという理由が考えられる。ブローの噴出し口はモデルの中央に配置していたため、折り返し部分の奥まで空気とその圧力が行き渡るためには、折り返しによる膜の重なり部分を徐々に持ち上げていく必要があり、膜面が随所で均等に内圧を受けるという解析上の仮定と異なる状態になっていると予想される。

デフレーション過程ではこのようなことが起きないため、実験結果と解析結果はよく一致している。

5. まとめ

中規模の空気膜構造モデルを作成し、デジタルカメラによる3次元測量を実施した結果について報告した。本測定方法は準備や実施が簡便である点が最大の特徴である。本実験で行ったような、比較的動きのゆっくりとした空気膜構造のインフレーションやデフレーション時の変形を測定するには、十分な精度(長さに対して1/200程度の誤差)を持って適用できることが確認された。実験に関しては、変形中の膜面やケーブルに生じる応力の測定が今後の課題であり、変形に追従できる低剛性の歪ゲージなどの開発が必要と考えられる。また、既に提案した分子数制御による数値解析をトラス要素を用いて行ったが、形状変化に関しては、安定的によくシミュレートできた。今後は膜要素を用いた解析との比較へ発展させる予定である。

謝辞

本実験の一部は文部科学省科学研究費補助金萌芽研究「インフレーション構造の形態解析」(平成13年度-15年度)の助成を受けて行ったものである。膜材料は太陽工業株式会社 小田憲史氏に提供していただいた。また、実験遂行にあたっては東京大学生産技術研究所機関研究員 鈴木悠介氏 及び 牧田瑞記氏をはじめとする東京大学大学院川口研究室学生諸氏、東京大学農学部学生 近江屋一朗氏から多大な協力を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) T.Hertzog, Pneumatic Structures, Crosby Lockwood Staples, 1976.
- 2) A.Beukers,O.V.Molder, .A.J.R.Vermeeren, Inflatable Structures in Space Engineering, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol.41, n.3 (n.134),pp.177-190, 2000
- 3) R.H. Luchsinger, A. Pedretti, P. Steingruber and M. Pedretti , Light weight structures with tensairity, Proc. of IASS 2004 Symposium Montpellier, Extended Abstracts, pp.80-81, CD-ROM TP014 8pages.,2004.
- 4) Y.Hangai, K.Kawaguchi, K.Okamura and H.Magara, Shape Finding Analysis of Air-Supported Membrane Structures in the Process of Inflation, Proc. of IASS Symposium, Innovative Applications of Shells and Spatial Forms, Vol.II, Bangalore, India, pp.657-666, 1988.
- 5) 奥村,中山,鈴木,佐々木,米山,増田,河端,棚木, ハイブリッド二重空気膜構造の開発 (その2)静的載荷実験概要および内圧実験集中荷重実験結果,日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) B1,pp.809-810,1995.
- 6) 黒木雅代,黒木二三夫,大変形を考慮した膜構造物の適正な風荷重評価について,日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) B1,pp.959-960, 2003.
- 7) 日本写真測量学会編, 写真による三次元測量 応用写真測量, 共立出版, 1983.
- 8) 呂品琦,川口健一,平面矩形張力膜のしわ発生に関する実験的研究,膜構造研究論文集' pp.49-55, 1999.
- 9) 松田浩,仲村政彦,山本晃,和田眞禎,川口健一,呂品琦,非接触型 3D 計測装置を用いた膜形状の計測, 膜構造研究論文集, pp.47-56, 2000.
- 10) 熊野史朗,藤野陽三,阿部雅人,吉田純司,松崎拓也,膜の動的変形を対象とした画像計測システムの構築, 膜構造研究論文集 pp.7-13, 2003.
- 11) 川口健一,金子雅彦,内包空気分子数制御による空気膜構造のインフレーション解析,膜構造研究論文集 pp.43-46, 2000
- 12) 「インフレーション構造の形態解析」平成13～15年度文部科学省科学研究費補助金研究成果報告書(全151ページ) (萌芽研究 課題番号 13875097 研究代表者 川口健一). 2004.

THREE DIMENSIONAL MEASUREMENT DURING INFLATING PROCESS OF PNEUMATIC STRUCTURES

Ken'ichi Kawaguchi *1

Masayuki Takata *2

SYNOPSIS

Numerical simulation of inflating process is still counted as one of the difficult problems at the design stage of the pneumatic structures. In this paper three-dimensional measurement of membrane configuration of pneumatic structures during inflation process is firstly reported. Three-dimensional coordinates of the points on the membrane surface are identified by analyzing the static digital images obtained from synchronized digital cameras. Then numerical analysis, using truss elements for membrane material, based on the molecule weight incremental method is also carried out and compared with the results of the measurement.

*1 Associate Professor, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

*2 Graduate Student, Department of Engineering, University of Tokyo