

可変形状トラスを用いた可動型構造物に関する研究

- VGTの基礎特性と開閉屋根式ドームの試作実験 -

井上文宏 栗田康平 内海良和
(本社東京建築事業部工事第一部)
諸戸竜一 古屋則之 汐川孝

Experimental Study on Adaptive Roof Structure Applying Variable Geometry Truss

- Trial design and scale model experiment of the doom with movable roofs -

Fumihiro Inoue Kohei Kurita Kazuyoshi Utsumi
Ryuichi Moroto Noriyuki Furuya Takashi Shiokawa

Abstract

This paper describes a movable structure equipped with VGT (Variable Geometry Truss) mechanism that enables the structure shape to be moved and changed attractively. The VGT is a truss structure incorporating an elastic actuator. By controlling the length of the actuator, it is possible to create various truss shapes. In this study, the development of the VGT structure and its ability to create a movable structure were investigated in detail. To grasp the basic technology of the VGT structure, structural and dynamic analyses of the VGT were carried out, and several movable structures were created. A retractable roof doom with VGTs was originally designed and a scale model of the roofs was manufactured. Then, the performances of completed model roofs were experimentally verified. At a result, useful data were obtained on the VGT actuator, movable mechanism and control system, and the feasibility of a movable structure using VGTs was confirmed.

概 要

構造の一部に可動機構を取付け、複雑な動きを可能にする機構の一つに可変形状トラスが挙げられる。可変形状トラスはトラス架構内に伸縮アクチュエータを備えた機構であり、伸縮長を制御することにより様々な形状変化が可能である。本研究では可変形状トラスの可動型構造物への適用・展開を目的とし、その要素技術の開発と適用可能性について検討した。基礎技術として可変形状トラスの運動学および動力学的解析手法の確立を行ない、様々な可動型構造物の提案、創作を実施した。実用化提案として可変形状トラスを用いた開閉屋根式ドームの試設計を行ない、その部分縮小モデルを実際に製作した。完成したモデルを用いて開閉屋根の可動実験を行ない、可動アクチュエーター、可動構造、制御システムについて良好な性能を検証でき、実設計に向けた多くのデータを取得することができた。

1. はじめに

近年、建築構造物に対する用途が多様化し、構造の一部に可動機構を取付け、動く機能を持たせた巨大な構造物が多く出現し始めた¹⁾。船の往来に開閉する橋梁、ドーム球場の開閉屋根、場面毎に変化する舞台装置や天井などが代表的な例と言える。それらの可動方法見ると、建物がレールの上を移動したり、ヒンジを中心に架構が回転する方法が主であり、決められたパターンに従った極めて単一的な動作によるものが多い。そこには動く機能は備えていても、構造自体の形状変化を見ることの面白さは表現されていない。

近未来の建築物には、もっと自由な動きを表現させて

はどうであろうか。可動機構に多くの自由度を持たせて建物に躍動感、柔軟性、さらには知能を持たせることも期待できる。周囲の環境に調和した形状に架構自身が変わったり、形状の変化がより高度な機能を実現することで、より個性的な空間を作り出すことも可能である。このようなより複雑な動きを可能にする可動機構の一つに可変形状トラス²⁾(Variable Geometry Truss 以下VGTと記述)が挙げられる。VGTは元々展開型宇宙構造物として開発が試みられたもので、宇宙空間における様々なミッションに対応できるため小型のアクチュエータ用いて構造自体を様々な形状に変化できるものである。地上では小さく畳み、宇宙空間では数倍の大きさとなって展開することができる。またVGTは適用構造物(Adaptive

Structure)として類似の平行リンク機構と共に様々な可動機器の中に取り込まれつつある。特に複雑な位置決めを遠隔で行なうことが要求されるシステムや外部の荷重や環境に合わせて構造物の形状を制御するシステムに適用が試みられている²⁾。しかし、VGTを利用した地上構造物への適用例は簡易な機構を除いて未だなく、特に大規模構造物の可動機構として利用された例は皆無である。

そこで本研究ではVGTの地上構造物への適用、展開を図ることを目的とし、その要素技術の開発と適用可能性について検討した。実用化提案として、VGTを用いた開閉屋根式ドームを設計し、可変屋根の構造的、動力学的な解析を実施した。またドームの部分縮小モデルを実際に試作し、可動性能を実験により検証した。本報ではVGTの基本特性、解析方法、実際の構造物への適用例、ドームの部分縮小モデルの実験結果について記述する。

2. VGTの特徴と解析法

2.1 VGTの構成と特徴

Fig. 1に示すようにVGTは伸縮アクチュエータとヒンジから構成されるトラス架構であり、伸縮長を制御することにより様々なトラス形状を作り出すことができる。Fig. 2に二次元のVGTを結合した梁材(a)の形状変化の例を示す。隣り合う垂直部材を共に伸ばすことで、パネのように伸縮する形状へと変化し(b)、また垂直部材の一つおきに伸ばすことで、梁材は弧を描くような形状へと変化する(c)。さらに任意に部材を変化させることで、目的に応じた形状へと変化(d)させることができる。

建築構造物にVGTを適用した場合の特徴としては、

- (1) 目的に応じた多様な形状の創作、設計が可能
- (2) トラス架構を常に形成することによる強度の確保
- (3) 伸縮部を架構内に有する簡易な構造を実現
- (4) 汎用アクチュエータの使用が可能
- (5) 高度な制御システムと接続することによる精度の確保などが挙げられる。一方宇宙構造物への利用とは異なり、VGTを地上構造物に適用するためには自重や地震力に代表される種々の外力の影響、またコストやメンテナンスに対する配慮も必要である。

2.2 VGTを用いた構造の運動解析

VGTを用いた構造物の運動解析には、VGTの伸縮長を与えることによって全体形状を決定する順運動解析と全体形状を予め与えてVGTの伸縮長を決定する逆運動解析の手法が挙げられる。前者は解析的に形状が求まるが、後者では形状自体が極めて冗長性の高い構造となるため、その解は一意に定めることは難しい。

(1) 順運動解析

Fig. 3にVGTの基本構成および構造全体の解析モデルを示す。各ユニットは2組の固定部材と伸縮アクチュエータから構成され、その構造全体は各VGTの固定部材1をシリアルに結合した多関節型リンクとして置き換えることができる。n個(n-2)のVGTが結合された構造

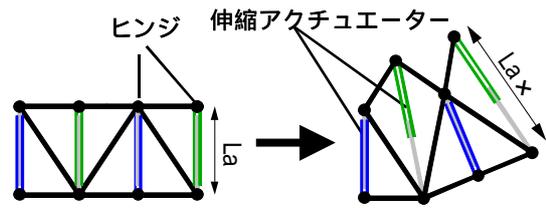


Fig. 1 VGTの基本構成と変化
Basic Component and Shape Changes of VGT

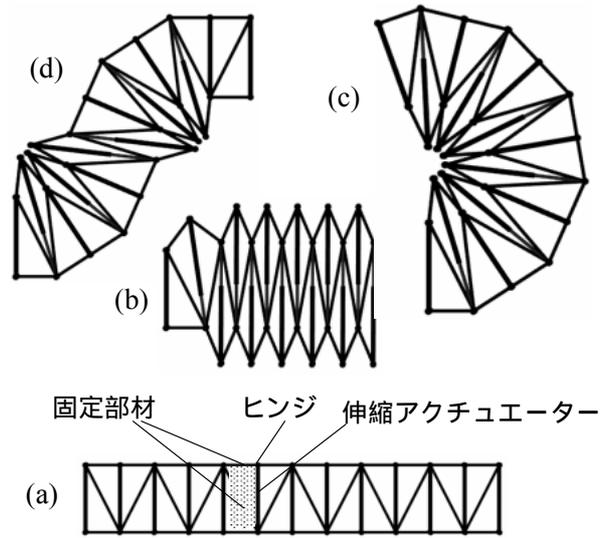


Fig. 2 VGTを用いた梁材の形状変化
Shape Changes of VGT Beam

の先端部 q_n におけるx、y座標は、その制御角 θ_j を用いると式(1)、(2)で示される。

$$q_{x,n} = l_0 \cdot \sum_{k=0}^n \cos \left(\sum_{j=0}^k \theta_j \right) \quad (1)$$

$$q_{y,n} = l_0 \cdot \sum_{k=0}^n \sin \left(\sum_{j=0}^k \theta_j \right) \quad (2)$$

制御角を与えることで容易にアクチュエータの伸縮長が求まり、構造の全体形状が一意に決定できる。しかし、構造を目的の形状に変化させるように各VGTの伸縮長を制御することは容易ではない。

(2) 逆運動解析

構造全体の時間的変化を考えると、式(1)、(2)は次のように表される。

$$\dot{q}_{x,n} = -l_0 \cdot \sum_{k=0}^n \left\{ \sum_{j=0}^k (\dot{\theta}_j) \cdot \sin \left(\sum_{j=0}^k \theta_j \right) \right\} \quad (3)$$

$$\dot{q}_{y,n} = l_0 \cdot \sum_{k=0}^n \left\{ \sum_{j=0}^k (\dot{\theta}_j) \cdot \cos \left(\sum_{j=0}^k \theta_j \right) \right\} \quad (4)$$

これらの結果をマトリクス形式で表すと、

$$\dot{q} = J \cdot \dot{\theta} \quad (5)$$

の関係が得られる。式(5)では $\dot{\theta}$ が独立した変数として表せるため、両辺を時間積分することにより θ を求めることができる。ただし、 J はヤコビ行列(2×n)を

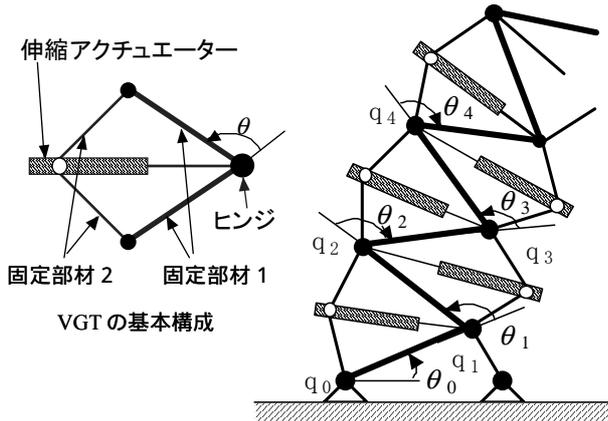


Fig. 3 VGTの基本構成と構造全体の解析モデル
Basic Component and Structure Model of 2-dim. VGT

表す。N>2のときJは正則ではないため逆行列が定まらず、求める解が無数に存在する冗長系となる。このような場合、一般にJの疑似逆行列式 $J^\#$ を考へることによって近似的な解を得ることができる。

$$J^\# = J^T \cdot (J \cdot J^T)^{-1} \quad (6)$$

本解析では疑似逆行列 $J^\#$ を用いて制御角 θ を数値的に求め、アクチュエータの伸縮長を定めている。

Fig. 4に片持ち梁の先端位置を順次移動させた場合の形状変化を示す。先端位置を基準として逆運動解析により各VGTの制御角を求め、梁全体の形状を随時決定した。一方、Fig. 5-(a)に弦材に伸縮アクチュエータを用いたVGT機構からなり、両端が支持された単純梁の形状変化を示す。Fig. 5-(b)では外側部材の伸縮長を変えず、内側部材のみの伸縮長を変化させた例であり、Fig. 5-(c)では外側および内側部材の伸縮長を共に変化させた例である。いずれも片持ち梁の支持部Aの制御角を変化させ、片持ち梁の先端が常に支持部Bに一致するように逆解析を行ない各VGTの伸縮長を決定した。(b)では梁材が大きく波打つような形状で変化し、(c)では梁材が拡大・縮小するような形状で変化することが分かる。梁材の両端が支持されていても極めて柔軟な動きが実現でき、かつトラス構造であるため必要な強度を維持している。このような形状解析とアクチュエータの制御手法を組み合わせることにより、用途に適した形状の創生や複雑な動きの制御を可能にした^{3),4)}。

2.3 VGTの動力学解析

VGTを実際に設計するには運動解析の他に、構造に作用する外力や構造の形状変化に必要な駆動力などの動的な解析が必要である。そこでFig. 3に示したVGTの構造モデルを多関節のリンク機構⁵⁾と仮定しニュートン・オイラー法⁶⁾による動力学解析を実施した。

Fig. 6-(a)にリンクiの解析モデルを示す。各リンクは1本の伸縮アクチュエータと3本の固定部材から構成され、伸縮長の変化に応じてヒンジ部 q_i を中心とし

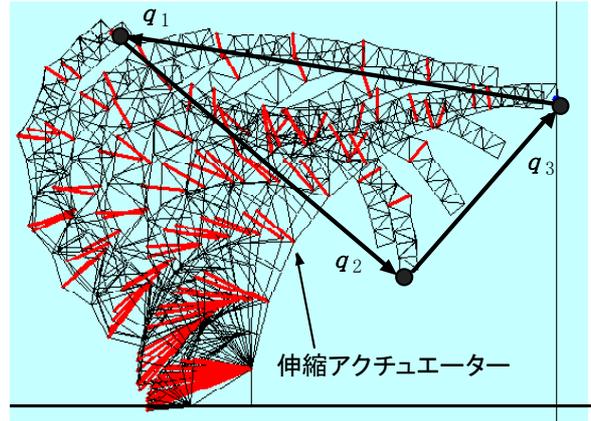


Fig. 4 VGTを用いた片持ち梁の形状変化
Shape Changes of Cantilever Structure

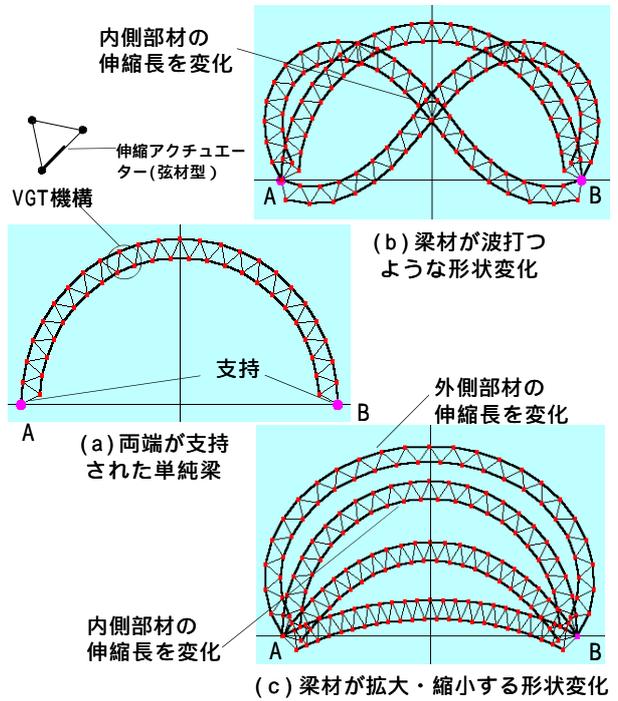


Fig. 5 両端が支持された単純梁の形状変化
Shape Changes of Simple Beam Supported Both Ends

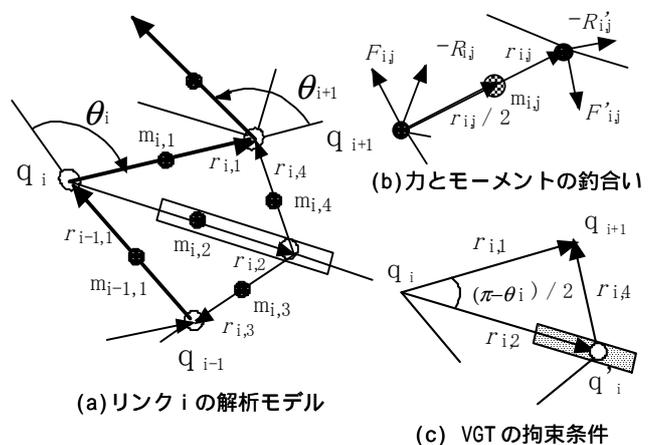


Fig. 6 VGTの動力学モデル
Dynamical Model of VGT

て回転する。これに伴い、各リンクの重心には加速度による力 $m_{i,j} \cdot a_{i,j}$ および回転モーメント $I_{i,j} \cdot \ddot{\theta}_{i,j}$ が作用する。ただし、 $m_{i,j}$ 、 $I_{i,j}$ は各リンクの質量および慣性モーメントを表す。

一方、各リンクに作用する力とモーメントの釣合いを考えると(Fig. 6-(b)), 各リンクの両端部に作用する反力 $F_{i,j}, F'_{i,j}$ は他のリンクから受ける外力 $R_{i,j}, R'_{i,j}$ と加速度による力および重力 $m_{i,j} \cdot g$ の和に等しい。また各リンクの重心周りに作用する外力のモーメントの和は、リンクの回転モーメントに等しい。これらの関係を式(7)および(8)に示す。

$$m_{i,j} \cdot a_{i,j} = F_{i,j} - R_{i,j} + F'_{i,j} - R'_{i,j} + m_{i,j} \cdot g \quad (7)$$

$$I \cdot \ddot{\theta}_{i,j} = -r_{i,j} \cdot (F_{i,j} - R_{i,j}) / 2 + r_{i,j} \cdot (F'_{i,j} - R'_{i,j}) / 2 \quad (8)$$

ここで伸縮アクチュエータを含むトラス機構の拘束条件に着目すると(Fig. 6-(c)), アクチュエータの伸縮長 r_i は三角形の余弦定理を用いて表現できる。それらを微分することにより、角加速度 $-\ddot{\theta}_i$ が求められ、リンク i の各動きを伸縮長の関数として表現できる。

各リンクに対して式(7)、(8)を計算することにより、リンク端部に生じる力を求めることができる。またアクチュエータに作用する力はリンクの両端部に生じる伸縮軸方向の成分から求められる。なお、上記の解析手法を用いた結果については、実験と合せて4.5節で説明する。また、これらの関係式の詳細については文献⁷⁾を参照されたい。

3. VGTを用いた可動型構造物の適用分野

VGTの要素である伸縮アクチュエータは、直接高度な制御システムと結合して使用できるため、極めて微細な制御から比較的単純な制御まで扱うことができる。その適用分野は幅広く、次のような利用例^{3), 4), 8)}が考えられる。以下にその概略を示す。

- (1)骨組み架構による可動施設
 - ・形状可変型の開閉屋根施設
 - ・可動屋根式パビリオン (Fig. 7)
- (2)応力や振動を目的とした制御装置
 - ・部材の緩和機構
 - ・構造の制振、免震機構
- (3)可動機構を有する設備機器、仮設構造物
 - ・形状可変型の足場(Fig. 8-(a))
 - ・音楽ホールの可動反射板(Fig. 8-(b))
- (4)各種の可動型モニュメント

4. VGTを用いた開閉屋根式ドームの試作実験

VGTを用いた構造物を設計、製作するにあたり、その基礎データを収集するため、屋根形状が花のように開き、各屋根面が任意の形状に変化できる半球状の開閉屋根式ドーム(以下、Flowering Dome と呼ぶ)への適用を試みた(Fig. 9)。また実構造物に対して部分縮小モデ

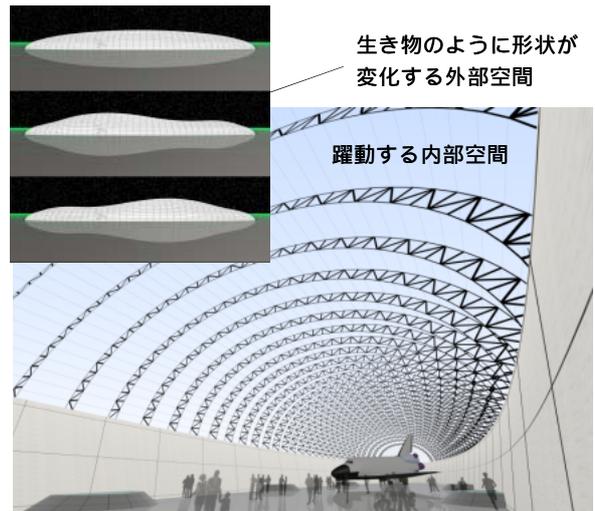
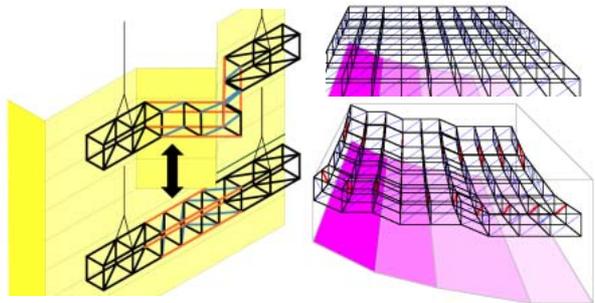


Fig. 7 波打つように屋根が可動する大型パビリオン
Waving Roofs on a Large Pavilion with VGT Structure



(a)形状可変型の足場 (b)音楽ホールの可動反射板

Fig. 8 可動機構を有する設備機器、仮設構造物
Examples of Movable Instrument and Temporary Material with VGT

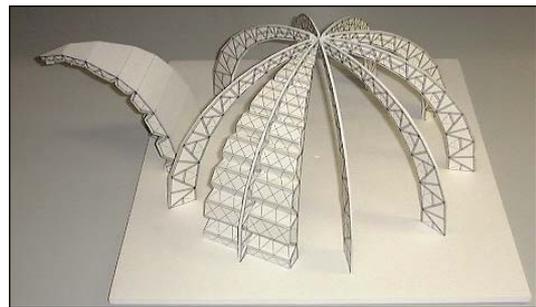
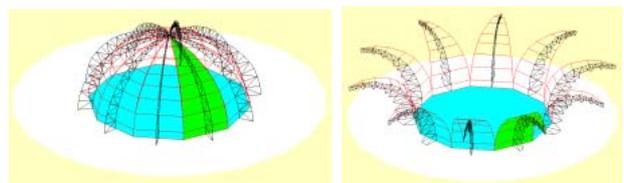


Fig. 9 半球状の開閉屋根式ドームの模型
Geometry Model of Flowering Dome with VGT



全開状態

全閉状態

Fig. 10 半球状の開閉屋根式ドームのモデル
Model of Hemisphere Retractable Roofs Doom

ルを実際に製作し、構造面、仕上げ面での設計手法の確立とVGT機構や制御システムの検証を実施した。

4.1 形状のシミュレーション

屋根全体は10枚の扇形屋根から構成され、各屋根の背骨部分に複数個のVGTを二次元的に配置することにより屋根の開閉を行った。屋根の形状を自由に变化させるため、2章で示した解析法を基に数値シミュレーションを行い、コンピューターグラフィックスによってVGTを含む屋根形状やその範囲を決定した。Fig. 10に屋根全体を花びらのように全閉から全開まで形状变化させた例を示す。VGTを用いることにより、かなり広い開閉が実現できるほか、各屋根が独立して動けるため極めて自由度の高い動きを実現することが可能である。また、ここでは屋根形状の変化と共に後述する制御プログラムの検証にもシミュレーションを利用した。

4.2 VGT機構の構成とその特性

部分縮小モデルに用いるVGTの機構には、伸縮アクチュエータを含む可動部と、屋根仕上げ面の取付けに配慮した固定部を交互に配置させる片持ち構造とした。VGTの構成にはFig. 11に示すように伸縮アクチュエータをトラスの束部材に用いる束材型と、上弦材に用いる弦材型の2例が考えられる。これらの構成は(1)架構剛性、(2)制御精度、(3)アクチュエータの出力等の点で異なる特性を持つため、FEM解析によりその有効性検討した。伸縮部材の性状には、オイルの圧縮率(6~7×10⁻⁴(1/MPa))や伸縮長、荷重方向を考慮した。また参考として一般的な鋼材特性による例も示しておく³⁾。

(1) 架構の剛性

架構の全体剛性および架構形状との関係をFig. 12-(a)に示す。5つの伸縮部材長を等しくしながら架構形状を全閉から全開まで变化させ、VGT脚部を中心とした先端変位の剛性を算出した。横軸は根元から先端までの制御角の和を示している。伸縮部材に一般鋼材を用いた全閉時の剛性はほぼ両者とも等しいが、全開に近づくに従い束材型は低く、弦材型は高くなる傾向がある。油圧ア

クチュエータの場合も鋼材と同じ傾向があるが、全閉時には束材型が大きな剛性を示している。不稼働時には屋根を全閉にすると仮定すれば、全閉時に剛性の高い束材型の方が有効である。

(2) 架構の制御精度

伸縮部材の制御長には、ある程度の誤差が含まれると考えられ、片持ち梁ではそれが累積して先端部の位置精度に影響を与える。Fig. 12-(b)に、5つの伸縮部材長に生じる誤差が累積して先端部におよぼす誤差量と架構形状との関係を示す。弦材型の誤差量は、架構形状に関わらずほぼ一定だが、全閉時における束材型の誤差量は極めて小さく出来る。全開時ではFig. 9から分かるように各屋根の精度はあまり必要ではない。

(3) 伸縮部材の必要出力

試験体のモデルは片持ち構造であるため、各VGTの出力は根元と先端ではかなり異なる。そこで、自重が作用したVGTを様々な形状に変化させ、最下段の伸縮部材に

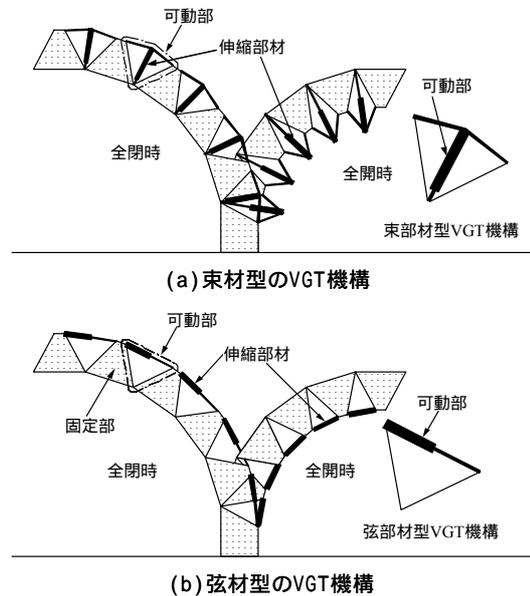


Fig. 11 VGT機構の基本構成と形状 Comparison of VGT Components and Geometry

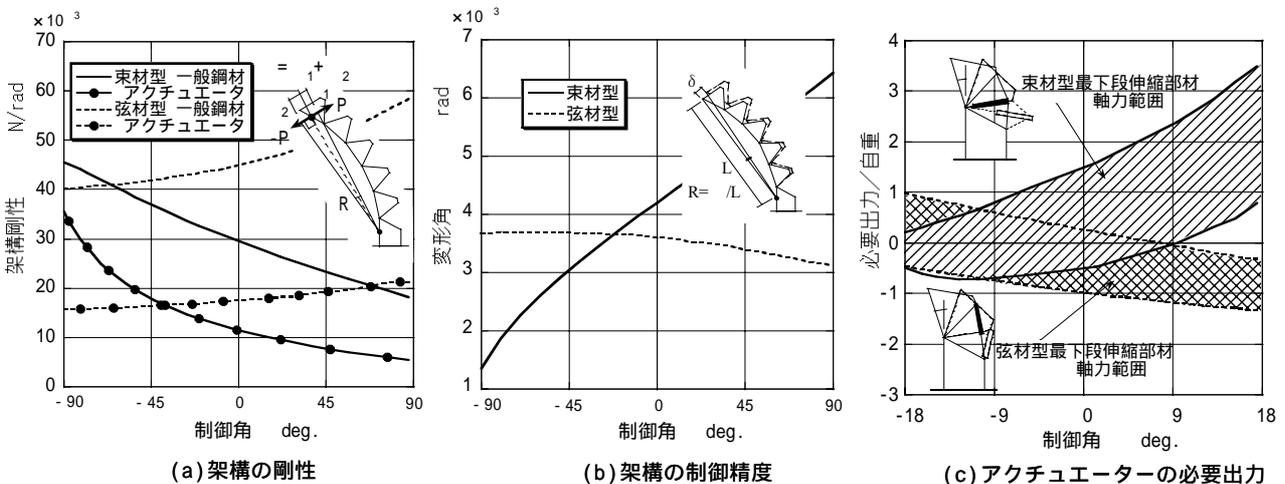


Fig. 12 VGT機構の構成(束材型,弦材型)とその特性比較 Comparison of VGT Components and Its Characteristics

作用する軸力の範囲と、制御角 との関係を図. 12-(c) に示す。架構が全開に近づくに従い、束材型の伸縮部材は大きな引張力が作用するが、弦材型では圧縮力が作用することがわかる。また軸力の絶対値を見ると、束材型の方が大きな出力を必要とすることが分かる。実際伸縮部材にはこの軸力範囲以上の出力が必要となる為、束材型の伸縮部材は弦材型よりも大型のアクチュエーターが必要となる。

ところで、本モデルでは全閉時に隣接する各屋根が厳密に制御しながら接近全閉し、その状態を保持させることが必要である。そのため上記の検討を考慮すると、全閉時の架構性状に優れた束材型のVGT機構を使用した方が有効であり、アクチュエーターには高出力への対応が比較的容易な油圧システムが最も適していると考えた。

4.3 部分縮小モデルの設計と製作

前述したモデルのシミュレーションおよびVGT機構の特徴を基に縮小モデルの設計、製作を実施した。開閉屋根架構の全体配置を図. 13に、架構および油圧アクチュエーターの主な仕様をTable 1, 2に示す。本試験体は、実大の約1/6程度の縮小モデルであり、10枚に分割した屋根のうち2枚を製作した。以下にその詳細を示す。

(1) 架構の構成およびVGT機構

モデルに用いた扇形屋根の架構構成を図. 14-(a)に示す。各扇形屋根は、その中央背骨部に配置した複数枚のVGT機構と左右に跳ね出す立体トラス部分の各ユニットから構成されている。また各立体トラスの外端部はヒンジを介してサイドトラスと結合され、全体として剛性のある構造を維持している。隣合うユニットはVGT機構のヒンジを介して折れ曲がり、その角度を制御することで屋根の形状を変化させる。各VGT機構の寸法・形状は試験モデルということもあり、すべて同じ物を使用した。

VGT機構は屋根の立体トラスに接続する固定トラス、束材の油圧アクチュエーター、それらをつなぐ上弦材から構成される。図. 14-(b)に示すように油圧アクチュエーターは汎用シリンダー、ポンプ、タンクおよび制御装

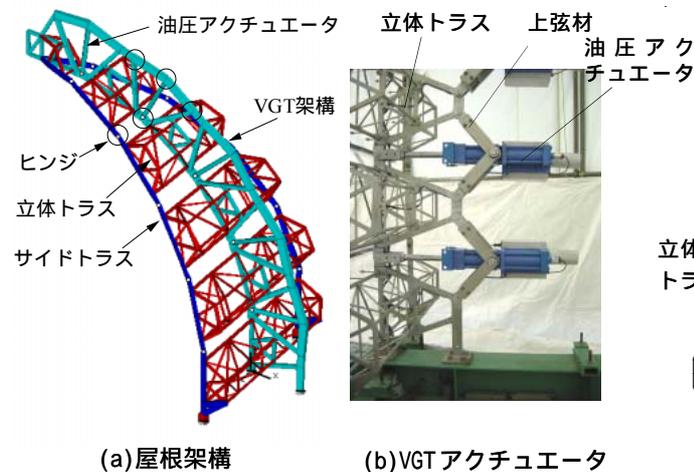


Fig. 14 架構の構成およびVGT機構
Composition of Roof Structure and VGT Actuator

置が一体化された簡易な構造であり、伸縮速度が一定のものを採用した。各屋根架構に5台ずつ配置し、またトラスオン式によるアクチュエーターを採用することで伸縮率を拡大させ、屋根形状の多様性を可能にした。

(2) 屋根仕上げ機構

立体トラス下面には、屋根の仕上げ面を模したアクリル板をそれぞれ固定した。各アクリル板は屋根の形状可変を妨げず、全閉時には隣接する仕上げ面の端部がシールを介して互いに畳み込む幾何形状とした。図. 15に仕上げ材の取付けおよび仕上げ材が重なる部分のラップ

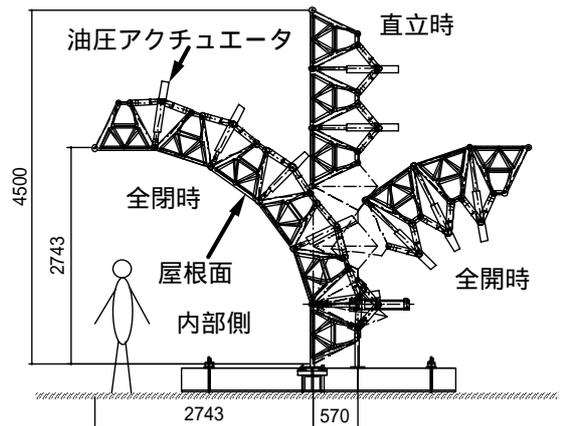


Fig. 13 開閉屋根架構の全体概要
Outline of Roof Structures for a Scale Model

Table 1 屋根架構の仕様 (1枚当たり)
Instruments of a Roof Structure

寸法	全長4.5m×全幅1.78m×トラス高さ0.57m	
使用材料	一般部材	SS40
	ヒンジ部分	S45C
	屋根面	アクリル
自重	約1.1ton(アクチュエーターを含む)	

Table 2 油圧アクチュエーターの仕様
Instruments of a Hydraulic Actuator

出力	圧縮 56kN, 引張 45kN
圧力	最大 7MPa
伸縮長	450mm
伸縮速度	押し 2.1mm/s, 引き 2.5mm/s
自重	約100kg

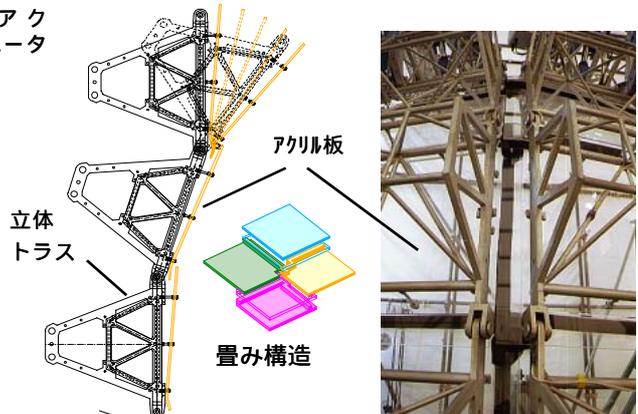


Fig. 15 開閉屋根の仕上げと畳み機構
Finishing Material and Its Retractable Mechanism

の状態を示す。最大で4枚の板が重なり、その隙間を特殊形状の樹脂性シールで塞ぐ機構となっている。この機構を用いることで、雨水などの一次止水効果があることを確認した。

(3) 制御システム

各油圧アクチュエータの内部に設置したストロークセンサーと油圧力(ヘッド側、ロッド側)を随時検出し、中央の制御システムで一括管理する方式を構築した。管理システムには汎用型制御ツールであるLabVIEWを使用し、様々な制御プログラム(手動制御、定型パターン連続制御など)の適用を可能にした。また、安全機構としては、油圧のオーバーロード検出による停止機構や2枚の屋根の接触を事前に防ぐセンサー機構などを装備した。

(4) 試験体の製作

まず屋根の面となる立体トラスを製作し、その後アクチュエータのロッド先端をヒンジを介して接続した。またアクチュエータの上弦材を各立体トラスと接続し、背骨部分を組み立てた。さらに2枚の屋根面を土台基礎に接続し、各種の制御配線等を実施した。完成した部分縮小モデル(試験体)の全体をFig. 16に示す。

4.4 稼動状態と各性能の検証

試験体の屋根を一連の制御プログラムに従い稼動させた。アクチュエータの伸縮長に対するダイヤグラムの例をFig. 17に示す。以下に各時刻の状態を示す。図中の写真は各時刻の屋根形状の状態を表している。またFig.

16で示した試験体の手前側をA屋根、奥側をB屋根とし、アクチュエータは下から1~5と呼ぶ。

各屋根が全閉した状態であり、B屋根の仕上げ材が外側からラップする。伸縮長は制御範囲で最小値をとる。稼動開始。B屋根全体が先に開き、一定時間後にA屋根全体が開く。ここでは仕上げ材の接触を回避している。各屋根が直立状態となり、一旦静止する。

A屋根がほぼ全閉、B開屋根が全開した状態。屋根が交差する特異な形状となる。

各屋根のアクチュエータ1,2が全開、3~5が全閉した状態。屋根面がS字状に反転した形状をとる。

各屋根が全開した状態であり、伸縮長は制御範囲で最

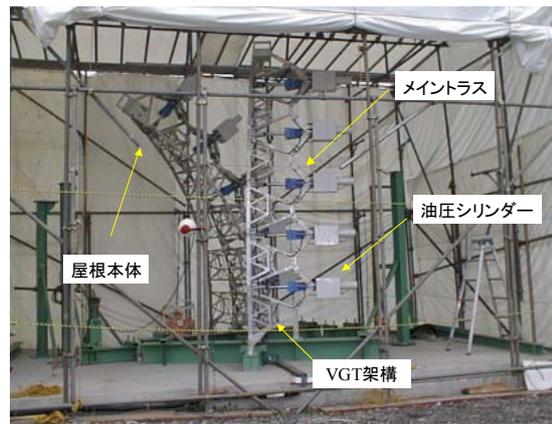


Fig. 16 完成したFlowering DooM の部分縮小モデル Completed a Scale Model of Flowering DooM with VGT

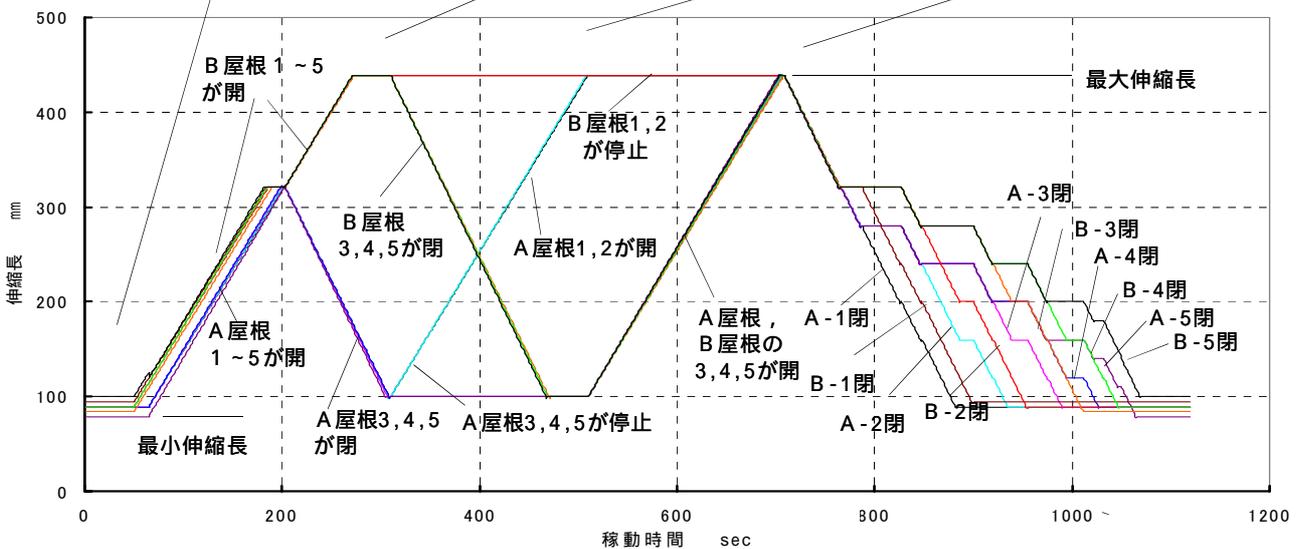
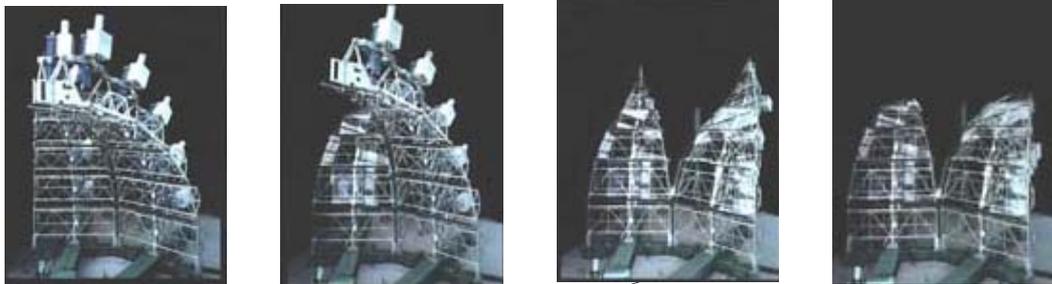


Fig. 17 制御プログラムに従って稼動させたアクチュエータの伸縮長に対するダイヤグラムの例 Examples of a Diagram for the Length of VGT Actuator Operated According to Control Program

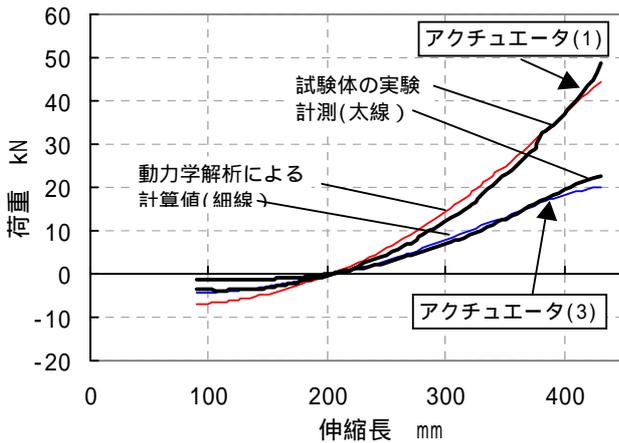


Fig. 18 動力学荷重の実験計測と解析との比較
Comparison of Dynamic Force Both Experimental Data and Numerical Analysis

大値をとる。屋根の先端は全閉時より180度反転する。全閉状態から屋根を閉じ始め、一旦直立状態で静止させる。その後、A屋根、B屋根の最下段から順次上段へと伸縮長を縮小させる。仕上げ材の接触を避けるため、各伸縮長の位置制御を行っている。

各屋根が全閉した状態となり、一連の稼働プログラムが終了する。

上記の稼働状況より、屋根の開閉は極めてスムーズであり、全閉から全開まで約3分で移動させることが確認された。またアクチュエータを個別に制御することで、様々な屋根形状に変化させるができた。また伸縮長の位置制御を行うことで、伸縮速度が一定のアクチュエータを用いた場合でも全閉状態における屋根面の畳込みを容易に実現することができた。

4.5 動力学への検討

屋根の稼働に伴うアクチュエータの動力学荷重を計測し、2.3節で示した解析結果と比較した。全閉から全開まで稼働させた場合のアクチュエータ1および3の荷重状況をFig. 18に示す。稼働開始付近および終端部分には若干の誤差があるものの解析結果は実験結果と類似する曲線を取り、解析手法およびその結果の妥当性が示された。伸縮速度を変えた場合の最下段アクチュエータ1に作用する動力学荷重の解析例をFig. 19に示す。伸縮速度の増加に伴い、屋根全体にはヒンジを回転中心とする加速度(遠心力)が増大し、特に伸縮長が比較的小さい範囲ではアクチュエータに大きな圧縮力が作用する。試験体の伸縮速度に対し50倍(100mm/s)程度までは、速度の影響は小さく静的な設計で十分であるが、それ以上の大きな速度では動的な影響は無視できなくなる。特に圧縮力が増大する範囲では部材の座屈限界を考慮するような安全な設計が必要であろう。

5. おわりに

未来型の可動型構造物を可能にする可動機構の一つとして、可変形状トラスVGTに着目し、その要素技術

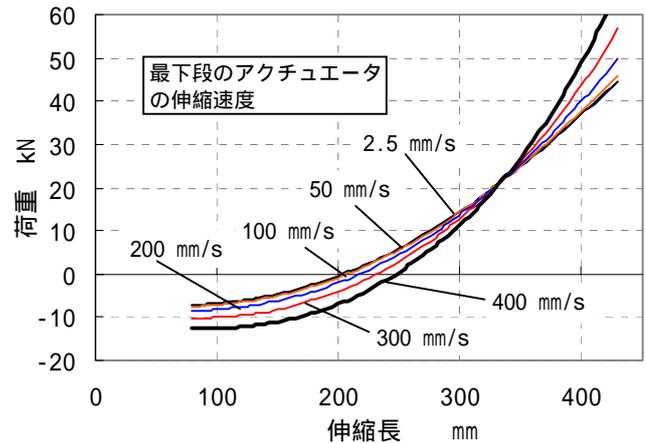


Fig. 19 伸縮速度に対する動力学荷重の解析
Numerical Analysis of Dynamic Force to Length Rate of Actuator

の開発と適用可能性について詳細に検討した。VGTはアクチュエータを備えた可動要素であり、その配置や特徴、種々の解析法、制御システムを活かすことで様々な形状を作り出すことが期待できる。それゆえ今回試作したFlowering Doomの部分縮小モデルによってVGTの有効性と将来性、また各種の特徴と性能を把握することができた。今後、さらに詳細なVGTの機構性状を理解し、実適用への展開を図って行きたい。

なお、本研究の実施にあたり多面にわたりご指導を頂いた文部省宇宙科学研究所(当時)、名取通弘教授に多大なご協力を賜った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 建築雑誌：“動く建築”，日本建築学会，Vol.110，No. 1368，pp.13～44，(1995)
- 2) 名取：“知能化する宇宙構造物”，日本機械学誌，Vol.96，No.900，pp.958～961，(1993.11)
- 3) 井上他：トラス可変形状を用いた可動型構造物の適用実験，第9回建設ロボットシンポジウム(第1報)，P.259～266，(2002.9)
- 4) K. Kurita and F. Inoue：Development of Adaptive Roof Structure by Variable Geometry Truss. Proc. of 18th ISARC，pp.63～68，(2001)
- 5) 船橋他：平面多節機構のシステム解析，日本機械学会論文集，Vol. 42-359，pp.2157～2165，(1976)
- 6) F. Hatold J, and Ronald L.H：Dynamics of Mechanical Systems・CRC Press，2002.
- 7) 井上他：トラス可変形状を用いた可動型構造物の適用実験，第10回建設ロボットシンポジウム(第2報)，P.341～346，(2004.9)
- 8) F. Inoue et.al, Application of Adaptive Structure and Control by Variable Geometry Truss. Proceedings of SASBE，(2003.11)