

可変形状トラスを利用した可動型構造物 —2005年日本国際博覧会可動モニュメントへの適用—

井上文宏・諸戸竜一・古屋則之

可変形状トラスを利用した可動型構造物の適用として、2005年日本国際博覧会「愛・地球博」長久手愛知県館で展示された大型可動モニュメントの構造概要および稼働状況について紹介する。可動モニュメントは3本の可動鉄塔から構成され、各鉄塔は独立して制御できるため、目的の演出に応じて様々な形状に変化することができる。可動モニュメントは建築工作物であるため構造評定の取得や各種の安全機構を導入して設計・製作されている。開催期間中、良好で安全な連続稼働が実現されて高い評価を受けた。VGT機構を用いた可動型構造物の有効性および実用性を検証することができた。

キーワード：可変形状トラス、VGT、可動型構造物、モニュメント、安全性、制御システム、愛・地球博、2005年日本国際博覧会

1. はじめに

21世紀最初の国際博覧会である2005年日本国際博覧会「愛・地球博」では「自然の叡智」をテーマに人と自然との関わりを発見する様々な展示や催し物、また魅力ある建物が作られ、予想をはるかに超える来場者が訪れるなど、大成功のうちに閉幕した。その中で特に話題になった出し物の1つにロボットの活躍がある。演奏するパフォーマンスロボット、接客や警備ロボット、掃除ロボットなどは近未来のロボット社会をイメージさせる光景と考えられる。

一方、会場の中心部にあたる日本ゾーン愛知県館では伝統的なからくり人形と共にゆらゆら動く巨大な可動モニュメントが来場者を手招きしながらその存在感を表現していた。これは「踊る指南鉄塔」と呼ばれ、伝統と最先端の技術が融合した愛知のものづくり文化を象徴するものとして展示された。ここにもロボット技術の活躍の場があり、万博全体を盛上げていた。

ところで、この可動モニュメントは可変形状トラス¹⁾(Variable Geometry Truss, 以下VGTと略記)を利用した可動型構造物で、言わば大型の多関節マニピュレータのように動く構造型ロボットである。VGTは図-1に示すようにヒンジと伸縮シリンダから構成されるトラス構造であり、伸縮シリンダの伸縮長を制御することで様々な形状を作り出すことができる。VGTは元々展開型宇宙構造物として開発が試み

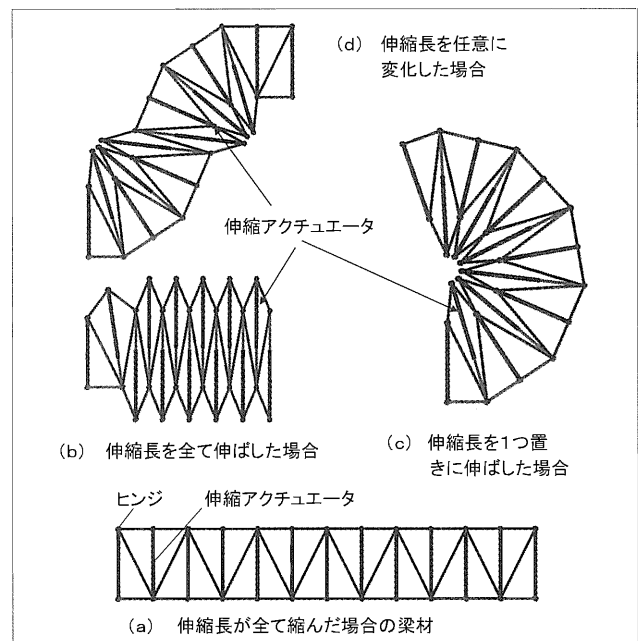


図-1 VGTを用いた梁部材の形状変化

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するため、冗長性のある知的構造物や可変構造物として研究が進められてきた。

著者らはこれまでこのVGTの特徴に着目し、地上構造物の適用を目指した実用化提案を行ってきた²⁾⁻⁴⁾。

屋根形状が変化する半球状の開閉ドーム、可動アーチを連続的に配置した有機的パビリオン、演目に応じて変化する音楽ホールの可動反射板等の提案例であるが、その応用性は広く、様々な場面での利用が考えられる。特に近未来には人工知能や情報化技術と結びつ

き、構造物に躍動感、柔軟性、さらには感情などを表現させることも期待できる。

本報文においては、このVGTを用いた可動型構造物への適用例として、2005年「愛・地球博」長久手愛知県館で展示された大型可動モニュメントの概要について報告する。開発の経緯、設計・製作の概要、可動状況およびその有用性、実用性について紹介する。

2. 可動モニュメントの建物概要

(1) 建物概要

愛知万博で展示された建物全体は、大型可動モニュメントと併設されたからくり演出装置から構成される。各々は独立に設計、製作、据付けされた機構であるため、ここでは可動モニュメントのみについて報告する。ただし、全体は内部の制御信号で結合されており、可動モニュメント単体および両装置の協調によるさまざまな稼働演出が計画されている。

図-2に可動モニュメントが設置された万博会場全体および長久手愛知県館（図-3）の概略図を示す。

愛知県館は会場中央の日本ゾーンに属し、日本庭園やかえで池に面した風光明媚な位置にある。会場の西ゲートから正面にあたり、グローバルループに併設しているため、来場者のアクセスが容易である。愛知県館はおまつり広場、大型劇場・舞台、中部広域交流館、管理棟からなり、管理棟の屋上に可動モニュメントは設置された。

(2) 開発経緯と建物概要

可動モニュメントは来場者をグローバルループから招くウェルカムモニュメントとして、また愛知県のシ

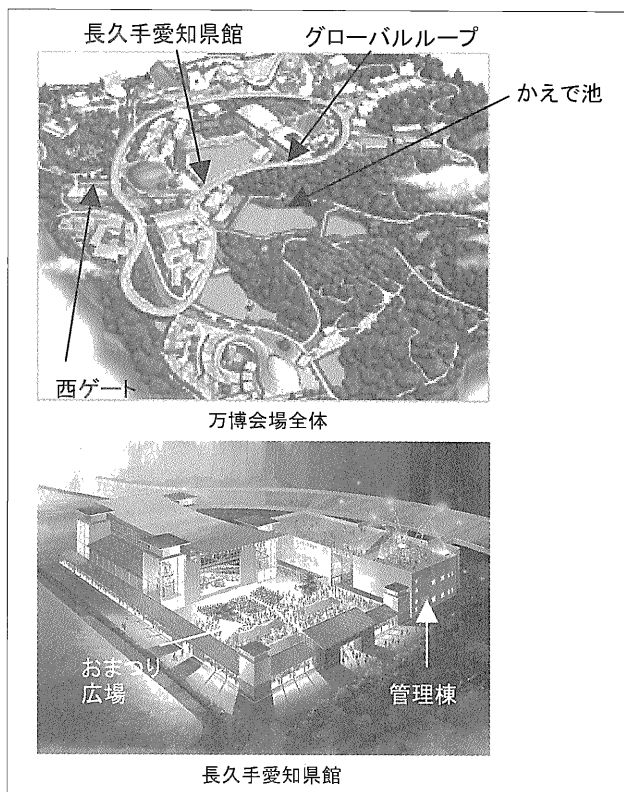


図-2 万博会場全体および長久手愛知県館の概略図（愛知県国際博推進局「パンフレット」より抜粋）

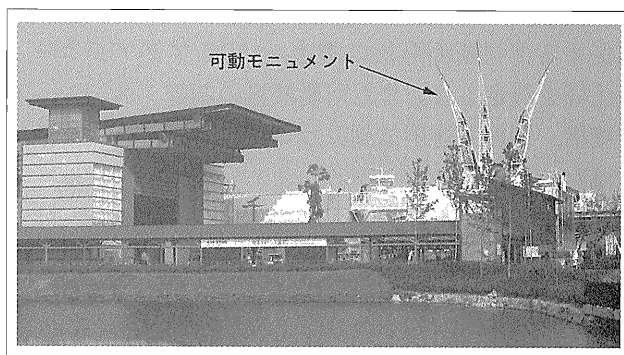


図-3 長久手愛知県館の全体

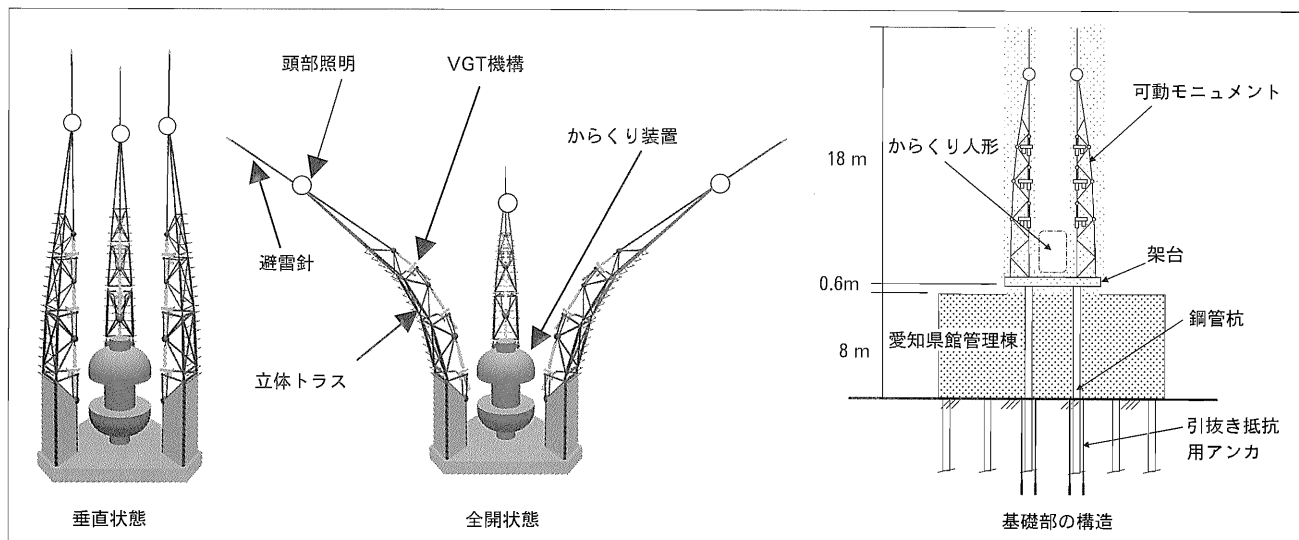


図-4 可動モニュメント全体の概要図

ンボルタワーとして開発依頼があり、開発中の VGT を利用した可動構造物の応用として可動モニュメントへの提案を行い、採用が決定した。

図-4 に可動モニュメント全体の概要図を示す。全体は同一仕様の 3 本の可動鉄塔から構成され、円周に沿って 120° 間隔で据付けられている。

1 本の鉄塔は全長 18 m、4 個のフレームと 3 台の VGT 機構が各々結合されている。各フレームは立体トラス構造からなり、外側はヒンジ、内側は伸縮アクチュエータが取付けられ、伸縮長に応じて全体形状が変化する。またモニュメントの先端部には頭部照明があり、さらに意匠性を考慮した避雷針が設置されている。

基礎部は建物 2 階屋上より内部を貫通し、頑丈な基礎杭に達している。

(3) 構造設計

可動する構造物の設計にあたっては十分な安全性を検討する必要がある。そこで構造設計の公的審査機関である日本建築センターより構造評定を取得した。設計条件としては屋上突起物に対する地震荷重および地域平均風速に基づく風荷重を使用し、十分な安全性を確保する部材断面形状の選定、VGT アクチュエータの仕様を決定した。また可動機構の制御システム、安全機構、管理・運用体制についても審査を行い、承認を得た。

3. 可動モニュメントの VGT 機構と制御システム

(1) モニュメントの VGT 機構

1 塔の可動モニュメントは 3 台の VGT (下から大型 (L)、中型 (M)、小型 (S)) が設置されており、各々独立して伸縮長を制御することができる (図-5)。

VGT の配置はトラスの弦材位置に伸縮アクチュエータを配置した弦材型機構であり、束材型に比べ剛性が高く精度性能が高いこと、荷重負荷が小さい範囲で扱うことができるなどの利点がある³⁾。偏角は内側に 2.5°、外側に 18° であり、モニュメント全体では外側に最大 54°、内側に 7.5° の範囲で可動することができる。

伸縮長に対する荷重と偏角の関係を図-6 に示す。荷重は偏角に対してほぼ比例の関係があり、制御的に扱いやすい特徴をとる。アクチュエータの伸縮速度は最大 20 mm/s であり、3 台の VGT が同時に稼働した際の先端周速度は 500 mm/s 以上にもなり、可動モ

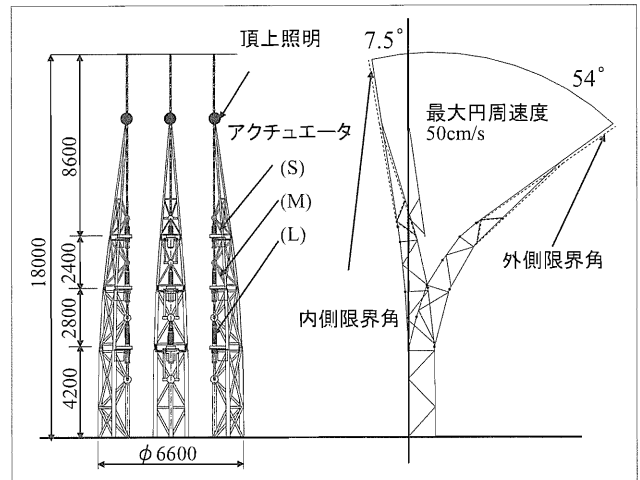


図-5 モニュメントの VGT 機構

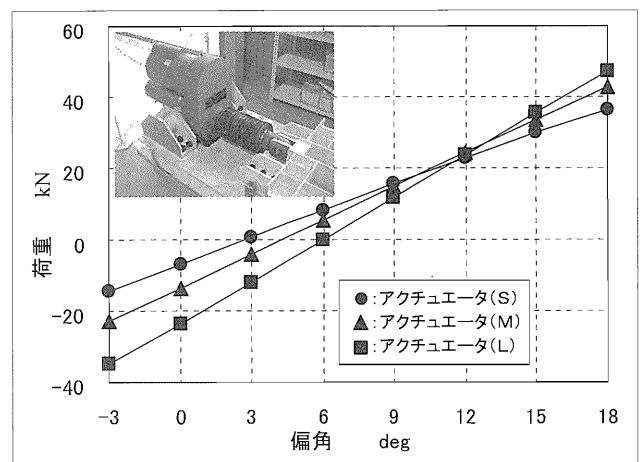


図-6 伸縮長に対する荷重と偏角の関係

ニュメントとしては極めてダイナミックな動きとなる。

(2) 安全機構と制御システム

可動モニュメントは常に稼働状況にあることを考慮し、十分な安全を維持する制御システムを開発した。アクチュエータの制御にはモータの回転をフィードバックする位置検出制御を使用し、各アクチュエータの状態を常に管理・記録した。また各種の故障を想定し、アクチュエータ周囲に 5 段階のチェック・安全機構を

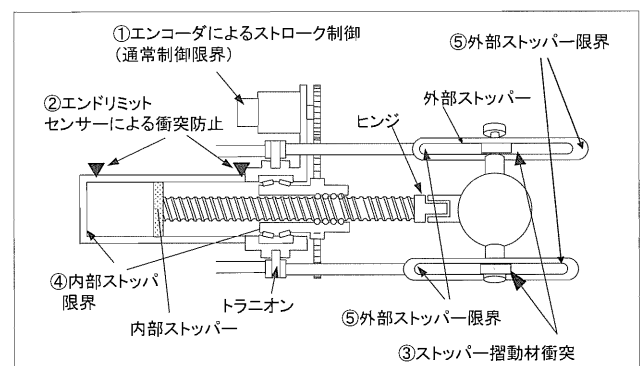


図-7 アクチュエータの安全機構

装備した（図-7）。

操作は初期操作を除きに自動運転で実施するシステムを構築し、オペレータはシステムの安全な運行と維持管理業務が主となる。万一故障しても常にモニメントが安全な状態を維持できるための複数ロジックによるフェールセーフ機構を導入した。非常時の対応としては、手動緊急停止装置の配備、地震、落雷、強風、豪雨時の自動停止・警報システムの導入、漏電、停電等に対するバックアップシステムを備えている（図-8）。

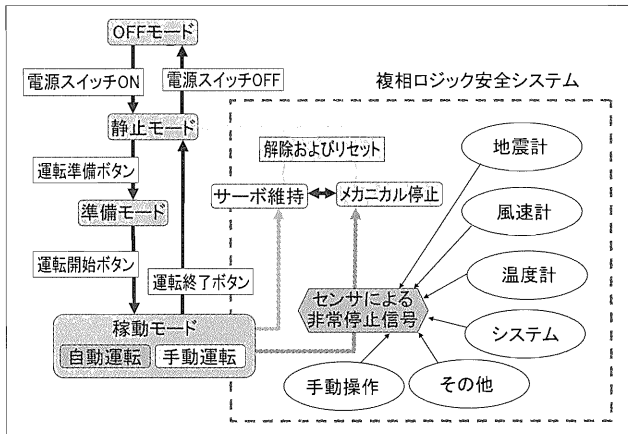


図-8 制御システムの安全対策

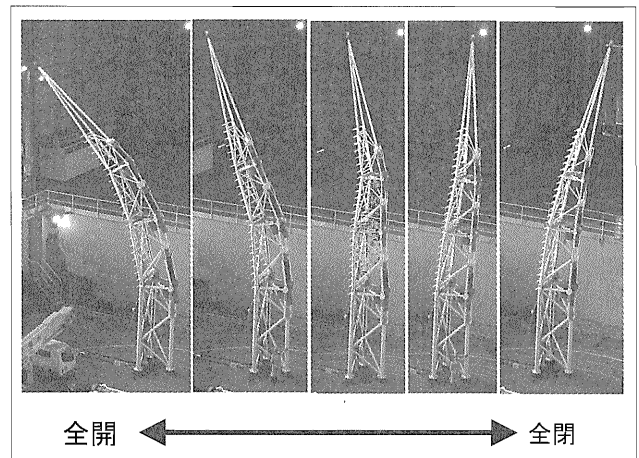


図-10 工場内の稼働検査

ここでは本体構造部、アクチュエータ、制御システムおよびテストプログラムによる動きの確認、非常時におけるシステムの安全性について検証した。モニメントの稼働状況は良好であり、制御システムおよび各種の安全機構が適正作動することを確認した。

2004年12月よりモニメントの現地組立て、据付け工事を開始した。その後、電気配線、制御システムの構築を行い、また最終の試運転調整を実施して、モニメントの単体の作業を年内に終了した。2005年1月より、からくり装置の現地組立て、据付け工事を開始し、2月下旬からからくり装置と可動モニメントの協調演出のためのシステム構築、自動運転プログラムの修正を実施した。特にモニメント単体および協調演出のタイミング、故障や非常時の対応など各細目の動作確認等が続けられた。3月中旬より、万博開催に向けた最終調整試験を実施し、2つのシステムが完成した。

(3) 可動モニメントの製作・施工

全体の製作・施工スケジュールを図-9に示す。

設計終了後、モニメントの本体フレーム、基礎部の製作に入り、並行してアクチュエータの機器選定、組み込みを実施した。現地での据付け工事前に、モニメント1体ついて工場内の稼働検査を実施した。図-10に稼働検査の状況を示す。

	2004年5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	2005年1月	2月	3月	4月
* 可動モニメント施工												
・設計	意匠・構造設計											
・鉄塔製作		材料手配		製作・仮組		全体仮組						
・アクチュエータ		仕様確定, 材料手配		製作・試験								
・制御		システム設計		ハード製作, 演出ソフト作成		デバック						
・工場内試験						工場試運転						
・据付工事						仮設・基礎工事, フレーム組立						
・試運転						制御工事		配線, 制御確認		試運転調		
* からくり装置の施工										組立・据付・運転調整		
* からくりとモニメントの協調作業										協調制御の組込, 調整		最終調整

図-9 可動モニメントの製作・施工スケジュール

4. 可動モニュメントの稼働状況と管理

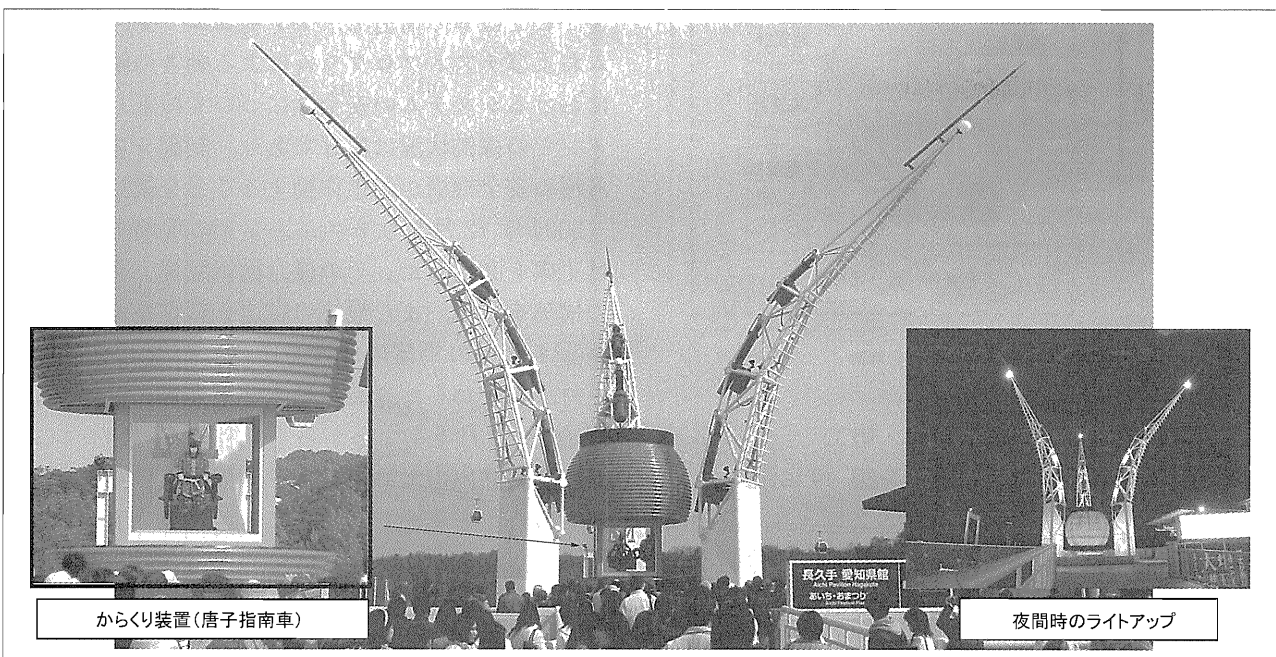
万博会場で稼働するモニュメントの全体を図一11に示す。

からくり装置との協調演出であり、モニュメントは全開し、その中央部ではからくり装置（唐子指南車）による演出が行われている。多くの来場者がモニュメント周囲に集まり、2つの展示物の演出を観覧している状況がわかる。なお、夜間時には各展示物はライトアップされ、先端照明と共にモニュメントの不思議な動きが強調される。

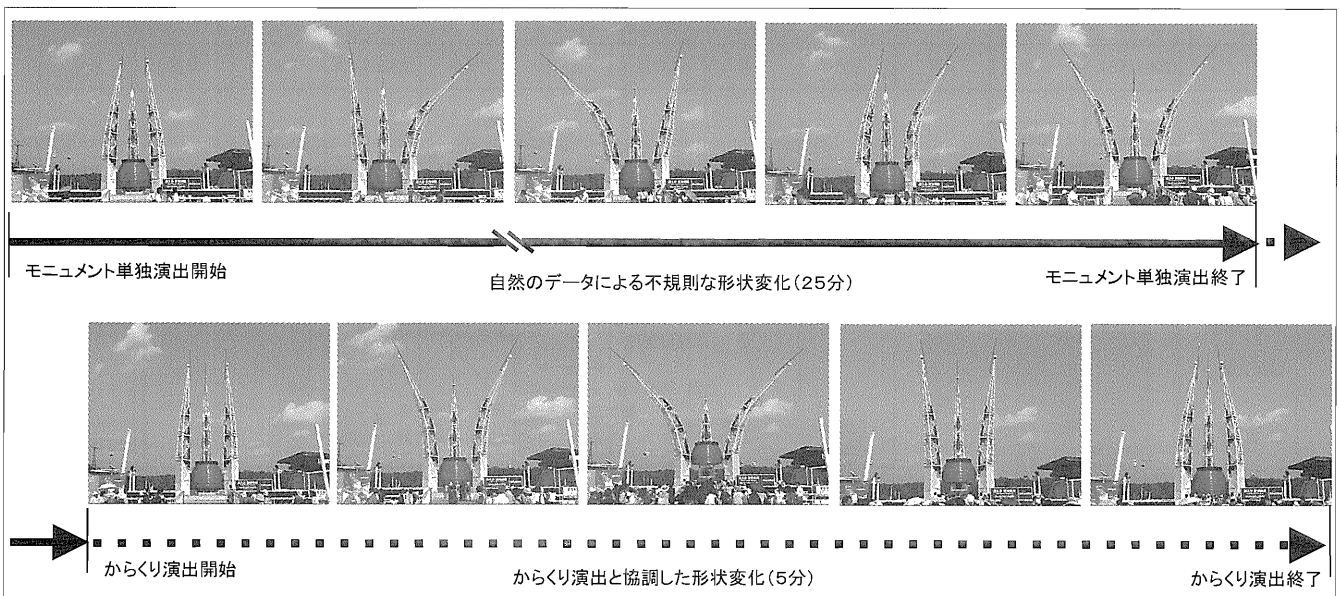
(1) 演出パターンと形状変化

モニュメントの演出パターンは単独稼働およびからくり装置との協調稼働とにより異なる。単独稼働では自然のデータ（風速や温度、時間など）の状態をモニタし、その情報を基に伸縮長の速度や停止時間を決定している。その結果、モニュメント全体は非常に不規則な形状変化を示し、同一形状変化になることはほとんどない。一方協調稼働はあらかじめ動きの形状変化や音、光、作動時間をプログラムしたものであり、演出のストーリーに沿った一連の形状変化を行う。

図一12に演出パターンとモニュメントの形状変化の様子を示す。演出の1ループは30分で2つのパター



図一11 万博会場で稼働するモニュメントの全体



図一12 演出パターンとモニュメントの形状変化

ンで構成される。前半はモニュメントの単独稼働（25分）、後半は協調稼働となり、このループを繰り返す。単独稼働ではモニュメントのゆっくりとした形状変化の中にもダイナミックさがあり、非常に興味深い動きが表現できた。また協調演出では演出プログラムに沿った正確な動きが実施されており、全体として統一性のある演出が実現された。

(2) 稼働状況

万博開催中、モニュメントの演出は9時～22時、1日約13時間（26ループ）連続稼働された。ただし特別来場者やイベント時には協調稼働が随時割込める仕様となっており、稼働計画は日々異なる。

図-13に可動モニュメントの稼働記録を示す。稼働回数は可動モニュメントの全閉から全開までの往復を1回として計算した。万博開催前期では、やや低速動な形状変化を行い、また曜日毎に速度を変化させた。中期から後半では速度を増し、曜日毎の速度を一定とした。後期では速度を最大として会場の盛上がりと呼び込ませた。

途中、点検・調整や悪天候等で、不規則な稼働回数を示す日もあるが、185日間一度の故障、事故もなく安全で良好な連続稼働を実現できた。累積稼働回数は約50,000回に達し、当初の計画内で運用することができた。

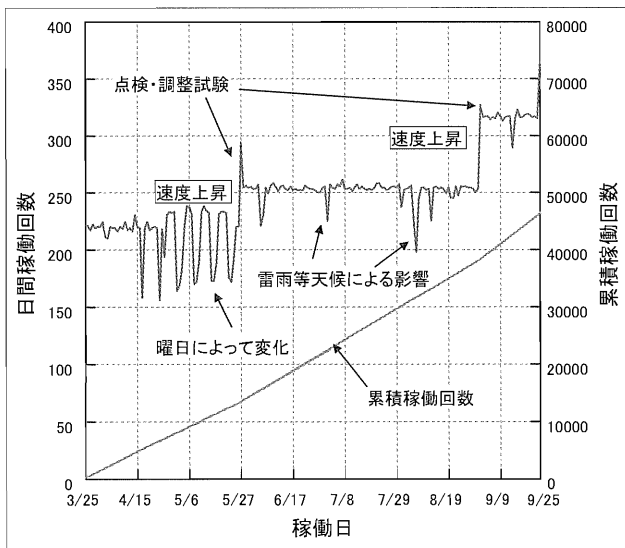


図-13 可動モニュメントの稼働記録

5. おわりに

可変形状トラス VGT を利用した可動モニュメント

の愛知万博での適用状況（計画、設計、製作、施工、運用）について、その概要を報告した。

技術の開発・実用化は初めての試みであり、構造設計、VGT 可動機構、制御システムなどを含め構造評定データを取得し、十分な安全性を考慮して開発を実行した。

今回のように様々な形状変化を伴う可動型構造物に対しては、VGT 技術が非常に有効であり、また実現可能であることを確信した。今後、VGT 技術の様々な利用、展開を図り、新しい可動型構造物の提案を行いたい。

最後に本開発の実用化にご協力頂いた関係各位に記して謝意を表します。



《参考文献》

- 1) 名取通弘：“知能化する宇宙構造物”，日本機械学会誌，Vol.96，No.900，1993.11，p.958.
- 2) 井上文宏，栗田康平，古屋則之，汐川 孝：“可変形状トラスを用いた可動型構造物適用実験（第1報）”，第9回建設ロボットシンポジウム論文集，pp.259-266，(2002).
- 3) F. Inoue, K. Kurita, Y. Utsumi and N. Furuya：“Application of Adaptive Structure and Control by Variable Geometry Truss”，Proc. of CIB 2003 International Conference on Smart and Sustainable Built Environment, p.59 (2003).
- 4) 井上文宏，栗田康平，古屋則之，汐川 孝：“可変形状トラスを用いた可動型構造物適用実験（第2報）”，第10回建設ロボットシンポジウム論文集，pp.341-346，(2004).
- 5) K. Kurita, F. Inoue, N. Furuya, T. Shiokawa and M. Natori：“Development of Adaptive Roof Structure by Variable Geometry Truss”，Proc. of 18th International Symposium on Automation and Robotics in Construction”，pp.63-68 (2001).

【筆者紹介】

井上 文宏 (いのうえ ふみひろ)
株式会社大林組
技術研究所
建築生産システム研究室
自動化グループ長



諸戸 竜一 (もろと りゅういち)
株式会社大林組
技術研究所
建築生産システム研究室
自動化グループ



古屋 則之 (ふるや のりゆき)
株式会社大林組
技術研究所
プロジェクト部
専任役

