

ケーブル式はさみ・アーチの研究

(その1・基本アイデアの縮尺モデルによる検討)

粉 川 牧*¹, 渡 辺 宏 二*²

A Study on Cable Scissors Arch

Part I Examination on the Basic Idea

by

Tsutomu Kokawa*¹, Koji Watanabe*²

Abstract

In case of the realization of scissors-type expandable structure, one of the most important problems is concerned with the rational method of expanding and rocking. This paper describes a new type of expandable arch structure which consists of three-hinged arch scissors and zigzag flexible cable through pulley with them. The changing form of this structure is controlled by only winding up or back instrument like a winch, and a special stable truss arch without chords is always gained during the winding process because the cable is effective against tension force under gravity load. A trial test of a 5-m span steel arch was carried out by this basic idea about changing form structure, and we got the hopeful light of this method.

1. 序

1-1. 研究の目的

我々の身近で見かける生活用具や道具の中には、何らかの仕掛によりその形状を変化させて使用する物が多い。例えば、折たたみ式の椅子、テーブル、傘、伸縮自在の物干し、門扉そして風呂敷、動くおもちゃや操り人形 etc. 実に様々で、これらは、移動や運搬が容易で、限られたスペースを効率的に使うとき、用いられることが多い。一方、建築の世界でも、可動間仕切り壁、観覧席や最近話題の大スパンを覆う開閉式屋根等が特定の集会施設やスポーツ施設で実現され、動きのある建築空間づくりの気運が徐々に高まりつつある。使用内容や目的に応じて規模や形状が変化する建築物を考えることは、建築計画上及び設備計画上極めて合理的な発想であり、又、建ち上げから始まる空間形状の

原稿受理：1994年9月29日

*¹ 北海道東海大学芸術工学部建築学科・教授

*² 北海道東海大学芸術工学部建築学科・助手

連続的変化は見る者に建築ダイナミズムの何かを想起させるであろう。

本研究は、形状が変化する建築物を可能ならしむ一つの構造工法を提案するところからスタートし、その構造工法について主に構造工学的側面から検討を進めようとするものである。そこで、本報告では、形状が変化するアーチ状構造体即ち可変アーチ構造体の場合について、まず基本アイデアを示し、次に鉄製の縮尺モデルによりそのアイデアの妥当性を検証している。

1-2. 既往研究と本基本アイデアの特徴

発想した可変構造体は、はさみの機構をヒントにしている。単純なはさみ構造体は前述したように、物干しや門扉など日常の生活用具の中にも見られる。建築構造への適用では移動民族タタール人の住居「ユルタ (YURT)」の壁面構造「ハナ (KHANA)」が古くより良く知られているが⁽¹⁾、現代的な意味で、はさみ構造体の研究は、1961年のピネロ (PINERO)⁽²⁾による移動劇場案から始まったと言われる。以来今日まで、この種の構造の構造システム^{(3),(4)}、展開収縮中の幾何学的適合条件^{(5),(6),(7)}、構造解析⁽⁸⁾及び展開終了時の構造安定化方法^{(9),(10)}などについて多くの研究がなされてきたが、未だ実施に至っていないのが現状である。これは、(1)伸縮・展開そして固定方法に関する合理的で簡便な構法アイデアの欠如、(2)曲げ抵抗系構造による力学的合理性の不足、にその原因があると、筆者は考えている。そこで、本研究では、はさみ連結体に可撓性の引張ケーブルをジグザグ状に配置し、ウィンチ等の巻き上げ巻き戻し操作のみによって、はさみ連結体の全体形状を連続的に安定した状態で変化させ、前述の(1)および(2)を同時に解決するアイデアを提案している。これをアーチ状の場合に説明すると以下ようになる。

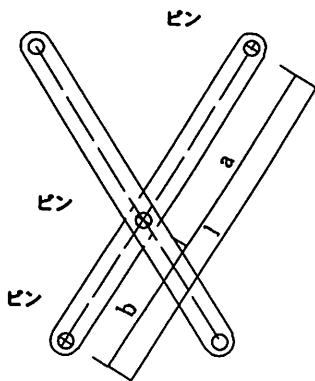


図1. はさみユニット

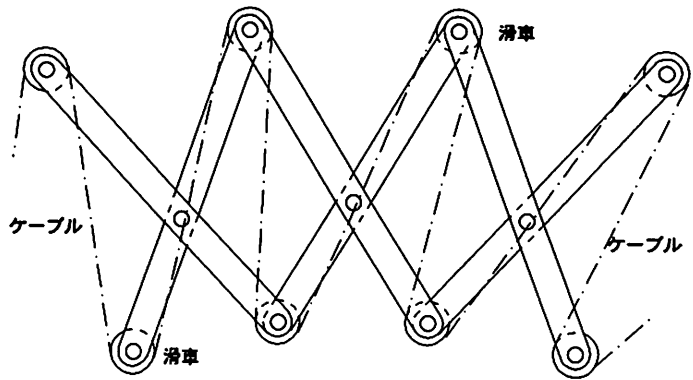


図3. ケーブルのジグザグ配置

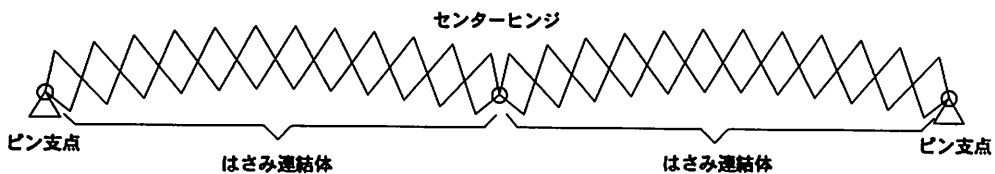


図2. 3 ヒンジはさみ連結体の低所設置

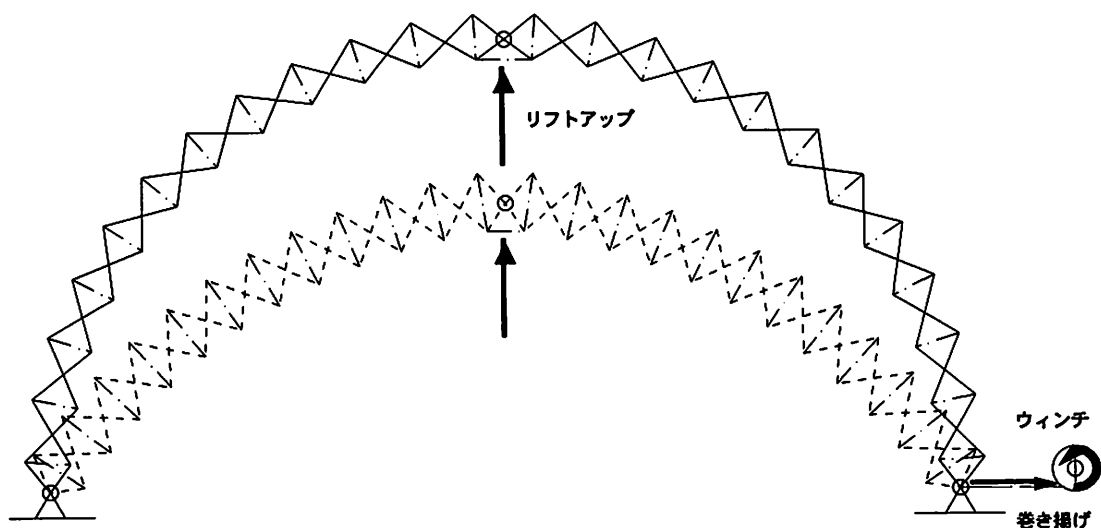


図4. ケーブル式はさみアーチのリフトアップ

図・1に示すはさみユニットの連結体を図・2のように低所で組み立てる。ここで両端の支点と2つの連結体の接合点はヒンジとなっている。また、ユニットとユニットの連結部には滑車が設けられている。このはさみ構造体に図・3のように可撓性ケーブルを配置する。ここで、図・4に示すように、ウィンチでケーブルを巻き上げるとはさみ構造体は伸長し、結果としてリフトアップされる。ケーブルの巻き揚げを停止すると、構造体の重量は各棒材の圧縮力及びケーブルの張力と釣り合う。一方、ケーブルを緩めると、自重により縮長し円弧の曲率を減少させながら、はさみ構造体はリフト・ダウンする。巻き揚げ巻き戻し操作は連続的に行われ、重力の存在によってケーブルには絶えず張力が作用し、自重のもとでは常に安定した構造体となっている。この構造体は軸力で抵抗する一種のトラスと見なされ、曲げ・せん断で抵抗する従来のケーブル無しのはさみ構造体に比べ、大幅に構造体の強度と剛性の向上を期待できるものと思われる。なお、ここでは、図・1において腕の長さの比 $a : b$ を全てのユニットで一定としたが、ユニット毎にこの比を適宜変化させて、アーチを任意の形状にすることが出来る。

以上の方法によって、ケーブルの巻き上げ巻き戻しだけで、はさみユニットの連結体であるトラス構造のアーチ形状を連続的に変化させ且つ静的に安定させることが出来る。さらに低所において組み立てた後、ケーブルを巻き上げてケーブルに張力を付与するだけで、所定の形状のアーチやドームを形成できることから、施工が容易で簡単かつ安全にして施工期間も格段に短縮が可能と思われる。

2. 縮尺モデルの試作

1-1で示したアイデアに基づいて、鉄製（スパン5.3m）の縮尺モデルを試作し、ケーブルの巻き揚げ巻き戻し操作を行い、本構法の問題点を探る。

2-1. はさみ構造体の部材諸元

図・5に示すように、試作モデルのはさみ構造体は、はさみユニット部材（A、B材）、支持点接

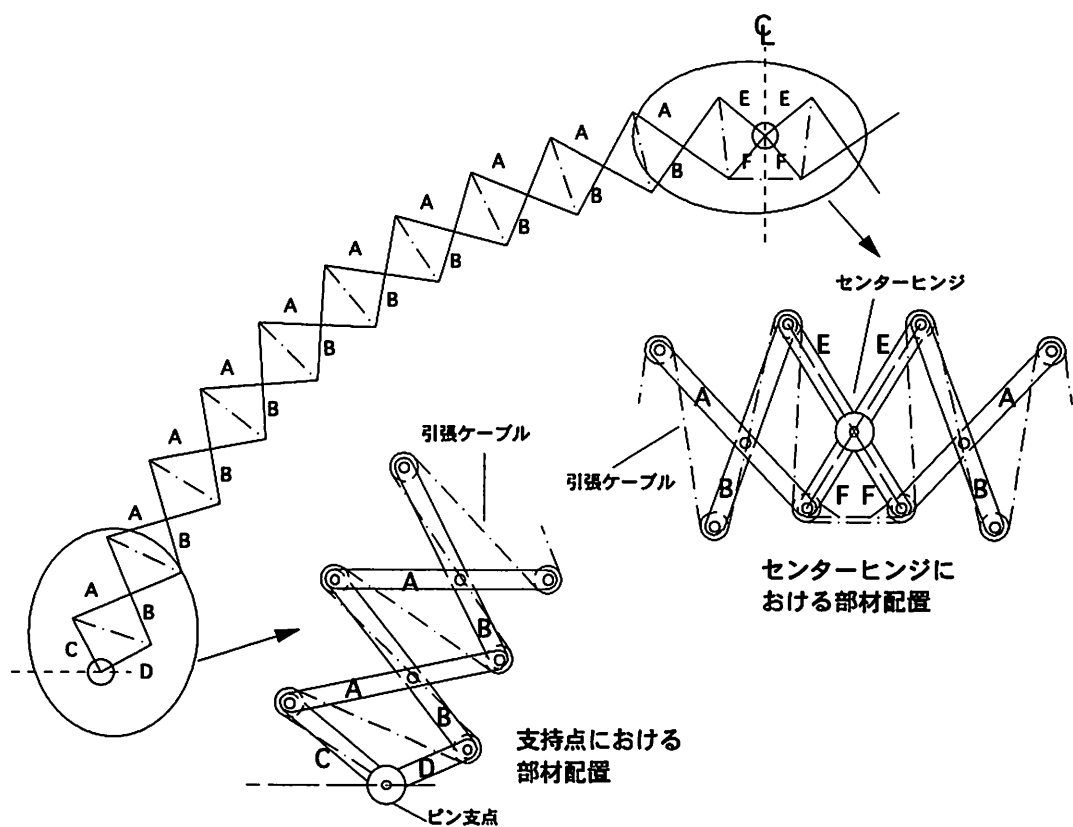


図5. 縮尺モデルの部材配置

合部材（C、D材）及び中央ヒンジ接合部材（E、F材）より構成され、それぞれの使用部材数は、A、Bが20本、C、D、E、Fが2本である。図・6に示されているように、これらの部材は、軽量ミゾ形綱（[-150*50*4.5, [-200*50*4.5, [-250*50*4.5), 平綱（F.B.38*4.5）を寸切穴開け（ $\phi 4.5$ ）加工し、さらにボルト（M4）接合して、製作された。又、各部材の交点となる位置に $\phi 9.5$ の穴開けを行い、その位置（以後ピン接続点とよぶ。）に $\phi 9$ の磨き丸綱を軸受け材として使用した。そして上下端の連結点には部材両外部に近接して図・7に示す滑車が設けられている。なお、今回のモデルでは、全てのユニットに対してピン連結点間距離（図・1参照）を $a=235\text{mm}$ 、 $b=213\text{mm}$ とし、従って二つのハサミ連結体はそれぞれ円弧形状となっている。

2-2. 支持点金具とケーブル配置

中心直径が5.3m、断面30cm*40cmのR.C.基礎リング上において、直径5.3mの円周上とその中心を通る直線との交点2箇所、図・8に示される支持金具を固定した。ケーブルは公称径 $\phi 4\text{mm}$ のものをダブルで使用し、図・9に示すように、はさみユニットの対向する滑車間に順次掛け回してジグザグ状に張設されている。

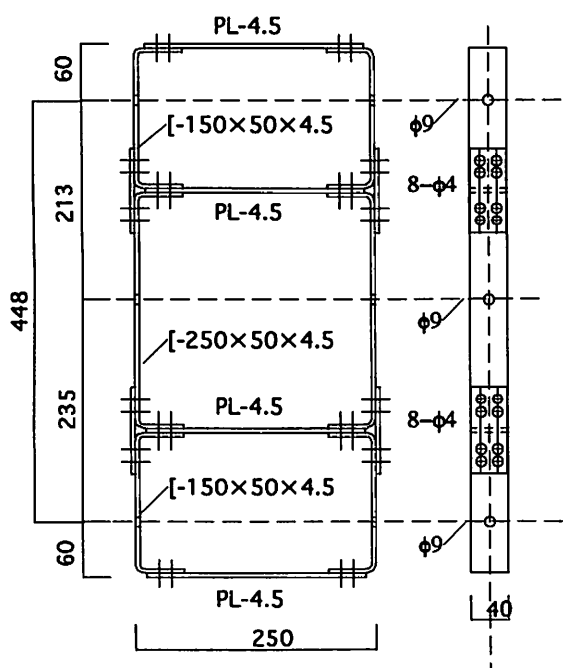


図 6 a. 部材 A

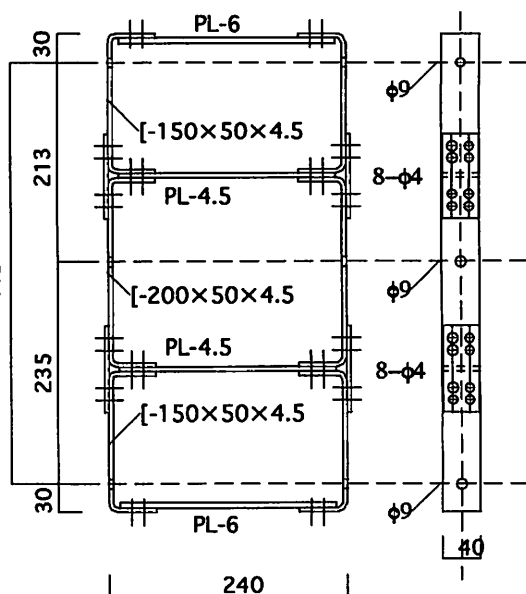


図 6 b. 部材 B

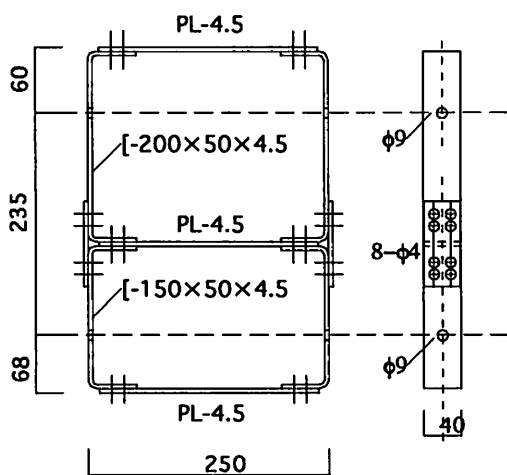


図 6 c. 部材 C

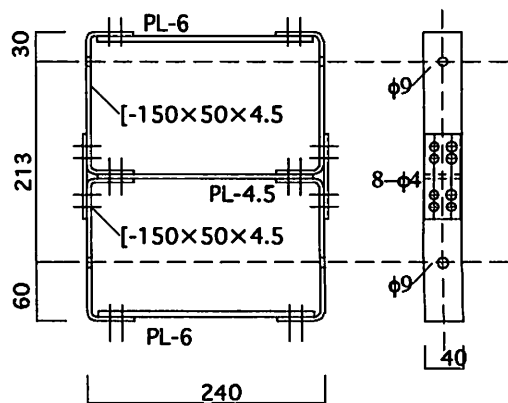


図 6 d. 部材 D

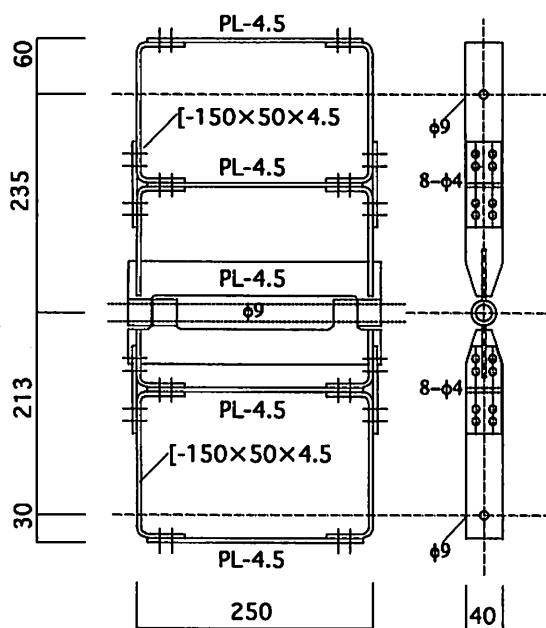


図 6 e. 部材 E

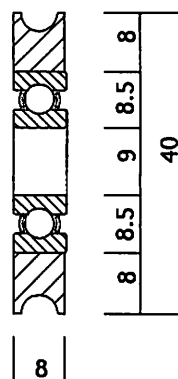


図 7. 滑車断面図

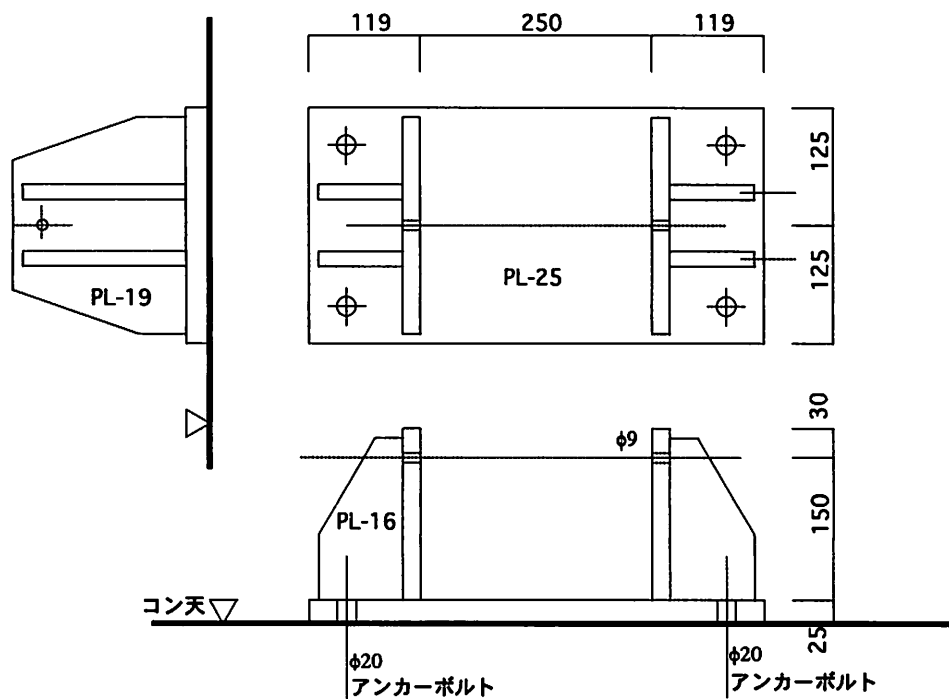


図 8. 支持金具

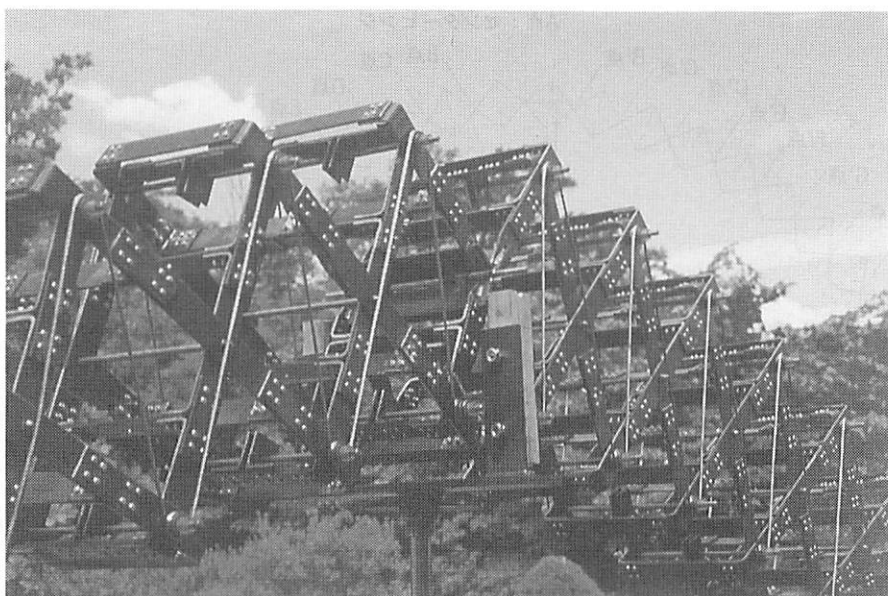


図9. ケーブルのダブル配置

3. 縮尺モデルのアップ&ダウン実験

縮尺モデルからケーブルを除去した構造体について安定・不安定判別式を適用すると以下のようになる。

n (反力数) = 4, s (部材数) = 88, r (剛接部材数) = 40

k (節点数と支点数の総和) = 67

$m = n + s + r - 2k = 4 + 88 + 40 - 2 \times 67 = -2 < 0$

従ってこのはさみの構造体は、理論上ある一点をその近傍で平面的に移動させたとき歪を蓄えることなく一意的に形状が定まる、2次の不安定構造であり、さらに滑車とケーブル間に生ずる摩擦力も考慮すると、ケーブル張力の付与つまり巻き揚げ巻き戻し操作の仕方に依っては、そのアップ&ダウン行程に於いて、形状の対称性を失うことが懸念された。そこで、ここでは少なくとも全行程に於いてケーブルの両端部に同一の張力を作用させることが重要と考え、そのために、まず、ケーブルは図・5のセンターヒンジにおける部材配置を参照して、アーチ・中央部を始点とし、上述した経路にしたがってはさみ構造体の中をジグザグ状に順次配置し、そして、図・10に示すように、両ケーブルを、それぞれの端部に掛け回した後アーチの外部に延長し、さらに図・11に示すように金具とウィンチ・ケーブル(φ8)を経由して、最終的に、他のR.C.基礎リングに設置された一台のウィンチに繋ぐというシステムを採用している。このシステムによって、センターヒンジを境とする左右のそれぞれのケーブル巻き揚げ巻き戻し長さはほぼ同じとなり、センターヒンジ点の水平移動は拘束される。結局、本構造体は1次の不安定構造となり、センターヒンジ点は垂直方向にのみ移動が可能となる。使用したウィンチは手動ラチェット式(1ton用)で、ウィンチ張力の測定にロード・セル(2ton)を用いた。このウィンチによるケーブルの巻き揚げ巻き戻し操作は、はさみ構造体のセンター・ヒンジ高さ: H (図・10参照)が150cmから250cm迄の範囲に於いて、繰り返し行われたが、その開始に先立ち構造体をセンター・ヒンジで一時的に支持しその対称性を確認しながら、ケーブルへの初期張力を

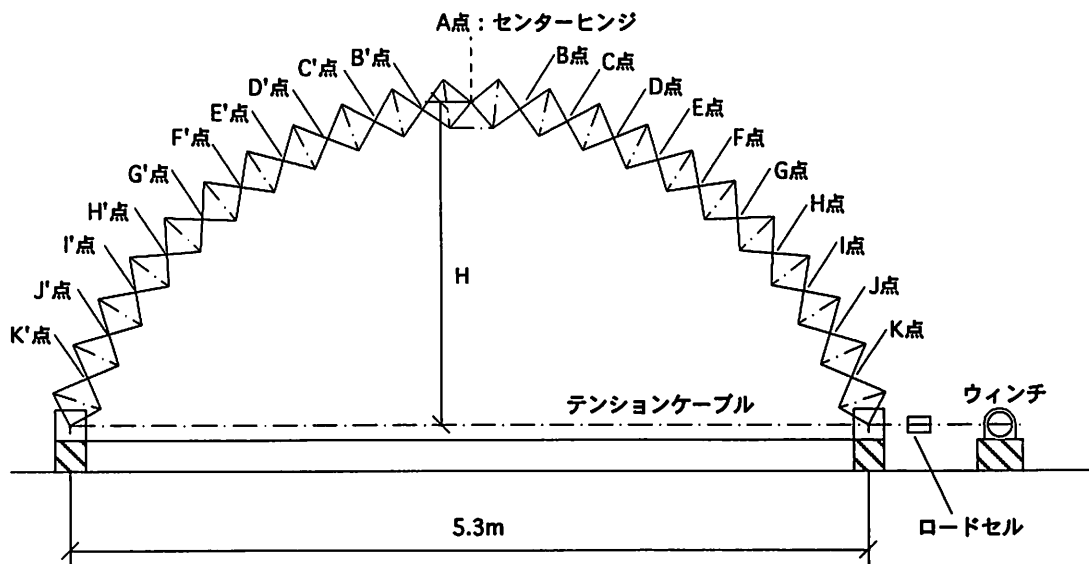


図10. アップ&ダウン実験ダイアグラム

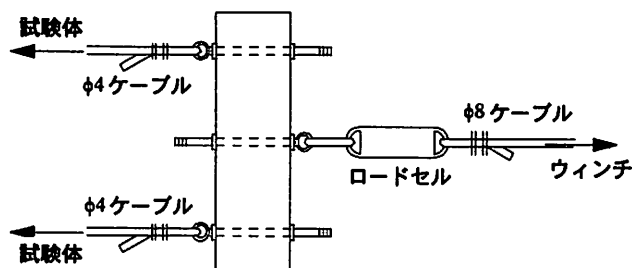


図11. ケーブル接合部

導入した。実験中、Hが低い範囲で、面外曲げ剛性の不足によって横座屈が発生した為、その防止対策としてセンター部分の両側に軽微なワイヤーを取付けて人意的に面外変位を拘束している。図・12は実験状況を示したもので、縮尺モデルの形状変化の様子が分かる。Hを実験パラメータとして、Hが150cm～250cm@25cmの時、図・10に示される各点の高さ測定を箱尺で行った。

表・1は、全ての実験結果のうち、1サイクル分を示したもので、他も同様の結果が得られている。ここで、表中のupは巻き揚げ行程、downは巻き戻し行程を意味し、そして、1サイクルとはup & downのことを表している。又、計算値は、ケーブル材を無視して得られる不安定はさみ構造体の幾何学的形状変化を考慮して算定されている。(APPENDIX 参照)

表・1より、形状については、1. 全ての行程で構造体の対称性がほぼ保たれていること、2. 各Hに対して、up・downの行程に依らずほぼ一意的に定まること及び図・13より、中央点と支持点の間で、実験値は計算値を少し下回りやや円弧形状からはずれること、が認められた。1の結果より、

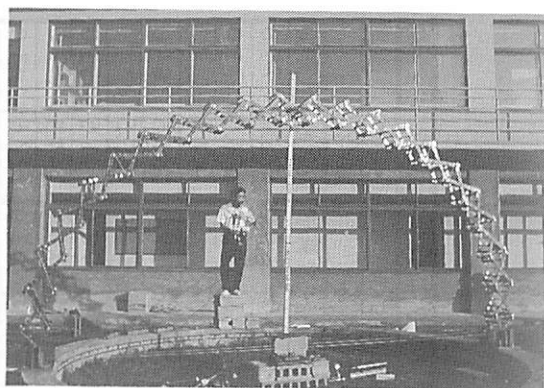
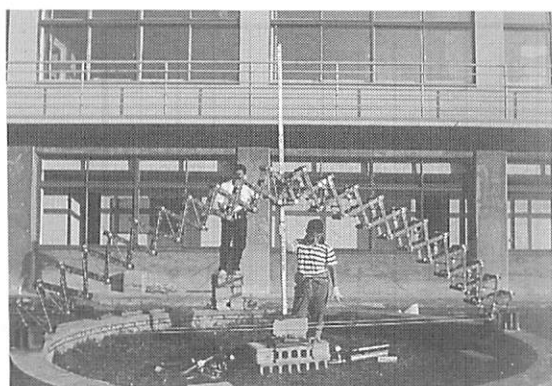


図12. 実験状況

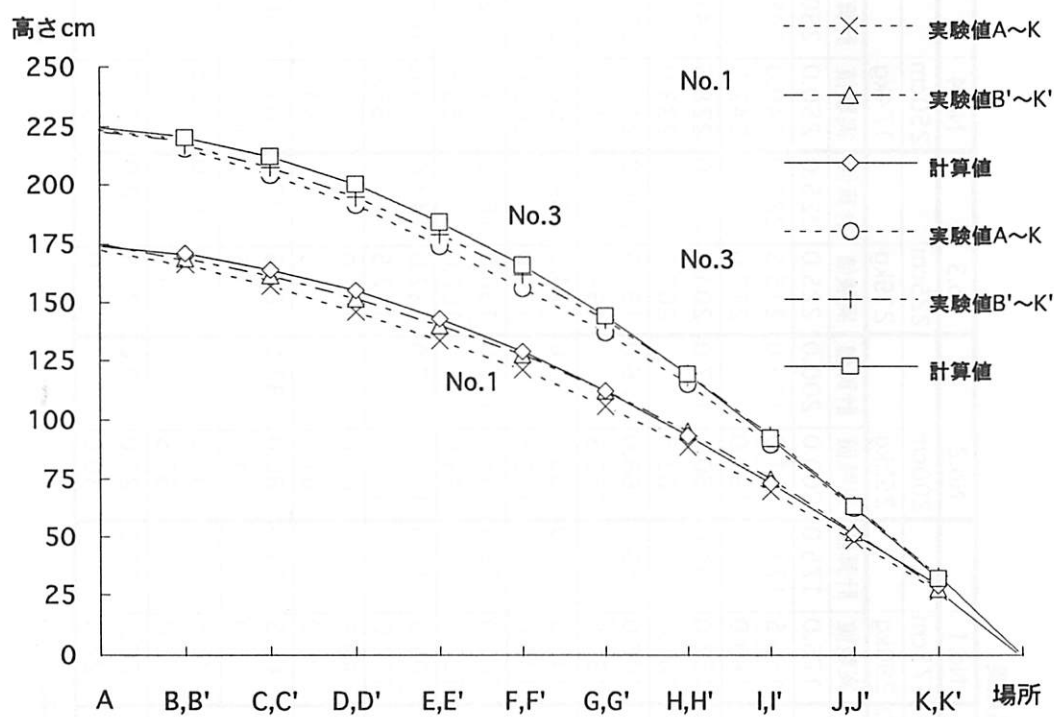


図13. 形状測定結果(ライズ=175cm, 225cm)

表・1 実験結果

実験No.	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6		No.7	
ライズ	175cm		200cm		225cm		250cm		225cm		200cm		175cm	
ウィンチ張力	290kg		252kg		219kg		174kg		90kg		114kg		124kg	
測定点	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値
A	175.0	175.0	200.0	200.0	225.0	225.0	250.0	250.0	225.0	225.0	200.0	200.0	175.0	175.0
B	166.5	171.0	191.0	195.0	215.5	220.0	240.0	248.0	214.5	220.0	187.5	195.0	164.0	171.0
B'	169.0		193.0		217.0		242.5		216.0		191.0		167.0	
C	157.0	164.0	180.5	187.0	204.0	212.0	228.5	241.0	202.0	212.0	175.5	187.0	153.5	164.0
C'	161.5		183.5		207.5		233.0		205.0		180.0		156.5	
D	146.0	155.0	168.0	176.0	191.5	200.0	214.0	229.0	188.0	200.0	162.0	176.0	141.5	155.0
D'	151.5		172.5		194.5		219.0		191.5		166.0		144.5	
E	133.5	143.0	153.5	163.0	174.0	184.0	196.5	213.0	170.0	184.0	146.0	163.0	127.5	143.0
E'	140.0		159.5		179.0		202.0		174.5		150.5		131.0	
F	121.0	129.0	138.5	146.0	156.0	166.0	177.5	192.0	150.0	166.0	130.0	146.0	113.5	129.0
F'	127.5		144.0		162.0		183.5		155.0		134.0		116.0	
G	105.5	112.0	121.5	127.0	137.0	144.0	155.0	166.0	130.0	144.0	111.5	127.0	97.5	112.0
G'	112.0		127.0		142.5		161.0		134.0		114.5		100.0	
H	88.5	93.0	102.0	106.0	115.0	119.0	130.5	138.0	107.0	119.0	92.5	106.0	81.0	93.0
H'	95.0		107.0		119.5		134.0		109.5		93.5		82.5	
I	69.5	73.0	80.0	82.0	89.5	92.0	101.5	106.0	84.0	92.0	71.0	82.0	62.0	73.0
I'	75.0		83.5		93.5		104.5		84.5		72.5		63.5	
J	48.5	51.0	55.5	56.0	62.5	63.0	69.5	72.0	56.0	63.0	48.5	56.0	43.0	51.0
J'	52.0		57.5		64.0		71.5		58.0		49.5		43.5	
K	26.5	29.0	29.0	29.0	32.5	32.0	36.0	37.0	29.0	32.0	25.0	29.0	21.5	29.0
K'	27.5		30.0		33.0		37.0		30.0		26.0		21.5	

重力効果がケーブルにはほぼ左右対称の張力を与え、構造体の安定度を高めていることが推測される。2は本はさみ構造体が弾性範囲内にとどまっていることを示唆し、更に円弧形状との相違の理由として自重による弾性変形や加工精度に伴うガタの影響が考えられる。

表・1のうちウィンチ張力についてまとめると図・14を得る。図・14は横軸にライズH (cm)を縦軸にウィンチ張力を、up と down のそれぞれの場合について示したものである。これより、ウィンチ張力について、3. Hが同一でも up・down の行程に依って大きさが異なり、up 時の張力は down 時のそれを上回ること、又、4. Hが高くなると、up & down いづれの場合も張力は減少すること、が一目瞭然である。3は滑車とケーブルの間に生ずる摩擦力が原因と考えられる。仮に摩擦力が零とした時のウィンチ張力： T_0 は、up と down の時の張力の平均値から求められると推測され、 $H = 175, 200, 225\text{cm}$ について、 T_0 はそれぞれ207kg, 183kg, 154.5kgとなり、これらに対応する摩擦力Fはおおの83kg, 69kgそして64.5kgと減少している。今、ここで F/T_0 はそれぞれ0.4, 0.38, 0.417で、Hによらず、ほぼ一定の値を示している。4についてはウィンチ張力はアーチのスラスト反力の2倍と考え、その値を T_E とすると、 $T_E = 2 * \text{全重量} * \text{スパン} / (8 * H) = 29454 / H$ となる。(ここに、全重量 $= 9.6 \times 23 + 1.5 = 222.3\text{kg}$, スパン $= 530\text{cm}$)
従って、 T_E はそれぞれ168kg, 147kg, 131kgとなり、 $T_0/T_E = 1.18 \sim 1.24$ と定性的に良い対応を示している。

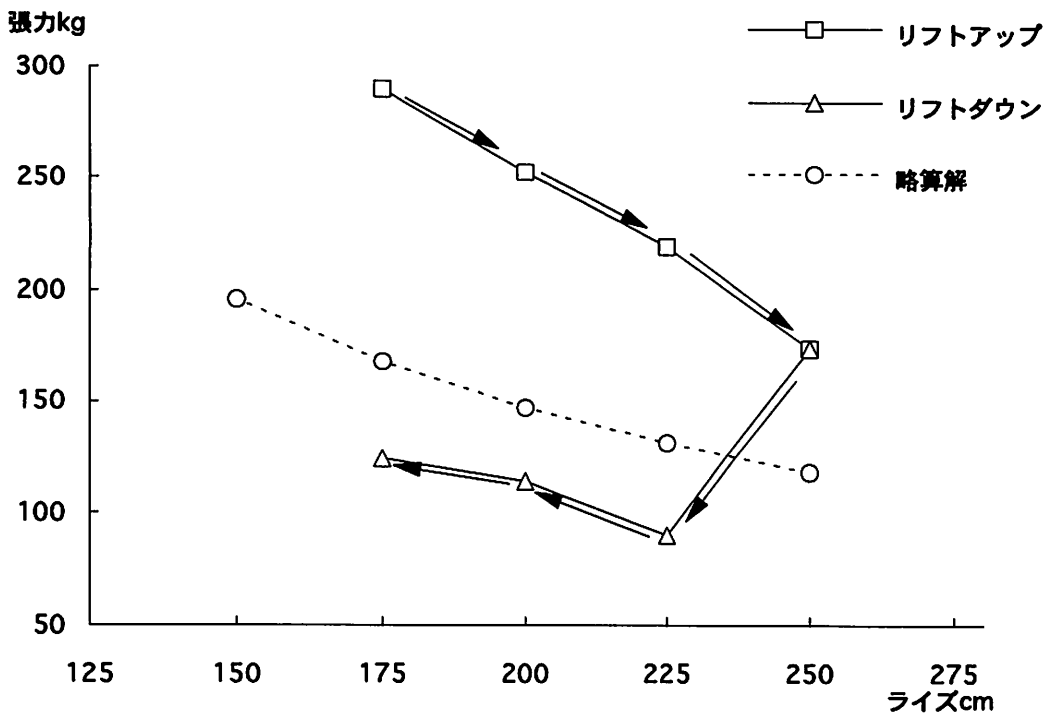


図14. ウィンチ張力ーライズ高さ

4. まとめ

はさみの機構にヒントを得て、アーチ状可変構造体の構法を提案した。即ち、アーチ状はさみ連結体に引張ケーブルをジグザグに配置し、ウィンチ等の巻き揚げ巻き戻し操作によって、その全体形状を連続的に変化せしめる方法である。この方法は 1. はさみ連造体の伸縮・展開を簡便にして可能ならしめると同時に、2. 形状変化中の任意の段階で、安定で力学的合理性を有するトラスを形成するといった特長がある。さらに、鉄製のスパン5.3mアーチモデルを試作し、ウィンチ操作によるリフト・アップ&ダウン実験を行い、本基本アイデアの妥当性を検証した。

謝辞：本研究の遂行に際して、1993年度北海道東海大学教育研究基金の補助を受けた。鉄製アーチの試作は平成5年度卒業ゼミ生：安倍俊昭，佐藤昭俊，関根健太郎，多賀文秋君によって，行われた，又，部材製作は佐藤利夫氏の指導を受けた。ここに，謝意を表します。

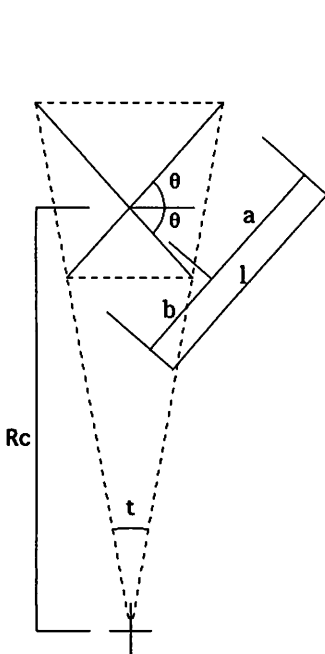


Fig 1. はさみユニットの形状パラメータ

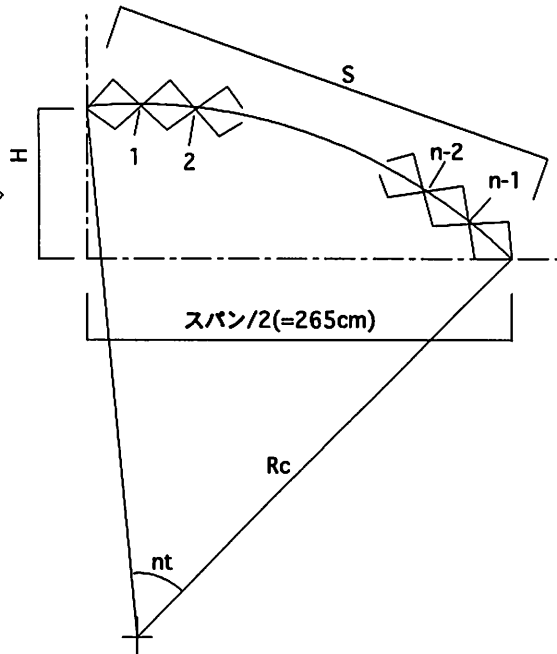


Fig 2. はさみ構造体の形状パラメータ

APPENDIX：円弧状はさみ・アーチの形状変化

同一のユニット (Fig・1) からなる Fig・2 の円弧状はさみ連結体を対象とし，両端点間の距離：S とはさみ・ユニットの形状：θ の関係を求めると次のようになる。

$$R_c = \frac{2(\alpha - 1)}{\alpha(\alpha - 2)} \sin \theta \cdot \ell$$

$$\text{ここに, } \alpha = \frac{\ell}{b}, \quad \alpha > 2, \quad \ell = a + b$$

$$t = 2 \tan^{-1} \left[\frac{\alpha - 2}{\alpha} \cot \theta \right]$$

$$\text{従って, } S = \frac{4(\alpha-1)}{\alpha(\alpha-2)} \sin \theta \cdot \ell \cdot \sin \left[n \cdot \tan^{-1} \left| \frac{\alpha-2}{\alpha} \cot \theta \right| \right] \dots\dots\dots(1)$$

式・(1)より、 n 、 α 、 ℓ を与えると、 S と θ の関係が具体的に求められる。
 本縮尺モデルの場合、 $n=11$ 、 $\alpha=2.103$ 、 $\ell=44.8\text{cm}$ で、これより、 $\theta=0.550\text{rad}$ のとき S は最大値： $S_{\text{max}}=366.656\text{cm}$ 、つまり $H_{\text{max}}=253.4\text{cm}$ となりこの θ を境にアーチは正ポインテッドから逆ポインテッドに移行し、一種の“うなづき現象”が解析的に予測され、このことは今回の実験でも確かめられた。

参考文献

1. TORVALD FAEGRE: TENTS ARCHITECTURE OF THE NORMADS, ANCHOR PRESS/DOUBLEDAY. NEWYORK 1979, PP.79-95
2. PINERO, E. P.: EXPANDABLE SPACE FRAMING, PROGRESSIVE ARCHITECTURE, VOL. 43, NO. 6, PP. 154-155, JUNE 1962
3. FELIX ESCRIG: EXPANDABLE SPACE STRUCTURES, SPACE STRUCTURES 1 (1985) 79-91
4. F. ESCRIG, J. P. VALCARCEL: GEOMETRY OF EXPANDABLE SPACE STRUCTURES, INTERNATIONAL JOURNAL OF SPACE STRUCTURES VOL. 8 NOS. 1 & 2 1993, 71-84
5. AGOSTINO ZANARDO: TWO-DIMENSIONAL ARTICULATED SYSTEMS DEVELOPABLE ON A SINGLE OR DOUBLE CURVATURE SURFACE, MECCANICA 21, 106-111 (1986)
6. L. PUERTAS DEL RIO: SPACE FRAMES FOR DEPLOYABLE DOMES, BULLETIN OF OF THE I. A. S. S., VOL, 32 (1991)N. 2 PP. 107-113
7. P. VALCARCEL, J. B. ESCRIG, F. ESTEVES, J. MARTIN, E.: LARGE SPAN EXPANDABLE DOMES, INT. SYMPOSIUM; ON LARGE SPAN STRUCTURES, IASS. TRONT 1992, 619-630
8. FELIX ESCRIG, JUAN P. VALCARCEL: ANALYSIS OF EXPANDABLE SPACE BAR STRUCTURES, SHELLS, MEMBRENEs AND SPACE FRAMES, PROCEEDINGS IASS SYMPOSIUM, OSAKA, 1986, VOL. 3, PP. 269-276
9. YECHIEL ROSENFELD AND ROBERT D. LOGCHER: NEW CONCEPTS FOR DEPLOYABLE-COLLAPSABLE STRUCTURES, JOURNAL OF SPACE STRUCTURES, VOL. 3 NO. 1 (1988) 20-32
10. A. S. K. KWAN, Z. YOU AND S. PELLEGRINO: ACTIVE AND PASSIVE CABLE ELEMENTS IN DEPLOYABLE / RETRACTABLE MASTS, INTERNATIONAL JOURNAL OF SPACE STRUCTURES VOL. 8 NOS. 1 & 2 1993