膜材料と二層立体ラチス平板から成る ハイブリッド構造の弾性座屈性状

谷口 与史也[*1]
坂　　壽二[*2]
前畑　　徹[*3]

梗　　概

空間構造物の大スパン化とそれに伴う軽量化，さらに架構の自在性を追求する一つの方法として，仕上げ材料と構造体が一体となることによって実現可能なハイブリッド構造形式が考えられる．本論では，膜材料とラチスフレームが一体となったハイブリッド構造の一つとして，二層立体ラチス平板に膜材料を取り付けた場合について，膜材料の座屈荷重と座屈モードに及ぼす効果を弾性座屈解析によって検討している．解析では膜材料を4方向トラスモデルに線材置換している．また，解析のパラメータとして（正方形＋正方形），（菱形＋正方形）型の2種類の網目模様，膜材料の2種類の取付け方向である．解析結果として弾性座屈荷重は約50%程度増加することが分かった．

1.　はじめに

ハイブリッド構造の研究としては，骨組構造での鉄骨鉄筋コンクリート部材やコンクリート充填鋼管部材などのように異種材料で構成される合成構造要素の研究[1)]は早くから行われており，次いで空間構造物におけるケーブル材と骨組構造を組み合わせた張弦梁構造に代表されるハイブリッド構造[2)]の研究，ケーブルと膜材料とで構成されたテンション膜構造もハイブリッド構造であり，その他種々の研究が挙げられる。第1番目は部材レベルでのハイブリッド化であり，後の2つは構造形式レベルでのハイブリッド化である．このようなハイブリッド化は今後も，各種技術の進歩や多機能化によって，部材レベルでのハイブリッド化から構造形式レベルへと向かいつつあると思われる，本論で対象とするハイブリッド構造は，そのように異種部材や異種構造システムが一体となり個々の要素の性能向上やシステム全体として新たな性能を生み出すような構造形式であり，空間構造物の大スパン化とそれに伴う軽量化，さらに架構の自在性を求める一つの方法と考える．

空間構造物に用いられるラチス構造のハイブリッド化に関するこれまでの研究としては，まずピン節時に無応力状態で生じる不安定な高次変形モードを有する正方形網目と菱形網目から成る二層立体ラチス平板の座屈耐力に及ぼす屋根仕上材の効果に関する実験的研究を行い，屋根材が立体ラチス平板のこの高次変形モードを拘束し座屈耐力を上昇させることを明らかにした[3)]．そこでは，屋根材は立体ラチス平板の接合部で固定されており，2つの構造物の接点はまさに点によるものであった．

次に，圧縮軸力を受ける正方形ラチスフレームに膜を直接取り付けた1構造ユニットの座屈崩壊実験を行い，ラチス部材に膜材料が連続的に接続された場合のラチスフレームの座屈挙動に及ぼす膜材の効果を実験的に明らかにしている．さらに，数値解析により弾性座屈荷重と座屈モードを算定し実験結果と比較考察している．その結果，座屈荷重については約15%上昇することが分かった[4)]．また，このようにラチス構造がハイブリッド化を受けることによって，異なった構造材料相互の接続は点から線へ，節点から部材へと展開していく必要があり，ラチス構造システムも本来の節点から部材へと力が流れる力学システムを変えなければならないと言える．すなわち，ラーメン構造物の梁のように部材に材軸直交方向の荷重を受けることが想定される．このラチス部材の材軸直交方向の荷重を考慮する為に座屈撓角式から誘導された分布荷重を受ける部材の接線剛性方程式が提案されており，簡単な平面ラチス梁を対象として分布荷重の弾性座屈性状に及ぼす効果を明らかにしている．さらに上弦材に分布荷重が作用した立体

*1 大阪市立大学工学部建築学科　助教授・工博
*2 大阪市立大学工学部建築学科　教授・工博
*3 大阪市立大学大学院工学研究科建築学専攻　修士課程

ラチス梁の座屈崩壊実験結果との比較により解析法の妥当性を検証している[5]．

そこで本論では，前述の膜材料と正方形ラチスフレームから成る1構造ユニットのハイブリッドを面的に広げた場合，すなはち複数の構造ユニットが繰り返し結合されるラチス構造に膜材料を取り付けた場合の弾性座屈荷重と座屈モードに及ぼす効果を調べる．ラチス構造としては（正方形＋正方形）型と（菱形＋正方形）型の2種類の二層立体ラチス平板を対象とし，膜材料を上面に取り付けるものとする．また膜材料は経糸と緯糸の方向を上弦材に並行になるように取り付けた場合と斜め45度方向に取り付けた場合の2種類について検討する．

2．　ハイブリッド構造モデル

2．1　膜材料

膜材料はA種膜材料を用い，その機械的な性質は文献6)より引用した値をTable1に示す．

Table1 Mechanical property of membrane

Property	Value	
Tensile stiffness of warp direction Et_w	4.30	kN/cm
Tensile stiffness of weft direction Et_f	2.23	kN/cm
Shear stiffness G_t	0.163	kN/cm
Poisson's ratio regarding warp direction ν_w	0.18	
Poisson's ratio regarding weft direction ν_f	0.08	

織糸で構成されている膜材料をFig.1に示すように線材に置換するモデルを用いる．モデル化に際して膜材料を直行異方性トラスとして取り扱う．また，式(1)により各線材の剛性を定める[2]．

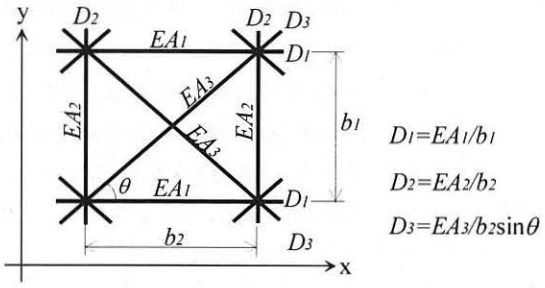

Fig.1 Four way truss

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_{xy} \\ N_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{1111} & D^{1112} & D^{1122} \\ & D^{1212} & D^{1222} \\ Sym. & & D^{2222} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

$$D^{1111} = D_1 + 2D_3 \cos^4\theta$$
$$D^{2222} = D_2 + 2D_3 \sin^4\theta$$
$$D^{1122} = D^{1212} = 2D_3 \cos^2\theta \sin^2\theta$$
$$D^{1112} = D^{1222} = 0$$

解析に用いた膜材のモデルは，繊維方向とフレーム部材が平行なParallelタイプと繊維方向とフレーム部材が45度の角度をなすDiagonalタイプの2種類である．これら2種類のタイプにおける膜材料の要素分割と線材置換モデルの各剛性をFig.2, Fig.3に示す．膜材料のフレーム部材への取り付け方については，フレーム上弦材に膜材料を取り付け，フレーム上弦部材を4分割し中間節点を設けその節点に膜材料の置換トラスを取り付けることとした．そのためFig.2, Fig.3に示すようにParallelタイプとDiagonalタイプにおいて膜材料の緯糸方向と経糸方向の分割数が異なるモデルとなっている．

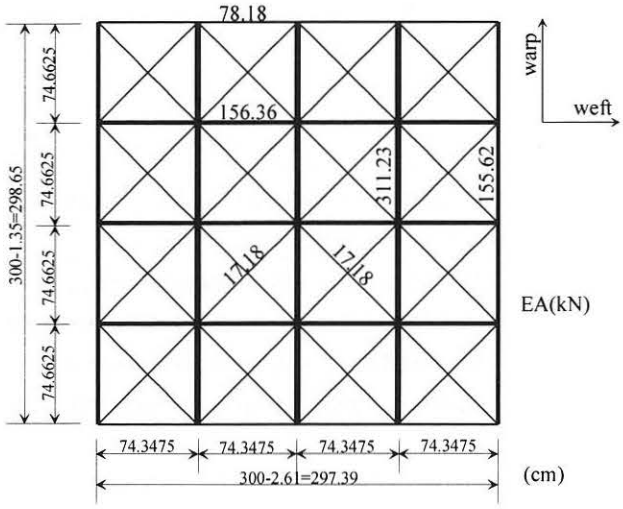

Fig.2 Numerical model of membrane (Parallel type)

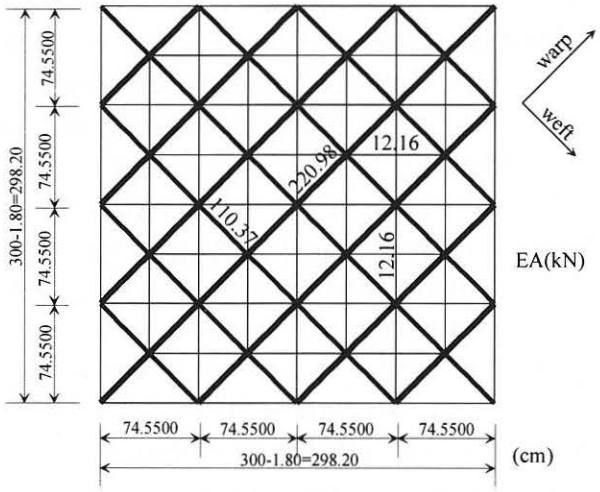

Fig.3 Numerical model of memberane (Diagonal type)

張力導入方法は実際の組み立て順序を考慮して，膜材がフレーム寸法に到達するまで4辺直交方向から膜材を引張り，初期張力が2 kgf/cm程度となるように各縮み率を定め，張力を導入することとしている．張力導入後，膜材をラチスフレームと合わせ，不釣合力が解消さ

れるまで収斂計算を行っている．収斂計算の結果導入された膜材料の張力はすべての線材モデルにおいて設計張力の99.7%以上となっており，ほぼ設計どおりの張力が導入されている．

2．2 ラチスフレーム

ハイブリッド構造を構成するラチスフレームはFig.4, Fig.5に示す正方形網目と菱形網目から成る二層立体トラス平板を用いる．以降，Fig.4に示す正方形網目から成る二層立体トラス平板をSS (Square on Square)型トラス，Fig.5に示す菱形網目から成る二層立体トラス平板をDS (Diagonal on Square)型トラスと呼ぶ．

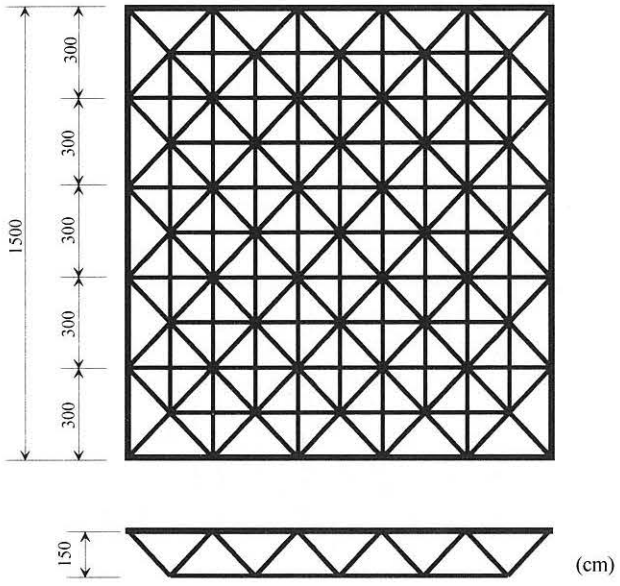

Fig.4 Square on Square type truss frame

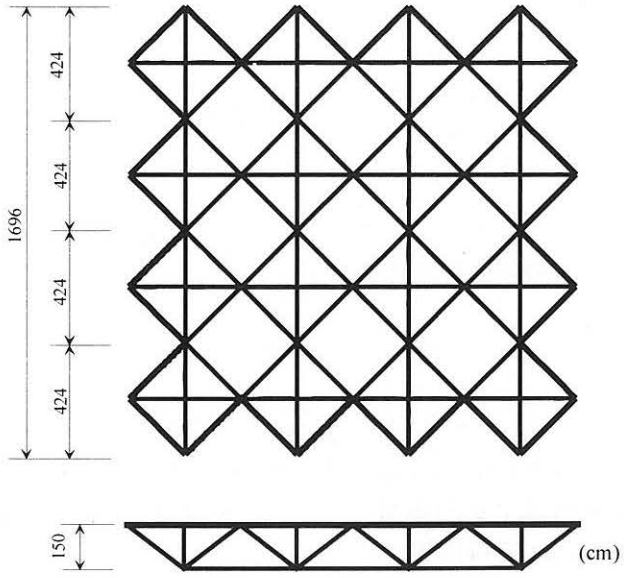

Fig.5 Diagonal on Square type truss frame

ラチスフレーの各節点は剛接とし，上弦材外縁の部材には正方形断面角型鋼管部材を使用し，上弦材の内側の部材には膜材料によるフレーム材の横方向の拘束が期待できるため外縁部材断面の横方向の長さを1/2にした角型鋼管部材を用いる．斜材および下弦材については円形断面鋼管部材を用いる．各フレーム部材の断面形状および断面性能をTable2に示す．

Table2 Mechanical property of frame

Upper chord member		Diagonal member	Lower chord member
Outer edge	Inner side		
Section size (cm)			
90×90×3.2	90×45×3.2	89.1×89.1×3.2	89.1×89.1×3.2
Cross sectional area A (cm^2)			
10.850	7.967	8.636	8.636
Geometrical moment of inertia I (cm^4)			
135.0	80.2 / 27.0	79.8	79.8
Slenderness ratio			
85.23	94.64 / 163.04	98.68	98.68

2．3 膜材料の取り付け方向

解析は膜材料を張らないSS型，DS型のフレーム２つ，2.1章によりモデル化されたParallelタイプの膜材料及びDiagonalタイプの膜材料をそれぞれSS型，DS型フレームに張ったハイブリッド構造４つの計6タイプについて行う．Parallelタイプの膜材料をそれぞれSS型，DS型フレームの上弦材に張ったものをP-SS型，P-DS型，Diagonalタイプの膜材料を張ったものをD-SS型，D-DS型と以降呼ぶこととする．それぞれ膜材料をフレームに取り付けたハイブリッド構造モデルをFig.6～9に示す．

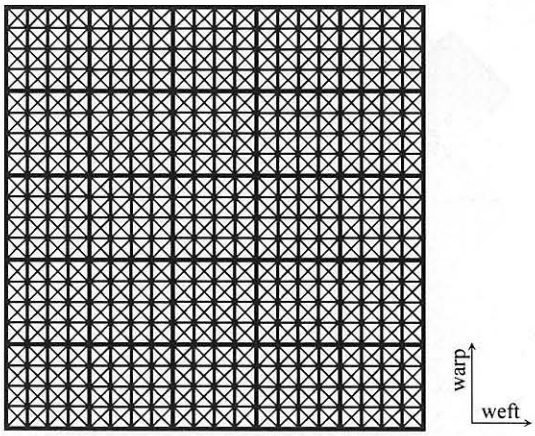

Fig.6 Square on Square type hybrid structure (Parallel type)

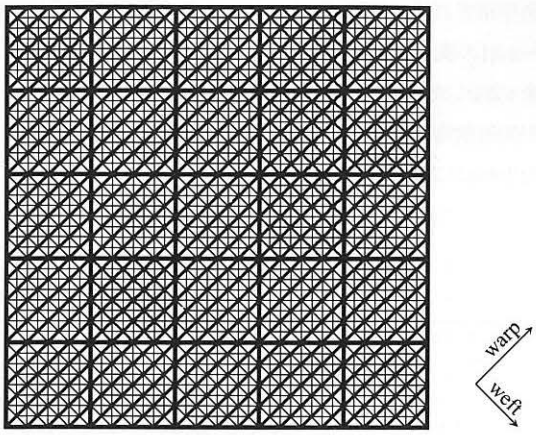

Fig.7 Diagonal on Square type hybrid structure (Parallel type)

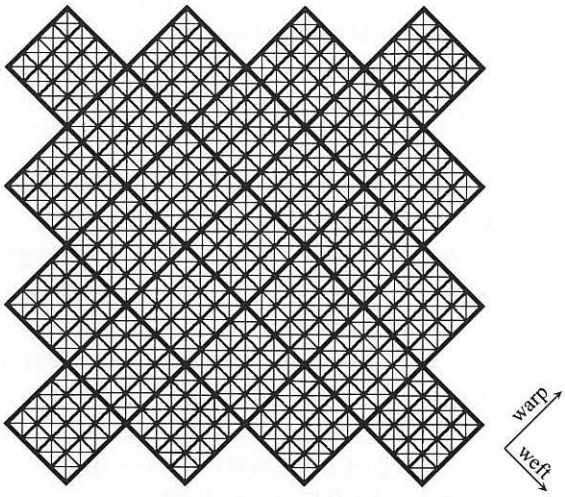

Fig.8 Square on Square type hybrid structure (Diagonal type)

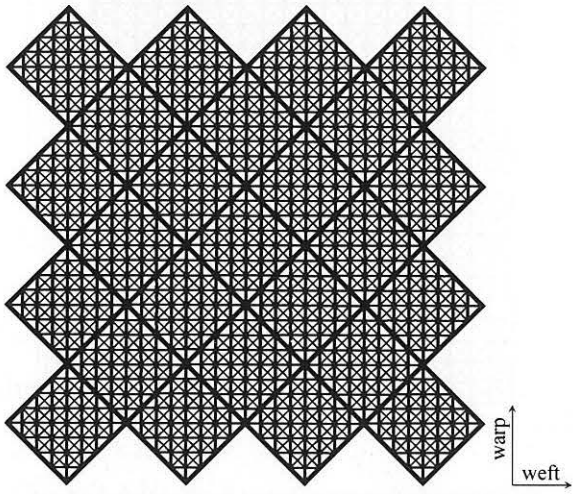

Fig.9 Diagonal on Square type hybrid structure (Diagonal type)

2．4　支持条件および荷重条件

ラチスフレームの境界条件は上弦材の外縁各節点二方向ローラー支持とし，荷重状態は上弦材の各節点に等価荷重をかける．そのモデルをそれぞれFig.10, Fig.11に示す．

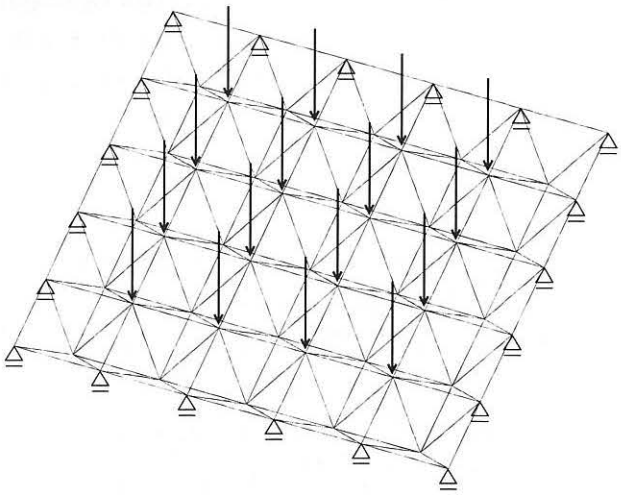

Fig.10 Boundary condition and load condition (SS truss)

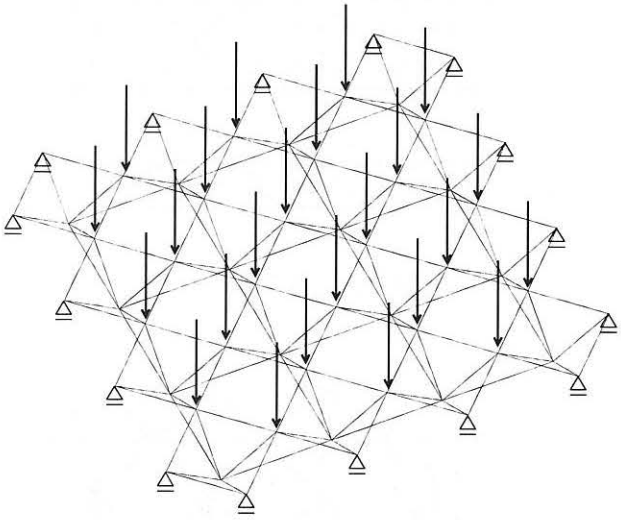

Fig.11 Boundary condition and load condition (DS truss)

3．　弾性座屈解析結果

本論では座屈撓み角法を用いた弾性座屈解析を行う．得られた弾性座屈荷重をTable3に示す．

SS型フレームでは，ハイブリッド構造のParallelタイプの弾性座屈荷重はラチスフレームのみの場合より約55%高く，Diagonalタイプでは約41%高い．また，DS型フレームでは，Parallelタイプの場合が約60%高く，Diagonalタイプでは約48%高い．どちらのフレームの場合もParallelタイプの場合に座屈荷重の増加率が高く，SS型よりもDS型のほうが座屈荷重の増加率が高い．

Table3 Elastic buckling load

Structural System					
SS type			DS type		
Truss frame	Hybrid structure		Truss frame	Hybrid structure	
	Parallel	Diagonal		Parallel	Diagonal
Elastic buckling load (kN)					
2075.64	3221.75	2921.77	1803.98	2884.83	2673.73
Amount of an increase in elastic backling load (kN)					
---------	1146.11	846.13	---------	1080.84	869.75
The increase rate of elastic buckling load (%)					
---------	155.2	140.8	---------	159.9	148.2

Fig.12, 15にそれぞれSS型フレーム, DS型フレームの座屈モード, Fig.13, 16にそれぞれParallelタイプの膜材料を張ったSS型, DS型ハイブリッド構造の座屈モード, Fig.14, 17にそれぞれDiagonalタイプの膜材料を張ったSS型, DS型ハイブリッド構造の座屈モードを示す.

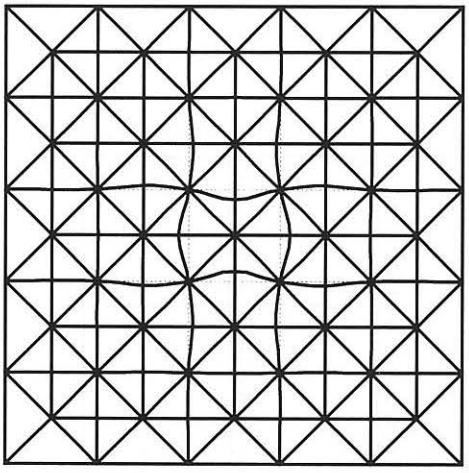

Fig.12 Elastic buckling mode of SS truss

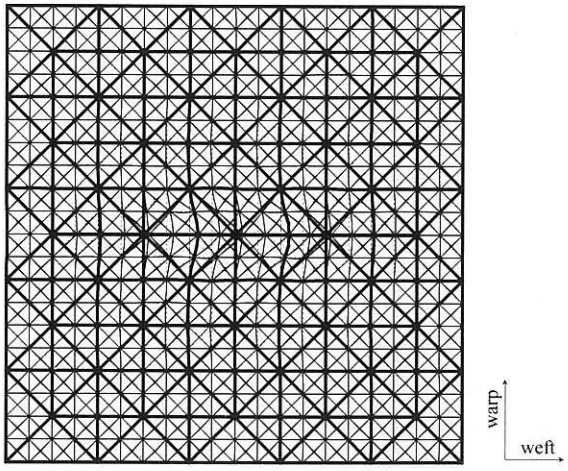

Fig.13 Elastic buckling mode of SS hybrid (Parallel type)

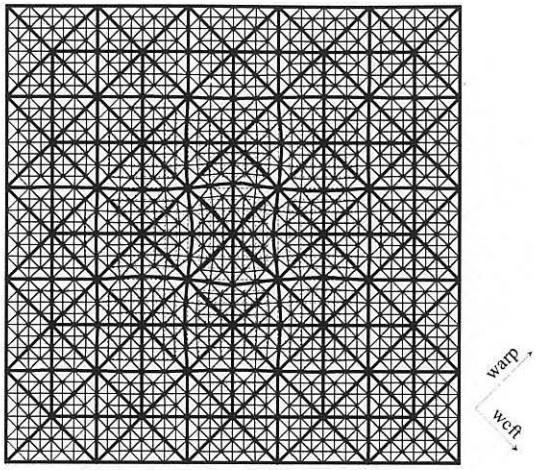

Fig.14 Elastic buckling mode of SS hybrid (Diagonal type)

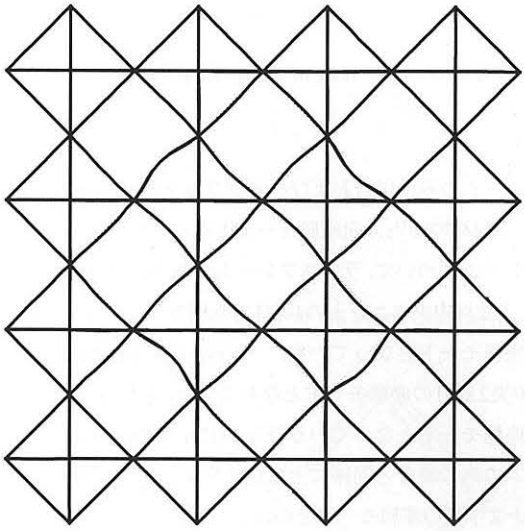

Fig.15 Elastic buckling mode of DS truss

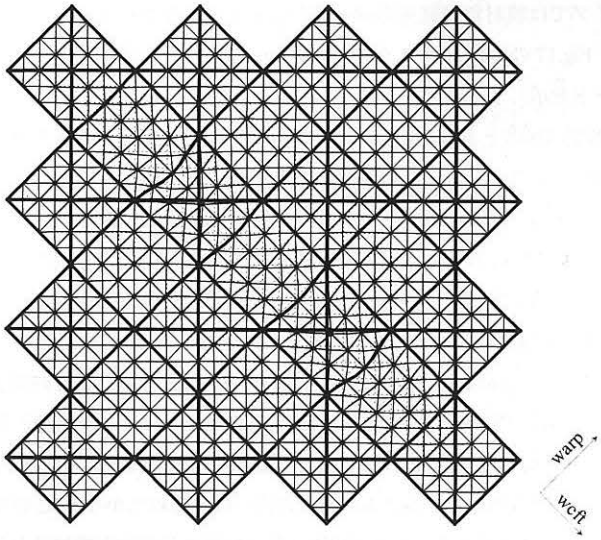

Fig.16 Elastic buckling mode of DS hybrid (Parallel type)

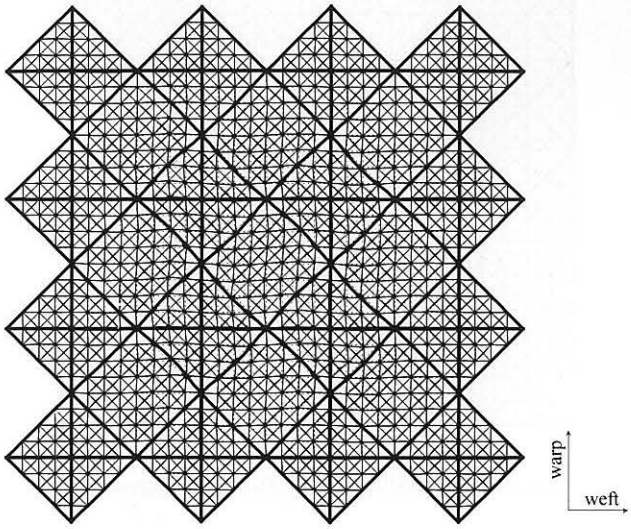

Fig.17 Elastic buckling mode of DS hybrid (Diagonal type)

ラチスフレームのみの場合およびハイブリッド構造の各場合ともに，上弦材水平部材の面内方向座屈モードとなっている．

SS型のフレームについて，ラチスフレームのみの場合Fig.12に見られるように，上弦材中央ユニットの4部材の座屈モードとなっており，十文字型の座屈モードとなっている．一方Fig.13のParallelタイプでは，上弦材中央2部材の座屈モードとなっており，膜材料の経糸方向の一文字型座屈モードとなっている．Fig.14に示すDiagonalタイプでは，フレームのみの場合と同様に上弦材中央4部材の座屈モードとなっており十文字型の座屈モードとなっている．

DS型のフレームについては，Fig.15のフレームのみの場合は，中央から一つ外のユニットにおける4部材の十文字型の座屈モードとなっており，ハイブリッド構造についてはSS型と同様に，Fig.16のParallelタイプでは膜材料の経糸方向への一文字型の座屈モードになっており，Fig.17のDiagonalタイプではフレームのみの場合と同様の座屈モードを示している．

SS型，DS型ともにDiagonalタイプの膜材料を張ったハイブリッド構造では，フレームのみの場合の座屈モードと同じ十文字型の座屈モードを示すが，Parallelタイプの膜材料を張ったハイブリッド構造では，フレームのみの場合と異なり膜材料の経糸方向一文字型の座屈モードを示しており，膜材料の張り方の違いにより異なる座屈モードが現れている．

また，座屈直前までのフレーム中央ユニットの節点の荷重方向節点変位と荷重の関係を調べた結果，SS型，DS型ともにフレームのみ及びハイブリッド構造においてもその節点変位は線形に増加しており，ハイブリッド構造とフレームのみでの違いは見られなかった．このことより，膜材料がハイブリッド構造全体の剛性に及ぼす影響はほとんどないといえる．

次に，Fig.18, 21にそれぞれSS型フレーム，DS型フレーム，Fig.19, 22にそれぞれParallelタイプの膜材料を張ったSS型，DS型ハイブリッド構造，Fig.14, 17にそれぞれDiagonalタイプの膜材料を張ったSS型，DS型ハイブリッド構造の座屈直前の軸力分布図を示す．ただし，図内では圧縮を正として表示している．

SS型のハイブリッド構造についてFig.20に示すDiagonalタイプでは，一つの部材に対して一様な軸力が作用しておらず一つの部材においても軸力分布の違いが現れており．この傾向は外周付近さらに四隅ほど大きくなっている．中央付近の部材では一様な軸力となっているのに対し，四隅の部材においては一部材内で最大約16%の軸力分布の差がある．一方，Parallelタイプではフレーム外周部の部材に軸力分布のばらつきが見られるが，約1%ほどの差であり一部材内ではほぼ一様な軸力分布となっているといえる．DS型のハイブリッド構造においてもParallelタイプでは軸力の偏りは見られず，Diagonalタイプではその外周部材で約1%の偏りとなっており，ともに一部材内での大きな軸力分布の偏りはない．フレームと膜材料の張り方の組み合わせにより一部材内の軸力分布に偏りが現れている．

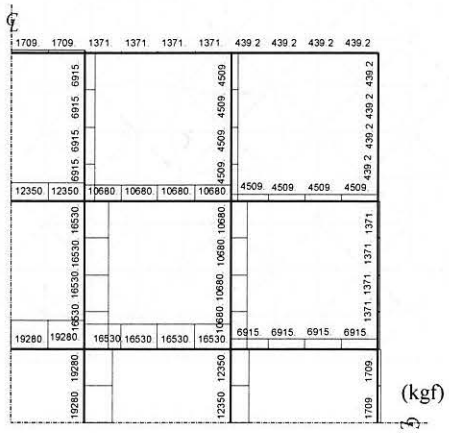

Fig.18 Stress distribution of SS truss

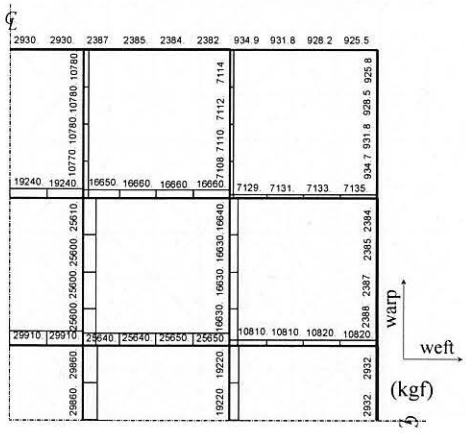

Fig.19 Stress distribution of SS hybrid (Parallel type)

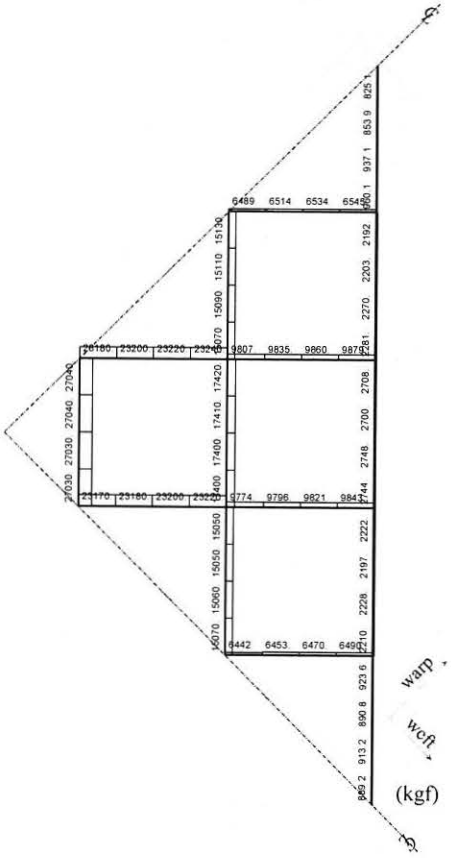

Fig.20 Stress distribution of SS hybrid (Diagonal type)

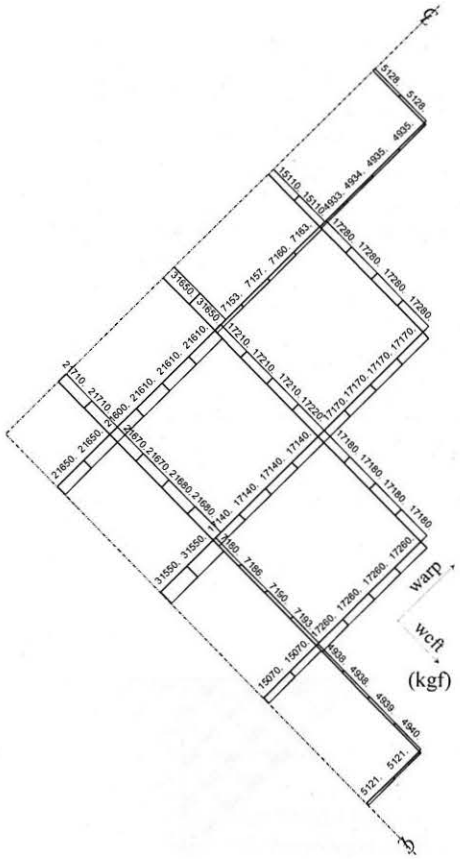

Fig.22 Stress distribution of DS hybrid (Parallel type)

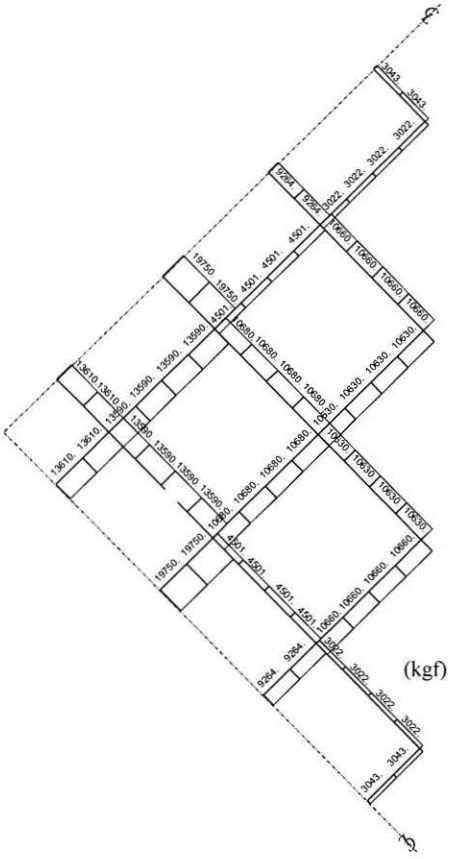

Fig.21 Stress distribution of D S truss

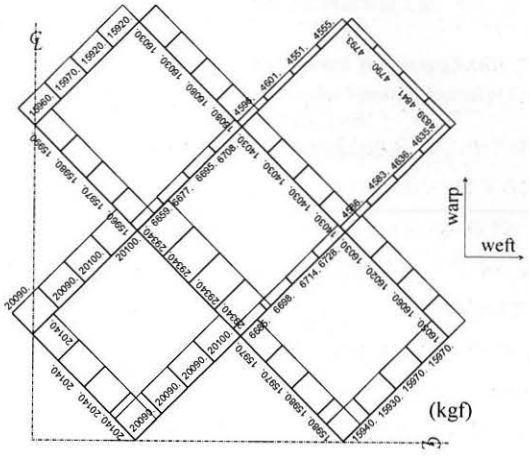

Fig.23 Stress distribution of DS truss (Diagonal type)

座屈直前の膜材料の張力について，それぞれFig.24にP-SS型，Fig.25にD-SS型，Fig.26にP-DS型，Fig. 27にD-SD型のハイブリッド構造に張られた膜材料の張力分布を示す．軸力の分布を薄い灰色で表しており，分布のスケールが張力の分布の大きさを表し，最大の張力の値のみを記してある．図中の数字は初期張力に対する座屈直前の張力の比を百分率で表しており，この値が100%を越えるときすなわち初期張力よりも大きな張力がかかっている部分についてはその分布の色を濃い灰色で表している．

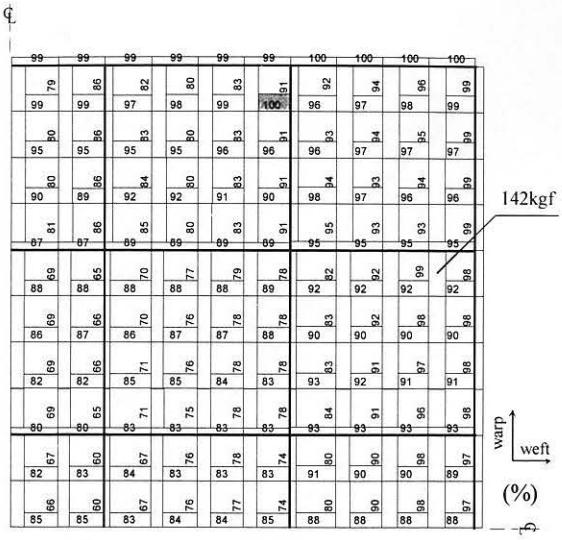

Fig.24 Stress distribution of Parallel membrane (P-SS)

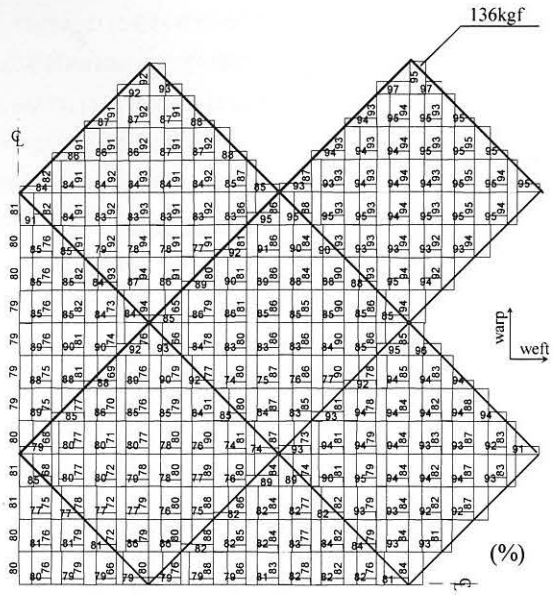

Fig.27 Stress distribution of Diagonal membrane (D-DS)

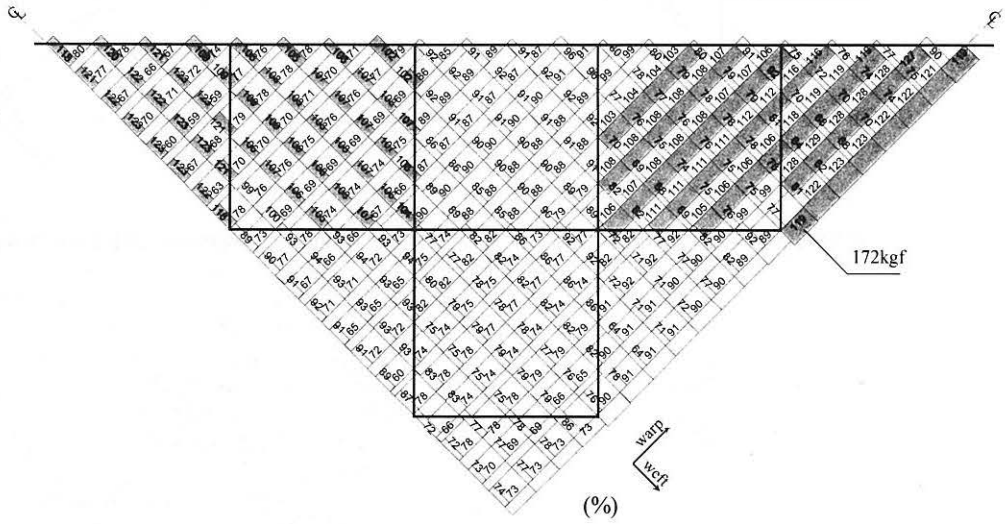

Fig.25 Stress distribution of Diagonal membrane (D-SS)

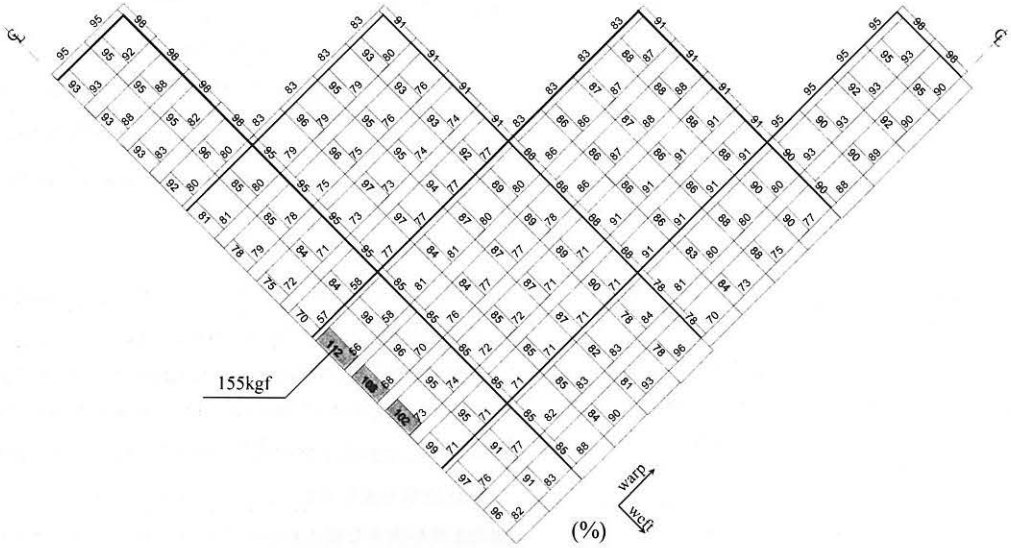

Fig.26 Stress distribution of Parallel membrane (P-DS)

膜材料の張力の分布はフレームと膜材料の張り方の組み合わせにより大きく異なり，P-SS型ではFig.24に見られるように，緯糸方向に大きく張力の減少が見られ，中央付近に近づくにつれ張力の減少は大きくなっており，最大で60%程度，膜材料全体の平均は約86%まで減少している．また，初期張力より張力が増加したところは膜材料の一要素のみであった．Fig.25に示すD-SS型ではフレームの四隅に近いユニットにおいてフレームの対角方向に大きな張力の増加が見られ，その張力の増加した膜要素と直角方向に交わる要素において大きく張力が減少していた．最大で59%，平均で約87%まで張力が減少していた．Fig.26のP-DS型では，P-SS型同様緯糸方向に大きく張力が抜けており，中央ユニットではなく一つ外側のユニットにおいて大きく張力が抜けており，最大で56%程度，平均で約87%まで減少していた．また，初期張力を越えたところは3要素のみであった．D-DS型では，Fig.27に見られるように緯糸方向により張力が減少しているがP-SS，P-DS型に比べて経糸方向との差は小さく，中央に行くほど張力の減少は大きくなっている．最大で56%程度，平均で約85%まで減少しており，張力が増加したところはなかった．最大張力はD-SS型でもっとも大きく172kgfであり，以下P-DS型155kgf，P-SS型142kgf，D-DS型136kgfとなっている．

4. まとめ

膜材料とラチスフレームが一体となったハイブリッド構造について，複数のユニットからなる２種類のラチスフレームについて弾性座屈解析を行いその膜材料の座屈性状に及ぼす効果を明らかにした．本論では約40～60%の弾性座屈荷重の増加が見られ，１ユニットのラチスフレームに膜材料を張ったときの弾性座屈荷重の増加率は約15%程度であったのに比べ大きくそのフレームの座屈荷重が膜材料を付加することによって上昇することが分かった．また，膜材料に張り方によって座屈荷重の増加の割合が異なり，特に1ユニットのみのハイブリッド構造においては，Diagonalタイプの場合の方が座屈荷重の増加が大きかったのに対し，複数ユニットの本ハイブリッド構造場合，Parallelタイプの場合に，より座屈荷重が上昇することがわかった．また，膜材料の張り方がフレームの座屈モードに影響を及ぼすことが明らかとなり，またフレームと膜材料の張り方の組み合わせにより大きく膜材の張力分布が異なることが明らかとなった．

本論で扱ったハイブリッド構造は複数のフレームユニットに渡って同じ方向に膜材料を取り付けたモデルであったが，本論で明らかになったとおり膜材料の張り方またはフレームとの組み合わせかたにより大きくその性状が異なる．そのためユニットごとに違う方向に膜材料を取り付けた場合の効果の検討や，膜材料に導入する初期の張力の大きさによる効果の違いの検討など，さらに検討する必要がある．

参考文献

１）建築雑誌，「特集ハイブリッド構造のひらく未来」，Vol.107，No.1329，1992.

２）斎藤公男，岡田章，「ハイブリッド空間構造」，建築技術，1998.01，pp.150-157，1998.

３）Yoshiya TANIGUCHI and Toshitsugu SAKA, Effect of Covering Plates on Buckling Behaviour of Double-Layer Grids, Proceeding of Asia-Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, edited by Tien T. LAN, pp.611-618 ,May, 1996.

４）谷口与史也，坂壽二，南宏和，「膜材料とラチスフレームから成るハイブリッド構造の基礎的研究」，日本建築学会構造系論文集，519，pp.71-77，1999.

５）Yoshiya TANIGUCHI, Hideto TANAKA and Toshitsugu SAKA, Tangent Stiffness Equations for Laterally Distributed Loaded Members, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 125, 5, pp.537-544, May, 1999.

６）膜材料弾性定数試験方法，（社）日本膜構造協会

Buckling Characteristics of Hybrid Structures consisting of Membrane and Double-Layer Latticed Plates

Yoshiya Taniguchi*1

Toshitsugu Saka*2

Tooru Maehata*3

SYNPOSIS

In the future if the possibility of large space structural systems may be pursued, a new structural system must be needed, barring unexpected developments of materials. One of possible structural systems that have been developed is the hybrid system combining a space frame structure with a cladding, for example, a concrete slab, steel panels or membrane. In this paper, hybrid structures consisting of membrane and double-layer latticed plates are treated to investigate the effect of membrane on the buckling behavior theoretically. In the analyses, 2 latticed patterns and 2 arrangements of membrane are used as parameters. As conclusion, it was made clear that buckling mode was changed and buckling strength was increased about 50% by the membrane.

*1 Assoc. Prof., Dr.-Eng, Dept of Architecture and Building Engineering, Faculty of Eng., Osaka City University

*2 Prof., Dr.-Eng, Dept of Architecture and Building Engineering, Faculty of Eng., Osaka City University

*3 Graduate Student, Dept of Architecture and Building Engineering, Faculty of Eng., Osaka City University