

令和 5 年 5 月 5 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04440

研究課題名（和文）縦型単層ラチス構造の座屈および座屈後挙動に関する研究

研究課題名（英文）Study on buckling and post-buckling behavior of vertical latticed structures

研究代表者

山下 哲郎（Yamashita, Tetsuo）

工学院大学・建築学部（公私立大学の部局等）・教授

研究者番号：80458992

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、軸圧縮を受ける縦型金属製円筒ラチスシェル構造の弾塑性座屈耐力と座屈後変形性能の評価を数値解析と実験を併用して実施し、数値解析を実験により検証した。実験においては3Dプリンターにてアルミとステンレスの試験体を製作し、試験体の3Dスキャンデータより形状初期不整を含んだ骨組モデルを抽出する手法を開発した。研究対象を軸力支配型の三角形格子と曲げ支配型の六角形格子ラチスシェルとしたが、その弾塑性座屈耐力についてはいずれの場合も古典的な接線係数理論により精度よく推定可能であり、塑性変形性能は線形座屈荷重と降伏荷重から定められる正規化細長比の2乗に逆比例する関数で概ね近似できることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年縦型単層ラチス構造が重層構造の柱や外周あるいは塔状構造物に使用されている。縦型の場合は支持する荷重が大きいため部材が太く塑性座屈を生じ座屈後の靱性も必要である。本研究は実験と解析の両面より軸圧縮を受ける円筒ラチスシェル構造の塑性座屈耐力と座屈後変形性能を評価し、簡単な線形座屈解析と塑性解析で軸圧縮塑性座屈荷重と塑性変形性能が推定可能なことを示した。試験体はアルミとステンレスを材料として3Dプリンターで製作し、3Dスキャンデータより初期不整を含んだ骨組モデルを抽出する方法を開発した。これにより以降金属製ラチスシェル構造の弾塑性座屈実験が安価に実行でき、この分野の実証的研究に寄与する。

研究成果の概要（英文）：Plastic buckling strength and ductility in the post-buckling behavior of axially loaded metal latticed cylindrical tubes, were investigated through experimental and analytical studies. Nonlinear FE analysis was verified by comparing with the test results. In the experimental study, 3D-printed latticed cylinders made of aluminum alloy and stainless steel were fabricated. A novel methodology for extracting a skeletal model and specifying geometric imperfection from the 3D-scanned data of the test bodies, was developed.

The latticed cylinders were composed of two kinds of grid, triangular and hexagonal in which axial force and bending were dominant, respectively. It was found that the classical tangent modulus theory is effective to estimate plastic buckling strength regardless the dominant stress, and the ductility factor can be roughly approximated by function proportional to the reciprocal of the square of the generalized slenderness, determined by linear buckling and yield loads.

研究分野：建築構造

キーワード：円筒ラチスシェル 塑性座屈 変形性能 線形座屈解析 3Dプリンター 形状初期不整 アルミ ステンレス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来単層ラチス構造は屋根の構造として使用されてきたが、近年は軽量、高剛性といった力学的長所と格子状の美しい外観より、縦型の単層ラチス構造が床のある重層構造の外周壁や柱、あるいは塔状構造物に使用されるようになり(図1)、魅力的な建築デザインが実現している。屋根構造では鉛直荷重に対する座屈耐力の評価が最重要であり、また軽量で細い部材が好まれることにより弾性座屈領域の設計が主であるが、縦型の構造では支持する自重が大きく部材が太いため塑性座屈が生じる。また設計想定以上の地震や風といった変動荷重に対しては座屈耐力だけでなく変形性能も必要とされる。



図1 単層ラチスの柱

しかしながら、建築分野では屋根型単層ラチス構造の座屈に関する研究は多いが、縦型(塔状)の単層ラチス構造の座屈や変形性能に関する研究は非常に少ない。航空機分野で縦型の軸圧縮を受ける円筒ラチスシェルの座屈に関する研究が実施されているが、軽量の複合材料の弾性座屈が中心であり、ラチスシェルの塑性座屈と変形性能を取り扱った研究は少ない。

また屋根型単層ラチスシェルに関する従来の研究では数値解析を実験の代用として弾塑性座屈荷重を求めているが、塑性座屈や座屈後挙動などの強非線形問題で数値解析のみに依存する研究は危険であり、実験による実挙動の観察と数値解析の検証は不可欠である。

2. 研究の目的

上記の背景より、本研究では、軸圧縮を受ける金属製の縦型単層ラチスシェルの弾塑性座屈荷重と変形性能を評価することを主目的とした。縦型単層ラチスシェルを重層構造に用いる場合は必ずしも軸圧縮荷重のみがクリティカルになるとは限らず、水平荷重による曲げやせん断の影響が考えられる。しかしながら連続体円筒シェルの弾性座屈理論に示されるように、曲げによる座屈荷重の解は軸圧縮解より導かれ、せん断座屈は大幅な耐力低下を生じない。従って構造の安定性を評価する上では軸圧縮による座屈特性が最も重要と考えられる。

さらに、従来金属製のラチスシェル構造では、部材と接合部で構成される大規模試験体と実験装置で座屈実験が実施されてきたが、今回のような軸圧縮円筒の場合は縮小試験体での実験が可能と考え、弾塑性座屈実験を比較的簡易かつ安価に実施する方法の開発を試みた。なお2020年度からのコロナ禍の影響で、縮小試験体でも大掛かりな実験装置を必要とする曲げ、せん断による座屈実験が実施できなかったこともあり軸圧縮問題に集中した。

3. 研究の方法

実験と数値解析を併用し、数値解析の妥当性を実験で検証しつつ研究を進めた。

3.1 試験体と実験方法

近年急速に発展した金属3Dプリンターを有する企業に発注して試験体を製作した。材料は当初アルミ合金であったが、靱性が低く座屈後の大変形状態で割れや部材破断が生じるため、後にステンレスに変更した。試験体の例を図2に示す。円筒ラチスシェルの大きさはアルミ製が外径160mm、高さが概ね90mm~130mmで、ステンレス製が外径180mm、高さが約100-200mmである。製造上の制約より、半径方向の部材厚さは2mm、部材の幅は2~3mm(いずれも設計寸法)であり、弾性座屈を生じる径厚比ではない。ラチスの形状は軸力支配型の3角形と曲げ支配型の6角形格子の2種類とした。



図2 試験体例(塗装済)

いずれの試験体も境界条件を明確に固定とするためラチスシェル部の上下に連続したバンドを設け、万能試験機でごく低速にて加力した。荷重測定は試験機内臓のロードセル、変位測定は非接触3次元測定システム(Venus3D)を用いた。

ラチスシェルの座屈においては形状初期不整の影響が大きいため、試験体の初期不整や部材断面を測定し解析に反映する必要がある。このため加力前の試験体を3DスキャンしたデータをRhino-Crasshopperで分析し、3次元のボリュームを有する試験体より初期不整を反映した線材の骨組モデルを抽出する手法を新たに開発した。

3.2 数値解析

数値解析は汎用FEMソフトのMSC-Marcを用い、幾何学的および材料非線形性を考慮した解析を実施した。部材要素は曲率を一定とする変位関数を使用した梁要素で、せん断変形は考慮されるが部材の破断は考慮できない。

軸圧縮を受ける円筒の弾性座屈では多くの座屈モードが近接した座屈荷重で存在するため解析は不安定であり、静的な弧長法では特に座屈荷重以降の経路を安定して解析できなかったため質量と減衰を考慮した動的解析を実施した。既往の軸圧縮円筒の実験・解析との比較により、 $h/r=0.5$ の質量比例減衰を採用した。弾塑性解析でもこの動的解析を弧長法と併用し、実験と比較して解析の妥当性を確認した。

4. 研究成果

4.1 座屈解析における動的解析の有効性

前述した動的解析による弾性座屈解析結果の例を図3に示す。座屈後にモードが大きく変化しながら階段状に耐力が低下する。初期不整が大きくなると弾性座屈荷重は線形座屈荷重から大幅に減少し、直径の1%程度で6割程度となるが、最終的な変形は線形座屈モードとは異なる周方向の波長の長いモードとなる。また弾性座屈荷重を低下させる効果の大きい初期不整モードの探索にCroll-YamadaのRS法の有効性を確認できた。以降、材料非線形を考慮した弾塑性解析においても動的解析を使用した。

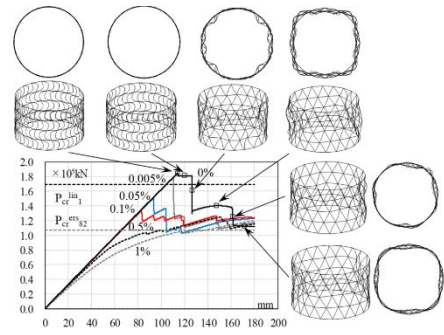


図3 動的解析による座屈後経路の解析

4.2 3D プリント試験体の形状分析と骨組解析モデル抽出手法の開発

3D スキャンした試験体のデータから、Rhino-Crasshopperの機能を活用して部材の軸線と節点座標を抽出し、部材断面寸法を計測する手法を開発した。

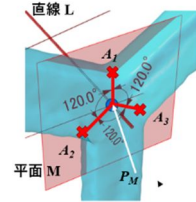


図4 節点の特定

当初アルミ試験体の分析において開発したアルゴリズムは、1) 仮の円筒軸をZ軸として定める、2) 円筒軸と直交する半径方向の直線を接合部に貫通させて2か所の貫通点の中点を節点とする、3) 節点から部材接合部の谷部までの距離を最小化するように節点の位置を遺伝的アルゴリズムを用いて定める(図4)、4) X-Y平面上に投影した各節点が可能な限り円と接近するように円筒軸を回転させる、5) 上記1)~4)を繰り返す、ものである。しかしながらプログラムが複雑で収束性が良好とは言えないため、ステンレス試験体の分析においてはアルゴリズムを改良し、1) 各部材の数か所の断面の重心を求める、2) 部材材軸を各重心に最も近い直線として最小二乗法で定める、3) 接合部に集まる互いに公差しない部材材軸との距離が最小となる点を節点とする、4) 以下同、として節点と骨組モデルを抽出した。

同定した試験体の径方向の面外初期不整は最大で直径の0.5%程度であった(図5)。部材断面の精度は設計寸法に対して最大1割程度(主にマイナス側)であり、ばらつきも大きい。

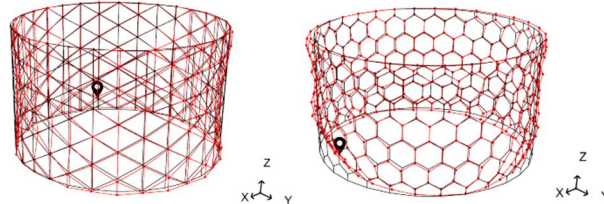


図5 同定したステンレス試験体の初期不整例(20倍)

4.3 座屈実験結果

線形座屈解析で得る1次モードは、ほぼ全試験体で周方向にも座屈波を伴うモードであったが、実験では材料に関係なく、1体を除き周方向の座屈波のない軸対称座屈が生じた。3角形格子の試験体では、境界付近で母線方向に短い座屈波長を生じるいわゆる「象の脚」座屈で、座屈点付近から急激に変形が増大したが、6角形格子試験体では波長の長い提灯型の変形が徐々に成長する座屈となった。低靱性のアルミ試験体では最大耐力点付近より6角形格子では面内曲げ、3角形格子では座屈湾曲に伴う面外曲げによる亀裂が生じた。ステンレスの試験体でも部材の細い6角形格子試験体では面内に曲げ亀裂が生じた。

図6にステンレス試験体の荷重変形曲線、試験体の最終的な変形の例を解析結果と共に示す。軸力支配型の3角形格子は耐力が高いが最大点を越えると急激に耐力低下を生じる。曲げ支配型の6角形格子は耐力は低いが変形性能を有する。亀裂の生じていないステンレス試験体では解析と実験結果は良好に一致している。

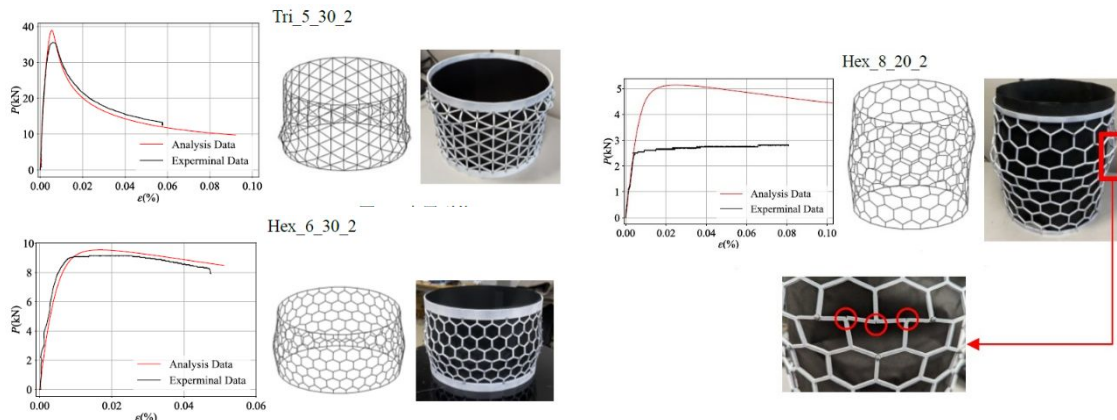


図6 ステンレス試験体の実験結果と追解析例

4.4 塑性座屈荷重と変形性能の評価

ここではアルミを想定した数値解析(破断を無視)をもとに、塑性座屈荷重と座屈点の変形の双方を近似的に評価する方法として、F.Engesser による接線係数理論の適用を試み、その有効性を示した。幾何学的非線形性を無視し、材料非線形性のみを考慮したいいわゆる Pushover 解析における荷重変形曲線の接線係数を、線形座屈荷重の算定に用い、両者の交点を塑性座屈点とする方法である(図7)。線形座屈荷重には周方向の座屈波を有する1次モードではなく、高次の軸対称モード座屈荷重を用いる方が近似精度が向上する。パラメトリック解析の計15モデルでは、塑性座屈荷重を-26~+13%の誤差で推定できている。変形性能を示す塑性率については、接線係数理論の推定値は数値解析の座屈点の約1/2となったが概ね相関が見られる(図8)。また、鋼構造の変形性能評価にてよく用いられる細長比の2乗の逆数に比例する関数でも概ね塑性率が近似できる(図9)。

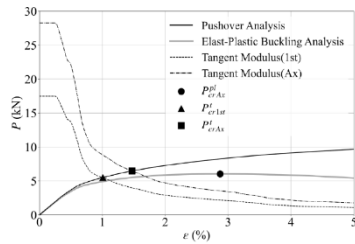


図7 接線係数理論による塑性座屈点の推定

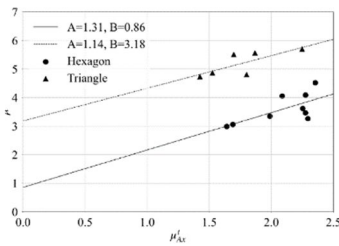


図8 接線係数理論による塑性率と数値解析結果

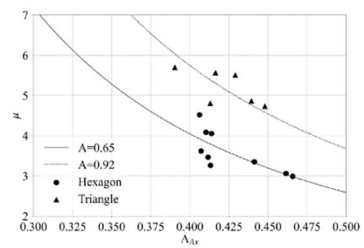


図9 正規化細長比の関数による塑性率の推定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 内田 亘樹, 山下 哲郎 | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 3Dプリントされたアルミ合金製円筒ラチスシェルの軸圧縮座屈実験 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集 | 6. 最初と最後の頁 1172,1177 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.28.1172 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 加藤 悠斗, 山下 哲郎 | 4. 巻 68B |
| 2. 論文標題 軸圧縮を受ける円筒ラチスシェルの塑性座屈荷重の評価 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 構造工学論文集B | 6. 最初と最後の頁 194,199 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijjse.68B.0_194 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Yuto Kato, Tetsuo Yamashita | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Evaluation on plastic buckling load of axially compressed latticed cylinders | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Conference Proceedings of IASS/APCS 2022, Innovation, Sustainability and Legacy, Beijing, China | 6. 最初と最後の頁 1040,1050 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 蔭山 快, 山下哲郎 | 4. 巻 84/759 |
| 2. 論文標題 H形鋼で構成される矩形平面球形三角形格子シェルの弾性座屈特性 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集 | 6. 最初と最後の頁 659,667 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.84.659 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 T. Matsuda and T. Yamashita | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Elastic buckling behavior of anisotropic latticed shells | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 FORM and FORCE, IASS Symposium 2019, 60th Anniversary Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures | 6. 最初と最後の頁 1442,1449 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 T. Yamashita and K. Kageyama | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Shell-like and member buckling of latticed shells made of H-shaped steel | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 FORM and FORCE, IASS Symposium 2019, 60th Anniversary Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures | 6. 最初と最後の頁 996,1003 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 松田貴裕, 山下哲郎 | 4. 巻 65B |
| 2. 論文標題 異方性格子構造の連続体置換による座屈荷重式の評価 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 構造工学論文集B | 6. 最初と最後の頁 491,497 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Tetsuo YAMASHITA, Kai KAGEYAMA | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Buckling and post-buckling behavior of axially compressed elastic latticed cylinders | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Abbreviated proceedings, IASS2018 Boston, July16-20, "Creativity in structural design" (in USB) | 6. 最初と最後の頁 103 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Kai KAGEYAMA, Tetuo YAMASHITA | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Elastic Buckling Behavior of Triangle Grid Shells Composed of H-Shaped Steel | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of 12th Asian Pacific Conference on Shell & Spatial Structures (APCS2018) (in USB) | 6. 最初と最後の頁 248,258 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Takahiro MATSUDA, Tetsuo YAMASHITA | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Evaluation of Buckling Load Using Continuum Analogy for Anisotropic Latticed Shells | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of 12th Asian Pacific Conference on Shell & Spatial Structures (APCS2018) (in USB) | 6. 最初と最後の頁 527,536 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 加藤 悠斗, 山下 哲郎 |
| 2. 発表標題 Evaluation on plastic buckling load of axially compressed latticed cylinders |
| 3. 学会等名 IASS/APCS 2022, Innovation, Sustainability and Legacy, Beijing, China (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 伊佐山晴也, 山下哲郎 |
| 2. 発表標題 3Dプリントしたステンレス製円筒ラチスシェルの軸圧縮座屈実験 |
| 3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会 (北海道) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 加藤悠斗、山下哲郎 |
| 2. 発表標題 接線係数理論による縦型円筒ラチスシェルの弾塑性座屈の推定 |
| 3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会（中部） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 内田亘樹、山下哲郎 |
| 2. 発表標題 3D プリントしたアルミ合金製円筒ラチスシェル試験体の形状分析 |
| 3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会（中部） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 松田貴裕、山下哲郎 |
| 2. 発表標題 強弱軸を有する部材で構成されたラチスシェル屋根構造の接合部の剛接度による弾性座屈荷重低減係数の推定 |
| 3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会（関東） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 内田亘樹、山下哲郎 |
| 2. 発表標題 3Dプリントしたアルミ合金製円筒ラチスシェルの軸圧縮座屈実験 |
| 3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会（関東） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 寺田泰地, 山下哲郎 |
| 2. 発表標題 軸圧縮を受ける柱状円筒ラチスシェル構造の線形座屈モード |
| 3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会(関東) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐々木英津子, 山下哲郎 |
| 2. 発表標題 静的な軸圧縮荷重を受ける円筒ラチスシェルの弾塑性座屈解析 |
| 3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会(北陸) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 松田貴裕, 山下哲郎 |
| 2. 発表標題 初期不整を与えた異方性ラチスシェルの弾性座屈特性 |
| 3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会(北陸) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Yamashita and K. Kageyama |
| 2. 発表標題 Shell-like and member buckling of latticed shells made of H-shaped steel |
| 3. 学会等名 IASS Symposium 2019, 60th Anniversary Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Matsuda and T. Yamashita |
| 2. 発表標題 Elastic buckling behavior of anisotropic latticed shells |
| 3. 学会等名 IASS Symposium 2019, 60th Anniversary Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 佐々木英津子, 山下哲郎 |
| 2. 発表標題 アルミ合金の円筒ラチスシェルの弾塑性軸圧縮実験 |
| 3. 学会等名 2019年度日本建築学会 関東支部研究報告集 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takahiro MATSUDA, Tetsuo YAMASHITA |
| 2. 発表標題 Evaluation of Buckling Load Using Continuum Analogy for Anisotropic Latticed Shells |
| 3. 学会等名 12th Asian Pacific Conference on Shell & Spatial Structures (APCS2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kai KAGEYAMA, Tetuo YAMASHITA |
| 2. 発表標題 Elastic Buckling Behavior of Triangle Grid Shells Composed of H-Shaped Steel |
| 3. 学会等名 12th Asian Pacific Conference on Shell & Spatial Structures (APCS2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Tetsuo YAMASHITA, Kai KAGEYAMA |
| 2. 発表標題 Buckling and post-buckling behavior of axially compressed elastic latticed cylinders |
| 3. 学会等名 IASS2018 Boston, July16-20, "Creativity in structural design" (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山下哲郎 |
| 2. 発表標題 連続体置換法による線形座屈荷重の評価 |
| 3. 学会等名 「シェル・空間構造」セミナー2018 空間構造の座屈と設計法 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 蔭山快、山下哲郎 |
| 2. 発表標題 H形鋼で構成される三角形格子球形シェルの弾性座屈性状 -全体座屈が生じる条件について- |
| 3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会(東北) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山下哲郎、蔭山快、佐々木英津子 |
| 2. 発表標題 静的な軸圧縮荷重を受ける円筒ラチスシェルの動的座屈解析 その1 解析方法と解析モデル |
| 3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会(東北) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐々木英津子、山下哲郎、蔭山快 |
| 2. 発表標題 静的な軸圧縮荷重を受ける円筒ラチスシェルの動的座屈解析 その2 弾性座屈挙動 |
| 3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会（東北） |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 松田貴裕，山下哲郎 |
| 2. 発表標題 六角形格子シェルの連続体置換法による座屈荷重の評価 |
| 3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会（東北） |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 山下哲郎 |
| 2. 発表標題 3. 仮定断面の決定法 4. 設計例 |
| 3. 学会等名 ラチスシェル屋根構造の耐震設計セミナー 講義編 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|-----------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 大崎純、竹内徹、山下哲郎 | 4. 発行年 2019年 |
| 2. 出版社 京大出版会 | 5. 総ページ数 184 |
| 3. 書名 シェル・空間構造の基礎理論とデザイン | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | | | |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|