

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289189

研究課題名(和文) 鋼薄板軽量構造の安定性評価と効率的耐震構造形状・形態開発への応用

研究課題名(英文) Evaluation of stability of lightweight steel sheet steel structure and its application to efficient shape and form development of earthquake resistant structure

研究代表者

五十嵐 規矩夫 (Ikarashi, Kikuo)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：40242292

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では薄板からなる部材として、波状鋼薄板、鋼板サンドイッチ版、冷間成形溝形状断面部材を主な検討対象とし、強地震および強風時を想定した場合の安定性評価と耐震性能評価を行った。

そこでは部材を構成する材料の特性を系統的に明らかにするとともに、構造特性との関係を明らかにした。また数値解析、載荷実験を通して、部材の境界条件、接合条件および荷重条件に応じた部材特性を明らかにした上で、理論的な検討を通して合理的な設計手法へつなげる性能評価式の導出を行った。

最終的に、薄板を適宜組み合わせ、接合した構造形式を提案し、その施工実験を通して薄板構造形式の今後の展開、可能性を示した。

研究成果の概要(英文)： This study focuses primarily on corrugated steel plates, steel plate sandwich panels, and cold-formed channel section members to evaluate their stability and seismic performance.

These evaluations confirmed the properties of the materials constituting the members, and specified the relationship of the material properties of the members with the structural properties. Performing theoretical analysis, numerical analysis, and loading test clarified the structural properties of the members according to boundary conditions, connection conditions, and loading conditions of the members. Moreover, a performance evaluation formula was derived that would contribute to rational design methods.

A structural form by appropriately combining thin plate members was proposed and showed the future development and potential of the thin plate structure type through trial construction experiment.

研究分野：工学，建築学，建築構造・材料

キーワード：建築構造 鋼構造 座屈 薄板 材料 波板 サンドイッチパネル 非対称断面

1. 研究開始当初の背景

(1) 通常の構造要素として使用される一般的な平板や形鋼を構成する板の板厚は 2.3mm 以上である。これ以下の板厚は、薄板軽量形構造建築物^{引用文献 1)}における使用を除けば、そのほとんどが内外装材としての 2 次的使用に限られている。このためその耐震性に関わる構造特性については明らかにされないまま、使用目的にのみ適した形状が使用規定的にその都度採用されているのが現状であろう。

(2) また海外では「Stressed Skin Diaphragm Design」^{引用文献 2)}が行われており、架構の水平面の剛性を屋根あるいは天井そのものに負担させ、水平ブレース等を省略できている。日本における現状は、屋根架構あるいは天井を構成する版としての安定性評価が不十分であるため、一般的には別途水平力負担材を設けることになる。

(3) これらの解決には、これまでは主に 2 次部材的な要素に使用されてきた薄板を積極的に構造要素として使用し、それらの耐震設計法を確立することであり、その結果として建物を軽量かつ安全なものとするのが可能で有るばかりでなく、2 次部材による複合的な被害の軽減にもつながるものとなる。

(4) また、薄板軽量形構造建築物の梁、柱を除けば、一般的には低層鉄鋼系住宅の屋根等の母屋、棟木に使用される事が多い冷間成形してなる断面は、その形状が非対称で複雑なため、合理的かつ簡便な設計法が確立していないのが現状である。さらにいくつかの断面をつづり合わせて使用する場合も多い。また冷間成形による材料変化が部材の断面性能に与える影響も十分には検討されていない。これらを明確にすることで主鋼材への薄板冷間成形材の使用は拡大する。

2. 研究の目的

(1) 本研究では主に薄板からなる写真 2.1 に示すような、

- ① 規則的な形状を繰り返すことで版を構成する波状鋼薄板、a)
- ② 両面より薄板で高分子材料を挟み込む事により形成される版、b)
- ③ 冷間曲げ加工により成形した溝形状の任意断面を有する部材、c)

を対象とし、それらの強地震及び強風時における安定性評価と耐震性能評価を行うと同時に、それらを適宜組み合わせた合理的な接合を含む構造形式の提案を目的とする。



写真 2.1 薄板構造の例

(2) 本研究の目的は、鋼薄板軽量部材及びそれらからなる構造要素の座屈挙動の解明と、その知見を応用する事により耐震設計上効率的な形状及び形態の提案を行うことである。本研究を遂行するにあたり、以下に示す 5 つのサブテーマから研究を構成している。

- ① 波形鋼薄板からなる構造形式の座屈挙動の解明と安定性評価
- ② 冷間成形開断面部材の圧縮曲げせん断挙動の解明と座屈耐力算定
- ③ 材料特性の把握と冷間成形後の材料特性と部材特性の関係性
- ④ 鋼薄板軽量構造のための適切かつ効果的な接合方法の開発
- ⑤ 鋼薄板軽量構造の効率的効果的な構造形態の提案と座屈設計法試案の提示

(3) サブテーマ①、②は、本研究の根幹をなすものであり、波板や開断面部材に代表される鋼薄板軽量構造の座屈挙動を解明すると同時に安定性評価を行い、座屈設計法の基本的な考え方を構築する。この座屈設計法を基にサブテーマ⑤を遂行する。その間、サブテーマ③、④を併せて行い、座屈設計法をより高度なものとし、具体的な鋼薄板軽量構造の提案へとつなげる。

3. 研究の方法

(1) 本研究は、詳細な載荷実験、数値解析に基づく、鋼薄板軽量構造要素の不安定座屈挙動の解明、安定性評価から始め、材料特性の把握と構造形式に適した接合部の検討と性能評価を通して、設計法の提案および効果的な鋼薄板軽量構造の形状、形態を提案していく。

(2) 効率的に研究を遂行するために、5 つのサブテーマを設けているが、各テーマは独立のものではなく、関連サブテーマと有機的に関連を持ちながら、研究全体の完成を目指している。研究を遂行する上で連携研究者との相互チェックの体制を取り研究を進めており、各サブテーマに対する助言、研究実施のための協力も得ることができている。

- (3) ① 波形鋼薄板からなる構造形式の座屈挙動の解明と安定性評価

波板鋼薄板は主として面外力に抵抗する材として建築構造物の屋根や壁に利用されているが、面内せん断力に対する優れた抵抗特性も有するとともにエネルギー吸収能力にも優れている^{引用文献 3), 4)}。今後新たな構造要素を開発していく中で、波形形状の断面を使用することの可能性は多大なものがある。そこで、波形断面が面内圧縮力及び曲げせん断力を受ける場合の基本的な座屈特性を解明する。また、波形断面の座屈モードと座屈耐力及び劣化域を含めた塑性変形性能との関係を明らかにする。

(4) ②冷間成形開断面部材の圧縮曲げせん断挙動の解明と座屈耐力算定

本サブテーマでは、溝形状の断面を取り扱う。この断面は、単独部材として使用する場合や2丁を背合わせにして一体として梁や柱として使用する場合もある。これまで、このような断面の具体的かつ統一的な座屈設計法は確立しているとは言いがたい。そこで、圧縮性状及び横座屈性状に的を絞る、断面構成、つづり方による安定性の違い、リップの有無が座屈性状に及ぼす影響について、載荷実験により検討するとともに、出来る限り理論解析的なアプローチから統一的な評価方法を示している。合わせて数値解析による検討も適宜実施する。

(5) ③材料特性の把握と冷間成形後の材料特性と部材特性の関係性

本研究で対象とする薄板は断面形状を形成する際、冷間成形にて行われる。その場合、折曲げ箇所において原板の材料特性とは異なる場合がある。また、サンドイッチパネルに内包する芯材についても、表面材の座屈拘束要素として作用することを考えると、その材料特性を詳細に把握し、その材料特性を積極的に構造要素の特性に取り組んだ上で、構造性能評価を行う必要がある。

そこで本サブテーマでは、冷間加工を受けた箇所から切り出した試験片とそれ以外の箇所から切り出した試験片を用いて材料特性の違いを把握するための引張試験を行う。また、サンドイッチ断面芯材の圧縮、引張特性試験を実施する。これら材料の特性値を用いた各部材の数値解析を実施し、部材構造特性との関係性を明らかにする。

(6) ④鋼薄板軽量構造のための適切かつ効果的な接合方法の開発

薄板においては適切な接合方法を用い、その特性を十分把握しておく必要がある。本研究で対象とする薄板に見合った接合方法を模索し、接合状況を考慮した座屈耐力評価を行い、適切な接手法と接合部設計に向けた基礎的な資料を提供する。

(7) ⑤鋼薄板軽量構造の効率的効果的な構造形態の提案と座屈設計法試案の提示

本サブテーマは、得られた成果をもとに鋼薄板軽量構造設計を行う上での資料をまとめる。また、あらたな構造形式の一提案を行い、その施工性等を検討する。

4. 研究成果

(1) 面内純せん断力を受ける波板の座屈形式および弾性座屈耐力に、波板の断面寸法が与える影響を数値解析により明らかにしている。まず、数値解析により得られた結果をもとに、波板に発生する座屈形式を図4.1のように分類し、その座屈発生条件を検討している。その際、全体座屈と局部座屈の他にも

異なる座屈形式が発現することの可能性に触れ、その座屈形式を含めた座屈形式の分類を行っている。解析範囲内で確認された各座屈形式に対し、断面寸法と座屈耐力の関係を定量的に考察している。これをもとに、各座屈形式に対し、それぞれに適応する弾性座屈耐力式の導出を図っている。座屈耐力導出にあたり、既往の研究で提案されている全体座屈耐力評価式、局部座屈耐力式をもとに、評価式の精度向上および簡略化を図った上で、全体座屈から局部座屈およびそれらとは異なる座屈形式であるゆがみ座屈を含めた面内純せん断力を受ける波板の統合的な座屈耐力近似式を提案している。さらに周辺境界の支持条件が異なる波板面内に曲げせん断力がかかる場合についても、先の純せん断状態の知見を利用することで、図4.2に示すような耐力評価を行っている。

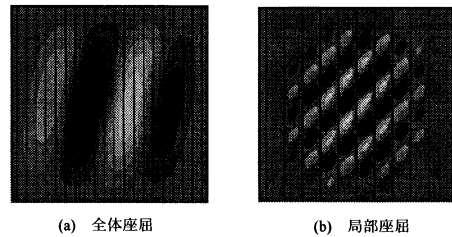


図 4.1 代表的な座屈形式

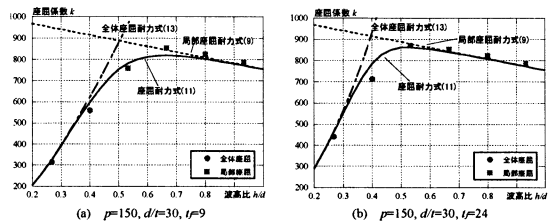


図 4.2 波板パネルの座屈耐力評価

(2) さらに、波板を耐震要素として用いる場合には、その弾塑性挙動を明らかにしておく必要があることから、先の弾性座屈耐力評価結果をもとに、波板パネルの最大耐力および塑性変形能力を明らかにしている。図4.3に最大耐力評価および塑性変形能力評価を示す。その際の評価では、波板部分の全体座屈および局部座屈による崩壊を対象としていることから、これらに適応しない座屈形式についてはその発生を防止する条件を明らかにし、性能評価の適応可能範囲を定めている。最後に、これらの知見を利用することで、耐震要素として必要性能を満足する波板パネルの形状設計法を提案している。

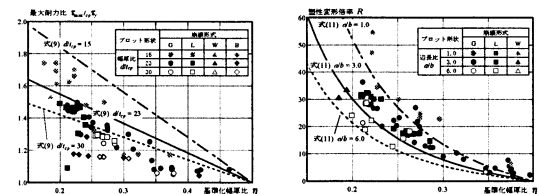


図 4.3 波板鋼板パネルの最大耐力と塑性変形能力

(3) 現在では、通常の円筒容器のほかに、波

板鋼板により構成された円筒容器が貯蔵槽として用いられることがあるが、その耐震性能を考える上での力学的性質についてはほとんど解明されていない。ここでは、波板円筒を対象として、基本的な荷重条件下における弾性座屈性状を把握し、その形状効果を考慮した設計手法の確立に向けた資料の蓄積を図っている。波板が材長方向に走る円筒を例として、図 4.4 に曲げせん断力を受けた場合の座屈形式を示している。この座屈形式を分類するための形状パラメータを提示し、図 4.5 に示すように、座屈形式の分類を行っている。この座屈形式をもとに、波板の波形状をパラメータとして座屈応力度近似式を導出するとともに、図 4.6 に示すように、せん断座屈型から曲げ座屈型に移行する過程で座屈耐力が最大となることを明らかにしている。また、波板を使用することで、鋼材量を低く抑えたまま座屈耐力を高くすることができることを明らかにしている。

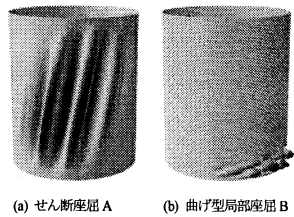


図 4.4 曲げせん断力による座屈形式

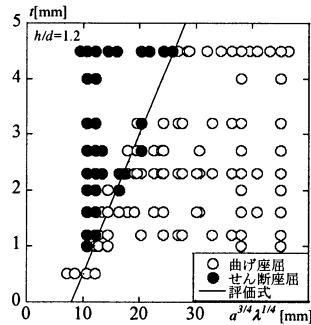


図 4.5 波板円筒の座屈形式

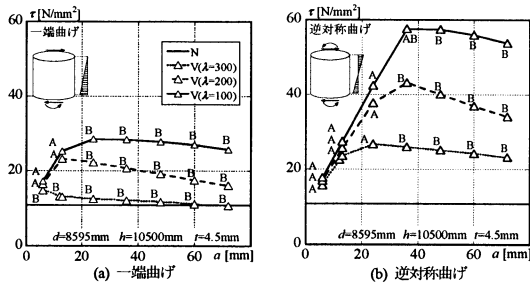


図 4.6 波板円筒の座屈耐力

(4) また、波板円筒内に内容物がある場合の座屈モード変化を図 4.7 のように明らかにするとともに、内容物の量が波板円筒の座屈耐力に与える影響を検討している。さらには、波板に生じる二次的な曲げ性状に影響を及ぼす形状初期不整について検討し、初期不整が最大耐力や座屈後の耐力劣化性状に与える影響が小さいことを確認している。

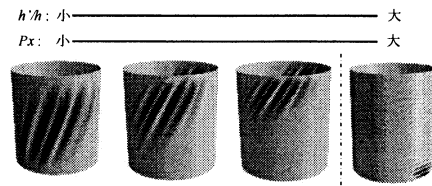


図 4.7 内容物の影響による座屈波形変化

(5) 建築用外装材として広く用いられている鋼板サンドイッチパネルを構造部材として検討する場合、表面材の座屈性状を明らかにする必要がある。その座屈性状は、芯材特性とも密接に関連することから、ここではまず図 4.8 に示す要素実験を行い、芯材の各応力状態における耐力、剛性を把握している。結果として、材料の物性値は各版厚により異なり、圧縮応力下よりも引張応力下における物性値が高い傾向にあるものの、安全側には圧縮側の値で評価して問題ないことを確認している。せん断剛性については、単軸の剛性から推定することは困難であり、せん断試験を別途行う必要があることを示している。

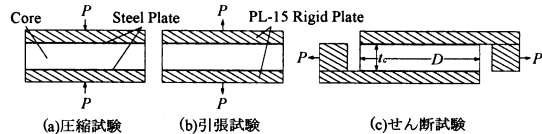


図 4.8 サンドイッチパネル芯材の材料試験方法

(6) また芯材物性値に与える応力方向の影響を、代表的な芯材としてウレタン、ロックウール毎に、図 4.9 に示すようにその異方性を確認している。なお、表面材の座屈特性に与える影響は、主に z 方向である厚さ方向の性状である。外壁の使用されるサンドイッチパネル表面は、太陽光により相当の温度上昇を伴う。その際の芯材特性については、図 4.10 に示すように、载荷時の温度が高いほど剛性が低下することを明らかにしている。

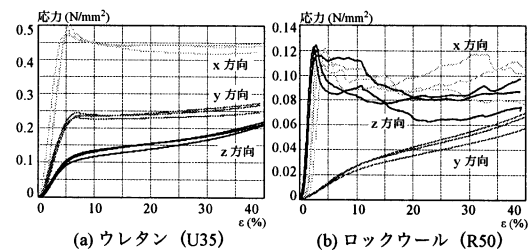


図 4.9 応力度ひずみ度関係の異方性

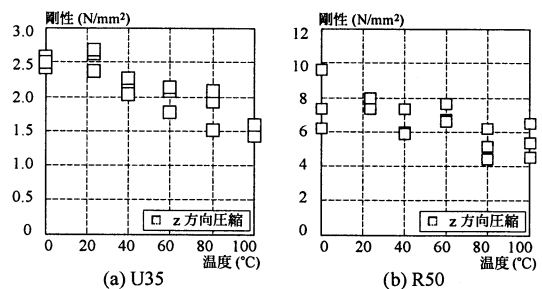


図 4.10 温度と剛性の関係性

(7) 続いて、鋼板サンドイッチパネルが不均等面外曲げを受ける場合を対象に、表面材の面外曲げ弾性座屈耐力を把握している。まず既往の研究により得られている単純圧縮時の座屈耐力評価式について有限要素法を用いた検討から各評価式を比較し、面外曲げを受ける場合に適応すべき適切な評価手法を選定している。この選定した理論を拡張した図 4.11 に示すモデルを用いて均等面外曲げを受ける弾性座屈耐力を、芯材厚、材長、芯材の材料特性、境界条件をパラメータとして算定している。さらに、単純圧縮時の既往の評価式をもとに、不均等面外曲げを受ける鋼板サンドイッチパネルの弾性座屈耐力評価式を算定し、解析との対応関係を確認することで、精度良い評価式を導出できていることを示している。

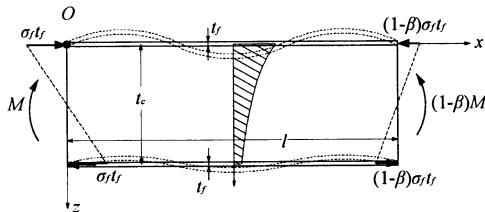


図 4.11 サンドイッチパネルの面外曲げ解析モデル

(8) 薄板軽量リップ溝形断面の不安定挙動については、圧縮力下における検討がほとんどであり、曲げせん断力を受ける場合の崩壊形式や座屈耐力については不明な部分が多い。このような現状に対し、ここでは数値解析を通して、リップ幅等の断面形状の差異、端部境界条件の差異が座屈性状に与える影響に検討している。リップ幅や境界条件の違いにより、その座屈モードは、図 4.12 のように変化することを示した上で、座屈耐力とモードの関係をリップ幅との関係で整理している。

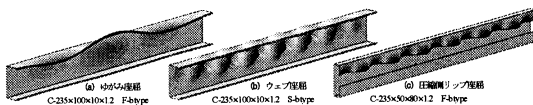


図 4.12 リップ溝形断面の座屈モード

(9) さらに、薄板を冷間成形することでリップ溝形断面试験体を作成し、各部の材料特性を調べた結果として、その機械的性質を表 4.1 に示している。平板部に比べて折曲げ角部において、若干の耐力上昇、伸び能力の低下が見られるが、その差は小さくため、断面全体としての材料特性としては平板部のものを使用して評価して問題ないと判断できることを示している。

表 4.1 鋼材の機械的性質

切出し位置	板厚 t (mm)	ヤング率 E (kN/mm ²)	降伏応力 sigma_y (N/mm ²)	引張強さ sigma_u (N/mm ²)	一様伸び a_1 (%)	破断伸び E/ing (%)	降伏比 引張比
フランジ平板部	1.6	212	259	365	22.7	42.9	0.71
ウェブ平板部		213	254	360	22.9	43.0	0.70
フランジリップ間角部		209	268	364	18.2	38.7	0.74
フランジウェブ間角部		211	267	365	17.7	38.3	0.73

(10) 部材の荷重試験では、片持ち梁形式で曲げせん断力を受ける場合を想定し、リップ幅を変数とするともに、端部境界条件として、Type-A の全断面固定、Type-B のウェブのみ固定としたものを用意している。図 4.13 に示すようにリップ幅により座屈モードが変化することを確認するとともに、図 4.14 に示すように境界条件により荷重変位関係に大きな差異が生じることを確認している。これらの結果を踏まえて、境界条件および断面形状を考慮できる座屈耐力評価式を構築している。

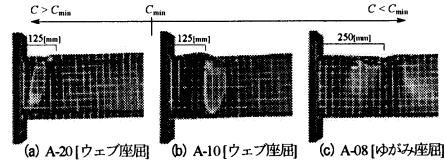


図 4.13 リップ溝形断面の最終変形形状

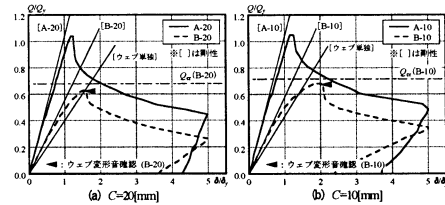


図 4.14 リップ溝形断面の曲げせん断荷重変位関係

(11) 薄板軽量形鋼造では、薄板軽量リップ溝形断面部材をねじ等でつづり合わせた組立材が使用されるものの、そのつづり合わせ効果や端部境界条件の影響が曖昧であり、合理的な設計にはいたっていない現状に対し、図 4.15 に示す組立断面の座屈性状を検討し、曲げ座屈性状に与える端部境界条件の影響は小さいことを確認し、つづり節点状況に応じた座屈耐力評価式を提案している。また、図 4.16 に示すように、局部座屈耐力に与える組立効果について検討し、図 4.17 に示すように局部座屈耐力の上昇を明らかにした。さらには、組立材が曲げせん断力を受ける場合の、座屈耐力を、境界条件を考慮した上で明らかにしている。



図 4.15 組立部材

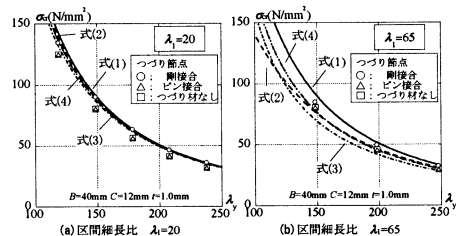


図 4.16 つづり間隔とつづり節点の影響

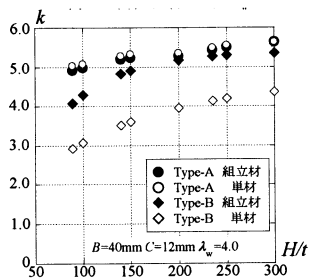


図 4.17 単材と組立材の局部座屈耐力比較

(12) これまで、薄板鋼板の特性、サンドイッチ効果、材料特性、組立効果について検討してきた成果を統合的に検討し、新たな構造形式の一提案として、写真 4.1 に示すように、ハット形断面を 2 枚の鋼板ではさみ、リベットつづりにつづることによって構成した形態可変版の試作実験を行っている。リベットによる接合はさほど目立たず、薄板から構成されているにも関わらず比較的大きな剛性を有し、サンドイッチ効果を確認している。

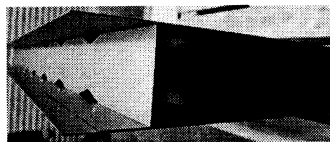


写真 4.1 薄板サンドイッチパネルの一提案

<引用文献>

- ① 薄板軽量形鋼造建築物設計の手引き，社団法人日本鉄鋼連盟，2002.
- ② Diaphragm Design Manual Third Edition, Steel Deck Institute, 2004.
- ③ 清水信孝，岡田忠義，五十嵐規矩夫，繰返し面内せん断力を受ける波板鋼板パネルの弾塑性変形挙動，日本建築学会構造系論文集，Vol. 75, No. 655, pp. 1745-1754, 2010.
- ④ 五十嵐規矩夫，小田部俊明，王韜，ウェブ幅厚比の大きな H 形断面梁の塑性変形能力と座屈後繰返し挙動，日本建築学会構造系論文集，Vol. 74, No. 646, pp. 2345-2354, 2009.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- ① 五十嵐規矩夫，稲葉澄，面外曲げを受ける鋼板サンドイッチパネルの弾性座屈耐力，日本建築学会構造系論文集，査読有，Vol. 82, No. 733, 2017, 475-483
- ② 五十嵐規矩夫，高橋大夢，小橋知季，リップ溝形鋼を用いた薄板軽量形鋼組立圧縮材の弾性座屈耐力，鋼構造年次論文報告集，査読有，Vol. 24, 2016, 830-835
- ③ Yoshifumi Yokoyama, Kikuo Ikarashi, Characteristics of Corrugated Tank under Fundamental Load, Nordic Steel Construction Conference 2015, 査読有，1-9

- ④ 五十嵐規矩夫，岡本純，佐藤圭一，周辺を鋼板に接合された矩形波板鋼板の大変形せん断挙動と崩壊形式，日本建築学会構造系論文集，査読有，Vol. 80, No. 710, 2015, 693-701
- ⑤ 五十嵐規矩夫，横山佳史，基本的荷重条件下における波板円筒の弾性座屈性状，鋼構造年次論文報告集，査読有，Vol. 22, 2014, 728-733

〔学会発表〕(計 15 件)

- ① 高橋大夢，五十嵐規矩夫，小橋知季，リップ溝形鋼を用いた薄板軽量形鋼組立圧縮材の弾性座屈耐力，日本建築学会大会，2016. 8, 福岡
- ② 久保田大貴，五十嵐規矩夫，端部境界条件を考慮した薄板軽量リップ溝形断面梁の座屈性状，日本建築学会大会，2016. 8, 福岡
- ③ 横山佳史，五十嵐規矩夫，岡田忠義，佐藤由悟，曲げせん断力が作用する波板円筒容器の弾塑性挙動，日本建築学会大会，2016. 8, 福岡
- ④ 久保田大貴，五十嵐規矩夫，等曲げを受ける薄板軽量リップ溝形鋼梁の弾性座屈性状，日本建築学会大会，2015. 9, 神奈川
- ⑤ 横山佳史，五十嵐規矩夫，曲げせん断力が作用する波板円筒容器の弾性座屈性状および分布内圧による影響，日本建築学会大会，2015. 9, 神奈川
- ⑥ 稲葉澄，五十嵐規矩夫，中田安洋，面外曲げを受ける鋼板サンドイッチパネル表面材の弾性座屈耐力評価，日本建築学会大会，2015. 9, 神奈川
- ⑦ 横山佳史，五十嵐規矩夫，波板円筒容器の基本的荷重条件下における弾性座屈性状，日本建築学会大会，2014. 9, 兵庫
- ⑧ 稲葉澄，五十嵐規矩夫，中田安洋，鋼板サンドイッチパネル芯材の力学特性，日本建築学会大会，2014. 9, 兵庫

6. 研究組織

(1) 研究代表者

五十嵐 規矩夫 (IKARASHI KIKUO)

東京工業大学・

環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：40242292

(2) 連携研究者

佐藤 篤司 (SATOU ATSUSHI)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00362319

石原 直 (ISHIHARA TADASHI)

独立行政法人建築研究所・

建築生産研究グループ・主任研究員

研究者番号：50370747

富岡 義人 (TOMIOKA YOSHITO)

三重大学・工学研究科・教授

研究者番号：50237111