

3D レーザースキャナー(3DLS)を用いた 高精度トンネル変形モニタリング手法の開発

横浜国立大学 都市イノベーション研究院 崔瑛 (CUI, Ying)

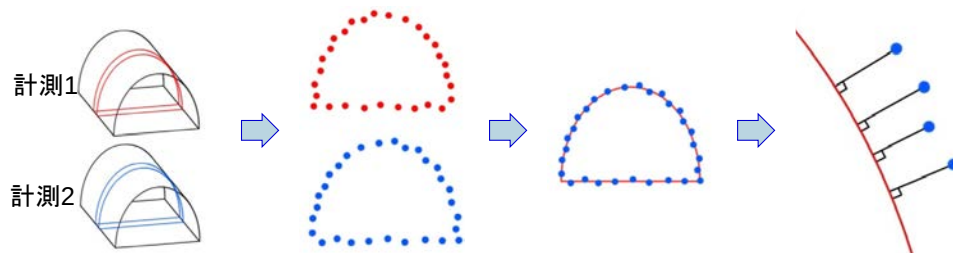
YNU 横浜国立大学 IUI 都市イノベーション研究院
YOKOHAMA NATIONAL UNIVERSITY Institute of Urban Innovation, Yokohama
Initiative for Global Arts & Sciences

2. 研究の目的

3DLSを用いたトンネル変形計測

3

3DLSによるトンネル変形計測と誤差要因



1. 計測 (複数回)

- 計測機器・設定
- 計測位置
- 計測環境 (温度・湿度変化)
- 計測対象 (表面性質)

2. 点群取得・合成

- ターゲット
- スキャン密度
- ノイズ処理
- 欠損データ

3. 位置合わせ

- ターゲット (設置誤差)
- 座標系 (不整合)

4. 差分計算

- 差分手法 (C2C, C2M, M3C2)
- 点群密度
- ノイズ
- Mesh精度

目的: 3DLSを用いた高精度トンネル変形モニタリング手法を開発

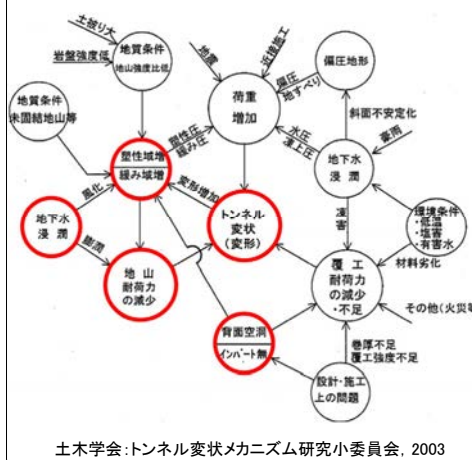
1. 研究の背景

トンネルの変状原因と変形計測基準

2

研究の背景: 近年, トンネルを含むインフラ構造物の老朽化が進行しており, 現状の調査および効率的な維持・管理技術の開発が急務となっている。

トンネルの変状原因



土木学会: トンネル変状メカニズム研究小委員会, 2003

トンネルの変形速度と対策区分

道路トンネル定期点検要領(2019): 変形速度に応じた対策区分の目安

変形速度				対策区分
10mm/年 以上	3~10mm/年	1~3mm/年	1mm/年 未満	
		○	○	IIa, IIb
	○	○		IIa
		○		III
○				IV

付表-2.8 変形、移動、沈下に対する対策区分

I	変形、移動、沈下等が生じていない、またはあっても軽微で、措置を必要としない状態
IIa	変形、移動、沈下等しており、その進行が停止しているが、監視を必要とする状態
IIb	変形、移動、沈下等しており、その進行が緩慢であるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
III	変形、移動、沈下等しており、その進行が見られ、構造物の機能低下が予想されるため、早期に措置を講じる必要がある状態
IV	変形、移動、沈下等しており、その進行が著しく、構造物の機能が著しく低下しているため、緊急に対策を講じる必要がある状態

道路トンネル定期点検要領, 2019

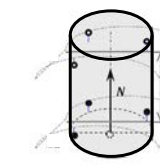
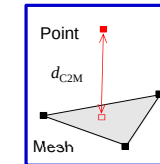
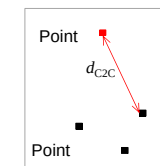
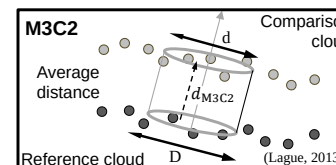
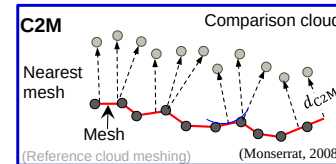
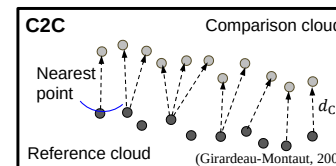
2. 研究の目的と構成

3DLSを用いたトンネル変形計測

4

目的: 3DLSを用いた高精度トンネル変形モニタリング手法を開発

差分計算方法



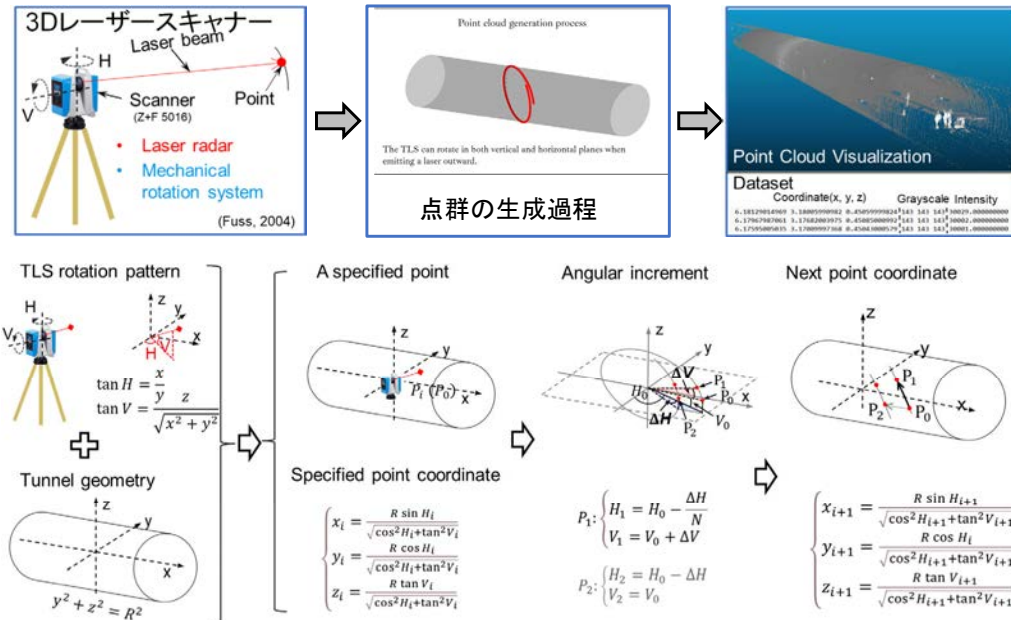
研究の流れ

- C2M(Cloude-to-Mesh) アルゴリズムにおける誤差の発生メカニズムを整理
- 点群の分布特性に基づく比較誤差評価手法 (CEE法) を提案
- 実トンネルでの現場実験によってその妥当性を検証
- 誤差を事前に制御する最適化手法を構築

3. トンネル点群特性に基づく比較誤差評価手法の提案

5

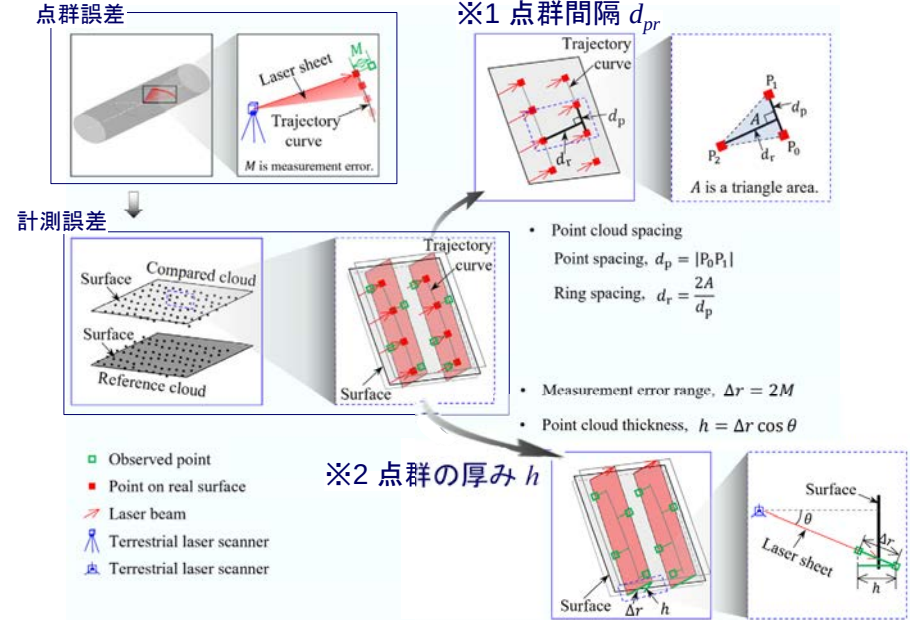
3.1 トンネル点群特性に基づく点群軌道の定式化



3. トンネル点群特性に基づく比較誤差評価手法の提案

6

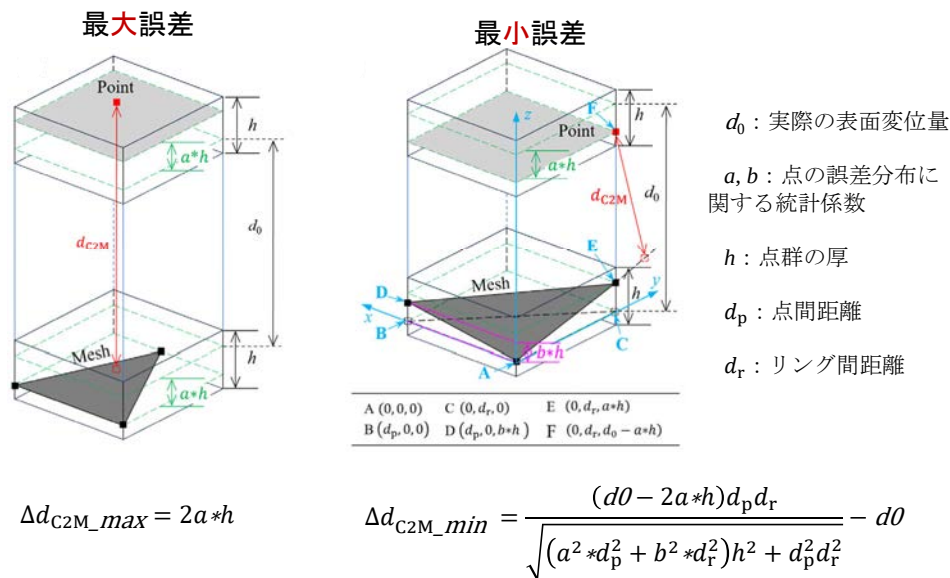
3.2 差分計算における誤差の発生メカニズム



3. トンネル点群特性に基づく比較誤差評価手法の提案

7

3.3 C2Mによる比較誤差評価手法 (CEE) の提案

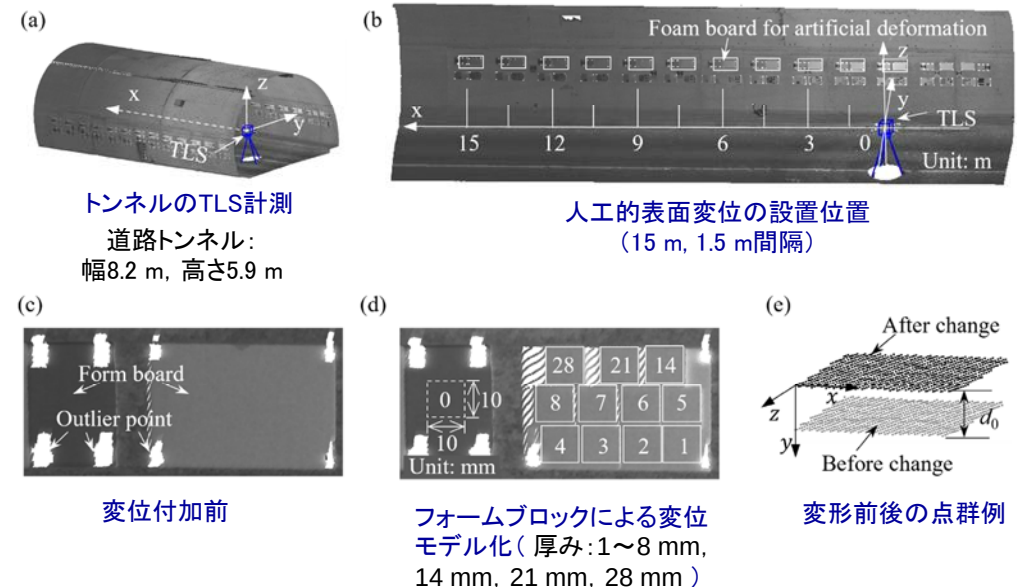


3. トンネル点群特性に基づく比較誤差評価手法の提案

8

3.4 現場実験による検証

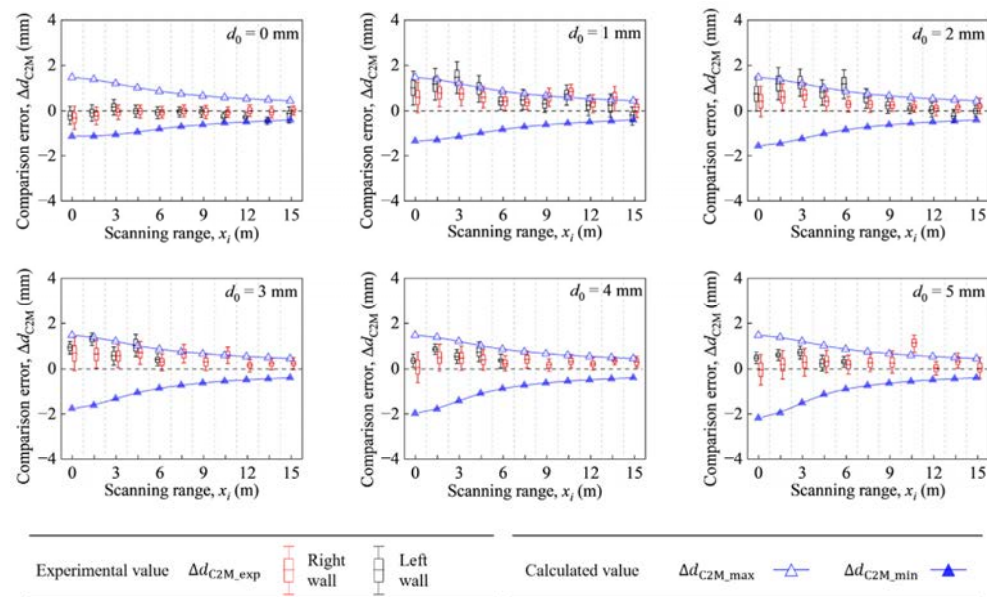
現場実験の概要



3. トンネル点群特性に基づく比較誤差評価手法の提案

9

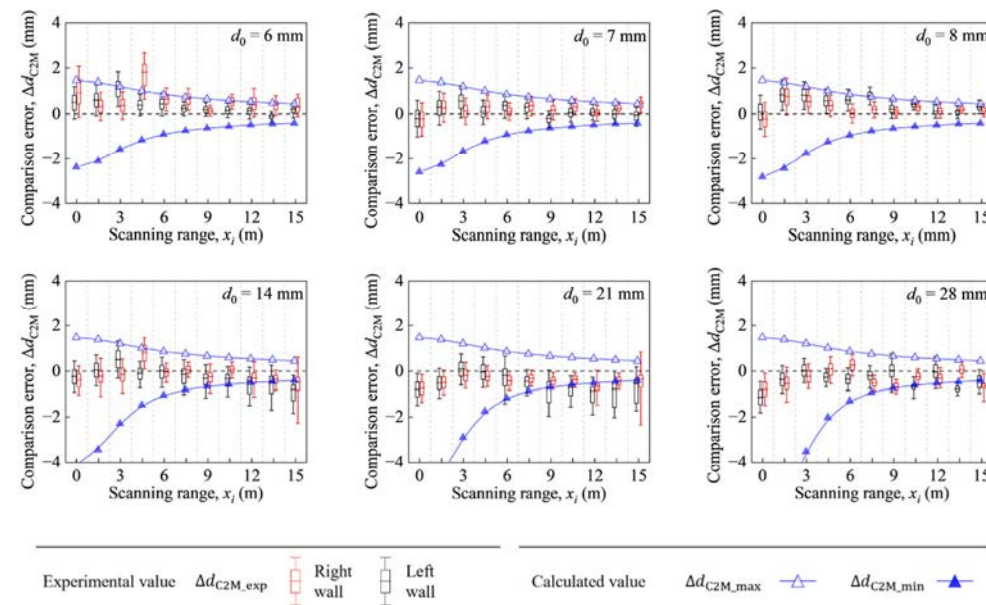
3.4 現場実験による検証



3. トンネル点群特性に基づく比較誤差評価手法の提案

10

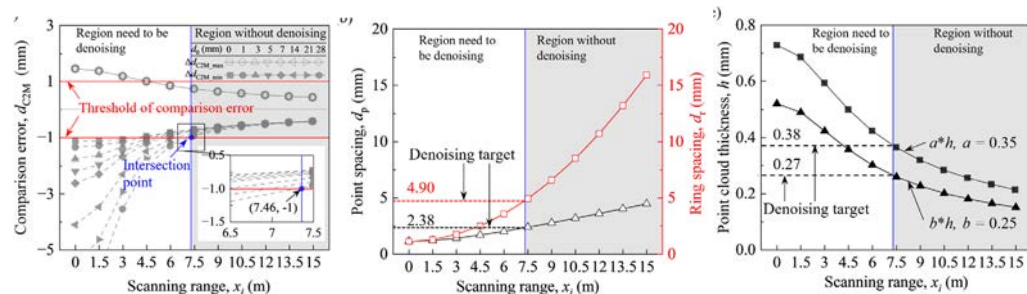
3.4 現場実験による検証



4. 点群最適化手法の提案

11

CEE法を用いた最適化



ノイズ除去領域の抽出



点間隔に対する制限値の設定

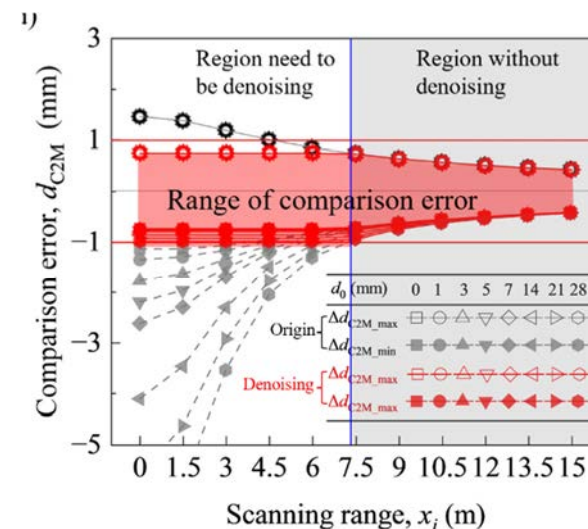


点群厚さに対する制限値の設定

4. 点群最適化手法の提案

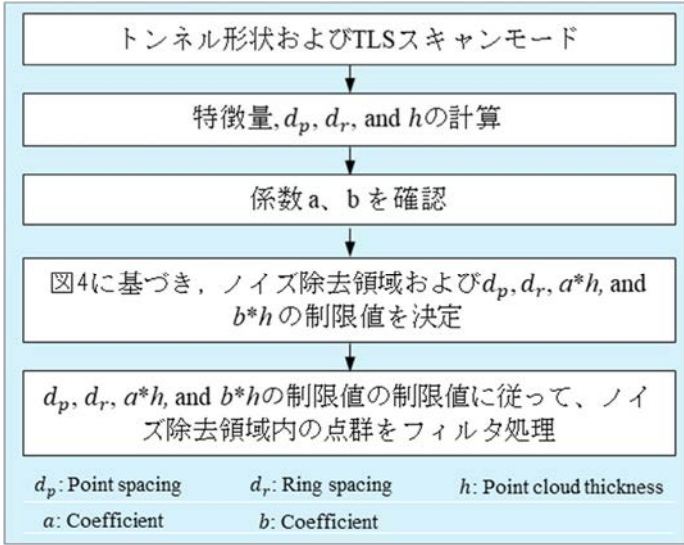
12

CEE法を用いた最適化の効果



最適化後の比較誤差評価

実測点群の最適化フローチャート



結論

- 点群およびメッシュに分布特徴量を割り当て、点群厚さに統計的制限を導入することで、C2M比較誤差を定量的に評価するCEE法を構築。
→従来十分に解析されてこなかったC2Mアルゴリズムの理論的誤差解析に新たな枠組みを提供。
- CEE法を活用することで、誤差閾値の設定・特徴量制限・ノイズ除去を体系的に実施し、C2Mアルゴリズムの誤差を効果的に最小化できることを示した。
→これにより、トンネル変形量の評価精度を±1 mmレベルで制御する点群最適化手法を実現。

課題

- 円筒形トンネルを対象としたTLS計測に限定されており、今後は湾曲トンネル・複雑構造トンネル・MLS計測への適用が課題。
- 法線方向変形(収縮・浮上・剥離など)の検出に有効だが、水平変位や回転変形には対応していない。今後は基準点を用いた変位解析との統合が必要。

全国にある木材加工工場にて製造可能な CLT(Cross Laminated Timber) の開発と社会実装

宇都宮大学 地域デザイン科学部
建築都市デザイン学科
中島史郎

研究の背景①

接着を用いて製造する木質構造材料



- 比較的大がかりな製造設備を要する
- 接着に対する高度な品質管理が必要

製造できるところが限られる

接着を用いないで製造する木質構造材料



- 簡単な設備で製造が可能
- 接着に対する品質管理が不要

小規模な木材加工事業者でも製造できる

研究の背景②

挽板を接着剤を用いて製造したCLT



- 挽板を接着積層しているため、材料の面内せん断剛性が著しく高い（剛）

CLTを隣接する部材に接合する接合部で
耐力・剛性・靱性に対する設計

挽板をビス接合を用いて製造したCLT



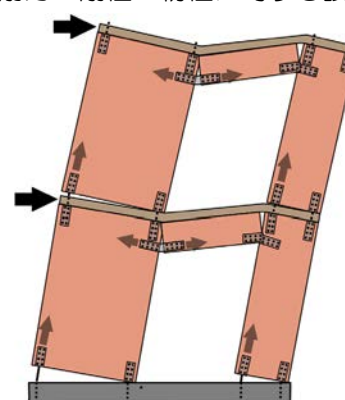
- ビスの種類と本数・配置により部材の面内せん断剛性が定まる

CLT自体で耐力・剛性・靱性に対する
設計を行うことが可能

研究の背景③

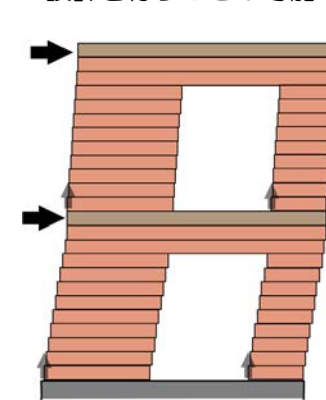
挽板を接着剤を用いて製造したCLT

CLTを隣接する部材に接合する接合部で
耐力・剛性・靱性に対する設計



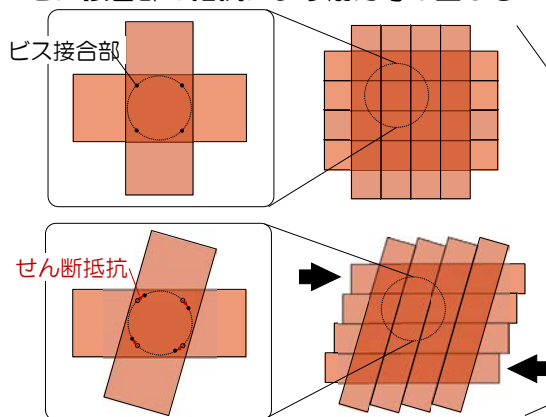
挽板をビス接合を用いて製造したCLT

CLT自体で耐力・剛性・靱性に対する
設計を行うことが可能

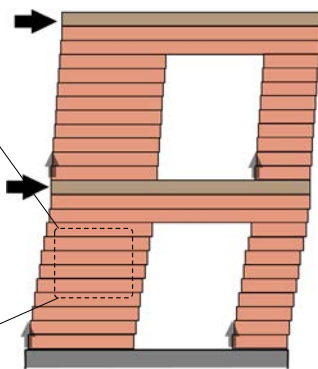


ビス接合を用いて製造したCLTの耐力等の発現機構

挽板が交差する部分の中央部を
回転中心とする回転変形とそれに伴う
ビス接合部の抵抗により耐力等が生じる



挽板をビス接合を用いて製造したCLT
CLT自体で耐力・剛性・靱性に対する
設計を行うことが可能



目的

1. ビス接合を用いて挽き板を積層接合したCLTについて：

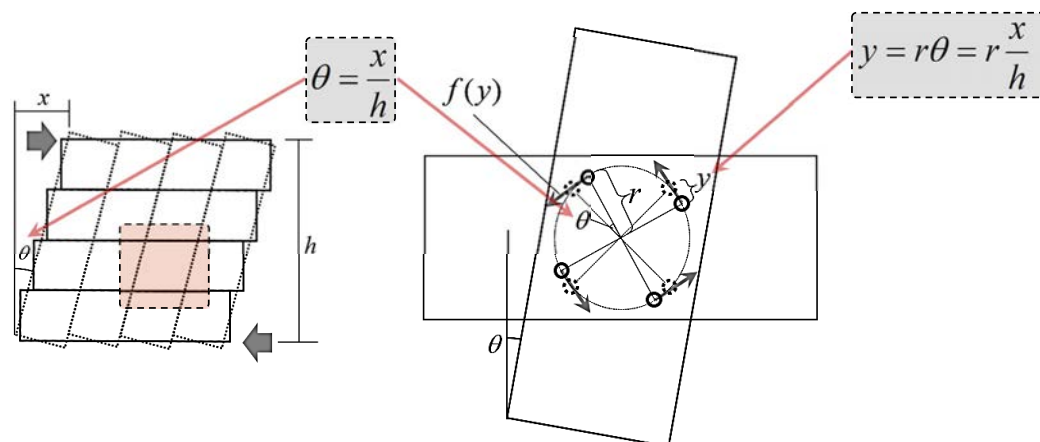
- ① 面内せん断に係る部材設計法を、前述の耐力等の発現機構を元に定め、
- ② 部材設計法の妥当性を実験により確認する。

2. モデル建物を対象として：

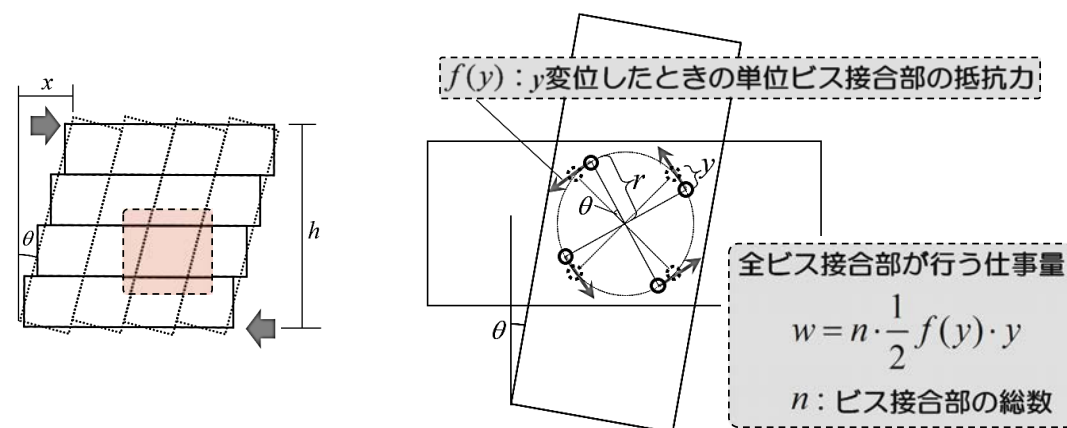
- ③ ビス接合を用いて挽き板を積層接合したCLTの利用の可能性について考察する。

注) 以降、ビス接合を用いて挽き板を積層接合したCLTを
Screwed CLTと呼ぶ。

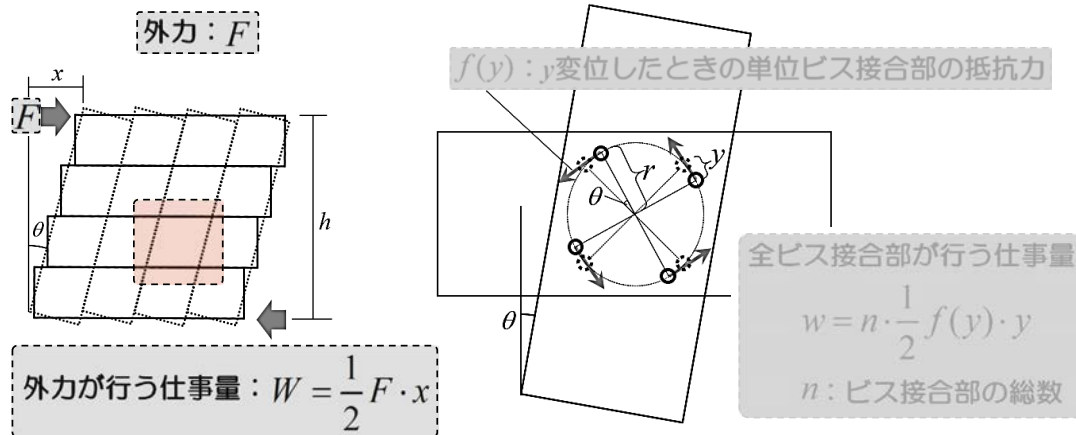
Screwed CLT の荷重変位関係の算定法



Screwed CLT の荷重変位関係の算定法



Screwed CLT の荷重変位関係の算定法①



Screwed CLT の荷重変位関係の算定法①

$$\text{外力が行う仕事量: } W = \frac{1}{2} F \cdot x$$

全ビス接合部が行う仕事量

$$w = n \cdot \frac{1}{2} f(y) \cdot y$$

n : ビス接合部の総数

$W = w$ となるので、

$$F = \frac{n \cdot f(y) \cdot y}{x}$$

微小区間についてみると

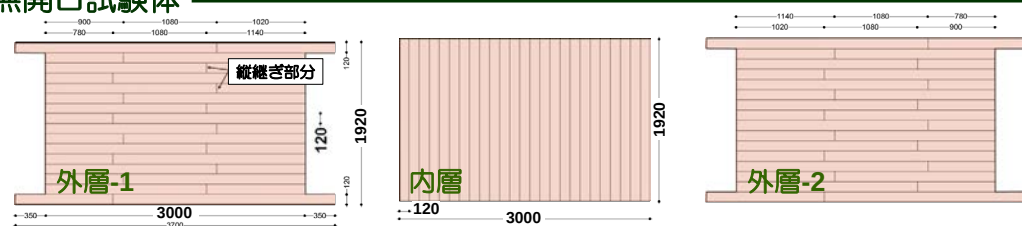
$$\Delta F = \frac{n \cdot f(\Delta y) \cdot \Delta y}{\Delta x}$$

変位増分解析により
Screwed CLTの荷重変位関係
を求めることができる

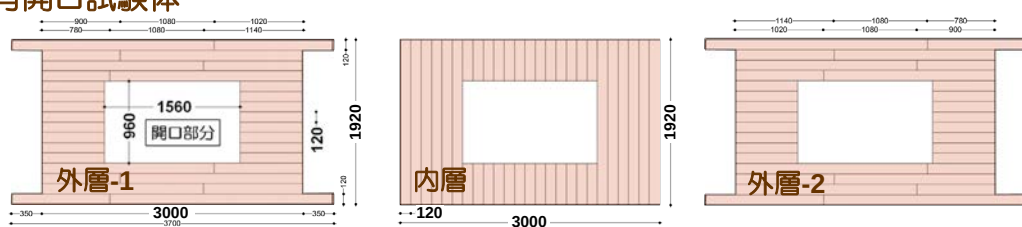
(Δy は Δx の関数)

Screwed CLT の面内せん断用の試験体（3層構成の場合）

無開口試験体

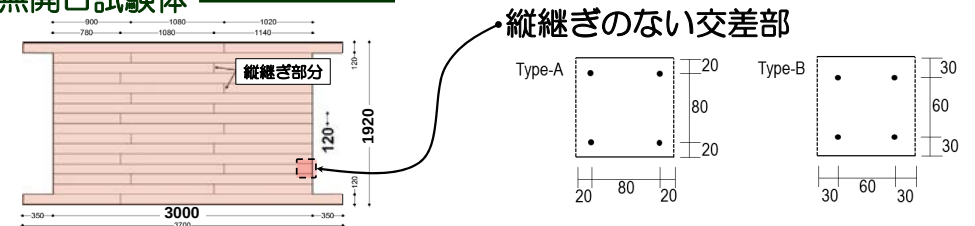


有開口試験体

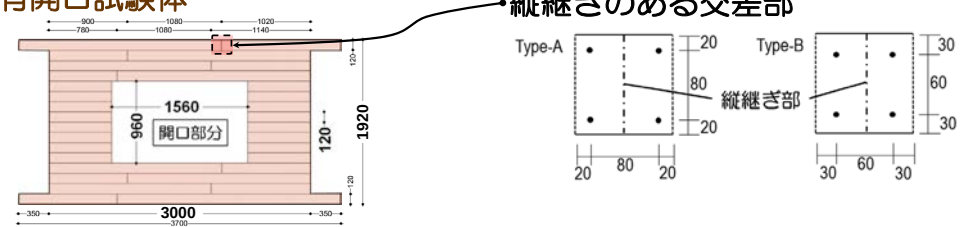


Screwed CLT の面内せん断試験 — ビス接合部の配置

無開口試験体

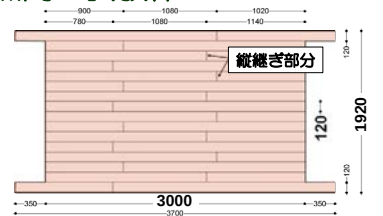


有開口試験体

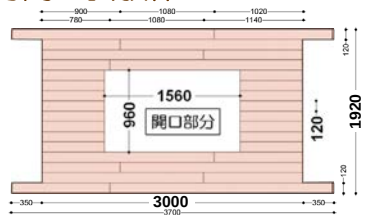


Screwed CLT の面内せん断試験 ― 層構成とビスの仕様

無開口試験体



有開口試験体



層構成と積層接合に用いたビスの仕様

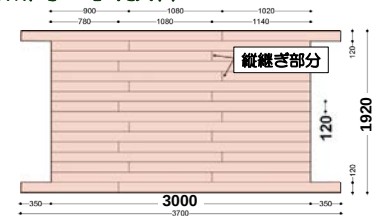
3層構成

[接合材：3層構成]
パネリドⅡ P5-80
・径：5mm，長さ：80mm

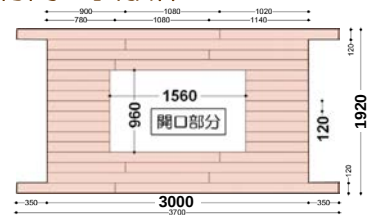


Screwed CLT の面内せん断試験 ― 層構成とビスの仕様

無開口試験体



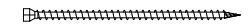
有開口試験体



層構成と積層接合に用いたビスの仕様

5層構成

[接合材：5層構成]
パネリド PX6-140
・径：6mm，長さ：140mm

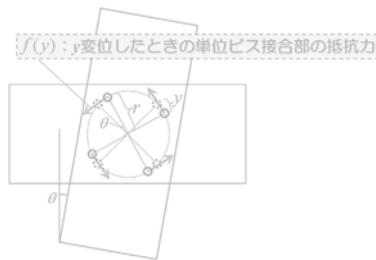


試験体の仕様と試験の目的

試験体名	F3-20	F3-30	F5-20	F5-30
①層数	3層	3層	5層	5層
②開口の有無	無	無	無	無
③ビス材縁距離	20mm	30mm	20mm	30mm

試験体名	O3-20	O3-30	O5-20	O5-30
①層数	3層	3層	5層	5層
②開口の有無	有	有	有	有
③ビス材縁距離	20mm	30mm	20mm	30mm

- 目的 ① 製材の積層数と耐力との関係を確認
② 開口の有無と耐力との関係を確認



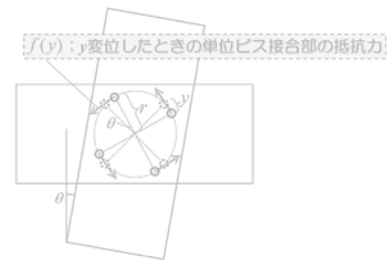
- ③ ビスの材縁距離と耐力との関係を確認

試験体の仕様と試験の目的

試験体名	F3-20	F3-30	F5-20	F5-30
①層数	3層	3層	5層	5層
②開口の有無	無	無	無	無
③ビス材縁距離	20mm	30mm	20mm	30mm

試験体名	O3-20	O3-30	O5-20	O5-30
①層数	3層	3層	5層	5層
②開口の有無	有	有	有	有
③ビス材縁距離	20mm	30mm	20mm	30mm

- 目的 ① 製材の積層数と耐力との関係を確認
② 開口の有無と耐力との関係を確認

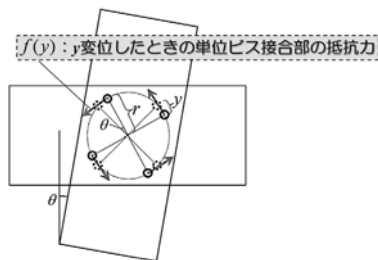


- ③ ビスの材縁距離と耐力との関係を確認

試験体の仕様と試験の目的

試験体名	F3-20	F3-30	F5-20	F5-30
①層数	3層	3層	5層	5層
②開口の有無	無	無	無	無
③ビス材縁距離	20mm	30mm	20mm	30mm

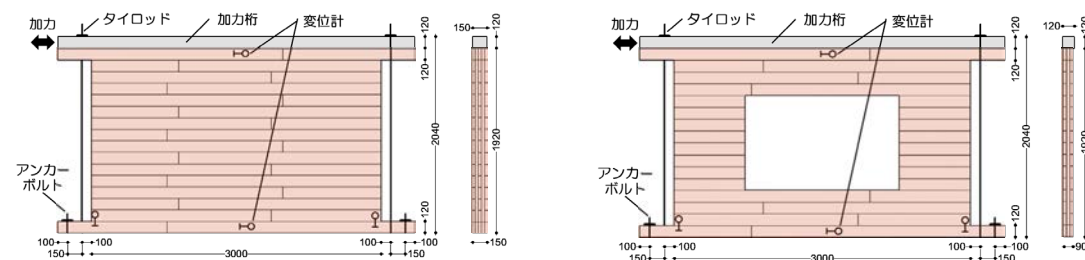
試験体名	O3-20	O3-30	O5-20	O5-30
①層数	3層	3層	5層	5層
②開口の有無	有	有	有	有
③ビス材縁距離	20mm	30mm	20mm	30mm



- 目的 ① 製材の積層数と耐力との関係を確認
② 開口の有無と耐力との関係を確認

- ③ ビスの材縁距離と耐力との関係を確認

試験方法（加力方法）

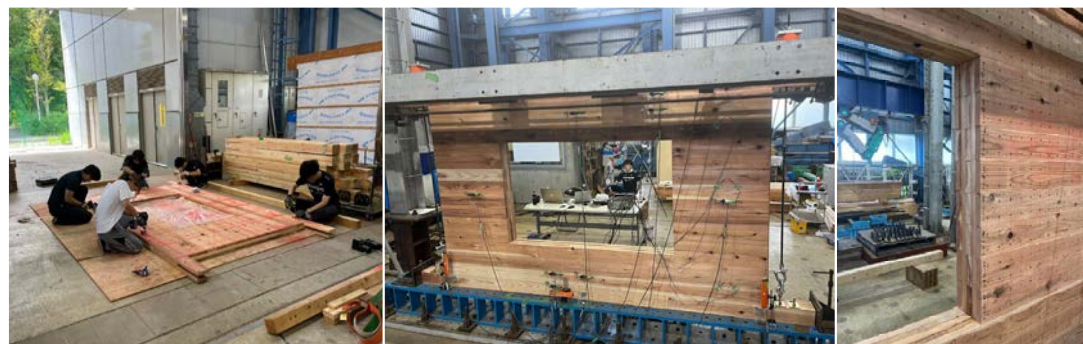


加力方法：正負交番の繰り返し加力

加力スケジュール：±1/450、±1/300、±1/200、±1/150、±1/100、±1/75、±1/50radを折り返し点とする3回繰り返し加力、その後、加力装置の荷重の容量まで単調加力

計測：水平変位
鉛直変位
挽き板の縦継ぎ部分の変位（開き）

試験体の製作と試験の様子

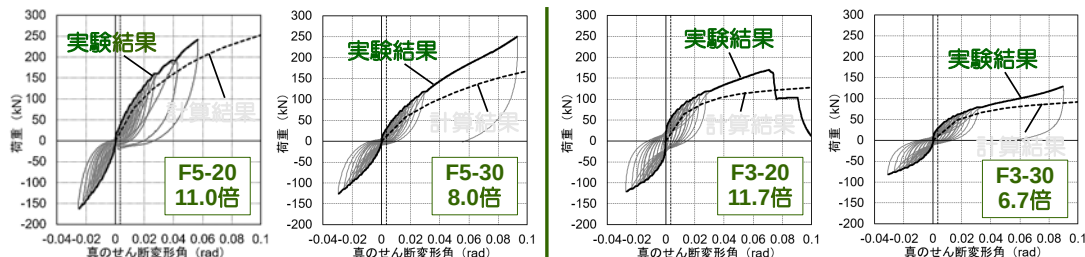


試験体製作の様子

加力試験の様子

試験体の変形

実験結果一荷重変形角曲線（開口なし）



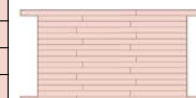
(a)5層構成・材縁20mm

(b)5層構成・材縁30mm

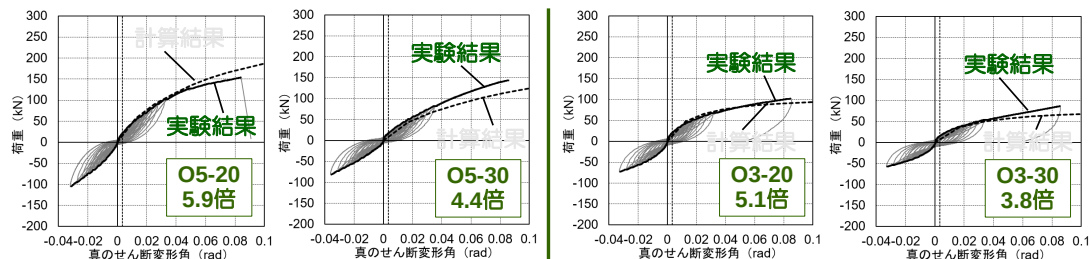
(c)3層構成・材縁20mm

(d)3層構成・材縁30mm

試験体名	Py (kN)	P _{1/150} (kN)	2/3P _{max} (kN)	0.2Pu/Ds (kN)	降伏耐力 (kN)	単位長さ 降伏耐力 (kN/m)	壁倍率 相当 (倍)
F5-20	125	64.6	161	67.2	64.6	21.5	11.0
F5-30	117	46.8	167	68.2	46.8	15.6	8.0
F3-20	86.7	69.3	113	68.8	68.8	22.9	11.7
F3-30	63.5	39.6	86.0	44.9	39.6	13.2	6.7



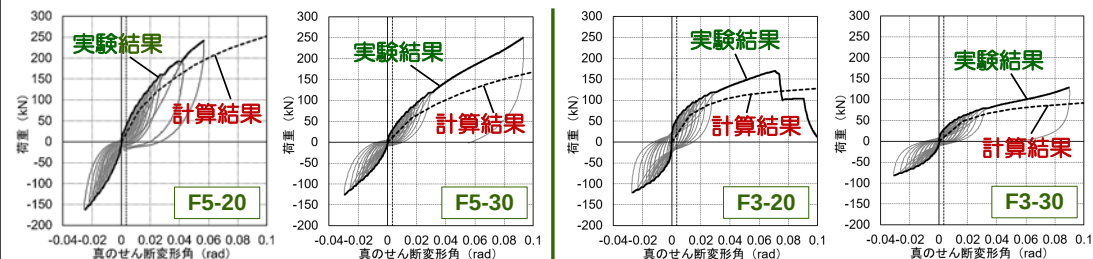
実験結果一荷重変形角曲線（開口あり）



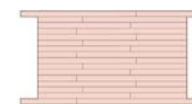
試験体名	Py (kN)	$P_{1/150}$ (kN)	$2/3P_{max}$ (kN)	$0.2Pu/Ds$ (kN)	降伏耐力 (kN)	単位長さ降伏耐力 (kN/m)	壁倍率相当 (倍)
O5-20	88.7	34.6	103	48.5	34.6	11.5	5.9
O5-30	69.7	26.1	96.0	39.1	26.1	8.7	4.4
O3-20	52.7	30.1	68.0	35.9	30.1	10.0	5.1
O3-30	42.7	22.1	57.6	26.9	22.1	7.4	3.8



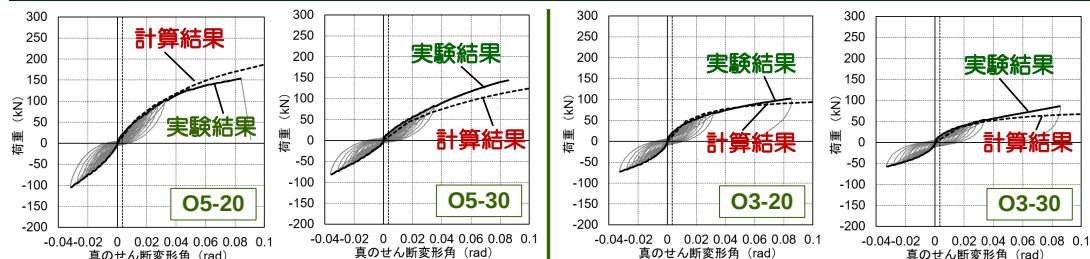
実験試験と計算結果の比較（開口なし）



計算結果は荷重が実験結果よりも低く求まった



実験試験と計算結果の比較（開口あり）



O5-20とO3-20を除き、
計算結果は荷重が実験結果よりも低く求まった



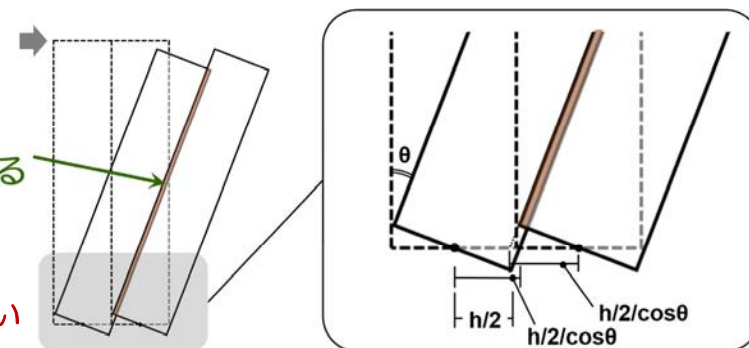
計算結果に対する考察

計算結果の荷重が、実験結果の荷重よりも低く求まった理由：

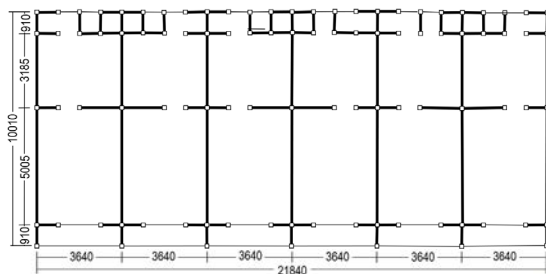
挽板が傾斜すると挽板間に支圧力と摩擦力が生じるが、この力が行う仕事量を計算では考慮していない。外力と釣り合う仕事量が小さく評価。

製材間に
支圧と摩擦が生じる

安全側の設計
という観点からは
考慮しないほうが良い



Screwed CLT を構造材とする設計事例ー計算対象



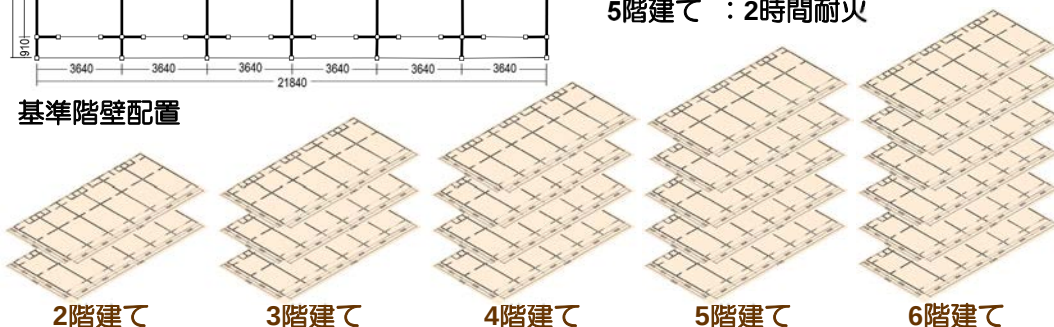
基準階壁配置

用途：集合住宅
基準階床面積：1181.5 m²
階数：2～5階建て

2～3建て：1時間準耐火

4階建て：1時間耐火

5階建て：2時間耐火



2階建て

3階建て

4階建て

5階建て

6階建て

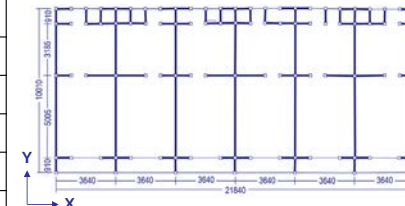
まとめ

1. 構造用ビスを用いて接合したScrewed CLTの面内せん断に係る降伏耐力、終局耐力、初期剛性に関する知見を実験により得た。
2. Screwed CLTの面内せん断に係る荷重変形角関係をビス接合部の荷重変位関係を用いて増分解析により求める方法を示した。
3. 計算結果が安全側の値となっており、設計に用いることが可能であるという結果を得た。
4. 6階建ての建物を設計した場合、耐力が最も低いScrewed CLT [3層構成+ビス材遠距離：30mm] を水平抵抗要素とした場合であっても、降伏時と必要な耐力を得ることができることを確認した。

Screwed CLT を構造材とする設計事例ー結果（地震時）

必要耐力（降伏時）と必要壁長さ

作用階	必要耐力 (降伏時)	必要壁長さ (m)			
		F5-20	F5-30	(F3-20)	F3-30
6階	216	3.3	4.6	3.1	5.5
5階	454	7.0	9.7	6.6	11.5
4階	641	9.9	13.7	9.3	16.2
3階	793	12.3	16.9	11.5	20.0
2階	931	14.4	19.9	13.5	23.5
1階	1050	16.3	22.4	15.3	26.5

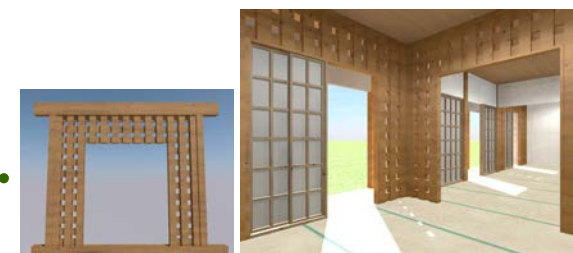
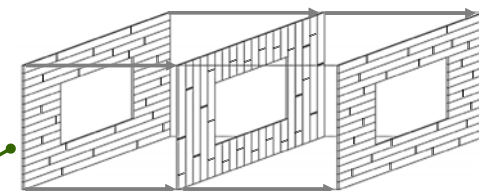


壁長さ X方向：54.6m
Y方向：81.0m

無開口壁で最も耐力が低い、[3層構成+ビスの縁距離30mm] のScrewed CLTを用いても耐力を確保することができる。

今後について

1. 積層数が5層以上、例えば、7層や9層の場合の耐力と剛性についての検証。
2. 短い挽板、例えば、360mm程度を用いた場合の性状の確認。
3. より精緻な試設計の実施。
4. 活用の可能性の検討。



耐震補強用のパネルとしての活用

ご清聴下さりありがとうございました

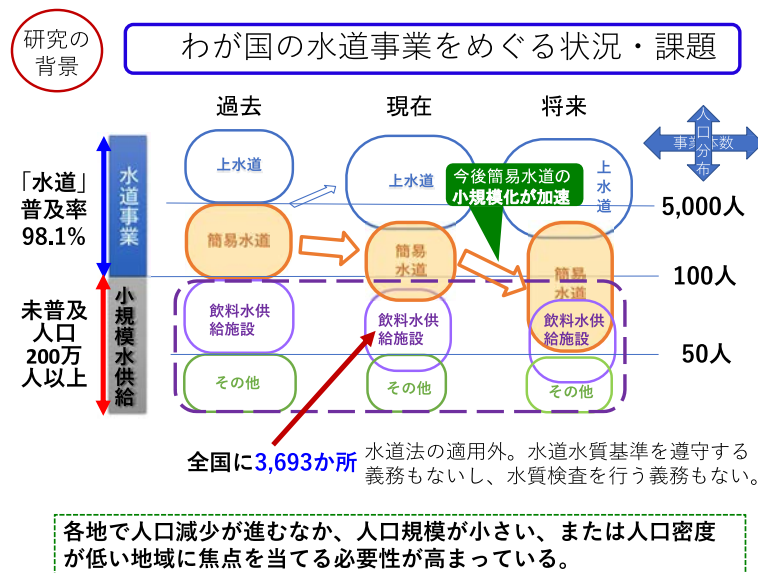
文献 : Petr Kuklík, Lukáš Velebil, Pavel Nechanický: Mechanically Jointed CLT Panels for Wall, Floor and Timber-Concrete Composite Structure, Proceedings of World Conference on Timber Engineering, 2016.

地域社会における持続可能な水供給計画の立案

研究代表者：京都大学大学院工学研究科 教授 伊藤 禎彦

共同研究者：京都大学大学院工学研究科 講師 中西智宏、助教 安井碧

2026年10月21日



「小規模な水供給システム ～安全な飲料水の持続可能な供給に向けて～」

目次

- 第1章 小規模水供給システムの概要
- 第2章 小規模水供給システムの現状
- 第3章 小規模水供給システムの実態と課題
- 第4章 小規模水供給システムの経営とその持続可能性
- 第5章 小規模水供給システムのための技術
- 第6章 小規模水供給システムの将来に向けて
- 第7章 提言

著者

京都大学 伊藤 禎彦
国立保健医療科学院 浅見 真理
北海道立総合研究機構 牛島 健
東京大学 小熊 久美子
大阪大学 木村 昌弘
国立保健医療科学院 増田 貴則
水道技術経営パートナーズ 山口 岳夫

出版社：水道産業新聞社

発行日：2024年8月30日

小規模な 水供給システム

安全な飲料水の持続可能な供給に向けて



第7章 提言

7.1 水供給形態の選択と維持管理方法・技術

- 7.1.1 水供給形態の選択
- 7.1.2 浄水処理装置に関するニーズ
- 7.1.3 水質管理
- 7.1.4 データ管理・監視技術の活用
- 7.1.5 長期的な持続可能性の検討と実装の必要性
- 7.1.6 多様な水供給システムの形成

7.2 住民の参画と地域自律管理型水供給システムの構築

- 7.2.1 実態把握と情報共有
- 7.2.2 地域自律管理型水供給システムの構築へ向けて
- 7.2.3 まちづくり・地域づくりとの連携

7.3 広域連携の必要性和都道府県の役割強化

- 7.3.1 広域連携の必要性
- 7.3.2 都道府県のリーダーシップ力の強化

7.4 制度の改善と運用面のフレキシビリティ確保

研究目的

人口減少が進む**小さな地域を対象**とし、
当該**地域に適した水供給システムを提示**することによって、
将来にわたって**安全な飲料水の持続的供給を実現**すること。

対象地域

京都府 福知山市

市内唯一の未普及地域



北原地区

京都府 福知山市

奥北原地区 (2戸、3人)

5軒に配水するものとして整備されたが、現在は2軒のみ

上向流式緩速ろ過装置と配水池



取水施設



“山水”と呼ばれる

電源なし

配水

塩素注入設備なし

北原地区 (5戸、7人)

常時居住しているのは5軒、農作業のため帰宅する家を含めると9軒。



渓流水の取水地点

(石の重みによって設置されているだけ。落葉などで閉塞しやすい構造。)



配水池 (塩素注入設備はない)

人口減少と高齢化が進んでおり、維持管理作業がいつまで継続できるか不安

研究方法

課題1. 水供給システムの整備方針に関する調査と評価

課題2. 衛生学的安全評価と必要な浄水処理プロセスの選定

課題3. 住民意向を反映し当該地域に適した水供給システムの提示

課題1. 水供給システムの整備方針に関する調査と評価

水道の未普及地域を解消する方法

✓ 上水道接続

浄水場と配水管網を有した通常の水道システムに接続する方法

✓ 分散型システム

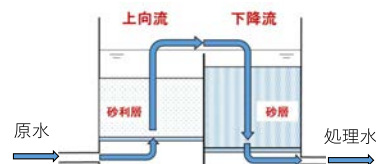
原水の取水—浄水処理—配水を当該地域内で完結させるシステム

✓ 運搬送水

通常の水浄場で生産した水道水を各戸または配水池まで運搬する方法

* イニシャルコストとランニングコスト（30年間）を試算して比較

導入を予定している分散型浄水処理装置



2槽式緩速ろ過装置構造図



表層の様子

装置外形

電源
不要

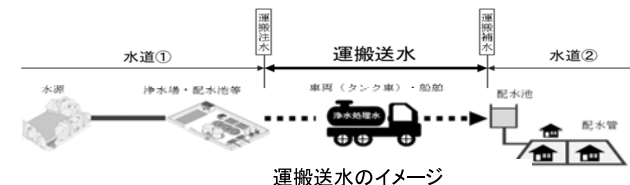
極小規模：

浄水能力 3 ～ 6 m³/日 (ろ速 4 ～ 8 m/日に対応)。15人程度の集落に適する。

安価：

装置本体は130万円。

運搬送水について



運搬送水のイメージ

厚生労働省医薬・生活衛生局水道課：
「運搬送水に係る留意事項」 発出(2023)
によって、選択肢とすることが可能になったもの



運搬送水の実施例：宮崎市

水供給システム総費用比較(30年間)

水供給形態	総費用(千円)
上水道接続	223,000
分散型処理施設整備	40,700
運搬送水・給水	35,400

÷ 7戸 =
31,000千円/戸
となり非現実的

課題 2. 衛生的安全評価と必要な浄水処理プロセスの選定

分散型システムとする場合・・・

一般細菌と大腸菌の測定結果			
一般細菌 (CFU/mL)		大腸菌 (MPN/100 mL)	
29.6		8.2	
3回の幾何平均値			
一般細菌数に基づくリスク評価結果と必要浄水処理能			
病原細菌推定濃度(cell/mL)	年間感染確率	必要除去・不活化log数	
72	9.67×10^{-1}	5.9	
大腸菌濃度測定値に基づくリスク評価結果と必要浄水処理能			
病原性大腸菌 O157:H7		カンピロバクター	
年間感染確率	必要除去・不活化log数	年間感染確率	必要除去・不活化log数
7.86×10^{-1}	4.6	9.13×10^{-1}	5.3

5.9 log除去の浄水処理を行えば安全な飲料水が生産できる
達成可能なプロセスは、①緩速ろ過+消毒、②急速ろ過+消毒

維持管理の容易さからこちらが適当

2槽式緩速ろ過装置で達成されている除去能
と塩素消毒に必要な不活化能

	いの町 檜山地区	土佐町 坪湊地区	大豊町 津家地区
大腸菌達成除去log数	0.84	0.79	1.0
一般細菌達成除去log数	1.2	1.2	2.1
塩素消毒による(一般細菌に対する)必要不活化log数*	4.7	4.7	3.8

* 5.9-(上記log数)

期待よりも
小さかった！
塩素消毒で
十分達成可能

課題 3. 住民意向を反映し当該地域に適した水供給システムの提示

住民の意識・ニーズ・要望などを把握
Byインタビューおよびアンケート調査



ヒアリングの様子
於：福知山市北原公民館

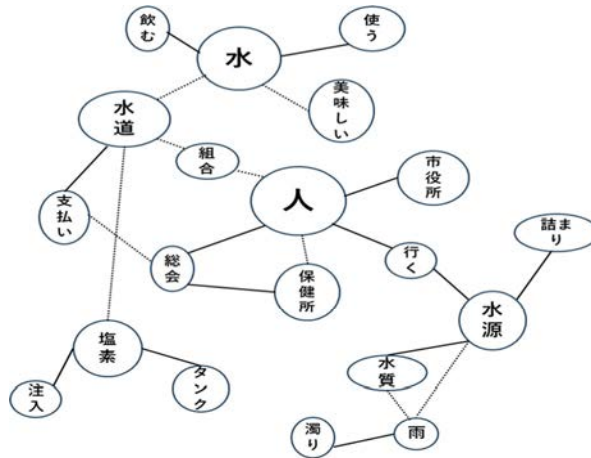
インタビュー内容は発語データ



意識構造として可視化

住民が実施可能な維持管理作業、
および負担可能な経費・料金の範囲を明示

水を巡る住民の意識構造



維持管理が容易な浄水処理装置が存在するなら、可能な限り自分たちで水供給を継続していきたいという意思が強い。

分散型システムの導入が適当

まとめ

●上水道接続、分散型処理施設整備、運搬送水・給水の3者について、30年間で必要となる費用を比較。

運搬送水・給水がもっとも安価。一方、分散型処理施設とのコスト差は大きくなかった。

●安全な飲用水を得るのに必要な浄水処理能は5.9 logと評価。

浄水処理プロセスとしては、緩速ろ過+塩素消毒が適当。

実際に運転されている2槽式緩速ろ過装置の性能評価を行った結果、ろ過による除去能は2 log程度以下しかなかった。塩素消毒が必須であると指摘。

●住民へのヒアリングを実施し、その意識構造を可視化。

維持管理が容易な浄水処理装置が存在するなら、可能な限り自分たちで水供給を行ってきたいという意思を確認。

総合すると、当該地域に導入する水供給システムとしては、分散型システムが適当。

大成学術財団 研究助成報告

大地震時の非構造部材の応力伝達機構解明 及び 損傷可視化に基づく地震後継続システムの開発

東北大学大学院 都市・建築学専攻

教授 木村祥裕

研究背景

2

2011年の東北地方太平洋沖地震

従来の巨大地震に比べて地震による建築物の構造被害は低減されたものの、ドアや窓、扉などのゆがみ、インフラの損傷により学校体育館などの施設に長期間避難を余儀なくされた方々が数万人となった。

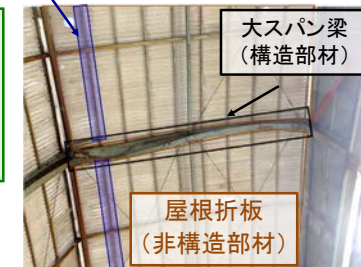


①建物の屋根被害

梁－非構造部材の
接合部での損傷
“剛性の低下”
▼
避難所として
機能しなかった事例

母屋
(非構造部材)

大スパン梁
(構造部材)



②建物の梁の被害

梁の座屈変形に
対する補剛材
(補強材)
“補剛効果”
▼
梁の変形を拘束
した事例

研究背景

3

2026年 熊本地震

東北地方太平洋沖地震と同様、地震による建築物の構造被害は低減されたものの、ドアや窓、扉などのゆがみ、インフラの損傷が顕著であった。



③建物の外装材の崩落



②屋根材の崩落

研究背景

4

巨大地震

非構造部材が**損傷**⇒専門的な**調査はなし**
⇒使用者が**生活に支障**をきたすことで**発見**

中地震

構造部材が無損傷 = 継続使用可能
非構造部材が**損傷** ⇒ **即時利用は難しい**

課題

非構造部材の損傷を可視化



①建物の屋根被害

梁－非構造部材の
接合部での損傷
“剛性の低下”
▼
避難所として
機能しなかった事例

研究目的
大地震時の非構造部材の応力伝達機構解明
及び
損傷可視化に基づく地震後継続システムの開発

- 1) 縮小模型横座屈実験による並列梁の横座屈性状の把握
- 2) 屋根折板(非構造部材)の振り実験による回転補剛剛性の算出
- 3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

研究目的

5

大地震時の非構造部材の応力伝達機構解明 及び
損傷可視化に基づく地震後継続システムの開発

1) 縮小模型振動実験による並列梁の横座屈性状の把握

並列梁の横座屈に伴い屋根折板に生じる
補剛モーメント及び回転補剛剛性

並列梁の横座屈耐力及び変形性能評価

対象) 屋根折板により拘束された**梁の変形性状の確認**

2) 屋根折板の振り実験による回転補剛剛性の算出

梁-屋根折板接合部より屋根折板に生じる
振りモーメント

接合治具の異なる屋根折板の回転補剛剛性

対象) 梁と**屋根折板接合部の変形性状の確認**

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

PLAを用いた等分布圧力下の屋根部材の応力伝達機構
DICによる屋根部材の変形状態の可視化

対象) 屋根折板の**変形性状の確認**

研究目的

6

大地震時の非構造部材の応力伝達機構解明 及び
損傷可視化に基づく地震後継続システムの開発

1) 縮小模型振動実験による並列梁の横座屈性状の把握

並列梁の横座屈に伴い屋根折板に生じる
補剛モーメント及び回転補剛剛性

並列梁の横座屈耐力及び変形性能評価

対象) 屋根折板により拘束された**梁の変形性状の確認**

2) 屋根折板の振り実験による回転補剛剛性の算出

梁-屋根折板接合部より屋根折板に生じる
振りモーメント

接合治具の異なる屋根折板の回転補剛剛性

対象) 梁と**屋根折板接合部の変形性状の確認**

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

PLAを用いた等分布圧力下の屋根部材の応力伝達機構
DICによる屋根部材の変形状態の可視化

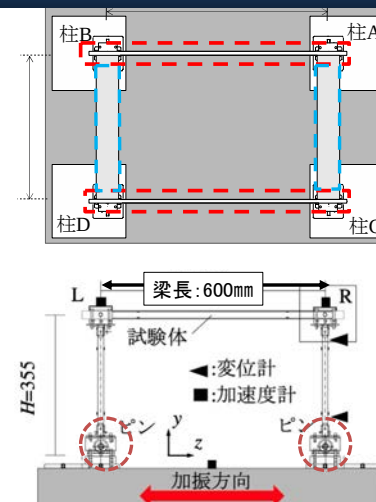
対象) 屋根折板の**変形性状の確認**

実験概要

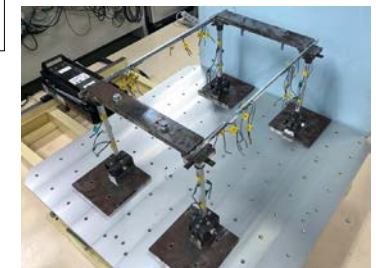
1) 縮小模型振動実験による並列梁の横座屈性状の把握

実験概要(実験装置)

8

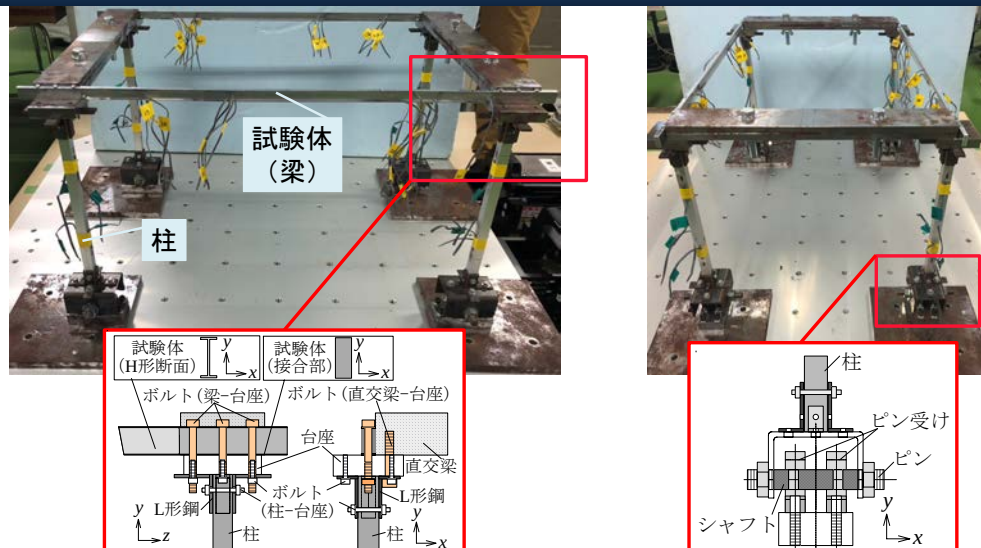


繰返し(振動)載
荷実験

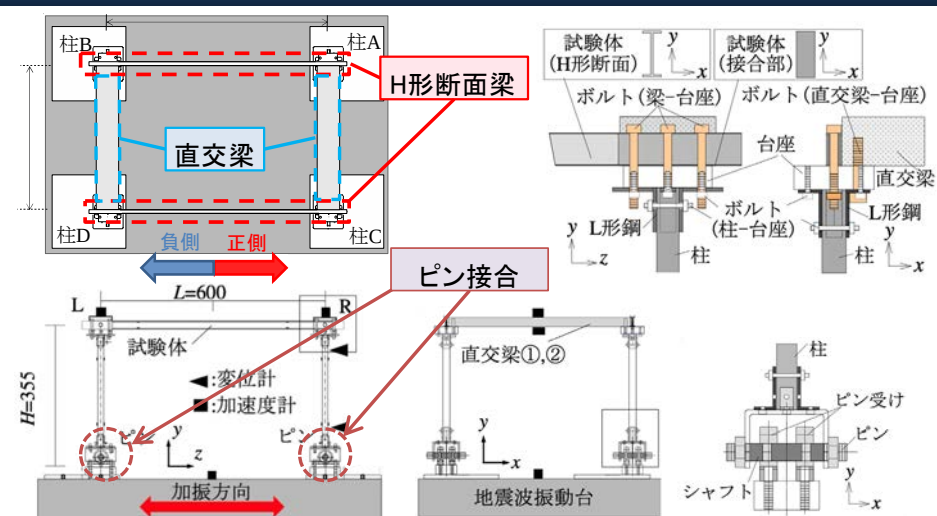


デジタル振動制御装置
(極大地震振動試験システム)
DSC40-SMART

実験概要(実験装置)

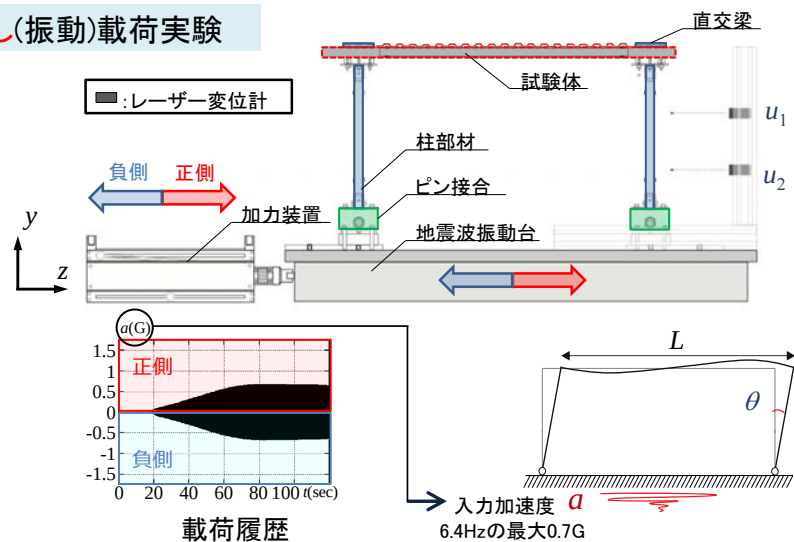


実験概要(装置詳細)



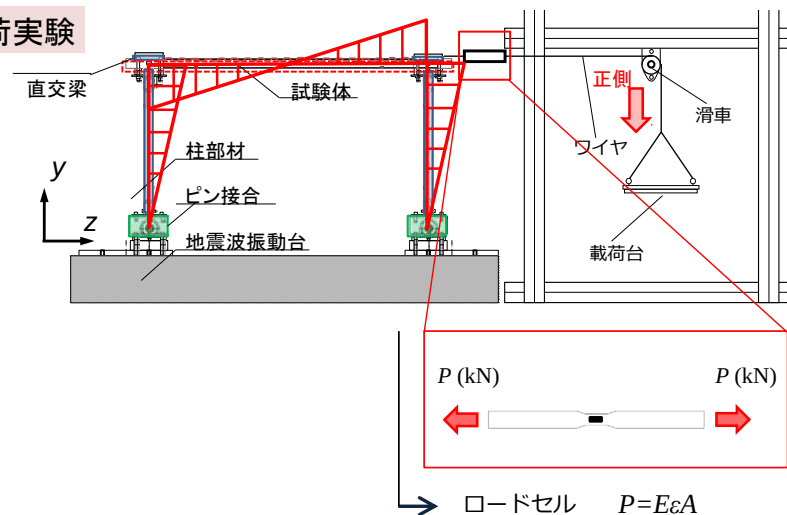
実験概要(載荷方法)

繰り返し(振動)载荷実験



実験概要(載荷方法)

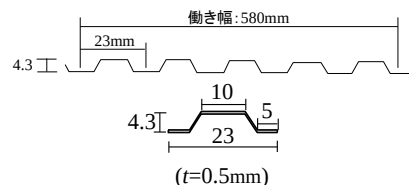
単調載荷実験



実験概要(補剛形式)

13

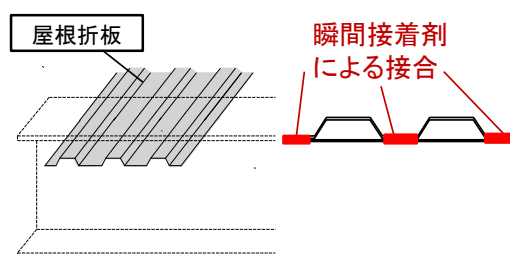
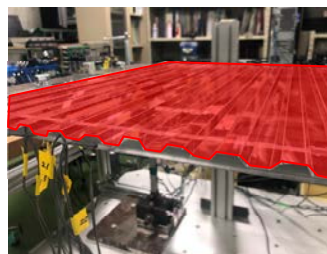
連続補剛材



- ・形状:角波サイディング
- ・材種:アルミニウムA1050

連続補剛材の材料特性

E_b	σ_y
kN/mm ²	N/mm ²
53.3	178



実験概要(試験体一覧)

14

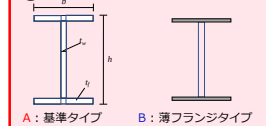
架構荷重実験(計18体)

A-CS-S70

① ② ③

試験体 名称	梁断面	横座屈細長比	修正一般化細長比	補剛条件	荷重条件
		λ_1	λ'_{hp}		
試験体A	H-17×6×0.8×1.23	344	0.95	無補剛	単調荷重
			0.68	連続補剛	繰返し荷重 (正弦波)
			0.95	無補剛	
			0.68	連続補剛	
試験体B	H-16×6×0.9×0.75	373	1.02	無補剛	単調荷重
			0.7	連続補剛	繰返し荷重 (正弦波)
			1.02	無補剛	
			0.7	連続補剛	

① 梁断面形状



② 補剛の有無

NS: 無補剛
CS: 連続補剛

③ 荷重プログラム

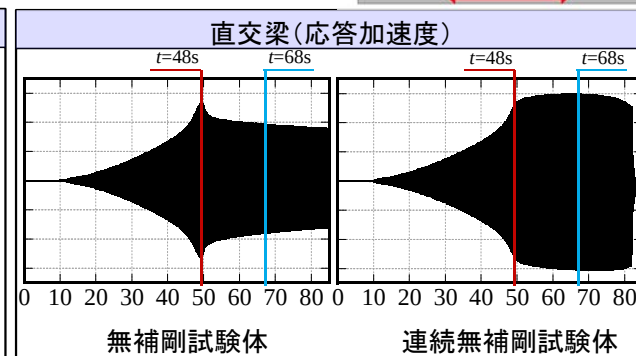
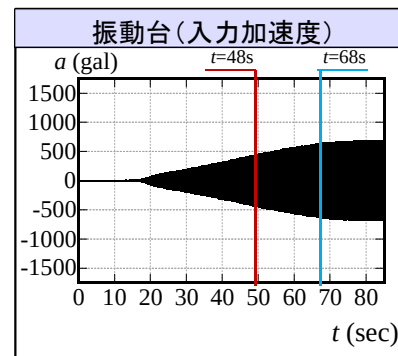
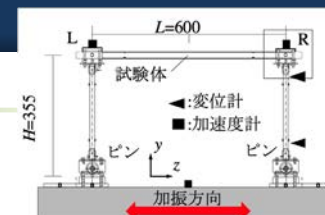
C : 繰返し荷重
M : 単調荷重

実験結果

1) 縮小模型振動実験による並列梁の横座屈性状の把握

実験結果(時刻歴)

加速度—時刻歴関係

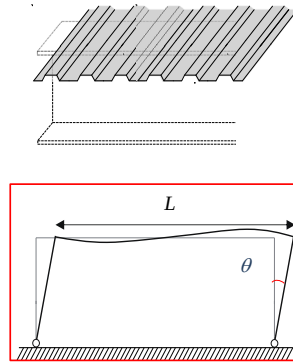
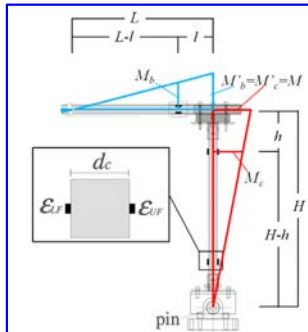
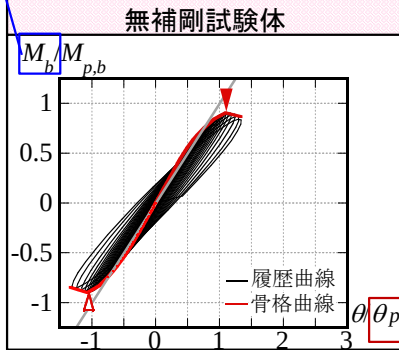


実験結果(履歴曲線)

17

材端曲げモーメント-部材角関係(履歴曲線)

$$M_b = \frac{\varepsilon_{UF} - \varepsilon_{LF}}{d_c} E_c I_c \left(\frac{H}{H-h} \right) \left(\frac{L-l}{L} \right)$$



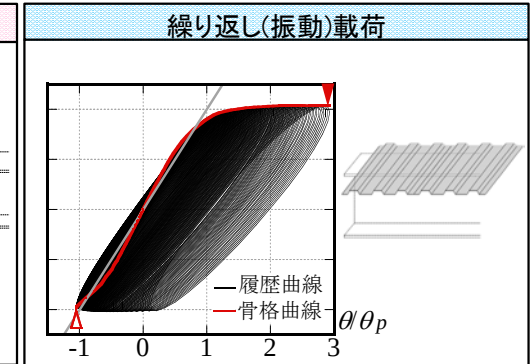
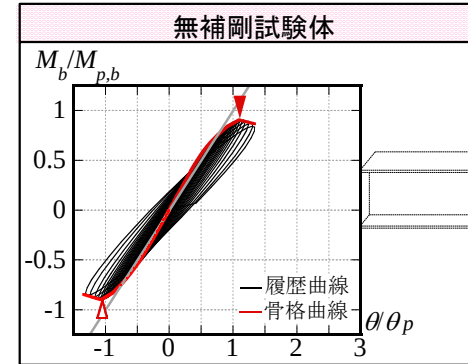
全塑性時の柱の部材角

$$\theta_p = \frac{M_{p,b} L}{6 E_b I_b} \left(1 + \frac{E_b I_b H}{2 E_c I_c L} \right)$$

実験結果(時刻歴)

18

材端曲げモーメント-部材角関係(履歴曲線)

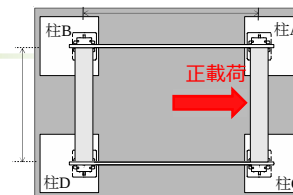
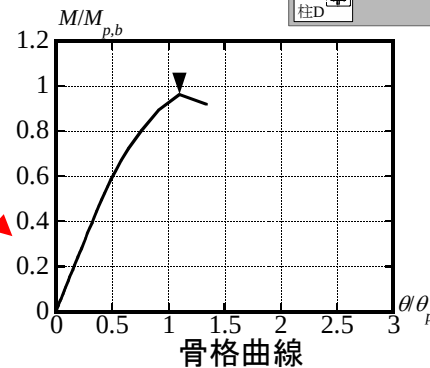
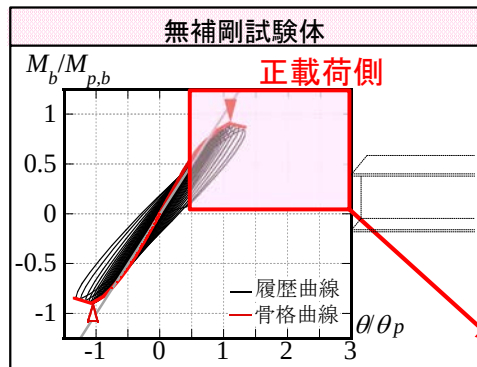


連続補剛の場合, 最大荷重後も耐力を保持しながら部材角が正側に上昇 → 梁の横座屈変形が原因

実験結果(時刻歴)

19

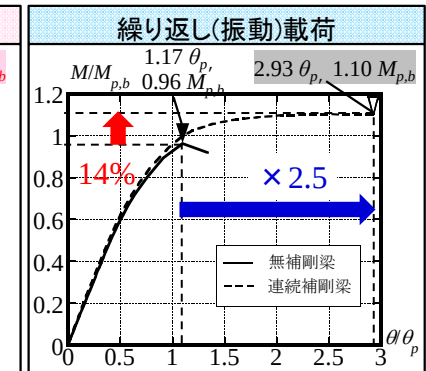
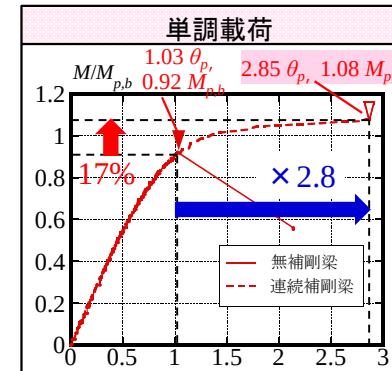
材端曲げモーメント-部材角関係(履歴曲線)



実験結果(骨格曲線)

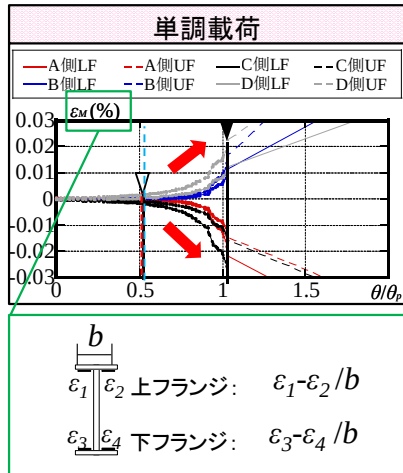
20

材端曲げモーメント-部材角関係(骨格曲線)

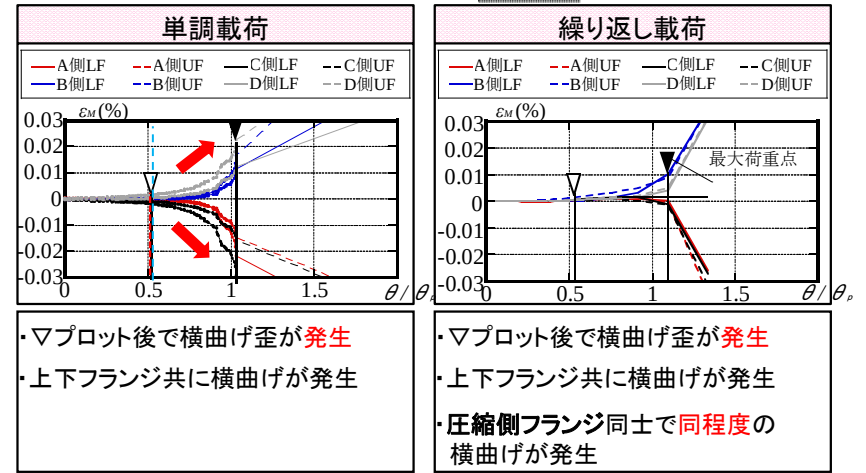


無補剛梁より連続補剛梁の最大荷重は14~17%程度向上
また, 変形性能は2.5~2.8倍程度向上

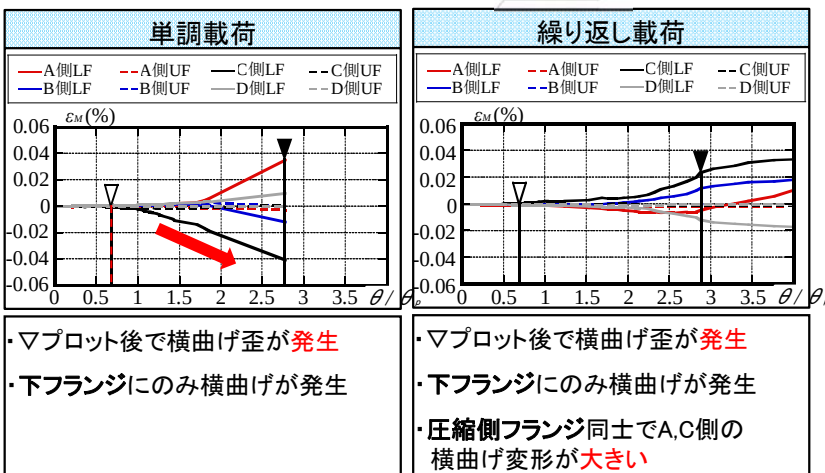
横曲げ歪一時刻歴関係(無補剛)



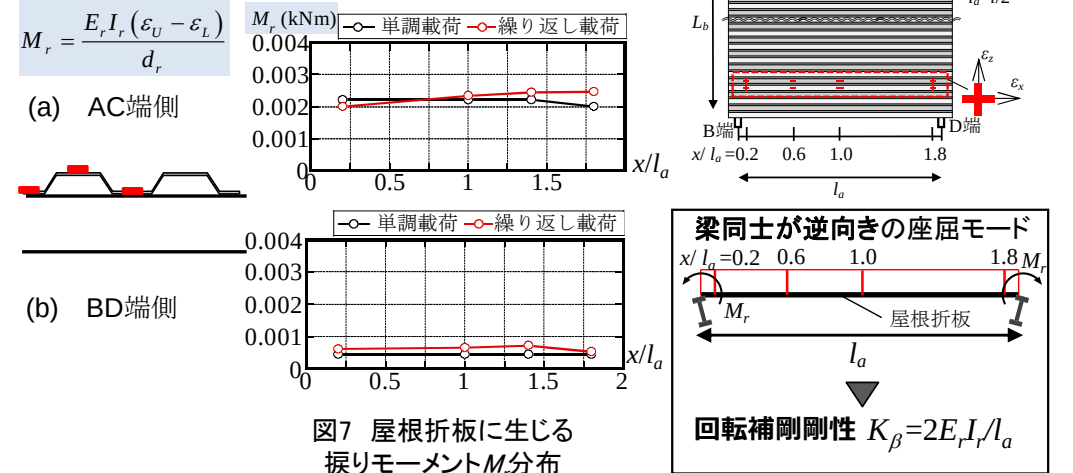
横曲げ歪一時刻歴関係(無補剛)



横曲げ歪一時刻歴関係(連続補剛)



屋根折板に生じたモーメント分布



横座屈性能評価

横座屈耐力評価

32

限界状態設計指針により評価

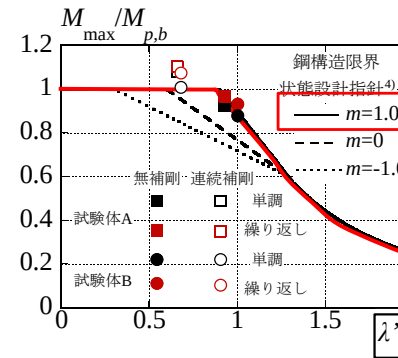
限界状態設計指針

連続補剛, 梁端拘束度による
座屈拘束効果を考慮していない

一般化細長比

$$\lambda_{p,b} = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{M_c}} \cdots \text{梁の全塑性モーメント}$$

$$\lambda_{p,b} = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{M_c}} \cdots \text{弾性横座屈モーメント}$$



修正一般化細長比

$$\lambda'_{p,b} = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{M_{cr}}} \cdots \text{弾性横座屈モーメント}$$

文献1) (12)式

回転補剛性
 $K_\beta = 2E_r I_r / l_a$

箱型柱による
完全拘束(固定支持)

連続補剛, 梁端拘束度による
座屈拘束効果を考慮した

1) 木村祥裕, 佐藤唯, 鈴木敦訓: 勾配曲げモーメントを受ける連続補剛H形鋼梁の弾塑性横座屈挙動に及ぼす柱の握り抵抗による拘束効果, 日本建築学会構造系論文集, 第87巻, 第793号, pp.316-327, 2022.3

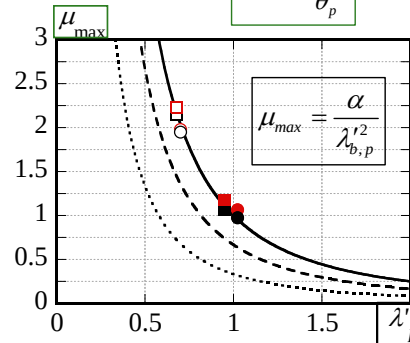
(2.5)式の修正一般化細長比を用いることで, 弾塑性耐力を座屈曲線で概ね評価できる

塑性変形倍率評価

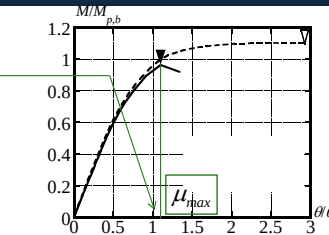
33

限界状態設計指針により評価

$$\mu_{max} = \frac{\theta_{max}}{\theta_p}$$



..... 等曲げモーメント: $\alpha = \frac{1}{3}$
 --- 一端モーメント: $\alpha = \frac{2}{3}$
 — 逆対称曲げモーメント: $\alpha = 1$



回転補剛性
 $K_\beta = 2E_r I_r / l_a$
 箱型柱による
完全拘束(固定支持)
 連続補剛, 梁端拘束度による
座屈拘束効果を考慮した

修正一般化細長比

$$\lambda'_{p,b} = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{M_{cr}}} \cdots \text{弾性横座屈モーメント}$$

文献1) (12)式

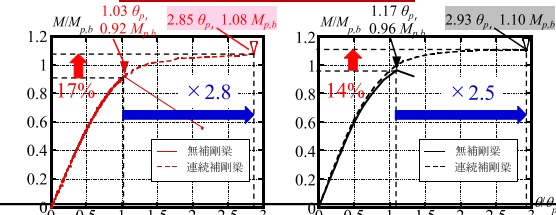
1) 木村祥裕, 佐藤唯, 鈴木敦訓: 勾配曲げモーメントを受ける連続補剛H形鋼梁の弾塑性横座屈挙動に及ぼす柱の握り抵抗による拘束効果, 日本建築学会構造系論文集, 第87巻, 第793号, pp.316-327, 2022.3

最大荷重時の梁端回転角と定義した各試験体の
塑性変形倍率は $\alpha=1.0$ を代入した(2.6)式により評価できる

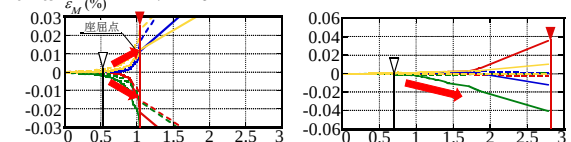
まとめ

38

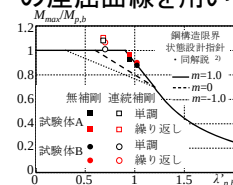
[1] 無補剛梁より連続補剛梁の最大荷重: 14~17%程度向上
 変形性能: 2.5~2.8倍程度向上



[2] 屋根折板によって梁の横座屈変形が拘束され, 骨組の耐力や変形性能が向上する。



[3] 各試験体の最大荷重は、(2.5)式の修正一般化細長比により設計指針⁶⁾の座屈曲線を用いて評価できる。

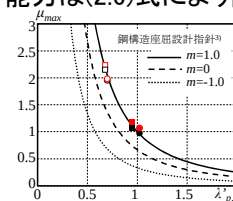


修正一般化細長比(梗概(5)式)

$$\lambda'_{p,b} = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{M_{cr}}} \dots \text{梁の全塑性モーメント}$$

$$\lambda'_{p,b} = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{M_{cr}}} \dots \text{弾性横座屈モーメント}$$

[4] 最大荷重時の梁端回転角と定義した各試験体の塑性変形能力は(2.6)式により評価できる。



逆対称曲げモーメントを受ける
梁の変形倍率評価式(梗概(6)式)

$$\frac{\theta_{max}}{\theta_y} = \frac{\alpha}{\lambda'^2_{p,b}} \dots \text{修正一般化細長比}$$

実験概要

2) 屋根折板の振り実験による回転補剛性の算出

大地震時の非構造部材の応力伝達機構解明 及び
損傷可視化に基づく地震後継続システムの開発

1) 縮小模型振動実験による並列梁の横座屈性状の把握

並列梁の横座屈に伴い屋根折板に生じる
補剛モーメント及び回転補剛性

並列梁の横座屈耐力及び変形性能評価

対象) 屋根折板により拘束された梁の変形状の確認

2) 屋根折板の振り実験による回転補剛性の算出

梁-屋根折板接合部より屋根折板に生じる
振りモーメント

接合治具の異なる屋根折板の回転補剛性

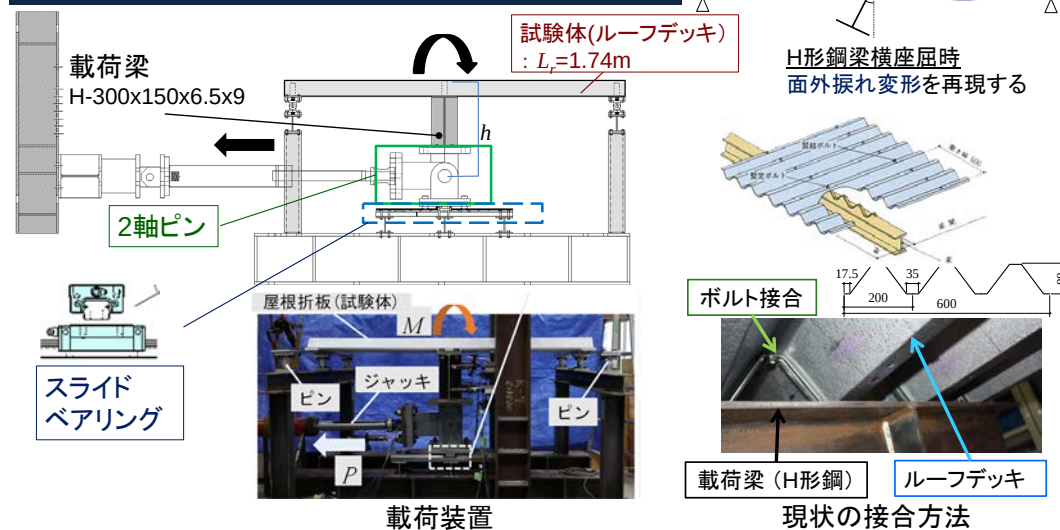
対象) 梁と屋根折板接合部の変形状の確認

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

PLAを用いた等分布圧力下の屋根部材の応力伝達機構
DICによる屋根部材の変形状態の可視化

対象) 屋根折板の変形状の確認

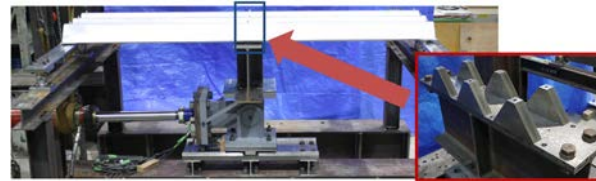
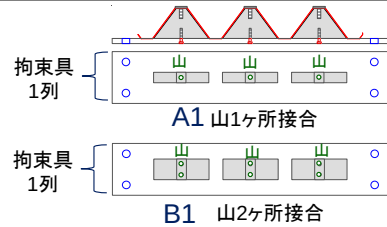
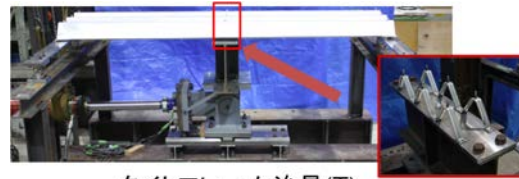
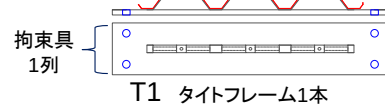
実験装置概要



実験装置概要

43

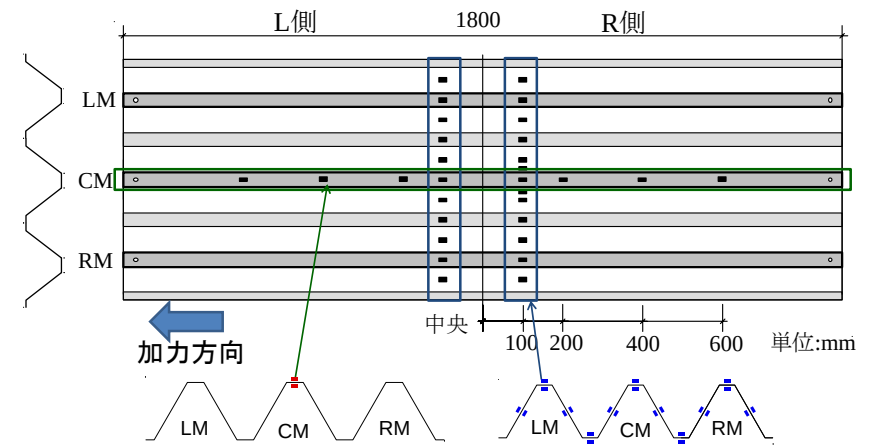
現状の接合方法



接合部の剛性を向上するため一拘束具治具(A,B)

実験装置概要

44



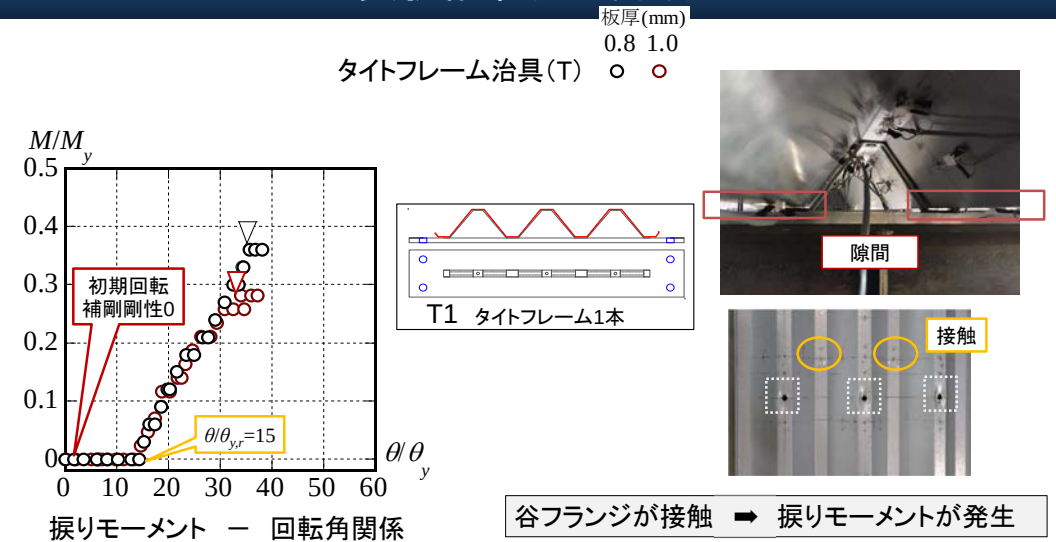
載荷点近傍の断面歪分布: 中央から左右100mmの全断面に貼付
材長方向の歪分布: 中央から左右100, 200, 400, 600mmのCMIに貼付

実験結果

2) 屋根折板の振り実験による回転補剛剛性の算出

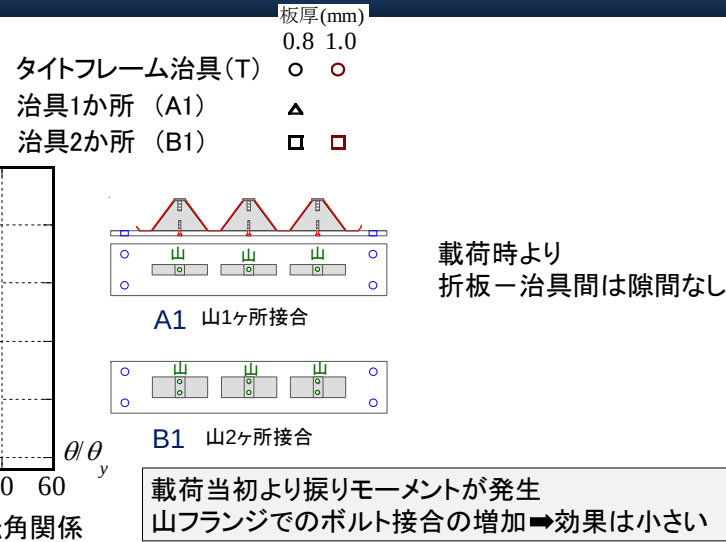
実験結果 (M-θ関係)

46



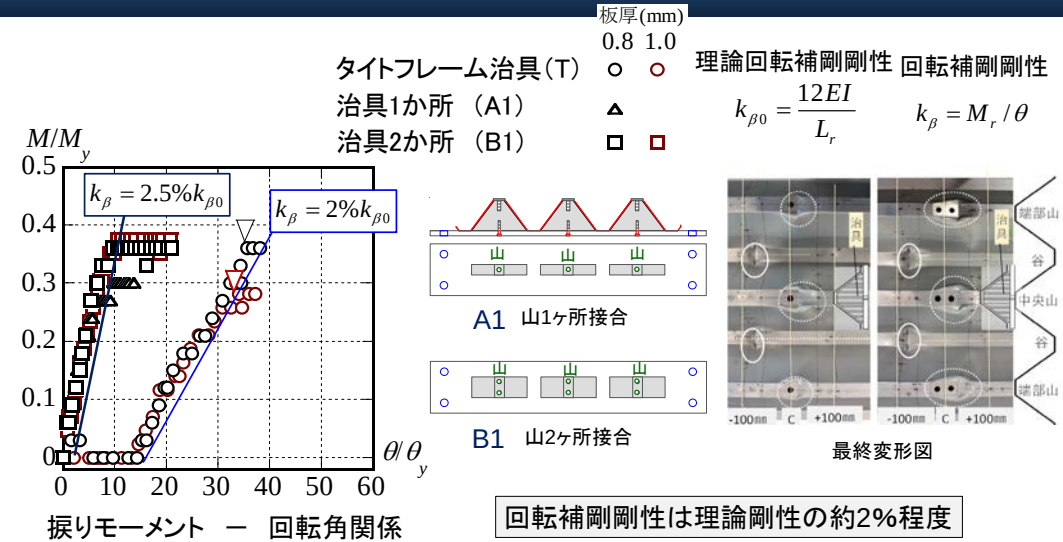
実験結果 (M-θ関係)

47



実験結果 (M-θ関係)

48



まとめ

52

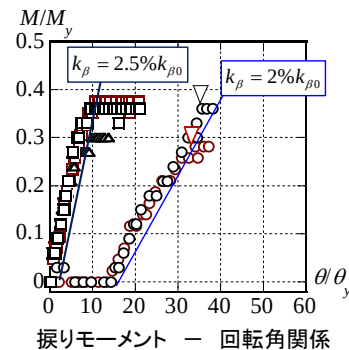
実構造物に使用されているタイトフレーム接合

H形鋼梁と屋根折板の接触に伴い振りモーメントが発生

剛な治具接合

載荷と同時に振りモーメントが発生

屋根折板の回転剛性は理論値の2%程度となっている。



研究目的

53

大地震時の非構造部材の応力伝達機構解明 及び
損傷可視化に基づく地震後継続システムの開発

1) 縮小模型振動実験による並列梁の横座屈性状の把握

並列梁の横座屈に伴い屋根折板に生じる
補剛モーメント及び回転補剛性

並列梁の横座屈耐力及び変形性能評価
対象) 屋根折板により拘束された梁の変形状の確認

2) 屋根折板の振り実験による回転補剛性の算出

梁-屋根折板接合部より屋根折板に生じる
振りモーメント

接合治具の異なる屋根折板の回転補剛性
対象) 梁と屋根折板接合部の変形状の確認

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

PLAを用いた等分布圧力下の屋根部材の応力伝達機構
DICによる屋根部材の変形状態の可視化

対象) 屋根折板の変形状の確認

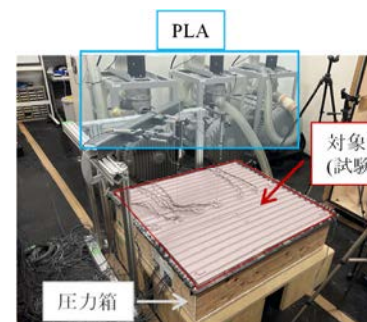
実験概要

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

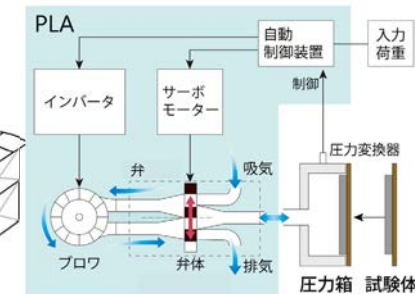
実験概要

55

PLA (Pressure Loading Actuator)



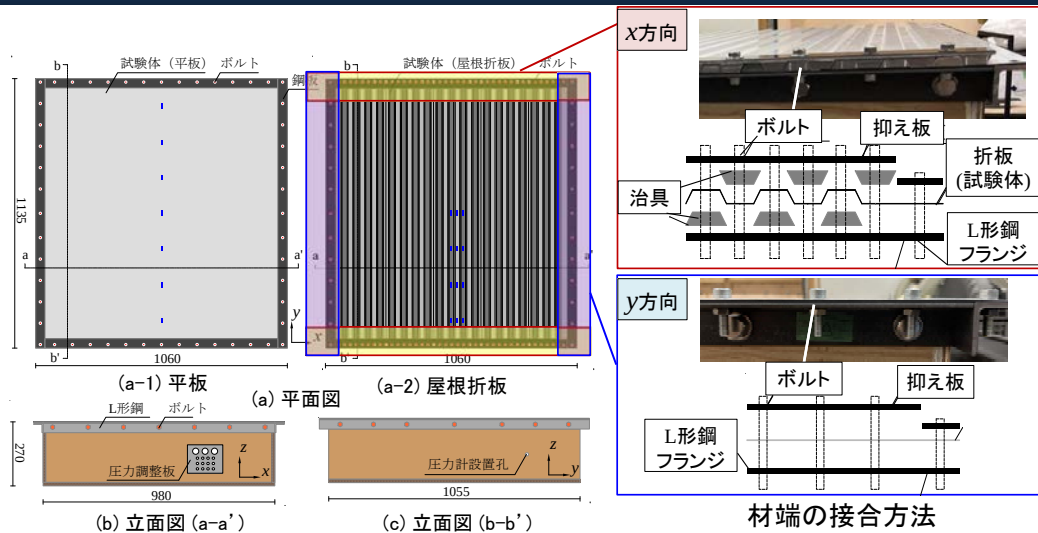
PLA装置及び試験体



PLAの制御方法

実験概要

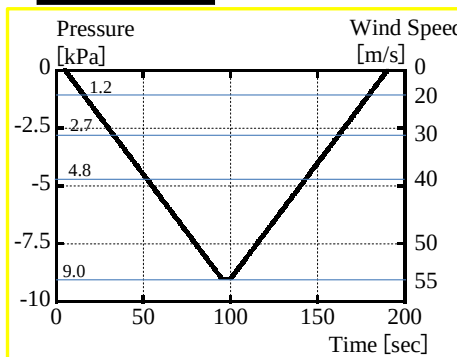
56



実験概要

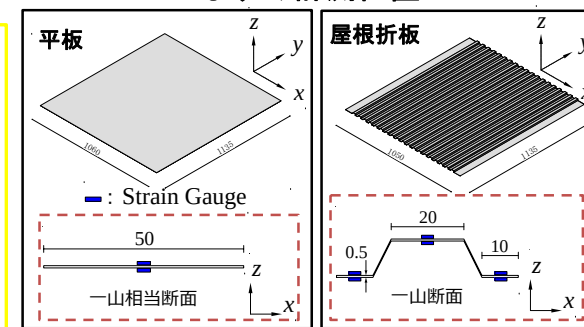
57

実験概要



載荷圧力

ひずみ計測位置



	板厚 d (mm)	断面二次モーメント I (mm ⁴)
平板	0.5	0.5
屋根折板	0.3	512.4
		323.9

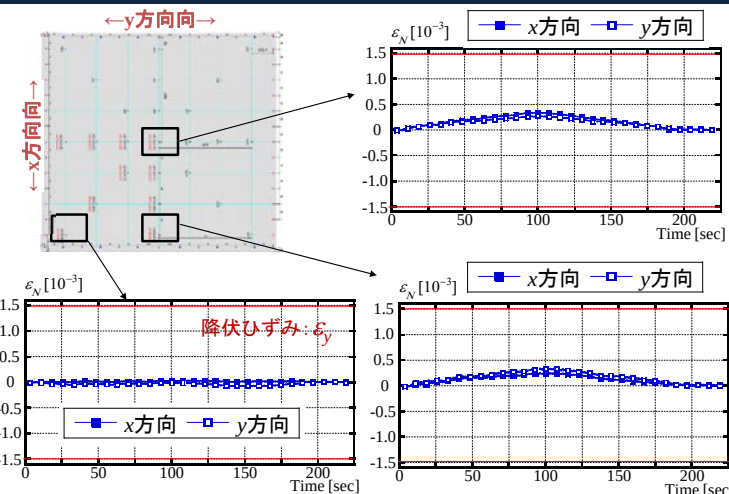
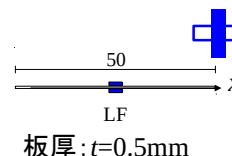
実験結果

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

実験結果(軸歪)

59

軸歪(平板)



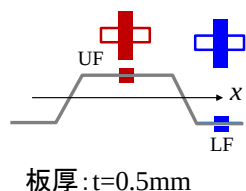
x方向)とy方向)の差は
小さい。
引張歪のみ発生

軸歪-時刻歴

実験結果(軸歪)

60

軸歪(屋根折板)

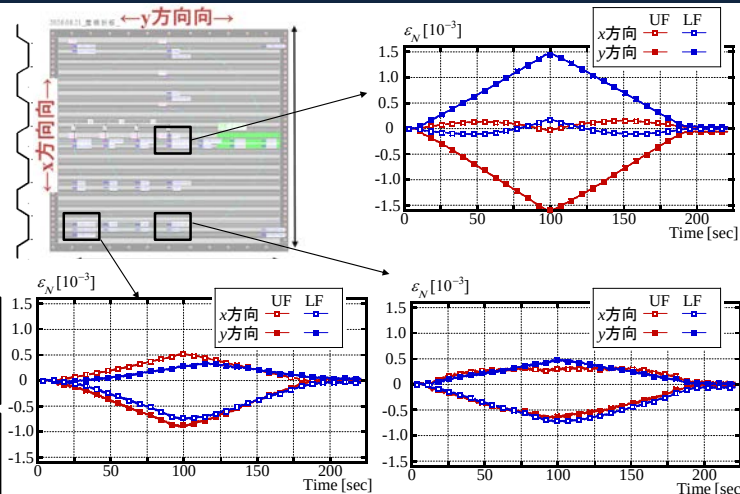


x方向)ウェブが伸縮する

軸歪は小さい

y方向)強軸の曲げ

軸歪は大きい



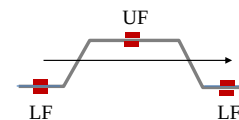
軸歪-時刻歴

実験結果(曲げモーメント)

61

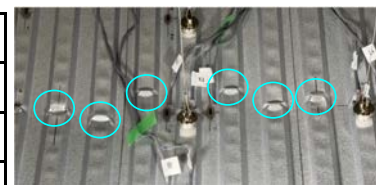
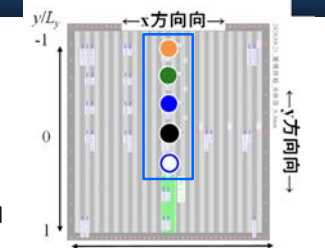
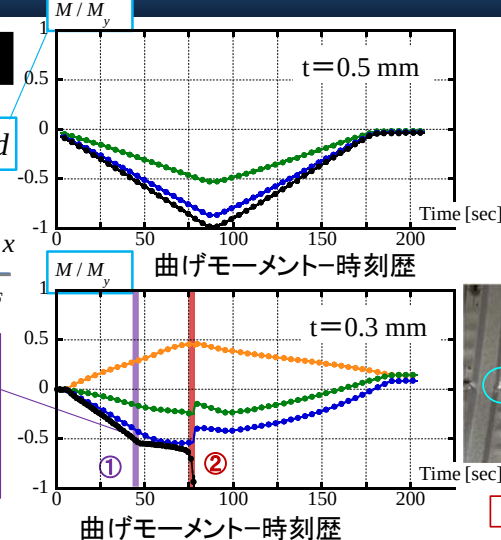
曲げモーメント

$$M=2EI(\varepsilon_{CF}-\varepsilon_{LF})/d$$



中央の山
 $M/M_y=0.5$
(4.2kPa付近)

モーメントが停留



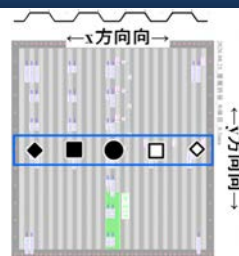
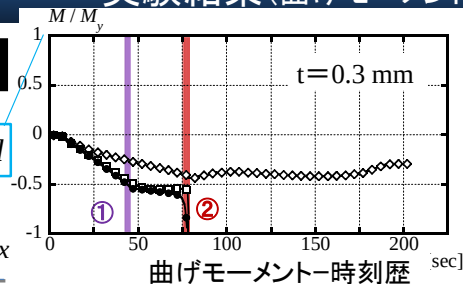
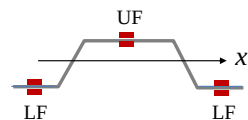
② y方向y/L_y=0付近に局部座屈

実験結果(曲げモーメント)

62

曲げモーメント

$$M=2EI(\varepsilon_{CF}-\varepsilon_{LF})/d$$

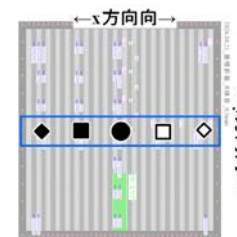
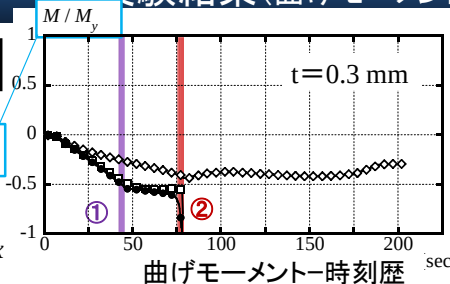
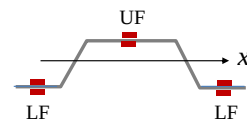


実験結果(曲げモーメント)

63

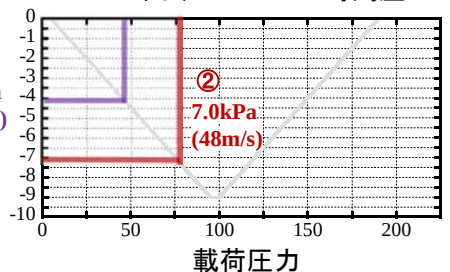
曲げモーメント

$$M=2EI(\varepsilon_{CF}-\varepsilon_{LF})/d$$



①
4.2kPa
(37m/s)

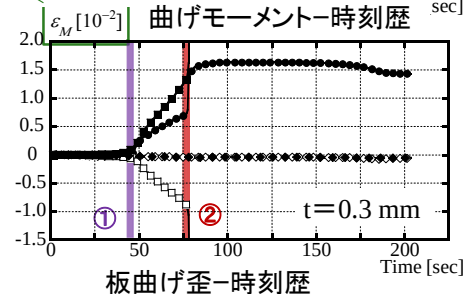
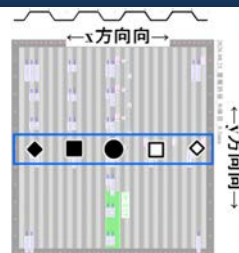
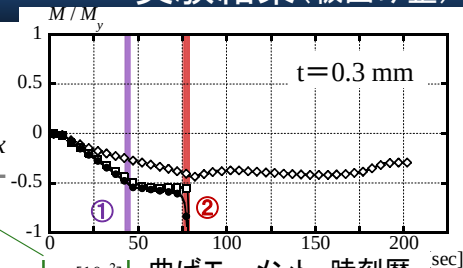
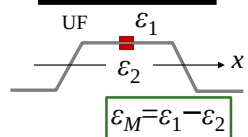
②
7.0kPa
(48m/s)



実験結果(板曲げ歪)

64

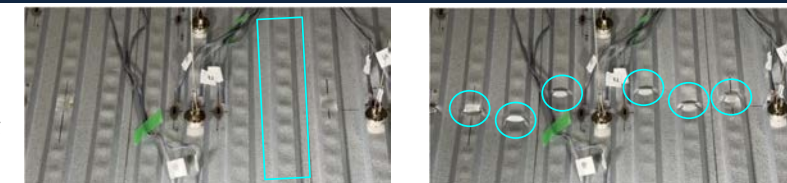
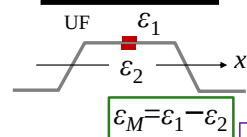
板曲げ歪



実験結果(変形性状)

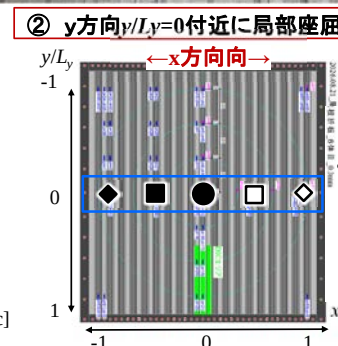
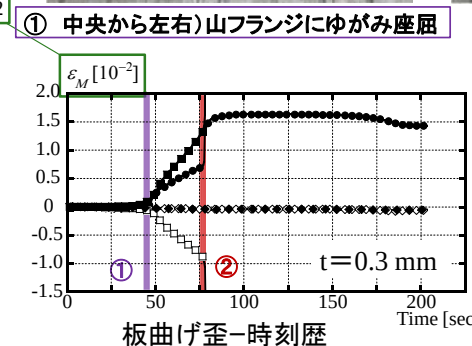
65

板曲げ歪



①
中央の山
ゆがみ座屈

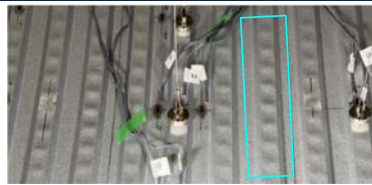
②
中央の複数山
局部座屈
(範囲: X=±0.4Lx)



実験結果(変形性状)

66

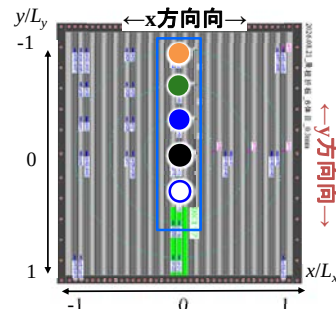
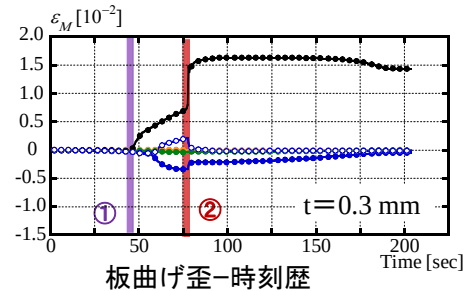
板曲げ歪



① 中央から左右)山フランジにゆがみ座屈

① 中央の山
ゆがみ座屈

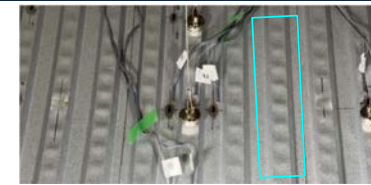
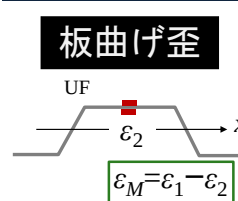
② 中央の複数山
局座屈
(範囲: $y = \pm 0.3L_y$)



実験結果(変形性状)

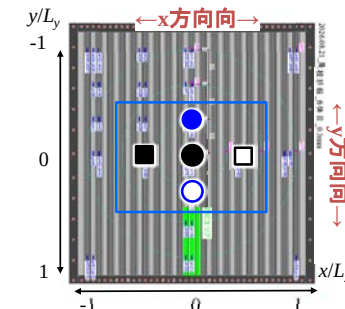
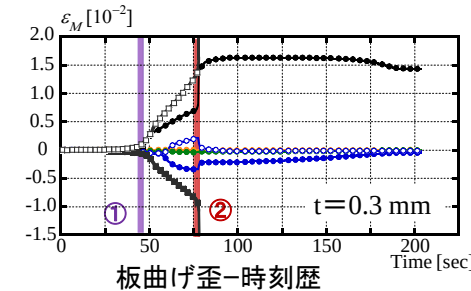
67

板曲げ歪



① 中央から左右)山フランジにゆがみ座屈

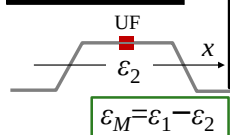
山フランジ
中央より $(x, y) = \pm 0.35L$ の範囲
4kPa付近
ゆがみ座屈



実験結果(変形性状)

68

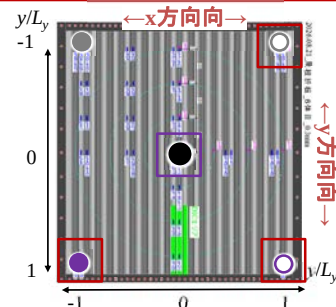
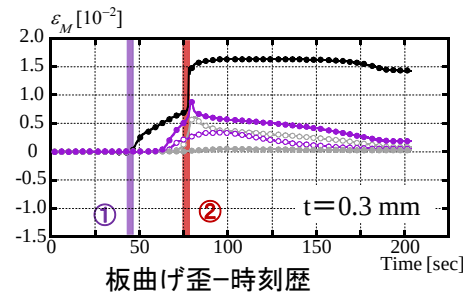
板曲げ歪



① 中央山フランジにゆがみ座屈発生時



② 隅角部に局座屈

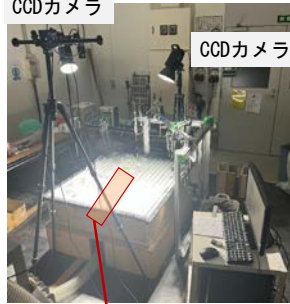


DICによる変位の可視化

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

CCDカメラ

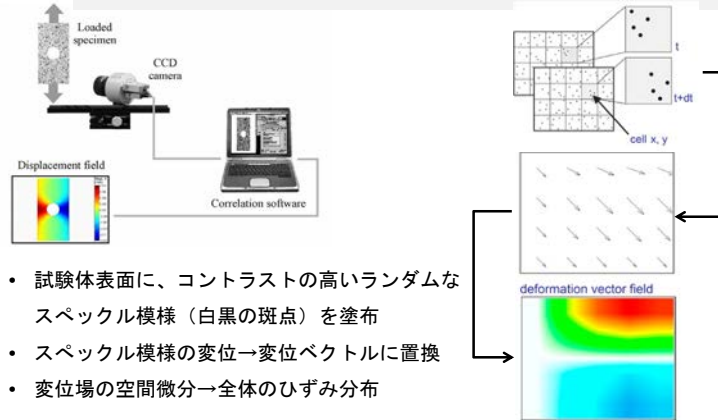
CCDカメラ



DIC (Digital Image Correlation)

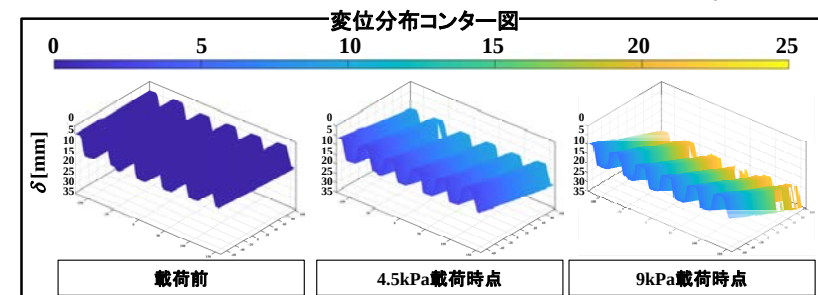
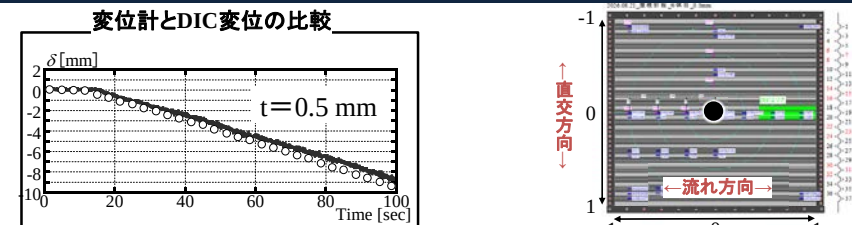
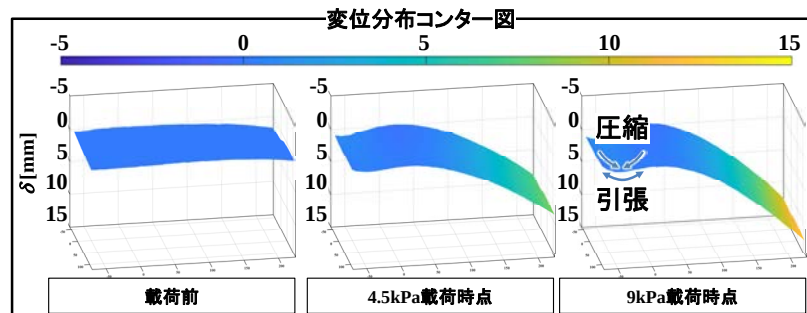
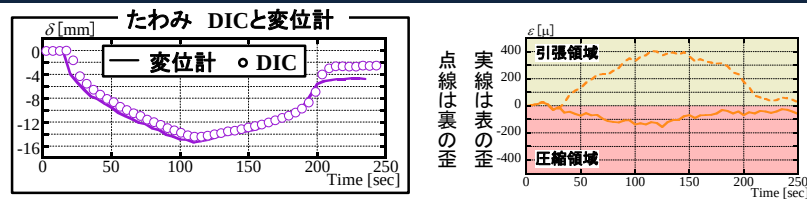
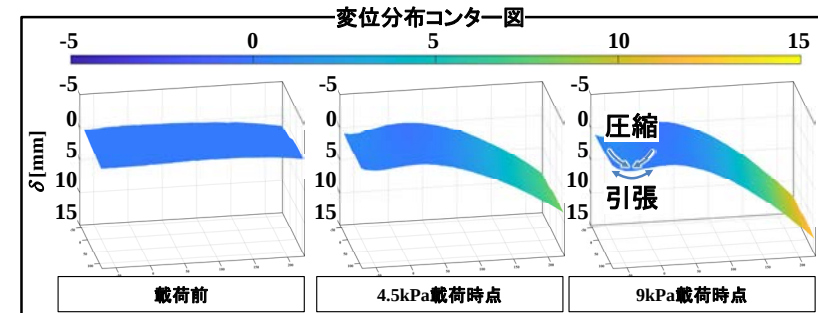
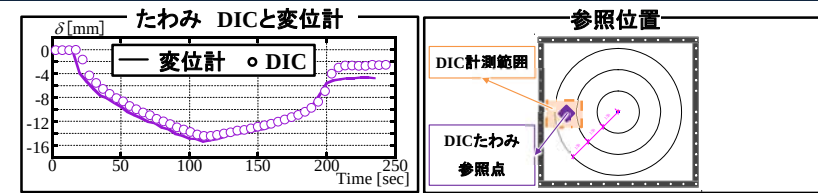
非接触型の光学測定技術

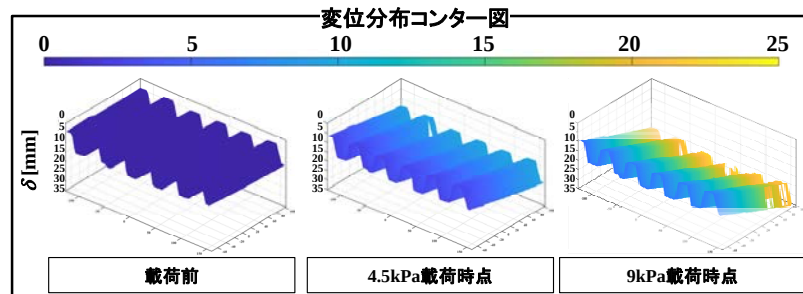
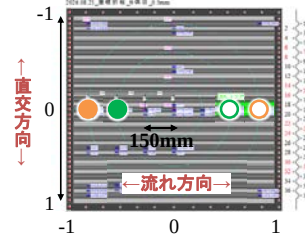
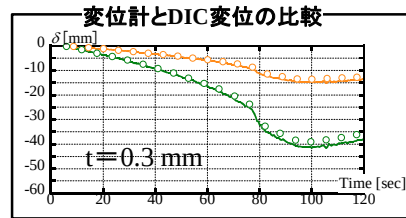
材料や構造物が荷重を受けた際の全体の変位やひずみ分布を測定



- 試験体表面に、コントラストの高いランダムなスペックル模様（白黒の斑点）を塗布
- スペックル模様の変位→変位ベクトルに置換
- 変位場の空間微分→全体のひずみ分布

スペックル模様

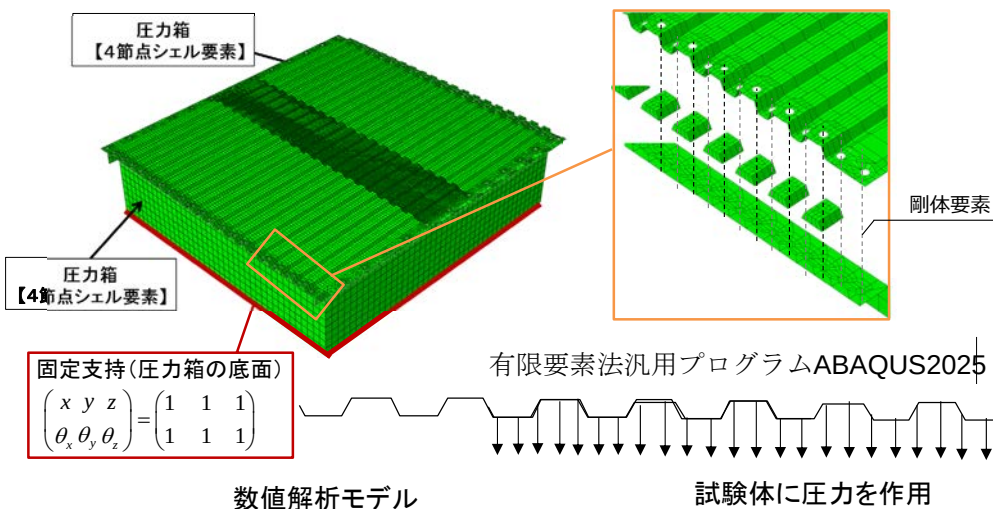




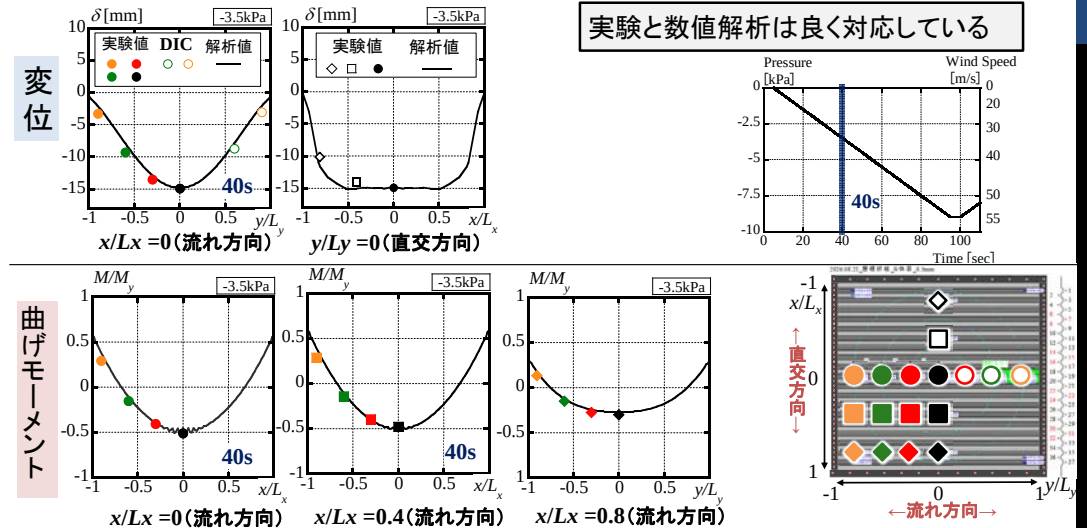
数値解析

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

数値解析モデル



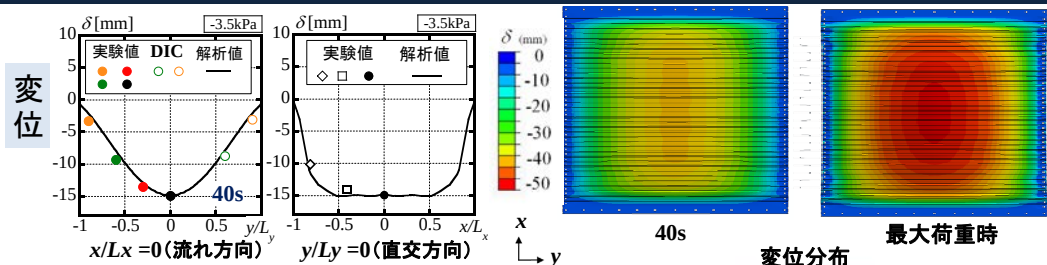
数値解析による変位及び応力分布の把握



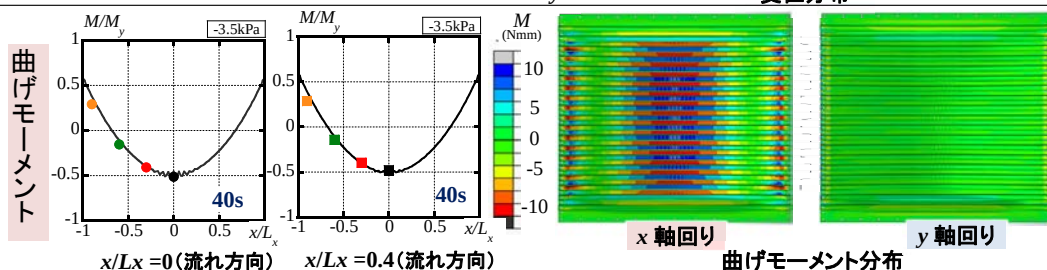
数値解析による変位及び応力分布の把握

80

変位



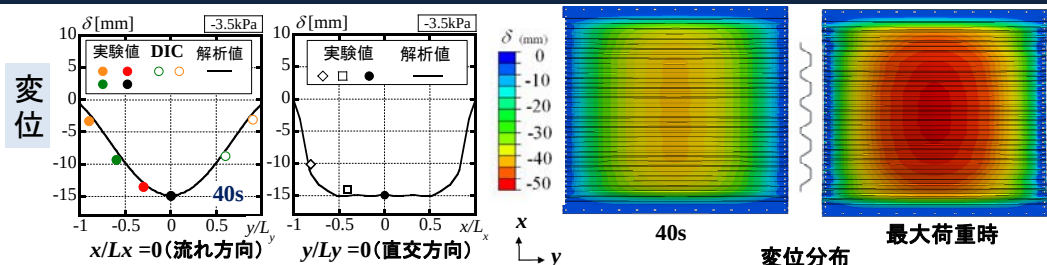
曲げモーメント



数値解析による変位及び応力分布の把握

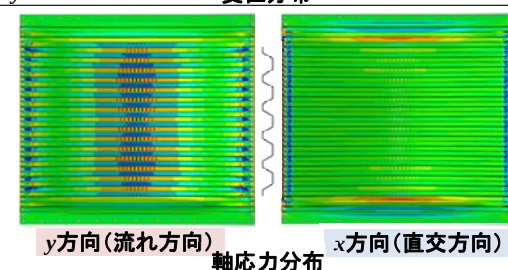
81

変位



コンタ図

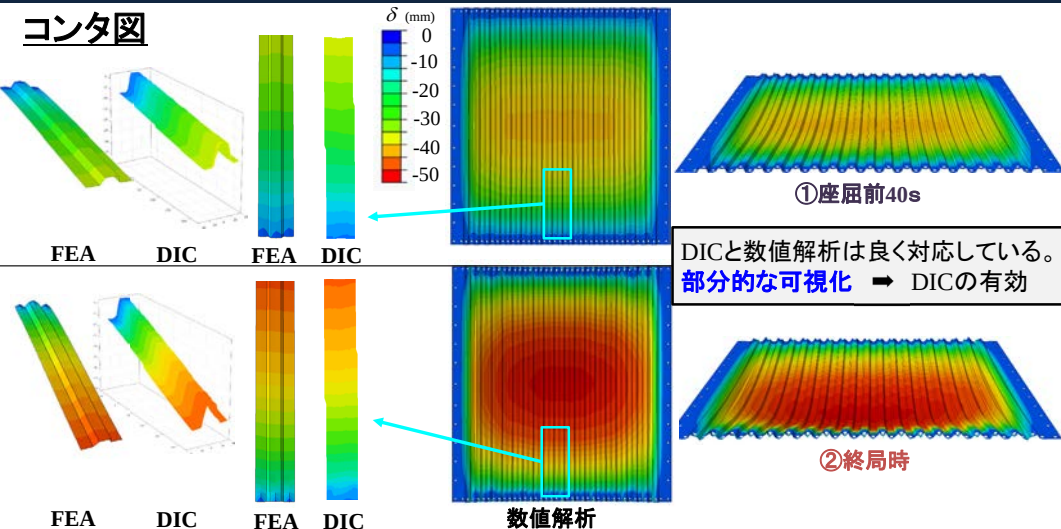
y方向
端部と試験体中央に応力(反対向き)が発生
x方向
端部で圧縮と引張が反転している。
→折板のたわみに伴い、x方向に伸縮する。



DICと数近解析の比較

82

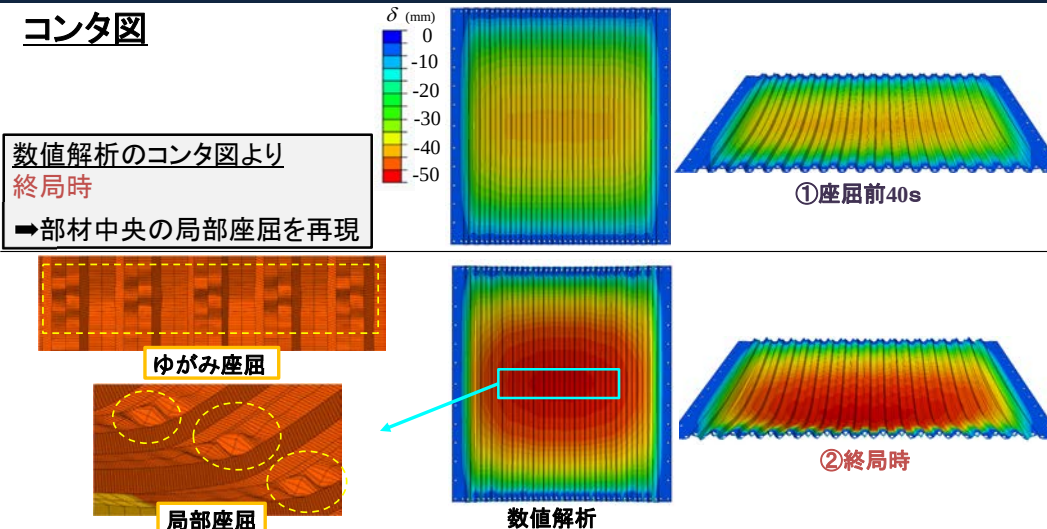
コンタ図



DICと数近解析の比較

83

コンタ図

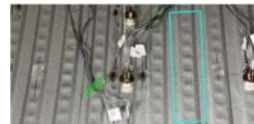
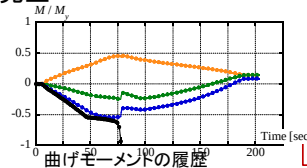


PLAによる屋根折板の応力伝達機構の解明

t=0.3mmの試験体の場合

0.5M/Mp程度で部材中央の山フランジに圧縮応力

- ⇒ 山フランジ(y方向)の**ゆがみ座屈**が発生
- ⇒ 中央山フランジの**局部座屈**が発生



① 山フランジにゆがみ座屈

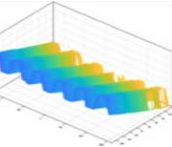
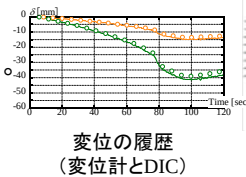


② y方向y/Ly=0付近に局部座屈

DICによる変形の可視化

DICと変位計による計測結果は精度良く計測できる。

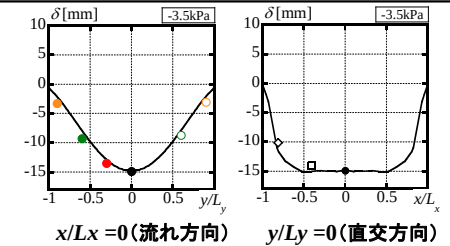
これにより、非構造部材の損傷を非接触かつ面的に可視化できる可能性が示された。



数値解析の有効性について

- ・計測点における応力・変位

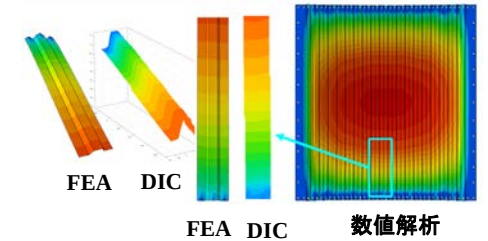
数値解析と実験におけるは概ね対応した。



- ・変形状態

数値解析とDICによる変位のコンタ図は対応している。

- ⇒ 数値解析モデルの有効性が示された。



DICによる変形の可視化

- ・実際の体育館への適用には

歪ゲージやDICによる計測 ⇒ **局所的な計測が限界**

- ・構造図面などの活用

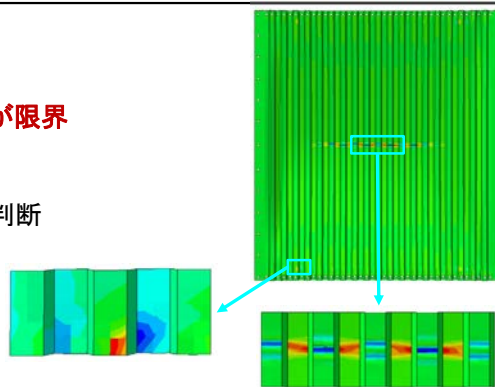
- ⇒ 事前に想定外力と想定される損傷部位を判断

- ⇒ **数値解析による検証**

今後の課題

数値解析によるパラメトリックスタディによる損傷箇所の把握

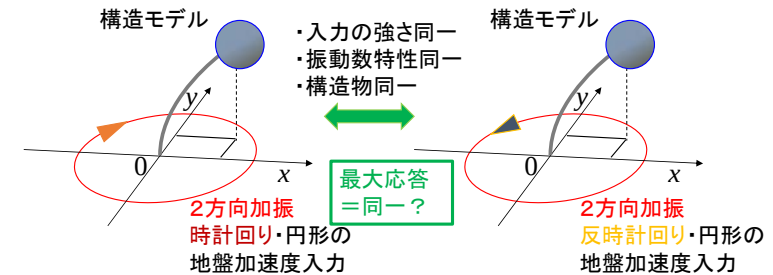
- ⇒ 損傷の箇所の検知を予め実施 ⇒ マッピング化する。



3次元入力地震動の位相極性に着目した構造物の耐震性能評価法の開発

京都大学防災研究所 教授
五十嵐 晃

背景（既往の研究より）



- ・知見：両者の最大応答は**同一ではない**（線形系でも！）
- ・位相極性(Phase Polarity)：2方向加振の場合は**時計回り**／**反時計回り**の区別の**一般化**
- ・異なる最大応答 ← 構造モデルが**非対称**な場合に生じる
 - ・原因の理論的説明
 - ・具体的な相違の評価

1

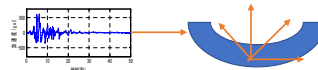
背景：多次元（2方向／3方向）入力

- ・非対称橋梁（曲線橋、偏心モーメントを受ける構造など）の耐震性能の照査
- 橋梁では方向を刻んだ**1方向入力**が一般的（道路橋示方書・同解説）
- ー水平面で影響が最も大きくなる地震動の方向を考慮
- ー水平2方向の慣性力の影響を独立に考慮してよい（最大方向＋その直角方向）
- ー全ての部材に鉛直方向の地震動の影響を考慮するとはしていない（必要な場合は「適切に考慮」）

問題提起：多次元入力時の動的応答が適切に反映された評価になっているか？

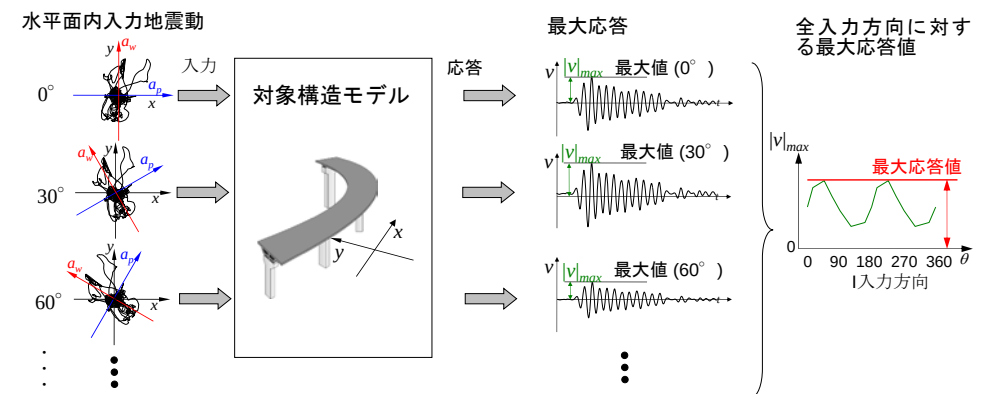
- ・非対称性による剛体回転モードの影響
- ・複数モードの連成
- ・制震ダンパーの回転など

合理的な**3方向入力**に基づく性能照査法の検討



2

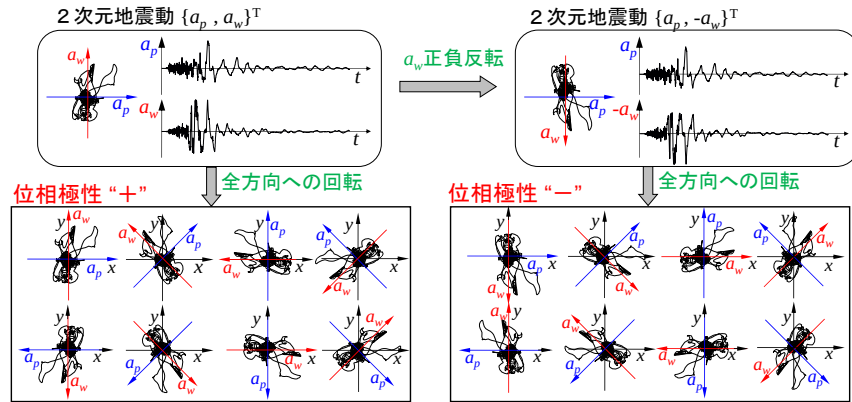
背景：2次元地震動入力の水平面内回転に対する応答の評価



- ・**2次元入力の全入力方向**に対する最大応答値を考える
- ・最大応答値 (seismic demand) が設計基準値 (seismic capacity) を超えないことを確認

3

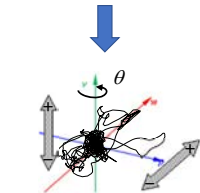
背景：位相極性（phase polarity）の概念



- 上記2つの地震動入力群の要素同士は、どの方向に回転させても一致するものがない → 2つの群の区別＝位相極性
- 水平2次元問題の場合、位相極性は2つ（便宜上“+”“−”と表記）存在

4

研究の概要：3次元地震動入力の場合への拡張



3次元入力の回転／符号反転の組合せ

- 水平2成分の性質と鉛直1成分の性質は、特性や構造物への入力としての作用等の面で相違 → 全ての3次元空間的回転（仰角＋方位角）は考えない
- 回転は鉛直z軸周りの全周360°の方向θのみ考慮
- 符号反転は水平y軸に関するもの、鉛直z軸に関するものの2通りの組み合わせ
- 3次元入力地震動の位相極性は、y軸・z軸成分の符号の正負の組み合わせ++、-+、+-、--の4つが存在
- 全方向に回転した入力地震動のこれらの符号反転が、構造物の地震応答評価に与える影響（理論的分析＋相違の評価）を検討
- 動的解析による非線形弾塑性地震応答に関する検討・調査

5

最大応答評価の定式化のための定義式

- 運動方程式（線形多自由度系）

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}(\mathbf{1}_x a_x(t) + \mathbf{1}_y a_y(t) + \mathbf{1}_z a_z(t))$$

- 構造物モデル応答のモード分解

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{i=1}^N \boldsymbol{\phi}_i q_i(t) \quad \ddot{q}_i(t) + 2h_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = -\left\{ \begin{matrix} \beta_i^x & \beta_i^y & \beta_i^z \end{matrix} \right\} \begin{Bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \\ a_z(t) \end{Bmatrix}$$

i次モードのx,y,z成分加振に対する刺激係数

- 3次元地震動のz軸周りの回転

$$\begin{Bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \\ a_z(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_p(t) \\ a_w(t) \\ a_v(t) \end{Bmatrix}$$

- 応答評価値の定義

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{f}^T \mathbf{u}(t)$$

6

最大応答評価の定式化の誘導（1）

- 3次元位相極性に対応する符号反転を含む運動方程式

$$\ddot{q}_i(t) + 2h_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = -\left\{ \begin{matrix} \beta_i^x & \beta_i^y & \beta_i^z \end{matrix} \right\} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_p(t) \\ \pm_h a_w(t) \\ \pm_v a_v(t) \end{Bmatrix}$$

水平成分正負の複号
鉛直成分正負の複号

- 構造物モデル応答のモード分解

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{i=1}^N \left\{ \begin{matrix} \beta_i^x & \beta_i^y & \beta_i^z \end{matrix} \right\} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_i^p(t) \\ \pm_h r_i^w(t) \\ \pm_v r_i^v(t) \end{Bmatrix} \boldsymbol{\phi}_i$$

$$= \sum_{i=1}^N \left[(\beta_i^x \cos \theta + \beta_i^y \sin \theta) r_i^p(t) \pm_h (-\beta_i^x \sin \theta + \beta_i^y \cos \theta) r_i^w(t) \pm_v \beta_i^z r_i^v(t) \right] \boldsymbol{\phi}_i$$

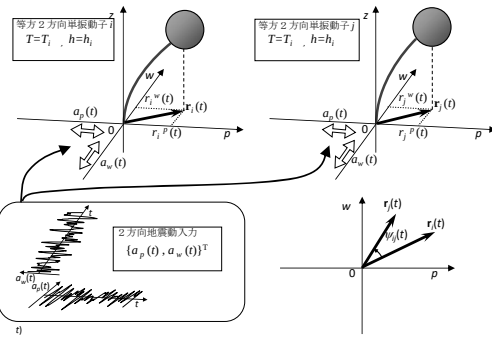
ここに

$$\ddot{r}_p(t) + 2h_i \omega_i \dot{r}_p(t) + \omega_i^2 r_p(t) = -a_p(t) \quad \ddot{r}_v(t) + 2h_i \omega_i \dot{r}_v(t) + \omega_i^2 r_v(t) = -a_v(t)$$

$$\ddot{r}_w(t) + 2h_i \omega_i \dot{r}_w(t) + \omega_i^2 r_w(t) = -a_w(t)$$

7

最大応答評価の定式化の誘導（２）



- 構造モデル係数の導入
 $s_i^x = \beta_i^x (\mathbf{f}^T \boldsymbol{\Phi}_i)$, $s_i^y = \beta_i^y (\mathbf{f}^T \boldsymbol{\Phi}_i)$, $s_i^z = \beta_i^z (\mathbf{f}^T \boldsymbol{\Phi}_i)$

- Cauchy-Schwarzの不等式による最大値評価

$$\mathbf{d} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N (s_i^x r_i^p(t) \pm s_i^y r_i^w(t)) \\ \sum_{i=1}^N (s_i^y r_i^p(t) \mp s_i^x r_i^w(t)) \\ \sum_{i=1}^N (\pm s_i^z r_i^z(t)) \end{array} \right\}, \quad \mathbf{e} = \left\{ \begin{array}{l} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 1 \end{array} \right\}$$

$$|\mathbf{d} \cdot \mathbf{e}| \leq \|\mathbf{d}\| \|\mathbf{e}\| \text{ より}$$

$$\max_{\theta} \max_t |v(t)|^2 = 2 \max_t \|\mathbf{d}\|^2$$

$$= 2 \max_t \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (s_i^x r_i^p(t) \pm s_i^y r_i^w(t)) (s_j^x r_j^p(t) \pm s_j^y r_j^w(t)) \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (s_i^y r_i^p(t) \mp s_i^x r_i^w(t)) (s_j^y r_j^p(t) \mp s_j^x r_j^w(t)) \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\pm s_i^z r_i^z(t)) (\pm s_j^z r_j^z(t)) \right]$$

8

- 応答評価値の表現

$$v(t) = \sum_{i=1}^N \left[(\beta_i^x \cos \theta + \beta_i^y \sin \theta) r_i^p(t) \pm_h (-\beta_i^x \sin \theta + \beta_i^y \cos \theta) r_i^w(t) \pm_v \beta_i^z r_i^z(t) \right] (\mathbf{f}^T \boldsymbol{\Phi}_i)$$

$$= \left\{ \sum_{i=1}^N (s_i^x r_i^p(t) \pm_h s_i^y r_i^w(t)) \right\} \cos \theta + \left\{ \sum_{i=1}^N (s_i^y r_i^p(t) \mp_h s_i^x r_i^w(t)) \right\} \sin \theta + \left\{ \sum_{i=1}^N \pm_v s_i^z r_i^z(t) \right\}$$

最大応答評価の定式化の誘導（３）

- 構造係数成分とモード応答成分の積分分解への変形

$$\max_{\theta} \max_t |v(t)|^2 = 2 \max_t \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (s_i^x s_j^x + s_i^y s_j^y) (r_i^p(t) r_j^p(t) + r_i^w(t) r_j^w(t)) \right. \\ \left. \pm_h \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (s_i^x s_j^y - s_i^y s_j^x) (r_i^p(t) r_j^w(t) - r_i^w(t) r_j^p(t)) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_i^z s_j^z r_i^z(t) r_j^z(t) \right]$$

- ベクトルの内積・外積を用いた表現

$$\max_{\theta} \max_t |v(t)| = 2 \max_t \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j) (\mathbf{r}_i(t) \cdot \mathbf{r}_j(t)) \pm_h \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\mathbf{s}_i \times \mathbf{s}_j) \cdot (\mathbf{r}_i(t) \times \mathbf{r}_j(t)) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_i^z s_j^z r_i^z(t) r_j^z(t)}$$

位相極性により応答値が変化する原因

鉛直成分の符号の影響が相殺して複合が消える

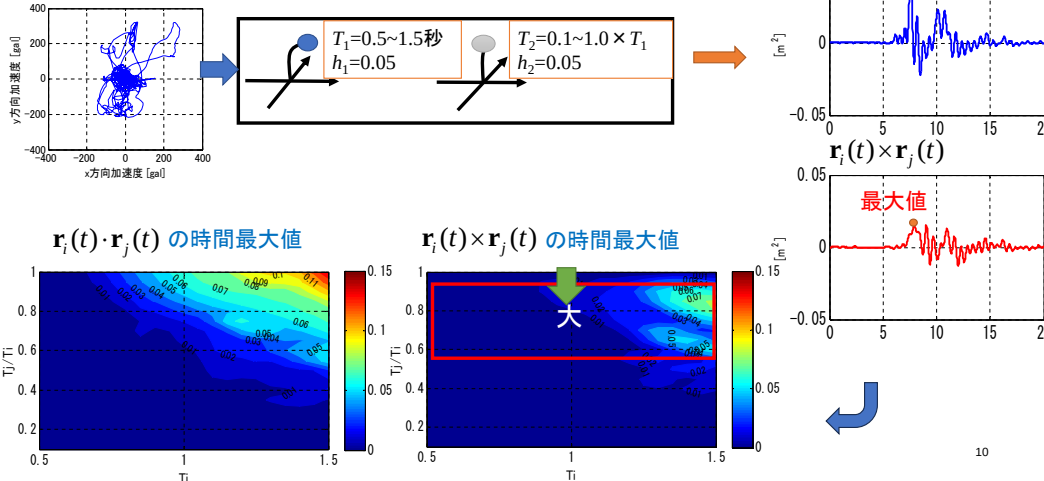
ここに

$$\mathbf{r}_i(t) = \begin{Bmatrix} r_i^p(t) \\ r_i^w(t) \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{s}_i = \begin{Bmatrix} s_i^x \\ s_i^y \\ 0 \end{Bmatrix} = (\mathbf{f}^T \boldsymbol{\Phi}_i) \begin{Bmatrix} \beta_i^x \\ \beta_i^y \\ 0 \end{Bmatrix}$$

9

（参考）２方向地震動の評価の計算例（既往研究）

例：1995年兵庫県南部地震 東神戸大橋記録



10

3次元問題に関する新たな知見

- 全ての360°の加振方位の回転を考慮した水平動2成分による最大応答に、鉛直地震動記録のみから算出される2つのモード固有周期 T_1, T_2 の単振動子の応答の積（ベクトル内積・外積）と、鉛直方向加振に対応する構造物特性の係数を乗じた量を加算することで、3次元地震動に対する応答値が評価される。
- 3次元入力地震動に存在する4種類の位相極性（水平 $\pm_h$ ／鉛直 $\pm_v = ++, +-, -+, --$ ）のうち、水平方向の位相極性（ $\pm_h$ の符号）により線形弾性構造物の最大応答値への影響が明示されるのに対し、鉛直方向の位相極性（ $\pm_v$ の符号）の影響は定式化の段階でキャンセルされ現れなくなる。

11

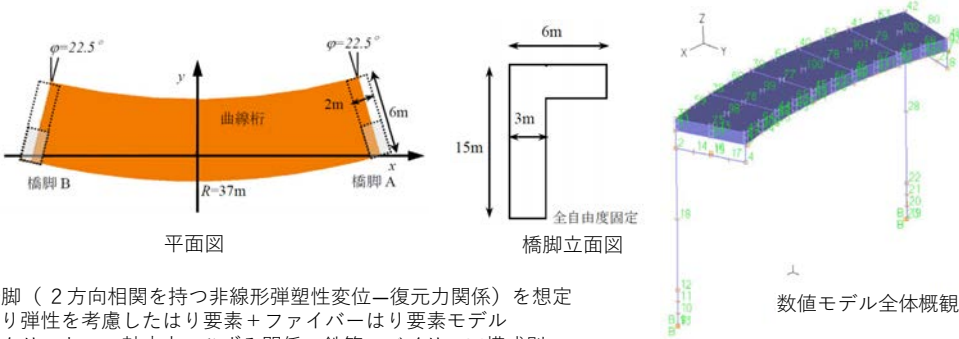
弾塑性非線形構造モデルの応答数値解析

- 非対称でかつ鉛直地震動が耐震性能評価に有意な影響を与えるような非線形弾塑性復元力を与えた簡略化構造モデルを用いて、4つの位相極性について全周方向に回転させた多数の3次元入力地震動に対する時刻歴応答解析を実施
- 4つの位相極性について全周方向に回転させた多数の3次元入力地震動に対する時刻歴応答解析を実施し、線形弾性構造物に対する理論式では現れなかった鉛直方向入力成分の符号の影響を検討

12

計算対象モデル

- 逆L字型橋脚2本（橋脚A、橋脚B）を有する曲線桁橋モデル

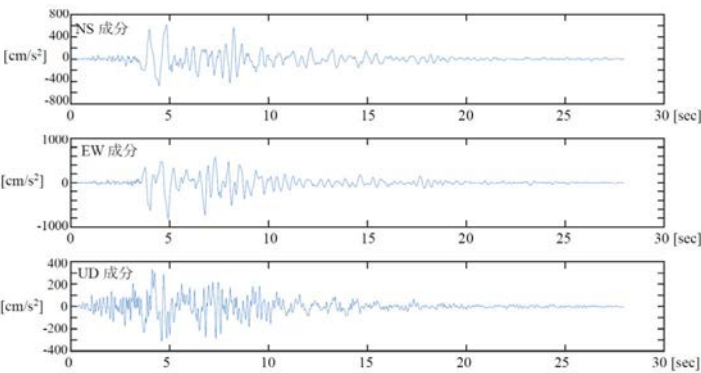


- RC橋脚（2方向相関を持つ非線形弾塑性変位－復元力関係）を想定
- ねじり弾性を考慮したはり要素＋ファイバーはり要素モデル
- コンクリート：一軸応力－ひずみ関係＋鉄筋：バイリニア構成則
- 曲線桁：近似剛体モデル（水平・鉛直方向質量＋3回転軸慣性モーメント）
- 支持条件：橋脚A上固定＋橋脚B上移動支承条件

13

入力地震動

- 1995年兵庫県南部地震：JMA神戸記録 (EW, NS, UD)

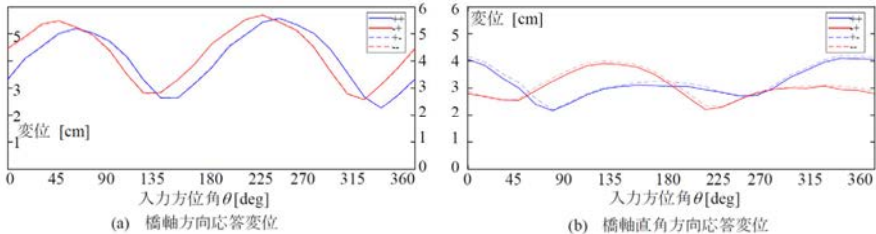


- 3次元入力地震動：96セット
- 鉛直軸回り回転：15° 刻み24等分
- 3次元位相極性：4つ（++、+-、-+、--）
- 着目応答量：橋脚A天端変位応答（橋軸方向成分、橋軸直角方向成分）

14

計算結果

- 橋脚最大応答変位-入力方位角関係の3次元位相極性による影響



位相極性	橋軸方向最大応答 [cm]	橋軸直角方向最大応答 [cm]
++	5.57	4.10
+-	5.69	3.91
+ -	5.58	4.19
--	5.71	4.00

- 橋軸方向応答
- 鉛直成分の位相極性が追加されたことによる効果（++と+の相違、-+と--の相違）は限定的
- 橋軸直角方向応答
- +を用いた入力地震動を用いた動的応答解析に基づく評価がもっとも重要
- 橋軸方向応答に比べ、鉛直成分の位相極性が応答に与える影響が有意に大きく表れる
- 理由：地震動の鉛直成分の影響が橋軸方向応答よりも橋軸直角方向応答の方が大きいため

得られた主な知見

- 3次元位相極性の影響は、線形弾性構造物を仮定して固有振動モードのベアを通じて応答値が決定される事を示す理論的な評価式が得られた
- 計算結果によれば、対象構造物の特性によっては多次元地震動入力、元になる入力加速度が同じであっても、位相極性に依じて応答評価に相当な影響を与える
- 数値計算によれば非線形性を有する構造物モデルにおいては、材料非線形性や幾何学的非線形性等を考慮した非線形構造系でも、入力の位相極性による最大応答への影響が同様に生じる
- 非対称で複雑な動特性を持つ構造物の耐震性能照査のために非線形時刻歴応答解析を行う状況では、3方向地震動を入力として用いる場合は、安全側の評価のため、全ての入力方向のみならず4つの位相極性についての応答解析を行い、いずれかのうち大きい応答値を許容値と比較する考え方を導入する必要性が高い。
- 鉛直成分に起因する位相極性の符号の影響は水平2成分によるものと比べると小さい影響となる結果となったが、この影響が大きくなる場合についても今後把握しておく必要があると考えられる

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した 三次元風向風速計測装置の開発

大成学術財団 研究助成（2024～2025年度）成果報告
北海道大学大学院 工学研究院 川村 洋平

着想とコンセプト



着想：風の強い日はドローンのバッテリー消費が大きい
→ 機体は風に「抵抗」している



風（外乱）

1. 風を受ける 向かい風・横風などの外乱
2. 機体が自動で補正 姿勢角（ピッチ・ロール）とモーター出力を調整
3. フライトログに記録 補正の履歴がミリ秒単位で標準保存
4. 逆解析で風を推定 記録から風向・風速を逆算

ドローン自身を「飛行する風速計」に
追加ハードウェア不要、市販機＋ソフトのみ

研究背景



風力発電の適地選定

- ・洋上風力の案件形成目標：2040年までに**3,000万～4,500万kW**
- ・風車のブレードは地表から**数十m上空**にあり、地表での計測では正しい風況が得られない
- ・山間部・洋上では事前の風況計測そのものが困難



ドローン運用の安全性

- ・建設・インフラ点検・農業・災害対応で活用が急拡大
- ・局所的な風向・風速が**安全運用と作業品質**を左右する
- ・従来は固定式風速計や専用センサに依存し、**コスト・設置・可搬性**に課題

飛行空域の**三次元風況**を**簡便・低コスト**に計測する手段がない

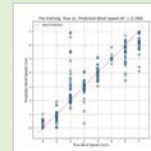
出典：洋上風力産業ビジョン（第1次）、2020年12月

研究の全体像

目標：市販ドローン＋ソフトウェアで三次元の風向風速を計測・可視化する

STEP 1 理論の確立

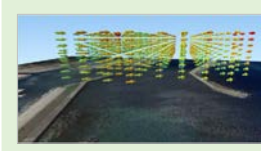
風洞実験



制御された風の中で機体応答と風を関係を定量化し、基礎物理モデルを構築

STEP 2 現場への応用

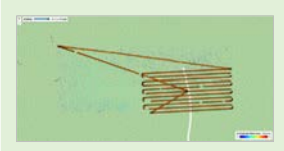
屋外実証実験



北海道福島町の漁港で飛行し、三次元の風況マップを作成

STEP 3 社会実装

アプリケーション



フライトログから風況マップを自動生成し、誰でも使える形に

推定の原理：機体の応答

STEP1 風洞実験

風を受けたときの自律安定化制御

向かい風

機体を前に傾ける
(ピッチ角増加)
モーター出力を上げる

追い風

ピッチ角・出力が向かい風と
逆向きに変化

横風

風上側へ傾く (ロール角発生)
推力を微調整して流されないよう
保持

フライトログの特徴量 (区間平均)

pitch_mean 平均ピッチ角

roll_mean 平均ロール角

power_mean 平均電力 (電流×電圧)

hspeed_mean 平均対地水平速度

機体の応答は、風という外力に抵抗した「記録」そのもの
→ 応答 (原因の結果) から風 (原因) を機械学習で逆推定する

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

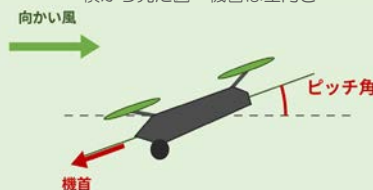
5

姿勢角 (ピッチ・ロール) とは

STEP1 風洞実験

ピッチ角 (前後の傾き)

横から見た図 機首は左向き



向かい風: 機首を下げて前方へ傾く
風が強いほど傾きと出力が大きくなる

ロール角 (左右の傾き)

後ろから見た図 機首は奥向き



横風: 風上側へ傾いて流されるのを防ぐ
傾きの向きが風向、大きさが風速を反映

風を受けたドローンは姿勢角を変えて抵抗する
→ 傾きの向きと大きさが、風向と風速を映している

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

6

風洞実験の概要

STEP1 風洞実験



北海道大学 風洞実験室の測定部と実験機体
(DJI Mavic 3 Thermal)



大型環流風洞
測定部
1.8×1.8×5.0 m
最大風速 70 m/s

使用機材	DJI Mavic 3 Thermal (M3T)
実験施設	北海道大学 風洞実験室 (大型環流風洞)
風速条件	0~7 m/s、1 m/s刻み (8段階)
風向条件	正面0°・右90°・後方180°・左270° の4方位
飛行方法	風洞中心軸に沿った往復飛行 (ホバリングではなく動的飛行)
データ	安定区間を抽出し 1,211点 のデータセグメント



ノイズが少ない教師データ
→ 風と機体応答の物理的関係を学習

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

7

機械学習モデル

STEP1 風洞実験

入力 (4特徴量)

pitch_mean
(ピッチ)
roll_mean
(ロール)
power_mean
(消費電力)
hspeed_mean
(水平速度)



向かい風成分モデル

ランダムフォレスト
(決定木100本)



横風成分モデル

ランダムフォレスト
(決定木100本)

ベクトル合成
↓
風速・風向

ランダムフォレストを採用した理由

- 他手法 (CNN) と比較し最も高精度
- 非線形関係に対応でき、過学習に強い

データ分割 (全1,211点)

学習用 80%

検証 20%

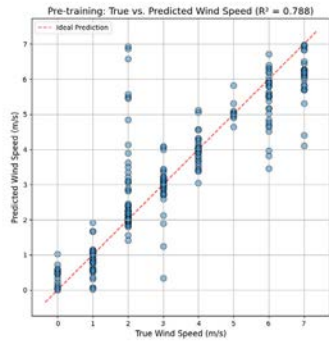
検証用は学習に一切使わない未知データ

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

8

風洞実験の結果

STEP1 風洞実験



風速の実測値（横軸）と予測値（縦軸）
赤破線： $y=x$

風速：決定係数 R^2

0.789

変動の約79%を説明

風速：RMSE

0.99 m/s

誤差 約±1.0 m/s

風向：円環決定係数 R^2

0.758

風向：円環RMSE

38.7°

4方位・8方位を概ね識別

標準センサだけで風を「読める」ことを実証
→ 基礎物理モデルを確立

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

9

現場での実証実験

STEP2 現場実証



実施地点：北海道松前郡福島町 吉岡漁港付近



実証実験の様子

DJI Mavic 3T
重量：920 g
GNSS：GPS+Galileo
+BeiDou



実施日	2024年7月30日
場所	北海道松前郡福島町
飛行	標高 約25 m・約40 mの2回
飛行時間	約12.5分・約13分
天候	晴れ
地上風況	風速 約2~4 m/s、西北西

市販機そのまま実フィールドの
風況を取得
→ 三次元空間への展開を検証

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

10

風況の解析と三次元補間

STEP2 現場実証



実際の飛行経路（往復飛行）



補間範囲（黄枠内）

運動方程式

$$m a = T - F_d$$

T：推力（プロペラ回転数と
ピッチ角・ロール角から算
出）

F_d ：抗力（ $\frac{1}{2} \rho C_d A v^2$ ）

①理論速度

運動方程式を積分し
風が無い場合の
機体速度を算出

②風速ベクトル

実測速度との差から
各地点の水平風
を算出

③空間補間

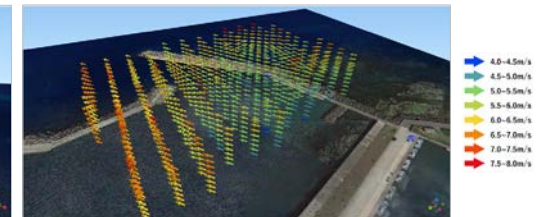
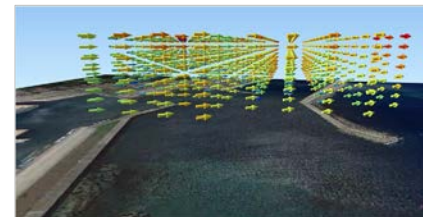
25~40 m間を逆
距離加重法（IDW
）で補間

④三次元可視化

GISで地図上に矢
印マッピング

三次元風況マップ

STEP2 現場実証



- 矢印の向き＝風向、色＝風速（青：弱 → 赤：強）
- 測定地点周辺の風向の特性や、どこで風が強まるかが一目で分かる
- 市販ドローンのログだけで三次元マッピングシステムを構築

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

11

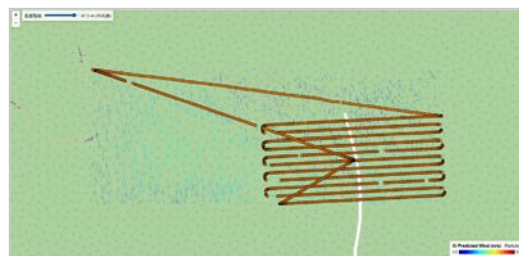
ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

12

風況マップアプリケーション

STEP3 社会実装

- 1 **データ取得**
現場で通常どおり飛行し、フライトログを保存
- 2 **データ入力**
フライトログ (CSV) をアプリに読み込む
- 3 **風況推定**
構築したモデルで各時刻の風向・風速を算出
- 4 **可視化**
飛行経路上のヒートマップをHTMLで出力



生成される風況マップ（スライダーで高度を切替、色で風速を表示）

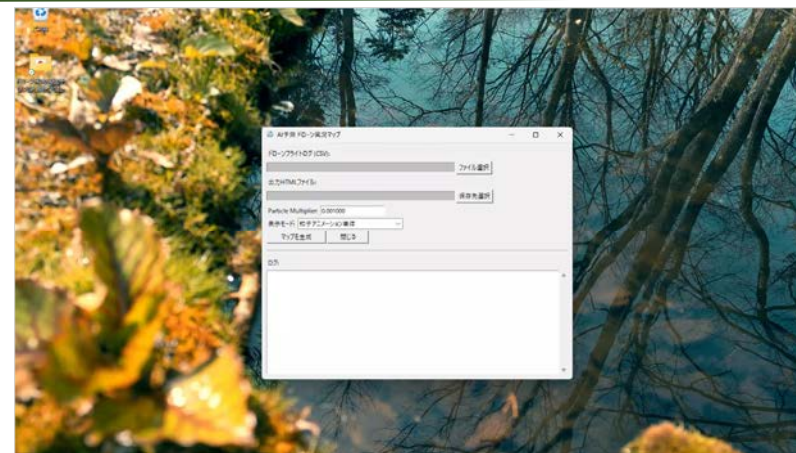
追加センサ不要
飛行後わずか数分で空域の風況を把握

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

13

アプリ操作デモ

STEP3 社会実装



フライトログの読み込み → 風況推定 → 風況マップ表示

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

14

本技術の活用先



**風力発電の
適地選定**

ブレード高さ（地表数十m）の風況を事前に面的に把握



**ドローンの
安全運用**

強風時の自動警告・帰還判断に活用



**自律飛行の
高度化**

風を考慮した飛行経路の補正



**インフラ点検・
建設**

作業可否の判断、飛行品質の事後評価



農業・災害対応

散布や捜索時の現場風況の把握



気象観測網

既存ドローン活用による低コスト・高密度な観測

追加ハードウェア不要→

既存のドローンにソフトウェアだけで即時適用可能

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

16

まとめ

STEP1

理論の確立

基礎物理モデルを構築
(風速 $R^2=0.789$ 、RMSE=0.99 m/s)

STEP2

現場への応用

福島町での実飛行から三次元風況マップを作成

STEP3

社会実装

フライトログから風況マップを数分で自動生成するアプリを開発

ドローン自身を「飛行する風速計」とする計測手法を
理論 → 応用 → 実装まで一貫して構築した

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

17

謝辞

本研究は、一般財団法人 大成学術財団の研究助成
(2024~2025年度)を受けて実施しました。
ここに記して深く感謝申し上げます。

共同研究者：岡田 夏男（北海道大学大学院 工学研究院 助教）

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

18

今後の展望



実環境への適応

風洞で得た基礎物理モデルを現場データ
で検証・再学習し、突風や乱流を含む実
環境での精度を高める



垂直方向への拡張

水平方向に加え、鉛直方向の風成分の計
測・解析を行う



最適航路の自動設定

目標：30分以内に60,000 m³の空間の
三次元風況を計測・可視化



自動定時計測

自動離発着・充電で定時に計測し、風況
の時間変動・季節変動を捉える

ドローンの姿勢制御パラメータを活用した三次元風向風速計測装置の開発

19

マルチスケール浸透破壊現象の解明に基づく 鋼矢板を用いた対策効果の評価

一般財団法人大成学術財団 第8回研究成果発表会
2026.10.21(水) 13:10-17:30
於 新宿センタービル 52階大ホール

松田達也(MATSUDA TATSUYA)
内藤直人(NAITO NAOTO)

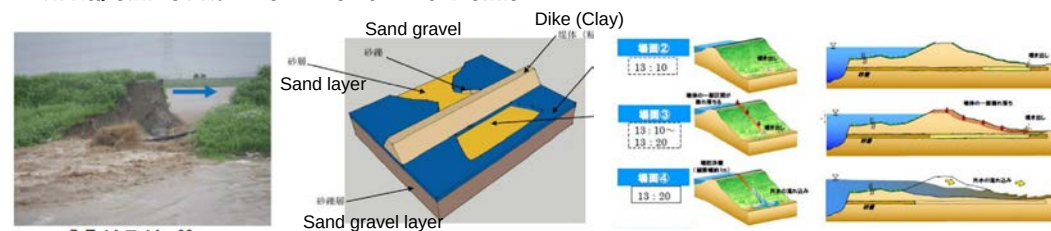
豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系
地盤・防災講座: 地盤力学研究室



Toyohashi Univ. of Technology, Dept. of Architecture and Civil Engineering
Division of Geotechnology and Disaster Prevention, GeoMechanics Laboratory

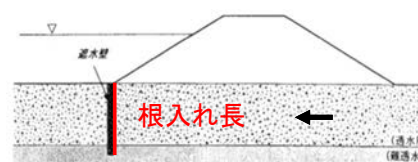
緒言

九州北部豪雨(平成24(2012)年7月集中豪雨)



九州地方整備局筑後川河川事務所 矢部川堤防調査委員会資料

矢板(川表)遮水工法



【計画・設計上の留意点】

浸透流量を半減させるためには、止水壁を透水層厚の80~90%程度まで貫入させる必要がある。

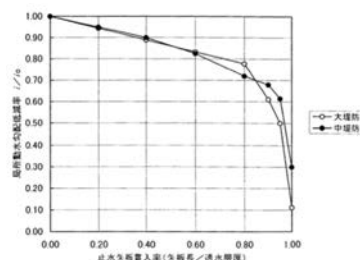
財団法人 国土技術研究センター, "河川堤防の構造検討の手引き", 2012-02.

研究の問い

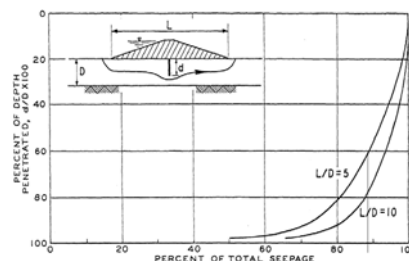
設計上は80~90%程度の根入れが必要と示されているが、その水理学的・力学的根拠を十分に明らかにする必要がある。

研究目的

矢板(川表)遮水工法の効果



遮水壁貫入率と局所動水勾配の関係



部分遮水壁の根入れ率と浸透量低減効果の関係
(均質・等方な基礎地盤, USACE: アメリカ陸軍工兵隊)

本研究の最終目標

矢板根入れ長が浸透流構造と地盤安定性に及ぼす影響を明らかにし、根入れ長決定の根拠を提示する。

本研究の目的

水と屈折率が等価な透明砂を用いた間隙水の流速直接計測・浸透流解析に基づき、矢板周りの浸透流れ構造を明らかとし、総浸透流量・有効応力の変化をもって水理学的・力学的根拠を示す。

透明砂による可視化実験

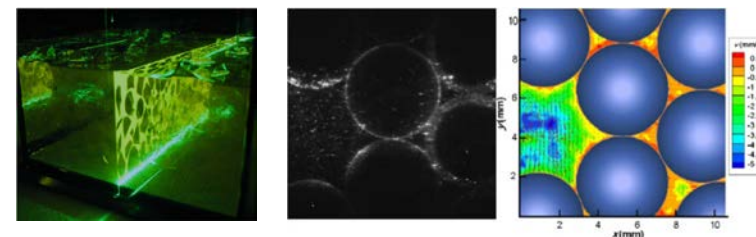
地盤内部を可視化するための技術

石英ガラス(屈折率約1.46)などの材料に、ミネラルオイルなどの屈折率を調整した溶液を飽和させ、屈折率マッチングを行うことで地盤内部の可視化が可能になる

<課題>

- 溶液は粘性のある場合が多く、以下の問題が発生する
- 流動性の低下
- 層流から乱流への遷移が遅れる(レイノルズ数の式)
- 水理現象の進行が本来よりもゆっくりになり、再現性が落ちてしまう

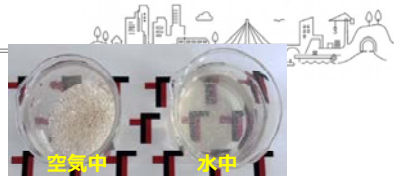
$$Re = \frac{\rho DV}{\mu}$$

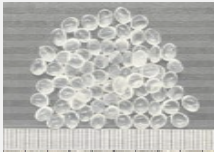
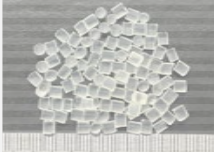


出典: Iskander, M., Bathurst, R. J., and Omidvar, M., "Past, Present, and Future of Transparent Soils," Geotechnical Testing Journal, Vol. 38, No. 5, 2015, pp. 557-573.

透明砂による可視化実験

水と屈折率が一致する透明粒子（屈折率1.33）を用いた。
NOK株式会社が開発した新素材「MEXFLON®」

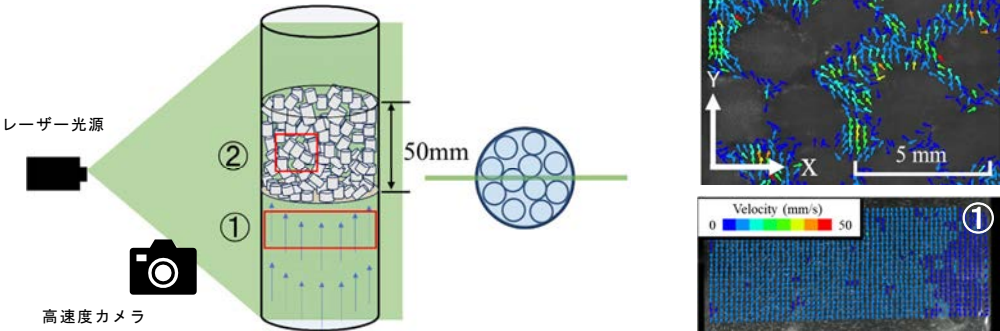


粒径形状	楕円体形	円柱形
形状特性	 長軸：4.30, 中間軸：3.32, 短軸：2.79 丸みの強い塊状体	 直径：2.89 mm, 高さ：3.17mm
最大密度	1.383 kg/m ³	1.281 kg/m ³
最小密度	1.299 kg/m ³	1.356 kg/m ³
気中安息角	32.10°	35.23°
透水係数	4.07 × 10 ⁻³ m/s	4.01 × 10 ⁻³ m/s

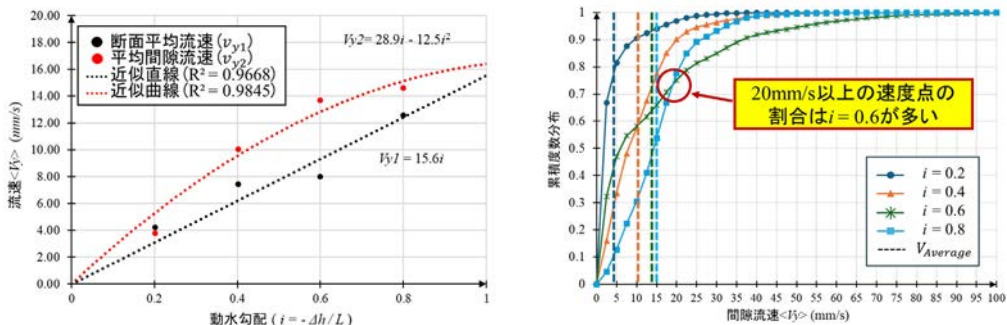
一次元浸透における間隙流れの高精度計測

実験の目的
流れ方向が明確な一次元上向き浸透場を用いて、間隙流速計測法の妥当性と基本特性を確認。
PIV解析により間隙流れの高精度計測を行い、間隙流れ構造を評価

供試体内へ流入する水の流れ場と、供試体内の観測領域での間隙内の浸透流れを高速度カメラで撮影した。



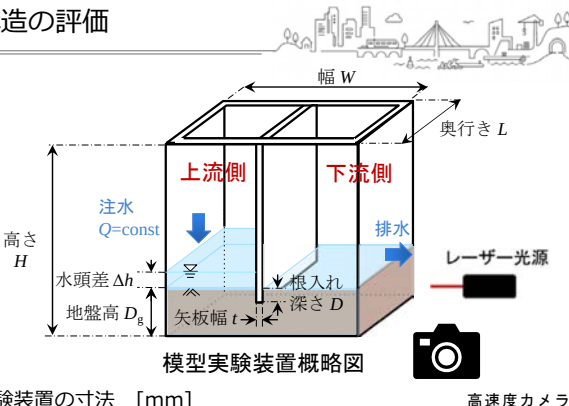
一次元浸透における間隙流れの高精度計測



矢板周りの浸透実験による間隙流れ構造の評価

実験の目的
一次元で確立した間隙流速計測法を、二次元的な矢板周りの浸透流れ場へ展開する。

浸透流解析を併用して矢板周りの浸透流れ構造を明らかとし、総浸透流量・有効応力の変化をもって水理学的・力学的根拠を示す。



一次元浸透における流速と動水勾配の関係

間隙流速の累積度数分布

- 動水勾配の増加に対して、間隙流速は単純な線形増加を示さず、**高動水勾配域で非線形性**が現れた。
- 全体的な傾向として動水勾配の増加とともに速い流れが空間的に増加したが、**単純に最大速度が増大するのではなく、高い勾配域における流路の再配分が発生**している可能性が示唆された。

模型実験装置の寸法 [mm]

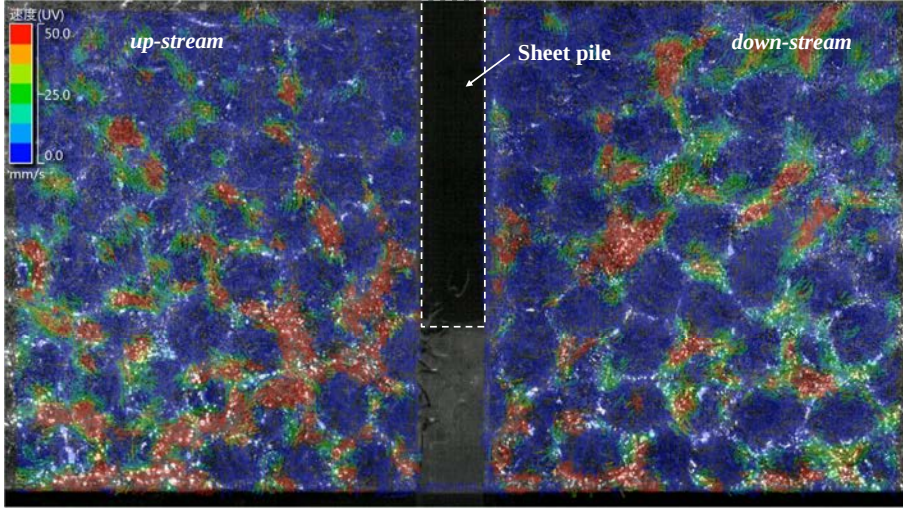
	高さ H	幅 W	奥行 L	矢板幅 t	根入れ深さ D	地盤高 D_g	水頭差 Δh
対象模型	145	150	-	3	32,24,16,8	40	-

矢板の根入れ率 (D/D_g) 地盤層厚に対する矢板の根入れ長の割合
⇒ 20, 40, 60, **80**, 90%へ変化

実験： $i = 0.5$ で定常
解析： 水位上昇速度 1mm/s で非定常

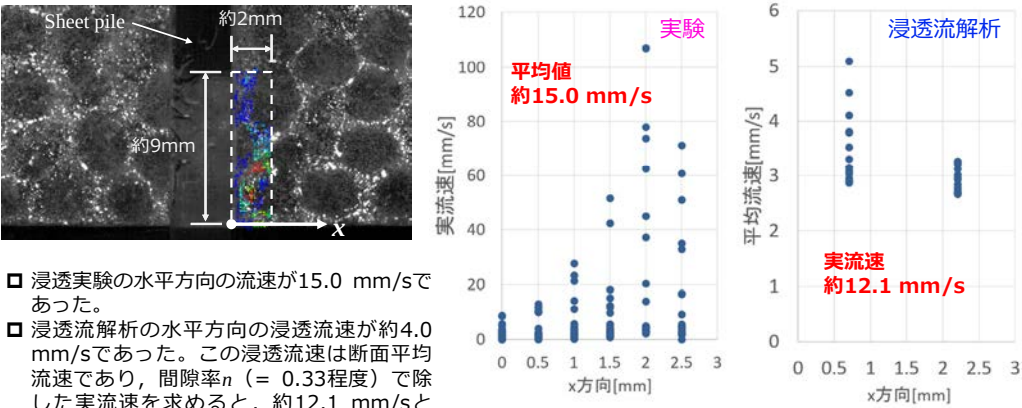
矢板周りの浸透実験による間隙流れ構造の評価

根入れ率 (D/D_g) : 80%, 動水勾配 $i = 0.5$ の定常状態



矢板周りの浸透実験による間隙流れ構造の評価

根入れ率 (D/D_g) : 80%, 動水勾配 $i = 0.5$ の定常状態

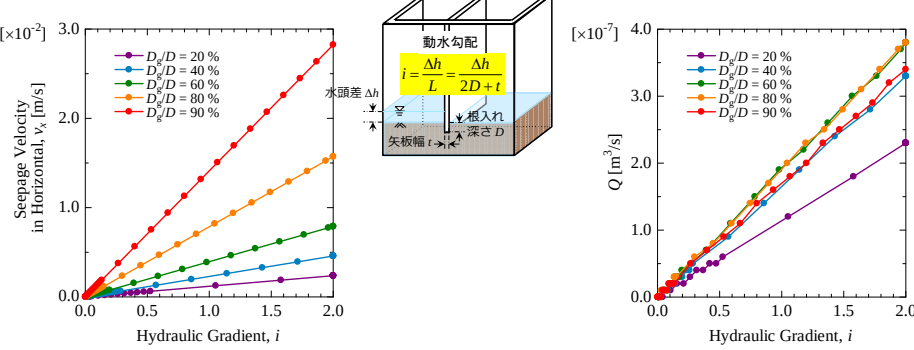


- 浸透実験の水平方向の流速が15.0 mm/sであった。
- 浸透流解析の水平方向の浸透流速が約4.0 mm/sであった。この浸透流速は断面平均流速であり、間隙率 $n (= 0.33$ 程度) で除した実流速を求めると、約12.1 mm/sとなった。
- 矢板の根入れ深さの決定に資する基礎的な実験・解析基盤を構築した。

水平方向の流速

矢板周りの浸透実験による間隙流れ構造の評価

動水勾配による流れ構造の整理



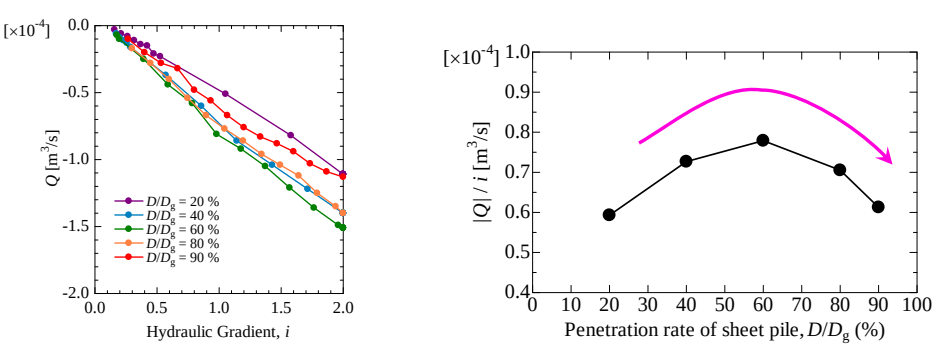
矢板下における通過流速と動水勾配の関係

矢板下における通過流量と動水勾配の関係

- 矢板の根入れ率の増加に伴って矢板下の通過断面積が縮小により、矢板先端付近の流れの集中が発生することが示唆された。

矢板周りの浸透実験による流れ構造の評価

動水勾配による流れ構造の整理



下流側の基礎地盤表面における総流量と動水勾配の関係

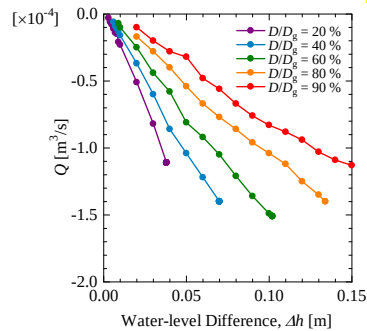
総流量と動水勾配の傾き

- 総流量 Q を動水勾配で整理すると、根入れ率に対して単調な関係を示さなかった。
- なぜ、根入れ率20%と90%は同程度に小さいのか？

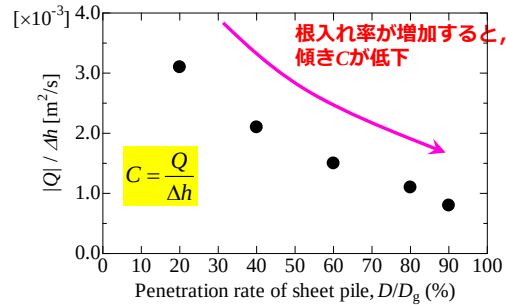


水位差による流れ構造の再整理

$$\Delta h = (2D + t) \cdot i$$



下流側の基礎地盤表面における総流量と水位差の関係



総流量と水位差の傾き

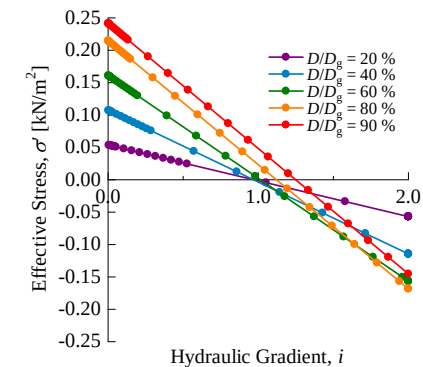
$$\frac{Q}{i} = (2D + t) \cdot C$$

- Q/i には通水性の変化に加え、浸透路長の増加効果も含まれる。
- 水位差で整理すると単位水頭当たりの流量は根入れ率の増加とともに単調に低下した。すなわち、根入れの増加に伴う地盤の通水性の低下を示すには、駆動力である**水位差（水頭差）**で整理する必要がある。

13



有効応力を用いた安定性の検討



有効応力と動水勾配の関係

- 根入れ率の増加に伴い、有効応力がゼロに達するために必要な動水勾配が増加した。特に、**根入れ率が80%以上では、浸透破壊に対する抵抗が向上**することがわかった。
- 総流量の低下は地盤の通水性を示す一方、浸透破壊は動水勾配と有効応力の関係から評価できるため、両者を区別して評価する必要がある。

14

結言



間隙スケールの流れ

間隙流速の直接計測手法を構築した。一次元上向き浸透では、動水勾配の増加に伴って高速流路の空間的な再配分が生じる可能性を確認した。

矢板周りの流れ構造

根入れ率の増加に伴って矢板先端近傍へ浸透流が集中し、矢板下の局所流速が増加することを実験・解析の両面から確認した。

根入れによる遮水効果

下流への総流量 Q を水位差（水頭差）で整理した結果、単位水頭当たりの流量（ $Q/\Delta h$ ）は根入れ率の増加とともに単調に低下した。これにより、矢板に伴う地盤の透水性（通水性）が低下することを示すとともに、流れの局所化や再分配をもたらす可能性が示された。

地盤の安定性

根入れ率の増加に伴い、有効応力がゼロに達するために必要な動水勾配が増加した。特に、根入れ率が80%以上では、浸透破壊に対する抵抗が向上することがわかった。

矢板根入れ効果の評価には、総流量の低減のみならず、**矢板先端近傍に形成される局所的な浸透流構造と有効応力変化を併せて評価**することが重要である。

15

有明海における漂流物追跡調査と 高精度漂流予測シミュレーションモデルの開発

九州大学大学院 工学研究院 附属アジア防災研究センター 山城 賢

豪雨時に河川から大量の漂流物が流出
→ 漁業、船舶航行、港や海岸保全施設の機能維持、
生態系・海洋環境など沿岸域の多方面に甚大な影響



平成29年7月九州北部豪雨
(2017年7月14日毎日新聞より)



令和2年7月豪雨
(2020年7月16日西日本新聞より)



令和4年台風14号
(2022年9月24日南日本新聞より)

筑後川並行着流堤 (2024.07.11撮影)

研究の背景



九州地方整備局 環境整備船「海輝」
(国土交通省九州地方整備局HPより)



海輝の作業の様子



令和5年7月九州北部豪雨時の回収作業の様子
(FKBオンラインより)



▲漁船が回収した漂流物の受け取り
(国土交通省九州地方整備局HPより)

豪雨の増加
→ 漂流物被害の増加
回収作業は目撃情報に依存
→ 現場到着時には既に流されている場合も多い
(九地整へのヒアリングでは回収率は50%程度)

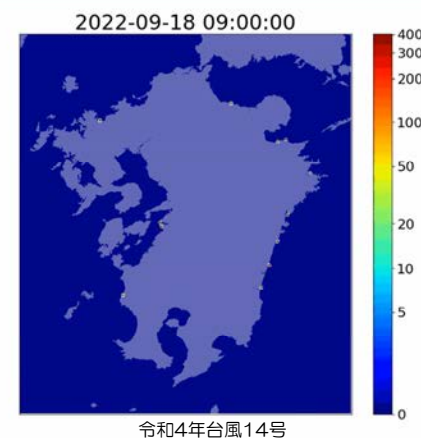
研究の背景

効率的な回収（漂流物被害の軽減）
→ 高精度な漂流予測技術（シミュレーションなど）

漂流予測シミュレーション
モデルの高精度化を継続



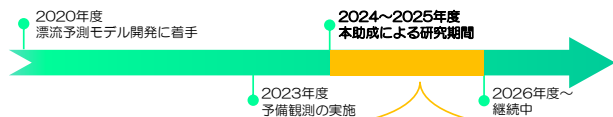
検証に十分な
観測データが
存在しない



研究の目的

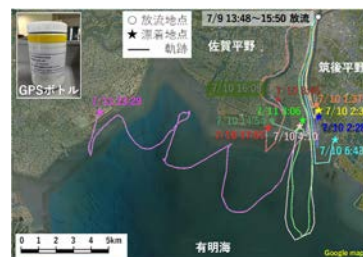
有明海における漂流物挙動の解明と漂流予測モデルの開発

- 漂流物追跡調査（データの蓄積、特徴の解明）
- 漂流予測モデル開発（精度検証、改良）



研究スケジュール

実施項目	2024年度	2025年度
漂流物追跡調査		
調査計画・各種許可取得		
GPSボトルの作成		
調査実施	9月以降は海苔養殖のため不可	実施できず
結果の整理・考察		
漂流予測モデル開発		
精度検証		
改良		
報告書作成		

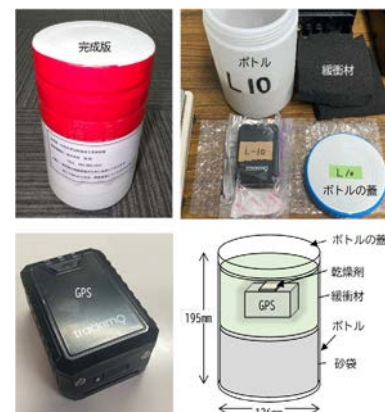


2023年度漂流物予備調査結果の例

GPSボトル

GPS: TRKM110-T

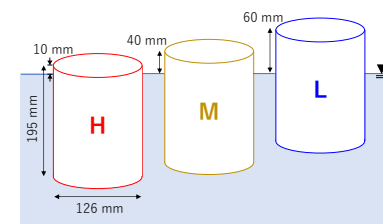
- 4G (LTE) 通信およびAGPSに対応
- 位置情報等をアプリやウェブブラウザ上で確認可能
- 測位間隔を遠隔操作により1~240分の範囲で変更可能



有明海沿岸の各漁業協同組合との協議により、放流しても漁船等に支障がない形状および寸法に決定

GPSボトル諸元

種類	個数	比率(水上/水中)	D(mm)
H	8	2:37	10.0
M	10	8:31	40.0
L	10	4:9	60.0



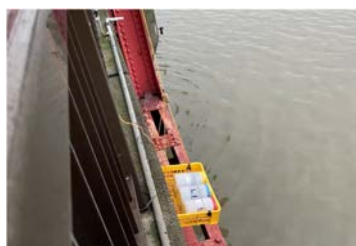
GPSボトルの浮遊状態

漂流物追跡調査

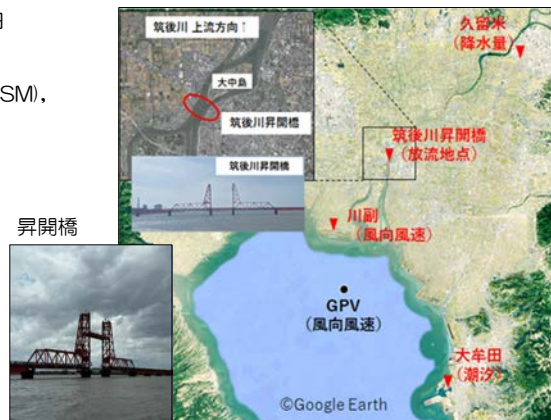
放流日: 2024年6月28日, 7月2日, 7月11日
放流地点: 筑後川昇開橋 (河口から6.63km上流)
気象海象データ: 降水量 (久留米, アメダス)
風向風速 (川副, アメダス), 気象庁GPV (MSM),
天文潮位 (大牟田, 気象庁)

放流日と放流個数

	6月28日	7月2日	7月11日
H	2	3	3
M	4	3	3
L	4	3	3



放流の様子



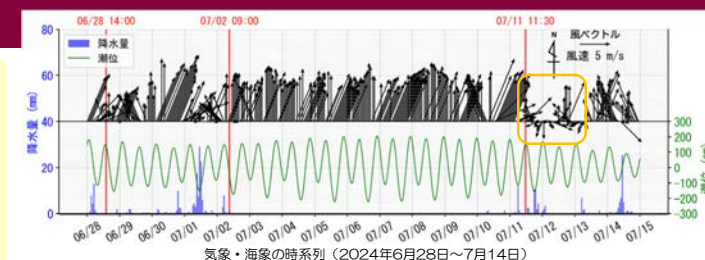
GPSボトル放流地点および気象・海象観測地点

漂流軌跡

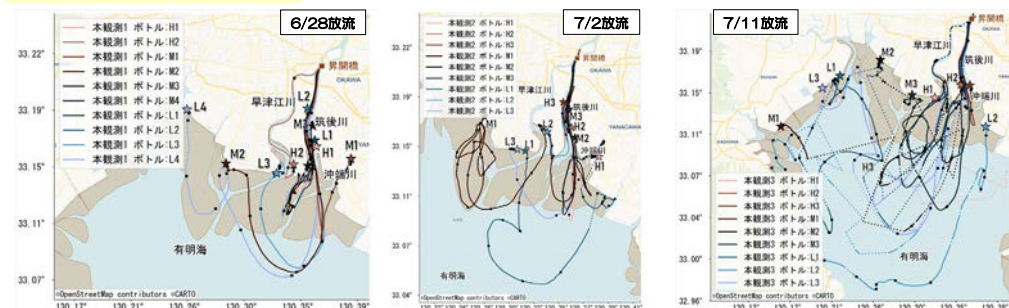
平均漂流時間

6/28放流: 約23時間
7/2放流: 約26時間
7/11放流: 約90時間

- 多くが河岸や河口周辺に漂着
- 滞筋を通して海域に流出する
- 潮目集積しやすい
- 稀に再漂流する

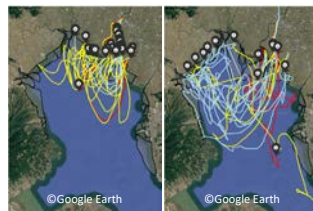


気象・海象の時系列 (2024年6月28日~7月14日)

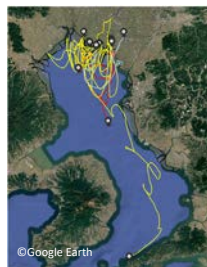


漂流挙動に影響する主な要因

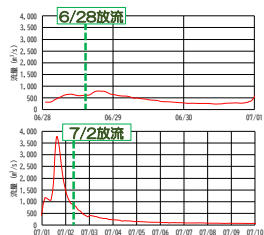
潮汐
河川流量 *本観測結果では不明瞭
風(特に風向)
漂流物の比重(海面上高さ)→風の影響
波(質量輸送, 海浜流), 潮目など



風向の違いによる漂流軌跡
(左図: 北風時に放流, 右図: 南風時に放流,
赤: ボトルM, 黄: ボトルL, 青: ボトルS)



再漂流したケース



GPSボトルの比重による漂流軌跡の比較(左からボトルM, ボトルL, ボトルS).
ピンは漂着地点もしくは最後に信号が受信された位置を示す.
筑後川片ノ瀬観測所流量推定値
(河口から40.61 km上流)



GPSボトルの比重による漂流軌跡の比較(左からボトルM, ボトルL, ボトルS).
ピンは漂着地点もしくは最後に信号が受信された位置を示す.

漂流予測シミュレーション

非構造格子海洋流動モデルFVCOMを改良

風応力(土門ら(2012))

$$V_p = V_c + kU_{10} \quad \text{風応力項}$$

$$k = \left[0.2056 \frac{\rho_a}{\rho_w} R_A^{0.661} \right]^{1/2}$$

$$\text{投影面積比 } R_A = A_a / A_w$$

ランダムウォーク

格子スケールより小さい渦を考慮

$$X^{t+\Delta t} = X^t + V\Delta t + R\sqrt{2K_h\Delta t}$$

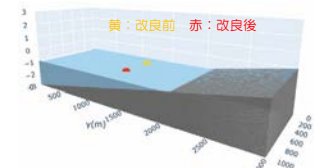
R: 正規乱数(平均値0, 標準偏差1)

K_h : 海洋の水平渦拡散係数(0.2m²/s)

漂着・再漂流

漂流物の喫水より小さい水深で漂着

メッシュ外に出た粒子は直前の位置に戻す



開境界: 潮汐 (NAO.99Jb)
海面境界: 気象庁MSMの気圧と風
水平空間解像度は5 km, 時間間隔は1時間.
FVCOMに外力として入力する際, 空間的
には逆距離加重法, 時間的には線形補間に
より内挿.

計算領域と計算メッシュ

主な計算条件

項目	設定
最小格子間隔	150 m (有明海湾奥)
最大格子間隔	3,000 m (開境界付近)
鉛直座標	10層s座標 ※以下, 分割割合 (表層~底層: 2%, 6%, 10%, 14%, 18%, 18%, 14%, 10%, 6%, 2%)
計算期間	2024年6月26日0時~7月4日0時
計算時間間隔	外部モード: 0.05 s 内部モード: 0.5 s
初期水温, 塩分	15°C, 35 psu
開境界の 水温・塩分	15°C, 35 psu
河川境界の 水温・塩分	15°C, 0 psu

各一級河川の水位流量観測所, 流域面積(観測所での集水面積), およびモデル入力値への補正係数と遅延時間

河川名	観測所	流域(集水)面積(km²)	補正係数	遅延時間(h)
六角川	妙見橋	341(95)	3.589	3
嘉瀬川	川上	368(226)	1.628	2
筑後川	片ノ瀬	2,860(1,812)	1.578	7
矢部川	船小屋	620(460)	1.348	2
菊池川	山鹿	996(586)	1.700	4
白川	代継橋	480(477)	1.006	2
緑川	城南	1,213(681)	1.781	2

精度検証

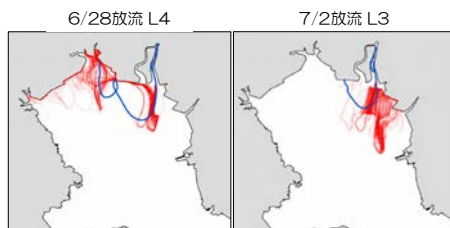
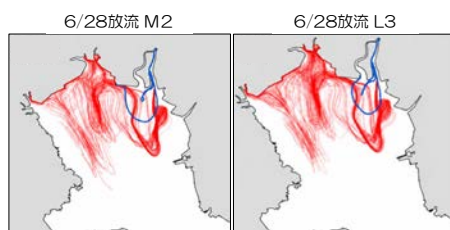
再現対象		
観測	GPSボトル	流出時刻
6/28放流	M2	6月28日 17:00
	L3	6月28日 17:00
	L4	6月29日 5:00
7/2放流	L3	7月2日 22:00

* 流出時刻: 放流した時刻ではなく,
有明海に流出した時刻

漂流は非線形過程であり, 特定の漂流軌跡を完全に再現することは困難

ランダムウォークによる乱流拡散過程を考慮した粒子群の漂流状況と比較

シミュレーションでは, 各ボトルを模したそれぞれ100個の粒子群を河口から放出

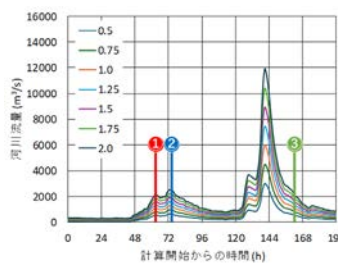


シミュレーションによる放出粒子(赤)とGPSボトル(青)の漂流軌跡の比較

漂流物の存在範囲
や漂着の可能性が
ある沿岸域をある
程度予測可能

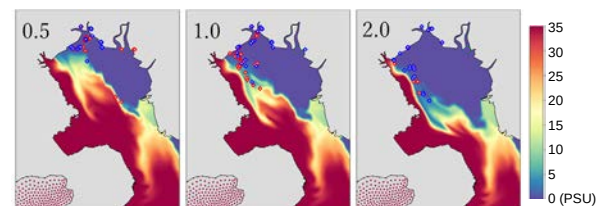
流出量の影響に関する検討

河川流量の影響は観測結果では不明瞭
→ 数値シミュレーションによる検討

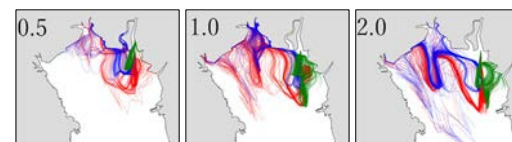


筑後川の河川流量の設定と粒子放出時刻

- 筑後川の河川流量のみ変化
- ①, ②, ③の3時刻にそれぞれ100個ずつ放出
- 粒子密度(投影面積比 R_A)はボトルMの条件



河川流量のピーク直後(潮位は満潮)における塩分濃度, 左: 0.5倍, 中: 1.0倍, 右: 2.0倍, プロットの色は流量の時系列の粒子放出時刻①, ②を示す.



粒子の軌跡, 左: 0.5倍, 中: 1.0倍, 右: 2.0倍, プロットの色は上図と同様.

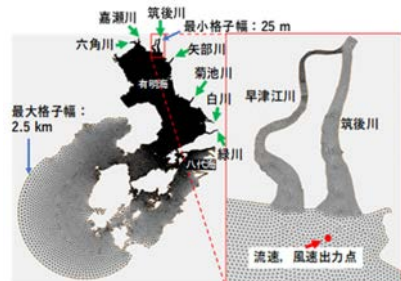
流出量は漂流物の存在範囲や挙動に大きく影響

波浪および力学過程を考慮した漂流モデルの高度化

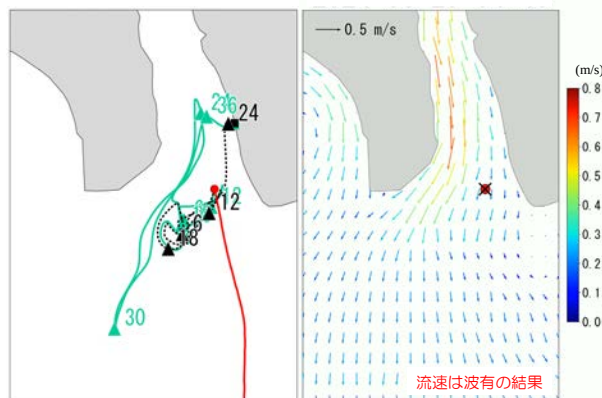
非構造格子海洋流動モデル ADCIRC
第三世代波浪推算モデル SWAN

波による質量輸送（ストークスドリフト）

粒子追跡 移流モデル $v = u + kU_{10}$
力学モデル $\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m}(F_w + F_a)$ 慣性を考慮



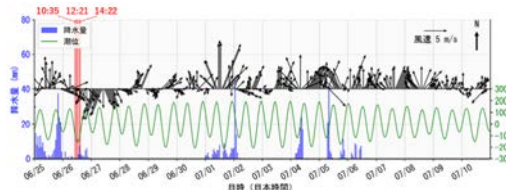
対象：2024年6月28～29日に筑後川から
流出したGPSボトル



シミュレーション結果の比較の例
(● 波無移流モデル, ● 波浪結合+質量輸送+力学モデル)

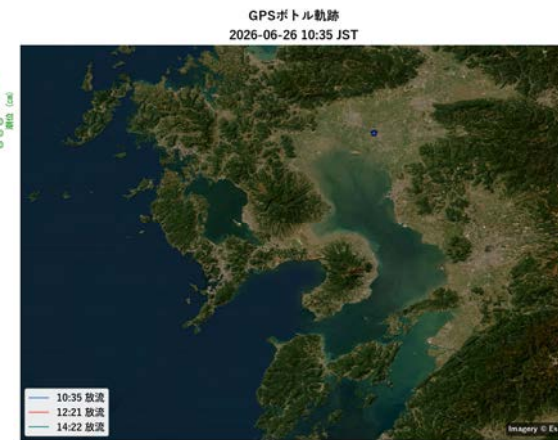
波浪や慣性の考慮により漂流経路が変化

漂流物追跡調査（2026年）



放流日：2026年6月26日
放流地点：筑後川昇開橋
(河口から6.63km上流)

放流時刻	ボトル
10:35	H, M, L
12:21	H, M, L
14:22	H, M, L



結論

- GPSを用いた漂流物追跡調査により、漂流挙動には、潮汐、河川流量、風の外力と漂流物の海面上高さが複合的に影響していることを明らかにした。
- 漂流予測シミュレーションは、個別の漂流物の軌跡の再現は困難であるものの、漂着する沿岸や漂流範囲は概ね予測可能であることが示された。また、河川からの流出量が漂流範囲や挙動に強く影響することを示した。
- 波浪モデルとの結合、ストークスドリフトの導入、漂流物の慣性の考慮により、特に浅海域では、漂流距離や漂着位置、漂着のタイミングが変化することが示された。

今後は、さらに現地観測データを蓄積するとともに、再漂流の確率的取り扱いや気象外力データの高解像度化など、漂流予測シミュレーションを改良し、回収作業の効率化に資する高精度な漂流予測の実現を目指す。



謝辞

本研究を実施するにあたり、福岡有明海漁業協同組合連合会、佐賀県有明海漁業協同組合、熊本県漁業協同組合連合会、国土交通省九州地方整備局熊本港湾・空港整備事務所、三池海上保安部の関係各位には、現地観測に御理解と御協力を頂くとともに貴重な情報を頂きました。また、現地観測の実施やデータの整理にあたっては、研究室の職員および観測時に在籍していた多くの学生諸君に協力頂きました。なお、本研究は、一般財団法人大成学術財団から助成を頂き実施されたものです。ここに記して感謝の意を表します。

機械学習によるカメラ画像を用いた 着衣量・代謝量推定モデルの開発

Development of a machine learning based model to estimate
the clo value and the metabolic rate from camera images

研究代表者 金 政秀 武蔵野大学 工学部 建築デザイン学科 教授

共同研究者 宮崎 莉帆 武蔵野大学大学院 工学研究科 建築デザイン専攻
田中 葵 武蔵野大学大学院 工学研究科 建築デザイン専攻
西原 直枝 日本女子大学 家政学部 被服学科 准教授

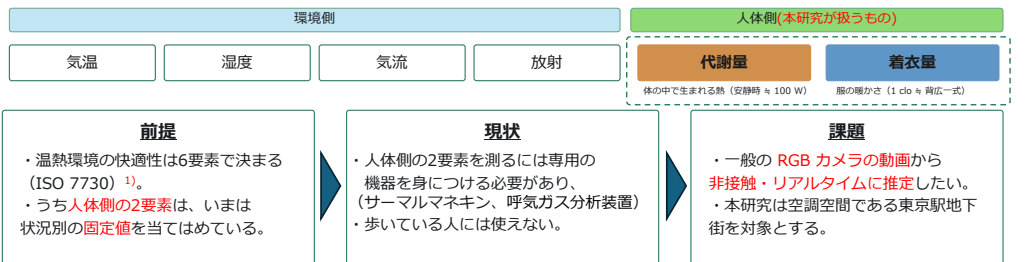
目次

1	はじめに	研究背景／本研究のゴール／推定の流れ／研究の全体像／既往研究
2	研究概要	着衣スタイルの分類と学習データ／歩行時の着衣量の補正／東京駅地下街の撮影
3	研究方法	東京駅路上調査／荷物重量／インナーウェア／被験者実験／サーマルマネキン実験
4	研究結果	荷物の重量／インナーウェア／運動量と代謝量／サーマルマネキン実験
5	推定結果	代謝量推定／着衣量推定とクロ値の補正／地下街の快適性評価
6	まとめ	本研究のゴール／まとめ／参考文献

研究背景：温熱環境の6要素

環境側 4 要素と人体側 2 要素

PMV は6つの要素で決まる。環境側の4要素はセンサーで測れるが、人体側の2要素は非接触計測機器では測定が困難。



本研究の目的

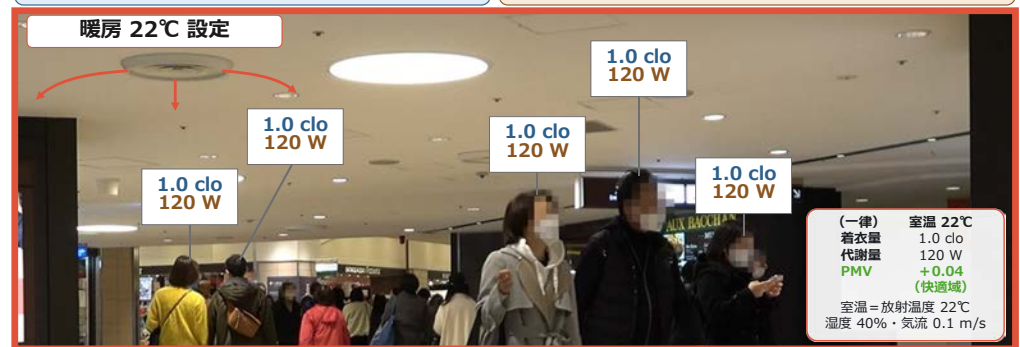
一般の RGB カメラの動画から、歩行速度に応じた着衣量・代謝量を**非接触で推定**し、**地下街の快適性を評価**する。

研究背景：東京駅地下街（八重洲）の空調の現状

いまの設計：全員を同じ着衣量・代謝量とみなす（イメージ）

着衣量 (clo) : 全員 **1.0 clo** (アウターなし)

代謝量 (W) : 1.2 met 約 **120 W** (立って安静)



✓ 全員を同じ値とみなす制御から、ひとりずつの着衣量・代謝量にもとづく制御へ。

※ 室温22℃ は地下街の暖房設定²⁾。
※ 1.0 clo・1.2 met は ASHRAE 55³⁾ のアウターなしの冬の服装・立って安静の値。

本研究のゴール（イメージ）

通行者ひとりずつの着衣量と代謝量

着衣量 (clo) : カメラ画像から推定 (5名分)

代謝量 (W) : 歩行速度から推定 (5名分)

暖房の室温設定 22℃ → 18℃ (4℃ 下げると快適域へ)

歩行速度・代謝量は仮定値

カーディガン
0.77 clo
3.6 km/h
176 W

アウター
1.89 clo
3.5 km/h
194 W

コート
1.89 clo
3.8 km/h
184 W

ダウン
1.89 clo
3.7 km/h
206 W

コート
1.89 clo
3.2 km/h
165 W

5人の平均の PMV
室温 22℃ のまま
PMV = +0.98
(やや暖かい)
↓
室温 18℃ に制御
PMV = +0.47
(快適域)
(着衣量 1.67 clo
代謝量 185 W
湿度 40%
気流 1.0 m/s)

ひとりずつの着衣量と代謝量をカメラで推定し、暖房の設定温度を決める。

※ PMV は 5人の平均の着衣量・代謝量で計算 (室温 = 放射温度 = 設定温度。相対湿度 40% は p.4 の設計条件と同じ、気流は 1.0 m/s)。

5 / 26

推定の流れ

動画から代謝量まで

体重・衣服・荷物荷重・歩行速度から運動量を求める。

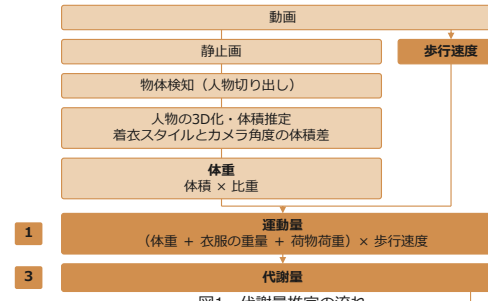


図1 代謝量推定の流れ

動画から着衣量まで

着衣スタイルを判定してクロ値を読み取る。

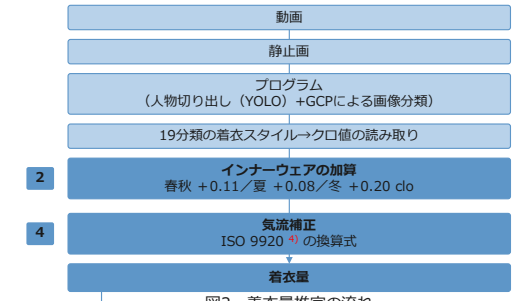


図2 着衣量推定の流れ

代謝量は体重・衣服・荷物・歩行速度から、着衣量はクロ値に2つの補正をかけて求める。

6 / 26

研究の全体像

4つの調査の役割

荷物 インナー 被験者 マネキン PMV

1 荷物の重量調査

歩行者が持つ荷物を、種類ごとに実測する。

→ 8種類の平均重量 (374 個)



2 インナーウェア調査

下着を含まないインナーウェアのクロ値を、季節ごとに調べる。

→ 春秋 +0.11 / 夏 +0.08 / 冬 +0.20 clo



3 被験者実験

運動量と代謝量の関係式を、日本人で測り直す。

→ 推定式 (R² = 0.72)



4 サーマルマネキン実験

ISO 9920 の換算式が妥当かを、実測で検証する。

→ 気流で clo 値が下がることを確認



5 地下街の PMV 評価

4つの係数を推定モデルに入れて、八重洲地下街の冬季の快適性を評価する。



7 / 26

既往研究

既往研究の一例

画像から PMV を組み立てた例、代謝量の規格、日本人の実測、機械学習による推定の4件を見る。

金子ら (2022) ⁵⁾

目的：画像解析で PMV を求め、空調を制御する

方法：AI で人流・客層 (性別・年代・着衣量・代謝量) を計測しフィードフォワード制御

結果：快適な温熱環境と省エネルギーを両立した

本研究での扱い：画像から PMV を組み立てる筋道は成立。

代謝量は歩行・停止の2状態、着衣量は半袖・長袖・厚着の3区分

久山ら (2020) ⁷⁾

目的：日本人の代謝量が規格値と合うかを確かめる

方法：若年日本人 男女 45 名の代謝量を実測し規格値と比較する

結果：全被験者で推定値が基準値より低い。

歩行時の性差は見られない

本研究での扱い：日本人向けに測り直す。

本研究の被験者実験がこれにあたる

ISO 8996 (2021) ⁶⁾

目的：作業時の代謝量の推定方法を規定する

方法：歩行速度と体重・荷重から代謝量を計算する

結果：水平で均等な道・2.5~5.0 km/h・荷重 20 kg 以下で 235~360 W

本研究での扱い：この推定式の考え方をうい、

被験者実験で日本人向けに検証する

富田ら (2025) ⁸⁾ / Liu ら (2022) ⁹⁾

目的：熱画像から入室者の温冷感・活動量を推定する

方法：富田ら 熱画像 4,848 枚を CNN で3群に分類。

Liu ら 映像から肌と衣服の領域を特定

結果：温冷感 90.6%、着衣領域 96.2%、活動 3 段階 95.6%

本研究での扱い：いずれも段階の判定にとどまる。

連続値で推定した例ではない

接触計測や RGB カメラを用いた研究はあるが、着衣量と代謝量を連続値で非接触推定した例はほとんどない。

8 / 26

着衣スタイルの分類と学習データ

着衣スタイル 19 分類

表1 各着衣スタイルと学習データの変更 ²⁾

画像	分類名	2023年	2024年	画像	分類名	2023年	2024年
	1.半袖Tシャツ+長ズボン	650枚	1,000枚		9.スーツスタイル(ジャケット)	650枚	650枚
	2.スーツスタイル(半袖シャツ)	650枚	1,000枚		10.スーツスタイル(長袖シャツ)	650枚	1,000枚
	3.半袖シャツ+短パン	650枚	571枚		11.カーディガン+長ズボン	550枚	648枚
	4.半袖Yシャツ+長ズボン	525枚	525枚		12.長袖Yシャツ+長ズボン	550枚	550枚
	5.ワンピース(半袖)	550枚	550枚		13.長袖+長ズボン	550枚	550枚
	スーツスタイル(腕まくり)	650枚			14.ジャケット(薄手)+長ズボン	500枚	500枚
	6.コート	550枚	550枚		15.ジャケット(フォーマル)+長ズボン	550枚	550枚
	7.アウター	550枚	850枚		16.ジャケット(ウィンドブルーフ)+長ズボン	550枚	550枚
	8.ダウン	550枚	550枚		17.パーカー+長ズボン	550枚	550枚
					18.黒		550枚

学習データは 2023年 のべ 10,425 枚、2024年 のべ 11,694 枚。
2024年は判別を誤りやすい分類の枚数を増やした。

- ✓ 季節を通した着衣の変化に対応できるよう、着衣スタイルを **19** 分類（18分類+その他）とした。

9 / 26

歩行時の着衣量の補正（ISO 9920）

歩行時にクロ値が下がる理由と換算式

歩くとき服のまわりの空気が動き、クロ値が下がる。ISO 9920 ⁴⁾ の換算式で補正する。

停止時



空気の層：厚い
服のまわりの空気が
ほとんど動かない
→ 断熱の層になる

歩く

歩行時



空気の層：薄い
前から風が当たり、
服の中の空気も
入れ替わる
→ 断熱が下がる

・標準または軽装 ($0.6 \text{ clo} < I_{cl} < 1.4 \text{ clo}$) 半袖・長袖・ジャケット・スーツなど
 $I_{Tr} = \exp [-0.281 (v_{ar} - 0.15) + 0.044 (v_{ar} - 0.15)^2 - 0.492 v_w + 0.176 v_w^2] \times I_T$ ……式(1)

・防寒具着用 ($2.0 \text{ clo} < I_T$) ダウン・コート・アウターなど、空気を通しにくい防寒着
 $I_{Tr} = \exp \{ [-0.0512 (v_{ar} - 0.4) + 0.794 \times 10^{-3} (v_{ar} - 0.4)^2 - 0.0639 v_w] \times p^{0.144} \} \times I_T$ ……式(2)

v_w : 空気速度 [m/s] v_w : 歩行速度 [m/s] p : 通気性 ($p=1$)
 I_T : 全断熱性 [clo] I_{cl} : 固有着衣断熱性 [clo]

- 4 サーマルマネキン実験 気流速度と clo 値の関係を実測した。

- ✓ 歩くとき服の断熱が下がるため、歩行時のクロ値は ISO 9920 の換算式で補正する。

10 / 26

東京駅地下街（八重洲）の撮影

撮影の概要

東京駅八重洲地下街で、10か月・計42日、定点で動画を撮影した。

表2 八重洲地下街動画詳細

撮影場所	東京駅八重洲地下街
撮影日	2022年4月～2023年1月
撮影日数	計42日（月4日、平日休日2日ずつ）
時間帯	9：00～、12：30～、16：00～
撮影時間	15分
歩行者数	約430人（動画1本あたり）×42日×3時間帯≒54,000人



図5 撮影風景（赤丸：定点カメラ）



八重洲地下街の動画

- ✓ 10か月・計42日の定点動画から、男女各**90名**を分析対象とした。

11 / 26

研究方法：東京駅路上調査

調査の概要

東京駅周辺の公共道路で、荷物の重量調査とインナーウェア調査を計4回実施した。

表3 路上調査の詳細

日程	6/5（荷物の重量調査のみ）、 8/20、10/20、12/8
時間	9：00～、12：00～、16：30～
場所	東京駅周辺公共道路
対象者	20代、30・40代、50・60代 （各時間30人程度）
粗品	QUOカード300円、ボールペン、カイロ
方法	・体重計で荷物の重さを量る。 ・鞆を複数持っている場合は、1つずつ量る。 ・インナーウェアは指差してアンケートに答えてもらう。



図6 調査の様子



指差しボード

- ✓ 計4回の調査で、重量調査 延べ **366名**・インナーウェア調査 延べ **328名**から回答を得た。

※ 調査前に、弁護士と最寄りの警察署に相談済み。

12 / 26

研究方法：荷物の重量調査

荷物の種類（8種類）

地下街の動画分析¹⁰⁾の4種類（リュック・斜め掛け・片掛け・トート）に、4種類を加えて計8種類とした。

追加



図15 荷物の種類（8種類）

荷物の数

4回の調査で、男性 156 個・女性 218 個、計 374 個を量った。鞆を複数持つ人は、1つずつ量った。

表4 荷物の総数

	春 (6/5)	夏 (8/20)	秋 (10/20)	冬 (12/8)	合計
男性	25	49	44	38	156
女性	29	52	74	63	218

✓ 4回の調査で 374 個（男性 156・女性 218）を測定し、種類ごとの平均重量を求めた。

13 / 26

研究方法：インナーウェア調査の人数

集計できた人数

1回あたり男女それぞれ50名前後、3つの年代がほぼ均等になった。



表5 インナーウェア調査人数

	夏 (8/20)				秋 (10/20)				冬 (12/8)			
	20代	30・40代	50・60代	合計	20代	30・40代	50・60代	合計	20代	30・40代	50・60代	合計
男性	18	16	16	50	19	22	12	53	21	17	20	58
女性	18	14	17	49	17	20	22	59	24	18	17	59

回答者の内訳

男女の差は 6 名、年代の差も最大 13 名にとどまった。

328 名
男性 161 名／女性 167 名

✓ 3季で計 328 名（男性 161／女性 167）から回答を得た。

14 / 26

研究方法：被験者実験

実験の概要

運動負荷装置と呼吸代謝測定装置を用い、20～60代の男女23名の代謝量を実測した。

表7 代謝量実測の詳細

日程	11/20、26日、27日、28日
被験者	20代男性3名 30・40代男女5名ずつ 50・60代男女5名ずつ
測定内容	着座 (10分間) 歩行 3km/h (15分間) 4km/h (15分間) 5km/h (15分間)
被験者への注意事項	前日に夜更かしをしない。 測定開始の2時間前から食事、激しい運動を行わない。
服装	ジャージ



図8 呼吸代謝測定装置



図9 被験者実験の様子

表6 被験者のデータ（平均 ± 標準偏差）

	男性13名	女性10名
年齢	41 ± 15	49 ± 8
身長	170 ± 7	160 ± 4
体重	65.7 ± 7.8	57.3 ± 6.1
BMI	22.7 ± 2.0	22.4 ± 2.3

測定の流れ

着座で安静を保ち、歩行速度を3条件に設定して代謝量を測定した。



✓ 23名の代謝量を、歩行速度3条件で運動量と対応づけて測定した。

15 / 26

研究方法：サーマルマネキン実験

実験の目的と条件

地下通路など不特定多数が通過する空間の空調を最適化するには、歩行者の着衣量を想定する必要がある。着衣量は歩行による相対気流を受けるため、気流が clo 値に与える影響を実測した。

第一実験（作用温度 × 風速）

人工気候室内に作用温度 4 条件（18・22・25・28℃）、相対湿度 50% に設定し、風速 3 条件（0.16・0.67・1.19 m/s）で、女性用パンツスーツ（標準服）の clo 値の変化を調べた。
1.19 m/s は歩行時を想定した。

第二実験（12 種類の着用条件）

スーツスタイルにおける 12 種類の着用条件を設定し、作用温度 25℃、相対湿度 50%、風速 3 条件（第一実験と同じ）における clo 値の変化を調べた。
実施場所は日本女子大学 人間環境系実験室。

実験の様子



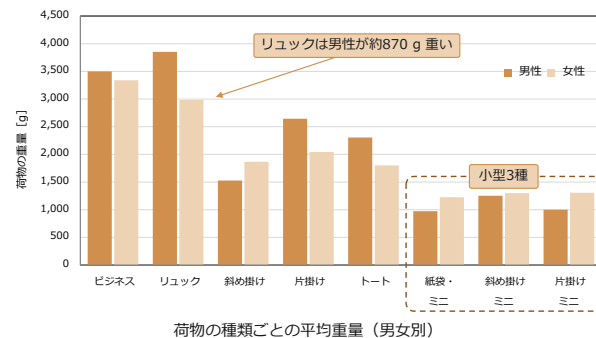
図10 サーマルマネキン実験風景

✓ 気流が clo 値に与える影響を、作用温度と着衣条件を変えて実測した。

16 / 26

研究結果：荷物の種類別の平均重量

種類ごとの平均重量（男女別）



男女の差

大型（リュック）は男性が
+870 g

小型3種は女性が
+203 g

荷物の数

種類	男性	女性
リュック	75	34
斜め掛け	15	13
片掛け	14	37
トート	14	73
ビジネス	21	9
紙袋・ミニ	6	30
斜め掛けミニ	5	13
片掛けミニ	1	8
その他・分類不明	5	1
合計	156	218

リュックなど大型の鞆では男性が重く、ミニバッグなど小型の鞆では女性が重い傾向が見られた。

✓ 女性は小型の鞆でも、一定重量の必需品を常時携行していると考えられる。

17 / 26

研究結果：インナーウェアのクロ値

年代別・季節ごと

年代を3つに区切り、それぞれ夏・秋・冬の順に並べた。

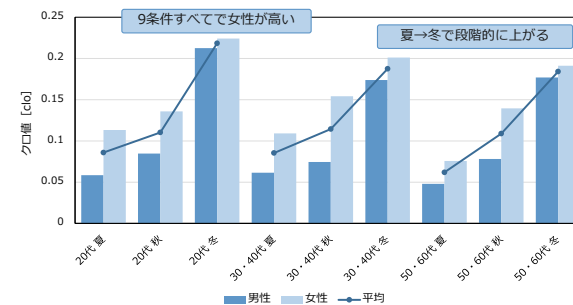


図16 インナーウェアの年代別・季節ごとの平均クロ値

どの年代でも夏→秋→冬と段階的に上がり、上がり幅は20代がいちばん大きい。

✓ 9条件すべてで女性が高く、夏→冬で平均 **+0.12 clo** 上昇した。

18 / 26

研究結果：運動量と代謝量の関係

運動量と代謝量の相関

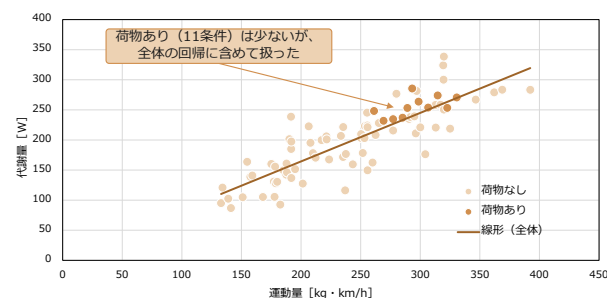


図17 運動量と代謝量の相関関係

代謝量の推定式

代謝量 [W]
 $= 0.8067 \times (\text{体重} + \text{荷物荷重 [kg]})$
 $\times \text{歩行速度 [km/h]} + 3.0054$

相関の強さ

決定係数 R^2
0.7197
相関係数 $R = 0.848$
LOSO でも $R^2 = 0.7196$ 。

運動量の増加とともに、代謝量も直線的に増加した。

✓ 荷物荷重を含めた運動量から、歩行時の代謝量を推定する。

19 / 26

研究結果：サーマルマネキン実験

作用温度と風速による全身 clo 値

標準服で、作用温度 4 条件・風速 3 条件を測った。

表12 作用温度と風速条件による全身clo値の変化 (clo)

作用温度	気流条件 0.16m/s	気流条件 0.67m/s	気流条件 1.19m/s
28℃	0.52	0.33	0.24
25℃	0.53	0.35	0.26
22℃	0.57	0.39	0.30
18℃	0.58	0.39	0.30

標準服の気流速度と clo 値

作用温度 25℃ での標準服（条件A：女性用パンツスーツ）。

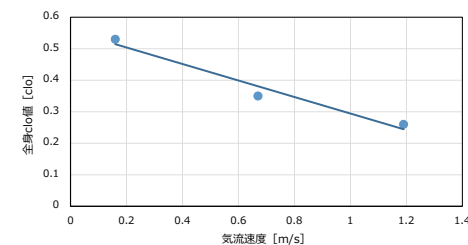


図20 標準服（条件A）の気流速度と全身 clo 値の関係

気流による clo 値の変化

作用温度による差は小さく、気流の影響が大きい。

✓ 作用温度によらず、気流速度が上がると全身 clo 値は下がる。

気流速度と clo 値の関係

$\text{clo 値} = -0.26 \times \text{気流速度} + 0.56$ ($R^2 = 0.96$)

20 / 26

推定結果：代謝量推定に用いた条件

荷物の種類の内訳

男女各 90 名が持っていた荷物 147 個の内訳。

表14 荷物の種類の内訳

	ビジネス	リュック	斜め掛け	斜め掛けミニ
男性	3	29	13	1
女性	6	11	10	9
	片掛け	片掛けミニ	手持ち (トート)	手持ち (紙袋、ミニ)
男性	8	0	11	0
女性	15	3	18	10

分析対象

動画18本（6区分×朝・昼・夕）
1本あたり男女5名ずつ → 区分ごとに男女15名
計 男女各90名・持っていた荷物 147 個

※ 体重は人体部分の体積 × 比重で求める。衣服の重量は表13、荷物は種類別の平均重量を使う（内訳は表14）。

✔ 男女各 90 名の推定体重に衣服と荷物を加え、 $y = 0.8067x + 3.0054$ で代謝量を求めた。

21 / 26

着衣スタイルごとの衣服の重量

考慮していなかった衣服の重量を推定体重に加える。

表13 着衣スタイルごとの衣服の重量

	衣服の重量 [g]
1 半袖Tシャツ+長ズボン	760
2 スーツスタイル(半袖シャツ)	720
3 半袖シャツ+短パン	670
4 半袖Yシャツ+長ズボン	720
5 ワンピース(半袖)	500
6 コート	1,940
7 アウター	1,670
8 ダウン	1,590
9 スーツスタイル(ジャケット)	1,610
10 スーツスタイル(長袖シャツ)	950
11 カーディガン+長ズボン	1,360
12 長袖Yシャツ+長ズボン	950
13 長袖+長ズボン	910
14 ジャケット(薄手)+長ズボン	1,570
15 ジャケット(フォーマル)+長ズボン	1,080
16 ジャケット(ウィンドブレーク)+長ズボン	1,250
17 パーカー+長ズボン	1,110
18 黒	—
19 その他	—

推定結果：代謝量推定

区分ごとの平均推定代謝量

全体と、季節・平日休日の6区分を並べた。

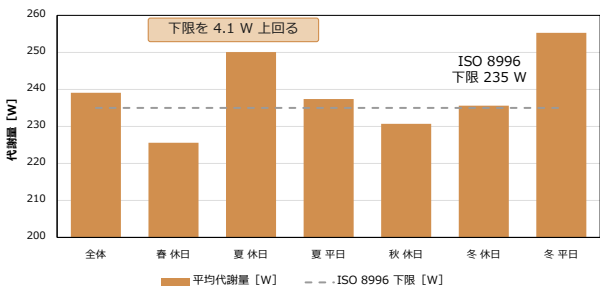


図 平均推定代謝量比較

※ 縦軸は 200~260 W を拡大。上限 360 W は図の外。日本人の代謝量は ISO 8996 の基準値より低い傾向がある⁷⁾。

✔ 平均 239.1 W。ISO 8996 の下限 235 W を 4.1 W 上回る。

22 / 26

ISO 8996 の基準値

歩行速度 2.5~5 km/h のときの範囲。

基準の範囲

235~360 W

推定した平均代謝量

男女各90名の推定結果。

239.1 W

平均歩行速度 4.4 km/h
平均体重 64.2 kg

区分別では 225.6~255.3 W。
下限をまたいでいる。

推定結果：着衣量推定とクロ値の補正

各着衣スタイルのクロ値（抜粋）

基準値にインナーウェアの加算値を足し、歩行時は ISO 9920 ⁴⁾ の換算式で補正する。

表16 各着衣スタイルのクロ値（抜粋）

	基準値	春、秋	春、秋歩行時	夏	夏歩行時	冬	冬歩行時
半袖Tシャツ+長ズボン	0.34	0.45	0.32	0.42	0.30	0.69	0.49
スーツスタイル(長袖シャツ)	0.49	0.60	0.43	0.57	0.41	1.08	0.77
カーディガン	0.88	0.99	0.71	0.96	0.69	1.19	0.85
ジャケット(フォーマル)+長ズボン	0.99	1.10	0.79	1.07	0.76	1.99	1.89
コート	1.79	1.90	1.81				
		夏 (6~8月)		秋 (9~11月)		冬 (12月)	
歩行者の平均クロ値 [clo]		0.56		0.84		1.63	

クロ値の補正量

従来の一律の加算値を季節別に置き換え、さらに歩行時の気流で補正する。

インナーウェアの加算値

従来：季節によらず一律 +0.09 clo
→ 春秋 +0.11/夏 +0.08/冬 +0.20 clo

歩行時の気流補正 (ISO 9920 ⁴⁾)

停止時より 0.09~0.34 clo 下がる。
防寒着は下がり方が小さい (0.09~0.10 clo) 。

✔ インナーウェアの加算と歩行時の気流補正で、着衣スタイルごとのクロ値を実態に近づけた。

※ インナーウェア調査は夏・秋・冬の3季。春季は未測定のため、中間期（秋）の値を適用した。
※ 季節ごとの平均クロ値：25日分（延べ 7,343 人）を人数で重み付け。4・5月の動画は使っていない。

23 / 26

推定結果：地下街の快適性評価

防寒着の有無と 12/13 の実態による快適範囲

PMV が -0.5~+0.5 に入る室温の範囲を、3つの場合で比べた。

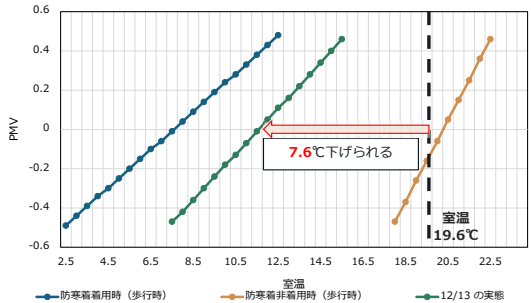


図22 防寒着あり・12/13 の実態・防寒着なしの快適範囲

※ 12/13 の実態：163 名（うち防寒着 104 名）の平均クロ値から算出。

✔ 12/13 の実態では、室温を 19.6℃ から 12.0℃ まで 7.6℃ 下げられる（全員が防寒着なら 11.6℃）。

24 / 26

3つの場合の条件と快適範囲

室温（=放射温度）・湿度は12月13日の実測。
代謝量・気流速度（歩行速度）は男女各90名の平均。

表17 地下街の温熱環境と快適範囲（冬季）

	防寒着あり	12/13 の実態	防寒着なし
歩行時の着衣量 [clo]	1.89	1.49	0.66
PMV (室温 19.6℃)	1.18	0.94	-0.14
快適範囲 [°C]	2.5~12.5	7.5~15.5	18.0~22.5
PMV≒0 の室温 [°C]	8.0	12.0	20.5

共通：代謝量 135.7 W/m²・湿度 23.8%・気流 1.2 m/s

調整できる室温（12/13 の実態）

19.6℃ から PMV≒0 の 12.0℃ まで。

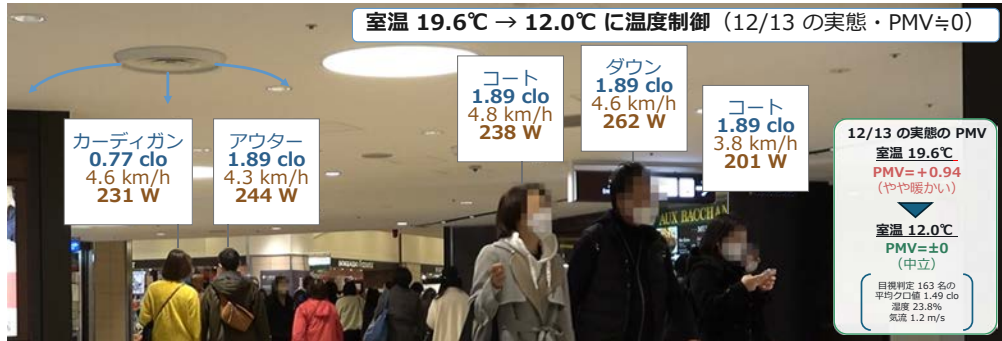
12/13 の実態で下げられる温度	PMV +0.5 までなら 4.1℃ 全員が防寒着なら 11.6℃
7.6℃	

本研究のゴール（暖房時の結果）

12/13 の地下街の実態で求めた室温（結果）

着衣スタイル：表1 の19分類から判定
着衣量（clo）：服の暖かさ（1 clo ≒ 背広一式）

歩行速度（km/h）：動画から求める
代謝量（W）：体の中で生まれる熱（安静時 ≒ 100 W）



✓ 12/13 の実態なら室温を 19.6℃ → 12.0℃ に 7.6℃ 下げられる（PMV +0.5 までなら 4.1℃）。

※ 写真は p.5 と同じ例示。PMV は 12/13 の実態（目視 163 名の平均 1.49 clo・歩行時）で計算。

25 / 26

まとめ

- ✓ 荷物 374 個、インナーウェア 延べ 328 名、被験者 23 名を実測し、推定に使う係数を整備した。
- ✓ 歩行時のクロ値は換算式で 0.09～0.34 clo 下がり、サーマルマネキン実験でも気流で clo 値が下がった。
- ✓ 男女各 90 名の平均推定代謝量は 239.1 W。ISO 8996 の 235～360 W の範囲に入った。
- ✓ 12/13 の実態から室温を 19.6℃ → 12.0℃ に 7.6℃下げられる可能性あり（全員が防寒着なら 11.6℃）（PMV≒0 まで）。

参考文献

- 1) ISO 7730, Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2025
- 2) 田中葵ら：機械学習による画像分析を用いた着衣量推定に関する研究－推定プログラムによる地下街評価－、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.189-192、2025.9
- 3) ANSI/ASHRAE Standard 55-2023, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, 2023
- 4) ISO 9920, Ergonomics of the thermal environment — Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble, 2007
- 5) 金子研ら：ららぼーと名古屋みなとアルクスにおける AI による解析を利用した快適性を損なわない省エネルギー空調の設計と実施、空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集、第23号、pp.137-140、2022.03
- 6) ISO 8996, Ergonomics of the thermal environment — Determination of metabolic rate, International Organization for Standardization, Geneva, 2021
- 7) 久山遼ら：人体温冷感・快適感予測モデルに関する研究（その20）－個人属性を考慮した代謝量推定式の精度検証、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第6巻、p.349、2020.9
- 8) 富田奈歩、項奕銘、田島和、岩泉秀、平松功至、浅野碩光、森谷泰樹、山野井曜、菅野福馬、中川純、田辺新一：熱画像と機械学習を用いた在室者の温冷感推定法に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第90巻 第833号、pp.291-299、2025.07
- 9) Jinsong Liu, Isak Worre Foged, Thomas B. Moeslund : Clothing Insulation Rate and Metabolic Rate Estimation for Individual Thermal Comfort Assessment in Real Life, Sensors 22, 619, pp.1-20, 2022.01
- 10) Aoi Tanaka, Riho Miyazaki, Jeongsoo Kim : A Study on Metabolic Rate Estimation in Underground Shopping Malls Using Machine Learning-Based Image Analysis, Indoor Air 2026, ID 10324, pp.830-832, 2026

26 / 26