

陸屋根に水平に設置される太陽光発電パネルの風荷重低減効果を利用した環境調和型防水システムの提案

Development of an environmentally harmony type waterproofing system utilizing the wind load reduction effects of photovoltaic panels horizontally installed on flat roofs

佐藤 公亮 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)
植松 康 秋田工業高等専門学校 校長・工博

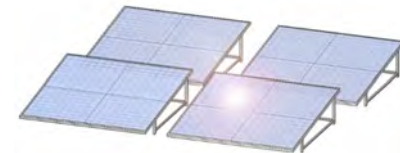
1

本研究の目的

- 機械的固定工法防水システム：有機溶剤の使用量が少ない→**環境配慮型**シートをディスクで**点状に固定**するため、応力集中により強風被害が生じる
- 太陽光発電(PV)システム：CO₂排出量が少ない→**環境配慮型**一般に、屋根面に対して20°から30°の勾配で設置されるが、逆風時の風力が大きくなる。



機械的固定工法防水システム



PVシステム

研究の目的

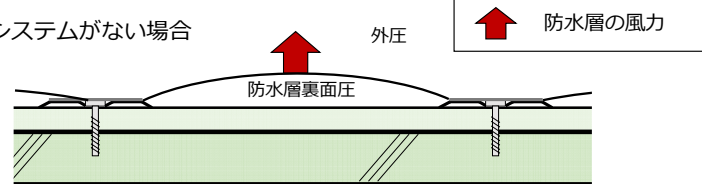
耐風性に問題を抱える防水システム及びPVシステムを組み合わせることで**低コストで耐風性が高く、環境的に優れたシステムを提案する**

2

本システムの特長1

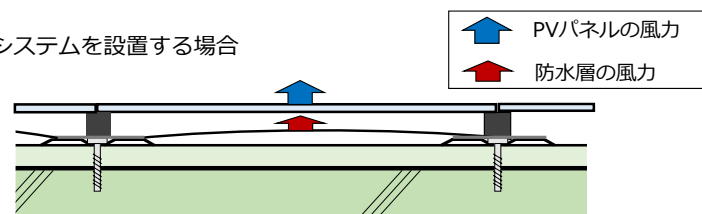
①防水シートの固定ディスクとPVパネルの固定金具を併用

●PVシステムがない場合



システムに作用する全ての風力を防水層が負担

●PVシステムを設置する場合

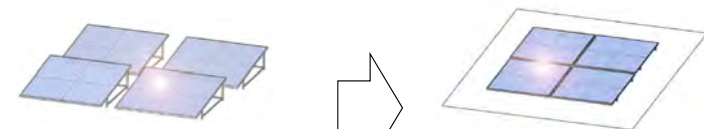


防水層が負担する風力の一部をPVパネルが負担する

3

本システムの特長2

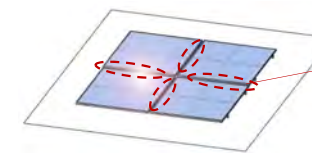
②PVパネルを屋根面に平行に設置することでパネルに作用する風力を低減



傾斜型PVシステム
一般に20°~30°の勾配で設置される。一方、逆風時の風力が大きくなる。

屋根平行型PVシステム
受圧面積を抑え、風力を低減する。構造的に強度を上昇。

③PVパネル間に隙間を設けて「等圧効果」を利用する



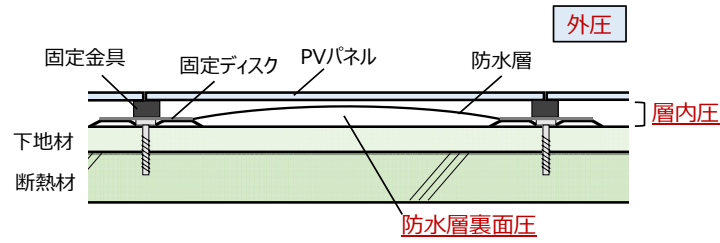
屋根平行型PVシステム

PVパネル間に隙間を設けて、空気
の通り道を作り「等圧効果」を利用

PVパネルに作用する風力を低減

4

風荷重低減効果の検証方法



層内圧：PVパネルと防水システム間の圧力

風洞実験

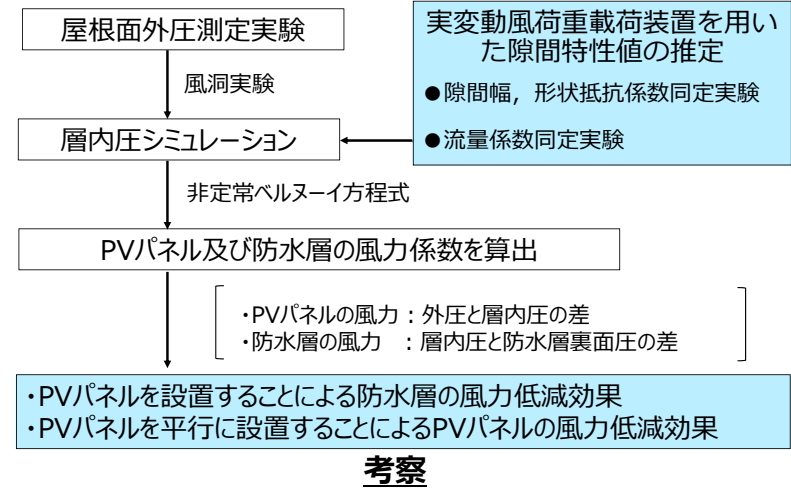
シミュレーション

$$\text{PVパネルの風力係数} = \text{外圧係数} - \text{層内圧係数}$$

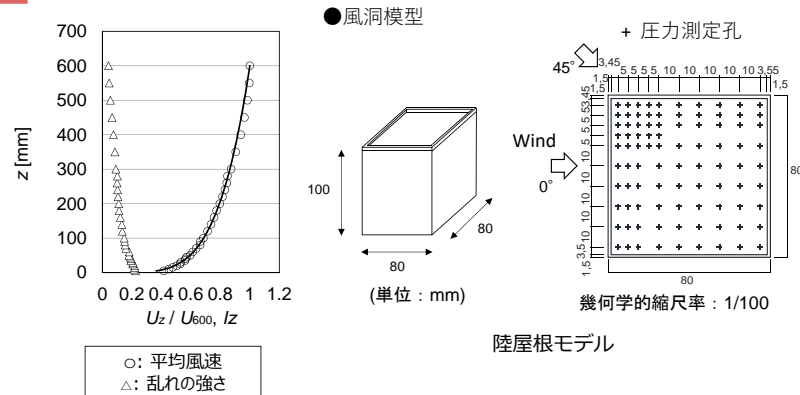
風洞実験によりPVパネル上面の圧力(外圧係数)を求める

実験では求めることができない層内圧は非正常ベルヌーイ方程式を用いたシミュレーションにより求める

研究フロー



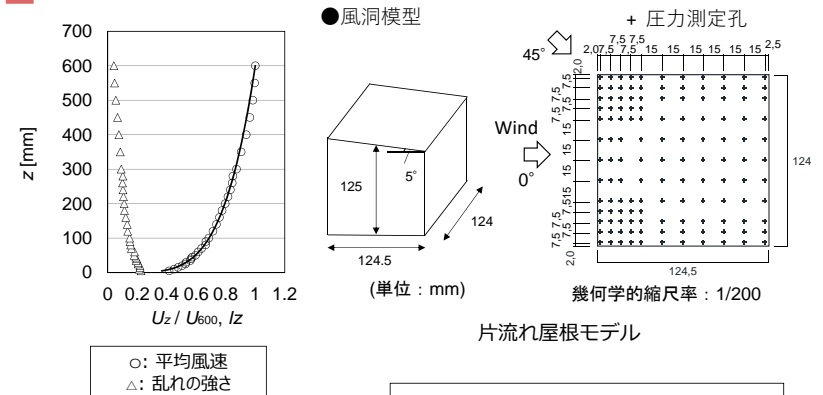
実験気流及び対象とする建物(陸屋根モデル)



パラペット(厚さ15cm)高さ15cmと30cmの2種類のモデルを想定

風速 (屋根平均高さ)	8 m/s
べき指数	$\alpha=0.21$
サンプリング周波数	800Hz

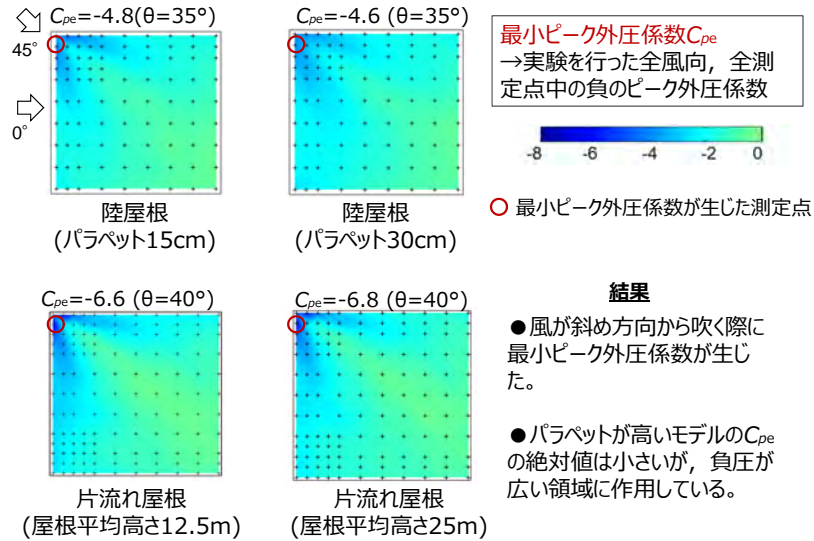
実験気流及び対象とする建物(片流れ屋根モデル)



屋根平均高さ12.5mと25mの2種類のモデルを想定

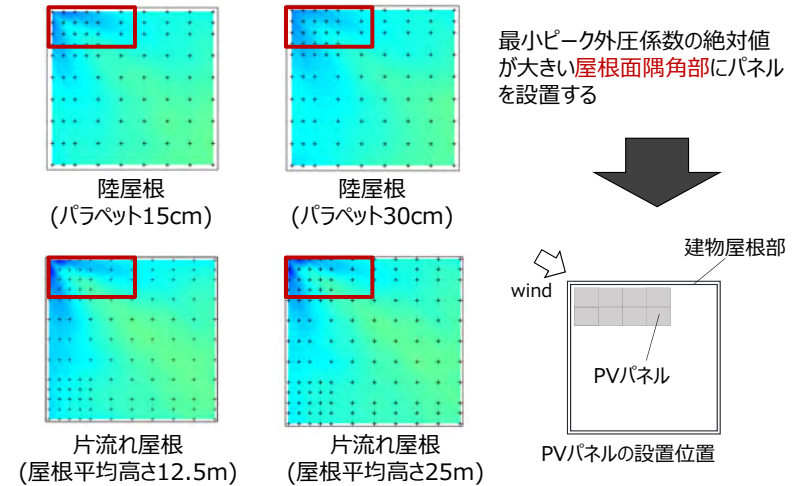
風速 (屋根平均高さ)	8 m/s
べき指数	$\alpha=0.21$
サンプリング周波数	800Hz

最小ピーク外圧係数が生じたときの圧力分布



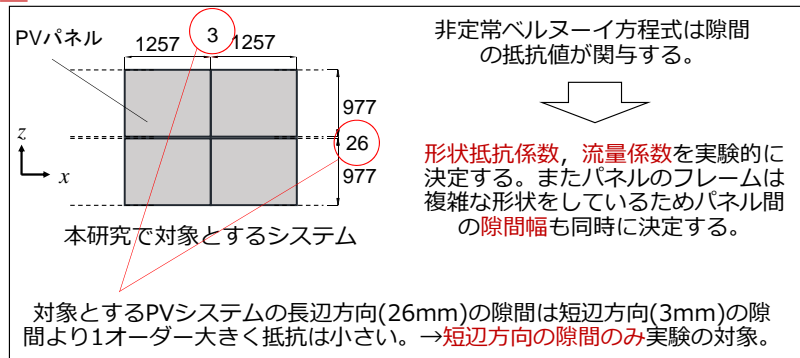
9

PVパネルの屋根面設置位置

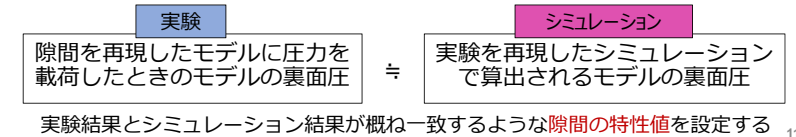


10

隙間特性値同定実験 概要



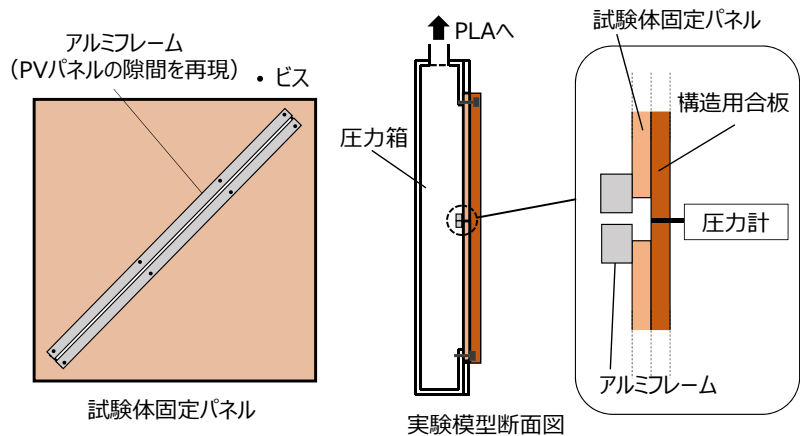
隙間の特性値 推定方法



11

隙間特性値(形状抵抗係数 C_{Lr} 等価な隙間幅 D_e)実験方法

実験には時々刻々変化する圧力を载荷できる動風圧载荷装置PLAを用いる。
入力荷重は風洞実験で得られた風圧時刻歴を用いる。



12

隙間特性値(形状抵抗係数 C_L , 等価な隙間幅 D_e)のシミュレーション

非定常ベルヌーイ方程式を応用したシミュレーション式

$$[\dot{U}_e] = \frac{q}{\rho l_e} [C_e] - \frac{q}{\rho l_e} [C_i] - \frac{C_L}{2l_e} [U_e | U_e] - \frac{p_f}{\rho l_e}$$

ただし $p_f = 64 \frac{\nu l_e \rho}{D_e^2} |U_{i,j}|$

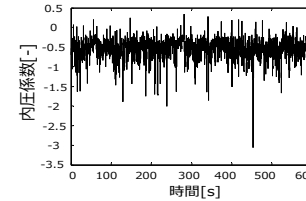
- | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| U_e : 流速 [m/s] | l_e : 隙間の深さ [m] |
| q : 速度圧 [Pa] | C_L : 形状抵抗係数 [-] |
| ρ : 空気密度 [kg/m ³] | ν : 動粘性係数 [m ² /sec] |
| C_e : 外圧係数 [-] | D_e : 等価な隙間幅 [m] |
| C_i : 内圧係数 [-] | |

実験で求まる外圧係数を入力値とし
等価な隙間幅及び形状抵抗係数の値を変えていき、
実験で測定される内圧係数と等しくなるよう、隙間の特性値を決定

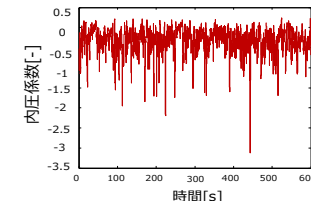
隙間特性値(形状抵抗係数, 等価な隙間幅)実験結果

非定常ベルヌーイ方程式を応用したシミュレーション式

$$[\dot{U}_e] = \frac{q}{\rho l_e} [C_e] - \frac{q}{\rho l_e} [C_i] - \frac{C_L}{2l_e} [U_e | U_e] - \frac{p_f}{\rho l_e}$$



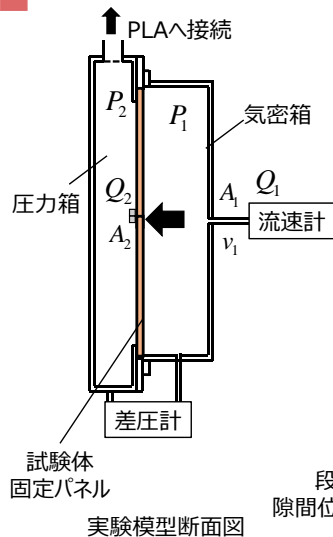
(a) PLAを用いた実験で得られた内圧係数



(b)非定常ベルヌーイ方程式を用いて
計算された内圧係数
($C_L=1.42$, $D_e=3\text{mm}$ とした場合)

形状抵抗係数 $C_L=1.42$, 等価な隙間幅 $D_e=3\text{mm}$ と決定

隙間特性値同定実験(流量係数 α)



流速計位置での流量(Q_1)と実物大システムの
隙間位置での流量(Q_2)は等しい(連続の式)

$$Q_1 = v_1 A_1$$

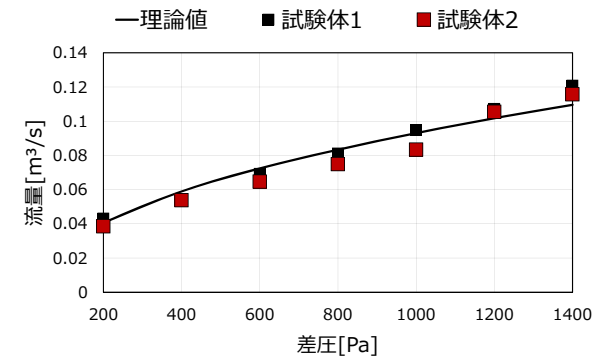
$$Q_2 = \alpha A_2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \alpha A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

$$Q_1 \approx Q_2$$

- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| v : 流速 [m/s] | ΔP : 差圧 [Pa] |
| A : 断面積 [m ²] | P : 圧力 [-] |
| α : 流量係数 [-] | |

段階式圧力を作用させ、得られる実験の流量と
隙間位置での流量の値が等しくなるよう流量係数を求める

隙間特性値同定実験(流量係数 α) 結果



$\alpha = 0.55$ とした場合
実験により求まる流量を概ね再現できている

シミュレーション式 (内圧と外圧の関係式)

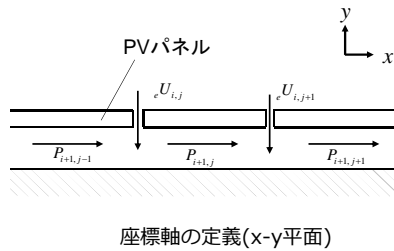
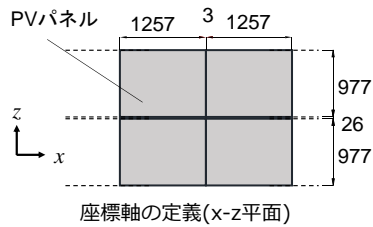
① x軸方向 $\frac{\rho l_{i,j} \dot{U}_{i,j+1}}{q} = C_{i,j} - C_{i,j+1} - \frac{1}{2q} C_{L,i,j} \rho U_{i,j+1} |U_{i,j+1}| - \frac{P_{f,x}}{q}$

② y軸方向 $\frac{\rho l_{i,j} \dot{U}_{i,j}}{q} = C_{i,j} - e C_{i,j} - \frac{1}{2q} C_{L,e} \rho U_{i,j} |U_{i,j}| - \frac{P_{f,e}}{q}$

③ z軸方向 $\frac{\rho l_{i,j} \dot{U}_{i,j+1}}{q} = C_{i,j} - C_{i,j+1} - \frac{1}{2q} C_{L,i,j} \rho U_{i,j+1} |U_{i,j+1}| - \frac{P_{f,z}}{q}$

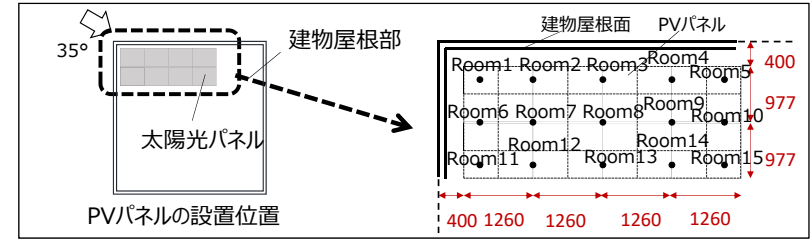
④内圧の時間変化量 $\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma P_0}{V_0} \sum Q$

l_e : 有効長さ[m]
 U : 各方向の流速[m/sec]
 q : 速度圧[Pa]
 $C_{e,i,j}$: 外圧係数[-]
 $C_{i,j}$: 内圧係数[-]
 $P_{f,f}$: 摩擦による圧力損失[Pa]
 C_L : 形状抵抗係数[-]
 P : 圧力[Pa]
 γ : 比熱比[-]
 P_0 : 大気圧[Pa]
 V_0 : 仮想室の体積[m³]
 Q : 流量[m³/s]



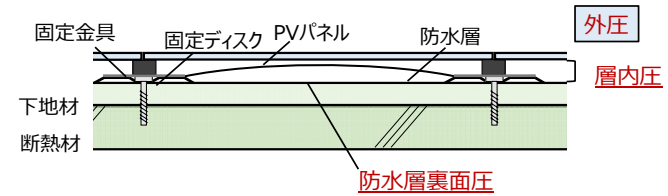
17

PVパネルのピーク風力の算定方法



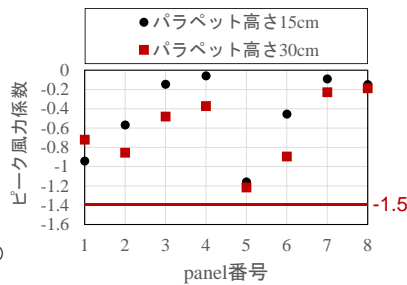
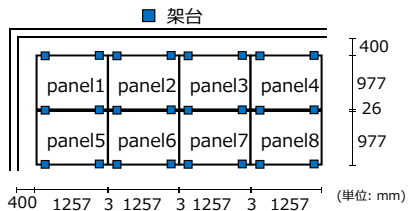
PVパネルのピーク風力の算定方法

風力係数 $C_f = \text{外圧係数}(C_{pe}) - \text{層内圧係数}(C_{pi})$



18

PVパネルの風力係数



JIS C 8955で示される風力係数はPVパネルを隙間0で設置したときの風力係数である。したがってJISの値と比較することでパネル間に隙間を設けることによる風力低減効果の検討を行う

JISによる風力係数(JISC 8955より引用)

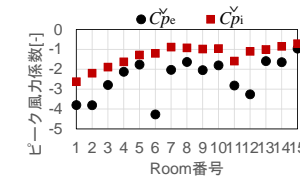
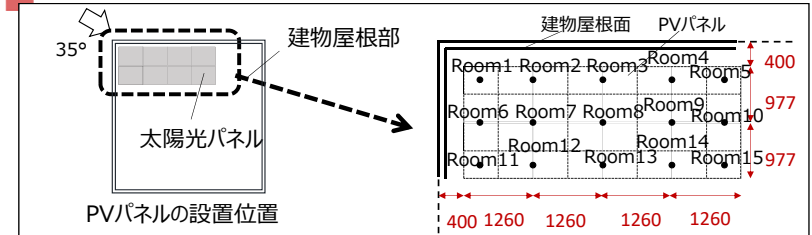
設置形態	風力係数の近似式	太陽電池傾斜角度
陸屋根モデル (負圧, 端部アレイ)	$C_a = 0.6$	$\theta \leq 10^\circ$

JISC8955で示される風力係数は「等価静的風力係数」である。したがって、ガスト影響係数(2.5)を乗じて、 $C_a=1.5$ である。

⇒ 本研究で対象としたシステムのピーク風力係数の絶対値の方が小さく、パネル間に隙間を設けることによる風力低減効果が期待

19

防水層の風力係数



陸屋根モデル(パラペット15cm)

C_{pe}^v : ピーク外圧係数(PVパネルが無い時の防水層のピーク風力係数)

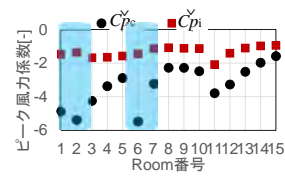
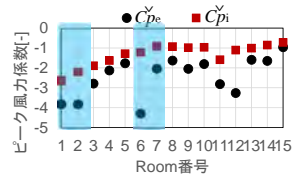
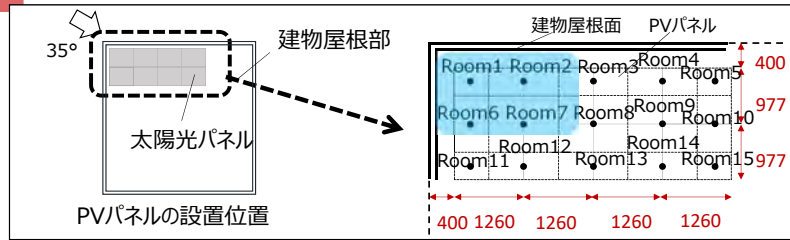
C_{pi}^v : ピーク層内圧係数(PVパネルを設置した時の防水層のピーク風力係数)

片流れ屋根モデル(屋根平均高さ25m)

ピーク層内圧係数の絶対値がピーク外圧係数の絶対値より小さい。→防水層の風力低減効果が期待される

20

防水層の風力係数

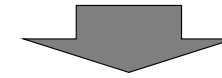


屋根面隅角部でピーク外圧係数とピーク層内圧係数の差が大きい。
→防水層の風力低減効果は屋根面隅角部で大きい

21

まとめ

- PVパネルを屋根面に平行にかつ隙間を設けて、さらに機械的固定工法防水システムと併用することで風力低減に効果的なシステムを提案した。
- その有効性を風洞実験並びにシミュレーションに基づき、検証した。



- パネル間に隙間を設けることでPVシステムに作用する風力が低減された。
- 特に屋根面隅角部に設置したパネルや防水層の風力が大幅に低減された。
- PVパネルを機械的固定工法防水システムと組み合わせることによる防水層の風力低減効果を確認した。

結論

本システムを応用することで**低コスト**で**耐風性が高く**、**環境的に優れた**システムを提案できる。

22

自律型IoTセンサリングシステムによる、 屋内外不均一環境場のリアルタイム評価と その応用に関する研究

Study on real time evaluation of indoor and outdoor nonuniform
environmental field and its application using autonomous IoT sensing system

小林 光
東北大学 大学院工学研究科
都市・建築学専攻 准教授

目次

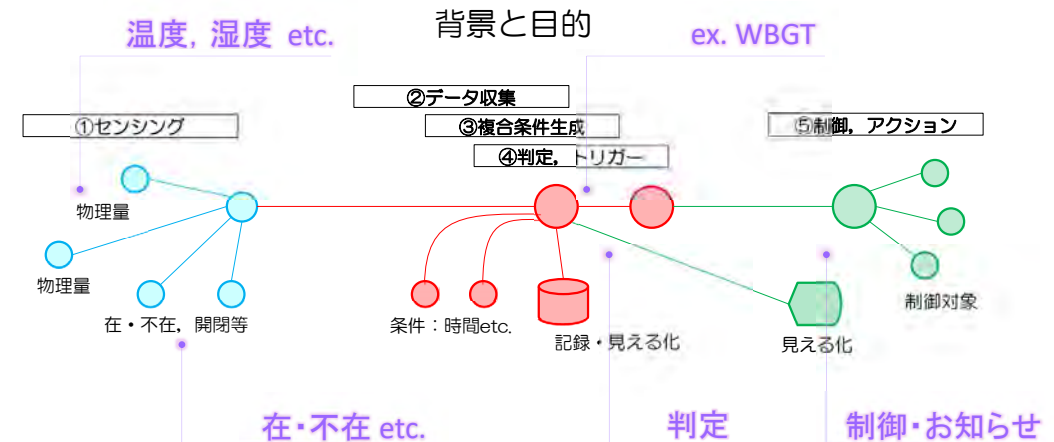
- ・背景と目的
- ・WITS (Wired IoT System)の概要, 構成
- ・計測及び制御に係る規格の構築
- ・システム(ソフト)構成
- ・フィールドにおけるシステムの実証試験
- ・まとめ

背景と目的

本研究は、独自に構築したIoTセンサリングシステムを用いた、建築内外の不均一環境の計測とリアルタイム評価の実現、及び、環境の管理・制御等の応用の可能性の検討を目的とした。

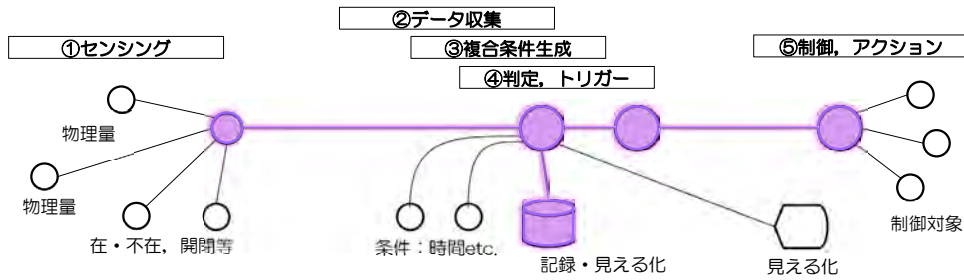
筆者らは、計測と制御のプラットフォームとなるIoT技術の中核としたセンサリングシステムを企画した。建築環境に関する研究、実務の経験に基づき、IoT技術によって多種の計測を統合して、計測+評価+制御を飛躍的に簡単化、便利化、効率化する事を意図した。

本研究では、このシステムを強化し、運用できるセンサ・制御群を開発。建築環境の多種・多点計測を実施し、建築環境分野での簡易なIoT技術利用の可能性を検討した結果を報告する。



制御等を行う際の条件として、温度、湿度等の環境パラメータ、在不在その他の運用系パラメータなど複数のパラメータを“複合した条件”を利用したい場合は多い。しかし①多種のセンシング、②データ収集、③複合条件の計算、④判定、⑤制御系、は別々のプラットフォームにあって統合されておらず案外簡単ではない。

背景と目的

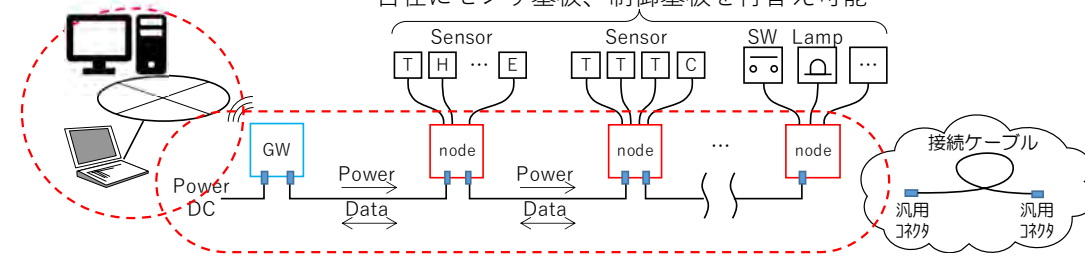


筆者らは単純で簡単に使えるIoTシステム **WITS (Wired IoT System)** を開発。本研究ではWITSをベースに運用できるセンサ群, 制御群(発停, 点灯etc.)を開発し, 不均一な建築環境の多種・多点計測を実施し, 更に評価や制御を試行することで **建築分野での簡単なIoT利用の可能性を検討**することを旨とした。

WITS の概要

WITSは電源供給を伴う有線を基本とする。**無線化は必要最小限として, 有線式で得られるメリットを最大化しながら, 従来に比べて飛躍的に手軽で“総合的に簡単である”**ことを方針とする。

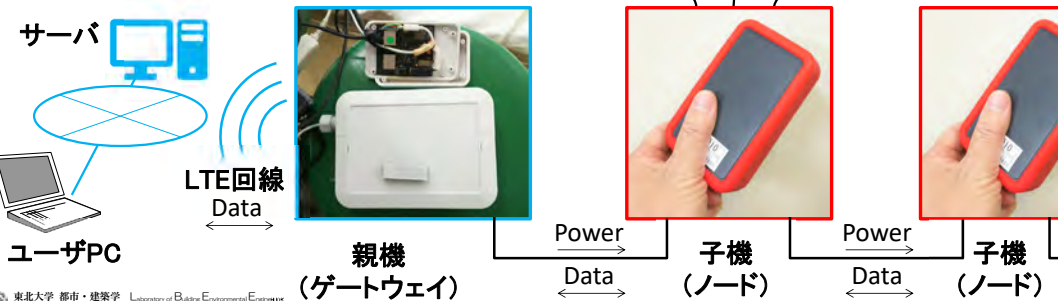
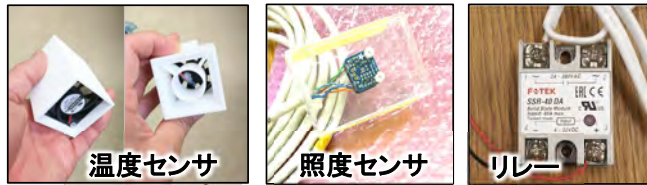
WITSを統括するサーバ



WITS: 基本的に有線で構築するシステム

WITS の構成

有線で親機と子機を結ぶラインを基幹として子機にセンサ類を接続。情報は親機からLTE回線でサーバに送り, サーバで記録・処理。有線で給電するためノイズに強くランプや小型ファン等も駆動可能。



WITS 規格の構築

WITS規格概要(ハード仕様)

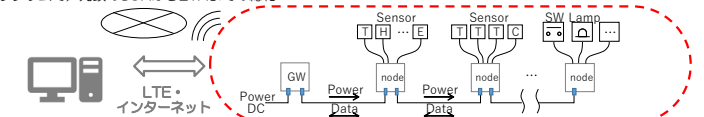
Wired IoT Systemは、有線でIoTデバイスを接続する為の仕様	
通信仕様	P2PのRS-422 半2重通信
通信速度	115.2kbps と 921.6kbpsに対応する。
通信距離	無給電でトータル800mまで (ケーブルのインピーダンスによる)
電源電圧	9V~24V GWには24Vを供給

WITSデータフレーム

SOH (1Byte)	STX (1Byte)	LENGTH (1Byte)	COMMAND (1Byte)	NodeID (1Byte)	DATA (1~200Byte)	DLE (1Byte)	ETX (1Byte)	SUM (2Byte)
OX01	OX02					OX10	OX03	DLE~ETX までの総和

SOH : Start of Heading
STX : Start of Text
LENGTH : COMMAND~DATAの最後までのByte数
COMMAND : 制御コマンド
NodeID : 接続時にGWから指定されるデバイス番号で, 接続後はこのNodeIDで指定される。
DATA : DATE設定, 数値, 日時など。
ETX : End of Text
SUM : 16Bitチェックサムで, 先頭のSOHからETXまでの総和

オンサイトのワイヤードシステムを成立させる各種規格・規約の設定が必要になる。



WITS 規格の構築

WITSコマンド

コマンド名	通信方向	説明	COMMAND	NodeID	Data部
Device確認	WGW → Device Device → Device	Device確認を受信したDeviceは、後続Deviceの有無を通知する。	0X10	0X00	—
Device確認応答	Device → WGW Device → Device	Device確認を受信し、後続の新しいDeviceが存在する場合はACKを返す。新しいDeviceから、DeviceIDとサポートする機能、通信速度を返信する。	0X11	0X00	ACK：あり NAK：なし ESC：切断 DeviceID VendorID Device 返信情報
Device追加	WGW → Device Device → Device		0x20	0X01 ~0XFF	0X00 Device 設定情報
Device追加応答	Device → WGW Device → Device		0x21	0X01 ~0XFF	ACK/ NAK
Device出力	WGW → Device Device → Device	Device出力指示	0X30	0X01 ~0XFF	0X00 Device 指示情報
Device出力応答	Device → WGW Device → Device	Device出力レスポンス	0X31	0X01 ~0XFF	ACK/ NAK
Device入力	WGW → Device Device → Device	Device入力指示	0X40	0X01 ~0XFF	0X00 Device 指示情報
Device入力応答	Device → WGW Device → Device	Device入力レスポンス	0X41	0X01 ~0XFF	ACK/ NAK データ 情報

NodeID : デバイス上で設定されたID
VendorID : 製造者のID 0X00000000~0xFFFFFFFFまでは、WITSから発行されたもの、0xFFFFFFFF00~0xFFFFFFFFFFまでは、試験及び研究開発用
DeviceID : 製造者にて1モデルに、1IDを割り振る。

新たなセンサ, リレー等の追加

WITSサポートタイプ

0	GPIO出力1	0:Low 1:High	16	[...]	[...]
1	GPIO出力2	0:Low 1:High	17	[...]	[...]
2	GPIO出力3	0:Low 1:High	18	[...]	[...]
3	GPIO出力4	0:Low 1:High	19	温度	4Byte温度×100℃符号付整数
4	GPIO入力1	0:Low 1:High	20	湿度	4Byte湿度×100%符号付整数
5	GPIO入力2	0:Low 1:High	21	気圧	4Byte
6	GPIO入力3	0:Low 1:High	22	[...]	[...]
7	GPIO入力4	0:Low 1:High	23	[...]	[...]
8	Analog出力1	4Byte	24	[...]	[...]
9	Analog出力2	4Byte	25	[...]	[...]
10	Analog出力3	4Byte	26	[...]	[...]
11	Analog出力4	4Byte	27	[...]	[...]
12	Analog入力1	4Byte	28	[...]	[...]
13	Analog入力2	4Byte	29	[...]	[...]
14	Analog入力3	4Byte	30	[...]	[...]
15	Analog入力4	4Byte	31	[...]	[...]

新たなセンサ,
リレー, 電圧入
力などを追加

GPIO (デジタル) : General Purpose Input/Output

接続するセンサや情報の種別を予め設定しておくことで、センサ類の接続時にはその種別を判断。設定不要。

WITSシステム (ソフト) の強化

WEB画面によるデータ表示例

計測値による装置制御 (発停) 条件設定

計算式の設定

計算式: 温度 (上限) 30.000 (下限) 25.000

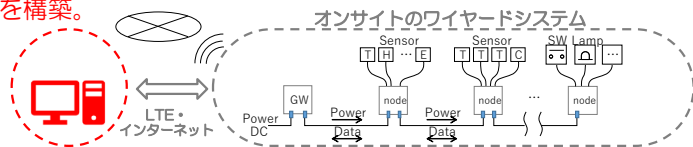
計算式の種類: 温度, 湿度, MRT, OT, PMV, 照度, 電圧

監視するノード: [選択]

通知先のノード: [選択]

測定データ複数
による計算, 条
件による制御機
能を追加

サーバは情報記録と処理, 簡易な制御指令等を行う。計測値を用いた複合的的判断, 簡易な制御やアラートの発信などを可能とするプログラムを構築。



実フィールドにおけるシステムの実証試験



N研究所 (宮城県)



Kハウス (宮城県)

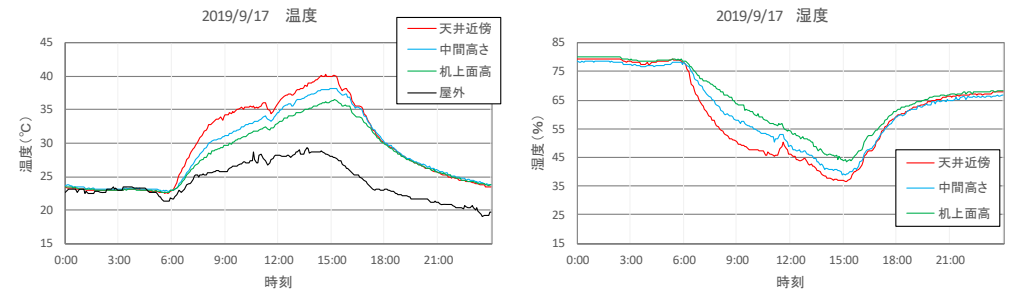
システムの検証を兼ね, 2つのフィールドで温湿度他の測定にWITSを使用した

Kハウスにおける測定と簡易制御

温度、湿度、照度、日射量の測定を試行し、これら測定値を条件とした屋根散水を試行。



Kハウスにおける測定と簡易制御



Kハウスにおける測定結果一例

サーバに蓄積したデータをダウンロードしてグラフ化。サーバにプログラムを組めば、画面上でのグラフ表示も可能になる。

まとめ

- 今回の助成により、初めて多数ノードを製作するとともに、判定と制御用のプログラムをサーバ上に構築し、2カ所でフィールドテストを実施した。
- 多種のセンサ、簡易な制御などを行うIoTシステムのフレームワークと一定の実証までを実現。現場にサーバを置かずに極めて簡易な計測と制御の利便性を確認した。
- 一方、多数ノードをリリースにする計測制御ラインの構築については、装置開発的な難しさも把握された。
- 今後、本研究の成果として、WITS規格及び知見を公開することを計画する。

ご清聴ありがとうございました

地域の脱炭素に向けた需要-創エネのマッチングモデルの開発

2021年10月29日

赤司泰義 (東京大学, 教授)

林 鍾衍 (Kangwon National Univ., Assistant Professor) *1

陳 薇安 (National Cheng Kung Univ., Researcher) *2

*1: 当時、東京大学, 助教

*2: 当時、東京大学, 博士課程3年

1

背景と目的

■ 背景

- 建築・都市分野における脱炭素化の強い社会的要請
- 省エネ (需要) や創エネ (供給) の高度なエネルギー利用の計画と導入
 - 省エネと創エネにはそれぞれ時間的・空間的な偏りがある。
 - 高度なエネルギー利用の計画と導入には、省エネと創エネのマッチングを図る必要がある。

■ 目的

- 地域規模の建物のエネルギー需要と創エネ賦存量の予測に基づいた、創エネ利用可能量の最大化を図るための手法の開発
- ここでは、その第一段階として、予測モデルの開発
 - ① 高度な統計モデリングにより地域特性を加味した建物のエネルギー需要予測
 - ② 都市に広く賦存し、検討が未だ不十分な下水管における下水熱利用ポテンシャル予測
 - ✓ 下水管での下水熱利用は、ある場所での利用がその下流域に影響を与えるという意味で、大規模な最適化問題に相当



一般財団法人 大成学術財団 第3回 研究成果発表会(2021.10.29)

2

本研究で開発したモデル

■ 建物のエネルギー需要の予測モデル

- モデルの説明変数に建物規模や用途別床面積割合、立地条件を取り上げ、それらのパラメータに確率分布を導入した確率的予測モデル

■ 下水熱利用ポテンシャルの予測モデル

- 網目状に敷設された都市部の下水配管を対象に、雨水と建物排水を考慮した下水量と下水温度の時空間変化の予測モデル

地域の脱炭素に向けた需要-創エネマッチングモデルの開発

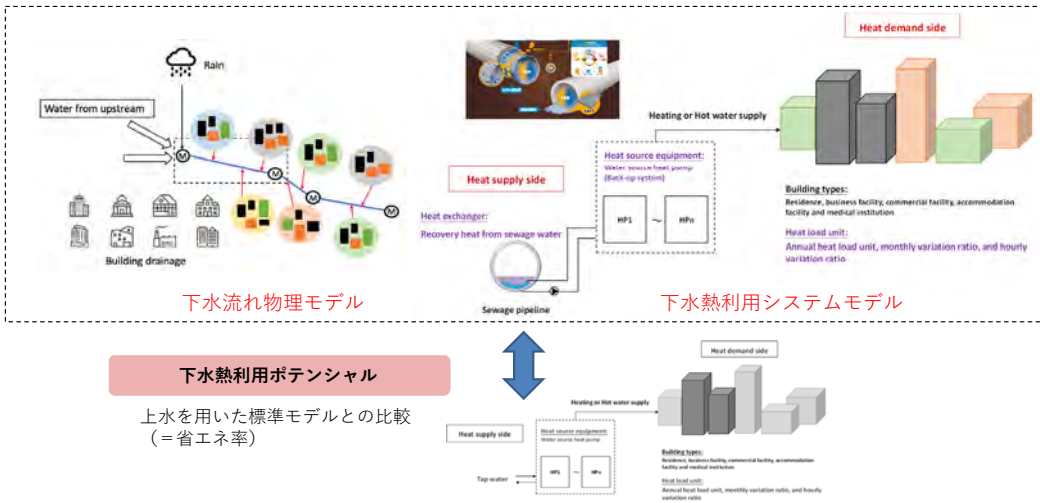
(1) 建物のエネルギー需要の予測	(2) 下水熱利用ポテンシャルの予測
<ul style="list-style-type: none">• データ整備• 推定モデルの構築• モデルパラメータの推定• 推定結果・提案モデルの有効性検討	<ul style="list-style-type: none">• 下水流れの解析モデル推定モデルの構築• 都市下水状態予測結果• 下水熱利用システムモデルの構築• 下水熱利用ポテンシャルのシミュレーション結果

3

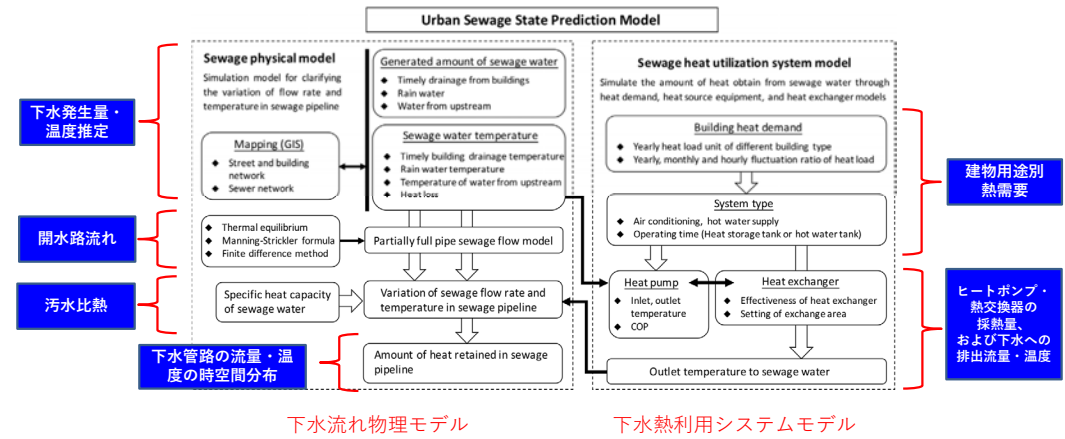
下水熱利用ポテンシャルの予測

4

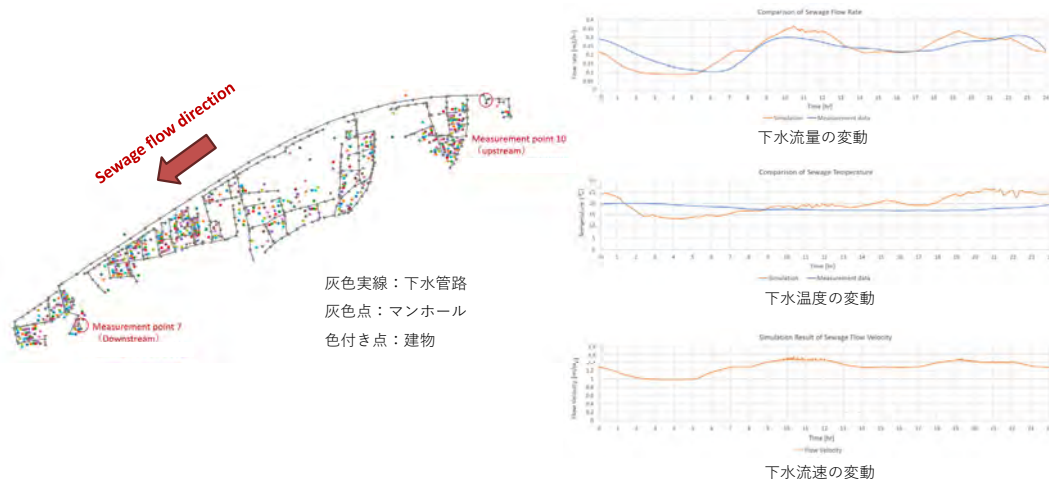
下水流れ/下水熱利用システムと下水熱利用ポテンシャル



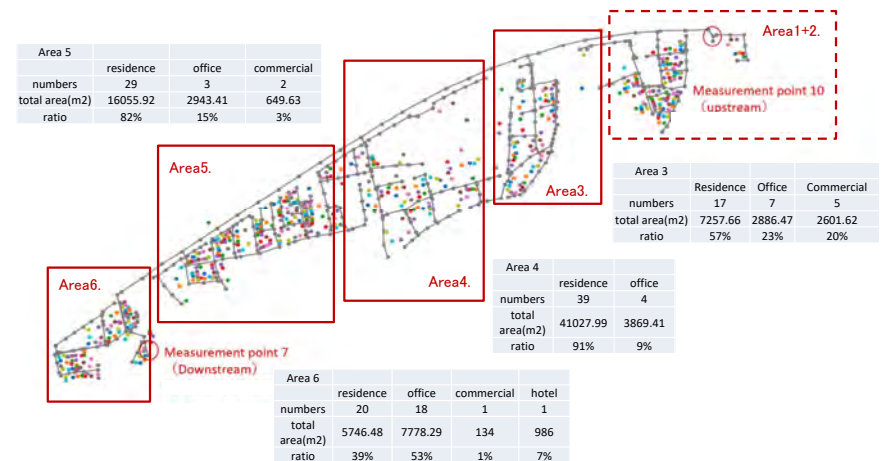
予測モデルの概要



予測モデルの検証



検討対象地域

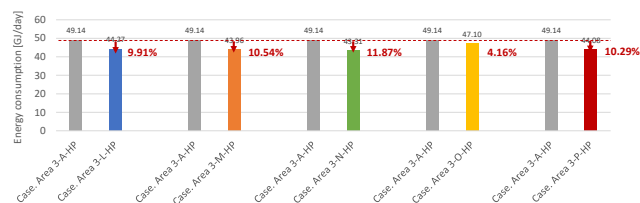


ケーススタディ (1)

■ Area3: 建物規模と下水熱導入率

- 下水熱利用の有効性を確認（特に大規模建物への導入）。
- Case NとCase Pから、必ずしも全ての建物で下水熱利用すれば良いわけではないことが示唆。下水熱利用による下水温度低下でHP性能も低下。

Case	Area 3-A-HP	Area 3-L-HP	Area 3-M-HP	Area 3-N-HP	Area 3-O-HP	Area 3-P-HP
Utilization rate of large-scale buildings	0%	100%	50%	100%	0%	100%
Utilization rate of small-scale buildings	0%	0%	100%	50%	100%	100%
Sewage heat utilization potential	Standard case	9.91%	10.54%	11.87%	4.16%	10.29%



一般財団法人 大成学術財団 第3回 研究成果発表会(2021.10.29)

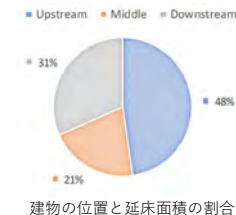
9

ケーススタディ (2)

■ Area3: 建物位置と下水熱導入率

- 下水熱利用の場所を上流、中流、下流で検討。
- 下水熱を広く利用することでより大きい省エネが期待できるが、Case QとCase Sから、下水熱利用の場所によって下水熱利用ポテンシャルが異なる可能性（ただし、以下は延床面積の違いがある）。

Case	Area 3-A-HP	Area 3-Q-HP	Area 3-R-HP	Area 3-S-HP	Area 3-P-HP
Utilization rate of upstream	0%	100%	0%	0%	100%
Utilization rate of middle	0%	0%	0%	100%	100%
Utilization rate of downstream	0%	100%	100%	100%	100%
Sewage heat utilization potential	Standard case	9.49%	4.43%	7.35%	10.29%



一般財団法人 大成学術財団 第3回 研究成果発表会(2021.10.29)

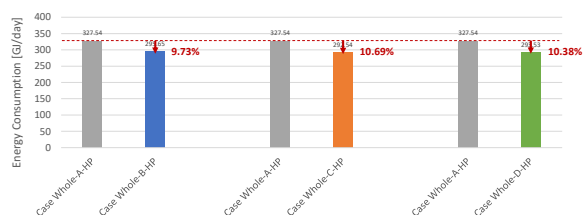
10

ケーススタディ (3)

■ Area3-6: 下水熱の広域利用と導入率

- 下水熱利用の過度な導入は下流の下水温度を下げ、下水熱利用ポテンシャルの期待した増加につながらない可能性。

Case	Whole-A-HP	Whole-B-HP	Whole-C-HP	Whole-D-HP
Utilization rate of Area 3	0%	50%	80%	100%
Utilization rate of Area 4	0%	50%	80%	100%
Utilization rate of Area 5	0%	50%	80%	100%
Utilization rate of Area 6	0%	50%	80%	100%
Sewage heat utilization potential	Standard case	9.73%	10.69%	10.38%



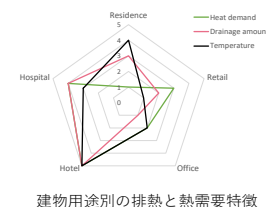
一般財団法人 大成学術財団 第3回 研究成果発表会(2021.10.29)

11

ケーススタディ (4)

■ Area3-6: 建物用途の特性と配置、導入率

- 建物用途における下水熱利用上の特性
 - 住宅は他用途の建物よりも数が多く（地域による）、かつ温度の高い排水と安定的な排水量をもつ。
 - ホテルや病院は熱需要が大きく、排水温度も高い。売店とオフィスは熱需要が小さく、排水温度も低い。



	Residential		Retail		Office		Hotel		Hospital		Sewage heat utilization potential
	Up*	Down*	Up	Down	Up	Down	Up	Down	Up	Down	
Case T	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	Standard case
Case U (Proposal case)	0%	100%	0%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	8.6%
Case V (Contrary case)	100%	0%	100%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	3.7%

*Up means upstream, Down means downstream

一般財団法人 大成学術財団 第3回 研究成果発表会(2021.10.29)

12

まとめと今後の課題

■ まとめ

- ▶ 地域規模の建物のエネルギー需要と創エネ賦存量の予測に基づいた、創エネ利用可能量の最大化を図るためのモデルを開発した。
 - 建物のエネルギー需要の予測モデル
 - 下水熱利用ポテンシャルの予測モデル
- ▶ 下水熱利用ポテンシャルの予測モデルによるケーススタディを通じて、下水熱利用システムの計画と導入に対する一定の知見を得た。

■ 今後の課題

- ▶ 今回開発した両予測モデルの改良と連携
- ▶ 他の創エネに対する本研究の考え方の適用と展開
- ▶ 個々の建築の集合体としての地域への総合的な創エネ導入計画立案の方法論

備考

(建物のエネルギー需要の予測)

予測モデルの概要

■ 方針

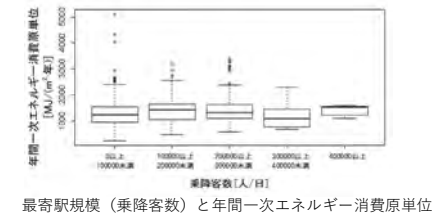
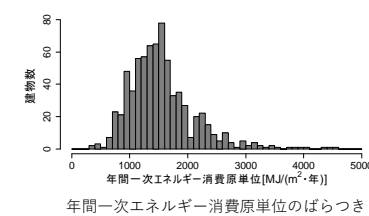
- ▶ 従来の統計データを加工した用途別エネルギー需要の推定手法には改善の余地がある。
- ▶ 同一用途の建物でもエネルギー消費のばらつきが大きく、その原因の仮説として、1) 実建物のほとんどは多用途施設であること、2) 建物規模による影響があること、3) 都心と郊外といった立地に影響されること、を想定し、これらの3つの因子を建物のエネルギー需要予測に組み込むことを考えた。

■ データ

- ▶ 日本ビルエネルギー総合管理技術協会による建築エネルギー消費量調査のデータ、特にデータ数の多い省エネ地域区分6で住所が特定できるもの
 - 2012～2015年度：学習データ、2016年度：テストデータ
 - 建物名、延床面積、用途別床面積割合（1つの建物内における事務所、デパート、店舗といった複数用途の床面積割合）、年間エネルギー消費量（電力、ガス等）

年間一次エネルギー消費原単位のばらつき

■ データ分析



■ 予測モデル

▶ モデル式

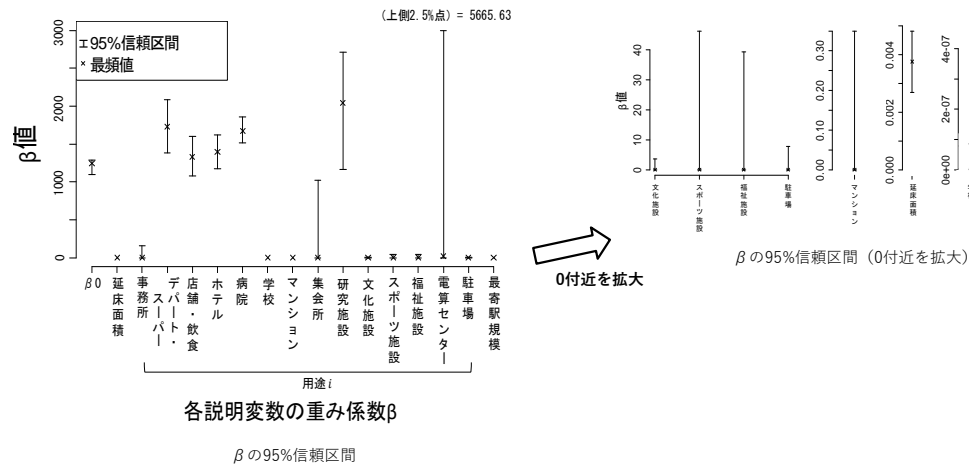
$$\mu = \beta_0 + \beta_a x_a + \sum_i \beta_i x_i + \beta_n x_n$$

ここで、 μ ：消費原単位の期待値[MJ/(m²・年)]、 β_0 ：切片、 β_a ：延床面積の重み係数、 x_a ：延床面積[m²]、 β_i ：用途別床面積割合の重み係数、 x_i ：用途別床面積割合[-]、 β_n ：最寄駅規模の重み係数、 x_n ：最寄駅規模[人数/日]、 i ：用途別床面積割合の建物用途

▶ モデルパラメータの推定

- β の事前分布を無情報事前分布として設定し、 β に対してマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC法)によりサンプリングを行うことで β の事後分布を推定した。

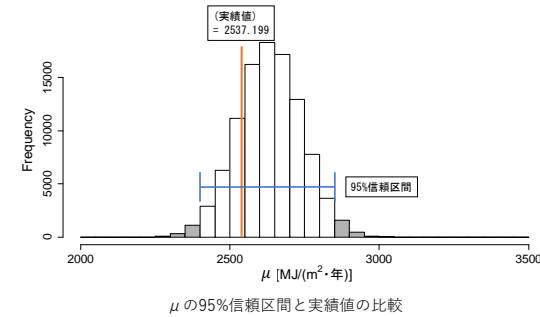
モデルパラメータの推定



17

予測モデルの有効性

- βが収束した前述の変数のみで構成される**テストデータ22件**に限定
 - 最寄駅規模は事後分布の形状が得られずβ値も極めて小さいためβn=0
- βの事後分布から乱数を発生させてβの組み合わせを100,000セット生成し、**各データにおける期待値μのヒストグラム**を作成した。



このデータでは実績値が推定モデルの95%信頼区間に収まっていることが確認できた。

しかし、95%信頼区間に収まっているケースが3件、信頼区間下端より小さいものが15件、信頼区間上端より大きいものが4件となった。

半数以上のテストデータで信頼区間が実績値よりも高く推定されたのは、消費原単位が極めて大きいデータが切片を引き上げたためであると考えられる。

一般財団法人 大成学術財団 第3回 研究成果発表会(2021.10.29)

18



一般財団法人 大成学術財団
第3回 研究成果発表会
(2021.10.29)



排砂バイパスの土砂輸送効率と ダム下流環境影響を踏まえた排砂システムの発展

京都大学防災研究所水資源環境研究センター
角 哲也・竹門康弘・Kantoush Sameh・小林草平・野原大督

国立台湾大学
陳 鵬安・頼 進松・李 豊佐

本研究の目的と構成

- ・ダムの堆砂対策手法としての「排砂バイパストンネル」の技術を発展させるために、日本の自然条件に近い台湾を対象にさらに展開を図る
- ・第3回排砂バイパス国際会議（2019, April 9-12）国立台湾大学への参加
 - ・日本の研究成果・技術開発の発表
 - ・台湾との共同研究の立ち上げ
 - ・国際交流の促進
- ・排砂バイパストンネルを通じたダム下流への土砂供給による河川環境改善効果の評価手法の開発
 - ・宮崎県耳川水系における現地調査（砂州の水質浄化機能の評価）

ダムによる洪水調節と異常洪水への対応



H30 西日本豪雨
R1 東日本台風
R2 球磨川水害

洪水時操作（緊急放流）
守られている社会
限界を超える場合
の情報発信

水力発電は重要な
国産再生可能
エネルギー
あって当たり前
になっていないか？



ダム再生の目指すところ

洪水調節機能の向上と
再エネ（水力）拡大

ダムの長寿命化と
環境対策

永く、賢く、
増やして使う

グリーンなダムに

菅首相施政方針演説（1/18）

- ・災害対策・国土強靱化 → 大雨予測の精緻化、ダムの事前放流
- ・グリーン社会の実現 → デジタル技術によりダムの発電を効率化

ダムの資産を次世代に良好につなぐために

治水
利水（上水・農水・
工水・発電等）

ダムは水を貯める器
社会のニーズに応じて
適応・再編可能
水利権・コスト
アロケーション

利水ダムの治水
協力(事前放流)



ダム本体
コンクリート・ロックフィル
ゲート設備（鋼構造物）
機械設備（開閉装置）
電気設備（ダムコン）

ダム堆砂
ダム湖水質
生物の縦断連続性

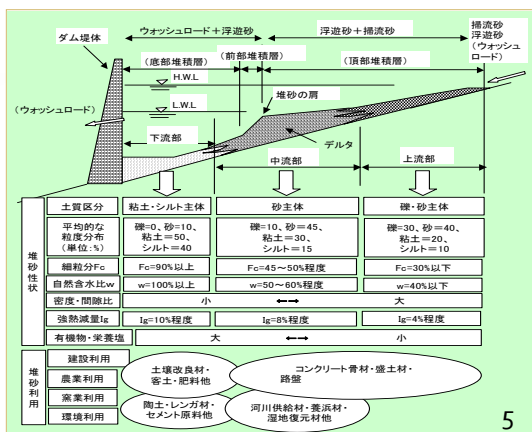
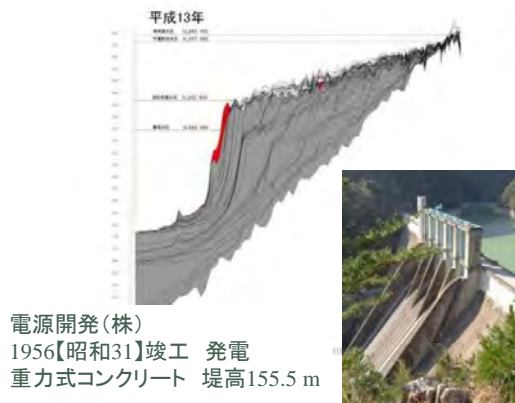
ダムの体力（外力増大に対する耐力（気候変動・地震）
ダムの健康度（経年劣化）

ダムのアセットマネジメント

何故、ダムに土砂が貯まるのか？

- 上流河川から土砂がダム湖に流れ込むと、水深が深くなるに従って流速が落ち、粗いものから順に堆積（分級作用）し「デルタ」を形成

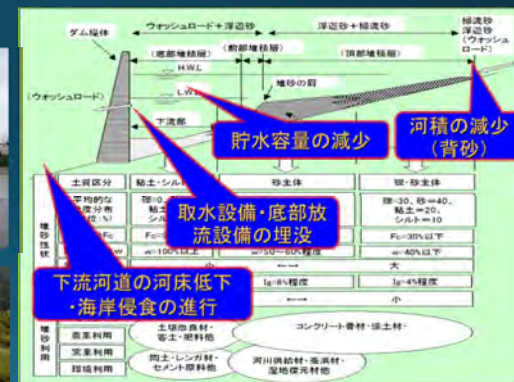
佐久間ダムの堆砂進行



土砂が貯まることでどんな問題が起こるか？

- 貯水容量の減少だけでなく、水を取り入れる取水口や放流口の埋没、ダム上流の河床の上昇、下流河道の河床低下や海岸侵食など

海岸侵食・天竜川河口



ダム堆砂対策の必要性

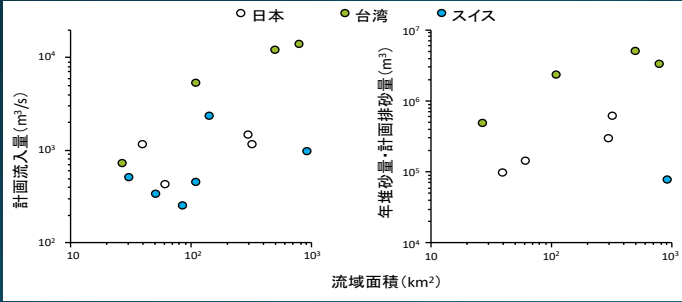
2020年12月神戸新聞他多数(共同通信配信)



ダム堆砂対策の技術



スイス・日本・台湾の排砂バイパス (SBT) 事例



台湾は大規模なものが多い (排砂+放流量増加)。堆砂量 (計画排砂量) も非常に多い。日本の規模はスイスより大きい。

排砂バイパストンネルの歴史

Japan

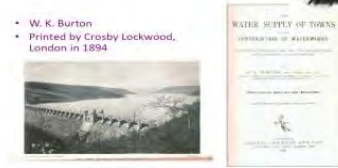
Tachigahata Dam(1905)
Nunobiki Dam(1908)
Muko-no-ike(1916)

Asahi(1998)
Miwa(2005)
Koshibu(2016)
Matsukawa(2016)

Switzerland

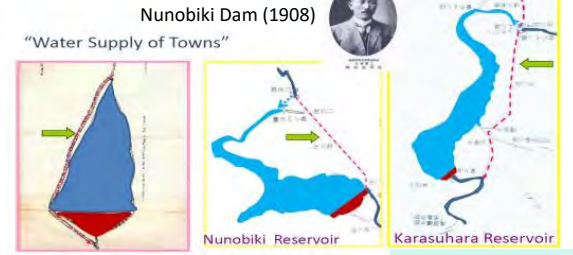
Pfaffensprung(1922)
Runcahez(1962)
Egshi(1976)
Palagnedra(1977)

Rempen(1986)
Solis(2012)



プラタモリ (神戸港編)
2017.2.18
「赤道を越えても腐らない水」を供給=有機物を含む土砂の流入防止、として紹介

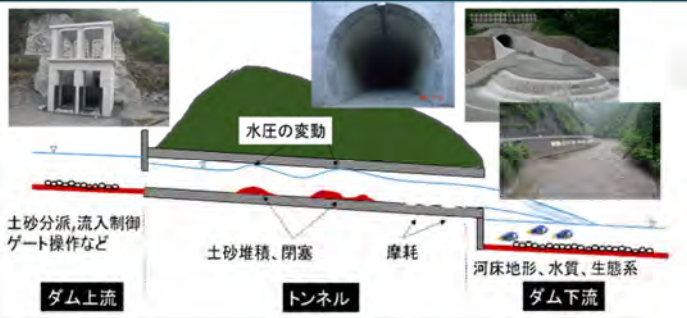
Sediment Bypass in Kobe (Plan View)



1900 布引五本松ダム (バイパスなし) → 流入土砂による堆積が顕著 (危機感)
1908 布引五本松ダムに逆導入 (バイパス設置)
1905 立が畑ダム (当初からバイパスあり)

土砂流入を効果的に防止

排砂バイパストンネル (SBT) の解決すべき課題



トンネルインバートの摩耗損傷事例



修復後

- 1) バイパス技術の適用条件の明確化 (どのようなダムに適合するか?)
- 2) 初期コスト (トンネルや分派構造の構築) および維持管理コスト (トンネル摩耗対策) の低減化、導入効果の評価 (ダム長寿命化+下流土砂供給 (環境))
- 3) 治水 (洪水調節) や利水 (発電・利水貯留) と土砂管理 (バイパス運用) の連携・最適化
- 4) バイパスを効果的に運用するために降雨・流出予測との連携、など

排砂バイパスに関する国際会議 (IW-SBT)

第1回排砂バイパス国際会議 (2015, April 27-29)
スイス連邦工科大学チューリッヒ校

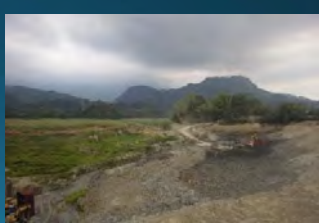
第2回排砂バイパス国際会議 (2017, May9-12)
京都大学

第3回排砂バイパス国際会議 (2019, April 9-12)
国立台湾大学

Abstract
Location
Program
Workshop Statement
Themes & Prices

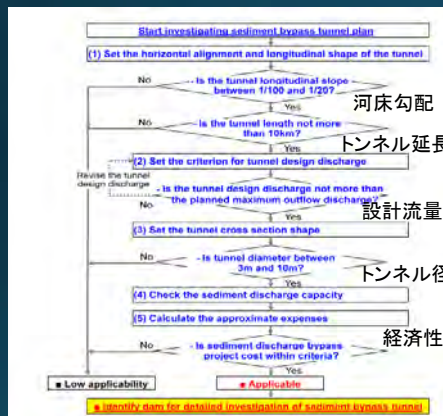


3rd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, Taipei, Taiwan, April 9-12, 2019.



排砂バイパストンネルの適用化検討

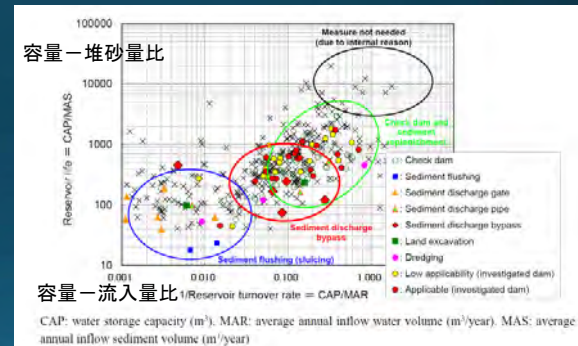
Outline plan investigation flowchart for sediment bypass tunnel



Tetsuya Sumi, Eisei Kitamura, Masato Ono and Gen Nagatani: Application planning of sediment bypass tunnel to dams, Proc. 3rd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, Taipei-Taiwan, 2019.

全国のダムのうち、どのような条件(河床勾配、トンネル延長、設計流量、トンネル径など)で適合するか

Reservoir turnover rate as well as reservoir life and sediment discharge method

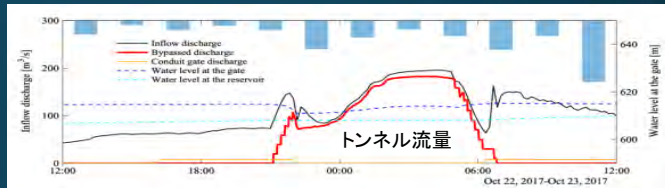
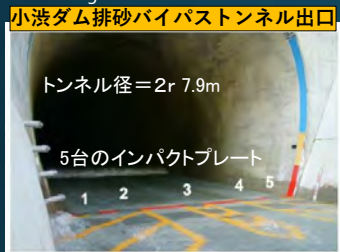


トンネルインバートの摩耗現象と対策

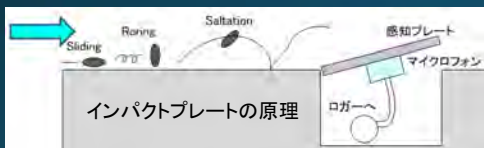
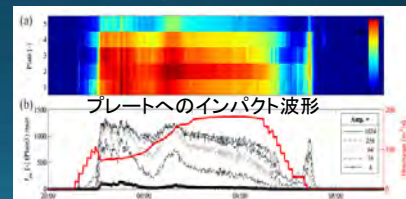
Koshibu SBT outlet and five Impact plate for bedload monitoring

トンネルの摩耗予測式の入力情報であるトンネル内の流砂量をリアルタイムで計測する技術の開発

Hydrological data and SBT operation during Oct.22-23, 2017



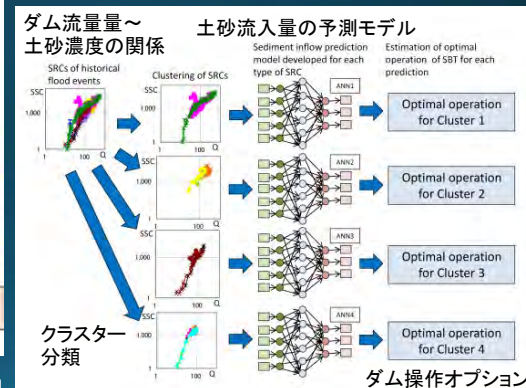
Example of monitoring results of Impact Plates (No.3)



Takahiro Koshiba and Tetsuya Sumi: Sediment Transport Monitoring with Impact Plates during Koshibu Sediment Bypass Tunnel Operations in 2016-2018, Proc. 3rd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, Taipei-Taiwan, 2019.

排砂バイパストンネル運用の高度化

上流河川から流入する流量や土砂濃度を考慮して、治水・利水の目的を満足しながら、いかに効率よく土砂をバイパスして堆砂進行を抑制するかの運用モデル開発

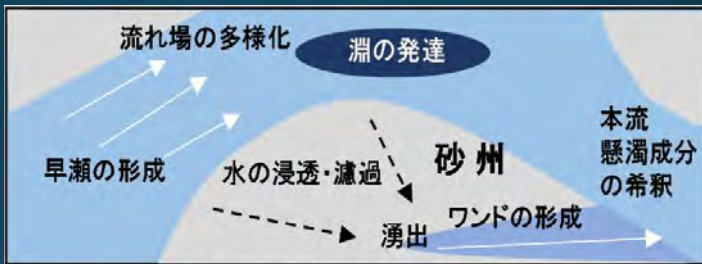
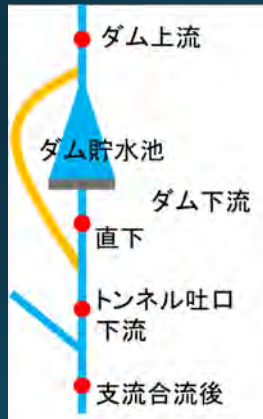


Daisuke Nohara and Tetsuya Sumi: Effective Operation of Reservoir and Sediment Bypass Tunnel Considering Inflow Prediction of Water and Sediment, Proc. 3rd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, Taipei-Taiwan, 2019.

Real-time SBT operation using ANN prediction models developed for each cluster of flood SRCs

トンネルを通じた土砂供給に伴って形成された砂州の環境機能の評価

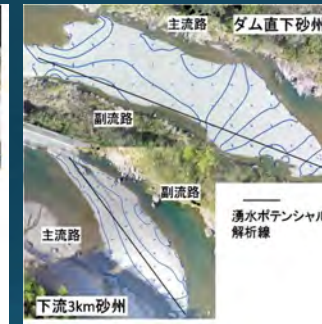
新たに形成された砂州には河川水を透過させて伏流水(Hyporheic Flow)を生み出す効果があり、このような活性度の高い砂州が多いほど河川環境は豊かになる



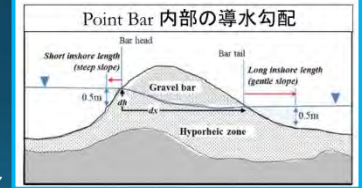
透明・水温安定 → 生物の避難場、保育場

砂州の透水性の評価

調査対象：宮崎県耳川水系西郷ダム下流



熊本県球磨川荒瀬ダム（撤去）下流の事例



砂州のオルソ化画像と等高線 水頭の等高線と砂州内流れのベクトル

- 砂州の高い透水性 → 湧水 → 水質浄化（フィルタリング）
水温変動の緩和効果、などが期待される
- 新鮮な砂州を維持するために土砂供給の継続が必要（排砂バイパスの貢献）

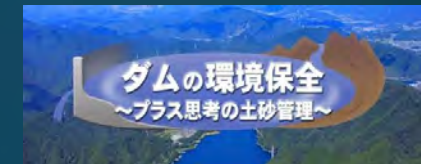
本研究の成果と謝辞

- 日本のダムの長寿命化の鍵となる「堆砂対策」としての「排砂バイパストンネル」の技術開発に貢献
- 特に、①排砂バイパストンネルの適用化検討、②排砂バイパストンネル運用の高度化、③トンネル導入に伴う環境改善効果（土砂供給に伴って形成された砂州の環境機能の評価）、など
- トンネルの維持管理コストの鍵を握る、インバートの摩耗現象解明と摩耗対策（スイスと日本の共同研究推進）、台湾を含めた3ヶ国共同研究への発展
- 排砂バイパストンネルを含む、ダムの堆砂対策の環境的理解の促進（ダム工学会の動画作成にもつながる成果）
- 貴財団からの研究費は、今回の会議に対する日本側発表者の参加費補助などに有効に活用させていただきました。この場を借りて感謝申し上げます。
 - 会議参加者：12か国（台湾、日本、スイス、フィリピン、ノルウェー、米国など）から、研究者と実務担当者を中心に合計約250名（日本から約30名）
 - 論文発表：8つの基調・招待講演、48の口頭発表、26のポスター発表
- 台湾の情報を含めた成果報告は、「大ダムNo.248, 2019」にも報告

ダム工学会作成の動画

<http://www.jsde.jp/>

- ①ダムと河川環境
- ②日本の土砂環境とダム
- ③堆砂対策と土砂還元
- ④土砂還元の効果



ダム環境問題における土砂に関する事項一覧

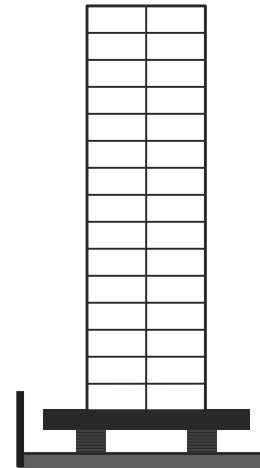
アクティブ制御を併用した 超高層免震建物の風応答予測

○ 佐藤大樹 東京工業大学
陳 錦華 東京工科大学

Introduction

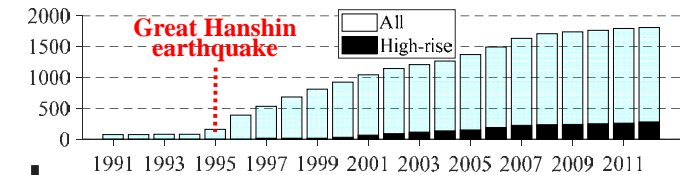


Recently, use of **PBI** in **high-rise** buildings increases ^{*)}



Passive base-isolated (**PBI**) buildings

- minimize damages of superstructures
- resume operation



Recent trends of PBI building in Japan ^{*)}

^{*)} : Yuji T., Nobuo F., Jun T., Masafumi M., development and analysis of database for base-isolated buildings in japan, 2011

Introduction

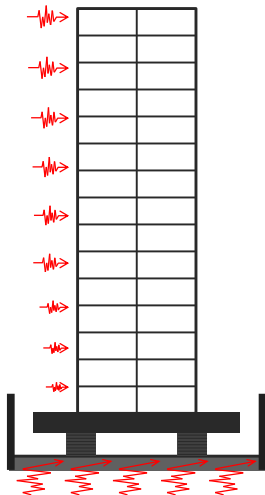


Recently, use of **PBI** in **high-rise** buildings increases ^{*)}

Issues:

PBI layer is relatively **soft**

Wind load contains **mean component** (along-wind)
Wind load acts **directly on the superstructure**



^{*)} : Yuji T., Nobuo F., Jun T., Masafumi M., development and analysis of database for base-isolated buildings in japan, 2011

Introduction

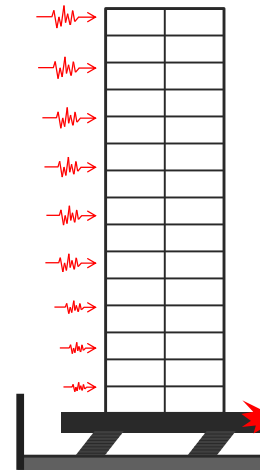


Recently, use of **PBI** in **high-rise** buildings increases ^{*)}

Issues:

PBI layer is relatively **soft**

Wind load contains **mean component** (along-wind)
Wind load acts **directly on the superstructure**



It is difficult to suppress **displacement** response within the allowable range

Active structural control (ASC) strategy

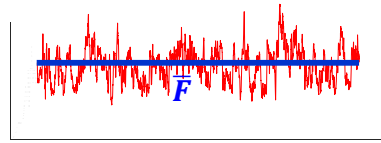
- Control system designed by trial-and-error approach
- Much guess and simulations are required

Design method for PBI buildings with ASC

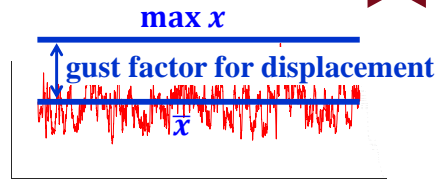
^{*)} : Yuji T., Nobuo F., Jun T., Masafumi M., development and analysis of database for base-isolated buildings in japan, 2011



Gust factor approach



Story wind force
(along-wind direction)



Displacement response

$$\text{gust factor} = \frac{\text{mean displacement}}{\text{mean wind force}} - \frac{\text{mean control force}}{\text{stiffness}}$$



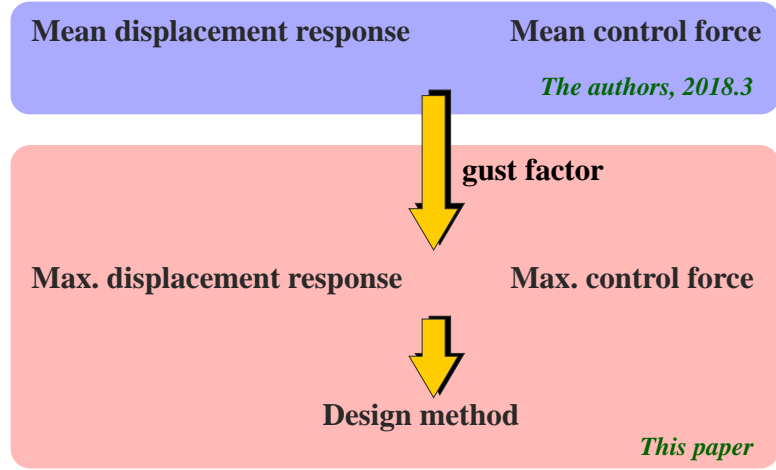
maximum displacement



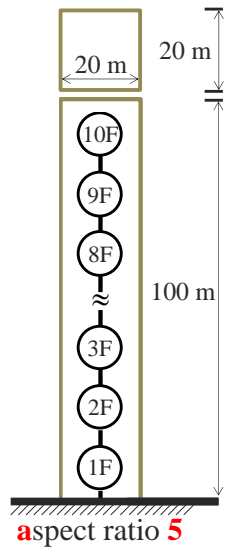
maximum control force



PBI buildings with ASC



Model of buildings

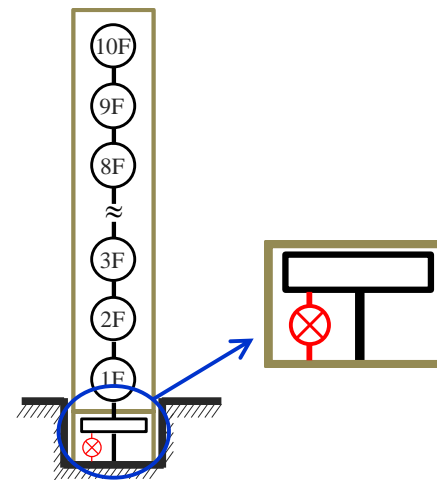


superstructure

- height: 100m
- aspect ratio: 5
- 10 DOF
- shear building model
- 1st natural period: 2 s
- 1st damping ratio: 0.02

PBI layer

Model of buildings



superstructure

- height: 100m
- aspect ratio: 5
- 10 DOF
- shear building model
- 1st natural period: 2 s
- 1st damping ratio: 0.02

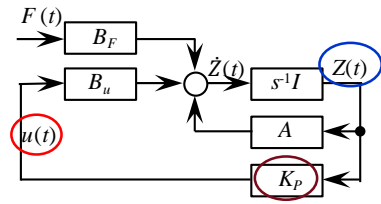
PBI layer

- isolated period: 3, 4 and 5 s
- damping ratio: 0.05
- ASC device installed

Control system



Feedback control



$u(t)$ control force
 $Z(t)$ state vector $\leftarrow \begin{bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{bmatrix}$
 K_p feedback gain
 K_{PD} displacement feedback gain
 K_{PV} velocity feedback gain

control law: $u(t) = K_p Z(t)$

$$= [K_{PD} \quad K_{PV}] \begin{bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{bmatrix}$$

$$= K_{PD} X(t) + K_{PV} \dot{X}(t)$$

Control system design

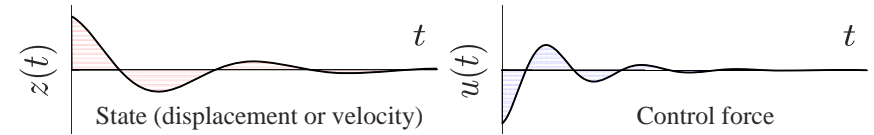


control law: $u(t) = K_p Z(t)$

LQR Method

$$J = \int_0^{\infty} \left(Z^T(t) Q Z(t) + u^T(t) R u(t) \right) dt$$

$\text{Aera} \times Q \times \text{Aera}$
 $\text{Aera} \times R \times \text{Aera}$



weight matrix

$$Q = 10 \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ and } R = 1$$



Along-wind force



Along-wind force is calculated by wind tunnel experiment *)

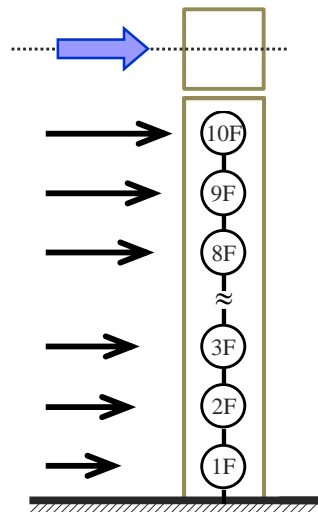
Information of design wind load

location (expectation)	Tokyo
flat terrain category	III
wind direction	0°
return period	500-years
top wind speed	63.8 m/s
story	10F



A5 building model

A4 building model



Mean control force



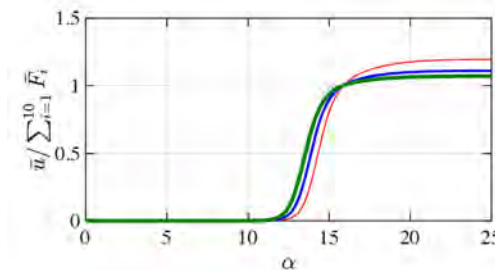
$$\bar{u} = K_p \bar{Z} = K_p \begin{bmatrix} \bar{X} \\ 0_{11 \times 1} \end{bmatrix}$$

$$\bar{X} = K^{-1} \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{F}_1 \\ \vdots \\ \bar{F}_{10} \end{bmatrix}$$

$$\bar{u} = K_p \begin{bmatrix} K^{-1} \\ 0_{11 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0 \\ \bar{u} \\ \bar{F}_1 \\ \vdots \\ \bar{F}_{10} \end{bmatrix}$$

Eq.(1)

accuracy verification



$T_0 = 3 \text{ s}$ — red
 $T_0 = 4 \text{ s}$ — blue
 $T_0 = 5 \text{ s}$ — green

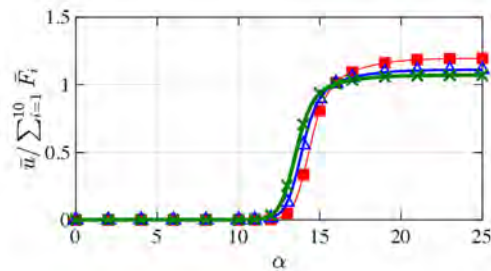
Mean control force

$$\bar{u} = K_p \bar{Z} = K_p \begin{bmatrix} \bar{X} \\ 0_{11 \times 1} \end{bmatrix} \quad \bar{X} = K^{-1} \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{F}_1 \\ \vdots \\ \bar{F}_{10} \end{bmatrix}$$

$$\bar{u} = K_p \begin{bmatrix} T_0 \\ K^{-1} \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{F}_1 \\ \vdots \\ \bar{F}_{10} \end{bmatrix} \\ \alpha \end{bmatrix} \quad 0_{11 \times 1}$$

Eq.(1)

accuracy verification



$T_0 = 3$ s — (red)
 $T_0 = 4$ s — (blue)
 $T_0 = 5$ s — (green)

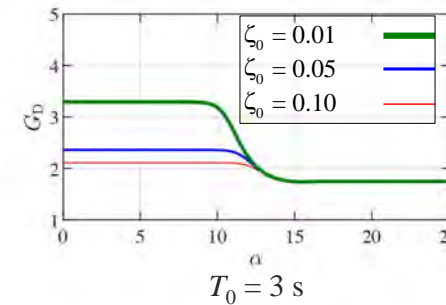
**validity is confirmed
via numerical simulations**

Gust factor for displacement

$$G_D = 1 + g_D \frac{C_g'}{C_g} \sqrt{1 + \phi_D^2 R_D}$$

T_0 natural period for the 1st mode (**with ASC**)
 α damping ratio for the 1st mode (**with ASC**)

accuracy verification

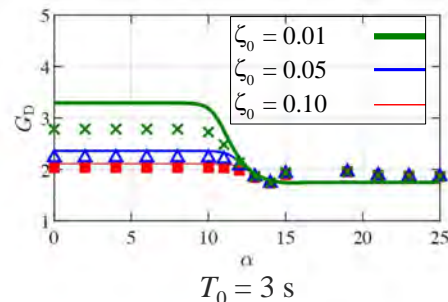


Gust factor for displacement

$$G_D = 1 + g_D \frac{C_g'}{C_g} \sqrt{1 + \phi_D^2 R_D}$$

T_0 natural period for the 1st mode (**with ASC**)
 α damping ratio for the 1st mode (**with ASC**)

accuracy verification



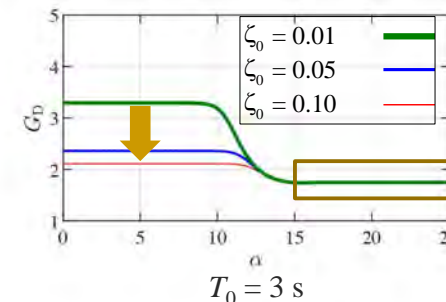
• Validity is confirmed
via numerical simulations

Gust factor for displacement

$$G_D = 1 + g_D \frac{C_g'}{C_g} \sqrt{1 + \phi_D^2 R_D}$$

T_0 natural period for the 1st mode (**with ASC**)
 α damping ratio for the 1st mode (**with ASC**)

accuracy verification



• Validity is confirmed
via numerical simulations

- $G_D \downarrow$ as $\zeta_0 \uparrow$ if $\alpha < 10$
- G_D is same for different ζ_0 if $\alpha > 15$



$$G_u = \frac{\max\{|u|\}}{\bar{u}}$$

$$\approx \frac{K_{PD}\max\{X\} + K_{PV}\max\{\dot{X}\}}{K_{PD}\bar{X} + K_{PV}\bar{\dot{X}} \approx 0}$$

$$\approx \frac{K_{PD}\max\{X\} + K_{PV}\max\{\dot{X}\}}{K_{PD}\bar{X}}$$

$$\approx \frac{K_{PD}\max\{X\}}{K_{PD}\bar{X}} + \frac{K_{PV}(\max\{X\} - \bar{X})\omega_1}{K_{PD}\bar{X}}$$

$$\approx \frac{K_{PD}\bar{X}G_D}{K_{PD}\bar{X}} + \frac{K_{PV}(\bar{X}G_D - \bar{X})\omega_1}{K_{PD}\bar{X}}$$

$$\approx G_D + \frac{K_{PV}\bar{X}}{K_{PD}\bar{X}}(G_D - 1)\omega_1$$

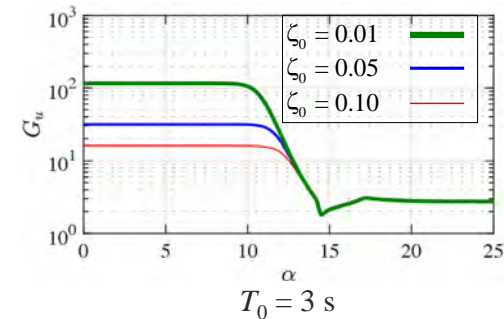
$u(t) = K_{PD}X(t) + K_{PV}\dot{X}(t)$

$\max\{\dot{X}\} \approx (\max\{X\} - \bar{X})\omega_1$



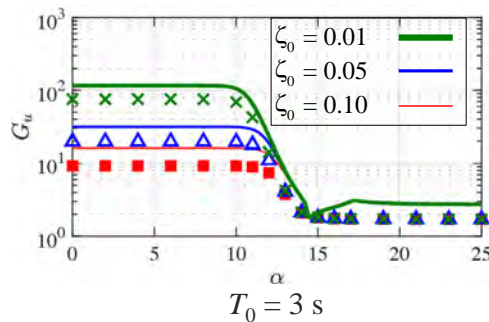
$$G_u \approx G_D + \frac{K_{PV}\bar{X}}{K_{PD}\bar{X}}(G_D - 1)\omega_1$$

accuracy verification



$$G_u \approx G_D + \frac{K_{PV}\bar{X}}{K_{PD}\bar{X}}(G_D - 1)\omega_1$$

accuracy verification

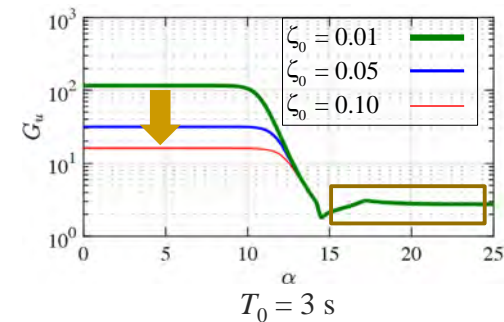


• Validity is confirmed via numerical simulations



$$G_u \approx G_D + \frac{K_{PV}\bar{X}}{K_{PD}\bar{X}}(G_D - 1)\omega_1$$

accuracy verification



- Validity is confirmed via numerical simulations
- $G_D \downarrow$ as $\zeta_0 \uparrow$ if $\alpha < 10$
- G_D is same for different ζ_0 if $\alpha > 15$

Design method & example



Step 1. Specify: parameters of building, wind force

superstructure return period
PBI layer

super struct.: 100 m , $T_s = 2 \text{ s}$, $\zeta_s = 0.02$

PBI layer: $T_0 = 3 \text{ s}$, $\zeta_0 = 0.05$ return period of **500 years**

Design method & example



Step 1. super struct.: 100 m , $T_s = 2 \text{ s}$, $\zeta_s = 0.02$

PBI layer: $T_0 = 3 \text{ s}$, $\zeta_0 = 0.05$ return period of **500 years**

Step 2. Determine the restrictions of max. response and control force

$x_{\max, \text{lim}} = 40 \text{ cm}$, $u_{\max, \text{lim}} = 10000 \text{ kN}$

Design method & example



Step 1. super struct.: 100 m , $T_s = 2 \text{ s}$, $\zeta_s = 0.02$

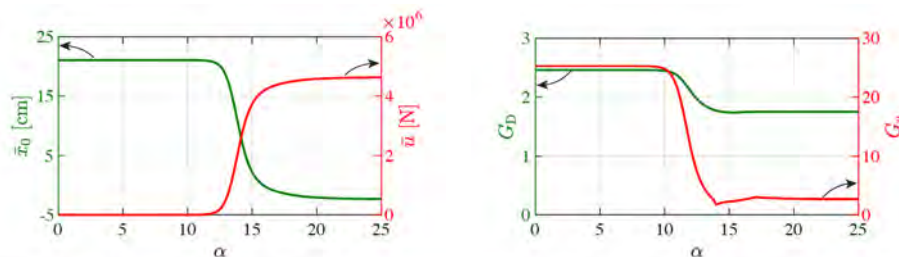
PBI layer: $T_0 = 3 \text{ s}$, $\zeta_0 = 0.05$ return period of **500 years**

Step 2. $x_{\max, \text{lim}} = 40 \text{ cm}$, $u_{\max, \text{lim}} = 10000 \text{ kN}$

Step 3. Calculate the mean displacement and mean control force

Step 4. Calculate the gust factors

Step 5. Calculate the max. displacement and max. control force



Design method & example



Step 1. super struct.: 100 m , $T_s = 2 \text{ s}$, $\zeta_s = 0.02$

PBI layer: $T_0 = 3 \text{ s}$, $\zeta_0 = 0.05$ return period of **500 years**

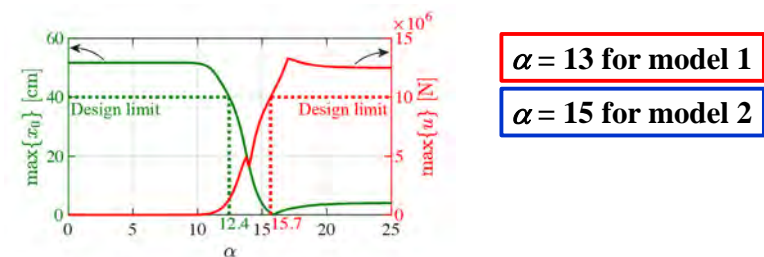
Step 2. $x_{\max, \text{lim}} = 40 \text{ cm}$, $u_{\max, \text{lim}} = 10000 \text{ kN}$

Step 3. Calculate the mean displacement and mean control force

Step 4. Calculate the gust factors

Step 5. Calculate the max. displacement and max. control force

Step 6. Select the weighting entry α



$\alpha = 13$ for model 1
 $\alpha = 15$ for model 2



Step 1. super struct.: 100 m , $T_s = 2 \text{ s}$, $\zeta_s = 0.02$
 PBI layer: $T_0 = 3 \text{ s}$, $\zeta_0 = 0.05$ return period of **500 years**

Step 2. $x_{\max, \text{lim}} = 40 \text{ cm}$, $u_{\max, \text{lim}} = 10000 \text{ kN}$

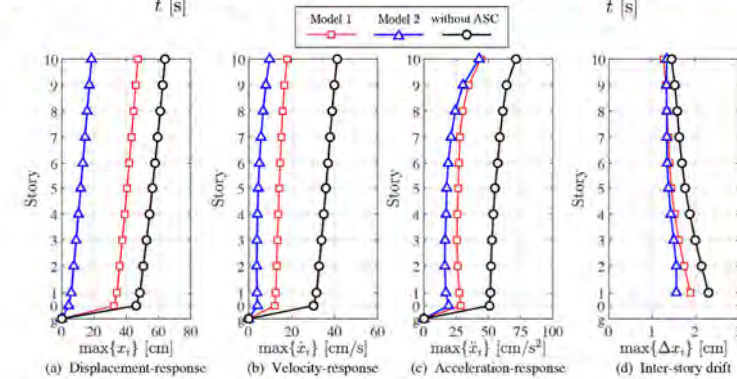
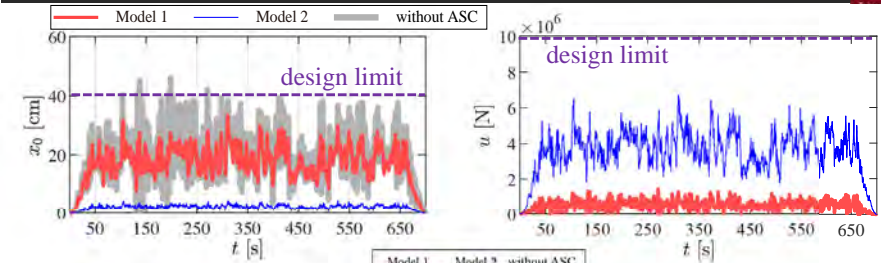
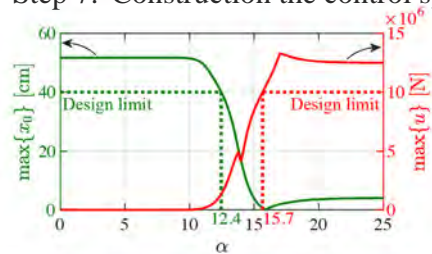
Step 3. Calculate the mean displacement and mean control force

Step 4. Calculate the gust factors

Step 5. Calculate the max. displacement and max. control force

Step 6. $\alpha = 13$ for model 1 $\alpha = 15$ for model 2

Step 7. Construction the control system



This study developed:

1. **Gust factor approach** for PBI buildings with ASC
 - Estimation method for **mean control force and displacement**
 - **gust factor** for control force and displacement
 - Estimation method for **max. control force and displacement**

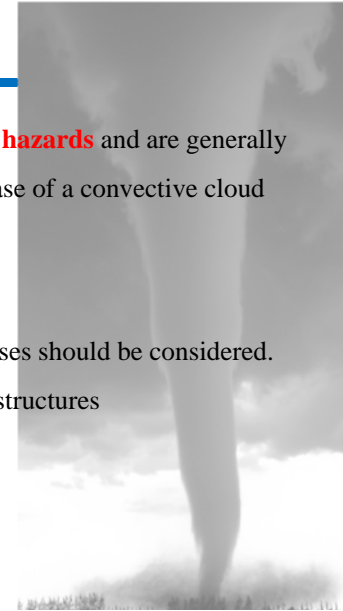
2. **Design method** for PBI buildings with ASC
 - **No trial-and-error approach**
 - **No numerical simulation**

日本型竜巻の 新しい工学的竜巻モデルの開発

◎ 金容徹, 東京工芸大学
田村幸雄, 重慶大学

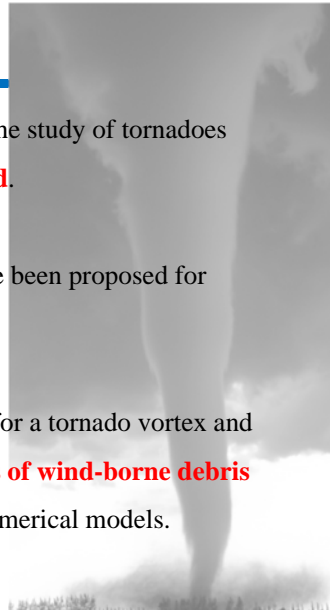
Introduction

- **Tornadoes** are the **most devastating meteorological natural hazards** and are generally defined as violently rotating columns of air, pendant from the base of a convective cloud and often observable as funnel cloud attached to a cloud base.
- To evaluate tornado-induced loads precisely, **three loading** cases should be considered.
 - i) First is time-varying **surface pressures** over the buildings / structures
 - ii) Second is loads due to **pressure differences**
 - iii) Last is loads induced by **wind-borne debris**



Introduction

- Since tornadoes move fast and their courses are unpredictable, the study of tornadoes from **direct measurements** has been always **difficult and limited**.
- Thus, **many theoretical and empirical numerical models** have been proposed for preliminary tornado-resistant design of buildings and structures.
- Objective is to **propose a new empirical modeling (1st year)** for a tornado vortex and **its effects on low-rise / tall buildings and flying characteristics of wind-borne debris (2nd year)** were investigated and compared with other existing numerical models.



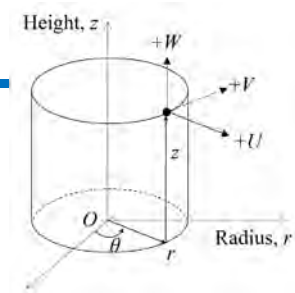
Equations of motion

- Time independent • Axisymmetric
- Pressure = function(r, z)
- No body forces

$$\text{Momentum equation} \begin{cases} \text{Radial} & \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{r}} + \frac{\bar{W}}{\zeta} \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{z}} - \frac{\bar{V}^2}{\bar{r}} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{r}} \\ \text{Tangential} & \bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{r}} + \frac{\bar{W}}{\zeta} \frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{z}} + \frac{\bar{U}\bar{V}}{\bar{r}} = 0 \\ \text{Vertical} & \zeta \bar{U} \frac{\partial \bar{W}}{\partial \bar{r}} + \bar{W} \frac{\partial \bar{W}}{\partial \bar{z}} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} \end{cases}$$

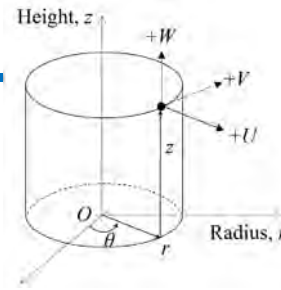
$$\text{Mass conservation equation} \quad \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{r}} + \frac{1}{\zeta} \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{z}} + \frac{\bar{U}}{\bar{r}} = 0 \quad \zeta = \frac{z_{ref}}{r_{ref}}$$

where, parameters are normalized by U_{ref} , r_{ref} , z_{ref} , and ρU_{ref}^2



Equations of motion

- Time independent • Axisymmetric
- Pressure = function(r, z)
- No body forces
- **Velocity components = $f(r) \times f(z)$**



$$\text{Radial } U \quad \bar{U} = \frac{-2\bar{r}(1 - \bar{z}^2)}{(1 + \bar{r}^2)(1 + \bar{z}^2)}$$

$$\text{Tangential } V \quad \bar{V} = \frac{4\bar{r}\bar{z}}{(1 + \bar{r}^2)(1 + \bar{z}^2)}$$

$$\text{Vertical } W \quad \bar{W} = \frac{4\zeta\bar{z}}{(1 + \bar{r}^2)^2(1 + \bar{z}^2)}$$

Parameters:
 $U_{max}, r_{ref}, z_{ref}$

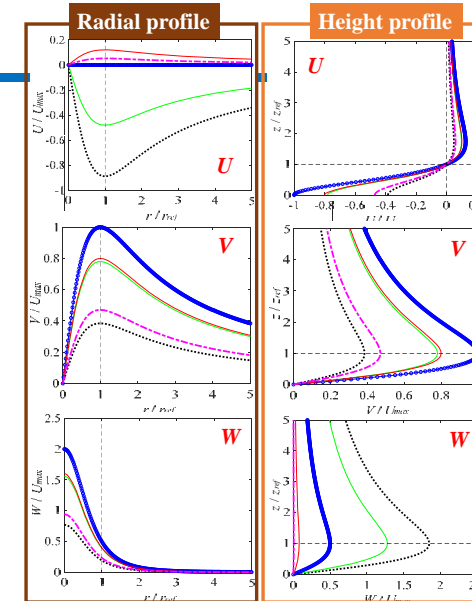
$$(\zeta = z_{ref} / r_{ref})$$

Proposed model: Characteristics

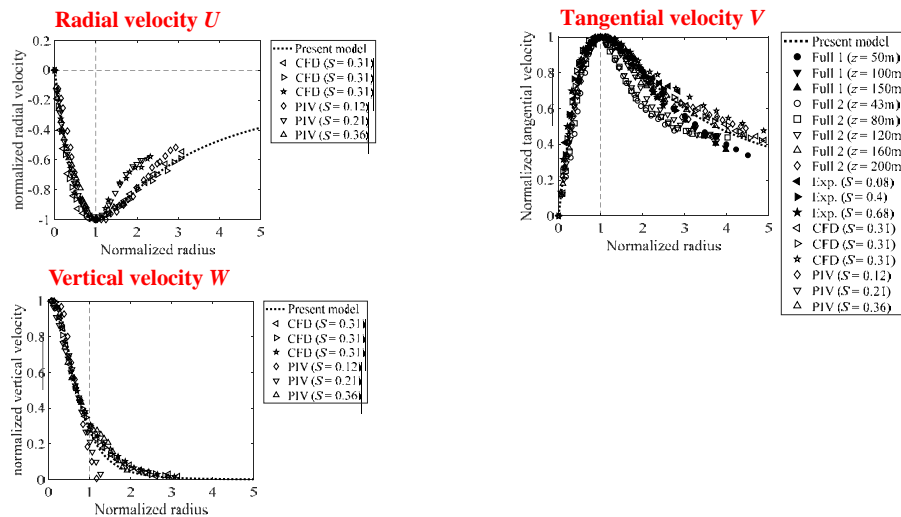
- **Maximum radial velocity was found at the ground**, reflecting the findings of field measurement and experiments, i.e. the strongest inflow was concentrated very near the ground.

- Maximum radial and tangential velocities were shown at $r=1$ and maximum tangential and vertical velocities were shown at $\bar{z}=1$.

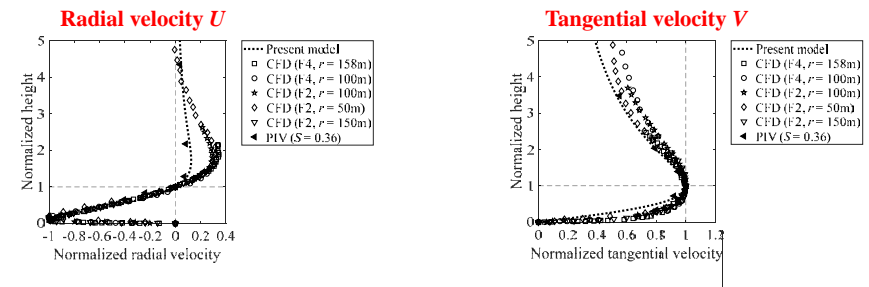
- The velocity components show **clear variations with radius and height**, overcoming the shortcomings of existing numerical models.



Proposed model: Radial variation



Proposed model: Vertical variation



The proposed model shown by a dotted line shows **good agreement** with existing data.

Other numerical model

Using proposed model, **peak normal stresses** on low-rise building and **aerodynamic force coefficients** on tall building were calculated and compared with those obtained from existing numerical models shown below.

- Modified Rankine model (1882)
- Burgers-Rott model (1948, 1958)
- Kuo-Wen model (1971, 1975)
- Fujita model (1978)
- Baker model (2016)

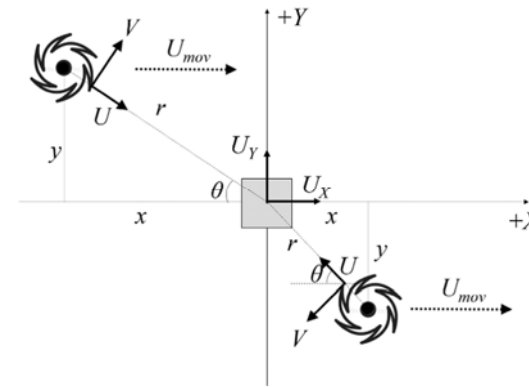
Proposed model

$$\bar{U} = \frac{-2\bar{r}(1 - \bar{z}^2)}{(1 + \bar{r}^2)(1 + \bar{z}^2)^2}$$

$$\bar{V} = \frac{4\bar{r}\bar{z}}{(1 + \bar{r}^2)(1 + \bar{z}^2)}$$

$$\bar{W} = \frac{4\zeta\bar{z}}{(1 + \bar{r}^2)^2(1 + \bar{z}^2)}$$

Peak normal stresses on low-rise building



Tornado properties:

$$U_{mov} = 15\text{m/s}$$

$$U_{ref} = 65\text{m/s}$$

$$r_{ref} = 50\text{m}$$

$$z_{ref} = 50\text{m}$$

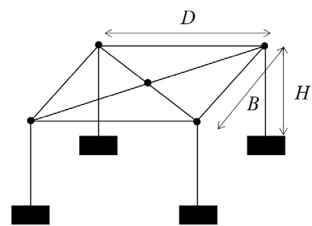
$$x = -500\text{m} \sim 500\text{m}$$

(1m interval)

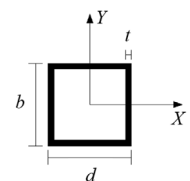
$$y = -200\text{m} \sim 200\text{m}$$

(1m interval)

Peak normal stresses on low-rise building



$$B \times D \times H = 20\text{m} \times 20\text{m} \times 10\text{m}$$



$$b = d = 0.5\text{m}$$

$$t = 0.02\text{m}$$

$$A = 0.0384\text{m}^2$$

$$Z_X = Z_Y = 0.005908\text{m}^3$$

$$F_i = 0.5\rho U_i^2 C_i A_{ref}$$

$$C_i = 1.2, i = X, Y, Z$$

$$M_X = (5/16)F_Y H$$

$$M_Y = (5/16)F_X H$$

$$(I_{beam} = I_{column})$$

$$\sigma_X = M_X / Z_X$$

$$\sigma_Y = M_Y / Z_Y$$

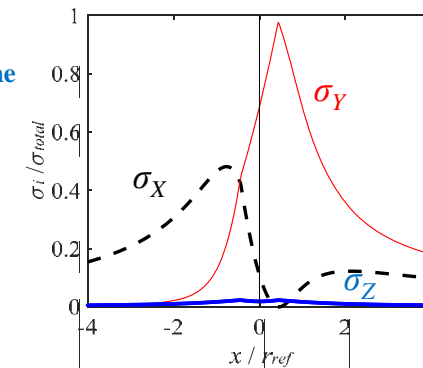
$$\sigma_Z = F_Z / A$$

$$\sigma_{total} = \sigma_X + \sigma_Y + \sigma_Z$$

Contribution of each stress component

At a point where the maximum total stress σ_{total} occurs.

Modified Rankine model



$$\sigma_X = M_X / Z_X$$

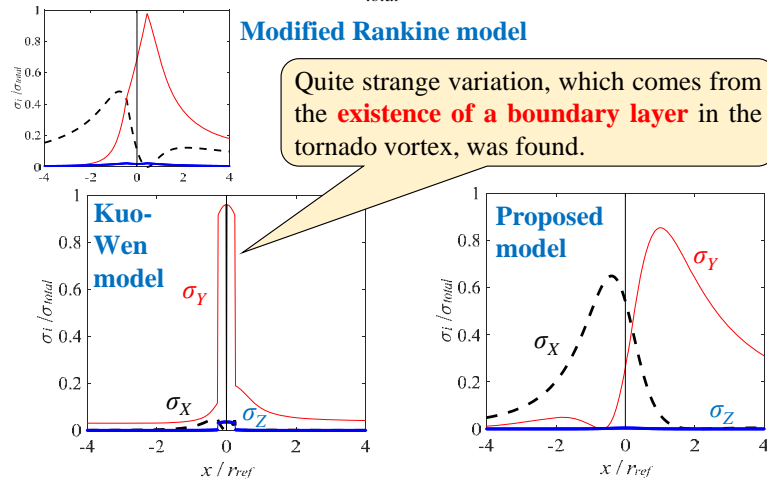
$$\sigma_Y = M_Y / Z_Y$$

$$\sigma_Z = F_Z / A$$

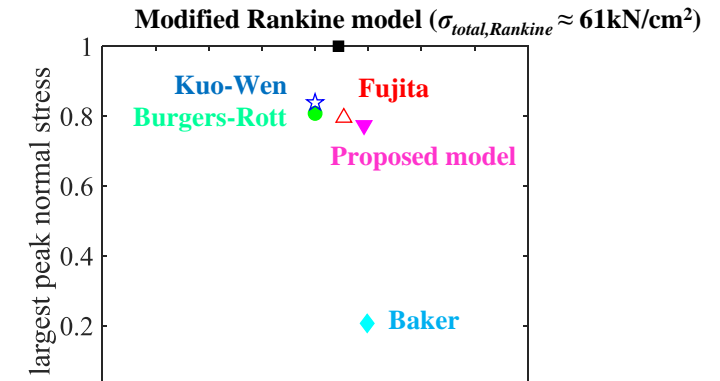
σ_Y is the largest and σ_Z is the smallest. σ_Z was resulted only from the vertical velocity, implying that the vertical velocity could be ignored in the calculation of tornado-induced load by the surface pressure.

Contribution of each stress component

At a point where the maximum total stress σ_{total} occurs.

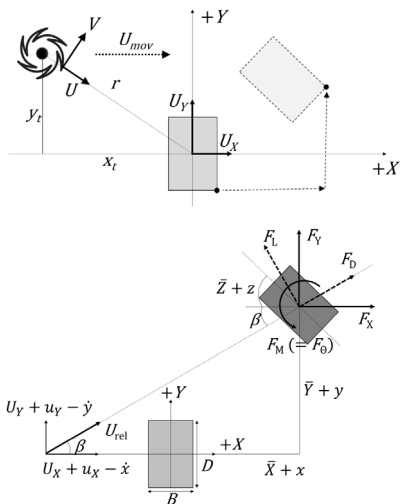


Maximum total stress σ_{total}



The maximum total stress of the modified Rankine model is the largest, and the smallest one is found for the Baker model, which is only 20% of the modified Rankine model. The maximum total stresses of the Burgers-Rott, Kuo-Wen, Fujita and the proposed models show similar value, corresponding to almost 80% of that of the modified Rankine model.

Aerodynamic forces on tall building



$$B \times D \times H = 30\text{m} \times 45\text{m} \times 250\text{m}$$

Tornado properties:

$$U_{mov} = 15\text{m/s}$$

$$U_{ref} = 65\text{m/s}$$

$$r_{ref} = 50\text{m}$$

$$z_{ref} = 50\text{m}$$

A tornado was assumed to **pass through the center of the building** along the X-axis

Aerodynamic forces on tall building

The resulting aerodynamic forces $F_D(h)$ and $F_L(h)$ at elevation h

$$(C_D = 1.0, C_L = -0.1, C_D' = -1.1, C_L' = 2.2, \beta = \tan^{-1}(U_y/U_x))$$

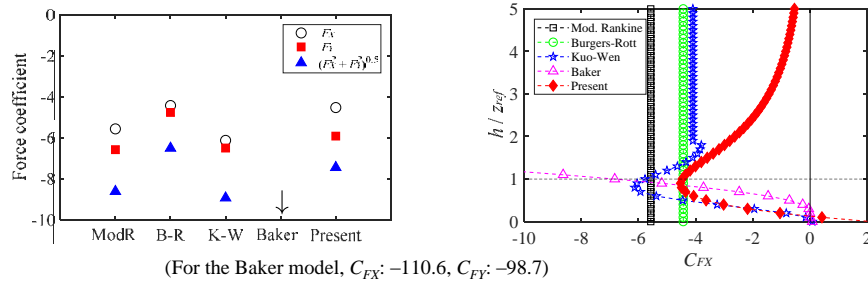
$$F_D(h) = \frac{1}{2} \rho D \left[C_D (U_x(h)^2 + U_y(h)^2) + U_x(h)^2 \left\{ C_D \left(\frac{2u_x(h)}{U_x(h)} \right) + C_D' \beta \left(1 + \frac{2u_x(h)}{U_x(h)} \right) \right\} + U_y(h)^2 \left\{ C_D \left(\frac{2u_y(h)}{U_y(h)} \right) + C_D' \beta \left(1 + \frac{2u_y(h)}{U_y(h)} \right) \right\} \right]$$

$$F_L(h) = \frac{1}{2} \rho D \left[C_L (U_x(h)^2 + U_y(h)^2) + U_x(h)^2 \left\{ C_L \left(\frac{2u_x(h)}{U_x(h)} \right) + C_L' \beta \left(1 + \frac{2u_x(h)}{U_x(h)} \right) \right\} + U_y(h)^2 \left\{ C_L \left(\frac{2u_y(h)}{U_y(h)} \right) + C_L' \beta \left(1 + \frac{2u_y(h)}{U_y(h)} \right) \right\} \right]$$

Maximum aerodynamic force coefficient

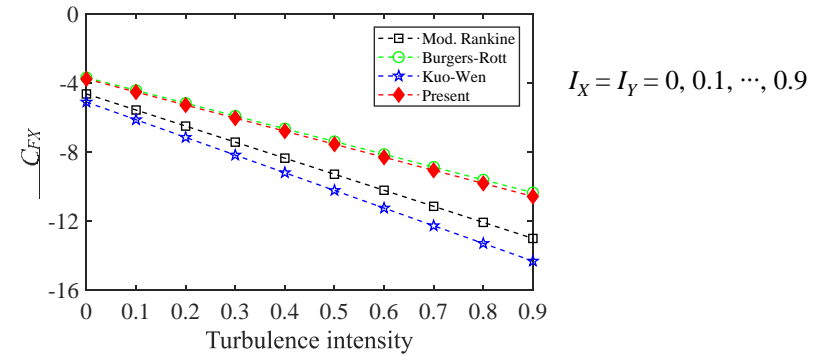
Maximum value **for all heights through out the tornado passage**

→ The heights for the maximum value differs depending on models.



The **modified Rankine** and **Kuo-Wen models** show larger values, and the proposed model shows intermediate value. The **Baker model** shows the largest one, because velocity components increase to infinity with height.

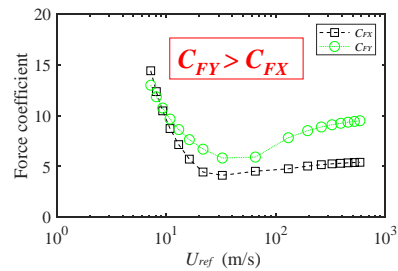
Effect of I_X and I_Y



Aerodynamic force coefficients **increase by roughly 10%** when the turbulence intensities increase by 10%.

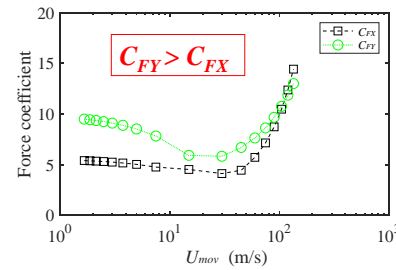
Effect of U_{ref} and U_{mov}

Reference velocity U_{ref}
 $U_{ref} = 7\text{m/s} \sim 585\text{m/s}$



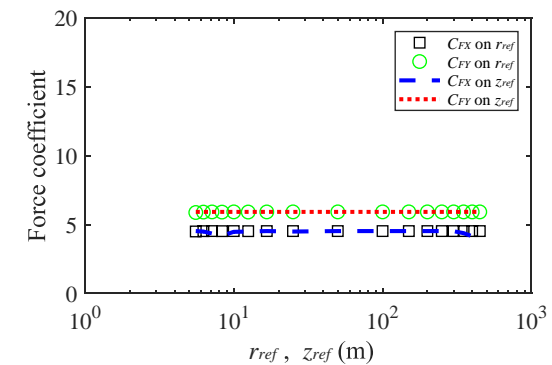
Aerodynamic force coefficients decrease with increasing reference velocity and increase slightly with increasing reference velocity.

Moving velocity U_{mov}
 $U_{mov} = 1.7\text{m/s} \sim 135\text{m/s}$



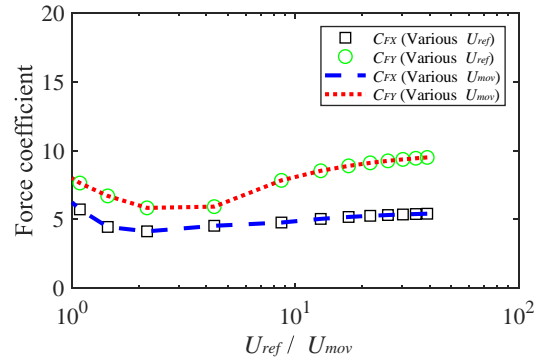
Opposite trend to U_{ref}

Effect of r_{ref} and z_{ref}



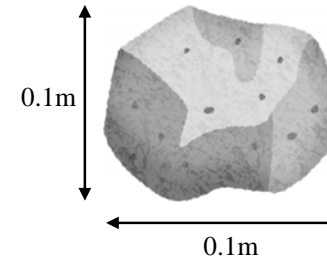
Aerodynamic force coefficients were **little influenced** by the reference radius and reference height.

Combined effect of U_{ref} and U_{mov} , U_{ref}/U_{mov}



Aerodynamic force coefficients were **well collapsed for the same normalized velocity U_{ref}/U_{mov}** , implying that the combined effects of reference velocity and moving velocity are **more meaningful** than the individual effects.

Characteristics wind-borne debris



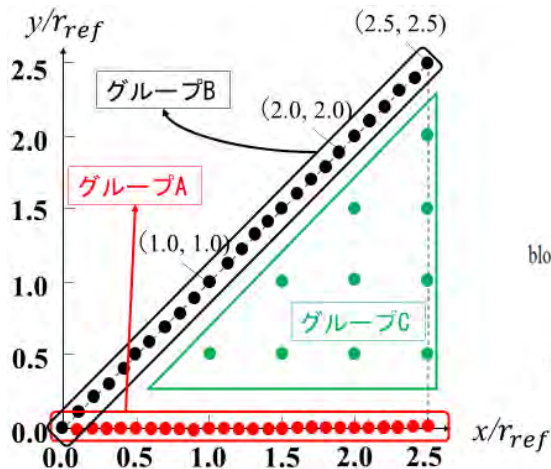
Wind-borne debris: Stone
 Size: $0.1\text{m} \times 0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$
 Mass m : 3kg
 Aerodynamic parameter $C_D A/m$
 : $0.01\text{m}^2/\text{kg}$
 $T_a (\rho U_{ref}^2 / 2 C_{Dg} \cdot C_D A/m)$: 1.35
 Initial velocity $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$: (0, 0, 0)

Tornado properties:

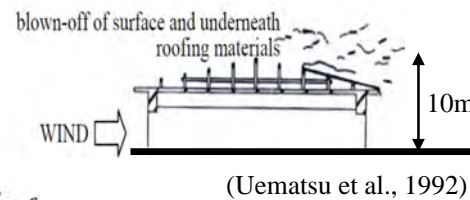
$$U_{mov} = 0, U_{ref} = 65\text{m/s}$$

$$r_{ref} = 50\text{m}, z_{ref} = 50\text{m}$$

Initial positions of wind-borne debris



$$(x, y, z) = (x, y, 10\text{m})$$



Equations of motion of wind-borne debris

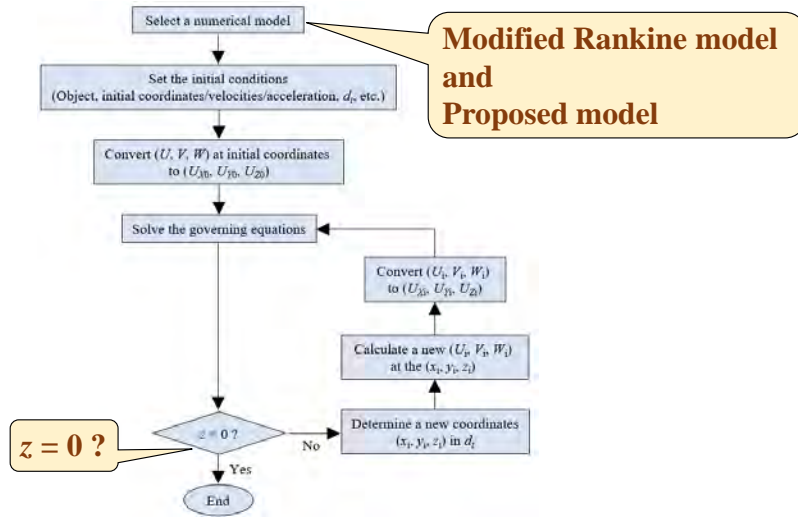
$$\text{X-direction: } \frac{d\dot{x}}{dt} = \frac{\rho A C_D}{2m} (U_x - \dot{x}) \sqrt{(U_x - \dot{x})^2 + (U_y - \dot{y})^2 + (U_z - \dot{z})^2}$$

$$\text{Y-direction: } \frac{d\dot{y}}{dt} = \frac{\rho A C_D}{2m} (U_y - \dot{y}) \sqrt{(U_x - \dot{x})^2 + (U_y - \dot{y})^2 + (U_z - \dot{z})^2}$$

$$\text{Z-direction: } \frac{d\dot{z}}{dt} = \frac{\rho A C_D}{2m} (U_z - \dot{z}) \sqrt{(U_x - \dot{x})^2 + (U_y - \dot{y})^2 + (U_z - \dot{z})^2} - g$$

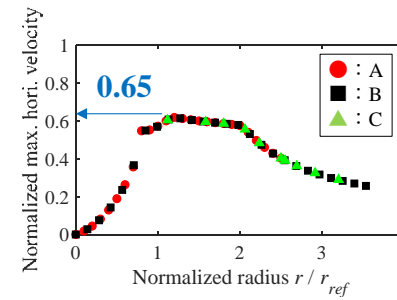
$$\text{Impact load: } W_M = \frac{m\{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{0.5}\}^2}{L_{min}} \quad (\text{Riera Equation})$$

Flowchart of calculation

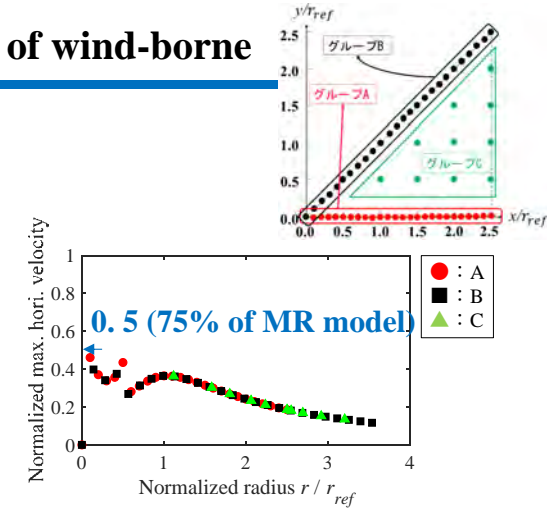


Maximum horizontal velocity of wind-borne debris

$$(x^2 + y^2)^{0.5} / U_{ref}$$

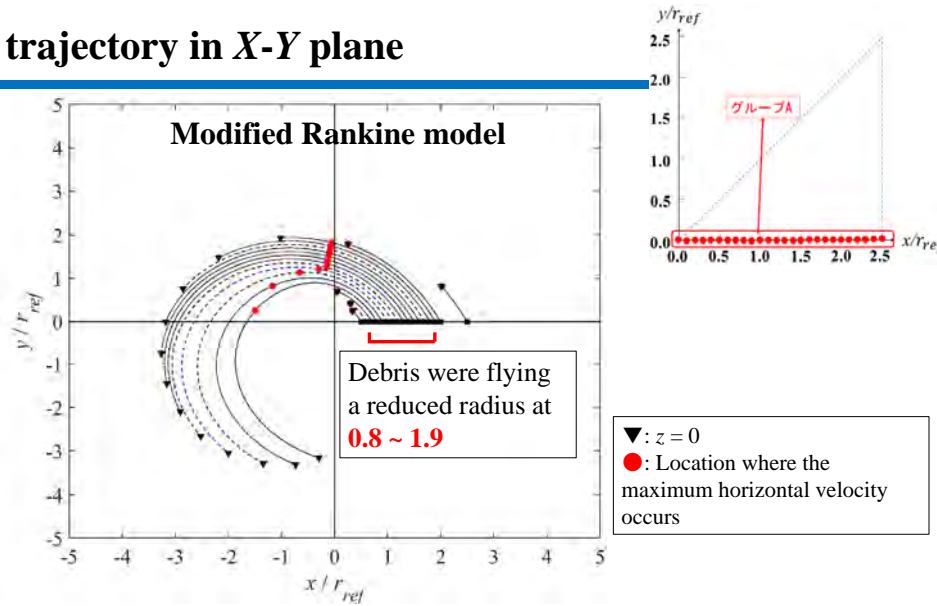


Modified Rankine model

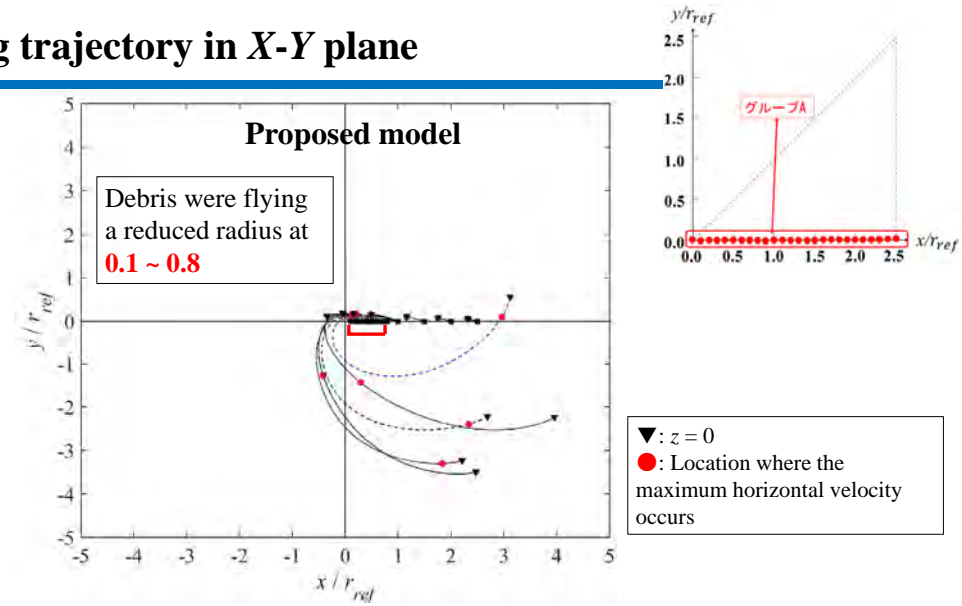


Proposed model

Flying trajectory in X-Y plane

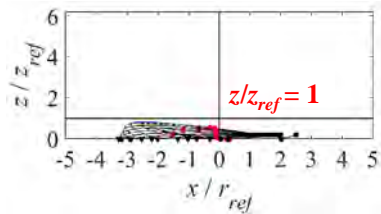
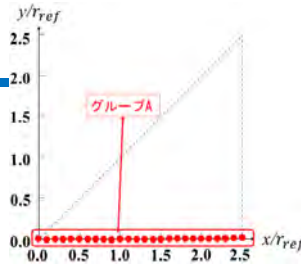


Flying trajectory in X-Y plane

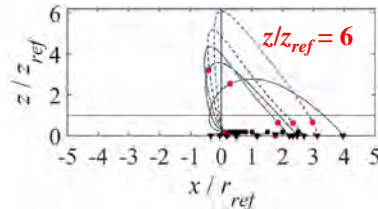


Flying trajectory in X-Z plane

▼: $z = 0$
 ●: Location where the maximum horizontal velocity occurs



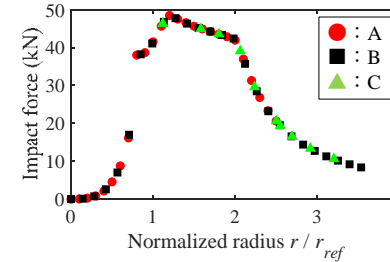
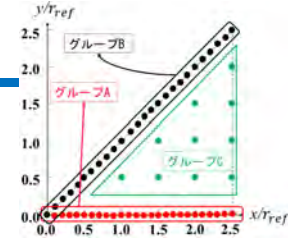
Modified Rankine model



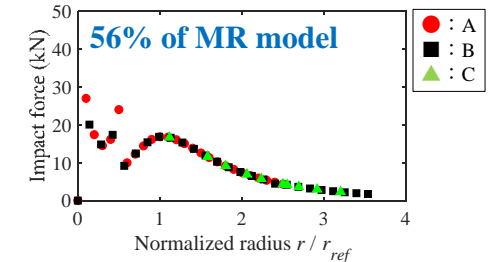
Proposed model

Comparison of impact loads

$$W_M = \frac{m\{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{0.5}\}^2}{L_{min}} \quad (\text{Riera Equation})$$



Modified Rankine model



Proposed model

Concluding remarks

- A **new empirical model** for tornado vortex was proposed, and **peak normal stresses** on low-rise building, **aerodynamic forces** on tall buildings, **flying characteristics** of wind-borne debris were calculated and compared with those from several existing models.
- There are **three parameters in the proposed model**, and the velocity components show **clear variations with radius and height**, overcoming the shortcomings of existing numerical models.
- In the proposed model, **the maximum radial flow was found at the ground**, reflecting the results of field measurement and wind tunnel experiment, i.e. the strongest inflow was concentrated very near the ground.

Concluding remarks

- The maximum total stress on column on low-rise building **the modified Rankine model was the largest**, and **that of the proposed model show similar value to other numerical models**.
- Aerodynamic force coefficients on tall building were calculated based on the simplified quasi-steady theory. **The results from the proposed model show similar values to most existing models**, while those from the Baker model show much larger values. Aerodynamic force coefficients **collapsed to one curve for the same U_{ref}/U_{mov}** . The effects of reference radius and reference height were found to be small.
- **Maximum horizontal velocity** from the proposed model was about **75%** of that of the modified Rankine model, giving **maximum impact loads about 56%** of that of the modified Rankine model.

Thank you very much

ACCOMPLISHMENTS

- Kim Yong Chul, Tamura Yukio, 2021, Empirical numerical modeling of tornadic flow fields and load effects, *Wind and Structures, An International* 32(4), 371-391.
- 金容徹, 田村幸雄, 2020, 1セル型の工学的竜巻モデルの提案, 第66回構造工学シンポジウム 66B, 229-235.
- Kim Yong Chul, Tamura Yukio, 2020, Modeling of tornado vortex and its effects on low-rise and tall buildings, *The 2020 World Congress on Advances in Civil, Environmental and Material Research*, Seoul, Korea.
- その他, 研究交流会にて, Modeling of tornado vortex and its effects on tall buildings
卒業研究発表会にて, 異なる工学的竜巻モデルによる飛来物の飛散特性の比較

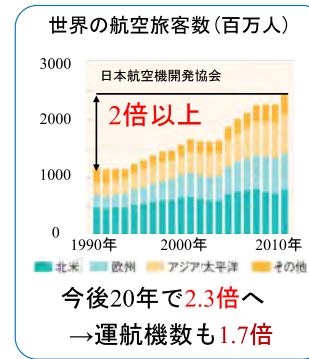
ACKNOWLEDGE

This study was supported by The Taisei Foundation. The authors gratefully acknowledge this support. Helpful discussions with Dr. C.J. Baker at the University of Birmingham are gratefully acknowledged. And also special thanks to Ms. Tanabe who is a former senior student.

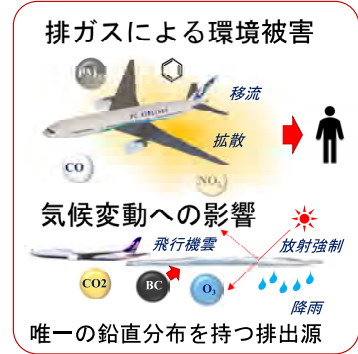
都心を低空飛行する航空機からの 排ガス・排熱データベースの構築, および街区への汚染物質輸送過程の解明 と市民の健康影響評価

東京理科大学工学部土木工学科
仲吉信人
共同研究者 小野村史穂 近藤慧史

・世界的な航空需要の急増



・航空機による環境負荷



○日本では??

航空需要の多くは首都圏の羽田空港、成田空港に集中

羽田空港：1日1200便以上
成田空港：700便以上

国内線利用客の68.0%
国際線利用客の60.6%

・都心と至近・・・羽田空港では10km程度



都心直上を飛行する2020年新飛行経路の運用開始



研究目的

羽田空港・成田を発着する航空機による環境への影響を調査

○3つのアプローチから航空機からの排熱・排ガス影響を調査

Step1 羽田空港・成田空港からの全発着便の排出量データベースの構築

対象便：HND1236便(2018年ダイヤ) & NRT733便(2019年ダイヤ)



Step2 データベースを用いた気象シミュレーション計算

- ・航空機を人工排熱源と捉えた気象への影響調査 → 気象モデルWRF
- ・航空機からの化学物質がどう輸送されるか調査 → 大気物質モデルWRF-chem

Step3 街区レベルの汚染状況の現地調査

- ・測定デバイスの構築&多点での同時観測 (step2での高濃度エリア対象)

Step1 データベースの作成

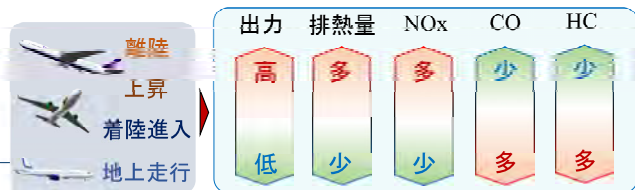


5/14

- 各機からの排出原単位[s]を得る(ICAOデータバンク)

対象は排熱・ CO_2 ・ NO_x ・ CO の各排出量(エンジンの燃料流量から算出)

エンジン出力ごとに算出&ルート情報に基づき配分



- 全便の使用機材・エンジンを含む時刻表の作成

- 各便が通過する平均飛行経路の取得

北風・南風の2運用

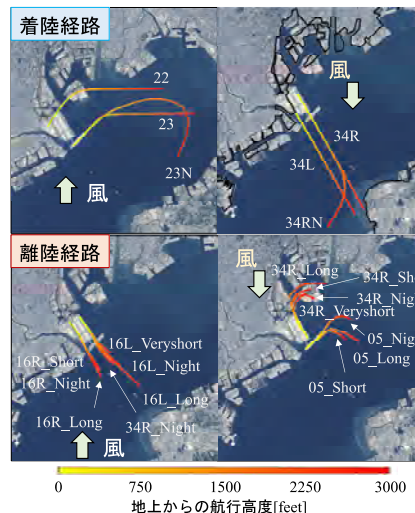
行先により使用滑走路異なる

飛行経路のモデリング



6/14

○Flightradar24の飛行データを平均して飛行経路をパターン化(羽田空港の例)



南西便 → 22 / 34L
 北東便 → 23 / 34R
 夜間便 → 23N / 34RN
 (23-5時)
 ・所要時間 4 - 6分
 ・飛行距離 18 - 29km

南西便 → 16R / 05
 北東便 → 16L / 34R
 夜間便 → 16R_Night / 05_Night
 (23-5時) 16L_Night / 34R_Night
 ・所要時間 1 - 3分
 ・飛行距離 7 - 14km
 ・滑走路距離に応じて配分

Flightradarでは特定しきれない情報は現地観測(地上走行, 離陸に要する秒数など)

データベースの結果



7/14

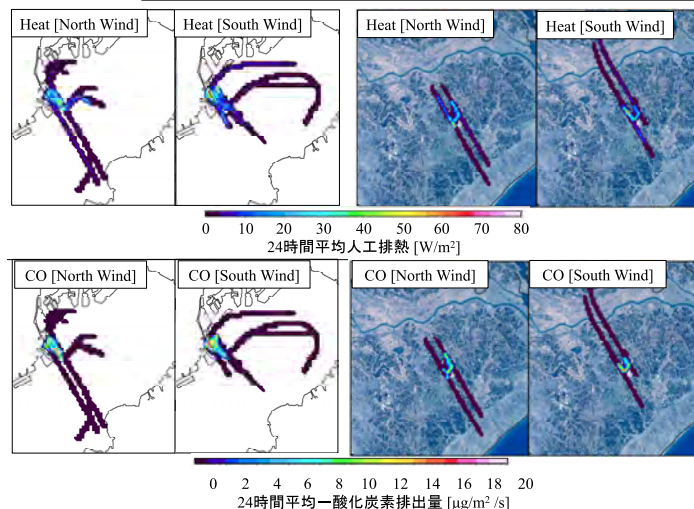


データベースの結果



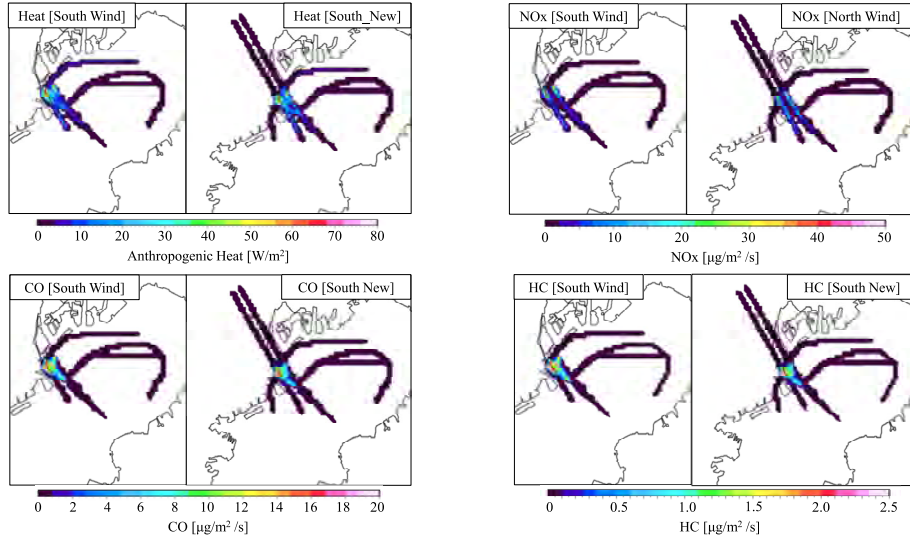
8/14

羽田空港 成田空港



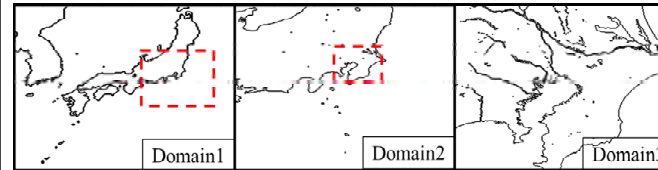
・滑走路 - 離陸ルート上で高い
 ※ NO_x も概ね同じ排出傾向
 HND:24時間総量は 3.65×10^{13} [J]
 東京23区(2005年) 参考: 5.30×10^{14} [J]

・90%以上が地上での排出
 ・離陸滑走路端付近で極端な集中
 →離陸機の滑走待機による影響
 ※HCもほぼ同じ排出傾向



OWRFモデルにより排熱と排ガス影響を考察

・対象領域： 東京都心~関東周辺



領域	解像度	格子
1	12.5 × 12.5 km	150 × 150
2	2.5 × 2.5 km	221 × 261
3	500 × 500 m	301 × 301

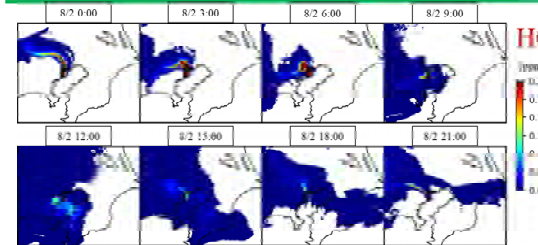
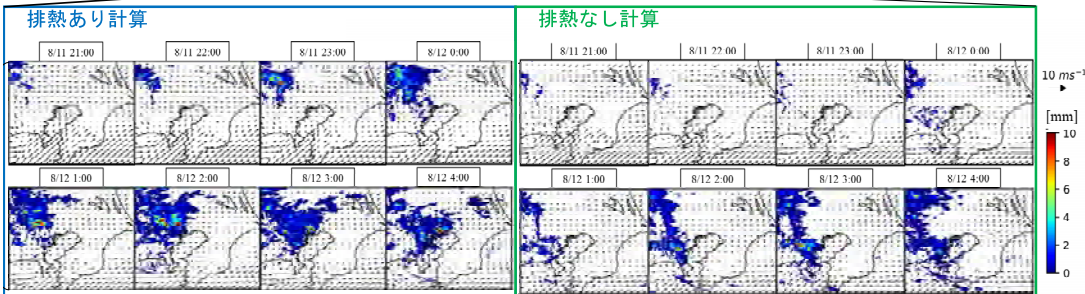
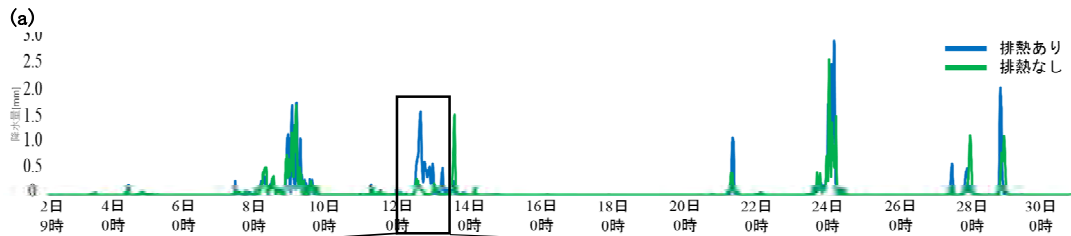
・計算期間：気象影響 2018年 8/1 ~ 8/31
健康影響 2018年 1/1 ~ 1/31
2018年 8/1 ~ 8/4 & 8/13 ~ 8/16
2018年 1/4 ~ 1/7 & 1/12 ~ 1/15

・初期・境界値：ERA5

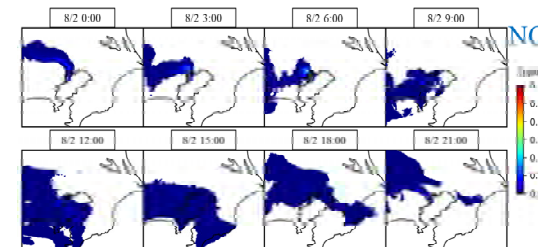
ヨーロッパ中期予報局
空間解像度 約33km × 33km
時間解像度 1時間

・排熱→
毎時間平均のフラックス[W/m²]
排熱有・無の計算の差分で評価

・排ガス→ NO CO HC
北風時の毎時間平均量[mol/h/km²]



HC基準：0.20-0.31 ppmC (AM6-AM9)



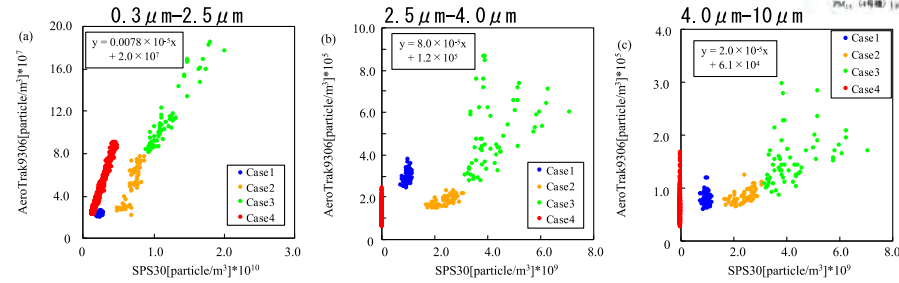
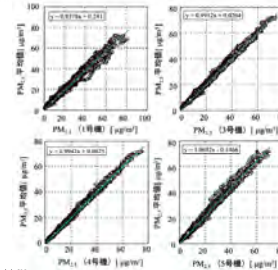
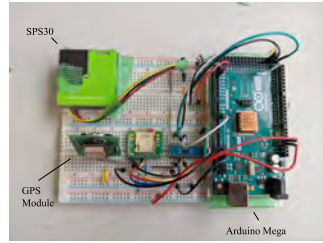
No2基準：0.04-0.06ppm (1日平均値)

○HCとNOxの第一層の濃度

- ・日中は低濃度で遠方まで輸送
- ・夜間は空港敷地内で高濃度
- ・航空機影響単体では、いずれの化学物質も環境基準値を超える値は確認されず。

航空機排ガスの現地観測用に測定デバイスの構築を行った。

光散乱方式のPM10センサと温湿度、位置情報を測定可能。



- ・羽田空港・成田空港を離発着する航空機からの排熱・排ガスデータベースを構築した。
 - ・羽田空港の排熱は東京23区の自動車排熱総量の1/10程。
 - ・NOxは上空まで、COとHCはほぼ地上でのみ排出
- ・気象シミュレーションにより航空機排熱が気象場に及ぼす影響、および排ガスによる街区汚染レベルを調査した。
 - ・航空機からの排熱を組み込むことで夏季の降水量が増加。他の気象因子には顕著な影響は確認されなかった。
 - ・航空機排ガス単体の影響では街区レベルの濃度は環境基準値を超えることは確認されず。
- ・積み残し課題
 - ・羽田空港新経路のデータベースの検証。

避難シミュレーションとバーチャルリアリティ実験の
連携による地下街の修正避難行動モデルの開発

東京理科大学大学院 理工学研究科 国際火災科学専攻
博士後期課程 田中 俊成



目次

1. 研究背景・目的
2. 実験1 -在館者密度が避難行動に与える影響-
3. 実験2 -異なる移動速度の避難者の構成比率の影響-
4. VR実験における避難行動傾向に基づく避難者行動モデルの開発
5. 総括・今後の展望



研究背景・目的

写真引用元
写真1: URL (<https://www.hhp.co.jp/services/shopping/>)
写真2: URL (<https://bluestyle.livedoor.biz/archives/52454435.html>)
写真3: URL (<https://www.constnews.com/?p=6754>)

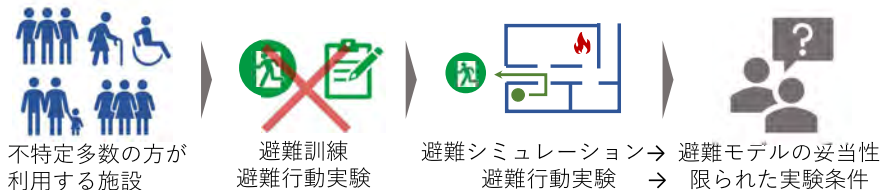


写真.1 ショッピングモール

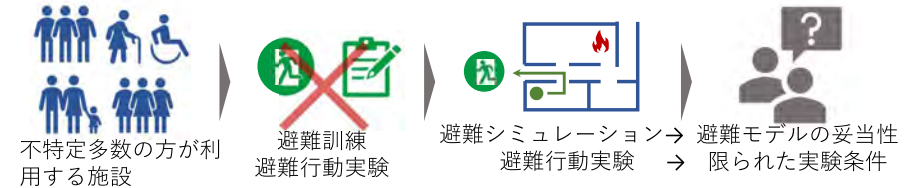
写真.2 駅舎

写真.3 地下街

不特定多数の人が利用する施設では、管理者やスタッフを対象とした避難訓練は可能だが、一般利用者を対象とした避難訓練は容易ではない。

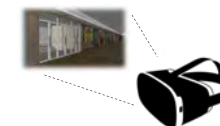


研究背景・目的



これまでに、不特定多数の利用者が利用する地下街やターミナル駅、ショッピングモールなどで火災が発生した場合の避難行動の特徴を分析した研究があるが、いずれも限定的な実験条件、大規模な避難を想定した実験は行われていない。

VRを
防災分野に応用



避難行動分析実験

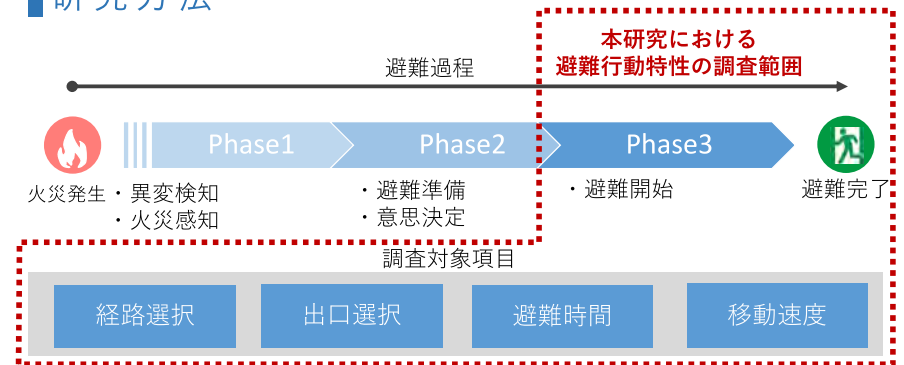
VR実験に得た避難行動傾向に
基づく避難者行動モデルを提案



実験 1 VR技術を用いた地下街火災時の避難行動分析

～在館者密度の影響～

研究方法



本研究では・・・

1. 他避難者の行動を考慮した大規模避難時の避難行動の分析
在館者密度, 他の避難者の移動速度
2. 避難開始時の位置と出口との位置関係や
避難開始時に向いている方向による出口選択の影響

研究方法

VR化までの流れ

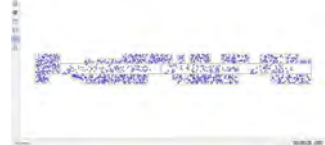
実験空間 (3DCG)



実験対象施設のモデリング
BIMソフト等

他避難者 (NPC)

火災避難シミュレーションEVATUS



避難者の座標を取得

VRモデル



ハードウェア:
HTC VIVE PRO

HTC VIVE PRO	
重量	765 g
視野角	110°
リフレッシュ	90 Hz
解像度	2880 × 1600 dpi

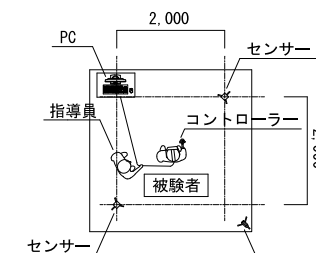


避難者の座標にNPCを配置

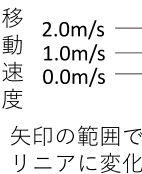
組合せ次第で様々な
シナリオで実験が可能

研究方法

VR空間の操作 (移動方法)

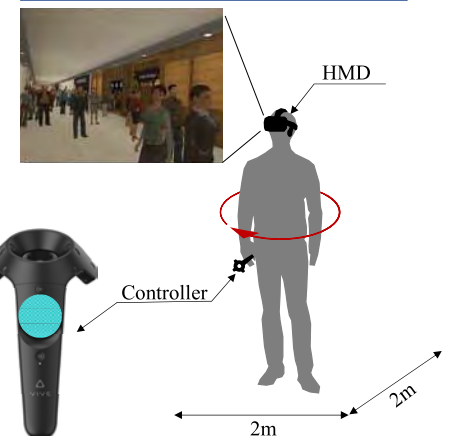


移動
速度



矢印の範囲で
リニアに変化

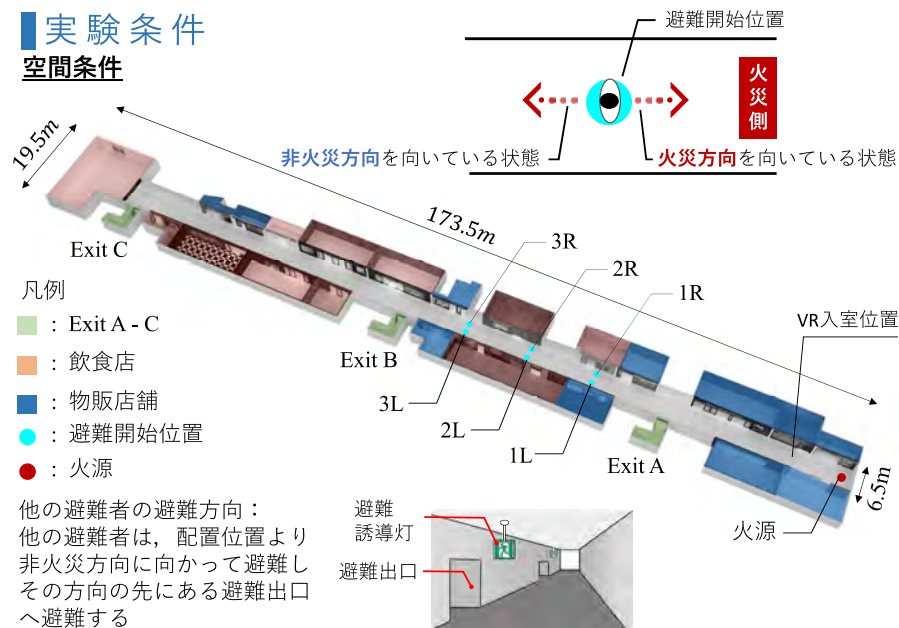
最大で10m×10mの範囲で歩行が可能
→本研究では、その範囲を超えるため
コントローラーによる移動方法を採用



HMDを装着しVR空間を見ながら視野の向きや高さは実際の体位を反映し、
コントローラーを使って視界方向に進進する

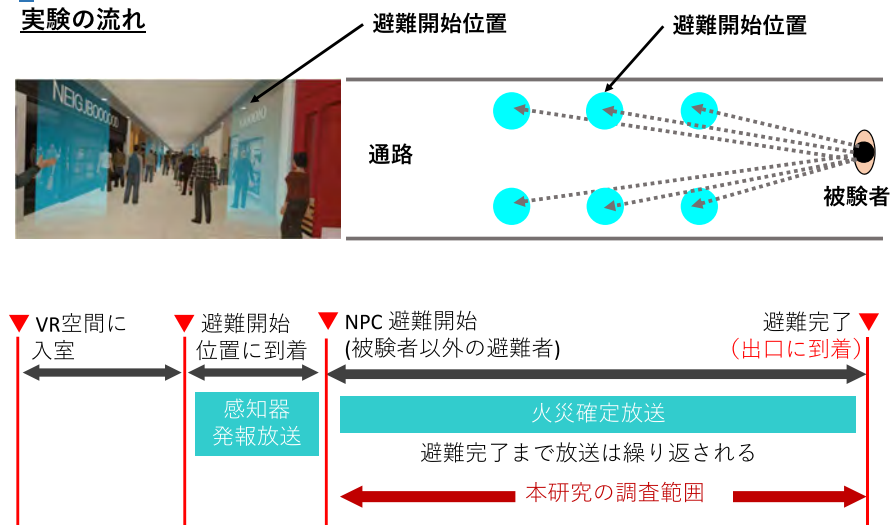
実験条件

空間条件



実験条件

実験の流れ



実験条件

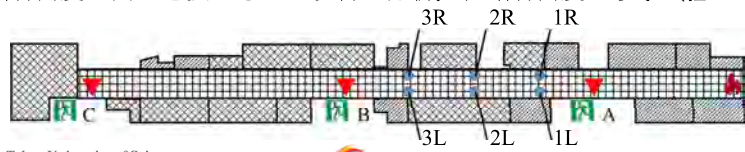
実験条件

避難者人数設定 (NPC)

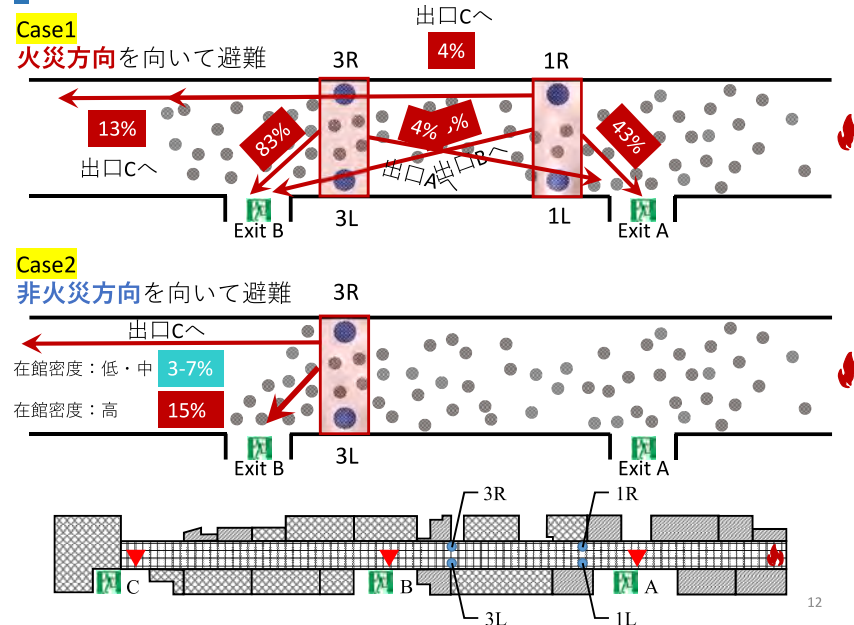
被験者	通路	物販店	飲食店	合計
30名 男性：25名 女性：5名	低密度 0.06人/m ²	0.125人/m ²	0.175人/m ²	248人
	中程度 0.125人/m ²	0.25人/m ²	0.35人/m ²	603人
	高密度 0.25人/m ²	0.5人/m ²	0.7人/m ²	1213人

実験条件

- Case1
4箇所 (1L,1R,3L,3R) の避難開始位置から
火災方向を向いた状態で避難をする条件の避難行動を分析
- Case2
2箇所 (3L,3R) の避難開始位置から
非火災方向を向いた状態で避難する条件の避難行動を分析
在館者密度が出口選択に与える影響を分析。在館者密度3水準 (低・中・高)



実験結果



実験結果

出口選択にばらつきがあったケース

在館者密度 : 中程度 (NPC : 603人)

避難開始時の向き : 火源側

13人 / 30人中

(43.3%)

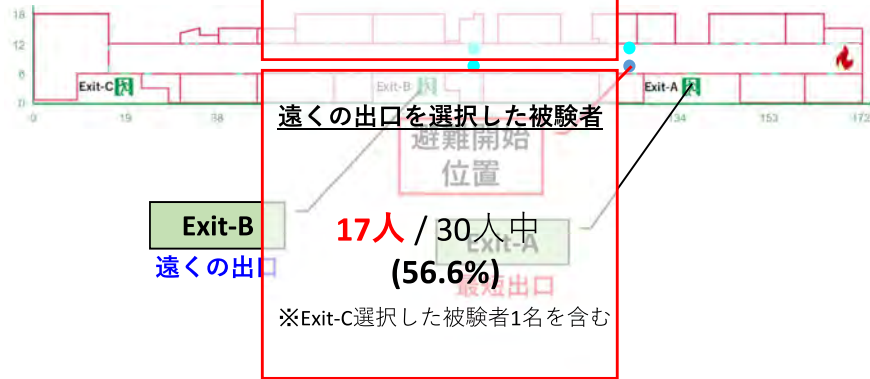
最短出口を選択した被験者

遠くの出口を選択した被験者

17人 / 30人中

(56.6%)

※Exit-C選択した被験者1名を含む



実験2

VR技術を用いた地下街火災時の避難行動分析

～異なる移動速度の避難者の構成比率の影響～

実験概要

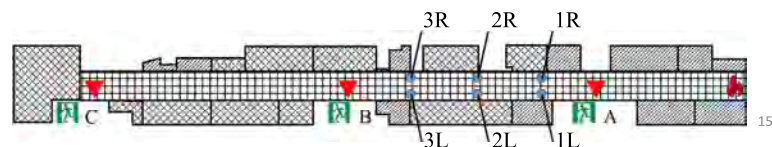
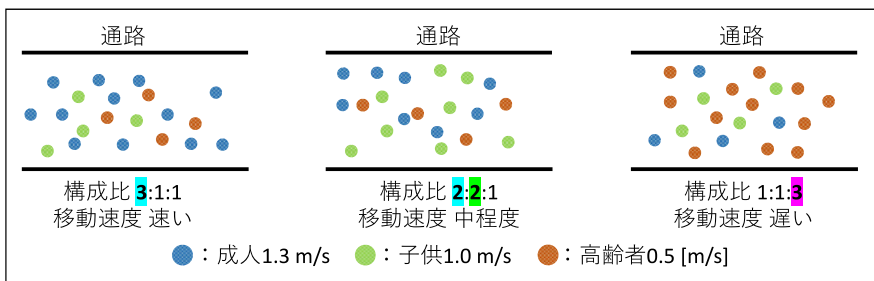
[目的]

異なる避難群集の移動速度が避難行動に与える影響を分析

NPCの設定条件

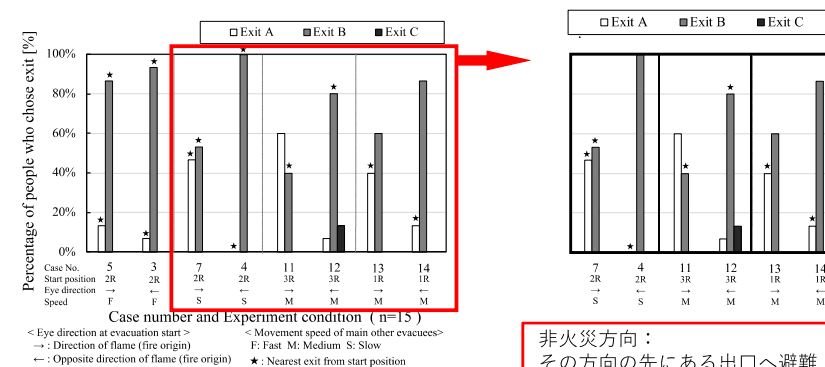
移動速度 : 成人1.3 m/s : 子供1.0 m/s : 高齢者0.5 m/s

構成比率 : 3:1:1を速い条件, 2:2:1を中程度, 1:1:3を遅い条件



実験結果

出口選択の傾向



避難開始時の方向の違いによる出口選択の傾向

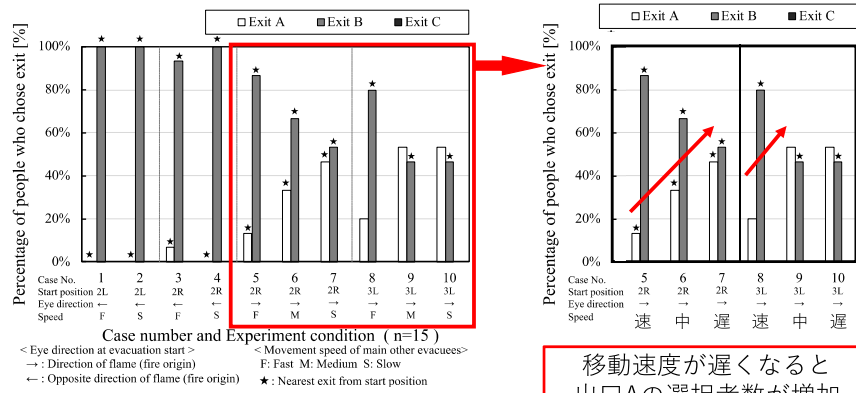
非火災方向：
その方向の先にある出口へ避難

火災方向：
その方向の先にある出口へ避難
方向転換→その先にある出口へ避難

実験1と同様の出口選択傾向

実験結果

出口選択の傾向



移動速度が速いと避難群集の流れに追従するように避難する傾向

実験結果

実験映像



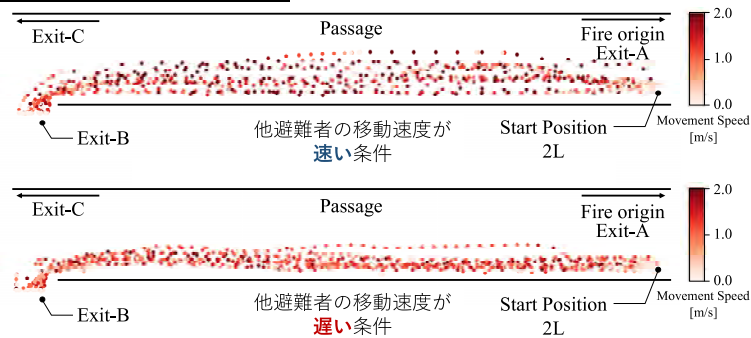
避難者間の空間が広い
・その間を縫うように避難した傾向があった



避難者間の空間が狭い
・他避難者に追従するように避難した傾向があった

実験結果

実験結果-移動軌跡と移動速度



他避難者の移動速度が速い条件

避難開始位置から出口までの区間でプロットの間隔が広く移動速度が速い
他避難者を追い抜くように避難

他避難者の移動速度が遅い条件

プロットの間隔が狭く移動速度は遅い、前の避難者に追従する傾向

VR実験での避難行動傾向に基づく
避難者行動モデルの開発

VR実験での避難行動傾向に
基づく避難者行動モデルの開発

VR避難シミュレータを用いた避難行動分析によって

実験1 避難開始時の位置と方向、在館者密度が避難行動へ及ぼす影響

- ◆ 在館者密度が高くなると、より離れた出口を選択する人が増加
- ◆ 避難開始時の向いている方向によって出口選択にばらつきがあったことを確認した

実験2 避難開始時の位置と方向、他避難者の群集速度が避難行動へ及ぼす影響

- ◆ 群集の移動速度によって選択する出口が異なる
- ◆ 非火災方向を向いて避難した人は最短経路で避難した

状況によって出口選択行動にばらつきがあることを確認した

従来の避難シミュレーションモデル

避難シミュレーションの多くは危険回避を基本とし最短距離や最小コスト選択などに基づく経路選択が採用

出口選択にばらつきを与えた避難者行動モデルを提案

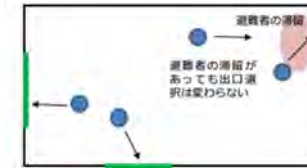
VR実験での避難行動傾向に
基づく避難者行動モデルの開発

避難者行動モデルの改良（マルチレイヤーポテンシャルの導入）

ポテンシャル法：避難の際により危険度の少ない方向に移動することを前提とし、空間内の危険度をポテンシャルとして表現し、避難者を前提に基づいてポテンシャルが低くなる方向に移動させて避難状況を推定する方法

現行の避難シミュレーションモデルは経路選択に関し、以下の仮定を行なっている。

1. 全ての避難者は、全ての避難出口を把握している。
2. 全ての避難者は、全ての避難出口を利用可能である。
3. 全ての避難者は、現在地より安全な場所に移動し続けることで避難出口に到達する



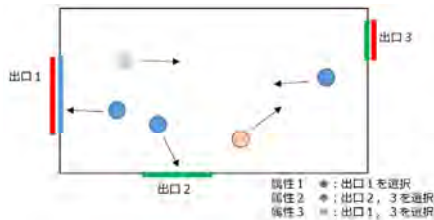
現行の避難シミュレーションにおける避難出口の選択

VR実験での避難行動傾向に
基づく避難者行動モデルの開発

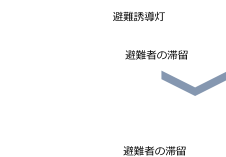
避難者行動モデルの改良（マルチレイヤーポテンシャルの導入）

エージェントによって異なるポテンシャルレイヤーを設定し、同一解析空間内に生成される複数のポテンシャルレイヤーをマルチレイヤーポテンシャルと定義。エージェントの避難経路選択に関し、以下の仮定を行う。

1. 避難者が認識している避難出口は完全に一致しないことが考えられる。
2. 避難者が選択する避難出口は、各避難者の属性に依存する。
3. 全ての避難者は、現在地より安全な場所に移動し続けることで避難出口に到達。
4. 避難出口の選択において、一定条件の成立をもって選択出口を変更する。
5. 移動先に他の避難者が存在する場合、最適なポテンシャル値以外で干渉を避けられる場所を選択する。



マルチレイヤーポテンシャルの考え方



状況に応じた避難出口の変更
上段：誘導等による出口選択の変更
下段：誘導等による出口選択の変更後

総括・今後の展望

本研究では、没入感のあるVRを用いて地下街における火災時の避難行動を分析した

避難行動分析手法としての適用可能性
様々なシナリオで避難行動の特徴を把握
出口選択にばらつきを与えた避難シミュレーションモデルの開発

今後の展望

複雑な平面計画での避難行動の分析

改良した避難シミュレーションの結果をVR避難シミュレーターに反映

VR実験で得た避難行動傾向に基づく避難者行動モデルの開発

■ 本研究成果に関わる業績

査読付論文

1. VR 技術を用いた避難訓練ツールの可能性～ 仮想地下街での火災避難における出口選択傾向の分析～ 田中俊成、朴聖經、水野雅之、ライフサポート 第32巻 第3号 90-96頁 (2020年5月)
2. VR技術を用いた地下街火災時における避難行動の分析 - Playerの避難開始時の位置や向きと異なる移動速度の避難者の構成比率の影響 - 田中俊成、水野雅之
日本火災学会論文集 投稿済, 査読中
3. Study on Exit Choice using VR Simulator of Underground Mall Fire, Toshinari Tanaka, Masayuki Mizuno, AOSFST 2021, アブストラクト 審査採択, Full paper 投稿中

学会発表

1. VR システムを用いた地下街火災避難における出口選択傾向の分析, 田中 俊成,水野 雅之, 日本建築学会関東支部研究発表会, 2020年3月 【口頭発表】
2. Toshinari Tanaka,Seong Kyung Park,Masayuki Mizuno, Experimental Study on Exit Selection using Virtual Reality in Case of Underground Mall Fire, 13th IAFSS, Canada, 2021 【Poster session】

25

■ 謝辞

本研究は、一般財団法人 大成学術財団の研究助成を受けて実施しました。
ここに記して感謝を申し上げます。

26

ご清聴ありがとうございました

27

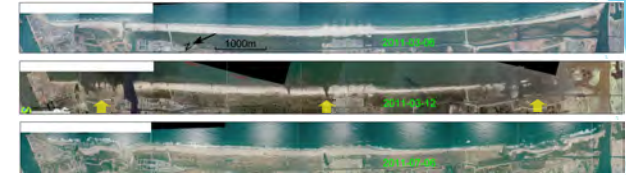
津波数値シミュレーションに使用する 新しい非定常抵抗則の提案

Proposal of a new friction law for tsunami numerical simulation

田中 仁
東北大学大学院工学研究科 教授
土木工学専攻

はじめに 津波による地形変化シミュレーション

仙台海岸

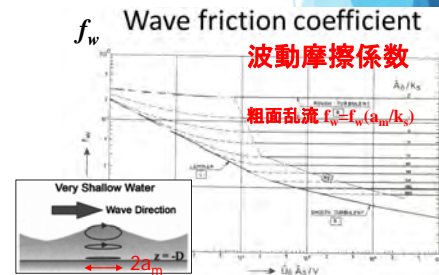
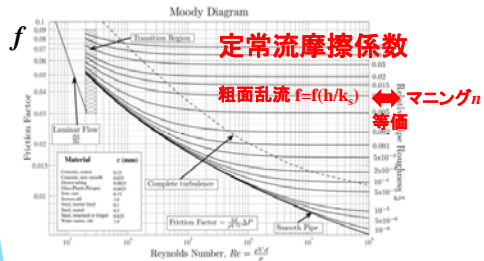


津波の摩擦係数に関する課題:

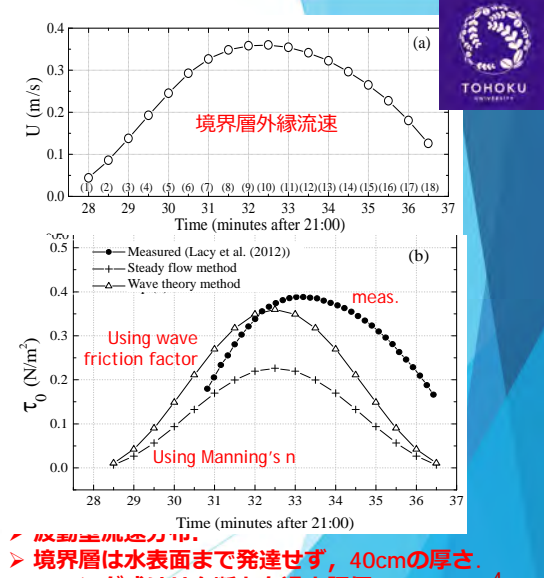
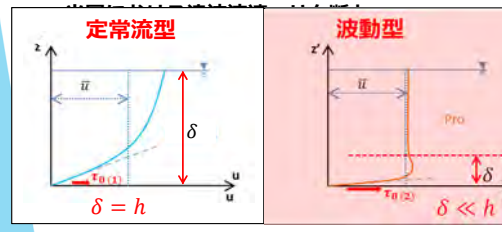
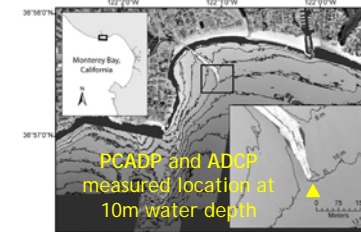
- ▶ たとえ長波でも、定常流摩擦係数を使用できない。
- ▶ 津波に対して波動摩擦係数の適用方法が不明。

既往研究

- ▶ **通常の津波の数値計算:** 平面二次元モデル (浅水流方程式) に基づき、定常流抵抗則 (マンニングの n や f) を使用。
- ▶ **孤立波底面境界層に関する実験:** 定常流の乱流構造とは大きく異なり、むしろ波動境界層に類似した非定常特性 (Liu et al., 2007; Sumer et al., 2010; Tanaka et al., 2012)。
- ▶ **Lacy et al. (2012) 津波による底面境界層の現地観測:** 波動境界層に類似した非定常特性

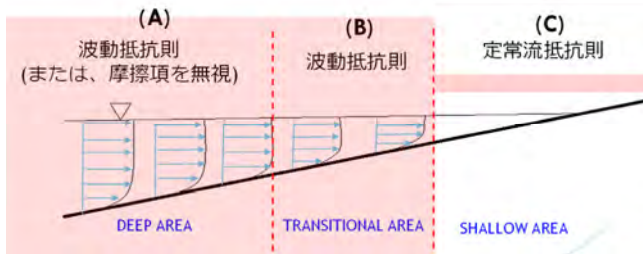
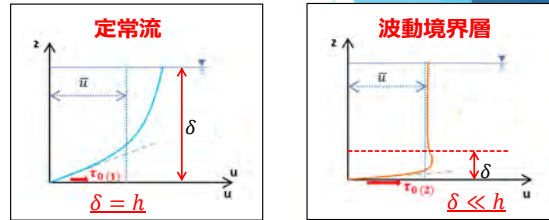


既往研究 Lacy et al. (2012)



- ▶ 收到断面断力 τ_0
- ▶ 境界層は水表面まで発達せず、40cmの厚さ。
- ▶ マニング式はせん断力を過小評価

- 津波の下での底面境界層は、定常流よりむしろ波動境界層に類似。
- したがって、底面せん断力の評価には、波動摩擦係数を使用すべき (Region (A) & (B)) .



▶ 一次元浅水流方程式 $\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0$ (1)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau/\rho = 0$$
 (2)

▶ マニング式による摩擦項. $\tau = \tau_c = \frac{\rho g n^2}{h^{1/3}} U|U| = \rho \frac{f_c}{2} U|U|$

▶ 新しい粗度係数:
新しい摩擦項:

$$\tau = \tau_w = \rho \frac{f_w}{2} U|U| = \frac{\rho g n_0^2}{h^{1/3}} U|U| = \frac{\rho g a^2 n^2}{h^{1/3}} U|U|$$

▶ 修正係数a:

$$a = \begin{cases} \sqrt{\frac{f_w}{f_c}} & \text{if } f_w > f_c \\ 1 & \text{if } f_w < f_c \end{cases}$$

where $f_w = \exp \left\{ -7.53 + 8.07 \left(\frac{30a_m}{k_s} \right)^{-0.100} \right\}$ $f_c = \frac{2\kappa^2}{[\ln(\frac{h}{z_0}) - 1]^2}$
(Tanaka, 1992)

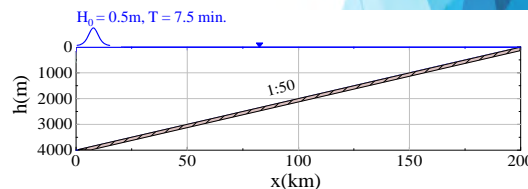
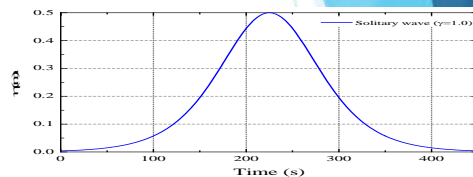
境界条件

孤立波:

$$\eta = \eta_0 \text{sech}^2(\gamma \sigma t)$$

計算条件

波源水深	$h_0 = 4000\text{m}$
波源波高	$H_0 = 0.5\text{m}$
周期	$T = 7.5 \text{ min}$
海底勾配	1/50
格子間隔	$\Delta x = 200\text{m}$
時間刻み	$\Delta t = 0.5\text{s}$
底質粒径	$d_{50} = 3\text{mm}$

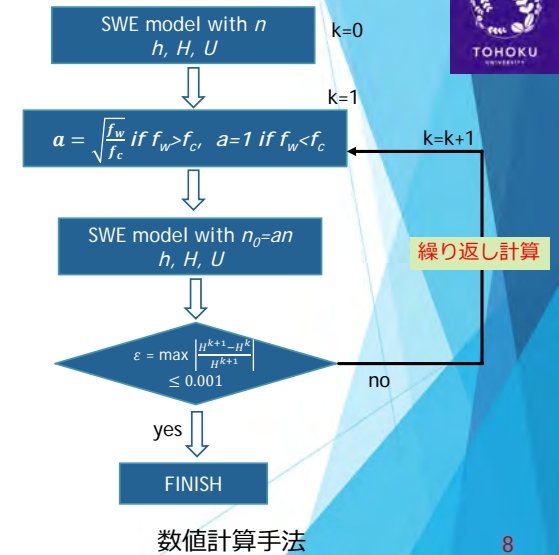
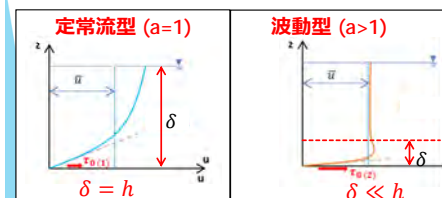


修正係数 a を用いた 1次元浅水流方程式による数値計算

$$n_0 = a n$$

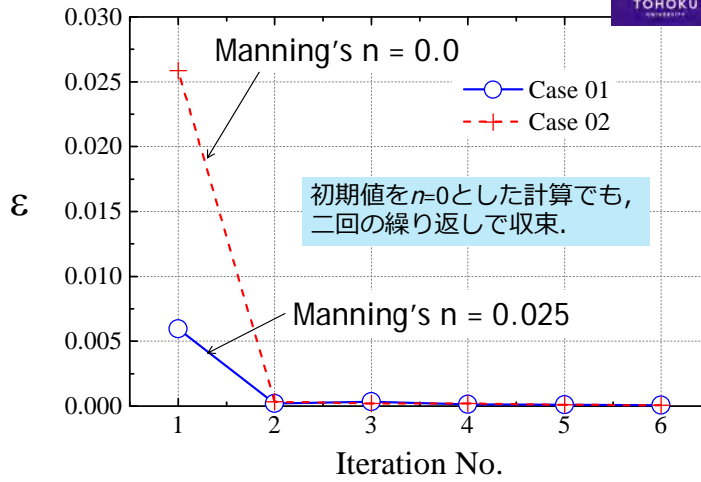
$$a = \begin{cases} \sqrt{\frac{f_w}{f_c}} & \text{if } f_w > f_c \\ 1 & \text{if } f_w < f_c \end{cases}$$

$a = \sqrt{\frac{f_w}{f_c}}$: 波動摩擦係数
 $a = 1$: 定常流摩擦係数



数値計算手法

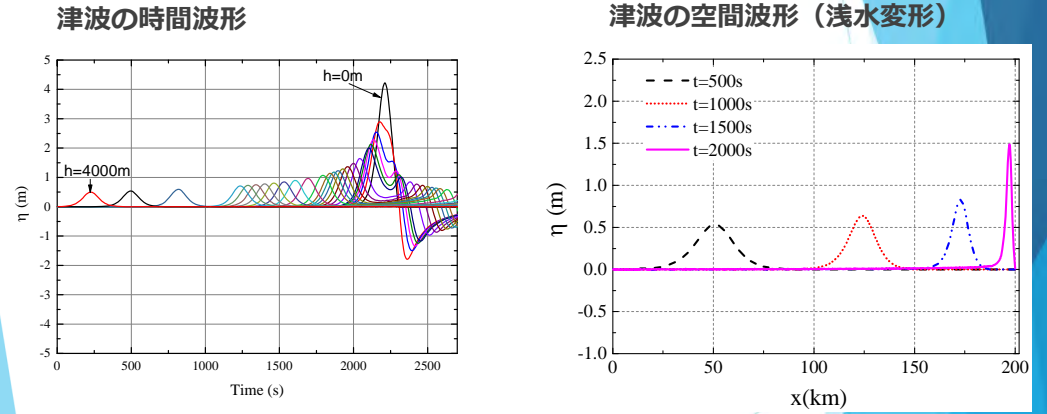
結果 浅水流方程式による計算結果 – 収束過程 –



誤差評価

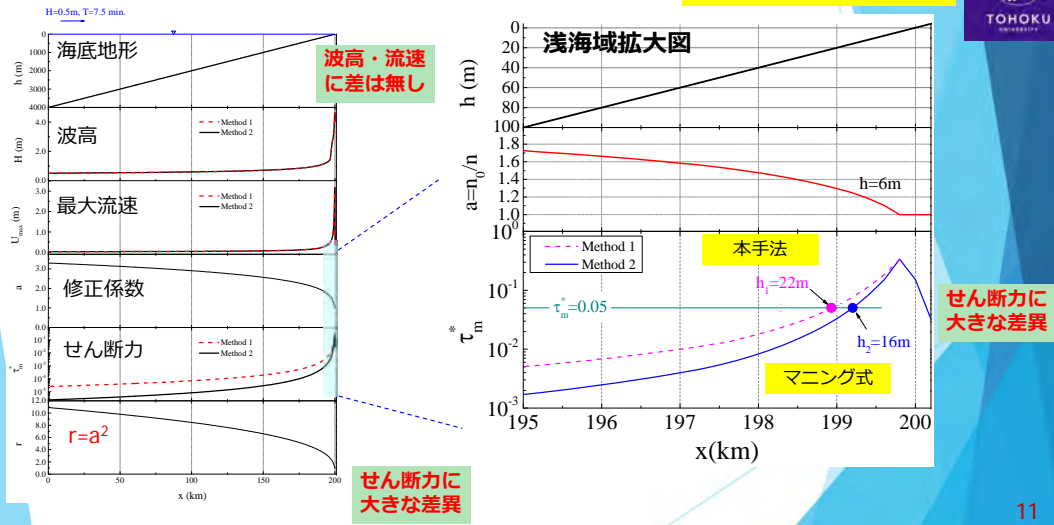
$$\epsilon = \max \left| \frac{H^{k+1} - H^k}{H^{k+1}} \right| \leq 0.001$$

結果 浅水流方程式による計算結果

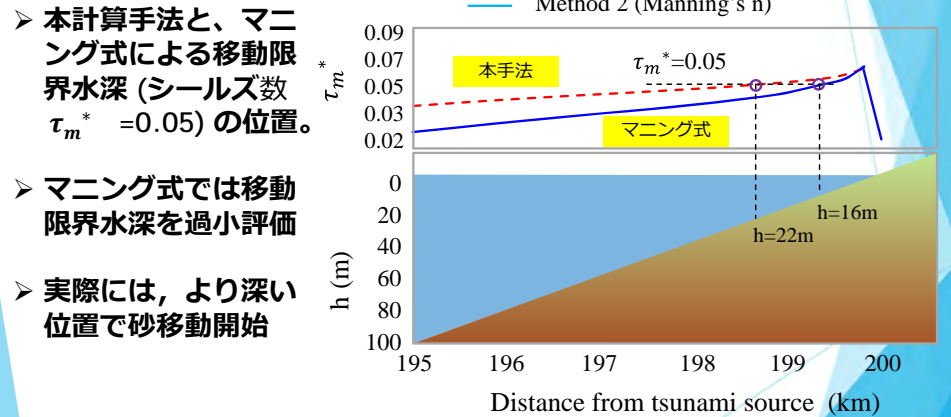


結果 浅水流方程式による計算結果

Method 1: 新しい提案手法
 Method 2: 従来のManning式



結果 シールズ数 (無次元掃流力)



- 本計算手法と、マニング式による移動限界水深 (シールズ数 $\tau_m^* = 0.05$) の位置。
- マニング式では移動限界水深を過小評価
- 実際には、より深い位置で砂移動開始

まとめ

- ▶ 浅水流方程式において、新しい底面せん断力計算法を用いた孤立波の浅水変形数値計算。
- ▶ 摩擦係数の遷移 (f_w から f_c へ) は、水深 $h=5$ から 6m に生じる。
- ▶ 本計算による底質移動限界水深は、 Manning式によるそれに比べてはるかに深く、土砂移動シミュレーションには本計算法が有効。
- ▶ 平面二次元シミュレーションにおいても同様な結果。
- ▶ **今後**: 土砂移動モデルへの本手法の適用。

13

ご清聴ありがとうございました。

主な発表論文

1. Nguyen Xuan Tinh, 田中 仁, 宋 文正: 津波の下での底面せん断力特性, 津波工学研究報告, 第36巻, pp.119-125, 2019.
2. Nguyen Xuan Tinh, 田中 仁, 宋 文正: 乱流モデルを用いた津波の下での底面境界層数値解析, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.75, No.2, p.L13-L18, 2019.
3. Nguyen Xuan Tinh, 田中 仁, 西脇 遼, 渡辺一也: 摩擦係数の遷移特性を考慮した津波伝搬の一次元数値計算, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75, No.2, pp.L697-L702, 2019.
4. 田中 仁, Nguyen Xuan Tinh, 西脇 遼, 渡辺一也: 孤立波の伝搬に伴う底面せん断力の変化特性, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.76, No.2, pp.L150-L155, 2020.
5. 田中 仁, Nguyen Xuan Tinh, Nguyen Trong Hiep: 2011年東日本大震災津波後の野蒜海岸回復過程, 土木学会論文集C(環境), Vol.76, No.5, pp.L43-L48, 2020.
6. 田中 仁, Nguyen Xuan Tinh: 津波の下での底面境界層のflow regimeに関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.76, No.2, pp.L397-L402, 2020.
7. Hitoshi Tanaka, Nguyen Xuan Tinh and Ahmad Sana: Improvement of the full-range equation for wave boundary layer thickness, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.8, Issue 8, 573, 2020. (IF=2.458)
8. Hitoshi Tanaka, Nguyen Xuan Tinh and Ahmad Sana: Transitional behavior of a flow regime in shoaling tsunami boundary layers, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.8, Issue 9, 2020. (IF=2.458)
9. Hitoshi Tanaka, et al. : Intrusion distance and flow discharge in rivers during the 2011 Tohoku Tsunami, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.8, Issue 11, 882, 2020. (IF=2.458)
10. Hitoshi Tanaka and Nguyen Xuan Tinh: Necessity of using a wave friction factor in tsunami numerical simulation, Proc. the 8th International Conference of Physical Modeling in Coastal Science and Eng., pp.348-353, 2020. (Keynote lecture)
11. Nguyen Trong Hiep, Hitoshi Tanaka and Nguyen Xuan Tinh: Centennial to multi-decadal morphology change and sediment budget alteration after the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami along the Nobiru Coast, Japan, Journal of Marine Science and Engineering, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.9, Issue 3, 265, 2021. (IF=2.458)

14



せん断波速度 V_s を利用した
新しい液状化強度の推定法とその適用性検証

東京大学生産技術研究所
清田隆・片桐俊彦・志賀正崇

研究背景

液状化特性に大きな影響を及ぼす年代効果を、通常の設計でも評価できるようにしたい

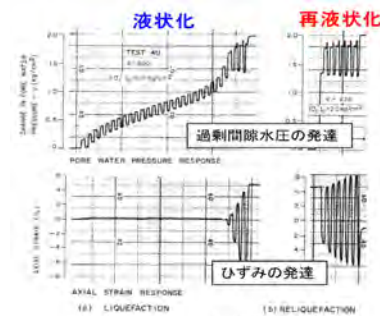
【正の年代効果】



関東地盤, 2011に加筆

3. 11による浦安市の液状化噴砂マップ
古くから陸地化していた地域では、液状化被害は少ない

【負の年代効果】



Finn et al., 1970
過去の地震履歴や液状化履歴、応力履歴などにより、地盤強度が低下することもあり得る

➢ 1980年代に簡易液状化判定法が開発された当初から、年代効果を考慮することは課題であった。

液状化強度の推定に関する諸問題

標準貫入試験(N値)に基づく簡易判定の現状

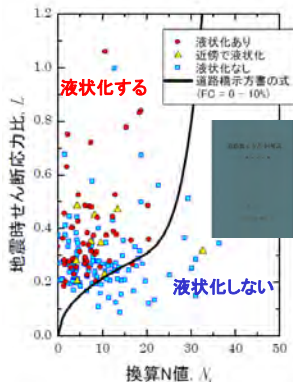
- ✓ 見逃しはほとんどないが、非液状化箇所の70%以上の地点で液状化強度を過小評価
- ✓ そもそもN値のみで密度と土粒子構造の影響を説明しようとすることに無理がある

乱れの少ない試料による室内実験の現状

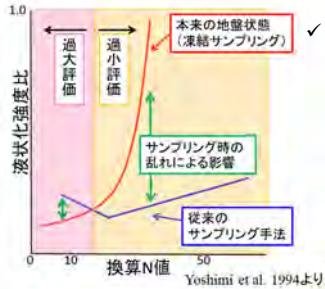
- ✓ 液状化検討の対象となる緩～中密の砂に対し、従来のチューブサンプリング法(トリプル・固定ピストン式等)ではその品質に問題がある。

液状化防災に関する問題

地価への影響、インフラ・構造物の耐震化への過剰投資、それに伴う対策の遅れに繋がる



東北地方太平洋沖地震時の液状化の実態
換算N値と地震時せん断応力比Lの関係
(土木研究所, 2014)

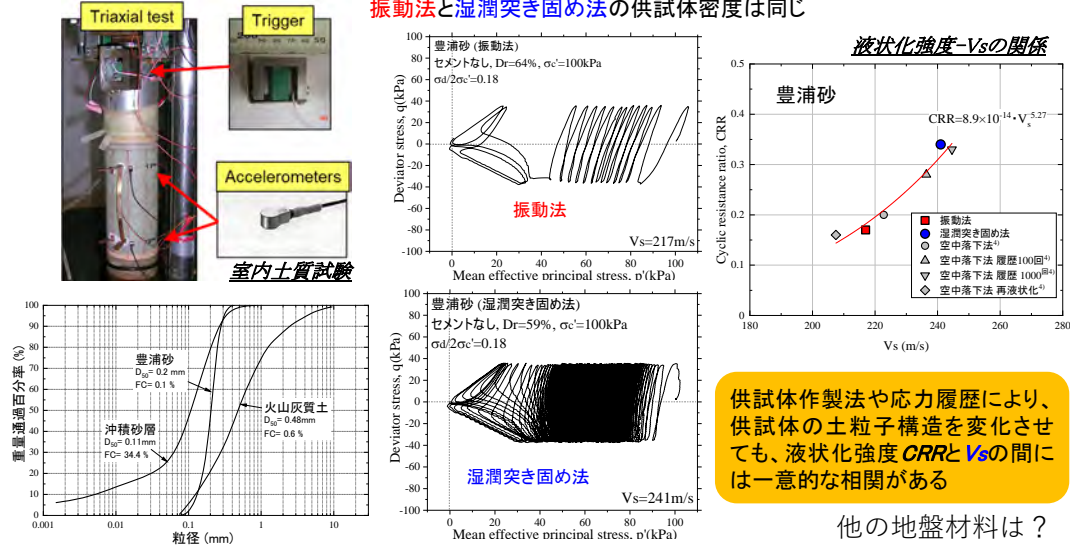


Challenge

液状化強度に及ぼす年代効果の影響(即ち土粒子構造)をせん断波速度 V_s で説明する

液状化強度に影響を及ぼす年代効果(土粒子構造)

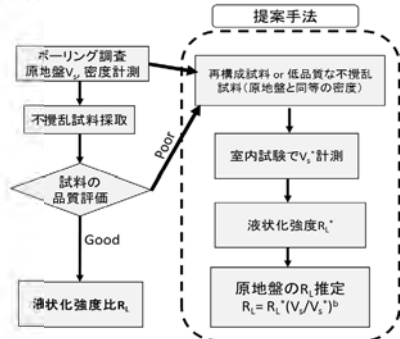
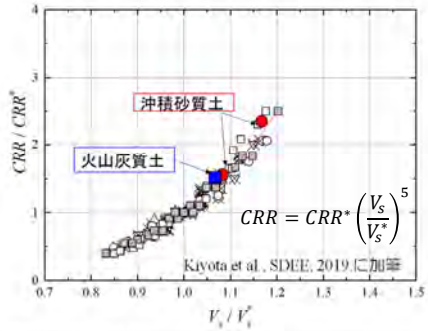
振動法と湿潤突き固め法の供試体密度は同じ



供試体作製法や応力履歴により、供試体の土粒子構造を変化させても、液状化強度CRRと V_s の間には一意的な相関がある

他の地盤材料は?

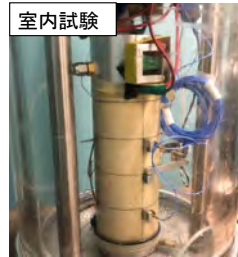
現場試験と室内試験を融合させた液状化強度推定法



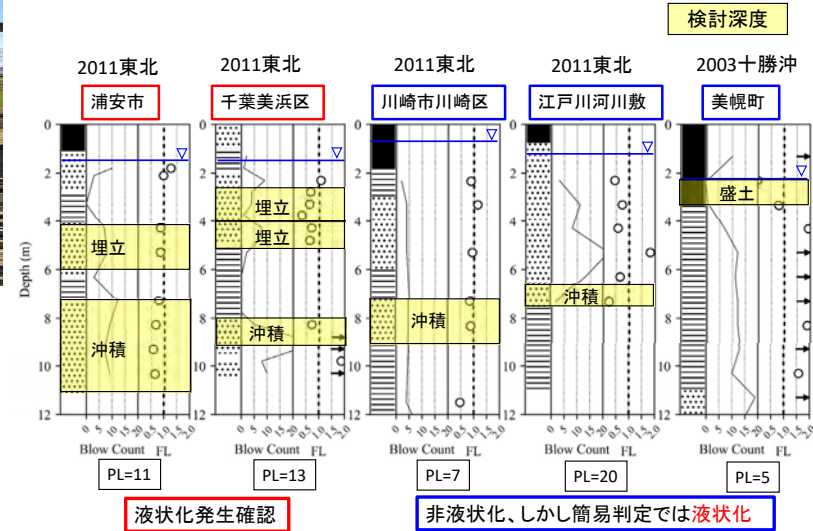
必要なパラメータ
PS検層: V_s
室内試験:
 V_s^* と CRR^*

提案手法の特徴:

- ある応力状態の液状化強度に及ぼす要因、①地盤種別、②密度、③年代効果(土粒子構造)、④応力履歴の内、原位置試料を用いて原位置密度に揃えることで①②を、原位置と室内試験の V_s で③④を考慮する合理的な手法
- 現行の地盤調査手法(PS検層、RI検層、液状化試験)で実現可能
- ボンディング効果(セメンテーションや塑性細粒分)を有しない地盤に有効
- 地盤工学分野で長年の課題であった地震履歴や年代効果(埋立・沖積～若い洪積の自然地盤)を考慮した液状化強度を推定できる可能性



新しい液状化強度推定手法の適用性検討



簡易法と室内試験結果、および新手法(清田ら)の比較

液状化発生確認

調査地名	対象地震	地表面加速度 (gal)	地質年代	液状化	検討深度 (GL-m)	平均N値	サンプリング	原位置 V_s (m/s)	室内試験		原位置CRR		安全率 F_L	
									V_s^* (m/s)	CRR^*	簡易法	清田ら	簡易法	清田ら
②千葉市美浜区	2011東北	232	埋立	発生	2.5-4.0	4	TS GP	89	110 117	0.31 0.40	0.20	0.11 0.10	0.64	0.35 0.32
				発生	4.0-5.0	8	TS	129	135	0.31	0.23	0.25	0.66	0.73
			沖積	不明	8.0-9.5	16	GP	148	151	0.39	26.8	0.35	69.9	1.14

埋立層

- 液状化地盤にしては、不攪乱試料(TSとGPサンプル)の液状化強度は大きすぎる(試料の乱れ)。
- V_s による新手法では、液状化強度は現実的な値に
- (GL-2.5~4.0m) それぞれ異なる不攪乱試料の液状化強度も、 V_s を考慮して新手法を適用すると同等の値になる。サンプリングによる土粒子構造の乱れが V_s で適切に補正されている。

沖積層でも、概ね妥当な結果

簡易法と室内試験結果、および新手法(清田ら)の比較

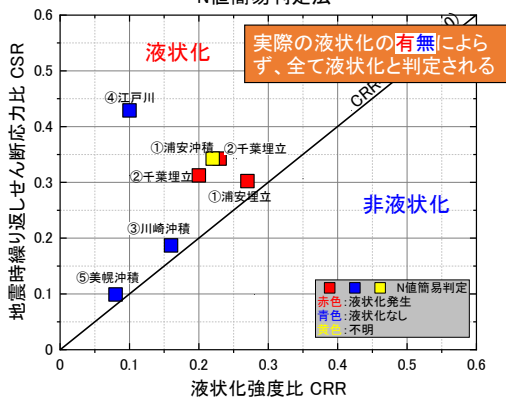
実際は非液状化、しかし簡易判定では液状化

調査地名	対象地震	地表面加速度 (gal)	地質年代	液状化	検討深度 (GL-m)	平均N値	サンプリング	原位置 V_s (m/s)	室内試験		原位置CRR		安全率 F_L	
									V_s^* (m/s)	CRR^*	簡易法	清田ら	簡易法	清田ら
③川崎市川崎区	2011東北	128	沖積	なし	7.2-9	5	攪乱	179	104	0.09	0.16	1.07	0.85	5.73
④江戸川河川敷	2011東北	262	沖積	なし	6.5-7.5	2	攪乱	155	128	0.16	0.10	0.42	0.24	0.98
⑤美幌町	2003十勝	85	盛土	なし	2.5-3.3	4	攪乱	124	119	0.22	0.08	0.28	0.78	2.42

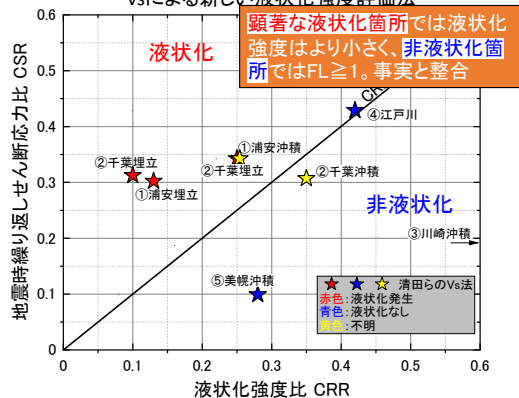
- 再構成試料を用いた室内試験の液状化強度は小さい(年代効果がない)
- V_s による新手法では、原位置と室内試験の V_s の比が年代効果を表現し、推定される液状化強度は大きくなる。
- いずれの地点でも、液状化が確認されなかった事実と整合する結果となった

まとめ

N値簡易判定法



Vsによる新しい液化強度評価法



本研究の知見が、年代効果や応力履歴を有する地盤の液化強度特性の理解に貢献し、延いては構造物の耐震設計の合理化につながることを期待いたします。

謝辞

一般社団法人 大成学術財団 関係者の皆様

江川拓也 様(土木研究所 寒地土木研究所)

石原雅規 様(土木研究所 つくば中央研究所)

本研究成果を含む業績により、令和2年度地盤工学会研究業績賞を受賞しました。

令和2年度地盤工学会賞受賞者

賞の名称	受賞業績名	受賞者
研究業績賞	砂質地盤の液化強度・変形特性に及ぼす年代効果の影響とその評価手法に関する研究	清田 隆 (東京大学生産技術研究所)
研究業績賞	● 経緯理由：本業績は、砂質地盤の液化特性の年代効果に関して、先駆的な試験法の開発、精緻な実験と数多くの現場調査や事例解析などの結果に基づき、長年の研究を積み重ね、学術および技術の発展に大きく貢献した貴重な成果である。土粒子構造とセメンテーションに着目した年代効果の統一的な学術的解釈に基づいて、原位試験と室内試験を融合した調査によって現地盤の液化強度比の推定の高精度化を可能にした。また、個々の地盤に固有の年代効果を現行の地質調査技術を用いて定量的かつ合理的に評価することを可能にし、実務にも大きく貢献している。一連の研究業績は構造物の地盤耐震設計の合理化、液化防災に関わる技術を総合的に発展させたものとして高く評価される。以上より、研究業績としてふさわしいと認められた。	