

被爆建築物の調査事例の紹介と 検査・診断技術の高度化に関する私見

2023年11月9日
コンステックテクノフェア2023
於:NTTクレドホール

広島大学 大久保

本日の話題

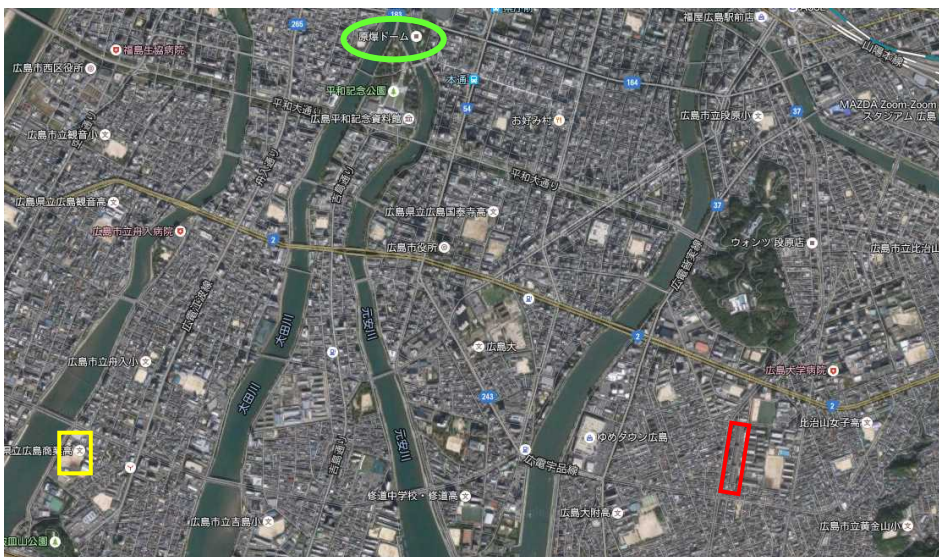
◎広島で被爆した建築物の調査結果

- ・県立広島商業高校
(解体時に採取したテストピースでの調査)
- ・広島旧陸軍被服支廠倉庫(現存建築物)

◎検査と診断技術の高度化に関する私見

- ・無線加速度センサでの経験
- ・周波数解析システムでの経験

被爆建築物の場所



広島県立広島商業高校

竣工1934年、解体2004～2005年の築70年の被爆RC造建築物

1983年の調査

外壁には多くのひび割れや剥落が生じており、かなり老朽化が進んだ状態で使用されていた

1984年に外壁改修及び階段室の改修

1990年から1993年にかけて内部改修

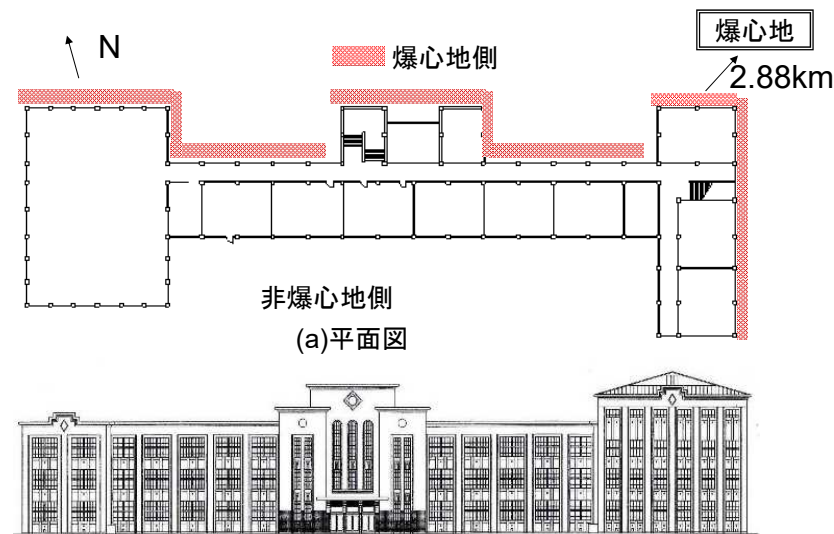


図1 調査建築物の平面図及び北立面図

採取した試験体

試験体記号	本数	試験体記号	本数	
非爆心地側 (建物内含む) から採取	*B梁	6	爆1梁	3
	*1梁	3	爆2梁	3
	*2梁	3	爆3梁	4
	*3梁	5	爆R梁	3
	*R梁	4	爆1柱(内)	3
	*1柱	3	爆2柱	3
	*2柱	3	爆3柱	3
	*3柱	3	爆R柱(内)	3
	*1壁	4	爆1壁	3
	*2壁	3		
	*3壁	3		
	*R壁	1		
	*1床	3		
*2床	3			
*3床	3			
*R床	1			

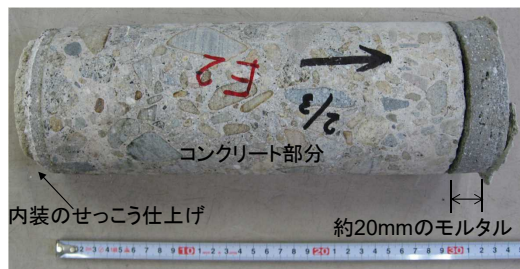
試験体記号は、「採取位置-階-部材」
例えば、
爆2梁:爆心地側の2階の梁から採取した試験体
*2柱:爆心地側ではない2階の柱から採取した試験体
なお、Bは基礎、Rは屋上ベントハウスを表す。

コンクリートの組成・物理的性状に関して実施した試験

試験	試験体及び測定内容
使用骨材の密度・吸水率	採取した試験片より、部位や部材の種類に関係なく、粗骨材を採取し、密度と吸水率を測定した。
コンクリートの単位容積質量・吸水率	爆心地側と非爆心地側から採取した試験体について単位容積質量や吸水率を測定した。
粉末X線回折	爆心地側と非爆心地側それぞれについて、採取した試験体において①屋外側から採取した試験体と②試験体内部(中心部)から採取した試料について、コンクリートを構成する物質の同定を行った。
TG-DTA	水和ペースト中の熱重量分析(TG: Thermogravimetry)と示差熱分析(DTA: Differential Thermal Analysis)により、特に、Ca(OH) ₂ とCaCO ₃ の同定と定量分析を行った。なお、試験体は粉末X線回折と同様の試験体とした。
細孔径分布	水銀圧入式ポロシメータによりコンクリートの空隙径分布を測定した。試験体は爆心地側と非爆心地側から採取したものとした。
断面観察	試験体の断面について、特にペーストとコンクリートの付着部やひび割れについて、顕微鏡により25倍程度の倍率で観察を行った。



(a) 爆心地側試験体「爆1梁」の外観



(b) 非爆心地側試験体「* 1梁」の外観
写真1 採取した試験体の外観(例)

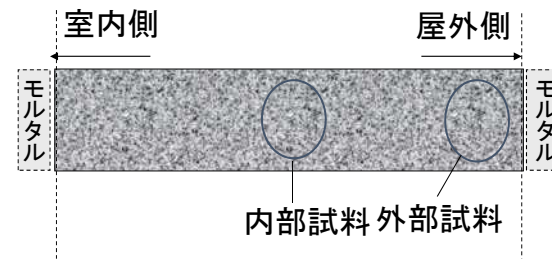


図2 梁・壁試験体から試料の採取



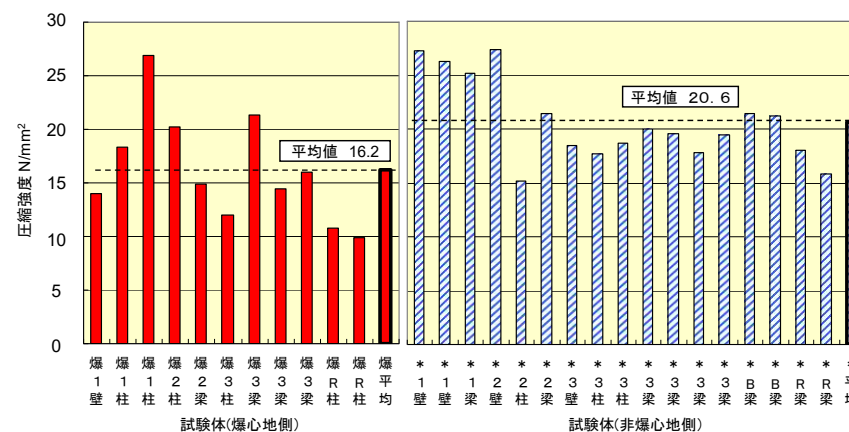
写真2 試験体のカット面から観察される骨材形状

試験体から採取して分類した骨材の密度

種類	絶乾密度 (g/cm ³)	気乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率(%)
A	2.41	2.43	2.46	1.86
B	2.42	2.44	2.46	1.82
C	2.44	2.46	2.50	2.82
D	2.47	2.49	2.55	3.25
E	2.49	2.51	2.53	1.71
F	2.55	2.56	2.58	1.31
G	2.56	2.57	2.58	0.60
H	2.59	2.60	2.61	0.46

※気乾密度は20℃ 60%RHの気中で安定させたときの密度

圧縮強度



(参考) 広島商業高校 コンクリート試験体の圧縮試験結果

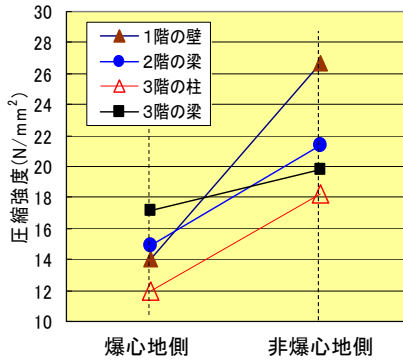


図7 爆心地側と非爆心地側のコンクリート強度の比較

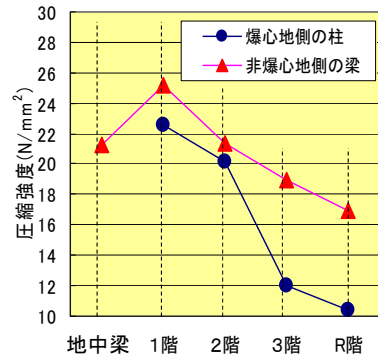


図8 階数の違いによりコンクリート強度分布

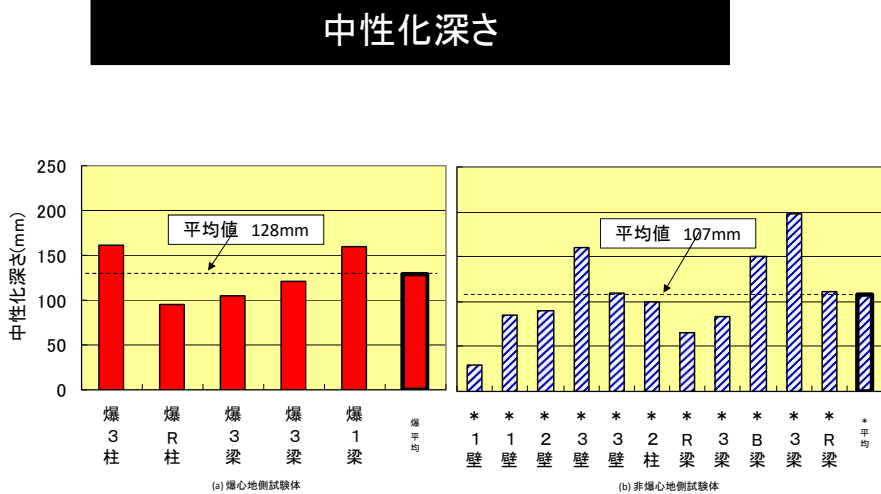


図9 コンクリートの室内側からの中性化深さ

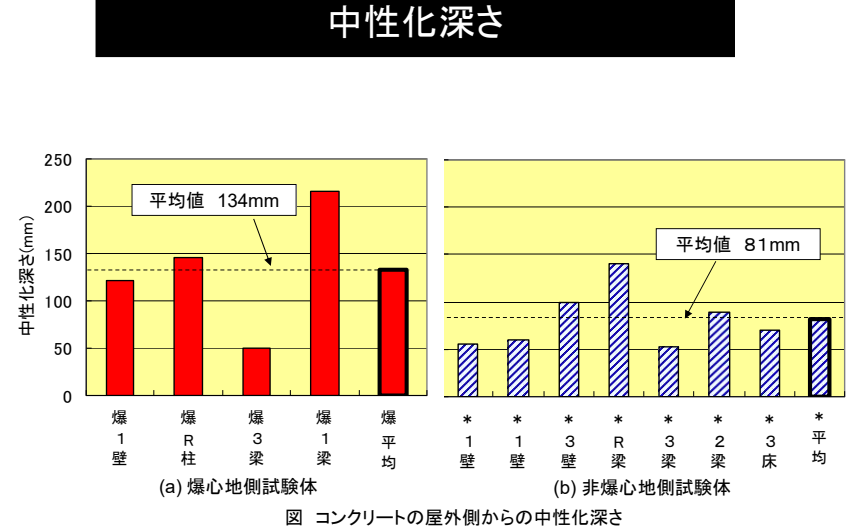
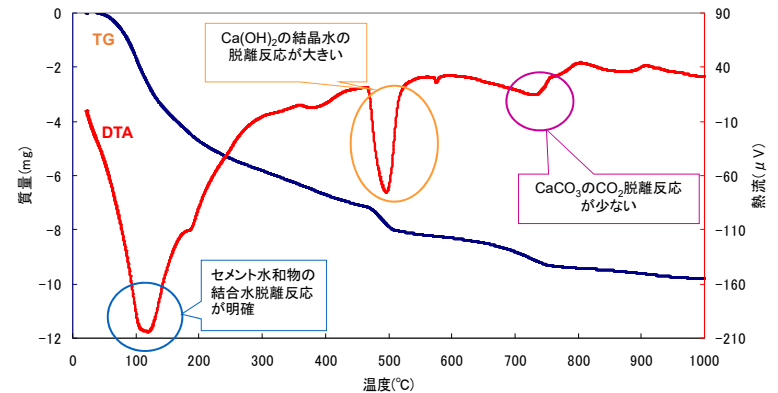
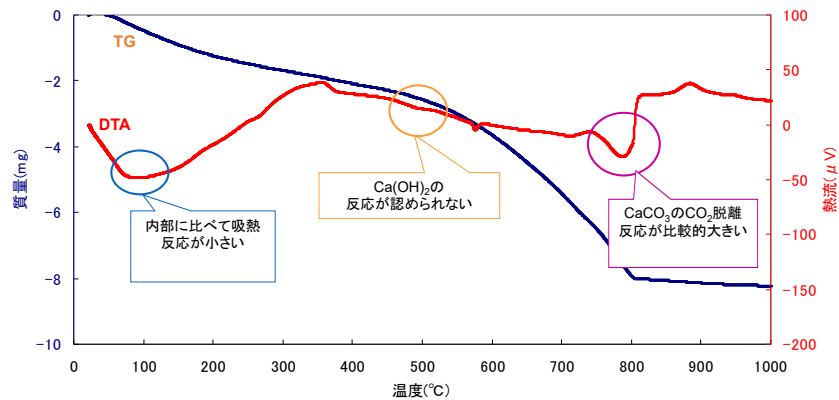


図10 コンクリートの屋外側からの中性化深さ



(a)内部のコンクリート

TG-DTA



被爆側外部のコンクリート

TG-DTA



写真 粗骨材とモルタルとの隙間(例)

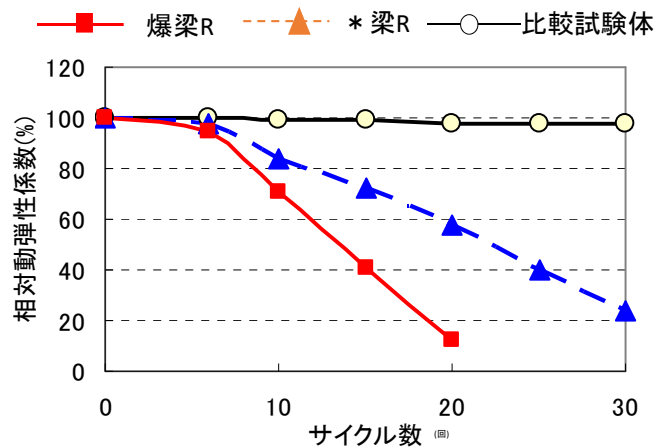
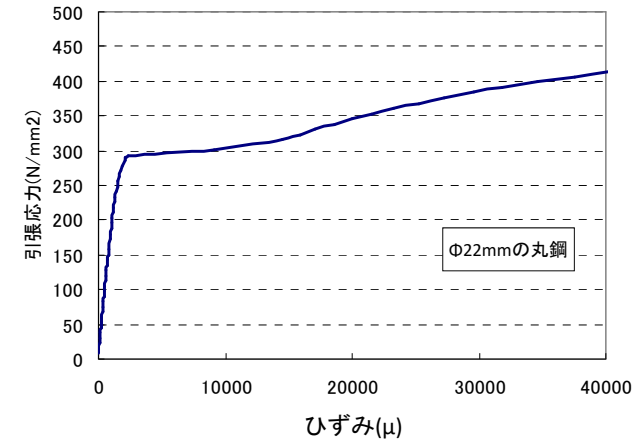


図 凍結融解試験における試験体の相対動弾性係数の変化



鉄筋の引張試験結果

試験体	φ21丸鋼		平均値	φ9丸鋼			平均値
	a	b		c	d	e	
鉄筋径(mm)	21.7	21.4	21.6	9	9.2	8.6	8.9
引張強度(N/mm ²)	454	389	422	498	480	461	480
ヤング係数(N/mm ²) (×10 ⁵)	2.03	2.13	2.08	2.12	2.24	2.20	2.19
降伏点(N/mm ²)	284	265	275	334	331	337	334
降伏比	0.625	0.682	0.654	0.671	0.687	0.690	0.682
絞り(%)	63.8	65.8	64.8	59.4	56	64.1	59.8



応力-ひずみ曲線の測定例

広島県旧陸軍被服支廠倉庫

表-1 建築物概要¹⁾

名称	旧陸軍被服支廠倉庫
所在地	広島市南区出汐2丁目4-60
建築面積	2,340m ² (1棟あたり)
延べ面積	5,578m ² (1棟あたり)
起工	1912年(大正元年)
竣工	1913年(大正2年)
築年数	約100年
構造	鉄筋コンクリート造外壁れんが3階建
建物経緯	広島県が国(大蔵省)から取得 県立工業高校として使用後, 運送会社に賃貸し、現在に至る



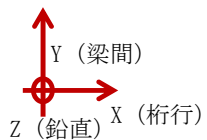
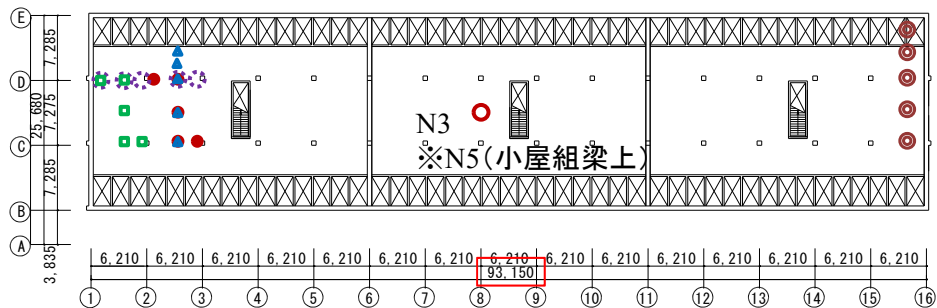
広島旧陸軍被服支廠



- ・用途: **倉庫**
- ・竣工: **1913年**
- ・延床面積: 各6427平米
- ・構造: **RC造煉瓦貼り3階**
- ・被服廠とは文字通り軍服や軍靴を製造する工場であり、この倉庫は大正二年に竣工している。極めて強靱な造り(壁の厚さは60センチ)が幸いして**被爆時にも倒壊することはなかった。**
- ・建物本体はRC(鉄筋コンクリート)造だ。**RCとしては国内の最古級**に入るので、建築史の見地からも残す価値は大いにある。

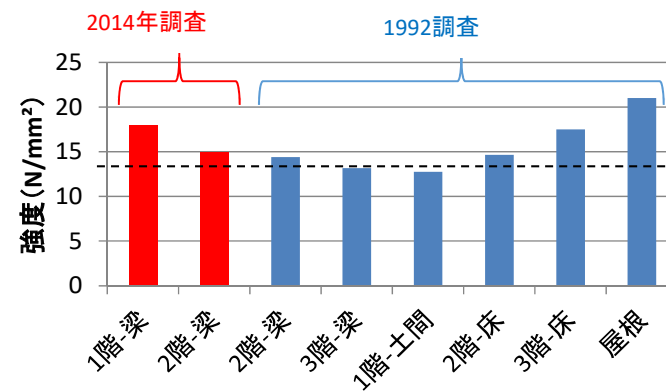
参考: 建築マップ 旧陸軍被服支廠倉庫
<http://www.arch-hiroshima.net/a-map/hiroshima/hifuku.html>





3F

調査結果： 圧縮強度, 中性化

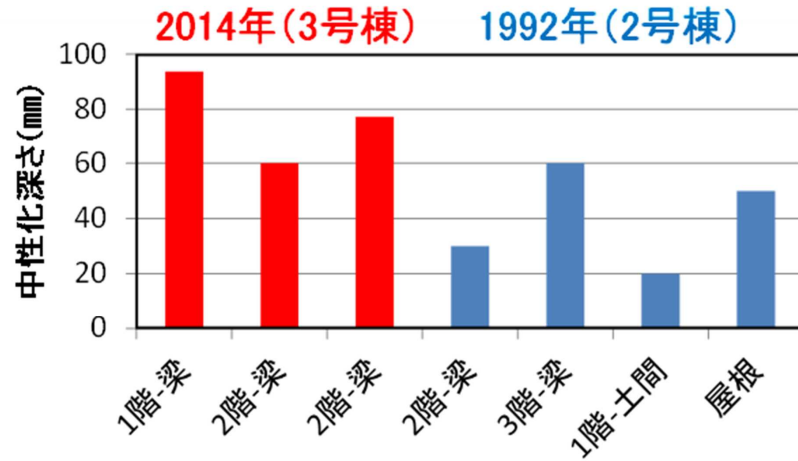
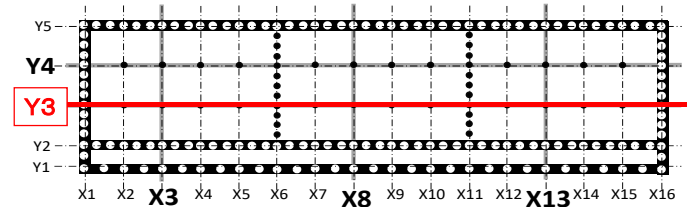
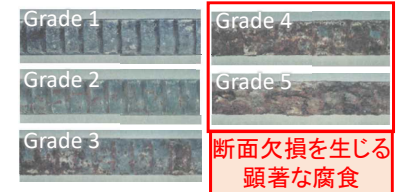
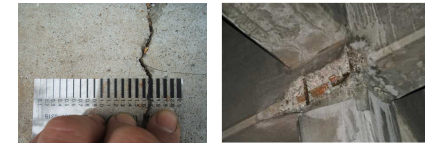


• 圧縮強度

- 市街地建築物法施工規則(大正9年)
→ 基準強度: 約 13N/mm²

調査内容

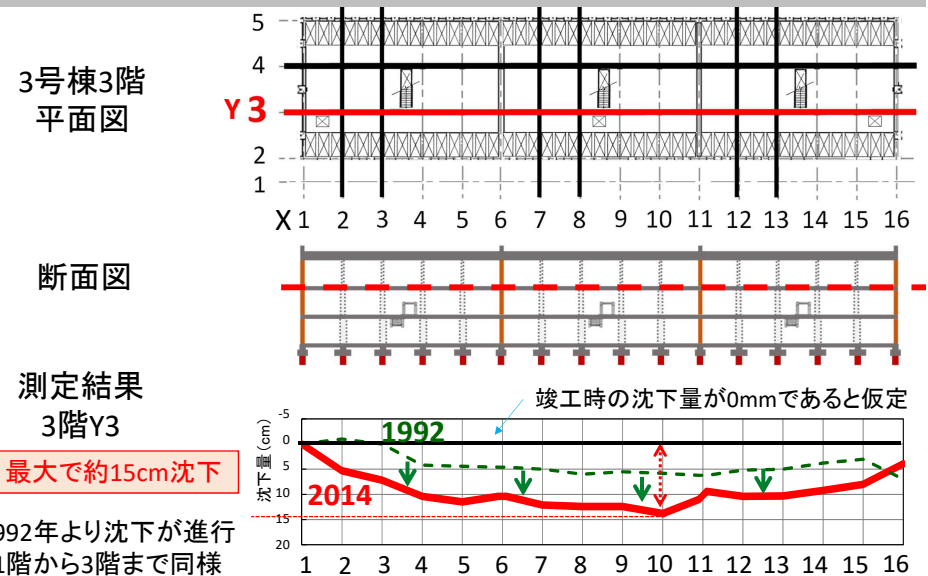
- ひび割れ
 - 特徴のあるひび割れの発生状況を記録
- 不同沈下量測定
 - Y3 通りでレーザーレベルを用いて測定
 - 各棟1, 2, 3 階で測定
- 鉄筋腐食状況
 - 露出している鉄筋の腐食状況を確認
 - AII指針に準じ、Grade1~5



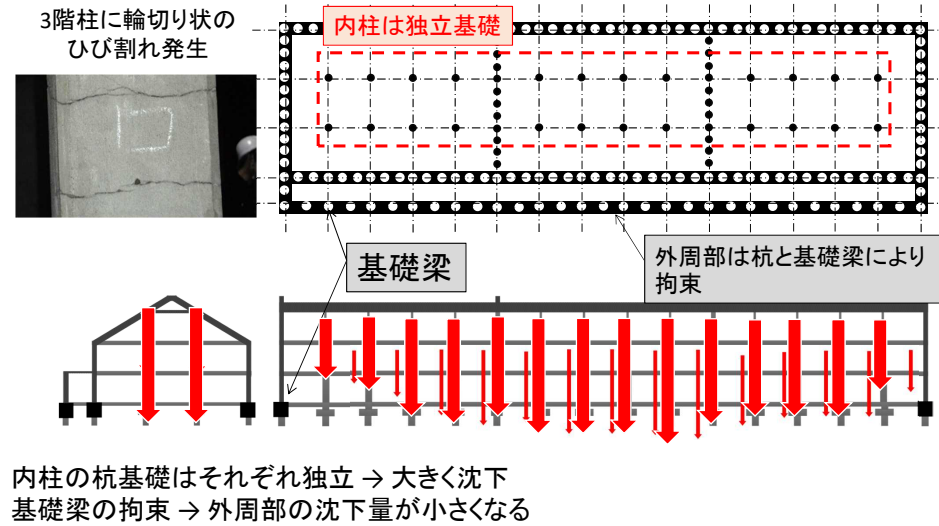
調査結果： ひび割れ

階	特徴のあるひび割れ	被害状況	柱断面形状
1階・2階	特に無し	 1階	□658 mm
3階	柱に剪断補強筋に沿う輪切り状のひび割れ	 3階	□320 mm

調査結果： 不同沈下量



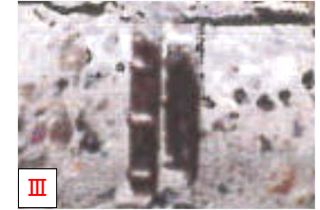
調査結果： 輪切り状ひび割れ発生概念



調査結果： 鉄筋腐食状況(1992年)

- はつり出した鉄筋の腐食状況を確認(1992年)
(漏水箇所の調査無し)

1992年 1号棟 1階 柱頭部(はつり)



- 1992年調査結果
- 中性化が鉄筋まで到達しているにも関わらず、腐食は軽微(Ⅱ～Ⅲ)

1992年 1号棟 1階 柱脚部(はつり)



- 中性化した箇所、ひび割れの生じた箇所においても、漏水のない箇所では、鉄筋の腐食は軽微であると考えられる。

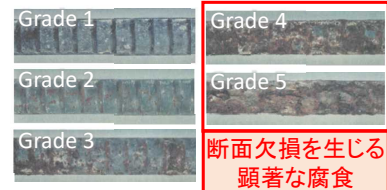


3階柱のひび割れ部

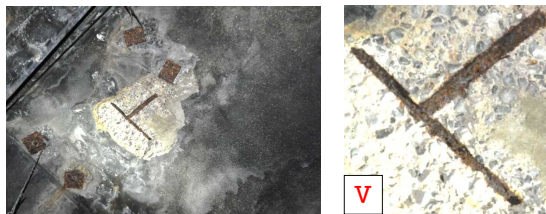
調査結果： 鉄筋腐食状況(2014年)

- 露出している鉄筋の腐食状況を確認(2014年)

- 鉄筋の腐食グレード(AIJ)



2014年 2号棟1階 屋根部(漏水)



2014年 3号棟1階 柱脚部

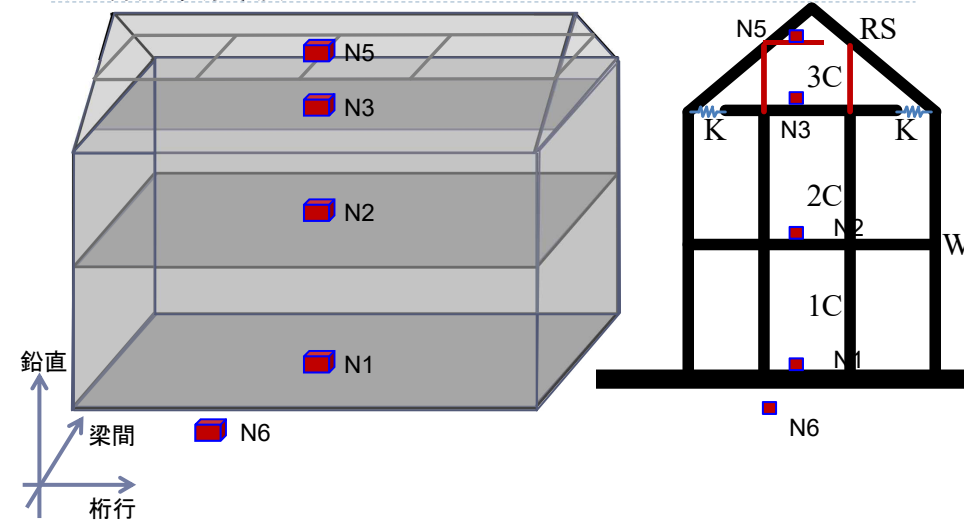


豆板により露出

2014年調査結果

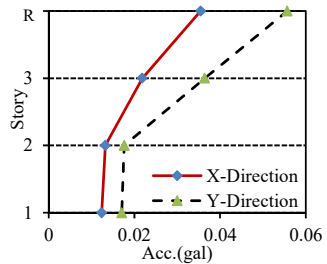
- 漏水箇所で顕著な腐食(V)
- 漏水のない箇所では、軽微(Ⅲ)

振動計測実験

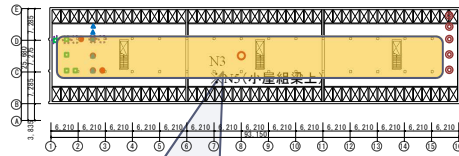
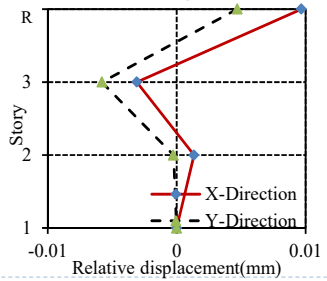


実験結果 (応答-変形関係)

応答加速度

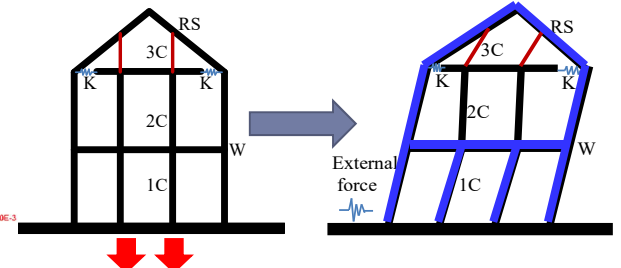
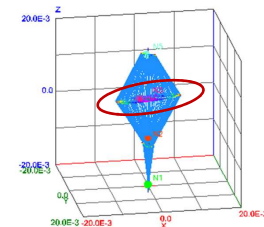


層間変位

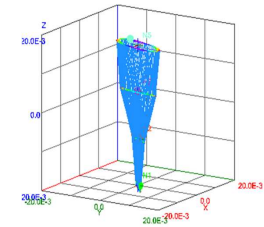


実験結果 (振動モード)

梁間方向



桁行方向



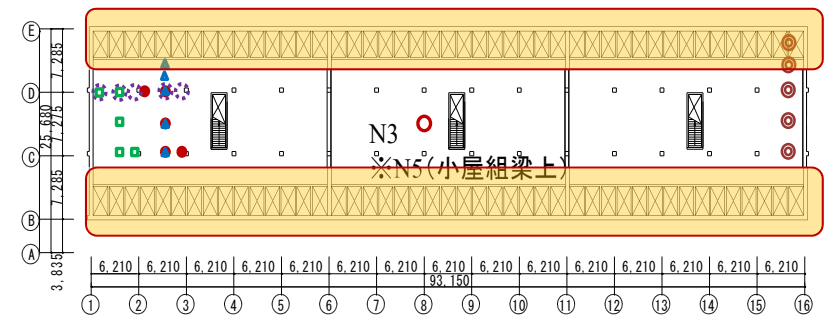
- ◆ 屋根と外周壁が剛性高い架構となっており、2階までは建物全体として外力を抵抗している。3階外周床の吹抜けにより、床と構造体はつなぎ梁より接続しているが、剛床になってない。
- ◆ 外部振動が発生した時、外壁と屋根及び1階架構は同じ向きに変形し、3階床接続部のばねが小さいため、架構と逆せん断が発生する可能性が高い。



床は柱に吊り下げられている

3F

補強手法の提案



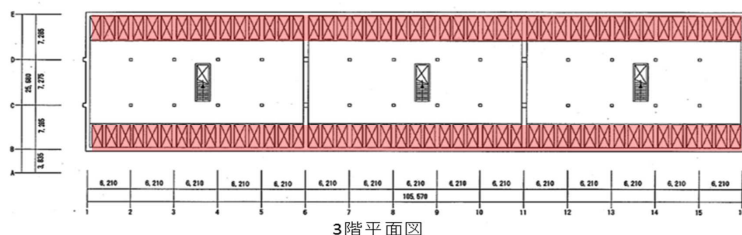
3階スラブの一体化や伝達能力の検討

目的

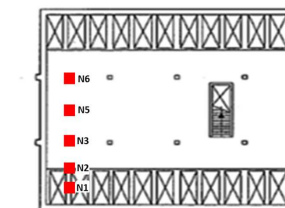
常時微動計測と人力加振実験



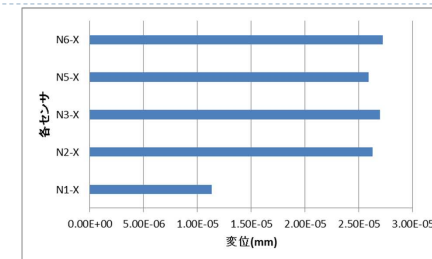
建物及び床スラブの振動特性
吹き抜け部が及ぼす影響



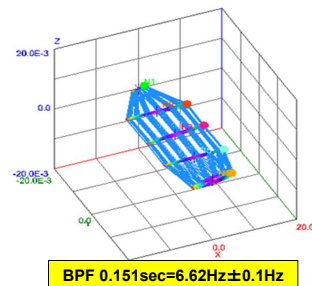
CASE-6の計測結果



CASE-6 設置位置



桁行方向の変位



振動モード図より
床スラブとつなぎ梁に振動の差がある
つなぎ梁上のセンサの変位が明らかに小さい



吹き抜け部によって外壁と床スラブが
一つの剛体になっていない

ここから、大久保の私見

建造物の
「検査と診断技術の高度化」

新しい検査・診断技術の普及

→ 「シーズ」よりも「ニーズ」

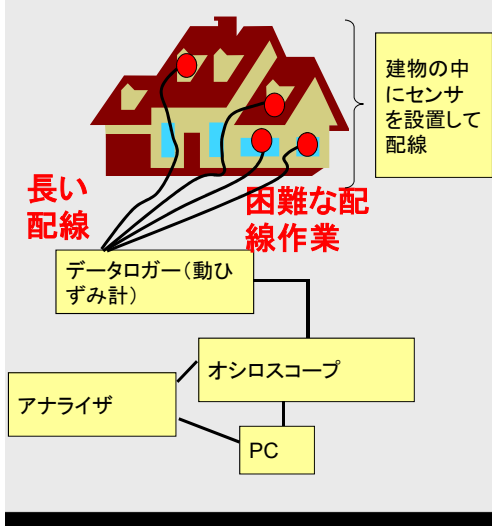
現場で困っていることに
手をさしのべる技術の重要性を痛感

- ・配線が煩わしい → 無線化
- ・データ処理が煩雑 → 専用解析ソフト
- ・程度を知りたい → デジタル化
- ・省人化 → 常時モニタリング

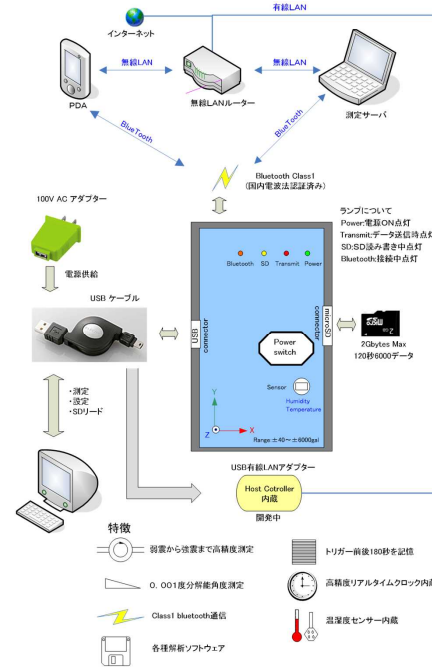
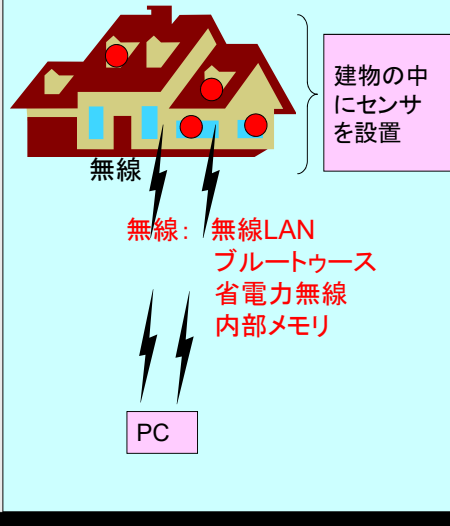
- ・検査のための足場が大変 → ドローン
- ・検査者による誤差・判断ミス → AI
- ・判断(閾値)の一元化 → 定量化・AI

目標:耐震リフォーム詐欺の駆逐(2002年頃)→加速度センサの無線化

従来の有線式センサー



無線センサー



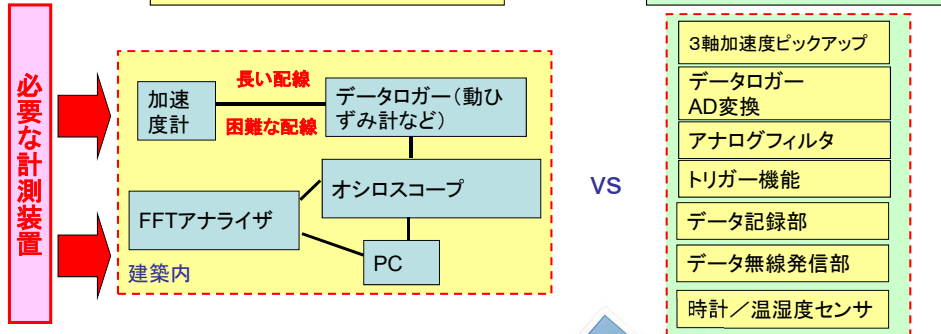
建築研究所時代に開発着手

一時期断念

広大の産学連携センター
住環境センシング研究室で
約5年をかけて開発

従来の有線式センサー

本センサー



最初の実証実験(2007年)

実際に行われた既存戸建住宅の耐震補強工事に本システムを適用し、その有効性を検証する

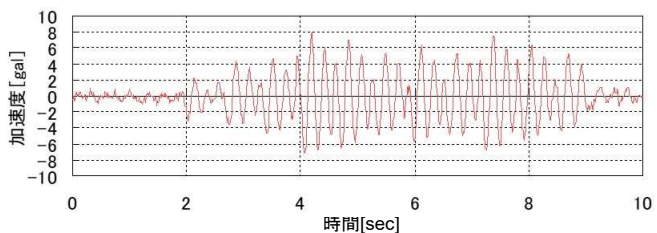


1階の耐震補強工事

実証実験

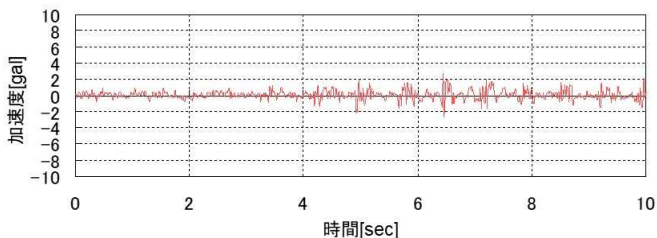
- 実験結果(加速度波形)

補強前

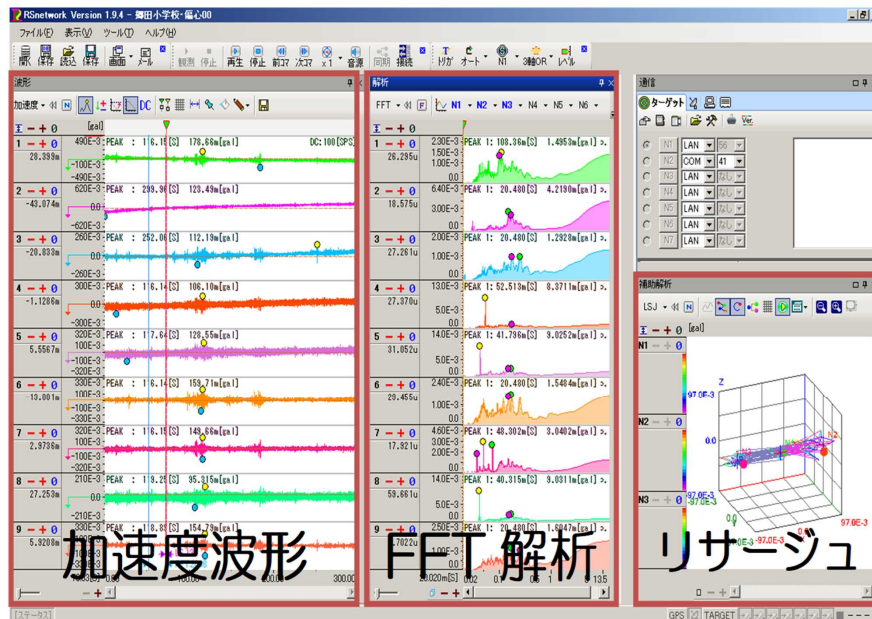


振動が抑制されている

補強後



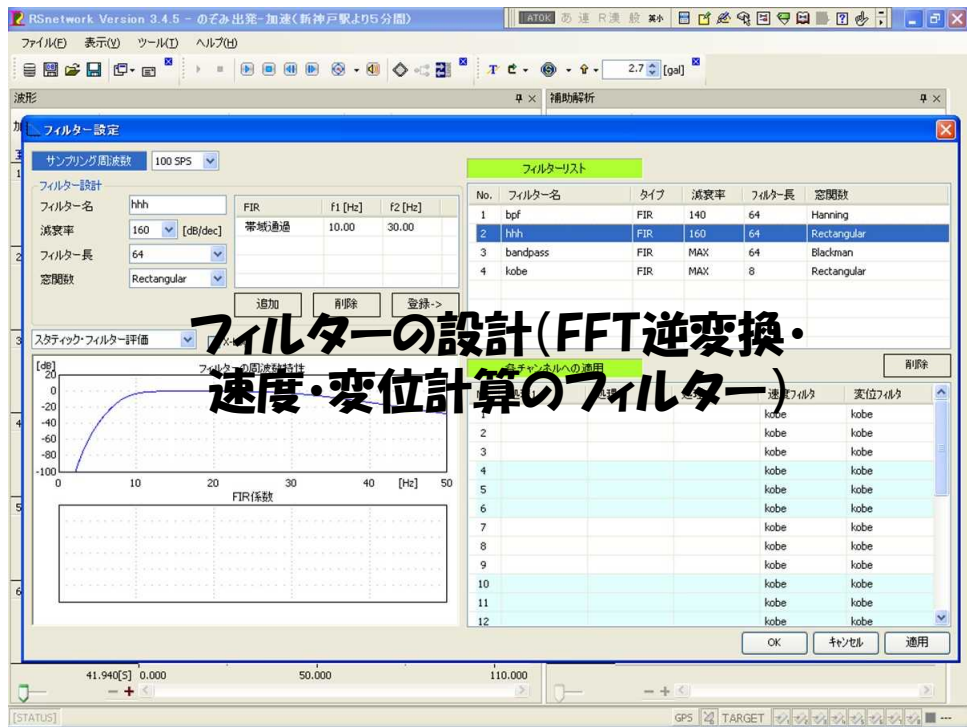
解析システムの開発



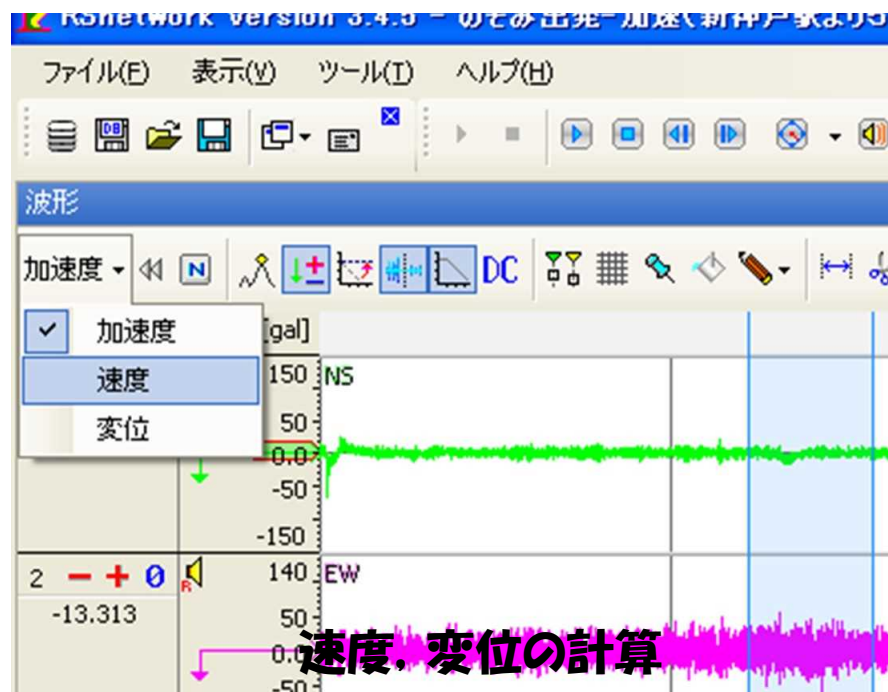
加速度波形

FFT 解析

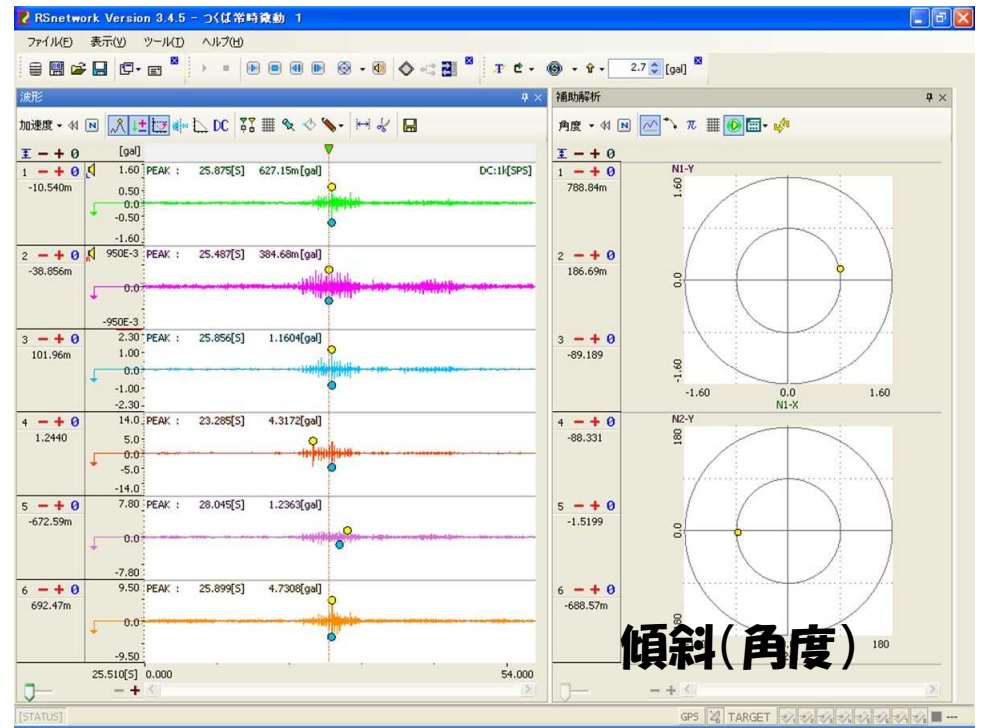
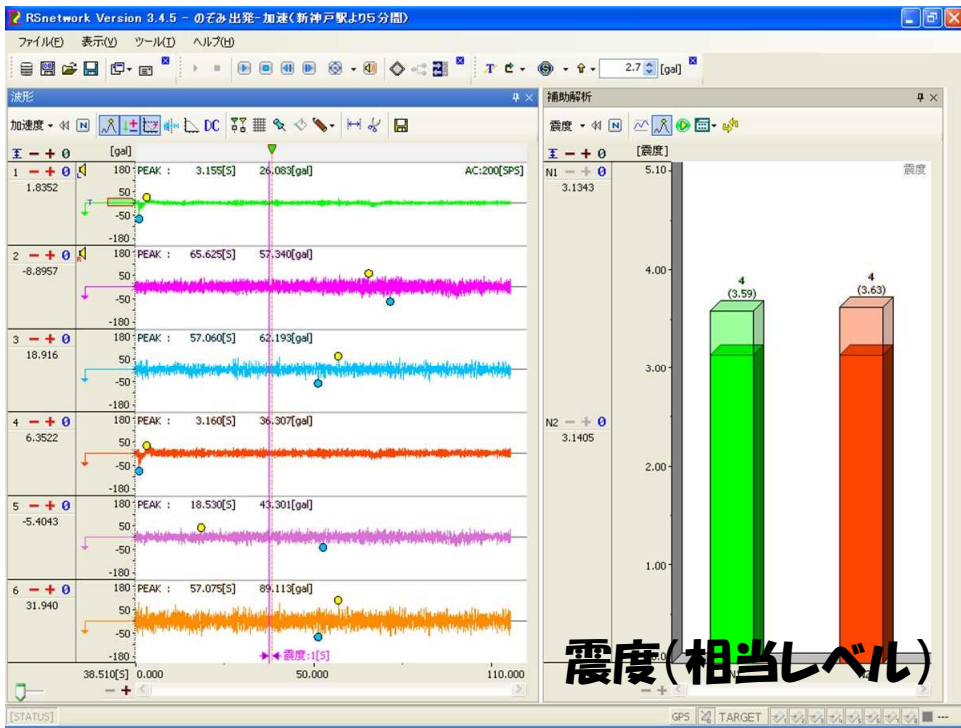
リサーチ



フィルターの設計(FFT逆変換・速度・変位計算のフィルター)



速度、変位の計算



解析設定

FFT マップ オクターブ解析 リサージュ 計測震度 角度 全波整流

窓関数 Rectangular

フレームサイズ 2048 [点]

オーバーラップ 25 [%]

ウォータフォール 5 [層]

ウォータフォール Free [秒]

DCキャンセル

平滑化(Parzen)

バンド幅 0.00 [Hz]

周期表示 x軸-LOG

y軸-LOG y軸-dB

ピーク表示 塗りつぶし

窓関数補正

オートスケール

リアルタイム

ピーク表示数 1

No.	機能	演算	入力No.
1	振幅	フーリエスペクトル	1
2	振幅	なし	1
3	振幅	フーリエスペクトル	1
4	振幅	パワースペクトル	1
5	振幅	クロススペクトル	1
6	振幅	伝達関数H1	1
7	振幅	伝達関数H2	1
8	振幅	フーリエスペクトル	1
9	振幅	フーリエスペクトル	1
10	振幅	フーリエスペクトル	1
11	振幅	フーリエスペクトル	1
12	振幅	フーリエスペクトル	1
13	振幅	フーリエスペクトル	1
14	振幅	フーリエスペクトル	1
15	振幅	フーリエスペクトル	1
16	振幅	フーリエスペクトル	1
17	振幅	フーリエスペクトル	1
18	振幅	フーリエスペクトル	1
19	振幅	フーリエスペクトル	1
20	振幅	フーリエスペクトル	1
21	振幅	フーリエスペクトル	1

構造物の診断に必要な
周波数解析

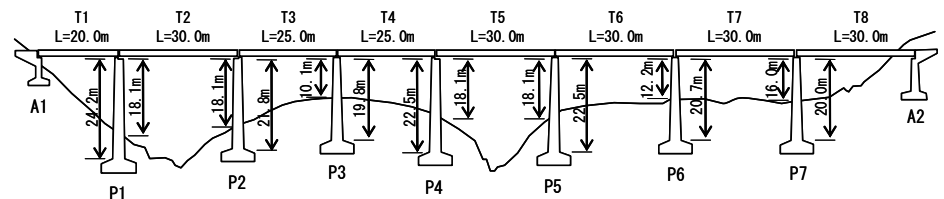
速度算定
変位算定
リサージュ

OK キャンセル 適用

計測対象の構造物

参考文献: 日本コンクリート工学会
コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, 2012,
pp919-924

隈部 佳・原田 悟・岩田 道敏・大久保孝昭



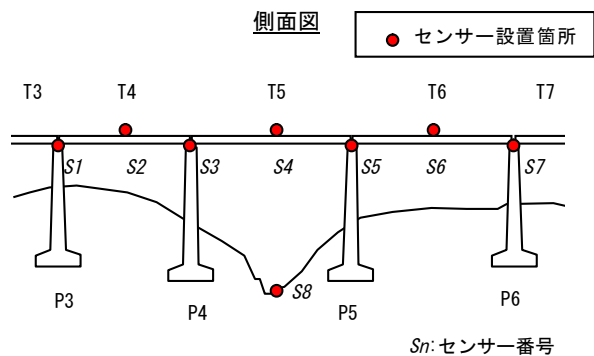
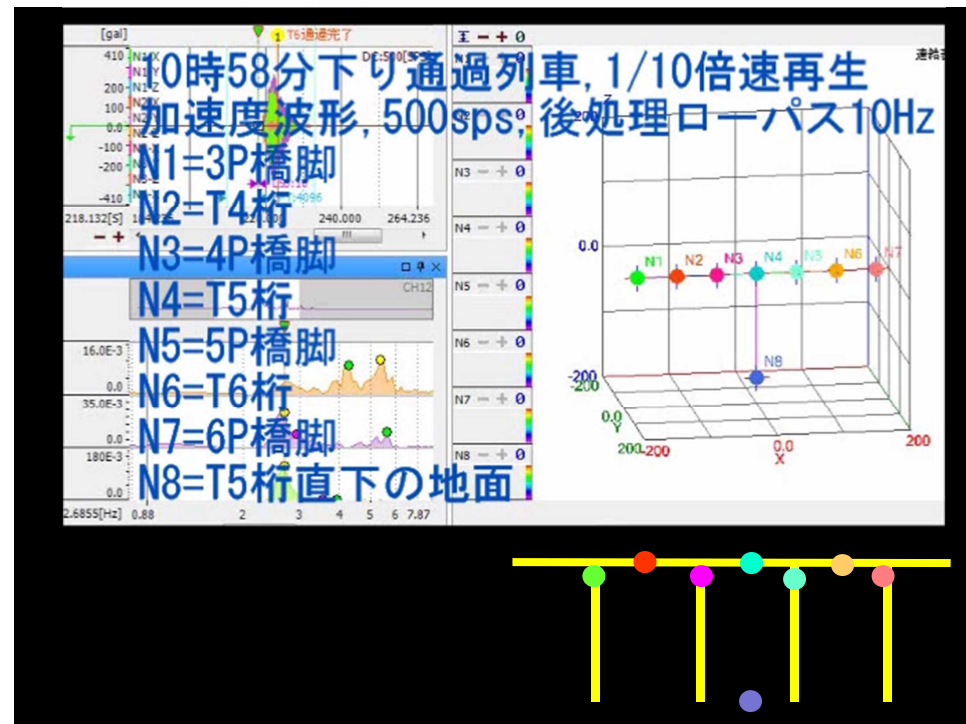
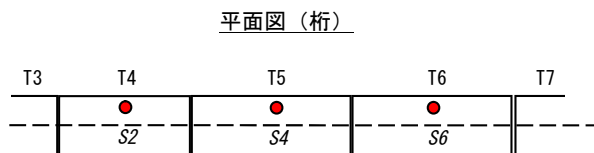


図-7 センサー設置状況



■対象住宅■
 所在地
 :熊本市東区
 益城町と御船町の間
 築年数 :20年
 階建 :2階建
 構造形式
 :1F S造
 2F 木造

無線センサの展開

熊本地震後の親戚など, 住民支援を通して

熊本地震発生後 2週間~4か月

戸建ての被災住宅(約40棟)の常時微動計測
 -木造・軽量鉄骨造約20棟ずつ-

無線加速度センサ



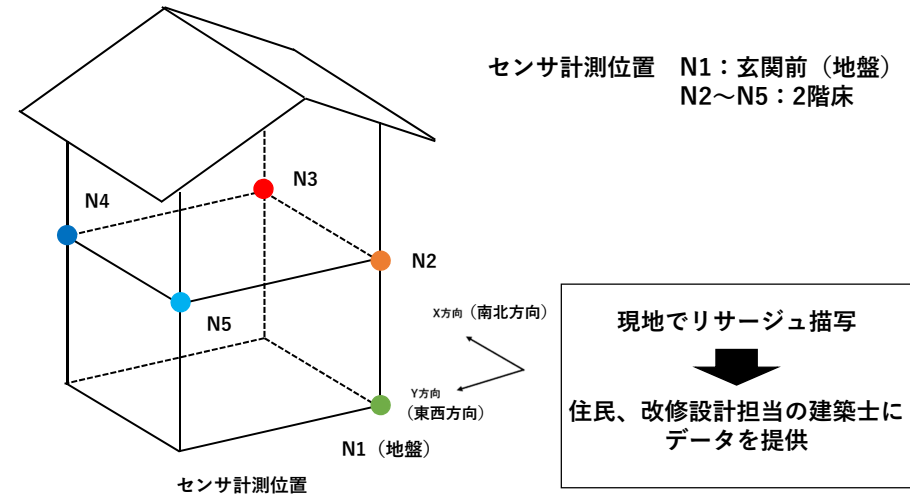
- ・安全性の判断
- ・補強設計の支援

当初の住民への説明とレポート

- 微動計測波形（加速度，変位）
- 固有周波数
- フーリエ振幅
- 各センサの位相差
- 1階の剛性
- リサージュ波形
- **3Dリサージュ動画**

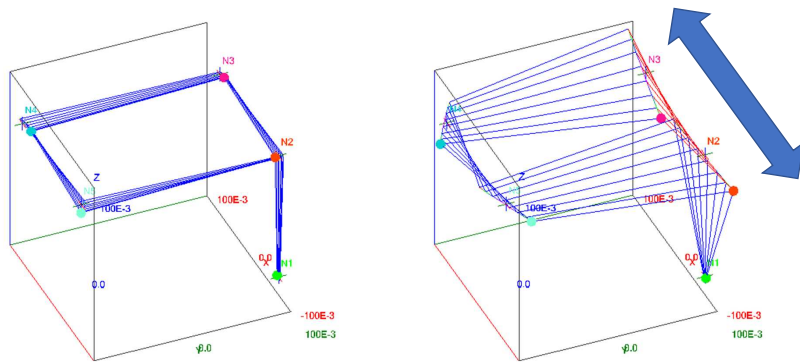
研究背景（熊本地震 被災住宅 計測内容）

熊本地震（最大震度7）被災住宅 無線加速度センサによる常時微動計測



研究背景（熊本地震 被災住宅 リサージュ結果）

熊本地震による被災住宅 振動リサージュ



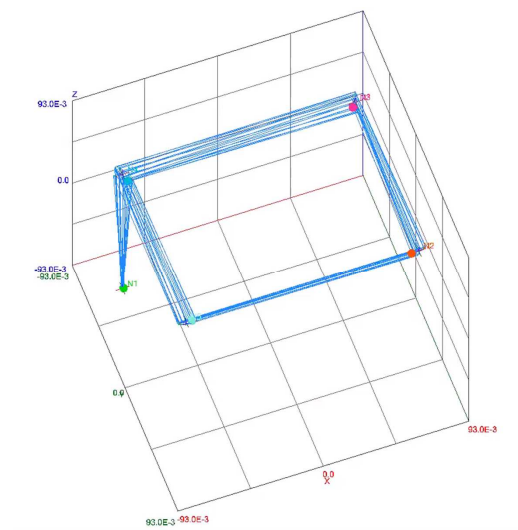
被災住宅A

フィルター（帯域通過 $5.0 \pm 0.05\text{Hz}$ ）
N2～N5 X方向 一次固有振動数 5.0Hz

被災住宅B

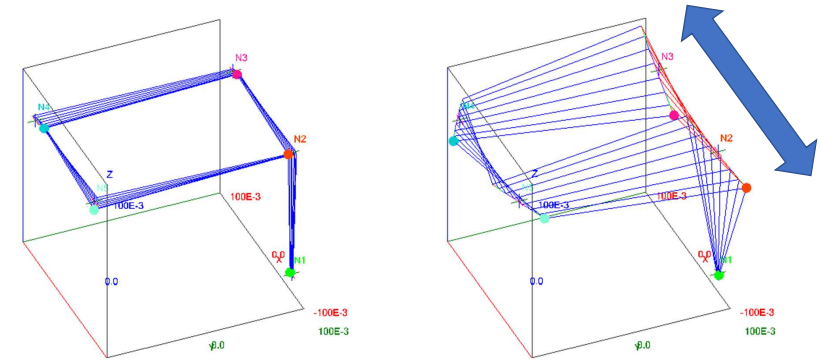
フィルター（帯域通過 $4.2 \pm 0.05\text{Hz}$ ）
N2～N5 X方向 一次固有振動数 4.2Hz

新築の戸建住宅のリサージュ



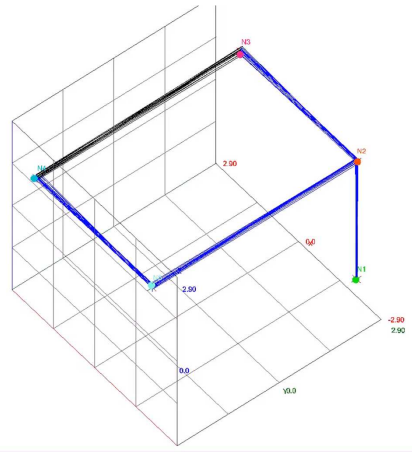
研究背景（熊本地震 被災住宅 リサーチ結果）

熊本地震による被災住宅 振動リサーチ



補強の必要なし

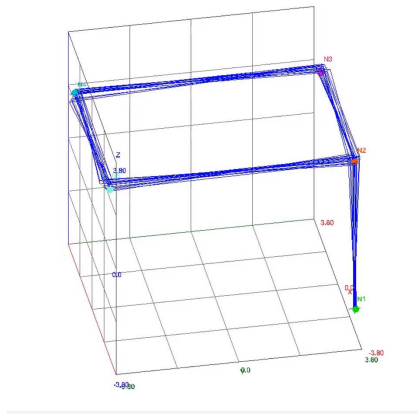
南壁面のブレース補強



被災住宅A

フィルター（帯域通過 $5.0 \pm 0.05\text{Hz}$ ）
N2~N5 X方向 一次固有振動数 5.0Hz

東西、南北方向とも一
体となって振動



被災住宅B

フィルター（帯域通過 $4.2 \pm 0.05\text{Hz}$ ）
N2~N5 X方向 一次固有振動数 4.2Hz

南側壁面に大きな振動
南側壁面にある大きな開口部
により内部の筋交いが損傷

研究背景（リサーチの重要性 計測の課題）



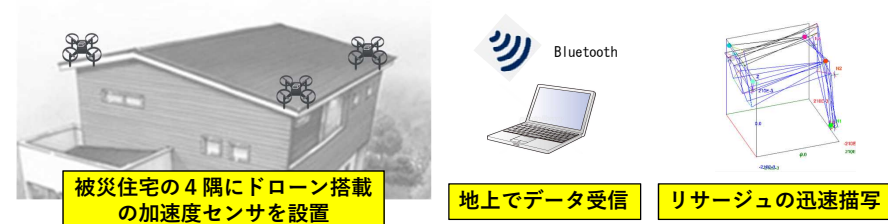
計測時の最も大きな課題

- 調査者の安全確保のため、センサ設置までに長期間の待機が必要な場合が多かった。
- センサの設置作業の手間が多かった

無線加速度センサ + ドローン



研究目的（無線加速度センサ+ドローン）



被災住宅の4隅にドローン搭載の加速度センサを設置

地上でデータ受信

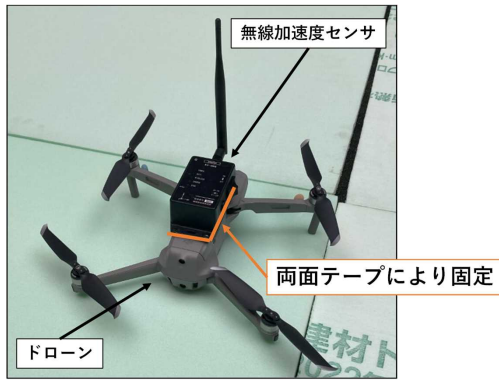
リサーチの迅速描写

- 現地計測に基づく迅速かつ定量的な診断
- 建築の専門家でない所有者にわかりやすい説明
- 改修設計担当の建築士にも有益な情報提供

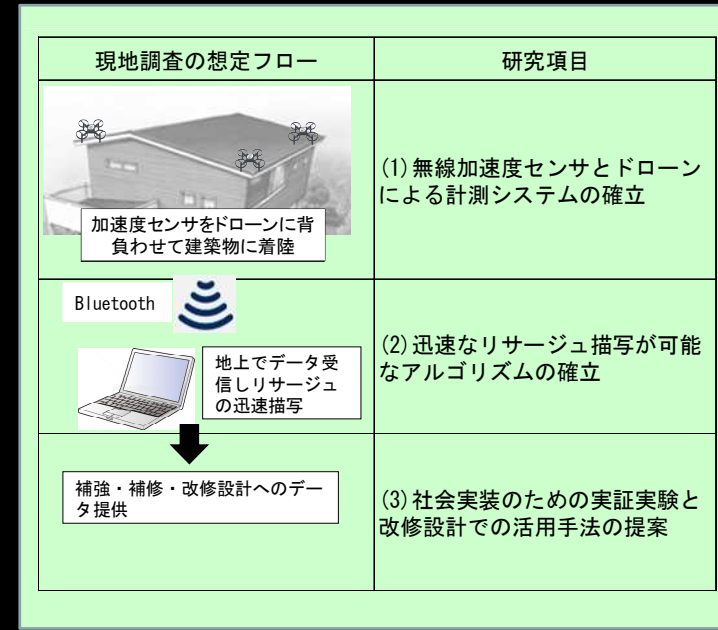
本報告

RC建築物への適用の可能性
適用範囲のフィージビリティ

最初のフィービリティスタディ



ドローン と AI



解析システムの応用：打診検査の音声解析

打診棒

質量	174.1 g
長さ	25.3cm
概要	打撃音が解析に適しているかを検討

袋ナット

質量	12.5 g
長さ	15.0cm
概要	先端形状による検知精度の比較
打撃方法	自由落下

針

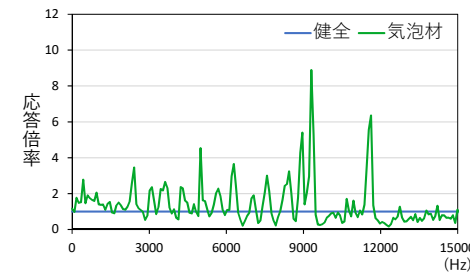
質量	15.2 g
長さ	
概要	先端形状による検知精度の比較
打撃方法	自由落下



模擬欠陥試験体の打撃音解析

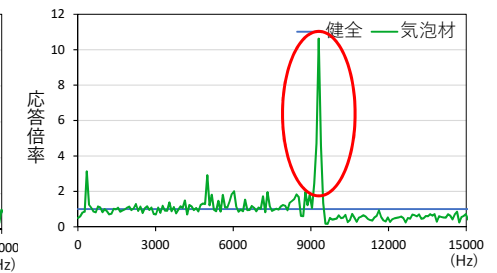
健全部の打撃音を基準とした欠陥部の応答倍率

打診棒



ピークが多く欠陥の特徴の判別が難しい

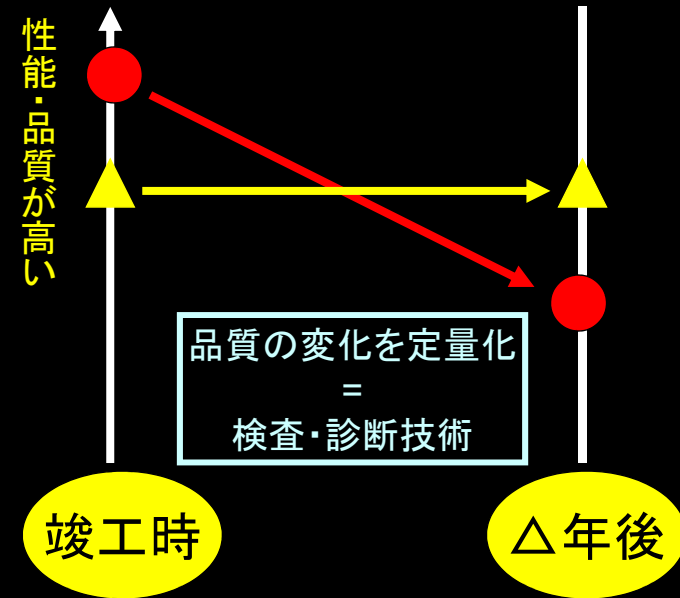
針



欠陥によるピークが明確にあらわれている

=最後に=
意匠設計
構造設計
設備設計
耐久設計

=授業科目=
建築材料・建築施工
補修材料・補修工法



品質の変化を見る 検査・診断技術の高度化

経時変化のデータ蓄積は
新築の耐久設計にも役立つ

様々な環境における建築物からデータが集まる
様々な構造物、部材、材料のデータがとれる

ご清聴有難うございました