



# wallstatで考える建物の耐震性

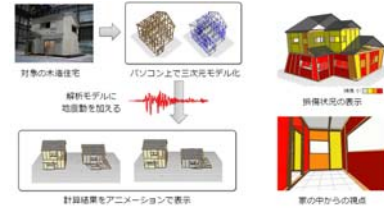
京都大学 生存圏研究所 准教授

中川貴文

1

## wallstat (ウォールスタット) とは？

- 木造住宅の立体骨組解析モデル → 時刻歴応答解析
- フリーソフト (無償)
- 損傷・倒壊過程をアニメーションで確認
- プッシュオーバー → 保有水平耐力計算、限界耐力計算



2

日刊木材新聞2020年12月11日

新建ハウジング2021年1月20日



5

## 中川貴文 略歴

- 1975 奈良県川上村
  - 97~02年  
東京大学大学院 農学生命科学研究科  
「木造住宅の地震時の倒壊過程シミュレーション」
  - 03~04年  
民間企業
  - 05~17年  
国土交通省 国土技術政策総合研究所  
国立研究開発法人 建築研究所
  - 18年  
京都大学 生存圏研究所
- 博士 (農学) 生物材料科学専攻 2003  
博士 (工学) 建築学専攻 2019

6

## 本日の内容

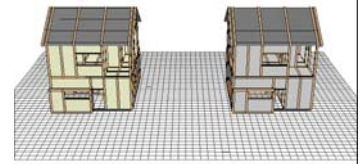
- wallstatとは？
- wallstatによる建物デジタル・ツイン
- wallstatとCADデータ連携

7

## もしE-ディフェンスのような実験が気軽にできたら…



振動台実験

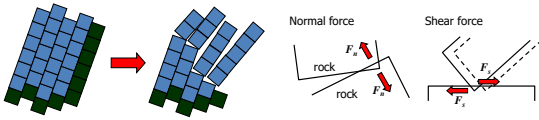


シミュレーション

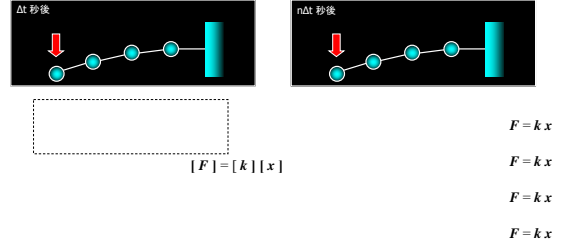
9

## 解析理論（個別要素法）の概要

- 土木分野で主に利用される
- 非連続体解析法→大変形、破壊解析が容易
- 骨組の構造解析のために梁要素、モーメント抵抗バネ等を追加
- 木造住宅の倒壊までを追跡できる数値解析手法



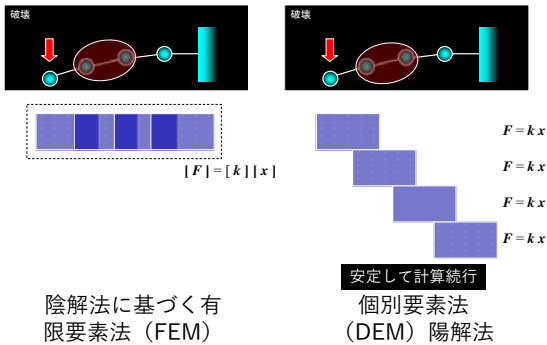
## 解析方法の比較



陰解法に基づく有限要素法 (FEM)

個別要素法 (DEM) 陽解法

## 解析方法の比較

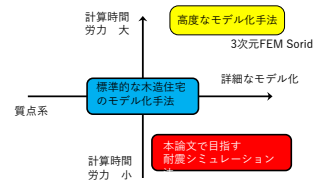


陰解法に基づく有限要素法 (FEM)

個別要素法 (DEM) 陽解法

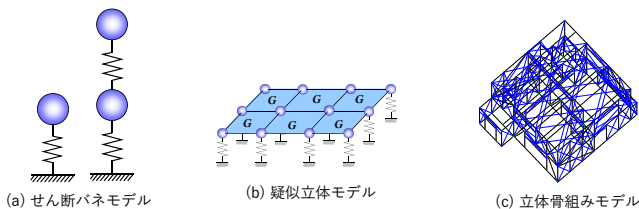
## 開発当初の目標

- 個別要素法を用いて倒壊・崩壊までの物理現象を追跡できること
- 振動台実験の検証により複雑な物理現象の再現
- 容易な操作で、高速に計算を実現  
→木造住宅1棟で計算1時間、モデル化4時間



## 建築物の構造解析モデル

第3章: 木造住宅のモデル化

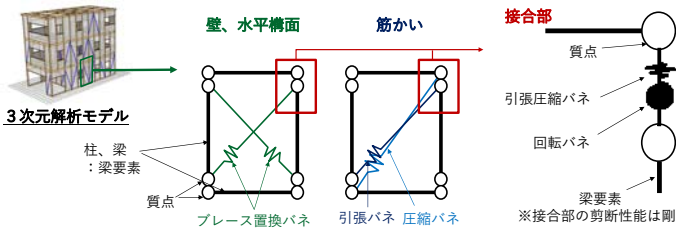


## 木造住宅の地震時被害

第3章: 木造住宅のモデル化



## モデル化の概要



16

## 振動台実験による精度検証 (3階建て木造住宅)



3階建て軸組構法 (日加共同研究)

17

## 振動台実験による精度検証 (3階建て木造住宅)



国土交通省補助事業@E-ディフェンス

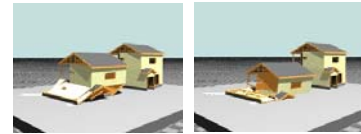
18

## 有限要素法(FEM)による解析例(日本システム設計三宅氏)

- 補強・無補強試験体の震動台実験の解析
- 大都市大災害軽減化特別プロジェクト



実験の映像



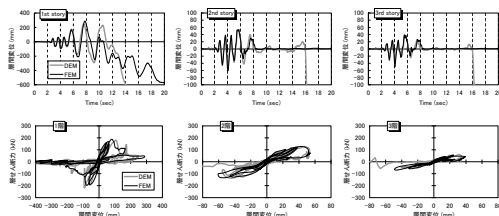
計算結果

2007 PD (応用力学) 資料

## 解析結果の比較

(陰解法に基づく有限要素法&個別要素法)

- 国土交通省補助事業「3階建て木造軸組構法の設計法検証事業」



## wallstatダウンロード数 (累積)



21

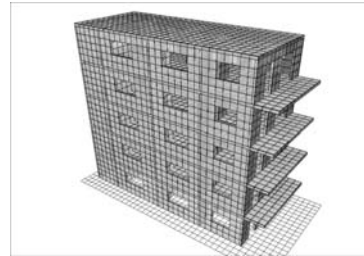
## wallstatで何が出来る？



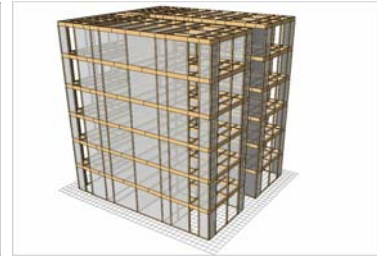
- 振動台実験の代わりに
  - 新製品の耐震性検証が簡単に実現
  - 住宅会社・設計事務所が耐震性のPR →顧客へのプレゼン
- 構造設計法として
  - ルート3、限界耐力計算の応力解析法として活用
  - 耐震診断・補強計画
  - 巨大地震時の検証
- 研究用ツールとして
  - 研究開発、新たな設計法の検討
  - ※H30建築学会大会でwallstatを用いた学術発表→18件

22

## wallstatの活用事例（中層木造）



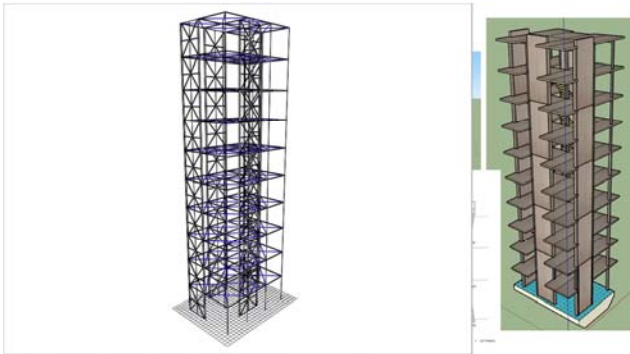
5階建CLT構造の振動台実験の解析



6階建て2X4工法共同住宅の解析

23

## 10階建て振動台実験（米国NSF NHERI）



24

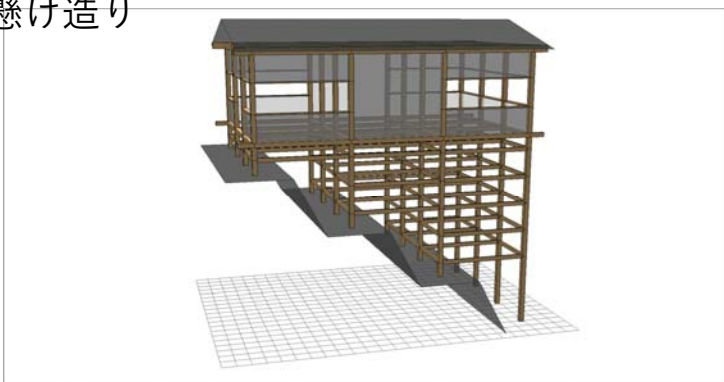
## 五重塔の解析



資料提供：津和佑子氏（文化財建造物保存技術協会）

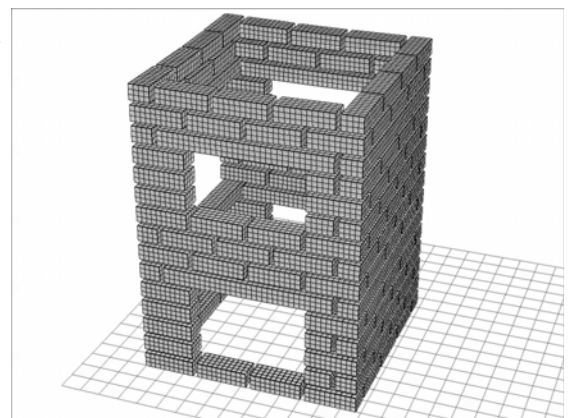
25

## 懸け造り



26

## 組積造



27

## wallstatの変遷

- 1995年 阪神・淡路大震災
- 1998年 東大太田教授の指導で研究開始
- 2003年 博士論文「木造住宅の倒壊シミュレーション」
- 2010年 研究・教育用ソフトとして無償提供開始 ver.1
- 2015年 シーデクセマ・CAD連携機能 ver.3  
商用利用開始

28

## wallstatとの独自連携を発表したCADソフト

|                 |              |          |
|-----------------|--------------|----------|
| ・ 株式会社インテグラル    | ホームズ君 構造EX   | 2017年4月  |
| ・ 福井コンピューターA(株) | アーキトレンドZERO  | 2017年7月  |
| ・ 富士通FIP(株)     | STRDESIN     | 2017年9月  |
| ・ 株式会社DTS       | Walk in home | 2019年2月  |
| ・ キャリアネット(株)    | らくわく         | 2019年3月  |
| ・ ネットイーグル(株)    | Xstar        | 2020年12月 |
| ・ 株式会社CPU       | A's          | 2021年1月  |
| ・ 株式会社CST       | ALTA         | 2021年10月 |



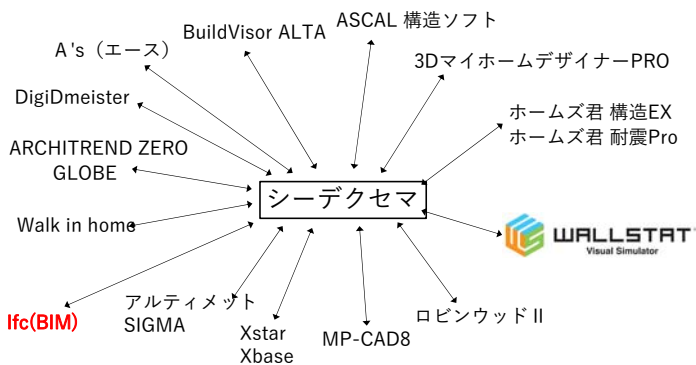
日刊木材新聞 2017年3月7日



日本経済新聞 2019年2月26日

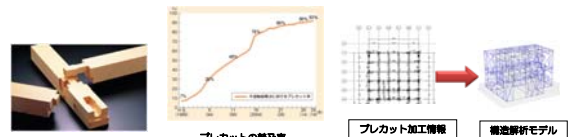
29

## シーデクセマ (CEDXM) ファイルの互換性



## シーデクセマ (CEDXM)

- 木造軸組構法住宅に関するCAD連携のための**標準ファイルフォーマット**
- 軸組構法住宅の90%はプレカット材
- プレカット加工は3次元CADを利用
- プレカット加工用CADデータは軸組・壁配置・接合部等の情報があり、**3次元構造解析との親和性が極めて高い**。



プレカットの普及率  
平成30年総務省発表より

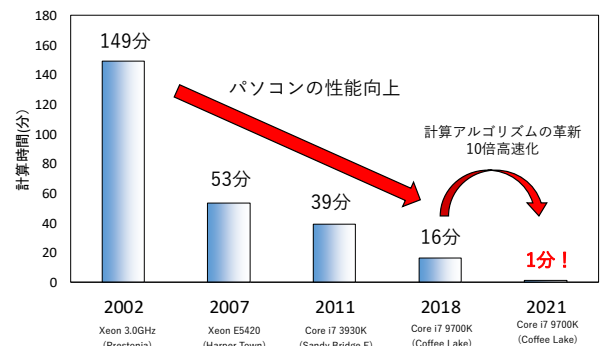
プレカット加工情報

構造解析モデル

## 新バージョン「wallstat 5」 の機能強化の概要

- ・ 計算速度向上→待ち時間が10分の1に！
- ・ GUI改良
  - ・ 開口部、壁自動分割
- ・ 耐力調整係数（耐震診断を想定）

## 1棟の計算にかかる時間が10分の1に

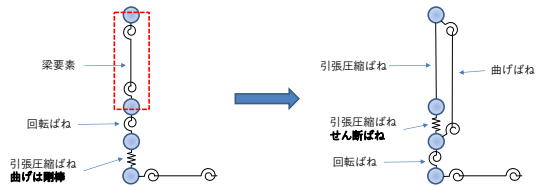


40坪程度の住宅 JMA神戸 30秒間

## ver.5 モデル化法の変更

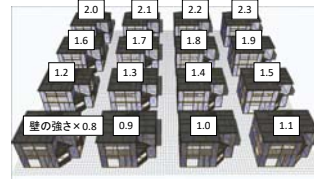
### • 接合部の剛域のモデル化改良

- 十分強い梁要素：長さが短いと計算の安定性に問題 (1e-5秒)
- 梁要素、回転ばね、引張圧縮ばね、せん断ばねの構成変更 (1e-4秒)



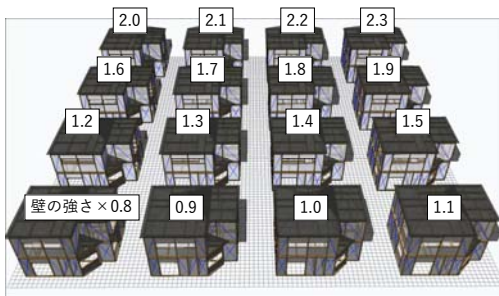
計算待ち時間がなくなると・・・

- これまでは間取りを変えて再計算するたびに15分程度待つ必要があった。
- 今回の機能強化で待ち時間がなくなり、再計算が簡単に  
→弱点を補強するなど設計段階で活用が可能



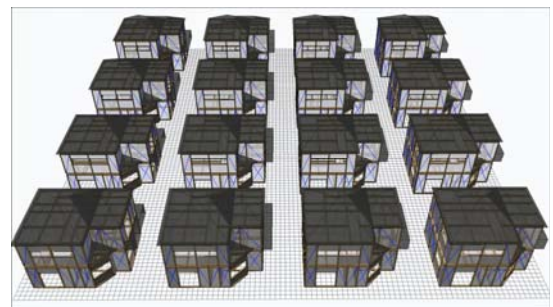
さまざまな間取りで検討可能  
→耐震性を追求可能

立面・平面プランが同じ木造住宅  
壁強さ 80~230% 1995兵庫県南部地震 (JR鷹取)



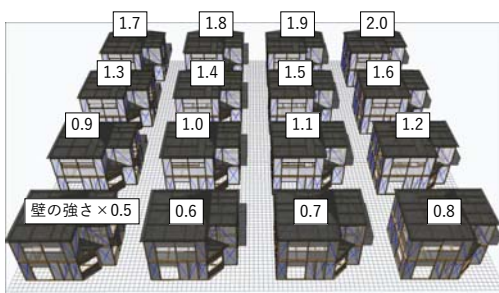
37

立面・平面プランが同じ木造住宅  
壁強さ 50~200% 2018大阪府北部地震



38

立面・平面プランが同じ木造住宅  
壁強さ 50~200% 2021福島県沖地震



KiK-NET山元

39

## wallstatの商用活用事例



【図2】 構造的な弱点を設計で改善

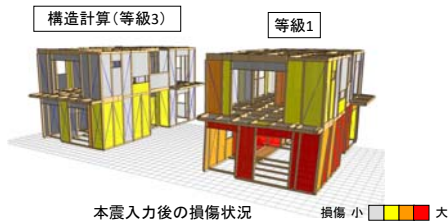


ウォールスタットによる耐震シミュレーションを発注者が確認することで、耐震性能とコストの折衷合いをつけたプランを提供できる。構造的に脆弱な部分を設計の早期に把握して改善のためのフィードバックにつなげる。(資料：益田建設)

40  
日経アーキテクチャ4月13日

## 2016熊本地震のシミュレーション

- 熊本地震の地震動に耐えるには？  
壁量？耐震等級？構造計算？
- 2度の震度7（益城町中心部）



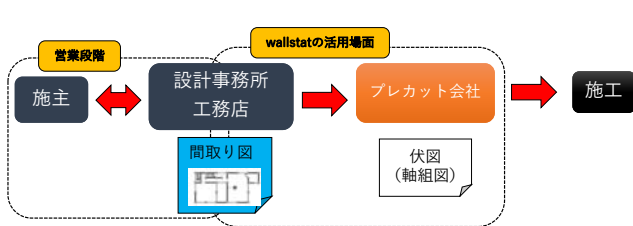
41

## wallstat S モデル化法

- 伏図入力省略可  
→ユーザーは柱・壁・床エリアの入力のみ
- 部材の位置制限 0.5モジュール
- 強軸方向に抵抗しない梁要素
- 協会員限定（サポート・コラボ・マスター）

## いつwallstatを使う？

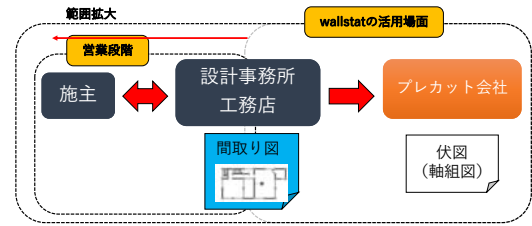
- 間取りを変更できる設計の初期段階で使いたい
- 今回の高速化で設計初期での導入が簡単になったが営業段階ではどうか？
- wallstatに必要な「伏図」が営業段階では作成されない



44

## wallstat S (ウォールスタットエス)

- wallstatの計算エンジンを元にした派生ソフト
- 伏図の入力不要。壁と柱のみ
- 営業段階での検討も可能（ユーザー層の拡大）
- 伏図が残っていない建物の耐震診断も可能に



## 長期優良住宅の性能検証実験 2009

①長期優良 ②接合部弱



- 事業目的：長期優良住宅の普及
- ①長期優良：倒壊しない ②接合部弱：倒壊させる
- しかし結果は・・・

47

## 長期優良住宅の性能検証実験



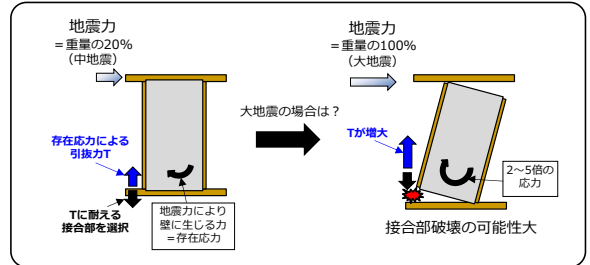
48

## 長期優良住宅が倒壊！！

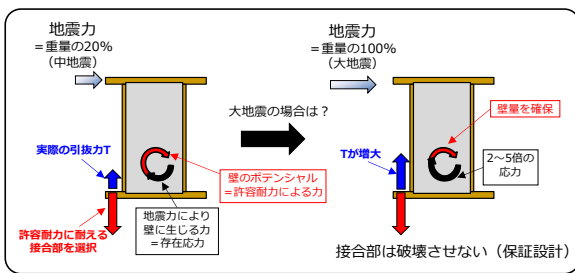


49

## 壁の存在応力による接合部設計



## 壁の許容耐力による接合部設計 (N値計算)



## 長期優良住宅の性能検証実験

- ①長期優良
- ②接合部弱
- ③偏心
- ④基準法

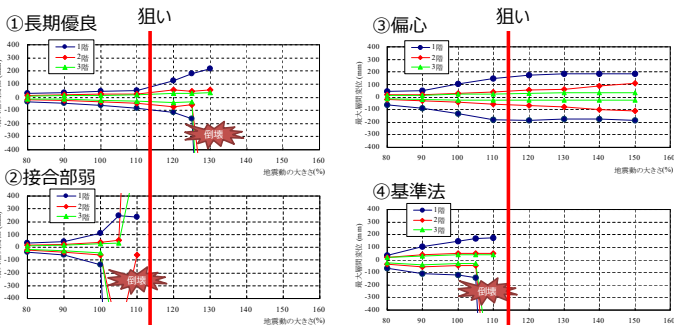


- 実は試験体4体 本番①②の前に③④
- まったく同じ耐震要素 (筋かい・内外装材・接合部)
- 事前解析① → ③④実験 → 事前解析② → 本番

53

## 事前解析①

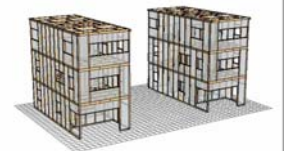
- 建築基準法レベルの地震動 (BSL) を徐々に増幅



54

## 実験結果

- ③偏心
- ④基準法



BSL112.5%でどちらも倒壊せず

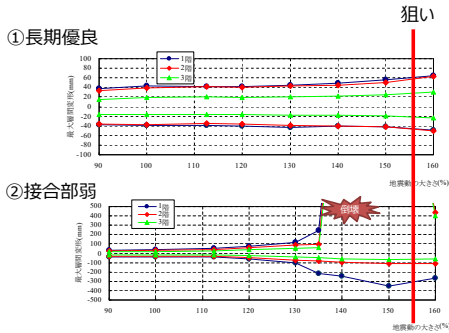
実験の性能 > 解析モデル

55



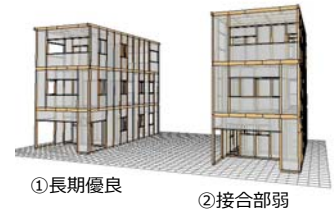
## 事前解析②の結果

(③偏心、④基準法の結果を受けて)



56

## 事前解析②



BSL波160% (基準法大地震の1.8倍の大きさ)

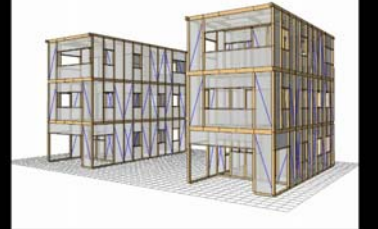
57

## 事後解析 (パラメータの調整)

- Post 1: 鉛直構面→要素実験から再設定  
接合部→要素実験から再設定  
減衰 5%で計算
- Post 2: 鉛直構面→圧縮筋かいの第3、破壊変位を「modified」に適合させる。粘り増加  
(理由: 実験では柱脚が先行破壊したとして)  
90%入力: ほぼ適合、160%入力: 10secまでは適合、その後早期に倒壊
- Post 3: 鉛直構面→引張筋かいの破壊変位を調整。下り勾配が緩やかにする。(0.3 → 0.5)  
(理由: 実験結果から)  
160%入力: 10secまでは適合、その後倒壊せず。柱脚の先行破壊が生じる
- Post 4: 接合部→HD15、HD20を調整。「modified」に適合させる。初期剛性、粘り増加  
160%入力: 10secまでは適合、その後倒壊せず。
- Post 5: 鉛直構面→引張筋かいの破壊変位をPost 2に戻す。(0.5 → 0.3)  
圧縮筋かいのPmax時の変位を変更(2次勾配を上昇)  
通し柱の曲げ強さを60 MPa → 30 MPa (断面欠損を考慮)  
160%入力: 10secまでは適合、その後早期に倒壊。
- Post 6: 鉛直構面→引張筋かいの破壊変位を増加(0.3 → 0.45)  
圧縮筋かいのPmax時の変位をPost 4に戻す。  
160%入力: 15secまでは適合、その後倒壊せず。
- Post 7: 鉛直構面→引張筋かいの破壊変位を減少(0.45 → 0.38)  
圧縮筋かいのPmax時の変位を増加。Pmaxも少し増加。

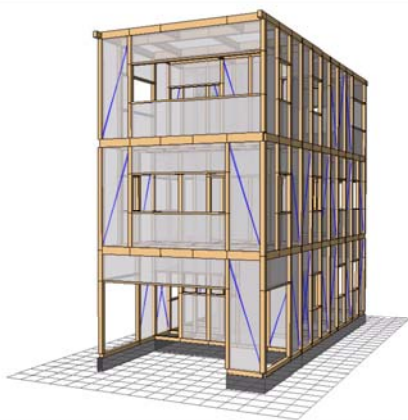
58

## 振動台実験による精度検証 (3階建て木造住宅)



国土交通省補助事業@E-ディフェンス

59



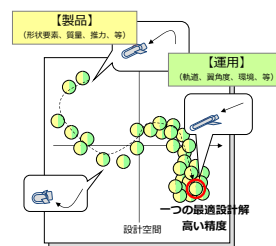
## 品質工学ツール「JIANT」 JAXA

JIANT: JAXA Integrator for Analysis Tools

品質工学: 自動車・電気メーカなどで広く利用されているロバスト設計の手法。  
JIANT: 品質工学の考え方をベースにJAXAが開発した最適化ツール。

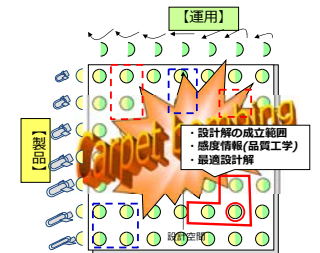
### 【従来の設計手法】

- 【製品(もの)】と【運用(使い方)】に関するパラメータを  
試行錯誤しながら解析ツールに入力し設計解を探索する。



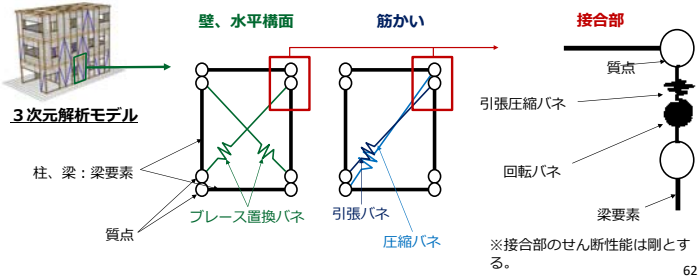
### 【JIANTの設計手法】

- 【製品(もの)】と【運用(使い方)】のパラメータの組み合わせを予め準備し、シミュレーションを実施することで、網羅的検証を実施



61

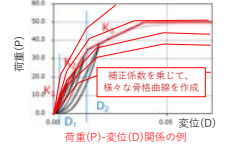
## パラメータの総当り



62

## 品質工学を用いたデータ同化

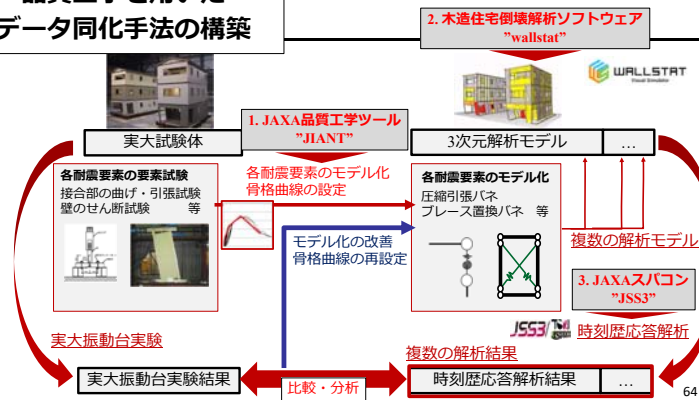
- 振動台実験を再現するパラメータの探索
- 調整するパラメータの例
  - 壁のパラメータ 10個×5種類×10水準
  - 接合部の引張剛性・耐力 10個×5種類×10水準
  - 仕上げ材の剛性・耐力 10個×2種類×10水準



- 品質工学における直交表より少ない回数で網羅的な探索 (例) L121直交表×2 →12パラメータ11水準×2→14641ケースの解析  
※直交表なし  
 $11^{12} = 9,849,732,675,807,610,000,000,000$   
→約 9 千8500 咳ケース

63

## 品質工学を用いたデータ同化手法の構築



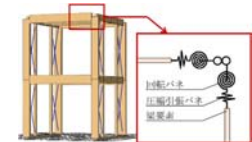
64

## 2. データ同化手法の検討事例 ①2階建て木造躯体

- データ同化対象の実大振動台実験  
木質ラーメン架構の振動台実験(平成25年度)  
入力地震動: BSL 85%  
平面: 3640mm x 3640mm



- 解析モデル  
解析ソフト: wallstat  
→回転バネ、引張バネ等で構成  
骨格曲線は事前に行った接合部の試験等により決定。

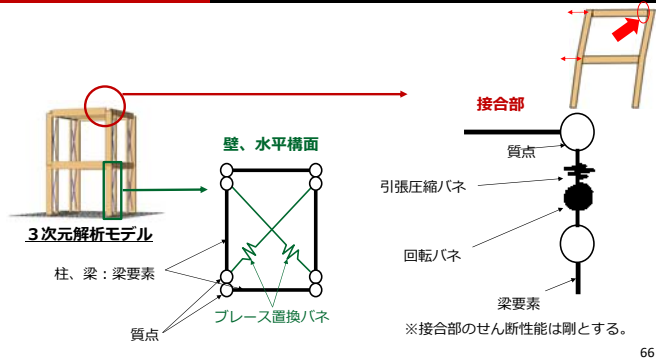


解析モデル

65

小谷裕城, 中川真文, 河合直人, 御子繁正: 木造住宅の倒壊解析手法の精度検証実験 その2 木質ラーメン架構を耐震要素とする木造躯体の振動台実験と解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 構造Ⅲ, pp.189-190, 2013.8

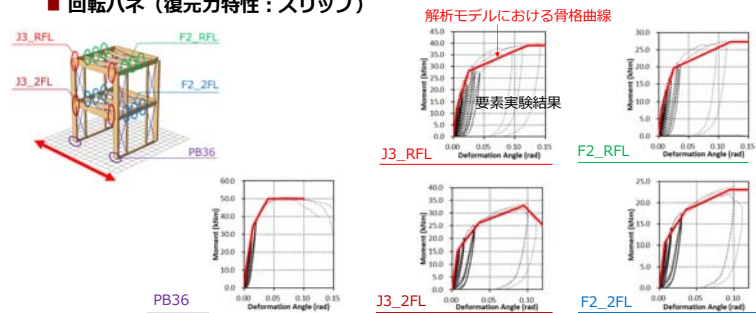
## 2. データ同化手法の検討事例 ①2階建て木造躯体



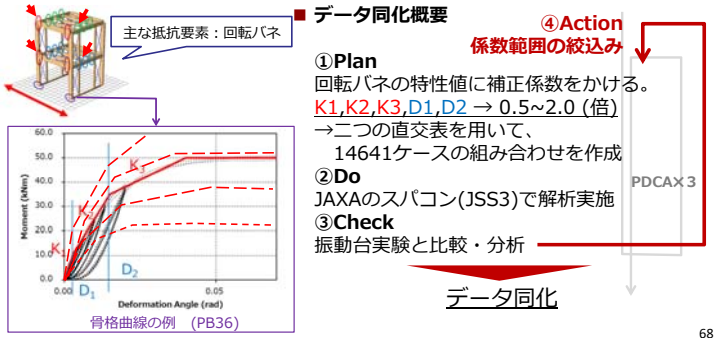
66

## 2. データ同化手法の検討事例 ①2階建て木造躯体

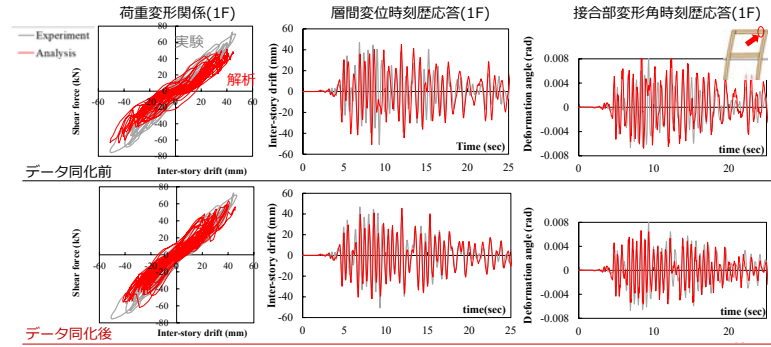
- 回転バネ (復元力特性: スリップ)



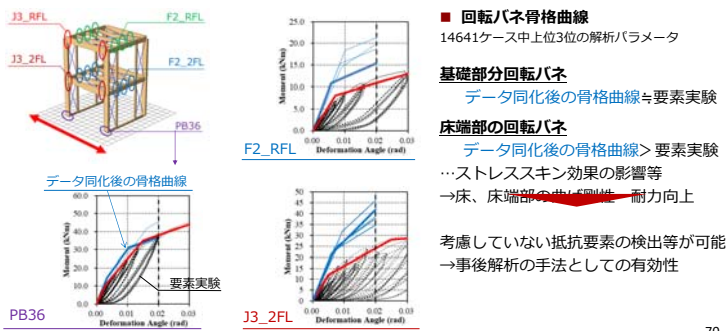
## 2.データ同化手法の検討事例 ①2階建て木造躯体



## 2.データ同化手法の検討事例 ①2階建て木造躯体

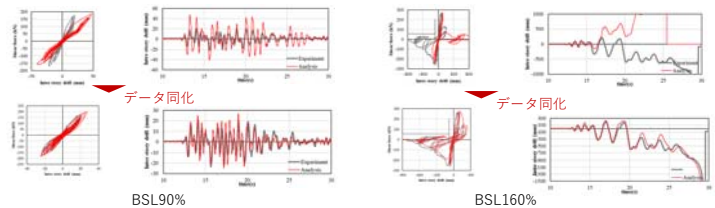


## 2.データ同化手法の検討事例 ①2階建て木造躯体



## 品質工学を用いたデータ同化

- 同化後のパラメータは剛性・耐力ともに高い傾向にあった。  
→筋かいの座屈挙動、動的効果等の影響
- 塑性化が進むと、ばらつきが大きい  
→ばらつきを考慮した検討が必要



71

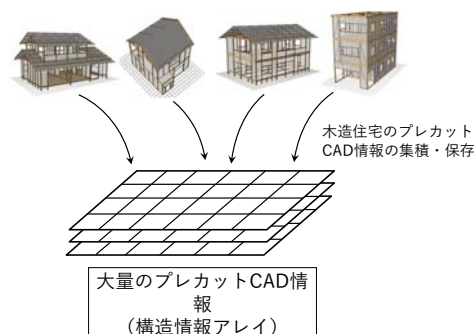


## デジタルツインの活用例

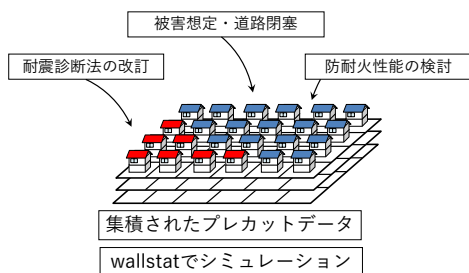
- 振動台実験とwallstatの計算結果の比較
  - 構法ごとに真のデジタルツインの作成方法の提示
  - 従来の安全な設計→実物に近いシミュレーションが可能に
- 仕様建材・地震動のばらつきを考慮して倒壊・損傷確率を示す
  - より正確な耐震性能を提示 仕様規定→性能規定→信頼性設計
- 低価格加速度センサーによるヘルスマonitoring
  - 新築時に解析モデルを作成→中小地震経験時にオートチューニング
  - 真のデジタルツインによる損傷予測

74

## プレカットCADデータの集積



## プレカットCAD情報の防災への活用



## 分析対象木造住宅の概要

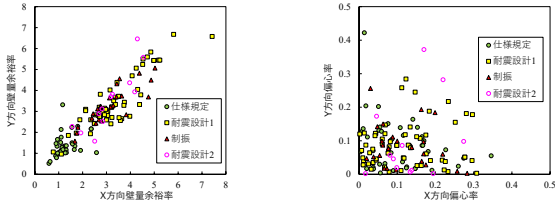
- 首都圏近郊で設計・建設された木造住宅149種の解析モデル
- 1棟で複数のバリエーションがある場合は別建物とする。
- 2階建ての在来軸組構法の木造住宅
- 主な耐震要素は筋かい・面材張り耐力壁
- 以下の設計方針により4つのグループに分類
  - ①仕様規定：建築基準法の壁量計算を満たすように設計
  - ②耐震設計1：建築基準法の必要壁量の2～3倍を目指して設計
  - ③制震：②に制震装置を追加したもの
  - ④耐震設計2：許容応力度計算で等級2を目標

## 計算条件

- wallstatの重量設定は建物によりばらつきがあるため、wallstatの詳細重量設定機能を一律採用
  - ※詳細重量設定機能：軸材の体積、面材・屋根・床の面積に応じて、重量を精算する方法
- 重量設定の際の共通項目は以下：
  - ・屋根は厚板スレート葺き (0.44kN/m<sup>2</sup>)
  - ・屋根勾配3寸、軒の出455mm
  - ・積載荷重は0.2 kN/m<sup>2</sup>
- 構造計算用重量よりは軽めに設定される
- サイディング・せっこうボード・小壁の余力を考慮

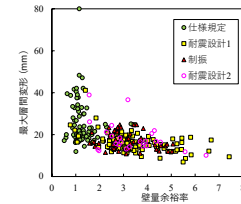
## 分析対象木造住宅の概要

- 1Fの壁量余裕率（令46条）、偏心率を以下にプロット
- 見上げの面積で必要壁量を計算→実設計と一致しない物件あり
- 仕様規定の壁量余裕率が低い、それ以外は同程度に分布



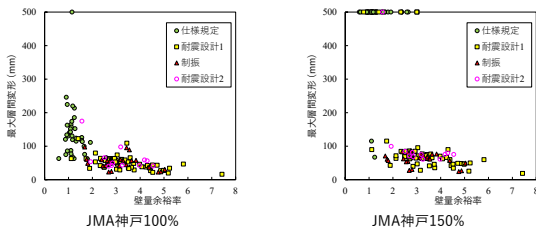
## 時刻歴応答解析結果（BSL 2種地盤）

- X方向、Y方向でプロット
- 概ね50mm以下に応答が収まる  
→余力、重量設定の影響か
- 壁量余裕率が2.0あれば、30mm（1/100rad）以下に収まる



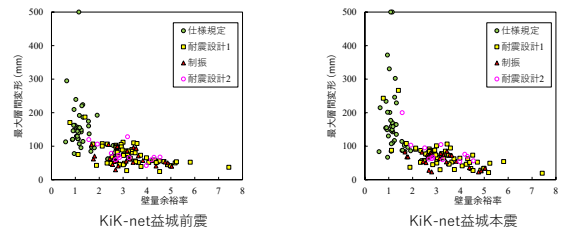
## 時刻歴応答解析結果（JMA神戸100%、150%）

- 仕様規定はほとんどが1/30radを超える。
- 壁量余裕率2.0あれば、100mm以下に収まる  
→余力、重量設定の影響
- JMA神戸150%では仕様規定はほぼ倒壊（倒壊は500mmでプロット）
- JMA神戸150%では150mmを超えるると倒壊

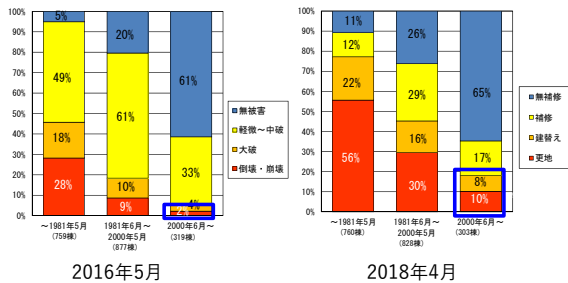


## 時刻歴応答解析結果（KiK-net益城前震・本震）

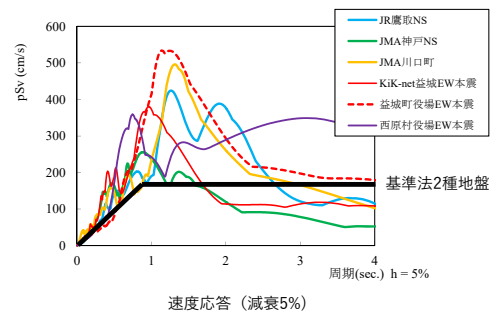
- 前震・本震は個別に入力
- JMA神戸より応答が大きい傾向
- 壁量余裕率2.0以上でも100mm以上の変形になるものを一定数存在
- 壁量余裕率2.0以下本震の方が変形は大きい、その他は同じ傾向



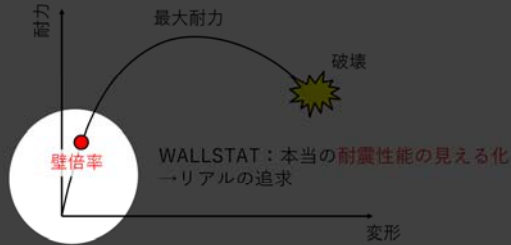
## 2016年熊本地震の益城町の被害状況（地震直後と2年後）



## 熊本地震で観測された地震動



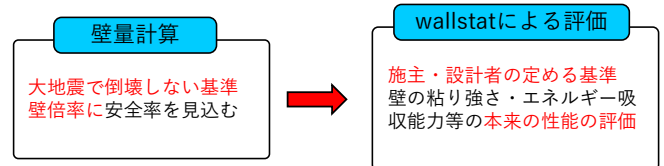
## 壁・接合部の本来の性能？



## wallstatによる「見える化」



- 壁、接合部、ダンパー、地域木材等の製品の壁量計算ではわからない**本来の性能の検証**
- 壁量計算によるチェック（大地震で倒壊しない）  
+ 施主・設計者の定める要求性能に対する回答
- 見える化の普及による**性能設計へのシフト**



## 一般社団法人耐震性能見える化協会

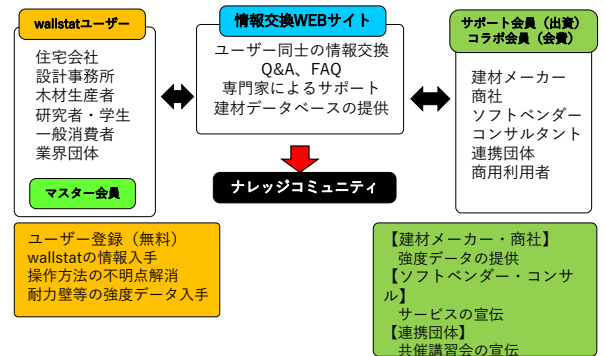
- 木造住宅の倒壊解析ソフトウェアwallstatの利用に関して、**適切な普及促進**に関わる事業を行う
- 建物の地震災害に対する安心・安全の検証・評価につなげ、広く社会貢献（**地震被害軽減**）に寄与

### 【主な事業】

- wallstatに関する情報交換WEBサイトの運営
- 実務者講習会等のイベント実施
- 適切な普及に向けた認証



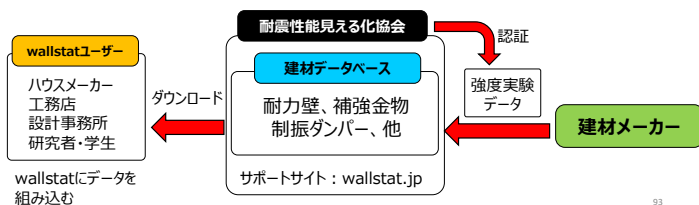
## 情報交換サポートサイト



## 建材データベースの充実



- 建材メーカー20社 100種類以上の認証建材
- 実際に使っている商品の強度性能を計算に組み込み可能 → よりリアルなシミュレーションを実現



## 協会 設立記念カンファレンス



- 日時：2019年7月25日（木）
- 会場：奈良県川上村やまぶきホール

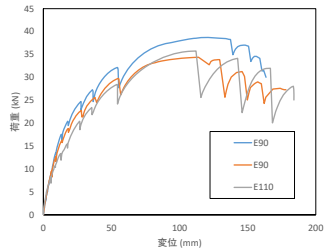
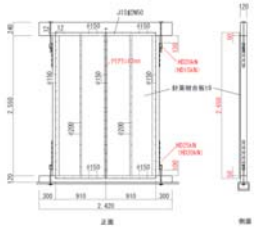


研究集会

京大・川上村 連携協定締結

## 川上村産吉野杉の耐力検証実験

- 告示の壁倍率 3.7倍 ⇒ 『5.1倍』



95

## wallstatを使ってみたいと思われた方

- 使い方講習会（無料・オンライン）
  - WALLSTAT.JP
  - 月一回：次回は5月25日(水) 15:00~16:30
- Youtubeチャンネル
  - wallstatチャンネルで講習会映像
- wallstatは「耐震性能の見える化」により  
要求性能に関して明確に回答

98