

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05046

研究課題名(和文) バランシング領域分割法と双対基底ラグランジュ乗数法によるアセンブリ構造解析

研究課題名(英文) Analysis of assembly structure using combined balancing domain decomposition method and dual Lagrange multiplier method

研究代表者

宮村 倫司 (Miyamura, Tomoshi)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：30282594

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：多数の部品を組み合わせで作られた大規模かつ複雑なアセンブリ構造物の詳細な有限要素解析では、複数の部品メッシュを接合して作った全体のメッシュを用いたアセンブリ構造解析の技術が重要となる。解析対象として原子力構造物が挙げられる。モルタル有限要素法は弱形式のラグランジュ乗数法で部品を接合する手法である。更に、双対ラグランジュ乗数法を用いることで、モルタル有限要素法を高精度かつ効率化することができる。本研究では離散化された線形問題の求解に大規模並列計算に適した連立一次方程式の反復型ソルバーであるバランシング領域分割法を多点拘束条件(MPC)付き問題に拡張した手法を適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複雑な形状をした重要構造物に対して形状の細部まで再現し、十分な数の要素分割をした高精細メッシュを作成し、想定外の地震に対する高精度な地震応答を解析することで安全性を確認することが求められている。例えば、建屋、格納容器、压力容器を含む原子力発電所や、地盤の付いた超高層ビル等の重要構造物のフルスケールモデルによる地震応答解析が行われている。本課題で研究する手法により、そのような構造物をアセンブリ構造物としてモデル化することによりメッシュ生成を効率化した上で、並列計算による高速な解析を実現することができる。また、そのための数値解析手法の開発とその実装にも学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：The mortar finite element method is used to assemble a number of component-meshes of parts of a structure. Constraints to connect components are imposed in a weak form based on a surface integration. The constraints can be represented by the Lagrange multiplier that is interpolated using a set of shape functions. In the dual Lagrange multiplier method, the Lagrange multiplier is interpolated using a set of biorthogonal shape functions. After the surface integration for the constraints is conducted, a constraint matrix is obtained, that is, the constraints in a weak form are represented as a set of multi-point constraints (MPCs). In the present study, a linear discretized problem for the finite element structural analysis of an assembly structure having the constraint matrix is solved by the improved balancing domain decomposition method that can incorporate MPCs. A preprocessing software package for building structures is also developed in the present study.

研究分野：計算力学

キーワード：アセンブリ 構造 バランシング領域分割法 モルタル有限要素法 双対ラグランジュ乗数法 原子力構造物

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

大規模並列有限要素法の発達により、大規模かつ複雑な構造物を詳細なメッシュでモデル化して構造解析を行えるようになった。一方、原子力構造物や超高層ビル等の重要構造物の想定外の地震に対する安全性を確認するために、高精度な地震応答解析が求められている。

領域分割法は並列有限要素法の核となる数値解析手法である。また、国内では、「京」に代表されるスパコン向けの並列有限要素法の実装が盛んに行われている。ADVENTURE システムは、海外のソフトウェアに対しても優位性を持つオープンソースの並列有限要素解析システムであり、世界的にも高い評価を得ている。その中の構造解析コードである ADVENTURE\_Solid では、領域分割法に基づく線形ソルバーの効果的な前処理手法のひとつであるバランシング領域分割法 (BDD 法) が採用されている。研究代表者は BDD 法で多点拘束条件 (MPC) を考慮するための新しい手法を提案している。

大規模かつ複雑な構造物の有限要素解析では、部品毎にメッシュを生成し、それらを数理的な手法で接合して全体を解析するアセンブリ構造解析が重要技術であり、国内外で多くの研究が行われている。その中で欧米を中心にモルタル有限要素法が発展している。双対基底ラグランジュ乗数法 (Wohlmuth 等) を用いたモルタル有限要素法は、面と面を接続するラグランジュ乗数を従来の方法に比べて局所的に定義でき、また精度もよい。

### 2. 研究の目的

モルタル有限要素法において導入された弱形式の拘束条件は、領域を積分すると最終的には MPC として表される。双対基底ラグランジュ乗数法を用いる場合にも、通常のラグランジュ乗数法と比べて形状関数が異なるだけであり同様となる。この問題に MPC を考慮できる BDD 法を適用することで、複雑な構造物の大規模な構造解析を実現することが本研究の目的である。更に、「京」等のスパコン向けにチューニングされた ADVENTURE\_Solid をベースに解析コードを開発することで、スパコン上で大規模かつ複雑なアセンブリ構造物に対する構造解析 (特に地震応答解析) を高速に行うことを目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 双対基底ラグランジュ乗数法に基づくモルタル有限要素法の実装

双対基底ラグランジュ乗数法に基づくモルタル有限要素法における弱形式の拘束条件を離散化して MPC に変換するプログラムを作成する。モルタル有限要素法では、二つの部品メッシュの接合面に接着剤のような役割をする双対基底ラグランジュ乗数を設定し、接合面を二次元メッシュ (パッチ) で離散化する。四面体メッシュを用いて表面が三角形パッチで表される場合と、六面体メッシュを用いて表面が四辺形パッチで表される場合のプログラムを作成する。出力された MPC を含むメッシュを、既存の共役射影勾配法を用いて MPC を考慮した単純な並列解析コードや、MPC を考慮した BDD 法に入力して解析を行い、性能を確認する。

#### (2) MPC を考慮した BDD 法のチューニング

既存の MPC を考慮した BDD 法のチューニングを行い、「京」のようなスパコン上での計算性能を向上させる。手法としては、多数の MPC を互いに依存しないグループに分割し、共役射影勾配法における射影計算をグループ毎に並列に行う方法や、射影計算にスパースダイレクトソルバーを導入する方法、ペナルティ法で MPC を考慮するコースグリッド修正において、部分領域の局所座標系を利用して数値的な誤差が入りにくくする方法等を組み合わせる。

#### (3) アセンブリ構造物としての建築構造物のメッシュ生成システムの設計

建築構造物は典型的なアセンブリ構造物であり、モルタル有限要素法によって部品メッシュの接合をすれば、メッシュ生成時間は飛躍的に短縮される。研究分担者の山下が中心となって開発した建築構造物用プリ処理システムに、モルタル有限要素法向けの接合情報を出力する機能を追加する。

#### (4) Xeon Phi (Knights Landing 上での解析コードのチューニング

「ポスト京」のような次世代のスパコンでは、メニーコア型 CPU が主流となるため、設備備品費で購入する Xeon Phi (Knights Landing) (intel 社のメニーコア型プロセッサ) 搭載ワークステーションを使って MPC を考慮した BDD 法のコードのメニーコア対応チューニングを進める。

#### (5) 原子力構造物および建築構造物の地震応答解析のプロダクションラン

原子力構造物および建築構造物の実機モデルの解析を「京」で行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 双対基底ラグランジュ乗数法に基づくモルタル有限要素法の実装

六面体要素によるメッシュの接合面は四辺形パッチで表される。このときの定式化を以下に示す。物体の二つの面が接触しているものとする。二つの面をマスター面、スレーブ面と呼ぶこととして、マスター面上の点を  $^M\mathbf{x}$ 、スレーブ面上の点を  $^S\mathbf{x}$  と表す。あるマスター面とスレーブ面のペアに対して、それらが接触している領域を  $\Gamma_c$  と表す。点  $^M\mathbf{x}$  と点  $^S\mathbf{x}$  が接触し、かつ固着

しているときには,

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}') = {}^M \mathbf{x}' - {}^S \mathbf{x}' = ({}^M \mathbf{x}^0 + \mathbf{u}^M) - ({}^S \mathbf{x}^0 + \mathbf{u}^S) = \mathbf{0} \quad \text{on } \Gamma_c \quad (1)$$

となる．強形式で表された式(1)の拘束条件を次式のように弱形式で表す．

$$\int_{\Gamma_c} \mathbf{g}(\mathbf{x}') \cdot \mathbf{v} d\Gamma_c = 0 \quad (2)$$

ここに  $\mathbf{v}$  は試行関数である．

拘束される領域  $\Gamma_c$  のスレーブ面側の節点の数を  $n_c$  としたとき，スレーブ面における変位ベクトルは次式となる．

$$\mathbf{u}^S \approx \mathbf{u}_h^S = \sum_i^{n_c} N_i^S \mathbf{u}_i^S \quad (3)$$

ここに， $\mathbf{u}_i^S$  はスレーブ面に属する節点変位ベクトルである．位置ベクトル，仮想変位ベクトルも同様に表される．一方，マスター面における変位ベクトルは次式となる．

$$\mathbf{u}^M \approx \mathbf{u}_h^M = \sum_i^{n_M} N_i^M \mathbf{u}_i^M \quad (4)$$

ここに， $\mathbf{u}_i^M$  はマスター面に属する節点変位ベクトルである．位置ベクトル，仮想変位ベクトルも同様に表される．

拘束力を補間するために，dual (双対) 基底関数による形状関数  $M_i$  を定義する．形状関数  $M_i$  は次の性質を満たすような関数とする．

$$\int_{\Gamma_c} M_i N_j d\Gamma_c = \delta_{ij} \int_{\Gamma_c} N_j d\Gamma_c \quad (5)$$

この条件がスレーブ面のひとつの表面要素において成立するとき次式を満たす，

$$\int_{\Gamma_e} M_i N_j d\Gamma_e = \delta_{ij} \int_{\Gamma_e} N_j d\Gamma_e \quad (6)$$

ここに， $\Gamma_e$  はひとつの表面要素の領域である．形状関数としてパラメータ  $\xi, \eta: [-1, 1]$  による形状関数  $\hat{N}_i(\xi, \eta)$ ， $\hat{M}_i(\xi, \eta)$  を用いる． $\hat{N}_i(\xi, \eta)$  はアイソパラメトリック要素において一般的に用いられる形状関数である． $\hat{M}_i(\xi, \eta)$  は次のように求める．

$$\hat{M}_i = \sum_k a_{ik} \hat{N}_k \quad (7)$$

ただし， $a_{ik}$  は次式により求める．

$$[a_{ij}] = \mathbf{D}_e \mathbf{M}_e^{-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{D}_e = \left[ \delta_{ij} \int_{\Gamma_e} N_j d\Gamma_e \right] = \left[ \delta_{ij} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \hat{N}_j \det J d\xi d\eta \right] \quad (9)$$

$$\mathbf{M}_e = \left[ \int_{\Gamma_e} N_i N_j d\Gamma_e \right] = \left[ \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \hat{N}_i \hat{N}_j \det J d\xi d\eta \right] \quad (10)$$

ここに， $\det J$  はヤコビアンであり，次式により計算する．

$$\det J = \left[ \left( \sum_i \frac{\partial \hat{N}_i}{\partial \xi} \mathbf{x}_i \right) \times \left( \sum_i \frac{\partial \hat{N}_i}{\partial \eta} \mathbf{x}_i \right) \right] \quad (11)$$

このとき式(6)は次式となる．

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \hat{M}_i \hat{N}_j \det J d\xi d\eta = \delta_{ij} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \hat{N}_j \det J d\xi d\eta \quad (12)$$

式(2)の試行関数も形状関数  $M_i$  を用いて補間する．これと式(3)，(4)を弱形式の拘束条件である式(2)に代入して離散化する．

$$\begin{aligned}
& \int_{\Gamma_c} \mathbf{g}(\mathbf{x}^t) \cdot \mathbf{v} d\Gamma_c \\
&= \int_{\Gamma_c} \left( \sum_i^{n_s} M_i \lambda_i \right) \cdot \left( \sum_j^{n_s} N_j^S N_j^S \bar{\mathbf{u}} - \sum_j^{n_M} N_j^M N_j^M \bar{\mathbf{u}} \right) d\Gamma_c \\
&= [\delta \lambda_i]^T \left[ \delta_{ij} \int_{\Gamma_c} N_j^S d\Gamma_c \mathbf{I} \right] [N_j^S] \bar{\mathbf{u}} - [\delta \lambda_i]^T \left[ \int_{\Gamma_c} N_j^M M_i d\Gamma_c \mathbf{I} \right] [N_j^M] \bar{\mathbf{u}} \\
&= \delta \tilde{\lambda}^T \mathbf{C}^T \bar{\mathbf{u}}
\end{aligned} \tag{13}$$

式(13)を要素毎に積分する形式に書き換えることもできる. この式の第2項で表される拘束条件行列のブロック行列は, マスター面とスレーブ面のパッチが整合していないときには, 式(5)のような対角行列にはならないため, 数値積分をする必要がある. スレーブ面のパッチの表面要素を積分セルとしてガウス積分を行う. そのためには, スレーブ面上の積分点と同じ位置のマスター面上の点の自然座標系の座標を求める必要がある. これは局所的な Newton-Raphson 法により求める. 最初に次の残差を定義する.

$$\begin{cases} f(\xi, \eta) = N_i^M(\xi, \eta) \bar{x}_i - \bar{x}^S \\ g(\xi, \eta) = N_i^M(\xi, \eta) \bar{y}_i - \bar{y}^S \end{cases} \tag{14}$$

また, 次のヤコビアンを定義する.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi} & \frac{\partial f}{\partial \eta} \\ \frac{\partial g}{\partial \xi} & \frac{\partial g}{\partial \eta} \end{bmatrix} \tag{15}$$

$(\xi, \eta)$  に対する Newton-Raphson 法に基づく反復は次式となる.

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}^{j+1} = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}^j - [J^j]^{-1} \begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix}^j \tag{16}$$

マスター側の自然座標が計算できれば式(13)の数値積分が可能となり, 最終的に拘束条件行列  $\mathbf{C}$  が求められる. 実装においては ADVENTURE システムのプリ処理モジュールの `msh2pch` コマンドにより, まず有限要素メッシュから表面パッチを抽出する. そのとき, 拡張子が `fgr` のメッシュ表面データファイル (`fgr` ファイル) が生成される. `fgr` ファイルには各面グループに含まれる表面パッチと有限要素を関連付けるためのデータが含まれる. これを利用してマスター面とスレーブ面を指定し, それを基に拘束条件および拘束力に関する数値積分を行う.

## (2) MPC を考慮した BDD 法のチューニング

モルタル有限要素法における拘束条件式は前節で求めた拘束条件行列  $\mathbf{C}$  により次式のように表される.

$$\mathbf{C}^T \mathbf{u} = -\mathbf{r} \tag{17}$$

部分構造型領域分割法における領域間境界問題にこの拘束条件を改めて Lagrange 乗数法により付加すると次式となる.

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{S}} & -\tilde{\mathbf{C}} \\ -\tilde{\mathbf{C}}^T & \mathbf{O} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\mathbf{u}}_B \\ \tilde{\lambda} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{\mathbf{p}}_B \\ \tilde{\mathbf{r}} \end{Bmatrix} \tag{18}$$

この式は次式で表される射影を用いた BDD 前処理付き共役射影勾配法により解くことができる.

$$\mathbf{P} = \mathbf{I} - \mathbf{C}(\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \tag{19}$$

全体の MPC を互いに依存しない MPC のグループへ分割すると, 上式に含まれる  $\mathbf{C}^T \mathbf{C}$  は例えば次式のようにグループ毎にブロック化できる.

$$\mathbf{C}^T \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_i^T \mathbf{C}_i & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{C}_j^T \mathbf{C}_j \end{bmatrix} \tag{20}$$

射影の計算において, 各ブロックの逆行列とベクトルの積をスパースダイレクトソルバーで計算することにより, 大幅に高速化することができる.

一方, 構造解析に用いられる BDD 法では, 次式で表される部分領域の並進と回転の剛体モードを表す行列  $\mathbf{Z}_p^{(k)}$  を利用してコースグリッド行列を作成し, 前処理においてコースグリッド修正と呼ばれる処理を行うことで CG 法等の反復型線形ソルバーの収束性を高めている.

$$\mathbf{Z}_p^{(k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & x_3 & -x_2 \\ 0 & 1 & 0 & -x_3 & 0 & x_1 \\ 0 & 0 & 1 & x_2 & -x_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

この行列には、剛体回転に関するブロックに座標  $x_i$  が含まれており、構造物の寸法や位置によっては 1 に比べて絶対値が非常に大きい数が  $\mathbf{Z}_p^{(k)}$  に含まれ、数値的な問題が起きる可能性がある。そこで、部分領域  $k$  の代表点の座標 ( $^{Ref}x_1^{(k)}, ^{Ref}x_2^{(k)}, ^{Ref}x_3^{(k)}$ ) を用いて  $\mathbf{Z}_p^{(k)}$  を次式のように修正する方法を考案した。

$$\tilde{\mathbf{Z}}_p^{(k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & (x_3 - ^{Ref}x_3^{(k)}) & -(x_2 - ^{Ref}x_2^{(k)}) \\ 0 & 1 & 0 & -(x_3 - ^{Ref}x_3^{(k)}) & 0 & (x_1 - ^{Ref}x_1^{(k)}) \\ 0 & 0 & 1 & (x_2 - ^{Ref}x_2^{(k)}) & -(x_1 - ^{Ref}x_1^{(k)}) & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

これにより、コースグリッド修正においてスパースソルバーにより行うコースグリッド問題の求解を安定的に行えるようになった。

### (3) アセンブリ構造物としての建築構造物のメッシュ生成システムの設計

図 1 に研究分担者の山下が防災科学技術研究所において開発を進めている建築構造物のメッシュ生成システムにおける通り芯を用いた入力画面 (左) と形状定義された構造物の形状 (右) を示す。形状は部材ユニットと呼ばれる単位の集まりとして定義され、各部材ユニットでは六面体メッシュが生成される。部材ユニットのメッシュは隣接する別の部材ユニットのメッシュと、可能であれば節点を共有させて接続し、隣合うメッシュの整合がとれない場合には、モルタル有限要素法により接続する。ここではそのために必要な接続面の情報 (接続する可能性がある面のペアの情報) を出力できるようにした。

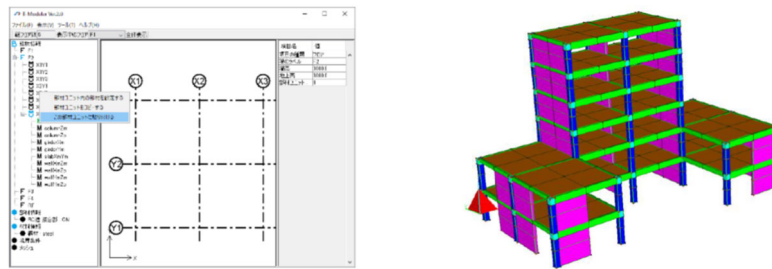


図 1 防災科研で開発された建築構造物のメッシュ生成システム E-Moderler

### (4) Xeon Phi (Knights Landing) 上での解析コードのチューニング

設備備品費で購入した Intel Xeon Phi (Knights Landing) を搭載したワークステーションにメニーコアスレッド計算に対応した Intel コンパイラをインストールして、ADVENTURE\_Solid FS 2.01 の性能評価を試みた。

コースグリッド修正および MPC を考慮するための射影において、スパースダイレクトソルバー MUMPS を用いている。まず、MUMPS で使われている "BLAS", "BLACS", "lapack", "scalapack" ライブラリについては Intel コンパイラの MKL 付属のものを使うようにすることでマルチスレッド化する。Xeon phi 向けのロードモジュールを生成するためには、"-mk1 -xMIC-AVX512" オプションを使う。ADVENTURE\_Solid では部分領域の単位を利用したマルチスレッド化もしている。最大で 32 スレッドを用いた計算を実行できた。

### (5) 原子力構造物および建築構造物の地震応答解析のプロダクションラン

福島第 1 原子力発電所および地盤を取り付けた超高層ビルのソリッド要素による高精細メッシュを用いた地震応答解析をそれぞれ「京」の戦略分野 4 と 3 のプロジェクトにおいて「京」により実施した (図 2)。解析には成功したものの、本研究で開発したモルタル有限要素法の技術を適用するには至らなかった。

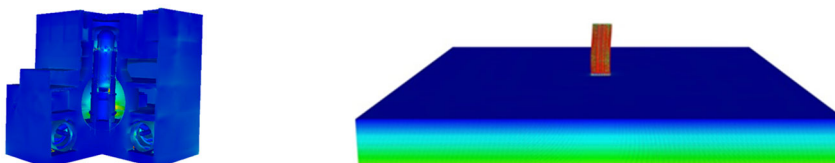


図 2 福島第 1 原子力発電所および地盤を取り付けた超高層ビルの高精細地震応答解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 吉村忍, 宮村倫司, 山田知典, 秋葉博, 清浦英明	4. 巻 18
2. 論文標題 3次元有限要素法による2011年東北地方太平洋沖地震本震時の東京電力福島第一原子力発電所1号機の応答解析（第1報：解析手法の開発とモデル構築及び解析性能検証）	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本原子力学会和文論文誌	6. 最初と最後の頁 135 ~ 159
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3327/taesj.J18.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 吉村忍, 宮村倫司, 山田知典, 秋葉博, 清浦英明	4. 巻 18
2. 論文標題 3次元有限要素法による2011年東北地方太平洋沖地震本震時の東京電力福島第一原子力発電所1号機の応答解析（第2報：固有値解析による基本特性把握と地震応答解析結果）	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本原子力学会和文論文誌	6. 最初と最後の頁 160 ~ 190
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3327/taesj.J18.025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 MIYAMURA Tomoshi, YOSHIMURA Shinobu, YAMADA Tomonori	4. 巻 6
2. 論文標題 Feasibility study of full-scale elastic-plastic seismic response analysis of nuclear power plant	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 19 ~ 281
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.19-00281	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 宮村倫司, 大崎 純, 梶原浩一	4. 巻 84(755)
2. 論文標題 ソリッド要素でモデル化した超高層鋼構造骨組の地震応答解析 - 南海トラフ地震模擬地震動による2分以上の揺れの解析 -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 39 ~ 49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.84.39	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 藤原 淳, 大崎 純, 田川浩之, 宮村倫司, 山下拓三	4. 巻 84
2. 論文標題 コンクリートの圧縮破壊を考慮した角形コンクリート充填鋼管柱の繰り返し曲げせん断挙動の有限要素解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 29 ~ 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.84.29	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Pal Mahendra Kumar, Yamashita Takuzo, Miyamura Tomoshi, Ohsaki Makoto	4. 巻 15(3)
2. 論文標題 A Comprehensive Numerical Simulation of Steel-Concrete Composite Beam Incorporating Compressive Failure of Concrete	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Computational Methods	6. 最初と最後の頁 1840028 ~ 1840028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0219876218400285	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 宮村倫司	4. 巻 83(852)
2. 論文標題 局所座標系によりコースグリッドを定義したバランスング領域分割法	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 p. 17-00070
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.17-00070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山下拓三, 宮村倫司, 小河利行, 熊谷知彦	4. 巻 82(740)
2. 論文標題 複数の二次元コースメッシュを用いたマルチグリッド法による円筒屋根周りの三次元LESの高速化	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1621-1631
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.82.1621	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tomoshi Miyamura, Seizo Tanaka, and Muneo Hori	4. 巻 10(5)
2. 論文標題 Large-scale seismic response analysis of super-high-rise-building fully considering soil-structure interaction using 3D high-fidelity model of solid elements	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Earthquake and Tsunami	6. 最初と最後の頁 1640014(21page)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1142/S1793431116400145	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計27件(うち招待講演 0件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Tomoshi Miyamura, Makoto Ohsaki, Takuzo Yamashita, and Masashi Yamamoto
2. 発表標題 Comparison between coupled structural and heat conduction analysis of laminated high damping rubber bearing and its full-scale test
3. 学会等名 7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinobu Yoshimura, Tomoshi Miyamura, Tomonori Yamada
2. 発表標題 Seismic Response of Unit 1 of Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plants during The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake of 9.0Mw
3. 学会等名 COMPdyn 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤原 淳, 山下 拓三, 大崎 純, 宮村 倫司
2. 発表標題 ソリッド要素を用いた鋼構造建物の露出柱脚のモデル化と解析
3. 学会等名 計算工学講演会論文集, Vol. 24
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 池田圭助, 永野康行, 藤原 淳, 山下拓三, 宮村倫司
2. 発表標題 建築骨組の6面体ソリッド有限要素モデル構築のためのブリ処理モジュール開発 その3 E-Modeler ver.1.0の試用による課題の抽出
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(情報システム技術)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoshi MIYAMURA, Shinobu YOSHIMURA, Tomonori YAMADA
2. 発表標題 High-Fidelity Seismic Response Analysis of a Nuclear Power Plant Using K computer
3. 学会等名 The 13th World Congress in Computational Mechanics (WCCMIII and PANACM II), (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun FUJIWARA, Makoto OHSAKI, Hiroyuki TAGAWA, Takuzo YAMASHITA, Tomoshi MIYAMURA
2. 発表標題 Detailed Finite Element Analysis of Concrete-filled-tube Column under Cyclic Shear-Bending Loading
3. 学会等名 The 13th World Congress in Computational Mechanics (WCCMIII and PANACM II), (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮村倫司, 山田知典, 吉村忍
2. 発表標題 ADVENTURE_Solid Ver. 2による原子力発電所のフルスケール地震応答解析の性能評価
3. 学会等名 計算工学講演会論文集, Vol. 23
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遊佐泰紀, 宮村倫司, 山田知典, 吉村忍
2. 発表標題 領域分割法を用いた風車ブレード構造の並列有限要素解析
3. 学会等名 計算工学講演会論文集, Vol. 23
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤原 淳, 山下拓三, Pal Mahendra Kumar, 大崎 純, 宮村倫司
2. 発表標題 圧縮破壊を考慮したコンクリート弾塑性構成則の損傷変数の陰的更新アルゴリズム
3. 学会等名 計算工学講演会論文集, Vol. 23
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮村倫司, 吉村 忍
2. 発表標題 3次元有限要素法による沸騰水型原子力発電所の弾塑性地震応答解析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集 (構造I)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下拓三, 宮村倫司, 藤原 淳
2. 発表標題 建築骨組の6面体ソリッド有限要素モデル構築のためのプリ処理モジュール開発 その1 プリ処理モジュールの基本コンセプト
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集 (情報システム技術)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤原 淳, 山下拓三, 宮村倫司
2. 発表標題 建築骨組の6面体ソリッド有限要素モデル構築のためのプリ処理モジュール開発 その2 実装と試用版
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集 (情報システム技術)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮村倫司, 山下拓三, 大崎 純, 山本雅史
2. 発表標題 高減衰ゴム免震支承の構造・熱伝導連成解析における材料パラメータの検討
3. 学会等名 日本機械学会計算力学部門第31回計算力学講演会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮村倫司, 吉村忍, 山田知典
2. 発表標題 有限要素法による原子力発電プラントのフルスケール弾塑性地震応答解析 (課題ID: hp170194)
3. 学会等名 第5回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会 ~ポスト「京」への移行期を迎えるHPCI~
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoshi Miyamura, Yasunori Yusa, Jun Yin, Kuniaki Koike, Takashi Ikeda, and Tomonori Yamada
2. 発表標題 Implementation of Combined Ohno-Wang Nonlinear Kinematic Hardening Model and Norton-Bailey Creep Model Using Partitioned Stress Integration Technique
3. 学会等名 ICCES (International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoshi Miyamura
2. 発表標題 Balancing Domain Decomposition Method for Finite Element Analysis of Large-Scale Assembly Structure Modeled Using Millions of Multi-Point Constraints
3. 学会等名 14th U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM14) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuzo Yamashita, Tomoshi Miyamura, and Makoto Ohsaki
2. 発表標題 Detailed Finite Element Analysis of E-Defense Shake Table Test of 10-story Reinforced Concrete Building
3. 学会等名 14th U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM14) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shinobu Yoshimura, Tomoshi Miyamura, and Tomonori Yamada
2. 発表標題 Petascale Finite Element Simulation Based Investigation on Structural Integrity of Nuclear Power Plant Attacked by Strong Earthquake
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮村倫司, 田中聖三, 堀宗朗
2. 発表標題 京による地盤-構造連成を考慮した超高層ビルの大規模地震応答シミュレーション
3. 学会等名 計算工学講演会論文集, Vol. 22
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 遊佐泰紀, 宮村倫司, 山田知典, 吉村忍
2. 発表標題 領域分割法による積層複合材料構造の並列有限要素解析と収束性調査
3. 学会等名 計算工学講演会論文集, Vol. 22
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山下拓三, 宮村倫司, 大崎純
2. 発表標題 10階建て鉄筋コンクリート造建物のE - ディフェンス震動台実験の詳細有限要素解析
3. 学会等名 計算工学講演会論文集, Vol. 22
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮村倫司, 梶原浩一
2. 発表標題 南海トラフ地震模擬地震動を受ける超高層ビルの京による地震応答解析 その2 2分以上の揺れにより生じる相当塑性ひずみ
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造I)(2017年8, 9月中国(広島工業大学))
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮村倫司, 山田知典, 吉村忍
2. 発表標題 京による大規模複雑薄肉構造物の有限要素解析モデルの検証(その2)
3. 学会等名 日本機械学会計算力学部門第30回計算力学講演会講演論文集(2017年9月16 - 18日, 大阪(近畿大学)), No. 17-4 (CD-ROM), No. 117
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomoshi Miyamura, Makoto Ohsaki, Takuzo Yamashita, and Masayuki Kohiyama
2. 発表標題 Coupled Structural and Heat Conduction Analysis of Laminated High Damping Rubber Bearing for Building Frame
3. 学会等名 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XII) & 6th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宮村倫司
2. 発表標題 ソリッド要素でモデル化された骨組構造モデルに対する梁要素を用いたマルチグリッド法の開発
3. 学会等名 計算工学講演会論文集
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宮村倫司, 大崎純, 山下拓三, 山本雅史, 小檜山雅之
2. 発表標題 高減衰ゴム免震支承の構造・熱伝導連成解析に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宮村倫司
2. 発表標題 局所座標系によりコースグリッドを定義したBDD法の性能評価
3. 学会等名 日本機械学会計算力学部門第29回計算力学講演会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 宮村倫司, 山下拓三	4. 発行年 2018年
2. 出版社 日本建築学会	5. 総ページ数 38 (第7章)
3. 書名 「第7章大規模並列構造解析」応用力学シリーズ13: 建築構造における強非線形問題への数値解析による挑戦	

1. 著者名 熊谷知彦, 宮村倫司, 小河利行	4. 発行年 2018年
2. 出版社 日本建築学会	5. 総ページ数 15 (第9章)
3. 書名 「第9章有限回転の取扱い」応用力学シリーズ13: 建築構造における強非線形問題への数値解析による挑戦	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山下 拓三  (Yamashita Takuzo)  (40597605)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・主任研究員   (82102)	
連携研究者	山田 知典  (Yamada Tomonori)  (40401145)	東京大学・工学系研究科・准教授   (12601)	