

# オープンCAEに関する技術調査

EHS&S 研究センター上級研究員 兼 建築構造技術本部長 齊藤 賢二

Keyword : CAE (Computer Aided Engineering), Open Source Initiative, OpenSees, 構造解析ソフト, Tcl 言語

## 1. はじめに

「CAE」(Computer Aided Engineering)とは、「コンピュータ技術を活用して、製品の設計や製造、工程設計の事前検討を行うこと、またはそれを行うためのツール」のことである。平易に言えば、「ものづくりにコンピュータを活用しよう」ということになる。

本稿では、まず最近注目を集めてきている「オープンCAE」について概括する。続いて、オープンCAEの中で、特に構造物の解析に利用されているOpenSeesについて直接海外で調査した内容を踏まえ、解析事例も含めて解説する。

最後に、オープンCAEの建築構造設計実務での活用の可能性について触れる。

## 2. オープンCAEへの流れ

### 2.1 CAEの種類

CAEは、利用目的や利用条件によりさまざまな種類があるが、その入手形態から以下のように大きく3つに分けることができる。

#### 1) 自作プログラム

これらは、プログラムの開発者や関連の技術者が利用者となっていることが特徴であり、組織内で自由に無償利用されてきている。

#### 2) 商用プログラム

「商用プログラム」は、汎用性や利便性を重視して開発されており、一般の対応可能な問題に対しては、極めて効率的であり、CAEの普及に大きく貢献している。

以前は特殊な問題解決へは未対応となっていることも多かったが、現在は最先端の技術が導入され、非常に高機能になっている。

一般的に高機能な商用プログラムは高価であり、ハードウェアの低価格化が進んだ現在でも、その購入費用は利用者を悩ませている。一方、実用的なレベルのプログラムを自作することも、現実的には不可能であろう。そのためCAEの裾野を広げるような、何か新たな取り組みが期待されていた。

#### 3) オープンCAE

そこで、最近になって登場してきたのが「オープンCAE」<sup>1)</sup>である。これは「オープン・ソースのCAE」の略称であるが、「ソースコードがオープンなCAE」という意味に加えて、「活用ノウハウもオープンになっている」という意味を込めて「オープンCAE」と呼ばれている。はじめは研究用に作られた自作プログラムであるが、汎用的な機能を付加して公開される場合も多い。

オープンソースを推進することを目的とする組織であるOpen Source Initiative (OSI) は、オープンソースとは以下の9項目すべてを満たすものであると定義している。

- 自由な再頒布ができること
- ソースコードを入手できること
- 派生物が存在でき派生物に同じライセンスを適用できること
- 差分情報の配布を認める場合には、同一性の保持を要求しても構わないこと
- 個人やグループを差別しないこと、適用領域に基づいた差別をしないこと
- 再配布において追加ライセンスを必要としないこと
- 特定製品に依存しないこと
- 同じ媒体で配布される他のソフトウェアを制限しないこと
- 技術的な中立を保っていること

当初は、機能が限定されたプログラムや、解析機能だけで解析モデル作成ツールや結果の可視化など後処理のツールを備えていないことも多かったが、関係する研究者や技術者らの無報酬での努力の集積により、最近では商用CAEと比較できるまでの機能を持つ「オープンCAE」も登場している。オープンCAEの例を表1に示す。

表1 オープンCAEの例

ソフトウェア名	解析内容	配布元
Salome-Meca	総合構造解析	EDF
OpenSees	骨組構造解析	UCバークレー校
Peridigm	粒子モデル破壊解析	Sandia国立研究所
Impact	衝突解析	ロシア
OpenFOAM	連続体シミュレーション	

## 2.2 無償の意味

オープンCAEは無償で入手できるが、それを活用するためのノウハウは、ユーザ間での積極的な情報交換・交流など、利用者の自主的な努力が前提となっている。これら活用のための時間やコストは、決して少なくはない。

一方、商用CAEは、購入費用は発生するが確実な導入サービスがあり、コンサルティングやマニュアルなども完備されている。さらにサポート契約を結ぶことで、サポートレベルによっては問題解決を依頼することも可能であり、利用者が余計な手間で煩わされることもない。実務では、利用者負担軽減は非常に重要な要件であるといえる。

以上のことから、単に「オープンCAEは無償」とは言い切れない面がある。どちらを選択するかは、必要とするCAEの位置づけや、導入する組織の目的・状況によるため一概には決め難いといえる。ただし、近年オープンCAEの機運が盛り上がってきているのは事実であり、コスト削減にも大きな効果を上げている。

結局、CAEの活用において、オープンCAEと商用CAEは相互補完の関係にあり、両者を適材適所で使いこなすことが重要と思われる。

## 3. OpenSees の概要

### 3.1 全体概要

米国カリフォルニア州立大学バークレイ校にある太平洋地震工学センターPEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley) では、地震工学におけるシミュレーションをサポートするため、OpenSees (The Open System for Earthquake Engineering Simulation) というオブジェクト指向型有限要素解析フレームワークの開発が、G.L.Fenves教授を中心に進められている。

OpenSeesはオープンソース型の開発が採用され、成果物だけでなく開発中のソースコードも公開されている。そのプログラムソースコードはホームページで公開され、世界中の開発者が情報を共有しながらフレームワークの開発を進めている。

OpenSeesは、ホームページを介した活動だけでなく、2000年からはPEERおよび各国大学等において利用者と開発者のためのワークショップを毎年開催している。

OpenSeesはソースコードが無料で頒布されており、各々が追加・変更することができる。さらにOpenSeesでは、利用者として他の人が作成した新しい材料、要素などのモデルを無料で自由に利用でき、また開発者として自身で作成した新しいモデルを世界に公開することができる。多くの人が開発にかかわり次々と新しいモデルが組み込まれることで、OpenSeesが継続的に拡張されていくという仕組みとなっている。つまりOpenSeesは、

誰しもが利用者と開発者の両側面からかわることができ、地震工学の解析体系となっている。

OpenSeesは専用のホームページにおいて、すべての情報が公開されている。ユーザは同サイトで使用法を習熟し、ソースコードも入手することができる。OpenSeesのソースコードには、主として汎用プログラミング言語C++が用いられており、構造モデルや解析制御などの入力データにはTcl言語が用いられている。したがって、利用者は最低限Tclに習熟する必要がある、開発者はそれに加えてC++言語も使いこなせる必要がある。

### 3.2 OpenSeesの起動環境

OpenSeesは、通常のWindowsアプリケーションではなく、DOSのコマンドプロンプト上で動作する。OpenSeesを操作するためにOpenSeesのコマンドを逐一直接打ち込むのも大変手間がかかる。そこで、Tclスクリプトファイルをあらかじめ作成しておき、これを使用してOpenSeesを起動するのが一般的な利用方法である。また、この方法以外に2013年にクラウドを利用した方法が発表された。この方法は、GUI形式で解析実行可能なことがメリットであるが、まだ実験段階であり今後の発展が期待される。

OpenSeesの起動環境イメージを、図1に示す。すでに述べたように、あらかじめTclスクリプトファイル (OpenSeesで用意されているコマンド群をxxx.tclファイル) として作成しておき、tcl executable環境を通して、DOSコマンドプロンプト上で実行する方法が一般的である。

入力データ作成の際には、Web上で公開されているオンラインマニュアルOpenSees Wikiを参照することができる。その他にOpenSeesの利用者、開発者の意見交換の場としてコミュニティサイトが開設され、活発な意見・情報交換が行われており、こちらも自由に参照できる。

### 3.3 開発環境

現在、OpenSeesの開発はMaterial (復元力モデル) やElement (力学モデル) の他に、Recorder (解析結果を記憶する方式) の分野においても行われている。OpenSeesに新しい機能が追加されると、前述したOpenSees Wikiにその要素の特徴や適用例などが記述され、ソースコードとともに全世界に公開される。OpenSees WikiはOpenSees

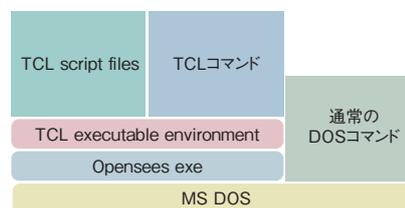


図1 OpenSeesの起動環境

のオンラインマニュアルとなっている。OpenSees開発者にはアカウントが与えられ、Wikiを自由に作成・修正することができる。

OpenSeesでは、プログラム開発においてSubversion形式で管理する方式を推奨している。Subversionとは現在広く使われているソースコード管理システム（SCM：Software Configuration Management）のことである。これは、バージョン管理システム（CVS：Concurrent Versions System）の改良版として企画されたものであり、ソースコードを管理するために広く利用されている。OpenSeesのように不特定多数の人が開発を行い、頻繁にソースコードの追加・変更が行われるようなシステムに適した管理方法である。Subversionの利点としては、プログラムのソースコードや、テキストデータとして書かれた仕様書など、どのようなファイルでもリポジトリと呼ばれる1つの場所にまとめて保管することができ、またリポジトリにアクセスして変更を更新することが容易であることである。

PEERでのOpenSees対応窓口は、Frank McKenna氏である。同氏は実質的にOpenSeesの開発責任者であり、各研究者からアップされたElement, Materialなどを定期的に集約してコンパイルし、実行モジュールを生成しそれを公開している。Frank McKenna氏は、自ら定期的にOpenSeesのWeb上での講習会（Webinar）を開催している。その他、米国以外においても世界各地でOpenSeesの開発者・利用者が解析事例を持ち寄り、直接意見交換が行えるワークショップが不定期ではあるものの開催されている。ただし、残念ながら日本での開催実績はない。

## 4. OpenSees の構成

### 4.1 基本構成

本章では、OpenSeesの全体構成について解説する。OpenSeesの枠組みは、主にオブジェクト指向の言語であるC++で書かれている。CやFortranなどの他言語も利用されているが、それらはごく一部である。OpenSeesの全体構成イメージを図2に示す。

中心に位置するDomainは、OpenSeesの核となる部分である。ModelBuilderは解析モデルの構築、Analysisは解析の計算を行う主体、Recorderは解析の結果を記録するところ、Domainはそれら3つをつなぎ合わせるものである。C++流に表現すれば、それらはクラスという構造で分類される。以下、核となるDomainクラスにつ

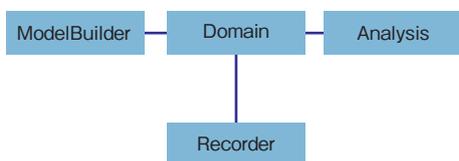


図2 OpenSeesの全体構成

いて解説した後に、OpenSeesコマンドの流れについて解説する。

### 4.2 Domainクラス

OpenSeesにおいて、Domainクラスに含まれるファイルは他のクラスに比べ格段に多い。図3にDomainクラスの構成を示す。DomainクラスはOpenSeesの主となる部分であり、Domainクラスには多くの情報が蓄積されている。

各クラスの内容は、概ねタイトルから推察できる。

Elementは力学モデルのことであり、ばね要素、トラス要素、はり要素、面要素、ソリッド要素などのクラスで構成される。Elementクラスはさらに、図4のような構成を有する。

このクラスには、Elementと組み合わせて用いられるMaterialすなわち復元力モデルが多数存在する。ElementとMaterialを適切に組み合わせることで多様な構造物の解析が可能となり、それぞれのクラスの多さが解析能力に直結する。Nodeクラス他すべてのクラスについての詳細は、OpenSees Wikiで詳細に解説されている。

### 4.3 OpenSeesコマンドの流れ

OpenSees起動環境で表示されたコマンドラインに、OpenSeesのコマンドを入力することで、構造解析を実行できる。

構造解析を行うためには、NodeやElement等の定義、外力の定義などが必要になるが、これらをOpenSeesのコマンドを使って入力し、解きたい問題の設定、解析手法の選択、解析結果の保存まで一連のコマンドを前述したようにTclスクリプトファイルとしてあらかじめ作成する。このTclスクリプトファイルに記載されるコマンドの流れを図5に示す。

外力の設定から解析開始まで違う入力を繰り返すこと

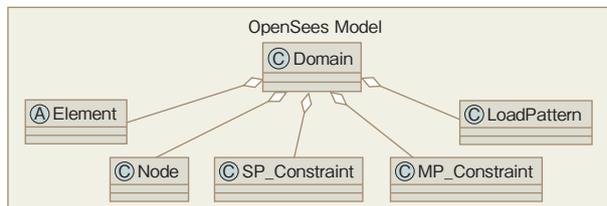


図3 OpenSeesの全体構成

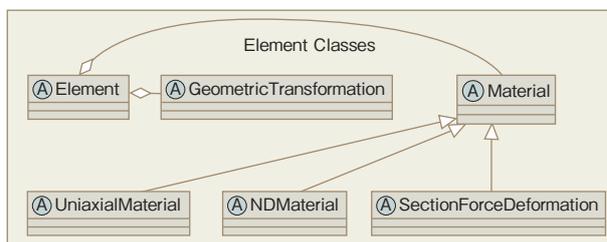


図4 Elementクラスの構成

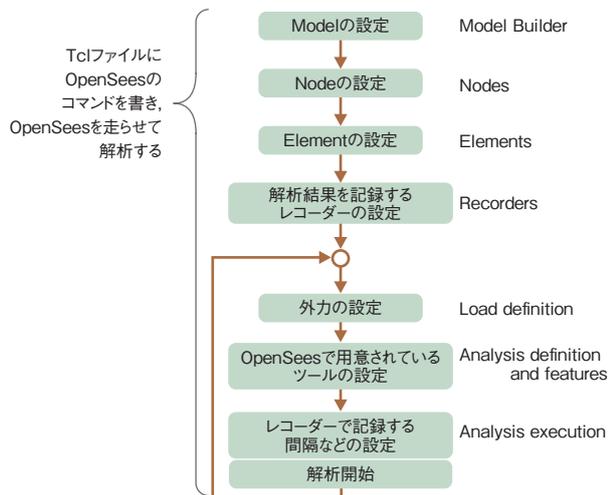


図5 Tclスクリプトファイルに記載されるコマンドの流れ

で、同じNodeやElementの設定をそのまま使用することができる。前述したように、Tcl言語は解析のフローまで制御可能な便利な言語であるといえる。

#### 4.4 OpenSeesユーザのためのツール

OpenSeesの入力は、Tcl言語により記述されるが、これは初心者には慣れるまで相当な労力を必要とする。特に実務者にとっては大きな負担となる。そのような事情から、OpenSeesにはプリポスト処理のためのツールや、他のソフトとデータ連携するためのツールがいくつか開発され、多くは無償で提供されている。以下に代表的なものを挙げる。

##### 1) Building Tcl

このツールは、より高度な解析のためのTcl言語のライブラリを提供している。また、モデル作成、解析制御、結果表示のためのグラフィカルユーザインターフェースも提供している。

##### 2) OpenSees Navigator

このツールも、モデル作成、解析制御、結果表示のためのグラフィカルユーザインターフェースである。また、matlabと連携することで動画作成も可能である。

##### 3) NextFEM Designer

無償で提供されている汎用FEM解析ソフトである。このソフトのプリポスト機能は、SAP2000, Midas GEN, OpenSees, ABAQUS, Zeus-NLなど多くの汎用FEM解析ソフトで利用可能である。

##### 4) ETO (ETABS To OpenSees)

このツールは、モデル作成、結果表示のためのグラフィカルユーザインターフェースである。最大の特徴は、ETABSの入力データをOpenSeesへインポートできることである。

##### 5) OpenSeesPL

地盤系、あるいは地盤～構造物系解析のプリポスト処理のためのソフトである。これも無償で提供されている。

## 5. OpenSeesによる解析事例

### 5.1 概要

本章では、OpenSeesを用いた解析事例を紹介する。ただし、Tcl言語を用いた入力データの作成方法と解析結果の出力方法については誌面の都合上割愛し、解析モデルと結果についてのみ解説する。

解析事例としては、

- 同調粘性マスダンパーシステムの解析
  - P-Δ効果に伴う下層部変形集中現象の解析
- 以上の2事例を紹介する。

### 5.2 同調粘性マスダンパーシステム<sup>5)</sup>の解析

同調粘性マスダンパーとは、Tuned mass damper (TMD) に類似した振動制御装置で、その質量要素としてダイナミック・マスを用いている点が特徴となっている。ダイナミック・マスとは、通常の質量とは異なり、2質点間の相対的な加速度に比例する慣性抵抗力を發揮するものである。

同調粘性マスダンパー制振システムの設計法については、一自由度建物の最適制御解が定点理論に基づいて導出されており、ダンパーの建物高さ方向分布が主系剛性比例の場合の多自由度系建物への拡張方法も提示されている。

次に解析法について述べる。Maxwellモデルを含む構造物の振動解析を行う場合、粘性要素と支持バネ要素の間の自由度に微小な質量を与えないと解析ができない場合があるが、同調粘性マスダンパー制振システムの場合は、ダンパー粘性部と支持バネの間にダイナミック・マスの質量項が存在するためにそのような困難が生じることはなく、Newmark-β法などの数値積分法で解析できる(図6)。

等価せん断型モデルの場合は、Fortranなどで容易に解析プログラムを組むことができるが、骨組みレベルの解析を行う場合は、何らかの汎用振動解析ソフトウェアを用いることとなる。ここでは、汎用振動解析としてOpenSeesを用いた解析例を紹介する。ただし、現時点ではダイナミック・マス要素がソフトウェア内に実装されていないので、同調粘性マスダンパー制振建物の解析を行うためには、ダイナミック・マス要素のモデル化に工夫が必要である。ここでは、回転慣性質量を用いた等

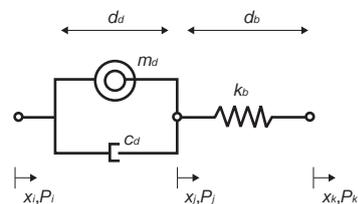


図6 同調粘性マスダンパー要素

価モデルを用いている(図7)。

図8に解析に用いた10質点系モデルを、図9にモデル1層における同調粘性マスダンパーの変位とダンパー力の履歴ループをMATLABで解析した結果とともに示す。

両者の結果は極めて良く一致している。

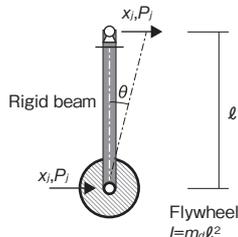


図7 ダイナミックマス代替要素

表2 部材諸元

階	断面2次モーメント (m <sup>4</sup> )		断面積 (m <sup>2</sup> )		全塑性モーメント (kN・m)	
	柱	梁	柱	梁	柱	梁
26~30	0.0400	0.0016	0.1000	0.0250	弾性	1,870
21~25	0.0360	0.0014	0.0800	0.0230		1,760
16~20	0.0320	0.0013	0.0700	0.0200		1,650
11~15	0.0028	0.0011	0.0600	0.0180		1,540
6~10	0.0024	0.0010	0.0500	0.0150		1,210
1~5	0.0020	0.0008	0.0460	0.0130		770

### 5.3 P-Δ効果に伴う下層部変形集中現象の解析

解析モデルは図10に示すような、平面内水平方向には無限均等な階高3mの鉄骨造30階建て、建物高さ90mの超高層建物を想定している。対称性を考慮して解析モデルには魚骨モデルを用いる。部材諸元は1980年代の超高層建物の部材諸元を参考にした値であり、表2に示す。これらの解析モデル諸元は上谷らの論文<sup>6)</sup>のα2フレームに準拠している。

梁は2次勾配係数が0.03%のバイリニア型の弾塑性モデルとし、柱は理想的な梁降伏型全体崩壊機構を示すために、弾性モデルを用いる。部材断面は実際の超高層建物を想定し、全体を5層ずつ、計6グループにグループ

ングしている。なお、部材はSN490級の鋼材を想定し、降伏応力度は300,000kN/m<sup>2</sup>としている。

図11に解析結果を示す。解析結果は時刻歴で出力され、それをMATLABにより動画で確認することもできるが、ここでは各時刻の応答を適当な時間間隔で重ね書きして描いている。柱軸力を考慮した場合(P-Δ効果を考慮した場合)には、柱に取り付く梁の塑性化が進むにつれ、層変位もより大きくなることを確認できる。今後、建築基準法で定められた大地震のレベルを上回るような巨大地震に対して、ここで示したような解析的検討の必要性が高まるものと思われる。写真1に、E-DEFENCEで行われた高層骨組の崩壊に至るまでの加振実験の様子を

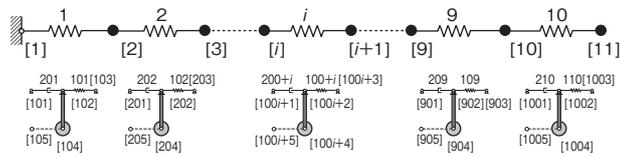


図8 10質点系解析モデル

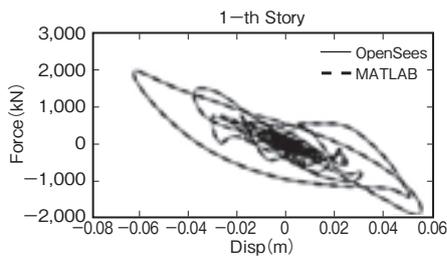


図9 1層の変位とダンパー力関係

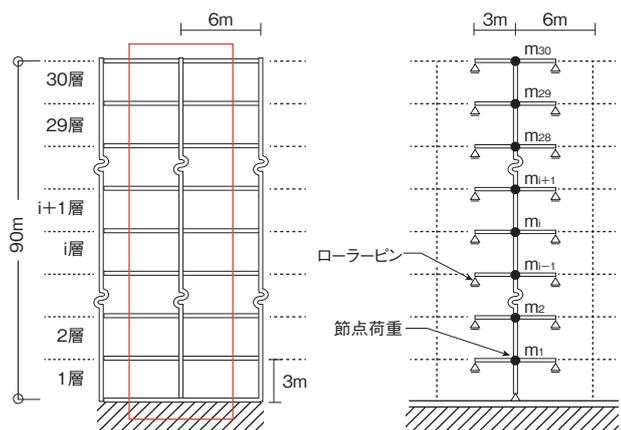


図10 解析モデル

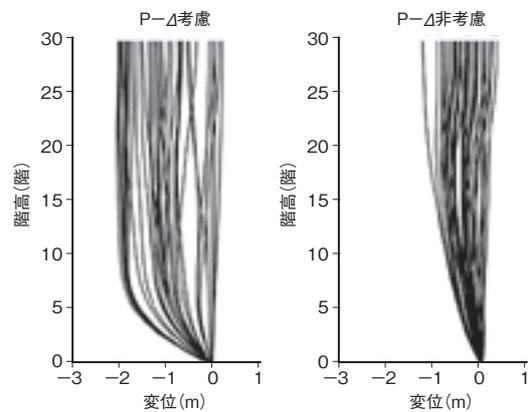


図11 解析結果

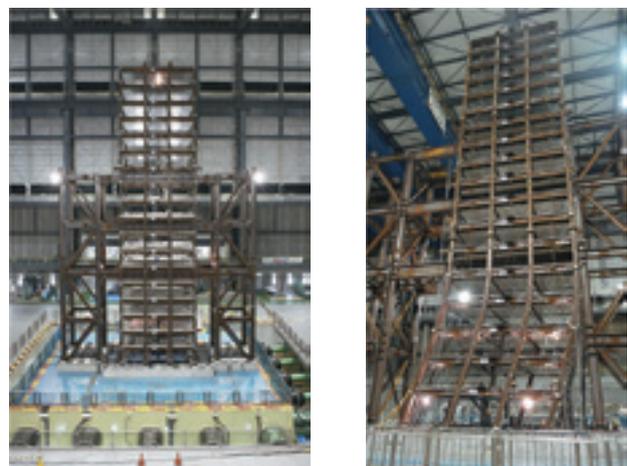


写真1 E-DEFENCEでの高層鉄骨骨組の加振実験<sup>7)</sup>(左:加振前, 右:崩壊直前の状態)

示す。建物規模は異なるものの、下層階の崩壊形は解析と実験とで良く整合していることがわかる。

## 6. まとめ

本稿では、オープンCAEとして構造解析の分野でも利用されているOpenSeesを取り上げ、その概要と解析事例を解説した。

OpenSeesは、基本部分にオブジェクト指向言語C++による実装がなされており、ユーザは独自の解析計算部分をプログラミングして本体にプラグインできることが最大の特徴である。また、入力データをTcl言語で記述することで、コンパイルを必要とせず、入力データファイル内でループや条件分岐などの高度な処理が可能であり、この点自由度の高いものとなっている。

一方OpenSeesは、研究者等による修正や応用をも考慮した広範囲な利用を目的としていることから、使い勝手に問題がある点も存在する。たとえば、ユーザとしての視点からは、Tcl言語はそれ程習得困難なものではないが、言語に関する情報が少なく取り掛かりにくい面がある。一方、解析計算部分を修正しようとする立場からは、OpenSees本体部分の修正を行う必要がある点が問題となる。OpenSeesは、ユーザコードとのインターフェース部分をOpenSeesコード側で持つため、ユーザはOpenSeesの内部に精通したうえでこの内部部分も修正を行う必要がある。また入力データはすべてTcl側から来るので、Tclとのインターフェース部も修正する必要がある。これらの点は、入門者には相当ハードルが高いものである。ユーザは基本部分を構成するC++言語とTcl言語の両方に精通する必要がある。

オープンソースは、基本的には研究者向けではあるが、構造設計実務でも十分活用できる可能性があると思われる。一般的な構造計算については市販のソフトと比較して、特に使い勝手の面で劣るが、2つの解析例で示したような特殊な解析では活用できる可能性が高い。より多くの設計者が、オープンソースを今以上に活用できるようにするためには、一貫構造計算ソフトをはじめとする多く市販の構造解析ソフトとのより一層のデータ連携が望まれる。

## 謝辞

本稿を執筆するにあたり、北海道大学 菊地優教授よりOpenSeesに関し大変貴重な情報提供を頂きました。また、東北大学 五十子幸樹教授からは、OpenSeesによる解析事例の提供を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 〔参考文献〕

- 1) 柴田良一, 野村悦治: はじめてのオープンCAE, I/O編集部, 2014.1.25
- 2) カリフォルニア州立大学パークレー校太平洋地震工学センター: OpenSeesホームページ, <http://opensees.berkeley.edu/>, 2016.5.10
- 3) 中村創一: オープンCAEに関する技術調査, 三重県工業研究所研究報告, No.38, pp.41~43, 2014
- 4) S.Tonegawa: <http://openseesmemo.blogspot.jp/2014/05/openseesopen-system-for-earthquake.html>, 2016.5.10
- 5) 杉村義文, 齊藤賢二, 五十子幸樹, 井上範夫: 同調粘性マスダンパーを用いた多層建築構造物の応答制御に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.56B, pp.153~161, 2010.3
- 6) 上谷宏二, 田川浩: 梁降伏型骨組みの動的崩壊過程における変形集中現象, 日本建築学会構造系論文集, 第483号, pp.51~60, 1996
- 7) 京都大学ホームページ: [www.kyoto-u.ac.jp/static/ja/news\\_data/h/h1/news6/2013.../01.pdf](http://www.kyoto-u.ac.jp/static/ja/news_data/h/h1/news6/2013.../01.pdf), 2016.5.10



さいとう けんじ  
齊藤 賢二

EHS&S 研究センター上級研究員 兼 建築構造技術本部長 兼 構造設計システム部長 兼 耐震構造技術部長  
構造解析システムの開発製造, 構造関連のSI業務に従事  
2004年日本免震構造協会賞技術賞受賞  
博士(工学), 一級建築士, 構造設計一級建築士, 技術士(建設部門), APEC Engineer  
構造計算適合性判定員  
日本建築学会, 日本建築構造技術者協会会員

## Synopsis

### Technical Research into Open CAE

Kenji SAITO

“CAE” (Computer Aided Engineering) refers to “use of computer technology to perform studies in advance into elements such as product design and manufacturing and process design and the tools required to do so.” Among the various types of CAE, “Open CAE,” a type that has appeared recently, features not only open sources, but also open application know-how.

This paper presents an overview of “Open CAE” with particular focus on Open CAE for structural analysis, a type that has recently been attracting attention. In addition, commentaries are provided on examples of analysis based on research in the U.S. on OpenSees, the Open CAE type most widely used across the world for structural analysis among Open CAEs in the field of building structure. Finally, the paper will look at the potential for application of Open CAE in practical building structure design work.

A summary of the paper is presented below.

The greatest feature of OpenSees is that the basic unit is implemented using object-oriented language C++ and the user can program a unique analytical calculation unit and plug it into the main body. In addition, because input data is written in Tcl language, advanced processes can be performed in input data files such as looping and conditional branching with no need for compilation, affording the user a high level of freedom.

On the other hand, OpenSees is intended for a wide range of usage that also allows for corrections and applications, for example, by entities such as researchers, and this presents problems in terms of usability. For example, although the Tcl language is not particularly hard to learn, available information on the language is limited, making it difficult to make a start. Moreover, in OpenSees, the interface to the Tcl language in which user-created source code and input data are written also needs to be modified by the user. This presents the beginner with quite a challenging obstacle. The user needs to be well-versed in both the C++ language used to configure the basic unit and the Tcl language.

Although, ordinarily, Open CAE is intended for researchers, it also has ample potential for use in practical work. While, compared to commercially-available software, Open CAE is inferior in terms of usability for ordinary structural analysis, it offers strong possibilities for use in practical work during special types of analysis such as those illustrated in the examples of analysis. For the average designer to be able to use Open CAE to a greater extent than at the present time, greater data linkage with consistent structural calculation software and other commercially-available structural analysis software in general use will be required.