

土木構造物における3次元解析、動的解析、非線形解析など 解析技術適用の事例とその効果

建築構造物の地震時安全性評価への3次元解析の適用

(株) フォーラムエイト 大阪支社支社長 青戸 拓起

1. はじめに

これまでの、3次元地震動による動的応答の特長、3次元モデルと2次元モデルによる応答の差異を、土木構造物を中心に紹介してきたが、今回は建築構造物(=多層ラーメン構造)を対象とした、地震時の安全性に関する検証例を紹介する。なお、ここに示す構造解析は、全てUC-win/FRAME(3D) Ver.1.07.00による。

2. 建築物の設計に用いる地震力

1) 地震力の大きさと損傷レベル

あらゆる建築物は、建築基準法に従って計画・設計が行われる。また、近年は「住宅の品質確保の促進に関する法律」の実施により、住宅性能表示制度が導入され、耐震性能に関しては3段階の耐震等級が示されている。建築基準法の許容応力度法等(保有耐力法を含む)、限界耐力法により安全性が確認された場合は耐震等級1、その1.25倍、1.5倍の地震力に対し同等の安全性が確認されたものを、それぞれ耐震等級2、3とするものである。

また、建築基準法は最低限の基準を定めるものであるが、1階部の設計水平震度(厳密にはベースシェア係数)の標準値について、希に発生する地震による力として0.2、極めて希に発生する地震による力として1.0(弾性応答時)としている。建築物でも、地震力を静的な荷重に置き換え、これを構造物に作用させて、発生応力等を確認する方法が主流である。一方、地震力を動的な荷重として、すなわち時刻歴波形として構造物に作用させ、動的解析により安全性確認を行うのは、通常、60mを超える(=

超高層)建築物に限定される。この時、地表面における地震波の最大速度の値について、希に発生する地震による力として25kine程度(kine=cm/sec)、極めて希に発生する地震による力として50kine程度が、よく用いられてきた。いずれの場合も、希に発生する地震に対して損傷の防止(=許容応力度以内)、極めて希に発生する地震に対して倒壊の防止(=許容変形以内、靱性の確保)を確認する。

なお、現行の建築基準法は、新耐震(1981年改正)とほぼ同等の耐震水準が確保されるが、これが示す「極めて希に発生する地震に対して倒壊しない」という性能は、大地震で建物が損傷することを、人命に関わる倒壊・崩壊が生じない限り許していることになる。倒壊寸前における損傷は極めて大きく、建替えを要する場合もあり、どの程度の損傷を許容するかは、使用者が供給者と十分協議の上、判断することが重要となる。

2) 建築物の時刻歴応答解析に用いる地震動

先にも触れたように、超高層建築物の構造耐力上の安全性確認は、時刻歴応答解析による動的解析に基づく。

多くの事例を見ると、時刻歴応答解析に用いる地震動は、建物のある1方向とその直行方向に対し、それぞれ別々(=独立)に作用させて実施されることがほとんどのようである。これは、土木構造においても、現在最もよく見られる方法である。設計断面力(あるいは応力)に割増し係数を乗じること、で、水平2方向同時に地震動を受ける効果を考慮する事例も見られるが、この時も構造解析そのものは1方向からの地震入力によるものである。

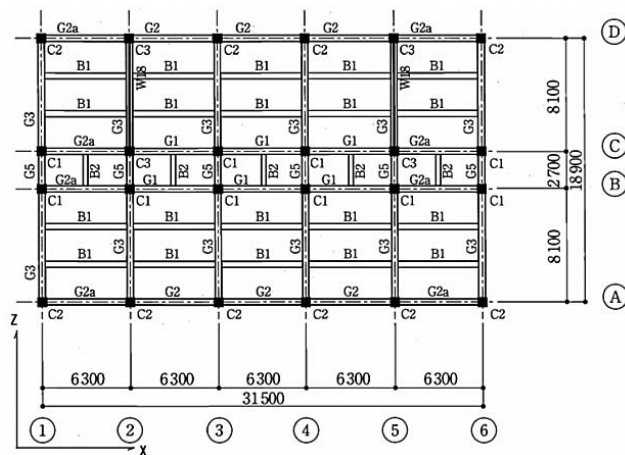
建築基準法では2000年の改正により、地震動を解放工学的基盤で規定するようになるが、過去の観測記録などを用いる場合は、その多くが地表面での記録のため、地表面波形として時刻歴応答解析を用いることになる。この時、先にも触れたように、観測波形を最大速度で基準化し、建築基準法における2段階の地震動レベルと整合をとることが多い。

そこで、今回の検証では、最大速度を50kine程度に基準化した地震動に着目し、その地震動の与え方による地震時挙動の比較を行ってみる。

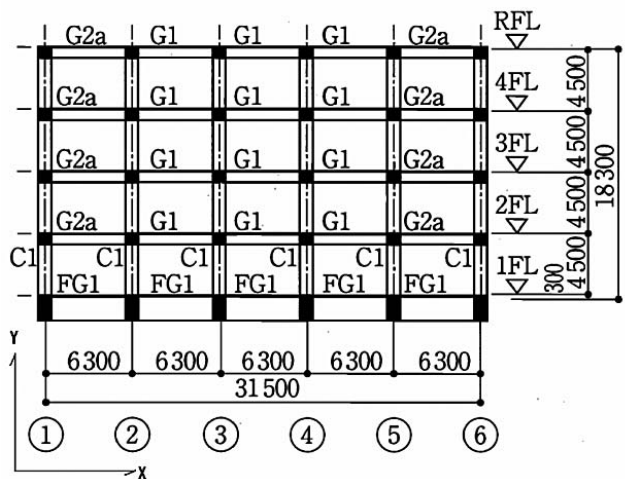
3. 鉄筋コンクリート建物の時刻歴応答解析

1) 解析対象

解析対象は、鉄筋コンクリート造の地上4階建て建物とする(図-1)。なお、図柱には耐震壁が示されているが、解析上、今回はこれを無視している。



(a) X方向

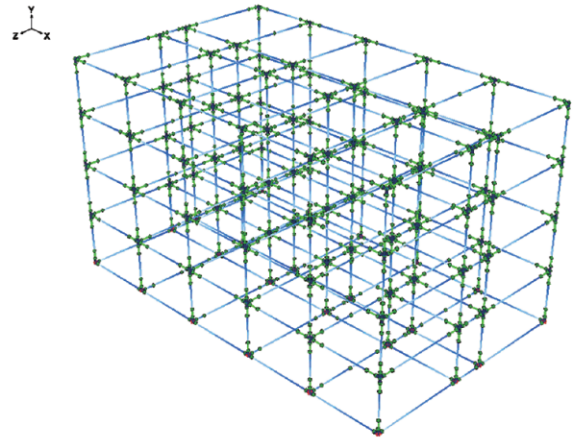


(b) 伏図

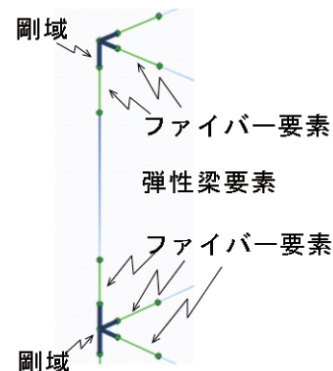
図-1 対象建物

2) 解析モデルと解析ケース

図-2に示すように、骨組み部材により建物全体をモデル化する。塑性化が想定される部材端部(=塑性ヒンジ)については、ファイバー要素を設ける。図-3に、ファイバー要素に用いた材料履歴モデルを示す。鉄筋には、塑性化後の座屈の発生を仮定する。さらに、解析においては、幾何学的非線形を厳密に考慮しており、P- Δ 効果だけでなく、座屈後の変形も表現される。

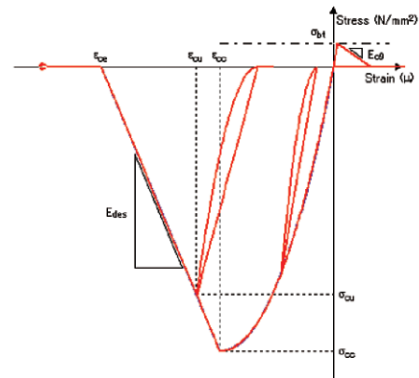


(a) 全体

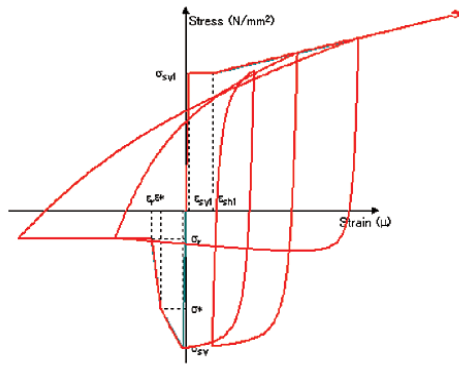


(b) 非線形部材の配置

図-2 解析モデル



(a) コンクリート



(b) 鉄筋

図-3 ファイバー要素に適用した材料モデル

今回使用した地震動を、図-4に示す。兵庫県南部地震における、神戸海洋気象台での観測波形（原波の強さは、最大加速度820Gal程度、最大速度90kine程度）を利用する。なお、南北をモデルのX方向に、東西をモデルのZ方向にとる。

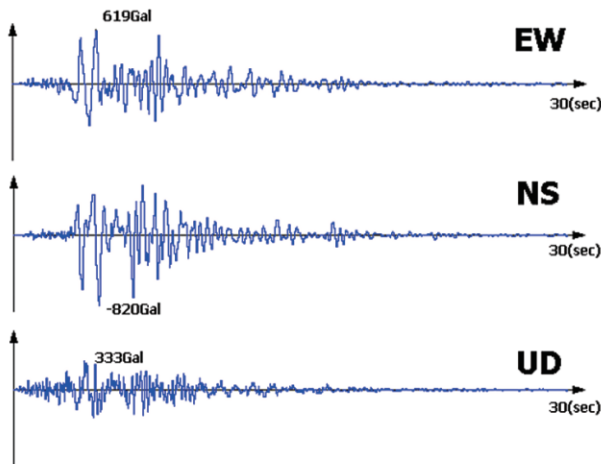


図-4 兵庫県南部地震(1995)の観測波形

解析ケースを、表-1に示す。地震動の強さと与え方、柱の配筋に着目した次の4ケースの解析を実施し、結果を比較することにする。

表-1

	最大速度	加振方向	柱配筋
Case 1	約50kine	Y、Z	D25×16本
Case 2		X、Y、Z	D22×12本
Case 3			D25×16本
Case 4	約90kine		

Case 1：最大速度を50kine程度に基準化し、水平方向はZ方向のみを加振する。

Case 2：最大速度を50kine程度に基準化し、水平

方向はX方向およびZ方向同時に加振する。

Case 3：Case 2について、柱の主鉄筋を減らしたものの。柱の曲げ耐力 M_u は、他のケースの約70%程度。

Case 4：地震動をそのままの強さで、水平方向はX方向およびZ方向同時に加振する。

すなわち、Case 1・2は建築基準法で示されている最低限の地震動強さ、Case 4は実際の地震動強さに相当すると考えることができる。Case 3は既存不適格建築物や耐震偽装された建築物を仮定したものと考えればよい。

3) 解析結果

a. Case 1

図-5に、ファイバー要素断面に生じた最大圧縮ひずみによる、損傷状況を示す。損傷レベル2は、圧縮強度を超えるものの、終局ひずみ（ $\epsilon'_{cu}=0.0035$ ）には達していないレベルである。図を見ると、1階柱基部において、損傷レベル2が認められるが、他の部位ではそれ未満の損傷である。

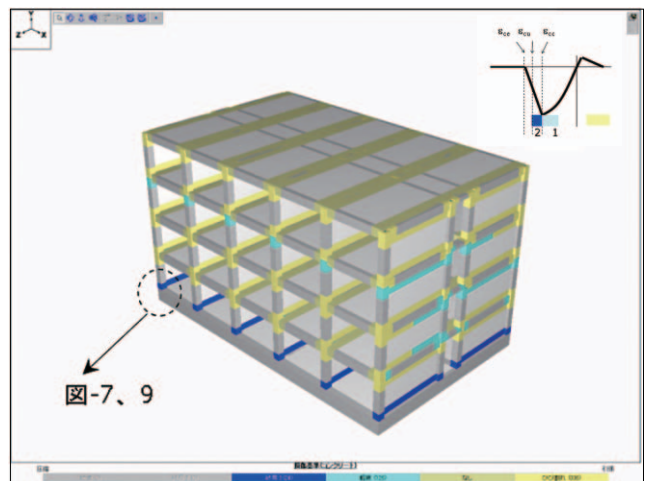
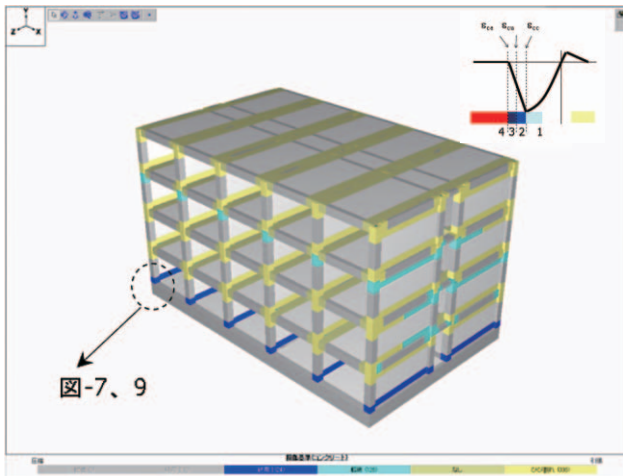


図-5 Case 1の損傷状況と変形(実変位)

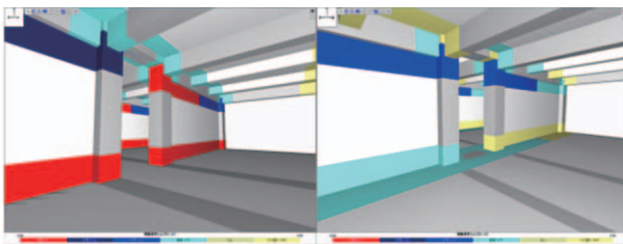
よって、倒壊・崩壊は確実に防いでいる結果となり、また地震後にも補強や補修により使用が継続できるものと推察される。

b. Case 2

図-6に、ファイバー要素断面に生じた最大圧縮ひずみによる損傷状況と、最終変形状態を示す。損傷レベル3・4は、終局ひずみ（ $\epsilon'_{cu}=0.0035$ ）を超えるレベル最大圧縮ひずみが生じたことを表し、特に損傷レベル4はかぶりコンクリートの剥落などの被害が生じるレベルに相当する。図を見ると、1階柱基部において、損傷レベル4が認められるが、2階以上は損傷レベル2にとどまっていることが確認



(a) 全体



(b) 室内の被害状況

[1階(左)、3階(右)]

図-6 Case 2の損傷状況と変形(実変位)

できる。すなわち、1階部分に被害が集中した被害形態である。

解析の結果からは、倒壊・崩壊はかろうじて逃れているように見えるが、残留変形が認められ、地震による損傷が大きく、地震後に建替えが必要とされる被害状況と推察される。

c. Case 3

図-11に、ファイバー要素断面に生じた最大圧

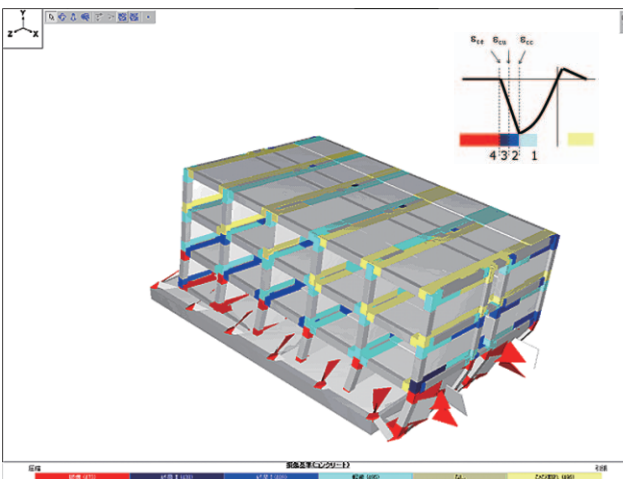


図-11 Case 3の損傷状況と変形(実変位)

縮ひずみによる損傷状況と、最終変形状態を示す。Case 2と同じ地震動を作用させているが、こちらは柱の耐力が大幅に低い。そのため、特に1階および2階の柱において水平変位が増大し、建物は自重に耐えられず倒壊に至ったと考えられる。すなわち、人命に関わる被害状況といえる。

d. Case 4

図-12に、ファイバー要素断面に生じた最大圧縮ひずみによる損傷状況と、最終変形状態を示す。

Case 2と同じ耐力を有するが、こちらは作用した地震動が大きかったために、建物は倒壊する結果となっている。これも、人命に関わる被害状況といえる。

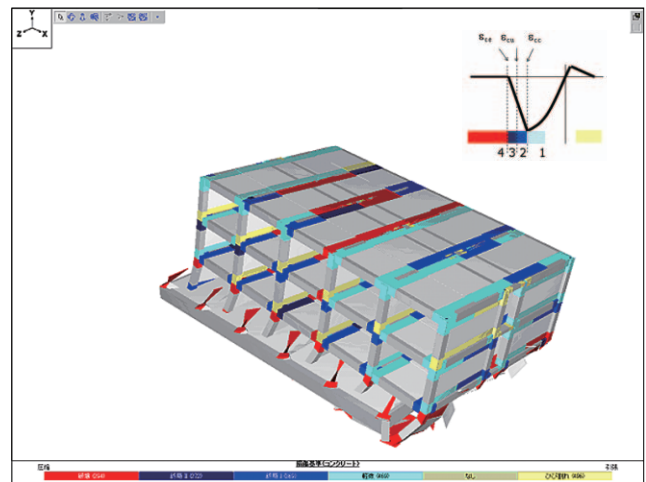


図-12 Case 4の損傷状況と変形(実変位)

4)結果の考察

ここで、Case 1とCase 2の結果に着目してみる。

図-7に、Case 1およびCase 2における、隅柱の軸方向力一軸ひずみの履歴図を示す。Case 2の方が軸力変動の幅が大きいのがわかる。Case 1では、引張軸力が生じることはなかったが、Case 2では、引張軸力も生じている。過去のいくつかの検証例でも、水平1方向の地震動を受ける場合よりも、2方向同時に地震動を受ける場合の方が、軸力の変動幅が大きいことが確認されている。

図-8に、Case 1およびCase 2の、水平面内の応答変位の軌跡を示す。Case 1に比べ、Case 2の方が最大応答変位が大きくなっていることがわかる。水平2方向の地震動を同時に受けることにより、水平1方向の地震動を受ける場合よりも、水平変位が増大するものと推察される。

図-9・10に、Case 1・2の同じ隅柱における、損傷レベルと圧縮鉄筋の履歴を示す。Case 1では、最大で損傷レベル2に達するものの、それはコアコン

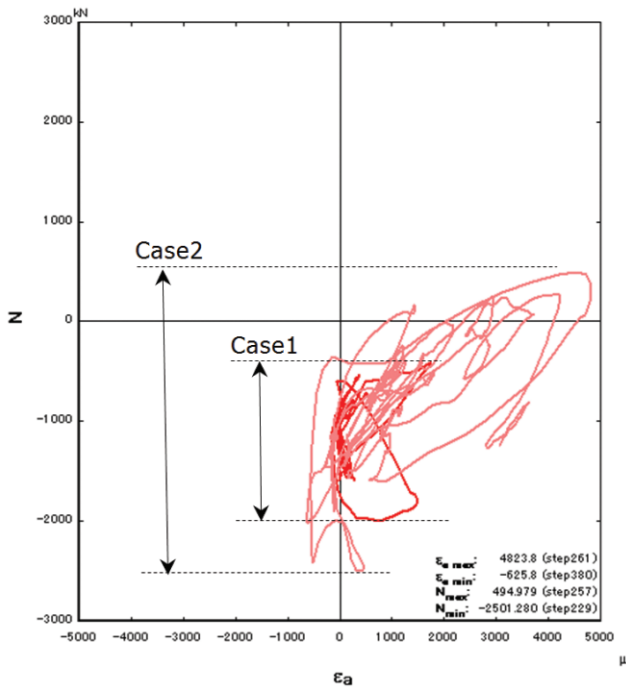


図-7 Case 1、2の隅柱の軸力-軸ひずみ応答

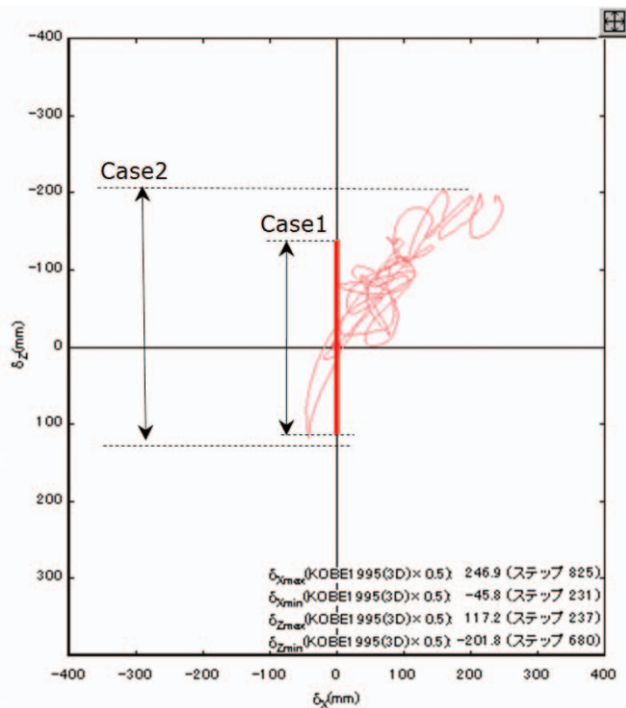


図-8 Case 1、2の隅柱の変位軌跡

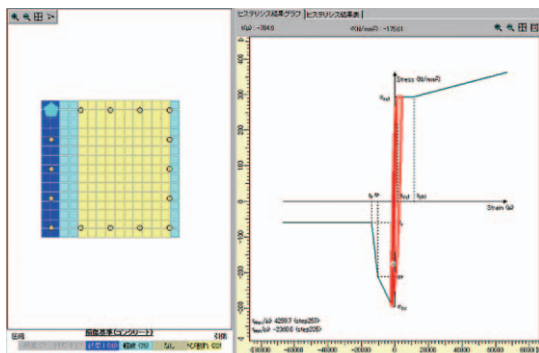


図-9 Case 1の隅柱の損傷状況と鉄筋の履歴

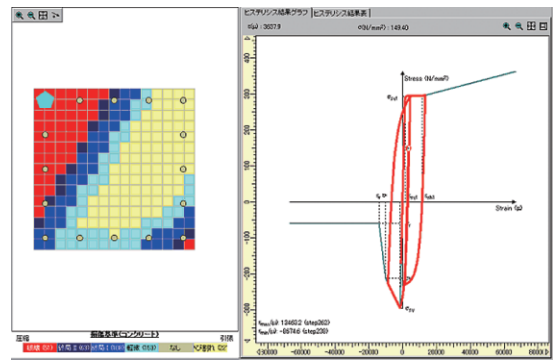


図-10 Case 2の隅柱の損傷状況と鉄筋の履歴

クリート深くまでは進行していない。しかし、Case2は、損傷レベル4に達するとともに、それがコアコンクリート深くまで進行している。水平2方向の地震動を同時に受けたことにより変位が増大し、また鉄筋の座屈の影響により、損傷が柱内部深くまで進行したものと推察される。

4. まとめ

1) Case 1・2は、その地震動の与え方が異なるものの、建築基準法で規定される最低限の地震動レベルである。この最低限の地震動レベルの作用下においては、解析上は崩壊を防ぐ結果となり、建築基準法の規定する耐震性能は満たされたと判断することができる。しかし、Case 4のような、想定外の大きな地震動に対しては、このモデルの場合は倒壊してしまったことになる。すなわち、この建築物に限っては、想定を超える地震動に対する余剰性能が低かったといえる。

なお、このモデルでは、十分なせん断補強および帯鉄筋を有しているものとして、せん断破壊に伴う柱の損傷・崩壊をモデル化していない。また、壁の抵抗も考慮していないが、これらを考慮した検証も可能である。

2) 水平1方向に地震動を与えた解析結果と、水平2方向同時に地震動を与えた結果は、明らかに損傷レベルが異なってくる。実際の地震動は3次元的な地震動であるため、水平動については2方向同時に入力した解析結果の方が、より実際に近い評価を与えようと考えられる。

なお、日本の主要98断層帯に対しては、地震動の予測結果が公開されており、水平2方向の波形が示されている。さらに、水平2方向同時作用下の地震動特性の評価方法についても、いくつか議論も進んでいる。今後は、水平2方向地震動を与えた3次元解析に基づく性能評価方法の実用性が、一層増していくものと考えている。