

原子力分野における耐震計算科学研究の果たす役割  
－認識論的不確定性の低減に向けて－

高田 毅士  
東京大学大学院工学系研究科

# 原子力分野における耐震計算科学研究の果たす役割 —認識論的不確定性の低減に向けて—

高田 毅士

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻  
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1  
[takada@load.arch.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:takada@load.arch.t.u-tokyo.ac.jp)

## 1. はじめに

耐震工学においては地震という極めて不確定な自然現象を取り扱うために、その不確定性の存在を認識することが重要である。これらの不確定性は、偶然的な不確定性と認識論的不確定性に分類され、前者が偶然性に関わるもので偶然事象であるが故にその不確定性を低減できない性質を有し、一方、後者は人間の持つ知識や情報の不足に起因する不確定性であり、知識や情報を獲得すれば低減可能な性質を有する。この不確定性については、人間が過去より培ってきた経験、知識と知恵により時代とともに低減されてきたが、最近の、予想外の地震被害（無被害も含めて）が起きる度に、認識論的不確定性の存在を改めて知るのである[1]。原子力分野の耐震設計・評価においては、これらの不確定性を適切に取り扱ってゆくことが、地震という自然現象に対峙する真摯な姿勢と言える[2]。

## 2. 耐震設計における設計モデルの認識論的不確定性の評価

設計においては慣用的に簡易なモデルがよく用いられる。これは、長年用いてきた実績のあるモデルであること、構造物の詳細な情報が設計時点では詳細には定まっていないこと、などが理由であろう。原子炉建屋であれば、間仕切り壁や二次部材等はモデル化では無視され、結果的に力学的理想化や簡略化が施され、次元を下げた簡易な力学モデルが用いられる。このような理想化、簡略化や低次元に縮約されたモデル化は工学としての合理的近似の結果であり長年の工学知に由来する。しかしながら、これらの近似の合理性は条件によっては不適切な結果をもたらすこともあり、モデルと現実との差、すなわち認識論的不確定性が存在し、それを定量的に評価する必要がある。

## 3. モデルのベリフィケーションとバリデーション、とモデル更新による不確定性低減

文献[3]によると、実現象を表すモデルの計算結果の妥当性・信頼性を考える上で、Roache が提唱する V&V(Verification and Validation)の考えが必要であることを述べている。Verification は検証と、Validation は妥当性確認と和訳されるようであるが、前者は仮定する数理モデルに対して数値計算モデルが妥当な結果を与えるかどうか、後者は対象とする物理現象に対して適切な計算結果が得られるかどうかに関するもので、数値計算モデルの適用上どちらも重要な事項である。新しく開発したモデルが、V&V が十分になされている必要があり、モデルが有する認識論的不確定性をできる限り低減させる必要がある。低減が困難で信頼性が十分でなくとも、許容誤差としての認識論的不確定性を評価しておけば、実用に供することが可能である。また、既存の情報やエビデンスによりモデルを更新することも今後重要である[4]。例えば、原子炉建屋の地震観測記録によりモデルを更新することが可能であり、すなわち、新しい情報によりシステム同定の技術を援用して対象構造物に固有の解析モデルを構築することが可能であり、認識論的不確定性を低減することができる。

## 4. 原子力耐震分野における計算科学研究の役割

計算科学研究の原子力耐震分野における役割として、設計・評価で用いられるモデルの妥当性確認(Validation)を通して、モデルのもつ認識論的不確定性の程度を把握する必要がある。次に、設計で用いられる簡易モデルのそれも詳細モデルと比較することにより定量化する必要がある。モデルの妥当性や不確定性が確認できれば、複雑な現象解明にも大いに活用できる。例えば、岩盤物性の不均質性による地震波の散乱減衰の解明、強震時の地盤の非線形化に伴う地盤沈下、液状化の評価、三次元的な斜面のすべり解析など、地震時の様々な複雑現象を解明するための有力なツールとなりうる。

## 5. おわりに

原子力耐震工学における計算科学研究に期待されることは多い。認識論的不確定性の評価と低減により、この分野で直面する様々な課題の解明に大いに寄与できる。

**参考文献** [1] 高田毅士、原子力分野における地震 PSA と最近の出来事、Vol. 7, No. 2, 保全学、2008. 6 [2] 日本原子力学会、日本原子力学会標準 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準、2007. 9 [3] 山田貴博、計算力学の最近のテーマ、建築構造力学における最近の発展と展望 その 2、日本建築学会資料、2010. 1 [4] 高田毅士、試験・観測データの有効活用-保証試験とベイズ更新、Vol. 32, No. 2, 信頼性学会誌、pp. 1-6, 2010



# 原子力分野における耐震計算科学研究の 果たす役割

## —認識論的不確定性の低減に向けて

高田毅士

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻



## 話の概要

- (1) 不確定性とは？
- (2) 認識論的不確定性の評価と低減
- (3) モデルのV&V, モデル更新
- (4) 原子力耐震分野における計算科学研究の役割
- (5) まとめ

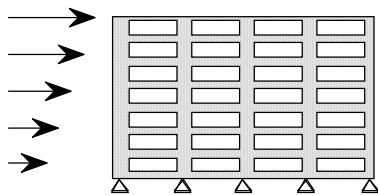


# 不確定性とは？

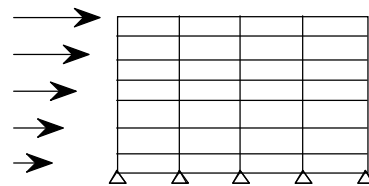


## 不確定性の存在-1

RC骨組の静的加力実験



実験のシミュレーション

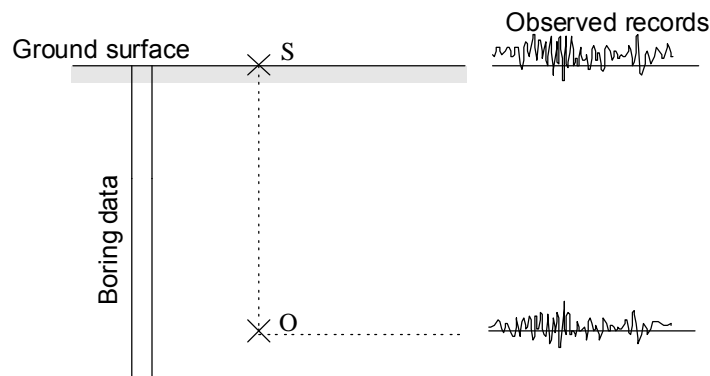


シミュレーションモデルの結果は実験と異なる。なぜ？

1. モデルに用いた材料特性、寸法は実験と同じ？（材料特性に関わる不確定性）
2. モデルにおける境界条件は実験と同じ
3. 線材によるモデルは適切か？（モデルの簡略化による不確定性）
4. シミュレーションに用いた理論は適切？（モデル化に関わる不確定性）
5. 実験は適切になされたか？（測定誤差、初期不整、製作誤差など）



## 不確定性の存在-2



地中0点、地表S点の観測記録が得られている。0点の記録と、ボーリング調査により得られている地盤特性を用いて、せん断波の一次元波動解析理論に基づいて、S点の記録をシミュレーションする。

しかし、結果はS点の観測記録と必ずしも合わない。なぜか？



5



## 不確定性の存在-3

1. ボーリングデータは三次元的に広がる地盤特性を反映していないかも(物性の空間変動)
2. せん断波の一次元波動解析では、SH波、S波、P波または表面波の波動伝播を表現しきれていないかも(理論の簡略化)
3. 地震波は必ずしも鉛直下方から入射されないかも(理論の仮定)
4. 三次元地盤中の波動伝播は複雑で一次元では表せない(理論の簡略化)
5. 地盤が成層構造になっていないかも(実体との差)
6. そもそも観測記録に誤差があるかも(測定誤差)など



6



# 不確定性について

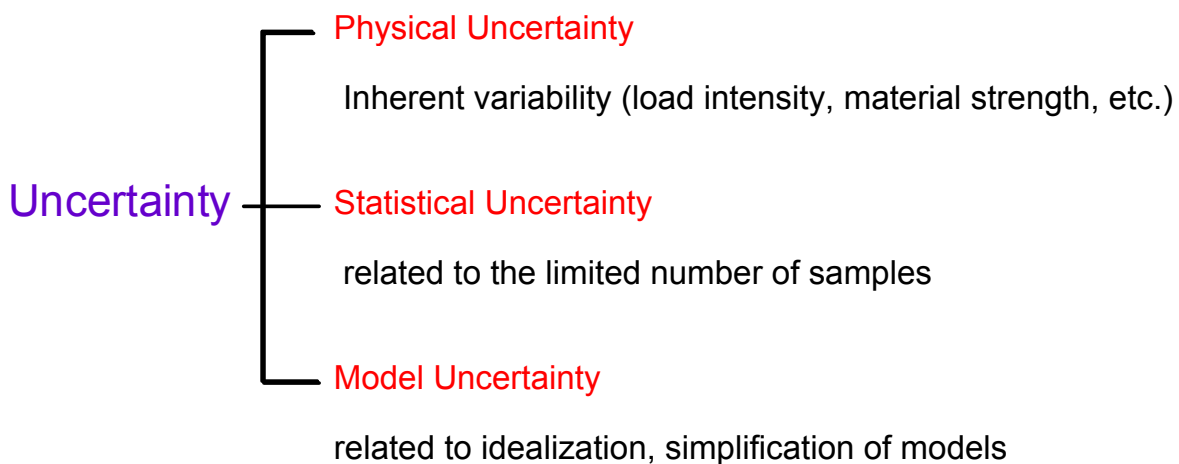
- 不確定性(uncertainty)
- モデル化誤差(modeling error)
- 不規則性(randomness)
- 不完全性(Incompleteness)
- あいまいさ(fuzziness)
- 不明瞭さ(ambiguity)
- 未知(unknown)



7



# 不確定性の定義



After Benjamin and Cornell (1970) or Christensen and Baker (1986)



8



# 不確定性の分類

**偶然的な不確定性  
(Aleatory  
uncertainty)**

**偶然に支配される不確定性  
荷重、材料強度などの物理量のばらつき**

**認識的な不確定性  
(Epistemic  
uncertainty)**

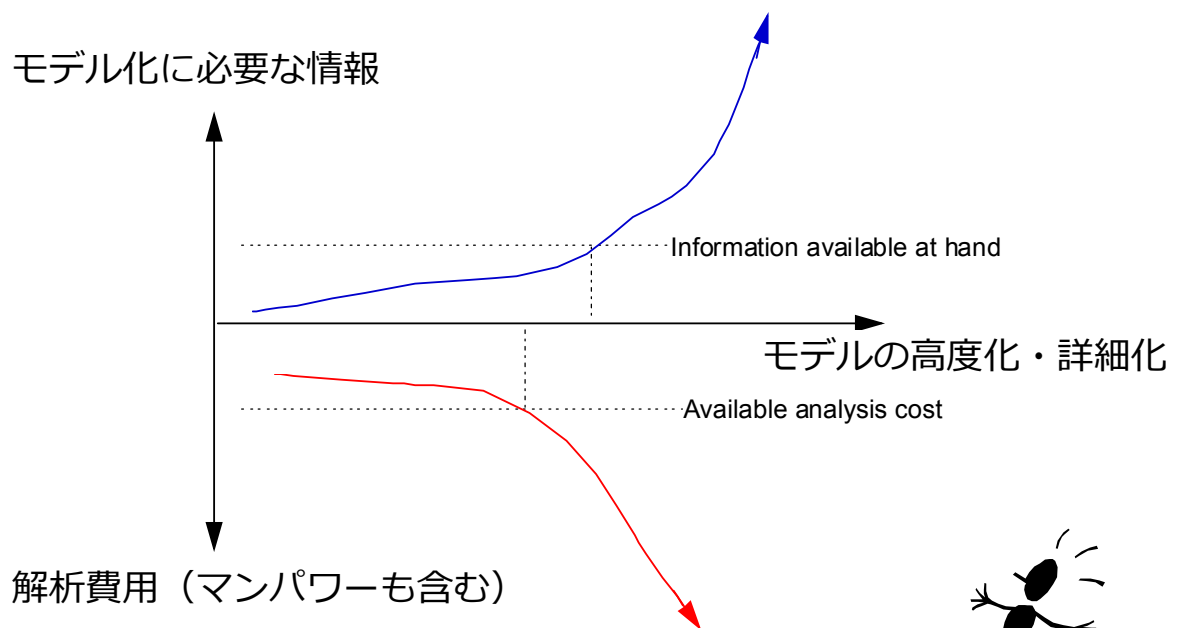
**真の状態がよくわからず知識不足により生じる不確定性(モデル化誤差に近い)  
データの蓄積、科学の進歩により低減可能な性質を持つ**



9



## 認識論的不確定性（モデル化誤差）の存在



10

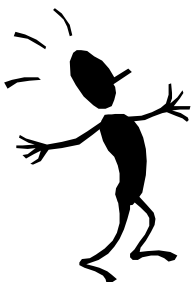


# 不確定解析・モデリングの意義

- 解析や設計の中に不確定性を取り入れる
  - 不十分な精度でしか推定できないパラメータ
  - 計測・試験コストがかかりすぎる
  - 利用できる情報量は限られている
  - 手元の情報を最大限に活用する
- 工学の実用性
  - 簡略化した解析は実用的で好まれる傾向
  - 最終結果を巾で表現すること
  - 最終結果に与える種々のパラメータの感度の評価

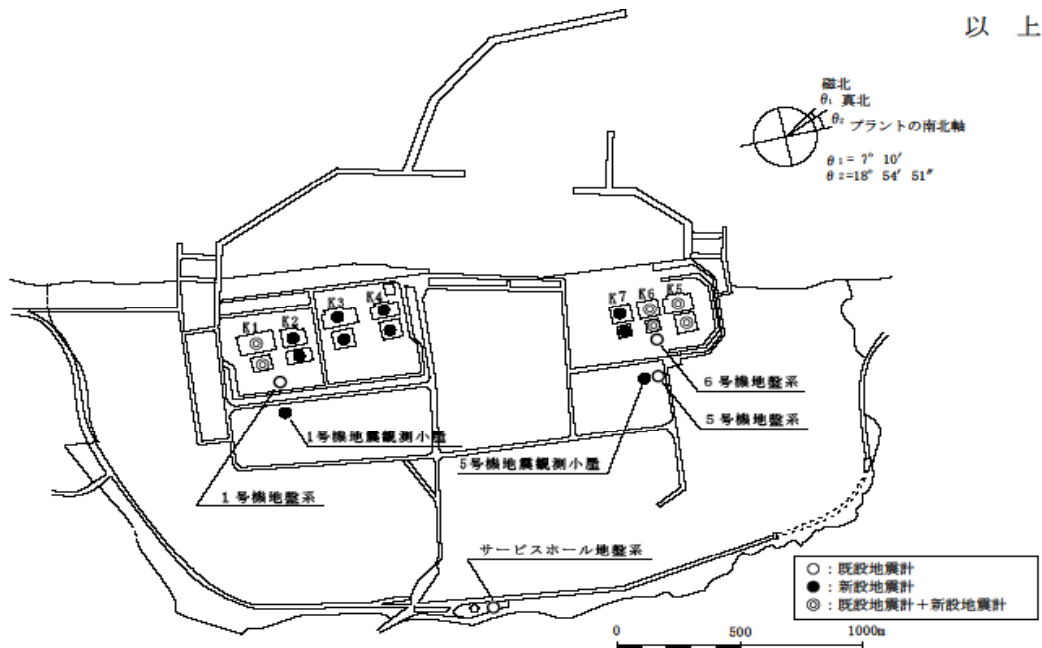


## 認識論的不確定性の評価と低減





# 2007中越沖地震の柏崎刈羽発電所の記録



## 観測記録と設計時の解析結果

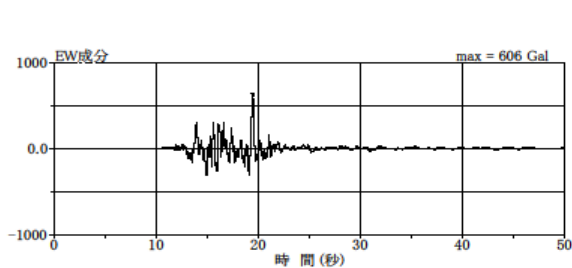


図 2-2 2号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

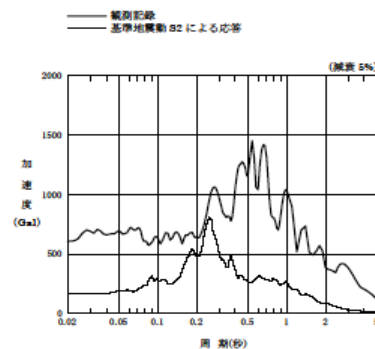


図 3-2 2号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

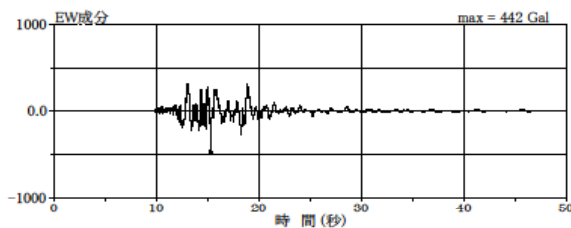


図 2-5 5号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

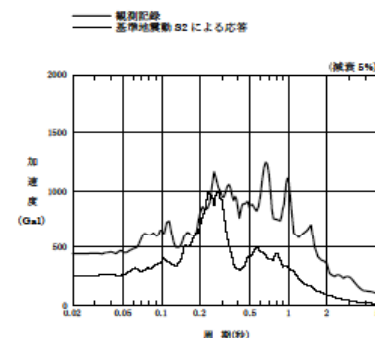


図 3-5 5号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)



## 認識論的不確定性の定量的評価



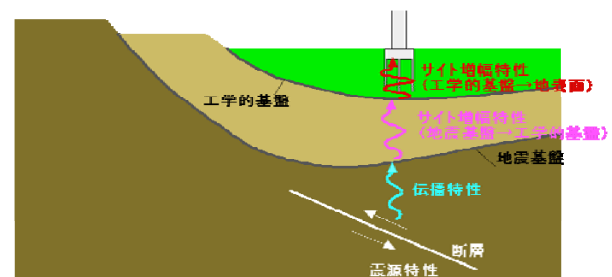
## ■ 地震発生に関する不確定性

- ・発生時刻(いつ?)
- ・発生地点(どこで?)
- ・発生様態(どのような規模、様式?)

## ■ 地盤中を伝わる地震動に関する不確定性

- ・地震動の特性(大きさ、波の性質)

## ■ モデル化の不確定性



## モデルのV&Vと更新



# 解析モデルの信頼性に関するV&Vの必要性

## V(Verification: 検証)

物理現象を数学的に記述したモデル(数理モデル)に対して、数値計算モデルとその数値シミュレーションによって妥当な結果が得られるかを評価する概念

(数理モデル解とシミュレーション解の照合)

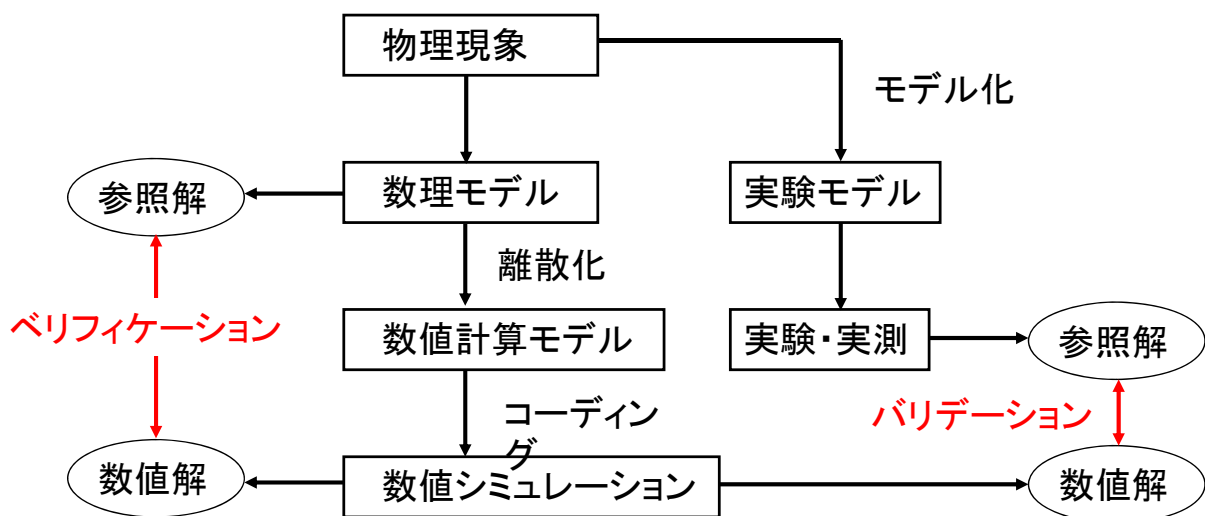
## V(Validation: 妥当性確認)

物理現象に対して適切な数値シミュレーションが行われているかを物理的観点から評価する概念

(数理モデルと物理現象との比較)



# V & V



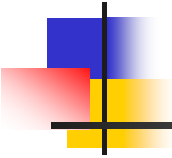
数値計算のモデル化プロセスとバリフィケーションとバリデーション (山田、2010)





## 不確定性に関する議論

- 1) 耐震問題に内在する多様な不確定性の存在を確認
- 2) 認識論的不確定性と偶然的不確定性の分離
- 3) 不確定性の定量的評価は可能か？
- 4) 認識論的不確定性はどこまで低減可能か？
- 5) 実際的に不確定性に関してどこまで情報収集可能か？
- 6) いろいろな不確定性の最終結果への感度は？
- 7) 工学における、不確定性を無視できるロジックは可能か？



原子力耐震分野における計算  
科学研究への期待



実現象の複雑性をシミュレートするモデルの高度化

簡易モデルの認識論的不確定性の定量的評価

観測記録やシステム同定技術による認識論的不確定性の評価

モデル化の程度と不確定性の低減

モデル更新の枠組み構築(ベイズ更新)

認識論的不確定性の低減のためのデータ収集



まとめ



## まとめ

---

- (1) 不確定性の存在、認識、評価
- (2) 不確定論からみた計算科学研究の位置づけ
- (3) 認識論的不確定性の低減と工学への応用
- (4) モデルのV&V, モデル更新の必要性
- (5) 計算科学研究の役割と大いなる期待