Three-way Conversation

How to Apprehend Uncertainty

不確実性をどうとらえるか

◆話し手◆

和田 章 *akira* WADA

東京工業大学教授／1946年生まれ。東京工業大学卒業。同大学大学院修士課程修了。建築構造学、耐震工学、情報システム技術。工学博士。共著に『Innovative Approaches to Earthquake Engineering』ほか。1995年日本建築学会賞（論文）、2003年日本建築学会賞（技術）、2010年日本免震構造協会賞（技術）受賞ほか

神田 順 *jun* KANDA

東京大学教授／1947年生まれ。東京大学卒業。Edinburgh大学大学院修了。建築構造工学、風工学、地震工学。Ph.D.。著書に『耐震建築の考え方』『安全な建物とは何か』、編著に『東京の環境を考える』ほか。1991年霞が関ビル記念賞（研究部門）、1996年日本建築学会賞（論文）受賞

内田祥士 *yoshio* UCHIDA

東洋大学教授／1955年生まれ。早稲田大学卒業。増沢建築設計事務所勤務後、東京大学大学院博士課程単位取得後退学。習作舎一級建築士事務所設立後現職。作品に「秋野不矩美術館」（藤森照信＋内田祥士）、「東洋大学実験工房」（久米設計＋内田祥士）、「妙寿寺庫裏」（内田祥士）ほか。著書に『東照宮の近代――都市としての陽明門』

●聞き手●

陶器浩一 *hirokazu* TOKI
（滋賀県立大学教授／編集委員会幹事）

中江 哲 *tetsu* NAKAE
（鹿島建設関西支店建築設計部グループ長／編集委員会委員）

福島加津也 *katsuya* FUKUSHIMA
（建築家／編集委員会委員）

陶器——構造計算による予測の精度が上がったことで、不確実性が一見極小化し技術のレンジが狭くなって包容力をなくしているように思えます。このような状況下において、構造が持つべき主体性とは何かを考えようというのが本日の趣旨です。今日は3人の先生方に、私たち構造家や建築家が今後どう振る舞うべきか具体的かつ深いお話を伺いたいと思います。

和田——必ずしも建築のエンジニアに限った問題ではありませんが、ほとんどのエンジニアは阻むものを恐れて立ちすくむことはなく、その時代で最大限の努力を続けて文明を進歩させてきたと思います。「こんなに大きな地震があります」「こんなに地盤が悪いです」と言われても、「では、(建てるのは)やめましょう」と言う人はおらず、「どうにかします」と言って進めていくことでしょう。超高層ビルは危ない、鉄筋コンクリートの学校は危ないと言っていたら、今の繁栄した日本はなかったと思います。ただ、これまでを振り返ると、自然災害と耐震技術の間にギャップがあることは確かです。理学研究者は、橋や建築をつくる使命を持つ人とは違う立場から発言していますが、彼らも地震や地震動のすべてがわかっているわけではありません。1968年にプレートテクトニクス理論が認められ、地震は地球内部の熱対流に乗って地殻が動くことで起きることがわかりました。それによって、地震とは、運が悪いから起きるのではなく、必ず起きる宿命にあるということがはっきりしました。同じ年、十勝沖地震では鉄筋コンクリートの建物がたくさん壊れ、その一方で霞が関ビルが竣工しました[★1]。人々の要求や欲望は絶え間なく、エンジニアは「できません」とは言わなかった。何か被害が出るのは、人々の欲望と「やりましょう」と言う技術者の掛け算によるのではないかと思います。このなかで地震学も工学も進んでいきますから、そのギャップを小さくしていくのがわれわれの仕事だと思います。

耐震構造の基本は三つあります。ひとつ目は剛性と強さで、細い柱より太い柱の方が丈夫だということです。二つ目はねばり強さ(靱性)です。例えばガラスの棒でできたような建物は、地震で揺れると先に限界に達したものから次々に折れてしまい、100本のガラス棒のような柱があっても、全体の強さは100本の合算値にはなりません。靱性(塑性変形能力)には、実際の挙動と計算との食い違いを補ってくれる効用があり、地震エネルギーを吸収する役割もあります。三つ目に重要なことは、部材の接合部、床構造をしっかりつくることによって得られる建物の一体性です。中国・汶川地震、ハイチ地震などによる大災害は、これら三つの基本が守られていなかったために起きたと言えます。

耐震設計をするときに、日本では佐野利器先生が、イタリアではそれより10年くらい前に物理学者が、等価な静的水平力を用いて設計すればいいと発表しています。これは素晴らしい方法なのですが、実際には地震は動的な現象なのに、静的な水平力に対して構造部材の強さが足りるか足りないかだけの議論になってしまっています。地震のとき建物は左右だけでなく前後にも複雑に揺れることが忘れられています。新しい発想、新しい耐震構造のためにも、本当の現象に思いを寄せる必要があります。

神田——安全に設計したつもりでも、実はわからないところがあるから壊れるわけです。それを不確実性と表現しています。私がこれからお話しすることは、整然とモデル化された不確実性の話です。一方ではわかっていたつもりでも間違っていたとか、ずれていたとか、どのくらいわかったと言えるのかといったことは、モデル化された確率論の話とは別の話です。実際に建物ができて、どれくらい安全かを考えるときには、必ずそういうものが両方入ったうえでの話になります。モデル化された確率論の世界で安全の説明ができていても、それが活用されていないのではないかという認識を持っているので、そのあたりのお話をさせていただきたいと思います。

地震の場合、一番の不確実な要素は、地震の規模に非常に大きなばらつきがあるということです。例えば風の場合、竜巻や突風などがありますが、ある特定の場所における50年間での最大の風速のばらつきは、計算すると20%ぐらいに落ち着きます。雪でも20から30%です。しかし地震は、60%かそれ以上になります。さらに詳しく調べていくとばらつきは小さくなりますが、それでも40%より小さくはなりません。そこで安全に設計しようと思ったら、なるべく大きな値で計算することが基本になるわけです。この30から40年ぐらいで、ある程度数字で確率的なモデルにして扱うことができるようになりました。国際的には限界状態設計という言い方がされています。

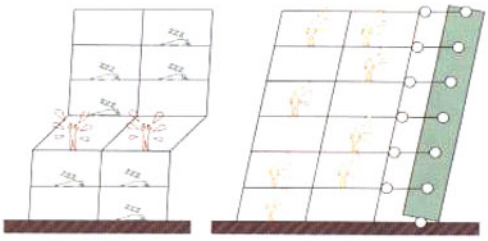

図1——耐震改修。左:地震がきて揺れている最中に限界に達した階だけが大汗をかいて他の階は寝ている。右:建物にロッキング壁を入れることでリダンダンシーを高め、特定層崩壊を防ぐ。構造物そのものは強くしなくても、どんな地震がきても、いつも全員参加で対応するようになる。要するに、地震動のわからなさを構造物の設計で補うこともできる。
[作成:内山裕太]

どれくらい安全に設計するかについては、すべて一律にするのではなく、個々の建築主やそれぞれの地域社会で議論がなされるべきだと思います。確率と設計荷重のレベルを対応させておけば、枠組みとして比較的容易に考えることができます。不確実性は現実にはたくさんありますが、どのくらい小さな破壊確率にするかを直接設計に取り込むことが可能になってきていますから、それを社会合意や建てたい建物の議論に反映させていくといいと思います。

内田——僕自身の考えは、今の神田先生のお話とは少し距離があって、例えば、地震被害のようなものは予測できないという前提に立っています。予測できない以上、耐震技術の進化は重要だけれども、具体的な数値基準は技術論ではないところで決まっていると考えるわけです。今でも暗中模索ですが、最適化という思考方法とは少し距離を持とうと考えていま

す。それが契機になって思考の幅が随分広くなりました。若いころ、鉄筋コンクリートは100年もたないし、中性化はこのようにして始まるということを、嫌というほど見せつけられましたが、汎用化されて目につく技術の瑕疵を、限界ではなく信頼性の上限と考えよう、そう考えれば信頼性の高い技術だととらえ直せる、そんな風に考えるようになりました。新しい技術の可能性を語るのとは別の可能性を探るようになったわけです。

例えば、耐火素材としてのアスベストは素晴らしい材料で、燃えないし安定していて耐久性もあると大変な評価を得て、最適化を標榜する市場を占有するに至りました。耐火というあるひとつの指標に対する安全性で市場を席巻したわけですが、その後、健康被害の問題が起きて、今度は使用禁止ということになりました。新耐震がそうであったように、それはそれで受け入れざるをえないわけですが、その振れの大きさを経験したときに、技術や素材の淘汰は、性能基準と市場原理では必ずしもうまくいかないと考えた方がいいだろう、それなら、技術や材料の選定も、基準や性能から少し距離をおいた視点から、可能性より現実にある技術で、しかもできるだけ瑕疵があらわになっている技術を使ってもいいはずだと考えるようになりました。新しい技術はまだ瑕疵が見えないから輝いているのであって、今ある技術は輝いてはいない分信頼できる。量を担っていて、どこにでもあれば、それはそういう技術だと認定する。それは、新しさの相対化という視点で、ある種のアイデンティティというか、遅れているとかついていけないという話ではなく、自尊心を持ってそういう位置を歩ける可能性がある。工学はそういうことをあまりしてこなかった分野だと思いますが、建築についてはそれができるのではないかと考えています。

「安全」という不確実なもの

中江――今キーワードとして出てきたのは、不確実性、信頼性、汎用化された技術はどうあるべきか、それから社会的な合意の問題です。合理には、経済、性能、技術の合理がある一方で、時代の合理みたいなものもあって、時代性の影響も受けざるをえない。今日伺ったお話では「きれいにモデル化された不確実性」という言葉に感銘を受けました。そのあたりから合理の問題や社会の合意形成などに結びつけて話を進めたいと思います。

和田――台湾にある高さ500mの「台北101」ですが、工事が半分の高さ（250m）まで進んだ2002年3月31日に地震（M7.3）を受けて、タワークレーンが4基とも落ちたことがあります。この工事に後輩や仲間がかかわっていて、その対策のため台湾に呼ばれ、政府関係の会議に出席しました。台湾の労働省の管轄の方が「あなたたちにとってタワークレーンは、施工中の2年か3年で取り壊す仮設的なものであって、その弱さには合理性があると思っているかもしれない。しかし、そこに乗っているオペレーターはこの仕事を続けていく限り一生クレーンの上にいるのだから、建物と同じ強さでつくってもらわないと困る」と発言されました。

確率の考えを取り入れ、地震の強さのレベルとその発生頻度の関係、これに建物の寿命というか、オーナーがその構造物を使いたい期間を掛け合わせて、つくろうとする建物にとって合理的な耐震性のレベルを決めることができるのだと思います。ただ、この方法で個々の建物のことだけ考えていると、オペレーターにとっての一生、つまり何百年と続く都市の耐震問題が忘れられてしまいます。確率で建物の耐震性レベルを決めることに問題点はないのでしょうか。神田先生いかがですか。

神田――僕は、こういう機会を設けて議論できるところに意味があると思います。今、和田先生がおっしゃったことに関して言えば、人の命にかかわる部分は、ある期間だけを切り出してもあまり意味がない。しかし財産として建物に投資するのであれば、1回建てるのと10回建てるのでは全然違いますから、安全性を高めて500年に1回建てる方が合理性の説明がつきます。それですべて説明できるわけではないので、別の議論も必要ですが、これまでそういうことをあまりにもやってこなかったので議論できる枠組みを用意してあげることが大事だと思います。

モデル化して定量化された確率による安全の数字は、上手に使うべきものだと思います。実際に、それをどれくらいにしたらいいかという議論をするときは、安全は確率で定量化して議論すべきだと思います。しかしそれですべてがわかるわけではない。例えば、技術そのものについても、先ほどのアスベストの話もそうですが、その人が「わかった」ということは、専門家として不確実な部分も含めて自分なりに「わかった」と思っているということです。その「わかった」とはどういうことなのか。「わかった」と言っても、200年後の社会にとっての常識は違っているかもしれない。構造の場合は、基本的に力学がベースになっていて、力が掛かれば変形が出たり反作用が出たりする。その部分が確固たるものとしてあって、その仮定条件が間違っていないという確認のもとに正しいという評価ができて、先に進めるのだと思います。だから、今までとはまったく違った現象が起きる可能性がもしあるのなら、そこが不確実なものとして残ります。

陶器――そのときの仮定条件、どういう外力を与えるかという境界条件は、建物によって違うと思います。例えば十勝沖地震でもそうですが、木造平屋建てであれば問題なかったものが、建物の規模が大きくなることで耐えられなくなってしまう。このことの繰り返しのような気がしています。

神田――基準に収まればいいという考え方が問題です。原理に照らし合わせてどうなるかとか、今設定しているレベルより高いレベルで力が加わる可能性があるなら、そのときにどういうことが起きるかを検討するのが構造設計の基本だと思います。基準に合わせているからいいというのは、先ほどの最適化の話にもありましたが、それ以外の箇所の瑕疵を見ないことになります。そこが今一番問われているところではないでしょうか。建築基準法は最低基準ですが、基準が細かく書かれているがゆえに、その基準さえク

リアしていれば建てる権利が認められると思ってしまう。安くすることが大事と考える人は、どのくらい安全にするかという議論をせずに、基準を満たしていればいいと逃げることになります。それは不確実なものに対する誠実な態度ではないと思います。

内田——不確実なものに対する誠実な態度は、現実的でなければいけないと思います。精神的な問題とは別にです。例えば、姉歯事件のときに、総括設計事務所の所長さんが自殺されています。あれは無限責任で、その方は負わなくていい責任を負っている。不確実なものに対する対応をきちんと整理しておかないと、まったく責任をとらないという方向と、無限責任という正反対の対応が現実化する。それは、本来は法律で解決すべきことなのだと思いますが、それ以外にもいろいろな場面で適切な位置に持っていくということをやらなければいけないと思う。それがどうもうまくいっていないというのが実感です。

法とは何なのか

神田——確率論の限界状態設計が万能だと言うつもりはありませんが、これはパラダイムを変えていると思います。今まではお上なり権威者が、「こうすれば大丈夫」ということでぎたわけです。しかしこれはそうではなくて、「すそ野はどこまでいくかわからないけれども、それぞれの場面でそれぞれの関係者が納得したところに線を引いて、それで設計しましょう」というものです。それが確率的なものを尺度にすることの大事なところではないかと思います。社会でみんなが納得して、「これでいい」と言うのなら、何かあっても仕方がないという判断になるということです。

陶器——社会的にそういう合意形成が進んできているという実感はありますか。

神田——ユーロコードにしても、アメリカのLRFD（Load and Resistance Factor Design：荷重抵抗係数設計法）にしても、法律で決めているレベルが「ここから取ってきた」という根拠を明確にしています。しかし、日本の場合、地震は再現期間をベースに決めたものという言い方になっていない。法律の文章を読んでも「政令で定める構造計算のものを安全とみなす」と書いてあるわけです。それは、非常に危険な考えをそのまま正当化していると思います。

内田——新しい基準が発表された途端、それ以前にできた建物がその基準をクリアできているか否かわからないという事態に陥ります。既存不適格の問題は一般の人には大変わかりにくいのですが、そのときに今までの基準でつくられたものをどう扱うかが問題になります。改修の啓蒙とは別に、そのまま使わざるをえないという状況をどう説明するか。既存の建物とそこに居る人々にどう語りかけるかということを整理しないと、新基準と改修の啓蒙だけでは問題は解決しないように思います。

和田——1968年に十勝沖地震があって建物が壊れたわけですが、その年に霞が関ビルが竣工したということは、動的解析がその数年前には実用化されていたということです。その当時、4、5階建てのRCビルに霞が関ビルと同じ方法（地震動の強さと振動解析法）を使ったら、とてももたないというのは、僕でも知っていたくらいです。襲って来る地震動や揺れ方を説明する物理学は同じなのに、超高層ビルと普通の建物を別なものと考えていたことになります。この矛盾はそのままに、研究だけしていて、1978年に宮城県沖地震が起きてからやっと動いた。この間にも建物は次々に建てられていたわけだから、1981年に新耐震設計法の法律をつくってあわてたのでは遅かった。

神田——かつて構造技術者には1950年の建築基準法と建築士法があった。それは静的な解析で震度0.2の世界です。免震構造などの動的なものでも構造の資格をどう考えるかはいっさい議論されずにきました。今は基準さえ守ればできてしまうわけですが、「ここはこう理解して、こうするから、これくらい安全です」という説明ができる人でなければやってはいけないくらいにするべきだと思います。すべての人が超高層ビルの設計をする必要はないわけで、もしやるなら日本建築構造技術者協会みたいなところがその役割を果たせばいい。今、社会はそういうものを求めているはずですから、そういう方向に舵を切っていくことが大事だと思います。

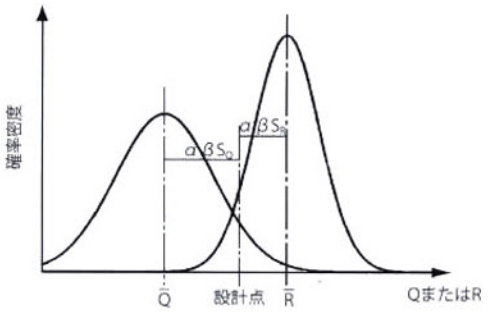

図2——限界状態設計の確率密度関数による模式表現。荷重と耐力のばらつきが数学的な計算から二つの山に示されている。二つの確率密度関数の山が離れていれば、荷重が耐力を上回る確率は小さくなる。［作成：神田 順］

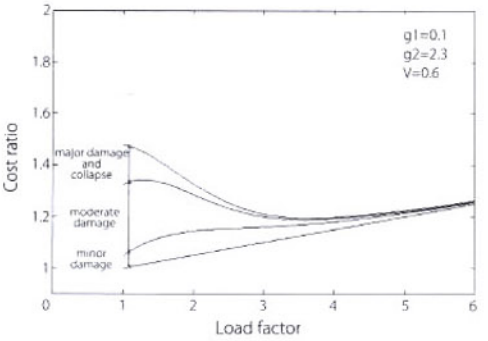

図3——総費用最小化による最適安全性の検討例。一番下が初期建設費用の線で、ロードファクターは荷重係数。初期費用は、荷重のレベルを上げていけばゆるやかにコストが上がり、破壊確率は小さくなっていく。倒壊したときの損失は、倒壊する確率を掛けて足し合わせると最小値が出てくる。（ロードファクター1は約200ガルに相当し、現行水準では2程度の値になると思われる。初期建設費用と倒壊だけでカーブを描くと、現状とほぼ等しい400ガル程度の設計で最適値に対応しているといえる。小破と中破も含めてトータルでコストを最適にする場合、50年のタイムスパンなら5割増しで設計するといいことになる）［作成：神田 順］

中江——神田先生の図2と図3のグラフは、近年の不動産証券化のような、金融工学のグラフに近いと思うのですが、どうお考えでしょうか。

神田——これは置き換えている道具に過ぎません。確率でどれくらいにしたらいいかと言っても伝えにくい話ですが、もし壊れたときにはどれくらいの損失になるかということだったら、一般の人にも話ができるし想像もできる。それをどう設定するかによって安全のレベルは大きくもなれば小さくもなる。そういうかたちで使うことを意図しているものです。

神田順氏、和田章氏、内田祥士氏、陶器浩一委員、中江哲委員
（右奥より反時計回り）

実際の証券化の世界では、PML（Probable Maximum Loss：地震による予想最大損失額）を聞かれて、「この建物は証券化するのにリスクが小さい」というような言い方をします。PML自体の評価に関しても学会でガイドライン作りをしてきましたが、少なくとも建築基準法の最低基準を守っているからいいとか、既存不適格だけれども立っているのだからいいというのに比べれば、はるかに適切な議論のレベルになっていると思います。

和田――PMLを考えるときには、その建物1棟だけで考えては駄目だと思います。周辺の建物、交通網などのライフラインがメチャクチャになった中にオフィスビル1棟だけが建っていても人は来ないわけですから。僕は考えているスケールが個々の建物では小さすぎるのではないかという気がします。

神田――それは建築基準法のあり方の問題です。1981年の新耐震で耐震レベルに保有耐力設計が付け加えられても、基本的には震度0.2の許容応力度設計のレベルから変わっていません。効率よく建てることをベースとして考えられた、1950年代にできたルールさえ守っていればいいわけではないのです。このことを今問い直さなければいけないのに、「基準だからいい」ということになっているところが、僕は一番問題だと思います。

合理と想像力

福島――確率論に基づく耐震設計は、日本では受け入れられず、アメリカでは1980年代に実用化されたというお話ですが、どうしてアメリカでは受け入れられたのでしょうか。

神田――要するに「より経済的になります」という宣伝がうまくて、どちらかというとコストが節約できるということで使われました。それは安くできる日本の限界耐力計算とまったく同じです。

陶器――「合理的」には、道理や論理にかなっていることと、無駄なく効率的なことという二つがありますが、どうも後者の方でしかとらえられていないですね。

内田――少なくとも建築技術に関する限り、量的に拡大すれば変質するというのが私の考えです。そうなると、ときには量に拡大させないという決心をするしかない。例えば超高層ビルは、実態としてはすでに量の時代に入っています。ですから、今は見えていなくても必ず瑕疵を持っていると宣言してしまうくらいでいい。そういう状況だと申し上げたい。

神田――ある程度の規模以上の建物の安全をどう確保したらいいかを考えたときに、建てた方がメリットのある人と建てない方がメリットのある人が、それぞれ専門家を立てて議論して、それをある程度オープンにして折り合うところまで話すといいと思います。今はその辺りの情報が隠されたまま、マニュアルの基準を満たしていればOKが出るため、そこに不安を感じている人が現実にたくさんいるわけです。多少効率は悪くなりますが、これからの社会では、経済効率よりそちらだということを建築学会だったら言えるのではないかと思います。

陶器――技術者として大きな想像力を持っていないと、どんどん押し寄せてくる技術革新や社会の欲望に負けてしまうと思います。そういうなかで持つべき想像力についてお話していただけますでしょうか。

和田――僕も含めてすべてのエンジニアに創造力を求めることは難しいと思います。しかし、個々のエンジニアが想像力を広げて自由に考えることはできます。東京湾沿いに超高層ビルをたくさん建てていいかどうかは少し想像すればわかる。足の弱いお年寄りが高層ビルに住んでいてエレベーターが止まったらどうなるかも簡単に想像できる。こういうことが大事なのではないでしょうか。この設計式を満たせば建てても良いという方法は、そろそろやめた方がいい。効率よくしようというベクトルが働いているから便利なマニュアルやコンピューターソフトが次々にできてしまいます。これらに頼らず、わからないことはまだたくさんあるという前提で、その都度考えていくように、ゆっくり進める方がいい。

神田――僕も同じ考えです。これまで立ち止まって考える余裕を与えられないままきてしまっていますが、ここらで基本に立ち返ってみることだと思います。1950年に国会を通ったものが法律になっているだけで、現実は告示で動いていたりします。告示に書いてあることは十分な議論や合意とは関係なしにできていて、それが逆に社会のルールになっているというところが非常に危険です。そういうことにみんなが慣れてしまっていますが、工学は常に、力や振動方程式などの原理に立ち返って自分が納得することを設計のなかでやらなくてはいけないと思います。

内田――量を担った技術を考えるとき、どうにもならない技術だと言われているものでも、扱い方によっては創造的な仕事ができるはずだという思いがあります。建築に携わっている人間として、そういう意欲はあるわけです。一方、可能性への楽観的な思いと現実的選択の間に建築家として自分で線を引いておかないといけない。それをどこに引くかによって人はいろいろ違うわけですが、量を担った技術にひとつ可能性を見出したい。今まで手に入れた技術もいろいろなかたちの展開をすれば、それはそれで創造的でありうると考えたいです。

（2010年6月29日、建築会館にて）

注

★1――これら3つの出来事（プレートテクトニクス理論、霞が関ビル、十勝沖地震）はどれも1968年のことであると、岡田恒男・元会長が指摘している。