

第3回専門家フォーラム

日時：平成26年2月22日（土）13時～16時30分

場所：東京大学農学部キャンパス ファカルティハウス セミナールーム

テーマ：**原子力発電所に影響を及ぼす地震と津波はどう想定され、対策はどこまで
されているのか？**

内容

話題提供①：東日本大震災をもたらした地震と津波はどのように発生したのか.....	3
1. 地震とは何？.....	3
2. プレート境界型地震の発生過程.....	5
3. アスペリティ・モデル.....	6
4. 貞観地震.....	7
5. 2011年東北地方太平洋沖地震.....	8
6. なぜ東北でM9を予見できなかったのか？.....	10
7. 地震学的手法による地震動と津波の予測可能性.....	13
話題提供②：地震・津波現象の不確実性と原子力施設の対策～耐津波設計を考える～.....	14
1. 福島第一原子力発電所の津波による事故分析.....	14
2. 福島第一原子力発電所の要因と対策.....	16
3. 耐津波対策及び耐地震対応の具体的事例.....	18
4. 自然災害への取り組みとして考えるべきこと.....	18
5. 科学者・技術者としてやるべきこと.....	20
【専門家間の議論】.....	20
地震学の不確かさ.....	21
津波予測の難しさ.....	23
科学技術の限界 ～仮説とその見直し～.....	23
今回の津波と将来の津波.....	25
想定と原子力発電所の安全.....	27
最新知見とは.....	28
専門家の見解の違いをどう扱うか.....	30
【全体討議】.....	33
”科学”の姿を誰がどう伝えるか.....	33
リスクの扱い方.....	36
なぜ活断層は見落とされてきたか.....	38
津波対策の十分さを評価するには.....	39
誰が何をどう動かして新知見を取り入れるのか.....	42
リスク評価の使い方～社会との対話と安全性向上の観点～.....	43

土屋：第3回専門家フォーラムを始めたいと思います。冷え込んでいる中をお集まりいただきまして、ありがとうございます。いつものように、リラックスして、壁を取り払った議論をしたいと思います。第2回に参加していらっしゃる方もいらっしゃるのですが、簡単に私のほうから説明します。

この専門家フォーラムの目的は、専門領域をつなぐということが一番重要なので、専門が違うからというような遠慮をされずに、いろいろ議論をしていただければと思います。領域をこえると、本当に素朴な質問があると思うのですが、それも、遠慮なく出していただければと思います。

第1回に、原子力発電所が、揺れに対してどう備えているかというのを話していただき、地盤工学では変位のところをどういうふうに想定しているのかというのを話していただきました。それを受けて、第2回は、揺れの評価をどういうふうにやっていたらいいか。そこにどんな課題があるのかというのをお話いただきました。さらに、変位のもととなる断層の認定は、一番論争になっているところですが、これをお話をいただいたところです。(ここで進行役の土屋より、第2回専門家フォーラムの概要を説明しています。その内容については、第2回専門家フォーラムの議事録を参照ください。)

さて、これまでは、原子力発電所の地震の影響を考える上で、どういうふうに取り組んでいるか、工学的なところから、さかのぼってまいりましたけれども、今日は、その全体を総括して、まず地震というものは、どういうものなのかを、海溝型の地震を中心にお話いただきます。海溝型ですと、やはり津波の問題が出てきます。この津波の不確実性というもののところまでをお話をいただこうと思っています。それを受けて、原子力発電所の津波対策というのは、従来、どういうふうなものやっていたか。そして、震災を受けて、どういうふうに変ろうとしているのかというところをお話いただきます。

たぶんどどのぐらいの規模のもので、どんなばらつきのものと考えていくのか、それにどういう対策ができるのだろうかというのが、今日のメインの議論になるのではないかと考えていますが、それに縛られずに、いろいろ議論をしていただければと思います。

簡単ですけれども、私のほうから、ご紹介しました。引き続き、地震と津波について、25分お話いただこうと思っています。それでは、よろしく願いいたします。

P：話題提供者 **E**：専門家フォーラムメンバー **A**：プロジェクトメンバー

話題提供①：東日本大震災をもたらした地震と津波はどのように発生したのか

P1：

今日は、東日本大震災をもたらした地震と津波が、どうやって発生したのかということで、普通ですと、1~2時間をかけてお話しするのですが、それを20分でやれということで、さすがに25分くらいをいただきました。

1. 地震とは何？

簡単に、まず地震とは何かということなのですが、100年ぐらい前までは、いろいろなことを言われていたわけですが、今は、大体地下の弱面に対して、両側から力が加わって、あるときに破壊が生じる。これが、地震という現象だということが、分かってきています。

地下にかかっている力というのは、応力という言葉を使います。単純には、圧力と同じものだと思ってください。ただし、圧力は、垂直に起こすものですが、応力というのは、こういう横にずらすような力も含めています。単位面積あたりの力で応力の単位はつくられます。

まず、言葉の定義ですが、多くの方々は、大地が揺れることを地震と呼んでいます。ただ、地震学者が地震というときには、断層が急に滑る現象のことを指します。両方合わせて、断層が急に滑って大地を揺らすことが地震だと、僕は言います。

では、地震の震源なのですが、普通、地震が起こると気象庁が震源を発表します。それは点で表されます。しかし、実際は、ここで表される点というのは、ある破壊の開始点に過ぎません。割れ始める場所ですね。その後、破壊が広がって行って、断層が滑って、地震を起こします。そのときの断層の長さや幅を、次のように定義します。断層を、長方形に切りとったときの長いほうを「断層の長さ」、短いほうを「断層の幅」と、これからは呼びます。ここで何が起こるかということ、食い違っていくわけです。この食い違った量を、滑り量や食い違い量などと呼んでいます。

私はつい使ってしまうと思うので、最初に言います。断層が動くことを、「滑る」「破壊する」「壊れる」「食い違う」「変位する」と言ったりしますが、全部同じ意味です。地震学というのは、非常に総合的な学問で、実験する人、活断層を調べる人、地球物理をやっている人など、いろいろな人たちが入ってきている学問なので、それぞれの元々持っていた用語が未だに使われているということです。

「震源」というのは、あくまでも破壊の開始点で、断層が滑り始める点です。最も大きく滑った地点と一致するとは限らないということにお気をつけください。たとえば岩手・宮城内陸地震では、震源は岩手県にありました。ただし、一番大きく滑った場所は、岩手県と宮城県の県境付近にあったので、岩手県よりも栗原などが大きく被害を受けました。

それから、「震源域」というのは、断層の中で、実際に滑った領域ということで定義します。

「破壊の伝播」というものがなかなか理解していただけないのですが、この後に大きな意味を持つので少し説明させてください。

雪国の方は、屋根雪が落ちるのを見たことがあると思います。そのときに、雪は、こちらに滑っているのだけれども、その滑りが、次々と屋根に沿って伝播していたということをご理解いただけるとと思います。これが、滑りの方向と、滑りの伝播方向が違うという意味です。もちろん一致する場合もあるのですが、一致しないことがほとんどだと思ってください。

東北地方の場合は、大体逆断層なので、その場合ちょっと屋根雪もシュールな絵になります。特に今回の場合は、こちらを北とすると、東北地方太平洋沖地震は、大体南側に大きく伝播をしましたので、こんなイメージです。屋根雪との大きな違いは、すべりの伝わる速さが、とても速いということです。秒速 3km ぐらい。もし、皆さんが目撃していたとすると、断層の割れ目がパーッと走ったように見えるはずですが、ほとんど一瞬で、全部壊れたように見えるはずですが、しかし、実際は有限速度を持っています。分速にして 180km、時速にして 10,000km。1 時間でアメリカまで行ってしまうぐらいの速度で、破壊が伝播していきます。ただし、分速 180km というような高速でも、今回の 3.11 の地震というのは、長さが 500km ぐらいありました。したがって、端から端まで壊れるまでにはやはり 2 分、3 分かかっているのです。いかに大きな地震であったかということ、これからも理解していただけたらと思います。皆さんは、経験されていると思いますけれども、あの地震が非常に長く揺れた。その一番の根本の原因は、断層がすごく大きくて、端から端まで壊れるまでに、分速 180km をもってしても時間がかかったということです。一方、滑る速度は、実はすごく遅くて、最大でも秒速 1m から数 10cm ぐらい。時速に直すと、これは 3.6km、四捨五入して 4km 程度です。要するに人が歩くぐらいです。だから、地震が起こるのを目撃していると、割れ目が走る。そのあとに、滑りがこのぐらいの速度でいくというのが、実際の地下で起こっている現象です。

では、大きさはどんなものかということ、断層の長さが 10 倍違うと、エネルギーが 1000 倍違って、マグニチュードは 2 違うのだということです。たとえば、宮城県沖に關しましては、30 年の確率で 99%と、我々は言っていました。しかし、そのときは、マグニチュード 7 だと想定していたわけですが、「一応、99%で宮城県沖で地震が起こったのだから、半分当たったのではないか」と言ってくくださる方もいらっしゃるのですが、マグニチュード 7 と 9 では、エネルギーがこれだけ違うわけですので、我々としては、とても当たったとは言えないと思っています。

では、断層のサイズの概略なのですが、これは、実は 3.11 が起こる前に講義で使った資料です。マグニチュード 9 というと、断層の長さが大体 500km で、平均の滑りは 10m ぐらい。と言っても、ぴんときないとと思うので、東北地方全体が、全体的に 10m 平行移動する、そのぐらいの地震が、マグニチュード 9 なのだということを、学生には説明してきました。一方、宮城県沖地震でいったら、マグニチュード 7~8 なので、佐渡島や宮城県ぐ

らの大きさの断層が、1~3m 動く。これが、宮城県沖地震です。それと比べて、マグニチュード 9 がいかに大きかったかということがわかると思うのです。

一方、我々が扱っている、一番小さい地震は、マグニチュード 1 ぐらいなのです。50m のぐらいの建物が 1mm 動く。これだけで、マグニチュード 1 の地震になります。これを我々は検知できます。

逆に、これは覚えてください。よく断層が動くと、断層の性質は動いた分だけ変わるのではないかと感じがちなのです。特に、よくマンガでこんなふうにしてプレートが沈み込んで跳ね上がる図があります。こんなに食い違ってしまったら、一回滑ると全然状態が変わるのではないかというふうに思っている方は多いのです。マグニチュードが大きいスケールで考えるからわからないのですが、マグニチュードが小さいスケールで考えると、わかるのです。この建物が 1mm 動いただけです。それなら、断層の面の性質は、そんなことで変わるはずがないということをご理解いただけたらと思うのです。よって、10~100 回地震を繰り返したとしても、面の性質はそれほど大きくは変わらないというふうに考えています。

あと、これは、いろいろ数値を書いていますけれども、倍~半分のばらつきがあるということ覚えておいてください。

2. プレート境界型地震の発生過程

プレート境界地震の発生過程に移ります。これは、最新のものではないですが、世界のマグニチュード 4 以上の地震の 20 年間分をプロットしたものです。これだけ世界で起こっているわけです。特に、太平洋を取り囲む領域で、地震活動は非常に活発だということがわかると思います。特にすごいのが日本列島です。これは、地震で埋め尽くされて、見えなぐらいになっています。これは、何で起こったかという、よく知られているように、プレートの相互作用です。地球の表面とは、大小さまざまな十数枚のプレートと呼ばれる岩盤で覆われていて、それらの相互作用でもって地震が起こっています。

日本列島は、このように 4 枚のプレートが衝突する場所なので、非常に活発な地震活動が起こるといふふうに説明されています。南米の沖合の、太平洋中央海溝というところからプレートが湧きあがってやってきて、日本海溝から沈み込んでいます。この速度は、大体 1 年間に 8cm ぐらいです。どのぐらいかといいますと、皆さんの髪の毛が伸びる速さは、1 年で 7~18cm くらい。爪の伸びる速さが 3~4cm です。だから、皆さんがこれから床屋に行って髪の毛を切るたびに、前回床屋に行ってから太平洋プレートがこのように動いたと考えてください。それから、爪の伸びる速さ 3~4cm は、南海トラフ巨大地震を起こすプレートが沈み込む速度とほぼ一緒です。だから、爪を切るたびに、フィリピン海プレートがこのぐらい沈んだと考えていただけたら大体合っています。

逆に、皆さん、こうやって考えると、意外とプレートの動きは速いのだと思いませんか。我々人間の感覚で実感できるような速度でプレートというのは動いているということをご理解ください。

3. アスペリティ・モデル

アスペリティ・モデルは、私の専門なので一番詳しく説明したいのですが、少し時間がないので結論だけにします。

プレート境界におけるすべり様式として、こんなようなことを我々は言っています。海洋プレートの上に、陸のプレートと海水が乗っています。これの上のほうをはいでしまうと、こんな形になっているだろうというふうに我々は考えているわけです。プレート境界というのは均質ではなくて、ずるずる滑る領域と、普段はがっちり固着していて、地震のときだけ滑るような領域に、たぶん大きく分けられるだろうと。そうすると、あるとき、ここで地震が起こると、次はその隣が壊れるのではなくて、また何十年かすると、また同じところが壊れる。そういうことを、実際の観測事実として、我々は、いろいろなところで検証してきました。

あとから言いますが、これで 3~4 割は説明できるのですが、すべてを説明しきれなくて、このモデルを高度化しようとしていた矢先に、3.11 が起こってしまったというところがあります。3.11 は、これでかなり説明できるのですが、説明しきれないところもあります。

非常にうまくいった例としては、釜石沖の固有地震的クラスターというものを我々は見つけていて、これは、横軸が時間で、縦軸がマグニチュードで、釜石沖に地震の巣があるのですが、その地震の巣で、どういう地震活動があったかというのを示しています。古いほうは、気象庁のデータしかなくて東北大の地震観測のほうはないのですが、東北大学の地震観測も含めて見ると、M4.9 ぐらいの地震が、非常に規則正しく、5 年半ぐらいの間隔で起こるということが分かると思います。我々は、これを見つけて、1999 年の時点で確率予測を出していました。もちろん、1 標準偏差つまり確率 68% の範囲、95% の範囲、99% の範囲で出すわけです。普通、99% も出していると、アッパーリミットなのですが、アッパーリミットで 2001 年 11 月という予測を出していました。正直、2001 年の秋までに起こると思っていたのが、なかなか起こらなくて、結果的に 2001 年 11 月に起こりました。

「地震が起こって喜ぶのは、何事だ？」と言われるかもしれないのですが、これは、釜石の直下 50km ぐらいのところで、M4.9 の地震です。だから、釜石市でも最大震度が 3 にしかありません。これは、絶対に被害を出さないということを我々はわかっていたので、学会でもこういう予測情報を出せたし、起こったことがわかったときには、みんなで大喜びしたという地震になります。

これで、また経験を積んだので、次は 2008 年 1 月。確率予測といっても、これは非常にプリミティブな話です。再来間隔が、正規分布、ガウス分布をしていると仮定して、予測を出しているだけです。だから、このデータを使えば誰でも同じ結論が出ます。1 標準偏差の範囲で計算して、2008 年 1 月だったのですが、2008 年 1 月に M4.7 の地震が起こるという状況になりました。

このような繰り返しを、我々は、繰り返し地震と呼んでいますけれども、このような M3 以上の地震を調べて、その中で、繰り返している地震がどのくらいあるかと見てみま

した。見ての通り、太平洋の下では、そういう繰り返し起こる地震がたくさんある。これも、いろいろな検証を進めて、ほとんどがプレート境界で起こっていることも確かめています。これこそが、先ほど示した、アスペリティの場所を示しているということです。ただし、小さいアスペリティです。

4. 貞観地震

一方、このようなアスペリティ・モデルで説明できないような地震が、過去にあったことがわかってきました。これは貞観地震で一番有名です。最近、よく言われている地震です。貞観地震は津波堆積物調査が明らかになったということ、皆さんはご存知だと思います。ジオスライサーというのですが、平たいパイプみたいなものを打ち込んで、抜いてやると、中に地層が詰まっています。津波堆積物としては、砂が詰まっています。貞観の場合は、ラッキーと言っていいのかわかりませんが、50年ぐらいたとに、十和田火山が大噴火するのです。そのような火山灰というのは、顕微鏡で見ると、これは、いつの、どの火山の噴火かということがもうわかっています。したがって、堆積物が見つかって、そのすぐ上に火山灰が見つかって、調べてみたら、十和田 a テフラだということがわかったら、この津波堆積物は貞観地震だということがわかるのです。これによって、ほかの津波堆積物の場合には年代の決定が非常に難しいのですが、貞観に関しては、非常に広域に同定することができました。皆さんは、よく貞観地震は千年に1回起こっていたというふうに聞いていませんか？実際に、2008年ぐらいたときは、そう言われていたのです。

これが実際のデータです。過去 4000 年間に、4 つの津波堆積物が見つかりました。ただし、貞観に関しては十和田 a テフラがあるので誤差はすごく小さいのですが、ほかは、そんな火山灰がないので、誤差がすごく大きい。これで見ると、等間隔で起こっているかどうかよくわからないし、千年に1度かどうか、本当はよくわからないわけです。それでもって、産総研が、これはもっと一生懸命調べればわかるだろうと思って、一生懸命調べたらこうなったのです。ますますわからなくなりました。これを見て、「何年に一回」と言えません。もっと厄介なことに、これは浅いところほど、最新のデータなわけです。だから、最新の地震がいつ起こったかが一番知りたいのですが、ここは、海岸近くですから、畑や田になっていますので、かき混ぜられてしまって何が何だかがわからないわけです。このために、貞観の地震があったということは、2000年代ぐらいたにわかったのですが、その規模、どのぐらいたの広がりがあるかということをもっと調べて、規模は大体わかっていましたが、その再来間隔は、なかなかわからなかったのです。

一方、宮城県沖地震については 30 年で 99% の確率が出たので、文科省のほうからお金が出て、宮城県沖地震における重点的調査観測プロジェクト—略称：宮城沖重点—が走り始めました。そのプロジェクトでもって産総研が一生懸命調べて、広域の津波堆積物と思われるものの対応関係を見つけました。その結果、450～800 年の間隔で貞観地震に相当するものが起きていたことがわかってきました。ただし、最新のイベントは、実は貞観ではなく

て室町時代だったらしいということも、このときにわかりました。しかし、室町時代ということは600年ぐらい前で、再来間隔も600年ぐらい。そうすると、やはり満期に近かったということがわかったわけです。これがわかったのは2010年です。これには、我々は非常に悔しい思いをしました。

2010年に、宮城沖重点のプロジェクトの最終報告書が7月ぐらいに出ます。そこでもって出てきた貞観地震のモデルは、これになります。いくつもモデルを計算してやって、津波堆積物の分布と一番合ったのが、モデル10と呼ばれているものです。200×100kmで、すべり量は7m、M8.4。M9の地震を経験したあとにしてみると、これは非常にかわいらしく見えるのですが、福島県沖でM8の地震が起こったという歴史記録が一切ありませんでしたので、これは、我々にとってはものすごくショックでした。一応、解析した産総研のグループは、M8.4以上と言っていました。「これ以上、大きいかもしれないけれど、少なくとも8.4以上は必要ですよ」という言い方をしていたのですが、我々としては、M8.4ですら、もう考えにくいイベントですから、ましてや、それよりも大きいものというのはいくらもありませんでした。

どのくらい合っているかということですが、宮城県の南部について、津波堆積物が見つかったところを赤で示しています。可能性があるものを、青で示しています。先ほどのモデル10でもって計算した津波の浸水深の分布を、カラーで示しています。ここの側線とここの側線について断面図を示したものが、これになります。先ほども言ったモデル10だと、津波堆積物の記録があるところまで、確かに津波が来ているということで、モデル10はたぶん正しい、一番もってもらいたいだろうというふうになっています。注意していただきたいのは、モデル10でも、海岸線での津波の高さは高々5~6mです。これは、宮城県ですけれども福島県も同じです。貞観地震の産総研のモデルでは、津波の高さは5~6mにしかなりません。後でも言いますがけれども、津波堆積物からわかるのは、どのくらい奥に波が入ったかということしかわからないわけです。海岸で何mの津波があったかという情報はないわけなのです。これが後々まで問題となります。

ともあれ、この報告を受けて、地震調査委員会では、海溝型地震の長期評価の改訂を行いました。2011年2月には、案文はほとんど固まっていた。2011年の3月に、福島県と宮城県の消防防災課に説明にうかがって、そこで事前説明を終えた後に2011年4月に公表という段取りになっていました。その矢先に起こってしまって、我々としては間に合わなかったという思いが非常に強かった地震です。

5. 2011年東北地方太平洋沖地震

太平洋沖地震で何が起こったかっていうことの詳細は省きます。こちら側が、カーナビで使われる陸のGPSから大地の変動がわかって、そこから推定されたすべりの分布、プレート境界のどこが滑ったか。これだと精度が悪いのですが、先ほど言った宮城沖重点のプロジェクトが走っていたおかげで、海底地殻変動の観測点がこのときは稼働していました。そのデータを詳細に調べることによって、このようなすべりの分布が世界で初めて明

らかになりました。わかったことは、長さ約 500km、幅約 200km の非常に広大な震源域が動いたということ。もう一つは、すべり量が 50m 以上のところが、非常に狭い範囲に集中しているということです。これには、我々は、ものすごくショックを受けました。特に海溝近くというのは、沈み込んですぐだったので、上からたいして圧力がかかっていないから、ずるずるすべっているというふうに我々は思い込んでいたのです。そこで、こんな大きなすべりを起こすということに関して非常に衝撃を受けました。

実際問題としては、プレート境界にすべりを仮定して津波から推定してやると、こういうのが出てくるのです。しかし、今までは、海溝近くでこんなに滑るはずがないから計算が間違っているというふうに考えていたのです。結果的にどうしたかということ、今までの大きな津波が出てくるときは、海溝付近ではプレートが境界をすべらなくて、そこから分岐断層が立ち上がって、それが動いているというふうに考えていました。何が問題かということ、海溝近くのプレート境界が大きく滑ってもこれはほとんど寝ているわけです。寝ている断層が動いたとしても、海底面はそんなに持ち上がらないわけです。津波が大きいということは、海水を持ち上げなければいけないわけで、広角な断層だったら、簡単に海底を持ち上げられるけれども、ほとんど寝ていたら、これが横に水平に動いたとしても、ずっと揺れるだけですから持ち上げる量はわずかです。そのわずかな量をずっと大きくするためには、すごい量を滑らせなければいけないわけです。それが、普通考えにくかったので、大抵分岐断層を仮定して広角に持ち上げていたのですけれども、今回は、海底地殻変動観測等があったおかげで、世界で初めてプレート境界がこんな浅いところで 50m 以上も滑ったということが明らかになりました。

ここで注意していただきたいのは、多くの方々は、すごく高い津波が危険だというふうに思っていると思うのです。今回の太平洋沖地震でわかったことは、幅広い津波と高い津波、その両方が違った被害をもたらすということです。高い津波は、わかりやすいです。いわゆる津波地震と呼ばれているものが、海溝付近で大きくずれると、非常に狭い範囲で高い津波をつくります。ただし、狭い範囲で滑るので波長は短いです。一方、プレート境界の全面に渡って大きく滑ると、高さはそんなにたいしたことないのですけれども幅がすごく広がります。実際に観測されたのは、こんな形になっています。これは、釜石沖に設置された海底津波計のデータなのです。ここから津波がやってきます。大体 15 分間、押し波が継続します。高さが、ここで 2m。これが 5m です。これは、海底の津波計なので、これが海岸に来るにしたがって、どんどん波が高くなってきます。だいたい、ここにあったものが海岸に来ると 2 倍以上になりますので、このデータが得られた段階で、海岸では 10m の波が来るというふうに本当は判断できたはずなのです。言いたかったことは、幅広い波長の波が来たということの意味します。何が問題かということ、押し波が 15 分継続するという事です。つまり、皆さんは、波は寄せては返すものというイメージがあると思うのですけれども。寄せることが 15 分続くわけです。そうすると、いかに内陸の奥深くまで入っていけるかということが、理解いただけると思うのです。波長の長

い津波が、宮城県南部から福島県にかけて、津波を非常に内陸の奥までに運んだ原因となっています。

もう一つ、キラーパルスみたいな津波、これは海溝付近で大きなすべりが発生したことによって高い津波になったものです。これが、三陸のほうで、防潮堤を乗り越える原因となった高い津波になります。だから、3.11 というのは、非常に不幸なことに、幅の広い津波と高い津波の両方が同時に起こってしまったのです。

貞観の地震では、波長が長いということはわかりました。だから、幅が広いというイメージは得られたのです。しかし、得られているデータで、高い津波の部分が重なっていたかどうかは今でもわかりません。だから、今回の地震と貞観地震と全く同じなのかどうか一ももししたら、貞観地震は、高い津波がなしで、幅広い津波だけだったのかもしれない。それは、まだ決着がついていません。

もう一つ、厄介なことに、このグラフだと、やや高めの津波が来て、それから、バーンととても高い津波が来るので、やや高めの津波の段階で逃げればいい、というふうに思えてしまうのですが、津波の速さというのは、水深が深いほど速くなります。だんだん浅くなってくると、津波の高さが高いほど波が速くなってきます。そうすると、高い津波が、だんだん先頭に追いついてきてしまうわけです。海岸で観測されている津波計のデータがこのグラフになります。最初に引き波が来て、海底がからからになって、そこへいきなりバーンと津波が立ち上がってくるわけです。

こういうことが起こってしまったので、初動の第1波から、結構高い津波が来てしまって、逃げるに逃げられなかった。引き波の段階で気がついて、逃げていただければよかったのですが、そうもいかなかったということです。

岩手県の久慈でもって、第1波から非常に強大な津波が来ていることが、目撃されています。それから、釜石、宮古、陸前高田でも、このような津波は来ていて、一方、宮城県南部では、このように非常に内陸の奥まで入る津波というものが観察されていました。

6. なぜ東北で M9 を予見できなかったのか？

なぜ、M9 を予見できなかったか。いくつかあります。一つには、非常にわかりやすいモデルが提唱されていたということです。プレートが沈み込みます。そのときに、軽いプレートと重いプレートが、もしあったとします。重いプレートは、もぐり込んだら、すぐに下にいってしまうから、上盤とは強く固着しないことになります。重いプレートとは何かというと古いプレートです。たとえば東北地方に沈み込んでいる太平洋プレートというのは、海水で1億年かけて冷やされています。どんどん冷やされていきますと、密度がだんだん上がっていきます。どんどん重くなっていくのです。マリアナ海溝には世界で一番古いプレートがもぐり込んでいるので、重くて簡単に沈み込んでしまう。こんなところで大きい地震は起こせるはずもない。一方、チリ、アラスカ、南海トラフに沈み込むフィリピン海プレートなどは、非常に若くて軽いプレートです。だから、もぐり込みにくい。そうすると、もぐり込むというよりも、衝突に近い状態になるのです。こういうときは、固

着が強いから、大きな地震を起こすというふうに考えられていました。厄介なことに、このモデルは非常にわかりやすかったのです。しかも、世界中で、過去に起こった M9 クラスの地震というのは、大体 8 千万年よりも若いところで起こっていました。たとえば有名な 1960 年チリ地震やアラスカ地震などは、全部 8 千万年よりも若いところだったので、太平洋沖は 1 億 3 千万年というプレートが沈み込んでいて、こんなところで起こるのだったら、世界中のどこでも起こってもいいということになります。

もう一つ我々が予見できなかった理由は、内陸でそんなにひずみがたまっているように見えなかったということです。今、カーナビで使われている GPS を使って、全国の大地の変形を調べることができます。これは、200 万倍に誇張していますが、大体今回の地震が起こる前は、東北地方は年間 1~2cm ずつ、どんどん縮んでいました。こんなレートで 100 年も縮んだら、メートルスケールで縮むわけですから、そこまで縮んでいたら、ひずみがすごくたまっているということがわかったわけです。日本は、100 年の測定の歴史があります。そのデータをコンパイルしてやると、100 年間、ひずみがたまっているように見えなかったのです。これは、面積歪(ひずみ)と言われているもので、赤いところが、伸びているところです。縮んでいるところが、青や緑になっています。見てみると、むしろ広がっているように見えたのです。だから、1990 年代のときには GPS が出てきて、GPS で見たらみんな縮んでいたのにびっくりしたのだけれども、100 年の間には、宮城県沖地震も起こっているし、福島県の塩屋崎地震も起こっているし、十勝沖地震も起こっている。そういう地震が起こることによってリセットされるのだろうというふうに考えてしまっていたのです。100 年というのがミソで、再来間隔が宮城県沖地震だと大体 40 年、M8 の地震でもたぶん 100 年ぐらいだろうと思ったので、100 年のデータがあれば 1 サイクル見ているだろう。その考えが正しければ 100 年を積算すれば、ひずみは蓄積されていないことになり、実際のデータもそのように見えたので、我々は誤解してしまっていたのです。

もう一つは地震活動です。これも、地震の前の 5 年間の M4 以上の地震の震度分布です。今回の地震が起こった震源域はここです。地震が起こる前から、東北地方の、特に南部の沖合では、地震活動が日本でも一番活発なところです。それに比べて、M8 の地震が心配されている、東南海と南海沖というのは、普段の地震活動はほとんどないのです。これを見て、我々がどう考えたかという、東南海・南海沖はプレートががっちり固着していて、ひずみエネルギーをためている。それが、150~200 年に 1 回たがが外れて、M8 の地震を起こす。一方、東北地方は、普段からずるずる滑っているから、M5~6 の地震を起こすにしても、M7 以上の地震はめったに起こさない。ましてや、M8~9 ということは考えもしなかったということになります。

もう一つ、我々がいいところまで行きながら失敗したと思ったのは、繰り返し地震のモデルです。先ほど言いましたように、プレート境界は大小さまざまなアスペリティがあって、大きいアスペリティは大きい地震、小さいアスペリティは小さい地震に対応していると思っています。周りがずるずるすべっていくと、アスペリティではすべり遅れてしまうので、そこがいずれはすべって、周りに追いつく。今、我々は非常に小さい繰り返し地震

を見つけています。だから、小さいアスペリティを見つけていました。我々がどう考えたかという、小さいアスペリティをプロットしてやると、大きいアスペリティがそのギャップとして見つかるだろうということです。問題は、このような大きなアスペリティとしてのギャップと、全く地震を起こさない領域との区別がつかないということなのです。では、データがどうなっているかという、こうです。繰り返し地震からわかった、小さいアスペリティの分布が得られていました。最近のデータから、大きい地震の震源域がわかってきていて、1994年の三陸はるか沖地震と、2003年の十勝沖地震は、確かに、この繰り返しのギャップで起こっていました。

返す返すも残念なのは、今回の地震の前に、我々は、この広大なギャップに気がついていました。気がついていて、研究者内部でも議論をしたのですが、海溝近くはずるずる滑っているという思い込みがあったので、ここは、海溝に近いところと同じように、ずるずる滑る領域が奥まで入り込んでいるのだろうと、我々は解釈してしまいました。これに、先ほどの滑りの分布を重ねてみると、まさしくそのギャップが、一番大きく滑った場所だった。この段階で大きなアスペリティがここに隠れていると我々は判断すべきだったのが、ここも間違いだった。

そういう意味では、北海道を見ると、そういうギャップがたくさんあるのです。貞観地震が見つかる前に、北海道では500年地震ということが話題になりました。大体500年に1回。こちら、産総研モデルではM8.4以上が出ています。今なら、今回の経験を踏まえて言うと、北海道もM9の地震が起こると我々は考えるべきだろうと思います。そのときに、十勝沖から根室半島沖、場合によったら北方領土の沖合までを全部壊すような地震が起こるのではないかと心配しています。最近の地震は1611年の慶長地震、伊達政宗の時代です。このとき太平洋沖で起こった津波というのは、地震が起こった時刻と津波が来た時刻があまりにも離れているのでミステリーだったのです。最近、もしかしたら十勝沖で起こった地震が、津波を東北地方にももたらしたのではないかという説が、でてきています。そういう観点でいくと、やはりすでに400年が経っていて、400~500年に1度の地震と考えると、満期に近いと考えるべきではないかというふうに考えています。

あと、これは余計な話かもしれませんが、要するに、私はかなり間違えました、というよりも以上のような思い込みがあったので、結果的に3月9日の地震のときの判断を間違えたという証拠です。これも言い訳はたくさんあるのですが、今日は時間がないので話しません。

予見できなかった理由について、学会などでもいろいろ説明していました。昨日、あるキャリアパスのシンポジウムで、ある人が東進ハイスクールの林先生の話が引用されていて、「えっ」と思ったのです。歴史上で、戦に負けた人物について3つの共通点として、林先生は、情報不足、慢心、思い込みの3つを挙げているのだそうです。これは、非常にびっくりしました。実は、私は学会でこれと全く同じことを言いました。3.11で何ができなかったか。情報不足。600年の再来間隔。これも、わからないのですけれども、少なく

とも数百年の再来間隔を持つ地震に対して、近代的データは 100 年分しかなかったわけです。我々は、せいぜい M8 の地震しか起こさないと考えていたから、100 年のデータがあれば大丈夫だろうというふうに思ってしまったのです。しかし、全く情報不足だった。それから、慢心。東北地方は、日本で世界で一番詳しく調べられている地域です。これは、世界中の誰もが認めます。逆に、そこですらこんなことが起こったということで、世界中はびっくりしたし、東北大学が一番びっくりしました。あとは、思い込みです。古いプレート沈み込みでは固着強度が弱い。強度の弱いプレート境界で、大きな地震を起こすはずがない。海溝近くは、ずるずる滑っているはず。こういう思い込みが邪魔をしました。

7. 地震学的手法による地震動と津波の予測可能性

最後、「予測可能性について、まとめてほしい」とのことでしたので話します。地震の規模です。先ほど言った、非常に繰り返しのきれいな地震でも、マグニチュードで±0.3 ぐらい揺らいでいます。これが、本質的な揺らぎなのか、計測の問題なのかは、正直わからないところもありますけれども、たぶんこのぐらいは揺らいでいたと思います。

地震動の振幅です。長周期に関しては、倍～半分ぐらいの不確実性があります。短周期に関しては、たぶん 10～0.1 倍の揺らぎがあります。「不確実性」と書くのは、少し悩んだのですが、非常に短周期を出しにくい場所、短周期を出しやすい場所というのは、大雑把にはわかっています。しかし、決定論的には、なかなか言えないだろうというふうに思っています。

それから、地震動の継続時間は、大体断層のサイズに依存するので、わりと予測しやすいのですが、倍半分の不確実性があります。先ほど、地震の規模がある程度大きくなってしまうと、それ以上大きくなっても地震動の振幅があまり変わらないという話があったのですが、それは短周期の話です。長周期は、今回の地震でとんでもなく揺れています。

それから、津波振幅ですが、これも、やはり倍～半分の不確実性があります。今回の地震に関しての津波の遡上高の分布を見たことがあると思いますけれども、ものすごく揺らいでいます。少し隣の湾に入ると、津波の高さが倍違うという、そのぐらいの不確実性があります。では、そういう場所は、いつも低いのかというと、どうもそうではないらしくて、いろいろなところから破壊して、いろいろなところで津波が起こって、それが、たまたま同位相の部分が重なって高くなったとか、それとも逆位相で重なって低くなったとか、そういうことがたぶん効いているはずですよ。

あと、強調しておきたいのは、先ほどの津波堆積物。今回の地震で、非常に脚光を浴びましたけれども、津波の到達距離がどこまでいったかという浸水域の距離の上限は推定できても、海岸の津波の高さの上限は推定できません。だから、福島に関しても、貞観の地震は知っていたのだけれども、津波の波高は 5m 程度と考えていた。一方、福島第一原発の敷地は 10m 以上あるということで、私自身はそんなに危険だというふうに、実は認識していなかったということが反省としてあります。今から考えれば、こんなものは倍半分の

世界で揺らいでいるのだから、「5m」と言われた時点で、倍はあるかもしれないということを実は考えなければいけなかった。それが、今の我々としての反省です。

土屋：ありがとうございます。初めて、まとまった話を聞いたような感じがします。今まで断片的過ぎたと私も反省いたしました。たぶん質問もされたいと思うのですが、せっかく津波の振幅がずいぶん違うということや、高さがなかなか見通せないということに対して、原子力発電所が、どんなふうに対応しようとしているのかを、基本的なところを中心にお話をいただければというふうに思います。

話題提供②：地震・津波現象の不確実性と原子力施設の対策～耐津波設計を考える～

P2：

学術的な話で面白いなと思いました。私のほうは、実際はどうなっているかという話をしたいと思います。

今日は、発電所はどういう対応してきたのかという話を中心にして、実際にどういうことが起きたのか、発生したら何をしなければいけないかという話までいきたいと思います。

1. 福島第一原子力発電所の津波による事故分析

これは前にも出したと思うのですが、地震があつて、津波が来て、それぞれの発電所のシステムが、その衝撃で重大事故に進展して、最終的に放射性物質の大量放出があつたのだということを、流れで示している図です。地震では問題ないという話を申し上げましたが、津波が敷地の高さを越えてきたことでいろいろなことが起きました。このあたりの話を申し上げて、今はどういう対策になっているかというところまでの話をしたいと思います。

これは地震の大きさです。設計のときに考えた基準地震動というのがあります。基準地震動は、地震が発生する要因をいろいろ考えて、どれだけの大地震動が発生するかという値を求めています。それに応じて、プラントが設計されていますので、この表は、最大の評価をしているときの基準地震動がこうなっていますというのに対して、実際はこれだけ来ましたということを示しています。黄色いところが、基準地震動をオーバーしているところです。

最大の基準地震動は、中越沖地震による柏崎の被災の後に大きく見直しをしています。その見直しをした後の値になっていて、実際の評価上はこれを超えないはずなのですが、やはり何度かの大きな地震動の周波数分析において、一部に少しこういうオーバーしている部分が出てきているというのが実態です。

これが東日本の太平洋岸にある原子力発電所の津波への対応の経緯です。津波への対応はどうしていたかというのを時系列で示しています。「福島第1」「第2」「女川」「東

海第 2」とありますが、それぞれの発電所ではそれぞれに何らかの評価をしながら対策を取ってきていたということです。女川は、最初に対策を取って、途中でも取っています。最初に 15m という高さを決めています。このときのエピソードがあります。設置の高さを決めるときに、1 人の、当時の副社長だったと思うのですが、多くの技術者の集約は 9m だったのですが、「15m にしたい」という強い意見を出したのです。これは経営会議でした。土木屋として独自の調査に基づいての提案、「したい」という強い意見でした。それを社長が採用の判断をした、ということです。それが議事録に残っているのです。それで、15m という高さになりました。

福島のほうはどうしたかという、15m の高さまでは十分に岩盤の高さはあったのですが、この地方は津波の歴史もなく、また他の要因で、お金をかけて削る工事をしたのです。土台を 10m まで削り込みました。ずいぶんお金がかかっているわけですが、福島第 1 は 10m と 13m、福島第 2 も 12m、女川は 14.8m と 15m、東海第 2 は 8m というような高さになっているわけです。

その後、2002 年に土木学会が評価の手法を出した後、それぞれの電力会社は各サイトの評価をし直して、津波高さの見直しがされています。それに対して、福島第 1 も対策をきちんと取っています。もちろん、第 2 も対策を取っています。東海のほうは、2007 年に茨城県の津波想定が出てきて、重要機器の水没が想定され、それに対応して工事をしていました。津波来襲時にはほとんどの工事が終了しており、間に合ったという状況なのです。このときのことを、私は実際に担当している人から聞いていますが、その人自身は「いや。工事なんてやらなくてもいい」と反対をした人ですが、どの工事を優先して実施するか議論の末、経営会議の中で防潮壁の工事をやろうということが決まると、結果的に、それが功を奏したということです。津波来襲時、工事はほぼ完了し、後は貫通している部分を塞ぐだけでした。この防護壁が、ちょうど炉心を冷却する海水ポンプ 3 台中の 2 台を防護することになり、水をかぶらずに必要な機能を確保できた、という経緯です。

福島第 1 については、2009 年に、もう一度こういう評価をして対策をやっています。そして、2011 年に、ご存知の通り、この津波の来襲の当日に、もう一回、再評価により津波の高さが高いので、工事をしますというような相談を、保安院に持って行ったところでした。このように、評価手法が進展したことに伴い、津波に対し何もやってこなかったわけではなくて、それぞれにはこういうことをやってきたという状況です。ただし、結果的に、津波の高さが新たな想定に比べても非常に高かったというようなことになった。これが経緯なのです。

津波来襲で、どんなことがあるのかという話をします。ここに冷却系のポンプがあって、ここに非常用ディーゼル発電機という、非常に重要な原子炉のシステムを動かしている設備があります。非常用ディーゼルは、要するに、地震があったら外から電源がなくなる可能性があるときに、ディーゼル発電機をもって動かす仕組みになっています。これが動かなくなると電源がなくなります。ただし、そういうことがあっても、他から電源を持てきます。外から電源車なりを持ってくるか、電源が生きているプラントにつながる。福

島第一では、機能を共有しているプラントはいくつかありますので、お互いに接続して機能の多重化を図るようになってきているのです。しかし、それらがすべてなくなってしまうと、これは動きません。これからこのような事態に対応する改造が必要なわけです。

もう一つは、原子炉というのは、止めてもずっと熱を発生し続けます。現在も、福島は冷却していますけれども、燃料というのは一度核反応を始めると、通常の運転を止めても、少ないがずっと熱が発生し続けますので、それを冷却しなければなりません。その熱を、常に海水に流してやることなどをして冷やさなければ、どんどん温度が上がってしまうので、必ず冷却システムというのを動かさなければなりません。この2つは、必ず必要な設備であります。

福島、それから東日本の発電所では、どこもそういう可能性がありましたが、東京電力の1～4号機だけがすべて電源を喪失したのです。冷却系も電源もすべて喪失したというので事故に進展したのです。

5～6号機は、福島第1の地域になっています。しかし、5～6号の場合は、同じ場所なのですが、若干、設置レベルが高いところにありました。また、後から設置されていた予備の非常用電源が空冷で動かす設備となっていたために、多様化が図られており、重要な電源が生きていたということです。電気が供給できたというのは、大きなことでありました。

それから、福島第2のほうもいろいろありました。津波が襲った遡上高さは、ほぼ同じくらいなのです。津波高さとの関係で、電源が一部確保できたことはありますが、当時の所長が電気屋だということがあり、すぐに海水に浸かった冷却用ポンプのモーターを、メーカに手配しヘリコプターで、三重県の工場のほうから取り寄せたり、駆動させるための電源ケーブルを全員総出の作業で敷いたのです。要するに、決められていたわけではないですけれども、アクシデント・マネジメントが有効に実施されたわけで、結果、重要な冷却機能を動かすことができたということです。それでここは、難を逃れたということです。

2. 福島第一原子力発電所の要因と対策

つまり、このような事態で原子力安全を確保するには、どういうことをやればいいのか、ベストなのかということなのです。要因と問題点というのは、ここにある通りです。

直接の要因は、今、申し上げました通り、津波が来て安全系設備のすべての機能を喪失したということです。それと、設計基準を超える事態への対応として、アクシデント・マネジメントとっておりますけれども、これがどの程度できたか、その違いによって、変わったのだろうということです。

問題点は、外的事象、こういう津波や地震などの想定をするということは、それにより生じる事態に対して、どういう対応を実際にやればいいのかというのが考えなければいけないことであります。また、システムとして考えると、電源、ポンプ、水の供給、エアなど、いろいろな問題がありましたが、そういったものを、お互いに関連付けてどのように確保したらいいのか、またそれらの、多重性と多様性をどのように考えればいいのか

かということ、考えなければならないということです。そして、アクシデント・マネジメントというのは、これは設備ではなくて、誰がどういうふうにするか。人間系であります。人が何をすればよいかということ、常に考えておかなければいけないということが、課題、教訓として得られたことだと思います。それを支配しているのは、責任者やリーダーの役割なのだということです。結局、責任者がどのように判断したのか、ということが、その後の事態の進展を左右していると思われまます。私たちは、ついハードに頼りがちなのですが、やはりソフト、人間系がかなり重要なのだということ、こういうところで学んだわけでありまます。

課題の中には、私たちは何をやらなければいけないかということなどが、細かく分析していますが、我々、「学术界が何をしてきたか」ということも反省しなければならないことです。設備をきちんとしなければいけないということは、もちろんそうなのですが、これを、どこまで私たちが発言、発信することができたのか。土木学会と私たち原子力学会の交流が、これまではほとんどなかったのです。土木学会が、「津波は100年を考えればいいよ」と、その当時はそう聞きました。ところが、原子力の場合は、 10^{-4} というオーダーで、安全を確保しようとしているわけなので、100年に1回起こるようなことを考えていていいわけではないのです。私たちは、地震のところは、比較的きちんとやってきました。地震の評価の基準の中に、津波評価基準というのを入れてはいるのですが、土木学会の古い（単に「評価しなさい」と記述しているだけの）ものをそのまま持ってきていただけでした。その当時は100年に1回の津波のことしか考えなくてもいいということが、頭にあったのだと言われています。それが、先ほど申し上げましたように、2002年から順次、だんだんと整備はされてきましたが、原子力で扱っているところの基準の中は全く変わってこなかった。そのところが、私たちが反省しなければいけないところです。

それから、地震動が、設計基準を超えることが何回もあったわけです。今回も超えています。そういったことに対応するのをどうしたらいいかというのを、我々は議論をし始めたところだったのですが、もっときちんとまじめにやらなければいけなかったのだろうということ、です。

さて、プラントとして、どういう対応をしているのかということをお話しします。これは、地震の後に何をしなければいけないかということです。電源を確保する、冷却機能を確保する、放射性物質の放出と飛散を防止する、それから、事故の収束や防災に何を、ということで、この対応は（旧保安院の）30項目と言われていますけれども、事業者ではこの要求に対応、着手しようということで動き出しました。

図には、大体の概要を書いてあります。設計基準の見直しをしようということや、重大な事故対策基準を適用しようなどということで、今、これは、規制基準の中に取り込まれています。

具体的にどうなのかというのを、これから少し説明します。津波対策、電源対策、航空事故緩和などという対策は、それぞれ具体的に示されています。それから、プラントに

何かがあっても、(今回の事態のような場合でも)フィルターベントで対策しようではないかといったことも、入っております。

特に、津波ではどういふことをしようとしているかということですが、浸水対策の強化だとか、非常用電源の確保だとか、先ほど申し上げましたように、冷却を常にしなければいけないので、そういった関連の機材の配備をきちんとすることですが、基本的には、こういう大きな項目に対して、プラントでできることを考えたということなのです。

3. 耐津波対策及び耐地震対応の具体的事例

これは、中部電力の津波対策設備であります。この緑のところは山の上であります。高さが50mぐらあります。海岸のところ、今、防波堤というか、防潮堤ができております。海拔は22mであります。防潮堤は地面から16mの高さになっていて、総延長が1.6km。要するに、周りを、すべてこの高さで囲っているという状況であります。波の前面のところは、まさに鉄の表面には何も無い壁が20m近くの高さで、すでに全部できております。ここへ来ますと、海は全く見えない、何も見えない。そういう状況です。

それから、炉心冷却の大量の熱を海に捨てる冷却水の取水ポンプは、1000m先から持って来ておりますが、海水を防潮壁の中まで引いていますから、そのポンプを置いている場所も、高い壁を設けて、中から水が出て外へあふれないようにしております。さらに、建屋の屋上に発電機を設置、敷地の高台にポンプ、電源車、ガスタービン発電機を設置、またガスタービン発電機は免震床の上に設置しています。そういったことを、このプラントでは行って、耐震、耐津波への万全の対応を取っています。

断面を見てみると、このようになっています。高台に多くの予備の設備を置いています。今、通常使っているものへの対応については、防水壁、防水設備、建屋の扉の強化をしています。

浜岡の場合は津波に対して非常に厳しいという条件がありますが、津波だけではなくて、地震に対しての強さも必要だということで、今までは、300～400ガルという設計基準だったのを、1200ガルでも対応できるという設備強化をしています。それができない1～2号機については、停止をするという判断で、今は廃炉の手続きを進めています。そのほかの号機については、1200ガルの地震が来ても大丈夫というものにしながら、22mの防潮堤をつくって津波対策をしているという状況です。ほかのプラントも、ほとんどこれと同じような対応をしているということです。

4. 自然災害への取り組みとして考えるべきこと

3つの課題と、私たちは何をしたらいいのかということをお願いしたいと思います。私たちは、原子力安全をどう考えるべきか、安全確保にどう行動すべきか、原子力のリスクをどう処置するのかということです。例えば、耐震指針においては、残余のリスクというリスク評価をしようとしています。要するに、設計基準を超える場合の地震に対して、どう対応すれば、どのように安全が確保されるということをリスクで定量化して、設計基準

を超える地震動でのリスクを低減させる方策を決めるように、プラント毎で対応しようというものです。すなわち、基準地震動を超えるような地震に対しても、どの程度のことができるかという評価をして、なるべくリスクを小さくしようということに取り組んでいるのです。これが、「残余のリスク」の評価です。同様に、津波に対してもどうすべきか、ということを考えなければいけません。リスクで想定外を防ごうということでありませけれども、対応することを想定しなければ、想定外には対応できないのだろうと思っていますので、ここをどれだけ議論していくかが、重要な鍵になるのではないかと思います。これが1つの課題であります。

二つ目は、科学的想像力を受容する文化です。先ほどは、女川のことを申し上げました。たまたま女川では、決定した敷地高さが今回の津波高さを上回る結果となりましたが、15m以上の津波が来た場合は、どうなったかという問題もあります。それから、東海では、工事をしたことで間に合いました。これも、5年前に津波が来たらどうだったかという問題があります。こういったところを、想像力により、こういうのをやるということを決めるというのは、非常に難しい問題です。科学技術が、どこまでそれをサポートできるか。最終的に、この事例では、経営会議で決めているのですから、技術屋だけでは、こういうのを決めたことはなかったのです。経営会議がこれを決めてきたということは、やはり我々は、こういうところでどういうふうに原子力安全を管理していくかということは、一つ大きなポイントだろうと思います。

3点目は行動の迅速性。東海第2の話をしました。やるべきことを素早くやったことで、防潮壁の工事が間に合ったという、結果はそういうことなので、やっていなければ、非常に影響の大きな事態を招いた重要な問題だった。これも同じように、経営の問題なのですが、必要なことは早くやるということです。問題は、他の工事との優先順位をどのように判断するか、ということです。

これらは結果として良かったと言えますが、このような想像力にどのように対応するかということは難しい問題です。具体的にどうしますかというような問については結論が出ないのではないかと思います。

島崎さん(現：原子力規制委員長代理)の記事で、皆さんは十分ご存知だと思うのですが、「昔、こういう主張をしました」とおっしゃっています。この図の赤いところは、東北地方での津波到達点です。データのないところは、ほとんど津波のないところです。福島のパラントがあるところなのです。このようなデータでも、やはり15mに設置しますか？ 今だから言えますけれども、それは、非常に難しい問題です。過去に津波のあった地域に近いのが女川です。ここのあたりだと思うのです。こういった過去に津波の被害にあった地域がかなり近いところにあったということは影響の大きなところだと思います。やはりその辺のところ、想像力の問題になるのだろうというふうに思います。

それから、リスク論に関わる問題についての二つ目は次のようなものがあります。一つは、インド沖で起きた津波により原子力発電所が水をかぶったという事実の、わが国への反映という課題です。反映されることはありませんでした。

もう一つが原子力安全・保安院からの資料です。フランスのルブレイエ原子力発電所で、電源喪失という事象が起きました。それは洪水によるものでした。日本でも、過去に起きた、同じような原子力発電所の事故というのを全て、日本のプラントに適用したらどうなるのだろうか、というような評価をしました。ルブレイエの問題は、たくさん評価した中の1つなのですが。この浸水事故だけは、沸騰水型原子炉（BWR5）に適用してみると他に比べてとびぬけて大きなリスク、炉心損傷確率となったのです。すなわち、ほかの事例は 10^{-8} ~ 10^{-9} という損傷確率のオーダーが出ているにも関わらず、このケースだけが、その確率が 2.4×10^{-2} という大きなものだった。これだけが突出して高かったと、公開の報告書にもきちんと載せているのです（原子力安全基盤機構「安全情報の分析・評価に関する報告書＝前兆事象評価の適用＝、平成19年4月、JNES/SAE07-058 07 解部報 058」）。

こういうリスクが高いという情報を得ながら、具体的に対応を実際は取られていなかったのですが、なぜ取らなかったのか、そこに本質的な問題を残していると思われる。すなわち、リスクへの取り組み、臨み方に課題があるということでしょう。これが、もう一度、リスク論として考えなければいけない問題なのだろうとふうに思うところであります。

5. 科学者・技術者としてやるべきこと

最後に、そういうことで、科学者自身がやるべきことは何だろうかというので、私たちは、こういうリスクを知ったときは、本当にこれを情報提供だけで終わらせていいのかということを考えないといけません。そしてこのような情報を得たときに、私たちはこれを、このリスク情報を、どのように扱えばいいのか、どのように対応していけばいいのか、対応する仕組みを作る必要があるのではないかと考えます。あるハザードに対してどういう根拠に基づいて、対応をやらなければいけないと言っていくのかという、一つの方策としてリスクをうまく活用するのはいいのではないかと考えているのですが。仕組みとして整えるような活動しようとしているところであります。以上が、前半の話になります。

土屋：ありがとうございます。地震と津波の話から、津波対策、それから、科学者としてやるべきことは何かというところまで、幅広い話になりましたので、これから10分間の休憩を取った上で、まず、専門家のフォーラムメンバーの先生方から、質問やご意見をいただきながら議論を進めていきたいと思えます。では、まず、休憩を取りたいと思えます。

【専門家間の議論】

土屋：もう議論が始まっていますが、再開したいと思います。地震のお話ですが、改めて聞くと、なるほどと思うようなところが多くて、やはりきちんと全体像をつかんでから進めるというのは大事だなと思いました。何かご質問や、自分たちのところではこういうことを考えているけれどどうなのだろうか、というようなご質問がありましたら、ぜひ積極的にどうぞ。

地震学の不確かさ

E1 : 100 年間は、かなりのデータがあるが、100 年以上のサイクルで起こることに対しては分からない、となると、今後 100 年というのは、どんどんどんどん長くなっていく。たとえば、今回は 400 年から 800 年に 1 回のサイクルのものについて、ある経験をしたとします。そうすると、その次のもっと長いサイクルでしか起きないものは、もっと言えば 2000 年、3000 年に 1 回。陸域の活断層というのは、そういうものが当たり前なのですよね。すると、そこに対する不確かさに対して、まだまだ理学的にわからないことがあるから、工学的にどう対処していいか人類は知らないでしょうと。それに対して何か答えというのはないのですかね。

P1 : いや、私も知りたいですね。最大規模をどこまで見ればいいのですか、とよく聞かれるのですが、それはむしろどのくらいの年数を想定していますかということで、答えはたぶん変わってくると思いますね。1 万年などと言われてしまうと、それこそ、たとえば、カルデラ噴火なども考慮に入れないといけなくなるだろうし。ただ、この町が被害を受けるかどうかではなくて、日本列島が、日本という国が、生き延びられるかどうかという議論をする覚悟があるのだったら、1 万年のイベントでもたぶん議論できると思います。それもなしに 1 万年のイベントを議論しても、たぶん、なかなか議論はかみ合わないのではないかなというふうに思います。

私は、マグニチュード 10 ぐらいは起こってもいいのではないかと考えていて、それについてあちこちから、色々言われていますけれど。それもやはり、すぐ起こるかもしれないし、やはり 1 万年に 1 回ぐらいかもしれない。それはカルデラ噴火みたいな同じぐらいのサイクルであるのですが、それもやはり日本が生き残れるかどうかという、そういう規模の津波になるわけです。

E1 : 外挿プラス、上限を理論的限界値で抑えるなどの可能性はないのですか。

P1 : 本当の上限でいくと、地球サイズでマグニチュードの上限は決まるので、マグニチュード 12 です。地球をパカンと割る、アラレちゃんの漫画みたいなイメージです。あれが M12 の地震です。それはさすがにないだろうと思いますので、本当の最大規模は、要するに環太平洋が全部壊れるような規模だとして計算すると、M11 ぐらいです。M11 のエネルギーで計算してみたら、恐竜絶滅を起こしたユカタン半島の小惑星の衝突ありますよね。あれに匹敵します。M11 だと、全人類が滅亡するみたいな話になって、M10 だと、日本国民がやっつけられるかどうかという話になる、というレベルだと思います。

E1 : ということは、今は経験してないことに対して、ある程度、推測がついているのですね。

P1 : いや、要するに可能性だけの話です。本当に起こると言っているわけではないです。可能性は否定できないというだけの話です。

E2 : M10 という 10 は、どういう評価の方法をとって出しているのですか。

P1 : 単純に、モーメントマグニチュードと断層の長さの関係から計算しているだけです。

E2 : ベースは地震モーメントですか。

P1 : モーメントです。

E2 : 震源域の大きさとすべりと。

P1 : ええ。ただし、**M10** を計算したときは、普通のスケーリング則は使っていません。自己組織化臨界現象の研究で有名な Bak という先生が、地球で起こる最大規模は **M12** と言っているのだけれど、それは通常のスケーリング則なら長さ 1 万 km の断層になるので地球上で起こりうると主張されているわけです。しかし通常のスケーリング則でいったら、断層の幅が 5000km になってしまう。幅 5000km というと地球の半分なので、それはさすがにないだろうと。そうすると、断層の幅というのは、大体 200~300km ぐらいで頭打ちするはずなので、それで計算すると、地球で存在しうる断層の最大長さとして 2 万 km、考え得る最大の滑り量として 200m を与えても、**M11** ぐらいになってしまう。

E2 : プレート境界ではなくて？

P1 : プレート境界です。プレート境界以外に、200 km の幅はないと思います。

E3 : 非常にわかりやすく解説していただきありがとうございました。大変勉強になりました。最後に、予測可能性が倍半分とありますが、この数字は、 $\pm 1\sigma$ で言われているのでしょうか。それとも、そんな細かい話ではないということかもしれませんけれども、我々工学の世界で、 $\pm\sigma$ で倍半分などと言ったりするのですけれども、そうすると、もっと大きな最大値など、ばらつき、ですけれども、どういう感覚ですか。

P1 : これはおおざっぱですね。だから、確かに σ と思ってもらったほうがいいかもしれません。

E3 : あくまで σ ということですね。ありがとうございました。

E2 : 同じところですけど、少し気になることがあります。短周期は、**M** (マグニチュード) という一つのあまり物理的ではない指標をベースとして考えることは難しく、たとえば、**M₀** (地震モーメント) だと、長周期成分はある程度評価できるかもしれませんが。ところが、短周期成分というのは、たぶん、それら 2 つの指標だけでは直接評価が困難だと思います。そこでたとえば予測問題を考えたときには、我々は、まず断層から地震の規模を評価しています。それも **M** で評価するケースが多いのですが、それを **M₀** にして、それから経験式などを使って短周期成分も含めて予測をしようとしているのが現状なのですが。この 10 倍から 0.1 倍という話というのは、何を基準値にして出てくる値なのですか。

P1 : これも普通の、とにかくコーナー周波数が ω^{-3} で落ちるような普通のスケーリング方法に比べて、どのぐらい揺らいでいるかという、たとえば津波地震だったら、全然短周期を出さないですし、一方でスラブ内地震のときは短周期を出していたりするから、ざっくりの話です。

E2 : 現在では 10 倍か 0.1 倍かは別にして、スラブ内地震にしる、プレート境界地震にしる、短周期成分を経験的な結果などを取り込みながら大きく想定するとか。あと、内陸地震については、少し大きめに評価しています。**M₀** が決まれば、予測問題としては、これぐらいで、しかも安全裕度を考えて少し大きめに評価をしています。

P1 : 短周期に関しては地震動評価の先生のほうが、はるかに詳しいです。

E2 : いやいや、そんなことはないです。ただ、一般論として 10 倍から 0.1 倍というのは、あまりにも大きなバラツキなので、一般の人が誤解されたら困ると思って確認させていただきました。

P1 : 倍半分はσだけれど、10 倍、0.1 倍はリミッターに近いような話をしています。

津波予測の難しさ

E2 : 私は津波のほうはもっとバラツキがあるのかなと思ったのですが。地震動のほうは倍半分程度と思っていますが、津波のほうでは、もっとバラツキがあるのでしょうか。あんまりデータがないという話しですが。

P1 : そうですね。これの書き方が正しくなくて、断層モデルが正しいとしても、倍半分のばらつきはありうる、そういう意味です。そこに、さらに断層モデルの不確定性が入ってくるので、本来はもっと大きくなります。

E2 : しかも強震動と違って、短波長、長波長の津波がいろいろな波源のでき方によっていろいろと変わるという話で、新規制基準でも、非常に津波に関しては、いろいろな不確かさを考えなさいということ求めています。確率的には裾野のほうにあるような津波を考え、こうした短波長、長波長の津波の組合せなど、いろいろなことを考えて、最大級のものを基準津波として策定しなさいと指導されているようです。

P1 : 今、何の話をしているかというのと、断層は、先ほど言ったように、一気に壊れるのではなくて、次々と破壊を伝播していつ壊れるという話をしました。その壊れ方によって、強震動の出方も、指向性が出てきて、どちら方向で震度が大きいのか、というのが出てきます。津波に関しても、これが北側から破壊するか、南側が破壊するか、それとも両側に破壊するのか、それとも東西に破壊するのか。先ほど、津波がインフェイズで、同位相で重なる場所と、逆フェイズで重なる場所というのは、高さが全然変わってしまうと言いましたが、いろいろなパターンがあります。どういうシミュレーションをするかということで、答えはかなり変わってしまう。そういう意味で倍半分は平気でありうるという意味です。

E2 : もっとバラツキがあるのかなと思ったのですが、倍半分ぐらいですかね。

P1 : いや、分からないです。これはエイヤです。破壊過程というのは、本当に、予測は、たぶん不可能と思うので。この辺の断層はこのぐらいすべりそうだっていう予測はある程度できて、こっちから破壊が始まって、こういうふうなシナリオで壊れるというのは、できる状況には今ないので、非常に難しいですね。シミュレーションを走らそうとやっている人はいますけれどね。強度分布を与えて、ここから壊すと、こういう破壊しますって、でてる。でも、その最初の神の一撃はどこから始まるかということに関して、僕ら情報を持ってないので。

科学技術の限界 ～仮説とその見直し～

E3 : 今の話に関連するのですが、林先生の話が引用されたところで、まさに私もこういうことだなと思うのです。以前、別の先生に聞いたのですが、「宮城県沖辺りは非常によく

わかっているところであり、ここは、この考え方がぴったりだ、心配いらぬのですよ」ということを言われたことがありました。それはもちろん、3.11の前なのですけれども。この情報不足という問題は、先ほども言われたように、なかなかこれは簡単には解決できないと思います。それから、慢心というのは、少し置いておきまして、この思い込みというのは少し言葉を変えますと、これは専門領域での一つの統一の見解ということだと思ふのですよね。思い込みというと、悪い表現に聞こえますけれども、その専門分野の統一の見解が、ここに記述されていて、それがやはり今まで、その専門の人たちのコミュニティの中で蓄積されてきた一つの式だと思ふのですよね。だからそれを思い込みと言ってしまうのは、完全に一生懸命そこでやってこられた方が、否定されてしまうというか、そんな感じもしないでもないですが。こういうことが起きてしまうと、結果的に思い込みなのかもしれませんけれど、基本的に全部将来を予測する、予測問題ですから、これは過去のことを考えての、そのコミュニティの中での統一の見解、いくつかあるかもしれないのですけれども、それもここに表現されていると考えるのが、それしか、たぶんできないのではないかなとまず思ふのですが。

P1: ネガティブな言い方かもしれないのですけれど、地震が起こったあとに、地震学会で特別シンポジウム開いて、あのとき私が、ぼろっと、地震学の敗北であると書いたのがメディアで広がってしまいましたが、それはこういうことです。地震学者が、誰もがこういう思い込みというか常識だったものが今回覆ってしまったと。それは、地震学の敗北ではないかと。それはなぜかという、やはり地震学はデータがないですから、データがないところでは先ほど言ったような、どういうモデルが一番もっともらしいかということで判断するしかないわけですよね。僕らがここで反省したのは、今はデータがないから、とりあえずこれは仮置きで進むけれど、いずれは検証すべきものですよね、というはずだったものが、いつのまにか自分自身をだましてきたのではないかという、それは反省として、少し強い口調で書きました。

もう1つは、逆に言い訳というか、地震学を弁護すると、そこまで来ていたのですよ。海底地殻変動のデータは5年間たまっていて、もう5年あれば、海溝近くで歪みエネルギーがたまっているよというのを、たぶんわかったはずなのです。その、本当に一歩手前まで来ていたところに、今回の地震が間に合わなかったという、そういう悔しさも一方あります。

P2: いや、今の思い込みの話は、まさに、科学技術の限界といえはそうなのですけれど。そういうのを常に見直すような仕組みというのが本来はあっていいはずなのに、そこのはなかったのですよね。我々もそうなのですが。そういうところを常に見直しをすることが重要なのですが、見直しを許さないような雰囲気があったということですか。

P1: そういうわけではないのですけれど、科学は結局、ほかの分野でもそうかと思ふのですけれども、昔の、結構、精度が悪いデータからつくり上げられてきた仮説が、なんとなく生き残ってしまうと、それで思い込んでしまっていて、今の新しいデータで見直したら実は違うかもしれないことは結構あるはずなのです。しかし、そういうふうに書こうとすると、

きっと査読で叩かれて、へこむのかもしれないのだけれど、そういうことは、本来、科学者はやらなければいけなかったのに、なんとなく安易なほうに流れていったのではないかというような発想なんですけれど。

今回の津波と将来の津波

P2 : 今、うかがっていると、津波も結構予測できそうな雰囲気聞こえてしまうのですが。昨年の春、リスク関連の学会で、津波の予測がなかなか合わなくて、いろいろなモデルを組み合わせて合わせる事ができた、と報告されました。それでは、海底の崖が崩れるというモデルを用い、海溝の中で崩れたからそれにより発生した波を重ね合わせて、福島第一の実態と合うようになったという、そういう報告もあるわけですよ。だから、予測技術としてはまだ合っていないように思われるのですけれど、おうかがいしていると、かなり予測できるようになったかというように聞こえてしまうところがあるかなと、思われます。

P1 : 確かに津波に関しては、おっしゃる通り議論があるところですよ。それから、予測可能性というのも、非常におおざっぱなところではわかってきているというだけであって、細かいところは、本当わからないことが多いです。

特に、今日お話しませんでしたけれども、今回の地震起こったあともまだプレート境界は、ずるずるずるずる動いています。それを余効滑りと呼ぶのですけれど、たぶんこれが数十年続きます。それが全部終わって初めて、次のサイクルに行く。そこまで行って、ようやく今回の地震の全体像が見えるはずですが、その動きに関しても、僕らが最初に考えていたのと少し違う動きしているのですよ。なんでそんなことが起こるのかということ、実を言うと未だ我々はアイデアを持ってないのです。仮説はいくつかありますけれど、検証は進んでいない。少なくとも私が現役の間に、この問題は決着がつかないというの今から見えています。下手したら、生きていううちには決着つかないかもしれない。

もう一つは、マグニチュード9の地震に本当にサイクルがあるのかということです。アスペリティ・モデルを僕がすごく強く推進したのは、システムサイズという一たん分かってくださると思うのですけれどー自分自身を全部壊すようなものがあり、周りが全部一定のレートで進んだときに、これが1個全部完全に壊れてしまえば、ここでリセットがかかるので、サイクルが生じるというのは考えるのです。しかし、自分自身が動くことが他に影響及ぼしてしまったら、複雑系になってしまってサイクルにならなくなってしまうのです。

今回のM9の地震も、同じような地震が本当に600年間隔で繰り返してきたのかどうかは、実は何もわかってないわけです。そこから疑ってかかるべきだろうと、僕は思うのですよ。しかし、そこまで疑うと何もできないので、とりあえず仮置きで、予測は出してみようかと。しかし、やはり仮置きであるということ、絶対忘れてはいけないというのが、今回大きなところですよ。

P2 : その中で、今のモデルで、ああいう大きさのモデルだと周期性があるということなのですか。なぜなら、地球の大きさとの関係だから、小さなものであれば境界が均一となってしまうので、周期性があるということですが。大きいと、なくなってしまうという話だと思うのですが、今の海溝型の地震というのは周期性があるのですか。言い換えれば、今得られている結果では、見込み、見通しがあるのですか。

P1 : 小さい地震は、たぶんあります。

P2 : 小さいのはそうですけれど、今の海溝型のような大きなのは？

P1 : それを、今言ったのです、M9 に関しては周期性はないかもしれない。

P2 : ないかもしれないと。

P1 : ただ、同じ場所に関しては、やはり歪みエネルギーがたまる時間が必要なわけです。今回、歪みエネルギーはほぼ 100% 解消してしまったということも別のデータでわかっているので、これから蓄積に入るから、今回の地震と全く同じ場所が、近い将来に壊れる心配はたぶんないだろうと思います。

問題は、そのすぐ北と南です。隣が壊れてしまったわけだから、そこはむしろ滑りやすくなっているはずで、そこはやはり要注意だと思います。それが、青森県東方沖と房総沖。その辺を我々は心配しています。

P2 : そちら辺はどれくらいの確かさで予測ができるのですか。心配なのは我々も心配です。どれくらいなのかというのは出していただくといいですよ。要するに津波の源になるわけですよ。地震はそれほどでもないかもしれない。

P1 : 津波ですね。

P2 : 津波です。

P1 : ただ、今回、みなさん、よくわかったと思うのですが、東南海、南海は、地震が起ってから本当に数分で来るのですけれど、日本海溝付近で起こる大きな津波というのは、到着するのに時間がかかるので、津波に関してはすぐに逃げ出せば間に合うのです。今我々がやっていることは、津波の即時予測を高精度化しようというので、海底ケーブルを展開して、海底でもっていち早く津波をとらえて、その津波の、海面の持ち上がりの分布さえとらえてしまえば、そこから後は、津波は伝播していくだけですから、非常に高精度の予測ができるはずなのです。そういうことは、今、視野に入れてやろうとしています。それは、しかし、今、東北沖と南海トラフ沿いにしか観測網を展開していないのです。北海道や房総も少し入っていますけれどね。北海道が少し心配なのですよ、正直。

E2 : そうすると、当然、沈み込むスピードが決まっているわけだけれど、それは1つの知見として考えると。十勝沖では、昔 500 年ぐらい前に津波の被害があった、そういう情報だけではなくて、もう少しアクティブな、固着の調査、観測などは行わないのですか。

P1 : やろうとしているのですが、今とりあえず東北、東南海、南海に人員が投入にされていて、これが終わらないと、なかなか他には行けない。要するに、お金はあるとしても、人的パワーがないのですよ。

E2 : 方向として、どういう形でやるのですか。

P1：海底地殻変動でやるのがやはり一番いいと思いますね。それは、もう少しでわかる場所です。ただ、海底地殻変動でやるのは、残念ながら、オンラインではなくて現場に行かなければいけなくて、用船費用が馬鹿高いのですよね。海上保安庁がやってくれば一番いいのですけれど、例の、尖閣のことで海上保安庁が忙しくなってしまったので。

土屋：そんなことが関わって来るのですね。何人資源を投入するかという。

P1：いや、本来あちらが海上保安庁の任務ですから、なかなか、こちらの方には予算と人員が回りにくくなってきているところがあって、難しいところです。

想定と原子力発電所の安全

土屋：さっきの質問は、時間がかかって到達するのはいいのだけれど、海底の振幅で、これはかなり高いものが来るというのを、早めに知らされれば、原子力発電所も少し備えることができるということでしょうか。

P2：いや、そういう意味ではなく、今は、津波がどういうのが来ても大丈夫なようにしようというのが基本的な考え方です。ただ、それも、防潮堤があっても上から越して来るのだという前提でなければいけないので、その上で、来たときにどれだけできるかはマネジメントの問題ですから、どれだけ訓練できているかということになる。いろいろな方策を取っています。ヘリコプターで電源を持ってくるとか、そういうことも考えて、いろいろなこともできるようになっています。ただ、実際にそれをやるか、どこまでできるかは、マネジメントですから、どれだけ訓練積むかということだと思います。

P1：今回のことを受けて、僕らが言わなければいけないのは、やはり最大規模の想定は、今の地震学では無理だということではないか、無理ということをむしろ言った方がよかったのかなと思うときがあるのです。そうすれば、そちらも、絶対ここを津波は超えませんよという話にはならない。何等かの確率で超えるという前提であれば、多重防護の考え方になります。「これを超える地震はありません」と言った瞬間に後ろがないがしろになってしまうのですよね。

P2：今、法律では、きちんと（実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則）第五条というところで、基準津波に対して安全機能が損なわれないことを規定し、基準津波は、「最新の科学的・技術的知見を踏まえ、波源海域から敷地周辺までの海底地形、地質構造及び地震活動性等の地震学的見地から想定することが適切なもの」を策定することになっているのです（規則の解釈、別記3より）。そうやってつくるのですよ。そこから先、基本的には考えないことになっているから、それではなくて、もっと別のことを考えていかないといけない。

P1：そうなのですけれど、基準地震動もそうですよね。しょうがないのかなとも思いつつ、地震屋からいくと、これ以上のものはないというのは、絶対言えないですよね。

P2：地震の場合は、残余のリスクでリスク評価してなんとか下げようということができるようになっていますけれど、津波の場合は、幅が大きすぎて、リスク評価をするというふうになるとかなり大変ですよね。決定論は、まだ決めていけばいいですけど、リスク評価を

すると非常に幅が大きくなってしまっていて、その問題が非常に難しい。これから悩みだなどと思っているのです。

最新知見とは

E3 : 本当に皆さん、すごく大変な、難しいなというふうに我々は思うのですけれども、そうすると、やはりしないほうがいいのではないかなと思ったりもしないわけではないですけれども。

いや、とりあえず冷静に考えなければいけないのは、今言われました、最新知見の話をしますが、最新知見って、僕はよくわからないのですけれども、あまり信頼をおけない研究者が、最新の論文を書いて、こんなものが起きそうだというようなことの判断を下したと。それは最新知見なのですよね。要するに、最新知見というのは、ある程度の検証がされて、それから、今までの知見に照らして、やっぱりおかしいというのをおかしいとする。もちろん学会の中でいろいろな批判があったりして、その上で、たぶん最新知見というのは、それなりの形で、そうか、と皆さんが納得するとは思っています。そのところが、学会の中でうまくそういうふうなプロセスになっているのかどうか。専門分野の中で、非常に新しい説を提案した人がいるとすると、それは本当に最新知見、新しく言っていることだから最新の知見かもしれないのだけれども、本当にそれがアクセプトしていいのかどうかというのは議論されるのか。

P1 : やはり学会発表と論文として出るかどうかは別問題で、地震学会というところは非常に自由な空気のところで、眉唾な発表もされています。だから、学会で発表したということがウェブで出たりするのですけれども、それを信じないでください。地震学会の学会誌は、きちんと査読も入りますし、おかしいことはチェックされます。だから、学会誌に載ったものと地震学会で発表されたのとは全然別問題なので、そこは地震学会も悩んでいるのですよね。やはり、ある程度厳しく、学会発表にすら査読を入れるべきではないかという議論もないわけではないですけれども。

E3 : そのときに、学术界そのものが、これはかなり突飛な考え方であるということで、ある程度の検証はそれなりに当然されているに決まっているのだけれども、わざとそれをとりあげないということはないか。なぜならば、過去の知見に照らして、過去の統一的な見解に照らして、これは非常に受け入れがたい、あるいは、これを出すと社会に与える影響が大きいなど、ということも若干関係あるかもしれませんが、いろいろなフィルターが働いて、出ないみたいなことがあるのかどうか。

P1 : ないです。地震学会は。

土屋 : 逆にないのですよね。

P1 : 逆にないです。地震学会は自由過ぎて困るのです。

E3 : そうなのですか。

P1 : 毎回議論には上がるのですけれども、大体反対されて、この自由な雰囲気は地震学会のいいところだからといって出てしまうのですね。

P2 : 今の話ですけれど、学術会議で発表している議論はいろいろあると思うのですけれど。それともう一つは、論文を出したときに、1回1回の論文を出すと、論文上での議論があったりするのですけれど、そういうことはやらないのですか。要するに、異論を唱える人が出てきてそれを論文に載せて、それに対してまた載せるというような。

E3 : 学会誌上の討論みたいな。

P2 : 学会誌上の討論、学会誌の論文に対する論文。時々ありますけれど、反対意見を言う人がいて、それに対する論文ですね。論文上での公開討論ですよ。そういうことをやらなければ本来はいけないような気がするのですけれど。要するに、何もないということは、みんな認めることになってしまうので。

P1 : 国際誌はやっています。日本の地震学会誌は、結構査読がきつくて、たぶん、変な論文は全部チェックされてしまうのですよね。逆に日本の地震学会誌は。

P2 : そうですか。自由に出てこないわけですか。

P1 : 論文としては出てこないです。むしろ、わりと欧米の有名な雑誌であっても「えっ？」と思うのが出て来て、それに対してコメント、反論として出て来てというのが。一応、健全な形であります。しかし、そもそもこれはレビューは通しても間違いではないかと思うようなのがあって、コメントが出て来ていたのに対して、再反論が全然できてないような論文もあつたりします。そういう意味で地震学会は面白いですね。学会発表は、すごくザルなのだけれど、学会誌はすごく厳しいというところはあります。

P2 : 確か『Nature』に80mの津波対策が出ましたよね。東大の外国人の方でしたか。80mの津波対策も考えなくてはいけないというような。

P1 : 『Nature』のオピニオンのところですね。彼の『Nature』に載っていた批判は、もうむちゃくちゃですよ。本人に言っても、それは、論文上で反論しろと言われていました。

P2 : まだ論文になっていないわけ。

P1 : 有名な、『テクノフィジックス』という雑誌でもって、ハザードマップについての彼らの批判が出ているのですけれど、その批判が非常に変な批判で、それに対して研究者が詳細な反論を出したのですけれども、それに対する再反論が、非常にこんなのでいいのかと思うぐらいのレベルの話で、私自身もそれにがっかりしました。だから、その程度の話ですよ。

P2 : そうというような意見を集約することはないわけですよ。

P1 : 集約するというのは？

P2 : 要するに、たくさんの人がそう思っているなら、意見はまとまっているってことがあるでしょう。

P1 : だから、地震学会の多くの人たちは、彼の論文をおかしいと思っているのだけれど、それがなかなか表へ出ていかない。

P2 : 表に出て来ない。

P1 : 皆さん、もう大人だからそういうことはよくないというか。

P2 : さっきの発言にもあったように、たとえば、断層問題の新しい知見が出て来たときに、それに対する議論、きちんとした意見というのほどまで出て来るかっていう話ですが、何となく、あんまり出てきていない気がするのですけれど。

P1 : 非常に難しい問題があります。すいません、個人批判みたいになってしまうのだけれど、たとえば、ハザードマップに対する批判の論文の中で、マップでは震度 6 の 30 年確率が 0.1% と評価されていたのに、震度 6 が来たと、30 年確率 0.1% ということは 3 万年に 1 回しか起こらないということではないかと論評をしているわけですよ。それは、ポアソン過程を考えればそうなるのだけれど、政府のやっている評価というのは、一部はポアソン過程が入っていますけれど、基本的にはサイクルのモデルを考えているのです。だから一度大きい地震が起こったら、その後は確率がぐっと下がるわけですね。そういうやり方はおかしいと、彼は一方で批判しておきながら、確率の値の解釈のときになると途端になぜか知らないけれど、ポアソン過程で計算したかのような批判をしてくる。

『Nature』に載っていたマップも、あれは、固有地震説にある程度基づいているので、大きい地震が起こった後は確率が下がっているんですね。2000 年代につくったマップですから、当然、神戸の地震があったところというのは、確率が下がっているわけですよ。そのマップに神戸の地震を重ねて、合っていないではないかかという批判の仕方してくるわけです。これ、どう考えてもおかしいわけですよ。

彼は、批判してくるぐらいだから、推本（地震調査研究推進本部）のマップをどうやってつくっているか知っているはずなのに、なんでああいう批判の仕方してくるのかというのは、僕らにとっては謎ですね。それは、僕は、彼にも言っているし、他の人も彼に言っているのだけれど、そういうことは論文上で批判してくれと言うから、論文で批判すると、そういう訳の分からない再反論が返って来るということになっているのです。

専門家の見解の違いをどう扱うか

土屋 : 新しい知見を入れていかなければいけないけれども、それを入れることの、ものすごく難しい、学术界の仕組みといたしまして・・・

P1 : だから、たぶん批判される方も建設的な対案を出してくれればいいのですよ。対立仮説としてこういうことだと言ってくれば、お互いに議論して行って、どっちがよりベターかという議論になるのですけれど、一方的に批判するだけだったら、何の発展性もないわけですよ。

彼も神戸の地震の後はいろいろと対案を出してくれたのですよ。それでもって、推本の方でも、一部はそれを取り入れて今の対策ができあがって来たのだけれど、それを今回彼は、全否定していました。

A1 : 今の議論の中で、私が気になることが 2 つあります。1 つは、専門学会、たとえば、地震学会なら地震学会の中でそういう論争的なことが起こったときに、その論争を調停する何らかの役割を果たす人なり、機関なりがあるのかどうか。これは学会によって異なっているのではないかというのが、まず 1 つなのですね。それから、私がここでしゃべるのはタ

イメージが早すぎるのかもしれないのだけれど、専門家間で、今議論が出されているのですが、外側で聞いていると実は私は 3~4 割しか分かっていない。皆さんの間ではそれはきちんと通じているのかどうか。率直に言って分からないから聞いているのだけれど、どうも今までの皆さんの、専門家の間での議論の仕方を聞いていると、必ずしも通じてないのではないかというのが、僕の今の率直な感想なのです。

今の話は後にして、前者の方、学会の中に何か、そういう論争的な課題が出てきたときに、それを調停する機関なり、仕組みなりが常設的に、あるいは臨時的でもいいのですが、何かできるのか。地震学会の場合だけで結構です。

P1 : ないですし、たぶん地震学会の今の雰囲気では残念ながら難しいですね。

A1 : ほかの学会はどうなのですかね。原子力学会はどうなのですか。

P2 : 原子力学会の場合も、基本的には、皆さん自由に議論をしている形なので、そういうふう
に調停はしていません。

E3 : そのときに、調停という一つの見解をつくる、求めるような感じがしますけれども、いろいろな多様な意見があるのだというのを、きっちり示してもらおう。それをたとえば、地震動の大きさで順番に、こう並べてみると、「これはものすごく、極端な大きな地震動が出るよね」「しかし、この仮説にすると、中ぐらいですよ」と、こういうふうなものが見えてくると、我々としては、工学としては、非常に使いやすいのですよね。それが全然見えないので、結局一番でかいものをとって行く。あるいは、一番でかくなるような説を言う人のものを採用していくようなことになってしまっているところがあって。そうすると、これは非常に難のある意思決定をしているのではないかなと思うのですね。

だから、そこで、とにかく多様な意見が、こんなに出ているのですよというものを、まとめて見せていただくというか、そういうふうな調停の仕方というか、そういう方がいいのではないか。

A1 : 調停の仕方には 2 つありましてね。1 つは、アカデミックな関心からいって、この議論を、みんなが納得できるような形で進めていくということを考えたときにどうするのか、というのがありますよね。今、ここでの議論はそうではなくて、その議論が、あるいは考えなり議論なりが、それが社会的な課題と直結しているわけですよ。だからこそ、これだけ議論しているわけですよ。そういうときには、何らかそこに、誰もが納得できるようなことを考える。しかし、なかなか納得ができないことがあって、それをどうしたらいいか。あるいは、それをアカデミックなサークルではなくて、社会との関わりの中で、あるいは施策機関との中で、どういうふうに、情報交換なり情報提供をしていくか。今ここで問題になっているのはそういう課題ですよ。だから、言っているのです。それがなさすぎると、私は思っているものだから申し上げているわけですよ。

P1 : 推進本部のほうも、最近はなるべく幅広い意見の分布があるということを前提にした評価の仕方によって変わってきていますよ。それが逆に、ますますわかりにくくなったという批判もあることは、事実なのですけれど。あと、学会内部に関しては、純粋なサイエンスの問題と、社会が関わってきた場合とで、問題の取り扱いが非常に難しくなっていて、どう

していいか正直、結構、地震学会内部で何回もシンポジウムを開いて、いろいろ議論しているのですが、結局、結論が出ないまま来ていますよね。ただ、おっしゃる通り、活断層学会も、この間私が行ったときも侃々諤々。

土屋：そうですね。あそこは。

P1：少し疲れましたがね。

土屋：もっと自由で、とにかく一人一人が、一つ一つの仮説をもっている感じで話しておられました。

P1：結局、地学では、検証するのが難しい学問がやはりあるわけですね。そうすると、「私はこう思う」ということになってしまう。これに対する、一応否定する材料はないという仮説がいくつもあったりしたときに、では、どうやって調停するのかという、そういう世界だから結構疲れしました。

P2：先日、英国大使館でシンポジウムがあったときに、英国では、科学者を集約するのは必要ないのだと、意見を集約する必要はないということでした。意見は、なるべくたくさん出すと。ところが、日本の学術会議はどうしているか、というと、ユニークボイスをつかってワンボイスにしようと、そういうふうな仕組みを今つくろうとしているというわけです。本当にそういう一つの声に集約するのが必要なものかどうか、というのはこれから議論になるだろうと思うのですけれど。

たとえば先ほど社会の問題がでましたが、いろいろな問題があって、たくさんの意見を多く聞いて、判断は政治家がする。いろいろな意見が出てきたところで判断する人たちが、そこから判断しなければいけないのですけれど、技術者なり、科学者が意見を出すときに、一つの声を出すというのは、間違った判断ではないかと、そういうふうに思います。

A1：かなり核心的な課題ですよ。それは、はっきり言えば、科学者なり、技術者なり、そういう団体が、かなり強烈なパワーを持つということですよ。学術会議が一つの意見にまとめるということは、それによって、すべてが動いていくということですから。学術会議が決定的な政治的力を持つということですよ。

P2：というのはいいのかと、私は疑問に思います。

A1：それはそうですね。そういうことですよ。

P1：先ほど意見分布とおっしゃったのですけれども、知り合いでも、予測というのはどうしても幅があり、その幅を示すときに、意見分布を示すのが一番いいのではないかと、いうことを言う人がいます。たとえば、株価の予想や円相場の予測など、結構意見分布を示すことをやるではないですか。それで経済が動いているのであるならば、たぶん地震の予測も同じようにして意見分布を出せば、ある程度の相場観が皆さんにもわかるのではないかと、いう意見はあります。

しかし一方で、社会に関わっていない、むしろ非常にサイエンスに近い人たちは、サイエンスは多数決ではないでしょ、それだと多数派が正しいように見えてしまう、本当にそれでいいのですかという、そういう議論をふっかけてくるわけです。その辺が、やはりどうしてもかみ合わないですね。

土屋：難しいですね。少し休憩を取ってから、全体を巻き込んだ議論にしてもいいでしょうか。だんだん社会の問題に関わってきています。今は、津波の想定の方の話ばかりでしたが、津波対策の方の不確実性についても、少し議論を進めていただければと思います。今度は、全体でいろいろ話をしたいと思います。15分までトイレ休憩にします。

【全体討議】

土屋：それではお揃いなので、再開したいと思います。今、いろいろな議論が行われ、新しい知見をどういうふうと考えていくのかということまで行きましたけれども、津波の想定は相当難しそうだという中で、先ほどあった津波対策の十分さといいたいでしょうか、どこまでのリスクを考えるのかということも含めて、何か皆さんのほうからご質問、ご意見などありましたら、お願いします。今回は全員参加でいきたいと思いますが、いかがでしょうか。

”科学”の姿を誰がどう伝えるか

A2：一般的な話ですがいいですか。

土屋：はい。どうぞ。

A2：さっきの話の続きみたいになってしまうのですが。いろいろな意見があつてというところでですね、学問分野によって、メタ解析やメタ論文、総説などで、分野以外の人を読んで相場観がわかるような手法がありますよね。ああいうものが、今回のこういう地震や津波などの分野ではないのかなと。放射線の問題でもいいですけども。そうすると、じかにこういうシンポジウムを聞かなくても、論文上で相場観が想像できるのかなと思って聞きたいのですが。

P1：地震に関しては、地震学会の『地震』という雑誌に、総説のものがあつて、解説記事を書くこともあるのですが、今回に関しては、地震学会ニュースターと「なみふる」という広報誌である程度のことは書かれていたと思います。岩波の『科学』では何回か特集が組まれていて、あれは私も一回書いています。あれは割といいかもしれません。おっしゃる通り、3年たって、そこからさらに進んできた知見もあるので、今の段階でもう一回総括を、一般向けの特集号など組むことができるかもしれないですね。

土屋：本職ではなくて、少し引いた立場から、ジャーナリストのような人がいろいろな情報をうまく分析する、というイメージでしょうか。

A2：誰か、そういうことに労力を注ぐ人が、いろいろな分野にほしいなというふうに思いますね。

P2：原子力の場合は、どちらかといえば分野そのものの幅が広いので、いろいろな人がいます。原子力学会誌がそういう意味では非常に幅広く中身をそろえ、それこそ放射線障害の話から、核燃料、発電システム、倫理問題など全部入っています。

今ございました、3年たったのという話は、この3月8日に原子力学会でまとめた事故調査報告書を、約500ページなのですけれど発行します。3月8日にヤクルトホールで、報告会をやるのですけれども、たぶん、書店に並ぶのは丸善から出のですが、2,500円（税抜き価格）だと思います。一応、全領域、リスクまで含めて頑張ってきた分をまとめています。その中では、それこそ学会の幅広い領域で分析をして意見をまとめました。原子力学会はどちらかといえば境界領域がたくさんありますから、そういう意味では、かなり幅広く意見を出しているかと思います。

E3: 先ほど指摘されたことについて聞きたいのですが、総説も、誰が書くかによって、やはり、だいぶ変わってくると思うし、最新知見の総説みたいなこともあれば、今までの統一的な見解から、今回の違う新しい解釈があるということを書く人もいるかもしれないですね。要するに、総説を書く人が、どういうふうなことを要求されて書くのかで、こんなにいろいろな意見分布があるのですよという、要するに、我々がこれから研究しようとする分野というのは、原子力分野ではこんなに難しいのですよという書き方をされるのと、こんなに分かっているのだよと書かれるのと、まただいぶ違ってくると思うのです。それは、やはりそういうふうと考えていいですか。書く人によってだいぶ違うというように。

P1: それはありますね。あと、もう一つは、やはり、雑誌の編集者の問題でしょうね。岩波なんかだと、地震の専門家ではない方が編集者だから、リクエストがいろいろと来るのは当然なのですが、根底に思想があるようで、難しいと感じました。

A1: 私は、実は雑誌『科学』の編集を1960年代から3回にわたって経験したことがあるのです。最近は関わりを持っていないので、今現在の状況は存知ませんが、内部に編集部員がいて編集会議をやっているわけですけれども、その外側に学者グループが相談役としてついていて、そのグループが助言をしながらやっていくというやり方にはなっていると思います。それで、『科学』のことはそれぐらいに置いて、むしろ学会のほうで、外側に、そういうものが必要なかどうかという議論ですよ。

一つは、これは、私の専門領域でもあるのだけれども、科学ジャーナリズムや科学報道などという場もありますよね。そうすると、こういう課題を、たとえば、今、皆様のような専門家の立場から言うと、なんかほしいものがあるのでしょうか。それとも、そういうことは、余分だからやるなということなのでしょうか。

P1: 人にもよると思うのですね。私自身は、メディアの方に、わかりやすい解説記事を書いていただきたいと思うほうなので、「記事にするかしないかは、どっちでもいいから、とにかく取材に来られるときは3時間は話を聞いてくれ」と言って、時間を取っています。逆に、そういう時間が取れないときには、1、2週間待ってもらっていたりして、最低3時間はかけるようにしていますね。それで分かってもらって、結局、「すみません。今回は、記事になりません」など言われるのは、「それは、全然構わないから」と言っています。それは、そういうこと繰り返していく中で、どこかできつといい解説記事を書いてくれるだろうと期待しているのですけれどね。

ただ、やはり難しいですよ。アスペリティの問題といっても、話をしたけれど、これをどうやって映像化して、漫画にして、説明していくかというのは、なかなかそう簡単でもないし、私自身、どうしていくのか、わからないのですけれども。

A1 : 私は、今、ここで言いかけていることは、こういう大きな課題、科学技術的に大きな課題は、いわゆるアカデミックな人たちも含めて、社会全体として扱うときにどういうふうな仕組みが望ましいのか、ということだと思っておりますよ。

たとえば、原子力の資料に書かれたものを少しパラパラ見ていたのですが、率直に言うと、どうやってもグラフがわからないのですよ。ごめんなさい。僕はこれを見てもわからないのです。

しかしながら、これが、我々の人生に影響を及ぼすわけですよ。だから、こういう課題を扱うときに、社会全体として、どういうふうにあつたらいいのか。あるいは、研究者の立場、実際の実践家の立場から、いったいどういう情報交換と議論の場が必要なのかと、それを考えなければいけないときなのではないでしょうか。これは、非常に複雑だし、難しいから、余計にそうなのですからね。

P1 : 原子力も地震学もやはり難しく、わかりやすい話で噛み砕いていくと、非常にシンプルな話になってしまって、それが、逆に研究者自身に、逆のフィードバックがかかって、思い込みにつながってしまうところを、私自身が、今回、自覚しました。

アスペリティ・モデルも、最初に出したときは、地震性滑りが卓越する領域がアスペリティで、それ以外は非地震性滑りが卓越する領域と言っていました。アスペリティでも、非地震性滑りが起こるし、アスペリティ以外が動いても、地震性滑りを起こすということは、シミュレーションから出てくるのですよね。

しかし、そういう言い方がわかりにくくて、二元論的な解説を一般にしていく中で、自分自身の、だんだん思い込みがそっちにいつてしまっている。あたかもアスペリティ以外で、地震が起こらないかというような思い込みに至ってしまったということをしごく反省しています。その辺を、非常にまじめに、今度解説しようとする、もう訳が分からないような解説になってしまうし、そこが、いつもしごく悩ましいですね。原子力も複雑なのでは？

P2 : 原子力の場合、私は、ずっと NHK で解説をやっていたので、どのように報道がされているのか、わかっているつもりであるのですが、NHK の解説はわかりやすいですが、全部を説明できることではないですね。あとは、いくつかの雑誌にわかりやすいように出して理解をしていただく、ということっております。

原子力の場合は、発電のシステム自体は簡単なのです。単純に核燃料を燃やして（核分裂を起こさせて）、水を熱して蒸気を出して、タービンを回す、です。一方で、放射性物質の放出のリスクを理解して、そのリスクを受け入れるか受け入れないかという、その問題のほうが重要なので、そこをどうやって、皆さんで議論していくのか。そこを、今、いろいろな活動をしていって、どのような活動をすればいいのかを含めて、議論を広めてい

く必要があるかなということをおもっているわけです。冷静に広めていくのが、非常に難しい。

リスクの扱い方

土屋：話題提供②の最後のシートにあります、科学的想像力を受容する文化や、行動の迅速性というのは、やはり社会に、今、どういうことが起こりそうなのかを、特に経営者に伝えることができるか、あるいは、どのくらいリスクが高くなっているかを伝えることができるかにも、依存しているところなのかなと少し思いましたけれども。

P2：私たちは、常にリスク運用をしているのです。それで、先ほど、経営判断ですよと申し上げましたけれども、我々は、技術的にはリスクはこうですよと言うことはできると思うのですが、では、どうするのですかと。このリスクを採用するかしないか。またリスクへの対策を取るか取らないかというのは、非常に難しい問題です。最近悩んでいるのは、そこをどういうふうにすれば、判断基準を与えることができるのか、ということで、私は非常に難しい問題だと思います。

我々はずっとリスクに向うべきだ、考えるべきだという話をしていますが、経営の中で、リスクの定量的な議論をしてきたことは、たぶんほとんどないのだと思います。リスクにより経営判断をするというのは言葉だけなのです。定量的な判断をするには、やはりきちんとした数値を持ってきて、これをやった場合と、やらない場合、どれくらいリスクが違いますかと比較する必要があります。先ほど数値を出しましたけれども、本当は、見ればすぐわかることは、やはりあるわけです。たとえば、10のマイナス何乗しかないものが、これをやると、 10^{10} のリスクになる、というのは、ものすごく大きな差になる。そういうところが、判断として出せるようになるような社会にならないと、駄目なのです。経営においては、そこまで判断しなければ、本来はいけないわけです。そういうことを、今までやってきたことがなかった。

A1：いいですか。もう一つ言うと、これは、何か、社会的な政策決定なり、意思決定をやるという、そういう課題ですよ。そういうときに、今、おっしゃっている、システムの専門家が出してくる、いろいろな情報あるいは判断と、それから、最終的に意思決定をするところでの判断と、それぞれありますよね。それが、たぶん違うだろうとおっしゃっていると。

では、意思決定する者や、さらには、それを支持する普通の人も含めての一般国民ですけど、理解のレベルを違っていいのか、違わなければいけないのか、それともどうあるべきなのか。リスク・コミュニケーションという言葉をお聞くたびに、私は、それを思うのですよ。私は、率直に、リスク・コミュニケーションというのは、「リスクがあるけれど、あなた方、受け入れてね」というような対応で今まで行われてきたように思えるのです。

そういう意味で、もう一度戻って言うと、それぞれ判断をしたり、それをサポートしたりする人々が、どの程度の理解、判断をすればいいのか。それは、レベルが違うのか。専門家のやる判断と、政策判断や決定をする人の判断と、それから、きっと一般市民、普通

の人の判断は違うでしょうね。しかし、それが、どういう関係にあるのでしょうか。そこが、やはり非常に大きな課題で、原子力を扱う場合には、まさにそれが問われているのではないかというのは、僕の印象です。

P2 : ぜひ、それをやっていただきたいと思います。基本的には、私は、リスクというのは、何かを判断するときには、皆が一緒に共有して扱える問題だと思っているのです。ただ、言葉はいろいろあるので、いかにわかりやすくしていくかは必要だと思いますが。リスクという対象は同じなのであって、同じものをどう表現するかの違いです。そのこのところはこういう方法でこういうふうにしていますよという、共通の理解は必要だと思います。そのあたりは次回にもっと議論をしていただければいいと思います。

リスクで判断するようにしないと。定量的な、正しい判断。共通の尺度で判断するのは、できるのではないかと思います。

E3 : リスクの件については、次回にまた。今、おっしゃったことで、少し気になることもあるのですけれどね。リスク・コミュニケーションとか、そういうことではなくて、そもそも、どういう問題を解こうとしているのか。どういう意思決定問題であるのかということ、全然ディスクリライブされていない。だから、何のことかさっぱりわからない。

物事には、ストーリーがあって、起承転結があるわけですよ。たとえば、原子力をつくりたい、原子力に反対したい、あるいは、廃炉するにはこうだ、など、大きな、持っていきたい考え方がベースにあると思うのですけれども、それを導くために、こういう問題をこういう形で料理をして、こういうデータを使って解くのであると。こういう意思決定をするのであると。そのときの意思決定の判断基準は、たとえば、費用かもしれませんし、あるいは、安全の水準かもしれません。一つだけではないのかもしれないし、いろいろ判断材料があるかもしれません。いろいろな判断の基準があると思うのですけれども、それで、自分のこうしたいという主張を裏付けるような、問題を解こうとする、というようなことだと思うのですけれど。それが、うまく示されていないように思うから、個々のことをいろいろ言われても、全くわからないと。

専門の話で、少し専門家はごまかしてしまっているのではないかなと、少し思うところが僕もあるのですけれども、今日の地震の話に関しては、大変私はわかりやすく、来てよかったなあともものすごく思いますけれども。そんな印象を持ちました。

A1 : 2つばかり、言っておきます。まず、言葉の問題でいうと、リスクという言葉を私たちはどう捉えているか、というのがあります。リスクというのは、本来、メリットがあるものに対して、リスクだと。かつて、私も少し翻訳に関わった、ラングトン・ウィナーという人の、『鯨と原子炉』という本があるのですけれども、その中でも、ずいぶんそのことが議論されています。それはともかくとして、リスクというのは、メリットがあることに対して、リスクだということを、まず押さえておく必要がある。

そうすると、ある技術なり、ある政策課題が、それにメリットがあると捉える人たちと、ないと捉える人たちがいて、最初、それをどうするのかということなのですよ。

私が、さっき、リスク・コミュニケーションについて私の印象を言ったのは、リスク・コミュニケーションは原子力だけではありませんけれども、ここ 30~40 年、私が眺めてきた中で言えば、かつてのリスク・コミュニケーションというのは、分かってもらえれば何とか認めてもらえるのよというふうな態度でやってきたものが、非常に多かったというのを、私は言っています。今でも、まだその流れがあるのですね。JNES（原子力安全基盤機構）のホームページに私も登場したこともあるのですけれども、まだその状況が続いているように私は思います。だから、そういう話は少し脇に置いて、もとに戻って言えば、かっこつきで「リスク」と言いますが、「リスク」の課題を政策としてどうするか、社会全体としてどうするかというときに、それぞれ関与する、あるいは、関与してほしい人たちが、どういう立場で、だけではなくて、どこまでの理解でということ、我々が求められているのか。

たとえば一般の人に、「原子力の仕組みを全部わかれ」と言っても無理ですよ。しかし、彼らには、彼らの判断がある。私も含めて、それぞれの判断がある。では、それぞれの立場で、どういう理解の仕方や判断の仕方をしていいかということになるわけですよ。だから、それこそが、こういう非常に複雑な課題を扱うときに、私たち、わりあいこういうことに関わっているような人間が考えなければならない点ではないか。僕は、さっきから問題提起しているのは、そこなのです。

土屋：それは、私に対する宿題だとも思いますので、ぜひ、次回、頑張ってやりたいと思っています。ほかに、何か皆さん、確認や質問など、あると思いますが、いかがでしょうか。

なぜ活断層は見落とされてきたか

A3：もとに戻すような話で、悪いのですけれども、土屋さんの資料に、浦底断層のことが出ています。バックチェックで、もう認めた、その前提でという話になっていますが、実は、今日、原子力規制委員会が北陸電力の志賀原発に対する調査に行っています。私が言いたいの、もう一つ、もんじゅ。それから、美浜。これは、敷地の近くに、白木一丹生断層というのがあって、これも 2008 年度のバックチェックで活断層認定がされました。設置許可のときは、活断層ではなかったのが、2008 年に認定されました。今日、規制委員会が調査に行っている志賀原発は、ほぼ敷地境界、正確な位置はあとで確認してもらえばいいのですが、そこに福浦断層というのがあります。バックチェックでも、活断層ではなかった。それが、今日の調査では活断層になっています。これは、電力会社というよりも、コンサルがみんな調べるわけですよ。いくつかコンサルはあるのでしょうか。電力会社お抱えのコンサルが、同じような手法で調べて、なぜこういう違いが出てくるのか。一つ一つの問題ではないですが、それが活断層として認められれば、しかも敷地に近接してあれば、話題になっている短周期の地震動はすごく大きくなるはず。

こういうものが、なぜ漏れてくるのかという、そういう、今の体制といたしまして、申請されたものを認可するという、評価の問題にまで、ぜひ話題にしてもらいたいというふうに思います。

土屋：活断層の認定も、たぶん、いろいろな知見が蓄積されたり、証拠がそろってきたりして、活断層になっていったものもあると思うのですが、やはり科学的な知見が、積み重なってくると、そういうことも一つもあるのかなと思います。

A3：私は、そうではないと思うのですね。つまり、白木一丹生断層には、12月に行って見えました。700、800mの距離で、その断層から美浜原発が見えるのですね。露頭も誰もが行ける場所にあるのです。これがなぜ報告に載らないかというのは、柏崎の経験で言えば、不都合なことは見なかったことにする、私はそうなのだと思うのです。やはり、これは科学的な問題ではない。柏崎の場合は油田地域で、石油関係者は全部知っていて、活断層という言葉は使っていませんが、原発に支障となる地質現象は石油関係の論文に全部出ているのです。それを電力会社は活断層ではないということです。ずっと来て、2007年の地震があって、それでいろいろな議論があった。そういうことを経験している立場からすれば、電力会社は活断層を隠すと言いましょか、消すと言いましょか、そういうことをやってきたことが、掘削してみても活断層だということになるということを経験していると思うのですね。

なぜこんなことが起きるかというのは、すごく深刻な問題で、今、明らかになっていることが、果たして全部だろうか。全部明らかになっていることを前提の議論では、私は不十分だろうというふうに思って、例として浦底はすでに話題になりましたが、すぐ近くの白木一丹生でも同じことが起きています。今、6.8の起震断層という評価になっています。

今回、そのバックチェックをすり抜けた志賀原発が、保安院の段階の意見聴取会で話題になって、規制委員会になって、報告が出てきたのが去年の12月ですね。それから活断層になると。だから、まだ見落としがいろいろなところにあるのではないかという意味で、それはもう知見が充実したから活断層になったのではなくて、隠されていたものが隠しきれなくなって、表に出てきたというふうに見るべきだろうと思います。経過からそうなっているということです。

土屋：ありがとうございます。扱う問題としては、やはり活断層認定というのは、とても大事なことなので、議論のテーマとしては、とても大事だと思っています。

津波対策の十分さを評価するには

A4：今日お話を聞いて、津波の予想が非常に難しいということは、よくわかったのですが、一方、たとえば、示してくださった中部電力の、新しい施設設置の図がありますよね。もし仮になのですけれども、私は、被害をもたらす原因の解析というのが一方にあり、もう一方で、災害が起こった場合に、それをどう防ぐかという防災の施設があるということで、両方から考えていかなければいけないと思うのですが、津波の発生頻度や、規模はわからないにしても、最大級のものが起こったとしても、こういう防災施設を立てれば大丈夫だという考え方が、もし徹底すれば、それはそれで国民に納得してもらえらると思うのですね。今、たとえば中部電力の図で示されたような規模の防災がきちんとなされるとするならば、どうなのでしょう。この防災のやり方に関してもっとも厳しい批判をす

るような科学的知見を持っている人から見ても、これは文句のつけがたいものであるのかどうか。もし、そういう批判を乗り越えられるような、かなりの充実度を持ったものであるとするならば、たとえ津波の予想がきちんとできないにしても、これで行けるだろうというふうに納得してもらえるものになると思うのです。その辺の判断、もし経営的判断とおっしゃるのであれば、この経営的判断というのは、こういう施設を建てた後に、これを運用するときの問題として、どこらへんが問題なのかということも、考察の中にはちらちら出てきているように思うのです。つまり、私が言いたいのは、地震学者なり津波のことを研究していらっしゃる方が予測できる範囲の問題と、それから防災面で計画を立てていく人の問題と、実際にそれを運用する人の問題ということで、どれかがきちんと乗り越えられる条件を示せば、他方がうまくいかないとしても、いけるのではないかなという見通しを立てて納得してもらえるものになるのではないかなと気がしたのです。その辺の考え方について少し聞きたいのです。

P2: 私はこの資料の後ろのほうに表をつけましたけれども、単に設備を置いただけではなくて、これは、本当はきちんとそれぞれのシステム、機器を対応させて、機能が維持されるという評価をやらなくてはいけない部分があるのではないかと思います。お手元の資料の17ページは、津波が来たら、電源が喪失したら、どの設備が活着しているかという図です。これは、たとえば、津波の高さというのは、（ほかのところでもあるのですけれど）22mを越して入ってきた場合の想定をして、どのように電源を保護し、喪失した場合にどのように電源を確保するかというので、たとえば直流バッテリーがなくなって、大容量の電源車を持ってきて対応する、というような可搬型設備を入れたとき、これでどこまで対応できるのか、炉心損傷まで行くか行かないかを評価をするような仕組みを、今、開発しているところです。そういう意味で、浜岡での地震・津波対策の図には、電源車だけではなくて、山の上の方に、地上30mのところにはガスタービン（発電機）がありますけれども、そういったところからケーブルを引っ張ってAM（アクシデント・マネジメント）対策をします。そういったテンポラリーな設備を使って、また活着している設備はなんでも使って緊急時対応をやりましょうというような仕組みです。どれが死んだら（どの機能を失ったら）何ができるかという評価をしながら、どこまでできるか。これが非常時の対応でしょう。

これは設備としてはできるのですが、あとは訓練をやらなければいけない。これは要するにだまってつなげられるわけではなくて、30mなどの津波が来たときには、当然、周りのものは壊れたりしますから、後からケーブルでつなぐ部分が出てくるわけです。そういったことがどれくらいできるかという訓練をいろいろして、その実現時間を調べて、時間内にできるかどうかという評価をするという、それもこの中に入っているのです。ただ、机上の訓練ではなく、具体的に訓練をやってみなければならぬ。色々な気象環境などで、時間を把握できるほどにやってみないといけない。それは、もちろん現場でやっていますけれど、様々な訓練を組み合わせていかないと非常時の評価はできない。しかも、実際には、冬場や大雨などいろいろ難しい条件がいっぱい出てくるわけですから。

だから、いろいろなときにいろいろな訓練をして、どれくらいかかるかというのを把握していくことが重要なことなのだ。そういうことがどれくらい、サイト、電力事業者の中で自覚しているか。そこをウォッチするのが我々の役目だと、学の役目もそこにあるのだというふうに思っているのです。でなければ、原子力の安全は担保できないのです。設備だけでできると思ったら大きな間違い。いかにやるかということだと思いのです。詳しくは説明しませんが、そういうことをこの資料の中に書かせていただきました。

津波のところは、先ほど、いろいろ議論があったのですが。リスク評価を学会でも我々はやっているのですが、津波の大きさはものすごいばらつきがあるわけです。だから、今、平均的にどうだっけ出していますけれど。あとはリスク評価の問題です。どれくらいの確率で来るか、どれくらいの確率で炉心損傷が起こるか、について、10のマイナス何乗という値を、どれだけ設備をやれば、どれくらい下がりますかという評価をしています。だから、確実にできるというものではなくて、どれくらいリスクが上がるか下がるというので、いろいろな設備など対策を取っていくということをやっていかなければならない。それがこういうようなリスク評価をやる意義だと考えています。

土屋：今、動き始めた感じですか。

P2：リスク評価については、これまで我々は地震時のリスク評価の標準をつくっていたので、津波による事故の後には、すぐに津波によるリスク評価の標準はできたのです。だから、中越地震後、地震動への対応の中に、耐津波リスク評価標準が必要と理解し、本当は3.11の前、津波の前につくろうということで、津波のリスクに対する評価のPRAという、リスク評価の活用的な評価をつくろうという、リストまでつくってやってきたのです。ただ、どれくらいのスパンでやるかというのは、結果論ですが、起こってみないとなかなか難しくできなかったということです。我々の反省なのですが、起きたら、半年で津波のリスク評価できましたから。そういう意味では、やろうと思えばできるのですけれども、いつやるかというのは、非常に難しい問題があります。

これは、我々が、2011年の秋に、もう完成させた、リスク評価の手法です。これに今、地震と津波を重ね合わせてどういう評価をするかというリスク評価標準をつくっています。

土屋：何か起きるとすぐ動くのですけれど、起きるまではなかなか少し腰が重いですよね。

P2：やらなければいけないというのは、ディスカッションして項目に上げていたのですが、残念です。しかし、それもやはりすぐにやるというのはなかなか難しい問題で、どういう組織がどのように拘束力を持ってやれるか、ということです。要するに、資源もいろいろ限られて難しいなというのが思ったところです。ただ、そこをどういう優先順位でやったらいいかというのは、またリスク評価をしながら本当は、やっていくのがいいのかもしれないけれども、まだそこまでいっていません。

E3：特に一般の人が、こんなに大きな津波がきたらもう、原子力施設は駄目だろうなどとよく言われるのですね。そのときに、よく理解していただいているなと思ったのが、単に、外力だけではなくて、要するにその対策があり、オペレーションがあると、いうようなこと

も述べていらっしやっただので、あるものを越えてしまったらもう駄目だということではないということ認識していただいて発言されているなということ、私の勝手だとは思いますが、とにかく大きな津波が来たらもう駄目だよ、みたいに思う人もやはり多いのですよね。

土屋：その他、ありますか。

誰が何をどう動かして新知見を取り入れるのか

A5：話が少し戻って申し訳ないです。さっきおっしゃった、新知見、受け手の工学側で新知見だと認定されての話ですが、トリガーというのがやはりよくわからないんです。たとえば、津波の話にしても、推進本部が津波地震はなかで怪しいと思っておられたかもしれないけれど、一応、公式なリスク評価として 2002 年に出ていたのを、いつまでもトリガーがかからなかったわけですよね。だから、それは学会論文よりはたぶん位が上だと思うのですけれども、それでもトリガーがかからなかった。そうすると、いつ誰がトリガーをかけるのか、誰がチェックをしてくれるのかがよくわからない。そうすると、いつまでも「不確かだ、不確かだ」と言っていると結局動かないということで、動かないうちに来てしまったということなのですから。

P2：トリガーの話をするならば、本来はもっとしっかりしたものがある必要があると思うのです。今はほとんど規制にかかりました。要するに、すべてのものがバックフィットすると規制にかかっているのです。規制で取り込めば少なくともすべてトリガーになります。そうではない仕組みも必要だろうということで、我々は今、取り組んで来ています。これもトリガーにしなければいけないと思うのは、日本は比較的外国に弱いのですけれども、IAEA の基準を汎用にするということ、我々は今取り組んでいるのです。IAEA の基準を反映する、IAEA の基準を使いますよというのが、今の日本の基本的な考え方なのです。そういうことで、IAEA の基準を日本の基準に取り込んで来て、日本の基準の見直しをするようにしています。元々、今は日本の基準見直しをしているわけですから、なぜ、という議論には十分にこたえられないから、海外の IAEA や NRC の基準を導入して、IAEA が変わった場合には、その変更は容易に日本に導入され易く、変更しやすく使ってもらえる。そういう仕組みを取り入れているのではないのでしょうか。新しい知見にどうやって取り組んでいくかというのは、IAEA をトリガーにして進めようということでしょう。

そうしないと我が国の仕組みを変えることは難しいということで、IAEA を取り入れるというのは世界の共通になりますから、変更がうまく行くのでしょうか。共通のパイを持って行って、世界の人みんなで議論して安全に取り組ましようという仕組みをつくらうというのです。今、日本も協力して、IAEA では劣化事象のデータベース (IGALL) など世界の情報の共有化への取り組みを行っています。それがうまく機能するかというと、もちろん、これから PDCA を回して使えるものにしていかないと機能するかどうか分かりませんが、そういう仕組みなどは、有効なのかと思います。私たちが産官学で協力して取り組んでいるところです。

A5：うまく PDCA が回ればいいのでしょうかけれども、ただ、実際、耐震指針でも、1970 何年かにかできたのが、20 何年か後によりやく変わるまで新知見が入らなかった。それが結局、津波の想定見直しも遅れた原因だと思うのですけれども、それが本当にうまく回るのかというのは、やはり一般人から見ると覚束ない。新規制ができた直後はいいけれど、その後何か新知見ができたときに、本当に取り入れられるのかなという不安があるのですよね。

土屋：それは私も同感です。

P2：それをいかに回せるようにするかというのは、我々の役割ではないかなと思っているのです。つまり、学術の人たちが、やはりバックアップして言わないといけないのではないのでしょうか。黙っていると、先ほどの話だと事業者など現場でやる人たちが本当はやらなくてもいいのではと思ってしまうのではないのでしょうか。

A5：まさしく本音ではそうなのでしょうね。ええ。

P2：だから、我々は、必要なことをやれるような仕組みをつくっていかないと。要するに、学は言わなければいけないのだということです。学術をやっている人たちの役割が、そこにあるのかなと思います。

A5：しかし、逆に言っては悪いですけど、土木学会なんかは足引っ張っていたと思うのですけれど。

P2：これから変わっていくと思います。

E3：新知見は、必ずしも前よりも大きなものだけを取り上げるという新知見だけではなくて、今まで設定したものが、きわめてこれはオーバーエスティメイトだなというような新知見だってあるわけで。

A5：確実度が高まれば、そういうのはあるでしょうね。

E3：必ずしも大きくなる方向ではないということだと思いますけれどね。

P2：そうなのです。もっとも端的な例では、安全率はどんどん小さくなっていきます。機械工学の分野では、4 が 3 になり、2 になり、今 1.8 くらいまで下がっています。要するに、材料が持つ安全率、いわゆる設計上の安全率をどれだけとるかというのが、だんだん小さくなっている。それはデータがだんだん整備されて信頼度が上がってきたからなのです。そういうものでだんだん基準が下がっているものもあるわけです。それと同じように、他のものも厳しくなるのもあれば、易しくなるものもある。それは世界を見て議論していくと、新知見はみんなそういうふうになんか厳しくなったり緩くなったり、適切になっていく。

土屋：ただ、断層認定についての歴史のように、やりたくないもの、見たくないものは、いくら外圧があってもやらないというのは、原子力防災のほうでもあったことなので、本当にできるのかという疑問があるというのには、すごく同感しますね。

リスク評価の使い方～社会との対話と安全性向上の観点～

P2：今度お話があると思いますが、リスクという話がある。日本人は皆さんリスクがあるのを嫌うではないですか。本当は、リスクは、リスクだけではなくてベネフィットがあつてのリスクなので、どこでも必ずリスクがあるにも関わらず、リスクという言葉を使つてはい

けないので、「安全です」と言ってしまうのです。私は、それが一番大きな問題で、安全と言わなければ駄目だという風土をつくっているのは、もっとも大きなリスクなのです。今、規制庁も一緒になって、みんな「安全です」と言っています。「こうすると安全だ」「安全を確認する」「安全です」と言うために一生懸命やっているのですが、「安全です」という中にリスクがあるのだということを、やはりきちんと理解してなければ駄目だと思うのです。

土屋：こういう話を普通の方たちとやると本当に盛り上がり、もっとリスクについて議論しようというふうになれるかもしれませんよね。

A1：そういう議論のときに、放射能について、私の家内は、「嫌なものは嫌よ」と言うわけですよね。だからさっき言ったように、いろいろなレベルの理解やいろいろなレベルの関心があるわけですよね。何か物事を決めていくときに、では、どうしたらいいか。これはある意味でそういうことを議論する場でしょう。「嫌なものは嫌よ」という人たちをどう取り込んだらいいのか。それから、もちろん電力業界のおじさんたちに、「あなたたちやらないと後で困るよ」というふうに言わなければいけないわけでしょう。そういう、いろいろなレベルがあると思うのですよ。それをどうすればいいかということではないですか。少しそこが、僕、もう一つ、それぞれのいろいろな関わりの立場があって、そこをもう少し明確にしながらか議論していかないと、先へ進まないのではないのかな。余分なことばかり言っておめんなさいね。

E1：リスクという言葉で、土屋さんがおっしゃっている、津波やいろいろな分野の考え方、これは賛成です。あとは、それをうまく安全性を上げることにつなげなければいけない。そこで、リスクを下げるために事業者は、どうしてもコストが上がるから、それだけではやはりやりたくない。むしろ、リスクを下げると、ボーナスになるようインセンティブをつけるような仕組みを提案して、自主的に事業者は安全性を上げて、社会もそれを応援する、そういうのを、もう少しポジティブなことを提案する仕組みがあったらいいかなと私は思いますけれどね。

土屋：無理やりやらせるよりも、自らやれるようにする。性善説であればそういうことですがけれど。

P2：今の話ですと、アメリカでは非常にうまくいっている。それはなぜかと言うと、アメリカでもプラントは定期検査をします。いろいろな検査をしたり、対策を取るときには、NRC（原子力規制委員会）にお金を払ってやってもらっているのです。NRCは定期検査をやるときにすごくお金を取るのです。だから、リスク評価をきちんとして、リスクを下げると、検査項目が減りますから、かかるお金が大きく減るのです。ですから、リスク評価を必ずやるのです。改善をするときも、工事をするときも、定期検査をするときも、小さな改良工事でも基本的にはみんな、現場でNRCの人と話をしながらリスク評価をして、どれをやる、やらないという判断をするのです。基本的にみんなお金に関わるのですよ。だから、アメリカの電力会社はみんなリスク評価に一生懸命取り組むのです。NRCもみんな

なリスクで評価をし、やる、やらないという判断をしていくのです。つまり、みんなお金に関わる。検査をするのにすごくお金がかかるのです。

そういうふうにして NRC は、自分のところの研究や、たくさんいる職員を養っているわけで、そのためにたくさん検査するときには職員をたくさん充てる。だからそういう意味で、お金をきちんと要求する。要するにいずれにもメリットがあるわけです。だから、リスク評価をして、ということになってくるのだと。そういう仕組みでもやらない限り、なかなか難しいのではないかなと思うのですけれど、日本はお金という面では非常に難しい問題があって、今はやっていません。

土屋：今日は、本当に、とてもわかりやすい地震の総括のご説明をいただき、非常に簡潔な津波対策のお話をいただきありがとうございました。おとといぐらいに東海村の人たちと、原電に行ったのですね。さっきの浜岡と同じように、いっぱい対策をやっている。ポンプ車や電源車がいっぱい置いてあって、住民の人たちが「これ動かせるんですか」など言っていて、まさにオペレーションができますかというのを心配していました。まだまだ、原電は「できます」とは言い切れていなかったもので、さらに努力してくださると思うのですけれども、そういう、一般の人たちの視点というのは、非常に総合的にリスクをどう管理していくかというときに役に立つのかなというのが、私がやってきたリスク・コミュニケーションの実感なので、みんなでリスクを削減し、さらに安住しないで新たな知見を積極的に生かして行くような社会に一步でも近づけたらなと思います。

本年度3回にわたって、つたない司会進行で申し訳ありませんでした。手探りでやっていたので、アンケート用紙にいろいろお書きいただきたいと思います。次回は、先ほどから何度も出ているリスクの問題をぜひ議論し、さらに、それをどうやって社会と共有し、考えていくか、誰と考えていくのか、どういうふうに考えていくか、というような議論のところに、先生方のお知恵を拝借したいなと思っておりますのでよろしく願いいたします。今日はどうもありがとうございました。