

特別
講演

インフラ維持管理とモニタリング

東京大学工学系研究科 社会基盤学専攻特任教授（講演時） 藤野 陽三

ご紹介いただきました、東京大学の藤野です。今、紹介がありましたけれども、私のフィールドというときは外の人にも「橋」と言っておりまして。大きな橋をたくさん作ったもので、大きな橋の特に振動とかですね。最近ですとモニタリングとか防災とか保全、こういうのを私の分野にしております。みなさんは、インフラに関わる人が多いと聞いていますので、インフラのモニタリングを中心にお話しさせていただきます。

1. はじめに 想定外とは…

橋やトンネル、インフラというのを考えたときに、誰もがすぐに思い浮かべるのが高い公共性、つまり高い安全性が要求されるわけです。そのために色々我々はやらなければならないことがあるわけです。橋やトンネルの問題は、長い供用期間、大体50年とかそれ以上使うわけですが、結局世代を超えて管理をしなければいけないということです。先を見たら誰がどのようにどれだけの期間使うかわからない、誰が管理をするかも実はわからないかもしれない、事後の予測がなかなか難しいのです。50年、100年先のことから、技術も全部変わってしまう。もう一つは長く使うので、我々は古い物を相手にしなければいけない。だから古いものを、だまし、だましでも安全に使わなければならないというのが非常に大変なわけです。

ですから、最初のときにはなるべく維持管理には頼らないようにということで、どっち

かと言えばインフラには高い安全率を課していると思います。それからご存知のように設置する場所の地盤とか気象とかいろいろな条件が一つひとつ違いますし、全く一個一個設計するという単品にもなっています。それによって色々な意味で不可侵性がある。橋一つにとっても結局はネットワークの一部でありますから、それ一つ欠けてもそのネットワークを潰してしまう、殺してしまうというようなことがあります。

それからランドマークのような役目もあります。東京には聖橋というのがありまして。1929年に太田圓三さんが設計した橋ですけれども、ここに掛かったアーチです。50年ぐらいたったあと、中央線ができていますね。橋はやっぱり何も変わらないし、周りの緑も変わらない。しかし、後ろの建物や景色が全て変わってしまいます。ですから橋は地域のランドマークなのです。ある種の記憶のリファレンスですかね。ある場所の記憶になるということです。ですから、そのためには橋は5年10年ごとに変わってはいけないので、安全に長持ちさせなきゃいけないという訳です。

インフラは長いこと使っていると、色々な予期せぬことが起こります。想定外という言葉が結構使われましたけれども、想定外というのは結局知らなかったことでして、普通の場合にはもし考えていけば対応できることが多い。場合によっては知らなかったことにしたいことを想定外と、我々は言ったりしますね。英語では何て言うかということ unexpected

ですね、想定していない、考えていなかったことです。

想定外を説明する話として、昔、ゆりかもめというレインボブリッジを走る電車が、あるとき車軸が折れたんですね。ここは無人運転なので、なかなか列車を取り除けないというので、2日か3日止まったままで大騒ぎになりました。そのときの新聞の記事で「ゆりかもめの社長会見。想定外だった」とあります。社長さんは想定外で、検査では見抜けなかったと言われるわけです。こういうときによく想定外って使われました。想定外はある種の弁明に使われるようです。

インターネットで調べるとサッチャーさんの法則というのがありまして、この前亡くなったイギリスの政治家が The unexpected さっきの想定外ですね、予期せぬことは起こるものだと、だから準備せよと、サッチャーはフォークランド戦争のときに兵隊に言ったということです。

想定外の例をいくつか私の関係したもので申し上げますと、2000年にロンドンでミレニアム・ブリッジというのが開通しました。これはノルマン・フォスターという有名な建築家が参画して、コンペで1位になった鳴り物入りの橋でした。非常に斬新でありまして、エリザベス女王をお迎えしてテープカットをしました。開通してたくさん人が通ると、思いがけないことに、横揺れが非常に大きかったのです。こう見てみますと、みんなわざと橋を揺らしているように見えますが、これは結局床が揺れているのです。みんな同期して歩くため、同じ歩調で歩き $1 + 1 + 1$ が大きくなる、それで揺れたようです。これはヨーロッパ中で大騒ぎになりまして、もちろんこの橋は1年半閉鎖されました。私はその10年ぐらい前に、人間の動きというのはシンクロするので、場合によっては橋を横に揺らすのだ



図1 ミレニアム・ブリッジ

という論文をイギリスの雑誌に書いていたのと呼ばれたのですけれども、そのネタになったのはこのビデオです。1989年ですからもう25年くらい前ですが、もちろん日本の設計でも想定しない横振動で、大晦日の12月31日の競艇場の橋で、競艇が終わるとみんな帰るのですが、みんな知らない間に、無意識に同期すると橋が揺れる現象が起こります。私はこの同期現象は知っていたのですけれども、イギリスの設計者は知らなかった。だから知っていれば何か考えたかもしれない。けど必要するに知らなかったというわけです。

こういう問題は意外といろんなところにあるということが後で色々勉強してみると分かりました。例えばホテルがパッパッと隣り合わせでみんな同じ時に光る現象があります。これは生物界にある一種の同期現象だと言うのが物理学の本にありまして、自然界には色々なところでシンクロナイズーションするということが書いてあります。だからこういうことを勉強していれば、あれは起こらなかったわけです。我々の知識が不足していたわけですが、その訳本も出ています。その1章は橋で、先ほどの揺れる橋がテーマになっています。

これは最後のスライドになるのですが、ケンブリッジ大学の先生の研究ですが、イギリ

スで非常に研究のブームになっています。メトロノームの長さがちょっとずつ違って、バラバラに動いているのですけれども、あるプラットフォームの上に乗っていて、微妙な非線形があると、このメトロノームはいつの間にか同期してしまうという物理学の論文です。

まあ、そういうわけで、要するに我々は常に勉強して、新しいことを獲得していくことが想定外をなくすことだということで、このお話を終わりにしたいと思います。

2. インフラと自然災害

インフラというとやっぱり考えなければいけないのが、災害、自然災害です。自然災害を守るためのインフラもたくさんありますが、見てみますと、日本は自然災害の先進国で、アメリカの次に日本は自然災害で物を失っているという事実があります。昔は、何とか台風がくると何千人が亡くなった時代がありました。今は人が亡くなることは非常に稀になりましたけれども、やっぱり毎年2兆円、3兆円が自然災害で消えていって、2兆円、3兆円を自然災害のために投資をしているというのが日本の現状です。ですから1995年1月17日の阪神大震災も我々の分野ですとある種の想定外であったというわけです。

ハリケーンサンディっていうのが去年の秋に来ましたが、日本に来たのではなくてニューヨークに来たのですが、ニューヨークはそんなにハリケーンが頻繁にくる所じゃないものですから、高潮で水がfloodして、それでおまけにfloodした水が変電所や発電所の中へ入っていった。発電所を壊して大停電になったというわけです。新聞の記事で色々調べました。というのは、私の学生がニューヨークの橋を調べにたまたま行っていて、ちょうどこのハリケーンサンディにぶつかって、2週

間何も研究成果をあげずに帰って来なければならなかったのですけれども、その時に、ワシントンポストがあることを書いていました。読みにくいですが「4 Japanese lessons for withstanding big storms」と。つまり、大きなストームに立ち向かうための4つの日本からの教訓です。そこに、首都圏外郭放水路と呼ばれる写真が出ていました。地下に川原のような大きなタンクを作って水を入れる、すなわち水がワーと増えたときにここに貯めるわけです。こういうものは、ニューヨークには一切ないですね。

これは100年に一度かという事象に対応するもので、普段は言ってみれば無駄のように見えるわけです。我々が災害に対して備えるということは、余裕だと思う人と、無駄だと思う人に分かれると思います。だから無駄と余裕は紙一重だと私は思います。考えてみると我々も物を設計するときに安全率を掛けます。2とか1.5とか平気で掛けますけれども、でもそれは無駄じゃないかと言われれば、確かに無駄かもしれない。でも車の100台に、1000台に一つ何か問題があってはいけないというので、それを余裕として許しています。ですからインフラに関わるときに、「皆さんがやっていることは無駄じゃないですか」と言われるのですが、決して無駄ではない、これは余裕なのだと言っています、世の中に余裕が必要なのだということを、どうやって定量化するかということが非常に大事なのです。

京都大学のエネルギーの買い取り価格などの経済学の先生が友だちなので、滅多にこないけれど、非常に影響の大きい災害に対して、経済学的にはどういうふうに対応するのか聞いてみたのですが、教えてくださいましたのがこの一冊の本なのです。ブラックスワンのお話です。スワンというのは大体白ですから、白でないスワンというのは、黒い白鳥ですが、オ

ーストラリアで黒い白鳥が見つかり、みんなで驚いたそうです。要するに事前に予想できず、想定外みたいなものですね。起きた時のショックが大きな事象のことをブラックスワンと言って、経済学でもそういうことで通じるのだそうです。

その本の副題に「あり得ないなんてあり得ない」という副題がついています。この本が有名なのは、2008年のリーマンショックを予測したと言われている、学者であり、評論家でもあるタレブさんという方が書いたからです。その本を読むと「無駄が大事なのだ」と書いてあります。母なる自然は無駄が好きで、守るための無駄を自然は色々な形で用意している。例えば、人間の身体は、目が2つある、肺も2つある、腎臓も2つある、脳まで2つあると書かれています。要するに人間は、神様が作ったときにやっぱり色々な意味で無駄がある。目も1個あれば見えるけれど、そうじゃないといけないので2つ作ってあるというわけです。ですから、まったく逆方向の無駄が、浅はかな最適化だと言うことになります。つまり物事を最適にすることは良いことだけれども、実はそれは非常に危険を増やしていることになる。これは経済学の人には怒られるかもしれないけれど、「経済学は大部分が浅はかな最適化の上に立ち」と書かれています。ですから、最適化というのは、聞こえは良いけれども、よほど気をつけないと脆弱な社会を作ることになるというようなことがこういう本に書かれています。また、成功報酬をもらえる人に原子力発電所を経営させてはいけなくあります。これは安全と利益をどうバランスとるかというときに、やはり利益に釣られると色々危ないことが起こるので彼が書いたのですね。

日本では、2年前に東北で3.11の大地震があったわけですが、それがマグニチュード9

で、その地震は想定外と言われたほど大きかったというのが定説です。世界の地震学をリードされた金森博雄先生という著名な先生が1980年に論文を書かれていて、東北地方の地震は、ある種の大きな地震は起きないというようなことを、直接言ってはいなかったのですけれども、地震学者がそう受け取るような論文を書かれました。それはどういう論文かと言いますと、プレートには、新しいものと古いものがあり、新しいものは、延性があり、しなやかに伸びるので、エネルギーをたくさん溜め、解放するときの地震が大きいということです。古いプレートは、脆くなるので、人間の身体と同じように。あまり大きなエネルギーは溜められないので、古いプレートの上であまり大きな地震が統計的には起きないということです。古いプレートは地震が小さいとすると、東北地方のプレートは古いですから、一般的には東北地方では大きな地震は起きないということで、政府の長期地震予測ではマグニチュード7.5とか、せいぜい8だと言っていたわけです。

しかし、金森先生はその後また、論文を書いています。2006年、地震が起こる5年前。それは東北地方のこの辺の地震をもう一回見てみると、毎年こうプレートが動いてきてこの辺に歪みがたまるけれども、色んな古い記録なんかを見てみると、エネルギーが放出されていない。だから、この辺では、論文の結論に大きなメガスラストイベント、つまり大きな地震になるか、大きな津波地震が起きるか、大きな静かな地震が起きるか、とにかくエネルギーはあそこにはたまっているはずだという論文を書かれたわけです。

また、私の持っていた1977年版の宇津先生という地震研究所の所長をやっていた方の地震学という本を見ると、津波を伴った大きな地震が869年に起きたとあります。すなわち

貞観地震ですね。こういう地震がやっぱり起きている。だからこれは地震学者のある種の定説だったわけです。

さらに、地震が起こる半年前の 2010 年の 7 月の日本原子力学会のレポートですが、このレポートは、原子力発電所の設計と評価における地震のための安全の論理が示され、地震の時には色々なリスクを考えなければいけないと書かれています。そのリスクというのは非常に起こりやすいものから、稀に起こるものまで色々ある。設計ですからあるところで線を引いて設計するわけで、この超えるものを随伴現象と言って、レジレアブルリスク、残余のリスクと言うのですけれども、残リスクはありませんということで取り扱っています。しかし地震は自然現象ですから、この前みたいなマグニチュード 9 の地震、おまけに津波ということが起こったので、やっぱり工学者というのは、確かにどこかで切らなきゃいけないし、設計を決めなければならないけれども、この辺の想定を一応色々しておくというのが、我々のこの地震からのレッスンじゃないかと思います。

3. インフラの安全性と点検・マネジメント

我々は、去年の 12 月に笹子トンネルの事故を起こしました。日本のインフラは安全なのかという問いを社会から突きつけられているわけです。それで、このインフラの安全性の話を少ししたいと思います。東京を例にとると、首都高が 1962 年、今から 50 年あまり前に開通しました。当時というのは、車はたくさん通っていませんけれど、これがずっと使われてきているわけですね。高齢化して、50 年経ってますます酷使というのが首都高の現状です。毎日 100 万台運ぶ、場所によっては、重いトラックが累計で 6500 万台通っている

というようなオーダーで酷使されているわけです。確かにあの当時作ったものですから、景観上も問題があると言って怒る人もたくさんいるわけです。例えば、日本橋の上には首都高が走っています。一橋の上にも首都高が走っていて、町並みのことを言われる人には、早くこれを取り除けと言われます。しかし東京の町の一部をもう形成していると言っても過言ではないと思います。

これだけ社会に貢献してきた首都高ですから、次の 50 年をなんとか安全にというのが今の時期です。ですから、精密検査を受け、本格治療、場合によっては手術して、人の動脈にふさわしく、かつ少しお化粧直しをする時期なんじゃないかというのが基本的な私の考え方です。

インフラが 30 年 40 年経つと一体どうなるかというのは、少し前にそういうことを経験したところを見てみる必要があります。調べてみますと、これはよく知られていることなのですが、アメリカの一番痛い事故は 1967 年に起きています。ですから我々の 50 年ぐらい前にそういう事故が起きていることになります。この橋は、1928 年にできた橋で、大体 40 歳くらいで、橋の 1 本の棒材がぽつんと切れて、橋が川の中に落っこちて、金曜日の夕方、車がたくさん走っているときなので 46 名の方が亡くなりました。実は、アメリカにも、この 60 年代の後半まで橋を維持管理するという概念はなかったようです。鉄だって太いし、コンクリートだってたくさんあるし、何かあるかもしれないけれども、しばらくは放っておいていいだろうということで、ずっと放っておいたら、40 年ぐらいすると部材がぽつんと切れて大事故になったというわけです。それで維持管理とか点検とかやっていなかったの、そのときは想定外だったわけです。

その後も事故が何回か起きて、それではい

けないというので、すべての橋は2年に1回検査をすることを義務とする法律が作られました。1970年のはじめから今に至るまで40年間、点検を2年に1回必ずやるようにしました。すべての橋の点検費用は国が、県とか市とかが点検するならお金を出すという仕組みで行いました。点検すれば色々なデータが集まり、そのデータをベースにマネジメントを展開するというのが、アメリカの今までの流れだったわけです。それでも37年経った2007年にミネソタで橋を落としました。点検はしていたけれども、点検では全部が守れなかったというわけです。これがそのときのスライドで、ビデオがたまたまウォーターゲートの上にあったのでこのショットが撮れたのです。この落ちた時、どこから壊れたかというのがすぐにわかって、結局はこの壊れたところの板が薄くて、設計ミスで壊れたということが事故の後1~2ヶ月で分かりました。壊れたのは、劣化、老朽化ではなくて、元々の設計ミスがトリガーになって壊れたということが分かりました。

ヨーロッパでもときどき、このように橋を落として、社会問題になります。我々の国よりも早く橋を作ったので色々な橋があって、アメリカの例えばニューヨークに行くと、どういう経緯になっているかを勉強できるというわけです。アメリカの私の友だちのヤネフ(Bojidar Yanev)さんという方が、「橋梁マネジメント」という本を書かれていて、我々が翻訳しまして、1万2600円です。この本は高くてもあまり売れませんが、著者割引ですと1万円なので、もし買っていただければ割引します。この本は非常にいい本で、ノウハウ本ではなくて、橋やインフラをマネジメントするというのは一体どういうことなのかが書かれています。ヨーロッパ人なもんですから、哲学的な



図2 ニューヨークの橋守ヤネフ博士

議論から始まるわけで、それで、私は副題に「技術・経済・政策・現場の統合」と書きました。つまり技術だけでも解けないし、経済やお金だけでも解けないし、国民に納得してもらおうということは政策で、且つ、現場が大事であろうと考え、この4つの要素をうまく組み合わせることがインフラのマネジメントだと思いました。

そのヤネフさんは、ニューヨーク市内の800の橋の古いデータを全部集めてきて色々見ると、こんなことが言えるだろうというのを書いています。それは橋の点数をつけて、この橋はここが悪いから6点、ここが良いから何点とつけるのですけれども、もともとの橋は、最初は7点です。満点が、だんだん年を取ると落ちてきて、2点になるとこれはもう大体取り替えか、使用禁止となります。だから使えない状態に7点からどのぐらいかかるのか、出来も悪いし、維持管理もまったくしないで一番悪いケースがこの30年の線です。つまり橋は場合によっては30年何もしないと、落ちる可能性が多分に出てくるということです。実際には、直したりペンキを塗り替えたり色々するわけですね。そうすると、実際の線は4点ぐらいになっていますが、4点を切ると橋としてはあんまり芳しくないというのがこの評点なのです。7点が非常に良くて、

4点を切るといけないというので、ニューヨーク市では4点は切らないようにやっているわけです。

何もしないと60年を過ぎると大体半分の橋はアウトになる。100あると50くらいの橋は60年経つと半分は使えない、使いにくくなり半分はOKだというのが、彼が求めた実際の橋のデータを基にした結果です。残念ながら日本は点検を義務化していないものですから、なかなかこういうデータがなくて、日本の橋はどうかと言われるとうーんというのが正直なところ。アメリカは目視にしろ、点検をずっと続けてきた結果、こういうのが得られているというわけです。日本も首都高も30年40年経ってきますから、色々なことを気にしなきゃいけないと思います。もう一つ日本が特に気にしなきゃいけないのは、地震です。2年前の3.11の地震でインフラは補強していたのでよかったと言われていますが、地震は明らかに一番弱いものを突いてきます。例えば、茨城県の鹿行大橋が地震のときにパイルベントが倒れて、桁が水の中に入って、走っていた車が水中に落ちて、2名の方が亡くなりました。高架橋とか首都高とか道路会社ものは結構補強してありますけれども、県なんかに行くとか補強していないのがたくさんあります。日本のインフラを考える時には、私は、だんだん劣化するというストックとしてのマネジメントと、リスクとしてのマネジメントの二つ要るのではないかと考えています。つまり地震対策とか、地震が起きたときにどうするかということと、常時ゆっくり劣化するものをどうやって補強していくかということの二つをやるのが非常に大事だと思います。

4. インフラのモニタリング

橋の状態を調べる目視の点検が、今度はモ

ニタリングにどのようにつながるというお話をしたいと思います。一般的に、今までは近接目視と言って、橋桁の下に回ったりして、色々見るというのが原則ですが、なかなか見えにくいところもあります。水の中なんかは見えないという状況があるわけです。ですから目視というものがすべて信頼できるわけではない。さきほどのミネソタの橋が落ちた事故がそうですね。目視では全部チェックされていたけれども、事故が起きてしまった。アメリカは、ミネソタで事故が起きた2007年に、長期性能プログラム研究というのを始めました。その一つが、点検検査の定量化で、センシングによってある程度、橋の状態をわかるようにしていくこと、どういうセンシングにするかというような研究です。

これは人間、生物とインフラのアナロジーですが、人間には皮膚とか骨格があって、外から守る、それから血管とか循環器系があり、神経系があると痛みがわかる。インフラの場合は、防御系は自然災害に対する擁壁であったり、斜面の崩壊防止だったり、それから道路とか鉄道とかいう循環もある。無いのは、この神経系ですので、インフラにどうやって神経系を埋め込むかというのが課題であることは間違いないわけです。しかし、インフラのセンシングというのはそんなに簡単なものではないかもしれない。インフラは大体大きさにしますと何メートルから何キロ、何十キロですから、これを計って、我々の安全に関する情報を得るにはメソスケールでは難しいと思っています。

我々がインフラに囲まれて生活しているときに、ハザードと呼ばれるものがありますが、地震であるとか、風であるとか、災害の原因となるものです。ハザードがいくら強くても、安全なところにいれば何も問題は起きないわけです。安全かどうかはそのインフラの脆弱

性によるわけです。つまりハザードが非常に高くても、安全なものにいればリスクは少ない。でも、風がちょっと吹いただけで壊れるような脆弱性の高い家にいれば、リスクは起きるというわけで。リスクはハザードと脆弱の積のようなものだと思います。

ハザードは、結構計っています。最近ですと、地震計をKネットとか言っているところにおいて、どこかで地震が起ると、どれくらい揺れたかが分かるようになってきています。しかし、インフラは、さっき言いましたように神経系がまだ入れていませんから、インフラの脆弱性というのはなかなかわからない。ですから次のターゲットはこの脆弱性をどう計るか、結果として起こるリスクをどうやって瞬間のうちに計るかがチャレンジなのだと思います。

ハザードのモニタリングはかなり進んできたというのが私の認識です。例えば、先進的な実用化例として、新幹線では、ユレダスとかテラスと呼ばれているものがあります。新幹線のスピードを地震の時に落とすというシステムです。これはどうやっているのかと言うと、海洋性の地震が起ると、地震を観測して揺れが起きそうと思ったら、走っている列車にスピードを落とすように命令をかけるわけです。これは非常に高い信頼性を持っていないとできないわけですね。つまり誤報を出すとんでもないことになりますから、計るだけではなくて、計ったデータを処理して、それを列車に送ると言う、システムとして非常に高い信頼度があるからこれは使えているわけです。

東北の震災の時は、新幹線も電車もみんな止まってしまったのですが、止まった後どうするかというと、みんな見に行く、見に行かざるを得ない。構造物の方は、計っていないので5時間かかったり6時間かかったりする

わけです。だから次は、ここにどうやってこうセンシングを埋め込むかというのが課題になるわけです。それで見に行くのを止めることはできないかもしれないけど、ある地震以下だったら見に行かないようにするとか、ある場所だけは見に行くけれど、その他は見に行かなくても良ければ、地震の後の列車停車時間がぐっと短くなると考えるわけです。そのようなセンサーを入れた橋っていうのは、日本ではまだあまりありませんが、中国なんかは今そういうブームで、香港の橋にはコスト10億円以上かけて、加速度だとか、歪みだとかのセンサーを入れた橋ができています。これはヘルスマニタリングと言いまして、私と友だち3人とでまとめたストラクチャルヘルスマニタリングという3,000ページぐらいの本も出しています。確かに計るということは非常に大事なことで、我々が思ってもみななかった想定外だったことがわかってきます。

その例ですけれども、脆弱性モニタリングと言いまして、ドクターイエローと呼ばれる新幹線が、ある時、レールが折れたのを計っていて、そのデータを半年前のデータや10日前のデータで比べると、この折れた場所が半年前からある程度の兆候が出ていて、10日前になるとどんどん大きくなってそれで壊れたことが分かりました。ですから、計った



図3 橋梁マネジメント

データを適切に判断すれば良いわけです。

私は先般「都市基盤の災害事故リスクの監視とマネジメント」というプロジェクトに組みました。このプロジェクトは、我々土木だけではできないので、計測の方、情報の方、電気の方、それから民間の方も混じってやったプロジェクトでした。東京周辺の大きな橋で、阪神淡路大震災の後、耐震性能をもう一回チェックして、必要であれば補強するというプロジェクトが2000年ぐらいから始まりました。これは1990年頃にできた橋で、横浜ベイブリッジですが、当時日本はバブルで、加速度計をたくさん置いて、リッチなネットワークを組んでいました。これが今20年経って、だんだん壊れてきていますけれども、非常に世界的にも稀なほど地震記録を計っている橋です。これを持っている首都高速道路の人たちはあまり得意ではないので、我々がこれをいただいて、データを分析しました。それを分析する理由ももう一つありまして、これは東神戸水路橋、今は東神戸大橋と言いますが、17年前の1995年の阪神淡路大震災でこの橋が危うく崩壊するところでした。実は耐震補強の時に、この柱がもし壊れても、この桁をグーッと押さえているように、もう1本鋼ケーブルで補強していました。ですからこれが壊れても、ワイヤーが橋を助けてくれるというので、フェイルセーフの設計を入れていました。これは、計ったからわかったことで、想定外の動きに対する耐震補強だったわけです。

3.11の東北大震災の地震では非常に大きな揺れが3分ほど続いて、横浜ベイブリッジで桁が60センチ揺れたと言われています。これもまたちょっと専門的になりますが、私はこの端部の揺れ方を非常に気にしていて、私は想定外の動きが本当の地震の時に起こるのではないかと考えていたのですが、実は想定内

の動きをしていたということで、安心はしましたが、それでも補強して一応安全を図ったことは間違っているとは思っていません。ですからこれも明らかに計ったから判断できたことです。その時にちょっと思ったのは、また想定外が起こり、首都高でトラックが横転して30時間取り除けなかったとすると、そこが渋滞になって地震の後の復旧活動に非常に大きな支障を来すのではないかとということです。

普通、ものを計るときはセンサーを張ってずっと置いておく。地震のようなものを計るときには、当然埋め込みセンサーを入れて1年、2年、5年、10年で地震が起きた時にどうだったかを計ります。ですから大きな橋の場合は、多少初期投資がかかっても埋め込みセンサーを入れて地震の揺れを計る必要があります。しかし、我々の相手にするインフラというのはたくさんあるわけです。橋だって全国に20万あります、高速道路、高速鉄道もたくさんあるわけです。ですから全部に埋め込むとなると、これは大変な数のセンサーが要ることになる。それは無理だから、そうすると現象を1日、2日計って、ある種の診断をして、また次の橋に行って診断をするというようなシステムじゃないといけないといふので、移動型のセンサーというのも大事になってくるわけです。

東海道新幹線が出来て50年経つわけですが、今は270km/hぐらいで色んな問題がありますのでなかなかスピードが上げられない。スピードをもっと上げたとしたら、疲労問題が起きるのではないかというようなことを気にするわけです。東海道新幹線は同じような高架橋が続いていますが、50年使って、特に大きな問題は起きていないわけです。しかし、スピードがもっと上がると、どんな問題が起きるかは分からないので我々の研究室で計っ

てみました。この高架橋に加速度計を貼り付けて、新幹線のスピードは大体決まっていますから、ある列車が何キロで、どういう応答するかを計ります。たくさん計れば、1個1個はみんな同じ応答になるのかどうかというのが分かります。これが計った例ですが。高架橋ごとに緑、赤、黒、青と色分けして、横軸がスピードです。この緑の高架橋は同じところで計ったけれども、青の高架橋に比べると、3倍ぐらい揺れが大きい。同じ時に同じように作ったにも関わらず、実際は結構、高架橋によって個体差がある。図面上は同じだけれど、実は挙動はかなり違うということが計ってみると分かります。すると、この揺れるのは一体何なのかを知り、精密な検査をする当たりをつけるためのセンシングという意味も出てくるわけです。我々の研究室では、移動型ということで、今はJRなんかも営業車を使ってやっていますけれども、こういう列車に加速度計とかGPSをつけて、軌道上で連続的に計るようなシステムを作っています。

これはビムスっていいまして、トレインじゃなくて自動車です。やっぱり路面の状態を大まかに計ります。iPadの加速度計をつけて路面状態を計ります。路面が悪いと揺れが大きく、どの場所の路面の状況が良いとか悪いとか一発でわかるというわけです。

さっきプロジェクトをやっていると申しましたけれども、そのプロジェクトの安藤先生という方がやられた研究をちょっとだけ紹介させていただくと、一本の光を当てて、6方向の変異を計測しようという光の6軸変異計測という研究です。考え方は、例えば柱がたくさんあり、地震のときに被害があったかどうかを一番見分けるのは、加速度計測ではなくて変異ですね。光を当てて橋脚がおのおののぐらい変形したかがわかると、地震の後の判断に良いのではないかとということで始め

たわけです。これは横方向、それから距離軸方向、それから回転方向が一本の光でわかる。一本の光で分かるのはどうやってやるのかっていうと、こういう光を当て、中にゼロ点ポールを入れた光を作って、そのポールの位置からの変形、それから角度の変形がわかるということをされています。我々の東大の工学部のキャンパスの中で色々と計測のトライアルをして、精度は出せることが確認されています。今のところ高価な計測なのですが、何らかの形でこういうものを使えるような分野はないかと探している次第です。

それから最後、もう一つの考え方は、既存のケーブルとかネットを使って、何か他の物を計るかという研究です。漏洩同軸ケーブルで、リーキーコアキシャルケーブルといいますが、これは新幹線の両側に必ずあります。高速道路にもあります。新幹線に色々な情報を出すというときに、ここから電波を送って情報を渡すわけです。ですからこう電波が出ているわけです。そのとき思ったことは、じゃあ雨が降れば、この電波を出すのは乱れるだろうと。そうすると、雨の量が強ければ乱れが大きくなるようなことがあるのではないかっていうことで、その当時研究したのがありました。ケーブルには放射モードとか、表面波モードとかあるのですけれども、その時に表面波のモードを使うと雨が当たったときに非常に大きな影響を受けるのではないかっていうことで、学生が、京都大学の雨天実験所へ行ってみましたが、これは理想状態なので、我々の研究室の東大の工学部の屋上でも実際にやってみました。色々な波形処理をしていくと、ある程度雨による電波の乱れがキャッチでき、計るだけではだめなので、そのデータ処理というのを絡めると、ある程度の希望が持てることが分かったという研究もやったことがあります。

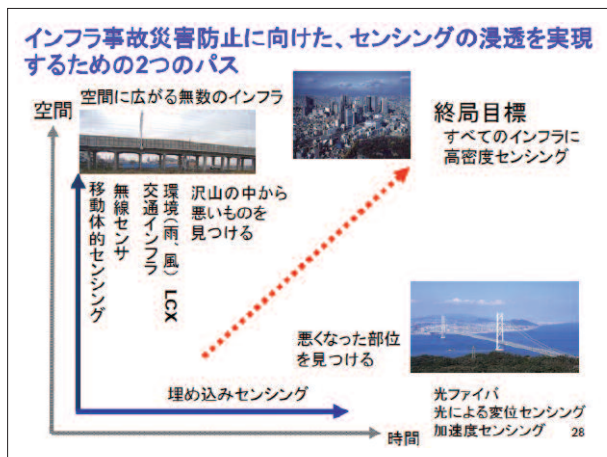


図4 インフラのモニタリング

最後の1枚ですが、センサーによるモニタリングで、よく疲労破壊とか、クラックがわかるのではないかと言われますが、インフラの損傷の進行というのは、普通は極めて局所的であり、壊れるところではその進行は緩やかです。ですから可能性のあるところを張り出すときりがありません。局所的ですからそれをセンサーで検出するというのはなかなか難しい話で、そういう考えはちょっとリアリスティックではないと思います。私の考え方は、グローバルな情報、例えば加速度とかそういうところから大きく状態が変化したのを見つけること。さっきの新幹線じゃないですけど、元々の設計に色々な問題があるかもしれないとすると、元々悪いのは設計や施工でそういうのが大きな事故につながることが多い。我々が考えていた想定したものじゃない動き方や挙動をしている場合がある。だから想定外の挙動をモニタリングから見つけて大事故を防いでいくというやり方が、モニタリングによって達成できるのではないかと考えています。

5. 結びに

これが本当の最後のスライドでして、先ほどもお話した金森先生という地震学の先生

が、たまたま3.11のときに日本にいました。東京大学の理学部で評価委員をやっておられ、金森先生がカリフォルニア工科大学に帰られて、インタビューを受けて言っておられるコメントの最後のパラグラフを説明いたしますと、「我々の科学、地球物理では、実験を何かを証明することはとても難しい。prove anythingというのは、実験ができないからです」つまり、インフラもそうですが、なかなかリアルサイズで実験ができない。ですから、我々は自然に委ねられているので、何が自然に起ころうとも、100%予測することはできない。だから building robust infrastructures というのは、非常に靱性とか、強靱なということで、要するにインフラを強靱にすること、強靱なインフラを作ることが大事なのだけれども、さらに加えて言えば、using rapid reliable information つまり信頼のおける情報システム、これは一種のセンシングも絡むわけで、そのインフラを粘りっこくするとともに今ある情報技術をうまく使っていくということが、prepare for the unexpected つまり、想定外に対する準備として大事なんじゃないですかというのが、金森先生のコメントで、私はそういう気持ちで色々なインフラのモニタリングをやっている次第です。どうもご清聴ありがとうございました。



講演者

藤野 陽三 (ふじの ようぞう)
東京大学工学系研究科
社会基盤学専攻特任教授(講演時)
現: 東京大学名誉教授
横浜国立大学客員教授(安心・安全の科学研究教育センター)

本稿は平成25年7月5日、当協会の第35回測量調査技術発表会において特別講演をいただいた藤野陽三教授のご講演内容を、本誌編集委員会にてまとめたものです。