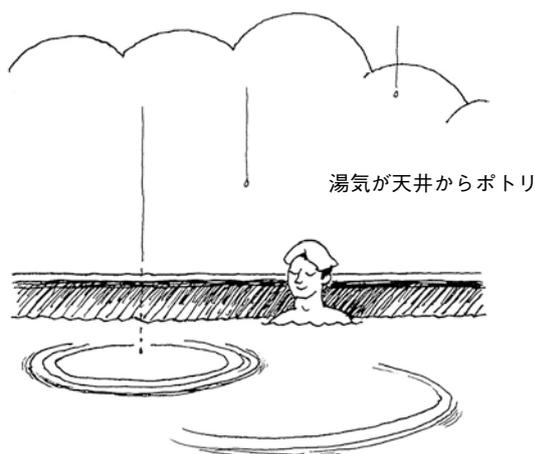


表面波談義



湯気が天井からポトリ・・・の波

与太郎 大家さん、こないだスーパー銭湯に行ったとき気がついたんだけど、天井から湯気が落ちてできる波を見てると面白いですね。輪っかになった波が広がって行くんだけど、いつでも二つか三つの輪っかになってるんですね。あれはどうしてなんですか？

大家 「♪湯気が天井からポトリと背な〜かに♪」なんていう歌があったけれども、湯気がポトリと落ちることはないですね。落ちるのは湯気が結露してできた水滴ですよ。

与太郎 そう言えばそうだなあ。しかし、大家さんは細か過ぎますよ。

大家 ご免ごめん。揚げ足を取るつもりじゃなかったけれども、つい悪い癖が出てしまいました。

与太郎さんは良いところに気がつきましたね。実は私もなぜああいう風になるかは正直に言ってよく分からないんですよ。

与太郎 へえ。大家さんにも分からないことがあるんだ。

大家 私は難しい数学を使って「波動論」などを勉強している学者とは違いますからね。

ただ、波動論の参考書を見たり話を聞いたりしても、天井から湯気がポトリと落ちたらどうしてああいう波



工学博士 **西尾 宣明**

元・東京ガス(株) 基礎技術研究所

が発生するかと言う説明にはトンと出会ったことがないんですよ。

与太郎 あれ、大家さんも「湯気がポトリ」って言いましたね。

大家 それは言葉の遊びですよ。その方が落語っぽくて面白いですから、与太郎さんから拝借しました。

まあ、私が考えるに、水滴がポトリと落ちると、水面が凹みますね。その分、凹んだところの周囲では水が盛り上がります。盛り上がるということはエネルギーを持っているということです。それが波となって周囲に伝わり、広がってゆきます。

次の瞬間に、凹んだところが周囲の水に押されてもう一度上に飛び出して、それが水平に戻るときにもう一度波が周囲に伝わっていきます。そんな風にして少なくとも二つの波頭が周囲に伝わります。実際にはもっと複雑な水面の動きがあって、二つ以上の波長の違う波が発生していると思いますけどね。

その「湯気がポトリ」に関係がある表面波のことで、最初に出会う説明が「深い水の波は波長によって速度が違う。これを波動の『分散性』という」と言った類いのものですからね。

与太郎 あれ、銭湯なんてそんなに深くないですよ。

大家 浅い・深いと言うのは波の波長に比べてのことです。「湯気がポトリ」の波は波長が数センチから、

長くても20センチもないですから、お湯のごく表面の水の運動が伝わって行く「表面波」なんですね。

それに比べると大きな津波は波長が10キロも20キロもあって、平均4キロ程度の太平洋の深さも相対的にはうんと浅いんです。そして、海底までの水が波の運動に係わっています。こういうのを「浅い水の波」と言います。前にもちょっと話したことがありましたね。

与太郎 いやあ、あんまりよく覚えてないですね。

面目ない。

大 家 ちっとも構いませんよ。そんなに簡単に覚えられるものでもないですからね。

与太郎 ああ、思い出した！ 津波は海が浅いと遅くなるんだ。その分、海岸に近づくと波がどんどん高くなるんでしたね。

大 家 そうです。よく覚えていてくれましたね。

表面波の場合、速度は波長の平方根に比例します。つまり、波長が長い波ほど速く進みます。

与太郎 そうすると、いろんな速さの波が起きて、速い波は遅い波を追い越したり置き去りにしたりして、バラバラに動くってことですか？

でも、銭湯で見たのは二つか三つの波の輪っかが一緒になって広がってましたよ。

追いかっこする波と群速度

大 家 実は、波長の違う波が同時に動くと、もちろん波長の長い波が短い波を追い越すんですが、そのときに二つの波が干渉合って、山と山・谷と谷が重なるところでは高い山と深い谷になります。山と谷が重なるところでは打ち消し合います。

ところが、二つの波の波長が少ししか違わない場合には、合成された波の山と谷はそれぞれの波が単独で進む速さの約半分の速さで進むようになるんです。その合成された波の速さを「群速度」と言います。

与太郎さんが観察したのはその群速度で広がる波なんですね。

与太郎 分散だの群速度だのって、学者は難しいことを言うんですね。

大 家 表面波の性質を研究するとそうなるんで、学者が意地悪だと言うわけじゃないんですよ。

ただ、得てして数学を使って研究できることだけに興味を持ち易いので、「湯気がポトリ」のときになぜ、

どんな波長の波が作られるのかというような、工学的な泥臭い研究には行かないんですね。

ところで与太郎さん。今の「湯気がポトリ」の群速度の現象は与太郎さんのうちの浴槽でもちゃんと観察できますよ。

与太郎 え？ 本当ですか？

大 家 私も毎日のように見えています。

風呂に入った後、うちではお湯がもったいないから明日の洗濯に使うように蓋をして置きます。

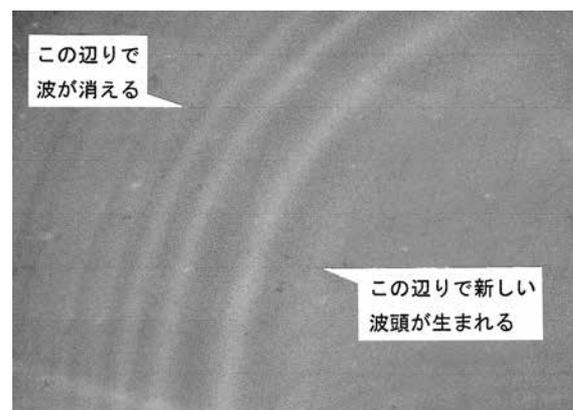
与太郎 そのほうが明日も少し暖かいお湯で洗濯できるからでしょう？ うちでもやってますよ。

大 家 その蓋を明けようとする裏側に結露した水がぼたぼた落ちますね。そうすると与太郎さんが見たように、群速度で広がる波が見えるんですよ。

与太郎 本当ですか？ 波ができるのは分かるけど、あんまりはっきり見えないですよ。

大 家 直接波を見ようとしても駄目です。波の影を見るんです。

浴室の照明で上から照らされた波の影が浴槽の底に映ったものです。波の山のところでは多分、水が凸レンズの働きをして波の影が明るくなっていると思います。逆に波の谷では水が凹レンズになるので光は拡散して、影が暗くなるのだと思います。



図a 浴槽底に映った表面波の影

その明暗の筋が3組ぐらいの輪の群れになって進んで行くのですが、その群れの中で、後ろの方から新しい影が生まれては、前の影を追いかけるんです。

そして、前の輪っかを追い、前の波を飲み込んで先に進み、群れの先端で消えて行きます。

そのように、個々の波は群れの中で速く進んでいるのですが、追いついて高くなった波は少し進むと消え

てしまって、全体としてはゆっくり進むんですね。それが群速度ということなんです。

与太郎 へえー。そうなんですか。でも、うちの風呂じゃそんなことが起きてるなんて全然見えないですよ。

大 家 もしかしたら、与太郎さん家の浴室には窓があるからじゃないですかね。私の所には窓がなくて、明かりは電気の照明しかないの、昼でも夜でも浴槽の底に映った波がはっきり見えるんですね。

与太郎さんの場合は窓に何か覆いをするか、日が暮れてから電灯の光で観察するといいですよ。

与太郎 ああー、そうなんだ。一遍試してみますよ。

それにしても大家さんはそんなことまで良く観察してるんですね。やっぱりガリレオ爺さんなんだ。

P波とS波が干渉する？

与太郎 ところで、3.11の地震の時、東京の超高層ビルが大きく揺れたのは表面波の影響だって言うのを聞いたような気がするんだけど、あれは水の表面波とは違うものなんですか？

大 家 似ていると言えば似ているし、違うと言えば違いますね。波を伝える媒体が水と土という違う性質のものですからね。

しかし、波長が長い方が伝わる速度が速いと言うのは水の波と同じ、つまり分散性があるということですね。難しい言葉を使うならば……。

与太郎 地震の表面波もやっぱり群速度って言う速度で伝わるんですか？

大 家 昔、現役の頃、20年以上前ですねえ、土木学会での大会などで群速度の解析を発表するのが流行していたけれども、そもそも地震の表面波がどのようにして発生するのかを教えてくださいる人は一人もいませんでした。

だから、分散だ、群速度だ、などと言う議論を聞いても、耐震工学にどう役に立つのか分からずさっぱり興味が沸きませんでしたね。

与太郎 じゃあ、表面波がどうしてできるかっていうのはまだ分からないってということですか？

大 家 一応、「表面波はP波とS波が干渉して起きる」などという説明が書いてあるのを見かけますが、どのように干渉して、どこでどのような表面波が生じるという具体的な説明は全くありません。いかにも学問的

に見える言葉を使っているけれども、それを書いている人も本当は分かっていないんじゃないですか？

大体、P波はS波よりも伝わる速さがかなり速いです。地震計に記録されるのは振幅は小さいけれども振動数は大きいP波がまず最初に来て、少し経ってから振幅の大きいS波がやってくるというのが普通です。

そんな二つの波がどこでどのように干渉するのか、是非専門家の説明を聞きたいものですね。

与太郎 そんなもんですかねえ。でも、大家さんは何か考えを持ってるんじゃないですか？ そんな匂いがしますよ。

大 家 匂いとは恐れ入りましたね。

確かに、いろいろ考えてはいますがね。

私の単純な頭では、表面波の発生の原因は主にS波によるものだと思います。地震のエネルギーは、かりにP波もS波も大差がないとしても、周波数の点から見ると、表面波に関係するのは主にS波と考えても良いと思いますね。そうすると、どのようにしてS波から表面波が励起されるかをある程度想像することができますよ。

与太郎 S波って横波が伝わるやつだっけ。

大 家 そうですね。地震の元になった断層がずれた方向に振動する横波が伝わるのがS波です。逆断層や正断層の場合は上下方向の横波になって、横ずれ断層では水平方向の横波になります。

与太郎 横波っていうからってつきり水平の振動とばかり思ってたけど、そうじゃないんだ。

大 家 地震波の進行方向に対して地盤が横方向に揺れるということです。横方向と言っても360度ありますからね。

その地震ですが、地殻やプレートが圧縮力や引っ張り力を受けると、その力の方向から約45度傾いた面でせん断力が一番大きくなります。その近辺の、岩石のせん断強さが一番弱い面で岩石が壊れて断層ができます。これをせん断破壊と言いますが、せん断破壊して放出された地盤ひずみのエネルギーが、この図のように断層に対して直角の方向にせん断波つまり横波として伝わります。それがS波です。

断層がずれる方向にもエネルギーは音と同じ縦波となって放出されますが、それがP波です。

その断層がどの方向に動くかは今の所地震に聞いてみないとわかりません。

与太郎 活断層が動くってことはないんですか？

大家 ちょうどその場所に、昔地震の元になって今でもせん断強さが弱くなっている、いわゆる活断層と呼ばれる岩盤の古傷があれば、そこが今度も地震の元になることはあるでしょうね。

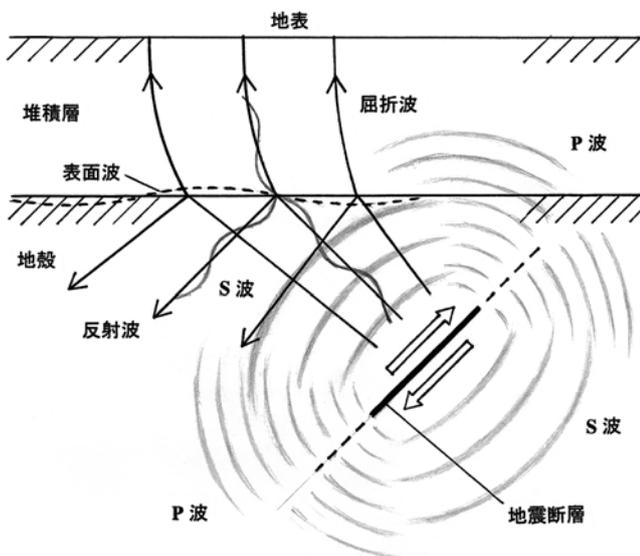
熊本地震を起こした断層帯などはそういうところなんでしょうね。

与太郎 ああ、そうですか。岩盤にひずみがたまるところに活断層ってやつがあると、それが壊れて地震になるっていうことですね。

大家 活断層は何千年、何万年前に動いた地震の古傷です。今でもそこが一番弱いかどうかはわかりません。そんな「活断層」という言葉は止めたほうがいいですね。むしろ「古断層」とでも言うほうが学術的には意味があると思いますね。

与太郎 そんなものなんですか。

大家 今まで眠っていた活断層が目覚めた時に地震になる、などと思っている人もいますが、それは大きな間違いです。



図b S波から表面波が？ (大家の仮説)

表面波の仕組み——大家の考え

与太郎 それで、大家さんはS波がどんな風にして「湯気がポトリ」の役をするって考えたんですか？

大家 ああ、「湯気がポトリ」とは面白いですね。しかし、水の場合は「湯気がポトリ」が直接表面波の元になるけれども、地震の場合は断層運動が直接表面

波の元になることは少ないと思います。

図bのように、横波のS波は断層から直角の方向に広がって行きます。そして、地殻とその上の堆積層の境界面などで、波のエネルギーの一部は反射されて地殻の内部の方に向かい、一部は堆積層の中を地表面に向かって進みます。その反射によって境界面に生じる振動がうまく具合に境界面に沿って進行する波の形になるとそれが表面波として観測されるのだと思います。

与太郎 あれ？ 表面波って僕らが立っている地盤の表面を伝わるんじゃないんですか？

大家 高層ビルを大きく揺さぶるような表面波は周期は数秒以上、場合によっては10秒とか20秒と言ったゆっくりした揺れでなければなりません。波長にすると10キロとか何10キロメートルで、地上の我々にはほとんど感じられない緩やかなものと思います。こういうゆっくりした揺れには何キロメートルと言った深さまでの地盤が絡んでいるはずですよ。

こういう条件を考えると、地殻と堆積層の境界に生じた表面波が数キロメートルの厚さの堆積層を刺激して増幅させると考えれば話が合います。

与太郎 ということは、我々は感じないけど、地上でも表面波はちゃんと伝わってるっていうことですね。

大家 そうです。地表面の方が地中よりもずっと大きな振幅でね。

それから、大きな波頭の数「湯気がポトリ」の表面波と同じように、二つか三つという少ない数だと思いますよ。

また、必ずしも全部の地震で同じように表面波が発生するとは限りません。やはり大きなマグニチュードの地震ほど発生しやすいと思います。

それから、表面波は震度幾つといった、気象庁の震度計の評価には乗らないと思います。表面波による被害の実例もほとんど知られていないのではないかと思いますね。せいぜいエレベーターが止まったぐらいでね。

「周期が合う」相手を探す表面波

与太郎 ほんとですか？ 3.11の地震の時に東京の超高層ビルが何メートルも大きく揺れたのがテレビに映ったときは本当にびっくりしたんだけど、震源からずいぶん遠いのに、どうして東京の高層ビルが揺れたんですか？

大 家 さっき言ったように、表面波は数キロメートルという深いところで堆積層が揺されると考えると周期Tが数秒以上という長いものになります。速度Vは地殻を伝わるS波と同じ程度の、毎秒3キロメートル前後と考えても良いでしょう。

波長は $L = VT$ という式で与えられますから、仮に $T = 4$ 秒とすれば $L = 12$ キロメートルということになります。

与太郎 へえー、ずいぶん長いんじゃないですか？

大 家 そうなんですよ。この波長が長いことのために、遠くまで伝わりやすいんですね。

ほら、大太鼓のドスンと腹に響くような低音が遠くまで伝わりやすいのと似てますね。

波長が長い低音は途中で木や林があってもあまり邪魔されずに遠くまで伝わるんですね。

与太郎 そういうことですか。それで東京までも伝わって来たんだ。そこに周期が同じ高層ビルがあったんで、喜んでその中に飛び込んだんだ。

大 家 全くその通りです。人間だって「波長が合う」人と一緒だと気持ちがいいですからね。

与太郎 あれ？ それって「周期が合う」と「波長が合う」というのが同じってことですか？

大 家 ごめん、ごめん。与太郎さんの疑問は当然です。「波長が合う」にはビルの方も10キロぐらい高くないとダメですね。与太郎さんが言うように「周期が合う」というのが共鳴・共振の条件になりますね。

与太郎 でも、地震でも人間でもおんなじことがあるってのは面白いですね。

普通のS波の場合でも同じようなことはあるんじゃないですか？

大 家 そうですね。地表面で記録されるS波は周期Tが0.1秒から1秒程度の成分が多いですね。しかも地中からほとんど真直ぐ上に向かって地表面にやっ来て来ますから、波長はほとんど関係なしです。それこそ「周期が合う」かどうか問題になります。

悪いことに、一般の住宅や中層以下のビルディングの固有の周期は大抵は1秒以下で、S波の周期とほとんど同じ範囲にあります。

だから建物と地震の「周期が合い」やすいので、被害も起きやすくなります。

与太郎 そうなんだ。それで、周期が合っても壊れないように建物を強く作る必要があるんですね。

阪神淡路大震災の時も、被害を受けたのは古い建築基準で建てられた建物がほとんどだったって聞いたことがあるけど、そうなんですか？

大 家 私もそう思いますね。熊本地震の被害もそうです。熊本の場合は地盤が弱かったという理由もありますがね。

超高層ビルの地震対策

与太郎 今、S波は地表面に向かって真下の方からやってくるって言ったけど、どうしてそうなるんですか？

大 家 それはP波でも同じことですが、硬い地層から軟らかい地層に移る時には地震波の「屈折」が起きます。堆積層は地表面に近づくほど軟らかくなっています。

地震波の速度は軟らかいほど遅い、そのため、下から斜めにやってきた地震波は上に向かうほどどんどん曲げられて、地表面に対してほとんど垂直になります。

与太郎 そうなんだ。

それで、超高層ビルの場合、表面波を考えた地震対策って何かあるんですか？

大 家 やっぱ「周期が合う」というのが一番の問題です。そこで、一番一般的なのは建物の柱や梁の間にダンパーと言って振動を吸収する装置を取り付けるやり方ですね。

与太郎 何かで聞いた話だけど、あのスカイツリーには法隆寺と同じ——心棒じゃない、なんて言ったっけ。

大 家 心柱しんばしらですね。形は似ているけれども同じものではないようです。

中央に剛性の高い心柱を立てて、周囲の本体の構造物との間をダンパーで結んでいると思います。

他にも、屋上あたりに重りになるものを置いて、ビル本体と違った動きをさせることで「周期が合わない」ようにするというような方法があるようです。

与太郎 ふーん。重りがビル本体の肩代わりをするってことですか？

大 家 そうそう。そういうことですね。

他にも色々な方法が考えられているようですがね。

そう遠くない将来に南海トラフで大きなマグニチュードの地震が予想されているので、建設会社は真剣に色々考えていると思いますよ。