

トレンドィはトレンドィ？



工学博士 **西尾 宣明**
元・東京ガス(株) 基礎技術研究所

「トレンドィ」は軽蔑語？

与太郎 大家さん、そのシャツいかしてますね。今どきのデザインですね。トレンドィっていうのかな、若く見えますよ。奥さんが選んだんでしょう？

大家 そうですよ。私なら絶対こんな派手な色合いのものは選びませんよ。私を若く見せたいんですね。でも着ていると結構違和感を感じなくなるから不思議ですね。

しかし、流行の色や形だけで若さを求めるなんていうのは嫌ですね。年齢なりの落ち着いた感じや雰囲気、そういったものも欲しいです。

与太郎 大家さんは大丈夫ですよ。歳を聞かれてビックリされることが多いんじゃないですか？

大家 それは与太郎さんのお蔭ですよ。色々聞かれるたびに、本を読んだりネットで検索したり、錆び付いた頭を叩きながら計算を試みたり、とにかく考える種が次々にできるので歳をとる暇がないんですよ。与太郎さんにはとても感謝しています。

与太郎 本当ですか？ 大家さんを困らせてるだけじゃなかったんだ。嬉しいな。

大家 ところで、英語でトレンドィってどんな意味か知ってますか？

与太郎 あれ？トレンドィって英語じゃないんです

か？

大家 私に言わせれば、あれは日本語ですね。英語の辞書を引くと「《軽べつ的》今はやりの、流行を追う」(新コンサイス英和辞典)とあります。個性とか個人主義を大切にする欧米では、世間の風潮や流行に軽々しく飛びつくのは軽蔑されることなんですね。だから素敵な外国人に出会って「you are very trendy」なんて言ったら苦い顔をされるかも知れないから注意しなくてはなりませんよ。

与太郎 ああー、そうなんだ。カタカナ英語って外国では通用しないことがあるんだ。

ランダウの物理学者等級分類

大家トレンドィといえば、ソビエトの天才物理学者ランダウの物理学者実力評価を思い出しますね。

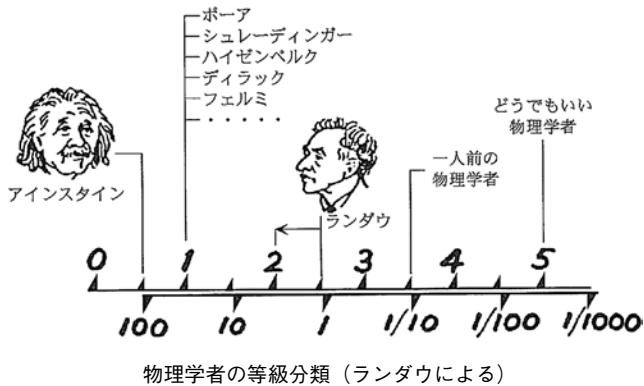
与太郎 その人はどんな人なんですか？

大家 液体水素の超流動現象を理論づけして1962年のノーベル賞を受けたり、超伝導の理論を解明して、例えばニア中央新幹線などのために研究が進んでいる高温超伝導に道を開いたり、色々な方面で物理学の進展に貢献した天才です。

その彼は色々なことを分類するのが好きで、ある時、冗談半分に当時の物理学者の能力や業績の等級を対数

目盛を使って評価したんです。

それをこんな図に表してみました。



横軸の上側にある0から5の数字が対数の値です。実際には対数には0という値はないので、最高の天才アインシュタインを0.5として、それより天才度——というか、能力や業績とを考えてもいいですね——それが低くなるほど大きな等級を与えるようにしてあります。

与太郎 フーン、あんまりよく分からないけど——。

大家 分かりやすいようにアインシュタインを100点としたら他の対数目盛が何点になるかを横軸の下に描いておきました。

与太郎 え——と、上の目盛が1だけ多くなると下の目盛が10分の1になるってことですか？

そうすると右に行くほどバカになるんですね？

大家 バカという言い方は乱暴ですが、まあ、能力も値打ちも落ちるということですね。

与太郎 ランダウは2.5から2に矢印がついてるけど、どういう意味ですか？

大家 この等級表を作った時、ランダウは自分を2.5級に評価したんですね。

等級1のボーア、シュレーディンガーなどと書かれているのは皆量子力学を作り上げた天才で、ランダウがとても尊敬していた人たちです。

与太郎 等級2.5の下の目盛りで行くとたった1点ですか。天才なのに随分控え目だったんですね。

大家 そう思いますね。

ところが、10年ほどしてある重要な研究を仕上げた時に自分を2級に昇格させたんです。点数で言えば約3点というところでしょうか。

与太郎 アインシュタインの100点に比べると30分の1か。それでも結構高い点数っていうことですか？

大家 そういうことですね。

実は、彼のノーベル賞受賞が決定することになる年の初めに、友達が運転する車が凍った道でスリップして、対向車のトラックに激突して、彼は頭に傷を受ける瀕死の重傷を負ってしまったんです。

ところが、等級1の物理学者達を初めとして、欧米の学者仲間が皆で彼の治療に必要な特別な薬を探し出して送ってくれたり、世界最高の脳外科医を彼のために手配したり——ソビエト当局もビザなしで受け入れたり、それで奇跡的に一命を取り留めたんです。そして、天才的な脳もほとんど元どおりに回復できました。

与太郎 へえー、凄いことが起きたんですね。

ランダウって人も皆から可愛がられていたんですね。

大家 この時ランダウは50代の半ばで、これから約5年後には60歳で亡くなってしまおうんですが、この事故がなかったらもっと長生きして、もっと物理学に貢献して、最後には等級1に並んだと思いますよ。

与太郎 そうですか。本当に天才だったんですね。

ところで、この「一人前の物理学者」って書いてあるのはアインシュタインの1,000分の1だけど、それでも一人前なんですか？

大家 天才が建てた理論の応用面を考えたり、それが正しいことの証明を見つけたり、そう言う面で役に立つ研究ができるということでしょうね。一人前の学生を育てる能力があるということも大切ですかね。

天才ではなくても、世の中に一番必要なのはこのような人たちなんじゃないでしょうかね。

与太郎 そうか。我々のように平凡な人間が多いから世の中うまく回ってるんですね。

この、「どうでもいい物理学者」っていうのはどんな物理学者なんですかね。

大家 まあ、いま世間で話題になっているテーマだから自分もやるという程度の、言うなれば「トレンドイ」な学者なんじゃないですかね。

ランダウに言わせれば、「全然内容のない論文を発表している、いわば病的な物理学者」ということです。

与太郎 随分キビシーですね。

大家 物理学の最前線で活躍する人だから、どうしても厳しくなるんでしょうね。

埋設管は進行する地震波で壊れるか？

大 家 そのトレンドイナ研究テーマということですが、埋設管の耐震性研究の世界もランダウの分類を流用すれば5級の研究者で溢れ返っていましたね。

与太郎 ええっ？ どういうことですか？

大 家 私が埋設管の事業所から研究所に異動する少し前でしたねえ。私は地震と埋設管についての技術講習会を聴きに行ったんですよ。

そこで地震とは地盤の中を正弦波状の変位の波が伝わるものだと聞いたんです。変位を微分すればやはり正弦波状の地盤のひずみが求められます。

そんな話を聴いて私は大変感激しましたね。

地震は地盤の中を伝わる波動だなんて、それまで聞いたこともなかったですからね。

そして、1972年に異動してすぐの仕事がまさにその問題だったんですよ。

与太郎 へえー。異動してすぐじゃ大変でしたね。

大 家 実はちょうどその頃、会社では天然ガスを海外から受け入れる基地を千葉県に造って、そこから東京湾を横断して東京圏に持ってくる高圧の海底パイプラインを計画していたんです。

ところが、圧力10キロ以上の高圧ガスを埋設管で輸送するのは初めてのことで、技術基準もないんです。そこで建設省（現在は国土交通省）の技術研究所の指導を受けていたのですが、耐震性の評価については成田空港へ燃料油を送るために1973年に制定された石油パイプラインの技術基準を適用することになったんです。

ところが建設省が考えていたのは、正弦波が進行するのが地震だと聞いて私が感激したのと同じレベルのものだったんですね。

与太郎 地震のことがあんまりわかってないって言うことですか？

大 家 まあそう言ったところですね

実は、その数年前の1967年に、「波動伝播と地盤の動的性質に関する国際シンポジウム」というのがアメリカであって、ニューマークという学者が、「地盤の動的ひずみの最大値は地盤の変位速度 (\dot{u}) を地震波の伝播速度 (c) で割った値に等しい」という論文を発売したんですね。

ちょうどその頃、サンフランシスコ湾を横断する

地下鉄の海底トンネルの設計が進んでいて、それにニューマークの説が利用されていたんです。

石油パイプラインの技術基準はそのニューマークの理論を参考にして作られたんですよ。

与太郎 地震国の日本よりもアメリカの方が進んでいたってことですか？

大 家 そう言えないこともないですね。

その頃は、日本でも地震の研究を本格的にやっている所は少なかったから、ニューマーク様々でしたね。

ところが、正弦波の地盤変位を埋設管に当てて計算すると、埋設管に発生するひずみはごく微々たるものなんですよ。「伝播する」ことができる地震波は弾性波ですから、ちょっと考えれば当然の話なんですがね。

そこで石油パイプラインの技術基準では「地震波は埋設管に対してどの方向から来るかはわからない」ということで、六つの方向から同じ波長の波が同時にやって来ると仮定して、とにかく、無理やり、計算上は結構大きなひずみが埋設管に発生する可能性があるような基準を作ったんですよ。特に、海底のヘドロのような軟弱地盤ほど地震の波長が短くなるので、計算上ではひずみが大きくなるんですね。

与太郎 大家さんはどうしたんですか？

大 家 研究所には埋設管の色々な実験ができるようになちょっと大きな土槽が作ってあったんですよ。その土槽にヘドロに近い軟弱地盤を再現して、その中に直径600ミリの鋼管を埋設して、それを強力なジャッキで管軸方向に押したり引いたりして地盤の抵抗力を測定する実験をしたんです。

与太郎 結構大変な実験なんでしょう？それで何かわかったんですか？

大 家 予想した通り、軟弱地盤の拘束力はかなり小さいことがわかりました。

その報告書を土木研究所に持って行って、管に加わる力はずんと小さくなることを説明して、なんとか認めてもらいました。

与太郎 よかったですね。

地盤の不均一度が問題

大 家 間もなく、1978年になると宮城県沖地震が発生します。それ以来、埋設管の地震時挙動の研究が各方面で盛んになりましたが、ほとんどが管にひずみ

を与えるのが実体波か表面波か、どんな地震でその違いが出るかなどを調べるものばかりで、新しい考え方は全然生まれて来なかったですね。

与太郎 そこで大家さんが登場するんですか？

大家 登場というよりも、私は全く違うことを考えましたね。中身は簡単で、素人にも分かるつもりですがね。アイデアは宮城県沖地震で被害を受けたガス管の実態を見て思いつきました。

与太郎 さすがは大家さんですね。どんなアイデアですか？

大家 まずは地面の中を進行する地震波で埋設管が壊れるわけがないと言うことです。

与太郎 本当ですか？地震波では壊れないんですか？

大家 当時、我々は会社の土地3箇所を利用して埋設管の地震観測をしていたんですが、管に沿って進行する地震波などこれっぽっちも観測できなかったんですよ。

それで考えたのが、地震波は下からやって来て、宮城県沖地震で被害が集中したような、地盤の構造が複雑な場所で地盤の動きも複雑になる、その結果地盤には地割れや滑りなどが起きて埋設管に悪さをするということです。

与太郎 そういう所で地震観測などしたんですか？

大家 しました。しかも仙台市ガス局の、実際に使われているガス管に計測器を付けさせてもらってね。

与太郎 よくそんなことができましたね。

大家 仙台市ガス局の技術の方とは以前から親しく付き合っていたので、快く許してくれましたよ。現場には自動のデータ記録装置を設置しましたが、私の部下の研究員もほとんど現場に常駐でしたね。

与太郎 そうだったんだ。それで観測の結果はどうだったんですか？

大家 予想通りでしたね。切土と埋め土の境目近くの埋め土側で管の応力は大きくなるんですね。

そのほか、仙台市や塩釜市でガス管の被害が集中したところの地盤の縮尺模型を作って、実際の地震から採られた地震の記録を使って振動台実験をしたり。

結果は全部予想通りでしたね。

与太郎 大家さんはそんな振動台っていうのも持っていたんですか？

大家 私の考えを信頼していた当時の研究所長は電動式で精密な制御ができる振動台をポンと買ってくれ

ましたね。1億円でした。2メートル角の小さなものでしたが、模型実験などには最適でしたね。

与太郎 そうなんだ。

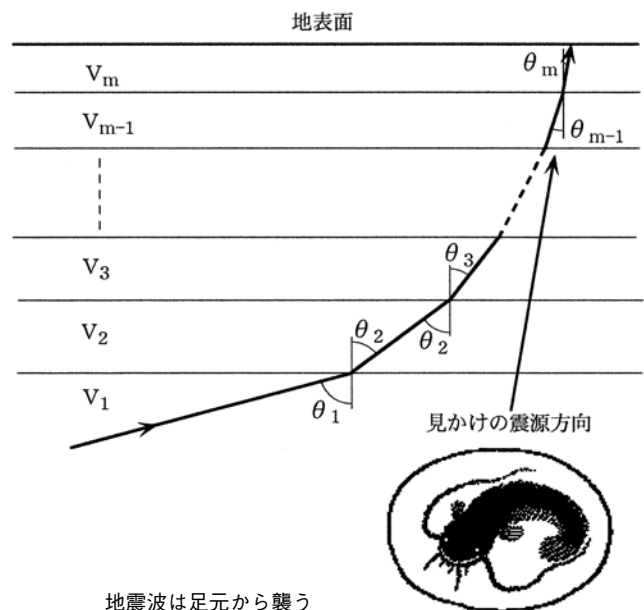
でも、振動台っていうのは全体と一緒に動くんでしょ？そうすると地震波が伝わるような実験はできるんですか？

大家 与太郎さん、なかなか鋭い質問ですね。

ところが、我々が地表面にいて感じる地震は実は全部ほとんど真下からやってくるんです。そのことは前に話しましたね（本誌99号「表面波談義」）。

与太郎 ああ、思い出しました。それから光の屈折の話もこの前聞きましたね。あれって地震波でも同じなんでしょう？

大家 そうですよ。ちょっとそれを復習して見ましょうね。



図のように層状になった表層の地盤を考えます。各地層の地震波——S波と考えておけばいいですね——その伝播速度を $V_1, V_2, V_3 \dots$ と行って V_m までの m 層分を考えます。そうすると各層の間の屈折率は

$$n_{1,2} = \frac{V_1}{V_2}, n_{2,3} = \frac{V_2}{V_3}, n_{3,4} = \frac{V_3}{V_4}, \dots, n_{m-1,m} = \frac{V_{m-1}}{V_m}$$

のようになります。

これを全部掛け合わせると第1層から第 m 層までの全体としての屈折率になります。つまり、スネルの法則の屈折角の表現を使えば

$$n_{1,m} = \frac{V_1}{V_m} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_m}$$

です。ほら、すごく簡単になったでしょう。

与太郎 ほんとだ。嘘みたいに簡単ですね。

大家 そこで、実際の地震として、深さ10キロ程度の地殻と呼ばれる岩石層で起きた場合を考えます。

兵庫県南部地震の震源が大体そんなところですね。

その震源が $\theta_1 = 80^\circ$ に見えるような場所で地震波を観測したとします。淡路島の震央を大阪あたりで眺めると大体そんな角度になりますね。

与太郎 それってほとんど水平に近いじゃないですか。

大家 そうですね。その地殻の中の地震波の伝播速度は毎秒3から4キロといったところです。そして、地表近くの、建築物の基礎として使われる地盤では500メートルから1キロメートル程度です。

それを参考にして、ここでは

$$V_1 = 3.5 \text{ km/s}$$

$$V_m = 0.7 \text{ km/s}$$

と仮定します。これをさっきの式に入れて θ_m を計算すると

$$\theta_m = 11^\circ$$

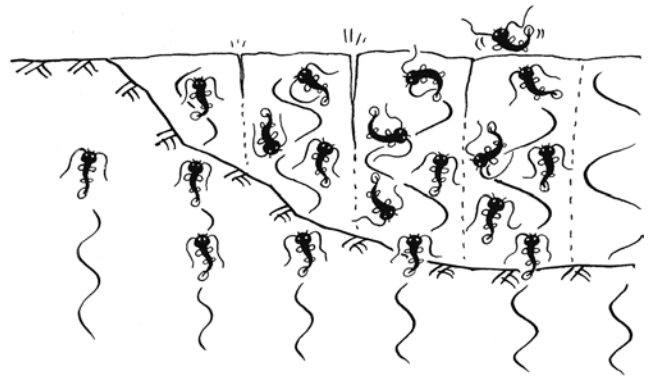
になります。どうです？ 与太郎さん。

与太郎 そうですね。初めは水平の方向からやって来る地震波も我々のところに届く時にはほとんど真下からやって来るってことですね。

大家 下からやって来る地震が表面の柔らかい地層までやって来ると、そこから先は行き場がないのでエネルギーが表面の地盤に溜まって、柔らかい地層を大きく揺さぶる傾向があります。その揺れ方は地盤が軟弱なほど、また軟弱な層が厚いほど大きくなる傾向があります。

そこで、一例として丘陵地に宅地を造成したような地盤を考えますね。高いところを削ったところとその削った土で谷を埋めて平らにしたところと、どちらの地盤が軟弱ですか？

与太郎 そりゃあ谷を埋めた方が軟弱ですね。それに、埋め立てが浅いところと深いところでは揺れ方が違うんでしょね。



硬い地盤と軟弱地盤の境界付近では地割れが起きやすい

大家 全くその通りです。揺れ方が違うと、表面には地割れが発生します。そこをネジ接ぎ手などの古い埋設管が横切っていたりすると、引っ張り力の時はネジが破断したり、圧縮力では管が座屈したりという被害を受けます。

与太郎 大家さんはそういうところで管が壊れたのをたくさん見てるんじゃないですか？

大家 そうですね。宮城県沖地震や1983年の日本海中部地震その他、色々見えていますね。

特に、仙台市のガス局の技術者からは被害の実態と現場の地形や土質分布などについて詳しく教えてもらいました。

それによって、埋設管の被害と地形や地質の関係についての私の考え方はほぼ固まりましたね。

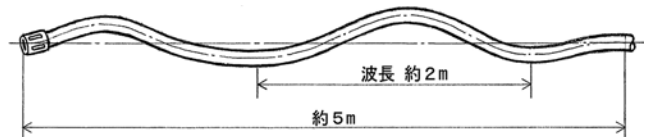
与太郎 仙台のガス局の人との普段の付き合いも役に立ったってことですかね。

大家 本当にそうですね。感謝しています。

ところで、宮城県沖地震の後で、日本瓦斯協会から調査団を作ってバスで仙台に行った時のことです。

50ミリの鋼管が蛇がのたかったようにぐにゃぐにゃと曲げられたのを見た時、同行のとある大学教授が「ここは波長4メートルぐらいの地震波が通ったんだ！」と叫んだ時には、私は啞然としてしまいました。

与太郎 どうしてですか？ わたしなんかそれを見たら、やっぱりそういう地震波が通ったからだと思っちゃいますね。



波長4mの地震波が埋設管（口径50mm鋼管）を曲げた？
—弾性波が埋設管を塑性変形させることはありえない—

大 家 私はそれまでに、細い埋設管が地盤から管軸方向の強力な圧縮力を受けると、2メートル前後の波長で波型に曲がることを計算して知っていましたからね。

与太郎 あれ？ でも、地割れが起きるということは引っ張りの力が働いているということだと思うけど、圧縮力ってどうして起きるんですか？

大 家 鋭い質問ですね。

実際は、地震力が働いている間は地割れが開いたり閉じたりを繰り返します。

開いた瞬間はそこを横切る管には引っ張り力が働きますが、閉じているときは地割れの両側の地盤のブロックはぐっと押し付け合っています。その時管には強い圧縮力が働いている筈です。地震が終わると、大抵の地割れはくっつきあって路面のヒビぐらいにしか見えないかもしれせん。しかし、地盤全体が傾いているようなところでは、地割れが開いたまま残ることもあるでしょうね。

与太郎 そうですか。それで「座屈」っていうことも考えるわけか。

大 家 「弾性床上の梁の座屈」という計算で、私のような機械屋（機械工学出身者）にとっては材料力学の結構初歩の例題だと思いますがね。

与太郎 地震屋さんは埋設管のことなんかあんまり考えたことがないんじゃないですか。

大 家 そうかもしれませんね。

ガス導管耐震設計指針のこと

大 家 実は、宮城県沖地震の後で、日本瓦斯協会では埋設ガス導管の耐震設計指針を作ることになったんです。

担当は東京ガスが幹事になって「中・低圧ガス導管耐震設計指針」を、大阪ガスが幹事になって「高圧ガス導管耐震設計指針」をそれぞれ作ることになりました。

私は技術委員会を作って検討しても無駄だと思ったので、一人で全部作ってしまいました。1982年のことです。

その基本は「5センチの地割れが生じても壊れないこと」としました。そして、主にネジ継手やソケット型の継手で接続される鋼管や鋳鉄管の実際の配管例について、5センチの地割れに耐えるかどうかを判断す

る具体的な事例を沢山の例で示しました。

小規模な地方のガス事業者——技術者も十分でないような事業者でも判断しやすいように心がけました。

与太郎 難しい計算なんかしなくてもいいということですか？

大 家 そうです。

与太郎 そういう指針だと分かりやすく助かりますね。評判良かったんじゃないですか？

大 家 多分、良かったと思いますね。

与太郎 高圧ガスの方はどうだったんですか？

大 家 Kt大学の数学の得意な先生が顧問になって作ってくれたようですが、七面倒くさい式がやたらに出てきて、しかもその式が物理的にどんな意味を持つかが私にもトンと分からない、不思議なものだったですよ。私は途中で読むのを諦めてしまいました。

私が思うに、さっきの地割れが起きやすいような地盤のところも弾性波動の理論を使って、無理やり埋設管にひずみが生じる条件を考えたのではないかと思いますね。

与太郎 石油パイプラインの技術基準と似た話ですか？

大 家 水道や下水道でも技術基準とか指針が作られましたが、全部石油パイプラインと同じ流れですね。

与太郎 今でも地震波が通る時に埋設管が壊れると思っている人の方が多いんじゃないですか？

大 家 与太郎さんがいう通りです。いかにも理論的に見える、数学を使ったものでないと満足しないようですね。特に学者という名の人はね。

与太郎 アメリカあたりではどうなんですか？

大 家 アメリカも似たようなものですね。多分、ニューマークが格好いい理論を示したので、それが金科玉条になってしまったようですね。

与太郎 やっぱり「トレンドィ」ということですね。

大 家 私の「地盤の不均一性と埋設管の被害」についての考え方がアメリカ機械学会の圧力容器部門の目に止まって、論文集への投稿を依頼されましたが、地震工学関係者は日米ともに全然関心なしですね。

与太郎 大家さんの理論はナマズの絵なんかが出てきて分かりやすいですよ。

大 家 きちんとした学会の論文ではナマズの絵など描くわけに行かないのが辛いところですがね。