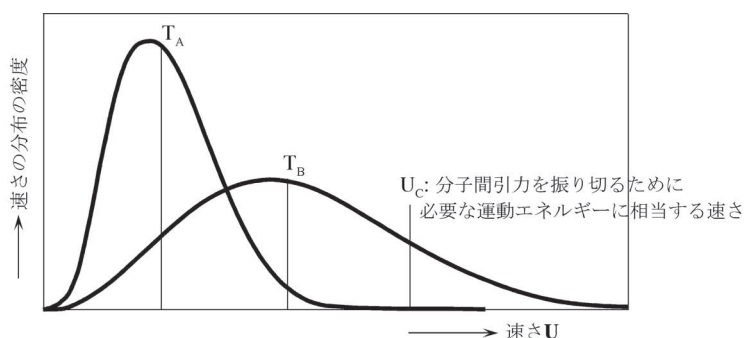


臨界三題



温度 T_A と T_B のときの分子の速さの分布
(マクスウェル・ボルツマンの速度分布則による。図の例では T_B は T_A の約2倍になっている。分子の元気さ=温度 T =は U^2 に比例するから、横軸は温度 T に換算が可能)

マクスウェルによる速度分布



工学博士 西尾 宣明

元・東京ガス(株) 基礎技術研究所

バーベキューの巻

与太郎 こないだ皆でバーベキューをしたんだけど、炭に火をつけるっていうのは案外難しいですね。ほら、着火剤っていうのがあるでしょう？あれは良く燃えるんだけどなかなか炭のほうに火がつかないんですね。

大 家 そうなんです。着火剤を多めにして団扇で煽いだり、とに角空気を沢山送り込んで火勢が強くなるようにしないと、いつまでたっても駄目ですよ。

炭に火がついても、放っておけばまたすぐに消えてしまいますからね。

与太郎 どうしてそうなるんですか？

大 家 それは炭が燃える時の温度なんです。炭の炭素が酸素と結合する——つまり、燃えるということです——そのためには炭素がある程度活発に動かなければなりません。動くと言っても固体ですから、熱くなって活発に振動するということですが、いつでも酸素と結びついて飛び出そうとするぐらいの温度にならないといけません。

ところが、火種が小さいと周囲から冷やされてその温度が保てなくなります。

与太郎 それで、その火種を大きくして温度を保つために団扇で煽ぐんですね？

大 家 そうということです。炭を山のように積んで火

をつければ、外から熱を奪われにくいから火種の持ちが良かったりしますがね。いずれにしても燃えて発生する熱と外から奪われる熱の釣り合いが取れていないと炭が燃え続けるか消えて行くかが分かれてしまいます。固い言葉でいえばその分かれ目を「臨界」などと言いますがね。

与太郎 ふーん。炭が燃えるのにも結構七面倒くさい理屈があるもんなんですね。

大 家 これは結構大事なことなんです。今でも製鉄所や化学工場などにはあるのではないかと思います。粉炭やコークスを山のように積んでいる貯炭場などがあります。そんな山の中で、火種がないのに石炭などに火がつくことがあります。

与太郎 へえー。どうやって火種もないのに燃えるんですか？

大 家 それは「マクスウェル・ボルツマンの速度分布則」のせいですね。気体でも固体でも、全体としては温度が低くても個々の分子には元気に飛び回ったり振動したりする活発なものもあれば、ほとんどじっとしているような元気がないものもあります。つまり、温度の高い分子と低い分子が混ざり合っています。その平均値が全体の温度ということになります。

与太郎 ああ、思い出した。前に聞いたことがありますね。確か打ち水の話（注）の時だったかな。

大 家 良く思い出してくれましたね。それなら話が早い。

そこで、元気のいい空気と元気のいい石炭の元素——酸素分子と炭素原子のことですが——それが反応して二酸化炭素が出来ます。つまり、燃えるわけです。全体としてはごくごく僅かで炎も出ませんが、熱が出ることは間違いありません。ところが、石炭の山が厚いと断熱材の役をして発生した熱はなかなか外へ逃げて行きません。そして、長い間にじわじわと熱が溜って温度が高くなります。

与太郎 そういうことなのか。それで、そのまま放つとくと火事になっちゃうんですね。

それで思い出したけど古タイヤの山が自然発火したってことがよくありましたよね。あれもおんなじことですか？

大 家 そういうことです。似たようなことは色々起きているんですね。

与太郎 で、石炭の山が火事になるのを防ぐ方法ってあるんですか？

大 家 しょっちゅう水を掛けて冷やしたり、ブルドーザーで山になっている場所を動かしたり、臨界温度より低く保つために結構大変な手間をかけているんですね。

与太郎 そうか。バーベキューは火種が十分大きくなるようにするのが大事なんだ。

大 家 炭火で思い出しましたが、昔は暖房と言えど火鉢だったですね。その火鉢ですが、夜寝る前に火のついた炭をそのまま灰の中に埋めてしまうんですよ。

与太郎 そうやって火を消すんですか？

大 家 ところが火は消えないんですね。灰が保温材になって火種は保存されます。逆に火力が強くなろうとしても灰を被っているから十分な空気が供給されません。火は消えもせず、盛んに燃えもせず、臨界状態を上下しながら朝まで炭火は消えないで残ることになります。

与太郎 朝になったら掘り出して炭を足せばまた勢いよく燃やせるんですね？面白いなあ。昔の人は頭が良かったんですね。

(注) にしお金蔵著「ガリレオ爺さんと与太郎さんの○×△□(おもしろ)科学談義」の『汗と打ち水』を参照。なお、本誌44号に同じ題名・同じ内容が対談形式になる前の形で掲載されています。

原子力の巻

与太郎 臨界って言えば、10年ぐらい前に東海村の原子炉で「臨界事故」っていうのがありましたよね。あのとき、テレビで専門家が「臨界」の話をしてたけど、イマイチ臨界っていうのが分かんなかったですね。

大 家 ああ、あれですね。私も見ましたが、あれは「連鎖反応」の話だけで「臨界」のことは何も話していませんでしたね。

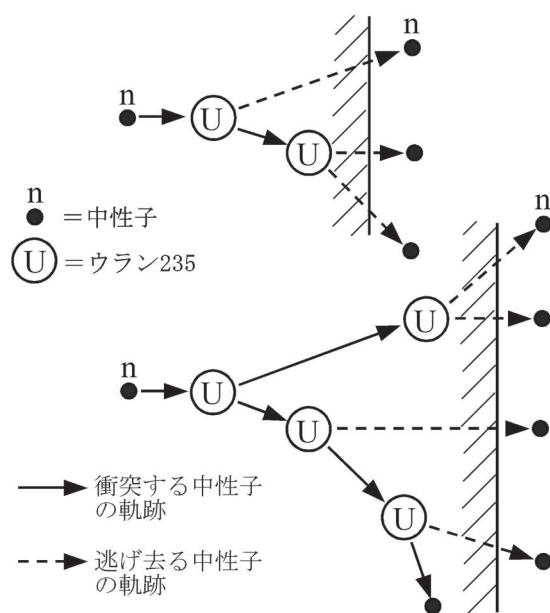
与太郎 そうなんですか？どうりで分かんなかったわけだ。それで、その「連鎖反応」って奴とはなにか関係があるんですか？

大 家 もちろん大いに関係があります。そのおさらいを簡単にしておきましょうね。

濃縮ウランの溶液に含まれていた放射性のウラン——ウラン235とウラン238というのが主な成分ですが——これは常に一定の割合で崩壊して別の元素に変わって行きます。その中でウラン235は中性子1個を吸収した後でセシウムやヨウ素などに分裂して、1個ないし3個——平均すると約2個の中性子を放出します。

その中性子が別のウラン235の原子核に衝突すると再び核分裂を起こして、更に新しく2個の中性子を放出します。また、大量の熱も放出されます。

こうして次々に核分裂が続いて起きるのがテレビでも説明された連鎖反応というものです。



容積が大きいと衝突（連鎖反応）の機会が増える

与太郎 もう一つのウラン235・いくつだっけ。これはどうなるんですか？

大 家 ウラン238ですね。これはウラン235に比べて核分裂の速さが遅いので原子炉の中の主役ではないんですね。しかし、中性子を吸収するとプルトニウム239という、これも放射能が強い原子に変わります。広島に落とされた原子爆弾はウランを使うものでしたが、長崎はプルトニウム爆弾でした。

今の原子爆弾の主役はプルトニウムということのようです。

与太郎 なんだか猛毒だっている話ですね。

大 家 そのようですね。

ところで、東海村の話に戻って、溶液の量が少ないと、中性子がほかのウラン原子核に衝突する確率は小さくて、ほとんどが溶液を素通りして外に出てしまうかほかの元素——たとえばウラン238などに吸収されて中性子の増殖は起きにくくなります。

ところが、溶液の量を増やして行くと中性子が溶液の中を通過する距離が伸びます。当然ウラン235の原子核に衝突する確率も大きくなります。そのため、新しく中性子が作り出される確率も増加します。

そして溶液の量がある大きさに達すると、逃げて行く中性子の量と新しく発生する中性子の量が等しくなります。

与太郎 あれ？ なんだか、石炭の山の話と似てますね。

大 家 おお、なかなか鋭い勘をしていますね。まったくその通りなんですよ。

このバランスが取れた状態では核分裂による中性子の増殖率は1です。つまり、原子核に1回衝突するたびに発生する平均の中性子の数が1倍だけ増えるということです。ということは何回核分裂が繰り返されても中性子の増え方は

$$1 \times 1 \times 1 \times \cdots = 1$$

といつまでたっても1倍。つまり、核分裂の速さは増えも減りもしないということです。核分裂で発生する熱量も一定で変わらないということです。

これが臨界状態で、この時の溶液の量を「臨界量」あるいは「臨界容積」と言います。

与太郎 そういことですか。それで、容積がそれより小さいとどんな具合になるんですか？

大 家 核分裂で発生する中性子の数よりも外に逃げ

る数のほうが多いから、増殖率は1よりも小さくなります。それをたとえば0.99としましょうか。これを2回掛けると0.98、もう1回掛けると0.97といった具合にどんどん小さくなって、しまいには0、つまり核分裂の連鎖反応は停止してしまいます。

与太郎 容積がそれより大きいとどうなんですか？

大 家 当然増殖率は1よりも大きくなります。かりにそれを1.1としてみましょう。これを8回掛けると

$$1.1^8 = 2.14$$

です。核分裂の連鎖が8回続くと分裂した原子核の量は2倍以上になるということです。

さらに8回分裂が続けばそのまた2倍以上の4.58倍の原子核が分裂します。さらにまた8回続けば……といった具合に考えると、分裂反応の速さは倍々ゲーム以上の速さで速くなって行きます。今の例で、8回単位で24回繰り返すと分裂の速さは約4億回です。あっという間にもの凄い速さになって行きます。

東海村の事故では臨界容積が12リットルの溶液をたしか16リットルだか17リットルも入れてしまったんですね。それが核分裂が暴走した原因だったわけです。

与太郎 そうだったんですか。12リットルと16リットルでは大した違いじゃないみたいを感じるけど、分裂が倍々ゲームで進むというのが恐ろしいわけですね。

大 家 そういことですね。

原子炉の中にあるのは固体の燃料だけれども、液体でも固体でも理屈はおなじです。核分裂が暴走せずに安定して進んで、臨界状態で一定の熱が発生するように、核分裂の速さを調節しています。

与太郎 その調節ってどんなふうにするんですか？

大 家 原子炉の燃料はウランを含むペレット（小さな円柱状の粒）状の固体をパイプに詰めた燃料棒の集まりなんですね。燃料棒の間に中性子を吸収する制御棒を置いて、制御棒の差し込み方を浅くしたり深くしたりして核分裂の速さを加減しているんですね。

燃料棒の集まりが臨界容積になるように調節していると言ってもいいですね。

与太郎 つまり、連鎖反応が「臨界」になるように調節するって訳ですね。

大 家 まさにその通りです。よく分かってくれましたね。

ところで、東北地方太平洋沖地震の後だったかな、

福島第一原発の事故からんで、時事問題の名解説で有名なあの池上彰さんがテレビで「臨界」の話をしていましたが、連鎖反応のことを臨界と取り違えていましたね。

池上さんは技術屋でもないから、結局テレビなどで解説する専門家の教え方が悪いんですね。

与太郎 そうだったのか。道理であんまりよく分らなかったわけだ。

大 家 実は原子爆弾も同じなんですよ。これは核物質を臨界容積よりも小さいいくつかの固まりに分けておいて、目的地に着いたところで一塊に集合させて臨界容積以上の大きさにして爆発的な連鎖反応を起こさせるわけです。

与太郎 核分裂の暴走が狙いだから制御棒なんか要らないわけだ。桑原桑原。

地球の巻

大 家 与太郎さん。この宇宙の中に地球と同じように高等な動物が住むような星があると思いますか？

与太郎 うーん。なんか、あるんじゃないかと思うけど——って言うか、あったらいいなと思いますね。地球だけじゃ淋しいですよ。

で、大家さんはどう思ってるんですか？

大 家 私はもし賭けるとしたらないというほうに賭けますね。

宇宙には太陽系のような恒星と惑星の組み合わせは結構沢山あると思いますよ。しかし、地球のように生物が生まれるだけではなく、それが育つ環境が何十億年も安定して続いているというのは奇蹟その物ではないかと思いますね。

与太郎 じゃあ、もちろんUFOなんかは信じないですね。「宇宙戦艦ヤマト」なんかも駄目ですよ。

大 家 おとし話としては面白いと思いますが、科学的な見方をしたら全く無茶苦茶ですね。ニュートンの力学の法則さえ無視していますからね。

あれは地球上の愚かな人間どもの葛藤や争い事を宇宙を舞台に置き換えたものと解釈すれば、立派な意味を持つでしょうね。

与太郎 ふーん。夢がなくてちょっと詰まんないなあ。

で、地球の兄弟分がないっていう一番大きい理由って何ですか？

大 家 一番大きいということではないんですが、さっきバーベキューの炭の話をしましたね。あれで思い出したんですが、地球もあの炭火と同じことなんですよ。

与太郎 そんなこと言われたって、何のことかさっぱり分かりませんよ。

大 家 ごめんごめん。実は地球の中には炭火が沢山詰まっているんですよ。

与太郎 まさか!? 火山のマ、マ・・・マグマのことですか？

大 家 マグマもその炭火によって作られます。

地球の内部にはウランやトリウムと言った放射性元素が含まれています。大部分は地球の表面から数百キロメートル以内のマントル上部に含まれています。とくにマントル最上部と、地表の厚さ数十キロメートルの地殻からなる厚さ約100キロメートルの岩石圏——地震の世界ではプレートとも呼ばれていますが——その岩石圏に多く含まれているそうです。

ちなみに、地震の大部分はこの岩石圏の中で起きています。

代表的な岩石の花崗岩を例にとれば、含まれる放射性元素の崩壊によって花崗岩1キログラム当たり1年間に100万分の7キロカロリーぐらいの熱が発生しているそうです。

与太郎 それって大きい数字なんですか？それとも——。

大 家 1リットルの水の温度を1℃上げるのに約14万年かかると言えいいのかな。小さいと言えば小さい数字ですね。しかし、地球の大きさがうんと大きいから、全体では大きな数字になりますよ。

与太郎 でも、地球の表面から宇宙に熱が逃げて行くんでしょ？その表面積だってうんと大きいんじゃないですか？

大 家 ほう。なかなかいい質問ですね。

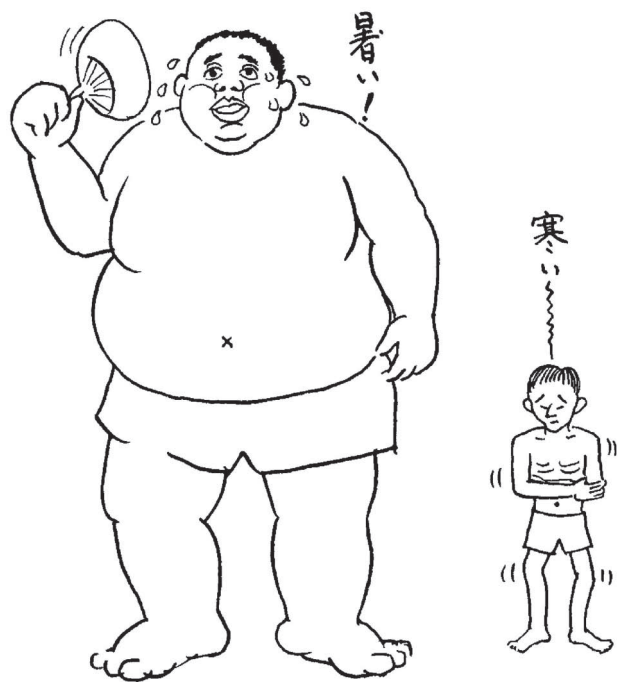
ここでは「比表面積」というのを考えるといいでしょうね。これは物の単位重さに比べて、表面積がどのぐらいの大きさかを示すものです。一般には重さの単位をグラム(g)に取り、表面積は平方メートル(m²)で表します。物の表面での化学的な反応などを問題にすることが多いからでしょうね。

たとえば、冷蔵庫の匂いを取る活性炭。この多くはココヤシの実から作られますが、これの比表面積は

2,500m²/gです。私の体の重さ62,000グラムに対して表面積は約2m²ぐらいですから、私の比表面積は0.00003m²/gです。

与太郎 いやあ！凄い違いだなあ。そうか、活性炭はそれで臭いを捕まえやすいんですね。

大 家 そういうことですね。それで、地球のことに戻りますが、比表面積を計算してみると約2×10⁻¹⁴m²/gになります。これは私の体の10億分の1という、ちょっと想像するのも難しいほど小さいものになります。私の体に例えれば、皮膚のうちの直径10分の1ミリにも満たない範囲がろうじて外気に接しているということになります。



大きい人は比表面積小さい

与太郎 いやあ。そうなんですか。それじゃあ熱が溜るわけですね。

大 家 かりに地球に熱を供給する放射性元素が地球の内部に均等に分布するものと仮定して、地球の質量

1キログラム当たり1年間に100万分の1キロカロリーの熱が発生しているものとしてします。

もしも地球の表面に断熱材が巻いてあって、この熱は全く外に逃げて行かないものとして計算すると、地球の温度は500万年に5℃という速さで上昇することになります。これは速いと思いますか？それとも大した速さではないと思いますか？

与太郎 500万年で5度か。うーん。そんなに速くもないんじゃないですか？

大 家 私はもの凄い速さだと思いますよ。1億年では500℃ですからね。生物が仮に発生したとしても、進化したり環境に適応する暇もなくあっという間に地球は死の星になってしまう筈です。

半径6,000キロメートルという地球の大きさは、内部で発生する熱量と表面から宇宙に逃げて行く熱量の釣り合いが取れて、地球の温度が上がりもせず下がりもしない、我々生物が快適に生きるためのちょうど良い加減の比表面積を提供しているわけです。

つまり、地球の大きさは臨界容積になっているというわけです。灰をかぶせた火鉢の炭火の例に似ていると思いませんか？

与太郎 なーるほど。地球の大きさもぴったりのまい具合になってるなんて、不思議なもんですね。

それはそうと、地球には太陽の熱もずいぶん来てるんじゃないですか？

大 家 おお、良いところに気がきましたね。太陽からの熱は地球の内部で発生するのと同じぐらいかそれ以上の量ですからね。

しかし、太陽熱は地球の表面を適温に保つのに役立っていますが、実は地球にやって来たのとはほとんど同じ量が地球から宇宙に放射されているんです。ただ、最近は二酸化炭素などの温室効果ガスが増えて来て、出て行く筈の熱が大気中に溜められてしまっている。それによる温暖化が問題になっているんですね。

与太郎 そういことなのか。地球が火鉢の炭と似てるなんて考えもしなかったなあ。