

五感的尺度と物理的尺度

福江 純

〈大阪教育大学 〒582-8582 大阪府柏原市旭ヶ丘 4-698-1〉

e-mail: fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp



日没は何分かかろうか。隣り星までの距離は太陽までの距離の何倍くらいだろうか。太陽は白熱電球よりどれくらい明るいのだろうか。太陽は何色だろうか。星の数と人の細胞数と細胞内の原子数はどれが多いだろうか。まず最初は直感で答えて、次に計算してみよう。

1. 講義で遊ぶ

講義中に尋ねたことや課題レポートなどで、ときどき面白いネタが出てくることがある。

たとえば、小学校教員免許に必須の科目で文科系の学生向けに「理科Ⅰ」「理科Ⅱ」というものがある。相手が文科系の学生だということもあって、あまりハードなレポートを課さないようにしている。それで、「ついたち」とか「みそか」など月に関する和語を枕に、月の満ち欠けを説明した回で、「月に関する言葉」というタイトルで、月の呼び方や月を含む言葉あるいは諺などをレポートで提出してもらった。このときもなかなか面白いレポートが集まった¹⁾。

あるいは、理科系の学生が必修の「地学Ⅱ」という講義がある（受講者は70人程度）。こちらはふつうに天文学の講義をしているが、同時間の別の講義に顔を出さないといけないときがある（そういう物理的に身体が足りないことが起こり始めている）。しかし、学内にはいるので、休講にする代わりに、“中間テスト”を行っている。ただし、実施中、ぼくは教室にいないのだから、ふつうのテストをしても意味がない。だから、課題（試験問題）はちょっと工夫が必要だ。そして、今年の課題でも面白い“作品”が集まった²⁾。

上記の2例は、学校現場向けのネタだと思い、天文教育普及研究会の会誌『天文教育』で紹介さ

せてもらった。

また同じ「地学Ⅱ」で、五感的尺度と物理的尺度の違いを考えてもらうことがある。今年はちゃんとデータを集めてみたので、本稿では、その内容を紹介してみたい。高校から大学の現場などで使えるネタになるのではないかと思う。

2. 日没は何分かかると思うか —時間感覚

高校までで習うはずだが、ラジアンはもちろん度分秒さえ忘れている学生が多いので、「地学Ⅱ」の初回は天文学に必要な単位などの復習から始めている。また電磁波や万有引力の法則なども、物理の講義で聞いているはずだが、やはり復習する。それらだけで、講義で2回分ぐらい、本だと数章分になってしまう³⁾。

その際、日常的な時間や角度に関する感覚として、日没にかかる時間を考えてもらうわけだ。

太陽が沈むとき、太陽の下の縁が地平線にかかってから上の縁が地平線の下に完全に隠れるまでの時間、すなわち日没にかかる時間はどれくらいだろうか。

具体的な計算をする前に、まず直感で答えてもらう。次に、太陽の視直径を与えて、計算させる。これがまあ、見事に食い違うのだ。

以下を読む前に、実際に考えてみて欲しい。

さて、直感の回答だ。いままでは、1分以下と思う人、2分ぐらいの人…など手を挙げさせるだけだったが、今年、初めてデータを取ってみた。

1分以下	1
2分以下	7
5分以下	20
10分以下	18
1時間以下	18

総計が64なので統計的には粗いデータだが、すぐくばらつきがあること、5分から10分程度ぐらいと体感している人間が多いことはわかるだろう。何でこんなに違うのか、わからないけど、面白い。心理的な調査などすでに同じモノがあれば、教えて欲しい。

なお、計算させると、ラジアンを復習した直後なので、みな正しい答えを出してくる。約2分である。

3. 星までの距離は太陽までの距離の何倍くらいと思うか—空間感覚

天文単位とか光年とか、数値が大きすぎて、日常的な感覚からは想像もつかない。しかし、比率にすると少しわかりやすくなるので、以下のような質問をする。なお、オーダーとファクターの違いは初回の講義あたりで話しておく。

一番近い星までの距離は太陽までの距離の何倍くらいか。

これももちろん、具体的な計算をする前に、まず直感で答えてもらう。次に、計算させる。これも以下を読む前に考えてみて欲しい。

まず、直感のほうだが、非常に大きくばらつく。細分するのが面倒なので、少しくくと、

100倍以下	2
1,000倍程度	4
1万倍程度	2
10万倍程度	11
100万倍程度	5

1,000万倍程度 6

1億倍以上 6

総計は36と少ない。当日は臨海実習で欠席者が多かったためと、直感のほうピンとこないためか書いていなかった学生が多数いたためだ。

一方、計算結果のほうだが、

約10万倍 33

その他 3

正答(約4光年/1天文単位)は約25万である。まあ、これもだいたい正答する。ただ、誤答の3人、少し問題なのは、全員が1よりも小さな(!)、1,000分の1という数値を出していたことだ。おそらく元ネタは一人なのだろうが、それが問題なのではなく、1よりも小さな値が出て不思議に思わないあたりが、問題かと思う。アンタの教え方が悪いと言われれば、それまでだが(笑)。

ところで、自然界の階層スケールを表すのに、パワーズオブテンという有名な概念がある。10倍ずつでは階層が非常に多くなるため、ぼく自身は100倍スケールをよく使う^{3),4)}。

しかし、実は、宇宙では10万倍スケールがよく出てくる。たとえば、

太陽系(天文単位)と星々(光年)

星々(光年)と銀河系(10万光年)

銀河系(10万光年)と宇宙(100億光年)

恒星ブラックホールと連星降着円盤

超巨大ブラックホールと降着円盤

構造スケールのステップが10万倍程度というのは、エディントンの巨大数ほどではないが、ちょっと面白い数の一致である。

4. 太陽はどれくらい明るい—明るさ感覚

講義の前半では、さまざまな天体现象を山ほどの画像とともに紹介するのだが、後半のほうになると、天体座標だとか、星の等級や色やHR図、星の質量の求め方、距離の求め方など、まあ、一般的な初等天文学の内容になる。

ほんとうは1等星と2等星の明るさがどれくらい違って見えるかとか尋ねたいのだが、星を見たことのない学生も多いし、そもそも都市圏ではるくに星が見えない。それで、あまりいい問いではないかもしれないが、次のような質問を試してみた。事前に太陽の光度や、100 Wの電球と単位が同じであることなどは説明してある。また光の強さが距離の2乗に反比例して弱くなることも復習してある。

1 mの距離に置いた100 Wの電球と比べて、太陽は何倍くらい明るいのか。また満月は何倍くらい明るいのか。

これもまず予測してみて欲しい。また実際に計算してみて欲しい。

まず、予測のほうだが、これも非常にばらつく。

100倍	8
1,000倍	7
1万倍	6
10万倍	9
100万倍	7
1,000万倍	1
1億倍	1

総計39だが2桁の投票がないくらいばらつきが大きい。また総計が少ないのは、今回も予想を答えていないものが多かったためだ。

ここら辺の問題になると、計算結果も誤答が増えてくる。

1万分の1	1
1程度	1
10程度	15
100程度	21
1億	1

これだけでは、10程度と100程度が拮抗しているようにみえる。ただし、10程度はすべて、13.7という値を出している。実は、この質問をした後に、太陽定数から太陽光度を求めさせるために、地球軌道での太陽定数の値として、 1.37 kW/m^2

の数値を板書している。つまり、13.7というのは、太陽定数の 1.37 kW を 100 W で割っただけなのである。単位の違いをわかっていないのも問題だし、質問のときには計算がわからなくて後で出てきた数値で適当に処理しているのも問題だろう。やっぱり教え方が悪いのかなあ(泣)。

ただし、この問題の難易度は少し高いかもしれない。実は、ぼく自身もあまり自信がない。

まず、太陽の明るさだが、太陽光度(約 $4 \times 10^{26} \text{ W}$)の値を1天文単位($1.5 \times 10^{11} \text{ m}$)の2乗で割ると、15mの距離に置いた20,000 W相当の電球の明るさとなる。したがって、200倍ということで、正答は100程度だ。

満月のほうはもっと面倒だ。というのも、月は自分で光っているわけではないので、満月の光度というものはないからだ。出し方としては、太陽の実視等級(-26.75)と満月の実視等級(-12.6)の差(14.15)から、明るさの比は $100 \times 100 \times 50$ 程度となるので、満月は1mの距離に置いた20,000 W / 500,000 = 0.04 Wほどの電球ぐらいに相当する、ということになるだろう。すなわち電球の2,500分の1にすぎない。

ちなみに照度を調べてみると、晴天時が100,000 lx、満月時が0.2 lx、室内が(300-) 500 lxということなので、200倍と2,500分の1はだいたい妥当な数値のようだ。

5. 太陽は何色か—色彩感覚

子どもはよく“真っ赤な”太陽を描くらしい。また一般書などでしばしば“太陽は黄色”と書かれたりする。体感的には何色なのだろうか、実際は何色なのだろうか。色彩感覚を尋ねるのは注意を要する質問かもしれないが、以下のような質問を試してみる。すでに、星の色やベテルギウスのHST画像などは見せた後である。

昼間の太陽は何色だと思うか。赤色、橙色、黄色、白色、青っぽい白。

数値を問う設問の場合、予測にせよ計算にせよ（とくに後者では）、しばしば“同じ”数値が乱立する。しかし、色については、素直に思ったままを書いているようである。

さてそれで結果だが、

赤	7
橙	4
黄	9
黄白	1
白	29
青白	1

となった（総計 51）。

夕日とかではなく昼間の太陽だと、わざわざ断っているのに、“赤”と答えるのは、よっぽど注意力がないか、単に興味がないかであろう。

正答（数値的な正答は難しいが）は、“白”，あるいは“黄白”，“青白”あたりまでかと思う。

問題というか、興味深いのは、“黄”や“橙”あたりだ。

実は、この質問は、今年の講義で初めてしてみたものである。というのも、天文教育に携わっている知り合いで、「長年、太陽の色は“黄色”だと思っていたし、そのように教えたり記事を書いてきた。」という人がいたからだ。「いやいや、太陽の色は“白”だよ。」「長年の思い込みからか“黄色”で、眩しいから白く見えると思っていた。」「でも、白色光というし、ND フィルター（全波長域で減光させるフィルター）通しても黄色にはならないでしょ。」「そういえばそうだ。」…

ま、たしかに、ぼく自身、理論的には太陽の色は“白”だと思うが、しばしば、黄みがあった白という説明をすることはある。

そこで、こういうことも尋ねてみたら、実に 1/4 ぐらいが、“黄”ないし“橙”と答えてきたわけだ。

夜空の星と異なり、ふだん、太陽をチラッとぐらい見ることは少なくないはずである。日中だと、眩しくはあるが、決して黄色には見えないと

思う。

太陽が“黄色”というのが、言葉による刷り込みなのか、黄色の範囲が個人差があるためか、何か心理学的影響のためなのか、これも理由はよくわからない。

というようなことを書いた日。たまたま大学構内を移動中に、かなり雲が厚かったので、太陽を“じっくりと”見てみた（よい子も悪い子もマネをしてはいけません）。いまもまだ残像が残って、モニタがチラチラしている。白色から灰白色の雲を通して、太陽は大部分が“白”ではあったが、周辺部が“黄味がかって”見えた。たしかに視覚上の体感として、“黄”という色彩を感じたのは間違いない。色は難しい。

6. ヒトの細胞数と細胞内の原子数はどちらが多いと思うか—数量感覚

天文学では 10 の何十乗という数値がバカスカ出てくる。銀河系の中の星の数、銀河の数、…、エディントンの巨大数というものさえある。しかし、地上にも大きな数はある。人間の体の細胞の数、地上の生物種の数など、いろいろある。

これらも具体的な数値がいくらかと考えると、よくわからなくなるが、比較という観点を入れれば少しはわかりやすくなるかもしれない。

銀河系の星の個数は約 2,000 億個である。ヒトの体細胞の数はいくつぐらいだろうか。1 個の細胞内の原子の数はいくつぐらいだろうか。

これも、まず直観で答え、次に、計算だ。

まず直感のほうだが、こちら辺になると、もうばらばらのメチャクチャである。下は 1 億個から上は 1,000 兆個まであって、正の字を書いて勘定したが、ある程度くくっても 8 枠ぐらいになってしまう。やや多いのが、

1 兆～3 兆 10

50 兆前後 10

ぐらいだった。

実際の細胞数だが、体重 50 kg の人間で、典型的な体細胞の大きさは $10\mu\text{m}$ ほどだそう。ヒトの比重を 1 程度とすれば、体細胞の数は約 60 兆個になる。この値は聞いたことのある人も多いだろう。計算させると学生もだいたい正答する (1, 2 割は計算間違いする)。

問題は細胞内の原子数だ。

まず、直感では、さらにばらついてしまう。下は 50 個 (ひどく小さい値) から上は 10 の 20 乗個まで、くくっても 10 枠ぐらいになり、正の字にならないところも多い。

で、計算値だが、細胞 1 個の重さを水素原子の質量で割ると、約 500 兆個になる。こちらのホウが大きいことがわかる。ただ、原子の数とした場合、酸素原子や炭素原子も多いので、大部分は水だと思えば、さらに 18 (水分子の分子量) で割って 3 (水分子の原子数) をかければ、80 兆個ぐらいで、全身の細胞数と同じぐらいかもしれない。

少し説明して計算させると、数十兆個程度の値を出してくると数百兆程度の値を出してくるのが全体の 7, 8 割ぐらいになる。

もとより正確な値が欲しいわけではない。

星の数ほど、とよく形容するが、銀河系内の星の数よりは、体細胞の数や細胞内の原子数のほうが多いのである。

なお、体重が大きい人でも小さい人でも、体細胞の数は細胞分裂で決まるのであまり変わらないらしい。体重が大きい人は細胞内の脂肪分などが増えて体細胞が大きくなるようだ。したがって原子数は体重に比例して多くなるだろう。

7. おまけ—アソビ感覚

この「地学 II」は必修科目なので、一応、きちんと (笑) 正規の期末試験をしている。ただし、暗記とかガチガチなのはイヤなので、ノートはもちろん参考書でもパソコンでも何でも持ち込み可 (ただし人間の持ち込みは不可) で実施している。また、たいてい、100 点以外のプラス α 問題を付

けている。本論とも関係するので、今年の試験と結果を少し紹介してみよう。

一応、“まともな”問題も出している。

基本問題 (各 20 点)

- 問 1 太陽の視直径 ($30'$) を用いて、日没にかかる時間を算出せよ。
- 問 2 太陽を除いて一番近い恒星であるケンタウルス座 α 星までの距離 (4.3 光年) は、太陽までの距離の約何倍ぐらいか、算出せよ。
- 問 3 ケプラーの第 3 法則を簡単に説明せよ。
- 問 4 太陽定数 (1.37 kW/m^2) を用いて、太陽光度を計算せよ。
- 問 5 年周視差が角度で $1''$ になる天体までの距離を算出せよ。

基本問題の方は、別に説明の必要もないだろう。ふつうにやっていたら簡単に 100 点が取れる。ただ、問 1, 問 4, 問 5 の計算問題は、講義で一度やっているはずなのに、できがそれほど良くない。

基本問題 (100 点満点) だけでは及第点が心配な学生や、少しでもいい成績にしたい学生のために、たいていは一つ二つのオマケ問題を付ける。実際、基本問題では 40 点ぐらいしかなくて、プラス α でかろうじて可 (C) になる学生が例年 (今年も) 数人はいる。またプラス α 問題のできが良く、秀 (S) が付くこともたまにある。

+ α 問題 (各 0 点 ~ +20 点)

- 問 6 太陽の見かけの明るさが 100 W の電球の何倍明るいかを求めるのに、太陽定数を 100 W で割って算出した人がいる。根本的な間違いを指摘せよ。
- 問 7 “ここはどこ”、“あなたはだれ”、“どこからきたの”、“どこへいくの”、“それはなぜ”。再度、この問いに答えよ。
#ユニーク性とオリジナル性を評価する

問8 自分で考案した問題と、その答えを述べよ。

#感心した答え、超優れたもの、感動した答え、笑ったものなどを評価する

問6は、4節で述べた問題から派生したプラス α 問題である。単位が違うの一言で答えは済むのだが、受験者70人中、一言でサクッと答えたのは10人ぐらいだった。

問7は、毎年、たいてい講義の初回のころと試験のときと、2回ぐらい尋ねる問題だ。どこかで書いたけど³⁾、もちろん、“いま教室にいる”、“福江 純という”、“家から来た”、“買い物に行く”、“宇多田ヒカルのミュージックCDを買うため”、というような答えを要求しているのではない。そのことは念を押すのだが、必ず数人は、自分の名前を書くヤツがいる。受けねらいではなく、たんに人の話を聞いていない。これはそれなりに答えられるので、今年の試験でも、50人ぐらいは回答しているが、とくに紹介するような際だった答えはなかった。

問8は、今年、初めて付けたプラス α 問題だ。ここで少し高い追加点を与えた回答をいくつか紹介してみる。

<感心したもの>

Q 月の光で日焼けするか？

A 紫外線ではなく温度を求めると断ったうえで、月光による放射平衡温度を154 Kと求めている。

Q 地球からナメック星まで、地球の科学力で作った宇宙船で4,338日と3カ月かかる。しかしナメック星の宇宙船なら1カ月、サイヤ人の宇宙船なら6日間でいける。地球からナメック星までの距離と、ナメック星およびサイヤ人の宇宙船が地球のその何倍の速さか求めよ。

A 地球の宇宙船が地球の脱出速度程度とすると、ナメック星は0.16光年先だそう。またナ

メック星の宇宙船の速度は光速の約2倍で、サイヤ人の宇宙船の速度は光速の約10倍になるらしい。ネットか本かに転がっている問題かもしれないが面白かった。より正確には、地球の脱出速度ではなく、地球軌道からの太陽系脱出速度を使うべきで、2倍かそこら遠くなるだろう。

<超優れたもの>

Q 一人でボール投げをして遊ぶことができる星はあるか？

A 星の上に立って水平にボールを投げ、星のまわりを一周してきたボールをキャッチするという状況を考えている。ボールを投げた速さ(=軌道速度)を20 m/s、遊ぶ時間(=周期)を1時間として、星の諸量を計算している。星の半径は10 km、質量は 7×10^{16} kg、重力加速度を3.5 mGと算出し、鉄でできた小惑星ならいいのではないかと結論している。ちなみに密度は16.7 g/cm³になるので、鉄の2倍くらいあるが、よく考えた問題だ。

<感動したもの>

これはとくになし。

<笑ったもの>

Q 衣類に向かって選挙宣誓している人がいます。誰でしょう？

A 福江先生(服へ宣誓)

基本問題やその他の+アルファ問題も完答ですばらしい答案である。

以上、最近では初めて標準6p以内に収まったが、何かの参考になれば幸いである。アバターを描いてくれた秋月千鶴さんに感謝します。

参考文献

- 1) 福江 純, 2008, 天文教育 20, 22
- 2) 福江 純, 2008, 天文教育 20, 27
- 3) 福江 純, 2008, 『そこが知りたい☆天文学』, 日本評論社
- 4) 福江 純, 2008, 『目からウロコの宇宙論入門』, ミネルヴァ書房