

村上ゼミシリーズ I

低炭素社会を問う

中学高校の理科の知識を武器に
トランスサイエンスに挑む

村上 雅人
小林 忍

飛翔舎

はじめに

世界は、いま「低炭素社会」"low carbon society" に向けて急速に動いています。日本政府も、100 兆円を超えるお金をかけてでも脱炭素社会を目指すと言いました。二酸化炭素 CO_2 の排出量を減らさないと地球が減んでしまうと警告されれば、真剣になってその対策に取り組むのは当然のことでしょう。

2021 年のノーベル物理学賞は、 CO_2 による地球温暖化を実証したとして真鍋先生に授与されました。真鍋先生の成果は、コンピュータの性能が低かった 1960 年代に、気象現象は物理法則に基づくという考えから、微分方程式を使って、地球の気象モデルを構築しようと挑戦したことにあります。そして、地球の大気循環をシミュレートできるモデルを構築しました。このように、気候シミュレーションの礎を築いたことが大きな功績です。

先生の CO_2 による温暖化機構は、大気中に CO_2 が存在することによって宇宙に逃げていくはずの赤外線が散乱されるという事実に基づいています。そこで、本書では、 CO_2 と赤外線の相互作用に焦点をあて、 CO_2 が熱を吸収するため、地球が温暖化しているという考えが間違っていることを明らかにします。

一方、赤外線との相互作用は、 CO_2 よりも水 H_2O のほうが、はるかに大きいことも知られています。実際に、真鍋先生は、 CO_2 により温度が上がると、大気中の飽和水蒸気量が増えて温暖化が

進むという正のフィードバックを報告しています。

地球は水の惑星と呼ばれています。この水の存在こそが、地球を宇宙のなかで、唯一、生命が存在できる星にしている要因です。水 H_2O の比熱は、固体、液体の中でもっとも大きいのです。このため、水は暖まりにくく、冷めにくいという特徴を示します。そして、地表の 70%を海が占めるおかげで、地球は緑豊かな星となっているのです。もし、(海) 水がなければ昼は灼熱地獄、夜は寒冷地獄となって多くの生物は死滅していたはずです。

みなさんは、放射冷却という気象現象を御存知でしょうか。晴れた日の夜に、地表から熱が奪われ、急速に地面が冷却する現象です。しかし、大気中には、温室効果ガスの CO_2 が存在し、地表から放出された赤外線を戻してくれるはずです。放射冷却が生じるという事実は、 CO_2 が赤外線を地表に戻す機能が小さいことを示唆しているのではないのでしょうか。

さらに、地球上の生物で栄養素をみずから合成できるのは植物だけです。光エネルギーを利用して CO_2 と H_2O から炭水化物 (CH_2O) をつくる光合成です。動物は、この栄養素を食べて生きているのです。つまり、 CO_2 は生命を支えるための必須物質なのです。この事実を忘れてはいけません。

地球環境問題は、多体問題であり、簡単に答えの出せるものではありません。しかし、科学的知識をもとに論理的な検証を進めることは可能です。村上ゼミでは、教員と学生が協力しながら、低炭素社会の意義を自分たちの頭で考え検証していきます。

2022 年 6 月

著者 村上 雅人

小林 忍

もくじ

はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3

第一回ゼミ 低炭素社会・・・・・・・・・・・・・・・・ 9

1. 1. 有機物とは 10
1. 2. ひとは二酸化炭素を排出する 12
1. 3. 炭素は大切な元素 15
1. 4. 炭素の同素体 19
1. 5. 炭素と同族のケイ素 Si 26
1. 6. 二酸化炭素と温暖化 29
1. 7. 気体の温度とは 35
1. 8. 温室効果ガス 40
1. 9. 赤外線吸収 41
1. 10. 電磁波と赤外線 43
1. 11. 赤外線と物質の相互作用 47
1. 12. 赤外活性 48
1. 13. 地球の温度 56
1. 14. 100 吸収された赤外線は 100 放出される 67
1. 15. 赤外線を吸収するという誤解 74
1. 16. 水 H_2O は CO_2 より赤外線吸収能が高い 75
1. 17. 赤外線反射による温暖化 79
1. 18. 真鍋先生の業績 81
1. 19. 連鎖反応 87
1. 20. 放射冷却はなぜ起こるのか？ 95
1. 21. 低炭素化へと進む世界 98

学生自主ゼミ 1 104

自主ゼミ 1「低炭素社会」のまとめ 108

補遺 1 光と物質の相互作用 111

補遺 2 空はなぜ青いか 115

補遺 3 二酸化炭素による温暖化説 118

補遺 4 ステファン・ボルツマンの法則 122

補遺 5 真鍋先生 127

第二回ゼミ 水の惑星 地球・・・・・・・・・・・・ 134

2. 1. 奇跡の星 134

2. 2. 砂漠はなぜ冷えるのか

——温室効果の働かない秘境 137

2. 3. 物質の三態——氷と水と水蒸気 141

2. 4. 水は異常液体 144

2. 5. 特異な水分子の構造 149

2. 6. 水素結合とクラスター 153

2. 7. 3 体問題 157

2. 8. 分子軌道法 161

2. 9. sp^3 混成軌道 165

2. 10. 水はモノを溶かす天才 171

2. 11. 気体も水に溶ける 181

2. 12. 赤外線吸収 191

2. 13. マイクロ波と回転運動 194

2. 14. 電子レンジと水 197

2. 15. 液体の水が鍵 198

2. 16. 気体の比熱には差がない 201

2. 17. 雲と水滴 204

もくじ

2. 18. 上昇気流 208

2. 19. 水蒸気の露点 211

2. 20. 不均一核生成 215

学生自主ゼミ 2 221

自主ゼミ 2「水の惑星 地球」のまとめ 224

第三回ゼミ 太陽と地球・・・・・・・・・・・・・・・・ 227

3. 1. 地球温暖化 227

3. 2. 温度測定は難しい 234

3. 3. 太陽からの入熱 248

3. 4. 公転軌道と四季 250

3. 5. なぜ北極と南極は寒いのか 253

3. 6. 春分と秋分 258

3. 7. 大気の変動は地球温度差の緩和 260

3. 8. 台風発生の理由 267

3. 9. 地球の公転軌道や自転軸は変動する 270

3. 10. 三内丸山遺跡——温暖な縄文時代に栄えた文化 276

3. 11. 地球内部の影響 279

3. 12. 地磁気 284

3. 13. 大気は地球を救う 291

3. 14. いま、そこにある危機 297

学生自主ゼミ 3 303

自主ゼミ 3「太陽と地球」のまとめ 307

ゼミ指導教員のコメント・・・・・・・・・・・・・・・・ 310

謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 315

参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 316

第一回ゼミ 低炭素社会

雅人 おはよう。今日のゼミでは、日本政府が取り組んでいる**低炭素社会** (low carbon society) を取り上げたいと思う。それでは、まず、基本事項の復習として『低炭素』の意味を知っているひとはいるかな。

莉緒 はい。低炭素の「炭素」は、**二酸化炭素** CO₂ (carbon dioxide) のことです。つまり、**地球温暖化** (global warming) の原因になっている二酸化炭素の排出を低く抑えるという意味なはずです。これは、日本だけでなく、世界が協働して取り組むべき課題とされています。

雅人 その通り。**炭素** C (carbon) という単語を使っているが、「低炭素」では誤解を与えるね。なぜなら、地球に存在する炭素の量は、増えも減りもせずに、常に一定だからだ。

和昌 え、そうなんですか。低炭素というと、地球の炭素の量を減らすことかと勘違いしていました。でも、その量が変わらないのに低炭素という用語を使うのは変ですね。

雅人 莉緒さんの指摘の通り、減らす必要があるのは、炭素では

なく、大気の中に含まれる気体の二酸化炭素のことだ。

1.1. 有機物とは

雅人 実は、炭素は大変有用な元素だ。そもそも、ひとを含む生物全体が炭素からできている。みんなは**有機物**という用語を聞いたことがあるかい。

しのぶ 地球上の物質は、**有機物** (organic matter) と**無機物** (inorganic matter) に大別できると習いましたが、その区別があいまいなところもあります。

直道 確か、炭素を含む物質が有機物で、それ以外の物質が無機物でしてでしょうか。

雅人 その通りなんだが、炭素の簡単な化合物である二酸化炭素 CO_2 や炭酸カルシウム CaCO_3 (calcium carbonate) などは無機物に分類される。動物や植物などを構成する物質の多くには炭素が含まれており、これらの物質を有機物と呼んでいるんだ。有機の英語の organic には「生物の」という意味があり、**生物**は英語で organism となる¹。よって有機物とは、ももとは生物が体内で生成する炭水化物 (carbohydrate)、たんぱく質 (protein)、脂肪 (fat) などの物質のことなんだ。

和昌 少し考えると「有機」と「無機」という日本語は分かりに

¹ 生物には living things という直截的な英語もある。教育科目としての「生物」の英語は biology である。

くいですね。英語の organic と inorganic を素直に訳せば「生物由来の物質」と「それ以外のもの」と分類した方が分かりやすいような気がします。

雅人 確かに分かりやすいね。かつては、生物由来の物質である有機物を人間が人為的に合成することはできないと考えられていた時代もあったんだ。もしそうならば分類は簡単だよな。しかし、化学の進歩によって、有機物も人工的に造られるようになっている。

しのぶ そういえば、いまでは「有機栽培」organic farming という用語も一般的ですね。「オーガニック栽培」とも言いますが、わたしの母は、値段が高くとも、つついオーガニックと銘打った食品をスーパーで買っています。

莉緒 わたしは高校時代に「有機化学」organic chemistry で苦労したことを覚えています。特に、ベンゼン環 (benzene ring) が出てくると、頭がくらくらしました。あれは、炭素の正六角形 (hexagon) のリングでしたね。

雅人 それだけ炭素からなる化合物は多様かつ有用なんだが、確かに、それを学ぶほうは大変だね。

直道 ベンゼンは炭素 C の六角形の環と、水素 H 原子 6 個からなる化合物で、確か化学式は C_6H_6 でしたな。しかし、有機化学では、C と H を略して描くために、それを知らないと亀の甲羅が並んだ訳の分からないものという印象しか持てないのですね。

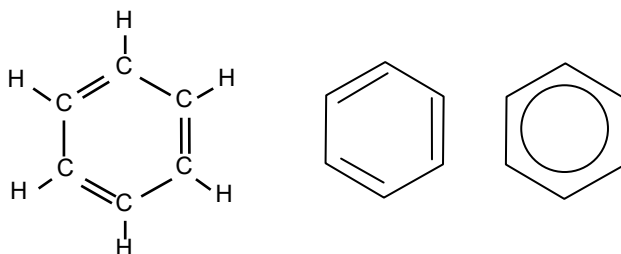


図 1-1 ベンゼン環：ベンゼン環は水素原子の位置をいろいろな元素で置換できる。また、ベンゼン環どうしが結合できるため多様な化合物を形成する(右図は略記した表記)。

雅人 みな、よく知っているね。実は、炭素はいろいろなところで利用されているんだ。人類にとって有用というよりも、生物にとっての必須元素なので、「低炭素」などと称することは本来あってはならないことなんだと思う。

たとえば、化石燃料 (fossil fuel) の石炭 (coal) や石油 (oil) の主成分は炭素だ。だから、これらの燃料を動力源として消費すると、成分の炭素 C が酸化されて、二酸化炭素 CO_2 が排出される。そして、これが問題とされている。

和昌 化石燃料を消費しているかぎり、 CO_2 が排出されるというのは宿命なのですね。

1.2. ひとは二酸化炭素を排出する

雅人 さらに、人間を含む動物は、みな、酸素を吸って二酸化炭

素を排出している。この**呼吸 (breathing)** によってエネルギーを得ているわけだから、動物の存在そのものが CO₂ 排出源となっていることになる²。

莉緒 それでも人間が呼吸で吐き出す CO₂ は、工業生産で排出される量に比べたら無視できるほど小さいのではないですか。

雅人 それが、そうでもないんだ。人間ひとりが 1 日で排出する CO₂ の量は約 1kg 程度とされている³。環境白書によると、日本における 1 世帯あたりの生活にともなう CO₂ 排出量は年 3600kg となっている。一方、人間ひとりが放出する CO₂ 量は 1 年で 365kg だから、5 人家族では 1825kg となる。つまり、呼吸するだけで、家庭での排出量の半分程度に達する。

しのぶ それは、確かに無視できない量ですね。

雅人 そうなんだ。さらに、日本の人口は 1.2 億人だから、日本人だけで、1 日で 1 億 2000 万 kg つまり 12 万トンもの CO₂ を排出している。中国の人口は 14 億人とすれば、140 万トン、全世界の人口は 76 億人とするとも 760 万トンにも達する。なんと 1 年間で 28 億トンとなる。これは、全世界の年間 CO₂ 排出量 300 億トンの 10% 近くにもなる。

² 人類は酸素を取り入れ、栄養素の炭水化物(CH₂O)の酸化反応で生じるエネルギーを利用して体を動かしている。この反応で CO₂ が放出される。

³ 活発に運動しているときと、安静にしているときでは酸素消費量は異なる。あくまでもおおざっぱな見積もりであることを付記しておく。ただし、無視できない問題でもあることに注意しよう。

直道 それは驚きです。ただし、日本はこれから人口減となるので、地球環境にはよい方向と言えるのですね。

雅人 ただし、地球全体で考えると、今後も人口は増えていく。2050年には100億人に達するという予想もある。人間が排出するCO₂量は、今後増え続けるんだ。さらに、呼吸をするのは人間だけでない。あらゆる動物にあてはまる。その量は決して無視できないはずだ。

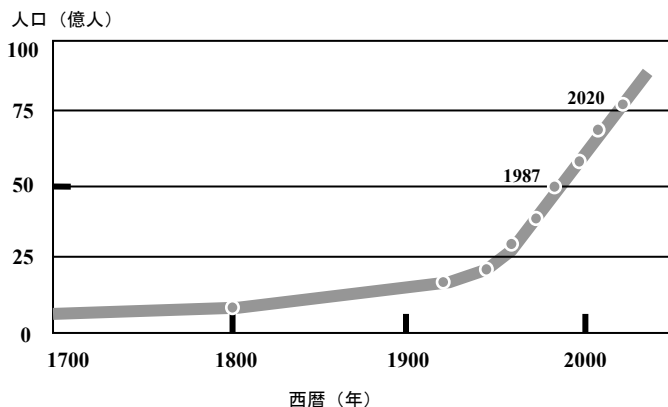


図 1-2 世界の人口の年度推移。20 世紀以降、世界の人口は急激に増大しており、2019 年で 75 億人、2050 年には 100 億人程度まで増加すると言われている。

しのぶ 生物由来のCO₂排出量が無視できないという話は驚きです。

雅人 いずれ、CO₂ 排出に関しては、いろいろなファクターを、

すべて総合して考える必要があることを忘れないでおう。

1.3. 炭素は大切な元素

雅人 ところで、炭素という元素の重要性について考えていたのだったね。わたしが、強調しなかったのは、炭素という元素は、動植物を含めたあらゆる生物の源泉となるだけでなく、多くの分野で大活躍しているということ。炭素がなければ、現代の文明生活 (modern culture) が成り立たないと言ってもよいくらいなんだ。

和昌 炭素というのは無くてはならない元素なのですね。

表 1-1 典型元素の周期律表

	1	2	13	14	15	16	17	18
1	${}_1\text{H}$							${}_2\text{He}$
2	${}_3\text{Li}$	${}_4\text{Be}$	${}_5\text{B}$	${}_6\text{C}$	${}_7\text{N}$	${}_8\text{O}$	${}_9\text{F}$	${}_{10}\text{Ne}$
3	${}_{11}\text{Na}$	${}_{12}\text{Mg}$	${}_{13}\text{Al}$	${}_{14}\text{Si}$	${}_{15}\text{P}$	${}_{16}\text{S}$	${}_{17}\text{Cl}$	${}_{18}\text{Ar}$
価数	+1	+2	+3		-3	-2	-1	0

※ 炭素 C は原子番号 (atomic number) が 6 の軽い元素である。

※ 1 族と 2 族は *s* ブロックと呼ばれ、最外殻電子が *s* 電子である。

13 族から 17 族では最外殻電子が *p* 電子で *p* ブロックと呼ばれる。

18 族は安定した原子構造をしており、他の元素と化合物をつくらない。そのため不活性元素 (inert element) と呼ばれる。

雅人 炭素 C が数多くある元素 element のなかで、これだけ重用されるのは、それなりの理由がある。一言でいえば多様な化合物をつくる能力があるということなんだ。それが、地球の生命の源

となっている。それでは、なぜ炭素には、このような能力があるのだと思う？

莉緒 もしかして、その原子価 (valence) が4だからでしょうか。そのため、結合手が4つもあって、いろいろな元素と自由に結合できると聞いたことがあります。

雅人 正解。炭素Cは、表1-1に示すように、周期表 (periodic table) では6番目に位置する典型元素 (typical element) で、構造としては原子核 (atomic nucleus) には6個の正の電荷 (positive charge) と、そのまわりを6個の電子が軌道を運動している。そして、図1-3のように、K殻に2個、L殻に4個の電子が配置されている。L殻には8個の電子が入れるので、まだ4個の空席がある。この結果、炭素には結合手が4個もあるんだ。

しのぶ 先生、図1-3はどちらかというと単純化した電子構造と習いました。実際にはもっと複雑でしたね。

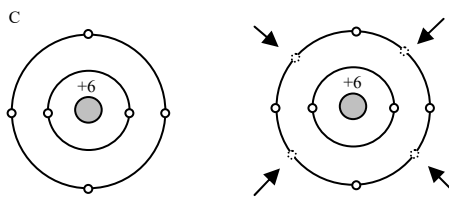


図1-3 炭素の電子構造：K殻には2個の電子が、L殻には4個の電子の計6個の電子がある。L殻には8個の電子が入れるので、4個の空席があることになる。これによって、4個の結合手が存在する。

雅人 そうだね。より正確な電子配列は、図 1-4 のようになる。これらは、量子力学 (quantum mechanics) によって明らかにされた原子の中の電子軌道 (electron orbital) で、 s 軌道と p 軌道がある。ここで、図 1-3 の K 殻は $1s$ 軌道に対応し、スピンまで考えると 2 個の電子を収容できる。L 殻には、 $2s$ 軌道と $2p$ 軌道があり、 $2s$ 軌道にはスピンの異なる 2 個の電子を収容でき、 $2p$ 軌道には 6 個の電子が収容できる。

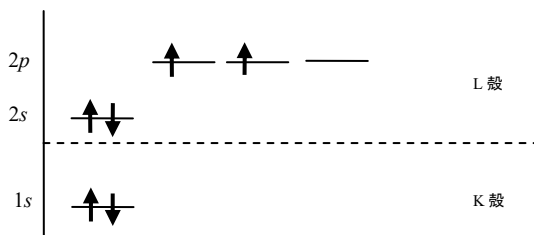


図 1-4 炭素 C 原子の電子配置：矢印の $\uparrow\downarrow$ は電子の上向きスピンと下向きスピンに対応する。スピン自由度も含めると、ひとつの軌道には 2 個の電子が収容できる。

雅人 さらに、他の原子との化合物を考える場合には、図 1-5 に示した s 電子や p 電子の軌道の形状などが重要となる。このとき、 s 電子の分布は球対称となるが、 p 電子には方位依存性がある。

しのぶ 先生、電子軌道に関する質問です。 s 軌道は分かるのですが、 p 軌道は意味不明です。電子はこんな変な軌道を回っているのでしょうか。互いにぶつかってしまうような気もするのですが。

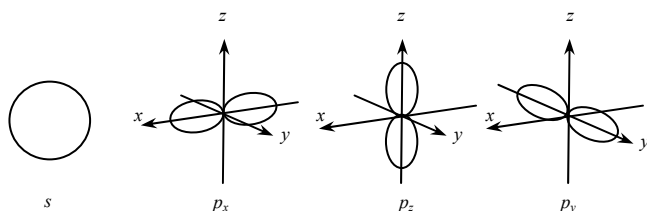


図 1-5 電子軌道の形状：ここでは s 軌道と p 軌道を示している。電子がこのような軌道を回っているという意味ではなく、電子の存在確率に対応している。

雅人 それは重要な視点だね。それに直接的な答えを出すのは簡単ではない。一般的には、これらの軌道は電子の存在確率を示すと言われている。実際には、シュレーディンガー方程式を解いたときの波動関数を図示したものということになる⁴。

しのぶ 量子力学は数学に基礎を置いているのですね。それにしても、不思議な軌道です。

雅人 ここでは、図 1-5 のように電子軌道は単純な球ではないこと、そして、その結果、原子が分子をつくるときにも、電子軌道を反映して、それほど単純ではないということを理解しておいて欲しい。

和昌 ところで、4 個の結合手があることは特別なことなのでしょうか。

⁴ 村上雅人著『なるほど量子力学 II』（海鳴社）を参照されたい。

雅人 そう、特別。マジックナンバーだよ。たとえば、炭素どうしが連結して、図 1-6 のような長い鎖状の分子をつくることができる。こんな構造がつくれるのは C だけなんだ。

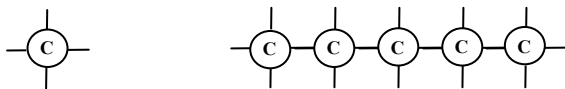


図 1-6 炭素には結合手が 4 個（マジックハンド）あり炭素原子どうしが結合して長い炭素鎖を形成する。また、H や O などの多種多様の元素と結合することができ多様な炭素化合物を形成できる。

和昌 そうでした。この炭素鎖（carbon chain）のおかげで、巨大な分子が作れるのでしたね。

雅人 巨大分子を高分子（macromolecule; giant molecule）あるいはポリマー（polymer）と呼んでいるが、確かに、その主役も炭素 C だ。高分子で有名なプラスチック（plastic）やゴム（rubber）も炭素からなる高分子なんだ。

1. 4. 炭素の同素体

莉緒 宝石のダイヤモンド（diamond）も炭素からできているのでしたね。炭（すみ）と同じ仲間と聞いて、とても驚いたことがあります。

雅人 ダイヤモンドは炭素原子が 4 個の結合手をフルに活用し互いに共有結合して、世界でもっとも硬い鉱物（mineral）となって

いる。炭素の同素体 (allotrope) のひとつなんだ。その構造は、まさに天の配剤だね。あるいは自然の芸術作品と言えるかもしれない。

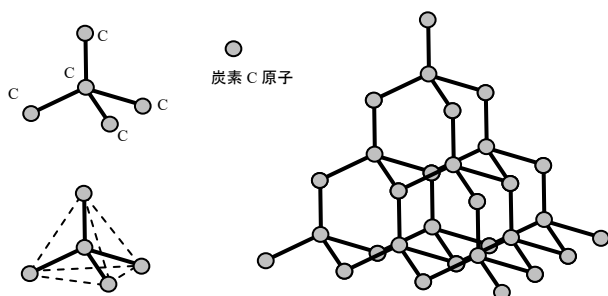


図 1-7 ダイヤモンド構造:炭素原子が 4 個ある結合手をフルに活用し、まわりの 4 個の炭素原子と正四面体構造を共有結合によって形成する。この構造が積層することによって、世界でもっとも硬いダイヤモンドが形成される。

雅人 ところで、炭素には他にも同素体があるが、なにか知っているかい。

しのぶ 鉛筆の芯の原料である黒鉛 (graphite) でしょうか。あれは、六角形の環が横方向に広がった、板状の結晶で、ダイヤモンドとまったく違いますね。色も黒いし、とても脆いです。

雅人 石墨やグラファイトとも呼んでいる。この脆さを克服するために、小さなダイヤモンドを混ぜるという技術もあるんだ。

しのぶ ダイヤモンドを混ぜるなんてもったいない気がします。それでも、おなじ炭素 C 仲間でしたね。

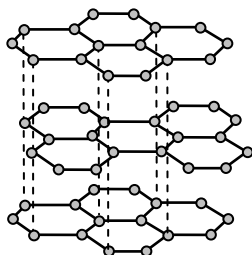


図 1-8 黒鉛 (graphite) の構造。六角形の環が層状に広がった層が弱く結合している。

雅人 ところで、この黒鉛の一層を取り出せたとしたら面白いと思わないか。

和昌 原子一層だけの炭素Cからなる六角形の網目構造となるのですね。

雅人 実は、セロハンテープを使って、この一層だけを取り出すのに成功したひとがいるんだ。そして、この層を**グラフェン** (graphene) と命名した。原子一層からなるグラフェンは面白い性質を示すことも分かって、ノーベル賞につながった⁵。

莉緒 鉛筆をセロハンテープではがしてノーベル賞ですか。それは、すごいですね。

⁵ ガイム (Andre Geim) とノボセロフ (Konstantin Novoselov) が 2010 年ノーベル物理学賞を受賞している。

雅人 もちろん、そのうえで、いろいろな物性を測定した成果もある。とはいえ、原子一層を取り出せるのは、炭素 C 原子が強固な六角形構造をつくれるからこそなんだ。

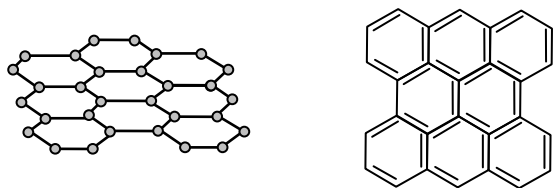


図 1-9 炭素 C 原子一層からなるグラフェンの構造

直道 炭素原子は、本当に優れものなのですね。確か、60 個の炭素 C 原子がサッカーボールのような構造となった C_{60} もありますね。

雅人 まさに自然が生んだ芸術作品だね。フラーレン (fullerene) とも呼ばれている。

しのぶ フラーレンと呼ばれる理由はなんでしたでしょうか。

雅人 バックミンスター・フラー (Buckminster Fuller) という建築家が設計したジオデシック・ドームが C_{60} と同じ構造をしているので Fullerene と呼ばれるようになったらしい。国際会議で海外の研究者がフラーレンと連呼しているんだが、最初はその意味が分からなくて戸惑ったことがある。そういえば、バッキーボール (Buckyball) と呼んでいるひともいたな。ちなみに、フラーレンの

発見者もノーベル賞を受賞している⁶。というか、炭素関連のノーベル賞は限りなく多いんだ。元素のヒーローと言われる所以だ。

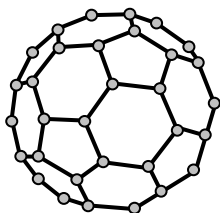


図 1-10 フラーレン C_{60} の構造: C 原子が 6 角形と 5 角形の網目を形成し、全体でサッカーボールのような構造を呈する。

莉緒 わたしは、フラーレンという名前のほうが素敵と思います。 C_{60} では無味乾燥ですね。

雅人 さらに、炭素 C は水素 H や酸素 O とも結合できるので、多種多様な化合物を形成している。そして、これらの炭素化合物が、われわれ人間を含む生物の体の重要な構成物となっている。まさに、炭素 C は生物の源なんだ。

莉緒 生物を形成する物質、つまり有機物が炭素を主成分として含んでいるのは、この多様な結合性に原因があるのでしょうか。

雅人 いいところに気づいたね。まさに、その通り。たとえば、

⁶ クロトー (Harold Kroto)、スモーリー (Richard Smalley)、カール (Robert Curl) の 3 人が 1996 年のノーベル化学賞を受賞している。

水素 H との結合を少し見ただけでも、いろいろな化合物をつくることができるんだ。そのほんの一例を図 1-11 に示している。

もちろん、これらの化合物だけではない。ちょっと考えれば、いろいろな構造が考えられるよね。実に多種多様なんだ。この他にも炭素は多数の原子からなる高分子も含めて生物にとって有用な化合物を形成している。

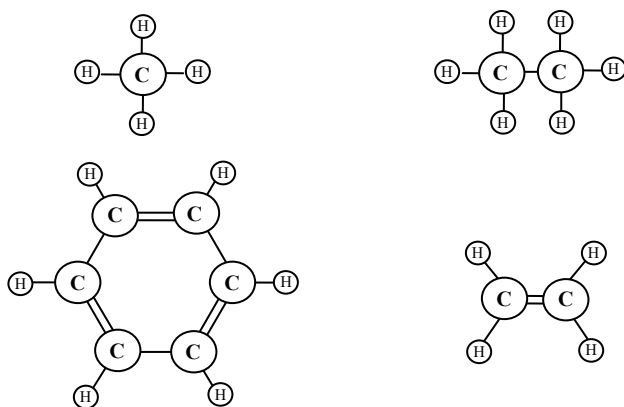


図 1-11 炭化水素化合物の例:メタン CH₄, エタン C₂H₆, ベンゼン C₆H₆, エチレン C₂H₄

莉緒 すごいことですね。一方で、これらの多様な構造を学ばなければいけない学生にとっては、有機化学はやっかいな学問ということになります。

雅人 確かにそうだね。ひとつひとつの化合物に注目していけば、とても面白く魅力的なんだが、残念ながら、学校の授業では限ら

れた時間のなかで、できるだけ多くのことを覚えなければならない。そうすると、じっくり吟味するというよりも、暗記科目のようになってしまう。多くのひとが敬遠したくなるのも分かる気がするな。

直道 そういえば、サークルの先輩は研究室で**エチレン** C_2H_4 (ethylene) の研究をしていると聞きました。どんな研究なんだろうと思っていました。だって、エチレンはありふれた物質で構造は簡単ですよ。研究することなんてないと思ってしまいます。

雅人 いやいや、エチレンは簡単な物質に見えるけど、実は、その構造そのものも完全には解明されていないんだ。炭素が2個ならば**エタン** C_2H_6 (ethane) となるのがより自然だよ。さらに、エチレンを重合してできた**ポリエチレン** (polyethylene) はプラスチックとして、その応用分野は、実に多種多様だよ。とても興味深い物質だ。

直道 そうなんですか。先輩の研究は面白くなさそうだなと思っていたのですが、実は、奥が深いんですね。

雅人 その通り。世の中は解明できていないことであふれている。すべての学問の奥がとても深いんだ。たとえば、**水素** H (hydrogen) や**酸素** O (oxygen) は2個で分子を形成し、 H_2 や O_2 という2原子分子 (diatomic molecule) の気体として普通に存在するんだが、炭素分子 C_2 は気体として一般的ではないんだよ。地球の大気では、炭素は二酸化炭素 CO_2 という気体として存在している。これも不思議だよ。

1.5. 炭素と同族のケイ素 Si

しのぶ ところで、**ケイ素 Si (silicon)** も結合手が 4 個ありますが、この元素も特別な存在なのでしょうか。

雅人 いいところに気づいたね。表 1.1 の周期表にも示したが、確かに**シリコン Si⁷**も炭素 C と同族の仲間で結合手が 4 個ある。だから、炭素と同じような性質があってもよいはずだ。もちろん、似た性質もある。たとえば、Si もダイヤモンド構造をとるが、とても脆い。さらに化合物を形成するという点では、炭素のような多様性はない。

莉緒 それも不思議ですね。だったらシリコンは炭素ほど有用ではないということですか。

雅人 いや、産業にとっては最重要元素のひとつとなっている。それは、**半導体 (semiconductor)** の基本材料として工業的には非常に重要な元素となっているからなんだ。産業のコメとも呼ばれている。

和昌 炭素と同じように結合手が 4 個あるならば、同じような多様性があってもよいような気がします、なぜなのでしょう。

雅人 簡単にいえば、Si は原子番号が 14 と大きく、図 1-12 に示すように原子半径が大きくなる。このため、炭素 C のように自由

⁷ ケイ素は、シリコンと呼ぶことも多い。漢字表記では、珪素や硅素となる。

度がないというのが理由のひとつとなる。

しのぶ 原子の中の電子軌道 (electron orbital) は、単純な球ではないということも重要でしたね。

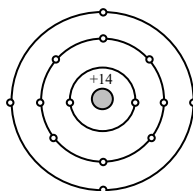


図 1-12 シリコン Si の電子構造: K 殻に 2 個、L 殻に 8 個、M 殻に 4 個の電子がある。原子サイズは C よりもかなり大きく、化合物を形成する際の自由度は小さくなる。

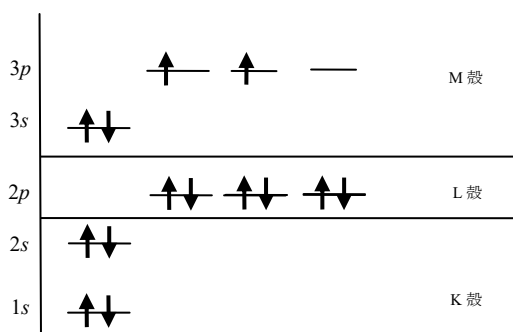


図 1-13 ケイ素 Si 原子の電子配置

雅人 その通りだね。Si の電子軌道は図 1-13 のようになっていて、図 1-4 の単純な C の構造とは異なり、かなり複雑になっている。

直道 つまり、炭素は構造が非常に簡単ということが多様性の原因となっているのですね。

雅人 特に 3 次元の構造を考えれば、C は、Si に比べて融通の効く元素なんだ。そういう意味では、炭素 C は、結合手が 4 個あるうえ、構造的にも単純だ。だからこそ、唯一無二の元素として多くの有用な化合物を形成している。

しのぶ 先生、そういえば、今日の講義は「低炭素社会」でしたよね。その話はどうになりましたか。

雅人 ごめん。いつものように話が横道にそれてしまった。ただ、強調したかったのは、炭素はとても重要で、それがなければ人間を含めたすべての生物が存在しえなかった貴重な元素という事実を、まず、みんなに理解してほしかったんだ。

直道 わたしは、先生の話聞いて、とても炭素 C に興味を持ちました。ぜひ、卒論では、炭素に関する研究をしたいと思いました。

雅人 それは嬉しいね。興味を持つということが学問の第一歩だからね。では、今日のメインテーマである「低炭素社会」へ話題を戻そう。ゼミの冒頭で、莉緒さんが応えてくれたように、「低炭素」と言うときの炭素は二酸化炭素のことを指す。それを、ま

ず、確認しておく必要がある。

和昌 先生の話聞いて思ったのですが、こんなに有用な炭素を悪者扱いして「低炭素」や「脱炭素」と言っているのは許せないですね。

雅人 その通り。正しくは、「低二酸化炭素」と呼ぶべきだよ。でも英語でも"low carbon"と言う。"low carbon dioxide"では長すぎるから略して使っている。残念ながら、日英だけでなく万国共通なんだ。

1.6. 二酸化炭素と温暖化

雅人 いま、世界中で「低炭素」が呼びかけられている。その理由は、二酸化炭素が地球温暖化の原因と言われているからだだね。地球の大気は、約 78% が窒素で、21% が酸素、二酸化炭素の量はわずか 0.03% (300ppm) しかないんだ⁸。それにもかかわらず、地球全体の温暖化に寄与するというのは少し考えれば不思議だね。

しのぶ 温暖化に寄与するガスは二酸化炭素だけでなく、メタン CH_4 (methane) や窒素酸化物（一酸化二窒素 N_2O (di-nitrogen oxide)）もあると聞きました。

雅人 それから、一時オゾン層破壊 (destruction of the ozone layer)

⁸ ppm は part per million の略で、100 万分の 1 のことである。よって 1% は 10000ppm となる。

で問題になったフロン (fluorocarbon) も温暖化に寄与すると言われている。これらの気体を**温室効果ガス (greenhouse gas)** と呼んでいる。英語の **greenhouse** は温室という意味だね。ところで、なぜ窒素や酸素は温暖化に寄与しないのだろうか。この疑問は、なぜ、二酸化炭素は温暖化に寄与するのかという問いと表裏一体だね。

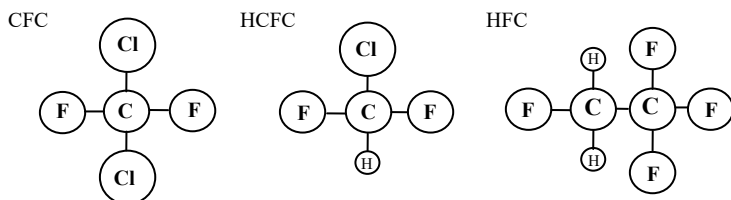


図 1-14 フロンとはフッ素と炭素の化合物であり、左から CFC (chloro-fluorocarbon), HCFC(hydrochlorofluorocarbon), HFC (hydrofluorocarbon) と呼ばれている。CFC と HCFC が塩素 (Cl) を持つためオゾン層を破壊する。HFC は Cl を持たないため、オゾン層を破壊しないので、代替フロンと呼ばれ利用されてきた。しかし、温室効果が高いため、現在は、その利用が制限されている。

直道 それは、二酸化炭素は熱を蓄えることができるからと聞きました。

雅人 熱を蓄える。どうやって？

直道 よく分かりませんが、二酸化炭素には熱を吸収できる仕組みがあるのではないのでしょうか。

雅人 そこが、とても重要だね。その前に、温室効果について話をしておこう。みんなは、**温室 (greenhouse)** は知っているね。

莉緒 ええ。**温室栽培 (greenhouse culture)** が有名です。寒い地方でも、温室を使えば、いろいろな植物を栽培できるのですよね。そのおかげで、冬に野菜が収穫できるとも聞きました。

雅人 それでは、温室の中には、温室効果ガスが入っているのかな。

しのぶ それはないです。たとえば、**ビニールハウス (plastic greenhouse)** は一種の温室ですが、普通の空気しかいれていないと思います。もし、余計なガスを入れたら生育環境も変わってしまいますから。

雅人 その通り。温室には、**ガラス (glass)** や**ビニール (plastic sheet)** で囲ったりしているものがあるが、原理的には温まった空気を外に出さないようにしているだけなんだ。もちろん、冬季などには、暖房を温室内に吹き込む場合もあるけどね。

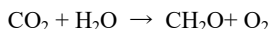
和昌 ビニールで囲うだけで効果があるのですか。

雅人 もちろんだ。ただし、最近ではトマトやいちごの栽培促進のために、二酸化炭素 CO_2 を注入する場合もある。

しのぶ それは、温室効果を高めるためなのでしょうか。

雅人 いや、そうではない。光合成 (photosynthesis) を高めて、成長を促すためなんだ。実際に、ハウス内の炭素濃度を 300 から 450ppm に上げるだけで成長量が 20%増加するという報告もある。さらに、トマトやいちご栽培では成長だけでなく、おいしくなることが確かめられている。逆に、CO₂濃度が 250ppm に下がると、成長率は 19%も減少してしまうんだ⁹。

莉緒 そうなんですか。CO₂は悪者という印象しかなかったので意外です。確かに植物は二酸化炭素 CO₂を利用して光合成



により、光エネルギーをうまく利用して、CO₂と水 H₂O から栄養素の炭水化物 (CH₂O) をつくっているのでしたね¹⁰。とすれば、CO₂は、植物の繁殖にとっては、むしろ必要なガスということになりますね。

雅人 その通りと思うよ。CO₂がいかにも地球環境に害を与える悪者にされているが、植物の成長のためには必須の気体であるということを忘れてはいけない。さらに、植物の光合成がさかんな夏はCO₂濃度は下がり、冬は上がるんだ。

直道 なるほど、季節によっても CO₂濃度は変化するのですね。

雅人 みんなは恐竜時代は知っているかな。ジュラシックパーク

⁹ たとえば、AGRI Journal, 2019 年 7 月号。文献によって数値は異なるが、CO₂濃度が大気濃度の 300ppm よりも高ければ植物の成長は促進され、低ければ抑制されるという傾向は、どの報告も一致している。

¹⁰ 実際の炭水化物は C₆H₁₂O₆ などのように、複合体 (CH₂O)_n となる。

でも有名なジュラ紀 (Jurassic period) は、約2億年前から1億4000万年前までの期間だが、当時の CO_2 濃度は2000ppm と言われている。いまの5倍以上だ。

しのぶ そんなに高かったのですか。

雅人 そのため、シダやソテツなどの植物が豊富な CO_2 を吸収して巨大化したと言われている。さらに、それを食べることができたので、巨大な恐竜が繁栄できたとも言われている。

莉緒 それは面白いですね。気温はどうだったのでしょうか。

雅人 いまより 10°C 高かったという報告もある。逆に、気温が高かったから大気中の CO_2 濃度も高かった可能性も指摘されている。

直道 なるほど、気温上昇にともなう CO_2 濃度の上昇の可能性が議論されていますね。確か、水に対する CO_2 の溶解度は温度が上がるほど小さくなるので、大気中に CO_2 が放出されると聞きました。

雅人 水温 15°C では、水 1m^3 に 1m^3 もの CO_2 が溶解できる。水には CO_2 がよく溶けるんだ。まさに、炭酸水がそうだ。ところが、水温が 25°C に上がると、30% の CO_2 が大気中に放出される。

莉緒 それはすごい変化ですね。

雅人 しかも、海水の表層だけで、全大気中の CO_2 の量の1.4倍

が溶解していると言われている。

和昌 海の表層と言われましたが、海全体では、どの程度なのでしょう。

雅人 大気中の CO_2 のなんと 50 倍が溶けている。

しのぶ それは、ものすごい量ですね。気温が変化すると、海水中の CO_2 の溶解度も大きく変化するので、大気中の CO_2 濃度への影響はとてつもなく大きいのです。ジュラ紀の CO_2 が 2000ppm だったことも納得できます。

雅人 さらに、わたしは、 CO_2 は人間にとって、とても優しい気体と思っているんだ。

和昌 えっ、さすがにそこまで言うのはどうかと思いますが。

雅人 長い歴史の中で、地球の大気は、窒素 N_2 、酸素 O_2 、アルゴン Ar、二酸化炭素 CO_2 さらに水の H_2O が主成分として落ち着いている。これらのガスは無味無臭で、しかも、人間には無害の気体だ¹¹。そして、生物（動物と植物）は O_2 を吸って CO_2 を排出する「呼吸」でエネルギーを得ている。また、植物は呼吸だけではなく、 CO_2 を取り入れて、太陽エネルギーの恵みによる「光合成」で栄養分である炭水化物 CH_2O を作り出している。このように、 CO_2 は地球上の生物が生きていくためのサイクルに見事に

¹¹ ただし、それぞれの気体の濃度が大きく変化すると危険である。たとえば、酸素濃度は 21% 程度であるが、これが 18% 以下になると人体に危険が及ぶ。

取り組まれているんだ。

しのぶ 言われてみれば、確かにそうですね。それでも CO₂ の存在によって地球の温度が上昇し、それが異常気象の原因と言われていますね。2021 年のノーベル物理学賞も授与されています。

1. 7. 気体の温度とは

雅人 それでは、よい機会なので、大気の温度について考えてみよう。実は、温度というのは物質の**運動エネルギー** (kinetic energy) に比例しているんだ。たとえば、熱いお湯の中に手を入れると痛く感じるのは、水の分子が猛スピードで運動しており、それが手にぶつかっているからなんだ。大気の場合も同じで、空気の温度が高いということは、窒素や酸素の気体分子がはげしく運動している状態に対応する¹²。たとえば、25°C では、酸素 O₂ 分子は秒速 440m で動き回っている。時速にすれば、1584km/h だ。

直道 えっ！音速 (speed of sound) が約 330m/s ですから、音よりも速いスピードで酸素分子が運動しているということですか。マッハの世界なのですね。にわかには信じられません。

雅人 そうなんだ。表 1-2 をみてもらえば分かるように、酸素よりも軽い水素 H₂ 分子や窒素 N₂ 分子はもっと速いスピードで運動している。

¹² 気体分子の質量を m 、その速度を v とすると、運動エネルギーは $(1/2)mv^2$ となる。温度はこれに比例する。多原子分子の場合には、直線運動だけでなく回転運動もあり温度に寄与する。

表 1-2 25℃ ならびに 100℃ における気体分子の速度

気体	分子量	25℃	100℃
H ₂	2	1930 m/s	2160 m/s
N ₂	28	470 m/s	530 m/s
O ₂	32	440 m/s	500 m/s
CO ₂	44	410 m/s	460 m/s

※ 気体分子の速度は絶対温度 T (K) とすると $\sqrt{T}$ に比例する。25℃ は 298K、100℃ は 373K に相当する。

コラム 気体分子運動論による平均速度 (v)

$$v = \sqrt{\frac{3RT}{M \times 10^{-3}}} \quad (\text{m/s})$$

R : 気体定数 8.31 (J/mol·K), M : 分子量, T : 温度 (K), 質量: m のミクロ粒子では

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$$

という関係が成立する。ただし、 k はボルツマン定数である。この関係は、分子の運動エネルギーが温度に対応することを示している。1mol の気体

では $\frac{1}{2}Mv^2 = \frac{3}{2}RT$ となるが、分子量 M の単位は g であるので、これを

kg に変換すると

$$\frac{1}{2} \frac{M}{1000} v^2 = \frac{3}{2} RT \quad \text{から} \quad v = \sqrt{\frac{3RT}{M \times 10^{-3}}}$$

となる。

雅人 実は、大気中に少しでも温度差があれば、速度の高い気体分子は、低温域にあってという間に移動してしまう。だから温度差

はすぐに解消されるんだ。ところが、ガラスの容器があると高速で運動している気体が容器内に閉じ込められて温度が保たれる。これが温室効果だ。もちろん、まわりが冷えていれば、気体分子がガラス壁にぶつかるたびにエネルギーを失って、徐々に室内の温度も下がっていくがね。

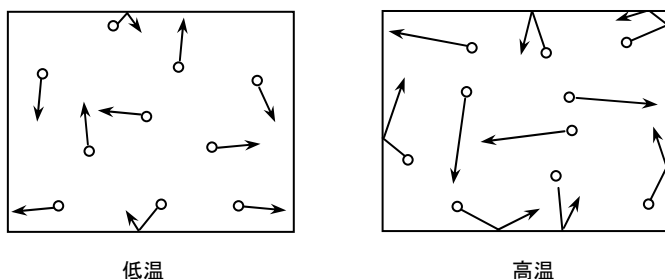


図 1-15 気体の温度は、気体分子の速度の 2 乗（運動エネルギー）に比例する。

莉緒 先生、質問です。われわれのまわりの空気中の窒素や酸素分子も猛スピードで運動しているなら、体にぶつかると痛くないのですか。

雅人 窒素や酸素分子が音速以上の速さで運動というのと、ジェット機をイメージするかもしれないね。そこで、どの程度の距離を自由に動けるかを計算してみよう。

しのぶ 気体の場合、種類に関係なく 1mol の体積は $22.4\ell^{13}$ でし

¹³ これは標準状態 (standard conditions) : 0°C、1 気圧 での体積である。

た。これは 22400 cm^3 に相当します。単位を cm から m に変換すれば $22400 \times 10^{-6} = 0.0224 \text{ m}^3$ となりますね。

この体積の中に 6×10^{23} 個の気体分子があるのですから、分子 1 個あたりの体積 (V) は $0.0224/6 \times 10^{23} = 3.73 \times 10^{-26} \text{ m}^3$ となります。

分子間距離 (a) は、 $V=a^3$ から $a=\sqrt[3]{V}$ と与えられるので

$$a = \sqrt[3]{3.73 \times 10^{-26}} = \sqrt[3]{373} \times \sqrt[3]{10^{-24}} = 7.2 \times 10^{-8} \text{ m}$$

となりますね。あれ、結構短いですね。

雅人 この距離を専門的には気体分子の平均自由行程 (mean free path) と呼んでいる。つまり、1 ミクロン ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$) の 1/10 の距離しか自由に動けないということを意味している。だから、気体分子は猛スピードで動き回りながら、他の分子と衝突を繰り返していることになる。

莉緒 これだと、気体分子が自由に動き回っているというイメージとは、確かに異なりますね。

雅人 それに気体分子の質量は無視できるくらい小さいから、肌で感じることはないね¹⁴。ただし、これらの気体分子の運動は圧力として感じることはできる。それが大気圧なんだ。 $PV=nRT$ という状態方程式¹⁵ (equation of state) を習ったね。この式の左辺に

¹⁴ 熱いお湯に手を入れると痛いのは、液体のお湯では水分子が、気体の時よりもはるかに密になっているからでもある。

¹⁵ P は圧力 (pressure)、 V は体積 (volume)、 n は気体のモル数 (molar number)、 R は気体定数 (gas constant)、 T は温度 (temperature) である。

ある P が気体分子の運動に対応した圧力となる。そして、圧力 P が右辺にある温度 T に比例している。

しのぶ 気体分子がぶつかっても痛くないのと同様に、われわれは**大気圧** (atmospheric pressure) も感じませんね。

雅人 実際の大気圧 1atm は 1kg f/cm^2 とかなり大きいんだが、人間はそれを感じない¹⁶。なぜなら、体の中と外が同じ大気圧になって、つり合っているからだ。でもドラム缶の空気を抜くと、缶がつぶれてしまうよね。あれが大気圧の威力。 1cm^2 で 1kg の物体を持ち上げる力だから、 1m^2 では 10000kg つまり 10t となる。

和昌 昔、実験で見たことがあります。普段は感じませんが、ドラム缶をつぶすぐらい大気圧は大きいんですね。ところで、温度のもととは分子の運動なのでしょうか。

雅人 そう。つまり、「温度が高い」イコール「気体分子のスピードが速い」ということなんだよ。液体ならば、その分子の運動、固体ならば構成している原子や分子の振動となる。

和昌 だとしたら、空気の成分である窒素 N_2 や酸素 O_2 分子の運動も温度に寄与しているということですか。

雅人 もちろんだ。運動に寄与しているというよりも、大気の場合はこれら気体の運動エネルギーそのものなんだ。その事実を忘

¹⁶ $1\text{kg f}=9.8\text{N}$ となる。 N はニュートンという力の単位であり、 1kg の物体を 1m/s^2 まで加速する力のことである。

れてはいけない。

直道 大気の主成分は、窒素と酸素なので、温暖化というのは窒素分子と酸素分子の運動が激しくなっている状態なのですね。

しのぶ それは、漠然と思っていた温暖化のイメージとは違いますね。わたしは、窒素や酸素は温度には関係ないと思っていました。

雅人 さらに、大気中に存在する CO_2 やアルゴン (Ar) などのすべての気体が互いに衝突しながら猛スピードで動き回っていることになる¹⁷。みんなは、理工系の学問を学んでいるのだから、曖昧なイメージではなく、一度、立ち止まって、自分の科学的知識をもとにじっくり考えてみることも重要だね。

1.8. 温室効果ガス

雅人 それでは、二酸化炭素 CO_2 がなぜ温室効果ガス (greenhouse gas) と呼ばれているのかを検証していこう。

しのぶ 窒素や酸素と二酸化炭素のなにが違うかですね。確か、二酸化炭素は熱を蓄えることができると聞きました。

雅人 環境問題 (environmental issue) を唱えるひとたちの多くは

¹⁷ 大気中のアルゴン濃度は 0.9%程度で、 CO_2 の 0.03%よりもはるかに高い。また、水蒸気 H_2O も含まれているが、湿度が高いときには 3%にも達する。

そう勘違いしているよね。実は「熱を蓄えることができる」という表現は正しくないんだ。

しのぶ でも、二酸化炭素は温暖化の原因と言われていますよね。だったら、熱を蓄えているということでよいのではないのでしょうか。

1.9. 赤外線吸収

雅人 正式には、窒素 N_2 や酸素 O_2 は、赤外線 (infrared ray) を吸収できないが、二酸化炭素 CO_2 は吸収できるという表現が正しい。ただし、「吸収」 absorption という用語も誤解を与えているのだが。

莉緒 ということは、他の温室効果ガスのメタン CH_4 や一酸化二窒素 N_2O も赤外線を吸収できるということなのですね。

雅人 そうということになるね。

直道 先生、赤外線は熱と関係がありますよね。たとえば、ストーブや電気こたつは、赤外線を発生して暖をとると言われています。だったら二酸化炭素も熱を吸収して蓄えると言ってもいいように思えますが、なにが違うのでしょうか。そういえば、真っ暗闇でも赤外線カメラを使えば、動物を捉えることができると聞いたことがあります。動物は熱を発しているからですね。

雅人 まず、赤外線が熱と同じものという考えは間違いだ。後で説明するが、赤外線は電磁波の一種で熱とは関係ない。赤外線が

物質にあたったときに、相互作用で熱が発生することがあるという表現が正しい（補遺 1 参照）。

しのぶ そうなんですか。赤外線と聞くと、テレビの CM から熱というイメージがあります。とすると、二酸化炭素 CO_2 の場合はどうなのでしょう。

雅人 実は、二酸化炭素 CO_2 は赤外線を吸収すると、すぐに放出してしまう¹⁸。さらに、赤外線を吸収しても熱を帯びない。だから「 CO_2 が熱を蓄える」という表現は正しくないんだ。ここを多くのひとが勘違いしている。英語でも *heat-trapping* という用語を使っているが、これも誤解を与える。

莉緒 赤外線を吸収しても、 CO_2 は熱を発生しないうえ、すぐに放出してしまうのですか。意外です。それなら CO_2 が温暖化の原因となるというのは、どういう機構なのでしょう。

雅人 固体や液体であれば、すぐ隣りに別の分子があるから、振動が物質内を伝わり発熱する。ところが、気体分子の場合には、分子間の相互作用がないため発熱しないんだ。

しのぶ そうなんですか。気体の場合は、吸収イコール発熱ではないのですね。それでは、 CO_2 がどのような機構で温暖化を招くのでしょうか。

雅人 その説明はあとで紹介したいと思う。いずれ、 CO_2 の気体

¹⁸ 吸収と放出の過程を「散乱」*scattering* と呼んでいる。

分子は、赤外線を吸収しても発熱しない。さらに、吸収するのは一瞬で、すぐに放出してしまうという事を覚えておいて欲しい¹⁹。世の中には、みんなと同じように二酸化炭素が熱を吸収して温暖化を引き起こすと誤解している人が多い。ところで、その前に、赤外線の正体を見てみよう。

1. 10. 電磁波と赤外線

雅人 先ほど少し話したが、赤外線は電磁波 (electromagnetic wave) に属している。だから熱エネルギーは持っていない。赤外線が物体に入射したときに、相互作用が生じて熱が発生するという表現が正しい。

図 1-16 に示すように、電磁波というのは電場 E (electric field) と磁場 B (magnetic field) の振動が空間を伝わっていく現象のことを言う。目に見える可視光 (visible light) は電磁波の一種なんだ。

しのぶ 電場と磁場の振動ですか。すぐにはピンときませんね。

雅人 テレビ放送や携帯電話に利用する電波 (radio wave) も電磁波の一種。また、健康診断のときにレントゲン撮影に利用するエックス線 (X-ray) も電磁波の一種。これらは、電磁波の波としての波長 (wave length: λ) が異なるだけで同じ仲間なんだ²⁰。電波

¹⁹ 吸収と放出にかかる時間は、わずかに 10^{-9} 秒程度である。100 万分の 1 のさらに 1000 分の 1 でありナノ (nano) の領域である。

²⁰ 電磁波は振動数 (frequency) によっても特徴づけることができる。周波数と呼ぶこともある。波長 λ と振動数 ν は反比例の関係にあり、光速を c とすると $c = \nu \lambda$ という関係にある。つまり、電磁波に関しては、波長あるいは振動数を指定すれば、その種類が特定できることになる。

は、電磁波の波長が 100m から km オーダーになるし、一方で、エックス線の波長は $1/1000000000 \text{ m}$ (10^{-8}m) 程度と非常に短い。このように、同じ電磁波でも、その波長の範囲は非常に幅広いんだ。

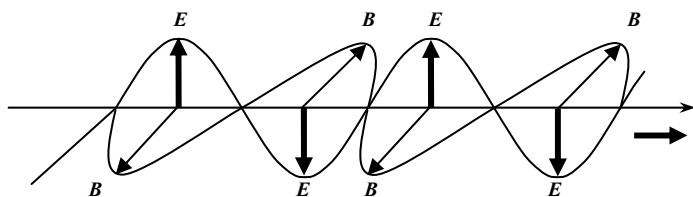


図 1-16 電磁波は電場と磁場の振動が空間を伝わる現象。電場 E と磁場 B は互いに垂直方向に振動し電磁波の進む方向はこれらの振動に垂直方向となる。つまり**横波** (transverse wave) となる。

和昌 赤外線というのは「赤」の外という意味ですね。

雅人 そう。赤色の光は可視光に属している。可視光は、ある波長の範囲 ($0.4\text{-}0.75\mu\text{m}$)²¹ にある電磁波の一種だ。そして、可視光には 7 色がある。虹 (rainbow) の色と同じだね。光は**プリズム** (prism) を使うと、**屈折率** (refractive index) の違いを利用して色を分離できる。それが 7 色とされている。そして、可視光でもっとも波長の長い光 ($0.75\mu\text{m}$ 程度) は**赤** (red) で、もっとも波長の短い光 ($0.4\mu\text{m}$ 程度) は**紫** (violet) となる。可視光よりも波長の長い電磁波を**赤外光** (infrared light) と呼んでいる。つまり、可視光の赤の外に位置し、人間の目には見えない $0.75\mu\text{m}$ よりも波長の長

²¹ マイクロメートル μm は 10^{-6}m のことで、1000 分の 1mm である。波長の単位としてはナノメートル nm もよく使うが 10^{-9}m である。よって $0.4\mu\text{m}$ は 400nm となる。

い電磁波となる。

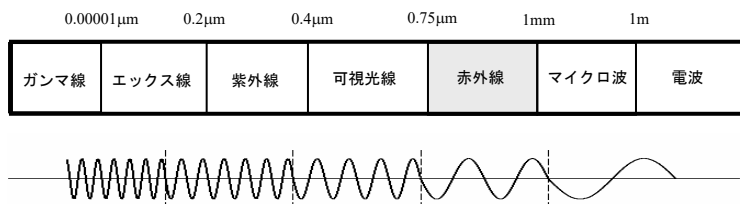


図 1-17 電磁波の種類：電磁波は波長の違いによってエックス線から電波まで多くの種類がある。

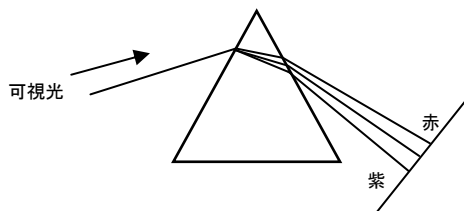


図 1-18 プリズムは電磁波が波長によって屈折率が異なることを利用し、太陽光を 7 色に分光することができる。波長が長い光ほど屈折率が小さい。

莉緒 とすれば、**紫外線 (ultraviolet ray)** は、可視光の紫の外の電磁波という意味なのでしょうか。

雅人 そうだね。ちなみに、可視光の紫よりも波長の短い電磁波のことで、こちらも目には見えない。ただし、目に当たれば危険

だ。エネルギーが大きいからね。

莉緒 紫外線で肌が日焼けするのはエネルギーが高いからなのですね。そして、赤の外だから赤外線、紫の外だから紫外線ということですね。

雅人 ただし、赤外線と呼ばれる電磁波にも波長の範囲があり、 $0.75\mu\text{m}$ から $1000\mu\text{m}$ (1mm) 程度となる。赤外光は、電磁波のなかで、物質との相互作用で、その温度を上昇させることができる性質を持っている。これが、赤外線加熱だ。

直道 波長は長すぎても、短かくても物質の温度上昇には寄与しないということですか。

雅人 そうだね。赤外線が熱と関係が深いのは、その波長が分子の振動や回転エネルギーとして物質に吸収されやすいからなんだ。人間が赤外線を浴びて暖かいと感じるのは、人体の 60% を構成している水が赤外線をよく吸収して、発熱するのが一因だ。一方、電磁波と相互作用しないことを透明 (transparent) と呼んでいる。たとえば、水は可視光に対して透明なので水槽を通して向こう側が見える。

莉緒 でも深い海の中は暗いですよね。

雅人 その通り。水が、完全に透明というわけではなく、水深が 10m 以上では通りにくくなる。これは、可視光が水と相互作用して、エネルギーを失うからなんだ。だから、昼には海水の温度が上がる。地面も光に対して透明ではない。よって、そのエネルギ

一を吸収し温度が上昇する²²。

しのぶ　ところで、先生は、二酸化炭素 CO_2 は吸収した赤外線をすぐに放出すると言われていましたが、その機構がよく分かりません。ということなのでしょう。

1. 11. 赤外線と物質の相互作用

雅人　実は、電磁波の吸収と放出という現象は、赤外光と相互作用する全ての物質に言えることなんだ。しかも、吸収から放出までの時間は非常に短く1ナノ秒 (nanosecond) つまり 10^{-9} 秒程度だ。

和昌　そんなに短いんですか。これでは、ほんの一瞬ですね。

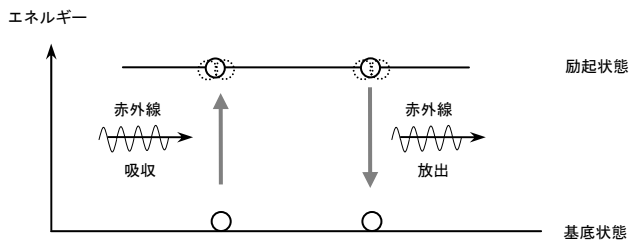


図 1-19 分子は赤外線を吸収して励起状態(エネルギーの高い状態：不安定)となるが、すぐに赤外線を放出して基底状態(エネルギーの低い状態：安定)に戻る。

莉緒　専門的には**励起状態** (excited state) と**基底状態** (ground

²² 光と物質の相互作用については、補遺 1 を参照いただきたい。

state) と呼ぶのでしたね。これは高校の化学でも習った記憶があります。

雅人 赤外線吸収だけでなく、光と物質の相互作用は重要な現象で、工業的応用も多い。たとえば、電子がエネルギーの高い状態に励起されて、もとの基底状態に戻るときに光を放出することがある。これが**発光ダイオード** (LED: light emitting diode) 照明の原理なんだ。そして、このような光を**蛍光** (fluorescence) と呼んでいる。電球とは違って LED は発熱しないのが特徴だ。

1. 12. 赤外活性

雅人 物質が赤外線を吸収できるということは、赤外線という電磁波の振動が分子内の原子間の振動とうまく**共鳴** (resonance) できるということを意味している。逆に、振動数が合わなければ、反応はしない²³。赤外線に共鳴できる**原子結合** (atomic bonding) のことを**赤外活性** (infrared active) と呼んでいる。赤外線を吸収できるかどうかは、分子の構造で決まることになる。別な見方をすれば、赤外線を照射したときに、どの振動数の電磁波が吸収されるかが分かれば、分子構造を特定できることになる。これを**赤外分光** (infrared spectroscopy) あるいは IR 分光と呼んでおり、物質の構造や種類を特定する手法として確立されている。

²³ すでに紹介したように、光と相互作用しないことを**透明** (transparent) と呼んでいる。大気中にある窒素分子と酸素分子は赤外光には透明である。実は、空気は、多くの光に対し透明である。ただし、波長の短い青い光を散乱する。

莉緒 それならば、どの波長の電磁波が、どの気体に吸収されるかも、全部、分かっているということなのですね。

雅人 その通りだ。例として二酸化炭素 CO_2 の赤外分光スペクトルを図 1-20 に示している。これを見ると、波数 κ : 667cm^{-1} (波長 λ : $15\mu\text{m}$) と波数 κ : 2347cm^{-1} (波長 λ : $4.26\mu\text{m}$) に吸収の大きなピークが見られる。これによって、被測定物が CO_2 と判定できるんだ。

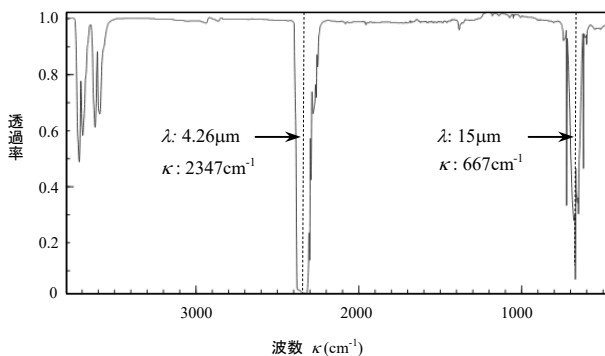


図 1-20 二酸化炭素 CO_2 の赤外分光スペクトル

直道 赤外線を吸収する気体が温室効果ガス (greenhouse gas) なのでしょうか。

雅人 その通り。二酸化炭素 CO_2 やメタン CH_4 がこれに相当する。ここで、二酸化炭素の構造を見てみると、図 1-21 のようになっている。炭素 (C) 原子をはさんで、酸素 (O) 分子が対称な位置に

配置されている。そして、振動するのは O-C と C-O の結合部分だ。

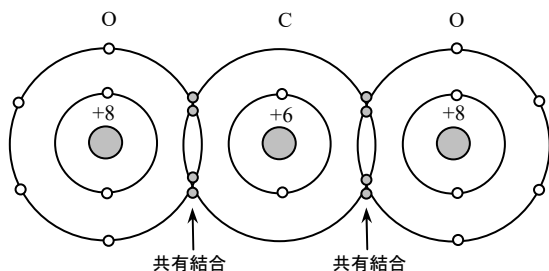


図 1-21 二酸化炭素 (CO₂) 分子の構造。炭素 (C) 原子をはさんで、酸素 (O) 分子が対称な位置に配置されている。

しのぶ 二酸化炭素の O-C-O の原子の結合部分が伸び縮みするということなのでしょうか。

雅人 イメージとしては、そうなるね。ただし、横方向だけでなく、上下の振動もあるよ。ここで、赤外活性ということを簡単に説明しておこう。

直道 赤外活性というのは、赤外線と相互作用するという意味ですね。

雅人 その通り。電磁波である赤外線は電場と磁場が振動している横波である。さらに、その進行方向は、これらの振動方向に対して垂直となる。ここで、物質との相互作用で重要となるのが、電場の振動、つまり、電気プラスとマイナスの振動だ。そして、

分子内の電子が振動するには電氣的な**極性 (polarity)** があることが前提となる。つまり、電氣的な偏りのことだ。これを示す指標が**電気陰性度 (electronegativity)** だ。電気陰性度とは、原子が電子を引き寄せる強さの指標であり、フッ素が 3.98 と最も大きい。ここで、図 1-22 に示すように、C の電気陰性度は 2.55、O は 3.55 なので、これらの数値の差が電荷分布を反映するので、端部の方が負の極性が大きいということになる。よって、電場の振動に呼応する可能性がある。

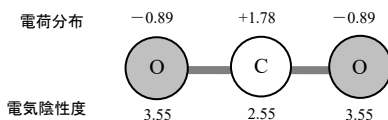


図 1-22 二酸化炭素分子の電荷分布：C と O の電気陰性度の差によって電気極性が -0.89 , $+1.78$, -0.89 の電荷分布となる。

莉緒 可能性があるとはどういうことでしょうか。電氣的な偏りがあれば、**電場の振動 (oscillation of electric field)** に呼応できると思うのですが。

雅人 実は、図 1-22 の O-C-O の O-C と C-O の結合部が左右対称に伸縮振動した場合には電氣的な振動とはならないんだ。

莉緒 どういうことでしょうか。意味が分からないのですが。

雅人 それでは、図 1-23 を使って説明してみよう。この図では、電磁波の電場の振動を模式的に示している。この振動に対応して、

分子内の原子間の振動にともない電気極性（つまり+と-の電気）が反転することが求められる。

ところが、図 1-22 のような横方向への**対称的な振動** (symmetric vibration) では、この電磁波（赤外線）の正負の電気振動には対応できないんだ。このため、O-C-O の対称的な横方向の振動は赤外不活性となる。

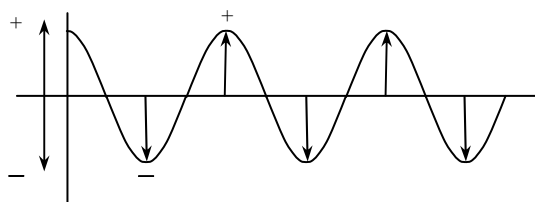


図 1-23 電磁波の電氣的な振動

和昌 なるほど。それでは、どんな振動ならば、赤外活性となるのでしょうか。

雅人 それは、図 1-24 のような振動だ。片方の結合部が縮めば、片方の結合部が伸びるような非対称な伸縮振動 (anti-symmetric stretching vibration) となる。

しのぶ なるほど。-の酸素 O 原子と+の炭素原子 C の距離が左右で違うので、当然、電氣的な偏りが生じますね

雅人 その通り。図 1-24 の場合、-の酸素 O 原子が+の炭素 C 原子からの距離が大きいほうが負の極性を持つことになる。

ここで、電磁波の振動に対応した CO_2 の振動モードを模式的に図 1-25 に示してある。

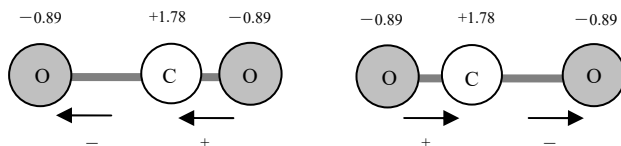


図 1-24 赤外活性となる CO_2 の伸縮運動。左右が非対称な振動となる。

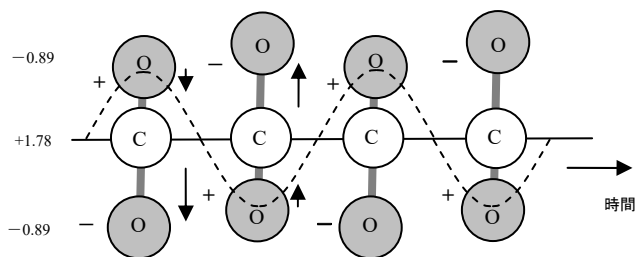


図 1-25 赤外活性な CO_2 の振動モード: O-C と C-O の結合が非対称に振動している状態。よこ軸は時間であり、二酸化炭素分子は、その場で非対称な伸縮を繰り返している。

雅人 片方の C-O 結合が伸びたら、片方の O-C 結合は縮む。これならば、電場の正負が形成されるので、電磁波の電場の振動（正と負一の振動）にうまく対応できる。どう、分かるかい。そして、この振動モードに対応する赤外線波の波長は $4.26\mu\text{m}$ となる²⁴。

²⁴ 振動モードを波数 k で示す場合もある。波数は波長 λ の逆数なので $k=1/\lambda$ となり、 $\lambda=4.26\mu\text{m}=4.26\times 10^{-4}\text{cm}$ から 2347cm^{-1} と与えられる。

莉緒 あらためて、図を使って説明してもらえばよく分かります。でも、図 1-25 のような非対称な振動が CO_2 分子で生じるというのも、なにか不思議ですね。

和昌 そして、赤外線分光で $4.26\mu\text{m}$ に吸収ピークがあれば、その物質は CO_2 と断定できるということですね。そういえば、先生は上下の振動もあると言われていましたね。どんな振動がよく分からないのですが。

雅人 これも図を使って説明したほうが分かりやすいので、図 1-26 を見てごらん。

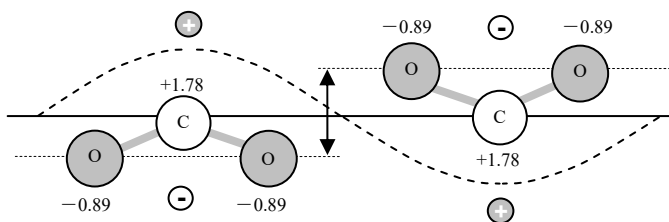


図 1-26 CO_2 における上下の振動：この振動においても電気的な正負の振動が生じることが分かる。正式には $\text{O}-\text{C}-\text{O}$ の角度が 180° からずれることから変角振動と呼ばれている。

和昌 なるほど。確かに、この振動ならば上下で正と負の電気的な振動が生じますね。

雅人 上下というのは分かりやすく表現しただけで、正式には変

角振動 (bending vibration) と呼んでいる²⁵。O-C-O の角度が変化するので、この名がついている。この振動モードに対応した赤外線
の波長は $15\mu\text{m}$ (波数では 667cm^{-1}) となる。

一方で、いまの機構を基本に置けば、窒素分子 N_2 や酸素分子 O_2 では、電気的な偏りはないから、電気的な分子振動は生じないことも明らかだよね。これは大丈夫だね。

しのぶ はい、分かります。つまり、光と相互作用するためには、分子構造に電気的な偏りが必要ということなのですね。だから、窒素や酸素は赤外不活性で温室効果ガスではないということになります。

雅人 その通り。ところで、正 (+) と負 (-) の対からなる分子を**電気双極子** (electric dipole) と呼んでいる。そして、赤外活性の条件として「分子が**双極子モーメント** (dipole moment) を有する」ということが正式な定義となる。

さらに、大事なことは、赤外線によって励起された分子の振動状態は安定ではないということなんだ。振動しているということはエネルギーが高いということを意味している。これを緩和するために、励起状態の分子は、赤外線を放出して、もとの基底状態に戻ることになる。力を加えて振り子を振動させれば動きだすが、やがて静止した元の状態に戻るのと同じだよ。

和昌 とすれば、 CO_2 から放出された赤外線がどうなるかですね。

²⁵ 変角運動ができる方向は図 1-26 の方向と、紙面に対して垂直方向もある。これら運動は等価であり、2 種類の運動が同じエネルギー状態に縮重していると呼んでいる。

雅人 その前に、地球の温度がどのように決まるかを復習しておこう。

1. 13. 地球の温度

雅人 地球には、太陽光というエネルギーが注がれている²⁶。しかし、太陽光が注ぎ続けるだけでは、地球の温度は上昇し、灼熱地獄になってしまう。実は、地球は宇宙に熱を逃がしており

太陽から注がれる熱 — 宇宙に逃げていく熱

という式で、地球の温度は、決まっている。

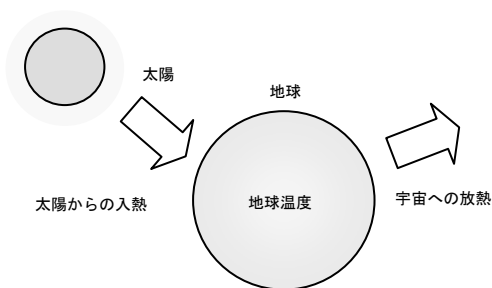


図 1-27 地球の温度は、太陽からの入熱と宇宙への放熱のバランスで決まっている。

²⁶ 太陽エネルギーのほとんどは原子量が 1 の H 原子 4 個から原子量が 4 の He 原子が 1 個できる核融合反応 (nuclear fusion) である。よって、太陽には水素とヘリウムが存在する。なお、ヘリウムという元素名は、ギリシャ語で太陽の意の helios に因んでいる。

しのぶ とても簡単な式ですね。これらの値がどの程度か分かっているのでしょうか。

雅人 まず、太陽からの入熱は測定できて、**太陽定数** (solar constant) といわれている。一般には、単位時間、単位面積あたりのエネルギーとなり、値としては、 $1370 \text{ [Js}^{-1}\text{m}^{-2}]$ となる。

直道 J はジュール (joule) でエネルギーの単位でしたね。確か $1[\text{N}]$ の力で、ものを $1[\text{m}]$ 動かせるエネルギーと習いました。つまり $1[\text{J}] = 1[\text{Nm}]$ という関係にあります。

莉緒 s は秒 (second) のことで、 s^{-1} というのは、1 秒あたりという意味ですね。つぎに m はメートルで m^{-2} は、 1m^2 あたりという意味になります。つまり、1 秒間に 1m^2 の面積に照射する太陽のエネルギーという意味になりますね。

雅人 実は、電気で登場する**電力** (electric power) の単位は**ワット** (watt: W) なんだが、 $1[\text{W}] = 1[\text{Js}^{-1}]$ という対応関係にある。つまり、単位時間あたりのエネルギーという意味となる。

和昌 電子レンジの出力に 600 [W] と 1200 [W] などがありますが、よく違いが分かりませんでした。これらは、単位時間あたりのエネルギーなのですね。

しのぶ つまり、 600 W で 1 分の加熱時間は、 1200 W ならば 30 秒で済むということですね。

雅人 そのたとえば分かりやすいね。ところで、太陽定数には $[\text{Js}^{-1}]$ という単位が入っている。これは $[\text{W}]$ に対応するから、太陽定数は $1370 [\text{Wm}^{-2}]$ となって、単位面積あたりの電力と解釈することもできるんだ。

直道 なるほど、日差し、つまり電力が強くても、短時間だと日焼けしませんが、時間が長くなると日焼けします。日差しの強さがワット(W)で、それに時間をかけたものがエネルギーと考えれば分かりやすいですね。

雅人 そして、太陽から注がれる全エネルギーは、太陽定数に照射の有効断面積をかければ算出できる。

莉緒 有効とはどういう意味でしょうか。

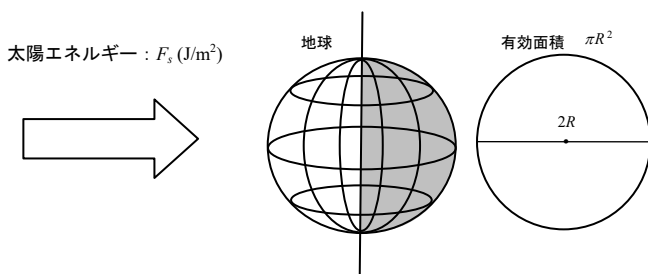


図 1-28 地球が太陽エネルギーを受け止める有効断面積は、地球の半径を R とすると πR^2 となる。

雅人 それは、図を使って説明したほうが分かりやすいと思うので図 1-28 を見て欲しい。地球の半径を $R [\text{m}]$ とすると、地球の表

面積は $4\pi R^2$ [m^2] となり、日が当たるのは、その半分なので $2\pi R^2$ [m^2] となる。ただし、赤道と極地では、日の当たり方が違う。そして、地球が受ける有効な面積は、日射に垂直な面積となる。これは、ちょうど πR^2 となるんだ。

直道 なるほど。そのために有効と呼んでいるのですね。これは、雨や風の向きと同じですね。後は、太陽定数に有効断面積をかければよいのですね。

雅人 実は、これだけではまだ不十分なんだ。実は、地球を含む天体は、入射光を反射することが知られている。この割合を**アルベド** (albedo) と呼んでいる。この反射光のおかげで、われわれは星を見ることができる。全部、光が吸収されたら、真っ暗でみえないからね。これが**ブラックホール** (black hole) だ。太陽系でみると、金星のアルベドは 0.9、火星は 0.25、月は 0.11 程度で、地球は 0.3 となっている。

莉緒 地球は、太陽光の 7 割を吸収するということですね。

雅人 これを考慮すると、太陽から地球に注がれるエネルギーは、単位時間あたり

$$(1-A)S_0\pi R^2 [\text{Js}^{-1}]$$

と与えられる。ただし、 A はアルベドで 0.3、また、太陽定数を S_0 とおいている。

和昌 あとは、値を入れていけばよいのですね。 $A=0.3$, $S_0=1370$ [$\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$] で $R=6.38\times 10^6$ [m] 代入すれば

$$0.7 \times 1370 \times 3.14 \times (6.38 \times 10^6)^2 = 1.23 \times 10^{17} [\text{Js}^{-1}]$$

となります。

雅人 そうだね。では、今度は地球から宇宙に逃げていく熱を計算してみよう。

しのぶ こちらは、いろいろな因子が絡むので計算が大変そうですね。

雅人 実は、そうでもないんだ。みんなは**ステファン・ボルツマンの法則** (Stefan-Boltzmann law) を知っているかな。

直道 まったく知りません。

雅人 有限の温度 T にある物質は、電磁波を放出している。真っ暗な夜でも、動物は、その体温に応じた電磁波、つまり赤外線を放出している。だから、赤外線カメラを使えば真っ暗闇でも動物を捉えることができる。

莉緒 映画の**プレデター** (predator) では、宇宙からのエイリアンが赤外線で人間を捉えるというストーリーで、とても怖かったのを覚えています。

雅人 実は、ステファン・ボルツマンの法則²⁷によると、温度 T の物体が単位時間、単位面積あたり放出するエネルギーは σT^4

²⁷ 補遺 4 に導出過程も含めて詳細な解説がある。

$[\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}]$ となって、その温度 T の 4 乗に比例することが知られている。そして、比例定数の σ は、ステファン・ボルツマン定数として知られており

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}]$$

と与えられる。地球の表面積は、 $4\pi R^2 [\text{m}^2]$ だから、宇宙に単位時間に逃げていく熱は

$$4\pi R^2 \sigma T_e^4 [\text{Js}^{-1}]$$

と与えられることになる。

和昌 地球の温度が変化しないとすれば、太陽からの入熱と、宇宙への放熱がつりあっていることになりますね。

雅人 その通り。これを放射平衡 (radiative equilibrium) と呼んでいる。式で書けば

$$(1-A)S_0\pi R^2 = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

となる。

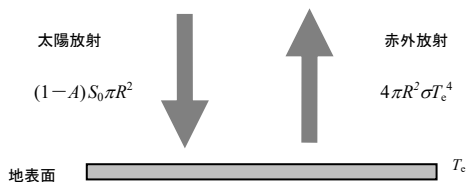


図 1-29 地球における放射平衡。太陽からの入熱と宇宙への赤外放射がつりあう状態のことである。

しのぶ πR^2 は両辺に共通なので

$$(1-A)S_0 = 4\sigma T_e^4$$

となりますね。

莉緒 なるほど、これを計算すれば、地球の平衡温度 T_e は

$$T_e = \left(\frac{(1-A)S_0}{4\sigma} \right)^{1/4} \quad [\text{K}]$$

と与えられることになります。

雅人 その通りだ。後は、具体的な値を代入すればよい。

直道 では、実際に計算してみます。 A が 0.3、 S_0 が $1370 \text{ [Js}^{-1}\text{m}^{-2}]$ で $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ [Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}]$ ですから

$$T_e = \left(\frac{0.7 \times 1370}{4 \times 5.67 \times 10^{-8}} \right)^{1/4} = (42.28 \times 10^8)^{1/4} \cong 255 \quad [\text{K}]$$

と計算できます。

雅人 その通り。この見積もりでは地球の平衡温度は 255 K で摂氏にすると -18°C となる。

莉緒 これは、寒すぎですね。どこか、計算間違いをしていたのでしょうか。

雅人 いや、計算は正しいよ。この差は、大気による温室効果 (greenhouse effect) と考えられているんだ。

しのぶ 温室効果ですか。大気がちょうど布団のような役割をしているのですね。

雅人 布団とはよい表現だね。地球には大気があって、その中を窒素や酸素分子が猛スピードで動きまわっている。これらの大気が衣のように地球を包んでいるんだ。実は、この効果を仮想的なガラスで覆われていると仮定することもある。

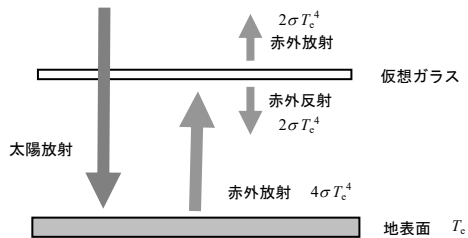


図 1-30 仮想的なガラス板による温室効果

和昌 大気が温室のようにガラス容器で閉じ込められているというイメージですね。

雅人 厳密には閉じてはいないが、近似的なモデルとしては十分有用なんだ。

直道 具体的には、どのような計算になるのでしょうか。

雅人 まず、太陽放射と赤外線放出がつりあっているということは大丈夫だね。

直道 はい、これならば温度は変わりません。

雅人 ここで、仮想ガラスは太陽光には透明であるが、赤外線には不透明と仮定する。

しのぶ 大気の効果を手透明のガラスで覆われた温室のように仮定するのですね。

雅人 ここで、仮想ガラスは地球表面からの赤外放射をすべて吸収し同量を上下均等に射出すると考える。すると宇宙に逃げていく赤外線による熱エネルギーは

$$(1-A)S_0 + 2\sigma T_e^4 = 4\sigma T_e^4$$

太陽放射 + 大気からの赤外反射 = 地表面からの赤外放射
という関係が得られる。

和昌 この式が成立するならば

$$T_e = \left(\frac{(1-A)S_0}{2\sigma} \right)^{1/4}$$

という式が得られます。

莉緒 この式に、具体的な数値を代入すれば $T_e = 304 \text{ [K]}$ となりますね。これは 31°C とかなり高いですね。

雅人 この値が、温室効果が最大の場合の地球温度だ。ここでは、地球からの赤外線放射をすべてガラス板が吸収すると仮定しているが、実際には 100% 吸収できるわけではない。だから、吸収率を a ($0 \leq a \leq 1$) とすれば

$$(1-A)S_0 + 2a\sigma T_e^4 = 4\sigma T_e^4$$

となり

$$(1-A)S_0 = 2(2-a)\sigma T_e^4$$

という式が得られる。つまり、地球温度は、大気の赤外線吸収率 a に依存することになる。

しのぶ なるほど。大気の吸収率 a が 1 ならば、右辺の係数は 2 となります。一方、0.5 ならば 3 となって、地球の平衡温度は下がるわけですね。簡単なモデルですが、有効ですね。

雅人 実際には、それほど単純ではないがね。さらに、大気には**対流 (convection)** があり、地表面の空気が暖かいと上昇気流となって高度の高いほうに移動する。

しのぶ 熱気球が空を飛べる原理ですね。

雅人 その通り。そして、対流の影響や、赤外線吸収率が 1 ではないので、現在の地球温度は 288 [K] 程度になっていると考えられているんだ。

莉緒 大気中の成分の酸素、窒素、アルゴンは赤外線に透明でしたので、赤外線と相互作用できるのは、二酸化炭素 CO_2 と水 H_2O ですね。

雅人 その通り。その他にも、メタン CH_4 やフロンも赤外線と相互作用する。そして、これらを**温室効果ガス (greenhouse gas)** と呼んでいるんだ。

直道 なるほど、 CO_2 が温室効果ガスと呼ばれる理由が分かりま

した。重要な問題は、 CO_2 によって、どの程度の赤外線が吸収されるか、つまり a の値ですね。

莉緒 でも、 CO_2 は吸収した赤外線を、すぐに放出してしまうと先生は言われていましたよね。

雅人 専門家の説明によると、この放出される赤外線が地表面に戻されるといふんだ。

和昌 そうか。ガラス板のモデルでは1枚のガラスでしたが、実際には、大気中に分布している CO_2 から赤外線が地表面に戻されるということなのですね。

雅人 そう。その結果、図 1-31 に示すように、宇宙への放熱が妨げられて地球の温暖化が進むという説明となっている。

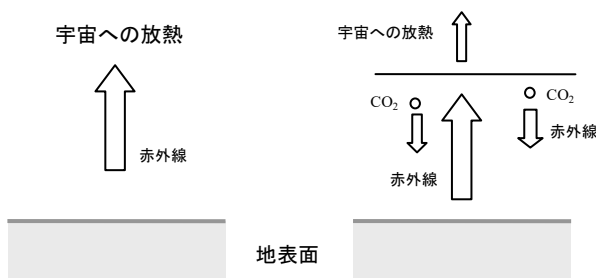


図 1-31 宇宙に逃げていくはずの赤外線は、いったん CO_2 に吸収されたのち、すぐに放出されるが、その際、一部が地表面に戻される。これが温暖化の原因となる。

莉緒 本当にCO₂に吸収された赤外線は地表面に戻されるのでしょうか。

雅人 常識的に考えれば、赤外線を反転させる機構は考えにくいよね。それでは、次に、その説明をしていこう。

1. 14. 100 吸収された赤外線は 100 放出される

雅人 ここで、一般の光と物質の相互作用を振り返ってみよう。図 1-32 に示すように、電磁波は平面波²⁸ (plane wave) にたとえられる。海岸に打ち寄せる波のイメージだ。

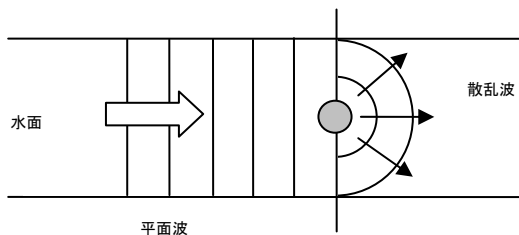


図 1-32 岸に寄せる波と杭の相互作用。平面的な波が杭に当たると同じ波長の波が放射状に放出される。ただし、光と物質の相互作用では、放射方向は 360° となる。

しのぶ この図は、海や川で生じる波なので分かりやすいですね。これがミクロの気体分子でも生じるのですね。

²⁸ 平面波とは、ちょうど洗濯板の表面のようなものであり、波の凹凸が平行に進んでいくというイメージである。

雅人 その通りだ。ただし、水面と違って、物質から放出される波は 360° の方向に放射状に放出されるんだ。よって、放出する赤外線には地表面に戻るものもある。

和昌 全方位ということがよく理解できないのですが。CO₂ が吸収できる赤外線の方法は決まっていますよね。

雅人 確かに舌足らずだったね。もちろん、CO₂ が吸収して放出する電磁波には指向性がある。図 1-25 と図 1-26 に示した方向の赤外線しか吸収できない。とすれば単純に考えれば、図 1-33 のようになる。

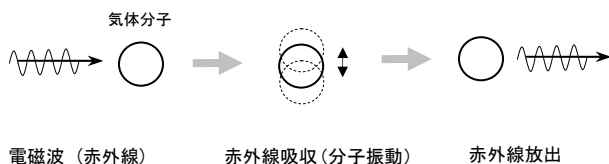


図 1-33 気体分子が赤外線を吸収放出するモデル

しのぶ 素直に考えればそうだと思います。

雅人 そうだね。ところが、実際はそうならない。赤外線を吸収した分子は方向性を持って振動する。これは CO₂ で、すでに示したね。このとき、CO₂ は電気的な振動をしており、専門的には電気双極子 (electric dipole) の振動 (vibration) と呼んでいるんだ。

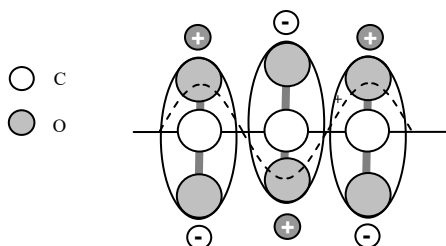


図 1-34 赤外線吸収後の電気双極子振動 (CO_2) のイメージ

莉緒 プラスとマイナスの電荷が反転しているというイメージですね。

雅人 そうだね。そして、電気双極子の振動は、電磁波を発生する。これが再放出だ。この放出過程を物理的に計算すると、図 1-35 のようになるんだ²⁹。

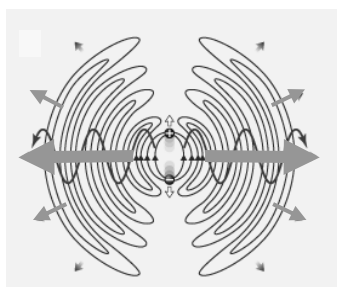


図 1-35 電気双極子からの電磁波の放出の様子

²⁹ 村上雅人著『なるほどベクトルポテンシャル』（海鳴社）を参照されたい。

しのぶ 面白いですね。ということは、進行方向だけでなく、反対方向にも電磁波は放出されるのですね。とすれば、宇宙に逃げていくはずの赤外線が地球に戻されているということになりますね。

雅人 全部ではないが、一部はそうなる。さらに、ここまでの説明では、吸収放出される赤外線に指向性は残るんだが、気体分子は、前に言ったように、室温では音速よりも速い速度で運動するとともに、回転もしているんだ。その回転数は1秒で1000億回程度、つまり 10^{11} 回に達する。

和昌 1秒に1000億回ですか。ミクロの世界は、想像もできないような世界なのですね。さらに、励起状態の寿命が 10^{-9} 秒でしたから、励起状態のわずかな時間でも分子は回転しているのですね。

雅人 このような気体分子の回転運動を考えれば、結局、 CO_2 分子から放射される赤外線は全方向に向かうことになる。そして、逆方向にもね。これを後方散乱 (back scattering) と呼んでいる。

直道 なるほど、奥が深いですね。

雅人 ここで、あらためて地表面から放出される赤外線と CO_2 分子の相互作用に適用すると、図1-36のようになる。こちらが正式な模式図となる。

直道 とすれば、赤外線が地表面に戻されることもあるわけですね。

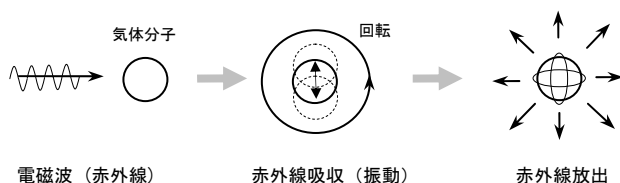


図 1-36 CO₂ 気体分子が吸収した赤外線は方向性を持っているが、双極子放射や、分子が自由に回転している影響で、放射赤外線の方法は全方位の 360° となる。この現象を散乱 (scattering) と呼んでいる。

雅人 360° の下方の 180° は地表面に戻るという考えもある。

莉緒 確か、CO₂ が吸収できるのは、波長が 4.26μm と 15μm のものだけですね。実際の赤外線は 0.75μm から 1000μm まであるのですから、後方散乱されるのは、ごくわずかではないでしょうか。

雅人 とてもいい指摘だね。ただ、地面から放出される赤外線は 15μm あたりにピークを持つとも言われている。だから、地表面に赤外放射を有効に反射しているとね。

しのぶ それでも 15μm の波は一点ですね。本来の放射量は全波長の積分ですから、やはり総量は多くないと思います。

雅人 その通りなんだ。実は、放射される光の強度は、図 1-37 のような波長依存性に従うことが知られている。そして、全波長にわたって積分することで、温度 T の物体が有する放射エネルギーが σT^4 と与えられるんだ。これが、ステファン・ボルツマンの法則だ³⁰。

³⁰ ステファン・ボルツマン則については補遺 4 に導出方法が載っている。

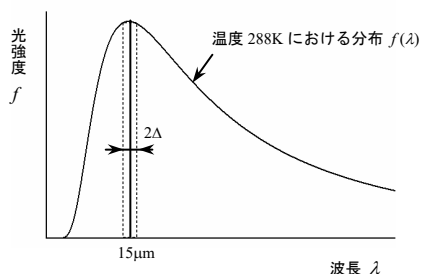


図 1-37 ある温度 T : 288K における光強度 f の波長依存性。この分布はプランクの式に従う。この分布を全波長で積分すると σT^4 という結果が得られ、この値から温度 T の物体の発生する熱エネルギーが計算できる。

しのぶ 地球の平衡温度は 288K の程度でしたね。

雅人 そして、そのピークは $15\mu\text{m}$ 程度とされている。これは、赤外線が吸収できる波長に相当する。

莉緒 ただし、エネルギーは図 1-37 の積分値なので、波長が 1 点のみの放射、たとえば $15\mu\text{m}$ の赤外線の場合には、積分値つまりエネルギーは 0 となるのではないのでしょうか。

雅人 いい点に気付いたね。その通りなんだ。実際には、ある程度幅があるから 0 ではないが、かなり小さな値になることには変わりはない。

直道 ある特定の波長の電磁波を吸収や放出しても、エネルギー

は実質的には0ということですね。これは、積分の際の下端と上端の値が同じこと、つまり $\int_{15}^{15} f(\lambda) d\lambda = 0$ に対応しているのですね。

雅人 その通りだ。実際の相互作用では、波長にある程度幅があるので、下端は $15-\Delta$ 、上端は $15+\Delta$ となるので、積分値、つまりエネルギーは0とはならない。

和昌 相互作用から考えると吸収できる波長は1点のはずなのに、このような幅 (2Δ) ができるという理由は何だったのでしょうか。

雅人 物理的にはゆらぎ (fluctuation) と呼ぶこともある。まず、ミクロの世界では不確定原理 (uncertainty principle) が成立し、エネルギーと時間の間には $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$ という関係がある³¹。このため、系のエネルギーは一点には決まらない。さらに、気体分子はものすごいスピードで運動しているし、回転もしている。その影響でも幅が生じる。その証拠に、温度が上昇するとゆらぎ（エネルギー幅）も大きくなるんだ。

莉緒 なるほど、面白いし、奥が深いですね。ただし、決まった波長の電磁波の吸収のみでは、吸収エネルギーは大きくないということ認識することが重要なのですね。積分の下端と上端が同じならば、積分は0ということで納得しました。

³¹ $\hbar$ はプランク定数 h を 2π で除したものである。

1. 15. 赤外線を吸収するという誤解

雅人 ところで、いろいろな機関のホームページを見ると、まず、二酸化炭素 CO_2 による温暖化の原因として、「熱を吸収する」からというものゝ圧倒的に多い。これは赤外線吸収のことを言っているんだが、どうも熱がそのまま CO_2 に蓄えられると誤解しているひとが多いようなのだ。そう考えれば、温暖化機構は分かりやすいからね。

みんなも、今日のゼミまでは、漠然とそう思っていたんじゃないか。実は、大学や研究機関のホームページを見ると、この機構で温暖化が説明されているものが結構多いんだ。

直道 実は、自分もそう思っていました。

雅人 もちろん、そう思うのには、それなりの理由がある。

和昌 それをはやく聞きたいですね。

雅人 図 1-38 は、地球温暖化の説明でよく引用される大気による赤外線透過率の波長依存性を示している。このスペクトル (spectrum) は宇宙から観測されたもので、凹んでいる波長の赤外線が大気によって吸収されたと解釈されている。どうだろう。

しのぶ たて軸は、透過率ですから、1.0 では、赤外線がすべて透過する、つまり透明という意味ですね。一方、0 では、赤外線がまったく透過しないという意味になります。とすると、図を見る限り、大気によって、かなりの赤外線が吸収されたとみてよいのではないのでしょうか。

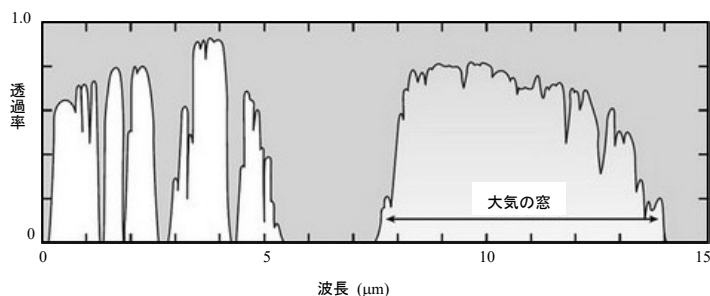


図 1-38 大気による赤外線の透過率。透過率 1.0 は赤外線が散乱されずに大気を透過できることを、0 はすべて大気によって散乱されることを示している。遠赤外領域の 7.5 から 14 μm の波長は大気を透過できるため、大気の間 (atmosphere window) と呼ばれている。宇宙から地球を観測するときは、この大気の間 の波長の赤外線を使う。

莉緒 ところで、図 1-38 の赤外線吸収は CO_2 によるものなのでしょうか。

雅人 CO_2 による吸収もあるが、実は、大部分が H_2O による赤外線吸収なんだ。

1. 16. 水 H_2O は CO_2 より赤外線吸収能が高い

雅人 それを確かめるために、水 H_2O と二酸化炭素 CO_2 の赤外線吸収スペクトルを比較してみよう。図 1-39 にそれを示している。

しのぶ 確かに、水 H_2O のほうが、赤外線をよく吸収しますね。でも、二酸化炭素 CO_2 が温室効果ガスという話はよく聞きますが、水 H_2O がそうだという話は、あまり聞きませんね。

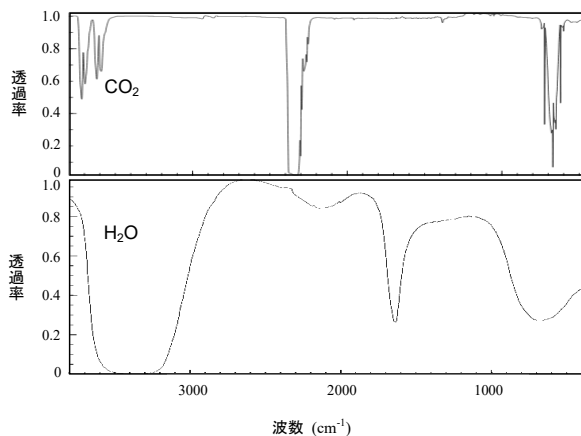


図 1-39 H₂O と CO₂ の赤外線吸収スペクトル。水 H₂O のほうが CO₂ よりも赤外線吸収能は大きい。

雅人 その理由は簡単で、水が規制対象になっていないからなんだ。温室効果ガスとして排出が規制されているのは、CO₂ の他、メタン(CH₄) やフロンの中の HFC 類、亜酸化窒素 N₂O など、水 H₂O は入っていない。

和昌 それは、本質的な対策ではないですね。温暖化の抑制をするには H₂O の排出も制御しなければいけないのではないのでしょうか。

雅人 理屈から言えばそうなんだが、H₂O の量は人間には制御できない。一方、CO₂ や他の温室効果ガスの排出は人為的に抑制できる。だから、水の影響は無視して、CO₂ だけ抑制しようということになっている。

直道 無視というのは、あまり科学的ではないですね。

雅人 制御できないものは、どうしようもないということなんですが、地球温暖化には水 H_2O の果たす役割が重要だということを指摘する科学者も実は多いんだ。アメリカの大統領だったトランプ氏がパリ協定から離脱すると宣言した背景には、この点を指摘する科学者の主張に耳を傾けたということもある。

莉緒 そうなんですか。「トランプは非科学的だからパリ協定から離脱した。けしからん」という報道しかありませんでしたね。科学者の言うことも聞いていたのですね。少し驚きです。

雅人 ただし、本質的な問題はそこではないんだ。図 1-39 を見て、 CO_2 や H_2O が赤外線つまり熱を吸収して温暖化に寄与していると結論すること自体が間違っている。この勘違いこそが本質的な問題なんだ。

莉緒 赤外線を吸収できるなら、温暖化に寄与するということは間違いないと思われそうですが、何が問題なのでしょう。

雅人 みんなは、今日のゼミで学んだよね。吸収された赤外線は瞬時に放出される。しかも吸収放出にかかる時間も 100 万分の 1 のさらに、1000 分の 1 秒 (10^{-9} s) と短い。

しのぶ 励起状態と基底状態でしたね。

雅人 そうだ。気体分子は、光を吸収して励起状態になるが、すぐに同じ光を放出して基底状態に戻る。しかも、その時間はあつ

という間だから、気体分子は基底状態のまま、光の行路を乱しているように見える。これを**散乱 (scattering)**と呼んでいる。

莉緒 そうでした。つい、そのことを忘れていました。すると、図 1-39 を見ると、あたかも赤外線が吸収されているだけのように見えますが、実際に起きていることは、吸収と同時に、赤外線が放出されるということなのですね。この場合でも、図 1-40 のように、検出器に届く量は減るので、あたかも気体分子に赤外線が吸収されているように錯覚するということですか。

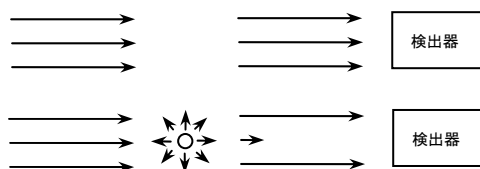


図 1-40 光を吸収する気体分子が存在しなければ、すべての波長が検出器に届く。一方、ある波長の光を吸収放出（散乱）する気体分子があれば、その波長の光が検出器まで届く量は減少する。

雅人 その通り。これを多くのひとが、気体分子に吸収されたままと誤解している。さらに、光は吸収されて消えたのではなく、同じ量が放射されているということも忘れてはいけない。つまり、 CO_2 に吸収された赤外線は、ただちに 100% すべて放出される。100 吸収したら 100 放出する。

和昌 でも、図 1-39 を見ると、 CO_2 や H_2O に赤外線が吸収されて地球は暑くなっていると思ってしまいますね。

雅人 一流の研究者でさえ、そう思っているひとが多い。そのほうが納得しやすいからね。だからこそ、根が深い問題なんだ。以前に、ある講演会でそのことを指摘したのだが、演者が「お前は環境破壊の味方をするのか」と怒り出したからね。

直道 それっておかしくないですか。科学的な議論をする講演会ですよ。

雅人 彼にとっては、 CO_2 が地球温暖化の主犯という結論は動かしようのない事実なのだから、枝葉末節に拘ってわれわれの足を引っ張るなという考えなんだろう。

しかし、温暖化を真剣に論じるならば、 CO_2 と赤外線との相互作用の基本を理解することは、とても重要だよ。というよりも、すべての鍵がそこにあるはずなんだ。

1. 17. 赤外線反射による温暖化

雅人 当然、多くの専門家は、この点に気付いているので、 CO_2 に吸収された赤外線がすぐに放出されるということを前提に温暖化機構の説明がなされている。

莉緒 それは、先生が図 1-31 を使って示してくれた説明ですよ。一度、 CO_2 に吸収された赤外線は、すぐに再放出されるが、後方散乱によって一部は地表面に戻されるという機構でした。

雅人 赤外線が、あたかも大気中の CO_2 によって反射されるようなイメージだ。

しのぶ ただし、 CO_2 が散乱できる赤外線は、波長が $4.26\mu\text{m}$ と $15\mu\text{m}$ のものだけでしたね。

雅人 それも大事な視点だったね。ほとんどの赤外線は、 CO_2 には透明で、そのまま宇宙へと逃げていくんだ。実は、 CO_2 で充満した円筒に赤外線を照射すると、ほとんどが透過することが知られている。

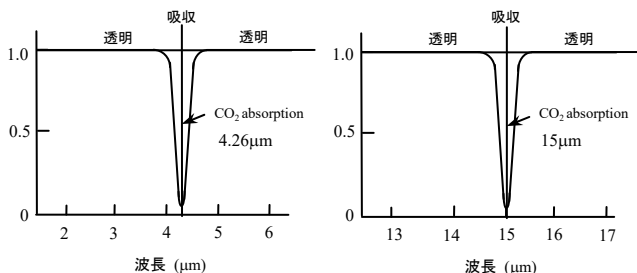


図 1-41 赤外線の吸収スペクトル (たて軸は透過率である)。 CO_2 による吸収は、波長が $4.26\mu\text{m}$ と $15\mu\text{m}$ の近傍でのみ起こり、その以外の赤外線は素通りする。

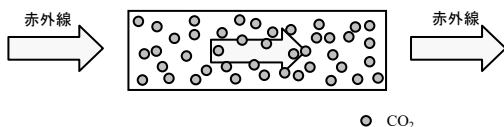


図 1-42 CO_2 で充満した円筒に赤外線を照射すると、ほぼ全部の赤外線が透過する。ただし、精度を上げれば、波長が $4.26\mu\text{m}$ と $15\mu\text{m}$ の赤外線が散乱されていることが分かる。

和昌 それは意外な気もしますが、よく考えれば吸収できる波長が2個しかないのですから、当たり前ですね。

雅人 ところで、最近では、一般向け啓蒙書でも、CO₂が熱を吸収するという機構ではなく、赤外線を地表面に戻すという機構で温暖化を説明するようになっている³²。

直道 より正確な説明が載るようになったのですね。ところで、ノーベル賞を受賞された真鍋先生の業績とはどんなものなのでしょう。CO₂が地球温暖化を招くことを証明したとニュースでは言っていました。

1. 18. 真鍋先生の業績

雅人 真鍋先生は、コンピュータの能力がそれほどでもなかった1960年代に、気候変化を予測できる数値シミュレーションを構築するアメリカ政府の研究に参加したんだ。大気の状態変化は物理法則に従うはずだから、微分方程式を解くことで、気候モデルを構築できると考えた人たちがいたんだ。

しのぶ でも天気はとても複雑ですよ。計算は2体ならば可能ですが、3体以上では厳密解がないと先生が、よく言われています³³。たとえば、太陽と地球ならば軌道は正確に計算できるが、月が入ったとたんに計算不能だと。さらに、世の中は3体どころ

³² たとえば『図解でわかる14歳から知る気候変動』（太田出版）

³³ 村上雅人著『不確実性の時代を元気に生きる』（海鳴社、2021）を参照されたい。

か多体なので、計算は無理とも言われていましたね。そして、そのため、いまでも天気予報がはずれることも指摘されていますよね。なるほどと感心していました。

雅人 確かに、その通りと思う。気象シミュレーションに関しては、**バタフライ効果 (Butterfly effect)** という有名なたとえがあるんだ。

直道 バタフライとは蝶のことですよ。

雅人 そうだ。**ローレンツ (Edward Lorentz)** という気象学者が、1972 年にアメリカ科学振興協会で行った講演のタイトル"*Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas?*"に由来している。日本語に訳せば、「ブラジルで蝶が羽ばたけば、テキサスに竜巻が起こるか」となる。

莉緒 そんなことは起こりえませんか。

雅人 確かにそうだ。あくまでもたとえ話だ。彼は、1961 年に天気予報のプログラムを走らせていた。ところが、時間がかかりすぎるので、初期データを 0.506127 から 0.506 に変えたんだ。すると、結果はまったく異なる予報となった。つまり、わずかなデータの違いが決定的な違いを生む。これがシミュレーションの難しさだ。

和昌 そういえば、初期データを少し変えれば、思い通りの結果が得られると聞いたこともあります。

雅人 だから、計算を全面的に信用することはできない。ただし、シミュレーションは重要でもある。なにしろ実験できないような現象を、ある程度予測できるからね。

真鍋先生も苦労して、地球の大気循環をなんとか再現できるモデルをつくったんだ。これに改良が加えられ、基本モデルとなったのが、**大気大循環モデル (atmospheric general circulation model: AGCM)** だ。単に GCM と呼ぶ場合もある。他の気象学者も、このモデルを使って気候予測をしている。

莉緒 なるほど、気候モデルの原型を作られたチームのメンバーだったのですね。その業績は素晴らしいですね。

雅人 真鍋先生は、このモデルをもとに、CO₂ 濃度が 300ppm から 600ppm へと 2 倍になったら大気温度がどうなるかを計算してみたんだ。すると、1~3℃ ほど上昇するというシミュレーション結果が得られた。これが世界的成果と言われている。

表 1-3 が先生の論文に載っているデータだ。まず、曇りの日と晴れの日では、当然、地球の温度は異なるよね。

表 1-3 真鍋先生の大気温度 (°C) の計算結果

CO ₂ 濃度	曇りの日		晴天	
	絶対湿度近似	相対湿度近似	絶対湿度近似	相対湿度近似
ppm				
150	16.80	13.11	25.75	31.40
300	18.05	15.39	27.05	34.20
600	19.38	17.75	28.41	37.12

※ 相対湿度とは CO₂ による気温上昇によって水蒸気濃度が増える場合、絶対湿度とは水蒸気濃度が一定とした場合である。

雅人 さらに、先生は、相対湿度と絶対湿度の両方で計算しているんだ。表にあるように、絶対湿度近似では、 CO_2 濃度が 2 倍になっても、 1.3°C しか大気温度は上昇しない。そこで、 CO_2 によって少し温度が上がれば、飽和水蒸気量が増えると仮定して計算もしている。これが相対湿度近似だ。そして、 $2\sim 3^\circ\text{C}$ という高い上昇温度が得られている。

しのぶ この表を見ると、天候の影響が、かなり大きいことが分かります。晴れの日と曇りの日では大気温度はまったく異なります。日差しが遮られるのですから、当たり前かもしれませんが。

和昌 一方で、このデータからは、 CO_2 濃度の影響は意外と小さいなと印象を受けます。さらに、面白いのは、真鍋先生の研究では、湿度（水）の効果がちゃんと入っていることです。そういえば、図 1-39 にも出ていましたが、 H_2O のほうが CO_2 よりも赤外線吸収能は、はるかに高かったのですよね。

直道 それを考えると、やはり水の効果がとても大きいのではないのでしょうか。

雅人 実は、この論文では、 H_2O の効果が 10 倍以上高いとして計算されている。さらに論文のタイトル³⁴には相対湿度 (relative humidity) という単語が入っているが、 CO_2 は入っていないんだ。

また、真鍋先生の持論は、複雑なことを単純に考えるということらしい。大気は 3 次元的広がりを持っているが、水平方向の影

³⁴ "Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative Humidity", *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 24, pp. 241-259 (1967).

響を考えると、とても複雑だ。そこで、大気は平行平面と仮定し、単純な 1 次元モデルにして鉛直方向の温度分布を計算している。

莉緒 ところで、CO₂ による温暖化は、宇宙に逃げていく赤外線
を地表面に戻すため生じるということでしたね。それならば、晴
れた日の夜が重要なのではないのでしょうか。そのデータがないの
は少し残念です。また、雨の日のデータも欲しいです。

雅人 いい視点だね。個人的には、曇りの日の夜のデータも欲しい。
赤外線反射は、かなり大きくなるはずなんだ。

和昌 真鍋先生は、大気中の CO₂ 濃度は 300ppm (0.03%) を基準
として計算していますね。ところで、0.03%というのは気体分子
の密度としては、相当低いほうでしたよね。

雅人 大気に 10000 個の気体分子があれば 7810 個が窒素 N₂ 分子、
2090 個が O₂ 分子、93 個が Ar 分子、そして 3 個が CO₂ 分子とい
う割合だね。さらに、湿度によって水分子の量は大きく変化する。
真鍋先生のシミュレーションは、CO₂ 分子の数が、3 個から 6 個
に増えた場合だ。一方で、いま言われている深刻な温暖化は、6
個ではなく 4 個になっただけで生じていると騒がれている。

直道 だけど、温暖化を説明するためには、地球に大量の熱が戻
ってくる必要があります。

和昌 しかも、CO₂ 分子と相互作用するのは、波長が 0.75μm か
ら 1000μm (1mm) の広い範囲にある赤外線のなかで、波長が 15μm

と 4.26 μm のものだけですよ。不思議だな。

雅人 実は、図 1-43 に示すように、ある CO_2 分子が散乱した赤外線、他の CO_2 分子が吸収して再放出するので、後方散乱が増えるという説もあるんだ。一種の連鎖反応だね。

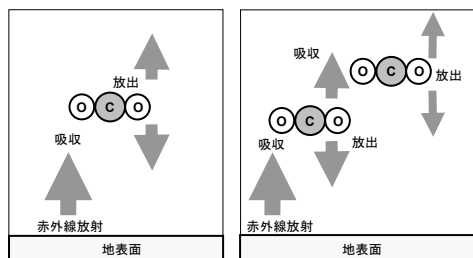


図 1-43 CO_2 分子間の相互作用によって吸収放出が繰り返されることで、地表面に戻る赤外線は増幅される。

しのぶ しかし、この模式図は、少し誤解を与えます。なぜなら、実際の赤外線放出の方向は 360° だからです。正しくは図 1-44 のようになるのではないのでしょうか。

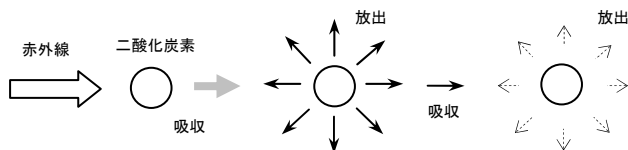


図 1-44 CO_2 によって吸収された赤外線は、放出の際は全方向となるので、隣接する CO_2 分子が吸収できる赤外線は無視できるほど小さくなる。

直道 確かにそうだね。とすると、他の CO_2 分子が吸収できる赤外線はかなり小さいということですね。

和昌 さらに、先生は、 CO_2 を充満した円筒実験では、多くの赤外線は素通りしたと言われていましたよね。 CO_2 が吸収できる赤外線の波長は 4.26 と $15\mu\text{m}$ しかありません。

雅人 実は、円筒実験では、その長さはせいぜい 1m だが、大気の高さ（対流圏）は 11km もある。赤外線は、この長い距離を通るから散乱される量も多く連鎖反応も無視できないという考えもある。

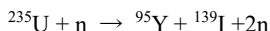
しのぶ 赤外線の伝播速度は光速ですね。とすると、そのスピードは 3×10^8 [m/s] なので、 11km つまり 11000m に届くのにかかる時間は 3.7×10^{-5} 秒になります。1 万分の 1 秒以下です。宇宙まで 100km としても、 3.3×10^{-4} 秒で届きます。まさに、あっという間のできごとですね。

雅人 それも重要な視点だね。赤外線ストーブのイメージで考えると、赤外線が 1 秒間に 30 万 km のスピードで移動しているという事実を忘れがちだね。

1. 19. 連鎖反応

莉緒 ところで、気体分子間の相互作用によって大量の熱が地表面に戻ると言う説は、原子力発電 (nuclear generation) におけるウラン核分裂の連鎖反応 (chain reaction) の説明と似ていませんか。

雅人 厳密には異なるが、確かに似ているね。原子核 (atomic nucleus) が不安定なウラン ^{235}U (uranium) に中性子 (neutron) n を 1 個当てると、2 個の原子核に分裂して、その際 2 個の中性子が出るという反応だ。一例として



という反応がある。

この反応ではイットリウム ^{95}Y (yttrium) とヨウ素 ^{139}I (iodine) に分裂しているが、実際には核分裂反応には 700 通りもあると言われている。いずれ、1 個の中性子を当てると、2 個の中性子が放出されるというのが鍵だね。この中性子が、近くにある 2 個の ^{235}U に当たれば 4 個の中性子が放出される。結局、1, 2, 4, 8, 16...と核分裂反応は増えていくことになる。

しのぶ この連鎖反応が起こるためには条件があると聞きました。

雅人 天然のウランでは、核分裂のないウラン 238 (^{238}U) の含有量が圧倒的に多いんだ。一方、原子力の燃料となる ^{235}U は、わずか 0.7% しか含まれていない。そして、このままでは、連鎖反応は起こらない。そのため濃度を 5% 程度まで高める必要がある。

和昌 0.7% では起きないのならば、たった 0.04% の CO_2 濃度ではと疑問に思います。ところで、濃度が重要ということは、連鎖反応が起きるには原子間の距離が重要なのですね。

雅人 そうだね。それでは実際に計算してみよう。ウランの原子間距離は $a = 3\text{\AA}$ 程度だ。これは $3 \times 10^{-10} \text{ m}$ となる。 ^{235}U が 0.7%

とすると、 ^{235}U の原子間距離は $1000/7$ の 3 乗根だけ大きくなる。

つまり $\sqrt[3]{1000/7} \cong 5.2$ なので $5.2a$ 程度となる。この濃度を 5% まで

高めれば、 $\sqrt[3]{100/5} \cong 2.7$ から、 $2.7a$ 程度まで短くなる。つまり、

連鎖反応が生じるためには、距離 $1.6 \times 10^{-9} \text{ m}$ では長すぎ、 $8.1 \times 10^{-10} \text{ m}$ まで近づける必要があるということになる。

莉緒 いずれにしても原子レベルの話で、ナノメートルの世界なのですね。ところで、 ^{235}U の濃度を高める操作がウラン濃縮 (uranium enrichment) でしたね。

雅人 そうだ。わずかな質量差を利用して遠心分離 (centrifuge) という技術で ^{235}U を分離して、濃縮させている。

和昌 やはり、 CO_2 の濃度はせいぜい 0.04% 程度ですから、とても連鎖反応が起こるとは思えませんね。

雅人 ところで、すでに計算したように、気体分子の平均自由行程は $7.2 \times 10^{-8} \text{ m}$ だったね。

莉緒 CO_2 の濃度を、0.04% として計算すると CO_2 分子間の距離は、濃度が 100% の場合の距離 $7.2 \times 10^{-8} \text{ m}$ の

$$\sqrt[3]{\frac{100}{0.04}} = \sqrt[3]{2500} \cong 13.6$$

倍なので

$$7.2 \times 10^{-8} \times 13.6 \cong 9.8 \times 10^{-7} \text{ m}$$

と与えられます。

直道 この値は 1 ミクロン程度なので、とても短く感じますが、ウランの連鎖反応に比べたら、距離として 1000 倍近く離れていることになりますね。

雅人 もともと地球に存在している CO_2 濃度は 0.03% 程度で、温暖化を引き起こしているのは増加分の 0.01% 程度と言われている。10000 個のなかの 1 個程度だ。つまり、10000 個のなかの CO_2 分子が 3 個から 4 個になったら温暖化が進むという説明になる³⁵。10000 個中のわずか 1 個の増加で、宇宙に逃げていくはずの熱が地表に戻るかどうかは、はなはだ疑問ではある。

ただし、多くの研究者は、この説明で納得しているし、一方で、後方散乱があるならば、地表面に戻ってくる赤外線はゼロではないからね。

和昌 わたしは、なにか納得できません。 CO_2 による温暖化は、すべてのひとが受け入れられる機構があって、実験的な検証も世界中で行われているとばかり思っていました。

雅人 確かに実験で検証できればよいのだが、残念ながら、地球のように大きな天体で実験を行うのは簡単ではない。あまりにも舞台が巨大だからね。ペットボトル実験で CO_2 による温暖化を実証したというレポートがネットにあふれているが、地球を再現したものではないし、 CO_2 が赤外線を散乱する際、いっさい発熱し

³⁵ 真鍋先生の計算では、3 個が 6 個に増えた場合に相当する。

ないから、中の空気の温度が上がることもないんだ。

さらに、すでに説明したように赤外線吸収率は H_2O 分子のほうがかかるに大きい。また、水の濃度は 0.3 から 3% と変化する³⁶。量にして、 CO_2 の 10 倍から 100 倍だ。しかも、天候によって、その量が大きく変化するので、現象を複雑にしているんだ。晴れ、曇り、雨の日でも大きく異なる。さらに、昼と夜の寒暖差などもある。だからこそ、いろいろな角度から検証することが必要になる³⁷。

莉緒 それならば、 CO_2 主犯説が完全に証明されたとは言えないのではないでしょうか。

和昌 でも、 CO_2 が地球温暖化の原因を証明したことがノーベル賞の受賞理由となれば、そのインパクトはかなり大きいですね。

雅人 そう、環境活動家も勢いづくだろうね。そして、今後は、ますます世界中で低炭素化への圧力は増すと思う。

ところで、太陽から地球に降り注いでいる光のなかには赤外線もある。すると、太陽から地球に届く赤外線も、大気中の CO_2 によって宇宙に戻されることになるはずだ。

直道 確かに先生のおっしゃる通りですね。 CO_2 は放熱だけでなく、入熱をも妨げるはずですよ。

³⁶ 1 から 4% という説もある。雲や雨などの影響もあり、正確な範囲の見積りは難しい。

³⁷ 実験として有効なのは 1 個の変数に注目して、その効果をみる場合である。変数が 2 個以上になると現象が複雑となり解析も難しくなる。

雅人 ただし、これにも別の見解がある。まず、太陽光の主成分は可視光なので、赤外線とは異なり、地表面に届く光の多くは CO_2 によつては妨げられないという説だ。

図 1-45 は、太陽光強度の波長分布を示している。可視光が 50%、赤外光は 44%、そして 6% が紫外光といわれている。このなかで波長が 0.4 から $0.75\mu\text{m}$ が可視光で、光の強さのピークは波長が $0.5\mu\text{m}$ 程度のところにある。そして、 CO_2 は、地球に降り注ぐ太陽光の大部分を占める可視光は散乱しない。

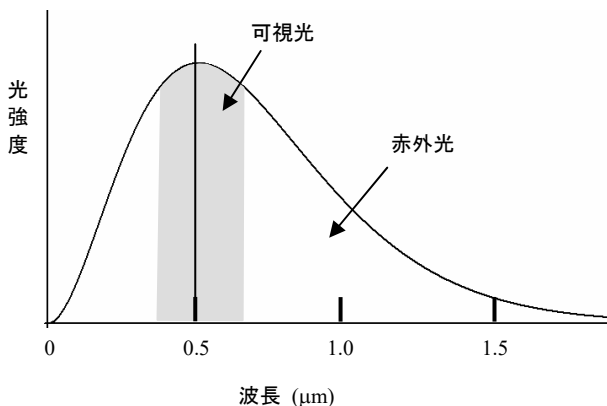


図 1-45 太陽光の波長分布。ピーク近傍が可視光である。

しのぶ この図をみると、地球に降り注ぐ太陽光の成分として赤外線の量も無視できないと思います。

雅人 ただし、しのぶさんが指摘してきたように、 CO_2 が吸収で

きる赤外線は波長は $4.26\mu\text{m}$ と $15\mu\text{m}$ のものだけだ。図から明らかのように、太陽から届く光には、これらの赤外線は、ほとんど含まれていない。だから、太陽からの光に CO_2 は透明となる。

莉緒 でも、出ていく場合も、ほとんどの赤外線は CO_2 には透明ですよ。

雅人 その通りと思うよ。

和昌 ところで、物質を暖めるのは赤外線と言われていました。可視光はどうなのでしょう。

雅人 可視光も電磁波の一種であり、エネルギー ($E = h\nu = h/\lambda$) を持っている。だから、地球の地表面や海に吸収されてエネルギーが熱に変換されると考えられる。参考までに、大循環モデルに基づいて、専門家が計算した結果を図 1-46 に示している³⁸。

和昌 大気による散乱が 20% と 27% という違いがあるのですね。この差は、地球温暖化を考えると、かなり大きな数値ではないでしょうか。

雅人 その通り、入熱が 50% と 43% では大違いで、当然、地球温度の見積もりにも大きな影響を与えるね。

³⁸ 一般的には、太陽光の 50% 程度が地球表面に届くと言われている。ただし、43% という報告（早坂忠裕『日本気象学会』1995 年 11 月、p.41）もある。いずれ、現象が複雑なので、正確な見積もりは難しい。とは言え、地球の温暖化を議論する際には、太陽光がどの程度地表面に届くかということは基本となるはずである。

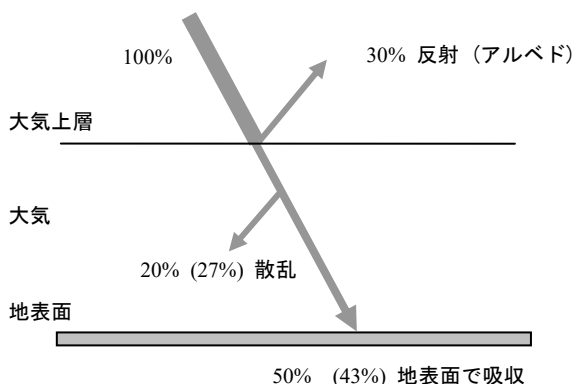


図 1-46 GCM によって推定される太陽放射エネルギーの分配。地表面に届く太陽エネルギーは 50% とされているが、一方で 43% という報告もある。すべてのシミュレーションに言えることであるが、得られる結果は設定条件によって大きく異なる。

莉緒 先生、しつこいようですが、やはり CO_2 分子からの後方散乱によって地表面に戻ってくる赤外線はそれほど多くないと思うのですが、どうなのでしょう。

雅人 その点については、放出された赤外線がまわりの大気を暖めるという説もあるんだ。

しのぶ でも、先生、大気の主成分である窒素分子や酸素分子は赤外線を吸収しないのですから、その説明は意味がないですよ。

雅人 その通り、これらの分子は赤外不活性だからね。実際に、この説にはしのぶさんのような反論があったようなのだ。さらに、

繰り返しになるが、連鎖反応で説明しようとしたら、10000 個のうちの 3 個では連鎖反応は生じないが、4 個になったとたんに生じるということになる。1 個の CO_2 分子から放出される赤外線は全方位 360° だから、別の CO_2 分子が受け取る赤外線はほぼゼロに近い。さらに、前にも検証したように、この程度の濃度で連鎖反応が起こるとは考えにくいかな³⁹。

1. 20. 放射冷却はなぜ起こるのか？

雅人 実は、もうひとつ、わたしが疑問に思っていることがある。みんなは**放射冷却** (radiative cooling) という現象を聞いたことがあるかな。たとえば、冬の晴れた日の夜に地上の気温が急激に低下する現象のことだ。

莉緒 はい、聞いたことがあります。わたしは北海道出身ですが、放射冷却で朝の最低気温が氷点下 20°C という予報があり、とても驚いたことがあります。

雅人 この現象は、晴れた日の夜に地表面から赤外線が放射されて、急激に冷える現象のことだ。でも、みんな不思議だと思わないか。だって、大気中には、地球温暖化の原因となる CO_2 があるんだよ。ならば、地表面から放射される赤外線を吸収して、それを地表面に戻してくれるはずだ。

³⁹ 光と物質との相互作用で、固体、液体では隣接分子への影響があることが知られている。気体では、その影響は薄れ、希薄な気体では、他の分子への影響はほとんどないことが知られている。たとえば『光の教科書』（オプトロニクス社）。

つまり、温室効果ガスの CO_2 があるならば、放射冷却など起こらないはずなんだ。これが、わたしの納得できない点だ。

直道 確かに、先生の指摘はもっともですね。晴れた日ということ、曇りの日には放射冷却は起きないのでしょうか。

雅人 そうなんだ。昼に太陽光によって暖められた地表面から、夜になると熱（赤外線）が逃げていく。そして、専門家によると、晴れていると赤外線が逃げるのを妨げるものがないから急激に冷えると説明している。

和昌 その説明はおかしいですね。だって、大気中には、温室効果ガスの CO_2 が存在しています。それならば、晴れた日であっても、赤外線は地表に戻されるはずですよ。

雅人 そうなんだ。さらに、雲 (cloud) があるから赤外線を反射してくれるので急激な冷却が起こらないとも説明されている。

直道 とすれば、赤外線を地表に戻すのは CO_2 ではなく、雲ということになりますね。

雅人 わたしも、雲による赤外線反射という説明が自然と思っている。そのうえで、 CO_2 が赤外線を地表面に戻すという効果は無視できるくらい小さいともね。でなければ、放射冷却は起こりようがない。

莉緒 専門家が矛盾した説明をしているということなのでしょうか。

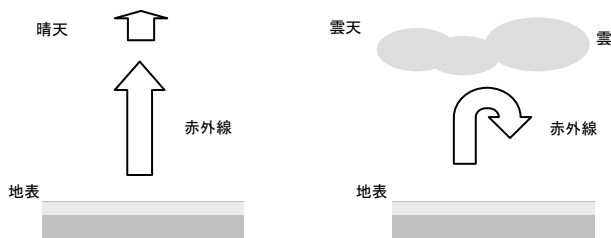


図 1-47 放射冷却は、晴れた日の夜に地表の熱が赤外線放射によって急激に奪われる現象である。一方、曇りや雨の日は、雲（や雨の水滴）が赤外線を反射して地表に戻してくれるため急激な冷却は起きない。

雅人 放射冷却の原理を説明している専門家と、CO₂による温暖化機構を提案している専門家は別だと思うよ。さらに、CO₂支持派は、水 H₂O との相互作用を前提としているし、CO₂が地表面に赤外線を戻す効果がまったくゼロと言えないのも事実なんだ。ここが難しい。

直道 でも、CO₂ 単独では、赤外線を効果的に地表面に戻さないというのは放射冷却という現象で明らかなのではないのでしょうか。

雅人 前にも言ったが、ゼロでないものは無視できないんだ。さらに、CO₂が地表面に赤外線を戻すことによって地球が温暖化しているという説はすでに多くのひとに受け入れられている。この機構は、完全否定することが難しいから、結局は水掛け論になってしまう。

しかし、まだまだ議論は不十分と思っている。そして、科学的

知見を持ったひとたちが、きっちりとした議論を重ねていかないといけない重要な問題でもある。

1. 21. 低炭素化へと進む世界

しのぶ でも世の中は、CO₂こそが地球温暖化の主犯として、日本政府も脱炭素社会を宣言しています。しかも何 10 兆円、いや、もしかしたら何 100 兆円もの税金をつぎ込むといわれていますよね。

雅人 地球を救うためなら金はいくら使ってもいいという意見もあるからね。それも分からないではない。

直道 さらに炭素税の導入も検討されていますね。製造業にとっては、死活問題ではないでしょうか。

雅人 まさにそうなんだ。たとえば、製鉄では酸化鉄 (FeO, Fe₂O₃) を還元するために、**コークス (coke)** つまり炭素 C を利用する。



この還元によって、金属の鉄ができるのだが、最終的には CO₂ を大量に放出するんだ。この CO₂ をいかに回収して処理するかが大きな課題となっている。企業にとっては大変な負担だ。

莉緒 CO₂ の処理とは具体的にどのような方法が考えられているのでしょうか。

雅人 二酸化炭素固定技術と呼ばれ、たとえば回収した CO₂ ガス

に高圧をかけて圧縮したうえで、地中や海中に閉じ込めるという方法が研究されている。

しのぶ その方法はあまり感心できません。

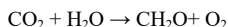
雅人 まあ、もちろん別な方法も考えられている。たとえば、CO₂ からメタンをつくって、エネルギーに利用しようという研究もある。製鉄会社にとっては、まさに死活問題だからね。

究極的には、CO₂ と水 H₂O から栄養分である炭水化物 (carbohydrate) を作り出せる光合成 (photosynthesis) が人工で可能となることが理想かな。

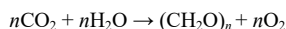
光合成は、植物が光のエネルギーを利用して起こる反応で、その実現に世界中の研究者が取り組んでいる。実は、動物はみずから栄養素をつくることはできない。そのため、植物が光合成でつくってくれた栄養素 (炭水化物: 基本式は CH₂O) を食べて生きている。

コラム 光合成

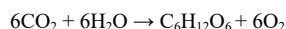
基本式は



であるが、一般式は



たとえば、ブドウ糖 (グルコース glucose) ができる反応は、 $n=6$ のときで



となる。

和昌 ビニールハウスにCO₂を入れてトマトやいちごの栽培を促進するという話がありましたね。この用途に、回収したCO₂を利用すればよいのではないのでしょうか。

雅人 それも一案だね。光合成がさかんになると、炭水化物の糖が増える。だから、いちごが甘くなるんだ。人工的な光合成が可能となれば画期的な技術となる。

ところで、さっき直道君が製造業への影響を心配していたけど、もしかしたらビール (beer) も飲めなくなるかもしれないんだ。

直道 先生の大好きなビールがですか。

雅人 ビールの泡は炭酸⁴⁰、つまり二酸化炭素 CO₂ なんだ。麦汁を発酵させると、糖分がアルコール (alcohol) と CO₂ に分解される。もし、CO₂ が温暖化の主犯ならば、ビール生産も制限されるかもしれない。

しのぶ いま気づいたのですが、炭酸は二酸化炭素なのですね。とすれば、炭酸入りジュースやコーラも飲めなくなりますね。

雅人 実は、炭酸飲料は問題ないと言われている。なぜなら、これらの飲料に注入する CO₂ は、もともと大気にあったものだ。とすれば、新たな CO₂ を発生させるものではないという理屈だ。そして、これをカーボンニュートラル (carbon neutral) と呼んでいる。

⁴⁰ 炭酸 (carbonic acid) とは正式には、CO₂ が水 H₂O に溶けてできる H₂CO₃ のことである。ただし、炭酸水から出てくるガスは CO₂ である。

和昌 そんな考えでよいのでしょうか。とすれば、ビールはどのようなのでしょうか。

雅人 ビールの泡のCO₂も麦やホップが光合成で大気中から取り込んだものだから、カーボンニュートラル。だから、心配しないで、どんどん消費すればよいと言われている。

直道 それは、ありがたいですが、屁理屈に聞こえますね。

雅人 化石燃料だって、もともと大気中にあったCO₂を植物が取り込んだものだからね。ある意味カーボンニュートラルだ。

莉緒 そう言えば、炭素排出権を金で買うという話も出ていますね。これはCO₂排出量の少ない後進国から、先進国がCO₂を排出できる権利を金で買うというアイデアですよ。今日話を聞いたら、とても納得できません。それに排出権を金で買うということ自体が、地球環境を守るという観点からは本末顛倒です。

雅人 その通りだね。実は、**カーボンプライシング (carbon pricing)** という考えがあって、排出するCO₂に応じた金銭的負担を企業だけでなく、個人にも求めるという案だ。少し行き過ぎと思うがね。

ただ一方で、人為的なCO₂排出は、地球にとって貴重な石油や石炭などの**化石燃料 (fossil fuel)** の消費を意味している⁴¹。だから、排出を抑制する必要があるという基本的な考えには個人的には賛成なんだ。さらに、工業生産ではたくさんの排気ガスや廃棄物

⁴¹ ただし、石油に関しては地中の無機反応で炭化水素が生成するという説も提唱されている。

も発生する。日本は、かなり環境に配慮した処理をしているが、多くの国では、そのまま垂れ流しだ。これが地球にとって深刻な環境汚染を引き起こしている。CO₂ だけに気をとられていては、本質を見失うことになる。

しのぶ 確かに、海洋汚染は深刻ですね。黄海が汚れている航空写真をみて、とても驚いたことがあります。

雅人 地球環境を考えたとき、人口爆発も問題だが、いちばんの基本は省エネルギーだと思う。一人ひとりが自覚をもって無駄を省くことこそが地球環境には大切だと思う。

莉緒 それは分かります。それでも、基本を理解していないことは大問題だと思います。環境対策だって、間違った方向に進む可能性もあります。

雅人 いったん世の中に定着した説に疑義を呈するということはとても大変なことなんだ。しかも、CO₂ による地球温暖化説は、日本だけではなく、世界中で受け入れられていることだから、余計、大変となる。

和昌 なにか納得できません。

雅人 わたしは、環境問題は、君たち若者が中心となって論理的な議論を進めることが、とても重要と考えている。いま、目立っている人たちは、生半可な知識で環境問題に取り組んでいるひとたちが圧倒的に多いからね。そのためには科学リテラシーがとて

も重要となる。

莉緒 わたしは、今日のゼミをきっかけに、自分なりにいろいろと環境問題を調べてみようと思いました。

雅人 それは、とても良い事だね。実は、わたしは、地球温度を考えるうえで、もっとも重要なファクターは、水 H_2O (water) と考えている。さらに、気体ではなく**液体の水** (liquid water) が鍵を握っていると。たとえば、地上からの赤外線を反射してくれる雲は水滴からできている。真鍋先生の論文でも、湿度（水）の影響が結構大きかったからね。ただし、わたしは、水蒸気の影響よりも、液体の水の存在がはるかに大きいと思っている。

莉緒 液体の水ですか。とても身近な存在ですね。人間を含めたあらゆる生物は水がないと生きていけません。にもかかわらず、水のことを真剣に考えたことはありませんでした。

雅人 そこで、つぎのゼミでは水を取り扱うことにしよう。

学生 とても楽しみです。

学生自主ゼミ 1

莉緒 これから村上ゼミ「低炭素社会」の振り返りを学生メンバーで実施したいと思います。今日は、任意参加にもかかわらず、全員の方に出席いただきありがとうございます。今日は、わたしが司会役を務めますので、よろしくお願いします。それでは、順にゼミの感想を話していただけますか。

和昌 日本政府が低炭素社会という目標を掲げて、二酸化炭素排出抑制を進めていますが、昨日のゼミに参加して、本当に、それが正しいことなのかどうか疑問に思いました。確かに、先生が言われるように、二酸化炭素排出は、貴重な化石燃料を消費したという指標となるので、その抑制は大切だと思います。

ただし、人為的な CO_2 排出が地球温暖化の原因となっているという主張が正当かどうかには疑問が残りました。今年のノーベル賞に輝いた成果と言われていますが、印象だけで判断するのではなく、自分たちで吟味して、考察することがとても重要だと思います。

しのぶ わたしは、赤外線吸収の話がとても印象に残りました。まず、いろいろな気体分子の赤外線吸収機構が分子内の原子間振動に対応しているということを初めて知りました。また、分子構造によって、どの波長の赤外線を吸収するのかが決まっており、未知物質の特定に利用できると聞いて、とても有効な分析手法と思いました。

CO₂が赤外線を吸収しても、すぐに放出するというのも驚きでした。それも、ほんの一瞬で吸収放出が生じることも意外でした。さらに、放出される赤外線の方向が360°つまり、全方位ということも面白いと思いました。

実は、高校の授業で、CO₂は温室効果ガスで、熱である赤外線を吸収して地球の温暖化に寄与すると習った記憶があります。だから、大気中のCO₂濃度が増えれば、当然、温暖化は進むとばかり思っていました。ところが、昨日のゼミでCO₂が赤外線を吸収して温度を上げるという機構が誤りだと知って、とても驚きました。というのも、CO₂をペットボトルに入れた実験で、その温室効果が実証されたということは何度も聞かされていたからです。

それから、CO₂から放出された赤外線が地表面に戻されて温暖化が進むという説には少し疑問を持ちました。

直道 それに関連して、僕が印象に残ったのは、放射冷却の話です。晴れた日の夜に、昼に暖められた地表面から赤外線が放射され、熱が急速に奪われて温度が下がるという現象は、テレビのニュースで聞いたことがあります。

先生が指摘した「なぜ温室効果ガスのCO₂があるのに、放射冷却が起こるのか」という疑問には、僕も、まったく同感です。本当にCO₂に赤外線を地表面に戻す機能があるのならば、夜に急速な冷却は起きないはずです。それと、放射冷却現象は、曇りの日には起きないということも大事な視点と思いました。それならば、赤外線を地表面に戻すのは雲と考えるのが自然だからです。

莉緒 みんな、感想をどうもありがとうございました。実は、最初にゼミのテーマが「低炭素社会」と聞いたとき、いま世界中で

進められているCO₂排出削減に関する話とばかり思っていました。ところが、実際の話聞いてとても驚きました。知らないことだらけだったからです。

さらに、炭素Cがとても有用な元素であるということが強く印象に残りました。しかも、生命がそれを利用して、いろいろな化合物をつくり出しているということにも興味を持ちました。

そして、炭素には結合手が4個あるうえ、単純な構造をした元素なので、数多くの有用な化合物をつくる能力があるということにも驚かされました。炭素という元素は、地球の生命にとって、まさに特別かつ貴重な存在だということもよく分かりました。

和昌 いま、多くの国では低炭素どころか、**脱炭素社会** (de-carbonized society) がキーワードになっていますが、炭素の有用性を考えると失礼な用法だなと思います。

しのぶ 実は、昨日のゼミのあと、久しぶりに高校時代の友人に連絡してみたの。彼女は、大学で環境サークルに入っていて、脱炭素化運動も活発にしている。それでね、先生から聞いた話をしてみたの。CO₂が地球温暖化の主犯ではない可能性がある。そうしたら、とたんに、激怒しだして大変だったの。まるで、先生が、学生にウソを吹き込む環境破壊の元凶みたいな話になってしまっ、まともな議論ができなくなっちゃった。

直道 先生をノーベル賞に歯向かう不貞の輩と思ったのだろうね。彼女は理系のひとなの？

しのぶ 彼女は文系の大学に通っているの。でも、地球環境のこ

とをいつも考えていて、リサイクル運動や、プラスチックごみの減量化にも熱心なのよ。

和昌 そうか。おそらく、人為的な CO₂ 排出が地球温暖化の原因で地球の破壊が進んでいると信じ込んでいるのだろうね。政府でさえ、そう主張しているのだからしょうがないよ。まあ、ノーベル賞は錦の御旗だよな。それに理系の知識がある程度ないと、昨日のゼミでの話を理解するのは難しいだろうからね。

しのぶ わたしの説明も下手だったかもしれない。もし、本当に理解してもらったら少し時間が必要よね。

直道 でも多くのひとは、なぜ自分の頭の中で考えることをせずに、政府やマスコミの発表を鵜呑みにしているんだろうね。

和昌 そうは言っても、僕らだって、昨日のゼミの前までは、CO₂ が地球温暖化を招き、異常気象の原因となっていると信じていたよね。

直道 言われてみれば、確かにそうだ。

莉緒 少なくとも、わたしたちは、常に自分たちの頭で考え、科学的な視点に立って検証するということを心掛けましょう。

個人的には、CO₂ が地球温暖化の主犯かどうかは、地表面から発せられる赤外線を吸収して放出する際に、それを地表面に戻す機構があるかどうかに尽きるのかなと思いました。

最後に、今日学んだことを表にまとめていますので、参照して

ください。

今回のゼミは、水の話となるようです。時間のあるひとは、予習をしてきてくださいね。

それでは、今日の自主学生ゼミを終了したいと思います。ありがとうございました。

自主ゼミ 1「低炭素社会」のまとめ

1 低炭素社会の炭素とは二酸化炭素 CO_2 のこと

→ 地球温暖化の原因となる CO_2 を減らすという意味

2 二酸化炭素 CO_2 分子は、原子間振動 (O-C-O) により赤外線を吸収する

- ・ただし、吸収できるのは、波長が $4.26\mu\text{m}$ と $15\mu\text{m}$ の波。

→ 他の波長の赤外線は素通りする。

- ・物質によって、吸収される波長は決まっている。

→ この性質を利用すると「赤外 (IR) 分光」により物質を特定できる。

3 赤外線は電磁波の仲間

- ・電磁波とは電場と磁場の振動が光速で空間を伝わる現象

- ・赤外線は可視光より波長が長い電磁波→目に見えない。

- ・赤外線を物質に照射すると暖める性質があるが、赤外線は熱ではない。

→ 赤外線が物質と相互作用する際、その一部のエネルギーが熱に変換されることがある。

- ・赤外線放射：有限温度にある物質から赤外線が放射される。

- ・太陽照射で暖められた地表面から赤外線が宇宙に逃げていく。

4 実 は、吸収された赤外線は、すぐに放出される

・CO₂ が赤外線を吸収して大気の温度を上げるという説は間違い。 → 実に、多くのひとが誤解している。

・赤外線吸収放出の過程で、CO₂ は熱を発しない。 → 大気を暖める効果はない。

5 CO₂ に吸収された赤外線が地表面に戻される？

・地表面から放出された熱は CO₂ に吸収されるが、すぐに放出される。この際、全方位に放出されるので、一部は地表面に戻される（後方散乱）。→ この機構では温暖化をうまく説明できないことに研究者も気づいた。

・そこで提案されたのが、まわりの CO₂ が、放出された赤外線を再び吸収し、それを放出する過程（吸収放出過程）を繰り返すという暴走機構。

→ 連鎖反応？

→ これが、現在採用されている温暖化機構。

学生 4 人の疑問 → この機構は本当だろうか？

6 大気中の CO₂ 濃度は 0.03～0.04%

→ 大気の気体 10000 個中の 3 個か 4 個に相当

・CO₂ が 0.03% から 0.04% へ増加して温暖化が進んだというのが通説

・10000 個の中の CO₂ が 3 個から 4 個に増えただけで温暖化？

7 よく晴れた日の夜に放射冷却が起こるのはなぜ？

- ・ 地表面から放出される熱（赤外線）が宇宙に放出される。
- ・ 曇りの日には放射冷却は起きない!!
 - CO_2 が大気中にあるのに、なぜ赤外線は地表面に戻されないのか？
 - 赤外線（熱）を地表面に戻してくれるのは雲ではないのか？

8 地球上の生物で栄養素（炭水化物: $(\text{CH}_2\text{O})_n$ ）をつくれるのは植物だけ

- ・ 光合成: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$
 - CO_2 は栄養素をつくるための必須物質
- ・ 動物は、植物がつくった栄養素を食べて生きている。
 - 呼吸で O_2 を取り入れ、栄養素 CH_2O が燃焼（酸化）する際の燃焼エネルギーを使って体を動かしている。
 - CO_2 が存在しなければ、人は生きていけない。

9 先生の提案

地球の温度に関しては、液体の水が重要な鍵を握っている。

補遺1 光と物質の相互作用

光（電磁波）を物質にあてるといろいろな相互作用が生じる。このとき物質の応答は3つに分類できる。それは、**反射** (reflection) と**吸収** (absorption) と**透過** (transmission) である。

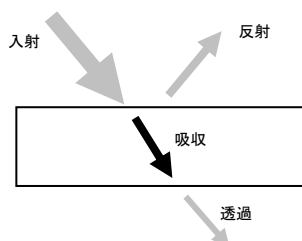


図 A1-1 光が入射したときの物質の応答

ただし、吸収とまとめているが、物質の内部では、いろいろな相互作用が生じる。どんな相互作用が生じるかについて、概略をまとめると図 A1-2 のようになる。

たて軸はエネルギーに相当する。エネルギーの高い紫外線や可視光の場合には、原子内で電子が励起される。つぎに赤外光では分子内の原子結合部の振動を誘起する。最後にエネルギーの小さ

いマイクロ波や電波は、分子の回転運動を誘起する。**電子レンジ** (microwave oven) は、**マイクロ波** (microwave) によって水分子の回転運動を誘起することで、加熱調理する装置である。

水素 H (hydrogen), ヘリウム He (helium), リチウム Li (lithium) などすべての原子は決まった**電子軌道** (electron orbital) に電子が配列されている。たとえば、水素原子は $1s$ 軌道に 1 個の電子がある。ヘリウム原子は $1s$ 軌道に 2 個の電子がある。Li 原子は $1s$ 軌道に 2 個の電子と $2s$ 軌道に 1 個の電子がある。

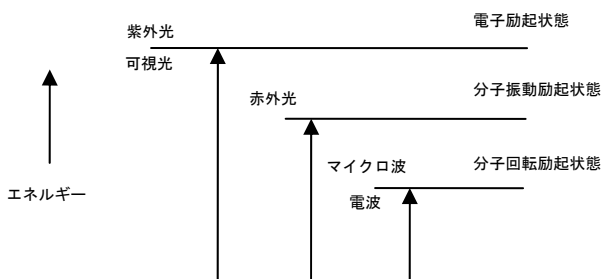


図 A1-2 光と物質の相互作用

量子力学によれば、電子軌道の大きさは連続ではなく、不連続となる。これを電子軌道の量子化と呼んでいる。原子に光が照射されたとき、電子はそのエネルギーを得て、よりエネルギーの高い軌道に移ることができる。その様子を図 A1-3 に示してある。ここでは、もっとも簡単な構造をした**水素 H** (hydrogen) 原子の場合を示している。

電子が光のエネルギーを得て、よりエネルギーの高い電子軌道に遷移することを**励起** (excitation) と呼んでいる。この電子の励

起状態 (excited state) は安定ではなく、励起された電子は吸収した光と同じ波長の光を放出することで、安定な基底状態に戻る。

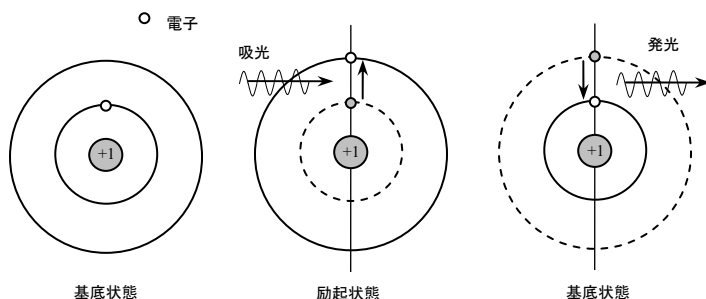


図 A1-3 光と電子の相互作用。電子軌道間の差に相当するエネルギーの光が照射されると、電子はエネルギーの高い軌道に遷移することができる。これを励起状態と呼ぶ。エネルギーの高い励起状態は不安定であり、電子は、吸収した光と同じ波長の光を放出することで、安定な基底状態に戻る。励起時間は 10^{-9} 秒程度と短い。

原子の基底状態の電子配置は、原子ごとに決まっており、励起された電子が占有できる電子軌道も決まっている。よって、電子軌道間の遷移は、元素を特定することに利用できるのである。実際に、ヘリウム He が発見されたのは、**太陽光 (sunlight)** を**分光分析 (spectroscopic analysis)** した際に、未知の波長の光が検出されたことに端を発している。

また、電子軌道間遷移によって発生する光の波長は決まっているため、これを利用して波長の揃った光を発生することもできる。これが**レーザー (laser)** の原理である。

さらに、図 A1-2 以外の相互作用もある。電磁波は電場と磁場

の振動を伴う。すべての物質は電子を有するため、電場ならびに磁場の振動に伴って、物質中の電子も振動するのである。たとえば、金属中には自由に動くことのできる**自由電子 (free electron)**が存在する。磁場が振動すると、電磁誘導により電流（自由電子の運動）が生じる。この際、金属表面に発生する電流は、**レンツの法則 (Lentz's law)** により磁場の侵入を妨げる向きに誘導される。この結果、電磁波は金属表面で、ほぼ 100% 反射されるのである。ただし、X 線などの高エネルギー電磁波は一部金属内に侵入でき、構造解析に利用できる。

一方、自由電子のない半導体や絶縁体では、電場の振動にともなって物質内部の電子分布が変化する。これを分極と呼んでいる。この振動によって電磁波のエネルギーは減衰することになる。

ここで、あらためて物質と光との相互作用を図示すると図 A1-4 のようになる。

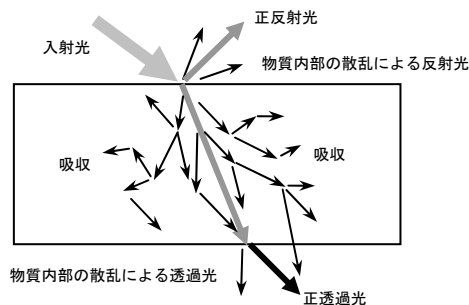


図 A1-4 物質内部では電子励起、赤外線による原子振動、マイクロ波による回転運動などとともに、原子どうしの相互作用、不純物による散乱など、様々な相互作用が生じて光の一部が吸収される。

補遺2 空はなぜ青いか

散乱という考えをもとに、なぜ空が青いかを考えてみる。小学生にも分かりやすいように、この質問に答えるのは、正直かなり難しい。子供向けの科学啓蒙書では、太陽光のうち青色の波長を持った光が、大気中のチリによって散乱されるために、空は青く見えるという説明がある。果たして、この説明で子供たちは納得できるのだろうか。

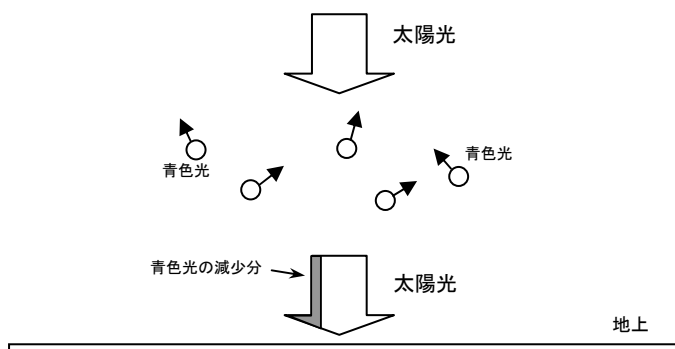


図 A2-1 大気中のチリによって青色の光が他の光よりも強く散乱される。その場合、地上に届くのは青色の光成分が減った太陽光であるが、それも白色光である。

単純に考えれば、太陽光のなかの青色光が散乱されるのであれば、青色はわれわれに届かないので、空が青く見えることはないはずである。普通のひとなら、そう考える。

実は、ここに落とし穴がある。散乱という言葉が誤解を与える。散乱とは、光を吸収したのち、同じ光を放出する現象である（エネルギー吸収があれば、波長が変化する）。このとき、光は 360° つまり全方位に放出される。

現象を整理してみよう。基本は、太陽光にはいろいろな色の光（虹の7色）が含まれていて、それらの合成の結果、**白色光** (white light)、つまり色の無い光となっている。これは、実験でも簡単に確かめることができる。たとえば、光の3原色は**赤** (R: red)、**緑** (G: green)、**青** (B: blue) とされており、テレビやパソコンの画面などは、これらの色を混ぜることで多彩なカラーを実現している。この手法を **RGB カラーモデル**と呼んでいる。そして、これらの光を同時に照らすと、ただ明るいだけの透明な白色光が得られる。つまり、可視光の赤から紫までの光（電磁波）が混ざると、われわれは色を感じることができないのである。そして、太陽光は色の無い白色光である。（つまり、目でみることができない。）これが基本となる。

ここで、空が青く見える理由をあらためて考えてみよう。青い光を散乱するのは小さなチリや**エアロゾル** (aerosol) と言われているが、その正体は明らかではない。大気中に大量に含まれている窒素分子と酸素分子が光を散乱すると考えることもできる。空気中のチリが原因とすれば、地域によって差がでるはずだが、空の青さは世界中どこでも共通で変わらない。これらの大気中の気体分子との相互作用で、波長の短い青色が、それ以外の光よりも強く散乱され、青色の光は、 360° 全方位に向けて放出される。

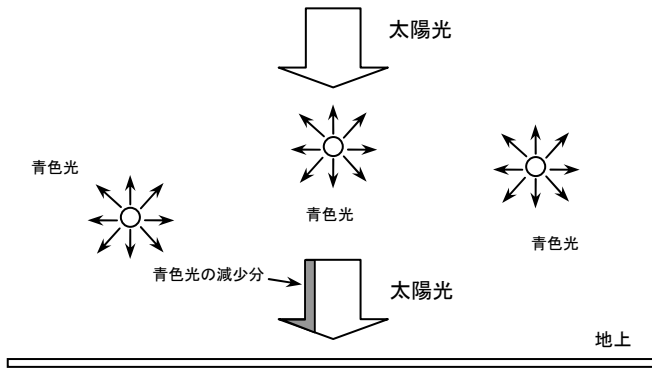


図 A2-2 大気中の気体分子によって青色の光が他の光よりも強く散乱されると、地上に届くのは青色の成分が減った太陽光であり、白色光である。しかし、再放出される青色光は太陽光と干渉しない成分もあり、それが目に届く。その結果、空は青く見える。

この放出される青色光には、もとの太陽光とは異なった方向の成分も含まれる。この結果、他の色と一緒に becoming 白色光とはならない成分もあり、空は青く見えるのである。よって「青色光は大気によって散乱されるので空は青く見える」という説明は、決して間違いではない。しかし、この表現は誤解を与えてしまう。

繰り返しになるが、白色光は、無色透明の光のことである。だから、本来は目に色は見えない。われわれが、まわりの色彩を感じることができるのは、白色光の中の特殊な色の光の反射や散乱のおかげである。このような光の散乱がないと、われわれは光を感じることができないのである。月面から宇宙を眺めれば分かるが、昼でも背景は真暗闇である。ただし、太陽光が注いでいる場合には、ものの影は見える。

補遺 3 二酸化炭素による温暖化説

そもそも、二酸化炭素 CO_2 が温室効果を有するという説は、どこから始まったのであろうか。実は、その端緒は、アレニウスプロットで有名なノーベル化学賞を受賞したアレニウス (S. A. Arrhenius, 1859-1927) と言われている。彼は、1896 年に二酸化炭素の温室効果が地表の温度に影響を与える可能性を発表している。Svante Arrhenius "On the influence of Carbon Acid in the Air upon the Temperature of the Ground", *Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 41, pp. 237-275 (1896).

彼は、二酸化炭素による赤外線吸収を計算し、ステファンの法則⁴²を使って、温室効果の法則を定式化している。ほぼ、現在の手法と同じものであることに驚く。ただし、多くの反論もあった。興味のある方はスペンサー・R・ワート著『温暖化の発見とは何か』(増田耕一、熊井ひろ美訳、みすず書房, 2005) : Spencer R. Weart "The discovery of global warming" Harvard University Press, 2003 を参照いただきたい。

実は、面白いことに宮沢賢治 (1896-1933) が二酸化炭素の温室効果を題材にした童話を 1932 年に書いている。『グスコーブドリ

⁴² 黒体輻射やプランクの法則、ステファンの法則について導出方法などを知りたいひとは、村上雅人著『なるほど統計力学応用編』(海鳴社, 2019) の第 6 章「光のエネルギー」を参照いただきたい。

の伝記』である。賢治の出身県の岩手は、夏の冷害によって何度も大きな被害を受けてきている。それが背景にあったと思われる。

主人公のブドリはイーハトーブ (Ihatov) の樵 (きこり) の子として生まれた。両親を冷害による飢饉で失っている。イーハトーブとは賢治が創った架空の理想郷のことで、岩手県とされている。ブドリが 27 歳になったとき、イーハトーブは深刻な冷害にみまわれる。そこで、彼はカルボナード火山を人工的に爆発させて二酸化炭素 CO_2 を放出させ、その温室効果によってイーハトーブを冷害から救うことを提案するのである。実は、世界では噴出ガスが二酸化炭素の火山の存在も知られている。しかし、火山を爆発させるためには、誰かが犠牲にならなければならない。反対を押し切って、ブドリはその犠牲者となることを決意し、火山を爆発させることに成功する。そして、イーハトーブの冷害は食い止められ、人々は飢饉から救われたのであった。

ちなみに、火山の名前のカルボナード (carbonade) はフランス語であるが、carbon 炭に由来しており、二酸化炭素を噴火ガスとして噴出する火山の名前としては秀逸である。いずれにしても、賢治の博識には舌を巻くばかりである。

地球温暖化が CO_2 の人為的な排出が原因であると言われるようになったのは、1985 年にオーストラリアのフィラハで開催された地球温暖化に関する世界会議（フィラハ会議）が最初とされている。1988 年には、地球温暖化に関する科学的側面をテーマとした政府間パネル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) が設立され、国際的な取組みが始まった。この IPCC において「人為的な CO_2 排出が地球温暖化の原因になる」という可能性が指摘された。この可能性は、2021 年ノーベル物理学賞を受賞された真鍋先生を含む多くの気象学者によって構築された大気大循環モ

デル AGCM の計算をもとに提案されたものである。

1992 年の「地球サミット」では、当時 12 歳だったセヴァン・スズキ (Severn Suzuki, 1979-)⁴³による伝説のスピーチが行われる。彼女は小遣いをためてブラジルのリオの会議にカナダから出席したのである。そこで、彼女は "If you don't know how to fix it, please stop breaking it." 「直し方の分からないもの (大切な地球) を、これ以上壊さないでください」と訴えたのである。

1997 年京都で開催された第 3 回気候変動枠組条約締結国際会議 (COP3) では**京都議定書 (Kyoto Protocol)** が採択された。ここでは、地球温暖化の原因となる二酸化炭素 CO₂ を含む温室効果ガスの削減目標を 1990 年を基準として各国に定めることが合意された。

2015 年には、パリで開催された COP21 において、**パリ協定 (Paris agreement)** が採択され、温室効果ガスの排出削減目標策定が義務化された。ただし、一部の法的拘束力はあるが、罰則規定はない。京都議定書は、先進国だけが対象であったが、パリ協定では 196 ヶ国が参加する枠組みとなっており画期的と言われている。2016 年にトランプ大統領がパリ協定からの離脱を宣言したことで注目を集めた。2021 年にバイデン大統領が選ばれたことで、アメリカのパリ協定への復帰が表明された。

地球温暖化が大きな注目を集めたのは、アメリカ元副大統領の**アル・ゴア (Al Gore)** が作製したドキュメンタリー映画の「都合な真実」"An Inconvenient Truth"の存在が大きい。衝撃的な映像とともに、このまま温暖化が進めば、人類は大きな危機を迎えるという内容である。アメリカでは、民主党と共和党の間では、地球温暖化に対して温度差があり、彼と大統領選を戦った共和党の

⁴³ 彼女の父親は日系カナダ人 3 世の環境活動家であり、スズキという日本名の由来である。

ブッシュ元大統領は地球温暖化に関して懐疑的な態度をとっていることと対照的であった。この映画は、アカデミー賞も受賞し、ゴアはノーベル平和賞を受賞している。

しかし、ゴアに関しては、環境ビジネスで巨万の富を得たり、テネシー州の自宅が普通の家庭の 21 倍もの電力を消費していることなど、ゴア本人の不都合な真実も明らかとなっている。この指摘のあと、ゴアは自宅に太陽光発電を設置したようである。

補遺 4 ステファン・ボルツマンの法則

プランクの放射式 (Planck radiation formula) とは、温度 T の黒体 (black body) からなる空洞に閉じ込められた光の単位体積あたりのエネルギー密度 u の周波数 ν [s^{-1}] 依存性が

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} \quad [\text{Js}^{-1}\text{m}^{-3}]$$

という式によって与えられるというものである⁴⁴。ただし、 c は光速 3×10^8 [m/s]、 h はプランク定数で 6.6×10^{-34} [Js]、 k_B はボルツマン定数で 1.38×10^{-23} [JK^{-1}] である。また [J] はエネルギーの単位の**ジュール** (joule)、 $[\text{s}]$ は時間の単位で秒である。

黒体とは、あらゆる周波数（波長）の光を吸収できる仮想的な物体である。吸収した光は黒体からすぐに放出される。これは、本文でも補遺でも紹介した励起状態から基底状態への変化である。光を吸収した黒体は、そのエネルギーを得て励起状態となるが、エネルギーの高い状態は不安定であるため、すぐに同じエネルギーの光を放出して、基底状態に戻ることになる。つまり、黒体空洞では、あらゆる周波数の光が充満した状態となっている。

⁴⁴ プランクの放射式の導出は、村上雅人著『なるほど量子力学 I』（海鳴社）、『なるほど統計力学—応用編』（海鳴社）を参照されたい。

プランクの放射式を、よこ軸を光の周波数、たて軸を光のエネルギー密度（単位体積あたりのエネルギー $[\text{Js}^{-1}\text{m}^{-3}]$ ）としてプロットすれば、図 A4-1 のようになる。

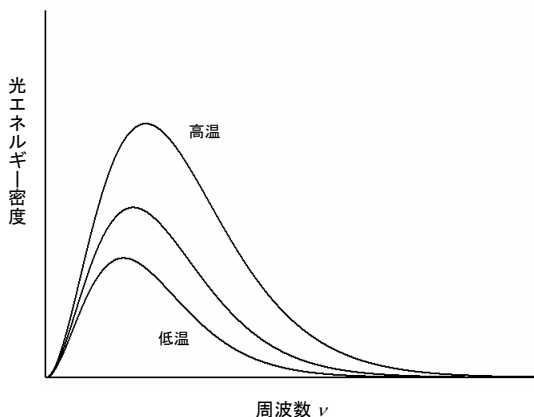


図 A4-1 光エネルギー密度の周波数依存性: 物体の温度 T が高くなると高周波数の光が増える

光放射を議論する場合には、面にあたる光の強度が重要となるので、単位体積あたりの光エネルギー密度 $u[\text{Js}^{-1}\text{m}^{-3}]$ ではなく、単位面積あたりの光強度 $I (= u/(4\pi/c)) [\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}]$ で論ずる場合が多く、プランクの放射式は

$$I(\nu, T) = \frac{2h}{c^2} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} [\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}]$$

という表式を採用するのが一般的である。

ここで、温度 T の物体が放射する単位時間、単位面積あたりの

全放射エネルギー $J(T)$ [$\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$] は、プランクの放射式を ν に関して 0 から ∞ まで積分すればよい。よって

$$J(T) = \int_0^{\infty} I(\nu, T) d\nu = \frac{2h}{c^2} \int_0^{\infty} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} d\nu = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3} T^4$$

となる。温度以外はすべて定数であるから $\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3}$ と置くと

$$J(T) = \sigma T^4$$

と与えられる。

よって、温度 T にある物体から放射される光のエネルギーは T の 4 乗に比例する。この温度依存性は、**ステファン・ボルツマンの法則** (Stefan-Boltzmann law) として知られている。また、ステファン・ボルツマン定数 σ は、それぞれ定数の値を代入すると

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \times 10^{-8} [\text{Js}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}]$$

となる。ここで電力 W は、単位時間あたりのエネルギー $[J]$ であり $W = J/s = \text{Js}^{-1}$ という関係にあるから

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}]$$

となる。

このように物体の温度 T が分かれば、その物体から放射される光のエネルギーが σT^4 と与えられる。この法則は、非常に分かりやすく便利である。

ところで、いままでは変数を、周波数の $\nu [\text{s}^{-1}]$ としてきたが、これを波数 $\kappa [\text{m}^{-1}]$ で表現する場合もある。このとき、光速を $c [\text{ms}^{-1}]$ とすると、 $\nu = c\kappa$ という関係にあるから、プランクの放射式

$$I(\nu, T) d\nu = \frac{2h}{c^2} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} d\nu$$

における変数を、振動数 ν から波数 κ に変換してみよう。 $d\nu = c d\kappa$ に注意すれば

$$\frac{2h}{c^2} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} d\nu = \frac{2h}{c^2} \frac{(c\kappa)^3}{\exp\left(\frac{hc\kappa}{k_B T}\right) - 1} c d\kappa = \frac{2hc^2 \kappa^3}{\exp\left(\frac{hc\kappa}{k_B T}\right) - 1} d\kappa$$

となる。また、光については、波長依存性で示す場合も多い。そこで、プランクの放射式

$$I(\nu, T) d\nu = \frac{2h}{c^2} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} d\nu$$

における変数を、振動数 $\nu[\text{s}^{-1}]$ から波長 $\lambda[\text{m}]$ に変換してみよう。

光の振動数 ν と波長 λ の間には、光速を c として、 $c = \lambda \nu [\text{ms}^{-1}]$ という関係が成立する。よって $\nu = c/\lambda$ から $d\nu = (-c/\lambda^2) d\lambda$ となる。これらをプランクの放射式に代入すると

$$\frac{2h}{c^2} \frac{(c/\lambda)^3}{\exp\left(\frac{hc}{k_B \lambda T}\right) - 1} \left(-\frac{c}{\lambda^2}\right) d\lambda = -\frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B \lambda T}\right) - 1} d\lambda$$

となる。よって、波長 λ で表示した単位面積あたりの光強度 $[\text{Wm}^{-2}]$ は

$$-\frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B \lambda T}\right) - 1} d\lambda$$

と与えられることになる。これから全エネルギーを求める際に、積分範囲は ν の0から ∞ から、 λ の ∞ から0に変わるので、

$$J(T) = - \int_{\infty}^0 \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B \lambda T}\right) - 1} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B \lambda T}\right) - 1} d\lambda$$

となる。したがって

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B \lambda T}\right) - 1}$$

と置くことがある。よこ軸を光の波長、たて軸を光強度としてグラフにプロットすると、図 A4-2 のようになる。

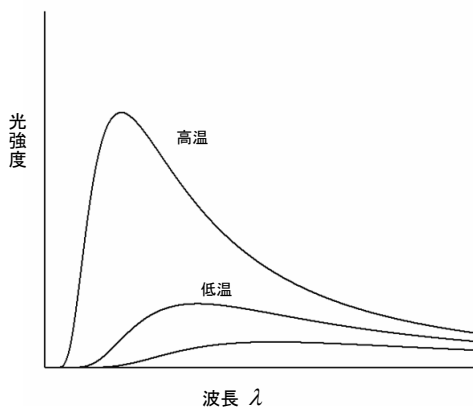


図 A4-2 光強度の波長依存性: 物体の温度 T が低くなると光強度が低く、またピークは高波長側にずれていく。

このように、光エネルギーの分布を、よこ軸を周波数と波長で表示した場合に様相が大きく異なることに注意されたい。

補遺 5 真鍋先生

2021 年ノーベル物理学賞を受賞した真鍋先生の業績とはなんだろうか。一般には、世界ではじめて「大気中 CO_2 濃度の上昇が地球温暖化の原因になる」と証明したからと言われている。

ただし、真鍋先生の大きな業績は、地球の気候をシミュレーションできる**大気大循環モデル** (atmospheric general circulation model: AGCM) を研究仲間と一緒に構築したことにある。大気中の気体分子の運動は、すべて物理法則に従うはずである。よって、観測値をもとに、微分方程式を数値解析すれば、計算によって気象予測も可能となる。このような数値モデルによる気候システムの研究は 1920 年代に始まった。しかし、当時は、コンピュータがなかったために、膨大な量の計算を必要とする気象モデルの構築はできなかった。

1950 年代にアメリカでコンピュータが開発された。この研究をリードしたのが、有名なフォン・ノイマン (von Neumann) であった。彼は、コンピュータの応用分野のひとつに気象予報を取り上げ、プロジェクトを開始した。1956 年にスマゴリンスキー (J. Smagorinsky) は、General Circulation Laboratory (気候モデルのための研究所) を気象局につくって、コンピュータによる気候モデルの開発に着手した。1958 年に東大の地球物理の博士課程を終えた真鍋淑郎氏が、このチームに合流した。

真鍋先生は、日本に見切りをつけて渡米したという話もあるが、当時の研究所はアメリカ政府から潤沢な予算を獲得しており、自由にコンピュータを使うことができた。日本では考えられない好環境である。予算申請のためのわずらわしい雑務からも解放されて、研究者にとっては、天国であったのではなかろうか。

先生は ACGM を利用して、地球全体の気候予想にもチャレンジしている。その研究の一環として、大気の平衡温度 (equilibrium temperature) のシミュレーションも行っている。ただし、大気は 3 次元的拡がりを持っているから、対流 (convection) や雲の影響などの複雑な影響をすべて取り入れることはできない。そこで、簡単なモデル化を行うのが一般的である。

そのひとつが、平行平面大気 (plane-parallel atmosphere) による近似である。大気の高さ方向に比べて、水平方向の拡がりはかなり大きい。よって、その影響を取り入れていたら切りがない。一方で、鉛直方向に比べると、水平方向では、気温の変化がそれほど大きくない。そこで、第 1 次近似として水平方向が一様と考える。そのうえで、鉛直方向の放射伝達を考えるのである。本文で紹介したガラス板による温室効果の説明は平行平面大気近似を適用したものである。



図 A5-1 平行平面大気近似：水平方向の大気は一様と考えると、鉛直方向だけの変化を考えればよい。

実は、地球の大気はいくつかの層に分かれている。地表面に近い側から、対流圏 (troposphere)、成層圏 (stratosphere)、中間圏 (mesosphere)、熱圏 (thermosphere) となる。ただし、地表面の温度に影響を与えるのは最下層の対流圏である。ただし、対流圏との熱平衡という観点で成層圏も重要となる。

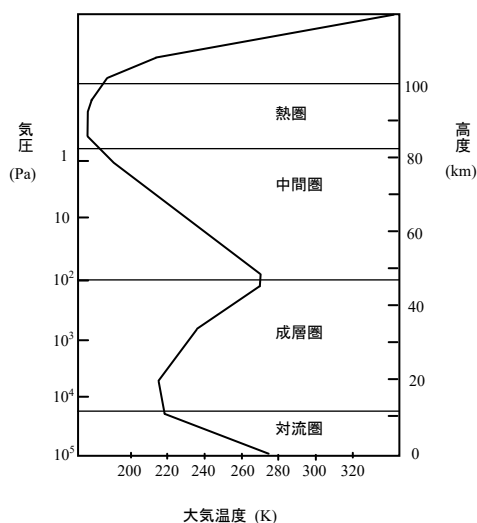


図 A5-2 大気の種類と鉛直方向の温度分布

さらに、対流圏においても、複数の層に分けて、層間の放射伝導を考えることでより精密なモデルが構築できる。

本文のガラス板モデルでは、1層であったが、それを2層にすることもできる。

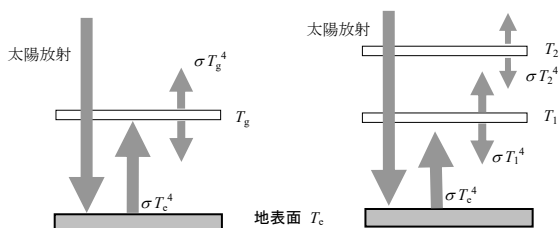


図 A5-3 大気の仮想ガラスモデル：大気の層を1層から2層へ、さらに多層へと展開することが可能である。

また、本文では太陽光に対してガラス板は透明としたが、紫外線は成層圏で酸素と反応してオゾンを生成する際に吸収されるので透明ではないとし、透過度を1から修正することも可能である。同様に、地表面からの赤外放射に対しても透過度を変化させることができる。実際に、大気には、赤外線を吸収する水蒸気 H_2O や二酸化炭素 CO_2 が含まれているため、透過率を調整することで、これらの気体の影響を取り入れることが可能である。

このように、もっとも単純なモデルからスタートして、多層構造を模擬し、それぞれの放射伝導や対流の影響も加味することで、真鍋先生らは、大気の鉛直方向の温度分布を計算している。その結果が図 A5-4 となる。ただし、ここでは、 CO_2 濃度が 150ppm のデータは載せていない。

この図で、高度とともに、温度が下がっている領域が**対流圏**に、温度が上がっている領域が**成層圏**に対応する。対流圏と成層圏の間には温度が変化しない領域があるが、ここも成層圏に入る。そして、対流圏と成層圏の境界を**対流圏界面 (tropopause)**と呼んで

いる。成層圏において、高度とともに温度が上昇するのは、太陽光のなかで、エネルギーが高い紫外線が大気中の O_2 を分解し、オゾン O_3 を発生させるからである。この反応によって紫外線のエネルギーは吸収され熱が発生し成層圏を暖めることになる。

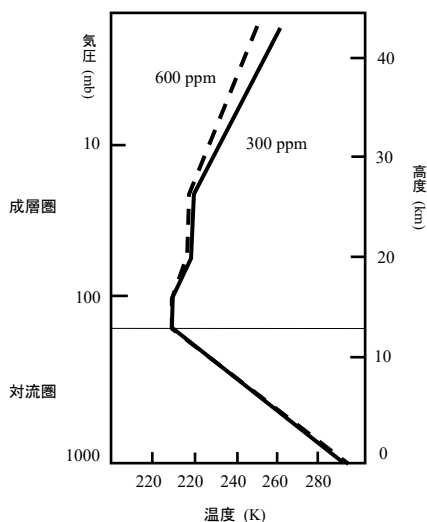


図 A5-4 真鍋先生の大気温度のシミュレーション結果

また、このスケールでは、300ppm と 600ppm のときの地表面の平衡温度は、差が分かりにくい。そこで、真鍋論文では、表 A5-1 のように、より詳細な地表面温度が掲載されている。

さらに、平衡温度の計算に当たっては

$$\text{太陽放射} + \text{赤外線反射} = \sigma T_e^4$$

という平衡式を使って、地表面の平衡温度 T_e を求めている。

表 A5-1 地表面の平衡温度: 絶対温度 (K)

CO ₂ 濃度 ppm	曇りの日		晴天	
	絶対湿度近似	相対湿度近似	絶対湿度近似	相対湿度近似
150	289.80	286.11	298.75	304.40
300	291.05	288.39	300.05	307.20
600	292.38	290.75	301.41	310.12

そして、大気中の CO₂ 濃度が 300 から 600ppm となると、絶対湿度を仮定した計算では 1°C 程度上昇するという結果が得られている。

このとき CO₂ の影響は、上式の赤外反射項に入るが、その赤外線吸収率を $a(\text{CO}_2)$ とすると、その値は $a(\text{CO}_2)\sigma T_e^4$ となる。 a は大気中に存在する温室効果ガスの積算

$$a = a(\text{CO}_2) + a(\text{H}_2\text{O}) + a(\text{CH}_4) + \dots$$

となるが、真鍋論文では、水 H₂O の単位量あたりの赤外線吸収率として、CO₂ よりも 10 倍近い値が採用されている。これは、赤外線吸収スペクトルのデータから見積もられた値である。さらに、CO₂ が吸収できるのは、波長が 4.26μm と 15μm の赤外線しかない。そして、大気中の赤外線吸収率 a への、それぞれの気体の寄与は、濃度にも依存するが、水蒸気の大気中濃度が CO₂ の濃度の 10 倍から 100 倍であることを考慮すれば、赤外反射項においては H₂O の影響がほぼ支配的と考えられる。実際に真鍋論文でも H₂O の影響は大きい。

雅人コメント

現在の地球では、 CO_2 の濃度が 300ppm から 400ppm になって、地球が温暖化し、気候変動が生じ、その結果、異常気象が世界各地で発生していると言われている。10000 個のなかの 1 個の増加でしかない。その主犯を CO_2 と結論するのは妥当なのであろうか。

実は、 H_2O は気体分子としてだけでなく、水滴や氷としても存在する。そして、赤外線吸収は液体の水のほうが、気体よりもはるかに大きい。電磁レンジにおいても、液体の水はマイクロ波を吸収して加熱できるが、気体の水蒸気は加熱されない。また、水は、地球温度で、固体、液体、気体と相変態する。この変態にともない、かなりの発熱や吸熱が生じるため、水の影響をシミュレーションに正確に取り入れるのは、かなり難しい。一方で、 CO_2 は地球環境では、常に気体として存在するので、取り扱いは容易である。(が寄与は小さい。)

このような時、実験屋はどうするか。それは、できるだけ H_2O の影響が小さな場所を実験場に選ぶことである。そして、それは砂漠である。さらに、日中は日射が大きいため、赤外線放射のみを見たければ、夜がいちばん適している。

それでは、砂漠の夜では、なにが起きているだろうか。それは放射冷却である。昼に暖められた砂漠表面からは赤外線が宇宙に向けて放出される。その結果、砂漠の夜は急激に冷やされ、日較差は 56°C に達することもある。そして、 CO_2 による赤外線の後方散乱の効果は、いっさい見られない。水 H_2O がないと赤外線反射は起こらないのである。