



Title	光音響効果を用いた気体の温室効果を学ぶ実験教材に関する研究
Author(s)	福原, 朗子
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第14600号
Issue Date	2021-06-30
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14600
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/82337
Type	doctoral thesis
File Information	FUKUHARA_Akiko.pdf



光音響効果を用いた気体の温室効果を学ぶ

実験教材に関する研究

(A study on development of the educational material
to learn greenhouse effect of gas using photoacoustic effect)

北海道大学大学院環境科学院

環境起学専攻実践環境科学コース

福原朗子

要旨

二酸化炭素などの温室効果気体によって、大気における温室効果が起こる。多くの人が、言葉として知っているものの、高校や大学で習う自然科学的な知見と結びつけて理解する機会は少ない。本研究では、Kaneko et al.(2010)で開発された光音響効果の実験装置をもとに、赤外線が透過する様子を、気体セルにおける入射量・吸収量・透過量に関するエネルギー収支を考察することで理解し、また、その光学的厚さをカバーガラスの枚数相当に換算することにより、高校生や大学生が理解できる教材としてまとめた。

既存の温室効果を理解する教材の多くは、赤外線ランプ等の光源は使っているものの、その光源の発する波長帯は近赤外領域であり、地球放射の遠赤外線とは異なること、および、用いている容器の多くは幅広い波長で吸収しているのに対して、近赤外領域の二酸化炭素の吸収帯はごく限られた波長のみであり、温度上昇で検出することは困難である。本研究は、それらとは異なるアプローチである光音響効果を利用した教材に注目した。Kaneko et al.(2010)では、赤外線の温室効果ガスによる吸収量が音響信号に変換されるため、結果的に温室効果ガスの吸収帯のみに注目した計測ができる。また、光源の放射温度を比較的強く抑えることにより、遠赤外領域でも吸収量を計測できる特長を持つ。気体の種類によって音響信号が異なること、気体の濃度が高くなると音響信号が大きくなること、断続光の周波数が高くなると音響信号が小さくなること、などが示されており、Fukuhara et al.(2012)では、気体セルに入射した断続光から音響信号として取り出せるメカニズムについて考察している。

本学位論文では、光音響効果を利用した装置で、2つの気体セルを縦列配置し、それぞれの吸収量を用いて、エネルギー収支から入射量や透過量を見積もる教材開発を行った。同一ガスを2つの気体セルに封入すれば、その気体の吸収帯におけるエネルギー収支を考えることができる。光源から遠い気体セル(2段目)にCO₂濃度100%を封入し、いわば検出器の役割を持たせ、近い気体セル(1段目)にCO₂濃度0%から100%を封入し、吸収量を計測した。経験的補正係数を導入した簡単なエネルギー収支により、入射量や透過量を見積もることができるようになった。また、光学的厚さは気象学における基礎的概念であるが、一般の高校生や大学生にとっては必ずしも知られていないものである。光学的厚さを(顕微鏡で使われる)カバーガラスの枚数に換算するようにした。カバーガラスは、可視光で透明だが、赤外光に対しては半透明であり、

波長毎の特性も、高校生や大学生の大気の温室効果の理解に役立たせることができる。なお、FTIR(フーリエ変換赤外分光光度計)を用いて、波長ごとの二酸化炭素の吸収帯とカバーガラスの透過率から、カバーガラスの計測された吸収率を確認することができる。本研究では二酸化炭素のみを扱ったが、今後、複数の温室効果ガスも扱うことで、気体特有の吸収帯で異なることなどを使用して、より波長特性を理解する教材開発もできる。

謝辞

本研究を行うにあたって、北海道大学大学院環境科学院環境起学専攻、山中康裕教授には、情熱的できめ細やかなご指導を頂きました。最初にこの実験装置を持参したときに投げかけられた、「この装置の光学的厚さはいくつなの？」という質問に答えるのに5年以上の歳月が必要となりました。赤外線のエネルギー収支というアイデアは山中先生に頂きました。目に見えない赤外線について、気体セルを2台使ったら何かわかるかな…と自信を持ってないまま試行錯誤していたとき、1台をディテクターとして使う方法を教えて下さいました。この研究は科研費によって大きく前進しました。大学院に在籍して一年目で科研費を獲得できたのも、やはり山中先生のご指導の賜物です。加えてひらめき☆ときめきサイエンスは3年連続採択されることにより、小学校高学年の児童にこの教材の魅力を伝える場を得ました。装置の説明や理解が難しいので、温室効果のある気体を入れると音が鳴り、温室効果がない気体を入れると音がならないというシンプルな紹介にとどめましたが、参加した小学生からは驚きの感想が得られました。加えて2021年度にも新たな科研費を獲得し、ますます身の引き締まる思いです。論文に直結しない分野では同じ教育職の立場の一人として尊重して頂き、懐の深さを感じました。知識や技術を惜しみなく分け与える姿勢、社会人に合わせたスケジュール管理、校正は目の前で一文ずつ丁寧に行うことなど、日々の面談は学びの連続でした。私の研究を長く支えてくれた山中先生に心より深く感謝申し上げます。

光学的厚さを可視化して学ぶ授業案として、特に、可視光における光学的厚さを理解する内容として、視程や透明度と関連付けて、白濁した水溶液を入れたメスシリンダーを上から眺めるといったいくつかの要素をまとめようと試みました。全体の授業案としてまとめるところまでは至らず、本学位論文に独立した章として付け加えることはできず、補遺Cとして残すことにしました。

この光音響効果実験装置の開発者である大阪大学大学院理学研究科金子文俊准教授には、装置の設計図から使い方や細かなコツに至るまで、ノウハウを惜しみなく教えて頂きました。サイエンスパートナープロジェクト用に開発されたこの教材の対象者をより広げるために、私の実験指導の経歴からこの研究チームに加えて頂きました。そのため、高校生や学部生対象として、この教材の可能性を自由に模索することができました。研究室や出張先に何度もお邪魔し、FTIRをお借りするだけでなく、実験の指導もして頂きました。どんなに忙しいときも、ストレートな表現でご指摘頂き、私の理解

不足や困ったことに対して具体的なヒントを与え続けて下さいました。折に触れて頂いた励ましの言葉とその気配りにいつも助けられていました。心から感謝申し上げます。

北海道科学大学全学教育共通部、小川直久教授には、たくさんご指導頂きました。物理が苦手ですずっと避けてきた私に、熱容量や熱流などの定義に始まり、基礎方程式の解説、電気回路と解析方法など、私のレベルに合わせた勉強会の時間を何度も繰り返し作って下さいました。またドライバーひとつ上手く使えない工作初心者の私に、はんだごてやボール盤、マルチメーターの取り扱い方を一から教え、実験装置を自力で完成するまで見守って頂きました。小川先生は博士号を目指すきっかけを与え、私の人生に最も大きな影響を与えてくれた一人です。心から感謝申し上げます。

大学院で過ごした約6年間はこの研究に加え、多くの人たちの出会いに支えられました。同じゼミの大学院生、南極学講座の手稲山・スイス・母子里・サロマ湖の各実習と一緒に学んだ大学院生のみなさんは年齢の離れた私に優しく話しかけ、自然と和に入れるようにしてくれました。南極学講座を支える全ての先生とスタッフのみなさんに他の大学院では決して経験できない貴重な体験と時間を与えて頂きました。秘書の竹谷和佳子さんには公私に渡り、いつも話を聴いて頂き、たくさん励まして頂きました。ありがとうございます。ここには個別のお名前を全て書くことをしませんが、北海道大学大学院環境科学院で出会ったみなさまに、心から感謝申し上げます。

本博士論文は、主査山中康裕教授、副査、渡辺悌二教授、平田貴文特任准教授、北海道科学大学全学教育共通部の内田尚志教授による論文審査会で審査して頂きました。先生方のコメントは本論文の位置づけやどこまで取り扱うかを定める鍵となり、本論文をより明確な教材にすることに役立ちました。関係して頂いた先生みなさまにお礼申し上げます。特に内田尚志先生には、大学生に実際に使用している教科書や関係する資料を提供して頂くだけでなく、学部生の理解レベル、物理教材と環境教育の教材の違いなどのたくさんのヒントを頂きました。温かい応援も心に沁みました。

職場である北海道科学大学工学部都市環境学科の教員のみなさまには、育児休暇復帰後から現在に至るまでの間、校務役職の担当を外すなど、教育と研究の時間を確保できるような配慮を頂きました。ありがとうございました。

最後に、ここまで辛抱強く私の博士課程を支えてくれた義父母、実父母、三人の子どもと夫に感謝申し上げます。長女には寛容な冷静さを、次女には諦めない強い気持ちと努力を、長男には与え続ける勇気を、夫には心を平静に保つ方法を日々の生活から教えてもらいました。ここでいま改めて、感謝の意を表したいと思います。ありがとうございました。

目次

第1章 はじめに	8
1.1 はじめに	9
1.2 基礎的なエネルギー収支および電磁気学	9
1.2.1 熱の輸送(放射・熱伝導・対流).....	9
1.2.2 熱エネルギー収支	10
1.2.3 電磁波	10
1.2.4 黒体輻射	11
1.2.5 放射に関する基本法則	11
1.2.6 放射伝達方程式と光学的厚さ	14
1.3 太陽放射と地球放射	15
1.4 物質による赤外吸収.....	18
1.5 教材開発に関する先行研究	21
1.6 既存の温室効果を理解する教材の課題	24
1.7 光音響効果について	26
1.8 本研究の目的	28
第2章 光音響効果を用いた実験教材の開発～縦列配置によるエネルギー収支の考察～	29
2.1 はじめに	30
2.2 赤外線波長の分布とCO ₂ の吸収波長帯について	31
2.3 装置及び実験	33
2.4 CO ₂ 濃度実験およびカバーガラス実験の結果.....	34
2.5 議論	37
2.6 本教材を用いた実習における学生評価	40
2.7 まとめ.....	42
第3章 総括	43
3.1 本学位論文のまとめ	44
3.2 本研究の課題と今後の展望.....	44
補遺 A 分子による赤外線の吸収の詳細	50
A.1 温室効果ガス	50
A.2 大気を構成する気体	51

補遺 B 本装置を用いた授業における資料	54
B.1 配付資料	54
B.2 エクセル・ファイル	59
補遺 C 光学的厚さを学ぶいくつかの要素	60
C.1 光学的厚さに関する方程式・解法についての説明.....	60
C.2 カバーガラスを物差しとして用いること(標準器の考え方).....	62
C.3 メスシリンダーを用いた可視光における光学的厚さの実験	62
参考文献	65

第1章 はじめに

1.1 はじめに

第1章では、光音響効果を利用した教材を作るうえで必要な知識と考慮すべき内容について説明する。1.2 節では、基礎的なエネルギー収支および電磁気学として、熱の輸送(放射・熱伝導・対流)、熱エネルギー収支、電磁波、黒体輻射、放射に関する基本法則、放射伝達方程式と光学的厚さに関する内容である。1.3 節で太陽放射と地球放射、1.4 節で物質による赤外吸収について説明し、1.5 節で既存の温室効果を理解する教材の課題を挙げる。1.6 節の実験装置の原理である光音響効果について説明した後、1.7 節で本学位論文の目的を述べる。

1.2 基礎的なエネルギー収支および電磁気学

ここでは、研究で開発する教材を理解するための大気放射学の基礎的な知識を記述する。この知識は、大学初年次で基礎物理学のレベルに相当する。著者が所属する北海道科学大学では、基礎教育科目「基礎物理学」は、工学部5学科のうち情報工学科、電気電子工学科および建築学科では初年次教育として開講されているが、機械工学科および都市環境学科では廃止されている。「基礎物理学」では、力学の基礎事項(情報工学科)、力学・電流・電場の基礎事項(電気電子工学科)、力学、流体、熱と温度に関する基礎概念(建築学科)など、各学科の専門教育に関連するような内容が教えられている。そのため、少なくとも北海道科学大学においては、ここで紹介する基礎知識を全員が学んでいるわけではない。逆に言えば、このような教材を用いた授業を数多く実施できれば、基礎教育科目「基礎物理学」で習うような基礎知識を教えることにつながる。その一方、気候変動に関しては、工学部を含む全学部全 13 学科で開講される基礎教育科目「社会の理解 I ～自然と環境～」の中で少し紹介されるが、必ずしも、その原理をしっかりと教えているわけではない。

1.2.3 から 1.2.6 は、大気放射学や物理学の教科書である、Petty(日本語訳は近藤訳(2019))、浅野(2010)、原(2010)を参考にして記述する。

1.2.1 熱の輸送(放射・熱伝導・対流)

ここでは、熱の輸送について、簡単に整理する。熱エネルギーがどのように伝わるかは、伝導、対流、放射という3つの機構またはそれらの組合せによって行われる。

熱伝導は、高温部の原子の熱運動エネルギーが原子間力の作用によって次々と隣の原子に伝えられて低温部まで到達することによって生じる接触している物体間あるいは物体内部での熱の輸送である。対流は、高温の部分と低温の部分の密度の差に

よって生じる流体の運動であり、高温(低温)の流体自身が移動することで熱が伝わるものである(流体の運動エネルギーは、通常熱エネルギーに比べて無視できる)。熱を気体や液体では、効率よく移動できる。放射とは、高温の物体から、光、赤外線、紫外線などの電磁波が射出され、空間を伝わって低温の物体に当たって吸収されることによって熱エネルギーが移動することである。

1.2.2 熱エネルギー収支

物体の温度 T は、伝導、対流、放射などの熱エネルギーの出入りで決まる。

$$C \frac{dT}{dt} = F_{in} - F_{out}$$

ここで、 dT/dt は温度の時間変化、 C は熱容量、 F_{in} は単位時間あたりの入る熱エネルギー、 F_{out} は単位時間あたりの出る熱エネルギーである。後述するように、地球をひとつの物体としてみると、 F_{in} は地球が受け取る太陽放射、 F_{out} は地球から射出される地球放射である。後者は、地球の温度による黒体放射(後述)に近似できるので、長期間平均した地球の温度は、前者に釣り合う後から決まる。

1.2.3 電磁波

光は、特定の周波数をもつ電磁波であり、その周波数(または振動数)は、角振動数 ω を用いて、

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}$$

のように表せる。周波数の単位は、1秒当たりのサイクル数、ヘルツ(Hz)で表される。基本的には、周波数は電磁波固有の性質であり、容易に変化するものではない。大気科学では、伝統的に、周波数 ν よりも波長 λ を用いられてきた(例えば、太陽光を短波放射、赤外光を長波放射と呼ぶことが象徴的である)。波長と周波数との関係は、

$$c = \nu \lambda$$

のように表せる。ここで、 c :光速、 ν :周波数、 λ :波長である。

$$\lambda^{-1} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$$

FTIR では、波長や周波数でもなく波長の逆数である波数(wave-number) λ^{-1} を用いる。波数は通常センチメートルの逆数の単位(cm^{-1})で表される。

電磁波は、波長別に光や電波といった名称で呼ばれる(図 1-1)。大気放射では、紫

外線、可視光線、赤外線の波長帯の電磁波を主に扱い、リモートセンシングではマイクロ波も用いられる。

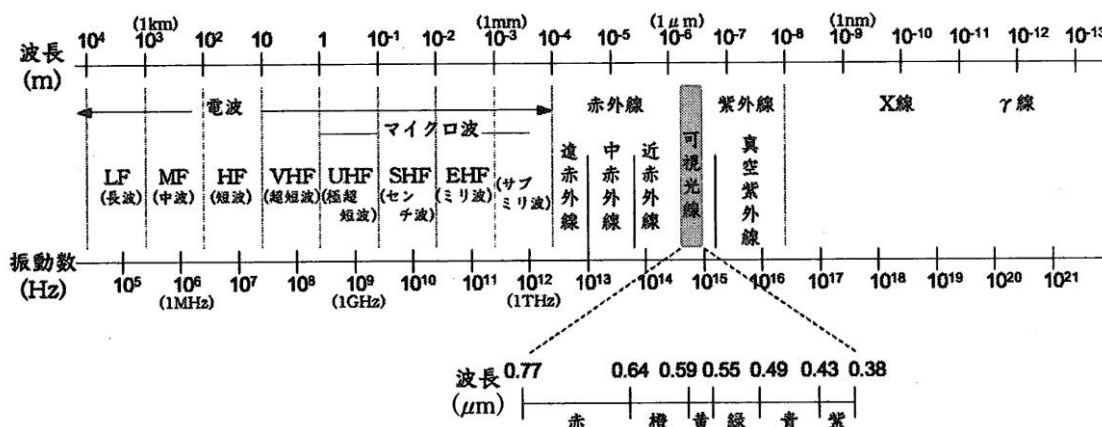


図 1-1 放射(電磁波)の呼称と波長および振動数(浅野正二 2010)

1.2.4 黒体放射

電磁波を完全に吸収する物体を黒体と呼ぶ。よく電磁波を吸収する物体はよく電磁波を射出する物体でもある。地球や大気による放射は、物質の熱エネルギーが電磁波に変化する過程である。この黒体放射は、プランクの法則(Planck's law)により記述される(1.2.5)。

1.2.5 放射に関する基本法則

放射に関する主な基本法則を説明する。

① プランクの法則

有限温度 T の物体は一般的にあらゆる波長の電磁波を射出する。しかし、いずれの波長 λ においても射出される放射量には決まった上限がある。温度 T 、波長 λ においてその上限を与える関数をプランク関数という。

振動数 ν から $\nu + d\nu$ [s^{-1}] の範囲にある、単位振動数あたりのエネルギー密度(放射輝度) $f_T(\nu)$ [J s m^{-3}] は、

$$f_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} d\nu$$

となる。ここで、プランク定数 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ [J s]、光速 $c = 2.998 \times 10^8$ [m s⁻¹]、プランク定数 $k = 1.381 \times 10^{-23}$ [m² kg s⁻² K⁻¹]である。

波長 $\lambda = c/\nu$ より、 $d\nu = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$ を利用して、振動数 ν から $\nu + d\nu$ [m⁻¹] の範囲にある

単位波長あたりのエネルギー密度 $f'_T(\lambda)$ [J m⁻⁴]

$$f'_T(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} d\lambda$$

となる(図 1-2)。

同様に、赤外線分光計 FTIR で用いられている波数で見ると、波数 $\omega = 1/\lambda = \nu/c$ より、振動数 ω から $\omega + d\omega$ [m⁻¹] の範囲にある単位波数あたりのエネルギー密度 $f''_T(\omega)$ [J m⁻²] は、

$$f''_T(\omega)d\omega = \frac{8\pi hc\omega^3}{\exp\left(\frac{hc\omega}{kT}\right) - 1} d\omega$$

となる。

なお、物体から射出される単色(注目する波長)の放射輝度 I_λ を黒体からの放射輝度とみなしたときに、

$$T_B = B_\lambda^{-1}(I_\lambda)$$

の関係式で決まる物体の温度 T_B を黒体相当の輝度温度という。この式は観測される放射輝度 I_λ が同じ波長での絶対温度 T_B を逆算することを意味する。

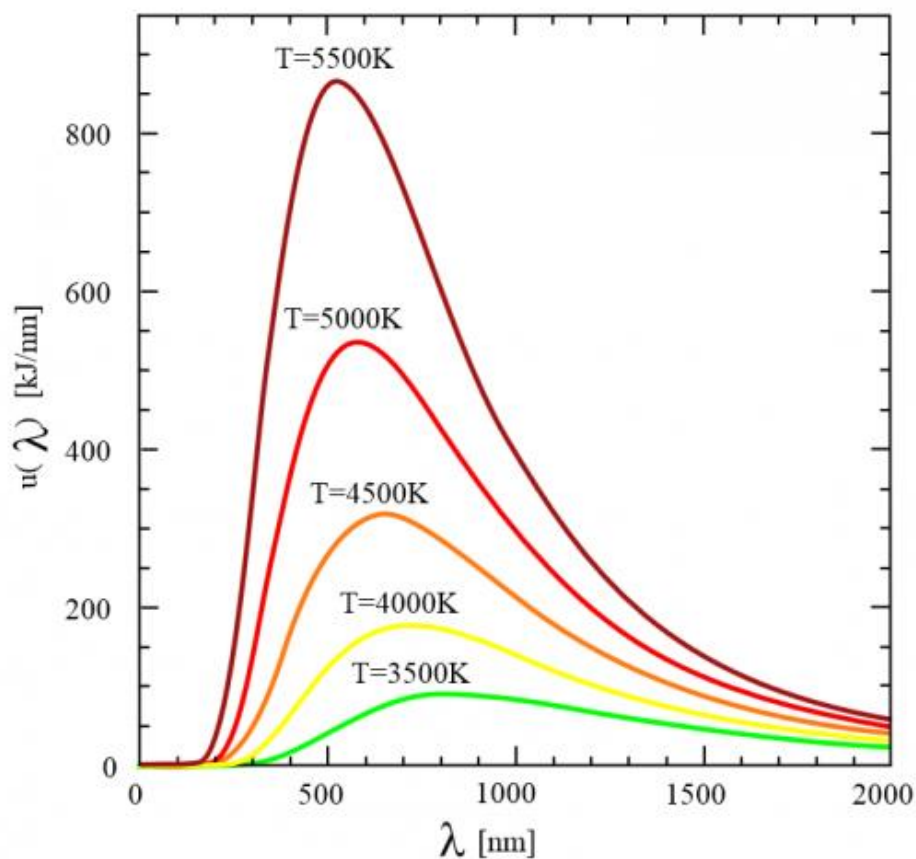


図 1-2 温度ごとの電磁波の波長分布 (heat-tech web ページ)

② ウィーンの変位則

プランク関数はある波長において最大値 λ_{max} をとる。この射出が最大となる波長は温度 T に反比例する。

$$\lambda_{max} = \frac{k_w}{T}$$

ここで、 $k_w = 2897[\mu\text{K}]$ である。物体の温度が低くなるにつれて、放射は長波長側にシフトし、地球のような冷たい物体からの放射が最大となる波長は、太陽のような高温の物体からの放射が最大となる波長に比べてずっと長いものとなる。太陽の表面温度 6000 [K]では $\lambda_{max} = 0.48 [\mu\text{m}]$ 、典型的な大気の温度範囲 200~300 [K]では 9.6~14.4 [μm]となる。

③ ステファンボルツマンの法則

プランク関数により黒体放射の単色の放射輝度が与えられる。エネルギー輸送において基本的な量は、黒体から射出される放射の広域帯フラックスである。このフラックスはプランク関数を全波長で積分し、半球の立体角である 2π ステラジアン領域で積分することで得られる。放射輝度が等方的であれば、後者の積分は放射輝度に π を

かけるだけで済む。したがって黒体のフラックスは $F_{BB}(T) = \pi \int_0^\infty B_\lambda(T) d\lambda$

となる。これを解析的に積分すると上式は、

$$F_{BB}(T) = \delta T^4$$

で表されるステファンボルツマンの法則となる。ここでは δ は

$$\delta = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15C^5 h^3} \approx 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

で表される定数である。

1.2.6 放射伝達方程式と光学的厚さ

任意の方向に対する放射伝達方程式は、大雑把に言えば、

$$\text{入射} = \text{射出} + \text{消散} + \text{透過}$$

となる。ここで、消散は、他の方向への散乱(反射)および物質による吸収であり、射出は黒体放射などである。

単純な状況として、光学的に一様な性質を持つ物体を透過する光 I を考えてみる。光学的厚さ τ は、物体を透過する距離 x に対する光の強度 I の式 $I(x) = I_0 e^{-kx}$ (ここで I_0 は入射光、 k は消散係数) により、 $\tau = kx$ と定義され、透過率 I/I_0 は $e^{-\tau}$ で与えられる。

入射光に対して、透過光は、光学的厚さ τ が1ならば $1/e$ 、光学的厚さ τ が2ならば透過光が $1/e^2$ のように、厚くなればなるほど透過光が弱くなる。例えば、大気が澄んでいる状況を表す指標として、どこまで見えるか? という視程(km)が用いられる。これは、見えなくなる程度を例えば $1/e^4 \sim 2\%$ とすると、視程 x (km)から、 $4 = kx$ より、消散係数 k という大気の状態を得ていることに相当する。つまり、霧や霞の程度として「霧が濃いね」という表現を定量化したものである。

また、気象学では、大気は太陽光に対して透明、地球放射に対して不透明とする説明が見られる。「大気は地球放射に対して不透明」は、「大気は光学的に1よりも厚い」

とも表現される。

1.3 太陽放射と地球放射

太陽からやってくる放射(太陽放射)と大気-地表面系が出す放射(地球放射)について簡単にまとめる。

太陽放射エネルギーの99%以上は、可視光(波長約 $0.4\mu\text{m}$ から $0.7\mu\text{m}$)を含む波長が $0.1\sim 4\mu\text{m}$ にわたる波長域にあり、太陽放射または日射と呼ばれる。その一方、地表と大気が放射するエネルギーのうち99%以上は波長が $4\sim 100\mu\text{m}$ にわたる波長にあり、地球放射または赤外放射と呼ばれる(図 1-3)。両者の波長域が分かれているのは、放射源の温度が大きく異なる(太陽が約 6000K に対して、地球および大気は $250\sim 300\text{K}$)ことに起因する。大気科学(気象学)の分野では、前者を短波放射、後者を長波放射と呼んできたが、他の分野では使われないことがないため、本論文では用いないことにする。

太陽放射のうち、紫外線は成層圏のオゾン等でほとんど吸収される。可視光の多くは、雲が無い場合は大気を透過するが、雲があれば遮断される(一部は反射され、白

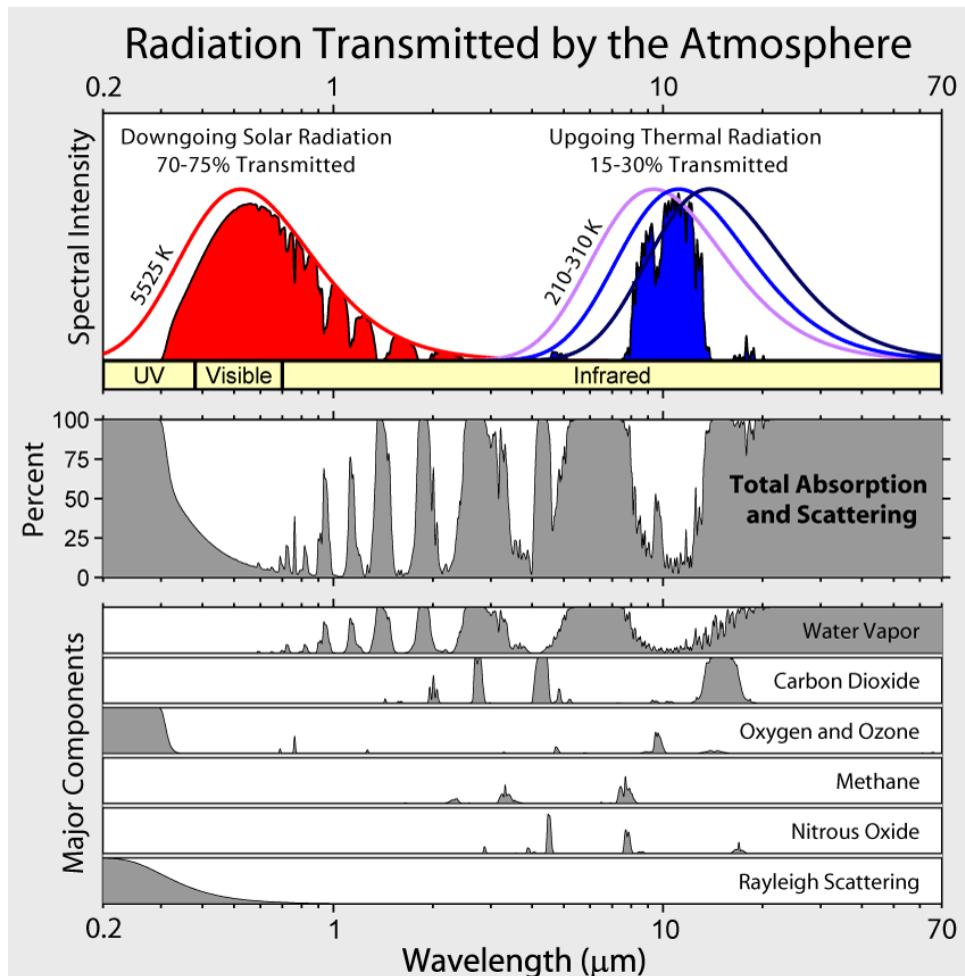


図 1-3 大気通過後の放射スペクトル(Wikipedia web ページ)

雲と認識され、ほとんど遮断されたように見える雲は黒雲として認識される)。これは、快晴の日と雨の日の明るさの違いとして感じられること(写真を撮る際、注意して絞りを見ている人ならば、雨の日では1/8ぐらいになっていることに気がつく)。また、青空は、太陽放射の直接光が、大気によって比較的青い光が散乱されて、太陽以外の方向から届く現象であり、透過した比較的赤い日射が遠くまで届いたときに見られるのが夕日となる現象である。これらは、レイリー散乱と呼ばれる。なお、ミュー散乱は、前方もしくは後方に強く散乱される方向依存性を持つが、波長依存性を持たない。そのため、太陽付近、あるいは太陽から反対側の空が明るく、太陽と直角方向の空が相対的に暗くなる。また、物理現象としては、暗い部屋に光が差し込むと光の筋が見えるのは、ハウスダストによって反射されるチンダル現象として知られている。

その結果、太陽光は地表面に到達し、多くは地表に吸収され、一部は反射され、大気を通過して地球外に放出される(地球の外から最初に見た人類ガガーリンが「地球が青かった」のように観測される)。反射率が高いのは砂漠などの裸地面や海氷などであり、その一方、低いのはプランクトンがない海である(そのため、本州の沖合に出ると真っ黒な海になるので、黒潮と呼ばれ、陸域からの河川で運ばれた粒子やプランクトンが多い河口付近の海は比較的エメラルド色に近くなる)。

結果として、地球に到達した太陽放射の約 3 割は反射され、約 2 割は大気中で吸収され、地表に届くのは約半分である。

地球外に射出される地球放射は大気や地表で吸収された太陽放射と釣り合う量として、地球に到達した太陽放射の7割であり、255[K]の黒体放射で近似される 15 [μ m]を中心とした 5 [μ m]~100 [μ m]の領域の赤外線として、射出される。地球外に射出される地球放射の多くは、大気中から射出され、地表からはごくわずかに射出される(地球放射の約 1 割である)。なお、この地表から直接放出されるものは、特定の赤外線の波長であり、大気の窓と呼ばれることもある(リモートセンシングでは、赤外線で地表面の様子を知りたい場合には大気の窓を用いる)。

地表で吸収されたエネルギーが最終的に地球外に射出される地球放射となるまでの過程が、まさに気象現象である。地表面から大気への熱輸送の約 6 割は、対流によるものである。地表の暖かい空気が上空で冷やされて、雲を作り、雨を降らせる過程で行われる。象徴的なのは、地表の水分が水蒸気となる時(液相から気相への相変化)、上空で水蒸気から雲粒になるとき(その逆の相変化)を通じて、熱を運ぶ(同 4 割)。これは潜熱と呼ばれる。暖かい空気自身が冷やされていくのは、同 2 割であり、顕熱と呼ばれる。これが大規模に行われるのが、低緯度のハドレー循環である。低緯度で海を吹き渡る貿易風により、海水が蒸発し、南北 10 度付近の熱帯収束帯付近で、上昇気流を作り、積乱雲により、熱帯性スコールを降らす。降らした後の空気は乾燥し、やがて、亜熱帯の上空で冷やされ(すなわち地球放射として地球外に射出し)、重くなった空気は下降し、亜熱帯高気圧として、砂漠などを作り出す。

地表面から大気への熱輸送の約 4 割は、(黒体放射のように)地表から射出される赤外線が(計算値としては地球に届く太陽放射よりも大きい)、(黒体放射のように)大気から射出される赤外線によりかなり相殺され、運ばれるものである。

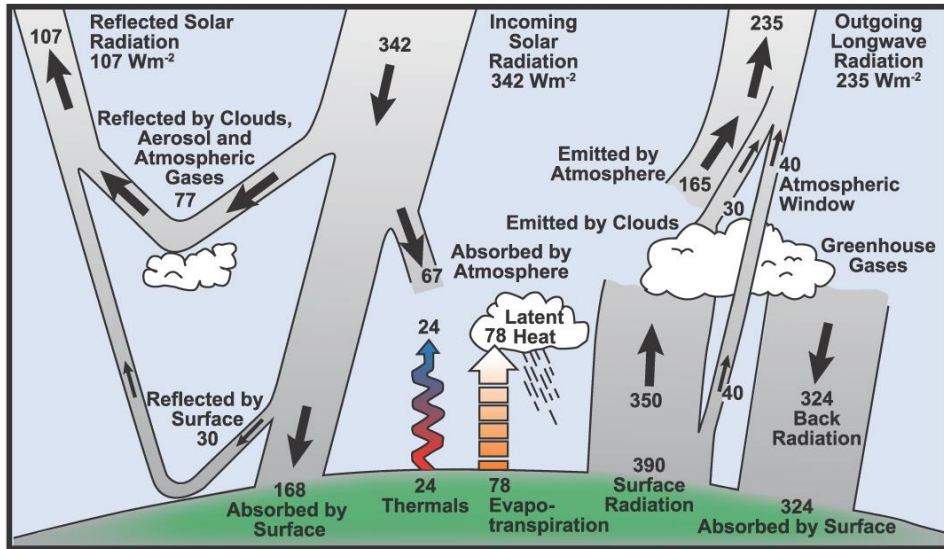


図 1-4 Estimate of the Earth's annual and global mean energy balance(IPCC AR5 FAQ)

図 1-4 は、地球の温室効果を簡単に説明する模式図として広く用いられている。ここで、地球に吸収される太陽放射を 1 としており、地表と大気との熱のやりとりも、赤外線だけにしている。地表から射出された赤外線は全て大気に吸収される様子から、「大気は赤外線に対する光学的厚さは十分に大きい」といわれることや、地球外に直接放出されるのは、大気(255K に相当するのは対流圏上部高さ 6~8km 程度)からであるということが分かる。

1.4 物質による赤外吸収

水蒸気を除いた空気は、主成分である窒素分子(N₂:体積比率で 78.1%)、酸素分子(O₂:同 20.9%)、およびアルゴン(Ar:同 0.9%)によって全体積の約 99.96%が占められている。これらは対流圏・成層圏・中間圏までよく混合している。残りの 0.04%未満の体積に二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、一酸化二窒素(N₂O)などの微量気体が含まれる。水蒸気は、気象学では、比湿という空気(1kg)に含まれる量(g)で表されることが多い。比湿は、地表近くでは極域の極低温から熱帯の高温まで 1~20[g/kg]程度であるが、大気下層に集中するので、高度 850 [hPa](約 1.5km)ぐらいで半減する。大まかには、下層の層厚 150 [hPa]と比湿の値 5 [g/kg]として、水と空気の分子量 18 と 29

から、 $(1000-850)/100 \times (5/18)/(1000/29)=0.12\%$ 程度なので、アルゴンに次いで多い成分とも言える。

大気の主成分である N_2 および Ar は、太陽放射や地球放射に対して不活性である(但し、温室効果ガスに対する分子衝突効果としては影響を与える)。他方、 H_2O および CO_2 や CH_4 、 N_2O などの微量気体は、含有量はごくわずかであるが、放射の吸収・射出に主要な働きをしており、地球の「温室効果」を担っており、「温室効果ガス」と呼ばれる。

気体の種類によって、赤外線吸収の有無や度合いは異なる。これらの気体は、量子力学で説明される特定の波長帯の赤外線を吸収するため、その波長帯は吸収帯と呼ばれる。詳細は補遺 A で説明する。分子としては、特定の波長の赤外線を吸収するが、分子が活発に移動していること(すなわち圧力をもつ)により、その周辺の波長でも、正規分布のような吸収量の形で赤外線を吸収する(ドップラー効果)。また、吸収の際に、大気主成分の N_2 等との分子衝突効果もある。そのため、気体の濃度が十分に低い場合や、気体を透過する光路長が十分に短い場合には、気体の濃度とともに赤外線の吸収量が増加するが、ある濃度や光路長になると、特定の波長は全て吸収され、それらが増加すると周辺の波長のみの吸収が起こるようになる(図 1-3)。従って、温室効果ガス濃度と赤外線吸収量は、単純な比例関係ではなく、低濃度では比例する直線関係となるが、ある濃度付近以上では(低濃度のような)吸収量増加が見られない、すなわち飽和していく曲線関係となる。この様子を、「吸収量は飽和する」といった言い方がよく用いられる。

大気中で、最も温室効果が大きいのは水蒸気 H_2O である。地表から射出された赤外線は、 $5-8 [\mu m]$ や $20 [\mu m]$ 以上の広範囲な波長帯でほぼ全て吸収されている。二酸化炭素 CO_2 は、最も強い地球放射の波長帯である $15 [\mu m]$ 付近($12-18 [\mu m]$)を吸収しており、水蒸気に次ぐ広範囲な波長帯で吸収を起こしている。なお、 $4.3 [\mu m]$ 付近の波長帯は、その波長帯での地球放射は弱くなるので、 $15 [\mu m]$ の吸収帯に比べて、弱い効果となる。なお、本実験で扱う $900^\circ C$ の光源では、最も強い効果を持つ(詳細は第2章で説明)。水蒸気や二酸化炭素の吸収が弱い $8-12 [\mu m]$ 帯の赤外線が大気にさほど吸収されないことを利用して、地表の様子を知る衛星リモートセンシングのセンサーが利用する波長として用いられる。そのことから大気の窓と呼ばれる。なお、この窓の波長領域にオゾン O_3 の $9.6 [\mu m]$ の吸収帯があることが知られている。以上の大気中の温室効果ガスの影響は、衛星リモートセンシングの各波長の放射輝度に相当する国際放射温度との関係で理解できる(図 1-4)。例えば、 CO_2 の $15 [\mu m]$ の吸

収帯では、220 [K]となっていることは、地表の 320 [K]との差を乾燥気温減率 11 [K/km]で割ると、高度 9 [km]付近からの赤外線が地球外に射出されている一方、大気の窓の 11 [μm]では、320 [K]程度の灼熱のサハラ砂漠から射出されている様子が読み取れる。

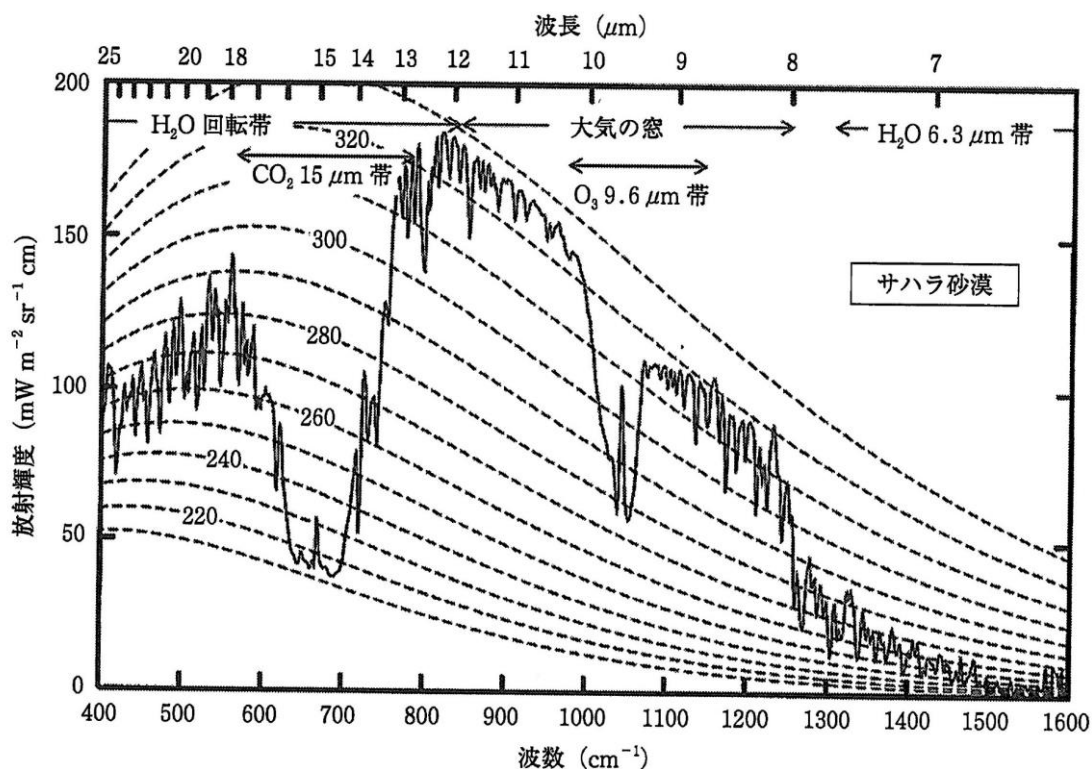


図 1-5 サハラ砂漠上空で Nimbus-4 衛星搭載の赤外干渉分光放射計 IRIS で測定された地球放射の中分解能スペクトル(浅野正二,2010: Petty, 20004, Fig.8.3a を一部改変)

メタン CH_4 も、大気中濃度は微妙ながら、7.6 [μm]付近の吸収帯が地球温暖化に影響を与えている重要な温室効果ガスである。その他として、一酸化二窒素 N_2O や一酸化炭素 CO なども影響を与える。なお、これらは、 CH_4 が酸化されて CO_2 になるなど、大気中の光化学反応で分子が変化するので、長時間にわたる温室効果に対する影響は複雑なものとなる。温室効果ガスの瞬間的な温室効果は、放射強制力という形で表現され、長期的には大気中に残る時間(life time)を考慮して、地球温暖化係数(Global Warming Potential, GWP)という形で表現される。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の評価書やパリ協定での温室効果ガス削減量の議論の際には、二酸化

炭素以外の温室効果ガスについて地球温暖化係数を用いて換算することが行われている。すなわち、注目する温室効果ガス濃度から、同じ地球温暖化係数になる二酸化炭素濃度にして表現する。例えば、メタンなどでも、相当濃度として、CO₂-eq ppm (eq は等価 equivalent の略)が用いられる。

このように、「温室効果ガスによる赤外線吸収」と一口で言っても、それぞれの温室効果ガスの吸収波長帯と(温度による黒体放射と決まる)光源から射出された波長毎の強度を注目した考察が不可欠となる。なお、1.6 で紹介する先行研究では、波長毎の特性を考慮していないものが多い。

1.5 教材開発に関する先行研究

教材開発に関する先行研究は、それぞれの学問分野に対する教育の中で、紹介されている。ここでは、本研究に関わりが深い、2020年に発行された学術誌「物理教育」と「工学教育」を取りあげ、どのような教材開発や学習プログラム開発がされているかを俯瞰する。学術誌「物理教育」は日本物理教育学会が年4回発行しており、2020年、査読付き論文14本(研究論文1本、研究報告5本、論説2本、研究短報3本、私の工夫・私の実践3本)が掲載されている。学術誌「工学教育」は、公益社団法人日本工学教育協会が年6回発行しており、2020年、論文が51本および事例紹介34本が査読付き論文として掲載されている。これらのうち、教材開発とその教材を使用した学習プログラムに関するものは計39本であり、大学生から小学生までを対象としている(大学生12本、高校生・大学生・高専生12本、高校生5本、中学生・高校生2本、中学生1本、中学生・小学生1本、小学生1本、特定なし5本)。

大学生を対象とした教材開発では、中釜(2020)は大学の分析化学において、物質移動と物質収支を視覚化した段理論学習用簡易シミュレーション教材の試作を行った。土居ほか(2020)は、IoT(Internet of Things)セキュリティに関する実験教材の開発を行った。情報科学・工学系3年生に対し、実験計画の策定、テキスト資料、脆弱性の埋め込まれたアプリケーション群を製作し実験を実施した。土江田ほか(2020)は実施したロボットプログラミング講座の実習内容と実習報告書や成果物などから、学生の理解度を評価し次年度に向けた実習構成について述べた。

高等専門学校生もしくは、大学生や高校生を対象とした教材開発において、光本(2020)は、高等専門学校において電気回路既受講学生に対してフェーザ軌跡に対するアンケート調査を行うとともに、学生アンケート回答要求に従ってフェーザ軌跡に関する描画ソフトウェアを作成し、さらに描画ソフトウェアを実演してアンケート調査を

行うとともに、描画ソフトウェア実演の有無と学生の理解度の関係について調査結果を報告した。早稲田ほか(2020)はペーパークラフト風力タービンと風力タービン解析ソフトウェアを用いて、現代の機械系の研究・開発プロセスにおいて主流であるデジタルとアナログの両方を用いるプロセスを模した体験をさせることで、導入教育期間において学習の動機付けとなるような「機械系エンジニアリング」や「高専のカリキュラム体形」のイメージをもたせることが可能な教材を開発し実践した。秋元ほか(2020)は電気工学の導入教育教材として全国高専に普及させるための教材を開発した。電気工学を専門としない教員においても実施可能な教材の紹介と実践結果について示した。辻ほか(2020)はオルゴールを題材とした教育教材の開発について、実施した実習の取り組みを紹介した。アンケート結果を踏まえ、実習の評価及び教育効果を明らかにした。安達(2020)はスマートフォンに接続した超音波センサーを用いた鉄道模型の運動の測定をした。瀧本(2020)はオンラインツールを用いた実験データのリアルタイム共有方法を、実際の実践結果に基づいて紹介した。

高校生を対象とした教材開発において、岡野ほか(2020)は黒鉛シートを金属空気電池の正極材料とした教材を用いて、高専低学年(高校生相当)の化学実験について教育効果を報告し、理科教材として検討した。小林ほか(2020)は理科の有用感を増す可能性のある教材として、高校物理のための人工衛星電波受信実験の教材化と実践を行った。受信実験の中では万有引力による運動やドップラー効果など高校物理で学ぶ多くの内容がわかりやすい形で現れ、物理と数学と科学技術との繋がりを実感できるとしている。

中学生、もしくは中学生と高校生を対象とした教材開発では、小林ほか(2020)は中高生向けの出前授業活動において、原子核や同位体についての理解を助ける模型の開発と教育実践を行った。猪本ほか(2020)はゲル抵抗器を用いて中学校理科のうち電流とイオンの概念を結び付けることで、電流についての理解を促す演習実験教材を開発した。

小学生、もしくは小学生と中学生を対象とした教材開発では、土江田ほか(2020)は教育用レゴマインドストーム NXT を使用した小中学生向けロボットプログラミング講座の改善と実践について報告した。東爪ほか(2020)は水の冷え方を可視化する教具の開発をし、水の冷え方を学習することによる教育効果の検証を行った。

対象を限定しない教材開発において、木村(2020)はフィジカルプログラミング用教材として新たに試作した電子楽器「フォトミン」について報告している。岩見(2020)は、科学館等の教育展示施設で稼働している、大型拡散霧箱で見られる飛跡の定量的な

知見を得ることを目的として、飛跡位置の3次元計測をステレオカメラにより行った。寺嶋(2020)ほかは火星の青い夕焼けを再現するための教材を、ミリカンの油滴実験に用いられるラテックス液を水に加え、水分を全て蒸発させることで作製した。田口(2020)は手回し発電機の出力電流をより簡単に測定するための方法について検討した。木村ほか(2020)はこれまで教材用電子楽器として開発してきた各タイプ、バージョンの「フォトミン」について説明し、様々な対象者に向けて参加者に応じた講座の実施内容について紹介し、その啓発活動としての効果について論じた。

また、教材開発のみに注目というより、特定の教材を使用した学習プログラム全般に関するものとして、大学生を対象としたものは、次の通りである。松本ほか(2020)はピア・インストラクションで扱われる **Concept Test** の回答傾向と、力学概念指標 **FCI** との関連性を、ロジスティック回帰を使って分析して、形性的評価としての学生の保持する誤概念を診断できるツールを作成した。小林(2020)が大学の材料力学の授業改善を行い、生涯学習能力の一つと考える問題解決能力の育成を扱った。間田(2020)は大学1年生の線形代数学における事前動画学習の効果および関心を持たれるための要因の調査を行い、教育効果を検証した。保田(2020)は大学機械工学科の主要科目である初等流体力学の授業を好きになってもらうことを目的に、放送映像を多用して授業を展開した事例を紹介した。片山ほか(2020)は大人数授業で展開される工学基礎教育におけるアクティブラーニングの導入として、ジグソー法を用いた授業デザインを実施し、その導入効果について質問紙、成績推移、インタビューを用いて様々な視点から検証した。土肥ほか(2020)は大学選択科目「コンピュータ基礎Ⅱ」において、**Learning Management System** が与えるモチベーションへの影響を分析し、特にモチベーションの推移が高い受講者に顕著に現れることを示した。坂井ほか(2020)は機械工学科4年生に開講した **PBL (Project Based Learning)** 教育に問題発見・解決要素やデザイン思考を組込み、製作の前段階である開発の部分に着目し、4つの特徴を取り入れることで開発の流れを繰り返し学習できる科目の実施・検討を行った。栗島ほか(2020)は大学にて数学の題材「果樹園問題」に対し新たな課題考察及び、理解のために数学ソフトウェア **Mathematica** で作成した **ICT** 教材について論じた。問題の視覚的理解を誘導し、受講者が手を動かすことで主体的に考えることを目的として作られた動的教材を提案した後に、授業実践時の受講者アンケート結果について報告した。佐々木(2020)は大学におけるコミュニケーション心理演習を通じ、コミュニケーション能力育成の手立てとしてロールプレイングの教育的価値を提示した。

同様に、高等専門学校生もしくは、大学生や高校生を対象とした学習プログラムに

関するものとして、中谷ほか(2020)は機能やサイズを改善した新しいモデルの CubeSat を開発し、モデル CubeSat を用いたグループ形式の講座と競技を行い、人工衛星開発への興味をより高められる学習内容を目指した。市村(2020)は高専学内に点在する既存機器のネットワークによる見える化と IoT 関連工作機械から構成されるバーチャル工房を整備し、IoT をテーマとするプロジェクト型授業を実施し評価を得た。池田ほか(2020)は高専教育の一般科目における取り組みとして、首都東京におけるアクティブ・ラーニングを用いた「課題研究」の実践について報告した。藤田ほか(2020)は社会人向けに実施してきた講座を紹介し、その講座の内容から、学生の学習状況やカリキュラムに合わせた工夫を示し、工夫した内容で実施した結果を紹介した。また、得られた結果を元に、実施した教育を考察した。平野ほか(2020)は工業高等専門学校 of 電気情報工学科へ入学直後の1年生を対象とした授業の中で、Math Works 社が提供する Simlink とそのオプションライブラリ「Stateflow」を用いてプログラミング導入教育を実施した内容、および、その効果とメリットについて報告した。坂本ほか(2020)は「高専スペースアカデミア」の講座の一つである「缶サミット講座 2019」の実施結果と、オンラインモノづくり講座としての評価、および課題について報告した。

高校生以下を対象にした学習プログラムにおいて、加賀ほか(2020)はチュートリアルワークシートを用いた授業を高校1年生の通常の授業時間に2時間だけ導入し、その授業効果を調べた。北村ほか(2020)は初学者の「作用・反作用の法則」の概念理解を目指し、米国物理教育研究で開発された Interactive Lecture Demonstrations の「ニュートンの第三法則」のユニットを組み込んだ、帰納法的推論を中心に据えた教授方略を考案した。庄司ほか(2020)は社会実装教育に SDGsの観点を盛り込むことで得られる教育効果、高専における社会実装教育、社会実装例の SDGsの観点による整理ならびに実例の紹介を行った。坂本ほか(2020)は高校生向けの高専スペースキャンプ 2019 において、新しく開発したミッション立案型のモデル CubeSat を利用した競技を実施し、その内容や設計、参加学生の取組結果などについて報告した。

1.6 既存の温室効果を理解する教材の課題

1.5 で見てきたように、1年間だけでも、数多くの教材開発がされている。しかし、地球温暖化や気体の温室効果に関する教材開発の先行研究は、数えるほどしかない。これらの多くは、赤外光線ランプを使用して、容器内に入れた気体の温度変化を測定している(川村康文 2003; 同 2004; 中山慎也ほか 2008; 沼田天ほか 2010; 川村康文, 田代佑太 2011; 芹澤嘉彦, 奥沢誠 2013)。

赤外光源に関する問題として、その光源温度と射出している波長に関する記載がほぼない。川村康文(2003, 2004)が用いた 4700K の光源の最大波長は 0.62 μm で光源から射出しているのは、紫外線、可視光線及び近赤外線である。また中山慎也ほか(2008)が用いた赤外電球は 2000K 程度と考えられ、その場合の光源の最大波長は 1.2 μm であり、川村同様二酸化炭素の主な吸収帯の遠赤外領域ではない(図 1-7)。川村(2011)ではポリスチレン容器の代わりに、ガラス容器には 2 μm の吸収帯を確認したとも記述されている。2 μm の波長の光は、赤外線(近赤外)であり、太陽放射の強度はあるが地球放射の強度はほとんどがない。川村康文(2003, 2004)や中山慎也ほか(2008)が用いている光源を用いて近赤外の吸収を扱う実験を、遠赤外である地球放射の吸収の実験としてよいか議論の余地がある。

川村康文(2004)では、「ポリスチレンによる吸収帯が多数存在し観測しにくい」(川村 2004)に記述されているように、二酸化炭素は吸収帯で吸収しているよりも、容器が多くの吸収帯で吸収している量の方がはるかに大きい。論文に記述されている素材としては、ポリスチレン製(川村康文 2003, 2004; 川村康文, 田代佑太, 2011)、アクリル製(中山慎也ほか 2008)、ポリエチレンテレフタレート製(ペットボトル)(沼田天ほか 2010)である。これらの素材を用いた容器では、容器の厚さにもよるが、正面から入射した赤外線の一部は透過するものの、容器の素材自身もかなり吸収している。そのような状況で、空気と二酸化炭素を入れ替えて、気温上昇の違いを見つけることはかなり難しいと想像される。

実際に、容器内に乾燥空気を封入した場合でも、二酸化炭素を封入した場合と同様に大きな温度上昇が見られる。先行研究では、乾燥空気と二酸化炭素の温室効果ガスのそれぞれを封入した実験において定常状態まで計測すると、大まかに言って、これらの温度上昇に比べて 1/10 程度の温度差が生じており、これを温室効果ガスが赤外線を吸収した効果と見なしている。仮に、上記の吸収帯による吸収量の議論に基づけば、近赤外線の吸収によるものだとすれば、そのような温度差が生じるとは考えにくい。また、容器自身が赤外線を吸収しているならば、容器の光源側とその反対側では、容器自身に大きな温度差を生じているはずであり、一点地点での計測で全体を把握できるとは思えない。

川村康文(2004)を除いた先行研究では、光源から発せられた幅広い波長分布を持つ赤外線(近赤外線)のうち、温室効果ガスの特定の吸収帯におけるごく一部の波長域のみで吸収が起こっていることについて、全く記述されていない。

これまで、先行研究には以上のような疑問を生じるが、きちんと議論するためには、追試等を行う必要があるだろう。

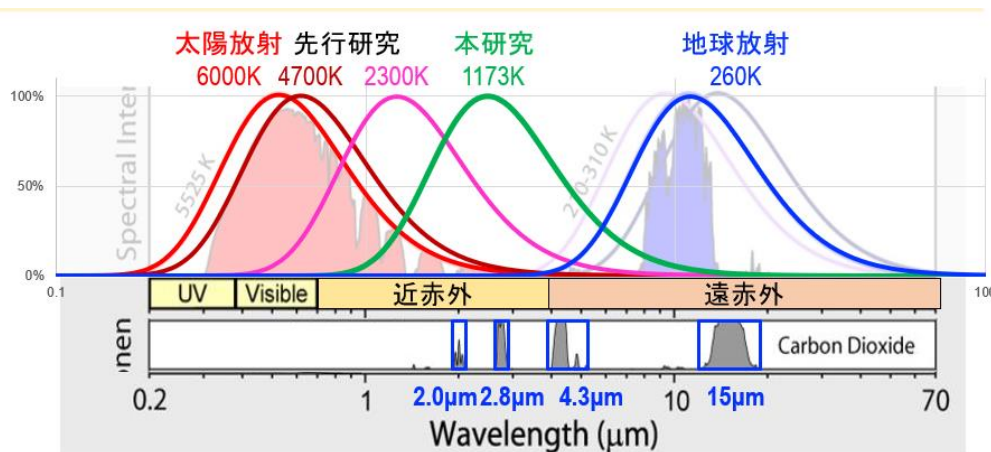
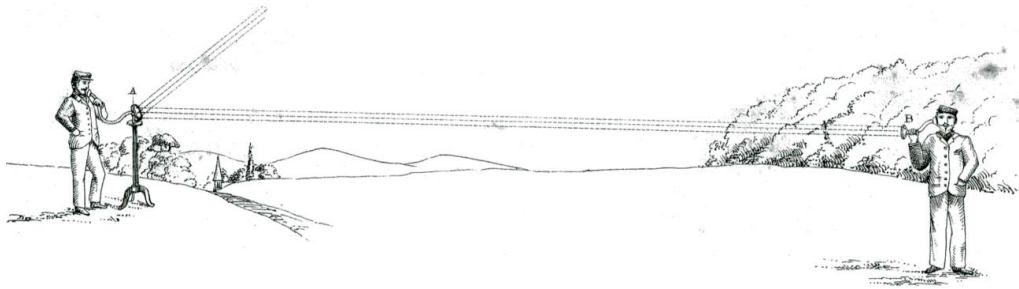


図 1-7 光源温度と射出波長

1.7 光音響効果について

光音響効果とは、封入された気体が、時間変動する強度をもつ光を吸収するとき、その圧力も時間変動するため、音波として検出できる現象である。なお、気体の加熱は光強度に合わせて時間変動するが、気体の冷却は容器を通じて時間的にほぼ一定に起こるため、長時間平均としては光の加熱と容器の冷却が釣り合うが、時間変動が起こる時間スケールでは圧力の時間変動が起こる。これについては、Fukuhara et al. (2012)で定式化により説明されている。この光音響効果は、1880 年代、グラハム・ベルによって発見された。(図 1-8)

本研究で用いる光音響効果実験装置は、Kaneko et al. (2010)によって開発された。実験装置は、赤外光源とチョッパーによって赤外線の間断光を作る部分、赤外線を入射・透過させる温室効果気体を封入する気体セルの部分、気体セル内の圧力変化をマイクにより音響信号として検出し、オシロスコープで表示させる部分からなる。



左: 音声によって振動する鏡に、太陽光が反射

右: 強度が変化する光を、光音響効果で音に変換

図 1-8 光音響効果の実験(Bell(1880)より)

Kaneko et al. (2010) は、気体の種類・濃度・断続光の周波数を変えていくつかの実験を行っている。①一定の強度をもつ断続光の周波数を 53, 100, 200Hz に変えた実験では、周波数が大きくなるとともに音響信号は小さくなる。②温室効果ガス(CO₂, CH₄, HFC-152)とそうでないガス(N₂)を封入して、後者には音響信号がないことを確かめる実験。③2 種類の気体(メタンと二酸化炭素)の濃度 0.1%~10%を変えた実験では、濃度が高くなるとともに音響信号は大きくなる。濃度に対する増加傾向はメタン 2%、二酸化炭素 0.5%以上で弱まることにより、赤外線吸収が飽和する様子が分かるようにした。また水蒸気については、水に通した窒素を用いて 0.2%以上の濃度で音響信号の検出が可能としている。

高校生に実施した授業では、④音響波の周期は断続光の周期と一致することを確認し、⑤通常用いる赤外線光源の他に、LED と蛍光チューブに光源を変えて、それらでは音響信号がないことを確かめた実験により、赤外線を出す光源が必要なことを確かめている。⑥二酸化炭素(主な吸収波長 4.2~4.5 μm)と HFC-152a(同 6.7~12.5 μm)の気体を封入させた検出器を用意し、赤外線がサファイヤ(5.6 μm以上の波長を吸収)を透過した実験では、後者の気体では音響信号が大きく減少する。これにより、気体毎に特有の吸収波長をもつ様子が分かるようにした。⑦マイクロフォンの出力をスピーカーに接続することで、音響信号を音として検出することができる。気体の赤外吸収率が音の大きさに反映されるので、デモンストレーションとしても効果的である。これらの実験により、Kaneko et al. (2010) は、この装置の基本的特性を明らかにした。

Fukuhara et al. (2012) は大学生が知っている CR 回路(図 1-8)の電流の式との相似を利用して、熱収支の方程式を解くことで、光音響効果実験装置の音響信号が検出できることを説明している。

1.8 本研究の目的

Kaneko et al.(2010)や Fukuhara et al.(2012)により、気体セルに封入された気体の赤外線吸収に対する基本的特性は明らかになっている。

本学位論文では、これらで開発された光音響効果の実験装置をもとに、赤外線が透過する様子を、気体セルにおける入射量・吸収量・透過量に関するエネルギー収支を考察することで理解し、また、その光学的厚さをカバーガラスの枚数相当に換算することにより、高校生や大学生が理解できる教材を開発する。

第2章では、気体セルを縦列配置させ、2つの気体セルを縦列配置し、それぞれの吸収量を用いて、エネルギー収支から入射量や透過量を見積もることを試みる。このとき、同一ガスを2つの気体セルに封入すれば、その気体の吸収帯におけるエネルギー収支を考えることができる。そのため、多くの先行研究で温度上昇を図っているときのような、封入した容器が(CO₂の吸収帯ではない)多くの吸収帯で赤外線を吸収する状況を回避できる。さらに、高校生や大学生に、吸収率から(気象学等で用いられる)光学的厚さを表す際に、徐々に赤外線を吸収するカバーガラスの枚数で光学的厚さを理解してもらおう。また、光学的厚さの概念を知れば、Kaneko et al.(2010)によって指摘されていた封入するCO₂が高濃度になると音響信号に比例しないことも、高校生や大学生でも理解できることも示す。

第3章では、教材開発した装置を更にどのように使うことができるか、その展望について議論する。その展望を議論する際に、大学生3年生向けに行った授業に用いた配付資料や実験結果を可視化するためのエクセルシート(補遺 B)や、可視光での光学的厚さを理解するパーツ(補遺 C)を用いる。

第2章 光音響効果を用いた実験 教材の開発～縦列配置によるエネ ルギー収支の考察～

2.1 はじめに

光音響効果とは、時間変動する光エネルギーが物質に吸収され、同一周波数の音波として捉えられる現象である(Bell, 1880)。この効果を利用した赤外線吸収を学ぶ教材は、赤外線の光源、断続光を作るチョッパー、温室効果ガスを封入した気体セルから成り、気体セル内の圧力変化が、マイクロフォンを通して音響信号として検出される(Kaneko et al.,2010)。これまで、温室効果ガスの種類や濃度を変えた相対的な吸収量を音響信号として計測できること(Fukuhara et al.,2012)、計測できる原理を高校生で学ぶ CR 回路を用いて理解できること(Fukuhara et al.,2012; 小川ら,2014)、が示されている。本研究では、それらの発展として、縦列配置した気体セルの音響信号より、エネルギー収支に基づく入射量と透過量を推定できること、光学的厚さの概念で温室効果ガスの吸収量を理解できることを示した。さらに、誰でも温室効果ガスによる吸収量を音響信号として直感的に確認できるが、温室効果ガスの波長毎の吸光度を学んだ者でも、フーリエ変換赤外分光計(FTIR)で計測した吸収帯別の透過率に基づいて、この教材における音響信号の強弱を定量的に確認できることも示した。また、教育実践を行い、学習者が理解できるかどうか確かめた。

大気上端における地球のエネルギー収支として、太陽から受ける可視光を主成分とする光エネルギーと地球外へ放出される赤外線を主成分とする光エネルギーは、長い目で見れば釣り合っている。後者の多くは大気から射出した赤外線であり、大気上層の温度が、黒体放射として受け取るエネルギーと釣り合う温度(-18℃)となる。結果として、地上気温はその温度よりも高くなるため、地球の温室効果と呼ばれている。温室効果ガスと呼ばれる水蒸気、二酸化炭素、メタン等は特定波長の赤外線を吸収する性質を持つ。そのために、地表から射出された赤外線の多くが大気に吸収される。端的に言えば、大気を構成する気体は、可視光に対しては透明である一方、赤外光に対しては半透明といえる。

気象学では、光がどのくらい透過するか(どのくらい吸収するか)を光学的厚さとして表現する(住, 1996)。すなわち、大気の光学的厚さは、太陽光に対して薄く、赤外線に対して厚いと表現される。ここで、光学的厚さ τ は、物体を透過する距離 x に対する光の強度 I の式 $I(x) = I_0 e^{-kx}$ (ここで I_0 は入射光、 k は吸収係数)により、 $\tau = kx$ と定義され、透過率 I/I_0 は $e^{-\tau}$ で与えられる。また、吸収係数が大きくなり、光学的厚さが厚くなれば、霧や霞が濃くなることと同じように理解される。本研究は、地球の温室効果を説明する際に用いられる、大気の入射・吸収・透過といったエネルギー収支に注目する。

赤外線に対して気体セルを縦列配置(タンデム)し、後方の気体セルを、前方の気体

セルを透過した赤外線の出射器として、それら気体セルのエネルギー収支を推定した。両気体セルに同一温室効果ガス(本研究では CO₂)を封入することで、その気体特有の吸収波長帯におけるエネルギー収支を考えることができる。また、同じ配置で、赤外線の一部を吸収するカバーガラスをフィルターとして用いてその枚数を変えることにより、前方のセルに封入された CO₂ の濃度による赤外線の吸収の割合を、光学的厚さを介して、カバーガラスの枚数相当に換算した。これらにより、高校生や大学生などの学習者が赤外線を吸収することで起こる温室効果をより理解できる教材・実験を用意し、教育実践により検証した。

2.2 赤外線の波長分布と CO₂ の吸収波長帯について

赤外線は、いくつかの CO₂ による吸収帯において吸収される(図 2-1a)。本実験装置の赤外光源(1173K)の黒体輻射分布は、大気(255K)のものと大きく異なる(図 2-1c)。そのため、大気から射出された赤外線を主に吸収するのは 15 μ m 付近(および 4.3 μ m 付近)の吸収帯である一方、赤外線光源から射出された赤外線を主に吸収するのは 4.3 μ m 付近の吸収帯(および他の吸収帯)である。後者に対する各吸収帯の寄与は、CO₂ 濃度 100%のとき、それぞれ 11.5%(15 μ m 付近)、59.4%(4.3 μ m 付近)、28.3%(2.7 μ m 付近)、0.8%(2.0 μ m 付近)となる。

後で述べる KBr の結晶(厚さ 2mm)における赤外線の透過率は、全波長で約 93% である(図 2-1b)。また、カバーガラス 1 枚をかざしたときの透過率は、0.1%(15 μ m 付近)、76.1%(4.3 μ m 付近)、87.1%(2.7 μ m 付近)、93.8%(2.0 μ m 付近)となる(図 2-1b)。すなわち、15 μ m 付近の赤外線はカバーガラス 1 枚目でほぼ吸収されてしまう一方、他の吸収帯の赤外線は、カバーガラス 2 枚目以降も赤外線の透過量は徐々に減少する。

なお、温室効果を理解する教材の多く(川村.,2004)では、本実験装置の温度(1173K)よりも高い温度(例えば 2400K)を持つ赤外線光源が用いられているため、近赤外域やそれに近い波長帯となる 2.7 μ m 付近や 2.0 μ m 付近の吸収帯における吸収を主に測っていたことになる。

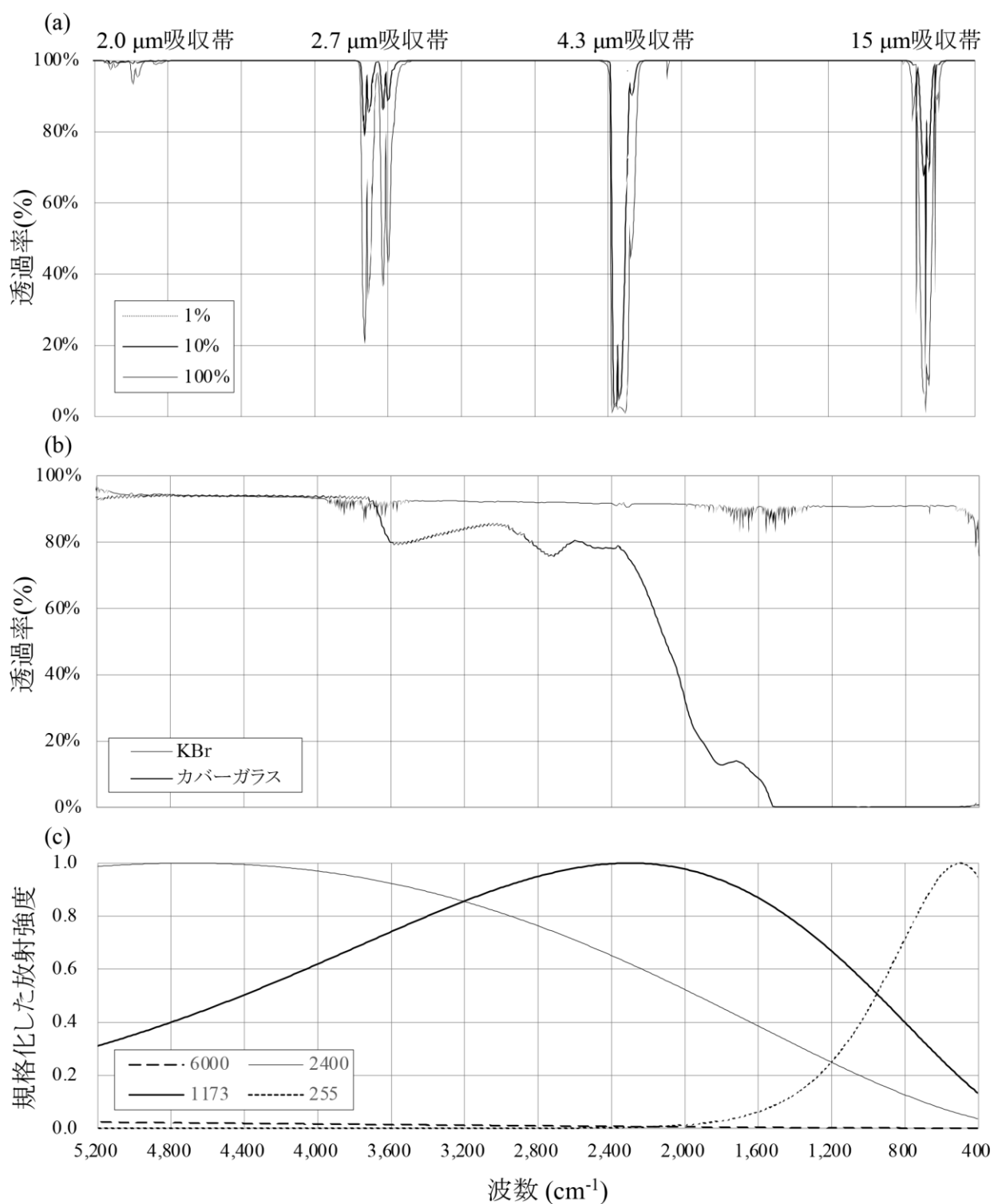


図 2-1: フーリエ変換赤外分光計(FTIR)で計測された(a) CO₂ 濃度 1, 10, 100 %における CO₂ の透過率(%)および(b) KBr とカバーガラスの透過率(%), (c)温度 6000, 2400, 1173, 255 K の光源における最大強度で規格化した黒体輻射の放射強度.

2.3 装置及び実験

2.3.1 装置

本研究で用いる装置2)は次のようなものである。光源(900 °Cの黒体放射相当)から出た赤外線は、4つの穴の開いた回転円盤(チョッパー)を通過して、赤外線パルス(50 Hz)となって、透過率の高いKBrの結晶をセルの窓に用いた円柱状の気体セルに入る(図1)。入射した赤外線パルスは気体により吸収され、セル内部の温度と圧力が時間変動する。それらの変動は、パルスと同一周期の音響波としてマイクで検出できる。感度を高めるために、セル長(光路長)を先行研究(Kaneko et al.,2010 ; Fukuhara et al.,2012 ;小川ら,2014)が用いた10 cmから3 cmに短くした(これについては4.1で議論する)。今回は、気体セルは縦列配置し、光源に近いほうから1段目、2段目と呼ぶことにする(図2-2)。なお、それぞれの気体セルにおいて音響信号の感度がほぼ同一であることは確かめられている(1段目の位置でCO₂濃度100%を充填させた同一条件で、それぞれのセルの音響信号が62.4 ± 2.3、64.1 ± 2.2 mV)。また、先行研究(Kaneko et al.,2010 ; Fukuhara et al.,2012 ;小川ら,2014)と同様に、ブランクとしてCO₂濃度0%のときの音響信号3 mVを実際の計測値から差し引いた。

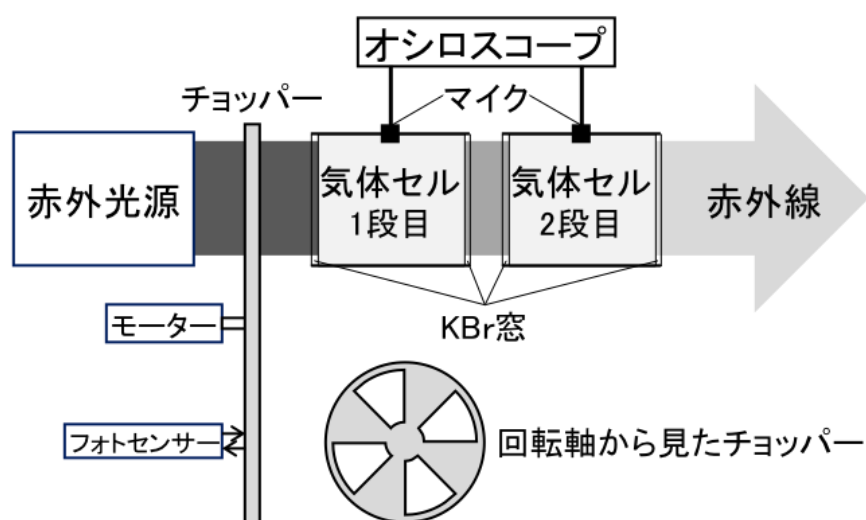


図 2-2: 2つの気体セルを縦列配置した装置

2.3.2 CO₂濃度実験

二酸化炭素濃度依存性を調べるために、1段目の気体セルのCO₂濃度(0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80, 100%)を変えた実験を行う(実験1~12)。2段目の気体セルのCO₂濃度を100%に固定して、検出器として、1段目から透過した赤外線をできるだけ

け吸収させる。音響信号の感度は気体セル毎に異なるため(59.8 ± 2.9 , 67.8 ± 2.8 mV)、2つの気体セルを1、2段目交替させ、CO₂濃度0%から100%までの実験セットを各5回行い、それらの平均値と標準偏差を得た。

シリンジに市販の気体缶からガスを直接注入することで、二酸化炭素と窒素を一定の体積比で混合させて、必要とするCO₂濃度を得た。例えば、気体缶のガス圧を利用して、CO₂気体を10 ml、N₂気体を90 ml 注入し、100 mlのシリンジのCO₂濃度を10%に調整する。その際、シリンジの目盛り間隔が1 mlであり、学習者が目盛りを読む際の個人差により濃度の精度は落ちる短所がある一方、気体缶からシリンジに気体を注入してからしばらく保持できるので、複数のシリンジに各濃度を準備してから実験できるという長所もある。実際のクラス授業では、学習者は、各自のペースで、班毎に配布された気体缶やシリンジを用いて、CO₂濃度を調整できる。

2.3.3 カバーグラス実験

カバーグラス実験では、1段目のセルの入射側にカバーグラス 1~10 枚を挿入し、透過する赤外線の数依存性を調べる。3.2の実験1に濃度条件を揃えて、1段目と2段目のセルのCO₂濃度は、それぞれ0%と100%とした。

ポリエチレンなどは赤外線を適度に吸収する素材であるが、市販の高分子フィルムの多くは、フィルムの厚みが赤外線の波長程度であるため、赤外線の干渉による干渉縞がしばしば強く現れる(赤外スペクトルにおけるベースラインが強く波打つ)。また、市販の板状高分子材は数ミリ厚であるために、赤外線をほぼ全て吸収してしまう。それに対して、カバーグラス(Micro Cover Glass Thickness No.1 武藤化学社製)は約0.16 mmと適度の厚さであり、枚数を重ねることで徐々に吸収の割合を増やしていくことができる。カバーグラスを小学校の理科実験で用いた経験がある学習者は多く、身近で取り扱いも容易なため、「枚数を増やしていくと、可視光も徐々に不透明に近づくものの、赤外線は速やかに不透明になる」という違いを簡単に体験できる。

2.4 CO₂濃度実験およびカバーグラス実験の結果

CO₂濃度実験では、1段目の音響信号はCO₂濃度とともに増加し、CO₂濃度10%以上では、その傾きが小さくなる(図2-3)。これは、図1(a)のように、全体の吸収量に大きく寄与する4.3 μm付近の吸収帯による吸収量はCO₂濃度10%以上になると飽和する一方、他の吸収帯によるものはCO₂濃度とともに大きくなるためである。その一方、2段目の音響信号はCO₂濃度とともに減少する。なお、図2-3では、音響信号の10回

の計測値を音響信号の誤差として示している。

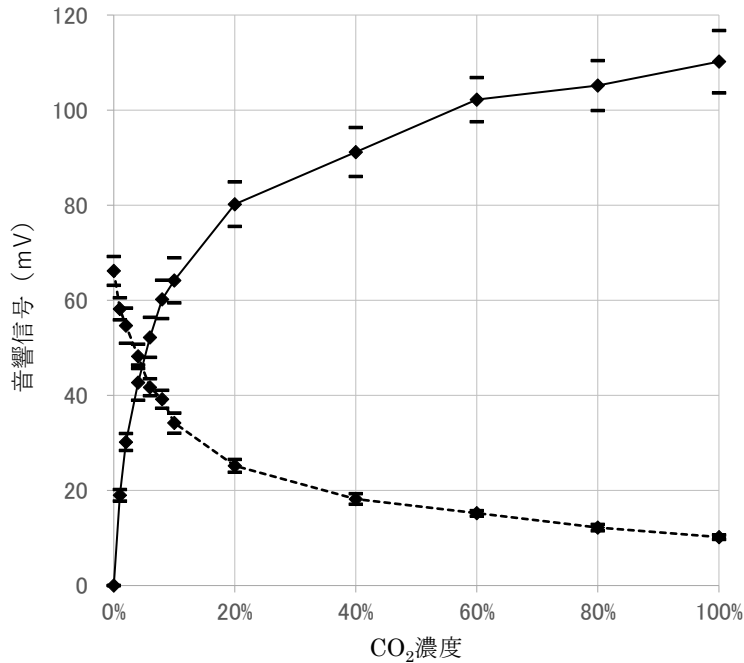


図 2-3:CO₂ 濃度と1段目(実線), 2 段目(破線)のセルの計測値.

CO₂ 濃度 20%から 100%に対して、音響信号は、1段目で 30 mV 増加、2 段目で 15 mV 減少というように、1段目と 2 段目における音響信号の和は一定ではない(表 2-1)。これは、入射量の一部しか音響信号で検出できないためである。

カバーグラス実験では、カバーグラスの枚数の増加とともに、2 段目のセルの音響信号が指数関数的に減少する(図 2-4)。カバーグラスの枚数(1~10 枚)に対する音響信号を近似する指数関数を最小二乗法で求めると、

$$y = 57.4e^{-0.24x},$$

となり、1 枚のカバーグラスは光学的厚さ $\tau = 0.24$ が得られる。ここで、 x はカバーグラスの枚数、 y は音響信号である($R^2 = 0.997$)。この近似式では、カバーグラスがないときは 57.4 mV となり、実測の 68.0 mV と大きくかけ離れ、2 枚目以降は、1 枚毎に 21.2%($= e^{-0.24}$)だけ減少する。

これらは、上で述べた、1 枚目で 15 μm を中心にした吸収帯の赤外線は全て吸収され、2 枚目以降は、4.3 μm 、2.7 μm および 2.0 μm の吸収帯の赤外線が 1 枚毎に 20.9% 減少する光学的特性による。

表 2-1: CO₂ 濃度と赤外吸収量実測値・理論値等

実験#	CO ₂ 濃度		実測値 (ゼロ補正済)		エネルギー 収支モデル			1 段目の吸 収率の換算	
	1 段目 (%)	2 段目 (%)	1 段目 (mV)	2 段目 (mV)	吸収率 r_1	2 段目 (mV)	透過 (mv)	光学的厚 さ τ	カバー ガラス(枚)
1	0	100	0.0±0.0	66.2±3.0	0.00	110.2	20.1	0.00	0.0
2	1	100	19.0±1.2	58.2±2.3	0.15	94.1	17.1	0.16	0.7
3	2	100	30.2±1.8	54.7±3.7	0.23	84.7	15.4	0.26	1.1
4	4	100	42.7±3.7	48.2±2.6	0.33	74.1	13.5	0.40	1.7
5	6	100	52.2±4.2	41.7±1.8	0.40	66.0	12.0	0.51	2.2
6	8	100	60.2±4.1	39.2±1.9	0.46	59.3	10.8	0.62	2.6
7	10	100	64.2±4.7	34.2±2.1	0.49	55.9	10.2	0.68	2.9
8	20	100	80.2±4.7	25.2±1.3	0.62	42.4	7.7	0.96	4.0
9	40	100	91.2±5.2	18.2±1.1	0.70	33.1	6.0	1.20	5.1
10	60	100	102.2±4.6	15.2±0.6	0.78	23.7	4.3	1.53	6.5
11	80	100	105.2±5.3	12.2±0.7	0.81	21.2	3.9	1.65	6.9
12	100	100	110.2±6.6	10.2±0.5	0.85	17.0	3.1	1.87	7.9

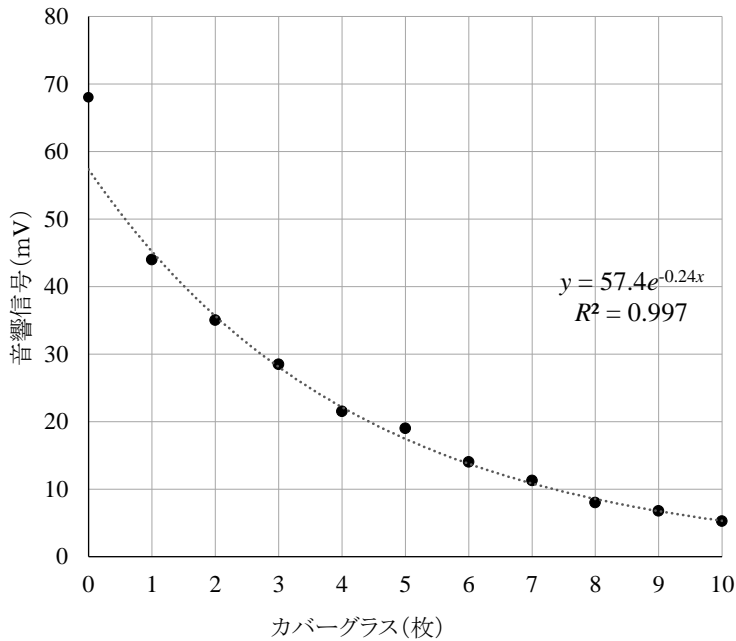


図 2-4: カバーガラス枚数に対する透過量

2.5 議論

2.5.1 CO₂濃度別のエネルギー収支

ここでは、エネルギー収支を考えることで、実験で得られた1段目と2段目の吸収量を用いて、直接得られない入射量や透過量を推定する(図 2-5)。各セルに対して、入射された赤外線の一部は、CO₂によって吸収され、その他は透過・散乱する。吸収量は音響信号に比例するものとして、その比例係数をCO₂濃度に依存する吸収率 r とする。この吸収率は、図 2-3 で見たような吸収帯毎の吸収量を合わせた結果として得られるものである。本来2段目の吸収係数 r_2 は、1段目の吸収係数 r_1 と同じ値を用いるべきである。2段目の音響信号は、1段目の気体セル通過後にKBrの結晶を2回通過するため、1段目の音響信号の0.86倍になることが期待される。しかし、実際には光源からの赤外線が均質な平行光になっていないことや1段目の装置の影響により、実験1の2段目の音響信号は、実験12の1段目の音響信号の0.60倍となっている。ここで、 $r_1 = sr_2$ のような経験的補正係数 s を導入すると、音響信号として計測できなかったものを含めて2段目の吸収量と見なし、簡単な定式化を行うことができる。上記の例では $s = 1/0.60$ となるが、今回、計測された吸収量と次に述べるエネルギー収支モデルか

ら推定される吸収量との差が、実験 1 から実験 12 までで合計が最小になるように s を決める。

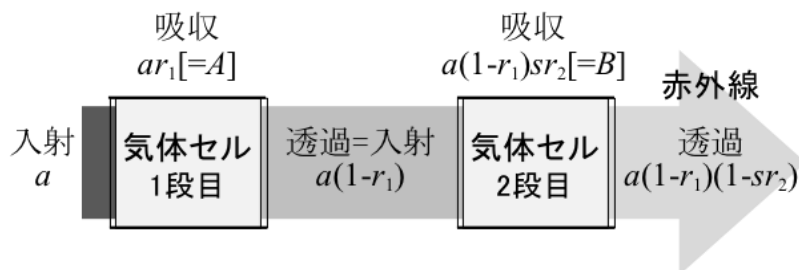


図 2-5: エネルギー収支モデル

1 段目と 2 段目のエネルギー収支(入射量=吸収量+透過)は、それぞれ、

$$a = ar_1 + a(1 - r_1),$$

$$a(1 - r_1) = a(1 - r_1)r_{100\%} + a(1 - r_1)(1 - r_{100\%})$$

となり、ここで a は入射量である(吸収量の音響信号から相対的に推定される値)。2 段目のセルは、検出器として CO_2 濃度を 100% に固定して用いる一方、1 段目のセルの CO_2 濃度を 0~100% に変化させ、各濃度($x\%$)に対する吸収率 $r_{x\%}$ を求める。実験 1(CO_2 濃度 0%)と実験 12(CO_2 濃度 100%)に注目すると、 a , $r_{100\%}$ を決めることができる。すなわち、実験 1(実験 12)に対して、1 段目のセル、2 段目のセルの吸収量 $A_{\#1}$, $B_{\#1}$ ($A_{\#12}$, $B_{\#12}$) は、それぞれ $A_{\#1} = 0$, $B_{\#1} = ar_{100\%}$ ($A_{\#12} = ar_{100\%}$, $B_{\#12} = a(1 - r_{100\%})r_{100\%}$) となるので、 $a = A_{\#12}/r_{100\%}$, $r_{100\%} = (B_{\#1} - B_{\#12})/B_{\#1}$ として求められる。実験 1 と実験 12 の計測結果から、 $a = 130.3$, $r_{100\%} = 0.85$ が得られる。なお、このモデルでは、 CO_2 濃度に依存する 1 段目の吸収係数 r_1 を通じて、 CO_2 濃度の変化に伴う 1 段目と 2 段目のエネルギー収支が決まる(図 2-6)。 $r_{100\%}$ は 2 段目の吸収量の比を用いて決まるため、2 段目の吸収量の補正係数が実験 1 と実験 12 で同じ値であれば、この補正は分母・分子で相殺される。

実験 1 から実験 12 までの CO_2 濃度に応じた 1 段目の吸収係数 r_1 は、1% のときは 0.15 となり、 CO_2 濃度が高くなるとともに大きくなり、 CO_2 濃度 60% 以降は約 0.8 となる。セル長 3cm に封入された CO_2 濃度に依存する吸収係数が得られたことから、それぞれの CO_2 濃度に応じた光学的厚さ $\tau_{x\%}$ を求めることができる(表 1)。 CO_2 濃度 10% のところで、吸収係数 $r_1 = 0.49$ 、光学的厚さ $\tau_{10\%@3cm} = 0.68$ となっており、入射量の半分

が吸収された結果、それ以上の CO₂ 濃度で吸収量が飽和していることとなる。これは、先行研究²⁾で 0.5%付近から飽和が始まると記述したことに対応している(CO₂ 濃度 1%のとき、表1から求めたセル長 10cm における光学的厚さは $\tau_{1\%@10cm} = 0.53$)。CO₂ 濃度 60%以上では、吸収量は一定に近づいてきているものの、光学的厚さ τ が 2 よりも小さく、入射量の約 2 割は透過していることが分かった。

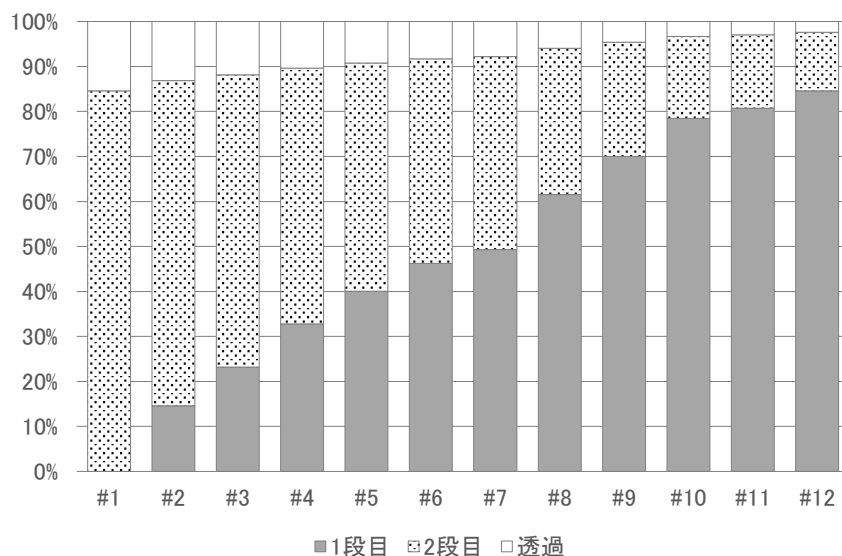


図 2-6-1 1 段目実測値から求めた 2 段目の吸収量と透過量.入射光 $a=130.3$ を 100%とした.

CO₂ 濃度 100%の吸収量は、セル長 3 cm では入射量の 85%、セル長 10cm では入射量のほぼ全て(99.8%)になる。音響信号は、圧力の変動幅によるため、同じエネルギーを吸収したとしてもセル内の体積に反比例する(Fukuhara et al.,2012)。そのため、セル長 10 cm の音響信号と比較して、セル長 3 cm の音響信号は 2.8 (= $0.85/1.00 \times 10.0 \text{ cm}/3.0 \text{ cm}$)倍となる。その一方、CO₂ 濃度 1%の吸収量は、セル長 3 cm では入射の 15%、セル長 10cm では入射量の 41%になり、セル長に応じて変化し、音響信号は 1.2 (= $0.15/0.41 \times 10.0 \text{ cm}/3.0 \text{ cm}$)倍となる。そのため、セル長を短くすることで、CO₂ 濃度が低いときの小さな音響信号を大きくすることは難しい。計測された吸収量と推定される吸収量との残差を最小とする経験的補正係数 $s = 1.60$ が得られたこと($R^2 = 0.99$, 図 2-7)から、検出器としての 2 段目の効率は、 $1/s =$

0.62倍と見なすことができる。実験 1 の2段目の吸収量と実験 12 の1段目の吸収量の比、0.60 に近い値が得られている。

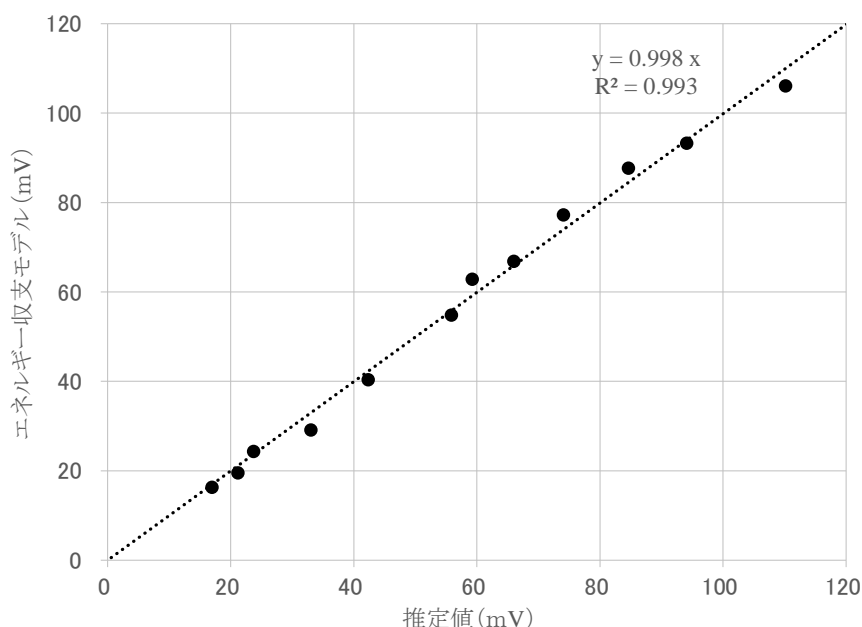


図 2-7:2 段目吸収量のモデル値と $s = 1.60$ を用いたとき推定値

2.6 本教材を用いた実習における学生評価

本教材を用いて、北海道科学大学工学部3年必修「都市環境実験」の10テーマの最初となる「気体の赤外吸収」として、受講生34名に対して、180分授業を実施した。なお、受講生にとって、大学入学後初めての実験科目を行う機会となった。学生には、実験結果や考察を記入できるA4サイズ4枚の配付資料や実験結果を可視化するためのエクセルシートを配布した。

まず、講師が、 CO_2 による赤外線吸収に関する原理や光音響効果についてパワーポイントを用いた説明を行い、装置の基本的なしくみと使い方を習熟する実験を行った。次に、受講生は各班約4名に分かれ、二酸化炭素濃度を変えて音響信号を計測する CO_2 濃度実験、および、カバーガラスの枚数を変えて音響信号を計測するカバーガラス実験を行い、班ごとに実験結果を共有しそれぞれ図にまとめ(図 2-3 および図

2-4 に相当)、考察を行った。その後、講師がこれらの実験の光学的厚さの説明を含めて意義づけを行った。最後に、理解に関する自己評価(5段階評価)や気づき(自由記述)を回答した。

学生は、エネルギー収支について理解していることが、考察から確認できた。学生からの回答「一段目は二酸化炭素濃度が増えると音響信号が増加傾向にあり、二段目は二酸化炭素濃度が増えると音響信号が減少傾向にある。入射は一定であるため、吸収量が増加すれば、透過量は減少する。」では、入射量が吸収量と透過量に分配されるエネルギー収支について明示的に記述されている。また、「一段目の CO₂ が濃度 100%のときに 104mV なのに対し、二段目では 0mV になれば(赤外線)全てを捉えたと言えるが、実際の結果は二段目で 18mV なので、(赤外線)ほとんどをとらえているが、透過している分があると言える」というように、二段目を検出器として利用していることも理解していた。

カバーガラスの吸収量に関する考察では、カバーガラス1枚による減少量を正確に記述している一方、一部の学生は、音響信号の絶対値の差を回答しているなど、1枚毎に透過率(%)=透過/入射を理解していない記述も見られた。CO₂ 濃度 10%や 100%による吸収量はカバーガラス約 2 枚や約 6 枚と回答しており、定量的な理解をしていた。なお、細かな補正を考慮する時間が無かったため、本研究で求めた値とは、1 枚程度の差があった。

理解に関する自己評価の回答(よく分かった、分かった、どちらともいえない、分からなかった、全く分からなかったから選択)は、問「入射した赤外線の一部が吸収され、残りが透過することを知り、エネルギー収支について分かりましたか？」では、それぞれ 23.5%, 64.7%, 11.8%, 0%, 0%となり、問「二酸化炭素による赤外線の吸収量をカバーガラスの枚数一枚相当に換算し、光学的厚さの概念を理解しましたか？」11.8%, 67.6%, 20.6%, 0%, 0%となり、概ね学生自身の自己評価でも理解したことが分かる。

学んだことや興味を持ったことに対する自由記述では、「この実験で CO₂ による吸収量を音響信号で捉えるということにとっても興味を持った。赤外線の吸収量をカバーガラスの枚数によって換算し表現できることを学んだ(カバーガラスを尺度として吸収量を表現)。「ガラスをかけることで 20%赤外線をカットすることができ、これを繰り返すことである種のものさしにできることが興味深かった」といった本研究で受講者に学んで欲しいことが記述されていた回答もみられた。さらに、本研究の発展的内容となる「普段生活で使っているものの中でも赤外線を通すものと通さないものをもっと知りたいと思いました。」「窒素以外の気体の実験をしてみたい。」「カバーガラスは赤外線を少し通

し、枚数を増やしていくと通す赤外線が少なくなる。カバーグラスを一枚目のときに赤外線の通す量を大きく減少させ、二枚目からは少しずつ減少していくことに興味を持った」などの回答もみられた。

2.7 まとめ

これまでの光音響効果を利用した教材では、赤外吸収量に注目して議論していたが、本研究では、セル 2 台を縦列配置することで、エネルギー収支を推定した。その結果、吸収が増えれば(1段目の音響信号が増える)、透過が減る(2 段目の音響信号が減る)様子を、エネルギー収支を考えることで、定量的に理解できるようになった。また、気象学における光学的厚さという概念を実感できるようにするため、1段目の CO₂ をカバーグラスに置き換え、カバーグラスの枚数(厚さ)を変える実験を行った。その結果を利用して、セルに封入する CO₂ 濃度毎の光学的厚さをカバーグラスの枚数(厚さ)に置き換え、CO₂ 濃度によって吸収量が決まる様子を直感的に理解できるようにした。なお、光源から射出された赤外線のエネルギー量の絶対値を測定していないため、本議論で行ったエネルギー収支でも、音響信号の強さを基にした議論になっていることに留意されたい。

第3章 総括

3.1 本学位論文のまとめ

広く用いられている赤外線光源(4700K~2000K)から放射される赤外線は近赤外線域である一方、地表面や地球(320K~255K)から放射される赤外線は遠赤外線域である。二酸化炭素は、前者に対して $2.0\ \mu\text{m}$ や $2.8\ \mu\text{m}$ の吸収帯で吸収する一方、後者に対して $15\ \mu\text{m}$ の吸収帯で吸収する。赤外線による温度上昇を計測する教材開発に関する論文の多くでは、それらに注目していない。

Kaneko et al.(2010)は、光音響効果を用いて赤外線の温室効果ガスによる吸収量が音響信号に変換されることを利用し、温室効果ガスの吸収帯のみに注目した計測ができることを示した。気体の種類によって音響信号が異なること、気体の濃度が高くなると音響信号が大きくなること、断続光の周波数が高くなると音響信号が小さくなること、などが示されており、Fukuhara et al.(2012)では、気体セルに入射した断続光から音響信号として取り出せるメカニズムについて考察している。

本学位論文では、これらの論文に基づき、気体セルを縦列配置し、それぞれの吸収量を用いて、エネルギー収支から入射量や透過量を見積もる教材開発を行った。経験的補正係数を導入することで、簡単なエネルギー収支から2つの気体セルの入射量や透過量を推定した。これまでの研究は、吸収量のみに注目し、気体セルに封入した気体の吸収の性質を計測する発想だった一方、本研究では、透過量ということから、赤外線が一部は吸収されるものの、他は透過していくという空間をイメージする発想である。特に、透過する様子を(吸収率の対数であるが)光学的厚さという気象学でよく用いられる概念を導入することが出来た。更に、カバーガラスの枚数に置き換えて理解することを提案した。二酸化炭素などの気体はどれも無色透明で、濃度が高くなると吸収が大きくなる(光学的厚さが大きくなる)と直感的な理解が難しいことを、ガラスという可視光には無色で赤外線を徐々に吸収していく、高校生や大学生にとって身近な材料で説明することができた。学部3年生に授業を行い、理解度を確認した。

3.2 本研究の課題と今後の展望

本学位論文では、波長特性については詳しく議論していない。音や光とはどのようなものを習っていないような小中学生にとっては、波長特性を説明することは難しいが、本教材を利用して教育プログラムを実施する小中学校の教員は、予め知っておく必要があると考えている。また、高校生や大学生では、波長特性の知識をある程度有するので、その知識を確かめたり深めたりする教材開発も望まれる。

先行研究の多くでは、赤外線ランプから発せられた赤外線による気温上昇を扱っており、波長特性を意識した論文はほとんど見られなかった。Kaneko et al. (2010)では、CO₂の吸収帯での赤外線吸収による音響信号に注目しており、それを利用した本学位論文では、カバーガラスでの透過率の計算する際に、CO₂の吸収帯毎に光源の強さやCO₂の吸収帯の透過率を計算して、全体の透過量を求めていた。

第1章や補遺 A で説明したように、赤外線領域には、4つのCO₂の吸収帯、15 μm、4.3 μm、2.8 μm、2.0 μmが存在している。音響信号は、それぞれの吸収帯でどれだけ赤外線を吸収するかによって決まるので、各吸収帯の光源の強度に、吸収率を掛けることで求められる。本実験で用いた 1173K での放射強度では、各吸収帯の寄与は、それぞれ 11.5%、59.4%、28.3%、0.8%となる(第2章)。地球放射(255K)では 99.4%、0.6%、0%、0%で、第1章の図 1-5 におけるサハラ砂漠からの放射(320K)では 96.4%、3.6%、0%、0%である(筆者による試算)。実際の大气における CO₂ による赤外線の吸収では、15 μmの寄与が最も高くなることが明らかである。これに近い音響信号にするためには、光源温度 1173K から下げるか、10 μmよりも波長が長い赤外線を通すローパスフィルタ(低周波側を通す)を付ける必要がある。

そのため、CO₂濃度と吸収率の関係は、それぞれの吸収帯で異なるが、CO₂濃度が高くなれば吸収率が大きくなる性質は一致している。今回の研究では、各吸収帯の寄与率に注目していなかったが、放射強度と吸収帯の寄与という意味では、上記のように大きく異なるので、波長特性を意識した教材の開発を行うときには、光源温度は避けて通れない留意点となる。

今回の研究では、1段目と2段目に同一の気体、CO₂を封入したため、CO₂の吸収帯に閉じたエネルギー収支を考えることが出来た反面、一見すると、赤外線全体でエネルギー収支を考えることと区別が付かなかつたり、誤解したりする可能性がある。温室効果ガスはそれぞれ特有の吸収波長をもつことを意識させるために、異なる気体、例えばメタン(CH₄)を用いて新たな実験を行うことができる(CH₄の吸収帯は図 3-1)。1段目と2段目に CH₄を封入すると、定量的には異なるが CO₂と同様な結果が得られる。例えば、1段目に CO₂と2段目に CH₄を封入すると、1段目の CO₂濃度に関わらず、2段目の CH₄の音響信号は変化しない。さらに、1段目に CO₂と CH₄の混合気体を入れて実験を行うと、吸収スペクトルが重複していないため、それぞれの吸収帯で赤外線吸収が同時に起こる。この現象は地球放射の「大気の窓」の理解につなぐことができる。

光音響効果実験装置を用いて窒素を蒸留水に通じて得た気体を、水蒸気として扱い赤外透過率を求めることは理論上可能である。但し、赤外線透過材の KBr は湿気に弱く、湿度 50%以下で保存することが推奨されている (FTIR シリーズ付属品ハンドブック, 島津製作所) ように、長時間水蒸気に当たると劣化する。つまり現実的には前述の理由によって、コストがかかりすぎるため実現が難しい。

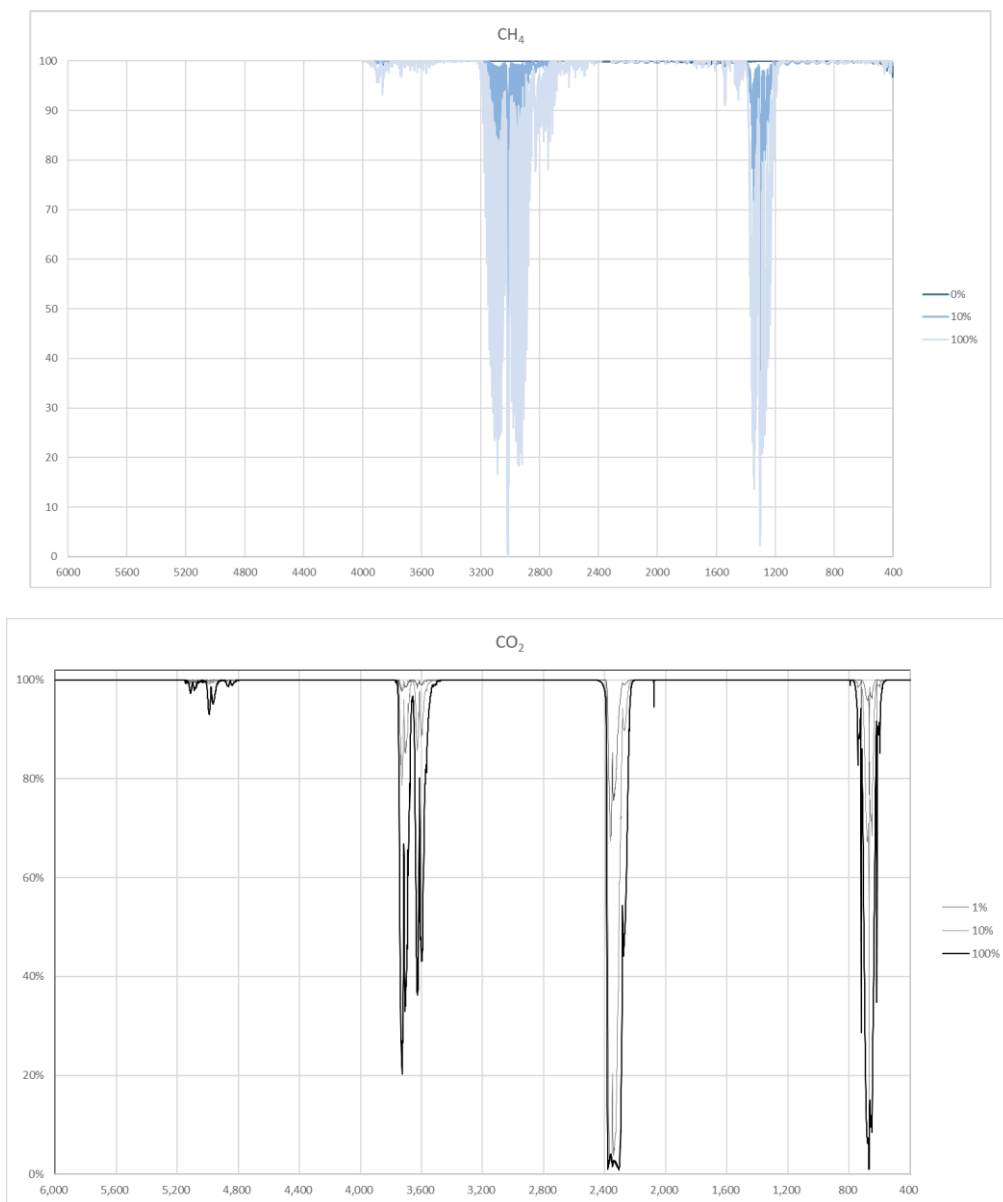


図 3-2: CH₄(上)と CO₂(下)の吸収スペクトル

既存研究でも水蒸気の赤外吸収を扱ったものは著者が知る限り存在しないが、第2章のカバーガラスの実験結果でその可能性が広がった。図 2-1 に示すようにガラスは 7 μm より大きな波長では赤外線を完全吸収するが、それより短い波長では部分的に吸収する。水蒸気は二酸化炭素よりも広範囲の吸収帯を有するため、KBrの窓板の代わりにガラスの窓板を用いても、アンプによる増幅で音響信号の計測が期待できる。

水蒸気は大気における最大の温室効果気体であり、二酸化炭素等と比較できるように実験条件を整え、水蒸気による赤外吸収の実験が実現出来れば、大気の温室効果に、より模したものとなる。

本学位論文では、Kaneko et al.(2010)や Fukuhara et al.(2012)で用いていた気体セル長を 10 cmから 3 cmに短くした。第2章で議論したように、音響信号が小さい気体では、検出感度を期待通りに上げることは出来なかったが、気体セルを FTIR 装置にそのまま入れることが可能になり、CO₂の4つの吸収帯の音響信号への寄与を明らかにすることが出来た。

本学位論文では、光学的厚さをカバーガラスの枚数への換算という理解の仕方を提案した。今回は、赤外線の光学的厚さを扱ったが、気象学ではどこまで遠くが見られるかという視程や、水質調査ではどの深度まで透明板を見ることができるかという透明度といった可視光における光学的厚さを考えることができる(補遺 C.2)。この場合、検出器は人間の目であり、高校生や大学生が直感的に理解するための前段として、授業に取り入れることも可能になるだろう。実際、本学位論文における大学3年生への授業では、光音響効果を利用した教材装置による実験だけでなく、補遺 C.3 に説明した実験を行った。この実験は、白い絵の具を水に溶かし、濃度や深さを変えた水溶液をメスシリンダーに注ぎ、上から覗くことで、視程や透明度を疑似体験できるものである。この実験は、光音響効果を用いた教材開発に注目したため、学位論文には含めなかった。しかし、光学的厚さを可視光や赤外線で学ぶというような授業を組み立てることで、高校生や大学生が光学的厚さをより理解することはできるだろう。また、光学的厚さをカバーガラスの枚数への換算、すなわち、この開発装置で測ると音響信号〇〇 mV という言い方から、赤外線の減衰する割合が、カバーガラス〇〇枚相当という言い方にするには、光学的厚さをカバーガラスという物差しで測ったことに他ならない。このことから、長さをメートル原器を基準にした物差しで、重さをグラム原器を基準とした天秤で、測るという標準化の話に発展させることもできる(補遺 C.2)。

第2章で紹介したように、光学的厚さを指数関数的減少と捉えるのではなく、直線的減少と捉えている学生が見られた。本学位論文では、一定の割合で減少する光を距離に関する指数関数として議論を始めているが、補遺 C.1 のように、学生自身が、光のエネルギー収支の微分方程式を立てるところから始めることもできる。指数関数として解が得られること、さらに、片対数グラフを用いれば直線となり、近似直線を求める際にも、Microsoft[®]エクセルなどのスプレッドシートによる近似直線を得るのではなく、グラフに定規を当てて作図するといった学びの過程を含めた授業の展開も可能である。その際、高校の数学Ⅱで習った指数関数や対数関数の性質などを復習することも可能であろう。

このような要素を入れて、本学位論文で扱った光音響効果を用いた教材を一部とした、授業に発展させることも可能である。なお、受講生の理解を確かめるために第2章の授業を行っているため、これらの提案は、補遺 B に示すように、確かめるという本来の目的に影響を与えない程度に、簡単に組み込んだ。

本学位論文は、光音響効果を利用した装置を用いて、二酸化炭素の吸収帯に注目し、赤外線が二酸化炭素の封入された気体セルを透過する様子やそれを光学的厚さとして理解する教材開発を行った。ここで議論した可視光を含めた光学的な厚さの理解する授業とともに、実際の大気中の二酸化炭素濃度が低く (400 ppm)、厚さ(1 気圧大気換算で約 8km)が厚い、異なる状況を理解する授業があると、高校生や大学生のより深い理解が得られるだろう。これらを通じて、大気中の温室効果を理解する教材や授業を開発することが望まれる。

補遺

補遺 A 分子による赤外線吸収の詳細

A.1 温室効果ガス

気体のうち、赤外線の光エネルギーを吸収し熱エネルギーとして放出する気体を温室効果ガスという。各気体分子の吸収帯は、気体の種類によって固有であり、強弱さまじまな多数の吸収線の群れとして構成されている。そして、それぞれ吸収線や吸収帯の形成には量子力学的に従った規則性がみられる。なお、補遺 A 全般の記述は主に日本化学会編,化学便覧(基礎編Ⅱ),丸善(1993)を参考にしている。

気体分子があるエネルギー(波数)の放射(光子)を吸収あるいは射出して振動や回転のエネルギー準位の遷移が起きるためには、その分子は、電気双極子や磁気双極子などの双極子モーメントをもたなければならない。その場合、双極子モーメントは、分子の原子配列による恒常的なものだけでなく、分子の振動による変形で誘起される一時的なものであってもよい。

一般に、N 個の原子からなる分子の調和振動の自由度は、分子が直線形(CO₂ や N₂O)の場合には(3N-5)、非直線形(H₂O)の場合には(3N-6)個である。3原子分子の基準振動モードには、対称伸縮、逆(非)対称伸縮および変角の3つのモードがある(以下)。

水蒸気

水分子(H₂O)は電子配列に起因する強い永久電気双極子をもつ典型的な極性分子である。2個の水素原子が酸素原子を頂点として104.5°の角度を成し、水素原子と酸素原子が互いの電子を共有し合う形で結合する非直線形である。水分子の正電荷(陽子)の総数と負電荷(電子)の総数は等しく、全体として電氣的に中性であるが、このような分子構造により、水素原子核(プロトン)との正電荷と共有されない電子の負電荷の重心位置が一致せず、電気双極子をつくりだしている。基準振動は3種である。主な吸収波長として、全対称伸縮振動(ν_1)2.7(3.7) μm ・3657(2671) cm^{-1} 、逆対称伸縮振動(ν_3)2.7(3.6) μm ・3756(2788) cm^{-1} 、全対称変角振動(ν_2)6.3(8.5) μm ・1595(1178) cm^{-1} があり、その付近が吸収波長帯になっている()内は D₂O)。

二酸化炭素

二酸化炭素は3原子からなる直線状の分子で、基準振動は4種である。このうち、全対称伸縮振動(ν_1)1333 cm^{-1} は赤外不活性のためピークとして検出されない。主な吸収波長として、逆対称伸縮振動(ν_3)4.3 μm ・2349 cm^{-1} 、縮重変角振動(ν_2)15 μm ・667 cm^{-1} 、縮重している変角振動(ν_2 ・667 cm^{-1})の吸収の第5高調波に相当する

$2.8 \mu\text{m} \cdot 3500\text{cm}^{-1}$ があり、その付近が吸収波長帯になっている。炭素原子の左右に酸素原子が線形に結合した対称な形をしているので、電気双極子も磁気双極子ももたず、純粋な回転吸収帯は存在しない。しかし、分子が変形を伴うような振動をすると、電化分布に偏りが生じて電気双極子が誘発される。これにより、振動-回転の吸収帯が生じる。

メタン

メタンは5原子からなる正四面体形の分子で、基準振動は9種(v1~v9)である。このうち、全対象伸縮振動(v1)が $3.4 \mu\text{m} \cdot 2917\text{cm}^{-1}$ と縮重変角振動(v2)が $6.5 \mu\text{m} \cdot 1534\text{cm}^{-1}$ で赤外不活性のためピークとして検出されない。主な吸収波長として、三重縮重伸縮振動(v3) $3.3 \mu\text{m} \cdot 3019\text{cm}^{-1}$ 、三重縮重変角振動(v4) $7.7 \mu\text{m} \cdot 1306\text{cm}^{-1}$ があり、その付近が吸収波長帯になっている。

オゾン

オゾンは水蒸気と同様に二等辺三角形分子の振動形であり、全対象伸縮振動(v1)が $9.0 \mu\text{m} \cdot 1110\text{cm}^{-1}$ 、全対象変角振動(v2)が $14.2 \mu\text{m} \cdot 701\text{cm}^{-1}$ 、逆対象伸縮振動(v3) $9.6 \mu\text{m} \cdot 1042\text{cm}^{-1}$ があり、その付近が吸収波長帯になっている。

酸化二窒素

酸化二窒素は水蒸気やオゾンと同様に二等辺三角形分子の振動形であり、全対象伸縮振動(v1)が $7.6 \mu\text{m} \cdot 1318\text{cm}^{-1}$ 、全対象変角振動(v2)が $13.3 \mu\text{m} \cdot 750\text{cm}^{-1}$ 、逆対象伸縮振動(v3) $6.2 \mu\text{m} \cdot 1618\text{cm}^{-1}$ があり、その付近が吸収波長帯になっている。

一酸化炭素

一酸化炭素(CO)は2原子分子であるが、異なる原子が結合して分子を形成しているため電気双極子モーメントをもつ。分子構造による永久双極子モーメントを有する分子は純粋の回転遷移による吸収帯をつくりうる。

A.2 大気を構成する気体

大気を構成する気体に関する資料として、重要な大気成分の分子構造(図 A-1)、分子の振動の基準モードの模式図(図 A-2)、晴天でエアロゾルがない状態での夏の中緯度における典型的な大気の透過率(図 A-3)について資料を示す。

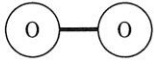
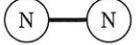
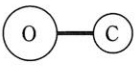
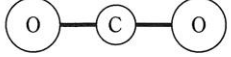
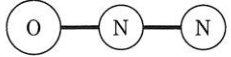
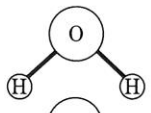
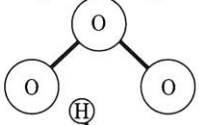
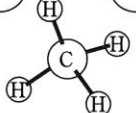
分子種	構造	永久電気双極子モーメントの有無
酸素		直線形 無 (ただし磁気双極子モーメントがある)
窒素		直線形 無
一酸化炭素		直線形 有
二酸化炭素		直線形 無
一酸化二窒素		直線形 有
水		非対称こま 有
オゾン		非対称こま 有
メタン		球対称こま 無

図 A-1 重要な大気成分の分子構造

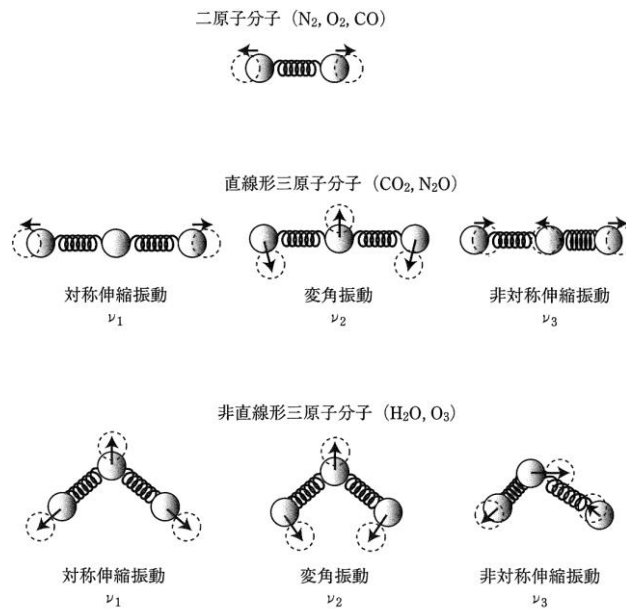


図 A-2 分子の振動の基準モードの模式図

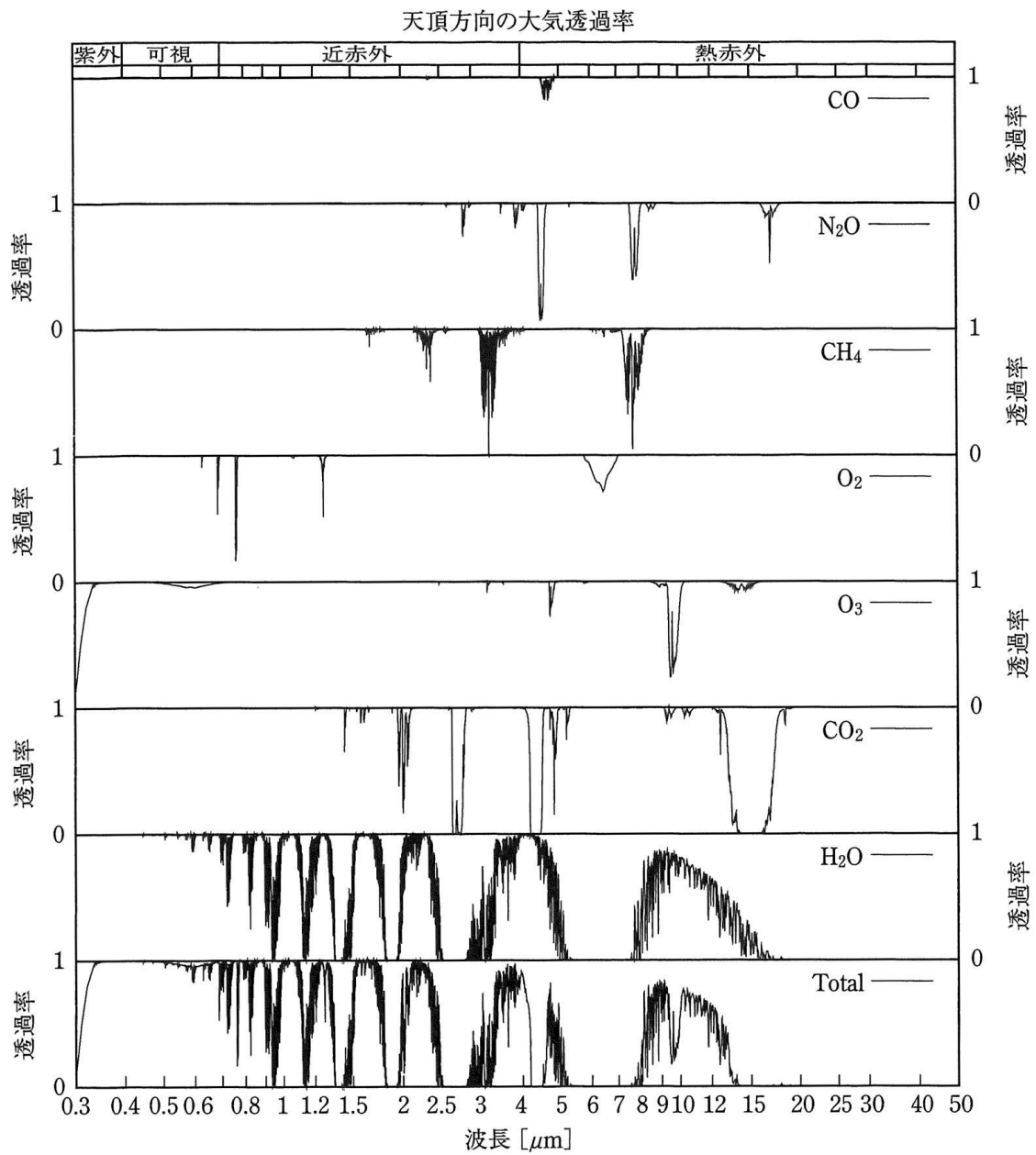


図 A-3 晴天でエアロゾルがない状態での夏の中緯度における典型的な大気の透過率

補遺 B 本装置を用いた授業における資料

北海道科学大学工学部 3 年必修「都市環境実験」の 10 テーマの最初となる「気体の赤外吸収」として、受講生 34 名に対して、180 分授業を実施した。その際の配付資料を B1 および B2 で示す。

B.1 配付資料

次頁に、実際に使用した配布資料を示す(なお、実際に配布した A4 サイズの資料 4 頁を 91%に縮小している)。

気体の赤外吸収

【目的】 二酸化炭素による赤外線の吸収量を音響信号で捉え、気体の濃度と赤外線吸収量の関係を学ぶ

- ①入射した赤外線の一部が吸収され、残りが透過することを知り、エネルギー収支の概念を理解する。
- ②二酸化炭素による赤外線の吸収量をカバーグラス一枚相当に換算し、光学的厚さの概念を理解する。

【原理】 気体の赤外吸収・光音響効果・エネルギー収支（入射＝吸収＋透過）

【予備知識】

1. 光音響効果実験装置について

光音響効果実験装置はセルに入れた気体が赤外線を吸収する様子を音響信号で測定できる装置である。装置は光源部と試料セル部とマイク、オシロスコープから成り、音響信号を測定するために必要な条件を調整するアンプを含む。

【実験1】 装置の基本的性質を知る（セル1台：ラインの位置）

1. 装置の調整

光源：光の強度を最大にする（アンプ部のつまみ）
周波数：周波数を _____ Hz に合わせる（アンプ部のつまみ）

2. 装置の使用法

- 試料セル部の両方のコックを開け、ブロアーでセル内の空気を入れ替える（最低 _____ 回）
- 試料気体の入ったシリンジ先端をセル部に差し込み気体を注入し、すばやくコックを閉める
- オシロスコープで音響信号を測定する

*音響信号の大きさによって目盛のスケールを調整する（1目盛が5, 10, 50mV など）

*試料気体の濃度を変えて行う

*音響信号 (mV) = 目盛 × スケール (mV/Div 読み方: ミリボルト パー デビジョン)

CO₂ 濃度 100% のとき

目盛	スケール (mV/Div)	音響信号 (mV)
_____	_____	_____

3. 音響信号の大きさを適切にする調整（音響信号が変わる4つの要因）

(1) 光源の強度（光源に流す電流量）：

電流量が大きくなると、セルに入る光の強度は [_____] なる。

(2) 光源からのセルの距離：

距離が近くなると、セルに入る光の強度は [_____] なる。

(3) 気体の種類（セルに入る光の強度は同じでも…）：

音響信号は、窒素では検出 (_____)、二酸化炭素では検出 (_____)。

(4) 音響信号への変換効率：同じ気体でも、周波数が低くなると、音響信号は [_____] なる。

※あとの実験では(3)を詳しく調べるため、(1),(2),(4)は適切にしたら変更せずに用いる。

4. いろいろな素材と赤外線の通しやすさ

いろいろな素材を光源部とセル部の間に挿入し、赤外線が透過するかどうか調べる。

赤外線を通さないもの： [_____]。

赤外線をすこしだけ通すもの： [_____]。

赤外線をほとんど通すもの： [_____]。

【実験2】 二酸化炭素の濃度と音響信号（セル2台：一段目・二段目）

1. 各 CO₂ 濃度の調整

10%以上（高濃度）と10%以下（低濃度）では作り方が異なる。試料気体 CO₂、希釈用気体 N₂ のスプレー缶、および、10mL 容と100mL 容のシリンジを用いる。

- 高濃度では、CO₂ 濃度 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100% の実験をしてもらう。100mL 容のシリンジに、試料気体 CO₂ と希釈用気体 N₂ をそれぞれのスプレー缶から直接入れることをつくる。

例えば、CO₂濃度 20%を得たい場合は、CO₂20mL と N₂80mL を入れれば良い(コツ:CO₂20mL を入れる際に約 30mL 入れてから、約 10mL 押し出すとより正確な濃度が得られる。N₂80mL は慎重に 100mL に近づけて、余計に入れることはしない)。

- 低濃度では、CO₂濃度 0,1,2,4,6,8,10%の実験をせよ。10mL 容のシリンジに、試料気体 CO₂と希釈用気体 N₂をそれぞれのスプレー缶から直接入れて、それを 100mL 容に移し替えて、残り(90mL)を N₂で 10 倍希釈してつくる。

例えば、CO₂濃度 4%を得たい場合は、10mL 容のシリンジに CO₂4mL と N₂6mL を入れて CO₂濃度 40%を作り(上のコツを忘れずに)、それを 100mL 容に移し替えて、残りの 90mL は、N₂をスプレー缶から直接入れる。

2. 音響信号の測定

一段目の気体セルに濃度を変えた CO₂を入れ、二段目の気体セルに濃度 100%の CO₂を入れて、それぞれの音響信号を測定する。濃度 0%~10%、濃度 10%~100%ごとに実験を行う。

CO ₂ 濃度(%)		音響信号(mV)				一段目 CO ₂ 濃度0%のとき、二段目の音響信号で規格化した値
一段目	二段目	一段目		二段目		
0	100	x	=	x	=	1
1	100	x	=	x	=	
2	100	x	=	x	=	
4	100	x	=	x	=	
6	100	x	=	x	=	
8	100	x	=	x	=	
10	100	x	=	x	=	
0	100	x	=	x	=	1
10	100	x	=	x	=	
20	100	x	=	x	=	
40	100	x	=	x	=	
60	100	x	=	x	=	
80	100	x	=	x	=	
100	100	x	=	x	=	

3. 【宿題】グラフの作成

グラフ(散布図)を作成(横軸:CO₂濃度 縦軸:音響信号)

【実験3】カバーガラスの枚数と音響信号(セル1台)

- セルを1台にし、CO₂濃度 100%を入れる。入射する赤外線にかバーガラス 0~10 枚をかざして、音響信号を測定する。

カバーガラス(枚)	音響信号(mV)	カバーガラス 0 枚のとき、二段目の音響信号で規格化した値
0		1
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

2. 【宿題】グラフの作成

グラフ(散布図)を作成(横軸:カバーガラス 縦軸:音響信号)

【考察】

- 実験2において、二酸化炭素濃度が増えると一段目と二段目の音響信号はどうなるか？なぜそうなるかを簡単に説明せよ(ヒント: エネルギー収支として吸収と透過を考える)。

- 実験2において、二段目は二酸化炭素濃度 100%にしているが、赤外線を全て捉えているか？(ヒント: 一段目の二酸化炭素濃度 100%のときの二段目の信号がどうなっているか)

- 実験3において、カバーグラス 1 枚を透過すると、光が何%減少するか？(ヒント: 3 枚目の音響信号が 2 枚目の音響信号に比べて何%減少したか、同じように、例えば 5 枚目と 4 枚目を比べる。なお、1 枚目は、0 枚目に比べて大きく減少してしまっているが、1 枚だけで全て吸収されてしまう赤外線の波長があるため、他の枚数と状況が異なる(だから、ここでは比較しないこと))

- 実験2と実験3の音響信号に注目して、CO₂ 濃度 10%と 100%による吸収量は、カバーグラス約何枚分の吸収量に相当するか？(ヒント: それぞれの規格化した音響信号が同じ値のところを比べる)

【発展】

CO₂濃度が増えると、赤外線吸収量が増え、透過量が減ります。透過量が減る様子を、同じだけ透過量が減るカバーガラスの枚数(厚さ)で表してみました。つまり、透過量の減少を枚数(厚さ)で表現したことになります。実際にも、空気のきれいな様子、水の澄んだ様子は、見えている距離で表します(視程・透明度と呼ばれます)。例：摩周湖 28.0m、倶多楽湖 22.0m、…

(環境省湖沼調査報告書平成5年)

赤外線がどれだけ吸収しているかは、「光学的厚さ」(約63%減少(=1/e))で表現されています。この実験で用いたカバーガラス4.2枚分が約63%減少するので、カバーガラス4.2枚で光学的厚さ1として換算できます。すなわち、例えばCO₂濃度10%や100%による赤外線の吸収量も、カバーガラス何枚相当と求められたので、4.2で割れば光学的厚さに簡単に換算できます。

【確認】二酸化炭素による赤外線の吸収量を音響信号で捉え、気体の濃度と赤外線吸収量の関係を学びました。

①入射した赤外線の一部が吸収され、残りが透過することを知り、エネルギー収支について分かりましたか？

よく分かった、分かった、どちらともいえない、分からなかった、全く分からなかった

②二酸化炭素による赤外線の吸収量をカバーガラスの枚数一枚相当に換算し、光学的厚さの概念を理解する。

よく分かった、分かった、どちらともいえない、分からなかった、全く分からなかった

この実験で、学んだこと、興味を持ったことを3つ書いて下さい。

B.2 エクセル・ファイル

B1と同様に、授業で用いたエクセルシートを以下に示す。

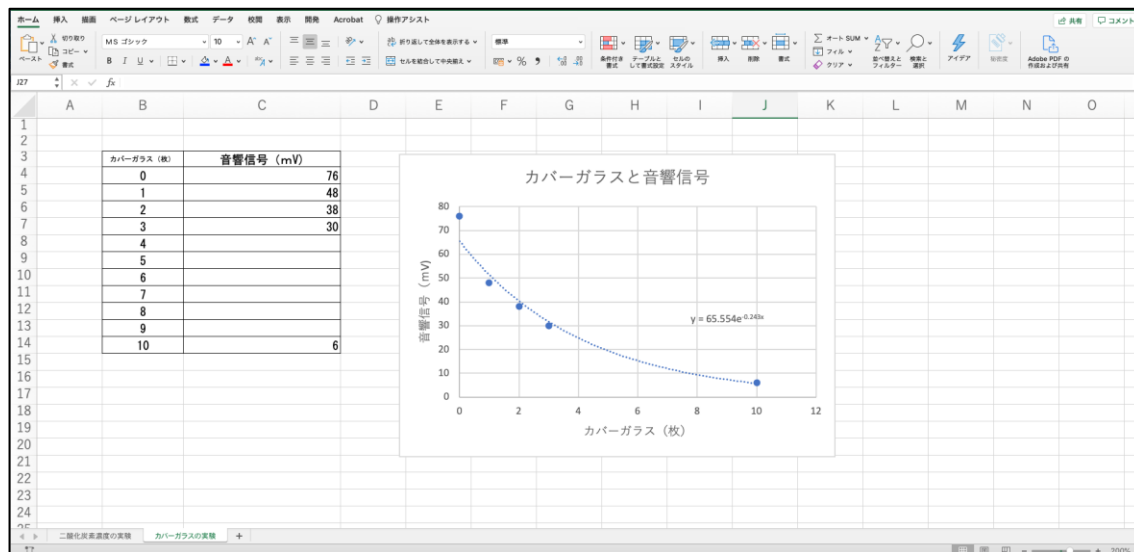
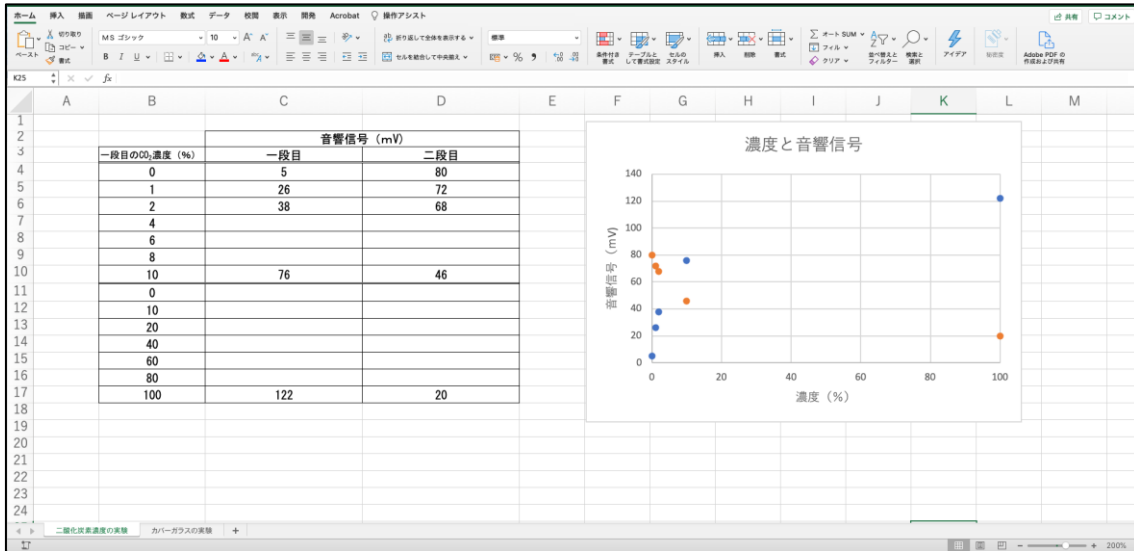


図 B-2 エクセルファイル(上:濃度と音響信号・下:カバーガラスと音響信号)

補遺 C 光学的厚さを学ぶいくつかの要素

光学的厚さを学ぶときに利用できるいくつかの要素を参考資料として示すことにする。ここでは、第2章で本実験装置から得られた結果と、大気科学で用いられている視程や透明度などを組み合わせて、可視光の透過について学ぶときに、利用できるパーツ(要素)を補遺 C とする。視程については、気象庁では「視程とは水平方向での見通せる距離、霧とは微小な浮遊水滴により視程が 1km未満の状態、濃霧とは視程が陸上でおよそ100m、海上で500m以下の霧を示す」のように定義している。また、透明度も、水質指標の一つで、直径 30cmの白色円盤を水中に沈め、水面から認識できる限界の深さをmで示す指標である。霧の濃さ、水の濁りはその言葉通り、霧が濃い薄いや濁りの濃淡を連想するが、濃度で判断するわけではなく、認識できる距離をものさしとして用いている。視程と透明度の共通点は、観測(基準)点からどこまで見えるかの長さを基準にしていることである。この長さの基準は光学的厚さを基準としていると同義であり、光学的厚さの理解が身近な自然現象、例えば、海の深さと光の届く距離、吹雪時の視程の悪さなどの理解の手助けになる。

C.1 光学的厚さに関する方程式・解法についての説明

第2章では、気体セルのエネルギー収支「入射量=吸収量+透過量」を考えた。一般的には、光がある物質を透過する際、その強度の変化 $dI(x)$ は、光の強度 $I(x)$ と層厚 dx に比例するならば、吸収係数を k として、

$$dI(x) = I(x) - I(x + dx) = -kI(x)dx \quad (3-1)$$

ここで x は、光路長である。すなわち、

$$\frac{dI(x)}{dx} = -kI(x) \quad (3-2)$$

ように書くことができる。この微分方程式(3-2)は、変数分離法により、

$$\int_0^x \frac{dI}{I(x)} = -k \int_0^x dx$$
$$\ln[I(x)] - \ln[I(0)] = \ln \left[\frac{I(x)}{I(0)} \right] = -kx \quad (3-3)$$

となるので、減衰する指数関数の解は、入射光($x = 0$ のとき)の強度を I_0 として、

$$I(x) = I_0 e^{-kx} \quad (3-4)$$

ように得られる。カバーガラスのように一定の厚さ Δ を、 i 枚重ねたときの光の強度は、

$a = e^{k\Delta}$ とおくと、

$$I_i = I_0(1/a)^i, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

ように、カバーガラス1枚増えるごとに $1/a$ 倍になっていくことが分かる。また、自然対数を取ると、傾き $-k$ 、切片 $\ln I_0$ の直線

$$y = \ln I = -kx + \ln I_0 \quad (3-5)$$

で表されるので、片対数グラフ用紙(底が10の常用対数であることに注意)を用いて、 x を変えながら光強度 $I(x)$ を計測した実験結果をプロットして、傾き $-k$ を求めることもできる。 $k = 1$ のときの通常のグラフと片対数グラフを示す(図 C-1)。

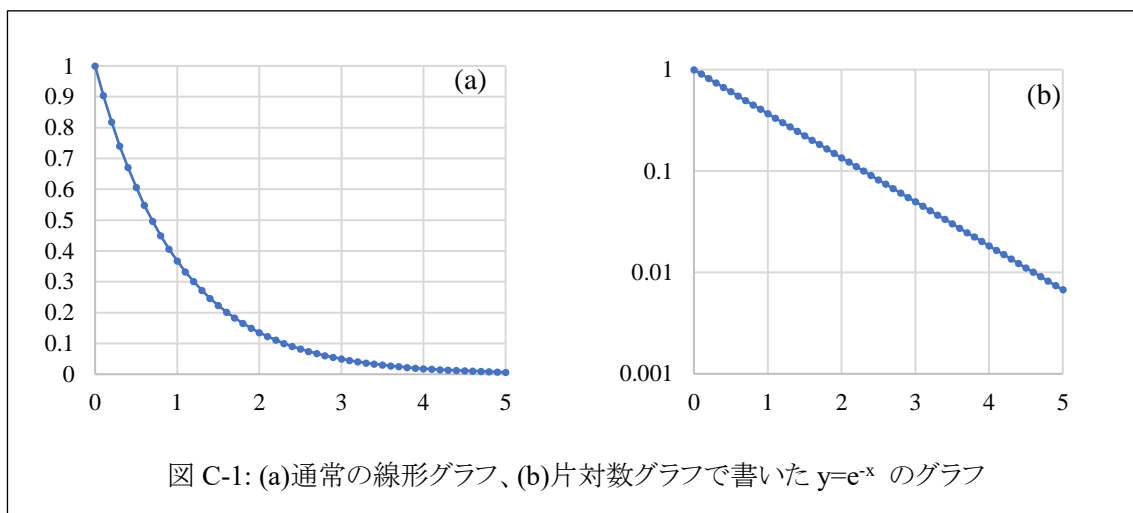


図 C-1: (a)通常の線形グラフ、(b)片対数グラフで書いた $y=e^{-x}$ のグラフ

$\tau = kx$ を光学的厚さと呼ぶこととする。吸収が弱くても光路長が長く、あるいは、吸収が強くても光路長が短く、光学的厚さが同じならば、同じだけの割合を吸収することを意味する。光学的厚さが1のとき、透過する光は、 $e^{-1} = 1/2.718 \dots = 0.368 \dots$ となる。単純には、光学的厚さ1のとき1/3、2のとき1/10、4のとき1/100 (正確には $e^{-4} = 0.0183 \dots$ と約1/50)を目安にしておけば良い。

分析化学では、式(3-3)のような入射光に対する透過光の比の対数が吸光度 A に比例することは、ランベルトの法則(Lambert law)と呼ばれる。吸光度 A は、光学における光学的厚さ τ と同じであり、吸光度 A が濃度に依存することはベールの法則(Beer's law)と呼ばれる。特に希薄水溶液や希薄ガスでは、モル吸光係数 ϵ とモル濃度 c を用いて、 $A = \epsilon cx$ のように書くこともベールの法則と呼ばれる。なお、第2章で扱ったような場合には、 CO_2 濃度と吸収量は比例関係になく、モル吸光係数とモル濃度のような考え方はできない。一般には、これら二つの法則をあわせて、ランベルト・ベールの法則(Lambert-Beer law)と呼ばれている。

C.2 カバーガラスを物差しとして用いること(標準器の考え方)

本研究以前は、吸収量のみ計測していたため、異なる気体・濃度の吸収量は、この光音響効果に基づく教材として定量的な比較に留まっていた。第2章では、エネルギー収支を考えることにより、透過率を求めることから、光学的厚さを求めることができた。即ち、異なる気体・濃度の吸収量は、この光学的厚さによって定量的な比較ができるようになり、この教材に依らない普遍的な知見が得られたことになる。

光学的厚さは1ならば透過光は入射光の $1/e$ 、その倍ならば入射光の $1/e^2$ とある意味で普遍的で分かりやすいものだが、「厚さ」に実感を伴わない。特に初めて学ぶ学生にとって実感があるものがあつた方が良く考えて、第2章ではカバーガラスを導入して、カバーガラスの厚さ(もしくは枚数)という形で、光学的厚さを理解する考え方を提示した。ここでは、さらに、具体的に、カバーガラスの導入について、標準化の視点から記述する。

長さ1mは、フランス革命に伴って地球の一周の4万分の一として定められた。1960年までは、標準器としてメートル原器が用いられていた。物差しで、様々な物を〇〇mと測っておくと比較ができる。例えば、この机は、このスペースに入るだろうか?というときにスペースの長さを物差しで測り、カタログに載っている製品の大きさを比較して入るかどうか購入前に確認することができる。なお、いざ設置してみると、意外と大きかったなど実感との齟齬がある場合もある。これは、1mという単位を標準化したために様々な物の長さを比較できるようになったことを意味する。その一方、実感が伴わないようなものでは、例えば、東京ドーム何杯分といった表示もされることがある。長さの「尺」は親指と人差し指を拵げた象形文字で昔は23cmとなっていた(いまでは1尺=30.3cm)。光学的厚さ1は言わばメートルに相当し、カバーガラスは「尺」に相当するものと見なすことができる。すなわち、光学的厚さ〇〇という表現では無く、カバーガラス〇〇枚(相当)という言い方になる。

C.3 メスシリンダーを用いた可視光における光学的厚さの実験

光学的厚さを直感的に理解するために、霧などの大気現象の視程の感覚を持ちこむ、メスシリンダーの実験を別途用意した。これは、可視光の光学的厚さを表現するため、目で確かめることができる(いわば人間の目が検出器である)。

メスシリンダーは、横から覗けば、常に同じ厚さを光が透過した状態なので、「色の濃さ=液体の濃度」として認識される一方、上から覗けば、液体の量に依存して、異なる厚さを光が透過した状態なので、「色の濃さ=液体の濃度や厚さ」として認識される。

なお、メスシリンダーは、円筒の容器なので、容量の目盛りが等間隔であり、容量(ml)を厚さとしても用いることができる(例えば、内直径 3.57cm のメスシリンダーは 1ml=1mm となる)。

上から覗き込み、メスシリンダーの下に置かれた、黒色の十字線が書かれた白い紙を見ることで、絵の具を水道水に溶かした水溶液の光学的厚さを判定する。水溶液が濃くなったり量が増えたりするとともに、黒色の絵の具を用いれば、白い紙が十字線と同じように黒くなる一方、白色の絵の具を用いれば、十字線が白い紙と同じように白くなることが観察される。明るい室内で実験しており、水溶液のメスシリンダー側面から光が当たっていることや、透視度計や霧や吹雪による視程の悪さを連想し易いことから、白色の絵の具を用いることにした。なお、十字線が見分けやすいように、メスシリンダーの下側にも光が入るようにした。絵の具は、安価で身近な「サクラクレパス マット水彩単色 ポリチューブ入り(白)」を用いた。

与えられたサンプルの水溶液と標準溶液を入れた2つのメスシリンダーを用意して、標準溶液の容量を調整して、十字線の見え方が同じになる標準溶液の容量をサンプルのこの標準溶液を基準とした「光学的厚さ」とする。この方法は、サンプルをいじらずに、十字線の見え方を同じにすることにより、同じ光学的厚さを、標準物質の容量(厚さ)に写し取る「物差し」の概念となっている。例えば、pH 試験紙では、サンプルに付けた試験紙の色を、標準変色表と比較することにより、サンプルの pH を知ることができる。また、炭素同位体の量を表現するときは、 ^{13}C の絶対量ではなく、標準物質との差の千分率の値 $\delta^{13}\text{C} = \frac{(^{13}\text{C}_{\text{サンプル}} - ^{13}\text{C}_{\text{標準物質}})}{^{13}\text{C}_{\text{標準物質}}} \times 1000(\text{‰})$ が用いられている。

与えられたサンプルが、上から見たときに十字線がある程度薄く見えている濃度や量であれば、100mlのメスシリンダーを用いたときに 100mlでちょうど底が見えないくらいの濃さに標準溶液をしておくと、サンプルの濃度や量を変えずに、標準溶液の量を調整することで、与えられたサンプルの光学的厚さを同じようになる標準溶液の量で求めることができる(標準溶液〇ml 相当)。

また、与えられたサンプルが、上から見たときに十字線が全く見えない濃度や量であれば、サンプルを希釈する操作、もしくは、見え始めるまでサンプルの量を減らす操作が必要となる。例えば、60ml の全く底の十字線が見えないサンプルがあったとする。一つは、5 倍に希釈した 60ml が、ある程度薄く見えているようにし、上記の方法で比べ、例えば標準溶液 80ml 相当であれば、実際の光学的厚さは、希釈を考慮し $5 \times 80\text{ml} = 400\text{ml}$ 相当と求めることができる。あるいは、例えば、サンプルの量を減らしていき、1/4 の 15ml のとき、ちょうど底が見えないくらいになると(標準溶液 100ml 相当とな

り)、 $100\text{ml} \div (1/4) = 400\text{ml}$ 相当となる。

なお、透明すぎる場合には、標準溶液を 1ml まで減らして計測できるはずであるが、人間の目による濃さの比較が難しくなるため、実際の取り扱いは避けた方が良い。

水道水と白い絵の具は、透明な溶媒と不透明な溶質であり、光学的厚さは溶媒の量には依存せず、溶質の総量で決まる。例えば等量の水道水で希釈すれば、光学的厚さ(上から見たときの濃さ)はそのままだが、濃度(横から見たときの濃さ)は $1/2$ となる。その一方、同じ濃度で水溶液の量を増やしていくと、光学的厚さは水溶液の量に比例して増加する。

視程や透明度は、光学的厚さが十分に大きくなると見えなくなることを利用している。例えば、光学的厚さが 4 ぐらいになると、透過する光は、2%程度になり、ここでは、光学的厚さ4を見える/見えないの閾値とする。つまり、上記の見え始めるまでサンプルの量を減らす操作が、視程の観測や透明度の計測に相当する。

参考文献

第1章

Grant W. Petty, 近藤豊, 茂木信弘(2019) 詳解 大気放射学 基礎と気象・気候学への応用. 東京大学出版会

浅野正二(2010) 大気放射学の基礎. 朝倉書店

原 康夫(2010) 第4版 物理学基礎. 学術図書出版社

Kaneko, F., H. Monjushiro, M. Nishiyama, T. Kasai (2010): Photoacoustic Experimental System to Confirm Infrared Absorption due to Greenhouse Gases. J. Chem. Educ., 87, 202-204. DOI: 10.1021/ed8000446

Fukuhara, A., F. Kaneko, N. Ogawa (2012): Simple model of photoacoustic system as a CR circuit. European J. Physics, 33, 623-625. DOI: 10.1088/0143-0807/33/3/623

小川直久, 金子文俊, 福原朗子(2014) 「光音響効果による温室効果ガスの検証」 物理教育, 62, 69-74. DOI: 10.20653/pesj.62.2_69

住明正(1996) 第1章 気候の形成, 住ほか編「岩波講座地球惑星科学第 11 巻 気候変動論」, 1-32.

中釜 達朗(2020) 「物質移動と物質収支を視覚化した段理論学習用簡易シミュレーション教材の試作」 工学教育, 68, 33-39.

土居 茂雄, 向平 卓矢(2020) 「IoT セキュリティ教材の研究開発と評価」 工学教育, 68, 46-51.

土江田 織枝, 千田 和範, 林 裕樹, 高坂 宜宏, 香山 瑞恵(2020) 「個別学習と協働学習を組み合わせた問題解決型ロボット実習の試み」 工学教育, 68, 68-73.

松本 益明・大久保 淳熙(2020) 「ConcepTest による力学誤概念診断」 物理教育, 68, 175-179.

光本 真一(2020) 「フェーザ軌跡簡易描画実演を利用した電気回路教育の実践」 工学教育, 68, 89-92.

早稲田 一嘉, 藤本 健司(2020) 「ペーパークラフト風力タービンを用いた工業高等専門学校機械工学科導入教育の実践」 工学教育, 68, 41-46.

秋元 祐太郎, 鈴木 真ノ介(2020) 「電力工学に関する高専向け導入教育教材の開発と実践」 工学教育, 68, 47-50.

辻 尚史, 松田 英昭, 佐々木 智征, 伊藤 大地(2020) 「オルゴールを題材とした工場実習教材の開発と導入」 工学教育, 68, 74-79.

- 安達 照(2020)「スマートフォンに接続した超音波センサーを用いた鉄道模型の運動の測定」物理教育, 68, 234-237.
- 瀧本 家康(2020)「オンラインツールを用いた実験データのリアルタイム共有方法」物理教育, 68, 238-241.
- 岡野 寛, 多田 佳織, 伊藤 武志, 矢野 潤(2020)「天然膨張黒鉛シートを正極とした金属空気電池の作製とエネルギー教育への利用」工学教育, 68, 28-32.
- 小林 尚輝・内山 秀樹・山本 仁・神尾 誠也・木下 拓史・島野 誠大・武井 大・松山 福太郎・内山 匡・石代 晃司・渡辺 謙仁(2020)「高校物理のための人工衛星電波受信実験の教材化と実践」物理教育, 68, 18-21.
- 小林 良彦・中野 享香(2020)「原子核や同位体についての理解を助ける模型の開発と教育実践」物理教育, 68, 14-17.
- 猪本 修・岩本 幸恵(2020)「ゲル抵抗器における電気誘導と電流」物理教育, 68, 14-17.
- 土江田 織枝, 林 裕樹, 高坂 宜宏, 鈴木 未央, 大貫 和永, 高橋 晃, 香山 瑞恵(2020)「理解度に合わせて取り組める小中学生向けロボットプログラミング講座の改善と実践」工学教育, 68, 62-67.
- 東爪 大樹・寺田 光宏(2020)「水の冷え方を可視化する教具開発による本質的な理解」物理教育, 68, 8-13.
- 木村 尚仁(2020)「STEAM 教育用フィジカルプログラミング電子楽器教材「フォトミン」の試作」工学教育, 68, 72-75.
- 岩見 敏明(2020)「ステレオ画像による拡散型霧箱中の飛跡の発生一の測定」物理教育, 68, 2-7.
- 寺嶋 容明・中村 夏海(2020)「火星の青い夕焼けを再現するための教材開発」物理教育, 68, 180-183.
- 田口 幹雄(2020)「手回し発電機の実出力電流の簡便な測定方法」物理教育, 68, 230-233.
- 木村 尚仁, 碓山 恵子, 小島 洋一郎, 伊藤 隆介(2020)「教育用電子楽器「フォトミン」を用いた科学啓発講座の実践と効果」工学教育, 68, 62-67.
- 小林 志好(2020)「材料力学における問題解決能力の育成」工学教育, 68, 19-27.
- 間田 潤(2020)「線形代数学における事前動画学習の効果および関心を持たれるための要因の調査」工学教育, 68, 40-45.
- 保田 和則(2020)「映像を用いた流体力学の授業展開」工学教育, 68, 81-84.

- 片山 昇, 高木 優香, 金 冨男, 本田 周二, 森 朋子(2020)「大人数授業におけるアクティブラーニングとしてのジグソー法の導入」工学教育, 68, 3-7.
- 土肥 紳一, 今野 紀子(2020)「LMS を活用したプログラミング教育のモチベーションへの影響」工学教育, 68, 8-13.
- 坂井 仁美, 金井 亮(2020)「デザイン思考を用いた PBL 型授業における受講学生の反応と授業手法 (第一報)」工学教育, 68, 14-19.
- 栗島 昂大, 鷺尾 夕紀子, 中村 周平, 鈴木 潔光, 藤田 耕平, 平田 (河野) 典子(2020)「ICT 教材を活用した数学導入教育の実践」工学教育, 68, 72-76.
- 佐々木 智之(2020)「コミュニケーション能力育成におけるロールプレイングの効果」工学教育, 68, 27-32.
- 中谷 淳, 土屋 華奈, 坂本 知也, 加藤 樹, 梶村 好宏, 北村 健太郎, 上田 真也, 高田 拓(2020)「宇宙技術教育のための 2U モデル CubeSat の開発と活用実践: 1. ミッション系空間を確保した機体開発」工学教育, 68, 60-65.
- 市村 智康, 平社 信人, 佐々木 信雄, 宮越 俊一, 先村 律雄, 佐藤 孝之, 大岡 久子, 高橋 徹, 鶴見 智(2020)「バーチャル工房を活かした高専教育高度化による情報活用エンジニアの育成」工学教育, 68, 76-80.
- 池田 宏, 古川 浩洋, 長森 清(2020)「首都東京におけるアクティブ・ラーニングを用いた「課題研究」の実践」工学教育, 68, 27-32.
- 藤田 悠, 芦田 和毅(2020)「Raspberry Pi を用いた社会人向け IoT 講座の学生への展開」工学教育, 68, 83-88.
- 平野 旭, 城明 舜磨(2020)「Simulink と Stateflow を用いたプログラミング導入教育の効果」工学教育, 68, 35-40.
- 坂本 知也, 加藤 樹, 梶村 好宏, 中谷 淳, 北村 健太郎, 篠原 学, 上田 真也, 高田 拓(2020)「オンライン会議による工学系モノづくり講座: 缶サット講座 2019 の準備から実践まで」工学教育, 68, 54-59.
- 加賀 栄子・宗尻 修治(2020)「チュートリアルワークシートを用いた高校物理の授業実践と評価」物理教育, 68, 87-92.
- 北村 貴文, 谷口 和成(2020)「科学者に対する ILDs を組み込んだ「作用・反作用の法則」の教授法の効果」物理教育, 68, 169-174.
- 庄司 良, 鈴木 大輔(2020)「SDGs を意識した社会実装教育とその展開ー社会実装教育フォーラムのテーマを SDGs の観点で解析ー」工学教育, 68, 46-49.

- 坂本 知也, 加藤 樹, 中谷 淳, 土屋 華奈, 若林 誠, 徳光 政弘, 上田 真也, 高田 拓(2020)「宇宙技術教育のための2Uモデル CubeSat の開発と活用実践: 2. ミッション立案型の競技設計と実践」工学教育, 68, 66-71.
- 川村 康文(2004)「地球温暖化デモンストレーション実験器」物理教育, 52, 233-236.DOI:10.20653/pesj.52.3_233
- 気候変動に関する政府間パネル(IPCC): 第4次統合報告書第1作業グループ 概要及びFAQ(気象庁訳), 地球全体のエネルギー収支(年平均)
- 日本化学会編,化学便覧(基礎編Ⅱ),丸善(1993)
- 川村康文(2003)「エアロゾルによる地球温暖化・冷却化デモンストレーション実験器」物理教育, 51, 10-14.
- 中山 慎也, 村上 隆正, 重松 宏武(2008)「地球温暖化実験装置を用いた理科学習の実践」島根大学教育学部紀要(教育科学), 42, 7-11.
- 沼田 天, 矢野 慎, 長南 幸安(2010)「温室効果ガスの検証実験と中学校における教材化に向けた基礎研究」弘前大学教育学部紀要, 104, 45-51.
- 川村康文,田代佑太(2011)「多人数対応型地球温暖化デモンストレーション実験機」科学教育研究, 35-3, 256-263.
- 芹澤嘉彦,奥沢誠(2013)「既存の地球温暖化モデル実験装置における欠陥」群馬大学教育実践研究 別刷, 30, 17-25.

第2章

- Bell, A. G. (1880): On the production and reproduction of sound by light. *American Journal of Science*, **20**, 305-324. doi:10.2475/ajs.s3-20.118.305
- A. Fukuhara, F. Kaneko, N. Ogawa (2012): Simple model of photoacoustic system as a CR circuit. *European J. Physics*, **33**, 623-625. DOI: 10.1088/0143-0807/33/3/623
- F. Kaneko, H. Monjushiro, M. Nishiyama, T. Kasai (2010): Photoacoustic Experimental System to Confirm Infrared Absorption due to Greenhouse Gases. *J. Chem. Educ.*, **87**, 202-204. DOI: 10.1021/ed8000446
- 小川直久, 金子文俊, 福原朗子 (2014)「光音響効果による温室効果ガスの検証」物理教育, 62, 69-74. DOI: 10.20653/pesj.62.2_69
- 住明正(1996): 第1章 気候の形成, 住ほか編「岩波講座地球惑星科学第11巻 気候変動論」, 1-32.

第3章

- F. Kaneko, H. Monjushiro, M. Nishiyama, T. Kasai (2010): Photoacoustic Experimental System to Confirm Infrared Absorption due to Greenhouse Gases. *J. Chem. Educ.*, 87, 202-204. DOI: 10.1021/ed8000446
- A. Fukuhara, F. Kaneko, N. Ogawa (2012): Simple model of photoacoustic system as a CR circuit. *European J. Physics*, 33, 623-625. DOI: 10.1088/0143-0807/33/3/623