

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

Teaching Materials Using Experiments with Greenhouse Gases

沼田 天*・矢野 慎*・長南 幸安*

Satoshi NUMATA*・Makoto YANO*・Yukiyasu CHOUNAN*

要 旨

近年、環境問題やエネルギー問題などの地球規模の問題が課題となっている。それに伴い環境教育の重要性にも目を向けられてきている。持続可能な発展のため、科学技術の重要性と必要性への認識が高まってきた。新学習指導要領では、環境教育のより一層の充実が求められている。中学校第3学年「自然と人間」の分野は、中学校理科の中で最も環境教育と深く関わっている分野であり、環境教育のより一層の充実のためには、この分野の教材研究が必要不可欠である。本研究では、中学校理科で取り扱われやすい環境問題の中でも地球温暖化のメカニズムと温室効果ガスに焦点をあて、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、ブタンの温室効果の検証実験を行い、その結果とそれぞれの温暖化係数（二酸化炭素：1、メタン：21、一酸化二窒素：310）との関係の考察を行った。また、それらの実験方法を授業に取り入れ生徒に考察、話し合いさせるような授業計画を開発することにより、環境教育の充実を図る。

Key Words：中学校学習指導要領・地球温暖化・温室効果ガス・環境教育

はじめに

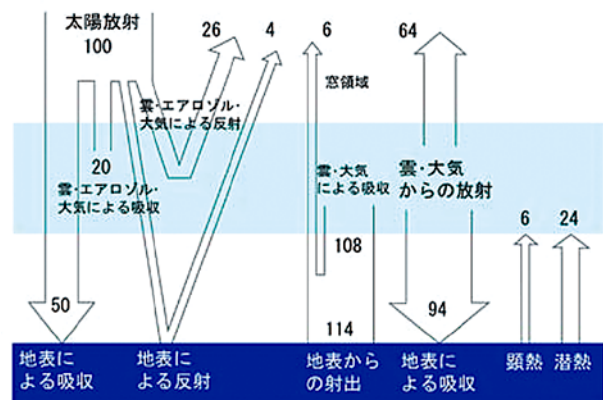
(1) 温室効果ガスについて

温室効果とは、太陽放射が地表面に達し暖められた地表から放射された赤外線が温室効果ガスに吸収され、吸収された熱の一部が再び下向きに放射され地表を暖める現象であり、温室効果をもつ気体を温室効果ガスという。この温室効果によって、地球の平均気温は約14度に保たれている。温室効果ガスが全く存在しなければ地球の平均気温は-19度になってしまう。

温室効果は、空気中で赤外線を吸収する分子が存在することによって生じる。赤外線と分子との関係はどうなっているのだろうか。分子内の原子を結び付けている共有結合は、ある安定なエネルギーを底として、伸びたり縮んだりという伸縮振動を起こすことができる。さらに分子は、全体としてぐるぐるとコマのように回転することもできる。そのような分子回転も分子が赤外線のエネルギーを受け取る仕組みのひとつである。赤外線は電磁波であり、赤外線の流れの中では、電場が急速な速度で反転している。電場の中では電荷は引っ張られるので、もし分子が極性を持っているの

図1 太陽放射と地球放射の収支

太陽放射エネルギー（343W/m²）を100としたときの大気-地表面間のエネルギーバランス（年平均）



であれば、正に帯電した側が負の方へ、負に帯電した側は正の方へ、それぞれ動こうとして向きを変えようとする。その時には、分子は回転させられる力を赤外線から得ることになる。同時に、分子は引き伸ばされたり縮められたりという、伸縮振動も赤外線によって引き起こされる。このようにして、極性をもつ分子は赤外線によって分子の回転と伸縮振動のエネルギーを獲得することができる。しかし、現在最も問題になっ

*弘前大学教育学部理科教育講座

Department of Natural Science, Faculty of Education, Hirosaki University

ている温室効果ガスは、二酸化炭素やメタン、フロンなどであり、これらは無極性分子である。これらはどうして赤外線を吸収できるのだろうか。

これらのような原子3個以上からなる多原子分子は、もし分子を構成する原子が振動によって歪んだ形になったところが極性を持つような場合には、赤外線はその振動を引き起こすことができる。2本のC=O結合が交互に伸縮して真中の炭素原子が中心からずれるような振動、あるいは結合角が変化して分子がたわむような振動では、一時的な極性が振動によって生じている。このようなタイプの振動は、赤外線を吸収することによって引き起こされる。

(2) 温室効果ガスの紹介

○ CO₂ (吸収波長: 2.5~3 μm, 4~5 μm, 12~17 μm)

二酸化炭素 (CO₂) は無色無臭、不燃性で化学的には不活性な気体であり、吸収波長は2.5~3 μm, 4~5 μm, 12~17 μmで波長15 μmの赤外域に特に強い吸収帯があり、強い温室効果を持つ。二酸化炭素は大気、海洋、陸上生物圏の間を循環しており、それぞれ異なる時間スケールのさまざまな過程を通じて大気中から除去される。大気中での二酸化炭素の滞留時間は、その吸収放出のメカニズムによって変わるため、単一に定めるのが困難である。そのため IPCC (2007) では滞留時間を示さず、濃度減少を時間の応答関数で示す方式をとっている。また、IPCC (2007) によると1750年以降の二酸化炭素の増加による放射強制力は1.66 W/m²であり、1995~2005年の間に20%増加した。これは少なくとも、過去200年間のあらゆる10年間において最大の変化である。また、産業革命以降の長寿命温室効果ガスの増加による放射強制力のうち、二酸化炭素の寄与は約63%と考えられる。

人間活動に伴う化石燃料の消費と、セメント生産および森林破壊などの土地利用の変化により二酸化炭素濃度は増加している。工業化時代以前からの大気中の二酸化炭素濃度の増加の75%以上が化石燃料の消費やセメント生産によるもので、残りの増加は農法の変化による寄与を含めて、森林破壊を主とした土地利用変化（と関連するバイオマス燃焼）によるものである。

○ CH₄ (吸収波長: 3 から3.5 μm, 8~9 μm)

メタン (CH₄) は無色無臭の可燃性気体で、8 μm付近に強い吸収帯があり、効率的に赤外放射を吸収・放出する。現在の気組成における1分子あたりの放射強制力は二酸化炭素の約25倍であり、大気の窓（光

の透過率が高い8~13 μmの部分のこと) に吸収帯があるので二酸化炭素に次ぐ影響を持つ温室効果ガスとして重要である。大気中での滞留時間はおよそ12年とみられている。放出源は、湿地や水田から、あるいは家畜および天然ガスの生産やバイオマス燃焼など、その放出源は多岐にわたる。またウシのゲップには大量のメタンが含まれており、糞からもメタンが発生するため、ウシが増えると大量のメタンガスが発生して温室効果を高めるとし、大量の牛肉を使用（そして破棄）しているハンバーガーがバッシングされたこともあった。人口の10倍以上の家畜を抱える酪農国のニュージーランドでは、羊や牛のゲップを抑制するという温暖化対策を進めている。

対流圏での消失は、主として、OHラジカル（ラジカルとは遊離基とも言い非常に不安定な分子種）との反応による分解と成層圏への輸送である。このOHラジカルは、オゾンに紫外線が当たることによって水蒸気が分解されて発生する反応性の高い物質である。成層圏ではメタンは酸化されて最終的に水蒸気と二酸化炭素になるため、成層圏オゾンに影響を与える水蒸気の重要な供給源ともなっている。寿命は12年とみられているが、メタンを分解するOHラジカルの濃度は気温や湿度に影響されるうえ、放出源から放出される量も気温に依存する。また、両半球の中高緯度においては、紫外線強度と水蒸気濃度の変動によりOHラジカル濃度が夏季に高く冬季に低くなることに対応して、メタン濃度は主として夏季に低く冬季に高くなる季節変動を示す。

近年、石油や石炭に比べ燃焼時の二酸化炭素排出量がおよそ半分であるため、地球温暖化対策としても有効な新エネルギーであるメタンハイドレートが注目されてきている。メタンハイドレートは、圧力と温度の条件が整うと水の分子が格子状になり、その中にメタンガスの分子を閉じ込めたような状態になったものである。ちょっとした刺激（圧力の変動や温度の上昇）で簡単に水とメタンに分離してしまい、1気圧・15.6°Cのもとで分解すると元のハイドレートの体積の160倍もの体積のメタンガスが発生する。地上よりも海底に多く存在し、メタンハイドレートの分解によるメタンガスの発生は、水温の上昇による分解の影響で世界各地の海底でも観測されている。このまま気温が上昇すれば、海底や永久凍土に閉じ込められているメタンハイドレートが放出されると懸念する意見がある。メタンハイドレートの埋蔵量は定かではないが、一説によると現在確認されている天然ガスの内臓量の

数倍から数十倍あるといわれている。うまく取り扱って利用できれば大変有望な資源だが、大気中に放出されてしまうとメタンの強烈な温室効果により気温が上昇し、さらにメタンハイドレートの分解を促すという悪循環に陥りかねない。

○一酸化二窒素（亜酸化窒素，笑気ガス）（吸収波長：4.5, 8 μm）

一酸化二窒素（N₂O）は無色の気体で対流圏ではきわめて安定である。8 μm付近の赤外域に吸収帯があり、強い温室効果を示す。現在の大气組成における1分子あたりの放射強制力は二酸化炭素の約300倍と見積もられており、大気中における一酸化二窒素の寿命は114年と長い。

放出源は土壌や海洋からの自然起源のものがある。一酸化二窒素の主な自然の放出源は海洋、大気中のアンモニアの酸化及び土壌である。人為起源の排出としては、土壌中の微生物による窒素肥料の分解、バイオマス燃焼、牛の飼育及びナイロン製造などの工業活動がある。一方、大気からの消失過程は、成層圏での光解離などによる分解がほとんどである。分解された一酸化二窒素は成層圏においてオゾンに影響する窒素酸化物の起源と考えられている。

※放射強制力は通常、「大気上端で測った地球の単位

面積当たりのエネルギー変化率」として定量化され「W/m²」で表される。

2 学習指導要領について

中学校学習指導要領理科の第2分野（7）「自然と環境」では「自然と人間のかかわり方について認識を深め、自然環境の保全と科学技術の利用のあり方について化学的に考察し判断する態度を養う」とある。

3 実験

(1) 研究方法

授業に取り入れるために、温室効果ガスの検証実験を行う。

- ①1.5 L ペットボトルを2本用意（本研究で用いたのは Asahi 三ツ矢サイダー）し片方は空気用、もう片方は温室効果ガス用とする。空気用のペットボトルには、空気を乾燥させるためにあらかじめオープンで乾燥させておいたシリカゲル20 gを入れる。
- ②シリコン栓（6号）2つに、コルクボーラーで温度センサーよりも少し細い穴をあけ、その穴に温度センサーを挿す。同じようにして温度センサーが挿してあるシリコン栓を計2つ作る。
- ③出来上がった温度センサー付シリコン栓をペットボトルの口にし、空気用のペットボトル内の空気を乾

表1 各気体の濃度の変化と温暖化係数

	二酸化炭素	メタン	一酸化二窒素	クロロフルオロカーボン	ハイドロフルオロカーボン
産業革命前	約 280 ppm	約 715 ppb	約 270 ppb	存在せず	存在せず
2005 年の濃度	約 379 ppm	1774 ppb	319 ppb	251 ppt	18 ppt
大気中の寿命		12 年	114 年	45 年	270 年
温暖化係数	1	21	310	6500~1 万	140~1 万以上

※温暖化係数：赤外光吸収力と大気中濃度と放出後の経過時間によって決まる。

図2 温暖化係数の算出方法

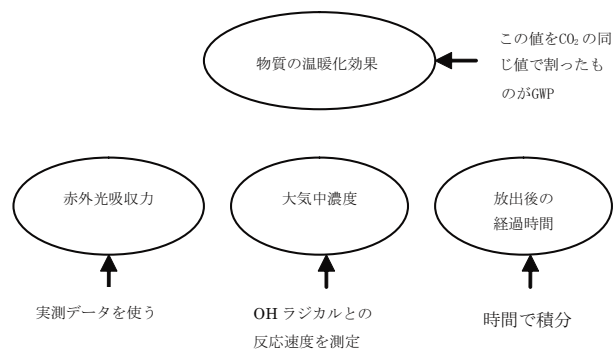


図3 二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素の大気中濃度の変化（気象庁より）

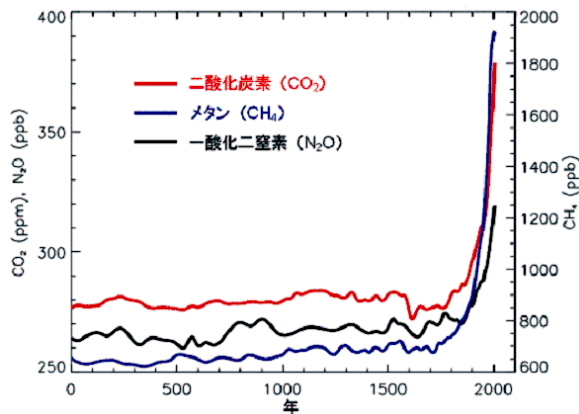
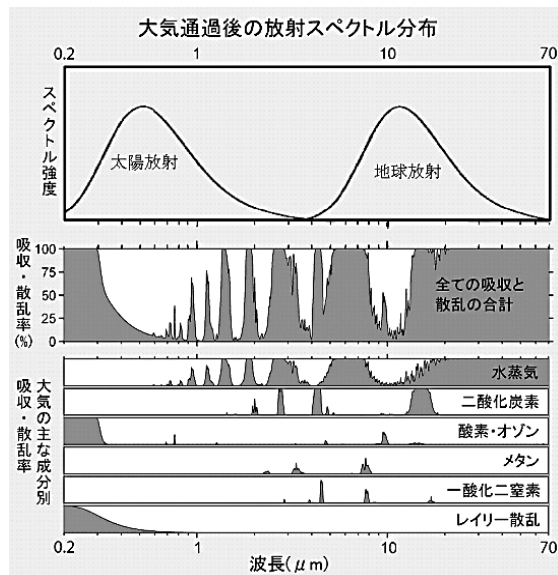


図4 太陽放射と地球放射のスペクトル分布と温室効果ガスの吸収波長



乾燥させるために一日以上放置する。

- ④温室効果ガス用のペットボトルに温室効果ガスを入れ、すぐに温度センサー付シリコン栓をする。
- ⑤ペットボトル二本を並べ、温度センサーをデジタル温度計に接続し、デジタル温度計の電源をONにする。二本のペットボトル内の温度が等しくなるまで待つ（等しい温度になりにくい場合は赤外線電球を照射し微調整する）。
- ⑥二本のペットボトルを並べ、赤外線電球を二本のペットボトルからの距離が等しくなるように置き、照射する。その後、時間による温度変化を見る。

本研究では、水蒸気による温室効果を懸念し、ペットボトルにシリカゲルを入れ、ペットボトル内の空気を乾燥させたが、念のため、空気中の水蒸気による温室効果の程度を知るために乾燥させた空気とそうでない空気でも実験も行った。結果は次のようになった。

実験の結果より、空気と乾燥させた空気の温度差は出なかったが、実験室内の湿度は日によって変わる不安定なものなので、常に同じ湿度の空気を用いて温室効果ガスとの比較を行うために、温室効果ガスの検証実験を行う際にはシリカゲルによって乾燥させた空気を用いた。

図5 実験風景



中学校学習指導要領 第4節 理科 より抜粋

第1 目標

自然に対する関心を高め、目的意識をもって観察、実験などを行い、科学的に調べる能力と態度を育てるとともに自然の事物・現象についての理解を深め、科学的な見方や考え方を養う。

第2 各分野の目標及び内容

[第2分野]

1 目標

(4) 生物とそれを取り巻く自然の事物・現象を調べる活動を行い、自然の調べ方を身に付けるとともに、これらの活動を通して自然環境を保全し、生命を尊重する態度を育て、自然を総合的に見ることができるようにする。

2 内容

(7) 自然と人間

微生物の働きや自然環境を調べ、自然界における生物相互の関係や自然界のつり合いについて理解し、自然と人間のかかわり方について総合的に見たり考えたりすることができるようにする。

ア(イ) 学校周辺の身近な自然環境について調べ、自然環境は自然界のつり合いの上に成り立っていることを理解するとともに、自然環境を保全することの重要性を認識すること。

3 内容の取り扱い

(8) 内容の(7)については、次のとおり取り扱うものとする。

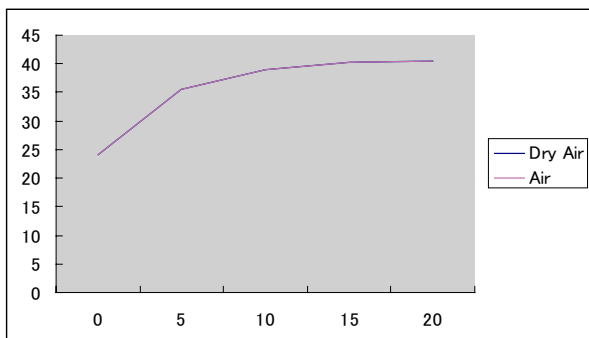
イ アの(イ)の自然環境について調べることにについては、学校周辺の生物や大気、水などの自然環境を直接調べたり、記録や資料を基に調べたりする活動などを適宜行うこと。

第3 指導計画の作成と内容の取扱い

2 (2) 生命の尊重や自然環境の保全に関する態度が育成されるようにすること。

今回、最も温度差の出る赤外線電球からペットボトルまでの距離、床から赤外線電球までの距離、赤外線電球の角度を模索したところ、ペットボトルが近すぎ

表2 空気と乾燥空気での実験結果



ペットボトルと赤外線電球の配置

では二つのペットボトルに均等に赤外線をあてるのが難しく、ペットボトルの下部に赤外線を当てると、気体が赤外線を吸収、放射することによって生まれた熱が温度センサーの部分まで上昇してくるまでの時間差によって、デジタル温度計の反応が遅くなる。また、シリカゲルも熱せられてしまい、純粋な気体同士の温度差が測れないと考察し、赤外線電球からペットボトルまでの距離、床から赤外線電球までの距離はともに15 cmで、水平に照射し実験を行った。

今回、実験に使用した温室効果ガスは二酸化炭素(比熱: 37.15 J/mol·K)、メタン(比熱: 35.68 J/mol·K)、ブタン(比熱: 99.17 J/mol·K)、一酸化二窒素(比熱: 38.83 J/mol·K)の四種類である。

図6 二酸化炭素の実験結果

(赤外線電球からペットボトルまでの距離: 赤外線電球の高さ)

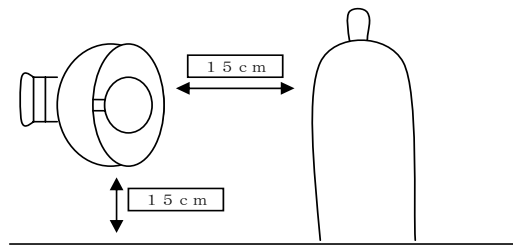


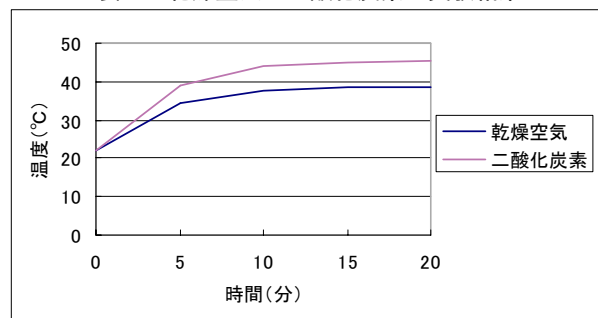
表3 二酸化炭素の実験結果

(赤外線電球からペットボトルまでの距離: 赤外線電球の高さ)

距離(高さ)	最大温度差
7 cm: 3 cm	1.5°C
2 cm: 8 cm	4.3°C
3 cm: 3 cm	2.3°C

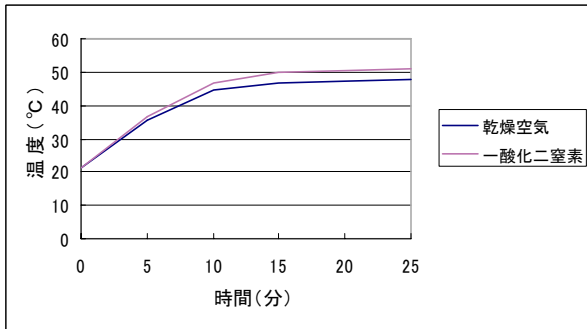
(2) 実験結果

表4 乾燥空気と二酸化炭素の実験結果



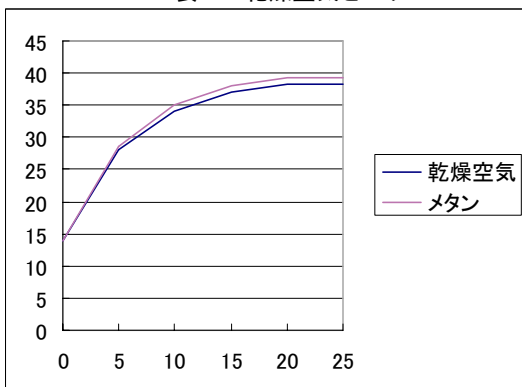
最大温度差7.8度

表5 乾燥空気と一酸化二窒素の実験結果



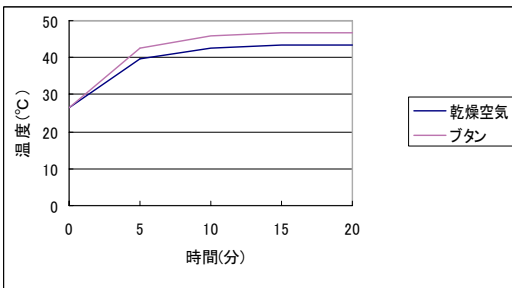
最大温度差3.2°C

表6 乾燥空気とメタン



最大温度差1.2°C

表7 乾燥空気とブタンの実験結果



最大温度差3.4°C

(3) 考察

今回の実験では1.5 Lのペットボトルを使用したので、ペットボトル内が注入した温室効果ガスで満たされたと仮定すると $1.5 \div 22.4 = 0.06696 \text{ mol}$ の温室効果ガスがペットボトル内に存在することになる。つまり、ペットボトル内に存在にするそれぞれの分子の数は $0.06696 \times 6.02214179 \times 10^{23}$ 個である。

○二酸化炭素

今回用いた4つの気体の中で最も温度差が大きかった。二酸化炭素の温暖化係数は他の温室効果の基準となる1であるが、大気中の寿命を特定できないため、IPCC(2007)では滞留時間を示さず、濃度減少を時間の応答関数で示す方式をとっている。よって温暖

化係数の基準となる二酸化炭素だが、数値は曖昧な部分がある。また、赤外線の吸収波長域のみに着目すると、二酸化炭素が最も波長域が広いので、温度差が大きく出たと思われる。二酸化炭素は放射強制力が 1.66 W/m^2 で最も大きいので、こういった結果になったと思われる。

○ブタン

二酸化炭素に次いで温度差が大きかった。ブタンの温暖化係数ははっきり算出されていないが、他の温室効果ガスの温暖化係数の傾向から考えると、炭素が多く含まれている気体の温暖化係数の方が大きいことから、ブタンの温暖化係数の方が大きいと思われる。また、ブタンはメタンに比べC-H結合が多い分、振動する部分も多いと思われるのでメタンよりは温度差が大きかった。

○一酸化二窒素

ブタンとほぼ同じ温度差を示した。一分子あたりの放射強制力は二酸化炭素の300倍と言われているが、 W/m^2 に直すと 0.16 W/m^2 と二酸化炭素を大きく下回るのでこのような結果になったと思われる。また、メタンと比較すると一分子あたりの放射強制力は12倍である。

○メタン

最も小さい温度差を示した。一分子あたりの放射強制力は二酸化炭素の25倍と言われているが、二酸化炭素の温度上昇に比べ、メタンは乾燥空気との温度差がとて小さかった。

放射強制力に着目すると、一酸化二窒素よりメタンのほうが大きいのだが、温度差は一酸化二窒素の方が大きく出た。放射強制力は大気中濃度にも関係しているので、放射強制力が高いからといって温度上昇が大きいわけではないことがわかった。また、温暖化係数は赤外光吸収力と大気中濃度と放出後の経過時間で決まるので、温暖化係数が大きいからといって、温度上昇が大きくなるはならなかった。赤外光吸収力の大きさが、そのまま温度上昇につながるからと言われると、そうではないのかもしれない。また、温暖化係数の値は、大気の組成が現在のまま永久に維持されると仮定したうえで計算されており、二酸化炭素の濃度が増加すれば新たな二酸化炭素排出に対する放射強制力の値が小さくなり、メタンを含む他の地球温暖化気体の温

暖化係数は増加することになる。つまり、二酸化炭素以外の温室効果ガスの温暖化係数が高いのは、今のところ大気中の濃度が低いからであり、濃度が高くなればそれらの温暖化係数は下がることになる。よって、温暖化係数が大きければ温度上昇が大きいということにはならない。

一分子あたりの放射強制力の強弱と実験結果が合わない原因として考えられるのは、使用した赤外線電球の波長などがあげられる。今回用いた赤外線乾燥用電球ではなく、赤外線照射用電球を用いるとまた違った結果になると思われる。放射する赤外線の波長域が広い電球または、さまざまな赤外線電球で試してみることで、より信憑性のある実験結果になっていくと思われる。

4 総括

実験を通して、温室効果ガスは乾燥空気に比べ赤外線吸収による温度上昇が大きいことが分かった。放射強制力は通常「大気上端で測った地球の単位面積当たりのエネルギー変化率」として定量化され、「 W/m^2 」で表されるので、そういった意味では二酸化炭素の方が、放射強制力があるのだが、メタンや一酸化二窒素は一分子あたりの放射強制力がメタンの何倍もあるので温室効果ガスとして警戒されていることを知った。

今回の研究で授業計画も考えたが、中学校第3学年にあたるこの分野は、実際の学校現場では授業として数時間をかけて実施するケースは少ない。ほとんどの学校では「自然の人間」の一つ前の分野の授業を終わらせるのがやっとだと思われる。その上、中学校第三学年ということで、高校受験が間近に迫っており、授

業時間に余裕があっても、高校受験のために1,2学年の復習に力を入れるケースが多い。しかし、環境教育の充実が求められている現代に、この「自然と人間」の分野は欠かせなくなってくる。よって授業は一時間分が理想だと思われる。しかし、考察でも述べたように、今回行った実験では赤外線電球を照射する時間が15～25分であるため、授業として実施する際には、赤外線を照射している時間に生徒は時間ごとに温度を測定しながら何を行うか、時間配分を工夫しなければ、生徒は暇を持て余してしまうかもしれない。また、今回用いたデジタル温度計は一般的な中学校にはあまりないと考えられ、あっても授業で各班に一つないし二つ配るほどはないと思われる。この実験を授業で行うためには、中学校の実験で用いられることが多いアルコール温度計を使って実験できるように工夫しなければならない。

参考文献・参考 URL

- (1) 中学校学習指導要領解説 理科
- (2) 気象庁
- (3) ALDRICH Chemistry (2009-2010) Handbook of Fine Chemicals
- (4) The Index of Laboratory Chemicals (2008)
- (5) ナカライテスク 総合カタログ (2007-2008)
- (6) ADVANTEC ホーム ページ http://www.advantec.co.jp/japanese/hinran/tanpin/26_822.html
- (7) 文部科学省 新高等学校学習指導要領解説 理科編
- (8) 裳華房「生化学の魔術師—ポルフィリン—」 森正保著 (1990年)

(2010. 8. 9 受理)