

第1章 プロローグ

近年、地球温暖化によりシベリアの永久凍土の融解が加速している。それに伴い、地中に眠っていた大量のメタンガスが大気中に放出されており、北半球の全ての永久凍土が溶けると温室効果ガスが現在の3倍になると危惧されている。

1969年、アポロ11号が史上初めて月面着陸に成功してから、人類は地球単位で物事を考えられるようになり、次第に温暖化を深刻な問題として受け止めるようになった。今日、地球温暖化の主な原因として挙げられているのが、二酸化炭素ガスやメタンガスなどによる温室効果である。そこで我々は、計測工学的見地からこの二種類のガスの温室効果による温度上昇を検証するため、装置の開発、温室効果の検証を実験的に行うことを本研究の目的とした[1]。

この研究から、地球温暖化に及ぼす温室効果ガスについて第三のアプローチが提供できることが期待される。

第 2 章

温室効果検証装置

2.1 温室効果研究装置の概要

本装置は地表、大気、宇宙の関係を簡略的に模擬している(図2.1)。 P_R 、 P_E 、 P_F はそれぞれ黒体放射板からの放射、黒体放射板に入る電力、総合的なかえり熱パワーである[2]。図1より黒体放射板のつりあいの式は、

$$P_R = P_E + P_F \quad (2.1)$$

である。

地球温暖化は、地表に降り注いだ太陽エネルギーが、温室効果ガスによって、宇宙に発散されにくくなっていることが原因だとされている。そのため、装置内の仕組みとしては、黒体放射板を地上、導管内の対象のガスを大気、液体窒素を入れた発砲スチロールを宇宙と模擬し、地表を出発点とした熱放射、温室効果ガスとの関係を装置化している。ガス容器内の二酸化炭素ないしメタンガス濃度を計測、また黒体放射板に任意のパワーを加えることができ、放射板自体の温度を計測することも可能である。

図2.2は室内において温室効果を模擬している研究装置である。

装置内の仕組みとしては、黒体放射板を地上、導管内の測定対象ガスを大気中、液体窒素を入れた発砲スチロールを宇宙に見立てている。この装置は管内の二酸化炭素ガスないしメタンガスの濃度を変化させることにより各濃度で温室効果を研究することが可能である。黒体放射板は電源電圧から任意の印加により加熱される。印加されたエネルギーを液体窒素側のみに放射させるために、黒体放射板の裏側には追温板が設置されている。追温板と黒体放射板の間には熱電対が取り付けられており、温度差を常に零度に保つよう、トランジスタによるスイッチング回路で追温板をフィードバック制御している。また、黒体放射板の温度を計測するために、追温板側に氷を零度基準とした熱電対を取り付けてある。つまり、フィードバック制御の稼動範囲で熱電対の温度差は黒体放射板の温度と等しいといえる。

装置内の攪拌機はガスを一様に混ぜるためのものである。また混合ガス容器と液体窒素容器の境には使用して、ガスの混合を防いでいる。

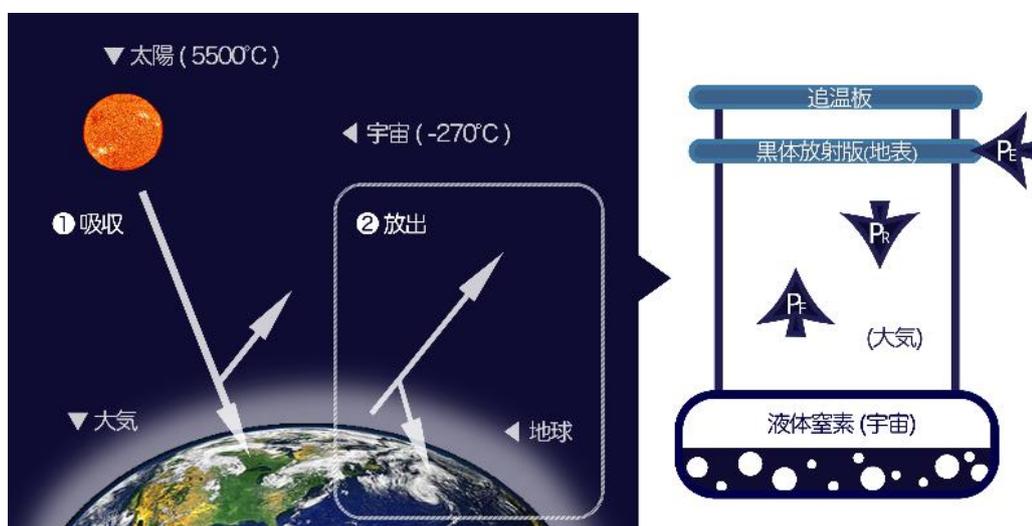


図 2.1 地表、大気、宇宙を装置により模擬

2.2 従来の研究との差異

地球温暖化に及ぼす温室効果ガスの研究は、現在の大気を対象とした屋外での観測、また様々な大気モデルを仮定した計算機シミュレーションの双翼によって多岐にわたり行われてきた。しかし、屋

内での装置による実験的検証というのはこれまで行われてきていない。加えて、第三のアプローチとして改良を重ねられてきた本研究装置だが、従来は黒体放射板の温度を調節できないなど、計測範囲に限界があった。

そこで今年度の研究では、黒体放射板（地表）を任意の温度に設定できるようにするため、黒体放射板の裏側に追温板を取り付け、二層構造にした。また、温度上昇は追温板から計測することができる。温度制御システムプログラムのブロック線図は図2の通りである。

加えて、地球温暖化の火付けともいわれている第二次産業革命時(1850年ごろ)の二酸化炭素濃度278[ppm]を模擬できるよう、混合ガス容器を1.8[m]から2.3[m]まで延長。装置内の二酸化炭素ガス濃度を97 [%]に設定することで再現が可能となった。



図 2.2 混合ガス容器 改良前(左)と改良後(右)

2.3 黒体放射板の改造

今年度は黒体放射板を任意の温度に設定するため黒体放射板の裏側に追温板を取り付け、二層構造にした。黒体放射板の作成は厚さ 50 (μm) のアルミ板に直径 80 (μm) の銅線を 5 (mm) 間隔で波上に接着、その上より黒色のラッカースプレーで黒色に着色した。また、追温板も同様の手順で作成。黒体放射板の熱放射の向きを制御するために黒体放射板と追温板の間に熱電対を内側から 4 点で取り付け、LabVIEW で温度の制御が行えるようにした。追温板側には黒体放射板の温度を計測するための熱電対が取り付けられている。これは、黒体放射板側に取り付けるとヒーターと熱電対が直接接触することになるため、追温板側に取り付けられている。

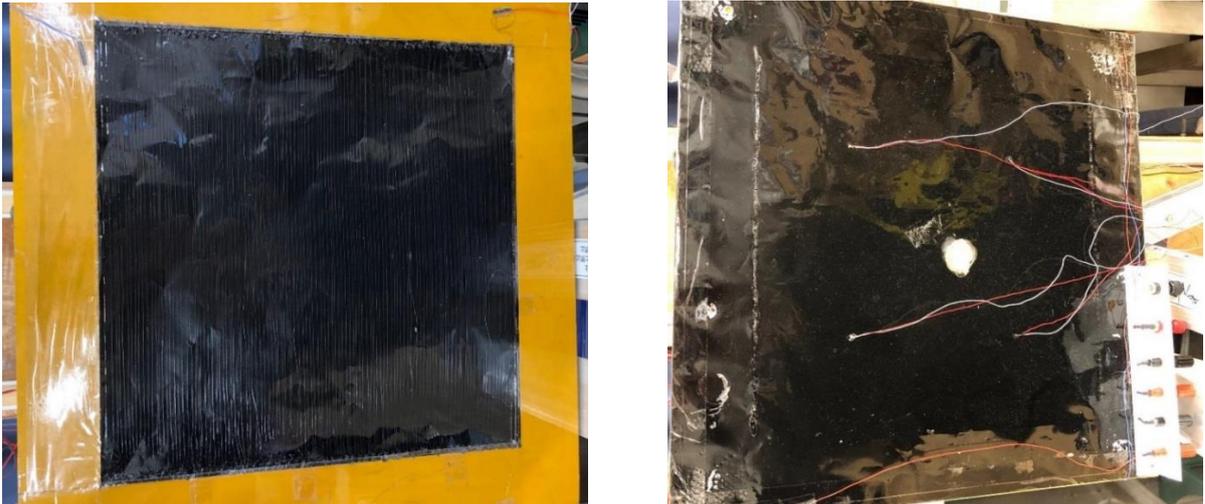


図 2.3 黒体放射板（左図）と追温板（右図）

2.4 混合ガス容器の概要

長さ 2.3 [mm], 内寸 0.3 [m] × 0.3 [m] の容器を用意した. 上側は, 厚さ 50 [μ m] のアルミ板の上に直径 80 [μ m] の銅線を 5 [mm] 間隔でつけた黒体放射板を取り付けてある. 機密性を確保するために継ぎ目にはコーキングをしている. 下側は, 液体窒素を溜める発泡スチロールを置き, 混合ガス容器と発泡スチロールとの境には赤外線を通すポリ塩化ビニリデンフィルム使用して外気との混合を防いでいる.

容器の内側には, 赤外線反射率を上げるために銅テープを貼り付けている. また装置の側面には図 2.4 のようなガス抽入口があり, 内部へのガスの流入や管内の濃度の測定を行う穴として使用している. また液体窒素をいれておく発泡スチロールとの間で機密性が失われないように直結させた.



図 2.4 ガス注入口

2.5 温度制御システム

図 2.5 は温度制御システムの概略図である. 黒体放射板は電源から任意の出力により加熱される. また, 黒体放射板からのエネルギーを液体窒素側のみに放射させるため, 黒体放射板の裏側には追温板が設置されている. 追温板は黒体放射板と同温度を保持するよう (エネルギーの移動をなくすため).

エネルギーは高いところから低いところに落ちる), 両者間に熱電対を直列で交互に4点(熱電対の感度上げるため)取り付けており, 温度差によって生じる微小の電圧を4倍で計測することで, 温度を逆算し, 追温板を用いてフィードバック制御している.

また, 黒体放射板の温度を計測するために, 追温板に氷を零度基準とした熱電対を取り付けている(ここでの熱電対の温度差は黒体放射板の温度と一致する).

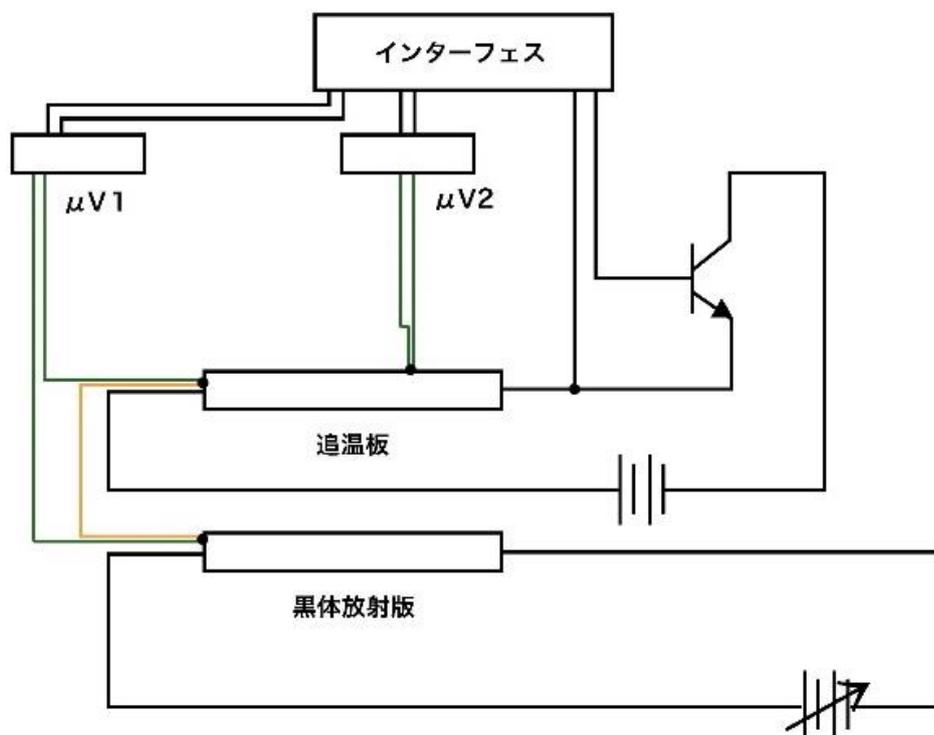


図 2.5 温度制御システム

2.6 フィードバックプログラム

追温板に入る電源電圧をスイッチング回路により温度制御している. 電源電圧を読み取り, 管内温度計測を同時に動作できるように LabVIEW を用いてプログラムを作成した. 図 2.6 のインターフェースは, NATIONAL INSTRUMENT 製の「USB6009」を使用した.

図 2.7 (a) のプログラムは, 1[s]間隔でデータを取得している. 熱電対と μV 計 1 を使用し, 黒体放射板と追温板の温度差を常に一定に保つよう, フィードバック制御を行うことにより, 黒体放射板からの熱放射を管内方向のみに向くよう調整している. 黒体放射板の温度が, 追温板より低くなると電源が ON になり, 追温板より高くなると電源が OFF になる.

2.7 トランジスタを用いた温度制御

トランジスタで ON/OFF 制御を行っている. そのときの回路を図 2.8 に表す. NPN 型の低周波数のトランジスタ (2SD718) を用いた. トランジスタとは, ベース・コレクタ・エミッタの3つの足がついており, コレクタ・エミッタ間の電流をベースに流す電流でコントロール(制御)できるというこ

とである。本研究ではインターフェースからの電流がベース電流になり，コレクタ・エミッタ間の電流を制御し，黒体放射板に電流を流している。

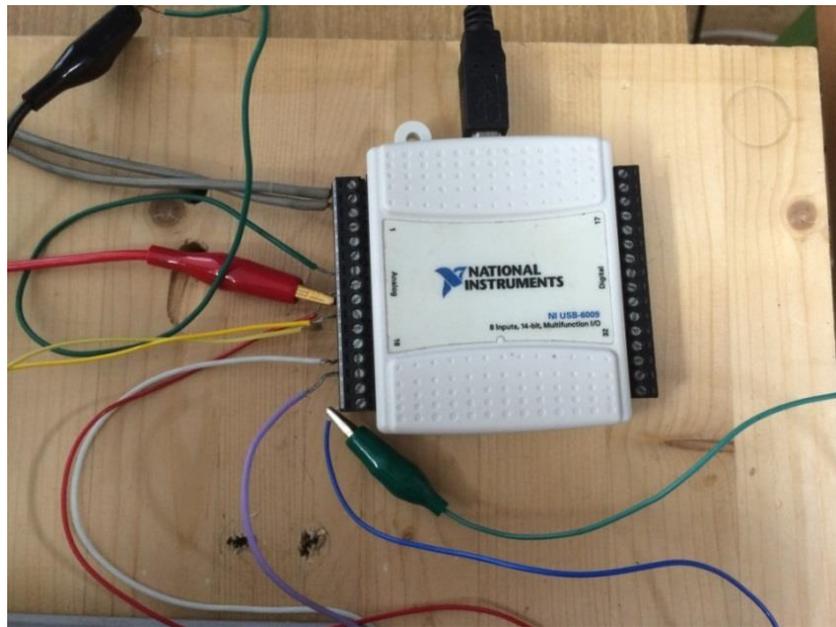


図 2.6 PC と電子回路間を繋ぐインターフェース

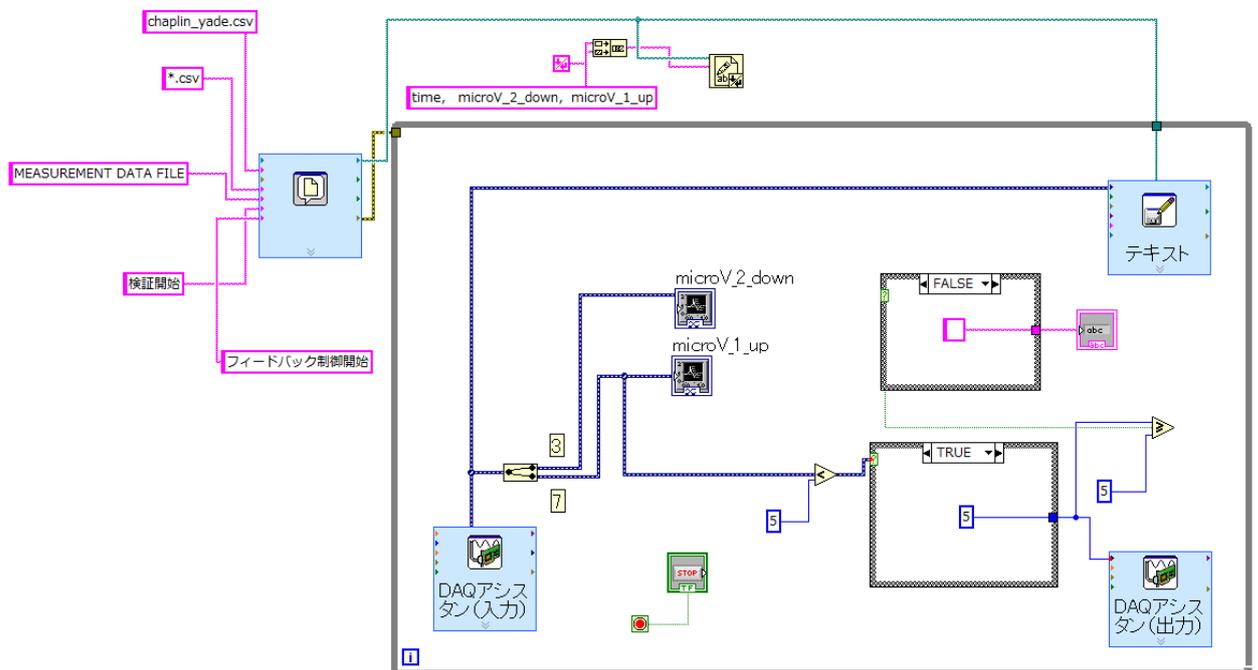


図 2.7 フィードバックプログラムのブロック線図

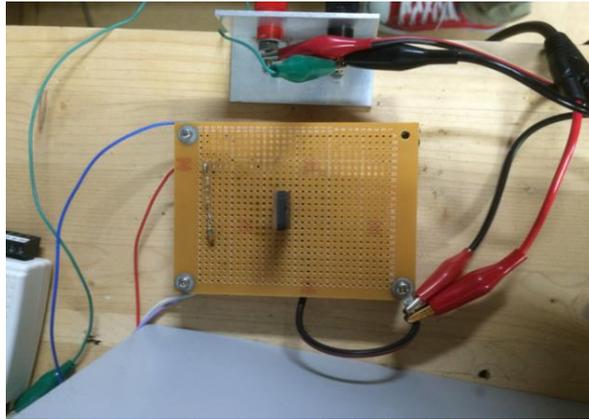


図 2.8 黒体放射板に入る電圧を制御する回路

2.8 攪拌器

混合ガス容器内の試験ガスを攪拌させるために攪拌器を取り付けた。図 2.9 が攪拌器である。風向は自然対流を考えて上向きにしている。実験前に 10 分ほど回し、その後、容器内の濃度構成を完了したら、自然流に戻すために 10 分ほどおいた後、実験を行っている。表 1 は平成 27 年度の研究内容から引用した。容器内の上中下それぞれで濃度計測した時の結果である。表 1 を見てわかるように攪拌器をつける前は、混合ガス容器の下側に二酸化炭素ガスが溜まってしまい濃度が一定にならなかったが、攪拌器で十分攪拌することによって実験中の管内濃度を一定に保つことができた。よって容器内の濃度はどの部分をとっても一定と考える。

表 1 導管内に 50%の二酸化炭素を溜めた時の濃度

	上から 0.5mの位置[%]	上から 1.0mの位置[%]	上から 1.5mの位置[%]
攪拌器なし	47.8	48.9	51.1
攪拌器あり	51.1	51.1	51.1

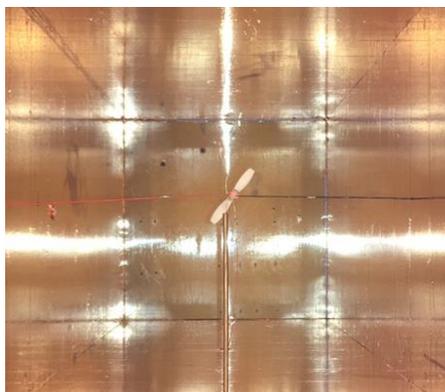


図 2.9 攪拌器

2.9 二酸化炭素濃度計の校正方法

実験中の導波管内の二酸化炭素濃度を測定するために、図 2.9 の新コスモス電機株式会社製 (XP-3140) を使用した。しかし濃度計が空気中での正確に測定可能であるが実際に実験中は測定のベースは窒素であるために二酸化炭素の数値が変動したため濃度計の構成を行うことにした。構成には図 2.10 のグラフを使用する。

1) ~ 5) の手順で濃度計の設定を行った。

- 1) ビニール袋に窒素を 100%溜めて、二酸化炭素を 0%にする。
- 2) 袋に濃度計を入れてゼロ点を設定する。方法は濃度計の AIR ADJ. を 3 秒程度長押しする。
- 3) ビニール袋に二酸化炭素を出し入れしてビニール袋内の濃度を 100%に近づける。
- 4) 3 の状況下での濃度測定を行う。
- 5) 表示値を図 2.10 のグラフで読み取り真値 (構成して出た適正な濃度) を読み取る。

以上で導きだされた値を実験較正值とした。

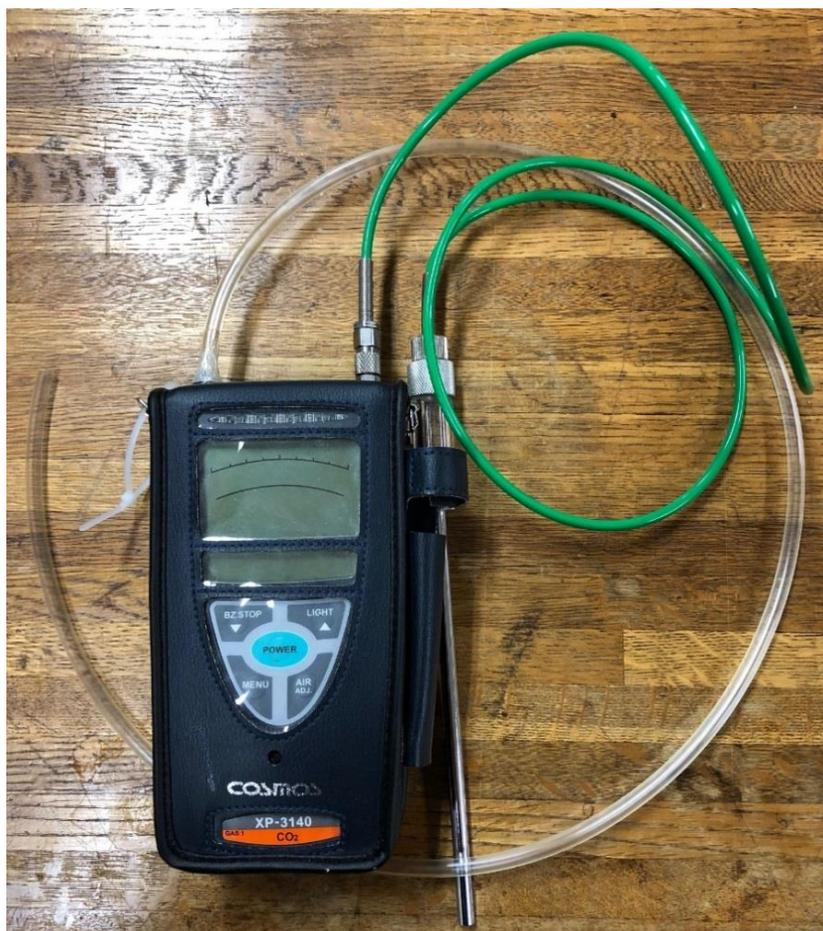


図 2.10 二酸化炭素濃度計

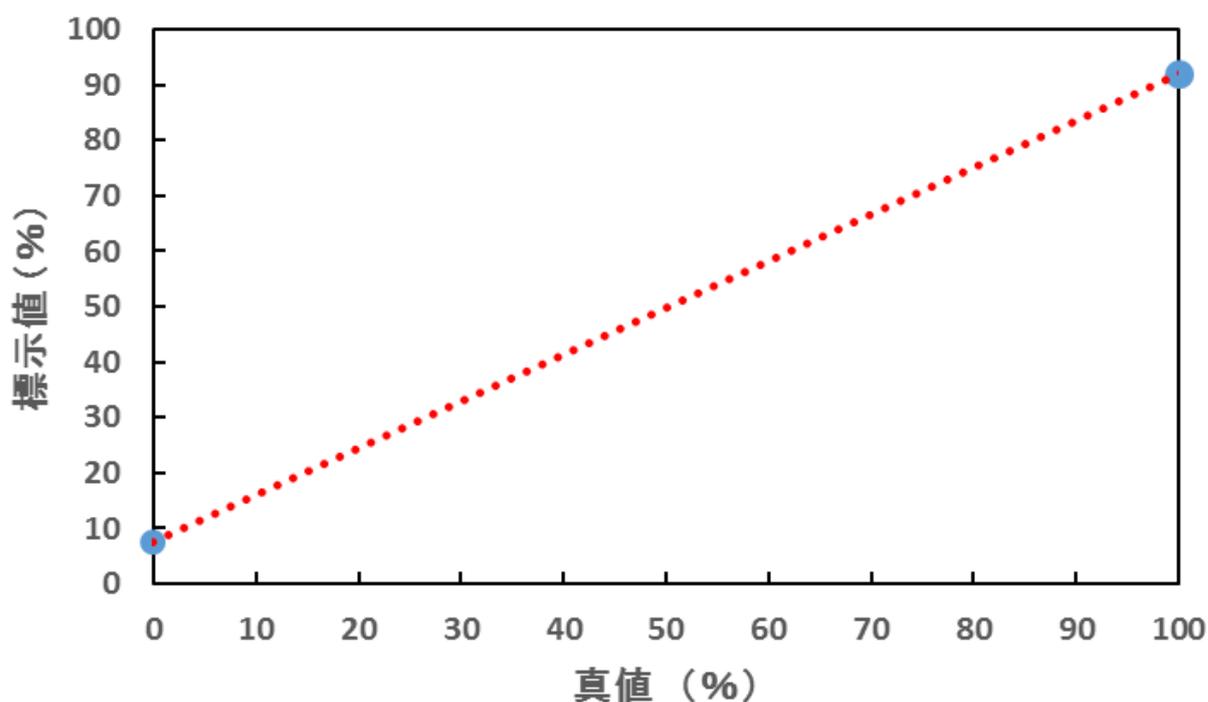


図 2.11 二酸化炭素濃度計の校正

2.10 熱電対を用いた熱計測

熱計測には熱電対を使用した。熱電対とは、異なる金属が接触する際に生じる微小の電圧を利用したもので、接触部に温度差ができると、発生する電圧の大きさに差が生まれ、熱電対全体で電位差が生じる。本研究では、銅・コンスタンタンを使用した。

熱電対を黒体放射板と追温板との間に4点直列で交互に取り付け、温度差によって生じるマイクロ電圧を4倍にして計測することで、より正確に温度を逆算し、追温板を用いてフィードバック制御を行った。

また、黒体放射板の温度を計測するために、放射板に氷をゼロ度基準とした熱電対を取り付けた。原理は同様で、ゼロ度である氷と放射板の温度差を計測することで、黒体放射板の温度を測ることができる。

2.11 液体窒素の取り方

今回の実験で宇宙の温度 3K を模擬するために、液体窒素を使用した。手順は、1) ~ 10) の通りである (エレクトロニクス研究所資料より抜粋)。

- 1) 皮手袋を着用する。
- 2) 蒸気を飛ばすために扇風機を強で回す。(火災報知器の誤作動を防ぐため)

- 3) ハカりに汲み取る容器を置く。
- 4) ポンプのブロー弁を開いて、パイプを容器に挿入する。
- 5) 接続用真空ゴムをしっかりとめ込む。
- 6) ブロー弁を閉める。
- 7) 汲み取り容器を3分くらい冷やす。
- 8) ゴム球をもみながら液体窒素を汲み出す。
- 9) 汲み取り終わったら、ブロー弁を開き、パイプを外す。
- 10) 全てを元に戻して終了。

2.12 ガスの取り扱いについて

実験では2種類の温室効果ガス、二酸化炭素ガスとメタンガスを使用した。これら2種類のガスはそれぞれ、人体への有害性や爆発の危険性があるため取り扱いに十分の注意を払った。対策方法について、以下に示す。

1) 二酸化炭素ガス

二酸化炭素ガスは、30kg のガスボンベを使用しており、これを気体状態の体積に換算すると、二酸化炭素は44mol であるため、

$$\frac{30 \times 10^3}{44} \cong 681.82(\text{mol}) \quad (2.2)$$

であり、体積に換算すると、

$$\begin{aligned} 22.4 \times 681.82 &\cong 15272.73(\text{L}) \\ &\cong 15.3(\text{m}^3) \end{aligned} \quad (2.3)$$

となる。

本研究室は縦横高さ7.5(m) × 10(m) × 2.5(m)、体積187.5(m³)の部屋であるため、万が一密室状態でガスが漏れた場合、0.2(m)ほどの有毒ガスが床上に広がる(二酸化炭素は空気より重い)。室内全体を覆うわけではないが、十分に危険であるといえる。そのため、実験時は常にドアや窓を開け、実験時は必ず喚起を行った。また、部屋の換気扇は常時ONにし、安全性の面を保障した(換気扇は室内の空気を一時間に一巡行う設計になっている)

2) メタンガス

メタンガスは可燃性ガスであり、空気や酸素と混合した場合、爆発範囲5~15%を満たした状態で着火源が存在すると爆発する。

今回はボンベを使用していたので最悪の事態を考慮し、メタンのガスボンベを屋外で保管し、抽出等も屋外で行った。また、ボンベの破損を防止するため、保護容器とブルーシートで囲い、安全面を確保した。



図 2.12 メタンガスポンベの保護容器

第3章

計算機によるシミュレーション

3.1 分光放射輝度

分光放射輝度とは、放射源の表面上の点からある方向へと放出される放射束であり、 1m^2 、 1sr (57.3° の立体角) での放射量を表す。まず、Spectral Cal®の Blackbody Calculator を使用して分光放射輝度を求めた[3]。図 3.1 は分光放射輝度を出す際の設定である。今回は、地表からの分光放射輝度になるため 288.15 K で設定している。図 3.2 は分光放射輝度である。

分光放射輝度を波数によって出せるようにプランクの法則を使って計算した。これは後で透過率と掛け合わせる際にプロット数を合わせるためである。プランクの法則は、

$$I(k) = \frac{2h}{c^2} \times \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{k_b T}} - 1} \quad (3.1)$$

である。 $I(k)$: 分光放射輝度 [$\text{W}/\text{m}^2/\text{s r}/\text{cm}^{-1}$]、 h : プランク定数 $= 6.626 \times 10^{-34}$ [$\text{m}^2 \cdot \text{kg}/\text{s}$]、
 ν : 周波数[Hz]、 c : 光速 $= 3 \times 10^8$ [m/s]、 k_b : ボルツマン定数 1.381×10^{-23} [$\text{m}^2 \cdot \text{kg}/\text{s}^2/\text{K}$]、
 T : 地球の平均気温 $= 288.15$ [K] である。しかし、公式を使ったがうまくいかなかったため、数値を合わせた。固定数 $\frac{2h}{c^2} = A$ と置き、spectral Cal の分光放射輝度と波数を代入して A を求める。例として spectral Cal の 600 [cm^{-1}] のときの 0.122 [$\text{W}/\text{m}^2/\text{s r}/\text{cm}^{-1}$] で計算をする。まず、

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = ck_1 = 100ck = 3 \times 10^{10} \times k \quad (3.2)$$

となり、 k : 波数 [cm^{-1}]、 k_1 : 波数 [m^{-1}] である。よって、

$$0.122 = A \times \frac{(3 \times 10^{10} \times 600)^3}{e^{\left(\frac{h \times 3 \times 10^{10} \times 600}{k_b T}\right)} - 1} \quad (3.3)$$

となり、 $A = 3.916 \times 10^{-40}$ となった。この A をプランクの法則に使用して、分光放射輝度と透過率のデータ数を合わせた。よって、分光放射輝度は

$$I(k) = 3.988 \times 10^{-40} \times \frac{\nu^3}{e^{\left(\frac{h\nu}{k_b T}\right)} - 1} \quad (3.4)$$

となり、この結果を元に、波数を変えて分光放射輝度が出せるようになった。

下の図 3.2 は分光放射のスペクトルの設定である。

黒電卓	
入力	結果
単位: <input type="text" value="ワット"/> <input type="text" value="波数 (cm-1)"/> <input type="text" value="ケルビン"/> 黒体のプロパティ: 温度: <input type="text" value="288.15"/> K 放射率: <input type="text" value="1"/> 最気後退の速度: <input type="text" value="0"/> km/s	放射 emittance: 390.929 W/m ² 放射輝度: 124.437 W/m ² /SR ピーク分光放射輝度: 0.136 W/m ² /sr/cm ⁻¹ ピークの波数: 565.065 cm ⁻¹
波数 <input type="text" value="3000"/> cm ⁻¹ 下限値 <input type="text" value="0"/> cm ⁻¹ 上限値 <input type="text" value="3000"/> cm ⁻¹	分光放射輝度: 0.000100424 W/m ² /sr/cm ⁻¹ (1.67804 e + 19 光子/J) バンドの放射輝度: 124.412 W/m ² /SR

図 3.1 Spectral Calc ®による分光放射のスペクトルの設定

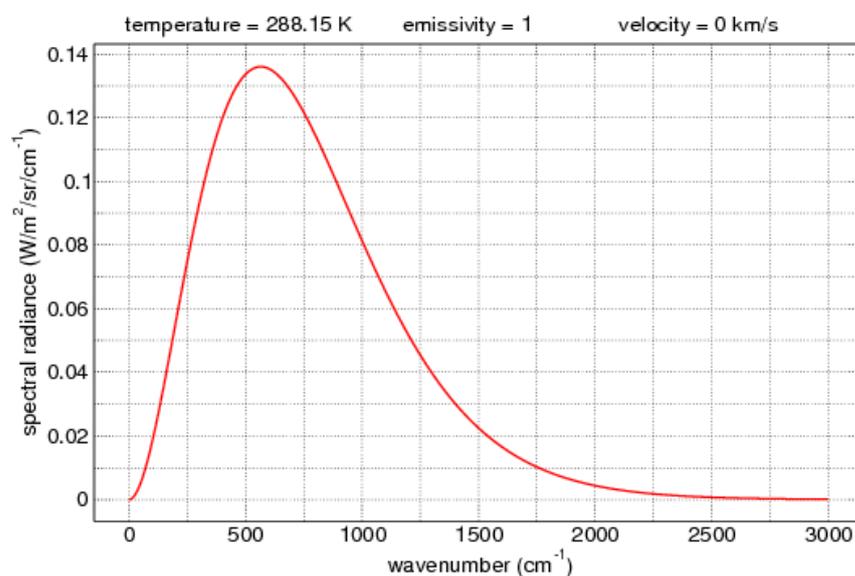


図 3.2 分光放射のスペクトル

3.2 ガス赤外線透過率

Spectral Cal ®の Gas - Cell Simulator で図 3.3 のような設定を行う。ガス温度は、地球の平均気温の 288.15 (K) に設定している。このデータベースを用いることによりあるセル範囲内における

自分で設定したガスの混合比率内での透過率を求めることが可能である。温室効果ガスは二酸化炭素を用いておりそれ以外のガスは窒素で設定する。気圧は大気圧で設定している。上記の設定をすることにより図 3.4 のようなある濃度における透過率を算出することが出来る。

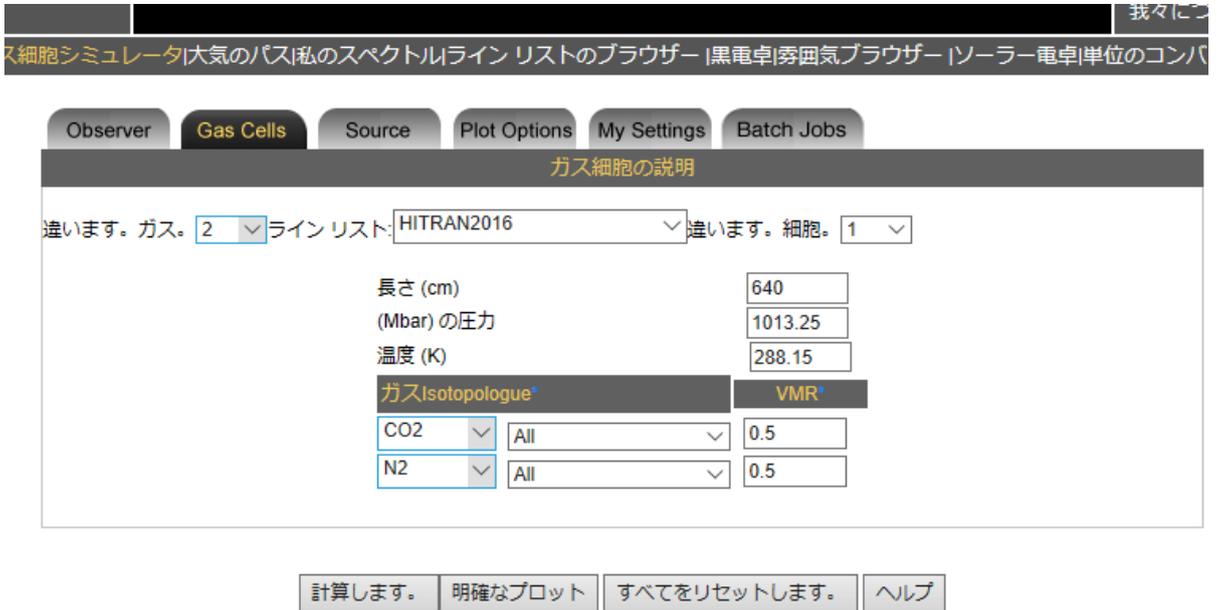


図 3.3 Spectral Calc[®] によるガス透過率の設定

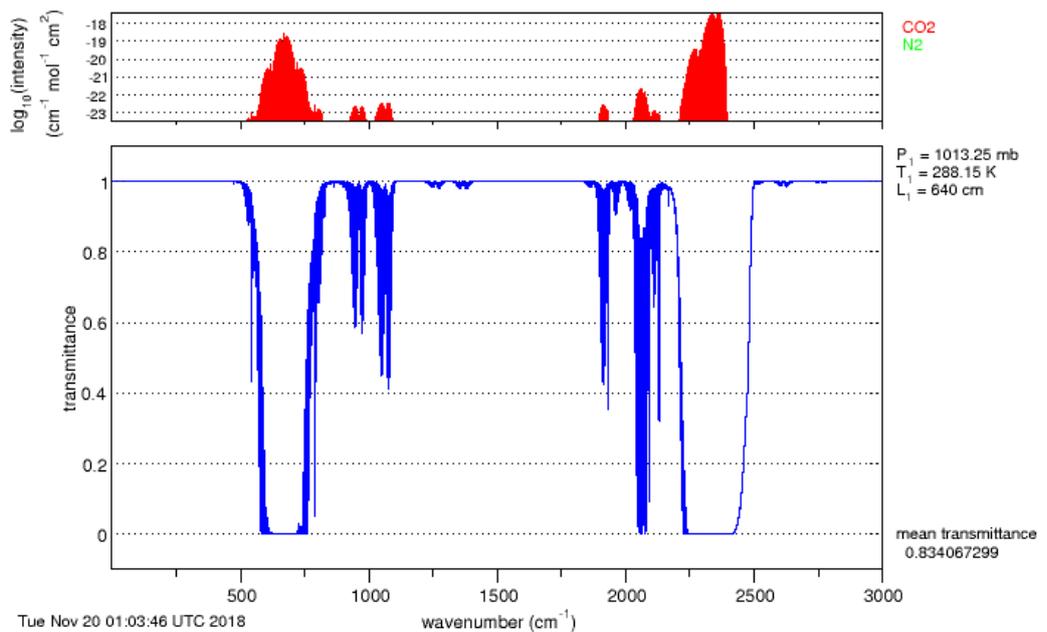


図 3.4 透過率 (N₂:50%、CO₂:50%時)

3.3 理論赤外線吸収率

理論吸収率は Spectral Cal[®] を用いて透過率と黒体放射板の分光放射輝度を算出し解析することによって求めることができるが透過率のデータ数が波長範囲 0~3000 の間に約 75 万ある。しかし分光放射輝度のデータ数が 500 ほどしかなく、同じ波長にての解析が不可能であるので分光放射輝度のデータ数を 75 万にするべく 3.1 章において分光放射輝度の公式を導き出し、それにより約 75 万プロットのデータを取得することが可能になった。これにより図 3.5 のような解析が可能になる。

水色のプロットは 3.1 章より求めた分光放射輝度 $I(k)$ である。それに約 75 万データある透過率をかけることにより透過率を含めた分光放射輝度を求めることができる。それは図 3.5 の朱色のプロットである。理論透過率を求める際にはこの 2 つの面積比より求めることができる。また理論吸収率はその逆数である。

3.4 一気圧の大気の高さ

実大気と装置との比較を簡略化するため、大気を装置と同じ形状と仮定し、1atm の空気の柱と考えることにした。地球上の全大気を標準気圧の 1atm で圧力は均一、また、シミュレーションでは赤外線吸収率に着目するため、温室効果ガスの中で最も代表的な吸収率を誇る二酸化炭素ガスを用いて検証を行うことにした。二酸化炭素ガス濃度は割合から求めた。また、基準は第二次産業革命時の二酸化炭素ガス濃度は 278 (ppm) である。

全体気における空気の柱の高さ $H(m)$ は、

$$\begin{aligned} H &= \frac{h}{a \times g} \\ &= \frac{1.01325 \times 10^5}{1.29 \times 9.8} = 8014.95 \text{ (m)} \end{aligned} \quad (2.1)$$

である。

次に、二酸化炭素ガスの空気の柱の高さ $H(CO_2)m$ は、

$$\begin{aligned} H(CO_2) &= H \times M(CO_2) \\ &= 8013 \times 278 \times 10^{-6} \approx 2.228 \text{ (m)} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$h: \text{標準気圧} = 1.013 \times 10^5 \text{ (Pa)} \quad a: \text{空気の重さ} = 1.29 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$g: \text{重力加速度} = 9.8 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad M: CO_2 \text{濃度} = 278 \times 10^{-6} \text{ (-)}$$

となる。

全大気を一気圧の空気の柱とすると、高さは 8014.95 [m] となる。また、第二次産業革命以前の二酸化炭素ガスの割合は同柱において、高さは 2.228 [m] となる

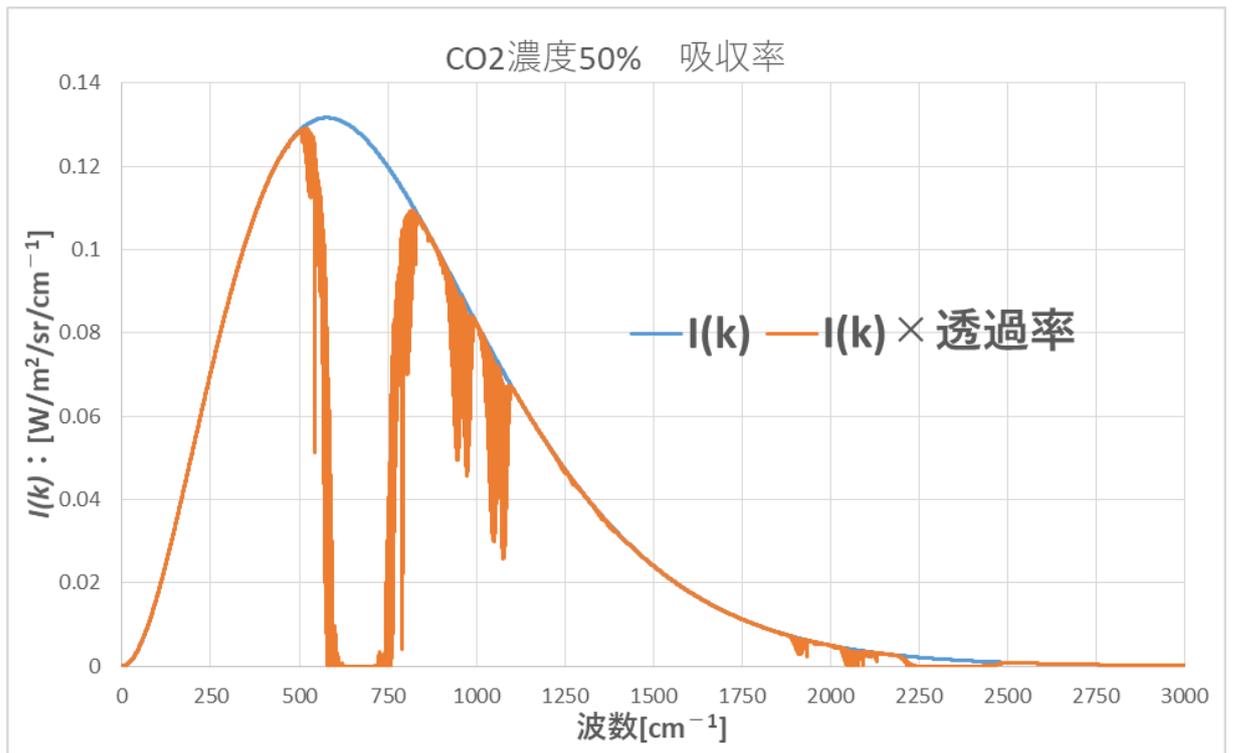


図 3.5 二酸化炭素50%における分光放射と透過率の関係

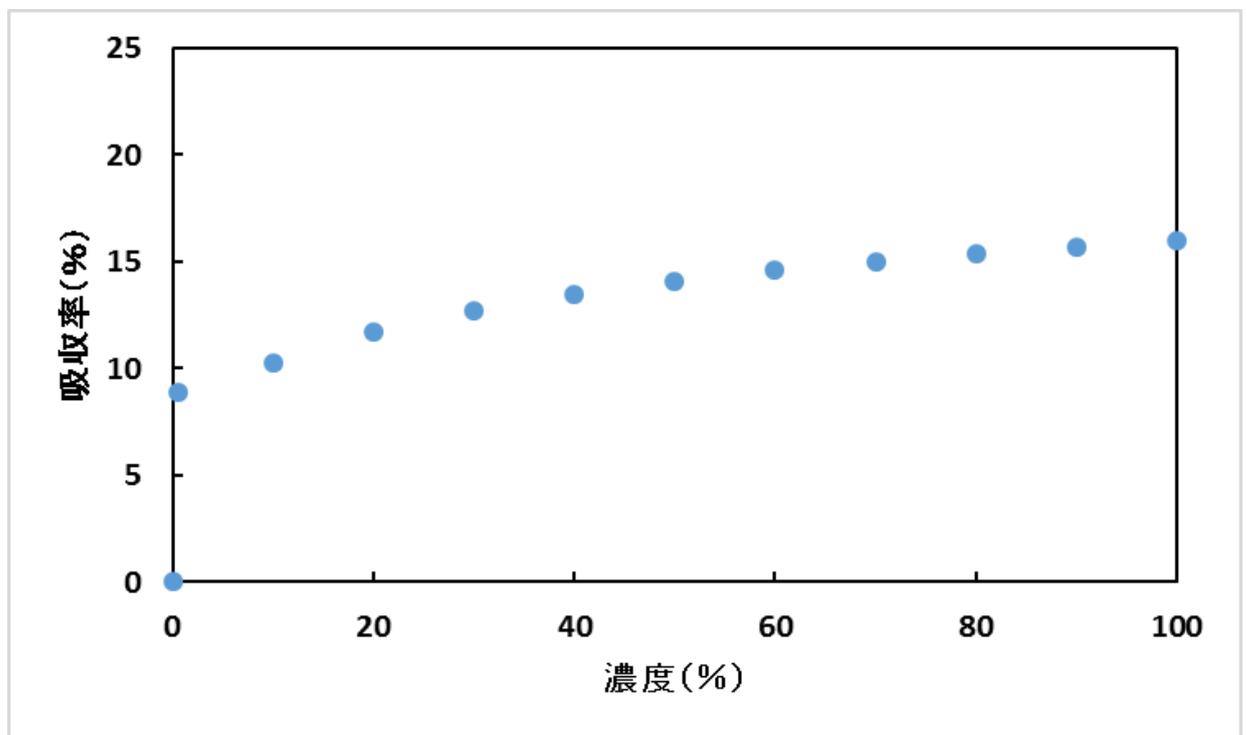


図 3.6 二酸化炭素の濃度と吸収率の関係

3.5 装置と大気と比較

Spectral Calc[®]を用いて全大気と本装置における二酸化炭素の吸収率の計算を行った。これは装置と実際の大気の状態を比較することで、どれだけ装置が実際の大気を模擬できているか検討するためである。

全大気を一気圧の空気の柱とすると、高さは 8014.95 [m]である。ここで、全大気における第二次産業革命以前の二酸化炭素ガスの割合は同柱において、高さ 2.228 [m]となる（1850 年代の二酸化炭素ガス濃度は 278 [ppm] である）。なお、これは 2.3 [m]の本研究装置が二酸化炭素ガス濃度 97 [%]になったときの状態と一致する。

以上の条件の下計算を行った結果、全大気における二酸化炭素ガスの吸収率は 4.2 [%]であった。また、同様の手順で装置内の吸収率も求めた。吸収率は温度によって変化するため、実際の大気に装置内の温度を合わせ、シミュレーションを行った。装置内の二酸化炭素ガスの吸収率は 4.3 [%]である。このことから、本装置は実際の大気の状態を模擬できているといえる。



図 3.7 全大気（一気圧）における二酸化炭素ガスの高さ

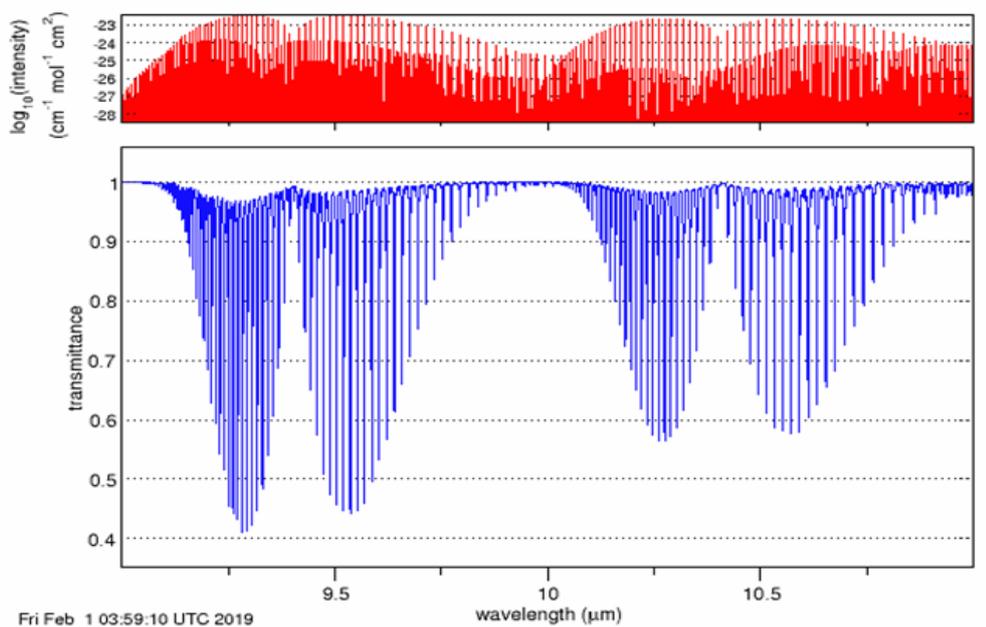


図 3.8 大気中の二酸化炭素ガスの吸収

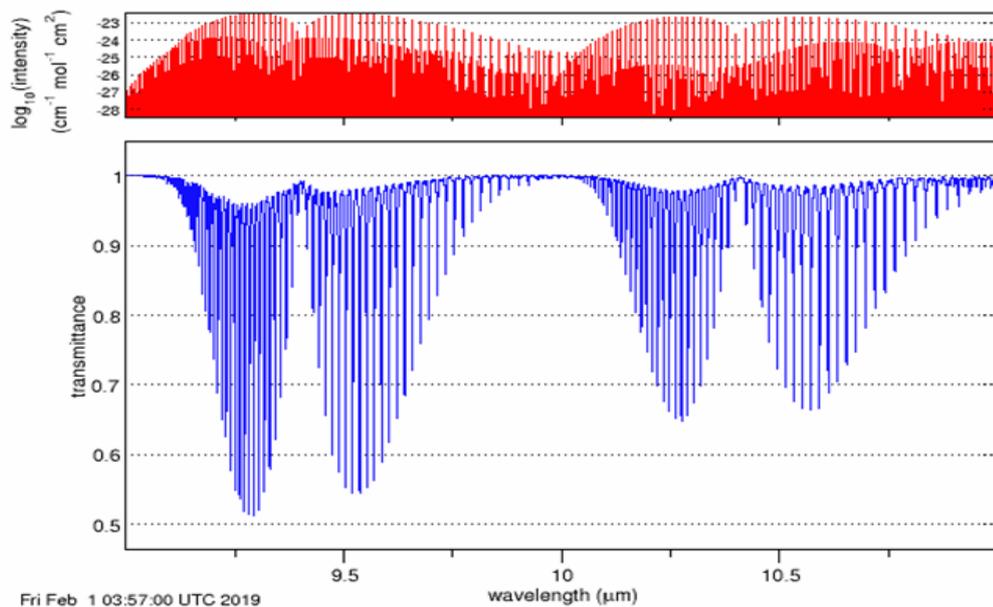


図 3.9 装置中の二酸化炭素ガスの吸収

第 4 章

二酸化炭素ガスの温室効果の検討

4.1 実験手順

1) ~ 7) の手順で実験を行った。

- 1) μV 計 1 のゼロ点 (室温) 設定をする。
- 2) 実験装置下部ラップ部分の結露を防ぐため、発泡スチロール内に乾燥窒素ガス (N_2) を入れる。
- 3) 発泡スチロールに液体窒素を入れる。先に入れることで導管内のガス濃度の変化を防ぐ。
- 4) 二酸化炭素ガス濃度計の較正をする。
- 5) 実験するガスを導管に溜め、導管内のプロペラを回し、ガスを一定にする。
- 6) 0 点基準の氷をセットし、 μV 計 2 と LabVIEW を起動させる。
- 7) 電源電圧に任意の電圧を入れて温度制御を行い、データを集め解析する。

以上にしたがって、本研究ではメタンガスと二酸化炭素の温室効果について検証する。ただし、メタンガス 0% のときと二酸化炭素 0% のときはいずれも乾燥窒素 100% のときである。

4.2 二酸化炭素ガスの温室効果

大気中の二酸化炭素ガス濃度は 18 世紀半ばから始まった産業革命を境に急激に上昇した。これは石油をはじめとする大量の化石燃料を燃やしてきたこと、またセメントの生産、森林破壊なども加わった結果だとされている。現在、1850 年に比べ 40 [%] 増加している。近年問題となっている永久凍土の融解で、土壌に含まれている炭素がメタンガスや二酸化炭素ガスとして大気中に放出される。永久凍土の融解がさらに進めば気温が上昇し、地球温暖化を増幅する恐れがあると言われている。また、図 4.1 は NASA のデータを参考に名古屋産業大学がまとめた図である[4]。これより二酸化炭素ガス濃度は現在も上がり続けていることがわかる。

第 2.2 章で記した通り、本装置において二酸化炭素ガス濃度 97 [%] は工業化以前の 278 [ppm] と一致する。実験では二酸化炭素ガス濃度を 0,10, 30,50,80,100 [%] で変化させ、二酸化炭素ガス濃度と上昇温度 T [$^{\circ}\text{C}$] の関係を図 5.2 にまとめた。

図 4.2 より二酸化炭素ガスは濃度 10 [%] で約 8 [$^{\circ}\text{C}$] の温度上昇があった。また温度は、二酸化炭素ガス濃度 50 [%] の状態で飽和しているといえる。

4.3 現実の大気との比較

図 4.2 は 0~100 [%] の二酸化炭素ガスの濃度変化は、100 [%] を 1850 年の状態としそれ以前、100~140 [%] の二酸化炭素ガスの濃度変化は、1882 年~2011 年の実大気の推移をまとめている。

同実験データから、二酸化炭素ガスは 50%(143ppm)付近で温度上昇が止まる、という興味深いデータが出た。これは第二次産業革命以前に二酸化炭素ガスによる気温上昇はすでに飽和していた、ということの意味している。また、産業革命以降の気温の変化を見ても大気中の二酸化炭素のように単調増加しているわけではなく、1850 年~1900 年頃、ないし 1940 年~1960 年代頃まではかえって低下しているように見える。

本研究から考察すると、大気の観測データは温度の上昇を示しているが、二酸化炭素ガスによる温室効果以外の要因を考える必要があるといえる。

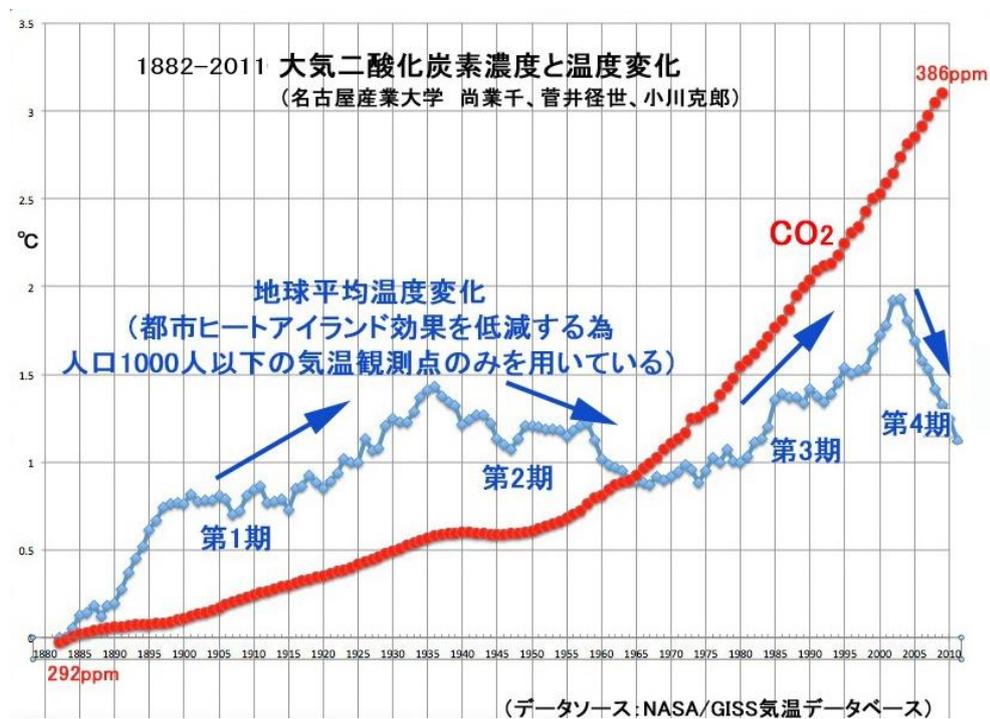


図 4.1 二酸化炭素ガス濃度変化と世界平均気温 [4]

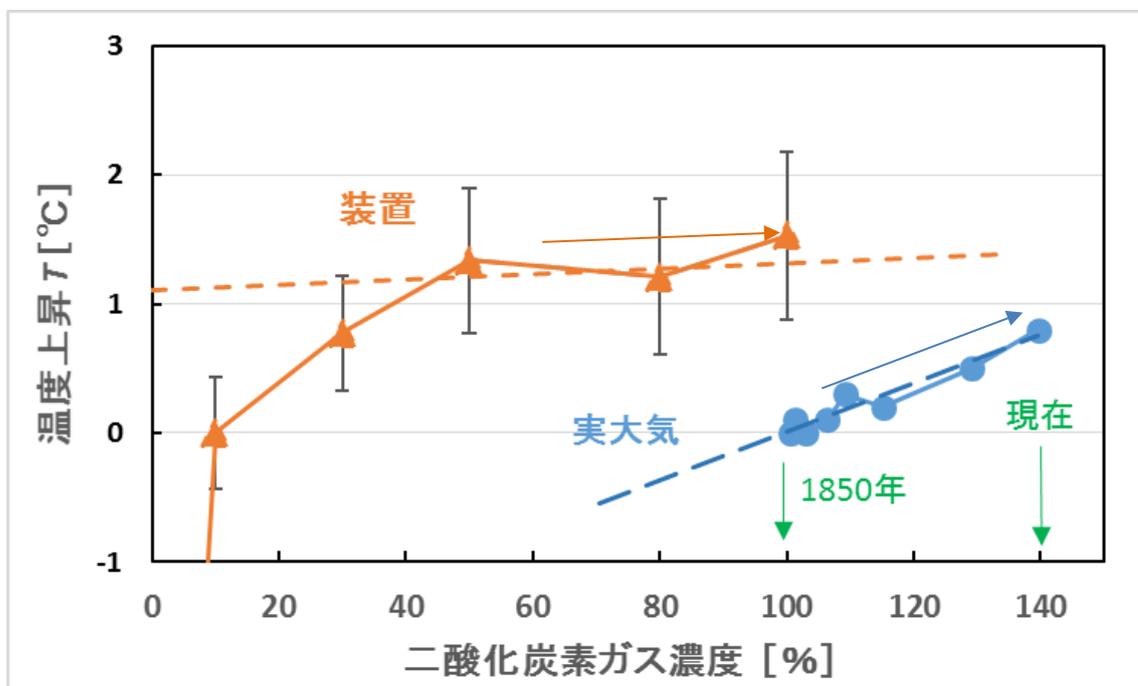


図 4.2 装置における濃度と温度上昇の関係

第5章

メタンガスの温室効果の検討

5.1 メタンガスについて

メタンガスとは、融点が -183°C 、沸点は -162°C 、露点が -65°C でり大気中に約 5~14%で爆発する危険性があるが、エネルギー源として有用な天然ガスの主成分である。

発生源は主に草食動物のゲップや糞などで1/4を占めるといわれており、無色無臭の気体で毒性は無い。また、図 5.4 は NASA のデータを参考にした[5]。図の通りメタンガスは第二次産業革命を境に急激に増加している。これは、家畜の大量管理による資本主義の弊害、人為的な問題が大きく絡んでいるといえよう。

5.2 メタンガス濃度

メタンガスは低い濃度で実験を行ったため、濃度計は使用せず、風船と実験装置の管内の体積比で濃度を求めた。風船の体積計算は楕円の式、回転楕円体の積分式より、以下の通りである。まず、実験装置の管内の体積は、

$$\begin{aligned} V &= h \times S = 230 \times 900 = 207000 \text{ (cm}^3\text{)} \\ &= 207 \text{ (}\ell\text{)} \end{aligned} \quad (5.2)$$

である。この体積の1%を風船で再現するには、風船の大きい直径を $a = 17\text{(cm)}$ 、小さい直径を $b = 15\text{(cm)}$ と設定した。

$$B = \frac{1}{6} \times a \times b^2 \times \pi \quad (5.1)$$

1%のとき、 $a = 17\text{(cm)}$ $b = 15\text{(cm)}$

$$B = \frac{1}{6} \times 17 \times 15^2 \times \pi \approx 2.0 \text{ (}\ell\text{)}$$

実験では1~3%の濃度を使用した。そのため1%を再現し、流入回数でそれぞれの濃度を調整した。

5.3 風船内の圧力

メタンガス濃度を選定する際、風船は大気に圧縮され濃度が変化する。そのため風船内の圧力がどれだけ変化しているかを確認するために、U字管マンオメーターを用いて測定した。

水の1気圧(1013 hPa)における高さは約10.3(m)である。メタンガス濃度1(%)時の風船内の圧力をU字管マンオメーターで高さを求めると0.2(m)となる。

風船内にかかる圧力をXとすると、

$$\frac{10.3+0.2}{10.3} = \frac{X}{1013} \quad (5.3)$$

$$X = 1032.7 \text{ (hPa)}$$

となり、
 ここから実際の風船の体積と装置の体積を比較すると、

$$\frac{\text{実際の風船の体積}}{\text{装置内の体積}} = \frac{2.04}{207} \quad (5.4)$$

$$\approx 0.0098 \text{ (0.98 \%)}$$

となる。

濃度 1 (%) との差は 0.02 (%) となるので、本実験で風船を用いてガス濃度を選定する際、風船内の圧力は考慮する必要はない、といえる。

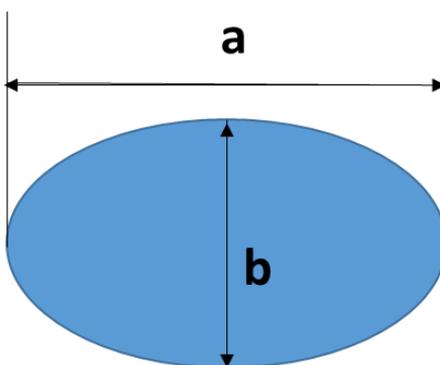


図 5.1 風船の長さ



図 5.2 メタンガスを流入した状態

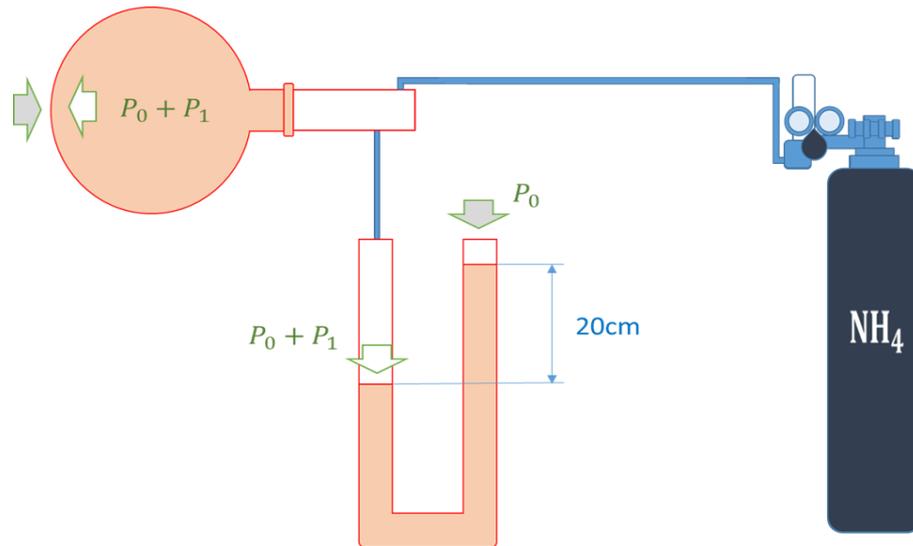


図 5.3 マノメーターによる風船内の圧力測定

5.4 メタンガスの温室効果について

2019年現在、大気中におけるメタンガス濃度は 1.8×10^{-6} (1800ppb)である。これは装置内においては、0.63% (14.4mm)の割合である。実験ではメタンガス濃度を0, 1, 2, 3, 4, 5, 6%で変化させ、メタンガス濃度と温度上昇の関係を調べた。このデータから、メタンガスは3, 4 (%)付近で飽和していることが分かった。また、装置内における現在のメタンガス濃度は0.63 (%)であるため、未だメタンガスは吸収の余地があるということもわかった。

メタンガスに関しては、地球の温暖化に影響を及ぼしている可能性が高い、ということがいえる。

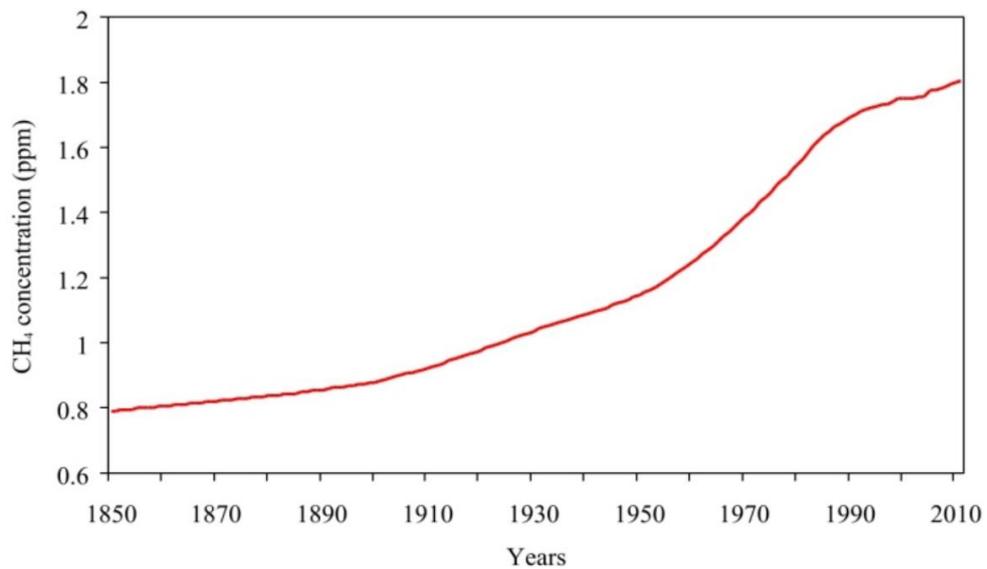


図 5.4 メタンガスの大気中の濃度 [5]

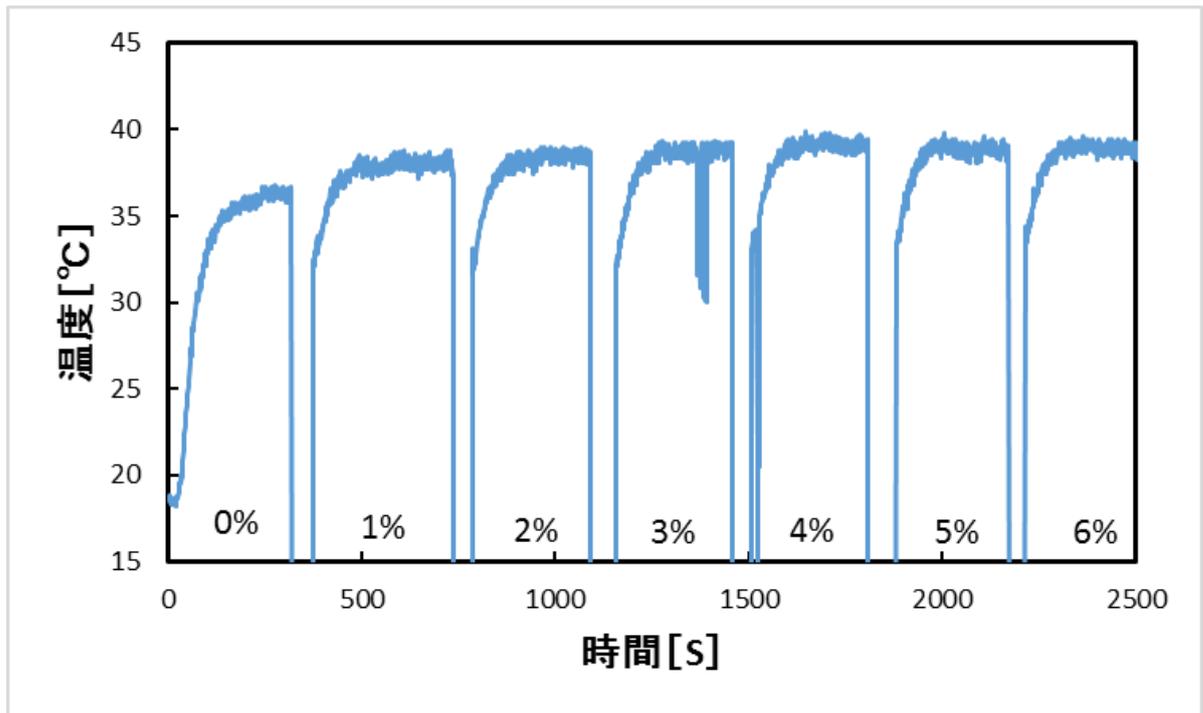


図 5.5 実験による各メタンガス濃度と温度上昇

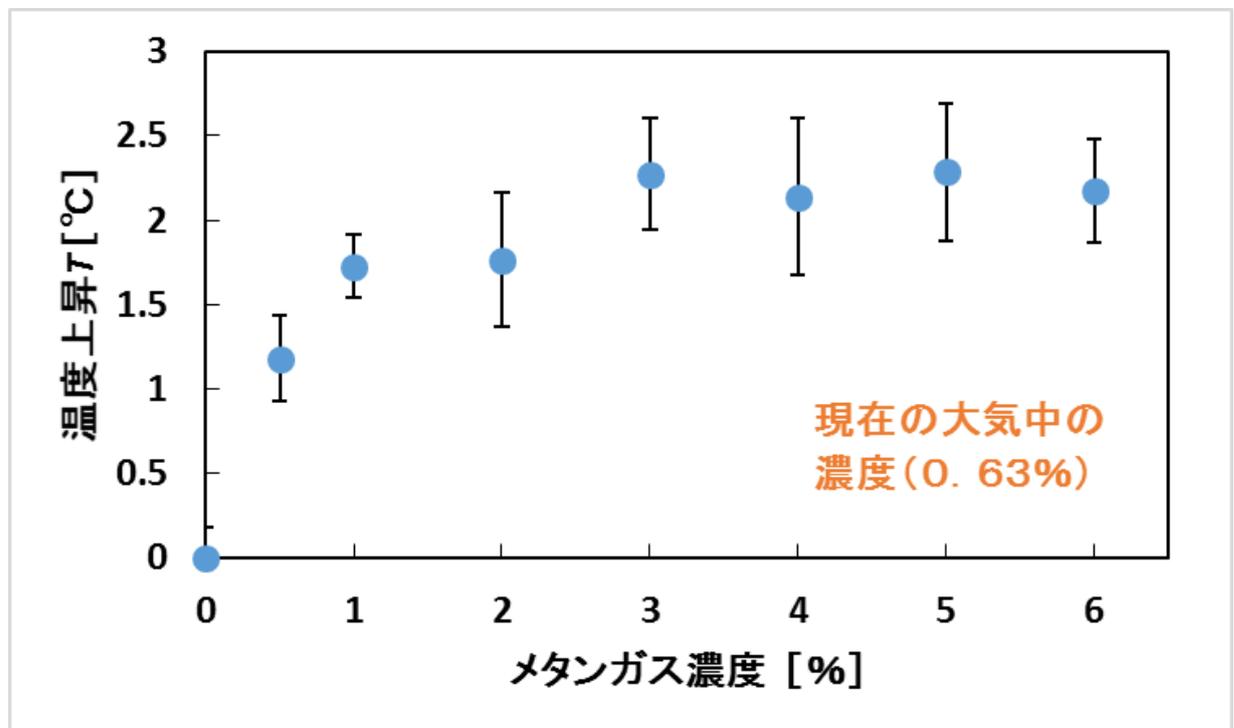


図 5.6 メタンガス濃度 0%からの温度上昇

第 6 章

混合ガスによる温度上昇

6.1 各ガス単体での温室効果実験

これまで単体の物質で実験をまとめてきたが、実際の気体は高度に複雑である。そこで、複数の大気がどのように温室効果に影響を及ぼしているかを明らかにするために、二酸化炭素ガスとメタンガスの混合ガスについての検証も行った。まず、単体のメタンガスと二酸化炭素ガスを吸収の変化が出やすい1,2,3 [%]の範囲でそれぞれ濃度0%（窒素濃度100%）からの温度上昇の計測した。

二酸化炭素ガスとメタンガス濃度を0 [%] から3 [%] を増加させると、濃度0 [%] に比べて二酸化炭素ガスは約4.2 [°C]、メタンガスは約3.1 [°C] 温室効果の影響による温度上昇があった。また、メタンガスよりも二酸化炭素ガスの方が温室効果の影響が大きいという結果が出た。

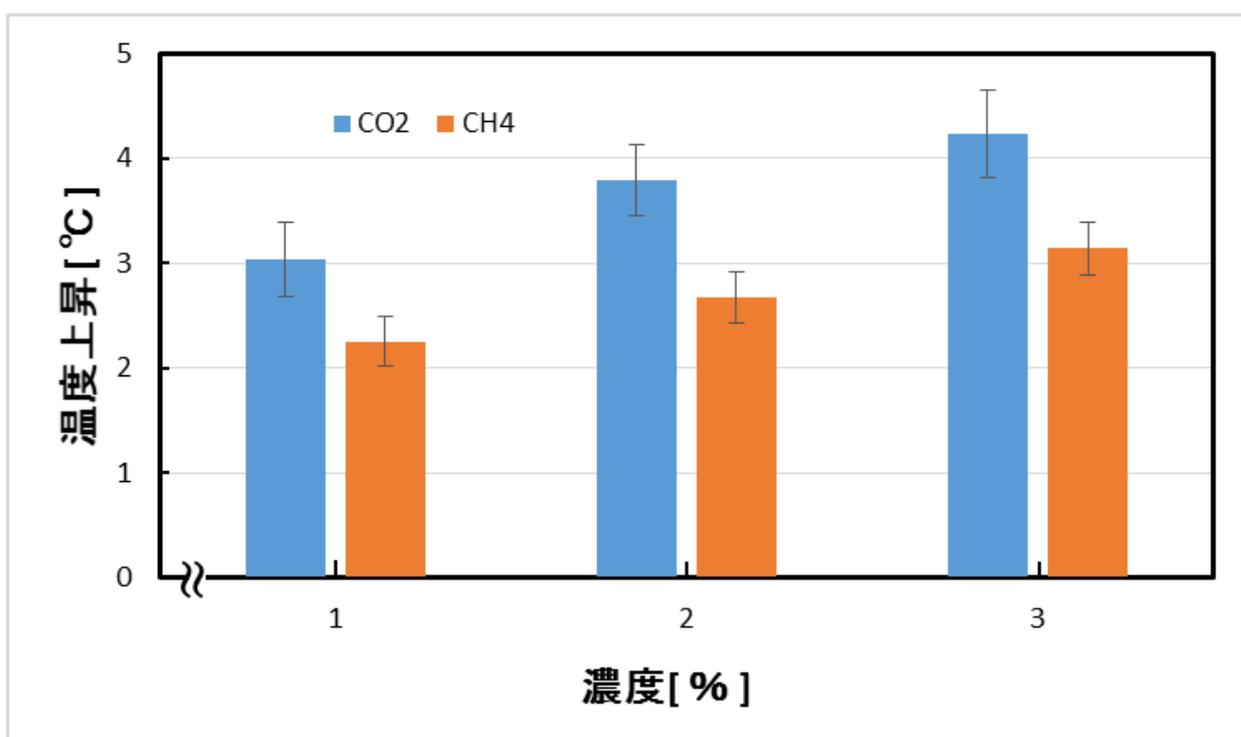


図 6.1 二酸化炭素ガス, メタンガスの濃度別温度上昇

6.2 混合ガスによる温度上昇

次に、混合ガスにおける吸収率の変化も合わせてまとめた。混合ガスを1:1の割合で足し合わせて2,4,6 [%]と濃度の比率を変え実験を行った。

図 6.2 は第 6.1 章のデータと混合ガスの温度上昇の温度上昇をまとめたデータである。単体のガスを混合せずに1:1で足し合わせた気体（単純加算）の上昇温度を黄色の点で示し、混合ガスの温度上昇を灰色の棒グラフで示している。図 6.2 より、温度上昇が純粋な足し合わせではなく、混合ガスの方が低くなった。その原因として、それぞれの温室効果ガスの吸収波長には重なる点があるため、混合ガスの吸収率が下がったと考えられた。

また、濃度が上昇するにつれ、混合ガスの温度上昇が小さくなっていることがわかる。この原因は

メタンガスの飽和点が 3,4%付近であるため、濃度を上げていくにつれメタンガスが飽和に近づいているためだと考えられた。

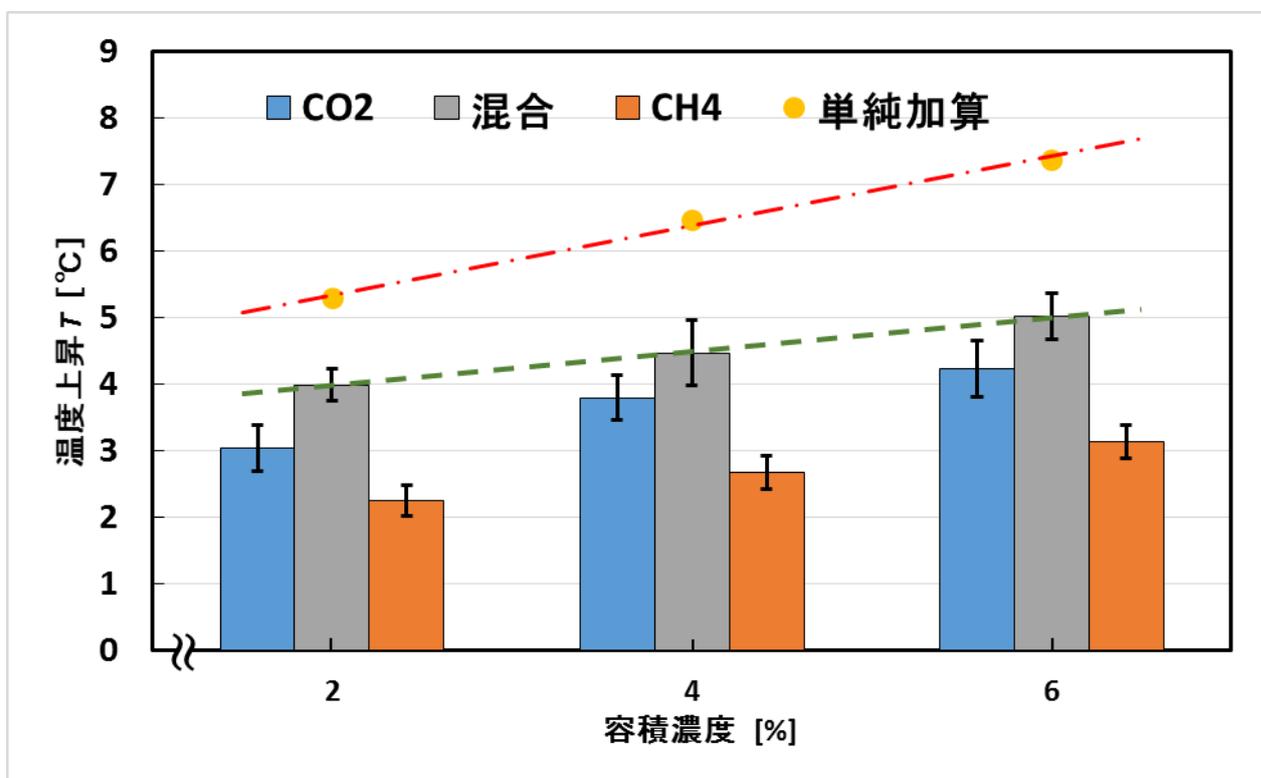


図 6.2 メタン、二酸化炭素ガスの混合気体と足し合わせた気体の上昇温度との比較

6.3 シミュレーションとの比較

Spectral Calc[®]を用いて装置における二酸化炭素ガスとメタンガスの赤外線吸収率の計算を行った。これは混合ガスの吸収率とガス単体の足し合わせの吸収率を比較することで、吸収率がどのように変化するか確認するためである。条件は装置の状態に合わせ、1気圧、温度（室温の 296 K）高さ 1.15 [m]（装置の半分）で計算を行った。

計算の結果、2つのガスの単体の吸収率は二酸化炭素は 6.9 [%]、メタンガスは 20.4 [%]となり、吸収率を足し合わせると 27.3 [%]となった。

また、同様の手順で計算を行い高さ 2.3 [m]の混合ガスの吸収率も求めた結果 26.9 [%]となった。

このことから、吸収率はガス単体の純粋な足し合わせではなく、混合ガスの方が低くなった。この結果は実験の温度上昇のと同様な結果となった。

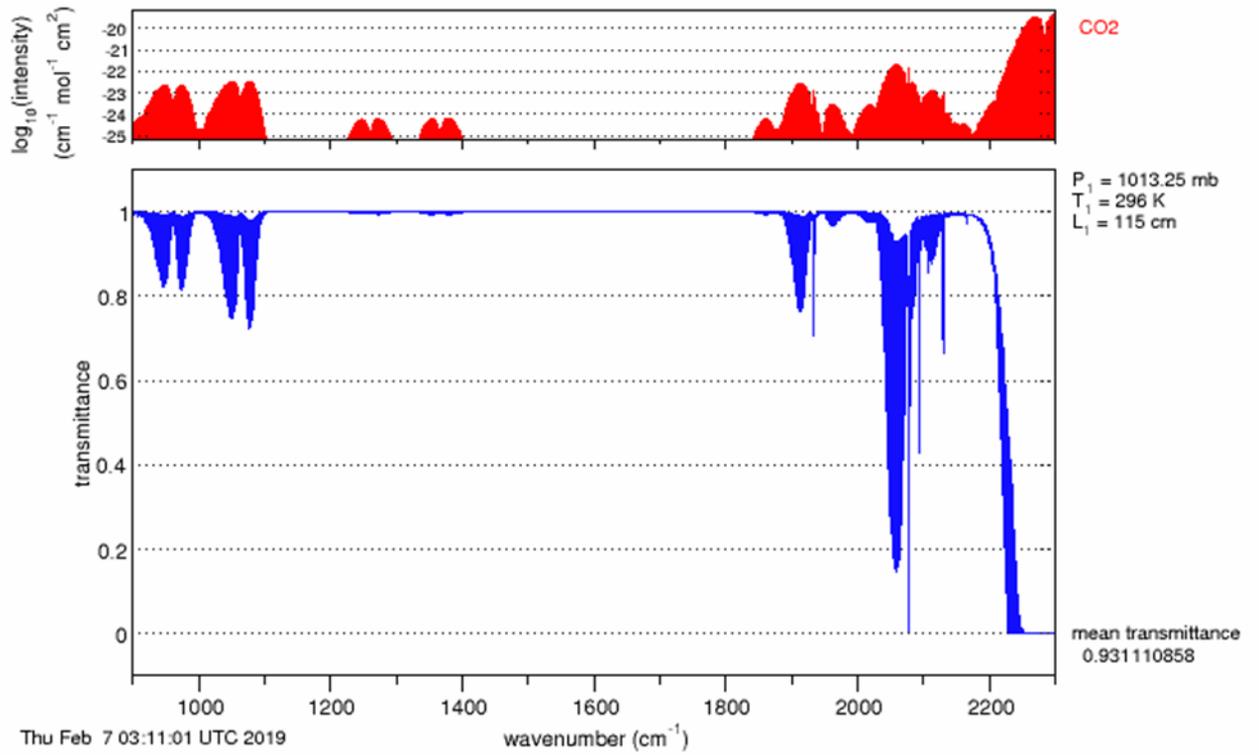


図 6.3 二酸化炭素の吸収波長

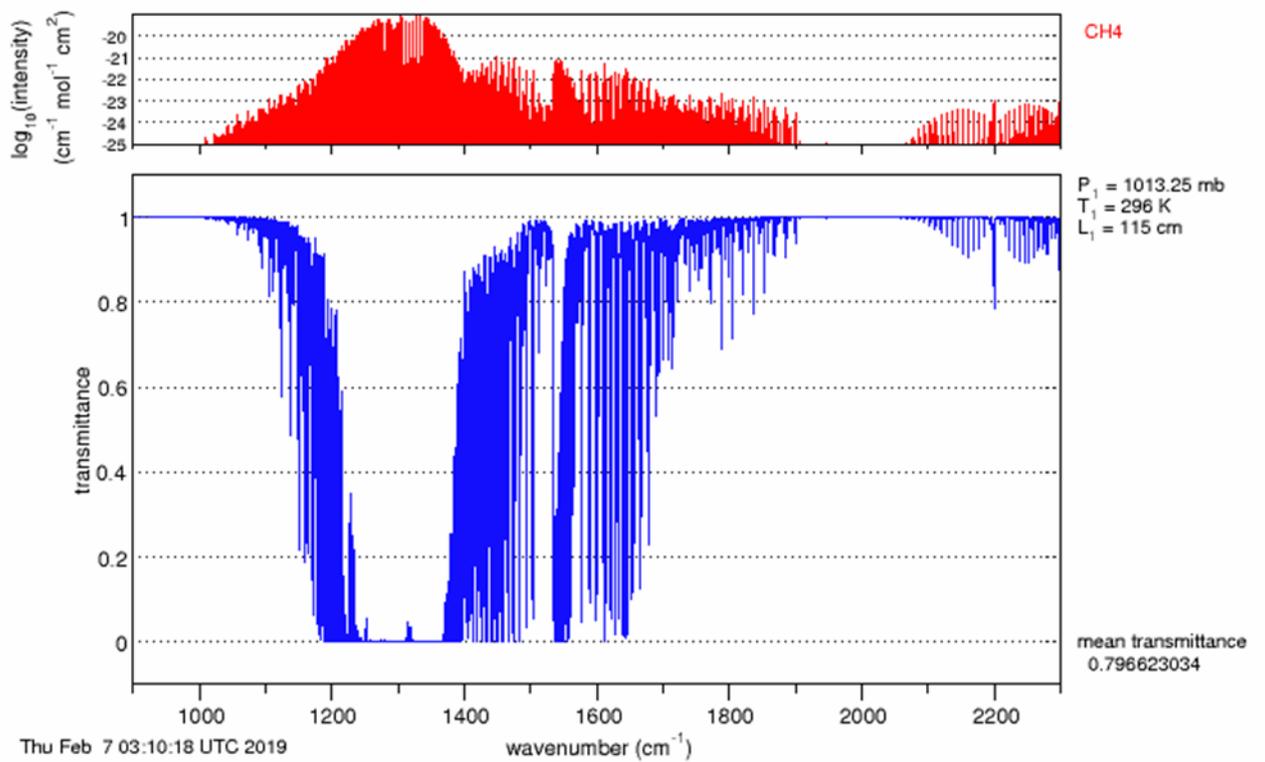


図 6.4 メタンガスの吸収波長

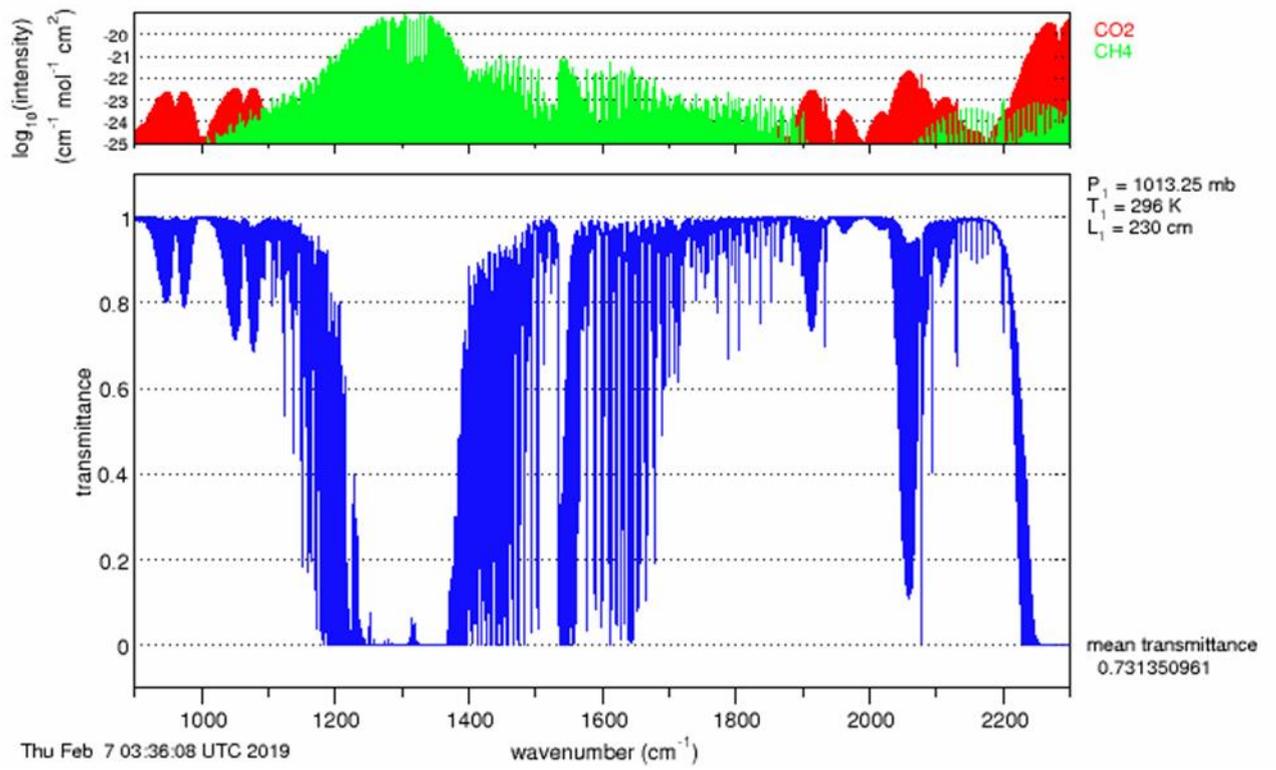


図 6.5 混合ガスの吸収波長

第7章. まとめ

本研究を以下にまとめる.

- 1) 装置による検証からは二酸化炭素ガス濃度は第二次産業革命以前にすでに飽和していた, というデータが出た. よって, 二酸化炭素は温室効果に影響を及ぼしているかは疑わしい.
- 2) 現在のメタンガスの濃度は装置において 0.63[%]であり (飽和点は 3,4[%]付近), 未だ温室効果の余地があるといえる.
- 3) 温室効果ガスの吸収波長はそれぞれ重なる点があるため, 混合ガスの吸収率は, 純粋な気体の足し合わせに比べると小さい.

エピローグ

本研究は今年でちょうど 10 年を迎えます。我々は先代から受け継がれてきた研究というひとつの大きな物語の流れの中で一役を担えたことを誇りに思っています。

また、液体窒素を提供していただいたエレクトロニクス研究所はじめ、助力いただいた皆様、そして最後までご指導いただいた河村良行教授に心より感謝をいたします。

参考文献および注釈

[1] 最も温室効果に影響を及ぼしている物質は水である。しかし水は自然的要因であり、蒸発し雲となって太陽光の入射を防ぐ効果もある。このように地球の循環システムは非常に複雑なものであるため、本研究では人為的要因といわれている二酸化炭素ガスとメタンガスの二種類の温室効果ガスについて研究をまとめた。

[2] 総合的なかえり熱パワーの内訳は、黒体放射板からの熱伝導、壁で反射された熱放射、温室効果ガスの放射強制力である。

[3] Spectral Calc[®] (<http://www.spectralcalc.com/info/about.php>). Spectral Cal[®]は HITRAN のビッグ・データをもとに設計された計算機シミュレーションである。HITRAN とは、米国空軍の地球物理研究所（現在の Phillips Laboratory）が 1973 年から開発しているもので、1992 年版には 31 種類の気体について、 $0\sim 23,000\text{cm}^{-1}$ のスペクトル範囲で 709,308 本の吸収線の情報が含まれている。個々のデータには分子番号、同位体番号、吸収線の中心波数、吸収線強度、ローレンツ半値半幅、基底状態エネルギーなどの情報が記載されている。

[4] 尚業千, 菅井径世, 小川克郎 「過去 110 年間の地球気温変化と CO₂ 放出及び太陽活動との関係～NASA/GISS 気温データベースによる」

[5] NASA (<https://data.giss.nasa.gov/modelforce/ghgases/>)

[6] 村山雅基, 吉村圭吾 「平成 29 年度 卒業論文 温室効果ガスの実験的検証」

付録

二酸化炭素ガス、メタンガスの様々な濃度による実験データである。調べる気体以外の気体はすべて赤外線放射がほとんどない窒素で実験を行った。

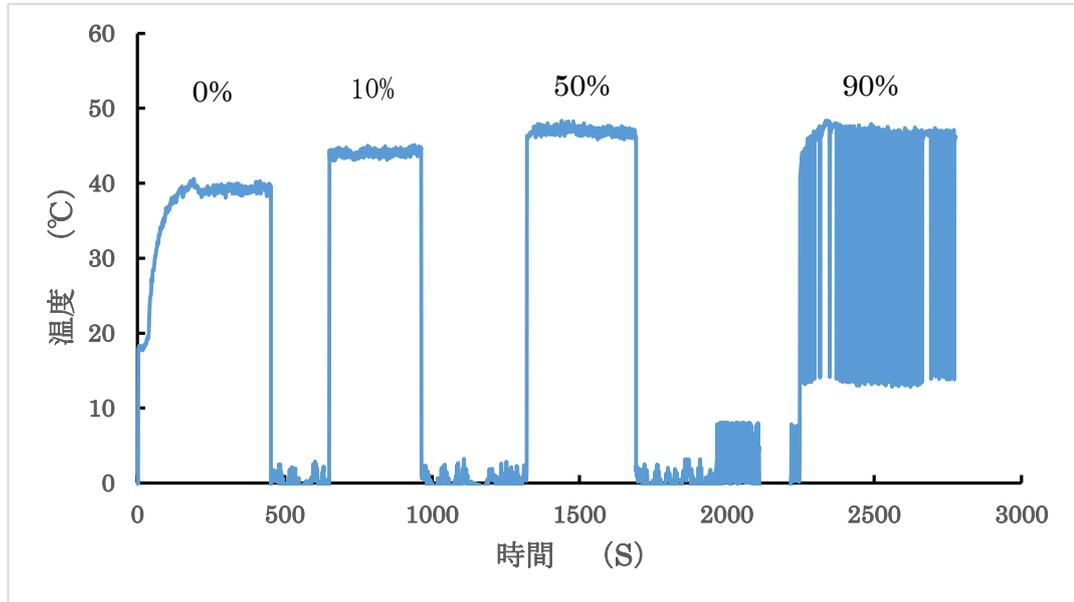


図 8.1 二酸化炭素ガスの濃度と温度の関係

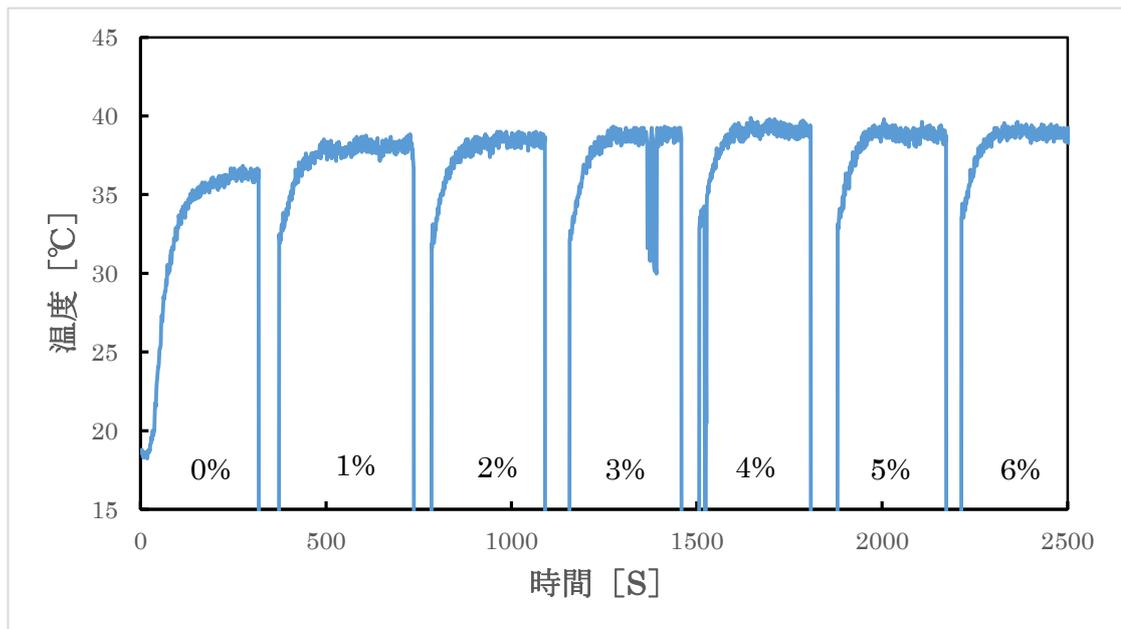


図 8.2 メタンガスの濃度と温度の関係

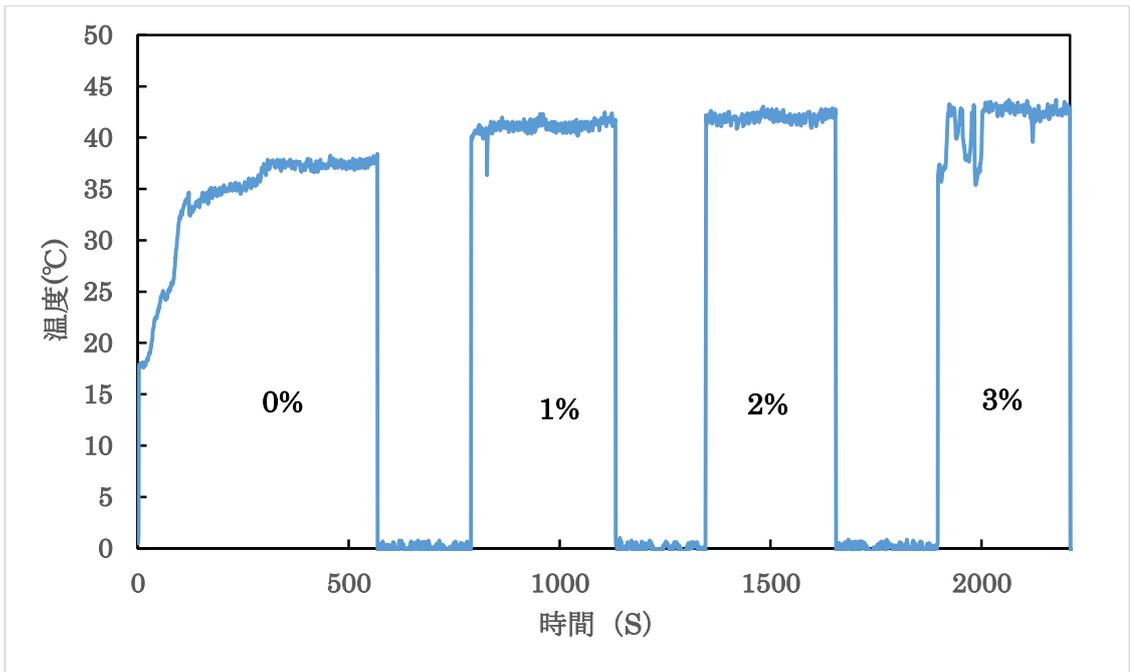


図 8.3 混合ガスの濃度と温度の関係