

平成 27 年度卒業論文

温室効果ガスによる
放射強制力の実験的研究

福岡工業大学 工学部
知能機械工学科

12E2010 江本 大起

12E2055 藤村 朗大

指導教員 河村 良行 教授

第一章. 諸言

第二章. 温室効果実験装置

- 2. 1 温室効果検証装置の回路
- 2. 2 導波管
 - 2. 2. 1 熱伝導による対流
- 2. 3 L a b V I E Wプログラム
- 2. 4 トランジスタ
- 2. 5 空調
- 2. 6 メタンガス
- 2. 7 二酸化炭素
- 2. 8 二酸化炭素ガス濃度計
- 2. 9 液体窒素

第三章. 温室効果実験の理論計算

- 3. 1 分光放射輝度
- 3. 2 ガス透過率
- 3. 3 大気一層モデル
- 3. 4 大気多層モデル

第四章. 温室効果実験

- 4. 1 実験手順
- 4. 2 一本と二本の比較
- 4. 3 二酸化炭素での実験

第一章. 諸言

現在地球上では、温暖化が深刻な問題となっている。主な原因として、二酸化炭素やメタンガスなどの温室効果ガスが挙げられる。そこで、二酸化炭素ガスやメタンガスの温室効果を実験的に研究するために、
昨年装置を改良し、温室効果を確かめることを本研究の目的とした。

第 2 章. 温室効果検証装置

2. 1 温室効果検証装置の回路

図2. 1が今年の実験回路である。今年の回路は、昨年のON/OFF制御にデューティー比を求めるための回路と管内温度を得るための回路を追加した。まず今年、リレーの動作回数に寿命があったため、スイッチをトランジスタで行っている。二つ目に、電源電圧のデューティー比を求めるためにPCに繋がしたが、インターフェースの最大読み取り電圧が10Vなので分圧するために抵抗を挟んだ。また電圧を読み取る時に電圧の平均化をして誤差を少なくするためにコンデンサーを挟んだ。三つ目に、管内の熱電対での温度測定は、読み取る電圧が非常に小さいため μV 計2で増倍し、その値を10秒間ごとに平均している。これをプログラムで温度変換を行っている。これらをすべて同時にPC(L a b V I E W)で実行する。

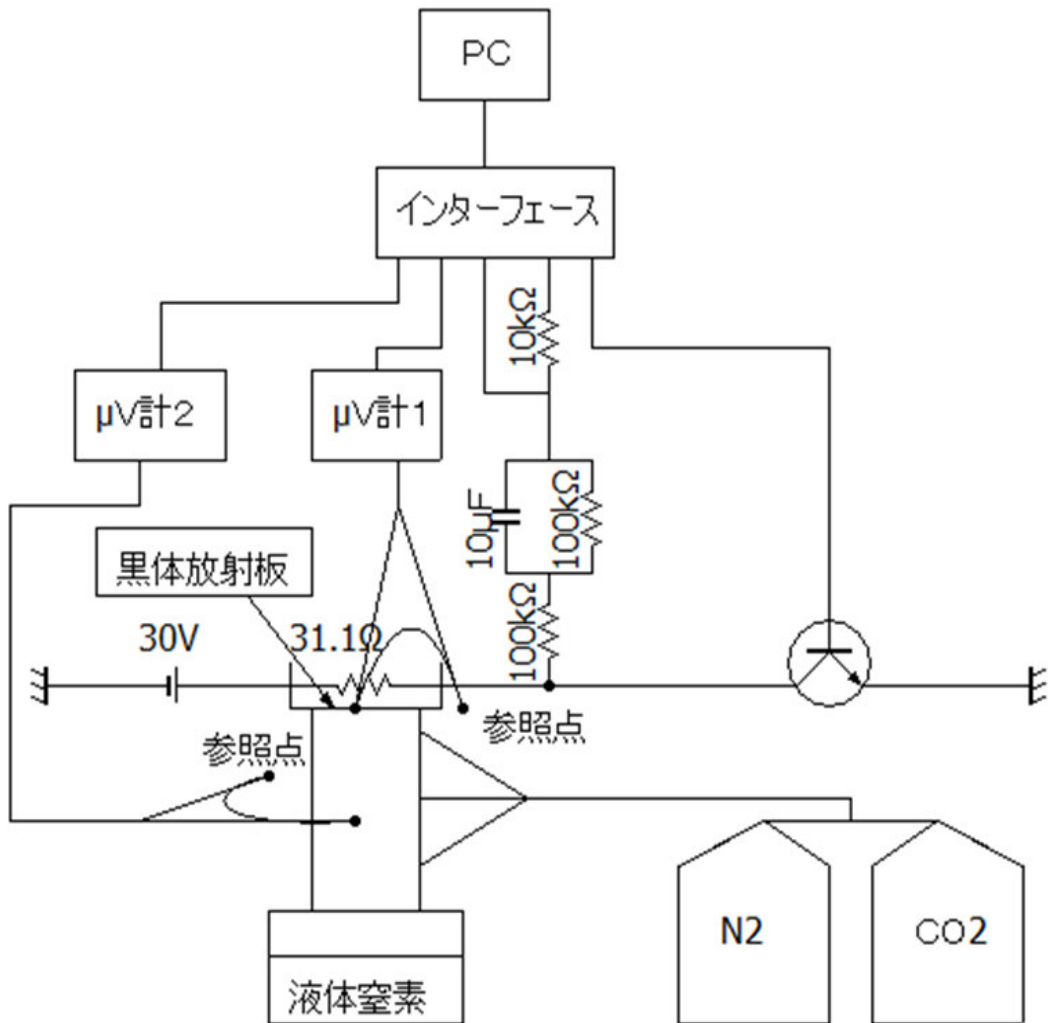


図2. 1 実験回路

2. 2 導波管

長さ1.0[m], 内寸0.3[m] × 0.3[m]の導波管を用意した. 上側は, 厚さ50[μm]のアルミの上に長さ1.8[m], 直径1.20[μm]の銅線を5[mm]間隔でつけた黒体放射板を取り付け, 下側は, 液体窒素を溜める発泡スチロールを置き, その間にはサランラップを付け密閉空間を作った. 管の内側には, 赤外線反射率を上げるために, 銅テープを貼った. 外側には, 外気から受ける熱伝導をできるだけ少なくするために発泡スチロールを貼った. この管には, ガスを入れる穴と管内温度を計測するための穴を空けている. また, 管の密閉を徹底するために, コーキングを行っている.



(a) 発泡スチロール無し

(b) 発泡スチロール有り

図2. 2 導波管

2. 2. 1 熱伝導

導波管内部の温度を一定にするために壁面からの熱伝導について考えた。まず、管内の二酸化炭素濃度を100%にしたときの外部からの放射熱による放射束Wを求めた。放射束Wは、

$$W = \lambda s (\delta t / \delta d) \quad (2. 1)$$

で表すことが出来る。

二酸化炭素の熱伝導率 λ : $16.55 \times 10^{-3} [\text{w}/(\text{mk})]$

管壁の面積 s : $1.2 [\text{m}^2]$

壁面から3cmの温度勾配 $(\delta t / \delta d)$: $56.6 [\text{K}/\text{m}]$

これを計算すると、この時の放射束Wは $1.12 [\text{w}]$ である。

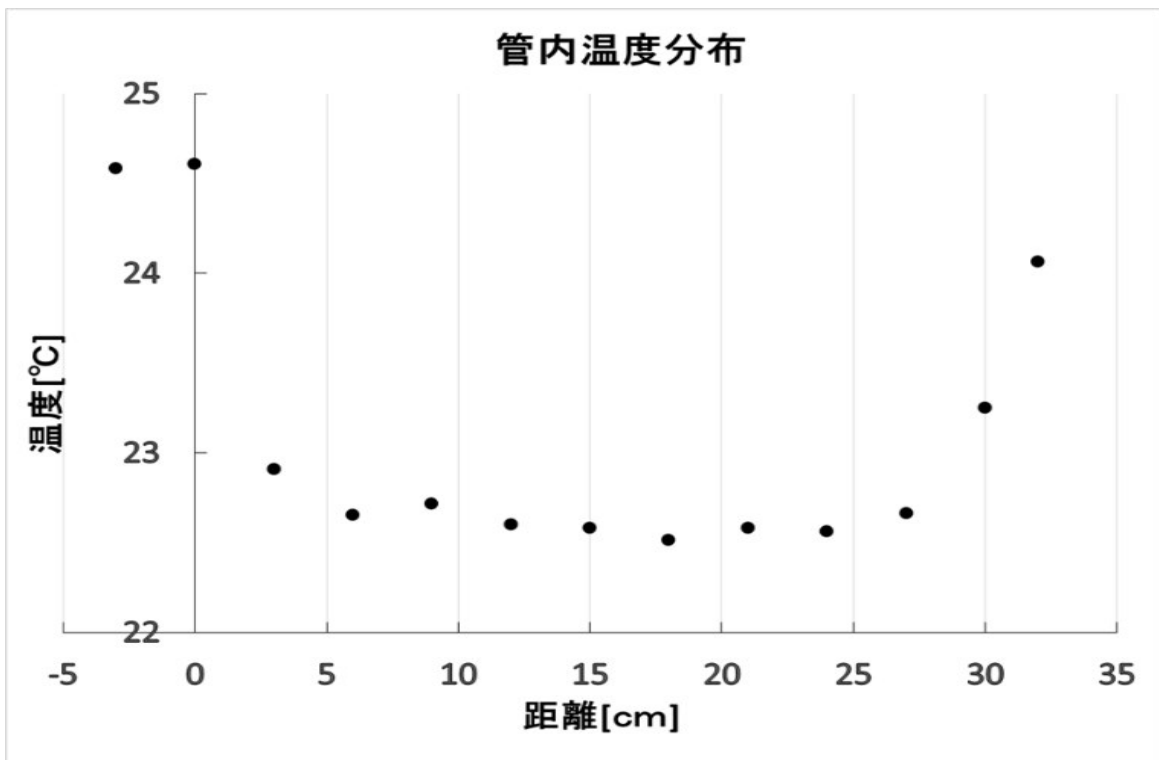


図 2. 2. 1 管内温度分布

次に、管内の対流による熱伝導について考えた。ヌセルト数 Nu を用いて熱伝達と熱伝導の比を求め、対流が起こっているときの放射束Wを求めた。密閉管内における対流のときのヌセルト数 Nu を求めるためにプラントル数 Pr 、レイリー数 Ra を求めた。まずプラントル数は、

$$Pr = \frac{\eta C_p}{k} \quad (2.2)$$

二酸化炭素が 20℃の時の粘度 $\eta = 1.47 \times 10^{-7} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$

二酸化炭素の比熱 $C_p = 851.8 [\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}]$

二酸化炭素の熱伝導率 $k = 16.55 \times 10^{-3} [\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}]$

で表すことが出来る。これによりプラントル数 Pr は 0.76 となる。次にレイリー数を求めるためにグラスホフ数を求めた。グラスホフ数は、

$$Gr = \frac{g \rho (k_o - k_i) L^3}{\eta} \quad (2.3)$$

重力加速度 $g = 9.8 [\text{m} / \text{s}^2]$

二酸化炭素の密度 $\rho = 1.797 [\text{kg} / \text{m}^3]$

管内と管外の温度差 $(k_o - k_i) = 1.697 [^\circ\text{C}]$

管外から温度が伝わる代表長さ $L = 0.03 [\text{m}]$

で表すことが出来る。グラスホフ数 Gr は 9.86 となる。レイリー数は、

$$Ra = Gr \times Pr \quad (2.4)$$

で表すことが出来る。レイリー数 Ra は 74.97 となる。次に、密閉管内における自然対流の時の Nu は、

$$Nu = 0.18 \left(\frac{Pr}{0.2 + Pr} Ra \right)^{0.29} \quad (2.5)$$

で表すことが出来る。上記で求めたレイリー数とプラントル数をヌセルト数に代入するとヌセルト数は 0.59 となる。ヌセルト数は、熱伝達と熱伝導の比なので、二酸化炭素の放射束に対してヌセルト数倍の熱伝達がかかっていることを表している。つまり、二酸化炭素の放射束 + (二酸化炭素の放射束 × ヌセルト数) という式が成り立つので実際の放射束 W は 1.78 [w] となる。

次に管外からの熱伝導を少なくするために発泡スチロールをはった.

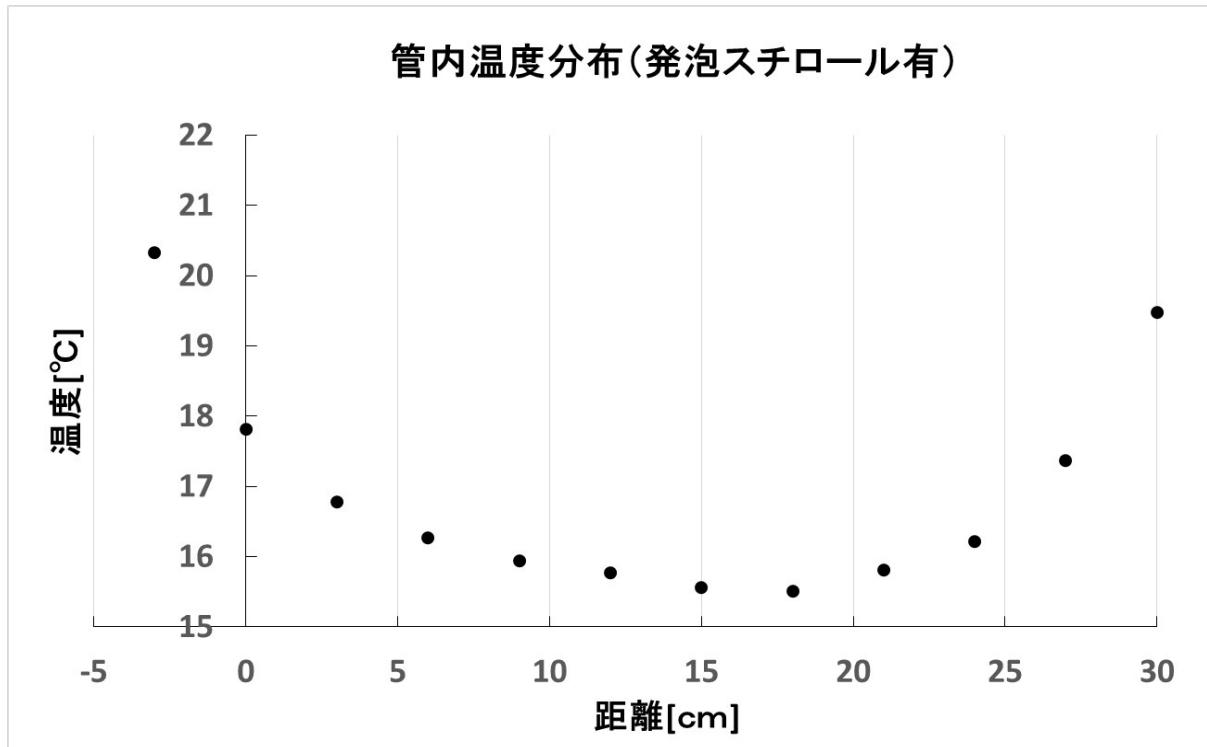
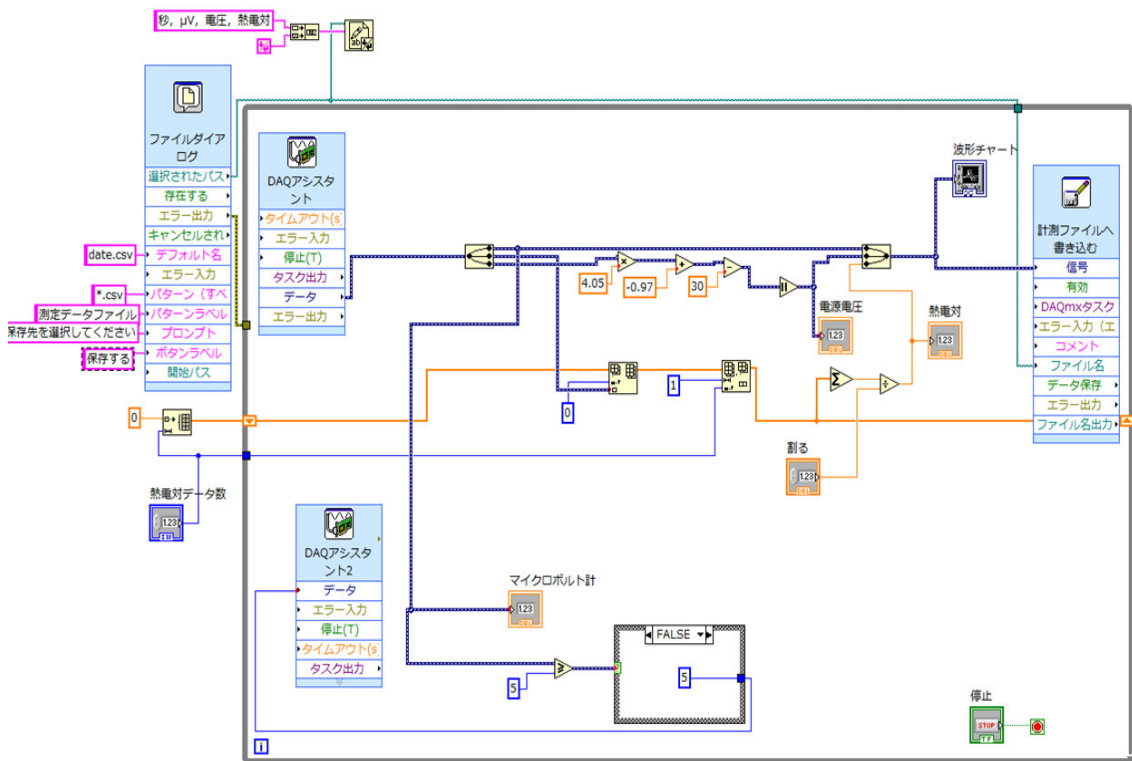


図 2. 2. 2 管内温度分布 (発泡スチロール有)

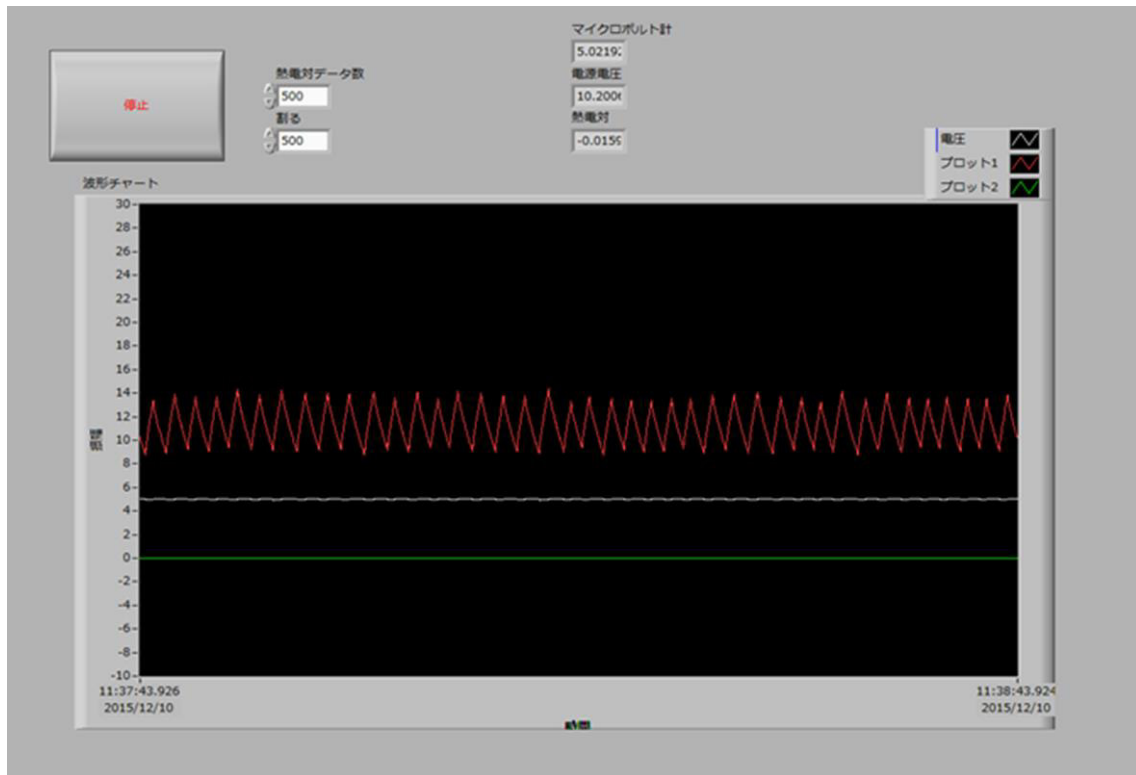
発泡スチロールを付けたことで管外と管壁の温度差ができ、管内の温度勾配が下がった。このことにより放射束 W が 1.04 [W]となった。発泡スチロールを付けたことにより管外からの熱伝導を少なくすることができた。

2.3 LabVIEWプログラム

黒体放射板の温度制御，電源電圧の読み取り，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2.1のインターフェースは，NATIONAL INSTRUMENT製の「USB6009」を使用した．図2.3.1(a)のプログラムは，0.025[s]間隔でデータを取得している．熱電対と μ V計1を使用し，黒体放射板の温度を電源のON/OFF制御をして，室温になるように保たせている．黒体放射板の温度が，室温より低くなると電源がONになり，室温より高くなると電源がOFFになる．電源電圧は，分圧を行ったため校正を行い，校正式をプログラムに入れている．図2.3.1(a)がプログラムで，図2.3.1(b)がプログラムを実行している様子である．赤が電源電圧，白が μ V計1の値，緑が管内と室温との電圧差を読み取っている．



(a) ブロックダイアグラム



(b) プログラム実行の様子

図2. 3. 1 L a b V I E Wプログラム

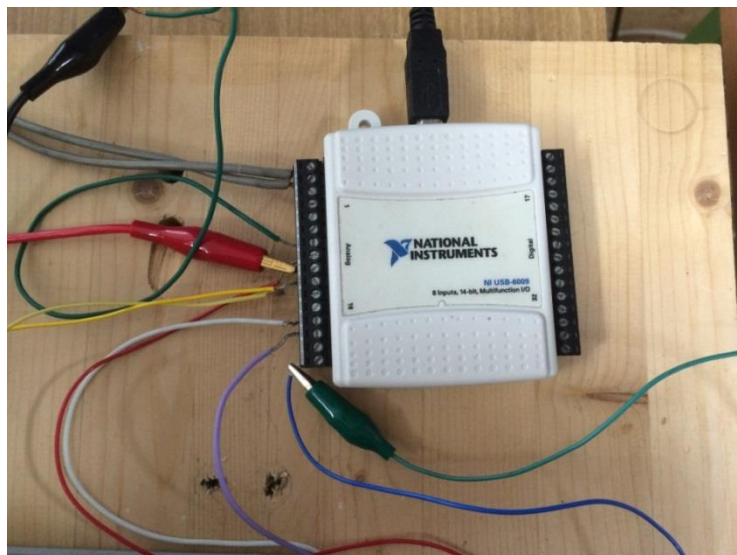


図2. 3. 2 インターフェース

2. 4 トランジスタ

今年からトランジスタをスイッチとして使用している。去年はリレーをスイッチとしていたが、動作回数に制限があり、今回の装置には適していなかったため変更した。使用したトランジスタはNPN型の低周波数のもの（2SD718）である。トランジスタとは、ベース・コレクタ・エミッタの3つがついているものがほとんどである。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。つまり、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す。

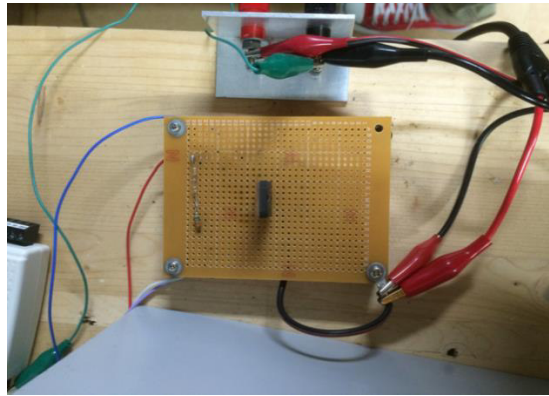


図2. 4 トランジスタを取り付けた基盤

2. 5 空調

今回の実験で図2. 5の不安定なデータが得られるときがあった。この原因は暖房によるものと考えられる。熱電対の参照点側の温度が上がることによって、このような不安定なデータになったため、実験を行うときは空調を切って実験を行わなければならない。

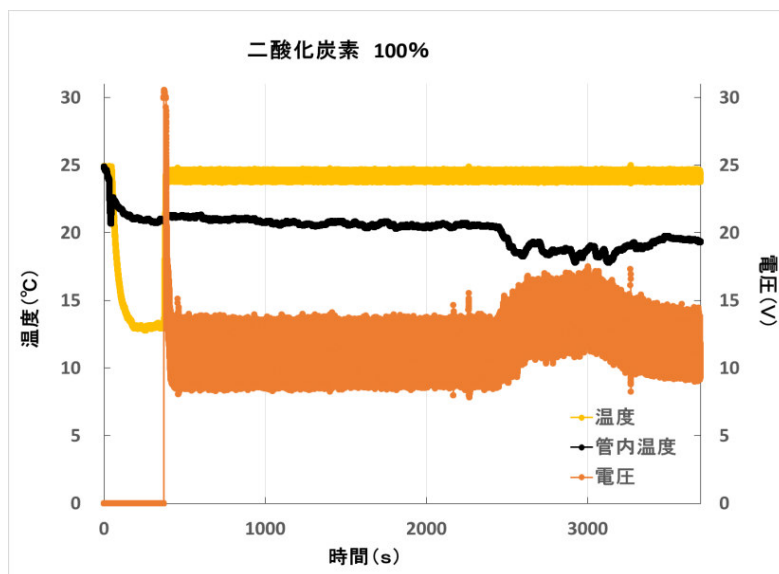


図2. 5 暖房による不安定なデータ

2. 6 送風機

導波管にガスを溜めて実験をしているが、溜めたガスが拡散していないため送風機を取り付けた。実験前に回して、実験は自然対流で行いたいため止めた。図 2. 6 が送風機である。風向は自然対流を考えて上向きにしている。

2. 7 メタンガス

二酸化炭素ガスを中心に実験を行っていたが、メタンガスにも注目することにした。メタンガスは、草食動物のゲップや糞などからも発生し、無色無臭の気体でヒトに対する毒性は無い。融点は -183°C 、沸点は -162°C である。エネルギー源として有用な天然ガスの主成分である。大気中に約5～14%で爆発する危険性があるため、慎重に取り扱った。地球温暖化効果が二酸化炭素ガスより高いということで、今回実験することにした。表 1 が、今回使用したメタンガスの規格である。注意事項は付録に付けている。

表 1 メタンガス規格

	Grade 2
純度	99.9 vol. %
不純物	
O_2	50 vol. ppm
N_2	700 vol. ppm
CO_2	10 vol. ppm
C_2H_6	200 vol. ppm
H_2O	-65°C

2. 8 二酸化炭素

常温常圧では無色無臭の気体。常圧では液体にならず、 -79°C で昇華してドライアイスとなる。地球の気体の約0.028%が二酸化炭素である。二酸化炭素はメタンなどに比べて温室効果は低いとされているが、排出量の問題で二酸化炭素の方が注目されている。今回の実験で使用しているガスは液化炭酸ガスである。そのため窓材で使用しているサランラップに結露ができる可能性が高くなる。結露ができると温度が下がりにくくなり、データが不安定になる可能性がある。これを解消するために、二酸化炭素と窒素を導波管に入れる前に乾燥剤を通して水分を無くし、結露しないようにしてデータの安定化を目指した。図2.8.1が乾燥剤である。



図2.8.1 乾燥剤

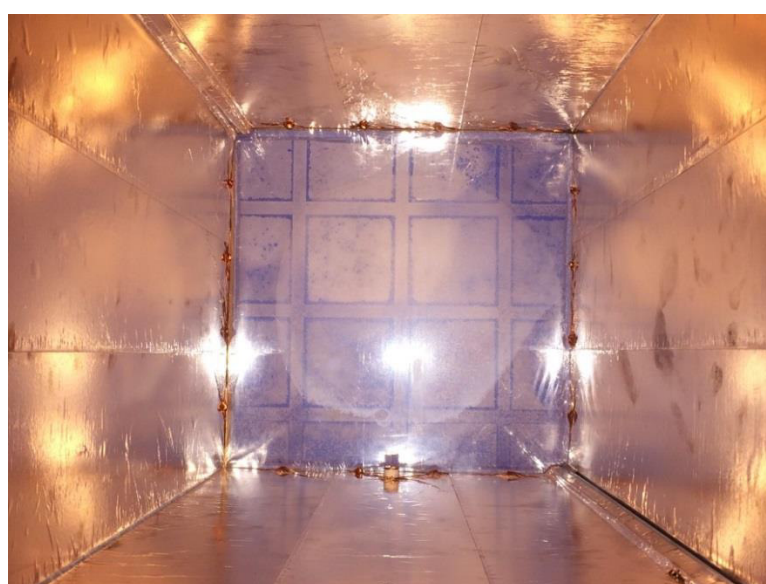


図2.8.2 結露した窓材

2. 9 二酸化炭素ガス濃度計

実験中の導波管内の二酸化炭素濃度を測定するために、新コスモス電機株式会社製（XP-3140）を使用した。この濃度計は、測定するガスを吸い込み、熱伝導によって測定する仕組みになっている。そのため、実験している間に付けたままにしておくと、対流ができることと濃度を一定に保つことが難しくなるため、使用するのは要所にした。

濃度計の設定は、

- 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, 1の袋に濃度計を入れてゼロ点を設定する。ゼロ点のやり方は濃度計の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100%溜める。
- 4, 3の袋に濃度計を入れ、出た数値をyとする。このときyは100にならない場合が多い。
- 5, 実験で導波管に溜め、濃度計で計測し、出た値をx、導波管の濃度をAとし校正式を立てると

$$A = x \times 100 / y \quad (6)$$

となり、Aを実験濃度とする。



図 2. 9 二酸化炭素濃度計

2. 10 液体窒素

今回の実験で宇宙の温度 3 k を作るために、液体窒素を使用した。図 2. 9 が液体窒素を汲み取っている様子である。

以下の手順で汲み取った。

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. ハカリ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。



図 2. 10 液体窒素を汲み取る様子

第三章. 温室効果検証の理論計算

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、 1 m^2 、 1 s r (57.3° の立体角) での放射量を表す。まず、spectral Calc の Blackbody Calculator を使用して分光放射輝度を求めた。図 3. 1. 1 は分光放射輝度を出す際の設定である。今回は、黒体放射板からの分光放射輝度になるため 295 K で設定している。図 3. 1. 2 は分光放射輝度である。

黒電卓	
入力	結果
単位: <input type="text" value="ワット"/>	放射 emittance: 放射輝度: ピーク分光放射輝度: ピークの波長:
波数 (cm-1): <input type="text" value=""/>	
ケルビン: <input type="text" value=""/>	
黒体のプロパティ: 温度: <input type="text" value="295"/> K 放射率: <input type="text" value="0.9"/> 景気後退の速度: <input type="text" value="0"/> km/s	
Wavenumber <input type="text" value="100"/> cm ⁻¹	分光放射輝度:
下限値 <input type="text" value="0"/> cm ⁻¹	バンドの放射輝度:
上限値 <input type="text" value="3000"/> cm ⁻¹	

図 3. 1. 1 放射輝度の設定

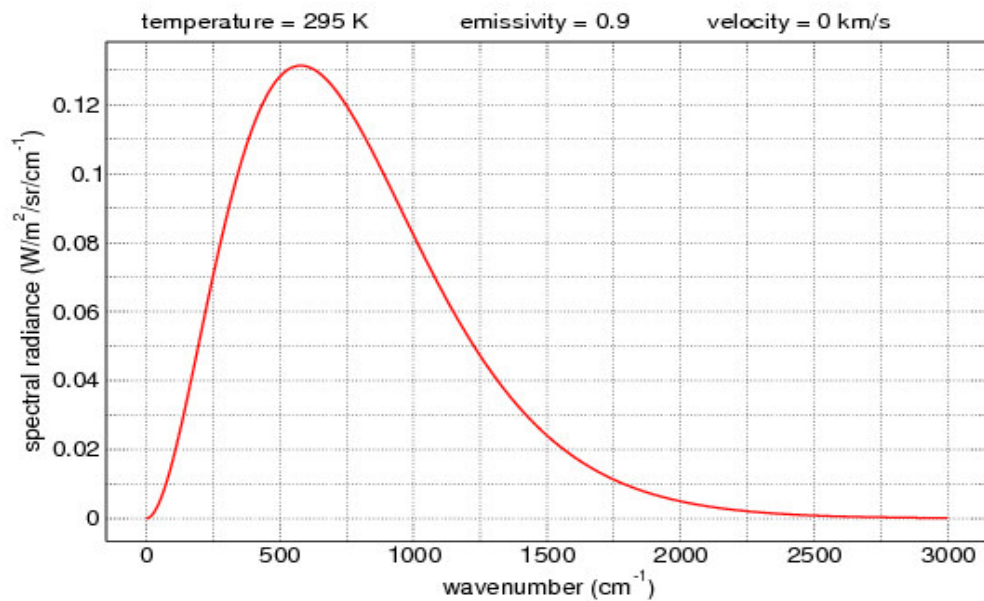


図 3. 1. 2 放射輝度

図3. 1. 2のグラフが正しいか確かめるためにステファンボルツマンの法則と比較した。まず、黒体放射板からの放射熱量を P_R とすると、ステファンボルツマンの法則は

$$P_R = \varepsilon \times \sigma \times S \times T^4 \quad (3. 1)$$

ε :放射率=0. 9[-]

σ :ステファンボルツマン定数= $5. 67 \times 10^{-8}$ [W/m²・K⁴]

S :黒体放射板の面積=0. 09[m²]

T :室温=295[K]

となり、34. 78[W]となる。次に図3. 1. 2を元に放射熱量を求めると

$$P_R = \int_0^{3000} I(k) dk \times \pi S \quad (3. 2)$$

$I(k)$:縦軸の分光放射輝度[W/m²/sr/cm⁻¹]

k :横軸の波数[cm⁻¹]

となり、34. 78[W]となるため正しいグラフと証明できる。

次に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。式3. 3はプランクの法則である。

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

$I(k)$:分光放射輝度[W/m²/sr/cm⁻¹]

h :プランク定数= $6. 6 \times 10^{-34}$ [m²・kg/s]

ν :周波数[Hz]

c :光速= 3×10^8 [m/s]

k_b :ボルツマン定数= $1. 38 \times 10^{-23}$ [m²・kg/s²/K]

T :室温=295[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。まず、

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = c k_l = 100 c k = 3 \times 10^{10} \times k$$

k : 波数 [cm^{-1}]

k_l : 波数 [m^{-1}]

である。次に $\frac{2h}{c} = A$ と置き、分光放射輝度と波数を代入して A を求めると、 $A = 3.916 \times 10^{-40}$ 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。

$$I(k) = 3.916 \times 10^{-40} \times \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kbT} - 1}} \quad (3.3)$$

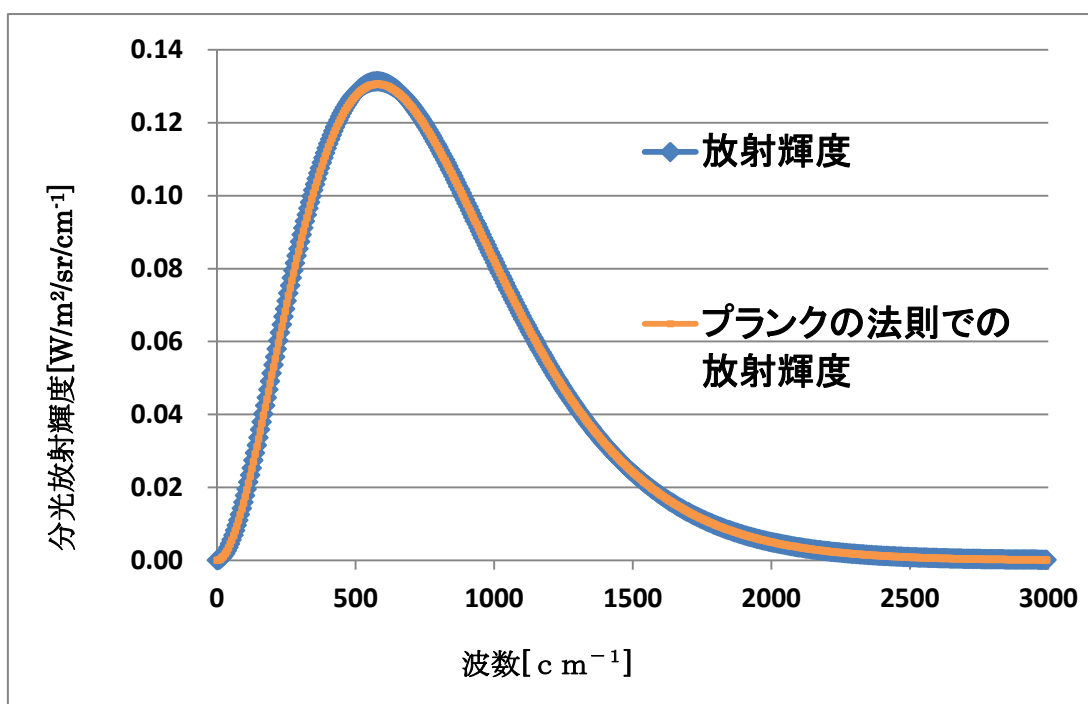


図3. 1. 3 プランクの法則で求めた放射輝度

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。

3. 2 ガス透過率

spectral Calc の Gas - Cell Simulator で図 3. 2. 1 のような設定を行う。ガス温度は、管内の温度が約 19℃のため 292 K に設定している。

ガス細胞シミュレーター 大気の大気私物のスペクトルラインリストのブラウザー | 黒電卓 黒電卓ブラウザー | ソーラー電卓 単位のコンバーター

Observer Gas Cells Source Plot Options My Settings Batch Jobs

オブザーバー

計算: 波長: 楽器の機能:

透過率
 吸収
 排出量/輝き

単位: 波数
 下限値: 0 cm^{-1}
 上限値: 3000 cm^{-1}

どれも
 幅: 0.1 cm^{-1}

Observer Gas Cells Source Plot Options My Settings Batch Jobs

Gas Cell Description

No. of Gases: 2 Line List: HITRAN2012 No. of Cells: 1

Length (cm): 200
 Pressure (mbar): 1013.25
 Temperature (K): 292

Gas	Isotopologue	VMR
H2O	All	0.5
CO2	All	0.5

図 3. 2. 1 ガス透過率の設定

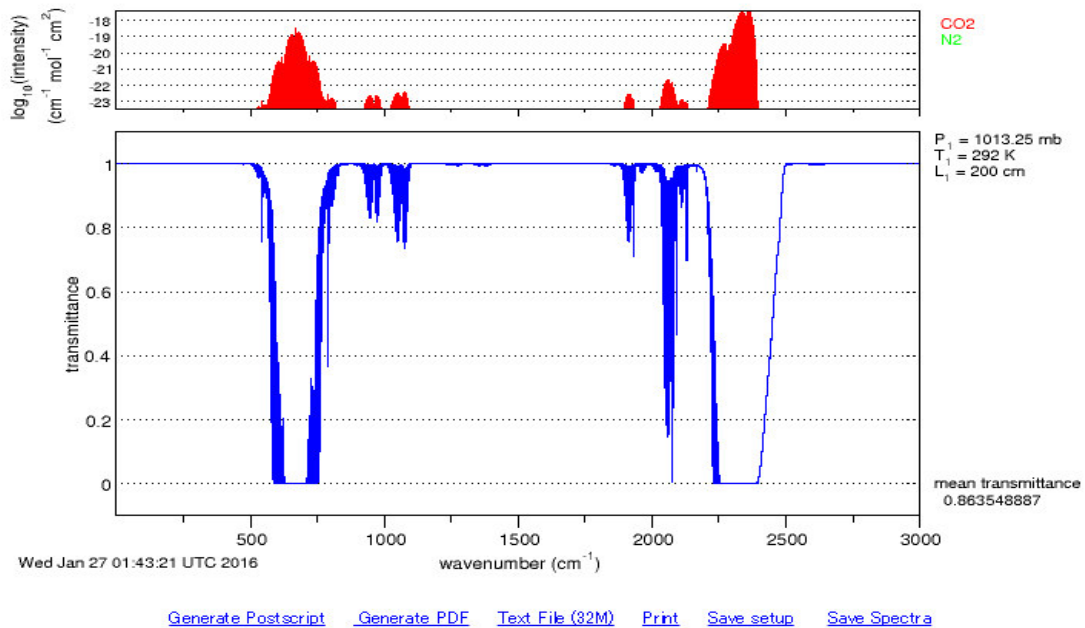


図 3. 2. 2 透過率 ($\text{N}_2 - 50\%$, $\text{CO}_2 - 50\%$ 時)

0から3000 [cm⁻¹]で分光放射輝度 I(k)を積分した値をA

0から3000 [cm⁻¹]で分光放射輝度 I(k)×ガスの透過率Tra(k)を積分した値をBとすると,

$$A = \int_0^{3000} I(k) dk \quad (3.4)$$

$$B = \int_0^{3000} I(k) Tra(k) dk \quad (3.5)$$

B/Aをすると0から3000 [cm⁻¹]での平均透過率を求めることができる。図3.2.3は分光放射輝度×透過率のグラフである。

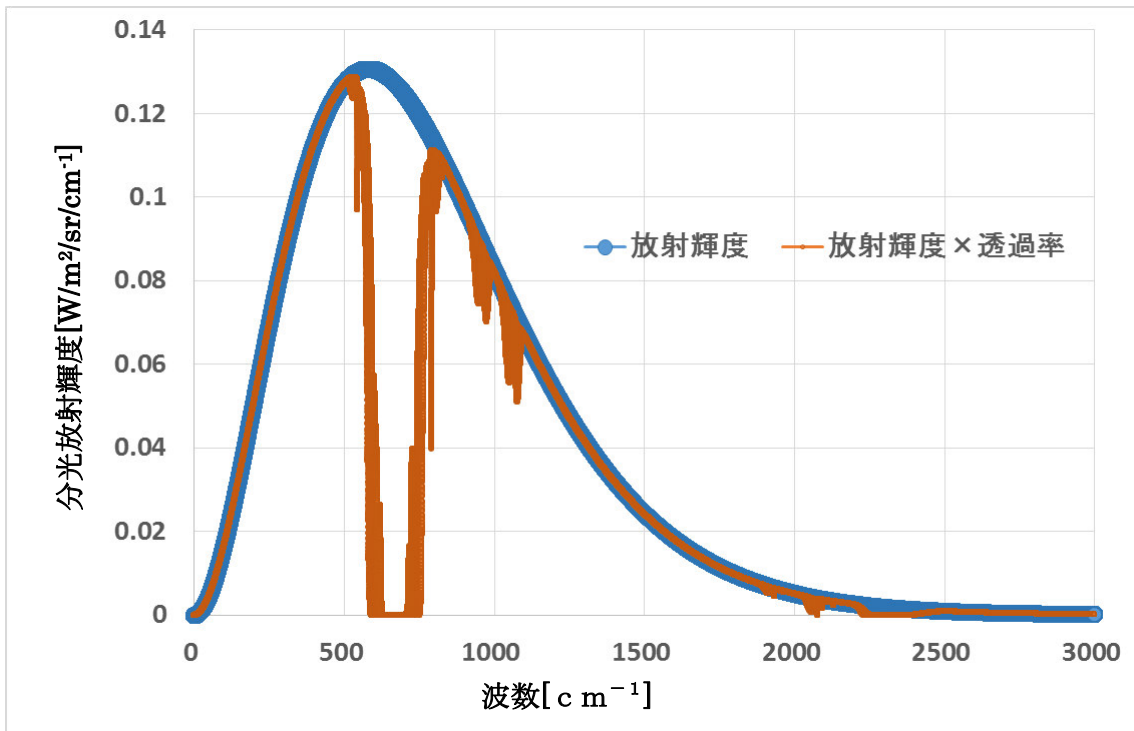


図3.2.3 分光放射輝度×透過率

3. 3 一層大気モデル

二酸化炭素の透過率を求めた。残りは吸収されていると考えられる。しかし、吸収されたままではない。そこで、一層大気モデルで考えた。図3. 3. 1は一層大気モデルである。入る電力をPEとして、出口の電力と比較する。まず、黒体放射板からの放射をPr、CO₂の透過率Tra、吸収したものの放射をPoとすると

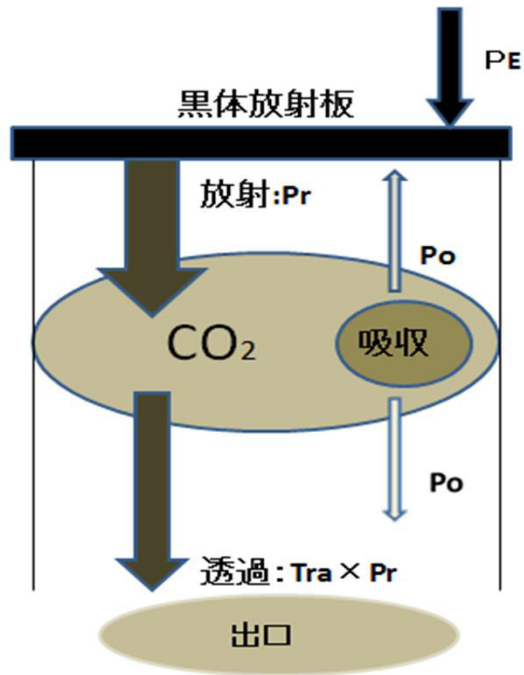


図3. 3. 一層大気モデル

$$P_r = Tra P_r + 2 P_o \quad (3. 6)$$

が成り立つ。吸収された放射は

$$P_r - Tra P_r = 2 P_o$$

$$P_r \times \left(\frac{1 - Tra}{2} \right) = P_o \quad (3. 7)$$

となる。よって、吸収された放射のうち

$$\frac{1 - Tra}{2} \times P_r$$

は透過すると考えることが出来る。これにより理論式は

$$Pr = \varepsilon \times \sigma \times S \times T^4 \times \left(Tra + \frac{1 - Tra}{2} \right)$$

$$= \varepsilon \times \sigma \times S \times T^4 \times \left(\frac{1 + Tra}{2} \right) \quad (3.8)$$

となる。

3. 4 多層大気モデル

地球には無限層の大気がある。図3. 4. 1が多層大気モデルである。

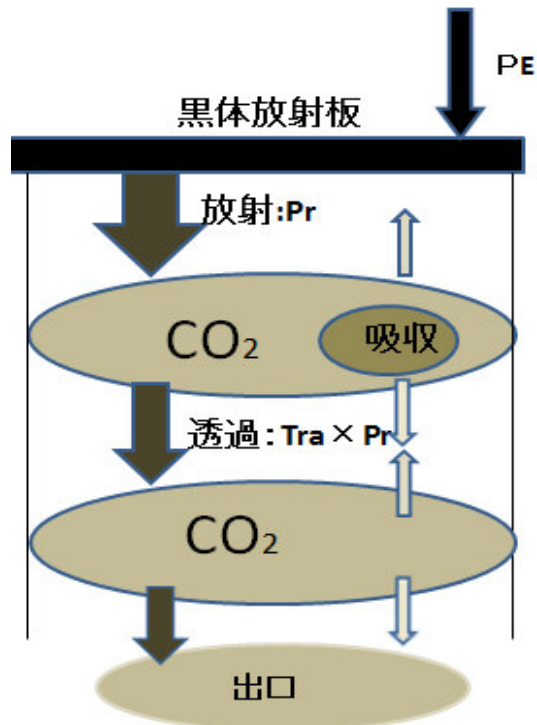


図3. 4. 1 多層大気モデル

一層大気モデルと多層大気モデルの違いを見ていく。まず、ガス透過率について考える。一層で考えたときは、spectral Calcで2 mでの透過率Traを使った。しかし、n層で考えるときは(2/n) mでの透過率にしなければならない。

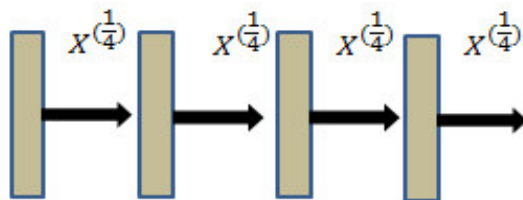


図3. 4. 2 透過率の考え方

図3. 4. 2は仮に透過率Xの2 mの導波管を4等分したときの透過率の関係を示している。よって、n層に分けたときの透過率はTra^(1/n)になる。これをもとに出口の電力をP_{EX}として、大気一層から四層モデルの計算をすると、

$$P_{EX} = \left(\frac{1 + Tra^{(1/n)}}{2} \right)^n \times Pr \quad (3. 9)$$

となった。電力を考えずに式3. 9を使って層の変化によつての透過率の変化を見た。例として二酸化炭素ガス100%時の平均透過率0. 796[-]を使っていく。

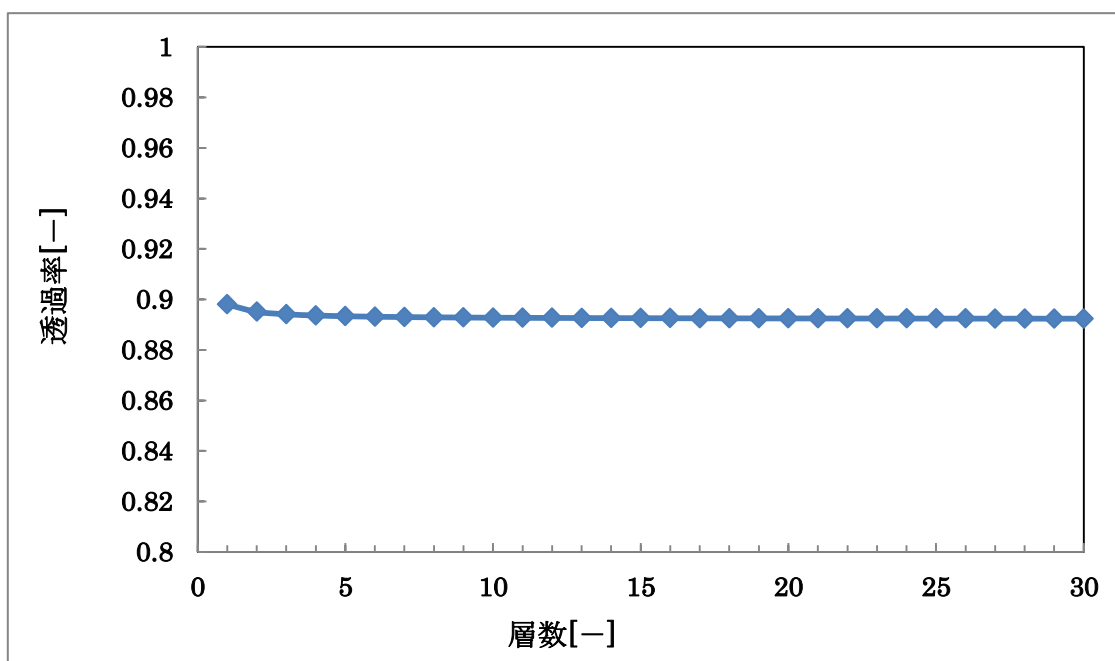


図3. 4. 3 (a) n層による透過率 (Tra=0. 796の時)

図3. 4. 3を見るとあまり変化がないことが分かる。
 しかし、Traを0[-]とすると図3. 4. 3 (b) となる。

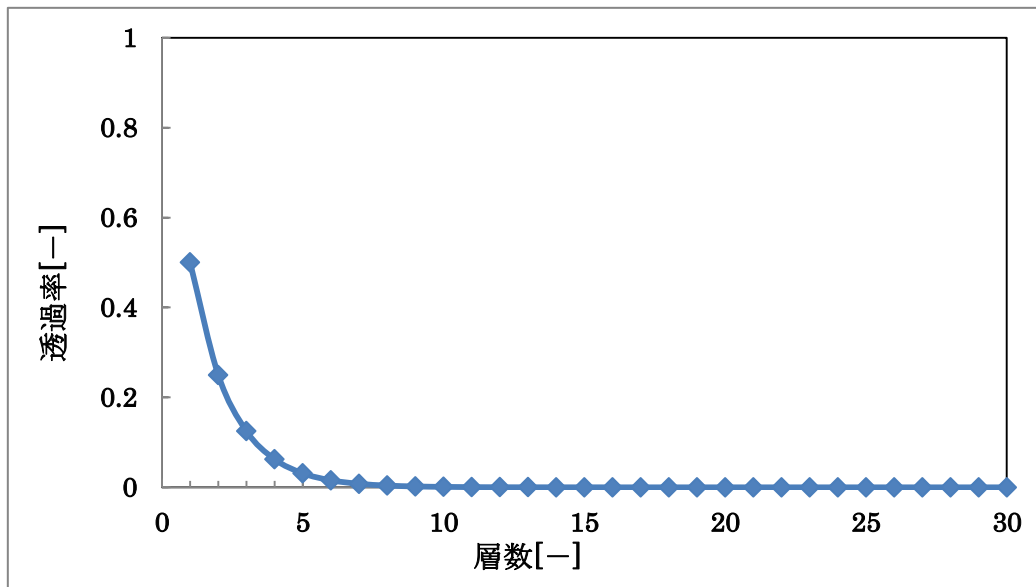


図3. 4. 3 (b) n層による透過率 (Tra=0の時)

透過率 Tra が低い方が多層になると変化が大きくなった。この結果より、透過率を平均して使うことが間違っていると分かる。また、20層あたりよりデータが落ち着いてきているところから多層を20層にした。よって、各波数で大気20層の透過率と分光放射輝度を掛け合わせて理論値を出すことにした。式3. 2と式3. 9より、 P_{EX} を算出した。

$$P_{EX} = \int_0^{3000} I(k) \left(\frac{1 + Tra(k)^{\frac{1}{n}}}{2} \right)^n dk \times \pi S \quad (3.10)$$

式3. 10より、各二酸化炭素濃度での理論放射熱量を出したものを図3. 4. 4に示す。

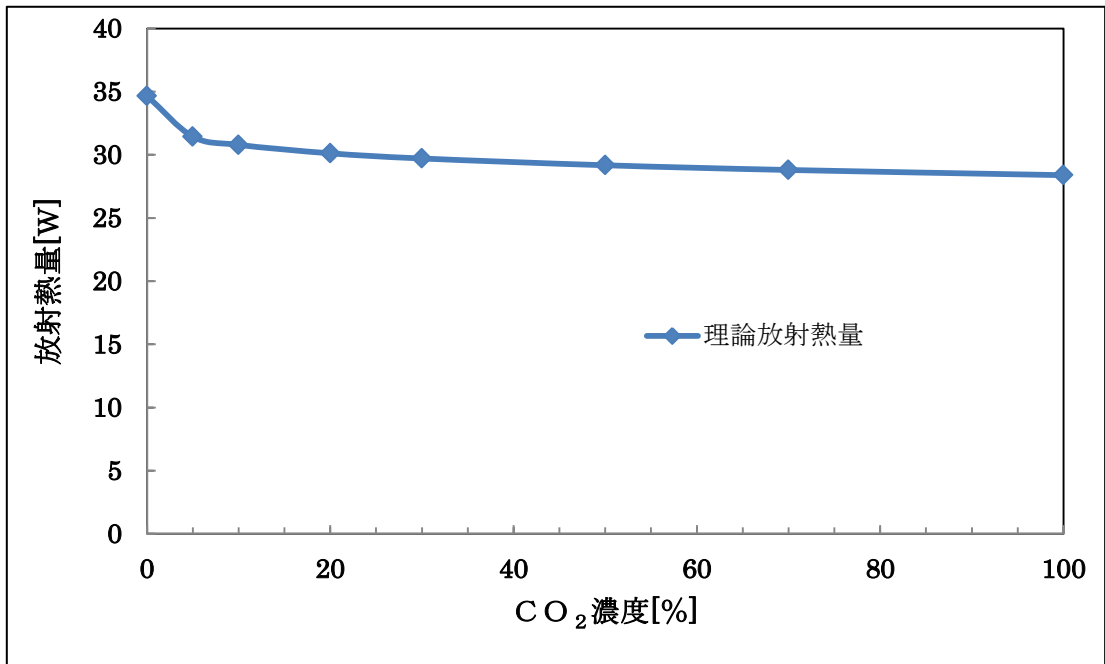


图 3. 4. 4 理論放射熱量

第四章. 温室効果検証実験

4. 1 実験手順

次の手順で実験を行った。

1. μ V計1のゼロ点（室温）設定をする。
2. 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波管内のガス濃度の変化を防ぐ。
3. ガス濃度計の校正をする。
4. 実験するガスを導波管に溜め、送風機を回す。
5. μ V計2とL a b V I E Wを起動させる。
6. 電源電圧30Vを入れて温度制御を行い、データを集め解析する。

今回の実験では、導波管の安定を待つために電源を入れて30分後からのデータを解析に使用した。

4. 2 一本と二本の比較

導波管を一本と二本で実験をした。表2は、管を一本から二本に変えたときの放射熱量の差をあらわした表である。この実験値の放射熱量は

$$P_E = (V^2 / R) \times \alpha \quad (4. 2)$$

で求めた。

表2, 管の長さを変えたときの放射熱量

	CO2 100%[W]	CO2 0%[W]
管一本	13. 31(0. 09)	14. 76(0. 13)
管二本	11. 51(0. 03)	12. 85(0. 05)

※ () 内は標準偏差

このときの平均室温は22. 6℃である。管一本と管二本を比べて管二本のほうが放射束の低い原因は、管の縦の長さが二倍になったことにより液体窒素による冷却が一本のときと比べ二倍になった分弱くなったためだと考える。また、管を二本にしたことにより標準偏差が小さくなり実験の精度が上がった。

4. 3 二酸化炭素ガスでの実験

本実験は2 mで行った. 図4. 3. 1と図4. 3. 2は実験データである. 二酸化炭素の0%と100%の実験でデューティー比を出すための電圧, 黒体放射板の温度, 管内温度をまとめている.

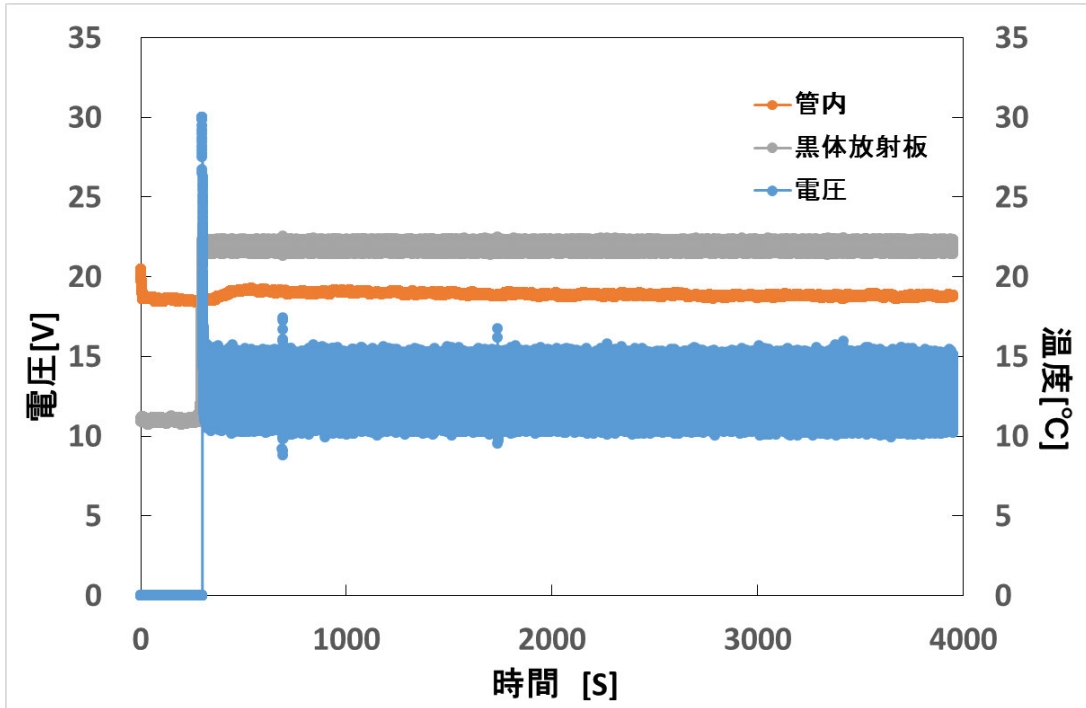


図4. 3. 1 二酸化炭素0%の実験データ

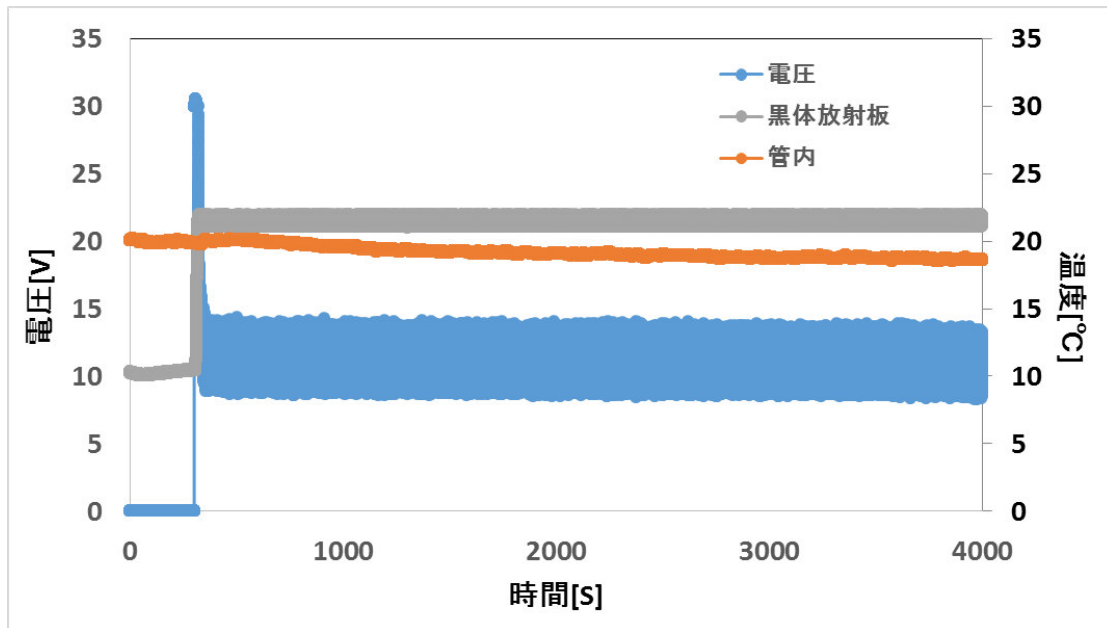


図4. 3. 2 二酸化炭素100%の実験データ

実験データを使って、 P_E を求めた。二酸化炭素濃度が低いところの方が実験値に大きな差が出たので、濃度が低いところの実験を多く行った。図4. 3. 3は実験値と理論値の放射熱量である。このグラフは理論値の値を0.35倍にして0%での値を同じにした。理論値が実験値の約3倍出たのは、窓材、放射の条件や管の反射率によって出たものである。しかし、傾向を見ると近い傾向が出たため温室効果の実験検証がうまく進んでいることが分かる。

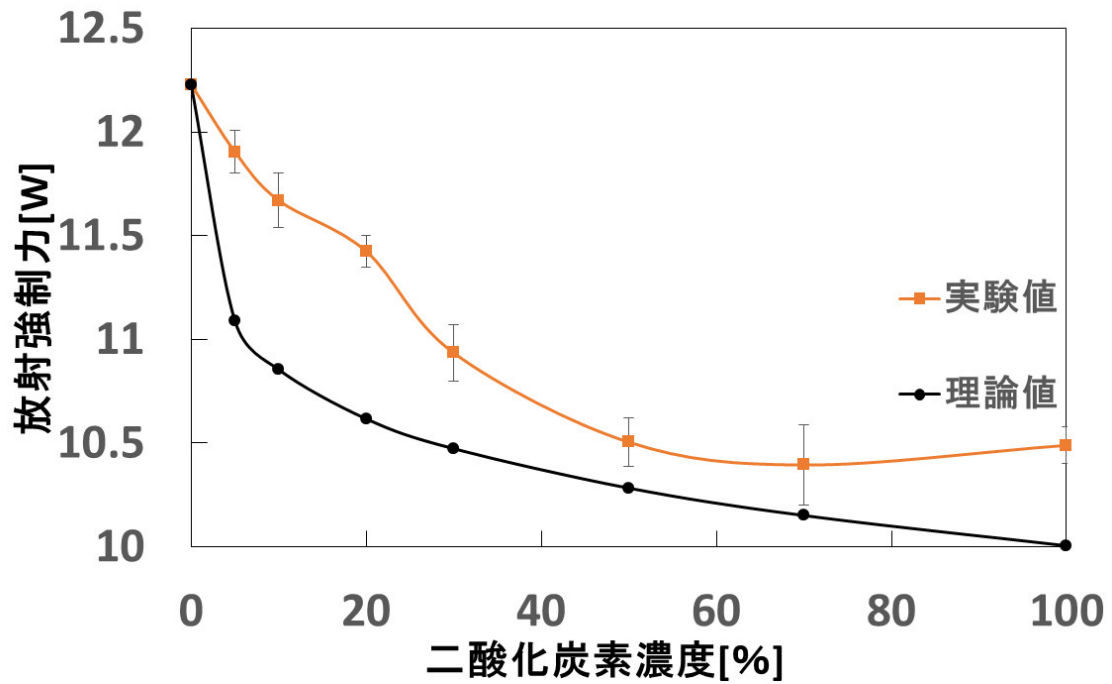


図4. 3. 3 実験値と理論値の放射熱量

4. 4 メタンガスでの実験

メタンガスでの実験も二酸化炭素ガスの実験とほぼ同じ方法で行った。メタンガスは窒素100%にした導波管に風船に入れて、濃度計がなかったため体積比で考えた。