

別紙 A 「自由テーマ」応募フォーム詳細

- ・ A4 サイズ 10 ページ以下とします。
- ・ 以下の各項目について記入してください。

1. 実験テーマ名

「重力変動時における中空層の伝熱特性（対流成分）に関する研究」

2. 実験の目的・概要

（実験のねらい、その基本となる仮定、期待する成果などを記載してください。）

2.1 目的

重力が 0~2G の間で変化する場合、つまり空気の温度差（密度差）による対流の影響が変化する場合に中空層の伝熱特性（熱抵抗）を把握するのが本実験の目的である。

2.2 中空層の熱伝達（1G 下）

中空層とは、壁体内や二重ガラスの空気層のことで、両内表面に温度差があると熱は輻射と伝導対流で移動する。このうち、輻射熱交換量は式（1）で理論的に求めることができる。

$$Q = \varepsilon_{12} \sigma (\theta_1^4 - \theta_2^4) S \quad [\text{W}] \quad \text{式 (1)}$$

Q: 輻射エネルギー [W]

ε_{12} : 平行 2 平面間の有効輻射率

σ : シュテファン-ボルツマン定数 $5.67 \times 10^{-8} \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$

θ : 内側表面温度 [K]

S: 壁体の面積 [m^2]

しかし、伝導対流は空気層の厚さ、熱流の方向、空気の密閉度などで微妙に変わるから、理論のほか最終的に実験が必要となる。空気層の伝熱量 q_a は、次式のようになる。

$$q_a = c_a (\theta_1 - \theta_2) = (c_r + c_c) (\theta_1 - \theta_2) = \frac{1}{r_a} (\theta_1 - \theta_2) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad \text{式 (2)}$$

c_a : 空気層の総合熱コンダクタンス [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

c_r : 空気層の輻射熱コンダクタンス [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

c_c : 空気層の伝導対流熱コンダクタンス [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

r_a : 空気層の総合熱抵抗 [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

輻射熱交換量は式（1）と同じであるから、 c_r は次式となる。

$$c_r = \varepsilon_{12} \sigma \frac{(\theta_1^4 - \theta_2^4)}{(\theta_1 - \theta_2)} = \varepsilon_{12} C_b \beta \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}] \quad \text{式 (3)}$$

$$\varepsilon_{12} = 1 / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)$$

C_b : 黒体の輻射定数 $5.67 \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$

β : 温度係数 [K^3]

$$\beta = \left\{ \frac{(\theta_1/100)^4 - (\theta_2/100)^4}{\theta_1 - \theta_2} \right\} \cong 0.04 (\theta_m/100)^3 \cong 1 \mp 0.1 \quad \text{式 (4)}$$

$$\theta_m = (\theta_1 + \theta_2) / 2 \quad (\cong \text{は常温における近似})$$

伝導・対流による伝熱を考えると、空気層の厚さ (δ) が 10-15mm くらいまでは、空気自身の粘性のため流動せず、このため空気層の伝導熱コンダクタンス c_c は、空気

の熱伝導率を λ_a [W/m·K]とすると、

$$c_c = \frac{\lambda_a}{\delta} \quad \lambda_a \cong 0.024 \quad \text{式(5)}$$

で与えられる。空気層の厚みが増すと、対流作用が発生し熱コンダクタンスは式(5)よりも大きくなり、空気の見かけの熱伝導率が大きくなる。この対流作用は、下図のように上向き熱流のとき大きく、下向き熱流のとき小さい。

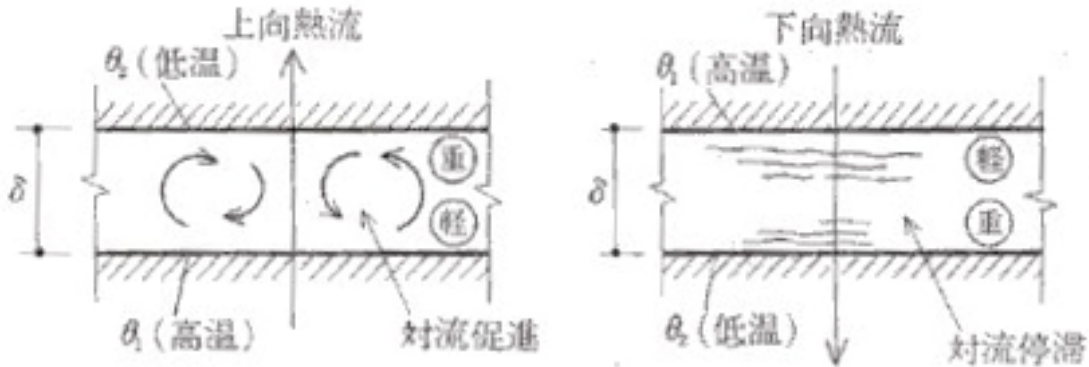
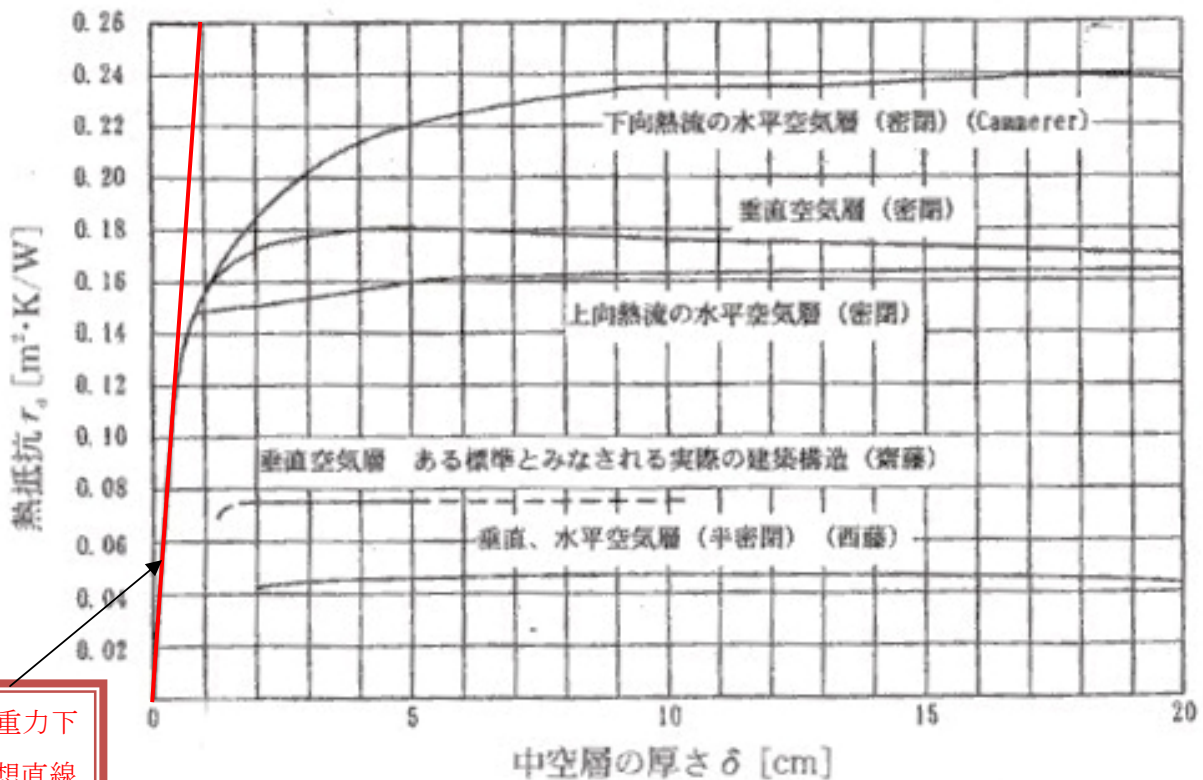


図1. 上向き熱流と下向き熱流

図2は、これらの空気層の総合熱抵抗が示されている。図から空気層の厚さが20cmを超えると、熱抵抗 r_a はほとんど増えないことが分かる。



微小重力下の
予想直線

図2. 中空層の厚さと熱抵抗の関係

(以上、「最新建築環境工学 改訂3版」井上書院 を引用した。)

2.3 中空層の熱伝達 (μG および $2G$ 下)

微小重力下では、空気の温度差(密度差)による対流が発生しないと考えられる。つまり図1のように熱流の向きには依存しないと予想できる。さらに、対流が発生しないので図2の厚さが小さい時の挙動が、厚さが大きい状態でも再現され厚さと熱抵抗がほぼ比例関係になるのではないかと予想できる。(図2に書き込んだ赤色の予想

直線参照)つまり空気は流体としてではなく固体のような役割を果たすと考えられる。これにより地球上とは比べ物にならないほどの断熱効果が期待でき、今後の宇宙建築の設計に影響を与えるのではないかと考えている。

また 2G 下では上向きの熱流は促進されるので熱抵抗が減少し、下向きの熱流はより対流が停滞するので熱抵抗が増加すると考えられる。

これらの予想を定量的に把握することが今回の実験の目的である。

3. 実験内容の区分

化学・物理・生物・医学・**理工**・文化・芸術・その他（ ）

4. 実験手順

(予想される実験手順・操作を記載してください。)

(観察・測定項目とその手段、試料の種類・名称もできるだけ具体的に、できれば国連番号または CAS 番号を記載してください。)

2.3 で示した事柄を確認するため、図 3 のような試験体を用意する。中空層の厚さが 0.3,0.5,1,3cm のユニットを持つ試験体である。また実験装置の 1 ユニットの詳細を図 4 に示した。つまりこの試験体は中空層の厚さが異なる 4 つのユニットからなる。この試験体を 2 回目のフライトの際は上下逆さまに設置することによって、上向き熱流と下向き熱流両方を実験する。実験は以下の手順で行う。

①電源を ON にして、ヒーターを稼働する。これは微小重力に突入する以前に行い、重力が変化するには図 4 の θ_1 と θ_2 (中空層の内側表面温度) が一定になっているようにする。(タイミングは事前実験で確かめておく)

②重力が変化する際の熱流・温度などの変化を見る。

③氷が溶けたら新しい氷と交換する。

④二回目のフライトでは実験装置の上下を逆さまにする。

測定点は図 4 にあるように熱流計を 8 か所、気温と表面温度 2 1 点とる。温度は径 0.2mm の熱電対を用いる。熱流計は英弘精機株式会社製 MF-200 (寸法 50×50×0.7mm) を、ヒーターはソーワエンジニアリング株式会社のペリメータヒーター (寸法 200×200×1mm、16W) を 4 枚、断熱材はスタイロフォーム 3 種をそれぞれ用いる。

なお、実験装置は既往研究「低放射材をもつ中空層の伝熱特性に関する研究」駒野清治を参考に設計した。下の写真はこの既往研究で用いられた中空層伝熱特性実験装置である。



写真 1. 中空層伝熱特性実験装置

式(2)より

$$r_a = \frac{1}{q_a}(\theta_1 - \theta_2) \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad \text{式(6)}$$

と表わせる。 θ_1 と θ_2 は図4と対応している。これらの温度を常に一定に保つために上部は氷とした。こうする事で、重力以外のパラメータを一定として測定できる。

そして、定常時は

$$q_a = \alpha = \beta \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad \text{式(7)}$$

となるので、熱流計の測定値から中空層の熱抵抗が求められることになる。こうして求めた熱抵抗の値が、重力が変化する際にどのように変化するかを確かめる。また上向き熱流と下向き熱流による差異も確かめる。その際中空層の厚さは4パターンとする。

5. 実験装置概要

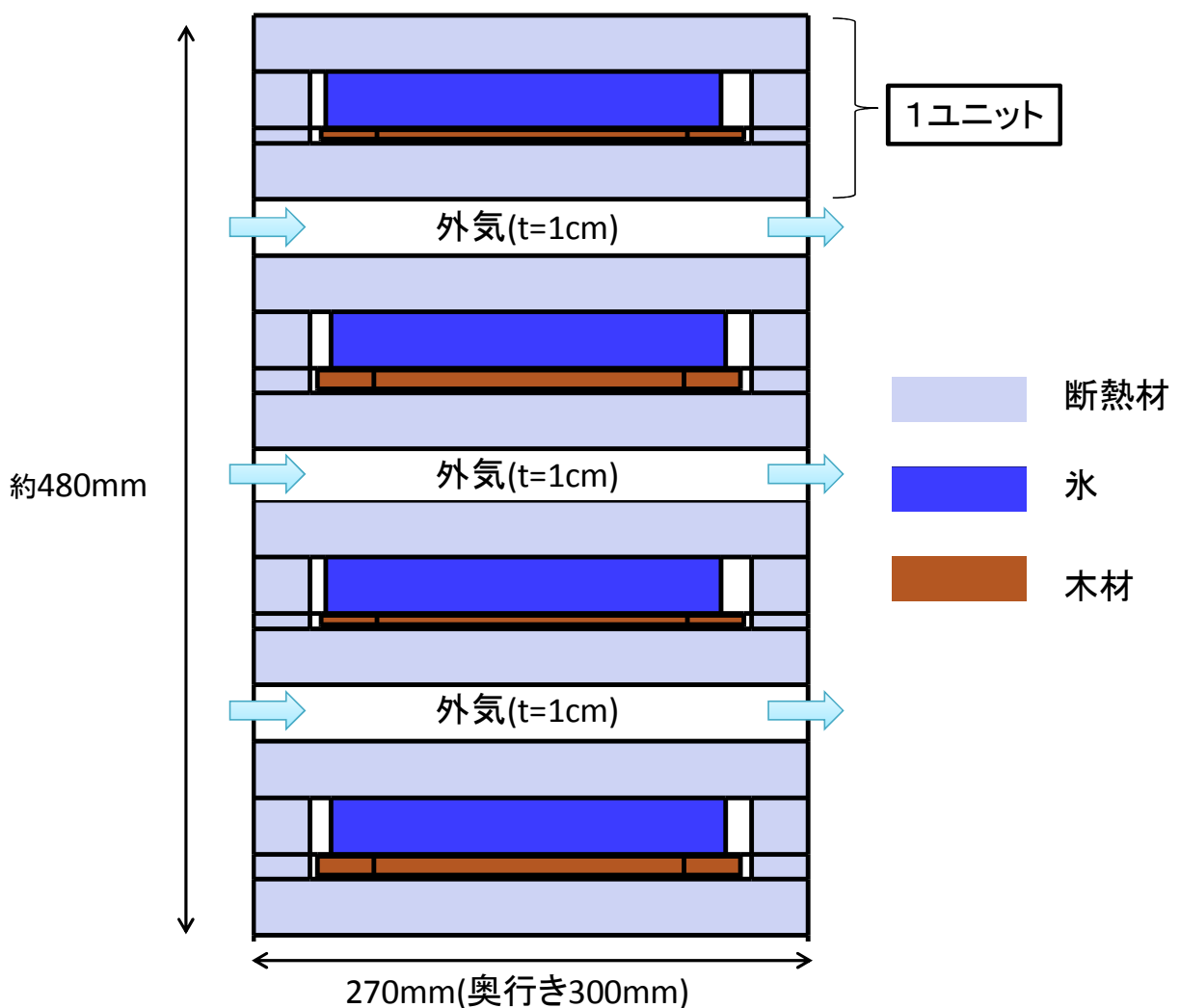


図3. 実験装置断面図

実験装置は図3のように4ユニットからなる箱型のものとなる。各ユニットの間は外気が通るようにすることで、熱的に独立させる。1ユニットの詳細は次の図4のようになる。

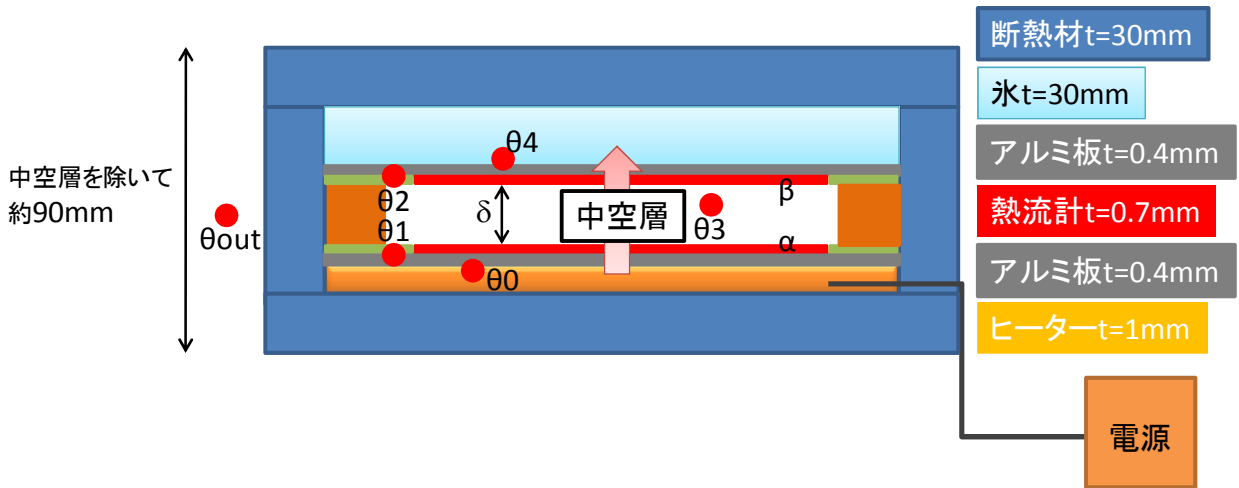


図4. 実験装置の1ユニットの詳細図

下部は面状ヒーターを有する加熱部で、直上にアルミ板を置く。また本実験式(3)の放射成分なるべく小さくしたいので、熱流計にアルミ箔を貼る。アルミの放射率は約0.1である。

中心が中空層で、ここの高さ(厚さ)が異なるユニットを4つ用意する。

上部は熱を受ける部分で、ここに密閉容器に封入した氷を設置する。これは氷の潜熱により θ_2 と θ_4 の温度が実験中一定にするためである。

ラック全体の配置図は以下のようなになる。なお配線は省略している。

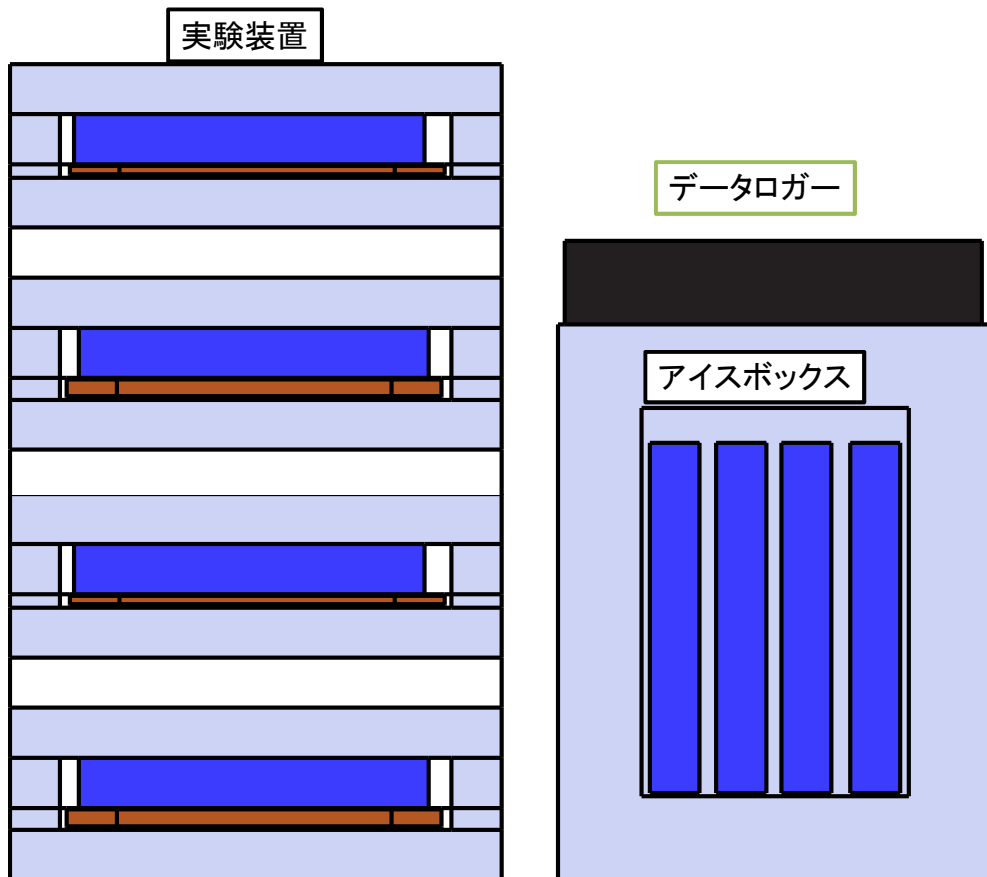


図5. ラック全体の断面図(正面から見た図)

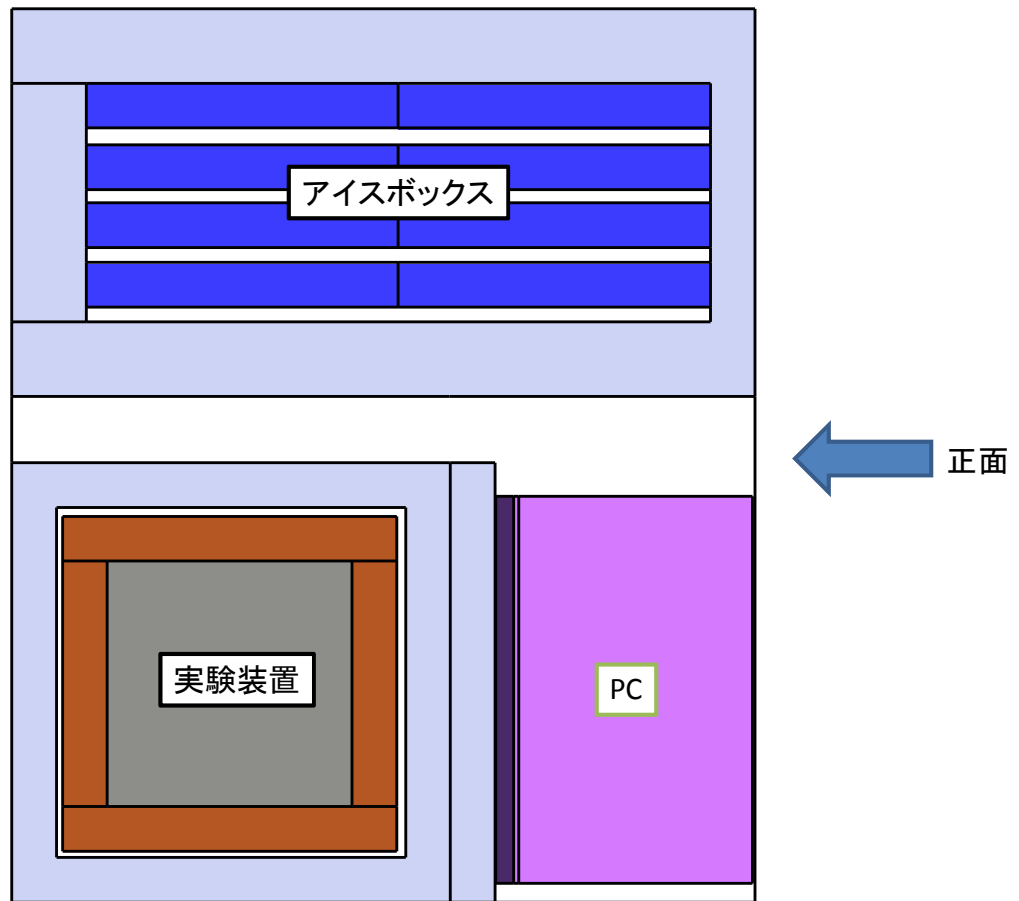


図6. ラック全体の平面図

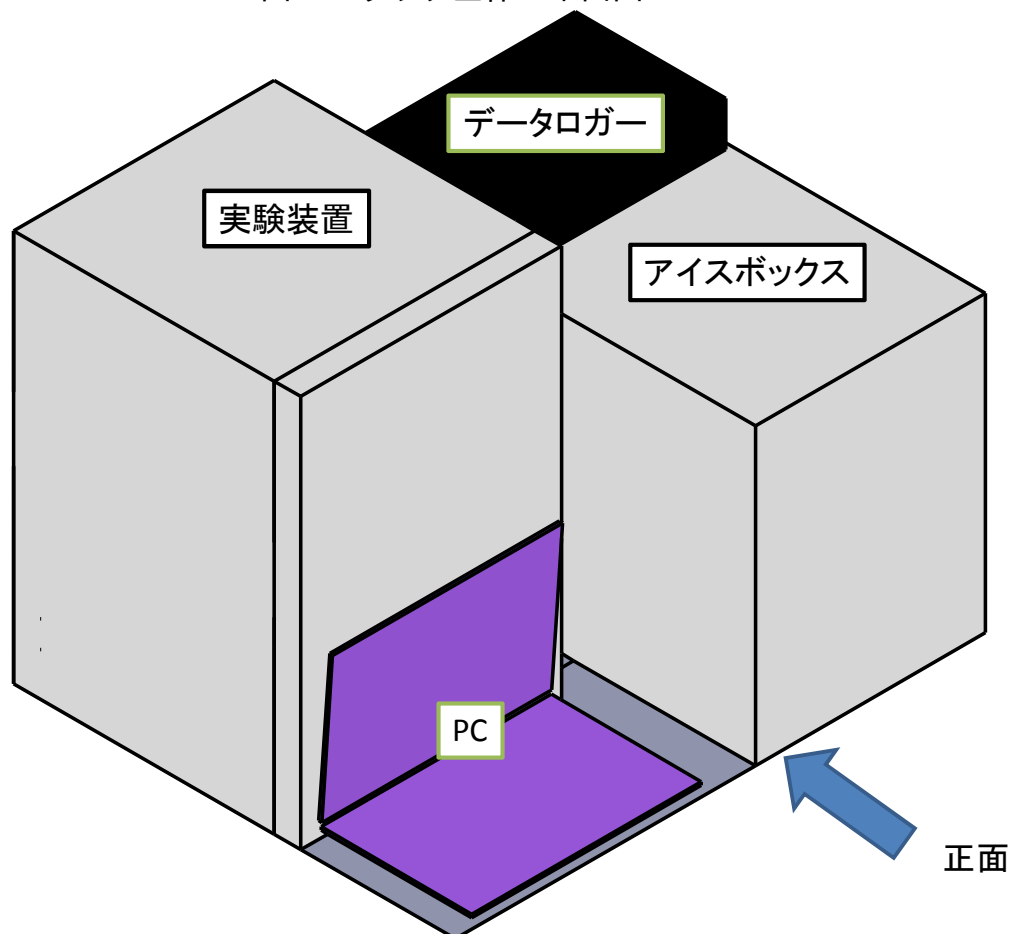


図7. ラック全体のアクセサリ

図5～7のようにアイスボックスを設け、交換用の氷も用意しておく。氷は前面の断熱材を取り外すことで交換する。交換のタイミングについては事前の実験で確かめる予定である。他に小型のノートパソコン（寸法 260×170×35mm）とデータロガー（寸法 250×170×50mm、DC15V 程度）を設置する。

6. 実験装置のサイズ／重量概算

実験装置の大きさは、

幅 : 270mm
奥行き : 300mm
高さ : 最大約 480mm

アイスボックスなどを含めると、

幅 : 570mm
奥行き : 500mm
高さ : 最大約 480mm

総重量は、パソコン・ロガー・アイスボックスを含めて 20kg 前後。

7. 必要な電源容量概算

(AC100V (Max. 3Amp) DC28V (Max. 5Amp))

前者はヒーターに用い、後者はデータロガーに用いる。ヒーターは計 64W、ロガーは DC15V 程度なので電源容量に収まっている。

8. 実験支援装置の利用要望

(実験開始信号) (計測データの収録装置)

9. 危険物等の搭載の有無

(高圧ガス・可燃物・毒物・その他)

特になし。

10. 実験実施時の航空機への搭乗希望有無

(有 ・ 無)

11. 役割分担

未定。

12. その他特記事項

特になし。

※ 1 G 下での予備実験の計画

本実験を成功させるために、以下のような予備実験を検討しております。

1. 中空層に様々な気体（酸素、二酸化炭素、窒素、水素など）を入れ実験装置がきちんと比重の差を検知できるか、応答にどの程度時間がかかるかを検討する。そこで得られたデータから、実験装置の改良が必要な場合は改良をし再実験していく。
2. ヒーターではなく、氷のような純物質の相変化（潜熱）を利用した場合の応答性を

検討する。

次の図8の赤い折れ線グラフはヒーターの温度特性を示しているが、ヒーターの温度は安定域でも若干上下する。温度が20秒の間にその波の山か谷にあたってしまうと、正確な値が得られないことが懸念される。

そこで、ヒーター以外に温度を一定に保つ方法を検証する。現段階ではヒーターより応答性の良いペルティエ素子を用いるか、PCM（潜熱蓄熱材）や氷＋塩など0℃以外の潜熱域を有する物質と氷とで中空層を挟むことを考えている。

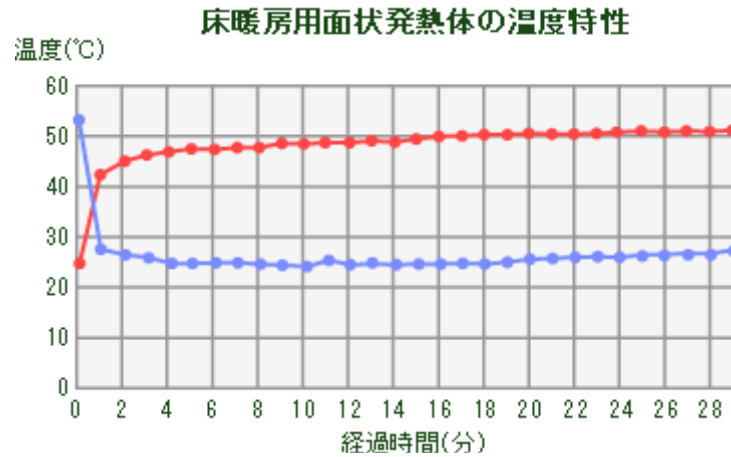


図8. ヒーターの温度特性