

# 環境傾度バイオーム内の温度・湿度制御に関する研究

環境システム学専攻 66749 倉持祐一 (2008年3月修了)

指導教員: 影本浩 教授, 阿久津好明 准教授

Keywords: 環境傾度バイオーム, 温度制御, 湿度制御, 模型実験, 数値計算

## 1 緒言

### 1.1 背景

産業革命以降、地球における大気中の二酸化炭素が急激に増加してきている。二酸化炭素は温室効果ガスのひとつであり、その排出量の大幅な増加は地球の温室効果に大きな影響を及ぼす。地球温暖化が進行した場合、地球への様々な影響が発生すると考えられているが、その中の一つに植生への影響がある。植生の生存は気候条件と密接に関連しているため、温暖化によって等温線が移動すると、それに伴って自らも移動しなければならない。しかし植物の移動速度が地球温暖化による等温線移動に追いつけない可能性が示唆されており、行き場を失った植生の絶滅の可能性が考えられる。

一方、生態学はこれまでフィールドでの実験・観測によって発展してきたが、生態系に影響を及ぼす環境要因の多様化・複雑化により、このような研究手法に限界が見え始めており、エネルギー・物質循環の多様な要素を系統的に解明する新たな研究手法が必要な段階に来ている。<sup>(1)</sup>

このような背景を受け、東京大学大学院新領域創成科学研究科では、大型環境制御施設「環境傾度バイオーム (Gradient Biome)」の建設を計画している。概要は以下の通り。

- 大きさ: 長さ 200m × 幅 50m × 高さ 40m
- 内部環境: 寒帯～熱帯の環境をノンバリアーで連続的に再現
- 制御項目: 温度, 湿度, 風速, 日射量, CO<sub>2</sub> 濃度
- モニタリング項目: 大気環境, 光環境, 水環境, 土壌環境, 植物生理, 植物生態

環境傾度バイオーム内では、各気候帯の境界

における生態系の動向、エネルギー・物質循環の特性などに関する研究や、チャンバー内を温暖化させた際の植物の移動特性などの研究も行われるため、ノンバリアーという条件は非常に重要であり、最大の特徴である。

### 1.2 既往の研究

矢野<sup>(2)</sup>によって模型実験および数値計算の研究が行われている。温度制御に関しては、植物導入時において寒帯～熱帯で 40K 差という条件を達成しているが、鉛直方向 5K 以下という条件は未達成である。湿度制御に関しては具体的な制御方法は示されていない。

### 1.3 研究目的

環境傾度バイオームを実現させるための研究として、内部環境の制御技術に関する研究と導入する生態系の構築に関する研究が必要である。しかし、連続空間の中に熱帯～寒帯の温度・湿度環境を実現した例は未だ無く、まず内部環境の制御技術を確立しなければならない。本研究では、環境傾度バイオームの設計条件を満足するような温度・湿度の制御法を考案し、その効果・実現性を模型実験および数値解析によって検証することを目的とした。環境傾度バイオームの設計条件を以下に示す。

- 熱帯から寒帯まで、ほぼ一定勾配で 40～50K 程度の温度差
- 地表面から天井までの鉛直方向の温度差は 5K 以下
- 最大風速が 5m/s 程度以下 (自然界における風速に近い値)
- 湿度は熱帯側で多湿、寒帯側で低湿

## 2 研究方法

### 2.1 模型実験

地球環境工学研究室が所有する環境傾度バイオーム 1/100 模型を使用し、環境制御実験を行った。模型チャンバーのサイズは 2.0 × 0.5 × 0.4m であり、温度制御装置としては寒帯側・熱帯側両側面に 2 枚ずつ、模型上面・下面に 5 枚ずつ、合計 14 枚の放熱板が取り付けられている。気流制御装置には吊り下げ型の仕切りと y 方向の風を発生させるファンを天井に設置した。

本論文では、便宜上長さ方向を x 方向、幅方向を y 方向、高さ方向を z 方向とする。

### 2.2 数値計算<sup>(3)</sup>

矢野による計算プログラムを元に、独自に改良したものを使用して数値計算を行った。主な支配方程式は、大気系の方程式として連続の式、Navier-Stokes 式、熱・水分の移流拡散式、乱流モデルとして  $k-\epsilon$  モデルを使用しているため  $k, \epsilon$  の移流拡散式を使用している。また、

土壌系の式として熱拡散式と水分移動の式を使用し、大気-土壌境界面の式として顕熱輸送量と蒸発量を考慮した熱収支の式を使用した。離散化は有限体積法で行い、SIMPLE 解法により約 100 万の直交グリッドを使用して計算

した。未知数は風速  $u, v, w$ 、圧力  $p$ 、気温  $T$ 、比湿  $q$ 、土壌温度  $T_s$ 、土壌含水率  $\theta$  である。

なお、本研究での計算は計算時間の都合上全て 1/100 模型スケールで実行している。

### 3 温度制御

#### 3.1 チャンバー壁面への温度の導入

チャンバー壁面に設置した放熱板の温度を設定し、温度制御を試みた。放熱板の温度は 0 ~ 40 に設定したが、実験では寒帯側の放熱板の温度が十分に冷却されない現象が見られた。結果としては、熱帯側で上昇気流が発生し、寒帯側で下降気流が発生するため、チャンバー全体で x-z 平面内の空気循環が出来てしまい、温度がほぼ均一になってしまった。このことから、チャンバー内の気流を制御することが温度制御に繋がるのではないかと考えた。

#### 3.2 仕切りの導入

3.1 の結果を踏まえ、天井から吊り下げる形の仕切り（高さ 20.0cm）を 5 枚設置し、気流制御を試みた。結果、仕切りを設置しても結局は仕切りの無い部分で空気が x 方向（長さ方向）に移動してしまい、仕切りの無い下半分はほぼ均一な温度環境となってしまった（Fig. 1）。

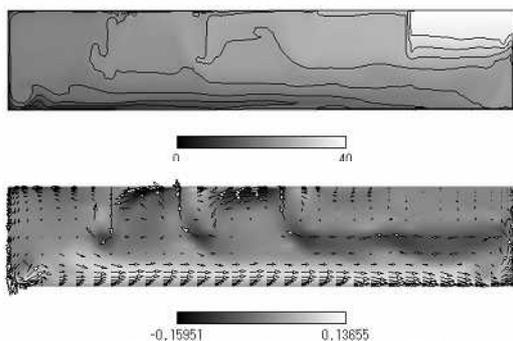


Fig. 1 x-z 断面図（上：温度[ ], 下：風速[m/s]）

#### 3.3 ファンの導入

チャンバー天井に y 方向の風を発生させるファンを設置し、y-z 平面内の空気循環をすることによって x 方向の空気の移動を緩和することを試みた。結果、ファンの導入は温度制御に対して非常に有効であるが、模型スケールにて 40K の水平温度勾配をつけるためには 1m/s の風速が必要であることが分かった（Fig. 2）。

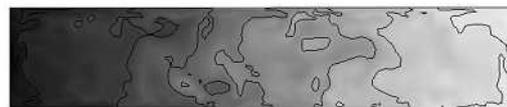
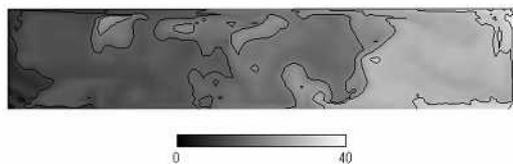


Fig. 2 温度分布図（上：ファン風速 0.5m/s, 下：ファン風速 1.0m/s）

#### 3.4 ファンと仕切りの導入

ファンのみでは、設計条件の温度差を実現するために速い風速が必要になるが、植物の生育に最適な風速は 0.5~1.0m/s とされている<sup>(4)</sup>。しかし 3.3 の結果から、ファンのみで温度制御を行うと実際のバイオームスケールでは 10m/s 程度の風速が必要だと考えられ、かなりの強風である。このため、ファンの風速を抑えるための気流制御補助装置として仕切りを同時に導入した。結果、風速が遅く温度制御が出来ていない場合は仕切り導入により温度環境が改善されるものの（Fig. 3）仕切りの高さによっては温度の上下変動が大きくなってしまふことが確認された。

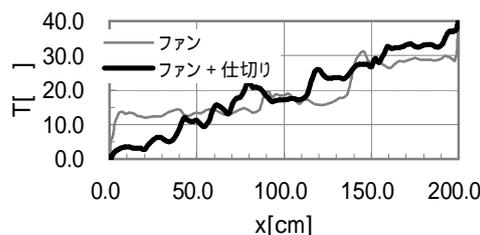


Fig. 3 温度グラフ（y=25.0cm, z=20.0cm）

#### 3.5 複数の y-z 平面空気循環による気流制御

気流制御の補助的装置第 2 案として、z 方向の風を発生させるファンによって y-z 平面空気循環を 2 個作ることを試みた（Fig. 4）。結果、元々風速が遅く設計条件の温度差が実現出来ていない場合には、この方法によってより理想に近い温度環境を実現出来ることが分かった。

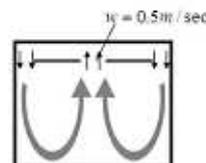


Fig. 4 2個の y-z 平面空気循環

### 3.6 擬似的な大気循環の導入

地球上の 3 つの循環 (ハドレー循環・フェレルル循環・極循環) をチャンバー内に再現したが、3 つの循環内で温度が均一になってしまった。循環の数を増やすことにより、より細かく、大きな温度差を実現することが出来たが、ファンの設置場所で温度が飛躍するという問題点は残ってしまった (Fig. 5)。

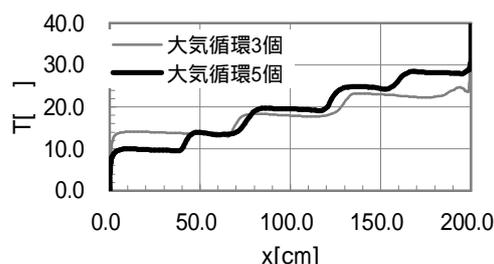


Fig. 5 温度グラフ (y=25.0cm, z=20.0cm)

## 4 湿度制御

気流制御のみでは湿度制御は不可能なため、3.3 で述べた天井のファンに湿度制御装置を組み込んだ。計算上では空気がファンを通過する際に強制的に湿度の値を変更している。

複数の条件にて実行した数値計算の結果を、2 種類の指標で定量的に比較した。

$$D = \frac{\sqrt{\sum (X_{ideal} - X_{result})^2}}{\text{number of grids}}$$

$$G = \frac{\sqrt{\sum \left( \left. \frac{\partial X}{\partial x} \right|_{ideal} - \left. \frac{\partial X}{\partial x} \right|_{result} \right)^2}}{\text{number of grids}}$$

計算では  $X=q$  である。D は温度・湿度の理想値と計算結果の差を表しており、G は温度勾配・湿度勾配の理想値と計算結果の差を表している。この 2 つの指標で比較した結果を Table.1 に示す。ここで、空気循環 2 とは Fig. 4 のような条件を示す。比較結果から以下のような知見が得られた。

- 仕切りの導入により温度・湿度の上下変動を抑えることが出来る。
- 風速が遅い場合は y-z 空気循環数の増加により理想に近い温度・湿度環境が得られるが、風速が速い場合は逆に理想勾配との差が大きくなってしまう。

温度に関する計算では  $X=T$ , 湿度に関する

Table.1 各条件での計算結果の定量的比較 (湿度制御時)

	$D_T [\times 10^{-3}]$	$D_q [\times 10^{-4}]$	$G_T [\times 10^{-2}]$	$G_q [\times 10^{-4}]$
ファン風速 0.5m/s, 仕切り x, 空気循環数 1	5.96	4.82	1.27	4.23
ファン風速 1.0m/s, 仕切り x, 空気循環数 1	3.20	2.84	0.959	2.80
ファン風速 0.5m/s, 仕切り, 空気循環数 1	3.33	3.24	0.626	1.87
ファン風速 1.0m/s, 仕切り, 空気循環数 1	2.61	2.50	0.649	2.12
ファン風速 0.5m/s, 仕切り x, 空気循環数 2	4.00	3.45	0.760	2.03
ファン風速 1.0m/s, 仕切り, 空気循環数 2	3.75	3.17	1.10	2.97

## 5 土壌・植物の導入

実際の環境傾度バイオームには植物が導入されるため、植物による空気抵抗と大気-土壌-植物の水分移動の条件を導入して計算を行った。湿度制御と同様に、温度・湿度および温度勾配・湿度勾配の理想値と計算結果の差を定量的に比較した。結果を Table.2 に示す。比較結果から、バイオーム内に土壌・植物を導入する

ことによって温度環境・湿度環境ともにより理想状態との差が小さくなることが分かった。また、Fig. 6 に示すように温度に関しては水平方向で約 40K の温度差を実現し、相対湿度に関しても寒帯側で 20%、熱帯側で 80% と高温多湿・低温低湿状態を実現することが出来た。

Table.2 各条件での計算結果の定量的比較 (土壌・植物導入時)

	$D_T [\times 10^{-3}]$	$D_q [\times 10^{-4}]$	$G_T [\times 10^{-2}]$	$G_q [\times 10^{-4}]$
風速 0.5m/s, 仕切り x, 空気循環数 1	7.29(7.56)	5.61(5.77)	1.42(1.70)	4.76(5.72)
風速 1.0m/s, 仕切り x, 空気循環数 1	3.29(3.86)	3.31(3.32)	0.817(1.26)	2.31(3.72)
風速 1.0m/s, 仕切り, 空気循環数 1	2.70(3.03)	2.89(2.92)	0.527(0.838)	1.71(2.75)

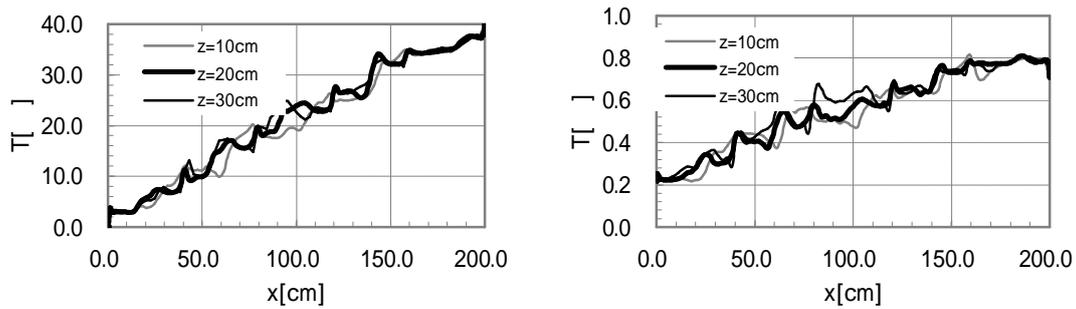


Fig. 6 の計算結果：y=25.0cmにおけるグラフ（左：温度グラフ，右：相対湿度グラフ）

## 6 結言

本研究では様々な温度・湿度制御法を実験および数値計算にて検証した。数値計算にて得られた結果については、理想的な温度・湿度分布との差に関して定量的な比較を行った。比較した結果、本研究において最も有効であると考えられる温度・湿度制御法は次のものである。

- チャンバー壁面に放熱板（実際にはエアコンなどが考えられる）
- 天井にy方向の風を発生させるファン設置
- 吊り下げ型の仕切りを導入（ファン風速を抑えるため）
- ファンの設置部分に、その位置に適した湿度の空気を供給する湿度制御装置を導入

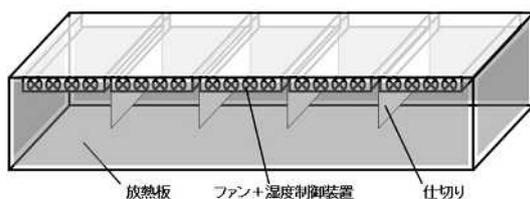


Fig. 7 本研究で最適と考えられる環境制御法

設計条件の「水平方向 40K 以上かつ鉛直方向 5K 以下の温度差」および「高温多湿・低温低湿の湿度環境」は概ね達成することが出来た。また、このとき風速も 5m/s を越えてしまうこ

とは無かった。しかし、今回は模型スケールでの数値計算であるため、実際の環境傾度バイオームのスケールでは、より速い風速が必要になると考えられる。さらに、温度や湿度のグラフを見てみると、まだ大きな上下変動が存在しており、一定勾配で傾度がついているとは言えない。

このようなことから、今後の課題としては、実際のバイオームスケールにおいて風速を可能な限り抑えつつ、一定の勾配での温度傾度・湿度傾度を実現することが挙げられる。今回使用した計算プログラムでは実際のバイオームスケールでの計算に非常に長い時間を必要としてしまうため、はじめに計算プログラムの高速化が必要と考えられる。

また、植物の抵抗、蒸散速度や土壌からの水分吸収量など詳細なデータの無いパラメーターが数多く残っているため、これらの値を実験によって測定していく必要があるだろう。

最後に、環境傾度バイオームの 1/10 模型が近く建設予定となっている。1/10 模型による研究が始まれば、これまで 1/100 模型によって得られたよりも詳細かつ多様な知見が得られると思われる。実際のバイオームスケールでの計算を実行する前に、1/10 模型スケールの計算プログラムにおいて、より詳細な研究を行う必要があるのではないだろうか。

## 参考文献

- (1) 東京大学大学院新領域創成科学研究科 大型環境制御実験施設ワーキンググループ：バイオーム研究 No.2 (2004)
- (2) 矢野順也：環境傾度バイオームにおける熱・水分環境の制御法に関する研究，東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士論文 (2004)
- (3) 荒川忠一：数値流体工学，東京大学出版会(1994)
- (4) 日本生物環境調節学会：新版 生物環境調節ハンドブック，養賢堂(1995)