

OpenFOAMを活用した環境傾度バイオーム内の 温度・湿度制御法の検討

丁 世珉、影 本 浩

東京大学大学院 新領域創成科学研究科
環境システム学専攻



1. 背景と目的
2. 数値計算法
3. 計算条件と結果
4. まとめ
5. 今後の予定

1. 背景と目的

地球温暖化

植物の移動速度が温暖化による等温線移動に追い付けず、絶滅する可能性有り

生態学

環境要因の多様化・複雑化により、フィールド実験・観測による研究に限界が見え始めた

環境傾度バイオーム

各気候帯の境界における生態系の動向、エネルギー・物質循環の特性に関する研究や、地球温暖化による植生移動への影響の研究などを行う大型環境実験施設。

寒帶～熱帶の生態系環境をノンバリアーで再現することが必要

1. 背景と目的



参考URL

<http://www.caseplan.biz/biome/index.html> BIOMEの紹介

1. 背景と目的



概要

- 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再現
- 制御項目: 温度, 湿度, 風速, 日射量, CO₂濃度
- モニタリング項目: 大気環境, 光環境, 水・土壤環境, 植物生理, 植物生態

現状

連續空間内に寒帯～熱帯までの環境(温度差・湿度差など)を実現した例は無い

連續空間内に寒帯～熱帯までの環境をノンバリアーで実現するための環境制御技術の開発が必要

1. 背景と目的

目的

環境傾度バイオームの設計条件を満足するような
温度・湿度制御法の確立

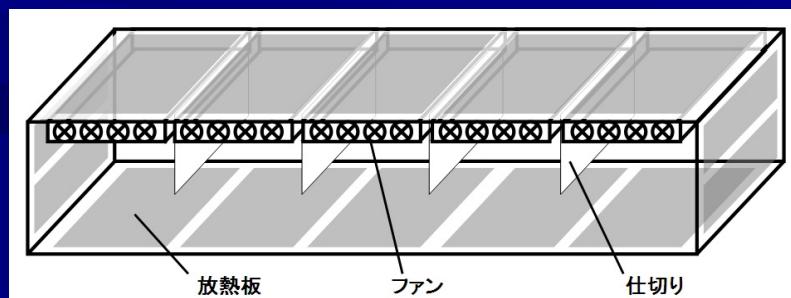
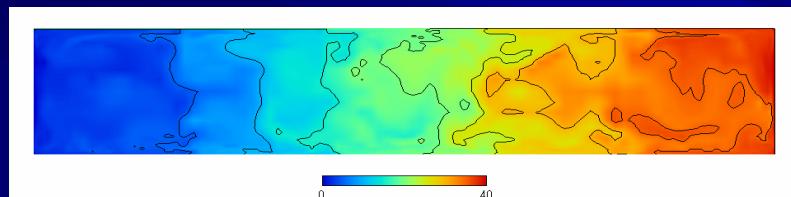
設計条件

- 熱帯から寒帯まで、ほぼ一定勾配で40K～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

1. 背景と目的

既往の研究(倉持、2007)

- ◆ 研究方法 : 模型試験と数値計算 (100分の1スケール)
- ◆ 結果 : 現段階で最も有効であると考えられる環境制御法
 - ▶ チャンバー壁面に放熱板
 - ▶ y 方向の風を発生させるファン
 - ▶ 各気候帯に適した湿度の空気を供給する湿度制御装置
 - ▶ 温度差重視→吊り下げ型の仕切り



最適と考えられる環境制御法c

コードの簡単比較

	既存	丁	商用
差分法	FVM	FVM	FVM
格子	構造、直角	構造、物体適合	ALL
乱流モデル	RANS(k-e)	LES(SGS)	ALL
速度圧力連成	SIMPLE	MAC系	Case Dependent
対流項	Hybrid	3次上流	ALL
時間項(?)	陰解法	陽解法	ALL
メリット	簡単、安定的(?) Customizeが安い	簡単、自分が良く 知っている Customizeが安い	色んな問題が解析 可能(信頼性)
デメリット	いろんな制限	開発からDebugま で時間掛かる	お金 Customizeに制限

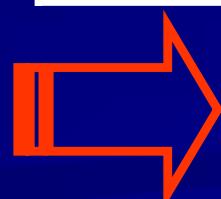
1. 背景と目的

- ◆ 既存コードの問題点と原因(あるいは対策)
 - 実スケールの計算の発散
 - > 差分法、格子
 - 内部物体(ファン、仕切りなど)の表現、壁効果、格子数
 - > 非構造格子、乱流モデル
 - 差分Schemeの変更、計算速度など
 - > Module化、並列化、Multi-Grid
 - 建築予定であるバイオームの形、素材、空調機器などの考慮
 - > 非構造格子、非定常、複数領域

より有効な制御方法の探し

コードの簡単比較

	商用	OpenFOAM
差分法	FVM	FVM
格子	ALL	ALL
乱流モデル	ALL	ALL
速度圧力連成	Case Dependent	Case Dependent
対流項	ALL	ALL
時間項(?)	ALL	ALL
メリット	色々な問題が解析可能 信頼性	Free 色々な問題が解析 商用よりCustomizeが安い
デメリット	お金 Customizeに制限	完璧に完成されたものではない Manualなどが不充分

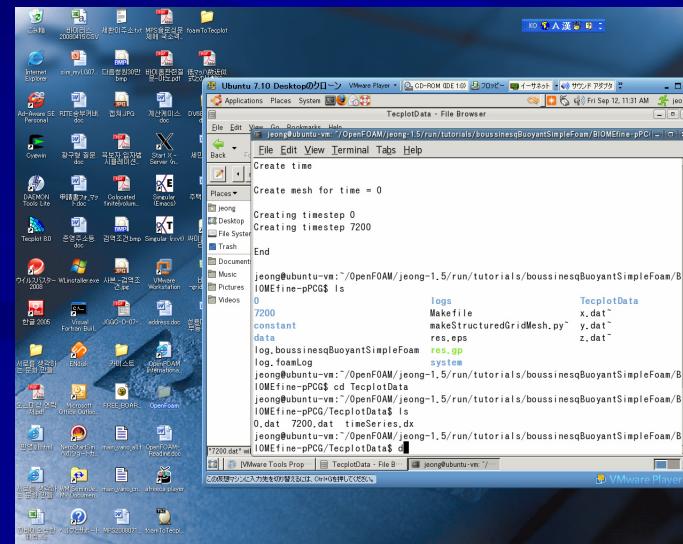


OpenFOAMの活用可能性を検討

2. 数値計算法

◆ OpenFOAMの開発、利用環境

1. 計算機 : Dell Precision 390, T3400 (Quad core 2.40/2.66Mhz, 4G ram)
2. Emulator : VMware WorkStation v6.04
3. OS(host/guest) : Windows XP Pro / Ubuntu 7.10 Desktop
4. OpenFOAM : 1.5 for Linux32, 2008. 7.14 Release



2. 数値計算法

- ◆ 支配方程式(3次元定常非圧縮性流れ、ブジネスク近似)

連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

Navier-Stokes式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (v_0 + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} - g_i \beta(T - T_0) + F_i$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$F_i = C_{D_i} S_i \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \cdot u_i$$

浮力効果
植生による空気抵抗

温度の輸送方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (a_0 + a_t) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right\}$$

$$a_0 = \frac{\nu_0}{Pr} \quad a_t = \frac{\nu_t}{\sigma_\theta}$$

2. 数値計算法

◆ 支配方程式+乱流モデル(標準 $k - \varepsilon$)

水蒸気(非湿)の移流拡散式

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(u_j q)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (a_0 + a_t) \frac{\partial q}{\partial x_j} \right\}$$

$$h \equiv \frac{e}{e_{sat}} = \exp\left(\frac{g \cdot \Psi}{R_W \cdot T_S}\right) e_{sat} = 6.1078 \times 10^\alpha,$$

$$q_{sat}(T_S) = \frac{0.622 e_{sat}}{1013.25 - 0.378 e_{sat}}$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{7.5 T_S}{T_S + 273.3} & (T_S \geq 0) \\ \frac{9.5 T_S}{T_S + 265.3} & (T_S < 0) \end{cases}$$

k の輸送方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(V_0 + \frac{V_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \varepsilon \boxed{G_k} + \boxed{F_k}$$

$$P_k = V_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$G_k = g_i \beta a_t \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

$$F_k = u_j \cdot C_{D_j} S_j \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \cdot u_j$$

植生による空気抵抗

ε の輸送方程式

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(V_0 + \frac{V_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \boxed{C_3 \frac{\varepsilon}{k} G_k} + \boxed{C_{P_\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} F_k}$$

浮力効果

2. 数値計算法

◆ OpenFOAMの利用

1. ブジネスク近似を用いる非等温乱流解析コードの改良
 - = SimpleFoam.C + kEpsilon.C (今野)
+ (植生の)空気抵抗 + 非湿計算(凝結ルーチン)
2. 仕切りの表現(厚さあり、なし) : snappyHexMesh
3. ファンの表現 : Box + 噴出し口と吸い込み口、kとe 境界値(等温乱流)
 - 1) snappyHexMesh
 - 2) subSetMesh、createPatch、refineMeshなど
4. 各種Script作成

2. 数値計算法

■ コード改良の例

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(u_j q)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (a_0 + a_t) \frac{\partial q}{\partial x_j} \right\}$$

```
tmp<fvScalarMatrix>qEqn
(
    fvm::ddt(q)+fvm::div(phi,q)
==fvm::laplacian(alphaEff,q)
);
qEqn().relax();
solve(qEqn());
```

```
forAll(q, celli)
{
    scalar etemp=6.1078*pow(10,(7.5*T[celli]/(237.3+T[celli])));

    if (T[celli] < 0.0)
    {
        etemp= 6.1078*pow(10,(9.5*T[celli]/(265.3+T[celli])));
    }
    scalar qtemp=0.622*etemp/(1012.5-0.378*etemp);
    if(q[celli]>=qtemp)
    {
        q[celli]=qtemp;
    }
}
```

土壤中の物質(水、水蒸気、熱)移動のなかで

$$\rho_w \frac{\partial \theta_G}{\partial t} = \rho_w D_{\theta,liq} \nabla^2 \theta_G + \rho_w D_{T,liq} \nabla^2 T_G + \rho_w \frac{\partial K}{\partial z} - E_{soil}$$

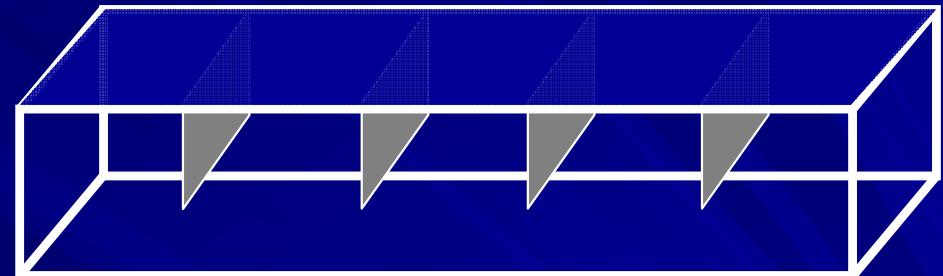
生成された水は上記式と連成予定

2. 数値計算法

■ 温度制御:仕切りの導入・ファンの導入

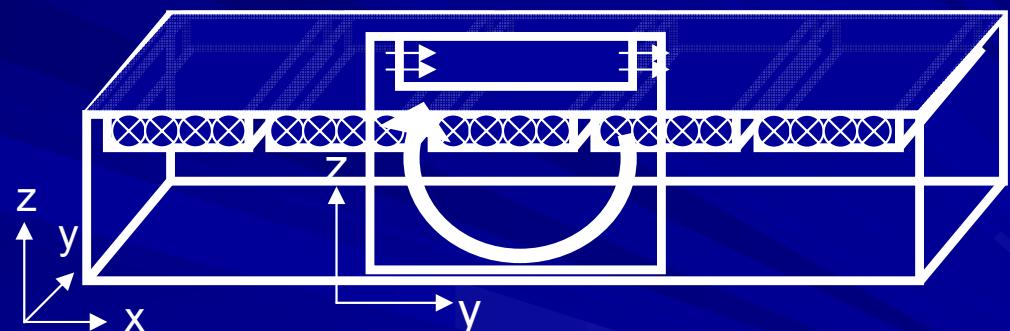
仕切り

天井から吊り下げる形の仕切り（高さ20cm）を4枚設置。空気のx方向移動を阻害する。

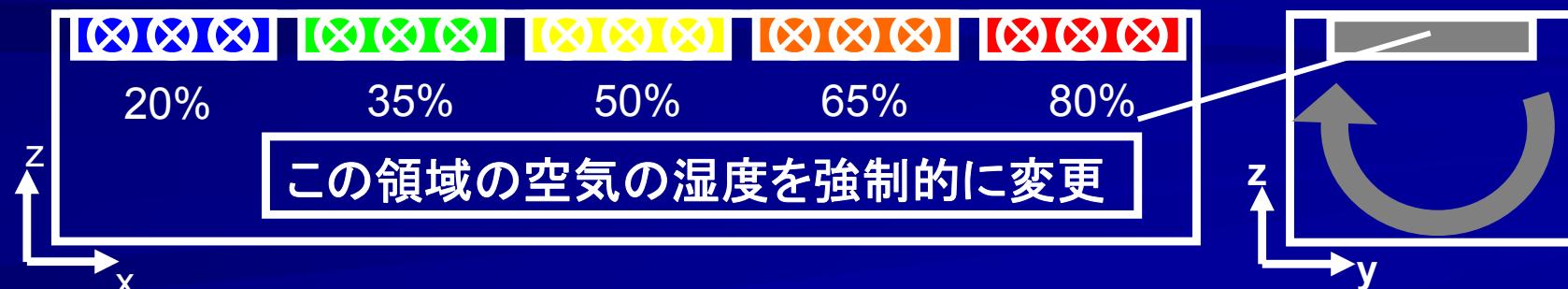


ファン

バイオーム天井にy方向の風を発生させるファンを設置。y-z平面空気循環を作り、空気のx方向移動を阻害する。

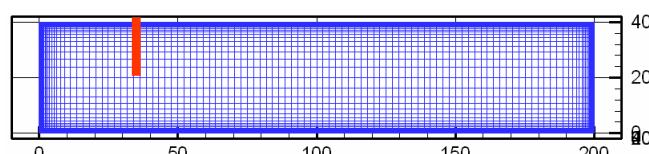
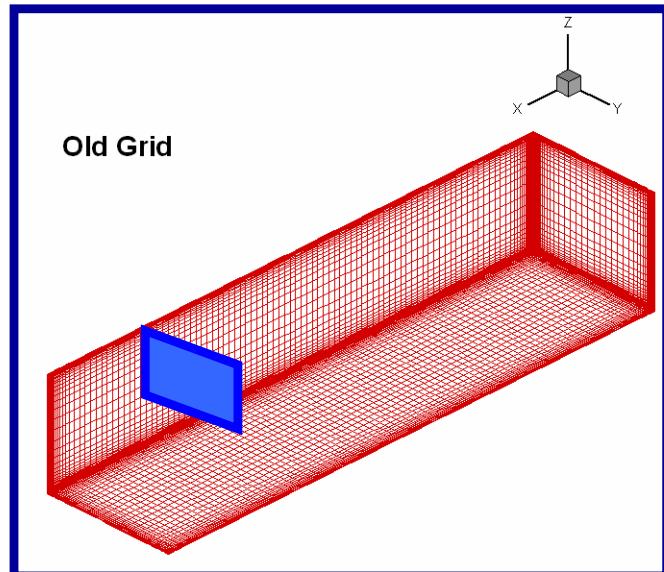


■ 湿度制御:ファン設置位置に、湿度制御装置の条件を導入



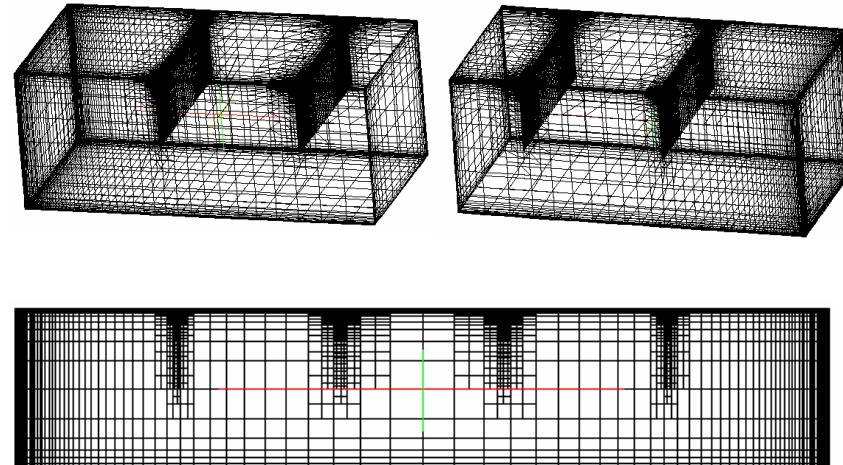
2. 数値計算法

■ 仕切り



今まで: 厚さない壁として処理

➤ 仕切り周辺の格子を細かくする必要
(壁と同じ)



厚さ無し

OpenFOAM

1 . Zero Thickness Wall (Baffle)

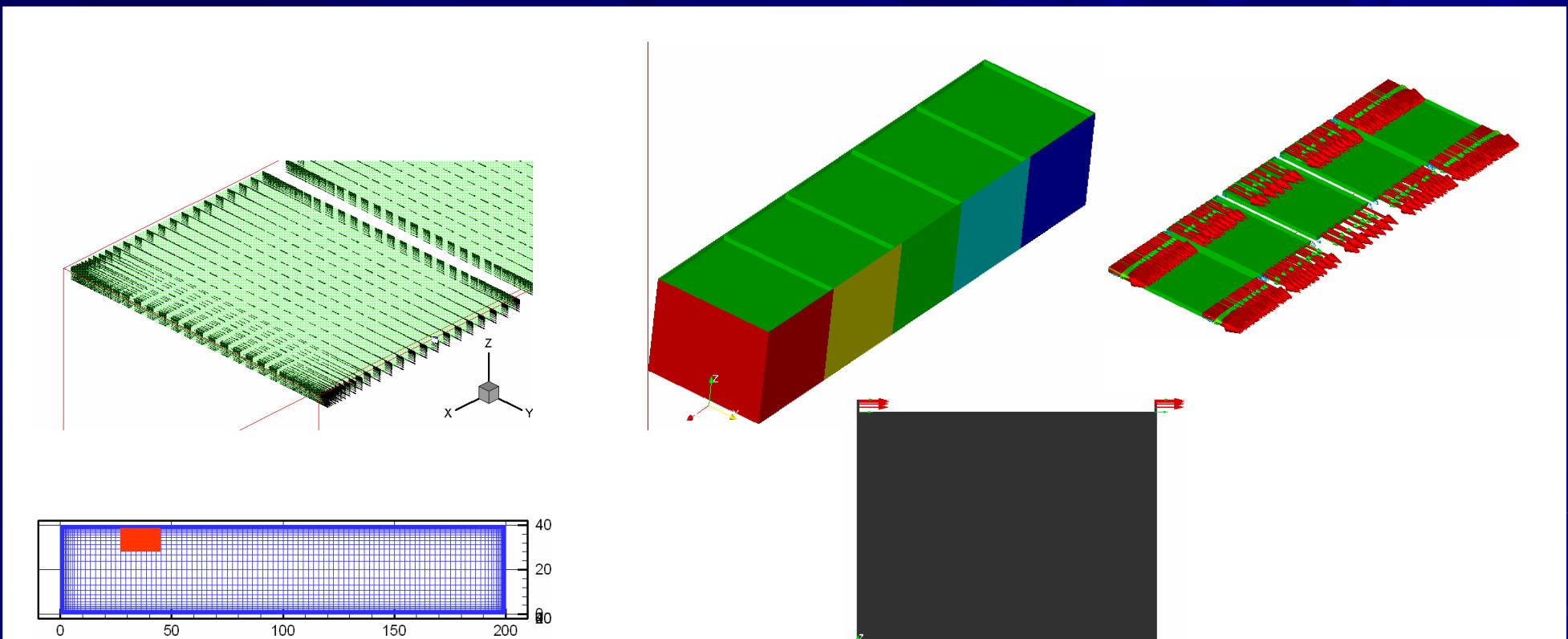
- `createBaffles`, `faceSet`などのを利用する
- `snappyHexMesh`

2 . Thin Wall ある程度厚さを与える

- `blockMesh+cellSet+refineMesh+subsetMesh`
- `snappyHexMesh`

2. 数値計算法

■ ファン



今まで: 内部領域一部の速度を一定

➤乱流効果なし

OpenFOAM

BOX部分を取り除き、周辺の格子を細かく

- snappyHexMesh、faceSetなど
- k, e の初期値は等方性仮定

3. 計算条件と結果

■ 計算の試み(模型スケール)

1. 放熱板のみ(実験、上下面)

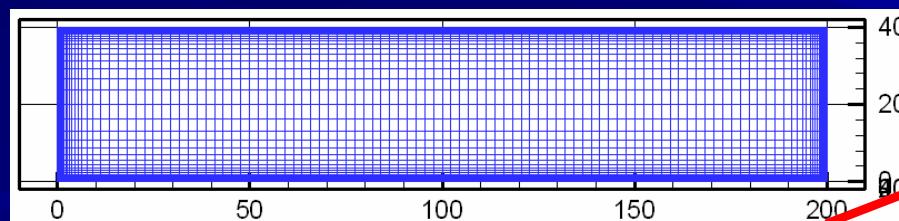
2. 放熱板のみ(側面、1:100)

3. ファンのみ(速度:1.0 m/s)

4. 仕切りのみ

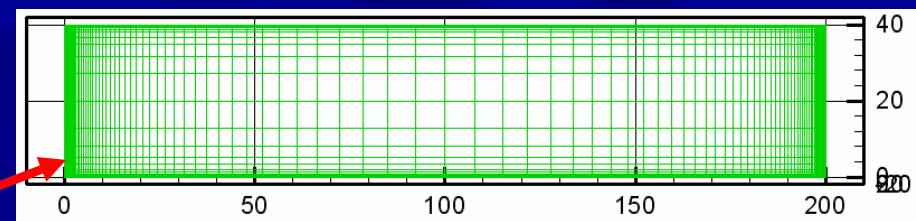
4. ファン+湿度調節(側面、1:100)

* 格子 : **151 × 81 × 71 > 51 × 25 × 21**



OLD

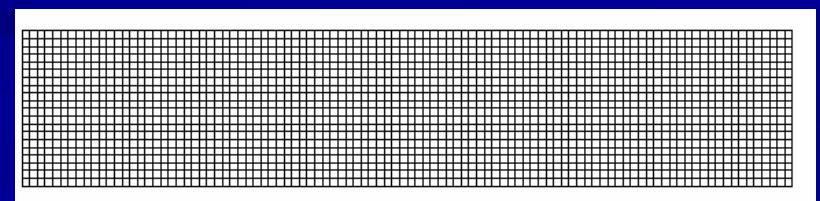
yPlusRAS



4. 放熱板のみ

グラスホフ数と浮力による予測速度から

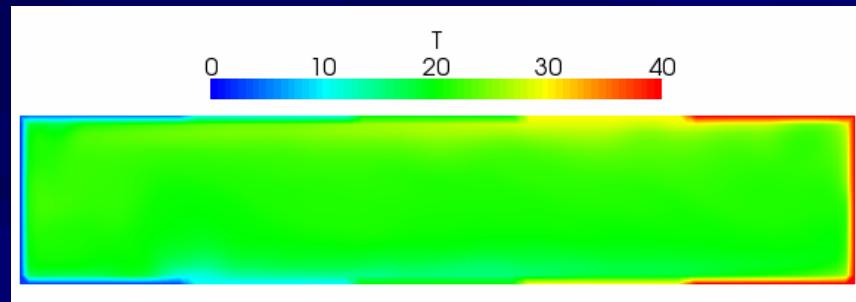
求めた平板基準 y^+ が小さすぎ



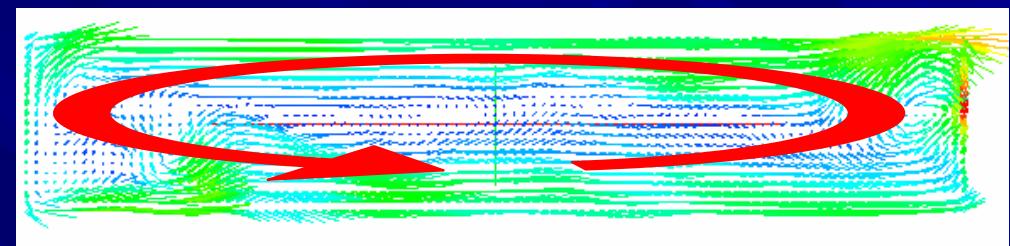
1. 放熱板のみ(実験、上下面)

3. 計算条件と結果

■ 放熱板のみ(実験、上下面)

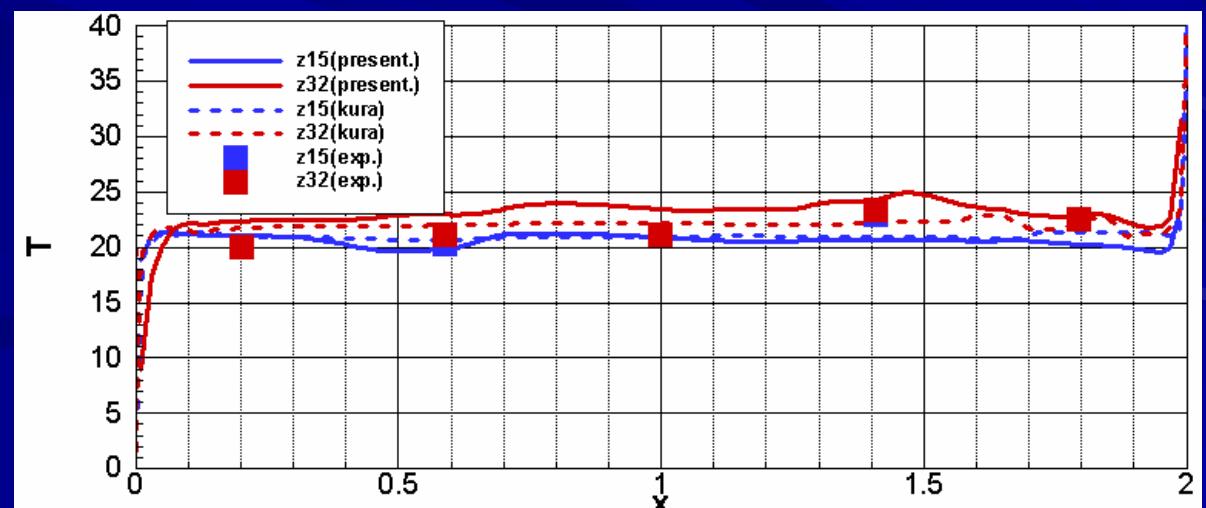
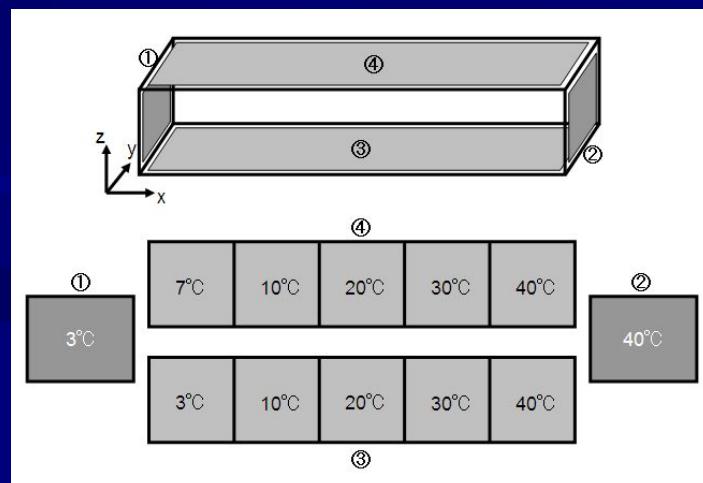


温度分布: ほぼ均一な温度になってしまった。



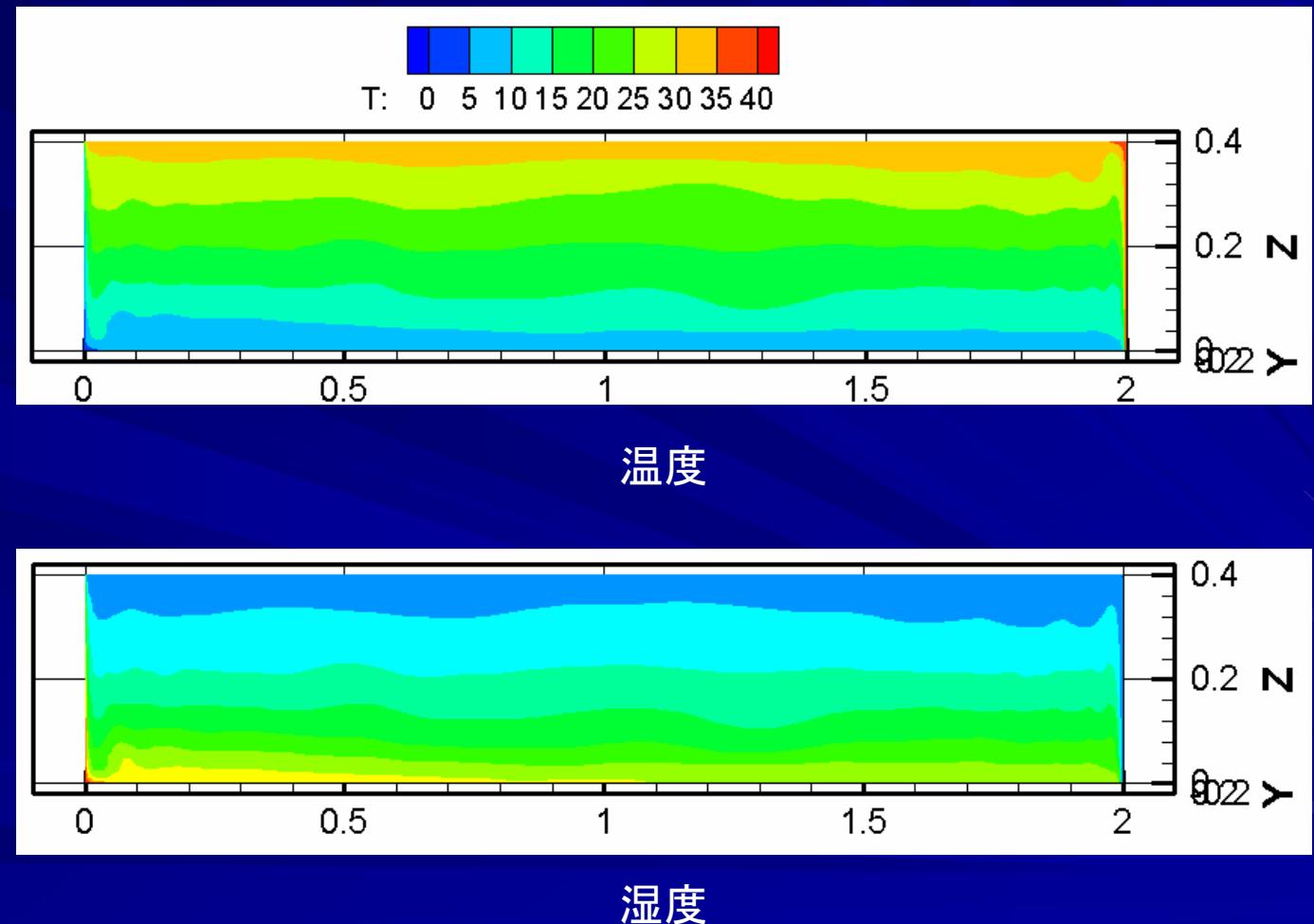
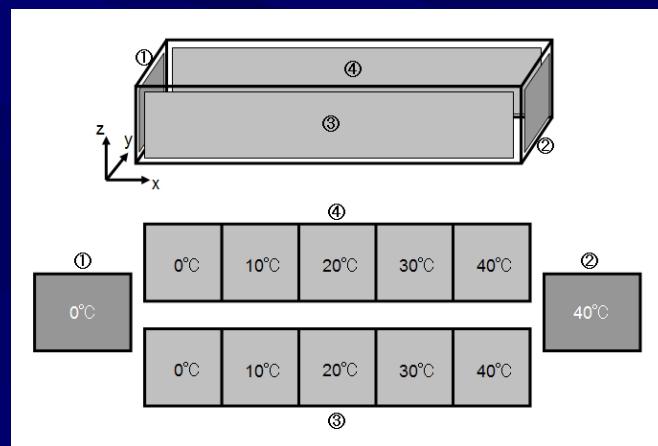
原因 →

x-z断面におけるチャンバー全体の空気循環が発生してしまう。



3. 計算条件と結果

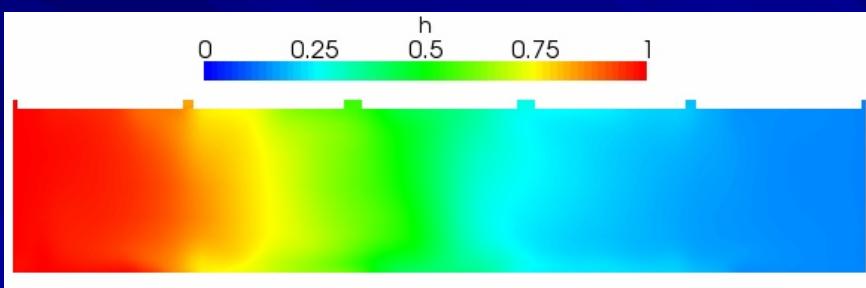
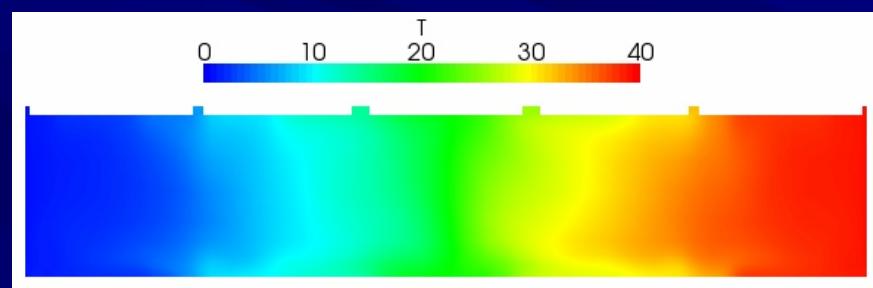
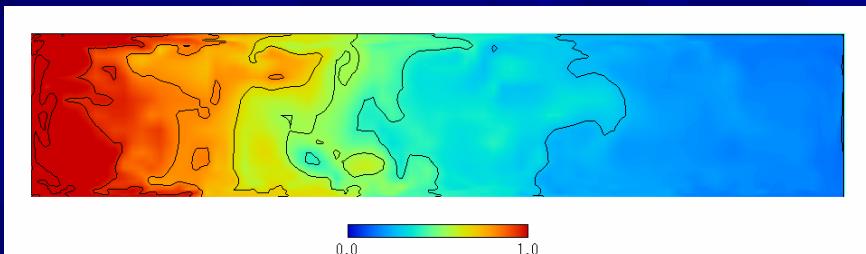
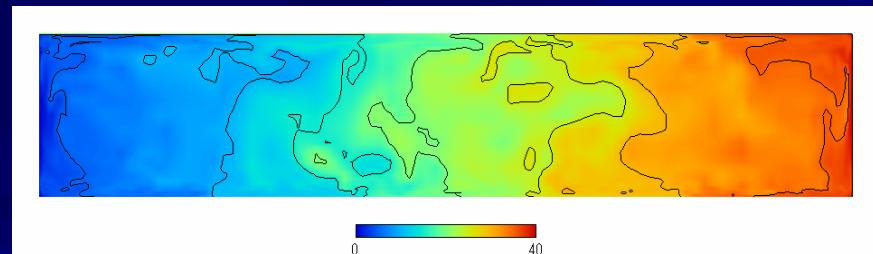
■ 放熱板のみ（側面、1:100）



上下面放熱板よりは良い、温度、湿度に勾配が作れない

3. 計算条件と結果

■ ファン



温度(上:倉持、下:OpenFOAM)

湿度(上:倉持、下: OpenFOAM)

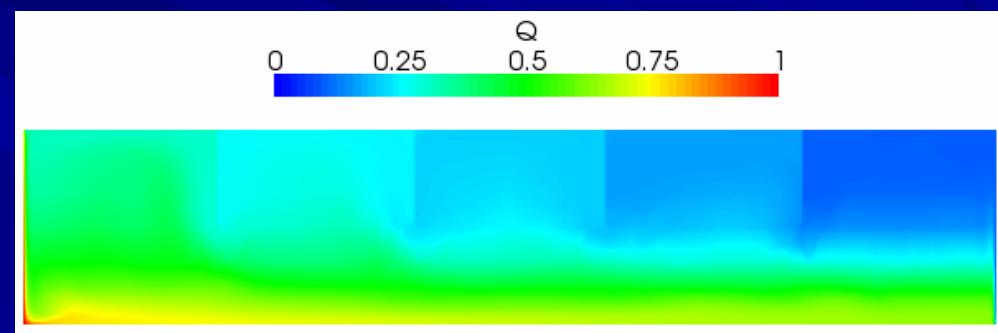
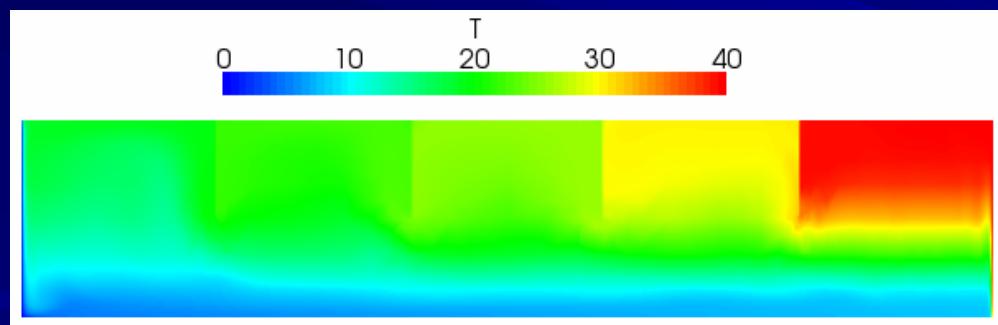
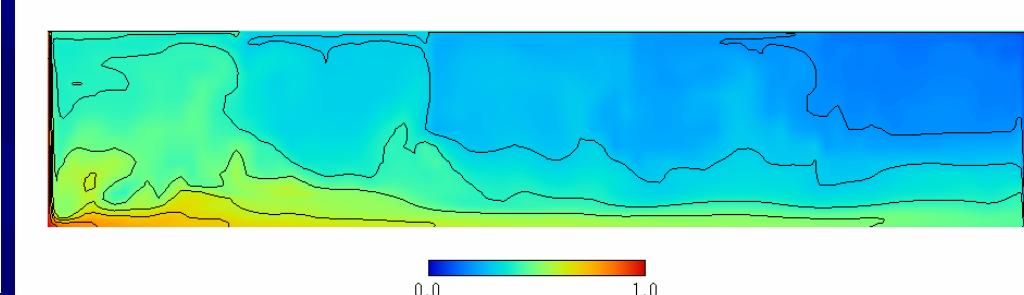
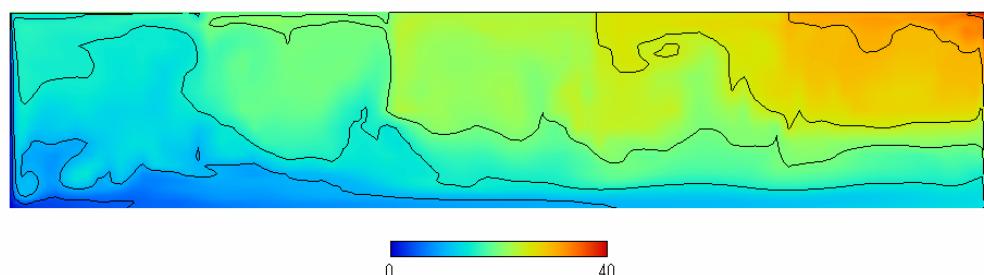
温度の勾配は作れましたが、湿度は理想と反対

1/20位の格子数でも傾向は見られる

3. 計算条件と結果

■ 仕切り

* 領域分割による並列化計算実行 : 手順と実行は簡単
(VMwareとQuad Coreの構造の影響で所要時間は同じ)



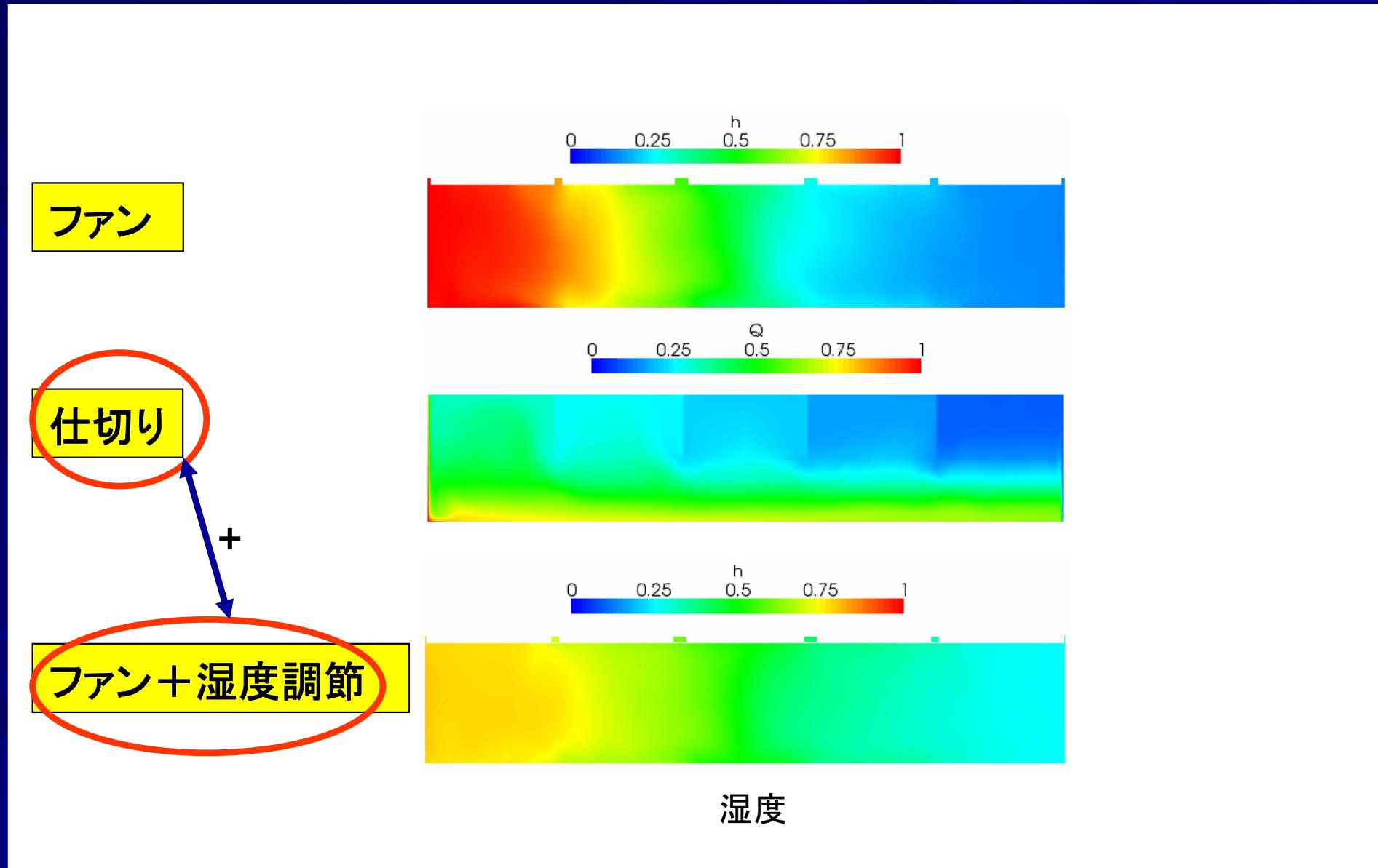
温度(上:倉持、下:OpenFOAM)

湿度(上:倉持、下: OpenFOAM)

仕切りがある部分だけ勾配が作れた。湿度は反対。

3. 計算条件と結果

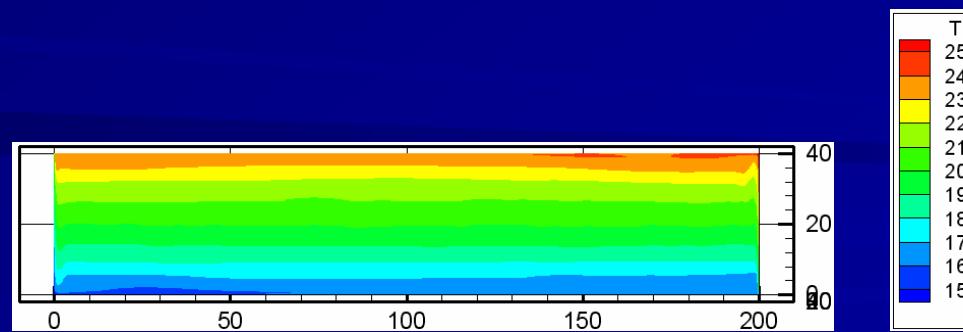
■ ファン + 湿度調節



4. まとめ

環境傾度バイオームの設計条件にあった環境を実現できる
環境制御法を探すために

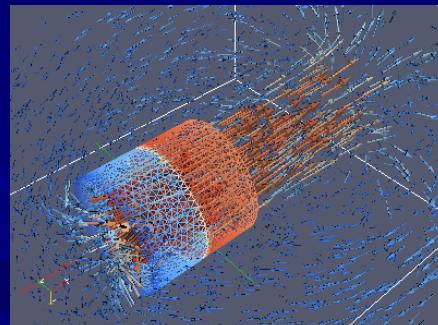
- OpenFoamの検討とImplementationを遂行
- 既存に提案された制御法を試し
- OpenFoamの有効性を確認



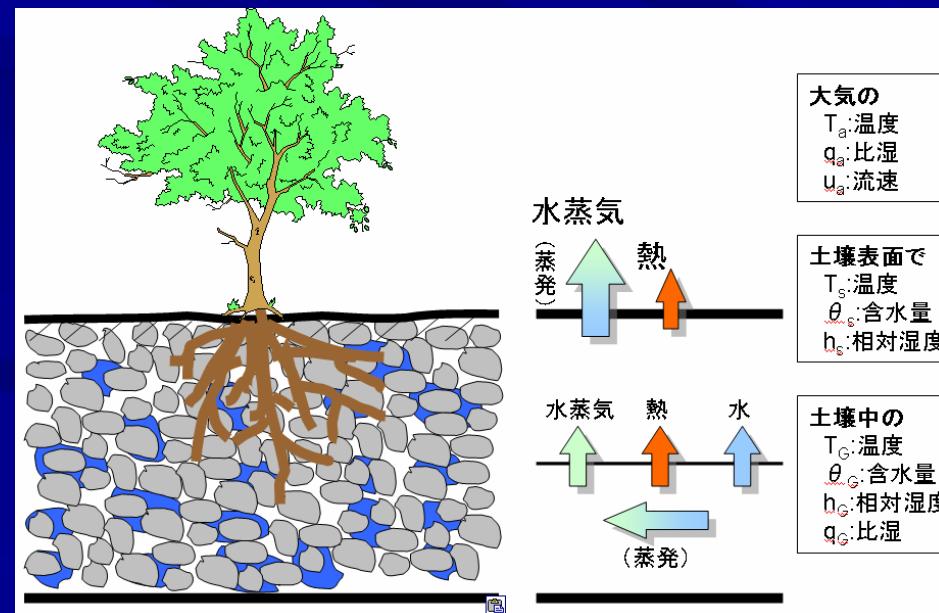
実スケールで計算(側面放熱板のみ)

5. 今後の予定

- 実験などとの定量的な比較
- 実スケールに効果的な温度・湿度制御方法を探す
- 土壌、植物モデルとの連成（温度、水分など）
- 実の空調機器を考慮



別 の 方 法 (検討予定)。ファン条件検討
: Zero Thickness Wall + Jump Condition



土壤中の物質移動

水

$$\rho_w \frac{\partial \theta_G}{\partial t} = \rho_w D_{\theta,liq} \nabla^2 \theta_G + \rho_w D_{T,liq} \nabla^2 T_G + \rho_w \frac{\partial K}{\partial z} - E_{soil}$$

水蒸気

$$\frac{\partial (\rho q_G (\theta_{SAT} - \theta_G))}{\partial t} = \rho f(\theta) D_{atm} \nabla^2 q_G + E_{soil}$$

熱

$$C \frac{\partial T_G}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T_G - l E_{soil}$$

(蒸発)

$$E_{soil} = \rho \frac{1}{0.02 F' / D_{atm}} [h q^* - q_G]$$

<未知数> 含水量 θ_G 、比湿 q_G 、温度 T_G

<定 数> 土壤の熱伝達率・熱容量は含水量に依存

$$\text{相対湿度 } h = \exp\left(\frac{g \psi}{R_w T}\right)$$

$$\text{飽和比湿 } q^* = q_{SAT}(T)$$

$$\begin{aligned} \lambda &= 0.251 + 0.5 \theta^{1/3} \\ C &= (1 - \theta_{SAT}) C_{soil} + \theta C_{water} \end{aligned}$$

空気の密度 $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$ 、水の密度 $\rho_w = 998.2 \text{ kg/m}^3$

土の熱容量 $C_{soil} = 2.40 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ K}$ 、水の熱容量 $C_{water} = 4.20 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ K}$

水蒸気の気体定数 $R_w = 461.5 \text{ m}^2/\text{Ks}^2$ 、水の潜熱 $\ell = 2.5 \times 10^5 \text{ J/kg}$

水蒸気の分子拡散係数 $D_{atm} = 2.54 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$