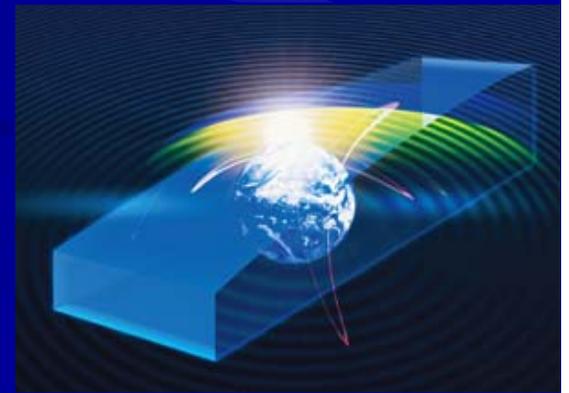


環境傾度バイオームにおける熱・水分環境の制御法に関する数値的研究

包国軍、丁世珉

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

生態学

- 地球上の生物群系は連続し存在し、**生態系内または生態系間**の相互作用がある。
- 野外観測のみでの生態システムの解明は困難となる。

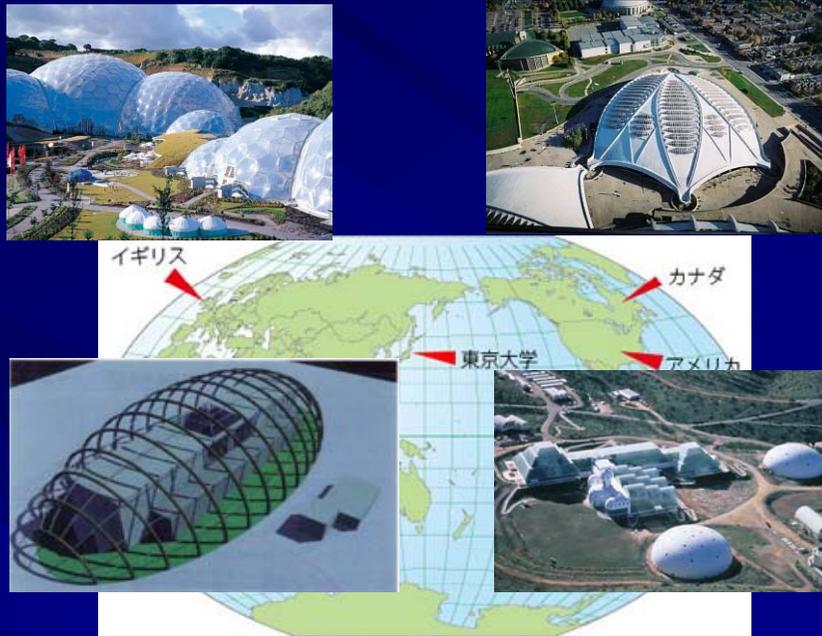
地球温暖化

- 地球温暖化は深刻化しつつある。
- 温暖化の速度に対して実際の**生態遷移**(生物の移動)がどの程度影響を受けるかは不明。

東京大学の「環境傾度バイオーム」の構想

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。

1. 背景と目的



世界での巨大環境ドーム



バイオームの概念図

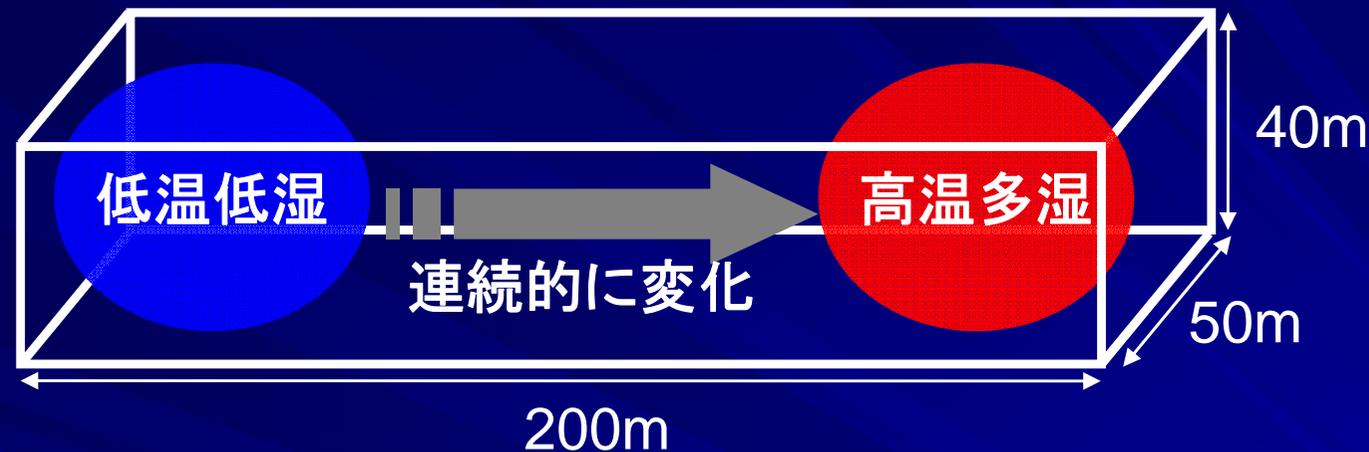
1. 背景と目的

東京大学環境傾度バイオームの特徴

- ◆ 連続した空間内に赤道から極地までの
様々な気候帯をノンバリアで再現
- ◆ 環境傾度を強化し、環境変化の加速化効果を生じさせて、
将来の地球環境を予測するという世界に類を見ない研究施設
- ◆ 新領域の多分野への応用
 - 環境制御のための新エネルギー、省エネルギー技術を導入
 - 施設の周辺には、加速された気候変動を活用し、
乾燥や塩害に強い農作物の開発、植物工場への応用
 - バイオテクノロジーを活用した応用研究や、
土壌・海洋微生物などのメタゲノム解析など



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・土壌環境, 植物生理, 植物生態

現状

連続空間内に寒帯～熱帯までの環境(温度差・湿度差など)を実現した例は無い

連続空間内に寒帯～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

研究方法

実験

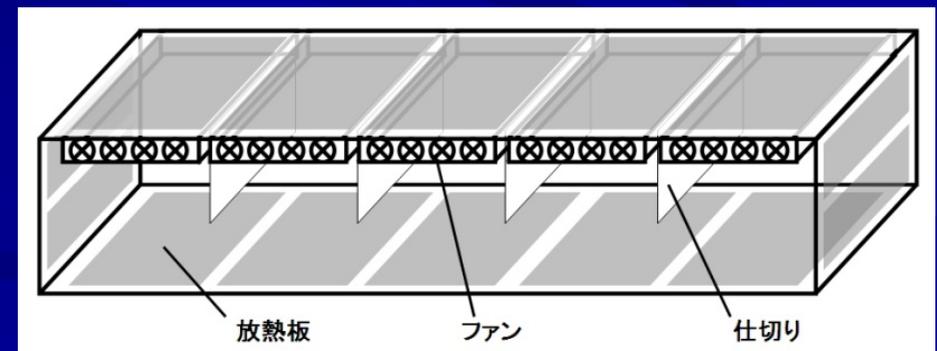
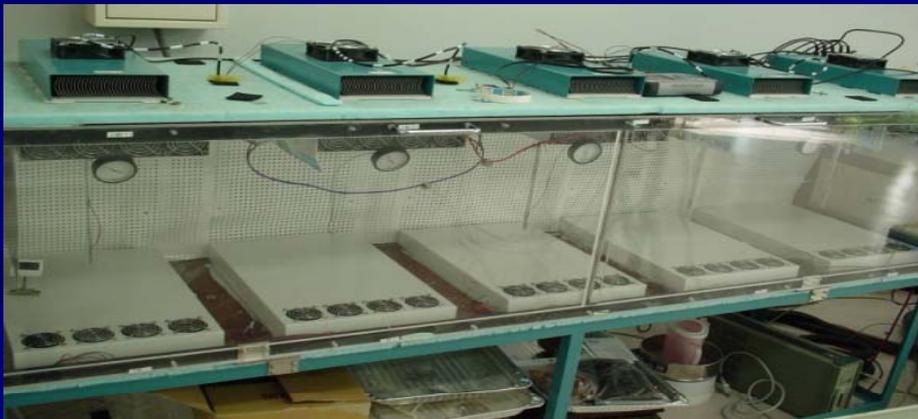
100分の1模型

- ◆ 環境制御技術の提案
- ◆ 実現性の確認
- ◆ 制御の自動化
- ◆ 栽培実験など

数値解法

解析プログラム

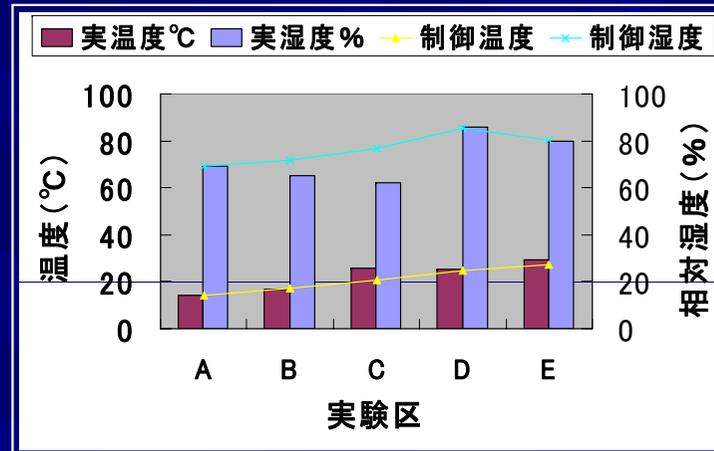
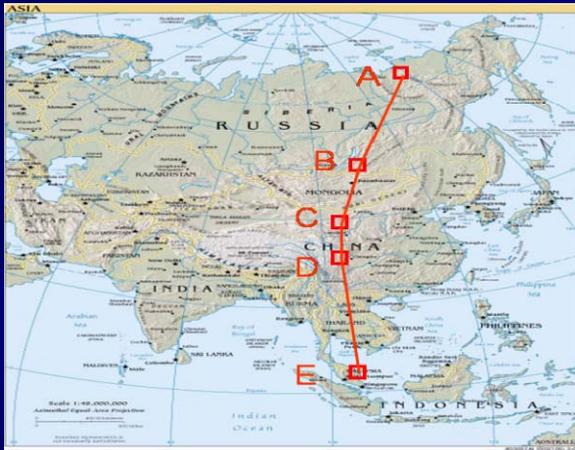
- ◆ 実験との比較(コードの検証)
- ◆ 実物がないスケール
- ◆ より効果的な制御方法を提案



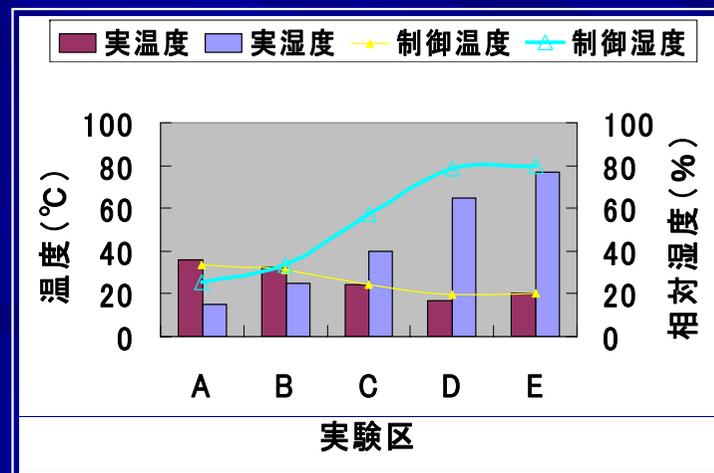
1. 背景と目的

既往の研究(包、~2009)

◆ 制御実験



アジア南北ラインの地理分布と温度・湿度制御の結果



アジア東西ラインの地理分布と温度・湿度制御の結果

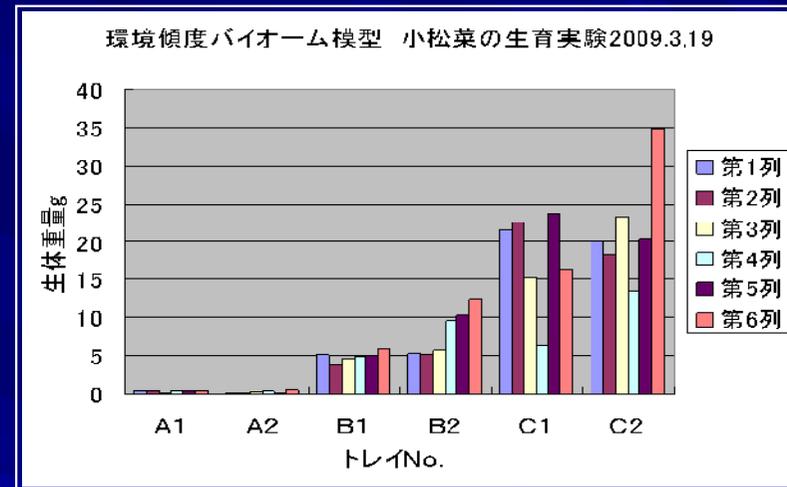
1. 背景と目的

既往の研究(包、~2009)

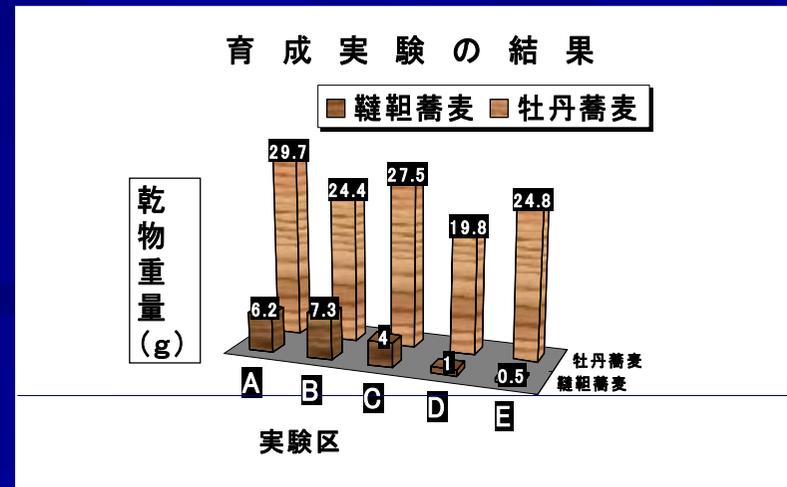
◆ 栽培実験



水耕栽培(小松菜)と生育結果



土壌栽培(そば)と生育結果



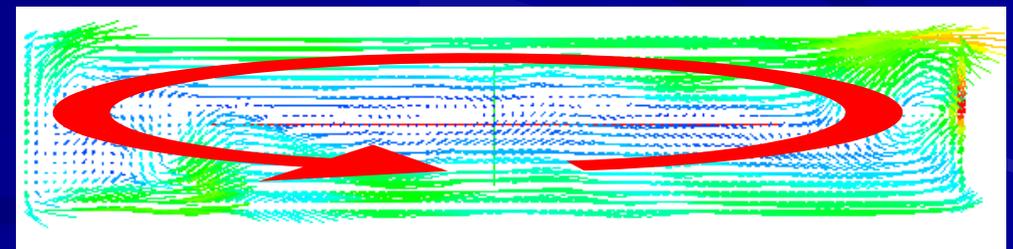
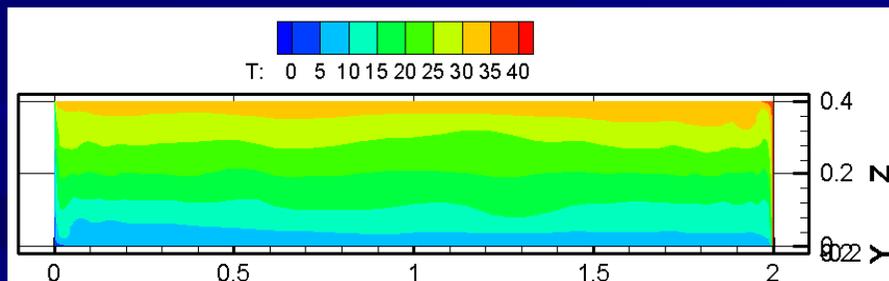
1. 背景と目的

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

基本設計条件

- 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**



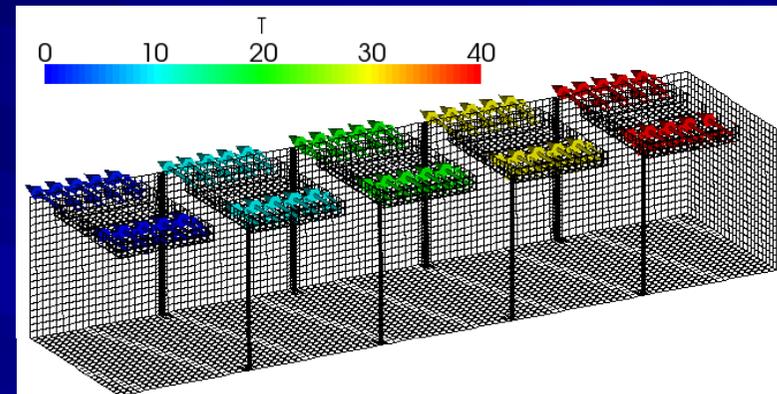
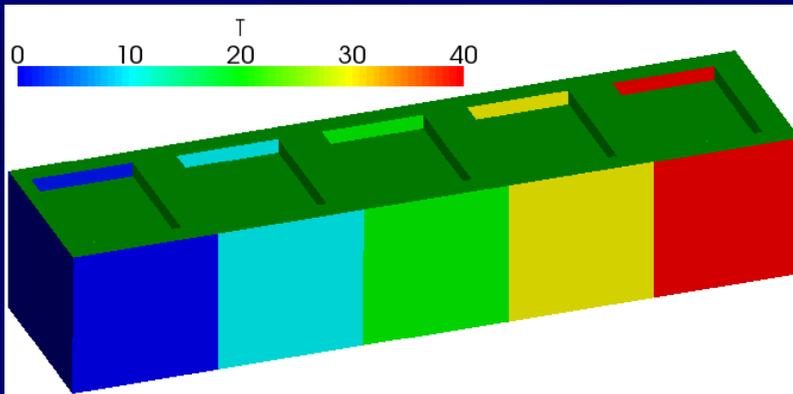
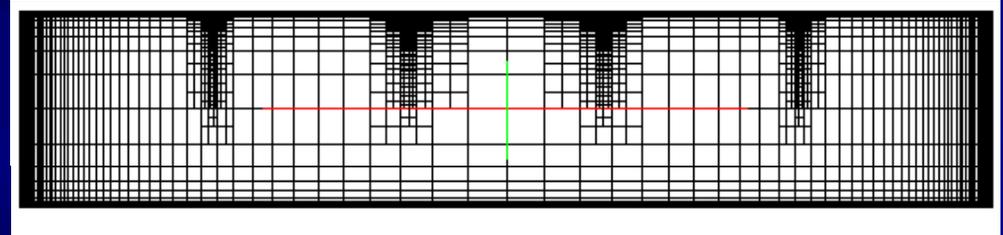
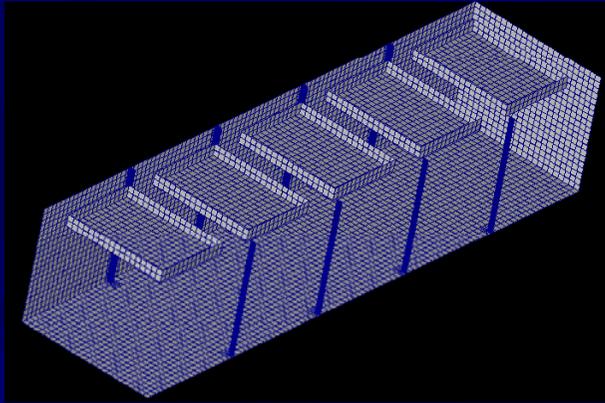
原因



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。

2. 数値計算法

- 温度気流制御装置：放熱板、仕切り、ファン、エアコンなど



- 湿度制御：ファンとエアコン設置位置に、湿度制御装置の条件を導入



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

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

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

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

植生による空気抵抗

温度の輸送方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (a_0 + a_t) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right\} \quad a_0 = \frac{v_0}{\text{Pr}} \quad a_t = \frac{v_t}{\sigma_\theta}$$

2. 数値計算法

◆ 支配方程式+乱流モデル(標準 k-ε)

水蒸気(非湿)の移流拡散式

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

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

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

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

kの輸送方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu_0 + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \varepsilon + G_k - F_k$$

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

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

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

植生による空気抵抗

εの輸送方程式

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu_0 + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + C_3 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{P_\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} F_k$$

浮力効果

2. 数値計算法

◆ OpenFOAMの開発、利用環境

計算機 : 東大スパコンHA8000 (4ノード、64コア)

OS : RedHat Enterprise Linux 5

OpenFOAM : Version 1.5.x (2008/9/2時点)、1.5-dev (2008.11.?)

Solver : Boussinesq近似 Bouyant SimpleFoam + ...

Pre : SnappyHexMesh、SubsetMeshなど

Post : Native Paraview (Windows用)

Dev版の利用理由 : 大気-土壌-植物の連性モデルを開発するため

(conjugateHeatFoam base、開発中80%程度)

推進状態

◆ conjugateHeatFoam

```
{
  // Decoupled patches
  # include "attachPatches.H"

  // Solid side
  # include "readSolidControls.H"

  for (int nonOrth = 0; nonOrth <= nNonOrthCorr; nonOrth++)
  {
    coupledFvScalarMatrix TEqns(2);

    // Add fluid equation
    TEqns.set
    (
      0,
      new fvScalarMatrix
      (
        fvm::ddt(T)
        + fvm::div(phi, T)
        - fvm::laplacian(DT, T)
      )
    );

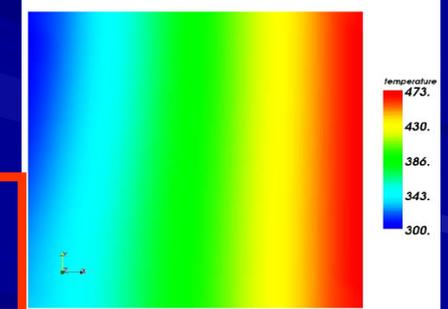
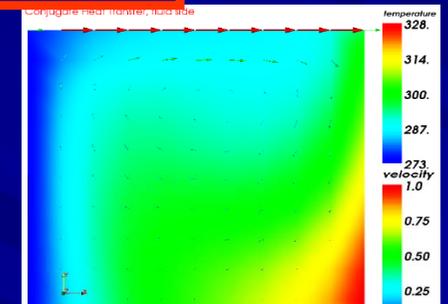
    // Add solid equation
    TEqns.set
    (
      1,
      new fvScalarMatrix
      (
        fvm::ddt(Tsolid) - fvm::laplacian(DTsolid, Tsolid)
      )
    );

    TEqns.solve();
  }
}
```

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(u_j T)}{\partial x_j} = a_{fluid} \frac{\partial^2 T_j}{\partial x_j^2}$$

$$\frac{\partial T_{solid}}{\partial t} = a_{solid} \frac{\partial^2 T_{solid j}}{\partial x_j^2}$$

流体(流れ+熱)



固体(熱)

◆ 並列計算の簡単比較

対象：一番時間がかかった「放熱板のみの実スケール」での計算

(格子：約800,000)

| Machine | Dell Precision T3400 | HA8000 |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| CPU | Intel Quad(2.66 Mhz) | AMD Opteron (2.3 Mhz) |
| OS | Windows XP+VMware (Ubuntu7.10) | Redhat Enterprize |
| CPU Used | 1 | 4(core)x4(cpu)x4(node) |
| Memory | 4 G | 32 G x 4(node) |
| Cal Time(sec) (72time file write) | 137,000 | 4,000 |
| 2 time file write | 134,440 | 3,142 |

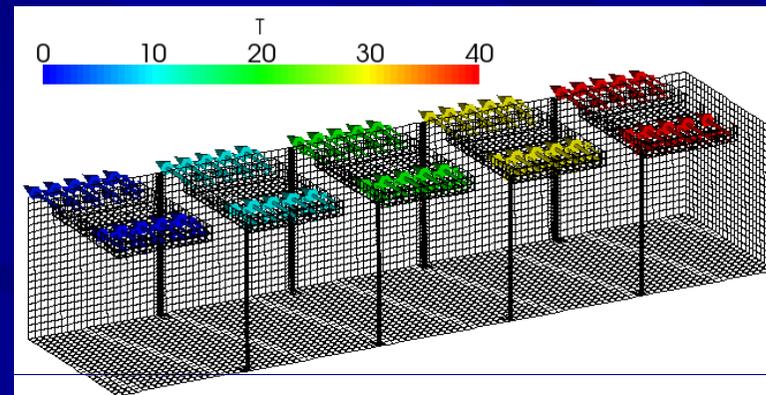
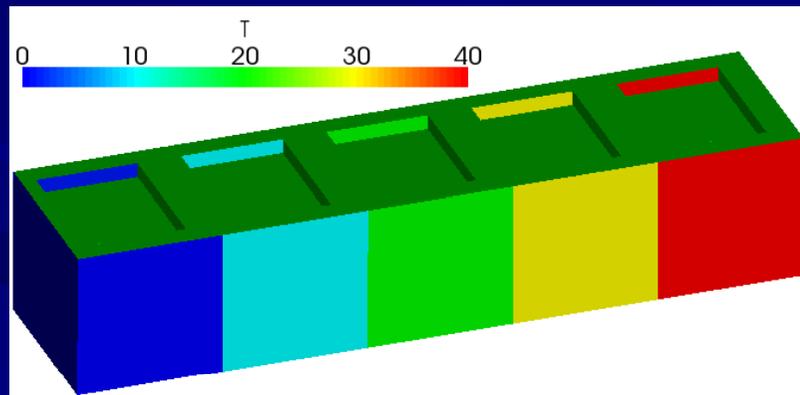
➤ 約34倍

➤ 約43倍

3. 計算結果

1:10スケール

- 側面に放熱板を導入
- 天井に設定した温度の風をy方向へ発生させるエアコンを設置
(側面からあるほど離れるように設置、
吹出口及び吸込口での風速は約2.0~3.0 m/s)
- エアコンの設置部分に、適した湿度の空気を供給する湿度制御装置を設置
- 補助的な制御装置として側面に断熱材の仕切りを導入



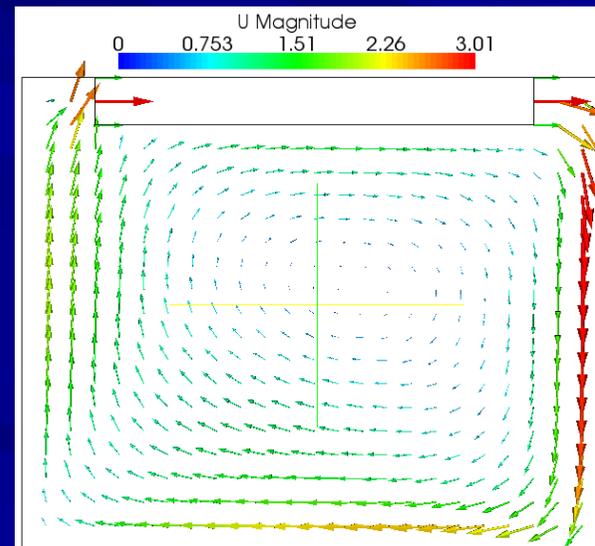
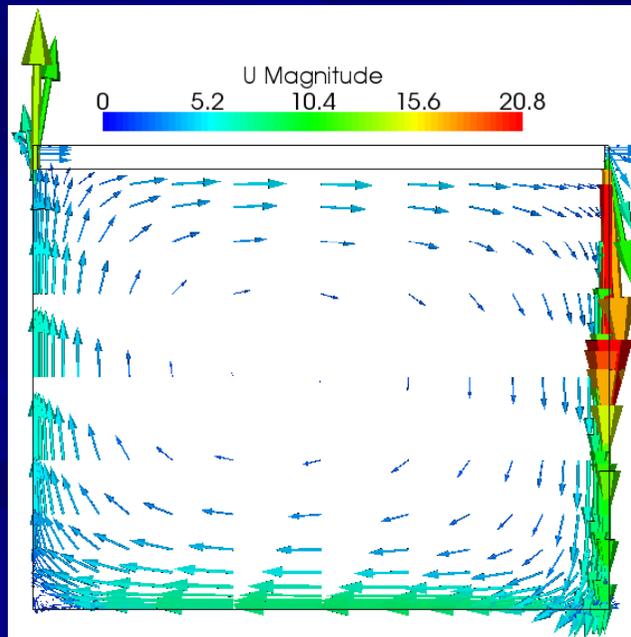
本研究で最適と考えられる温度・湿度制御法

3. 計算結果

1:10スケール

◆ 最大風速の抑制(ファンやエアコン)

- 吹出口が壁に近過ぎると吹出口に設定した速度の3~6倍の最大風速が内部領域、特に側面か底面、に発生する(図15)問題があったから、これを回避するため、吹出口から側面までの距離をあるほど離す必要

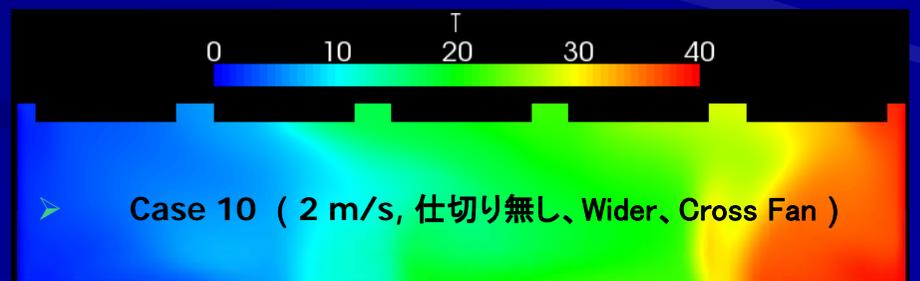
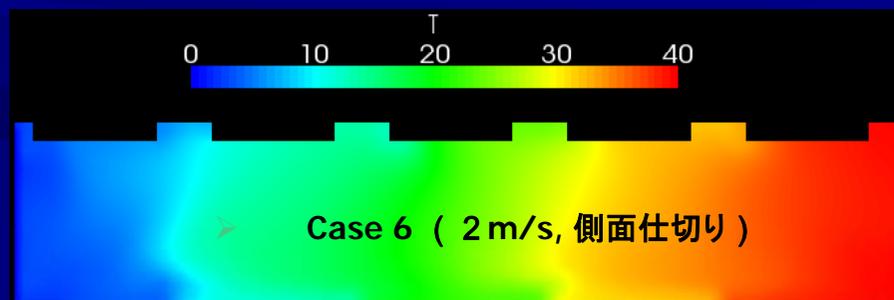
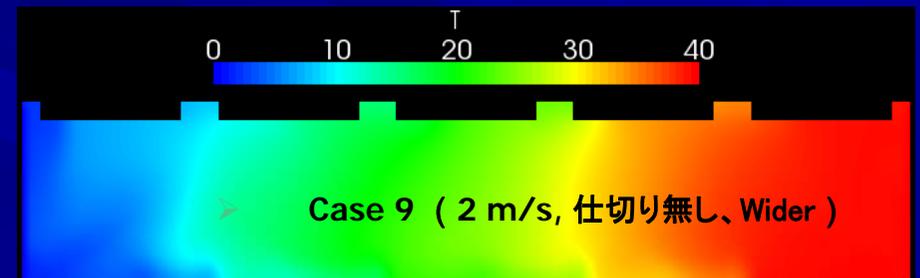
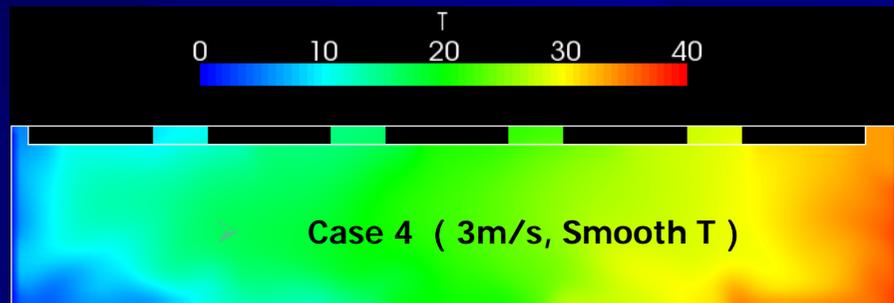
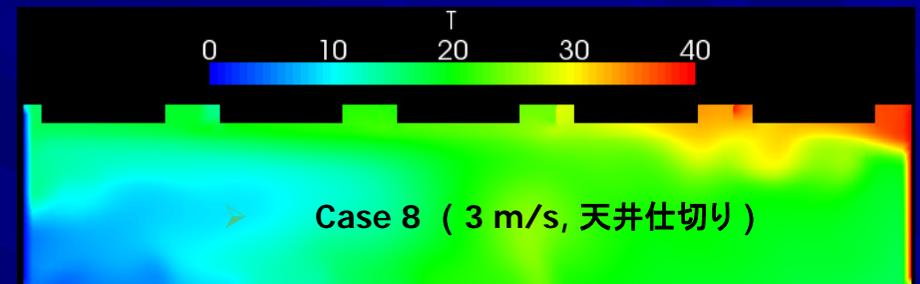
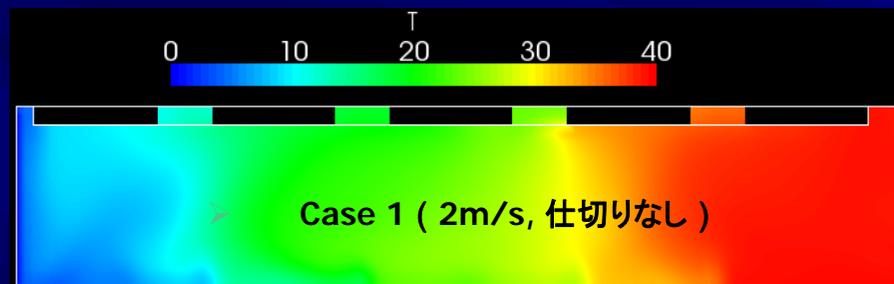


温度分布と速度Vector($v=3.0$ m/s, $x=18$ m)

3. 計算結果

1:10スケール

◆ 温度制御



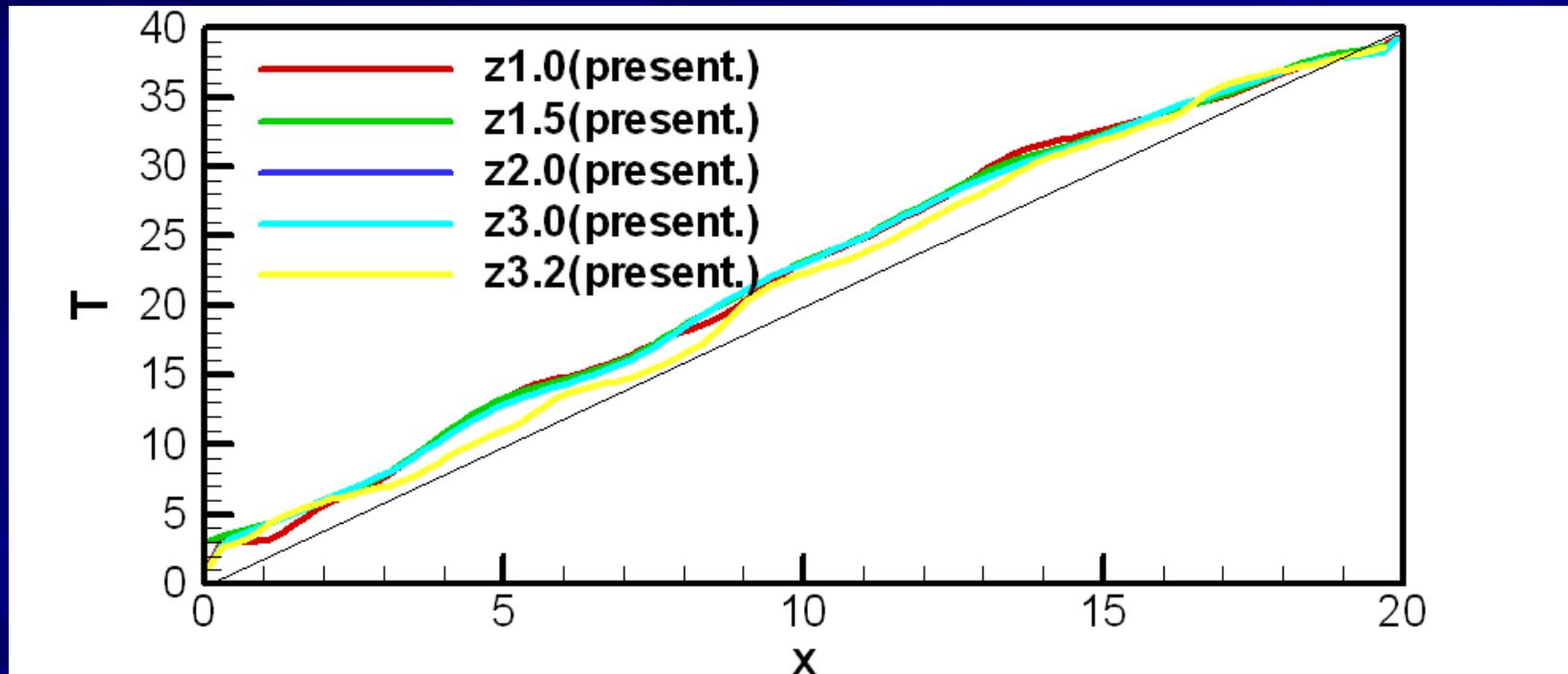
y-中央断面での温度分布

4. 今の状態

1:10スケール ◆ 温度制御

■ 計算結果 (Case 7、8) 放熱板 + エアコン

> 3m/sの場合には温度勾配ができた

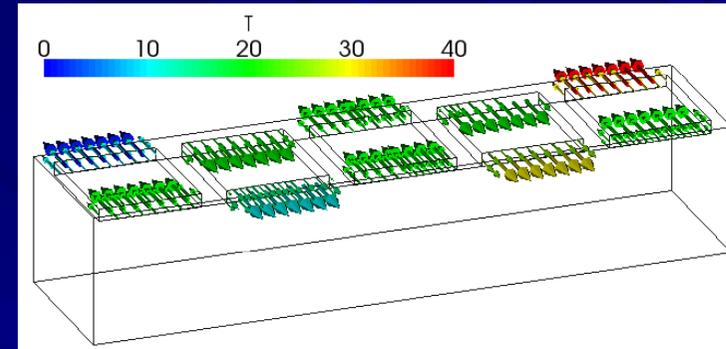
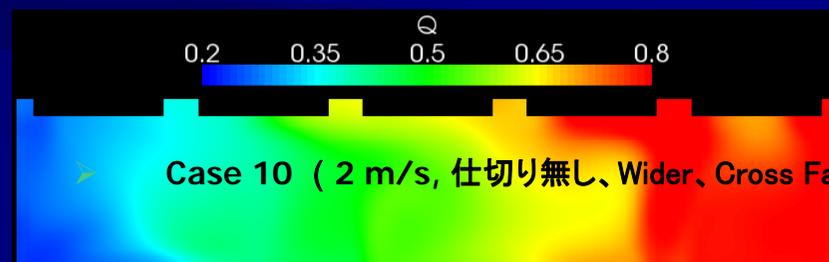
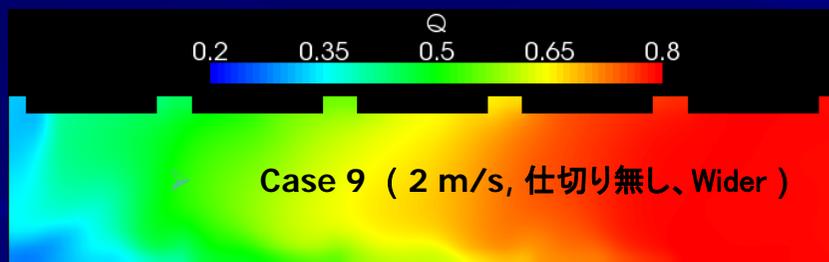
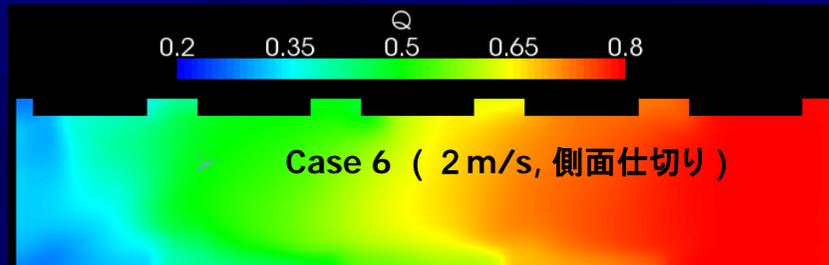
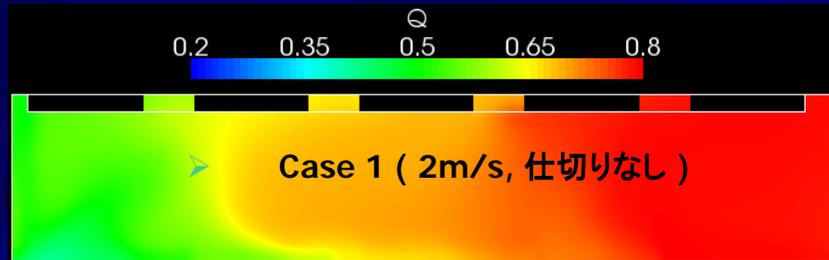


水平方向上の温度分布 (y=0 m、)

3. 計算結果

1:10スケール

◆ 湿度制御



| Case | エアコン | | | | 仕切り (長さ x 数[面 x 場所]) | 結果 | |
|------|---------------------|-----|----|------|-------------------------|----|----|
| | 1個のサイズ (長さ x 高さ) | 速度 | 風向 | 温度設定 | | 温度 | 湿度 |
| 1 | 2.8 x 0.4 | 2.0 | 1 | 1 | X | O | △ |
| 2 | 2.8 x 0.4 | 1.5 | 1 | 1 | X | X | X |
| 3 | 2.8 x 0.4 | 1.0 | 1 | 1 | X | X | X |
| 4 | 2.8 x 0.4 | 3.0 | 1 | 2 | X | X | X |
| 5 | 2.8 x 0.4 | 1.0 | 1 | 2 | X | X | X |
| 6 | 2.8 x 0.4 | 2.0 | 1 | 1 | 側面(0.2m x 2 x 5) | O | O |
| 7 | 2.8 x 0.4 | 1.5 | 1 | 1 | 側面(0.2m x 2 x 5) | X | X |
| 8 | 2.8 x 0.4 | 2.0 | 1 | 1 | 天井(0.4m x 5) | X | X |
| 9 | 3.2 x 0.4 | 2.0 | 1 | 1 | X | O | O |
| 10 | 3.2 x 0.4 | 2.0 | 2 | 1 | X | △ | O? |

| 植物種 | 葉面積密度[m ² /m ³] | 抵抗係数[-] |
|---------|--|---------|
| サンゴジュ | 7.10 | 0.67 |
| コブシ | 5.73 | 0.78 |
| シラカシ | 5.59 | 0.59 |
| サザンカ | 5.34 | 0.50 |
| ナツツバキ | 3.61 | 0.63 |
| タブ | 2.87 | 0.3-0.4 |
| キンモクセイ | 3.12 | 0.5-0.6 |
| ドウダンツツジ | 8.84 | 0.20 |
| カイヅカイブキ | 13.36 | 0.26 |

植物の葉面積密度と抵抗係数

| 植物 | 方向[m] | 方向[m] | 方向[m] |
|-------|-------------|----------|----------|
| コブシ | 5.0~45.0 | | |
| シラカシ | 55.0~95.0 | | |
| サザンカ | 105.0~145.0 | 5.0~45.0 | 0.0~30.0 |
| サンゴジュ | 155.0~195.0 | | |

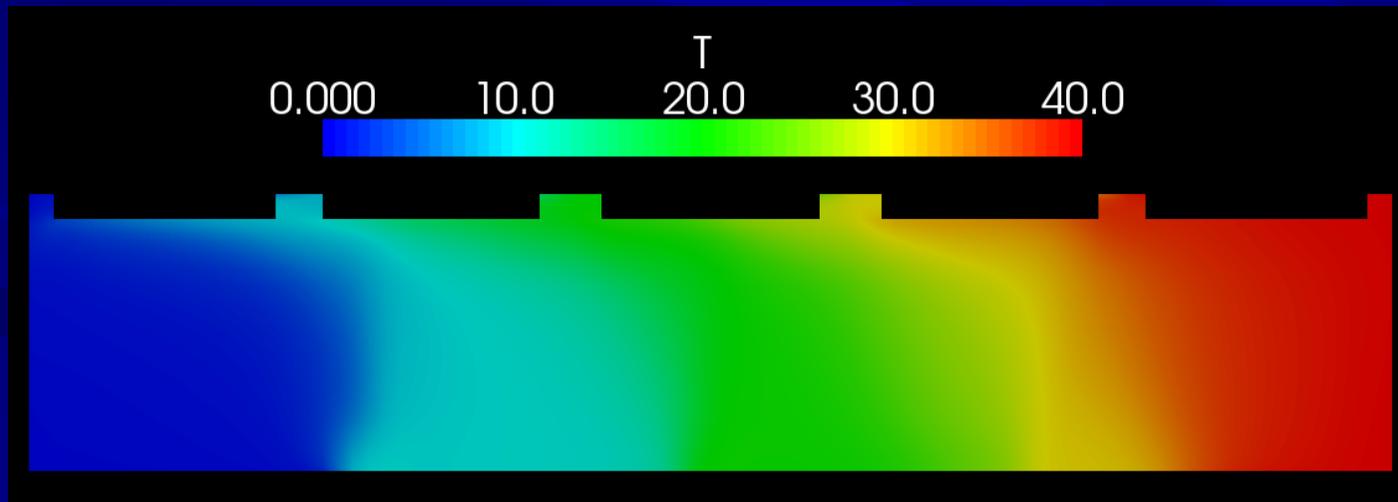
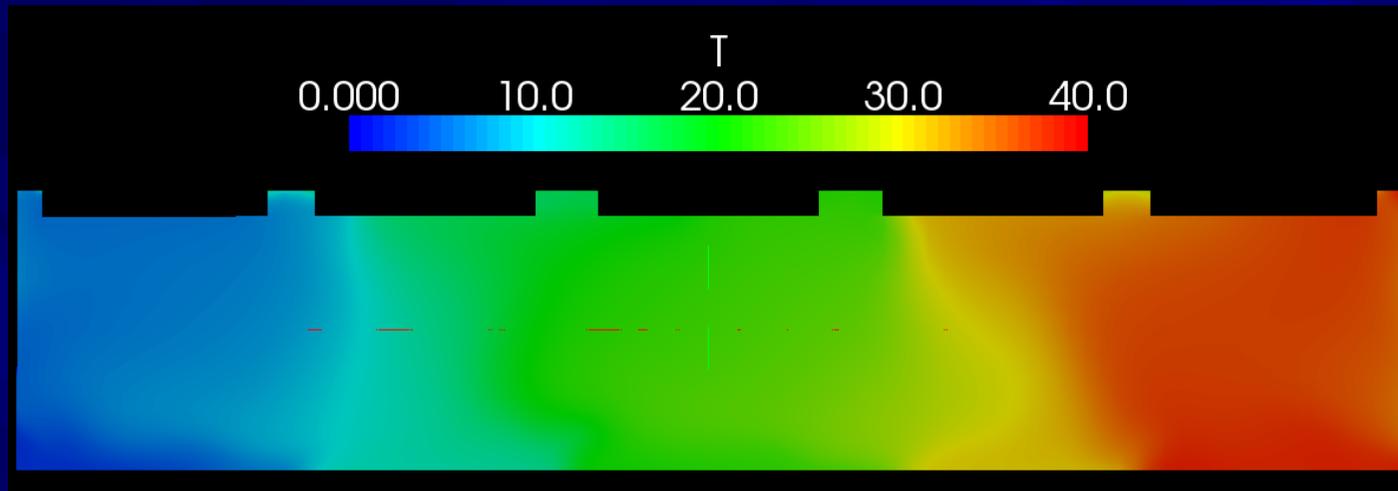
樹木の配置位置

3. 計算結果

1:1スケール

1:10の時は荒い格子を使用(10万程度) >100万個程度

V_{Fan} : 7 m/s 仕切りの幅を長く(2m>4m)、植物による抵抗有無

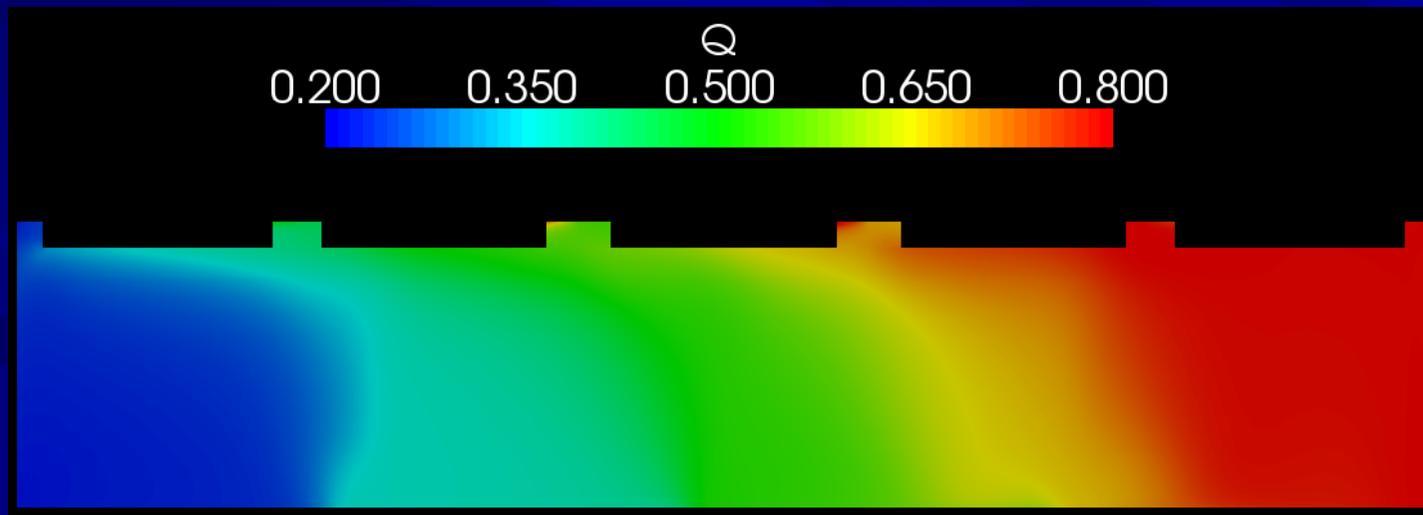
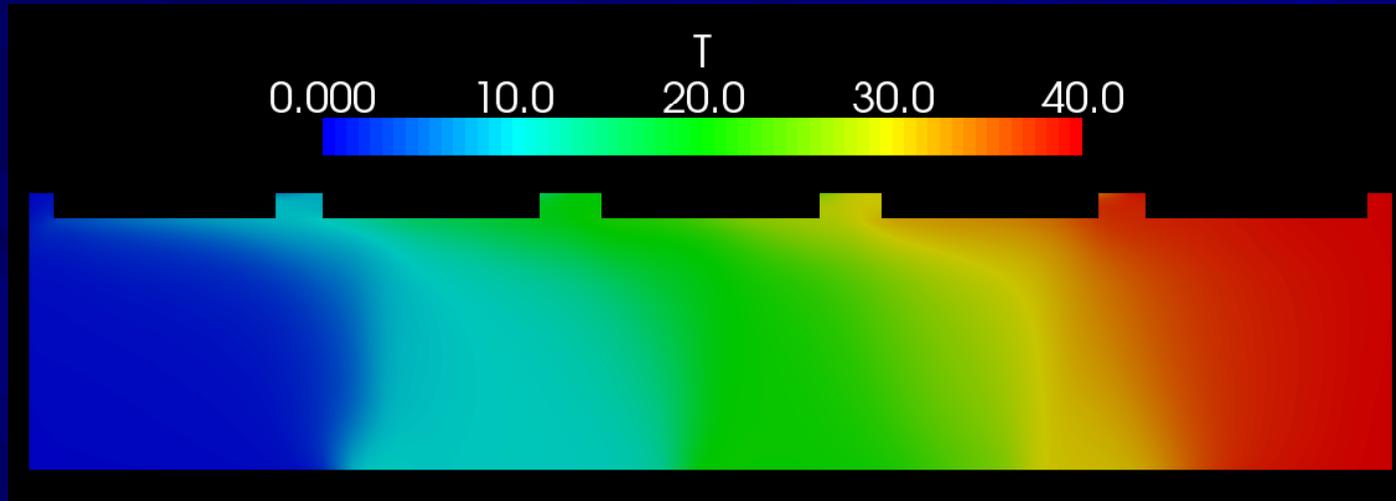


y-中央断面での温度と湿度分布(上:無、下:有)

3. 計算結果

1:1スケール

- V_{Fan} : 7 m/s 仕切りの幅を長く(2m > 4m)、抵抗有



y-中央断面での温度と湿度分布

4. まとめと今後の予定

- ・ OpenFOAMを用い設計条件を満足するような様々な温度・湿度制御法を数値計算にて検証し、
- ・ 1:10と1:1スケールの計算結果から温度と湿度の制御が可能であることを示した。

➤ 検証計算の遂行

- 1) H20に新たに得られた結果（大能、守谷）を含め、
今までの1:100の実験結果との比較計算を実行。

➤ コードの改良

- 1) 植生の影響、土壌内部や空気との境界での熱や水分の移動、
日射量などの外部環境を考慮するモデルを解析コードに組み合わせ。
- 2) できる限り、前処理（格子作成）と後処理（図や解析）の自動化を目指す。
- 3) 必要性によって非定常計算コードも開発。
- 4) 可能であれば、実験からの各種パラメーターをコードに反映。