

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

環境システムコース 地球環境工学分野
26658 矢野 順也

1. 緒言

1.1 背景

産業革命以降、人類は産業の発展に伴い化石燃料を大量に消費してきたことにより地球温暖化が起り、21世紀末には地球全体の平均気温が1.4~5.8℃も上昇すると言われている。このような地球規模で起こる温暖化は、降水量の変化などといった気候だけでなく、動植物にも多大な影響を及ぼすと考えられている。温暖化は等温線の移動速度で1.5~5.0 km/year に相当すると試算されているが、一方で木本植物の移動可能速度は比較的寿命が短い種でも0.1~2.0 km/year 程度で、植生の移動は実際の温暖化に追いつけず多くの種が死滅すると考えられている。だが現在のところ、植物がこの急速な環境変化に対してどのように応答し、植生帯の分布や生物種の構成などがどのような影響を受けるかについては、殆ど明らかになっていないのが実状である。

1.2 環境傾度バイオームについて

地球温暖化による動植物への影響、特に温暖化による等温線移動に対する植物の移動等の応答、および生態系の持続性・多様性等への影響について解明するために、東京大学大学院新領域創成科学研究科が計画している大型環境制御実験施設が「環境傾度バイオーム」である。この施設では長さ200 m、幅50 m、高さ40 mのチャンバーの中に熱帯、亜熱帯、温帯、寒帯の各気候帯を間仕切りすることなく連続的に再現し、各気候帯における生態系をそのままチャンバー内に収め、主に温暖化に伴う植生帯の移動や生物種構成の変化などについて調べようという計画である。

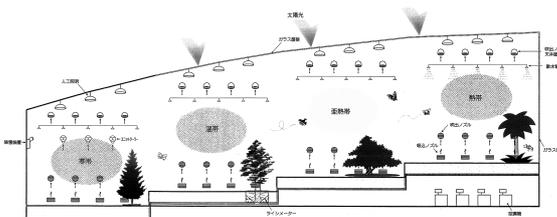


Fig.1 バイオームチャンバーの内部

そして地球上で100年スケールで起こる環境変化に対して、バイオームチャンバー内で加速させて環境変化を起こし、将来の地球環境を予測する研究が行われる予定である。

2. 研究の目的・概要

環境傾度バイオームは、熱帯から寒帯までの気候帯を、隔壁を設けず連続的に再現するという世界でも例を見ない施設であり、そのためチャンバー内では温度や湿度・日射量などが所要の環境になるように空調機器や人工照明などを用いて大規模に環境制御する必要がある。従って環境傾度バイオームの計画において、環境制御をいかに行えば各気候帯に適した環境を実現できるのか検討することは不可欠であり、また省コストで運営できる環境制御法についても検討することが必須である。本研究は、このような環境傾度バイオーム内の熱・水分環境の制御について、気流・温度・水分環境に関する所要の設計条件を満足し、省資源で制御できる手段を見出すことを目的とする。

そのために、まず模型実験と数値解析により環境傾度バイオーム内の温度制御法に関して検討を行った。この数値解析では、チャンバーを傾斜させた場合やチャンバー内に樹木を入れた場合など、特に模型実験では行えないような場合の解析を行い、気流・温度環境の制御法を検討した。さらに、その気流・温度環境における樹木花粉の飛散をトレースし、花粉がどの範囲まで飛散し落下するか確認した。これらにより、次頁に示す設計条件を満たすような温度制御法について検討した。

次に模型実験において、バイオームチャンバー内で実際に植物を栽培することによってチャンバー内の熱・水分環境の評価を行った。そして、数値解析においてもチャンバー内の熱・水分環境を調べるため、大気-土壌-植生系を対象とした熱・水分移動現象の連成解析を行う数値モデルを用いて解析した。

環境傾度バイオームの主な設計条件

- ① 熱帯から寒帯まで一定勾配で 40~50 K の温度差のついた気温分布を再現する。
- ② 地表面から天井までの鉛直方向の温度差は 5 K 以内にする。
- ③ 最大風速が数 m/s 程度である。
- ④ 樹木の種子が隣接する植生帯に分散できるように気流を考慮する。

3. 温度制御に関する実験

3.1 実験装置

実験装置は計画している施設の 1/100 の模型を製作した (Fig.2)。この装置には計 14 台の熱交換器 (ペルチェ素子) が付いており、これと接しているアルミ板がチャンバー内に熱を伝える仕組みになっている。測定項目は温度の空間分布と気流である。



Fig.2 環境傾度バイオーム模型

3.2 実験の概要

このバイオーム模型を用いて、チャンバー内部にどのように熱を与えれば目標とする温度分布が実現できるのか検討した。また実験結果を数値解析結果との比較に用いて、計算コードの妥当性の検証も行った。

4. 温度制御に関する数値解析

4.1 数値モデル

本研究で扱う三次元非定常非圧縮性流れは連続の式、Boussinesq 近似を用いた三次元 Navier-Stokes 式、熱の輸送方程式の 5 つの方程式により支配されている。三次元デカルト座標系、スタガード格子において式の離散化は有限体積法で行い対流項には三次精度の風上差分、乱流モデルには $k-\epsilon$ モデルを用い、SIMPLE 解法により、約 100 万の直交格子を用いて数値解析を行った。

4.2 実験結果との比較

温度制御の実験環境について数値解析を行い、その結果を実験結果と比較した。グラフ (Fig.3) のように結果はほぼ一致し、今回用いた計算コードの妥当性が確認された。

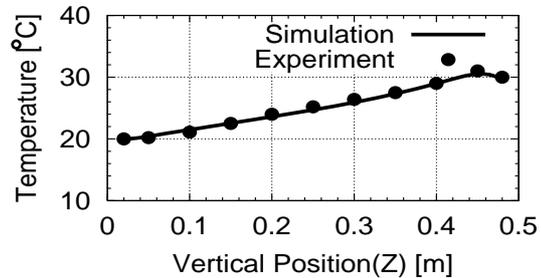


Fig.3 実験結果と数値解析結果の比較

4.3 温度制御の数値解析

環境傾度バイオームにおいて様々な温度境界条件を与えた場合の、チャンバー内における気流・温度の空間分布を解析した。この解析ではまず温度境界条件やチャンバー自体の形を変えたりして、一体どのようにすれば、7月の世界の月平均気温の分布である 0°C ~ 40°C を連続的に再現できるかどうかを検討した。その結果、模型実験環境と同様の放熱板を利用した空調法では、バイオームチャンバーに傾斜を付けなければ設計目標を満たすことは困難であることがわかった。これは浮力効果から暖気は上方に冷気は下方に溜まり易いことを利用して温度差をつけやすくしているものであるが、しかしチャンバーを傾斜させただけで設計目標を達成するような 40K の温度差を再現するには 20° も傾斜させる必要があり、これは非現実的な構想である。ここでさらにチャンバー形状に工夫をして、Fig.4 のような形のチャンバーを考えた場合の解析を行ったところ、熱帯~寒帯までの温度差を 40 K つけるという設計条件については達成できることがわかった。ただし、この場合には、地表~天井の温度差を 5 K 以内にするという条件は満たしていない。

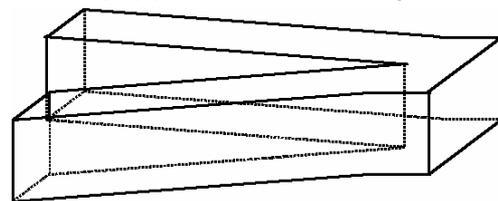


Fig.4 設計条件を満たすチャンバー形状

4.4 樹木を考慮した温度制御の数値解析

前述の気流・温度環境解析モデルに、チャンパー内に樹木が存在する場合の空気抵抗を考慮した項を付加して、数値解析を行った。この場合には、チャンパーに傾斜を付けなくても、Fig.5 のように熱帯～寒帯の温度差を40 K程付けることが可能であるとわかった。

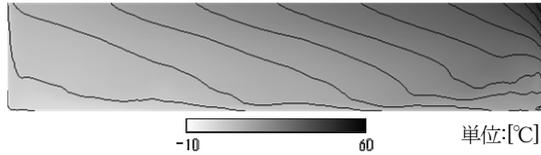


Fig.5 樹木抵抗を考慮した場合の解析結果

ただし、この場合も Fig.4 の場合と同様に設計条件②を満たしていない。そこで、例えばチャンパー内に小さな壁を設置した場合やファンにより強制的に風を吹かせた場合など、様々に改良を施して解析を行ったが、いずれの場合にも設計条件②を満たすことはできなかった。従って今後は、例えば風向可変のルーバーにより空調した場合など今回解析しなかった条件下で解析を行い、設計条件②を満足する、温度制御法の検討が必要である。

4.5 花粉飛散の数値解析

数値解析により得られた気流・温度環境において、樹木の花粉がどのような飛散性状を示すのかトレースし、④の設計条件を満たすかどうか調べた。数値モデルには、花粉の移流拡散はラグランジュ粒子法を用い、乱流拡散についてはランダムウォーク法により表現した。また花粉は球状と仮定し、花粉の沈降はストークスの式を用いて解析を行った。

—解析結果—

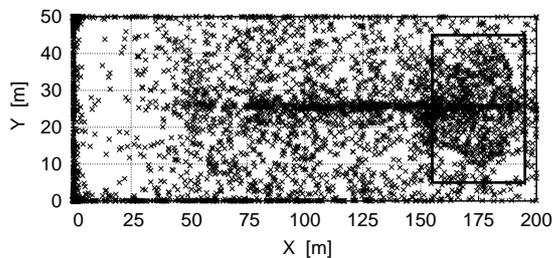


Fig.7 花粉の落下位置

※ これは $x=155\sim 195\text{ m}$, $y=5\sim 45\text{ m}$ の四角で囲った範囲内から花粉を発生させた場合、それらが最終的にどの場所に落下するかを解析した図である。

5. 植栽による温室内水分環境の評価実験

5.1 実験の概要

バイオーム模型を用いて、そのチャンパー内にプランターを置き、そこで植物の栽培実験を行った。植生は5区画設定し、気温は最寒区で10°C、最暖区で30°C程になるよう制御した。また光は外部からの光を遮断し、蛍光灯で平均2,000 lxの光を供給して、12時間周期でOn/Offの切替えを行った。ここでは、この実験環境で植物を栽培した場合の、特にチャンパー内の水分環境について評価を行った。

5.2 実験環境の測定結果

気温30°Cの区画では蒸発量が大きく、土壌表面の乾燥も早かった。一方、気温10°C、15°Cの区画では水蒸気が常に飽和しており、その周辺の壁面では結露が起きていた。

6. 熱・水分環境の制御に関する数値解析

環境傾度バイオーム内の熱・水分環境をあわせて解析するため、大気—土壌—植生系の熱・水分移動モデルを用いて、対流、放射、蒸発散、水の土中浸透などといった大気・土壌中の熱・水分移動現象の連成解析を行った。

6.1 数値モデル

土壌中および大気—土壌の境界面における熱・水分移動の数値モデルには、Kondo and Xu¹⁾の土壌最表層非平衡モデルを用いた。本モデルでは、大気系の方程式として連続の式、三次元Navier-Stokes式(Boussinesq近似)、熱の輸送方程式、比湿の移流拡散式の6つ、土壌系の方程式として土中熱拡散の式、土中水分移動の式の2つ、合わせて8つの支配方程式を連成させて解き、風速、気温、比湿、土壌含水率、土壌温度を算出している。

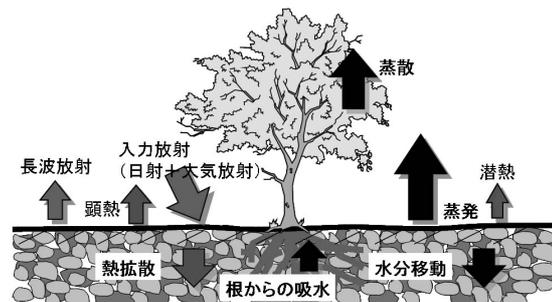


Fig.8 数値解析で扱う現象の模式図

6.2 解析条件と結果

○ 解析条件

入力放射量 700 [W/m²]

土壌含水率 0.20 [-]

相対湿度 0.40 [-]

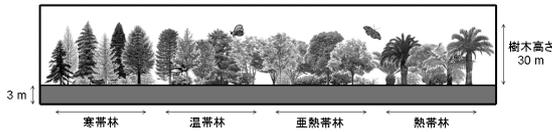


Fig.9 チャンバー内環境条件

○ 解析結果



Fig.10 相対湿度の分布



Fig.11 土壌含水率の分布

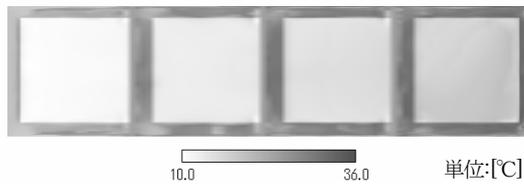


Fig.12 地表面温度の分布

解析結果より、Fig.10 のようにチャンバー内の低温区域では水蒸気が飽和し壁面で結露が起きることが確認された。また、地表面温度は植生による日射の減衰などによって、Fig.12 のように樹木が存在する区域は低温となることが確認された。さらに植生を導入した本解析結果では、裸地面での解析結果と異なり、高温区域と低温区域における蒸発量の顕著な違いは見られなかった。

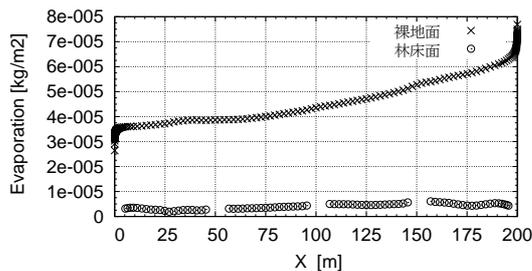


Fig.13 蒸発量の解析結果

7. まとめ・今後の課題

7.1 まとめ

本研究では、バイオームチャンバー内の熱・水分環境について模型実験と数値解析を用いて解析し、環境傾度バイオームにおける気流・熱・水分環境の制御法を検討した。

植生を考慮した場合の解析結果から、環境傾度バイオーム内の気流、熱、水分環境には植生による影響が大きく、チャンバー内の環境制御を考える場合には植生を考慮することが重要であることがわかった。また、樹木花粉の飛散性状を解析した結果から、花粉はそれぞれ隣り合う植生帯に散らばることが確認された。そして環境傾度バイオームの設計条件を満たす気流・温度制御に適した方法として、放熱板による壁面からの空調に加え、チャンバー内にファンを導入するのが効果的であることがわかったが完全に設計条件を満足する温度制御法を見出すことは出来なかった。

さらにバイオームチャンバー内の熱・水分環境の連成解析から、低温区域は水蒸気で飽和し、壁面で結露が起きること、また地表面を裸地とした場合には、植生を考慮した場合の林床の地表面に比べて、特に高温区域からの蒸発量が多いことが確認された。

7.2 今後の課題

今後は樹木の生理作用に関わる過程や壁面の風・熱流入条件を詳細に解析した環境解析や運営コストの概算を行い、省コストでできる環境制御法を総合的に検討する必要がある。

参考文献

- 1) J. Kondo and J. Xu : Seasonal Variations in the Heat and Water Balances for Nonvegetated Surfaces, *J. Appl. Meteor.* **36** 1676-1695 (1994)
- 2) 近藤純正 : 地表面に近い大気科学, 東京大学出版会 (2000)
- 3) Daniel Hillel : 環境土壌物理学 I 土と水の物理学, 農林統計協会 (1999)
- 4) 荒川忠一 : 数値流体工学, 東京大学出版会 (1994)
- 5) 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.1, 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (2002)