

ビニールハウス周りにおける強制対流熱伝達の数値解析

野田 英彦*・及川 滋**

Numerical Study on the Forced Convection Heat Transfer around the Green House

Hidehiko NODA* and Shigeru OIKAWA**

Abstract

Numerical simulations on the forced convection heat transfer around the green house are conducted to analyze the amount of heat removed from the green house. The equation for predicting Nusselt number derived from the analytical results is submitted. The estimation of the heat transfer coefficient and the amount of the heat removed from the green house may predict easily using the equation.

Key words: heat transfer, green house, numerical simulation

1. はじめに

北海道や東北では、冬季に外気温が著しく低下し、さらに夜間の放射冷却による温度降下により、農作物の成長が芳しくない。そこで、ガラス温室やビニールハウスなどの園芸施設を利用し、農作物の生育を促進している。このような園芸施設が増加していくにつれ、大型化し、冷暖房設備を備える温室空間が増加しつつある。しかし、冷暖房設備を備えていても、効果的に加熱するのが難しいので、ハウス壁面付近の農作物の成長は芳しくなく、耕作面積が減少する。さらに、冬季の暖房負荷が、六戸地区で10aあたり160万円程度必要であり、収益率が悪いため、冬季農業は休止状態にあるのが現状である。

一方、日射量は冬季でも莫大な量であり、伝熱工学的見地から、効果的な断熱を施し、加熱方法を工夫すれば、冬季農業の収益が改善され

ると推察される。

本研究は、農業用ビニールハウスと外気間の熱移動現象を詳細に検討し、個々の熱移動に対応する効果的断熱手法を開発することを目的としている。

前報⁽¹⁾では、六戸町の青森県農林総合研究センター畑作園芸試験場に設置しているビニールハウスを用いて、ハウス内外の熱収支に関する実験的検討を行い、使用しているビニールフィルムの長波長放射率が0.85程度であることから、放射伝熱に対処することが重要であることを示した。

本報では、ハウス周りの対流熱伝達に及ぼす風速の影響を解明するため、ハウス周りの流れ場およびハウス表面の熱伝達に関する数値解析を行った。

2. 解析方法

2.1 解析条件及び解析領域

ビニールハウス周りにおける周囲空気との強制対流熱伝達について、数値解析を行った。解

平成16年12月17日受理

* 大学院工学研究科機械システム工学専攻・教授

** 大学院工学研究科機械システム工学専攻博士前期課程・2年

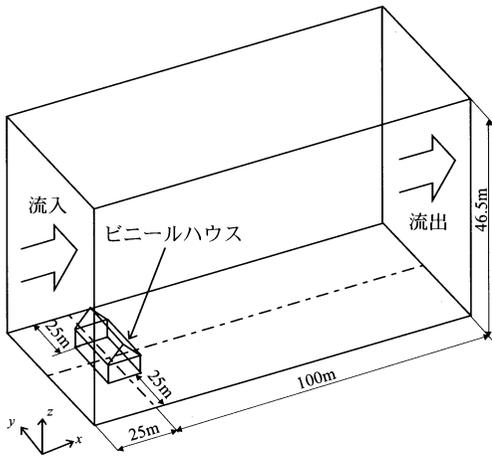


図1 解析領域

析領域を図1に示す。解析領域は、実器のビニールハウスサイズを参考にして作成した。解析は定常状態で行った。解析条件は、様々なサイズのビニールハウスに対応するように、ハウス長さを5m～50mの範囲とし、長さを5mずつ変化させて行った。また、それぞれの長さのビニールハウスに、風速を1～10 m/sの範囲で1 m/s毎に変化させて、ハウス周りの流れ場および熱伝達について解析を行った。風向は、ハウス長手方向に直角方向から吹く場合について行った。

解析領域の垂直方向である z 方向高さは、ビニールハウス周囲の乱れの影響を少なくするために、対象とした実器ビニールハウス高さ3.1 mの15倍の空間とし、46.5 mに設定した。流れと直角方向である y 方向の幅は、ハウス両端か

らの流れの影響が出ない様にするため、それぞれ25 mとした。流れ方向である x 方向長さも、ビニールハウス周囲からの流れの影響が無いようにするため、125 mとした。

2.2 1/7 乗則を適用した流れと熱伝達係数

ハウス上流の速度分布を図2に示す。通常の流れでは、流入側の解析領域を大きくし、流れが発達する状態まで距離をとらなければならない。解析領域が大きくなると、解析する範囲が大きくなり、解析時間が長くなる。このような問題を避けるため、流入側境界条件に1/7乗則を設定し、入口からハウス中央までの距離を25 mとして解析を行った。

図2のハウス付近の流れを見ると、ハウス上流で流れがすでに発達していることがわかる。

熱伝達係数は、ハウスの表面温度を 20°C に固定し、流入空気温度を 0°C として、ハウス表面の熱流束を積分することで算出した。また、土壌面は断熱とし、非圧縮性流れとして、運動方程式、エネルギー方程式を連立して解析を行った。解析には市販の差分法熱流体解析ソフトSTREAMを用いた。

3. 解析結果及び考察

3.1 速度分布

速度分布の解析結果を、図3に示す水平 x - y 方向位置および垂直 x - z 方向で代表して検討する。図4にはハウス長さ $l=10$ m, 図5にはハ

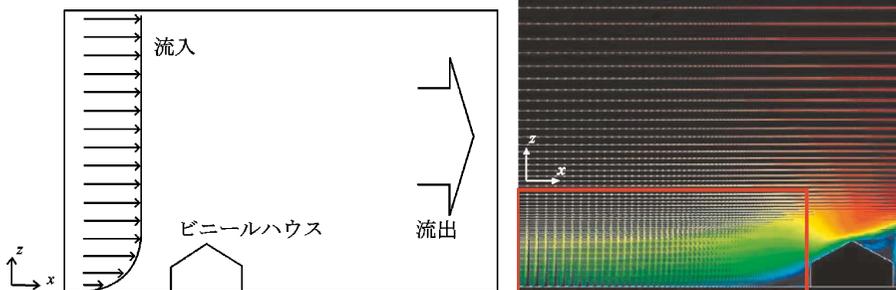


図2 ハウス上流の流れ場

ウス長さ $l=30$ m の速度分布の解析結果を表わしている。各ハウス長さに対して、主流速度 $u=3$ m/s の場合の解析結果を示している。

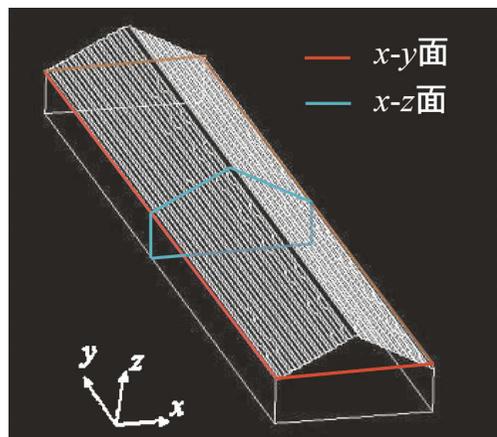
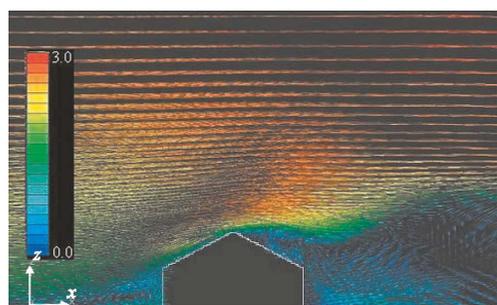


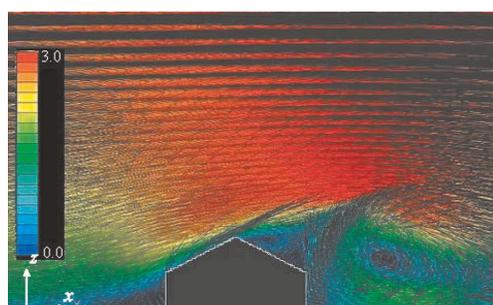
図3 速度分布位置

図4に示すハウス長さ $l=10$ m の $x-z$ 面の場合には、流れが側面に強く衝突している様子はなく、ハウスの両側に迂回する流れの影響で、ハウス上部の流れも緩やかな速度になっている。また、 $x-y$ 面ではハウス屋根部からの回り込みより、ハウス両端に迂回する流れの影響が強くていている事がわかる。

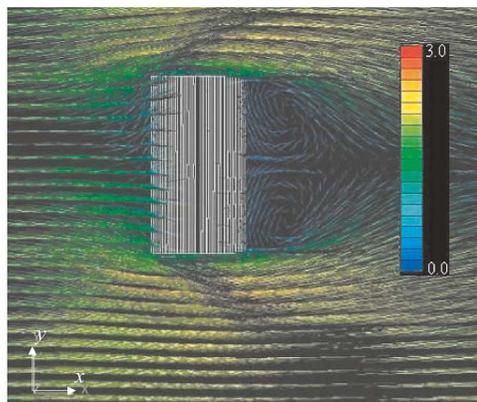
一方、図5に示しているハウス長さ $l=30$ m の $x-z$ 面では、ハウス両側に迂回する流れの影響が小さくなるため、ハウス中央部分に流入する流れは屋根の部分に強く衝突している。また、ハウス下流では大きな渦を巻いているが、流速が遅いので、ハウスに強く衝突していないことがわかる。 $x-y$ 面では、ハウス長さ $l=10$ m と同じように両側から迂回する流れは発生しているが、ハウスの長さが長いので、ハウス両端か



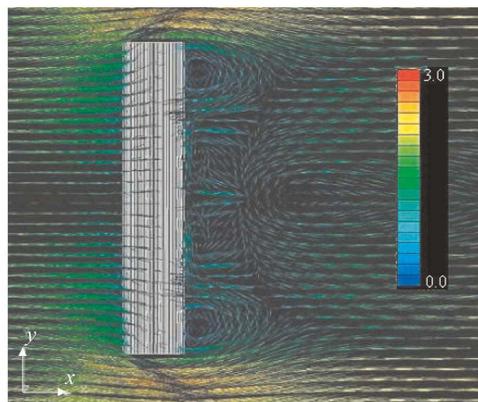
a $x-z$ 面



a $x-z$ 面



b $x-y$ 面



b $x-y$ 面

図4 ハウス長さ $l=10$ m の速度分布

図5 ハウス長さ $l=30$ m の速度分布

ら迂回する流れの影響よりハウス屋根部からの回り込みの方が強く影響している。つまり、ハウス両端に迂回する流れよりハウス屋根部から回り込む流れの支配が強くなることになる。

3.2 熱伝達係数

表面熱伝達係数の解析結果を図6に示す。ハウス長さ $l=10\text{ m}$ の場合は、ハウス屋根部に衝突する流れより、ハウス両端に迂回する流れの支配が強いため、ハウス屋根付近の表面熱伝達係数がそれほど大きくない。しかし、 $l=30\text{ m}$ のハウスはハウス屋根部に流れが強く衝突しており、ハウス長さ $l=30\text{ m}$ の屋根付近の熱伝達係数が大きい値になっている事がわかる。したがって、ハウス長さが長くなるほど、熱移動量

が増加する傾向にあると言える。

3.3 熱伝達係数の予測式

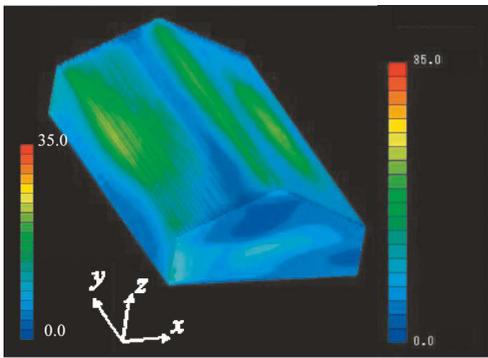
前節の解析結果を整理し、熱伝達係数を求めるための予測式を導出した。ヌッセル数 Nu を求めるには代表寸法を求めなければならない。そこで、体積の4倍をハウス表面積で除した等価直径 d_e を代表寸法とし解析結果を整理した。

$$d_e = \frac{\text{体積}}{\text{表面積}} \times 4 \quad \dots\dots\dots (1)$$

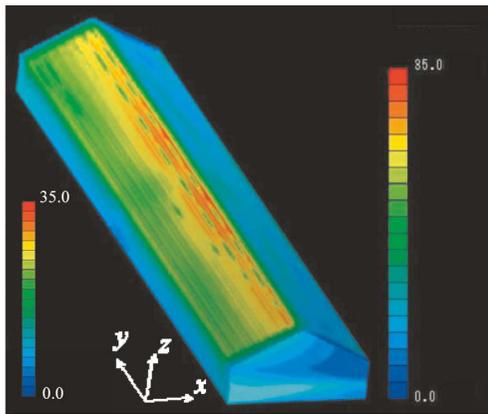
ハウス長さ $l=30\text{ m}$ ($d_e=5.12\text{ m}$) のヌセルト数 Nu の解析値とレイノルズ数 Re の関係を図7に黒マルで示す。 Nu は Re の増加とともにほぼ直線的に増加していることがわかる。この関係を式化すると、図中に実線で示す式(2)が導出される。解析値と予測式(2)は精度良く一致している。

$$Nu_{est} = 0.0176 Re^{0.86} \quad \dots\dots\dots (2)$$

各ハウス長さの場合の解析値 Nu と、式(2)で精度良く予測できるハウス長さ 30 m の場合の Nu の予測式(2)に各ハウスの Re を代入して算出した Nu の比を、図8に示す。解析値と式(2)で算出される予測値は共に各10点あり、左点からハウス長さ $l=5\text{ m}$ 、 $l=10\text{ m}$ と 5 m 毎に $l=50\text{ m}$ までの点を示している。ハウス長さ $l=30\text{ m}$ 以上になると、ほぼ一定の値になることがわかる。したがって、 l が 30 m 以上では式(2)で Nu を予測できることになる。



a ハウス長さ $l=10\text{ m}$



b ハウス長さ $l=30\text{ m}$

図6 表面熱伝達係数分布

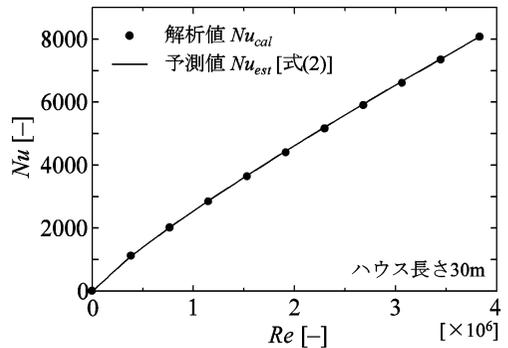


図7 Nu に及ぼす Re の影響

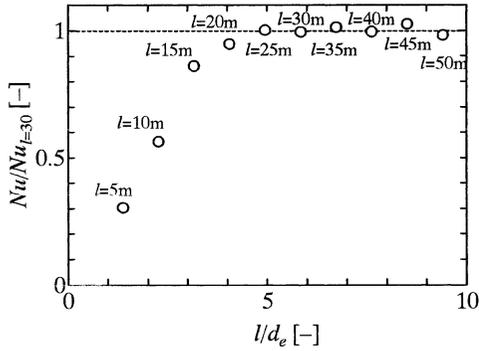


図8 Nu に及ぼす l/d_e の影響

ハウス長さ l を変化させた場合の Nu に及ぼす Re の影響を図9に示す。解析値を点で、後述する予測値を線で示している。ハウス長さ l が30mより大きくなると、 Nu はほぼ一定の値となっている。これは、ハウス壁面に衝突した流れの殆どが壁面を伝って上昇し、ハウス壁面の殆どの流れが同じ流れになることによる。一方、 l が小さくなると、壁面に衝突した流れが左右に分かれてハウスの横を抜ける流れの影響が相対的に大きくなり、壁面上昇する流量が減少するため、 Nu は減少することになる。

ハウス長さ l が30m以下の場合の Nu と Re の関係に及ぼす l の影響を、ハウス長さ l と代表寸法 d_e の比 (l/d_e) で整理し次式を導出した。

$$Nu_{est} = \{-0.055(l/d_e)^2 + 0.55(l/d_e) - 0.38\} 0.0176 Re^{0.86} \quad \dots (3)$$

ハウス長さ $l > 30$ m ($l/d_e > 5$) は式 (2) で、 $l < 30$ m ($l/d_e \leq 5$) は式 (3) で算出した予測値 Nu_{est} を、図中に線で示している。解析値と予測

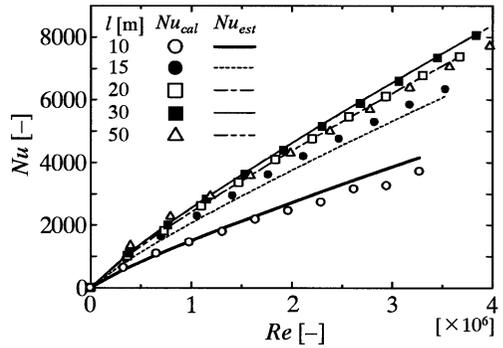


図9 Nu_{cat} と Nu_{est} の対応

値は良好な一致を示しており、式 (2)、(3) を用いてビニールハウス周りの Nu を予測し、熱伝達係数を予測できることが分かる。

4. おわりに

ビニールハウス周りの熱伝達に関する数値解析を行い、ハウスに長手方向の直角方向から風が吹く場合の熱伝達係数を、風速から容易に予測する式を導出した。ハウス内部の自然対流による熱伝達は、従来の垂直平板自然対流の実験式で予測できることから、風速を与えればハウスの熱通過係数が予測できる。

文 献

- (1) 野田英彦, 及川 滋, 千坂博和, 山田純一: 「寒冷地における冬季ビニールハウス周りの熱移動に関する実験的研究」, 八戸工業大学紀要, 第23巻, (2004年2月) pp. 7-14.