

都市のストリートキャニオンにおける 風速場と熱環境に対する街路樹の効果

Numerical Experiment on Momentum, Heat and Vapor Environment
within the Urban Street Canyon

稲垣 聡^{*}・日野 幹雄^{**}・神田 学^{***}

By Satoshi Inagaki, Mikio Hino and Manabu Kanda

Numerical experiments on the micrometeorological, such as momentum, heat and vapor environment, within the urban street space with tall building walls (urban street canyon) have been performed by Large Eddy Simulation. The roles of plant as the roadside trees and the effects of their arrangement are investigated.

Calculation is divided into two steps: at step 1, only the momentum equations are solved to observe the effect of plant arrangement on the flow field and at step 2 the full equations are solved to observe interaction between the flow and temperature fields.

The result shows that the momentum transfer inside and outside the street canyon differs with position of plant, and the moderation of heat environment by plant is observed in all cases.

Keywords : Heat Island , Urban Street Canyon , LES,
Numerical Experiment, Roadside Trees,
Evapotranspiration.

1. はじめに

都市の街路の様に、ストリートキャニオンと呼ばれる垂直な壁面で囲まれた空間では、上空の風速の減衰により混合が抑えられるのみならず、建築物からの長波放射の多重反射が起こり、キャノピー外へ熱を放出しにくい構造になっている。近年の都市の高層化はこの構造にさらに拍車をかけ、これが都市のヒートアイランド形成の一つの要因となっている。またこのストリートキャニオン内の熱・流速場の解明を行うことは、より大きなスケールでのヒートアイランドの解析への素過程という点からも重要と考えられる。

この街路空間における熱環境の研究は主に実測からの分析で行われ、Oke¹⁾は天空率(ストリートキャニオン内に立つときに建物に遮られずに見ることの出来る空の、視界に占める割合)を指標とすると、都市のヒートアイランド強度と明瞭な相関関係があることを示している。また、建築の分野では片山ら²⁾がキャニオン内での日射、放射、気流速度、表面温度からグローブ温度の形成に関わる熱流成分の検討と、基準となる気象データから求められる推定値とその実測値との比較を試みている。

しかしながら、実際のストリートキャニオンの流れ場は構造物や路面に存在する植生などの影響で複雑な

* 学生会員 東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻
** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
*** 正会員 工博 東京工業大学助手 工学部土木工学科

(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

乱流場となっており、実測による正確な把握は困難である。それに関し数値計算の分野では、村上ら³⁾がLESモデルを用いた街区周辺の流れ場の解析として、風洞実験との詳細な比較検討を行っている。しかし、キャニオン内の乱流場と熱環境との相互の関連を議論した数値計算の例は、筆者らの調べた限り存在しない。

本研究では我々の開発した水文気象プログラムをこの街路空間の現象に適応させ、ストリートキャニオン内及び上空の気流・温度場と水蒸気場を解析するとともに、キャニオン内に街路樹として存在する植生に着目し、その配置の差異も考慮しながら流れ場に与える影響と夏期の日中における暑熱緩和効果について解析を行った。

2. 数値計算の概要

2-1 基礎方程式と計算対象

基礎方程式及びスキームについては神田・日野⁴⁾と同じLESモデルを用いる。また、植生の効果の取り込みについては文献⁵⁾⁶⁾を参照されたい。運動量方程式には植生の抵抗による外力項が加わり、温度・水蒸気の移流拡散方程式には葉によるシンク・ソース項が追加されている。

計算を行う対象は、図-1に示す様に建物(コンクリート)の高さ、幅及び街路(アスファルト)幅が等しいストリートキャニオンが連続して存在する場合を考え、その一部を取り出し水平80(m)、鉛直100(m)の領域を42x38のメッシュで表現する。ただし今回は計算費用の面から奥行き方向は均一として二次元計算を行った。

次に街路樹の有無及びその配置を考慮して以下の4ケースを設定する(図-2)。

- case 1 : 植生が存在しない場合
- case 2 : 植生が街路中央に存在する場合
- case 3 : 植生が建物壁近くに存在する場合
- case 4 : 建物壁が植生に覆われている場合

植生は図-2の各領域に葉面積密度均一に存在するものとし、幹・枝の効果は今回の計算では考慮していない。なお case 4 は case 2, 3 より葉面積密度を低くして、全体の植生量が等しくなる様に設定した(表-1)。

2-2 計算内容

今回の計算対象設定で、上空に街路を横断する方向に一般風がある場合には、キャニオン内の流れ場は一種のキャビティー・フローとなる。この特徴的な流れ場に対する植生の効果、また熱的な効果の検討はそれぞれに興味深い。今回は以下の様に計算を2つのステップに分けて議論することとした。

- step 1 : 上空に一定風速の外部流が存在する時に、熱の影響を考慮せず運動量のみを解き、キャニオン内の風速(渦)の強さがほぼ定常となるまで計算を行う。

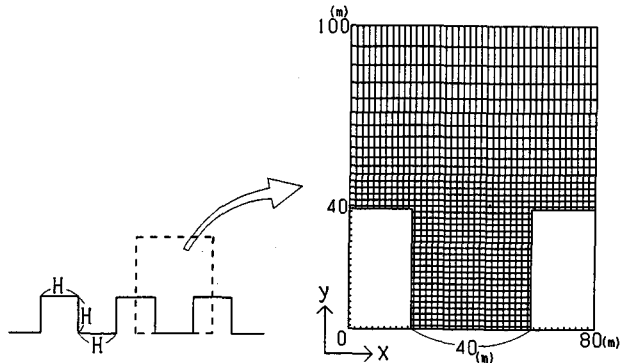


図-1 計算対象とメッシュ構成

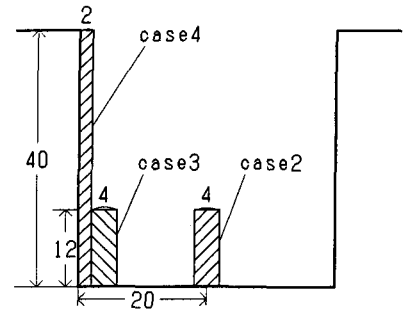


図-2 植生の配置の設定(単位(m))

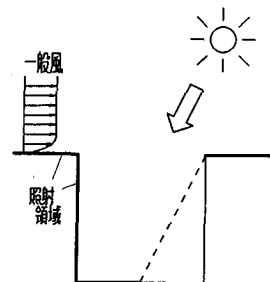


図-3 一般風と日射の条件

step 2 : step 1 で計算した定常な流速場に温度・

水蒸気一定の条件から図-3に示す斜め上方からの日射を与え、キャニオン内外の温度場・水蒸気場と流速場の相互作用からどのような微気象場がつけられるかを検討する。

2-3 計算パラメーター・境界条件

初期の気象条件及び種々の計算パラメーターは表-1の通りである。境界条件は、側方は周期境界条件を課す。ただし、流入側と流出側の境界の間には圧力損失に対応する圧力差を与え、一般風を維持させるようにした。上空は運動量に関しては free-slip 条件、すなわち水平方向成分(u)の一階微分0、鉛直方向成分(v)0で与え、その他は開放(一階微分0)とする。路面及び建物壁では、運動量は鉛直成分は0、水平成分は瞬時値から局所的に log law の仮定を行い、 ρu_*^2 の壁面摩擦力を与える。水蒸気フラックスは0とし、顕熱は我々が別途検討しているアスファルト・コンクリートの熱収支の知見⁸⁾を基に一定値で与える。このとき木陰となる部分は日射の減衰を考慮した値を設定し、建物の陰となる部分では顕熱量は0とした。植生の温度は葉面の熱収支から決定し、水蒸気は根からの吸水が十分にあるものとして葉面温度で飽和しているものとする。

表-1 計算諸元

基準風速	2.5 (m/s)
基準温度	308 (K)
基準水蒸気量	20 (g/kg)
葉面積密度	case2, 3 0.5 (m ² /m ³) case4 0.3 (m ² /m ³)
日射量 (短波+長波)	850 (W/m ²)
固体壁顕熱	アスファルト 50 (W/m ²) (日向) 25 (W/m ²) (木陰) コンクリート 25 (W/m ²) (日向) 15 (W/m ²) (木陰)
LES定数 ⁷⁾	C _m =0.0856 C _θ =0.845
時間刻み	0.2 (s)

3. 計算結果及び考察

3-1 風速場及び温度場の概要

図-4(次項)に各ケースの各ステップにおける風速ベクトル図と温度の基準値からの変動分のコンター図をまとめて示す。なお、上空の変動の小さい領域はカットして示している。また step 2 の図は日射照射後200秒での結果である。

case 1) step 1 : キャニオン内にキャビティフローの渦が形成される。後述するがこの渦の中心位置は時間とともに変動し、それに対応し渦の形も単純に対称なものとはならない。step 2 : 路面及び建物表面から大気に温度供給がなされ、移流によって運ばれるが、この熱による浮力の効果でキャニオン内の流れは強化されている。

case 2) step 1 : キャニオン内の流れは植生に衝突する時点で、速度を弱めて植生内を通過する流れと植生にブロックされて上方に向かう流れの2つに分かれる。また、case 1と比較するとキャニオン内の流速が非常に弱くなっている事が分かる。今回設定した葉面積密度 0.5 (m²/m³) は実際の植生の中では密度のかなり低い部類に入るが、それでもこのように流速が落ちてしまうことは、キャビティフロー自体が外部流に対する一種の補償流でありそれ自身に渦を駆動させる力がなく、障害物の存在に敏感に影響を受ける性質のものであることを示している。step 2 : 植生の後流域に蒸発散の効果による温度低下の領域が広がっている。路面・建物からの熱供給は風速を増すように働くが、やはり case 1 に比べ上空への高温域の上昇も弱い。

case 3) step 1 : 植生を端に寄せた場合には植生の影響が及ばない空間でキャビティフローが完結するため case 2 程の風速の減衰は生じない。ただし植生の後流域に風速の弱くなる部分が認められる。step 2 : 建物の近傍に植生による冷却効果が存在するため、浮力による渦の強化はさほど顕著ではない。但し植生域の路面に接する付近では上流側のアスファルトからの熱流が勝り高温域となっている。

case 4) step 1 : 気流は植生によって粗度が高くなっている側壁付近を進むことを避け、キャニオンの中央近くを流れようとするが、植生による運動量損失の影響で渦の鉛直径が小さくなっていることが分かる。

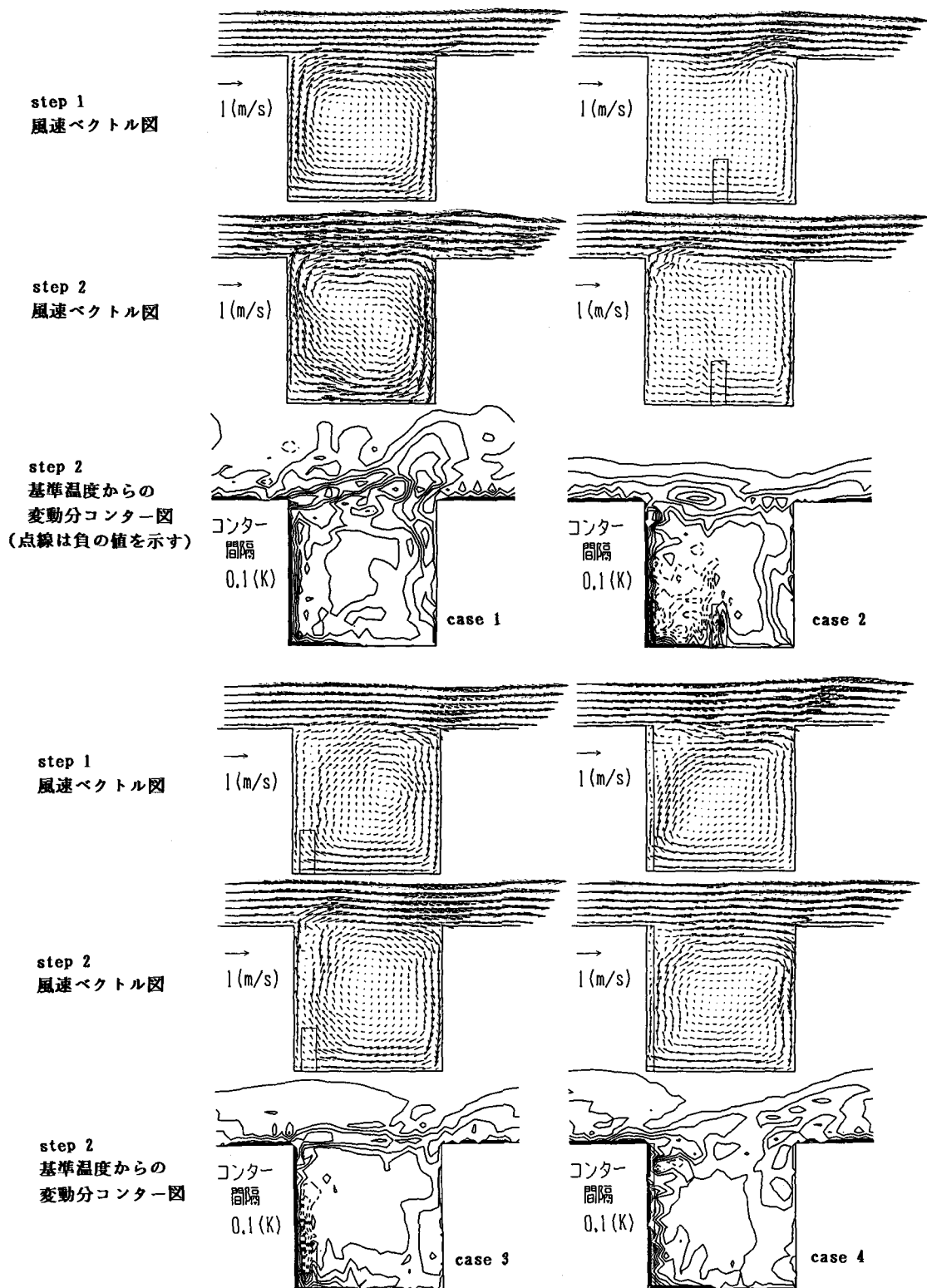


図-4 各ケース・各ステップにおける風速ベクトル図と温度変動コンター図

また植生内部では逆流や風上側建物からの剝離流が形成され複雑な流況を呈している。step 2：植生の密度が低く、分散して存在しているために植生による温度低下の領域はほとんど見られないが壁を覆う植生は建物からの顕熱流の輸送を妨げ、温度上昇域の広さと強度は case 1 と比べ確実に小さくなっている。またここでの浮力の効果は step 1 の傾向を単純なキャビティー流にもどす方向に働き、剝離や逆流の起こる領域は小さくなっている。

3-2 ストリートキャニオン内外の運動量交換と熱交換

表-2に、キャニオン内と上空との境界線上における運動量輸送（空間平均から求めたレイノルズ応力）と熱輸送（温度フラックス）の各ケースの値を示す。なおこれら輸送量の値は step 1 の熱を含まない段階においても時間変化に対し一定ではない。図-5に case 1 の step 1 における例を挙げるが、レイノルズ応力は時間的に明瞭な周期的変動をする。その時系列曲線の山と谷の所で風速ベクトル図を描いてみると、山の部分では渦の中心が図の左上方にあり、渦の長軸が右下がりの構造をしているのに対し、谷の部分では逆に渦の中心が右上方にあり渦が変形している。Ho⁹⁾は自由せん断流で発生する渦構造について、渦の長軸の傾きが変動することによりレイノルズ応力の正負が入れ替わることを指摘しているが、ここでもキャニオン内外の流れの差異によって似た構造がつけられているものと思われる。しかし図-5の二つのベクトル図の渦は互いに完全に対称ではなく、平均すると全体で正のレイノルズ応力が生成されている。

さて、各ケースによる交換量の違いを吟味してみると case 4 を除き日射によって運動量交換は増加している（特に case 1 では2倍以上）。case 4 で逆に減少している理由は先に述べたように日射によってキャニオン内の流れが単純化され、剝離の領域が減少していることが影響していると思われる。日射が無ければ case 4 が最も大きい運動量交換の値を示すことから、建物からの剝離の存在あるいは植生後背の乱れの存在（case 3）が運動量輸送にかなりの影響力を持つことが分かる。また熱輸送の面でも、case 4 は平均的にキャニオン内に流れ込む結果となっているが、これも剝離域の存在とキャビティー渦径の小ささという流れ場の

表-2 キャニオン内・外の境界における運動量と熱の輸送

	step 1	step 2	
	運動量輸送 $\langle -u''v'' \rangle (\times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}^2)$	運動量輸送 $\langle -u''v'' \rangle (\times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}^2)$	顕熱輸送 $\langle C_p \rho v''T'' \rangle (\text{W}/\text{m}^2)$
case 1	1.245	2.638	11.98
case 2	0.163	1.513	4.494
case 3	1.520	1.862	3.038
case 4	1.814	1.482	-0.085

顕熱輸送は上向きを正とする。C_p:大気定熱容量 ρ:大気密度

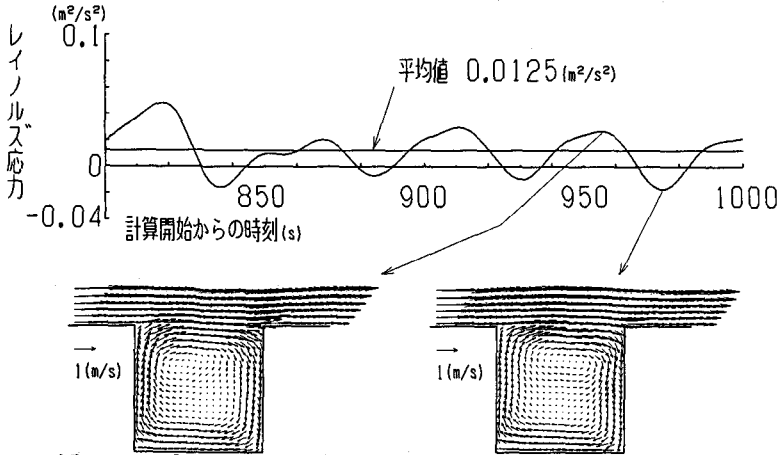


図-5 case 1, step 1 におけるキャニオン内外の境界でのレイノルズ応力の時間変動とそのうち2つの時刻における風速ベクトル図

表-3 キャニオン内の平均温度上昇（単位(K), step 2 計算開始後200秒)

case 1	0.154
case 2	0.079
case 3	0.078
case 4	0.111

も大きい運動量交換の値を示すことから、建物からの剝離の存在あるいは植生後背の乱れの存在（case 3）が運動量輸送にかなりの影響力を持つことが分かる。また熱輸送の面でも、case 4 は平均的にキャニオン内に流れ込む結果となっているが、これも剝離域の存在とキャビティー渦径の小ささという流れ場の

特徴が、建物の屋上部分で熱せられた空気の流入を促すからと思われる。しかし表-3に示す通り植生が存在する場合キャニオン内の温度上昇はいずれも抑えられ、気候緩和効果が示されていることが分かる。

3-3 植物蒸散による水蒸気の分布

図-6に case 2~4 における植物の蒸発散によりつくられた水蒸気量(基準水蒸気量からの増加分)の分布を示す。影響がキャニオン内に最も広く行きわたっているのは case 2 の場合であるが、蒸散量の大きさでみると、同じ植生の量で case 4 が最も蒸散能を発揮していることが分かる。

4. おわりに

ストリートキャニオン内の温度・風速環境について街路樹が与える影響を含め概観してきたが、街路樹の影響がキャニオン内、そして外部環境にも様々なインパクトを与えることを確認した。しかしながら、今回は路面及び建物表面の温度決定をかなり簡略化しており、長波の多重反射の効果等も取り入れていない点は注意が必要で、今後放射過程の取り込み等の検討することを考えている。また、三次元による計算や実測との比較を行うこと、大きなスケールのヒートアイランド解析との結合も研究課題である。

謝辞 本研究の計算の一部に(株)リクルート・スーパーコンピュータ研究所の NEC SX-2A の CPU 提供を受けた。また、平成4年度文部省科学研究費一般研究(B)課題番号03452207「植生の気候緩和効果に関する土・植・気圏を一体とした水文学的研究」(代表者・日野幹雄)の補助を受けた。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 1) Oke, T.R. : The Energetic Basis of the Urban Heat Island, Quart. J. R. Met. Soc., vol.108, pp.1-24, 1982.
- 2) 片山忠久・石井昭夫・西田勝・堤純一郎・中島哲也・増田正一: 住棟間の放射環境に関する実測とその推定, 日本建築学会計画系論文報告集, vol.401, pp.1-10, 1989.
- 3) 村上周三・日比一喜・持田灯: Large Eddy Simulation による街区周辺の乱流場の3次元解析(その1), 日本建築学会計画系論文報告集, vol.412, pp.1-10, 1990.
- 4) 神田学・日野幹雄: 大気-土壌系の相互作用に着目した対流性雲の発生・発達に関する3次元LESモデルによる検討, 水工学論文集第35巻, pp.27-32, 1991.
- 5) 神田学・日野幹雄: 大気-植生-土壌系モデル(NEO SPAM)による数値シミュレーション(2)植生の気候緩和効果の数値実験, 水文・水資源学会誌, vol.3, pp.37-46, 1990.
- 6) 日野幹雄・神田学・稲垣聡: 植生-大気境界面での運動量輸送機構に関するLESモデルによる検討, 水工学論文集第36巻, pp.689-692, 1992.
- 7) Schmidt, H. and Schumann, U. : Coherent Structure of the Convective Boundary Layer Derived from Large-Eddy Simulations, J. Fluid Mech., vol.200, pp.511-562, 1989.
- 8) 神田学・日野幹雄・稲垣聡・安部智久: 都市道路網(熱の帯)上の熱対流混合層のLarge Eddy Simulation-大手町・皇居周辺を例に, 水工学論文集第37巻(投稿中).
- 9) Ho, C.M. and Huerre, P. : Perturbed free shear layers, Ann. Rev. of Fluid Mech., pp.365-424, 1984.

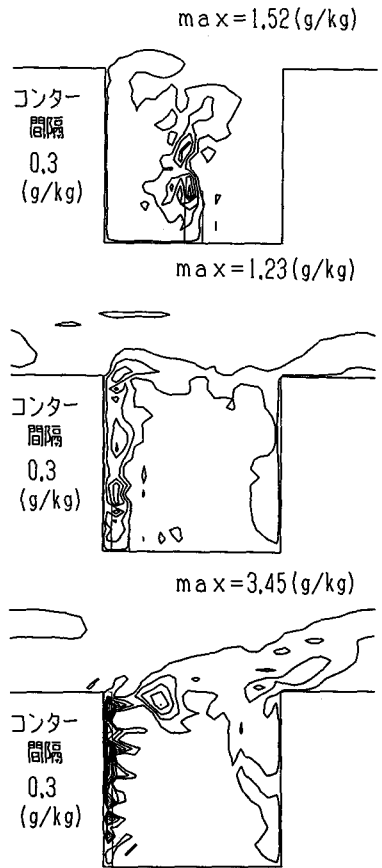


図-6 各ケース step 2 における水蒸気変動コンター図(上から case2, 3, 4)