

都市域における夜間の熱環境容量と熱帯夜の形成についての考察

Nighttime Heat Discharge Capacity of Urban Boundary Layer

守田 優

Masaru MORITA

ABSTRACT; Recently thermal environment deterioration has become one of the major problems in urban areas. "Tropical night" which means the night with high temperature in summer causes sleep discomfort and energy consumption increase. This study approached the phenomena focusing on the mechanism which discharge exhaust heat upwards from surface boundary layer and carried out some simulation calculations by a turbulent closure model to investigate the response of urban boundary layer to the exhaust heat load. The calculations showed the heat can be hardly discharged in the nighttime upwards when stable boundary layer forms on the surface and also suggested heat discharge capacity in the nighttime is lower than in the daytime.

Key words; urban thermal environment, urban boundary layer.

1. はじめに

近年の都市熱環境の悪化にともない、より快適な環境への関心から、都市域における水辺の役割や「風の道」など暑さを緩和するための研究調査が進められている。確かに、夏の昼間の猛暑は耐えがたく、熱環境を改善し、快適な環境をつくることの必要性は言うまでもない。しかし、一方で夜間の熱帯夜は、眠れない夜をもたらし、そのことがクーラーの使用率を高め、それによる熱環境への負荷をさらに高めるという悪循環をもたらしている。昼間の猛暑と夜間の熱帯夜、どちらも近年の都市熱環境において重要な問題ではあるが、この二つはやや性格を異にするものである。夏の昼間暑いというのは昔からそうであるが、そんなときでも少なくとも日が沈めばやや涼しくなり何とか我慢できるというのが実情だったのではないかと思う。つまり、熱帯夜こそは都市における土地利用も含めた人間活動によってもたらされた環境問題ということができるとは思えないだろうか。

本研究では、まず、気象データをもとに熱環境の問題を整理し、その上で、熱帯夜の熱環境における位置づけについて述べた。熱帯夜の形成に関して、従来、蓄熱や人工熱という熱源に焦点が当てられてきたが、ここでは、都市大気系と排出熱との相互関係、特に大気安定度に着目して検討した。そこで、乱流拡散モデルを用いて数値実験を行い、排出された人工熱がどのように都市の気温垂直分布に影響を及ぼすかを、特に大気の安定度との観点から調べ、熱帯夜を夜間の熱環境容量と排出熱との関係から考察した。

2. 熱環境における熱帯夜の位置づけ

都市気候という観点から、多くの長期気温変動の研究があり、都市域の気温の上昇傾向が明らかにされ、特に年最低気温の上昇率が年最高気温のそれより大きいことが示されている¹⁾。ここで、1年の最高最低ではなく、8月の最高最低気温に注目してみる。図-1は、東京の大手町、府中、青梅の1990年8月2日から5日の気温変化である。これらの地点は地理的に海岸部から内陸へ向かっており、単純な比較は避けなければならないが、それでも言えることは、これら3地点で日最高気温にはあまり差がないにもかかわらず、夜間の気温の低下には明らかな違いがあることである。すなわち、青梅、府中、大手町と都市化の程度が強くなるにつれ、夜間に下がるべき気温が下がらないという傾向が明確に読み取れる。

都市熱環境の問題は、最初に述べたように、昼間の猛暑と熱帯夜である。しかし、両者は性格的に異なる問題であり、それを簡単に要約すると次のようになる。すなわち、夏の昼間に暑いのは以前もそうであり、現在もそうである。しかし、適切な土地利用やエネルギー利用により、快適な環境にしたい。これが昼間の熱環境の問題である。しかし一方、熱帯夜の問題は事情が異なっている。すなわち、以前は夜は日暮れとともに気温は下がり暑くなかったが、現在はいつまでも気温が下がらずに暑いということになる。比喩的な言い方が許されるならば、熱帯夜の問題は、言わば都市の大気系が変質している問題であると言えよう。熱帯夜の数は、図-2に示したように着実に増加している。

3. 大気安定度と熱帯夜の関係

都市域における最高最低気温の経年変化と気温の日変化から熱帯夜の熱環境における位置づけを述べたが、図-1で示された都心と郊外の夜間の気温の変化を別の角度から見るために示したのが図-3である。この図は、東京の大手町と郊外の小金井の夜間における気温の垂直分布を示したものである²⁾。3月のデータで熱帯夜のそれではないが、小金井市では接地逆転層が見られるが、大手町では逆転層が見られず、小金井市の気温のカーブと大手町のそれとの気温差は、都市域において夜間に上方へ排出されずに残留している熱を象徴的に表しているといえる。

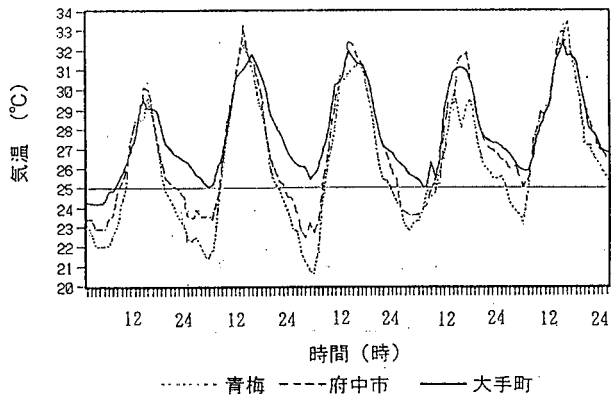


図-1 気温日変化の比較 (1990年8月1~5日)

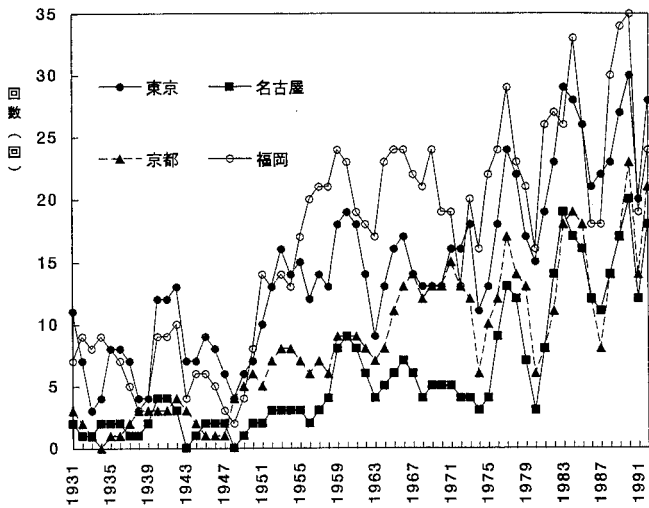


図-2 都市における熱帯夜数の増加 (3年平均値)
(気象庁のデータによる)

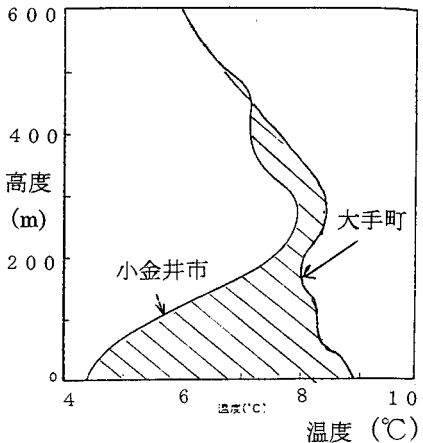


図-3 ヒートアイランド形成時における
都心と郊外の垂直温度分布の比較
(斜線は著者が加筆)

自然の大気系には変動しながらも気温をある一定のレベルに維持する機能が本来備わっていると考えることができる。昼間は混合層が発達していくなかで、地表からの熱い気塊は上方へ拡散される。しかし、夜間は地表に接地逆転層が発達し、安定境界層が厚さを増していく。このサイクルを自然な状態と考えると、ここへ都市における様々な熱源による負荷が加えられるとき、昼間においては、上に述べた鉛直方向の拡散によって気温の上昇が緩和されるが、夜間は大気が安定しているため、そのまま地表付近に熱が残留してしまうことになる。熱帯夜の要因として、従来、地表面の蓄熱、人工熱、建物からの長波放射など主に熱源の側から議論されてきたが、本研究では、まず大気の安定度と熱排出との相互関係という面からアプローチする。

4. 昼間及び夜間における人工熱流入の数値実験

都市大気系へ人工熱が流入したとき、それがどのように大気系から上方へ排出されるのか、あるいは残留するのか、また垂直方向の気温分布にどのような変化が生じるのか、これらを数値実験により検討した。本研究は、数値モデルとして、T. Yamada³⁾の垂直1次元の乱流クロージャーモデル (Level 2.5)を用いた。文献3)の論文では、森林のキャノピー層を考慮したモデルを扱っているが、本研究では、森林のキャノピー層と都市キャノピー層に置き換えて計算を行った。

4. 1 基礎方程式および計算の条件

基礎方程式は、2方向の風速(U, V)、乱流エネルギー ($q^2/2$)、乱流長さスケール ($q^2 l$ で求める)、及び温位 (Θ)、水蒸気量混合比(Q_v)を未知量とする6つの方程式と地表面熱収支式、地中の熱伝導方程式の計8つの方程式を連立させて解いた³⁾。

数値計算は風速の弱い夏期の晴天日を想定し、72時間の期間で計算を行った。計算では、日射量を入力するが、この入力データは著者らが1992年8月に行った観測による実測値を用いた。大気長波放射の計算では、Sasamori⁷⁾の簡略化した計算法を採用し、上部境界より上にさらに高さ10 kmまでとって長波放射を計算した。また、以下の境界条件、初期条件の設定においては同じく論文³⁾を参考にした。

(境界条件) 計算範囲は、大気が高さ1600 m、地中深さ0.5 mであり、空間格子は $\Delta z = 0.5 \sim 50$ m (80分割)、地中は $\Delta z = 0.05 \sim 0.15$ m (5分割)とした。境界の温位は特定の値に設定し、地中の下部境界条件は温度298 Kを与えた。地表面における大気系と地表面との境界条件の扱いは、T. Yamada⁴⁾に示された方法をとった。

また、地表面の条件として、地面のアルベド0.25、熱拡散係数 1.0×10^{-8} m²/secとした。ここでは、コンクリートを想定した。

(初期条件) 初期温位は、地表で303 Kとして、1400 mまで断熱減率で与え、それより上方では、10 K/kmで増加するようにした。また、水蒸気量は、相対湿度20 %で与え、地表面においては0 %とした。風速は、地表から対数則で増加し、最大風速として与えた地衡風の風速に達してあとは上方に一定とした。地衡風も時間的に一定であるとした。地衡風の風速は、モデル計算によって5 m/sec, 8 m/sec, 10 m/secに設定した。混合距離 l については、地上50 mまで $l = kz$ (k : Karman's constant)で与え、上部境界でゼロになるように設定した。

(数値計算) 数値計算は、上に述べた8つの方程式のうち、熱収支式を除く7つは基礎方程式を陰解法(ガウス消去法を用いた)で解き、計算時間間隔は $\Delta t = 60$ secとした。

4. 2 モデル計算(その1:都市キャノピー層を考慮しない)

数値実験として、まず都市キャノピー層を考慮しない条件でモデル計算を行った。日射量を入力し、基礎方程式の未知量である温位、風速、乱流エネルギーなどを計算し、特に垂直方向の温位分布が時間的にどのように変化するかを見た。これをいわばバックグラウンドの状態 (Case 0) とし、これに人工熱を加えてその温位プロファイルがどのように変化するかを計算した (Case 1)。人工熱は高さ1.75 mのグリッドに与え、夜間の午後9時から午前3時までの6時間 (Case 1-1)と昼間の午後9時から午後3時までの6時

間 (Case 1-2) の2つのケースについて計算を行った。人工熱は 50W, 100W, 150W、200Wと4段階で与えた。
4. 3 モデル計算 (その2: 都市キャノピー層を考慮する)

都市キャノピー層を考慮した条件で、まず風速や温位のプロファイルが Case 0 と比較してどのように変わるかを見た。そして、4. 2と同じように人工熱を流入させ、それがどのように変化するかを調べ、キャノピー層の役割を検討した。

ところで、都市キャノピー層のモデル化については、T. Ymadaの論文³⁾を参照したが、当論文は森林のキャノピー層を対象としたものであり、そのパラメータである森林面積率 η や葉面積密度 $a(z)$ を都市キャノピー層のパラメータに読み換えるが必要になるが、その相互関係が明確ではないため、本モデル計算では、森林面積率 η を建物面積とし、平均的な都心の数値として $\eta = 0.35$ と設定した。また、葉面積率については、計算を繰り返しながら値を見つけることにし、0.005と仮定した。キャノピー層の高さは、30 mとした。基礎方程式にキャノピー層の効果として加える drag 係数 C_d は0.2を与えた。

また、モデル計算 (その1) では、長波放射を計算したが、このモデル計算 (その2) では、建物を含むキャノピー層内の長波放射が複雑であることから、本論文ではこの部分の計算は行わなかった。

5. 計算結果と考察

モデル計算の結果と考察は以下のとおりである。

5. 1 モデル計算 (その1)

図-4にまず人工熱を与えない条件(Case 0)での垂直温位分布の時間変化を、3日目の24時間について3時間ごとにプロットした。この図の温位プロファイルの動きは図-3の小金井市に相当する。昼間、地表からの顕熱は、混合層の発達によって上空に運ばれ、夜間は放射冷却によって逆転層が形成される。安定境界層が地表付近に横たわるように形成されるようすがモデル計算によって再現できている。

計算では、真夜中 1:00 から 4:00 の風速のプロファイルにおいて、高度100 ~150m のあたりに風速の強い部分が生じており、このことが 図-4の 1:00あるいは 4:00 のプロファイルに認められる温位のわずかな盛り上がりの原因と思われる。

なお、この計算では、大気放射を計算したが、大気放射を考慮する場合としない場合で、72時間後の計算で 1~2 K の温位差が生じた。

以上が人工熱を流入させない自然な条件での温位プロファイルであるが、ここで人工熱を与えた条件での計算結果を図-5に示した。この図は、人工熱を与えた Case 1-1 と Case 1-2 の温位プロファイルから人工熱を与えない Case 0 のプロファイルとの差をとって、人工熱による温位の変化を見たものである。

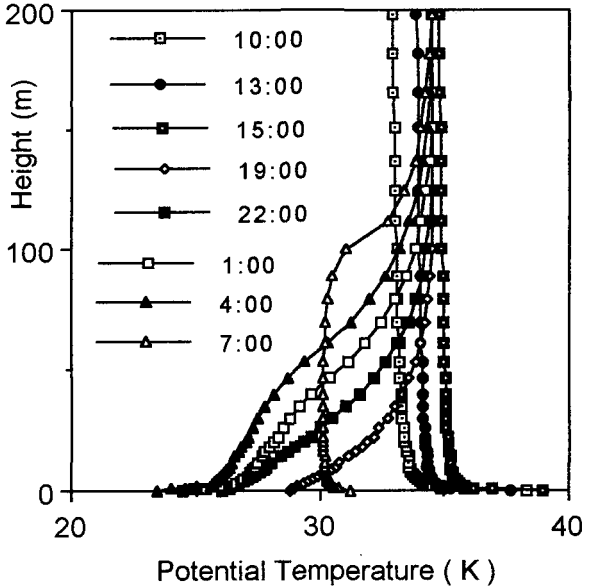


図-4 1日の垂直温位分布の変化 (Case 0)

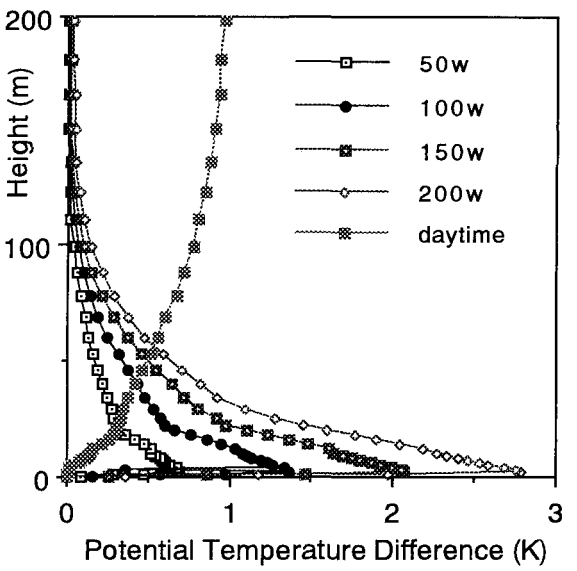


図-5 人工熱流入による垂直温位分布の変化 (Case 1)

まず、図中に示した夜間に人工熱を流入させた温位差のカーブは、午前4時における温位差の計算値である。人工熱が、50W, 100W, 150W, 200W と大きくなるにつれ、温位プロファイルの差も大きくなっている。この夜間のカーブから、地表近くで出された熱が、そのまま残留し、気温を上昇させていると解釈することができる。つまり、夜間は地表付近に安定境界層が形成されているため、流入した人工熱は上方へ排出されないとと言える。一方、昼間に人工熱を流入させた場合は、図から、温位の差が上にいくにしたがって増加し、拡散によって熱が上方へ排出されていることがわかる。

このモデル計算は、都市キャノピー層の存在しない条件で実施しており、そのまま都市の熱環境の問題として拡張解釈はできないが、都市大気系が地表からの熱を上方へ排出する能力をその熱環境容量とするならば、夜間は昼間より熱環境容量が小さいということが言える。

5. 2 モデル計算（その2）

都市キャノピー層の存在によって風速、温位、乱流拡散係数、乱流エネルギーがどのように変化するかを示したのが図-6の(a), (b), (c), (d) である。凡例はすべての図に共通で、点線が都市キャノピー層を考慮しないモデル計算（その1）の結果、実線がキャノピー層を考慮したモデル計算（その2）の結果である。

まず、図-6 (a) の風速プロファイルを見る。これは、地衡風の初期条件として8 m/sec を設定したときの計算結果である。まずわかることは、model 2 の結果で高さ30m付近に風速の変曲点があり、キャノピー層の存在によって強いウインド・シアが生じていることである。この現象は15:00のプロファイルにおいて顕著である。図-6 (b) は、温位のプロファイルであるが、風速と同様、model 2 の15:00の温位プロファイルに同様の変曲点があり、キャノピー層の内部とその上方とで乱流拡散のレベルが異なっていることを示している。ここでいまひとつ注目したいのは、夜間(4:00)のケースでは、いずれもキャノピー層の影響がほとんど見られないことである。

以上のことを確認するために、図-6 (c) に乱流拡散係数、図-6 (d) に乱流エネルギーのプロファイルを示した。まず図-6 (c) では図-6

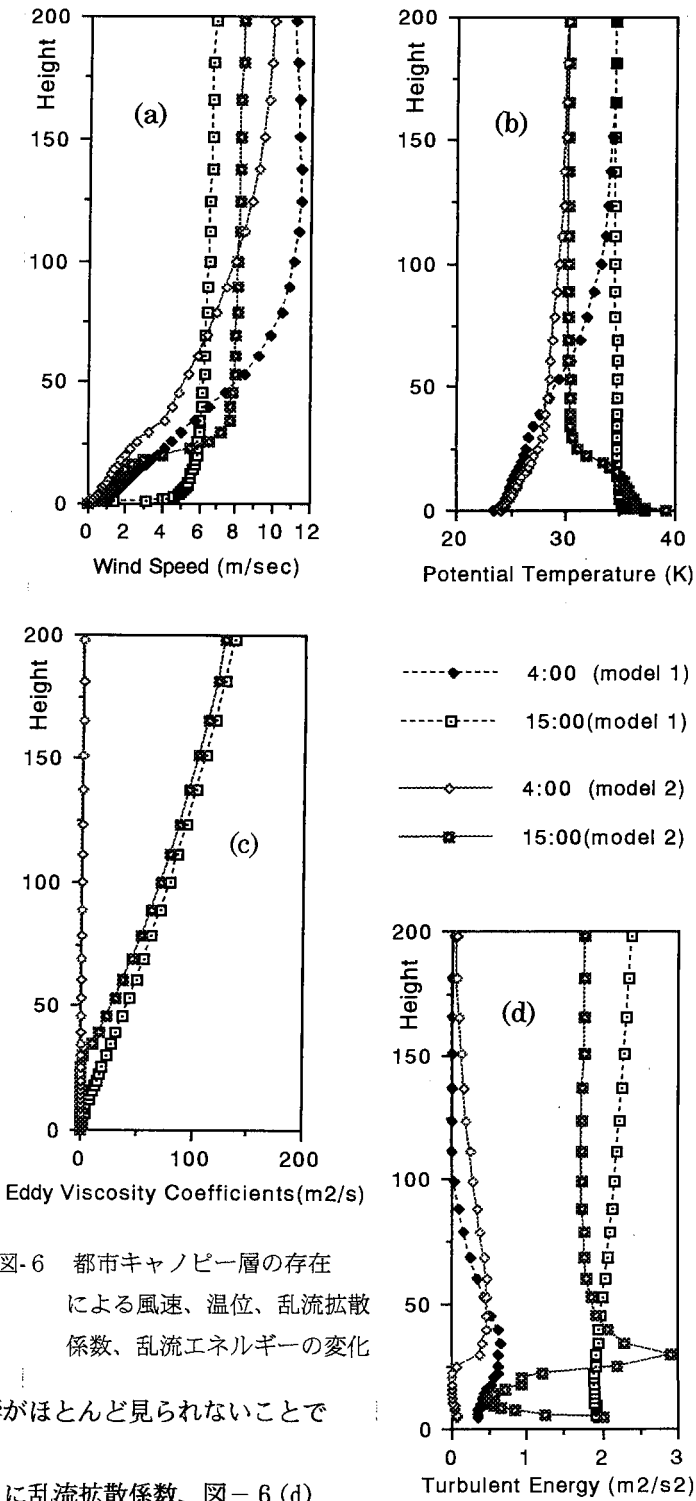


図-6 都市キャノピー層の存在による風速、温位、乱流拡散係数、乱流エネルギーの変化

(b) の温位のプロファイルを裏付けるように拡散係数が model 2 の 15:00 において、建物の高さ 30m を境にその下では拡散係数がほとんどゼロで、その上部で増加している。model 1 の 15:00 が地表から係数が増加しているのとは対照的である。夜間 4:00 では、いずれも拡散係数は小さい。図-6(d) では、キャノピー層の存在する model 2 で高さ 30m の少し上の位置でウインド・シアーによる乱流エネルギーの急激な増加を確認することができる。しかし、夜間においては、いずれも昼間より乱流エネルギーは小さい。

以上から、モデル計算(その2)では、キャノピー層の存在を、乱流拡散という観点においては組み込むことができたと考えられる。そこで最後に、モデル計算(その1)で行った人工熱の流入を数値実験として実施した。ここでは、1.75m の高さの人工熱源を 100W とし、風速を 2~8m/s に変えて午前 4 時の温位プロファイルの変化を図-5 と同様に計算した。(Case 2)。

その計算の結果を図-7 に示した。図-5 のケースと比較して、キャノピー層の存在により 100m より上で温位の上昇がやや見られるものの人工熱の大部分が地表近くに残留しており、夜間の安定境界層が熱帯夜の形成に基本的な役割をしていることがわかる。

おわりに

本研究では、熱帯夜を都市熱環境の重要な問題と考え、その形成を、特に熱源からの流入熱と大気安定度の関係から検討し、都市熱環境を規定する熱源・地表幾何形状・大気安定度のうち最後の大気安定度をその 1 次要因とした。このことは、同じ 100W の熱源であっても、夜間と昼間ではその熱環境に与える実質的な負荷が異なることを意味し、さらに、熱環境で熱源を議論するとき基本となる熱フラックスが相対的であること、すなわち熱フラックスの相対性という結論に達する。本研究では、モデル計算において、キャノピー層のモデル化がまだ粗く、熱源としての建物の扱いや移流の計算など今後残された課題もある。しかし、本研究の結論は 1 次近似的には妥当であると考えられる。

現在、環境工学の分野でエコテクノロジーが議論されている。自然が本来持っている浄化機能を積極的に利用しようというその方向は、熱環境の分野でもあてはまる。われわれの大気系が本来もっているホメオスタシス、すなわち気温を一定に維持していく機能を考慮しながら都市の熱環境問題にアプローチしていくことが求められている。熱帯夜はまさにそのことの反証といえるのではないだろうか。

参考文献

- 1) 伊藤政志, 宇田川満他: 最近の東京における都市気温分布の変化について(その2), 東京都環境科学研究所年報 1992.
- 2) 河村 武: ヒートアイランド, 別冊サイエンス, 日刊工業新聞社.
- 3) Yamada, T: A Numerical Model Study of Turbulent Airflow in and Above a Forest Canopy, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 60, No. 1, 1982.
- 4) Yamada, T: A Numerical Simulation of Nocturnal Drainage Flow, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 59, No. 1, 1981.
- 5) Sasamori, T: The Radiative Cooling Calculation for Application to General Circulation Experiments, J. Appl. Meteor., Vol. 7, 1968.

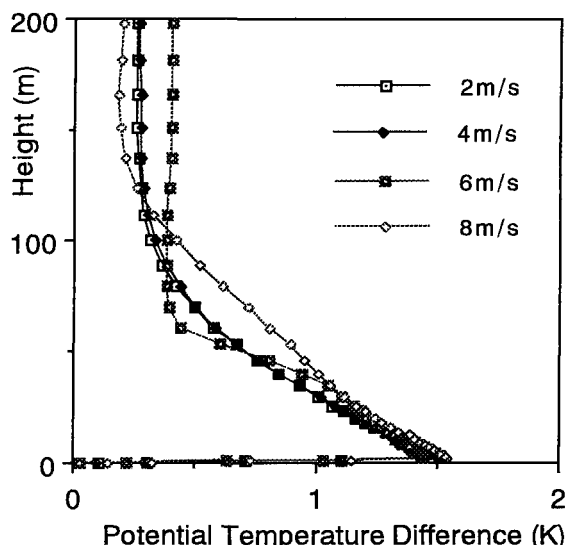


図-7 人工熱流入による垂直温位分布の変化
(Case 2)