

市街地の蒸発量に及ぼす建物周辺気流の影響
に関する実験的研究

正 会 員 成 田 健 一*
正 会 員 関 根 毅**
正 会 員 徳 岡 利 一***

1. 序

都市域における土地被覆形態の変化、すなわち道路の舗装化や建築物の高密度化は、そこでの熱収支構造に大きく作用し、都市域特有の気候環境を形成する大きな要因となっている。しかしながら、地表面が多くの凹凸を有し、しかもさまざまな土地利用形態がモザイク的に配置されている市街地においては、一様かつ無限平坦を仮定している既存の熱収支観測法の適用は難しく、そのため具体的な野外観測に基づく熱収支構造の評価に関する研究は極めて少ない。

これに対し、土地利用と熱収支を関連づける一つのアプローチとして、シミュレーションによる都市空間のモデリングが一方で試みられてきた^{1)~5)}。これは、地表面熱収支を左右するいくつかのパラメータ（例えば、アルベド・地表面粗度・地表面構造物の熱特性・透水面積率など）を都市と郊外について任意に設定し、地表面温度や各熱収支項の計算を行うというものである。その成果として、蒸発に伴う潜熱フラックスの大小が都市気候形成に最も大きく影響していることが指摘されてきた。

尾島・森山⁶⁾は、さらに土地利用形態ごとにパラメータを設定し、実際の土地利用との対応を試みている。これは、地表面熱収支を地域アセスメントに適用するための具体的方針を示した研究として評価されるが、各々のパラメータの設定や各熱収支項の計算式については、残された問題も多い。特に蒸発に関しては、(1)さまざまな建築物による凹凸を無視し地表面を平坦と仮定している、(2)土地利用の異なる周囲からの移流による影響を考慮していない、(3)蒸発比を任意に設定し、また降水後の蒸発過程や土壌水分の変化を無視している等が重要な問題といえる。

本研究は都市気候の熱収支的考察をさらにすすめるため、特に影響力の大きい潜熱フラックスに注目し、定量

的把握のための基礎資料を実験的に得ようとするものである。今回は、そのうち建築物による気流性状の変化と物質移動係数との関連を中心に風洞を用いて考察し、合わせて蒸発面のスケールの影響についても考察を加えた。

これまで市街地の物質移動係数については、熱と水蒸気の拡散係数が等しいというルイスの仮定を用いて対流熱伝達率から求められてきた。一方、対流熱伝達率は風速の一次式として取り扱われるのが一般的であるが、この場合風速としてどの高さのものを採用するかは明確にされていない。特に建築物の林立する市街地においては地表面近くの気流性状が複雑なため、地表面における実際のフラックスと風速との関係については不明な点が多く、この点を明らかにする必要がある。

筆者らは、塩水の濃度変化を利用した蒸発量測定法⁷⁾を用いて建物模型周辺の蒸発量分布を直接測定し、同時に蒸発面上の詳細な湿度分布測定を行うことにより物質移動係数を独自に求め、建築物周辺気流性状との関係について考察した。周辺気流そのものに関する風洞実験はこれまで数多く報告されている⁸⁾が、地表面フラックスとの関連を取り扱ったものは少ない。熱伝達率に関しては、突起物を有する外壁面を取り扱った類似の研究例⁹⁾があり気流性状との関係についても考察されている。同じ物質拡散という点では建物近傍汚染に関する風洞実験が挙げられる¹⁰⁾が、蒸発の場合は地表面上の湿度分布が蒸発速度自体に影響を与えるため、一定速度で排出されるトレーサガスの動きを追うこの種の実験とは本質的に異なるといえる。

風洞による模型実験は、相似則の問題等未解決の問題があり、必ずしも万全でないことは言うまでもない。しかしながら、特に蒸発現象に関しては野外実測における満足のいく蒸発量測定法がなく、かつ湿度測定に関しても非定常な野外で現象をとらえるには精度的に問題が多く、実スケールでの把握はほとんど不可能といえる。したがって比較的容易に種々の条件を変えられ、しかも同一の測器をトラバースすることにより器差等を考慮する

* 広島大学 大学院生・学術修

** 広島大学 教授・工博

*** 広島大学 大学院生・工修

(昭和60年6月6日原稿受理)

ことなく詳細な湿度分布を把握できる等の利点を考えると、風洞実験の意義は大きく、今後の研究に十分有用な資料を提供できるものと考えている。

2. 実験方法

(1) 実験装置

a) 風洞：広島大学工学部所属、半回流吹出型で詳細を Fig.1 に示す。風洞吹出口は高さ 900 mm、幅 1800 mm。b) 粗度要素：風洞吹出口前方に Fig.2 に示す粗度要素を配列した地面板を設置し、地面板上に乱流境界層を発達させた。粗度要素高さは 10 mm・20 mm・40 mm の 3 種で、配列長さはいずれも 3600 mm。配列間隔は高さの 5 倍である。c) 測定部：粗度要素配列の風下側 1800 mm を測定部とし、60 mm 四方深さ 50 mm のアクリル製水槽を配列し、各水槽に満たした塩水の濃度変化から蒸発量を測定。したがって求められる蒸発量の分布は、水槽面積 (60 mm×60 mm) を単位とした平均値である。d) 模型：幅は風洞幅と一致させ、奥行 (D) は水槽の大きさに合わせ 60 mm に統一。高さ (H) は 1/2 D・D・2 D の 3 種類とした。e) 風速測定：定温度型熱線風速計 (日本科学工業製・タングステン製 5 μm の I 型プローブ)、および無指向性サーミスタ風速計¹¹⁾ (芝浦電子製 F 5401) を併用した。f) 温湿度測定：湿度は容量型湿度計 (vaisala HMI-11) を使用。出力は測定後に飽和溶液により検定し、さらに測定中にも 10 分ごとにアスマン通風乾湿計との対比を行い、それらのデータから実験日ごとに検定曲線を求めた。気温は 0.1 mmφ の C-C 熱電対を使用。水面温度は同じ熱電対および赤外線放射温度計 (National ER-2007) を併用した。g) 解析：各々の出力はデータレコーダ (TEAC R-81) に収録し、マイクロコンピューター (TEAC PS-85, A/D 変換速度 20 msec データ数 1000 点) で解析を行った。

(2) 蒸発量測定法

塩水の水分蒸発による塩分濃度変化を、高精度サリノメータにより検出し蒸発量を求める。面積が一定の場合

蒸発量 E (mm) は次式で表せる。

$$hS = (h - E) S'$$

$$\therefore E = h(S' - S) / S' \dots\dots\dots (1)$$

ただし、h：最初の水位 (mm)、S：最初の塩分濃度、S'：一定時間後の塩分濃度。使用したサリノメータは Auto Lab Industries PTY. LTD. inductively coupled salinometer で、精度は ±0.003 ‰ である。蒸発量の測定精度は、 $\Delta S = S' - S$ とすれば

$$\delta E = \delta h \Delta S / S' + h \delta (\Delta S / S')$$

$$\sim \delta h \Delta S / S' + h \delta (\Delta S) / S' \dots\dots\dots (2)$$

となり、S' = 35 ‰、h = 50 mm、 $\delta h = 0.5$ mm、 $\delta (\Delta S) = 0.0042$ ‰ とした場合、E = 1.0 mm で $\delta E = 0.016$ mm すなわち 1.6 ‰ の精度となる。

サリノメータによる測定には、最低 150 cc の塩水を必要とする。蒸発量分布の把握という目的からすれば、水槽の面積はできるだけ小さい方が詳細な検討が可能である。しかしながら、蒸発量があまり大きくない場合には (2) 式において第 2 項 > 第 1 項 となり、水深を浅くした方が精度は良くなる。以上のことを考慮し、本研究では水槽の大きさを 60 mm×60 mm×50 mm (容量：180 cc) とした。

これまでの蒸発実験のほとんどは^{12)~17)}、天秤による秤量法で蒸発量を求めている。現在の天秤の精度からすれば、秤量法の方が精度的には優れている。しかしながら、多数の水槽を配列して同時に測定することは、実験開始時の各水槽の重量測定を必要とする秤量法では不可能である。本研究においては、あらかじめ別の大容量タンクで塩水を作り、よく攪はんした後速やかに各水槽に給水し、終了後はアクリル製の蓋をして蒸発を防ぎ、その後採水ピンに回収するという方法をとった。この濃度変化による方法では、塩水に極端な濃度分布がない限り、採水時の微量の溢水が大きな誤差にならないという取り扱い上の利点もある。各水槽の水位については、満水状態になるよう目視でスポイトを用いて微調整を行った。

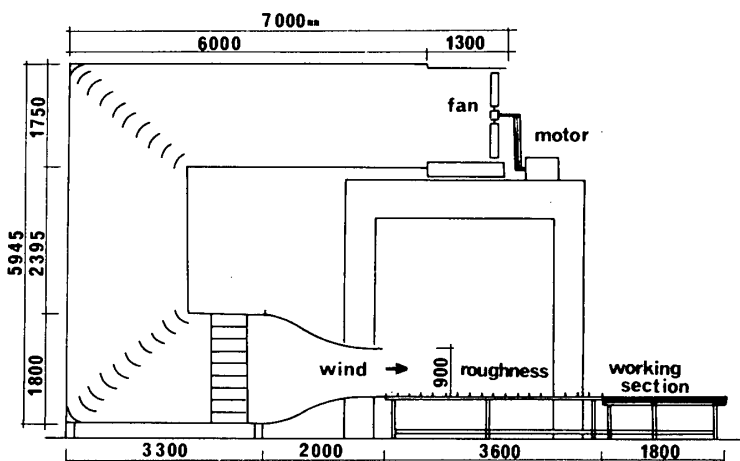


Fig. 1 Wind tunnel

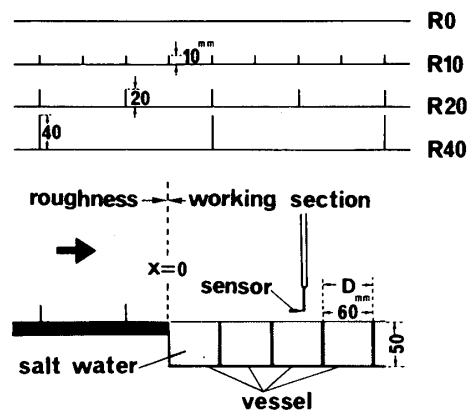


Fig. 2 Roughness elements and working section.

誤差は 0.5 mm 以下と考えられる。

(3) 実験条件

a) 風速：模型実験に関しては、上空風速（吹出口中央高さにおける風速： U_∞ ）約 1.2 m/s で一定とした。風洞実験としては弱い風速であるが、これは以下の理由による。すなわち強風では水面が波立つことで表面粗度に変化し、さらにしぶきとして飛び出した小水滴が空中で蒸発する『体積蒸発』がおこるようになり、取り扱いが複雑となる。現状ではこれらの効果を評価することは難しい。一方、実験条件としては、周辺気流に関して相似が得られる最低レイノルズ数（代表長さ：模型高さ）を確保する必要がある。本実験の基本模型（ $H:2D$ ）に対する分子レイノルズ数は 1.2 m/s で約 10000 となり、この値は決して十分な大きさではないが一応満足できるものと考えられる²¹⁾。

b) 温湿度：本来ならば恒温恒湿の条件下で行うのが望ましいが、今回は特にコントロールはしていない。ただし、塩水の温度についてはできるだけ気温に近づくように赤外線ランプ等を用いて給水前に調整した。実験時間内の平均水面温度は時間内の約 10 回の測定値を時間に対してプロットし、その経時変化から求めた。

c) 塩分濃度：使用したサリノメータが主に海洋学で用いられ、海水を基準に設計されているため、約 35 ‰ とした。なお、塩分濃度による飽和蒸気圧の低下は次式で求めた。

$$P_s = P(1 - 0.000537 S) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 S ：塩分濃度 (‰) P ：同温の純水の飽和蒸気圧 P_s ：塩水（濃度 S ）の飽和蒸気圧。

d) 実験時間：給水から密閉までの測定時間は風速・温湿度の測定点数により多少異なるがおおむね 70～90 分である。

(4) 表面温度測定法

蒸発面の水面温度に関しては、表層 1 mm 程度に水温ギャップが存在する等の指摘¹⁸⁾もあり実測例もいくつか報告されている¹⁹⁾が、その測定法にはいまだ議論が残されている。本実験では、鉛直方向に降ろした熱電対の先

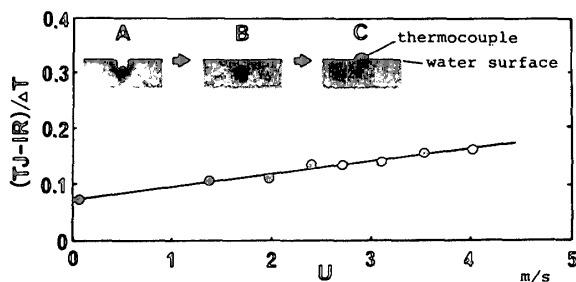


Fig. 3 The effect of wind speed on error in measurement of surface temperature— ΔT : the difference between air and surface temperature, TJ and IR : the surface temperature measured by thermocouple and infrared-thermometer, respectively.

端部を水平に折り曲げ、その部分を水面に接触させ測定した。折り曲げ長さは約 5 mm である。これとは別に、測定回数を増やす目的で放射温度計による測定を補足的に採用した。熱電対を降下させると最初は十分な接触が得られない (図 3・A)。そこで一旦完全に水没させ (B) その後再び引きあげ水面と同一高さに保った状態 (C) で測定した。保持高さが多少高い場合でも、表面に水膜が存在する限り示度に影響はなかった。熱電対による固体表面の温度測定に関しては宮野・小林²⁰⁾の報告に詳しく、接触長さは径の 100 倍程度確保すべきであり、さらに表面と周囲の温度差が大きい程また気流速度が大きい程誤差は大きくなると指摘している。そこで実験に先立ち、風速を変化させた場合の気温と水面温度の差 (ΔT) に対する測定の誤差 (熱電対による値 (TJ) と放射温度計による値 (IR) との差) を検討した。結果を図 3 に示す。誤差は風速とともに僅かに増加しているが、その値は風速 2 m/s 以下では ΔT の 10 % 以下と見積れる。本実験の風速条件では、 ΔT を 1°C 程度に抑えれば測定精度は 0.1°C 以内と考えられる。

3. 平坦面の蒸発量分布 (模型を置かない場合)

模型実験に先立ち、模型を置かない状態での気流方向の蒸発量分布を検討した。水槽の配置を Fig. 4 に示す。中央部に幅 6 列、気流方向 30 列、計 180 個の水槽を配列し、その両側にさらに幅 600 mm ずつの水面を設定した。採水は中央 2 列について行い、その平均を値とした。風速および温湿度の鉛直プロファイルは水面先端からの距離 $X=0, 30, 90, 210, 390, 630, 930, 1290, 1650$ mm の 9 点で測定した。アプローチフローは粗度要素高さ 10, 20, 40 mm および地面板のみの 4 種類 (各々 R 10, R 20, R 40, および R 0 と略記) で行い各々について風速を 3 種類に変化させ計 12 ケースについて測定した。ここでの風速の測定は I 型プローブを使用した。風速のプロファイルを図 5 に示す²²⁾。

(1) 気流方向の物質移動係数の分布

物質移動係数 (蒸気圧基準) は次式により算出した。

$$k = E / (e_s - e_\infty) \dots\dots\dots (4)$$

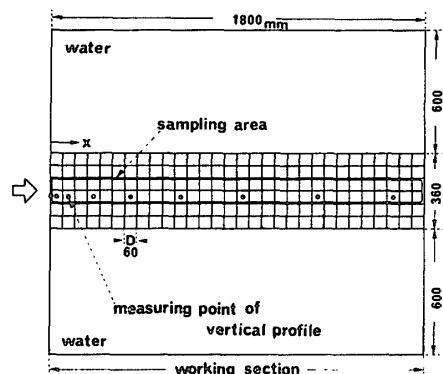


Fig. 4 Arrangement of vessels for measuring evaporation from flat plane.

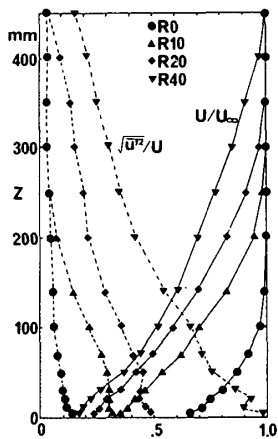


Fig. 5 Vertical profiles of mean wind velocity and turbulence intensity.

ここで、 k : 物質移動係数 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mb}$)
 E : 蒸発速度 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
 e_s : 各水槽の水面温度に対する飽和蒸気圧 (mb)
 e_∞ : 水面先端上吹出口中央高さの蒸気圧 (mb)

k の分布は Fig. 6 に示すごとく、いずれのケースにおいても $X=150 \text{ mm}$ までの範囲で急激に減少し、それよ

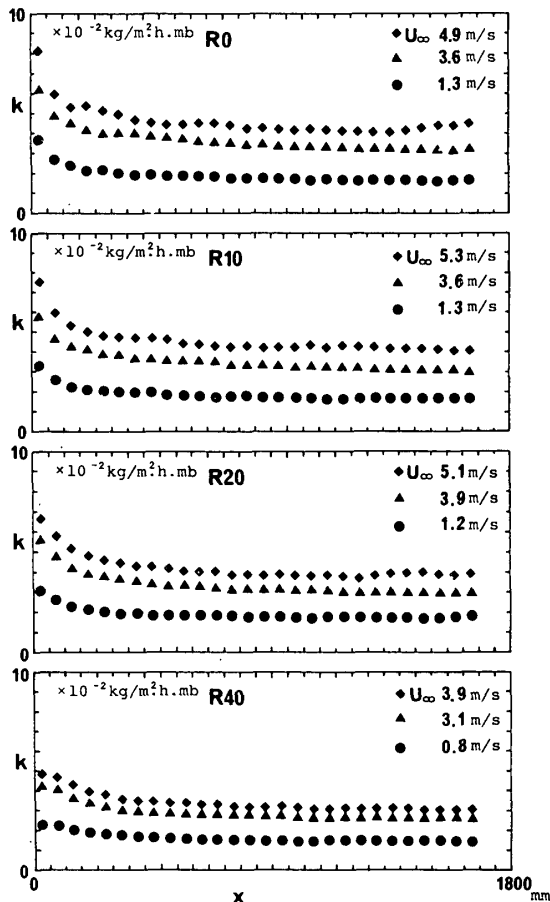


Fig. 6 Distributions of mass transfer coefficient (k) at various roughness and wind velocities.

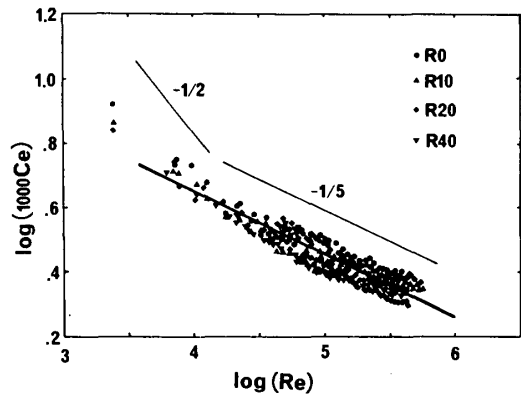


Fig. 7 Relation between evaporation rate and Reynolds number.

り風下側では緩やかに減少して $X \geq 600 \text{ mm}$ についてはおおむね一定とみなせる。これらの関係を無次元表示するため、次式によりレイノルズ数 (Re) と拡散能を表す無次元数 (C_e) を求めた。

$$Re = U_\infty X / \nu \dots\dots\dots (5)$$

$$C_e = (k' - a) / U_\infty \dots\dots\dots (6)$$

U_∞ : 上空風速 (cm/sec)

X : 水面先端からの距離 (cm)

ν : 空気 の 動粘性係数 (cm^2/sec)

k' : 拡散速度に換算した k (cm/sec)

a : 自然対流による拡散速度 ($= 0.298$)¹³⁾ (cm/sec)

境界層理論の解析によれば層流の場合 $C_e \propto Re^{-1/2}$, 乱流の場合 $C_e \propto Re^{-1/5}$ という関係が成立する。Fig. 7 に両者の関係を示すが、粗度および風速のいかんにかかわらず、ほぼ同一の関係を示している。Fig. 7 より平坦面における局所の k' に関し次式の関係が得られる。

$$k' = 0.298 + 0.028 U_\infty (Re)^{-1/5} \dots\dots\dots (7)$$

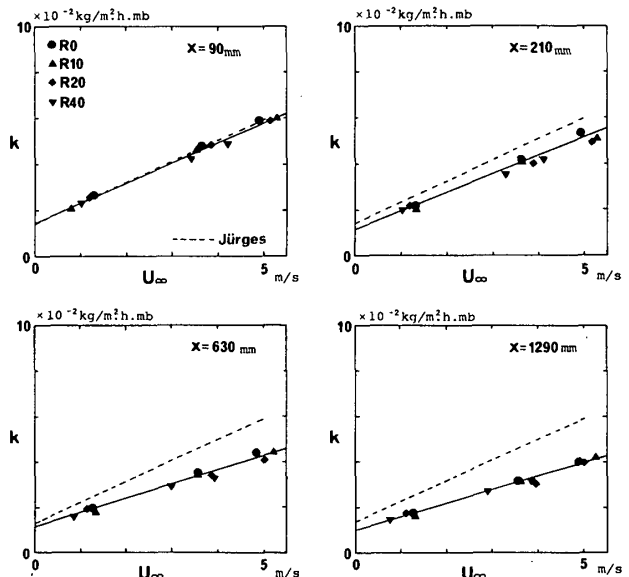


Fig. 8 Relations between mass transfer coefficient and mean wind velocity in free stream at various wet fetch.

$C_e \propto R_e^{-1/5}$ の関係を満たしていることから、いずれも乱流状態にあると判断できる。ただし $R_e < 10000$ ではその関係からややはずれてくる。(7)式から強制対流による拡散速度が自然対流によるそれと等しくなる風速を求めると $X=300$ mm において $U_\infty=0.5$ m/s となる。本報の実験条件 $U_\infty=1.2$ m/s では両者の比は約 2:1 となる。

(2) 上空風速との関係

k と上空風速の関係を水面先端からの距離別に示すと Fig. 8 のごとくなる。(7)式の関係からは $k \propto U_\infty^{5/4}$ が示されるが、ここでは既存の計算式との対比を考慮し k を U_∞ の 1 乗の式で示した。どの位置においても粗度の違いによる系統的な傾向は見られず、各々同一の回帰式で近似される。ただし、 X が大きくなる程その傾きは小さくなる。一般によく用いられてる Jürges 式をルイスの関係から換算した値 (図中に破線で示す) と比較すると $X=90$ mm では一致するが、それより風下側では 15~35% 小さくなっている。

(3) 表面近傍の風との関係

一例として $X=90$ mm における表面上 5 mm の平均風速と k の関係を Fig. 9 に示す。上空風速の場合とは異なり、粗度の違いによる差異が明確に現れ、粗度が大きい程等しい平均風速に対し k は大きくなっている。Fig. 10 は、同じ高さ 5 mm における乱れ $\sqrt{u_s^2}$ と k の関係を示したもので、粗度と無関係におおむね一致した傾向を示しており、 k は表面近傍の乱れとよく対応している。

Fig. 7~Fig. 10 の結果から次のようにいえる。すな

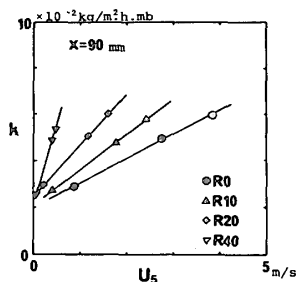


Fig. 9 Relation between mass transfer coefficient and mean wind velocity near the surface ($z=5$ mm).

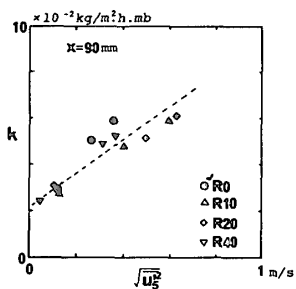


Fig. 10 Relation between mass transfer coefficient and R. M. S. of turbulent velocity near the surface ($z=5$ mm).

わち、粗度が大きくなる程表面近傍の平均風速は低下するが、そこでの乱れは逆に増大する。この両者の効果が互いにほぼバランスしており、結果として風速のプロファイルが変化しても拡散能力は上空風速でほぼ一義的に決定されることになる。

一般に k を一次式で表現する場合、風速や気層中の湿度をどの位置で測るかはあいまいにされている。以上の結果からいえば、位置を乱流境界層の外側とした場合には境界層内の状態にかかわらず平均風速で対応がつくのに対し、乱流境界層内の表面近傍とした場合には気流性状によって大きく左右され、 k は平均風速とは対応せずむしろ乱れとよく対応するようになる。

4. 建物模型周辺の蒸発量分布

前項の平坦面における蒸発量分布の結果を考慮し、模型実験においては変化の少ない $X \geq 600$ mm を測定域とした。さらに測定域における気流状態の差異を明確にするため、 $X < 600$ mm の水面上にも地面板と同様の粗度要素を配列した (Fig. 11)。水槽は $600 \leq X \leq 1800$ mm の範囲に幅 10 列、気流方向に 20 列の計 200 個を配列し、その両側には平坦面の場合と同様に幅 600 mm の水面を設けた (Fig. 12)。模型幅は風洞幅と一致させており、採水はやはり中心 2 列に限りまた風速・湿温度の測定もすべて中心線上で行うことにより、以下に述べる諸量の関係は 2 次元的取り扱いができるものとした^{註3)}。実験は R 20 を中心に R 0 と R 40 についても行い、粗度の違いによる差異を検討した。なお、R 40 については R 20 とおおむね同様の結果となったので本報においては省略する。

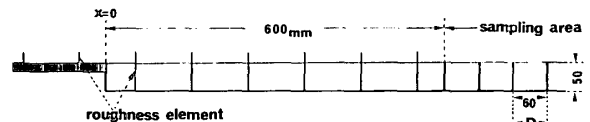


Fig. 11 Cross section of roughness elements in wet fetch.

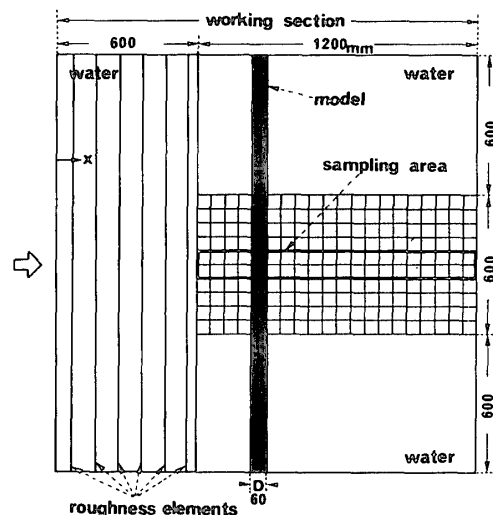


Fig. 12 Arrangement of vessels for measuring evaporation around model.

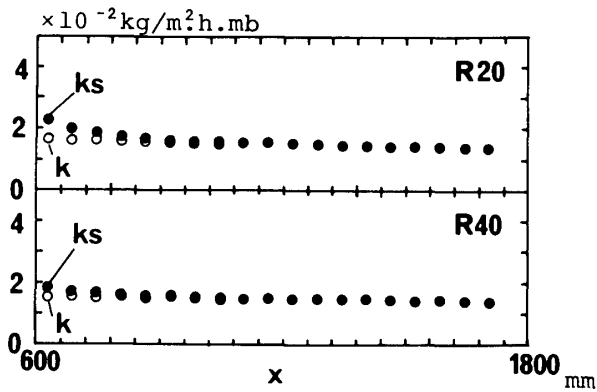


Fig. 13 Distribution of standard mass transfer coefficient (k_s) without model, comparing with (k) without roughness elements in wet fetch.

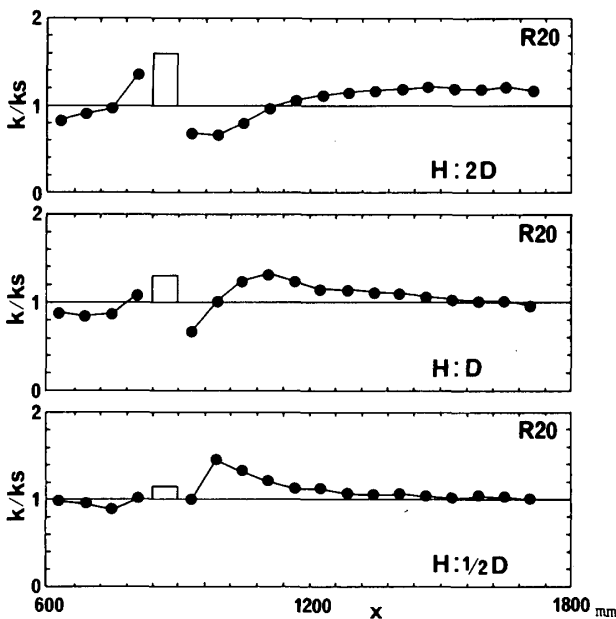


Fig. 14 Distribution of k/k_s for various model heights.

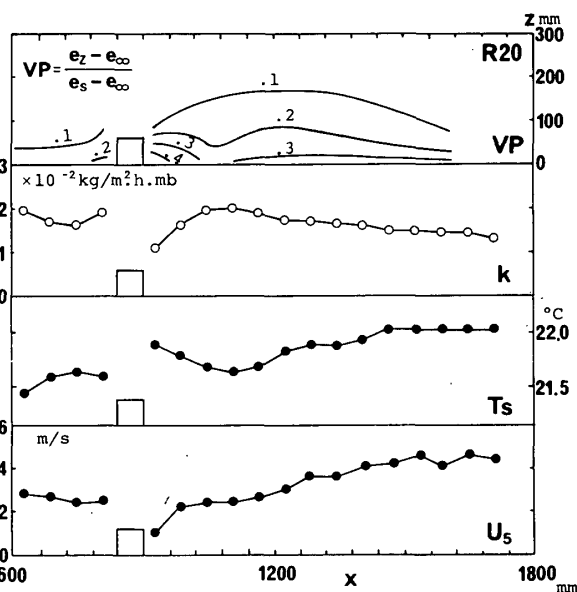


Fig. 15 Relation between distribution of (k) and VP isopleth, surface temperature (T_s) and mean wind velocity near the surface (U_s).

模型による影響を模型のない場合に対する変化比で表示するため、水面上に粗度要素を配した状態で、改めて模型なしでの分布を測定し物質移動係数の基準値 (k_s) とした。結果を Fig. 13 に示す。Fig. 6 に比べ水面上の粗度要素の影響で k がやや大きくなっている。

(1) 建物模型 1 列の場合

物質移動係数の変化比 (k/k_s) の結果を Fig. 14 に示す。

a) k の分布と周辺気流との関係

k/k_s の分布は一般に以下のようなパターンを示す。すなわち、模型の風上側では 1 より小さく、模型の直前で 1 より大きくなる。一方模型後方では模型直後で最小になった後増加してピークを示し、その後漸減して 1 に収束する。他の要素との関係を $H=D$ の場合を例に検討する (Fig. 15)。水面温度 (T_s) の分布は蒸発量と逆相関の関係にあり、蒸発のさかんな部分では多量の潜熱が奪われ温度が低下している。表面近傍 (高さ 5 mm) の平均風速 (U_s) はほぼ k と対応しているが、 $X \geq 1200$ mm では関係がくずれ、 U_s が増加傾向にあるにもかかわらず k は漸減する。湿度比 (VP) の等値線図によれば、 k/k_s のピーク付近では上空の乾燥空気が表面近くまで達している。Fig. 16 には模型後方の平均風速のプロファイルの変化を示した。これらの図から、 k/k_s のピークがいわゆる再付着域に対応することが明らかで、 k/k_s が小さい値を示す模型とピークの間は wake に対応す

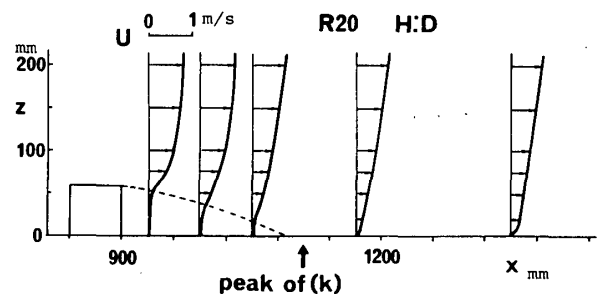


Fig. 16 Vertical profiles of mean wind velocity in the leeward of model (R 20, $H : D$).

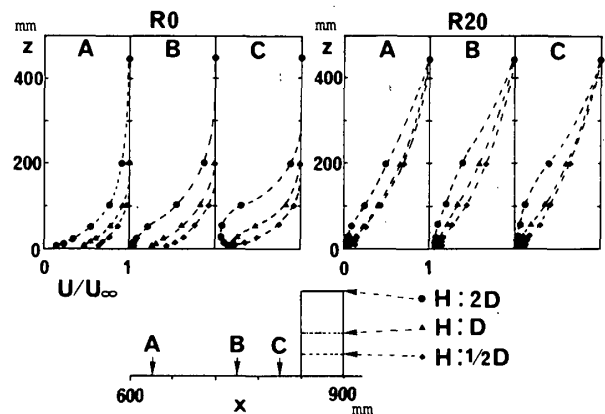


Fig. 17 Vertical profiles of mean wind velocity in the windward of model.

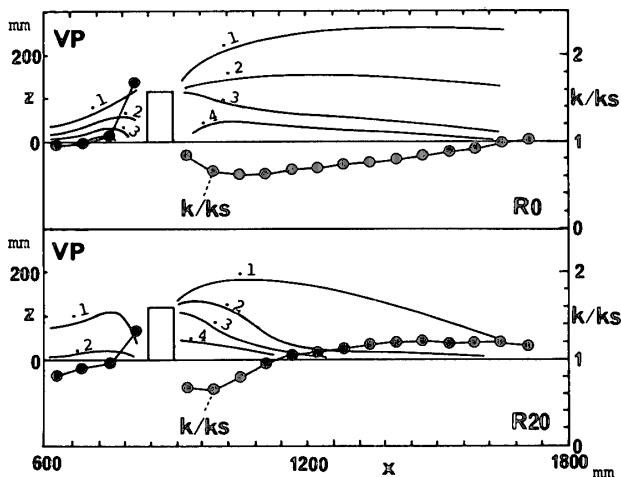


Fig. 18 Variation of k/k_s and VP isopleth due to the difference of roughness.

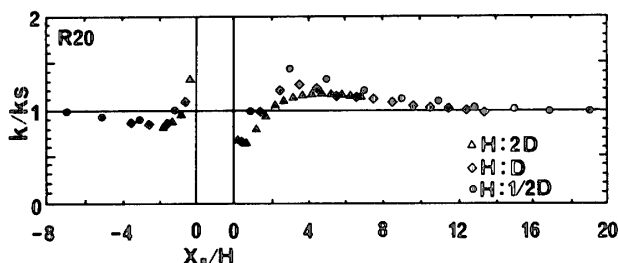


Fig. 19 Dependence of k/k_s on the model height.

る。また、 U_s が k と対応しなくなるのはいわゆる再発達域で、これはより滑らかな水面に対応した風速プロファイルが形成されるためである。一方模型前方に関しては Fig. 17 に平均風速のプロファイルを示した。模型直前では模型風上側壁面に沿う乾燥空気の吹き降ろしの影響で k/k_s が 1 より大きくなる。それより風上側では、吹き降ろしに起因する逆流の影響で表面付近の風速が低下し k/k_s が 1 より小さくなる。

b) 粗度と k/k_s との関係

R20 と R0 を比較すると (Fig. 18), 境界層が薄くなる程 k/k_s のピークは風下側へ移動する。このことは、境界層が薄い程 wake が広がるというこれまでの研究報告と一致する。湿度比 (VP) の等値線図からも R0 では wake が広がっている状況が明らかである。

c) 模型高さ と k/k_s との関係

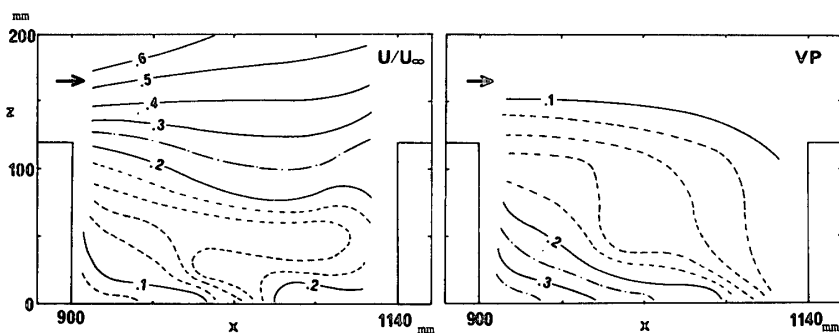


Fig. 21 Typical examples of U/U_∞ and VP isopleth between pair of models.

R20 について $H=1/2D, D, 2D$ の場合の k/k_s の変化を模型高さで基準化した距離に対してプロットした (Fig. 19)。ただし、気流方向の模型幅は一定であるため、模型形状に関する相似は成立していない。そのため模型後方のピーク位置は模型が高い程風下側にややずれる結果となっている。また、ピーク値の大きさについても模型高さにより差があり、境界層厚さと模型高さとの比も k/k_s に影響する。しかしながら、分布のパターンについてはおおむね一致している。

(2) 高さが等しい 2 列配列の場合

模型間隔 (L) が各々 $D, 2D, 4D$ の場合の結果を Fig. 20 に示す。

a) 模型前方: 1 列の場合とほぼ同様で、いずれの場合も吹き降ろしの影響がみられ、模型高さが高くなる程影響が顕著となる。

b) 模型間: 風下側ほど蒸発量が大きくなる傾向にあり、これは循環流の発達と対応する。一例として Fig. 21 に $H=2D, L=4D$ における模型間の風速および湿度比の分布を示す。Fig. 22 は、9 ケースすべてに

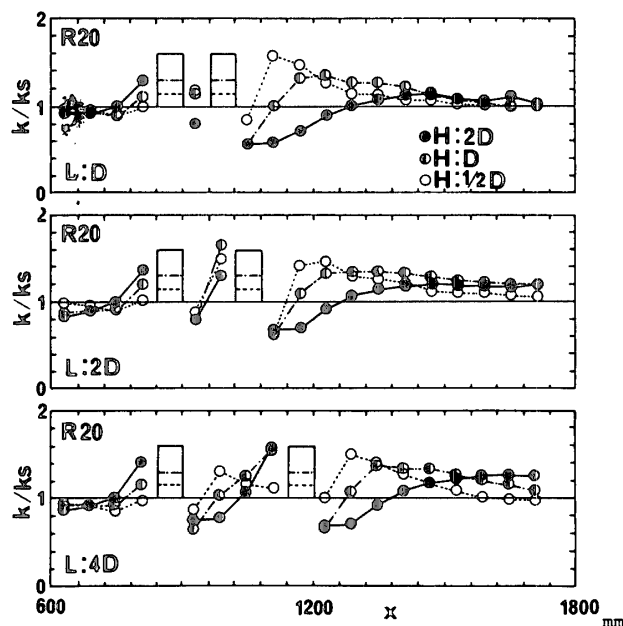


Fig. 20 Pair of models equal height—distributions of k/k_s at various model heights and intervals.

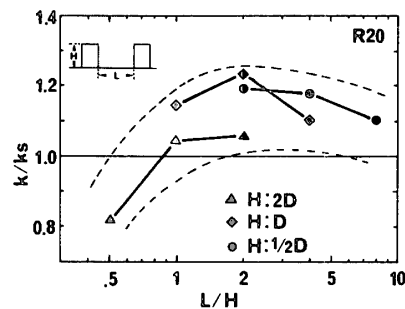


Fig. 22 Dependence of k/k_s between pair of models on L/H .

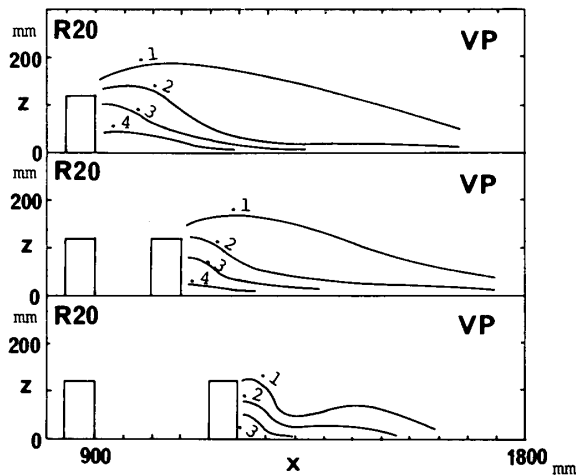


Fig. 23 Variation of VP isopleth in the leeward of model due to the model interval.

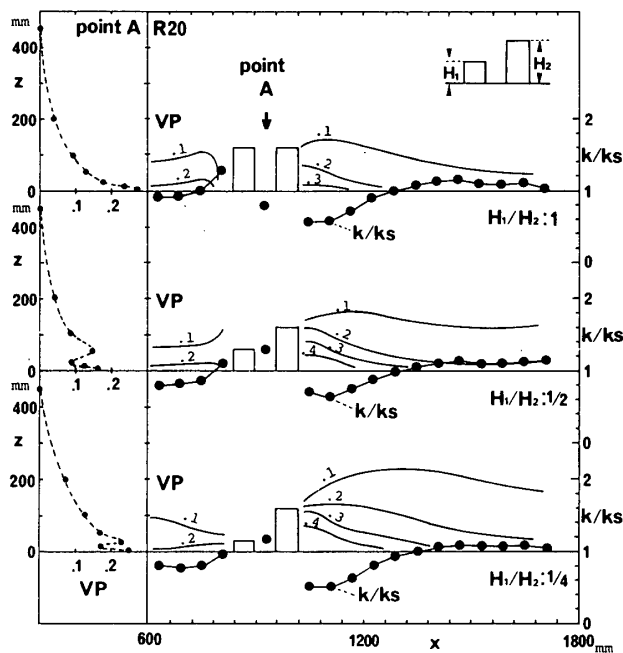


Fig. 24 Pair of models unequal heights—distributions of k/k_s and VP isopleth, and vertical profiles of VP between models at various height of upstream model.

ついて模型間の k/k_s (複数の場合にはその平均値) と L/H との関係を示したものである。 L/H が等しい場合でも k/k_s は模型高さにより異なっている。これは前述の模型形状が相似でないため流入空気量に差が生じることが一因と推測される。しかしながら、全体としては $L/H=2$ 付近にピークをもち、この条件で循環流がよく発達するものと考えられる。

c) 模型後方：1列の場合と類似するが、2列目後方の wake は模型間隔によって変化する。Fig. 23 は、 $H=2D$ の場合の模型後方の湿度比の等値線を比較したもので、1列→ $L=2D$ → $L=4D$ の順で wake が縮小している。

(3) 高さが異なる2列配列の場合

間隔 $L=D$, 2列目模型高さ (H_2)= $2D$ の条件で1列

目の模型高さ (H_1) を $2D$, D および $1/2D$ とした場合を比較した。Fig. 24 に k/k_s および湿度比 (VP) の等値線図を示す。模型間の k/k_s は $H_1/H_2=1/2$ の場合が最大となる。併示した模型間の湿度比プロファイルと比較すると $H_1/H_2=1/2$, $1/4$ では模型高さ以下でS字型を示し循環流の存在を示している。それに対し、 $H_1/H_2=1$ では表面まで VP は単調に増加しており循環流は生じていない。模型後方の wake は H_1 が低いほど拡大しており、 k/k_s の分布もそれと対応している。

5. 考察

ここでは以上の実験結果およびいくつかの追加実験の結果をふまえ、市街地の蒸発量に関する2, 3の問題について考察する。

(1) 蒸発面のスケールの効果

前項までの結果は、すべてある広がりをもった蒸発面に対して考察してきた。しかしながら蒸発量は Fig. 6 の結果からもわかるように、蒸発面のスケールによっても影響をうける。Fig. 25 は Fig. 6 の結果をもとに蒸発面の面積比 (R_x) と、そこからの蒸発量比 (全域を蒸発面とした場合の蒸発量にたいする比： R_E) との関係を示したもので、同じく R_E/R_x と R_x との関係を併示した。例えば R_0 では、面積比が10%の場合、 R_E/R_x はおよそ1.5となり、10%の面積から15%相当の蒸発がおこることを示している。 R_{20} の場合にはいくぶん小さく、スケール効果は粗度が小さいほど大きくなる^(註4)。

建物周辺についても同様の考察を行うため、これまでの広域水面における実験に対し以下のような比較実験を行った。すなわち、周囲をすべて乾燥面(アクリル板)とし、測定しようとする位置のみを水面(60 mm×60

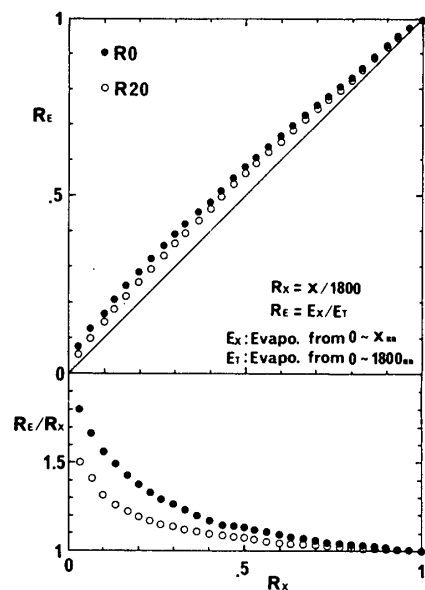


Fig. 25 Scale effect of evaporation for flat plane—relations between the ratio of evaporative area (R_x) and the ratio of evaporation from that area (R_E), and (R_E/R_x).

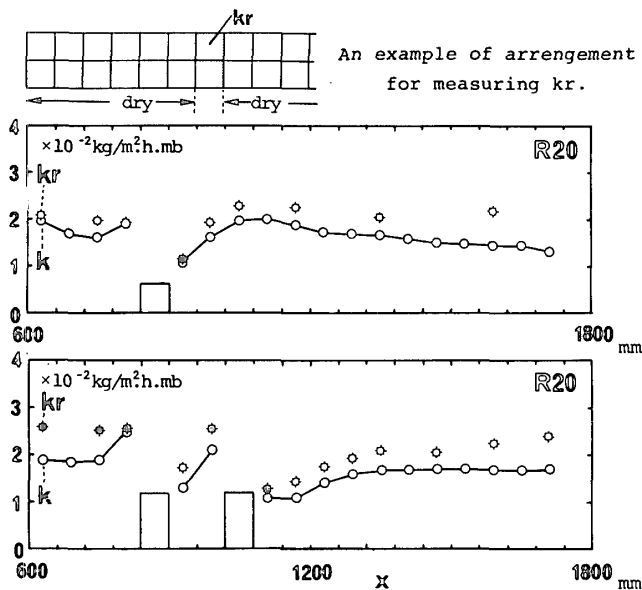


Fig. 26 Scale effect of evaporation around model—comparisons between (k) and (k_r) which is the mass transfer coefficient measured on the condition of dry surface except for the measuring vessel.

mm) とし、水面の位置を順に移動することにより建物周辺の物質移動係数の分布 (k_r) を測定した。模型配置・アプローチフローその他は同じ条件である。結果の一部を Fig. 26 に示す。特徴的な点は、模型前方で分布が均一になりほぼ模型直前の吹き降ろし域と等しくなること。模型後方については、wake 内では広域水面の結果とあまり変化はなく模型から遠ざかるほど両者の差異は大きくなることである。wake については、境界層が厚くはなるものの風速そのものが弱いことから大きな差異が生じないものと推測される。両者の差異は水平方向の移流効果を表すと考えられ、基本的には水平方向の流れが卓越する領域で風速が大きいほど差が増大する。蒸発面のスケールによる平均的な物質移動係数の変化率は 1.2~1.4 程度といえるが、特に建物近傍については平坦面の場合に比べ変化は大きくない。

(2) 建物による粗度の効果

4. では、建物周辺の物質移動係数の分布を建物周辺の気流の動きと対比させて考察した。ここでは、よりマクロ的に建物の影響を検討することを試みる。

物質移動係数に及ぼす建物の影響としては、地表面近傍の平均風速を低下させ物質移動係数を小さくする効果と、逆に気流の乱れを増大させ物質移動係数を大きくする効果とが考えられる。

そこでまず、地表面近傍 (高さ 5 mm) における平均風速の低下について検討した (Fig. 27)。模型設置による風速の変化は模型前方で 0.6~0.8 (ただし模型直前では 0.8~0.9)、模型後方では 0.3~0.5 (ただし模型直後では 0.1~0.3) で 5H 以上風下側の再発達域では急増し 1 に近づく。模型間は間隔により異なるが 0.3~

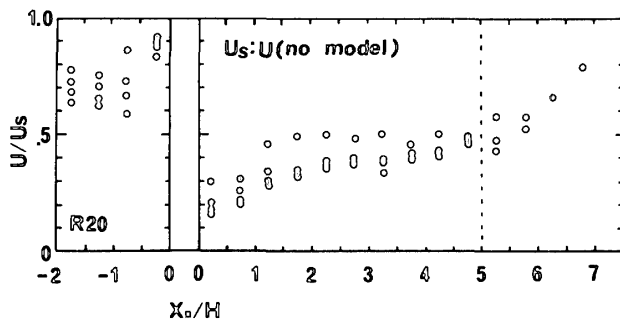


Fig. 27 Variation of mean wind velocity near the surface ($z=5$ mm) due to the setting of model.

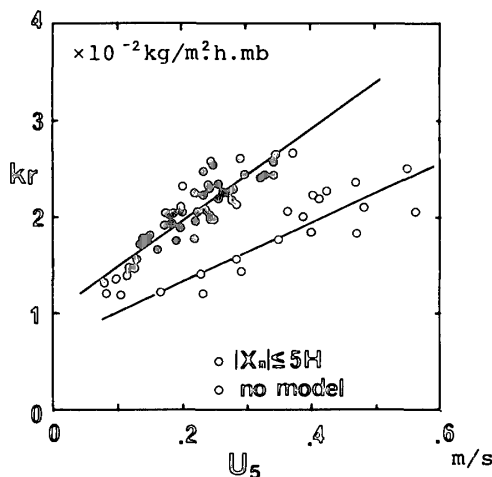


Fig. 28 Relation between mass transfer coefficient and mean wind velocity near the surface ($z=5$ mm).

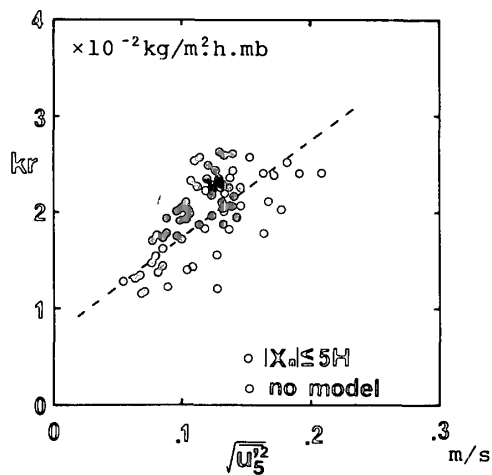


Fig. 29 Relation between mass transfer coefficient and R.M.S. of turbulent velocity near the surface ($z=5$ mm).

0.6 程度である。平均すると、建物周辺に関してはおおむね 0.3~0.6 程度に平均風速は低下する。

次に乱れの増加による物質移動係数の増加を検討する。ここではより純粋に気流性状と対応すると考えられる k_r を用いる。Fig. 28 は Fig. 27 の結果を考慮し、便宜的に模型から 5H までを建物周辺域とし、その領域での表面近傍平均風速 (U_s) と k_r との関係を示したもので、比較のため模型を置かない場合 (模型より 5H

以上離れた領域の値も含む)における関係を併示した。これによれば建物周辺における乱れの増加は、等しい平均風速に対し k_r を50%程度増大させている。Fig. 29には同じく表面近傍の乱れとの関係を比較した。ここでは、風向の変化を考慮して無指向性サーミスタ風速計を用いており、測器の応答性がばらつきの一因と思われるが、Fig. 28とは異なり模型設置による明確な差異は見られない。このことは、乱れの増加が物質移動係数を増大させていることを裏づけている。

6. 結 語

本報は、市街地における蒸発量と建物周辺気流との関係について解明するため、乱流境界層を発達させた風洞を用い模型実験を行った結果である。主な結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 平坦面からの蒸発量

a) 平坦面における蒸発量は水面先端からの距離を代表長さ、上空風速を代表速度とするレイノルズ数の $1/5$ 乗に比例する。

b) 物質移動係数は表面近傍の気流の乱れと対応する。故に、境界層内の平均風速と物質移動係数との関係は気流の乱れにより変化する。

c) 粗度の増加による表面近傍の風速低下の影響は、そこでの乱れの増大による影響とほぼバランスしており、結果として物質移動係数は上空風速により一義的に決り風速の鉛直プロファイルの形には大きく影響されない。

d) a) の関係から蒸発量は蒸発面の大きさにも左右される。例えば、面積比が10%の場合、そこからは1.5倍の15%相当の蒸発がおこる。ただし、気流の乱れが大きくなるとこのような効果は小さくなる傾向にある。

(2) 建物周辺の蒸発量

a) 建物周辺の物質移動係数は、気流の動きと対応して次のような変化パターンを示す。すなわち、建物が無い場合との比で表現すると

建物風上側：0.85~0.95で風上側に向かって1に近づく。ただし建物直前($1/2 H \leq X < 0$)では1.3~1.5となる。

建物風下側：建物直後の最小値は0.5~0.7で風下側に向かって増加し、再付着域でピーク値1.5~1.7となる。以後漸減して1に収束する。

建物間：建物間縦横比(L/H)により変化し、 L/H が2付近で最大となる。分布は循環流の影響で風下側で大きくなる。

b) 建物周辺における気流の乱れの増大による物質移動係数の増加は、建物が無い場合に比べ約1.5倍となる。

c) 建物周辺では鉛直方向の気流が増大し、しかも平

均風速が低下するため水平方向の移流の効果は平坦面に比べ小さく、したがって蒸発面のスケールによる物質移動係数の変化はあまり大きくない。

本報においては2次元的な取り扱いに限って考察したが、引き続き3次元的な建物模型およびその複数配列についても検討中である。また本研究の成果はあくまでも水面を蒸発面とした結果であり、実際の市街地への適用には表面の水分条件の変化等多くの問題が残されていることは言うまでもない。今後、野外実測等も含めさらに検討をすすめたい。

謝 辞

本実験に際し、広島大学総合科学部自然環境・坪田博行教授、福岡義隆助教授より測器の一部を借用した。また故三寺光雄先生からは生前数多くの有益な御助言をいただいた。ここに記して心から感謝の意を表します。

註

- 1) 一例として大場・小林(文献21)は6900~14000を提示している。風速を大きくし、レイノルズ数をより大きくした場合の影響については、実験方法の改良と合わせ今後の課題としたい。
- 2) R40については境界層厚が吹出口中央高さをやや越えるが、ここではそこでの値を上空風速として取り扱った。
- 3) 蒸発量および諸要素に関する現象の2次元性についてはworking section 全域で中心の両側土300mmについて実測を行い確認している。
- 4) 実際に周囲が乾燥面となっている都市域では日射により乾燥面が高温化し、それによる気温の上昇がさらに蒸発量の増加を招く。このような熱的な混在効果は、スケール効果と同じかそれ以上に大きい(文献22)。

文 献

- 1) L. O. Myrup: A numerical model of the urban heat island, J. Appl. Meteor., 8, 1969.
- 2) L. O. Myrup: Corrigendum to Myrup L. O., J. Appl. Meteor., 9, 1970.
- 3) M. A. Atwater: Thermal effects of urbanization and industrialization in the boundary layer, Boundary-Layer Meteor., 3, 1972.
- 4) 木村建一, 宇田川光弘, 久保俊介: 都市化とヒートアイランド現象。気象研究ノート, 119, 1974.
- 5) D. Morgan, L. Myrup, D. Rogers and R. Baskett, : Microclimates within an urban area, Ann. Assoc. Amer. Geogr., 67, 1977.
- 6) 尾島俊雄, 森山正和: 地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究(第2報)―地表面熱収支の計算法と実測。日本建築学会論文報告集, 265, 1978.
- 7) T. Fujita, N. Honda: Measurement of Evaporation from Salt Water Pan, Pap. Met. Geophys., 31, 1980.
- 8) 例えば, 関根 毅, 海野健一: 市街地における周辺気流の立体構造に関する研究。日本建築学会論文報告集, 245, 246, 247, 1976.
- 9) 小林定教, 宮野秋彦: 熱伝達率の研究―突起物を有する外壁面の熱伝達特性に関する研究。日本建築学会論文報告集, 258, 1977.

- 10) 例えば, 鎌田元康: 建物近傍における汚染物拡散に関する実験的研究。日本建築学会論文報告集, 279, 281, 1979.
- 11) 岩佐義輝, 又木義浩, 深尾康三, 宮木紀子: 風洞実験における風速変動量の測定に関する研究。日本建築学会論文報告集, 280, 1979.
- 12) 山本義一: 有限容器からの蒸発の実験。気象集誌, 第27巻, 第10号, 1949.
- 13) 山本義一, 三浦 晃: 自然対流による蒸発。気象集誌, 第27巻, 第11号, 1949.
- 14) 上田政文: 強制対流による水の蒸発。応用物理, 第29巻, 第7号, 1960.
- 15) T. Haseba: Mass Transfer across the Boundary Layer on Plant Leaves, J. Agr. Meteor. 30 (2), 1974.
- 16) 諸橋清一: フェンス後方のはくり域における蒸発を伴う熱伝達。北海道教育大学紀要(2A)第28巻, 第2号, 1978.
- 17) 稲葉一八, 大沢徹夫, 宮野秋彦: 材料表面の湿度境界層に関する実験的研究。日本建築学会論文報告集, 336, 1984.
- 18) 近藤純正: 蒸発についての問題点。海と空, 第45巻, 第2号, 1969.
- 19) 佐橋 謙, 土屋 巖: 蒸発しつつある水面近傍の温度分布, 日本気象学会春季大会予稿集, p.191, 1981.
- 20) 宮野秋彦, 小林定教: 熱電対による表面温度測定について, 日本建築学会論文報告集, 253, 1977.
- 21) 大場正昭, 小林信行: 建物周辺気流に対するレイノルズ数の影響に関する実験的研究—流れパターンが相似となるための最小レイノルズ数について。日本建築学会学術講演梗概集, 277, 1981.
- 22) 近藤純正: 複雑多様な地表面の熱収支—研究方針一。天気, 第31巻, 第9号, 1984.

SYNOPSIS

UDC : 551.5 : 697.11

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTS OF AIR FLOW AROUND BUILDINGS ON EVAPORATION IN URBAN AREA

by KEN-ICHI NARITA, Dr. TAKESHI SEKINE and
TOSHIKAZU TOKUOKA, Members of A. I. J

In order to assess the role of latent heat flux in urban climates, it is necessary to understand the evaporation rate in complex air flow around buildings. For this purpose, we made wind tunnel experiments in turbulent flow with the use of evaporation measurement by salinity change in the salt water vessels. In this paper, we report the distribution of mass transfer coefficient (k) on flat plane and around two dimensional models.

As for flat plane, evaporation rate by forced convection is in proportion to $-1/5$ power of Reynolds number. In spite of the difference of vertical profiles in boundary layer, k is determined by mean wind velocity at the top of boundary layer. On the contrary, k is proportional to R. M. S. of turbulent velocity near the surface and the relations to mean wind velocity vary with roughness condition.

Regarding the surroundings of buildings, k is in accord with air flow around it. Namely, downdraft along windward wall increases k in front of building (1.3~1.5), and about leeward k is small in wake (0.5~0.7) and has a peak in reattachment area (1.5~1.7). Between buildings, k is tend to be large in downstream because of circular flow, and average value of k is maximum on the condition of $L/H \cong 2$.

As a whole, the deterioration of mean wind velocity around buildings reduces k by a factor of 0.3~0.6, while for same mean wind velocity k is one and half times as large as that of flat plane owing to the increment of turbulence.