

海岸空間アメニティ構成要素としての 微気象および温熱環境の解析

灘岡和夫¹・内山雄介²・山下哲弘³

¹正会員 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
(〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²学生会員 修(工) 東京工業大学 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 博士後期課程
・日本学術振興会特別研究員

³学生会員 東京工業大学 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 修士課程

海岸空間では、防災面上の基本的要請に加えて、高度なアメニティ性が求められている。本研究では、特に夏季砂浜海岸空間のアメニティ環境を特徴づけている重要な要素の一つである、微気象および温熱環境に着目し、これらを現地観測および数値モデルによって解析・評価した。その結果、汀線から発達する内部境界層内における海風に対する砂面の加熱・乾燥効果、海浜上での熱収支構造、人体の温熱環境などを明らかにするとともに、これらを数値計算で良好に再現した。また、海浜形態の改変に伴う温熱環境変化のシミュレーションを行い、海浜上の芝生や、椰子系の植生によって構成された海岸林が背後地を含む海岸空間の温熱環境に及ぼす影響を予測した。

Key Words : *sandy beach, microclimate, thermal environment, numerical computation*

1. 序論

近年、海岸空間では、従来の防災・国土保全といった基本的な要請に加え、景観・環境保全を中心に高度なアメニティ性が求められている。海岸のアメニティを考えると、われわれは単なる「水辺」とは異なる「海岸」固有の要素——白い砂浜、松林、打ち寄せる波の音¹⁾、潮風、海岸生態系、夏の日差しなど——に魅力を感じているのであって、これらの五感的要素や、それに関わる環境・空間の諸特性を統合して議論することが重要となってくる^{2)~4)}。

本研究では、これらの諸要素のうち、夏季の砂浜海岸空間を特徴づける重要な要素であるにもかかわらず、これまで議論されることのなかった「微気象(大気環境および日射環境)」に着目した。ここではまず、海浜および周辺地における気象および熱収支観測を実施することにより、砂浜海岸空間の気象学的な諸特性を定量的にかつ詳細に捉えた結果について述べる。ついで、これらを人間の「体感」に結び付けるべく、物理的な人体温熱環境指標を用いて、夏季の砂浜海岸の温熱環境の特徴を明らかにした内容について述べる。さらに、これらの知見を空間デザインに具体的に反映させるための支援ツールとして、大気の運動を計算する微気象数値モデルをベースに、人体の温熱環境指標を最終的に出力する「温熱環境シミュレータ」を構築し、海浜上での計算結

果を現地観測データと比較することにより、その妥当性を検証した結果を示す。

近年、海岸空間デザインにおいても様々な植生の配置が重要視されつつあるが、これまで植生に関しては、飛砂・飛塩対策といった防災的な観点からの検討例^{5),6)}は報告されているものの、ローカルな微気象や温熱環境面からの検討はなされていない。そこで本論文では、ここで構築した温熱環境シミュレータの応用例として、植生配置に関連する海浜性状の改変に伴う温熱環境変化を定量的に予測した結果について述べる。

2. 幕張人工ビーチにおける微気象観測

(1) 観測の概要

まず、東京湾奥に位置する千葉市美浜区の幕張海浜公園人工ビーチ、「幕張の浜」において、1994年8月15日の午前6時から午後7時までの連続13時間行った微気象観測結果について報告する。

砂浜上の岸沖方向に設けた4定点(a1~a4)において風速・気温・水蒸気量の鉛直分布、砂浜上汀線近傍のb地点および砂浜中央のc地点で放射フラックスを測定した(図-1)。一般に、夏季の砂浜海岸では、日中、沖→岸方向に海風が吹くことが多いが、当日も観測期間を通じて安定した風向(ほぼ南西で汀線に概ね直角方向)の海風が吹き続いており、天候は晴れ、雲量はきわめて

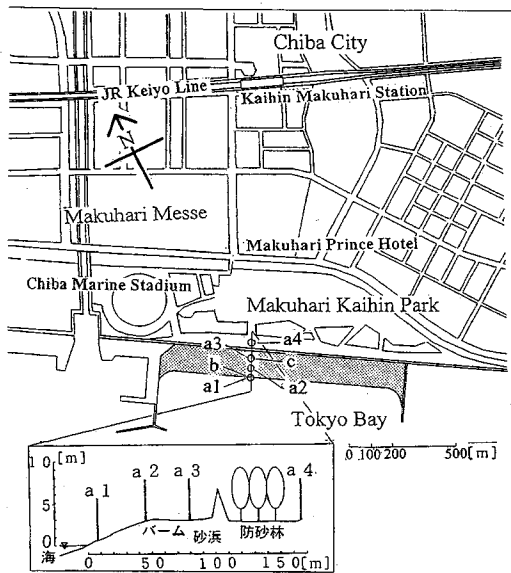


図-1 微気象観測実施地点(千葉県美浜区幕張海滨公園内人工ビーチ「幕張の浜」, 観測日:1994年8月15日, a1~a4:風速・気温・水蒸気量の鉛直分布観測地点, b, c:熱収支観測地点)

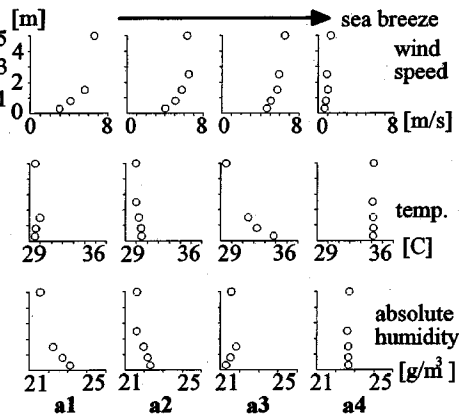


図-2 気象観測によって得られた午後12時台1時間平均の砂浜海岸における風速・気温・絶対湿度の鉛直分布構造(a1~a4は図-1で示された観測ポイントに対応している)

少なかった。なお、観測の詳細については既に発表済み(文献4)参照)であるので、以下ではその概要を述べるに留める。

(2) 砂浜表面付近の大気環境特性

図-2は、午後12時での各地点における風速・気温・水蒸気量の鉛直分布を示したものである。風速分布を見ると、上層風速は約6.5m/sでほぼ一定であるのに対して、地表面付近の下層では、汀線から内部境界層が発達しているのが分かる。気温・絶対湿度を見ると、海風は海

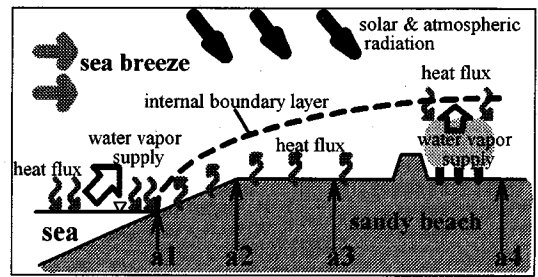


図-3 気象観測結果に基づいて作成した夏季砂浜海岸の大気環境特性の概念図(a1~a4は図-1および図-2で示されている観測ポイントに対応している)

上では冷却・湿潤化されているものの、この内部境界層の発達に連動する形で、汀線から流下するにつれて次第に加熱・乾燥化されていることが分かる。このような傾向は他の時間帯でも同様であった。なお、防風林直背後のa4地点が植生密度の高かった防風林の剥離領域に含まれていたことから、今回は植生による気候緩和効果をとらえることはできなかった。

以上の結果から海岸の大気環境の基本的な特性を概念図で示すと、図-3のようになる。海風は、海上での熱損失と水蒸気補給により、陸域内の風と比べて湿潤で冷涼な風として海岸に吹き込む。しかし、砂面が獲得する受熱放射フラックスの影響によって、海風は砂浜上での内部境界層の発達に連動する形で急激に加熱・乾燥化されて、その後、(通常は)海岸背後の防風・防砂林等の植生帯での蒸発散作用により、逆に熱的に緩和される。すなわち、砂浜海岸をとりまく微気象システムは、「冷源としての海域→熱源としての砂浜→冷源としての植生帯」というきわめて特徴的で複雑な場をコンパクトな空間スケールで構成している。特に、砂面上では運動量・温度・水蒸気それぞれに関する内部境界層が汀線から明瞭に発達し、しかも、その鉛直スケールは人間の身長オーダーとあまり差がない。したがって、砂浜上あるいはその周辺にいる人間は、急激な温湿度等の変化を経験することになる。

(3) 砂浜表面の熱収支構造

次に、砂浜上の大気に対する上記の加熱・乾燥効果を支配している地表面での熱収支構造を調べた。熱収支解析は、汀線ごく近傍の湿潤砂面上に位置するb地点(図-4上, a1地点とほぼ同一地点)と、汀線から離れた乾燥砂面上に位置するc地点(図-4下, a3地点とほぼ同一地点)について行った。顕熱・潜熱フラックスは、傾度法⁷⁾により算出し、また、放射フラックスは直接測定した値を用いているが、b地点での純放射量 R_{net} は湿潤砂面のalbedoを仮定して($=0.05$)算出した。一方、b地点で

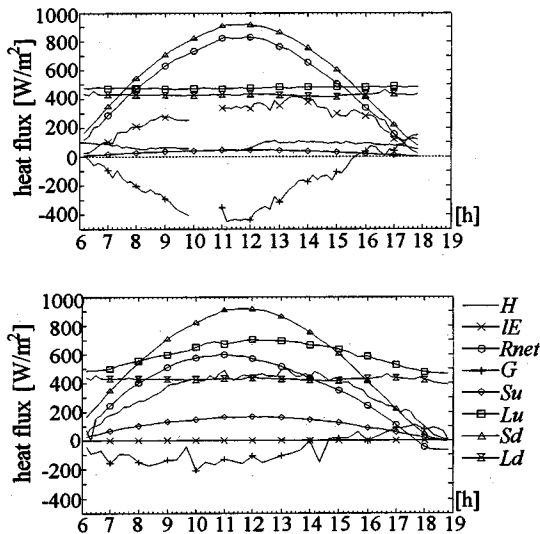


図-4 b地点(湿潤砂面:上図)およびc地点(乾燥砂面:下図)での熱収支の日内変化。ただし、Gは地中に伝導する方向を負に取っている。図中の記号は表-1と同様である。

の地中伝導熱量Gは熱収支の残差として推定しており、c地点でのGは地中温度の測定値から算出している。

図-4を見ると、c地点では砂面が極端に乾燥しているため、潜熱フラックスIE(ほぼゼロ)とGがかなり小さくなっており、Rnetの大半が顕熱フラックスHに変換される形になっている。特に、大気下層の気温を主に支配しているHは、最大で約450 W/m²に達している。これと比べてb地点ではHが相対的に小さく抑えられており、逆に、熱伝導量Gおよび潜熱フラックスIEが大きく、日最大で各々約450、400 W/m²にまで達している。つまり、c地点では砂面が乾燥しているため、水蒸気供給量が著しく低下して潜熱フラックスIEが小さくなり、同時に砂中の熱伝達率が低く抑えられることにより熱伝導量Gが小さくなる。一方、albedoは乾燥砂面では相対的に高くなり(今回の場合、日中を通じて約0.2)、その結果として反射短波放射量が大きくなるが、熱収支全体での寄与は非常に小さい。けっきょく、ごく表層の砂が加熱されることによって地表面温度が著しく上昇し、その結果、砂面からの射出長波放射量および顕熱フラックスHが増大することによって、乾燥砂面でのフラックスの収支バランスが成立することになる。

以上の結果から、乾燥砂面は、この大きな顕熱フラックスHによって地表面付近の大気を加熱しており、同時に、大気への水蒸気フラックスに関連する潜熱フラックスIEがほぼゼロとなることによって、大気の乾燥化にも大きく寄与していることを定量的に明らかにすることができた。

(4) 微気象観測データに基づく温熱環境解析

アメニティ環境としての海岸空間を、微気象および温熱環境面から評価することを試みる。本研究では、建築・生気象分野において活発な議論がなされている「温熱環境指標」を空間評価尺度として用いる。これを用いることの最大の理由は、物理的な外的因子である種々の微気象特性を、人体表面での熱フラックスの収支を考えることにより、統合された一本のパラメータとして空間評価が行える点にある(詳細については前掲の文献4)のほか、8)、9)などを参照)。この温熱環境指標は本来、屋内空間を主たる評価対象としており、環境変動の大きい屋外空間での検討例は少ない¹⁰⁾⁻¹³⁾。

屋外空間、特に夏季海浜では、風速・放射・発汗などの人体の生理的な応答などの因子を総合的に考慮して評価するべきであると考えられる。そこでここでは、Fanger¹⁴⁾によって示された、人体熱収支の立場より温熱環境を評価する基本的な枠組みから、人体の熱平衡状態の前提を外し¹¹⁾、平衡状態からの残差を表わす熱フラックスを屋外の温熱環境指標として採用した。この残差フラックスは、一般に「熱負荷」と呼ばれている^{11)、13)}が、本来、人体の熱的応答も含んで決まるフラックスを「熱負荷」と呼ぶことには若干問題があるので、ここでは人体余剰熱フラックス(EHF:excess heat flux)と呼ぶ。EHFは気温・湿度・風速・放射・着衣量・代謝量を統合して屋外温熱環境を評価する指標の一つであり、以下のように算出される。

$$EHF = R_{t,man} + M - H_{man} - I_{Eman}$$

ここに、 $R_{t,man}$: 人体に入射する正味放射量、 M : 代謝量、 H_{man} 、 I_{Eman} : 人体からの顕熱損失量および潜熱損失量である。

EHF値では、気温・湿度・風速の影響は主に顕熱・潜熱項に、放射の影響は主に人体表面での放射収支項に各々反映されることになる。EHF>0のときは、ある上限値を越えると、人体は生理機能による体温調節ができずに、熱的なストレスを感じている状態を表す。逆にEHF<0のときは、ある下限値までは熱的なストレスはゼロであり、熱的に中立な状態を表す。

この中立状態の上下限値は官能試験などと対応づけで決定していく必要があるが、ここでは便宜的に、EHF=0を中立状態の上限値としている。

ここでは、人体条件として、簡素な夏服着衣(0.3clo)、安静座位(1.0met=58.2W/m²)の条件を与えて、EHF値を算出した結果について考察する。図-5は、砂浜上各地点でのEHF値の日内変化を示している。EHF値が最も高いのは、砂浜中央a3地点の高さ0.3m(座位に相当)での値であり、同地点高さ1.5m(立位に相当)での値よりも最大で70~80[W/m²]も大きくなっている。一方、汀線

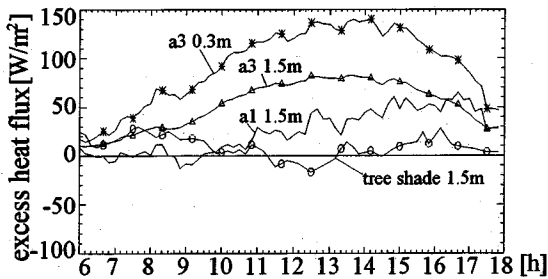


図-5 砂浜上各地点でのEHF値の日内変化(ただし、a1,a3は図-1,2で示された観測ポイントに対応している。tree shadeは砂浜背後の海岸林内部での値を表す。)

近傍のa1地点では、ほとんどの時間帯でa3での値よりも小さく、特に午前10時以前は木陰よりも熱的な中立状態に近いことを示している。すなわち、冷涼な海風に対する砂面の加熱・乾燥効果は内部境界層の発達形で現れるが、そのことは人間の暑熱感に関連するEHF値の空間分布特性にも密接に関与し、汀線近傍で比較の冷涼な海風は、砂面上を吹送するにつれて、また地表面に近いほどEHF値を増大させる。つまり、人間の暑熱感が急激に変化するスケールは内部境界層厚と同程度であることが推察される。

ここでは、夏季海岸空間評価の一手法として、温熱環境指標EHFによる解析を行った。その結果、夏季の海岸空間、特に砂浜上の内部境界層内の空間は、温熱環境の面から見るとむしろ暑熱感の著しい空間であり、そこでは人間は環境から大きなストレスを受けることになるものの、海からの冷涼な風を直接感じることのできる汀線近傍や砂浜背後地の木陰などは比較の暑熱感が緩和されていることが明らかとなった。このように、海岸空間は砂浜を中心とした比較の狭いスケールの範囲で温熱環境上、EHF値の大きなコントラストを持つところに特徴がある。

海岸空間の温熱環境に関して得られた以上のような知見は、天蓋・木陰といった日射光の遮蔽要素の適切な配置、さらには通風に関わる植生配置、芝生等による地表面条件の制御などの、具体的な植栽計画などを通じて、海岸空間デザインに直接反映させることができるものと考えられる。

3. 海岸微気象および温熱環境に関する数値モデル——温熱環境シミュレータ——の構築

(1) 結論

微気象観測および温熱環境解析から得られた以上の知見、つまり砂浜直上の空間が温熱環境からみてEHF値が著しく大きいことは、海岸空間全体のアメニティ環

境形成において、必ずしも負の要素となることを意味するわけではない。むしろ、砂浜空間を取り囲む水域や植生帯などの存在により、温熱環境的にコントラストの明瞭な空間構造が形成されているところに、海岸空間の持つ面白さや魅力がある、と考えられる。とすれば、そのコントラストの程度、空間分布構造をどのように演出し、デザインしていくか、ということが空間デザインの重要な課題として浮かび上がってくる。

この課題に具体的に取り組んでいくには、デザイン支援ツールとして、このような水域・砂面・植生帯等が存在する空間での微気象、温熱環境を定量的に表現することのできる「温熱環境シミュレータ」を構築することが不可欠となる。

そこで本章では、海風の運動や内部境界層の発達、砂面による海風の加熱・乾燥のプロセスを数値モデルにより再現し、さらに、最終outputとして人体余剰熱フラックスEHFを算出し、夏季海浜の温熱環境を空間的に捉えることを可能にする、「温熱環境シミュレータ」を構築することを試みる。

(2) 海岸微気象数値モデルに関する既往の研究

海岸の大気環境についての研究は、例えば、吉門¹⁵⁾、Kimura and Takahashi¹⁶⁾などの多くの研究者によって、数値計算を主体に行われている。しかし、それらはいずれも、いわゆる海陸風スケール(水平スケールで10~100km)の局地循環風を主な対象にしており、本研究で対象とするような、人間スケール(1.0~数100m)の微気象に関する計算例はほとんどない。海岸工学の分野でも、仲座ら⁵⁾が海風による飛沫海塩粒子の拡散特性を検討しているが、微気象という観点からの検討がなされた例はない。

一方、ヒートアイランド問題を対象とした、都市気象に関する研究では、ここで対象とするスケールと同程度での計算が行われている。例えば、中村・平岡¹⁷⁾はストリートキャニオンの蓄熱効果に着目し、 $k-\epsilon$ 2方程式モデルによる数値実験を行ない、構造物の壁面温度などを定量的に評価している。中村・平岡¹¹⁾はさらにキャニオン内に円筒で近似した人間がたたずむ場合の人体の熱負荷についての検討も行っている。また、武若らは、都市内に存在する水面(河川)の大気冷却効果に着目した実測¹⁸⁾を行い、静力学平衡を仮定した境界層方程式を用いた数値シミュレーション¹⁹⁾による再現計算を行っている。植生帯を有する場の微気象は、神田・日野²⁰⁾などによって数値計算がなされている。

(3) 海岸微気象を記述する数値モデルの概要

a) 基礎方程式系

本数値モデルの基礎方程式などを表-1に示す。

表-1 基礎方程式系

・運動量保存式

$$\frac{D u_i}{D t} = -\theta_0 \frac{\partial \pi}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_m \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - C_m S U^2 \frac{u_i}{|U|} \quad (1)$$

・質量保存式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

・熱の輸送方程式

$$\frac{D \theta}{D t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) + \kappa_\theta |U| S (\theta_{leaf} - \theta) \quad (3)$$

・水蒸気輸送方程式

$$\frac{D q_v}{D t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_q \frac{\partial q_v}{\partial x_i} \right) + \kappa_q |U| S (q_s - q_v) \quad (4)$$

・温位と気温の関係式

$$\theta = C_p T / \pi \quad (5)$$

・エクスター関数と圧力の関係式

$$\pi = C_p (p/p_0)^{R_d/C_p} \quad (6)$$

・湿潤大気の状態方程式

$$p = \rho R_d T (1 + 0.61 q_v) \quad (7)$$

・乱流モデル

$$K_m = \lambda^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| S_m (R_f) \quad (8)$$

$$K_\theta = K_q = \lambda^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| S_h (R_f) \quad (9)$$

・混合距離

$$\lambda = \kappa z \quad (10), \quad \lambda = \frac{2\kappa^3}{C_m S} \quad (\lambda < \kappa z) \quad (11)$$

・葉面熱収支式

$$R_{nleaf} - \varepsilon_s \sigma \theta_{leaf}^4 = C_p \rho \kappa_d J (\theta_{leaf} - \theta) + l \rho \kappa_q U (q_s - q) \quad (12)$$

・地表面境界条件(Monin-Obukhovの相似則)

$$R_{net} = H + IE + G \quad (13)$$

$$R_{net} = S_d - S_u + L_d - \sigma \theta_s^4 \quad (14)$$

$$H = -\rho C_p U^* \theta^* \quad (15)$$

$$E = -\rho U^* q^* \quad (16)$$

$$\tau = -\rho U^{*2} \quad (17)$$

$$\frac{\kappa U}{U^*} = \int_{z_0m}^{\zeta} \frac{\phi_m(\zeta')}{\zeta'} d\zeta' \quad (18)$$

$$\frac{\kappa(\theta - \theta_s)}{\theta} = \int_{z_0h}^{\zeta} \frac{\phi_h(\zeta')}{\zeta'} d\zeta' \quad (19)$$

$$\frac{\kappa(q - q_s)}{q^*} = \int_{z_0e}^{\zeta} \frac{\phi_h(\zeta')}{\zeta'} d\zeta' \quad (20)$$

$$\zeta = z/L \quad (21)$$

$$L = -\frac{\Theta_0 U^{*3}}{\kappa g (-U^* \theta^*)} \quad (22)$$

$$\zeta_{0m} = z_{0m}/L, \quad \zeta_{0h} = z_{0h}/L, \quad \zeta_{0e} = z_{0e}/L \quad (23)$$

不安定成層時: $\phi_m(\zeta)^2 = \phi_h(\zeta) = (1 - 16\zeta)^{-1/2}$ for $\zeta < 0$ (24)

安定成層時: $\phi_m(\zeta) = \phi_h(\zeta) = 1 + 7\zeta$ for $\zeta > 0$ (25)

・土壌温度に関する熱伝導方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (C_\rho T_s) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (26)$$

・人体熱収支式

$$EHF = R_{nman} + M - H_{man} - IE_{man} = R_{nman} + M - (H_{res} + H_{sk} + IE_{res} + IE_{sk} + IE_{sw}) \quad (27)$$

$$R_{nman} = (1 - \alpha_{man}) \left(S_{DN} / 4 + S_{SH} \psi_{sky \rightarrow man} + \sum_i \alpha_i S_i \psi_{i \rightarrow man} \right) + \varepsilon_{man} \left(L_d \psi_{sky \rightarrow man} + \sum_i \varepsilon_i \sigma \theta_s^4 - \sigma \theta_{man}^4 \right) \quad (28)$$

x_i : 水平方向(x)および鉛直方向(z)座標
 t: 時間[sec.]
 u_i : i方向流速[m/s]
 θ : 温位[K]
 q_v : 混合比[g/kg]
 π : エクスター関数[hPa]
 K_m, K_θ, K_q : 渦動粘性係数, 熱・混合比の乱流拡散係数 [m²/s]
 S : 葉面積密度[m²/m³]
 $|U|$: スカラー風速[m/s]
 κ_θ, κ_q : 葉面一大気間の熱および混合比交換係数
 p : 気圧 [hPa]
 p_0 : 標準気圧 (=1000[hPa])
 R_d : 大気気体定数
 C_p : 空気の定圧比熱

ρ : 空気の密度[kg/m³]
 R_f : flux Richardson数
 S_m, S_h, R_f : 実験関数
 ρ_s : 葉の密度[kg/m³]
 ε_s : 葉の射出率(=1.0)
 C_m : 葉面の抵抗係数(=0.5)
 θ_{leaf} : 葉面温度[K]
 q_s : 葉温での飽和比湿[g/m³]
 l: 水蒸気の気化潜熱
 U^*, θ^*, q^* : 摩擦速度[m/s]・摩擦温位[K]・摩擦混合比 [g/kg]
 R_{net}, G, H, IE : 地表面での純放射フラックス, 地中伝導熱量, 顕熱フラックス, 潜熱フラックス [W/m²]
 S_d, S_u : 下向き短波放射量・反射短波放射量 [W/m²]

L_d, L_u : 大気放射量, 上向き射出長波放射量 [W/m²]
 ε, α : 地表面射出率, albedo
 σ : Stefan-Boltzmann定数
 ϕ_m, ϕ_h : 普遍関数
 L : Monin-Obukhov無次元長さ
 Θ_0 : 場の平均温位
 z_{0m}, z_{0h}, z_{0e} : 運動量・熱・水蒸気量の粗度高さ[m]
 θ_s, q_s : 地表面温位[K], 地表面比湿[g/m³]
 T_s : 土壌温度[K]
 C_p : 砂の体積熱容量 [J/cm³/K]
 λ_s : 砂の熱伝導率 [W/cm/K]
 $R_{nman}, M, H_{man}, IE_{man}$: 人体に入射する正味放射量, 代謝量, 人体からの顕熱損失量および潜熱損失量 [W/m²]

H_{res}, IE_{res} : 呼吸による顕熱・潜熱損失量 [W/m²]
 H_{sk} : 皮膚からの顕熱損失量 [W/m²]
 IE_{sk} : 不感蒸泄量 [W/m²],
 IE_{sw} : 発汗による潜熱損失量 [W/m²]
 S_{DN}, S_{SH}, S_i : 法線面直達日射量, 水平面散乱日射量, 面要素iからの短波放射量 [W/m²]
 $\varepsilon_{man}, \varepsilon_i, \alpha_{man}, \alpha_i$: 人体および面要素iのalbedo, 射出率 ($\varepsilon_{man} = 0.95, \alpha_{man} = 0.4$)
 $\psi_{A \rightarrow B}$: 要素Aから要素Bを臨む形係数
 θ_{man}, θ_i : 人体および面要素iの平均表面温度 [K].

実際の海浜の微気象・温熱環境は、バームや後浜の防風・防潮堤などの地形の影響、日射減衰・散乱効果や運動量・熱・水蒸気のsink・sourceとしての植生帯の存在が本質的に重要となる。本研究では、将来的に3次元計算を行うことを想定して、これらの要素を定量的かつ簡便に取り扱い、計算機負荷の少ない数値モデルを構築することを目指す。その際、観測で得られた熱移動の素過程に関する知見・データを可能な限り用いることにする。ただし、ここでは汀線方向に現象はほぼ一様であるとして、2次元計算を行う。

大気の運動は非圧縮流れとして取り扱い、温度変化の効果に関しては非弾性平衡を仮定してBoussinesq近似を用いる。また、ここでは圧力場に関する静力学的平衡(primitive equation)を仮定しない。つまり、本数値モデルでは鉛直スケールの運動を無視せずに記述する。これは、計算対象領域において、浮力による小規模対流、粗度急変部、バームなどの地形、植生帯などを取り扱う必要があるためである。以上より、大気の運動を記述する運動量保存式は表-1の式(1)で表現される。また、質量保存式は式(2)、熱および水蒸気の移流拡散方程式はそれぞれ式(3)、(4)のように表される。ただし、式(1)、(3)、(4)中の右辺最終項は、植生の存在する領域でのみ現れる運動量、熱、水蒸気のsink・source項である。熱・水蒸気交換係数 κ_θ 、 κ_q は様々な定式化がなされているが、ここでは神田・日野²⁰⁾が用いたものと同様の形を与えた。

b) 乱流モデル

乱流モデルには、計算機負荷を考慮して、式(8)、(9)のように勾配拡散型で表現される、Mellor and Yamada²¹⁾のclosure model level-2を用いた(ゼロ方程式モデル)。ここに、 S_m および S_h は各種の実験結果に基づいて定められた、flux Richardson数 R_f の関数である。このモデルにより、機械的作用による乱れと、熱対流による乱れの生成・抑制効果が同時に考慮される。ここで、混合距離 l は、本計算で対象とする領域が大気最下層であることから、式(10)で与えた。ただし、植生領域中では、Kondo and Akashi²²⁾にならない、式(11)によって与えた。

c) 植生群落内放射環境

植生群落内では、葉による放射フラックスの減衰、運動量および熱のsink作用、水蒸気のsource作用などによって群落内特有の微気候が形成され、しかもこの微気候は木陰にいる人間の温熱感を強く支配している。そこでここでは、植生群落内部の放射フラックスの減衰・散乱を2-streamモデル²³⁾によって計算し、このローカルな放射量分布および気象条件を用いて、式(12)の葉面熱収支を解くことにより葉面温度 θ_{leaf} を決定し²⁰⁾、さらに θ_{leaf} から飽和葉面混合比 q_{vs} を求めた。

d) 地表面境界条件

地表面境界条件は以下のように与えた。すなわち、地表面熱収支式(13)に基づき、熱収支・水収支が同時に満たされるように地表面温度をimplicitに決定する。ここでは、大気最下層をconstant flux layerとみなし、式(13)中の各フラックスをMonin-Obukhov則(式(13)~(23))で与えた。普遍関数には、大気が不安定成層時は式(24)を、安定成層時は式(25)を用いた。Monin-Obukhov則は本来、十分発達した境界層内において成立する理論であり、境界層の発達過程を表現するには少なからず問題があるが、これに代わる普遍的かつ有効な手段が存在しないため、ここでは地表面近傍において、局所的にMonin-Obukhov則の成立を仮定した。

ここで、地表面での地中伝導熱量は式(26)の熱伝導方程式を解くことによって与えた(土壌系は鉛直1次元で各断面20層、深さ50cmまで計算)。また、地表面での混合比は、本来は土壌の水蒸気・液体水の移動を解くことにより決定されるべきであるが、ここでは簡単に、いわゆる α 法⁷⁾によって、地表面での相対湿度を観測値から与えた。

e) 人体熱収支計算

本数値モデルでは、2.(4)で論じた、風速・放射・気温・湿度・人体条件を総合的に考慮することのできる温熱環境指標EHFをモデル中に組み込むことを試みた。EHFは人体熱収支式(27)によって計算され、しかも式中の各項は、その大半が、

$$\text{flux} = k C_f U (Sc_f - Sc_s)$$

という形で与えられるので、気象モデルによって計算された風速・気温・湿度は、EHFを算出する際に陽的に用いられることになる(ここに、 k :比熱などの定数、 C_f :交換係数、 U :スカラー風速、 Sc :気温・水蒸気分圧などのスカラー量)。ただし、放射項 Rn_{man} は、観測された全天日射量を直達成分と散乱成分に分離²⁴⁾した後、これらを含む入力放射フラックス; および計算された地表面温度などを用いて、式(28)のように推定した。

4. 夏季砂浜海岸微気象の数値計算

(1) 計算条件

以上で構築した数値コードによる計算値を、現地観測データと比較することにより、本モデルの妥当性を確認する。図-6に示される計算格子を用いて、冷涼な海風が砂面上で加熱され、植生帯によって冷却される様子を再現する。計算領域は水平方向に250m、鉛直方向に30mを取っており、計算格子は地表面付近および大気-植生境界域に集中させるとともに、地形に沿った一般曲線座標系を用いて、不等間隔の100×40meshで解

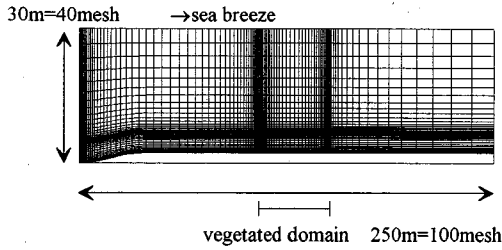


図-6 計算格子分割(不等間隔で100×40meshiによって解像。最小の計算格子は水平方向が0.5m, 鉛直方向が0.1m。観測結果との比較のため, 以下では地表面付近(200m×10m)での計算値を示す)

表-2 計算条件

time	a1		a3		z0m
	α	α	Ld	Sd	
	[%]	[%]	[W/m ²]	[W/m ²]	[m]
6:00	87.6	68.9	435.7	237.1	0.0015
7:00	86.3	55.2	430.8	429.1	0.0016
8:00	86.0	43.8	428.9	612.6	0.0020
9:00	86.9	37.2	424.8	757.5	0.0019
10:00	87.2	35.0	426.5	857.2	0.0026
11:00	87.5	32.2	429.5	914.6	0.0017
12:00	87.7	32.6	432.5	897.5	0.0019
13:00	87.8	33.5	424.1	820.2	0.0021
14:00	85.6	39.3	415.3	691.5	0.0032
15:00	87.1	47.3	425.3	523.8	0.0032
16:00	87.8	56.7	439.7	330.7	0.0028
17:00	89.4	69.5	430.7	142.1	0.0013

像した。最小の計算格子は水平方向が植生流入部での0.5m, 鉛直方向が地表面付近および植生上端での0.1mである。地表面付近に集中している観測結果との比較を容易にするため, 以下では地表面付近(200m×15m)での計算値を示す。時間積分は計算がほぼ定常に達するまでを行い, 入力条件を更新して1時間後の計算をする, という手順で行った。計算は東京工業大学計算機センターのCRAY-C916を用い, すべての物理量がほぼ定常に達するまでの計算時間は, CPU-timeで約420sであった。

(2) 初期条件および境界条件

計算条件を表-2に示す。風上側の海面, あるいは汀線付近に相当する領域において, 平衡に達した風速・温位・混合比の海風が進入してくる観測時のケースを考慮し, 最上流側の観測点における1時間平均値の各物理量の鉛直分布を対数曲線でfittingした滑らかな曲線で与えた。また, 放射条件(S_d , L_d), 地表面での粗度高さ, および地表面相対湿度 α は観測時の各時刻での一

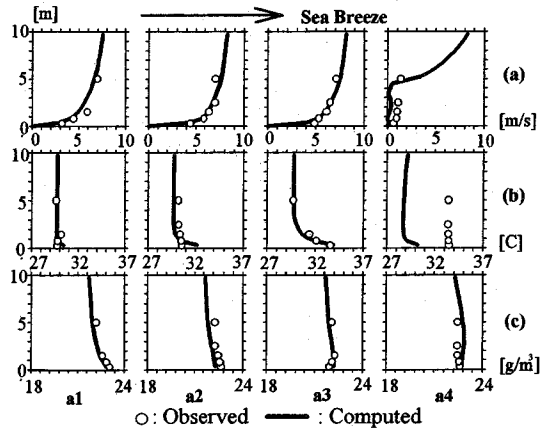


図-7 各観測ポイントにおける, (a)風速, (b)気温, (c)絶対湿度の鉛直分布の計算値と観測値との比較(12時)

時間平均値を, albedoは日中を通じて一定値(=0.2)を与えた。植生群落内では, 熱伝導方程式中の土壌の熱伝導率・熱容量が不明であるため, 土壌温度は解かず, G を地表面での Rn ($Rnet$ から射出長波フラックスを差し引いた入力有効放射量)の10%として与えた。また, 植生の葉面積密度は一定値(=1.0[m²/m³])とした。

境界条件は, 風速に関して, 上流端で観測値を強制的に流入させた。下流端では開放条件を与えた。地表面では3.(3).d)で述べたように, Monin-Obukhovの相似則から求まる底面せん断力 τ を用い, 壁面法則によって与えた。また, 上端ではfree-slip条件を与えた。上端の条件により観測時の流況とマッチしなくなることが懸念されたが, 鉛直方向に領域を大きく(ここでは30m)取ることによって回避された。熱・水蒸気についての境界条件は上流側で観測値に固定, 下流端および上端では開放条件, また, 地表面ではMonin-Obukhovの相似則により求まる底面摩擦温位・摩擦混合比を用いて壁面法則によって与えた。土壌温度は, 土壌下端で開放とした。

(3) 計算結果および考察

a) 海浜上での観測結果との比較

図-7は午後12時台における観測データの鉛直分布と, 同時刻での計算値を比較した図であり, 上から順に風速・気温・水蒸気量(絶対湿度)を表している。植生帯直背後の剥離領域を除いて, 観測時の微気象が精度よく再現されている。また, 図-8上は砂浜中央部(c地点)での地表面温度の日内変化, 図-8下は同地点での顕熱フラックスの日内変化について, 観測値と計算値とを比較したものである。これを見ると, 両者とも観測値との良好な一致が得られていることがわかる。

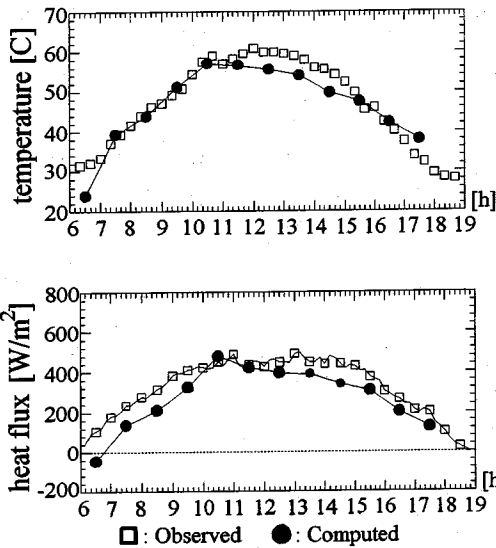


図-8 a3地点での地表面温度の日内変化(上)と顕熱フラックスの日内変化(下)に関する計算値と観測値の比較

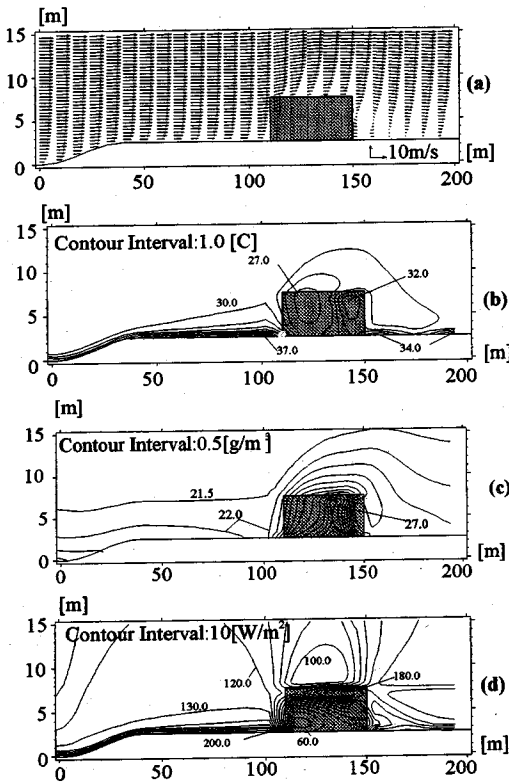


図-9 午後12時における観測データを用いた再現計算による(a)風速, (b)気温, (c)絶対湿度, (d)温熱環境指標EHFの空間分布(ハッチを施した箇所は、植生領域を表す。)

b) 植生帯を含む海浜上の風速・気温・水蒸気量・温熱環境指標EHFの空間分布

次に、午後12時での微気象・温熱環境諸量の空間分布に関する計算結果を図-9に示す。まず風速ベクトル図(図-9(a))を見ると、地表面付近に内部境界層が発達し、植生領域で減衰および上昇した後、植生背後で剥離している。この剥離領域内では逆流が生じており、30mほど流下した地点で再付着している。この剥離領域内では地表面に拘束された強制対流ではなく、植生高さスケールでの大きな混合が起きているため、本計算の乱流モデルの枠組みでは流況を再現できていない。

図-9(b)は同時刻での気温のコンター図である。日射量がほぼピークに達した時間帯であることから、顕熱・潜熱輸送で十分熱を大気中に輸送しきれないため地表面温度が上昇しており、温度境界層の発達が見られ、その発達高さは砂浜最奥部では約2mにまで達している。これに伴い地表面付近の温度が強い勾配を持つようになっている。植生群落内部では葉によって地表面での純放射量が低減するため、地表面温度は低く抑えられる。また、植生前部は風速シアによる潜熱放出のため、気温が低くなる。しかし、流下するにつれて風速が減少し、ひいては葉面での潜熱放出が減少するため、高温領域が植生層内後方に形成されている。

図-9(c)は同時刻での絶対湿度のコンター図である。汀線から流下するにつれて砂浜上での水蒸気量が小さくなっており、2.(2)で論じた砂面の乾燥効果に関わる水蒸気境界層の発達が確認される。植生内部では水蒸気量が砂浜よりも大きく現われているが、これは植生の蒸散作用によるものと考えられる。

図-9(d)は同時刻の計算結果を用いて算出される、EHFの空間コンターである。EHFは汀線近傍ほど小さく、地表面付近ほど大きいという、現地観測時のEHFの水平および鉛直分布構造を再現している。また、砂浜中央では立位で約130[W/m²]、座位で約180[W/m²]という値を示している。また、木陰空間では概ね60~100[W/m²]程度を示しており、その上、鉛直方向には極端な勾配がついていない。

5. 海浜構造変化に伴う温熱環境変化に関する数値シミュレーション

ここでは、本論文において構築した、「温熱環境シミュレータ」を海岸空間デザイン支援ツールの一つとして位置づけ、これを用いて様々な状況(地表面被覆状態、植生配置)での海岸温熱環境をシミュレートすることにより、海浜性状の改変に伴う温熱環境の変化を定量的に議論することを試みる。

具体的には、ここでは、①植生群落前面に芝張りを

表-3 計算条件

time	α [%]	albedo	z_{0m} [m]	z_{0h} [m]
12:00	65.0	0.26	0.017	$z_{0m} \times 0.01$

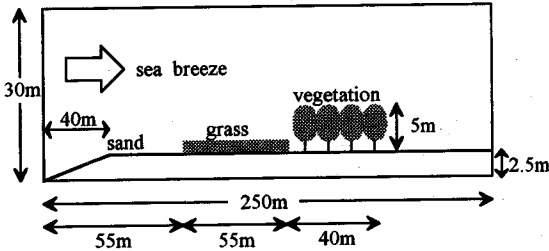


図-10 午後12時における観測データを用いた、浜幅改変および芝張りの場合の温熱環境シミュレーションの概要。

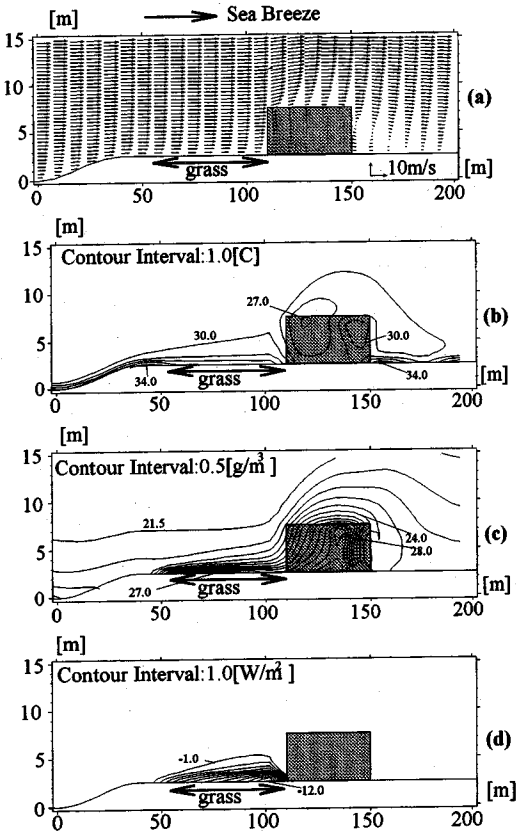


図-11 午後12時における観測データを用いた、浜幅改変および芝張りの場合の温熱環境シミュレーションによる (a) 風速, (b) 気温, (c) 絶対湿度, (d) 温熱環境指標EHF (ただし, 図-9(d)の検証計算値と予測計算値との差)の空間分布。ハッチを施した箇所は, 植生領域を表す。

施すことによって浜幅を変えた場合, および, ②海岸林を構成する植生種を変えた場合 (松→椰子) の2ケースに対して, シミュレーションを行った。

(1) 浜幅改変による海岸温熱環境変化に関するシミュレーション

a) 計算の概要

計算対象は, 4章と同一規模の海浜を想定した, 250m × 30mの2次元的な領域とし, ここではこのうちの200m × 15mの領域を出力結果として示す。計算条件としては, 先の4章での計算条件に対して, 約110mの砂浜部の陸側半分にて芝張りすることにより, 砂浜の幅を55mとしたケースを設定した。

また, 芝生表面上での条件は, 芝生が十分繁茂している状況を想定して, 武若ら¹⁸⁾のデータを参考に決定した。これらを表-3に示す。その他の条件は4章での計算 (以後検証計算と呼ぶ) と同一である。計算領域の設定は図-10に示す通りである。

b) 計算結果および考察

汀線に進出した海風は, 内部境界層の発達を伴いながら植生帯へと流下していく (図-11(a))。植生帯前縁部では, 検証計算と同様に上昇流が生じている。また, 植生背後ではやはり剥離領域が存在する。図-11(b)の温度コンターを見ると, 芝生面での地表面温度が砂面と比較して, 大きく低下している。これは芝生の蒸発散による潜熱放出のためと考えられ, 熱収支バランスからは低い地表面温度が算出されている。

また, 逆に芝生の蒸発散作用は極度な水蒸気sourceとなっている (図-11(c))。しかし, 大気中に供給された水蒸気は, そのほとんどが植生群落内にトラップされており, 植生背後の剥離領域はあまり高い値を示していない。

次に, 以上の計算結果を用いて算出されるEHFの空間分布を示す。ただし, 比較しやすくするため, 図-11(d)では, 検証計算での値とここでの値との差を示している。これを見ると, 芝生上では観測時のケースよりも芝生上で最大12.0[W/m²]低下しているものの, EHF値の低下量は比較的小さい。これは, 地表面温度の低下に伴う気温の低下による人体からの顕熱損失量の増加と, 湿度の上昇による潜熱損失量の減少とがキャンセルしあうためと考えられる。

このように, 海浜の一部を芝生で覆うと, 温度環境的に緩和された空間となるものの, 芝生からの蒸発散が活発な場合には, 砂面の場合とあまり変わらない温熱環境指標値を示した。以上のことから, 潜熱放出を伴う地表面条件の改変は, 直接的な温熱環境の改善に寄与するとは限らないことが推察される。

表-4 計算条件

time	albedo	G [W/m ²]	z_{0m} [m]	z_{0h} [m]
12:00	0.30	$Rn \times 0.1$	0.017	$z_{0m} \times 0.01$

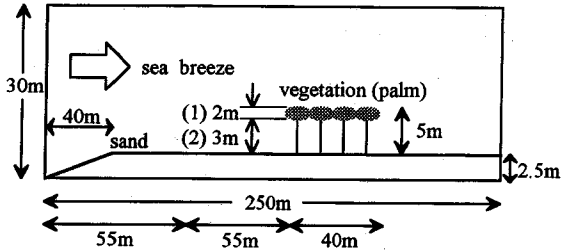


図-12 海岸林植生種を改変した場合のシミュレーションの概要。図中の(1)は葉の部分, (2)は幹部分を表して

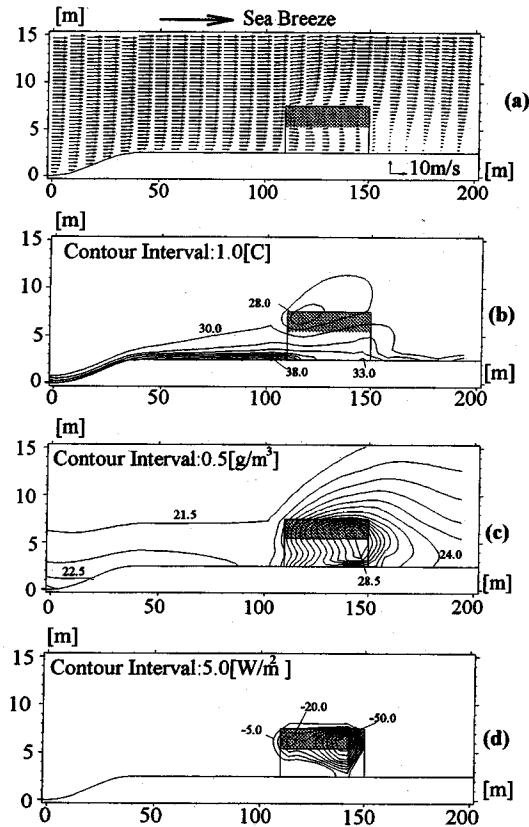


図-13 午後12時における観測データを用いた, 海岸林植生種を椰子に改変した場合の温熱環境シミュレーションによる (a) 風速, (b) 気温, (c) 絶対湿度, (d) 温熱環境指標EHF(ただし, 図-9(d)の検証計算値と予測計算値との差)の空間分布。ハッチを施した箇所は葉を表す。

(2) 植生種の違いによる海岸温熱環境変化に関するシミュレーション

a) 計算の概要

幕張人工海浜では, 砂浜背後の防風林帯は主として松系の植生群落が生形成されている。松系植生は海岸植生としては極めて一般的であり, 幹部分が短く, 風の遮蔽効果が高い。しかし, 昨今では特に人工海浜において, 主に景観的な要請から, 葉が少なく, したがって眺望が確保しやすい椰子系の植生種を用いるケースも増えている。椰子は防風林としての機能は松よりも劣るが, 温熱環境的な役割は調べられていない。そこで本節では4章での検証計算の条件に対して, 仮に松系植生を椰子系植生に置換した場合の温熱環境特性の変化を予測することを試みた。

ここでは, 砂浜長110mの海浜背後に40mの区間にわたって椰子系植生が繁茂している状況を考える。そのモデルとしては, 図-12に示すように, 地表面から3mまでを幹部分(葉面積密度0.1[m²/m³], 気孔なし=蒸発散なし), 3m~5mの区間を葉部(同1.0[m²/m³], 気孔あり)として与えた。植生帯下部での計算条件は, 表-4に示す通りである。

b) 計算結果および考察

図-13(a)の風速ベクトル図を見ると, 椰子系植生内では, 幹部分に相当する箇所(ハッチを施していない部分)での風速が, 4章での検証計算よりも大きくなっている。群落内では流下するにたがって運動量欠損が著しくなり, 後縁部での風速は1m/sに満たない。また, 植生背後では, やはり剥離領域が存在しているものの, その規模は検証計算結果と比較して小さい。図-13(b)の温度コンターを見ると, 砂面の履歴を若干受けているものの, 椰子系群落下部での地表面温度が砂面でのそれと比較して著しく低下している。これは, 群落下部での通風効果により, 松系の場合よりも顕熱, 潜熱輸送が活発になったためと考えられる。このため, 松系の場合よりも地表面での受熱放射量は大きいにも関わらず, 群落内の気温および地表面温度はかなり低い。また, 大きな風速シアは大きな潜熱輸送を生じさせ, 椰子葉面は逆に水蒸気sourceとなっている(図-13(c))。椰子系群落内下部ではこのような現象が顕在化しており, 砂浜上と比較して1.5[g/m³]程度の過大な水蒸気を大気へ供給している。しかし, 大気中に供給された水蒸気は, そのほとんどが植生群落内においてトラップされている。

EHFを計算し, 前節と同様に検証計算結果と比較する(図-13(d))。これを見ると, 椰子系群落内部では, 特に下流側上部において顕著なEHFの低下が見られ, その低下幅は最大で50.0[W/m²]にまで達している。

以上のようなことから, 通風のよい椰子系の植生は日射の遮蔽効果とあいまって, 温熱的に快適な背後地空

間を創出するツールとなり得ると考えられる。

6. 結論

以下に本論文で得られた主要な結論を示す。

- (1) 夏季砂浜海岸では、内部境界層の発達を伴う形で大気に対する砂面の顕著な加熱・乾燥効果が現れ、しかも、内部境界層内外で温熱環境的にコントラストの強い空間構造を形成する。
- (2) このような特性を持つ夏季砂浜海岸の気象場を数値モデルによって再現し、さらに人体温熱環境指標を最終出力とする、「温熱環境シミュレータ」を構築した。
- (3) 砂浜上の風速・気温・水蒸気量の空間分布や、地表面温度・顕熱フラックスの時間変動などの計算結果が、植生帯直背後を除いて観測値を良好に再現できたことから、「温熱環境シミュレータ」の妥当性が検証できた。
- (4) 温熱環境シミュレータを用いて、2ケースの海浜性状に対する微気象および温熱環境の特性を検討した。その結果、①砂面の一部を芝生で覆うと温度環境的には緩和されるものの、蒸発散による潜熱放出により、総合的な人体の温熱環境に対しては大きな変化は与えない、②通風効果の高い椰子系の植生は、日射の遮蔽効果とあいまって、暑熱感の緩和された空間を創出する、という結果を得た。

謝辞: 観測の準備・実施にあたり、東京工業大学工学部土木工学科の池田駿介教授・八木 宏講師・二瓶泰雄助手および水工研究室の多くの学生、そして千葉県企業庁の河北慶介主査に大変な御助力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 灘岡和夫, 徳見敏夫: 海岸の音環境に関する基礎的研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.757-761, 1988.
- 2) 灘岡和夫, 山下さゆり, 白水勝之, 八木 宏: 聴覚情報を統合した海岸景観シミュレータの開発と海岸空間設計への応用, 土木計画学研究・論文集, No.9, pp. 205-212, 1991.
- 3) 灘岡和夫: 海岸空間デザイン論の新展開——トータル空間デザイン論の構築を目指して——, 港湾, 日本港湾協会, Vol.71, pp.48-57, 1994.
- 4) 灘岡和夫, 内山雄介, 山下哲弘: 夏季砂浜海岸の熱収支構造と人体の快適性, 水工学論文集, 第39巻, pp.189-196, 1994.
- 5) 仲座栄三, 津嘉山正光, 山路功祐, 日野幹雄: 飛塩(海塩粒子)拡散の数値流体力学的解析, 海岸工学論文集, No.40, pp.1036-1040, 1993.
- 6) 宮田正史, 池田駿介, 武若 聡: 防風林の機能に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, No.40, pp.556-560, 1993.
- 7) 例えば, 竹内清秀, 近藤純正: 大気科学講座1・地表に近

い大気, 東京大学出版会, 1981.

- 8) ASHRAE: ASHRAE Handbook, Fundamentals, 1993.
- 9) Gagge, A.P., et al.: A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Transaction*, pp.709-731, 1986.
- 10) Burt, J.E., et al.: The relative influence of urban climates on outdoor human energy budgets and skin temperature I, *Int. J. Biometeor.*, No.1, pp. 3-23, 1986.
- 11) 中村泰人, 平岡久司: 二次元長方形市街地空間の路上にある人体の熱負荷に関する解析的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.369, pp.12-21, 1986.
- 12) 石井明夫, 片山忠久, 塩月義隆, 吉永久雅, 安部嘉孝: 屋外気候環境における快適感に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, Vol.369, pp.12-21, 1988.
- 13) 神田 学, 土屋信夫: 微気象観測に基づいた屋外における人体の温熱環境解析, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.35-44, 1995.
- 14) Fanger, O.P.: Thermal comfort, *Danish Technical Press*, 1970.
- 15) 吉門 洋: 海岸都市が海風と汚染物質拡散に与える影響の数値実験, 天気, 37.10, pp.45-50, 1990.
- 16) Kimura, F., and Takahashi, S.: The Effects of Land-use and Anthropogenic Heating on the Surface Temperature in the Tokyo Metropolitan Area, *Atmos. Environ.*, Vol.25B, pp.155-164, 1991.
- 17) 中村泰人, 平岡久司: 二次元長方形市街地空間における表面の温度および熱流に関する解析的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.367, pp.8-14, 1986.
- 18) 武若 聡, 池田駿介, 平山孝浩, 萱場祐一, 財津知亨: 都市内河川による大気冷却効果, 土木学会論文集, No.479/II-25, pp.11-20, 1993.
- 19) 武若 聡, 池田駿介, 平山孝浩: 数値モデルによる都市内河川の大気冷却効果のシミュレーション, 土木学会論文集, No.479/II-25, pp.21-30, 1993.
- 20) 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, 水文・水資源学会誌, Vol.3, No.3, pp.37-55, 1989.
- 21) Mellor, G.L. and Yamada, T.: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Sci.*, Vol.20, pp.851-875, 1982.
- 22) Kondo, J. and Akashi, A.: Numerical study on the two dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layers, *Boundary Layer Meteorol.*, Vol.10, pp.225-272, 1976.
- 23) Kondo, J. and Watanabe, T.: Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model., *J. of Atmos. Sci.*, Vol.49, pp.2183-2199, 1992.
- 24) 例えば, 日本建築学会編: 建築環境工学実験教材1・環境測定演習編, p.10, 1982.

(1995.6.16受付)

ANALYSIS OF MICROMETEOROLOGICAL AND THERMAL ENVIRONMENTS ON SANDY BEACHES IN SUMMER

Kazuo NADAOKA, Yusuke UCHIYAMA and Tetsuhiro YAMASHITA

Atmospheric and related thermal environments on sandy beaches in summer are significant factors for coastal amenity environments. Through a micrometeorological field observation conducted on Makuhari Beach facing Tokyo Bay in summer, we found that; an internal boundary layer of sea breeze was clearly formed on the beach, and the beach surface with dry sand has appreciable effects of heating and drying the surrounding air body. A physical thermal comfort index calculated with the observed data indicates that the sandy beach and its surroundings provide a highly contrasted spatial structure in thermal environment. A numerical model to simulate thermal environments has been developed to provide a tool for beach-space design. The model is applied to qualitatively find the effects of grass-covering of beach surface and of the spatial distribution of vegetation.