

夏季砂浜海岸の熱収支構造と人体の快適性

A Field Observation of Heat Budgets and Thermal Comfort on Sandy Beaches in Summer.

灘岡和夫*・内山雄介**・山下哲弘***

By Kazuo NADAOKA, Yusuke UCHIYAMA and Tetsuhiro YAMASHITA

Atmospheric environment and related thermal comfort on beaches in summer are significant factors for coastal space design to provide desirable amenity environments. Through a micrometeorological field observation conducted in summer on Makuhari Beach facing Tokyo Bay, we found that; (1) an internal boundary layer of sea breeze was clearly formed on the beach, (2) the beach surface with dry sand has appreciable effects of heating and drying on the surrounding air body, and (3) three physical comfort indices DI , SET^* and HS calculated with the observed data show that the sandy beach and its surroundings provide a highly contrasted spatial structure in thermal comfort.

Key Words : sandy beach, amenity, heat budget, thermal comfort, comfort index

1. はじめに

一般に、より良い空間デザイン（「景観」デザインではない）のためには、対象とする空間のもつクセ・特性をさまざまな観点から十分に把握しておくこと、すなわち空間認識のプロセスが重要になる。特に、本研究で対象とする海岸空間の場合には、そのことがとりわけ重要である。というのも、海岸空間の場合、景観を構成する視覚的要素以外の、波の音や潮の香りといった五感的要素が、総じて海岸らしさを演出するポジティブな役割を果たしており、さらには豊かな生態系などの存在が海岸空間を大きく特徴づけているからである。このような観点から、われわれは、人間の視覚的侧面に偏った従来の「景観デザイン」の枠組みを越えて、より多面的な空間認識に基づく「トータル空間デザイン論」の構築を目指している^{1,2,3)}。

本研究は、その一環として、夏季の砂浜海岸において空間を特徴づける重要なファクターになっている「微気象(大気環境および日射環境)」に着目し、その基本的な特性を現地観測によって把握することを試みたものである。また、本研究では、砂面についての熱収支解析を行うことにより、砂面の持つ気象学的な役割を明らかにするとともに、これらを人間の「体感」に結び付けるべく、物理的な快適性指標を用いて、夏季の砂浜海岸の温熱環境の特徴を明らかにすることを試みている。

* 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

** 学生会員 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 修士課程

*** 学生会員 東京工業大学 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

表-1 観測項目・機器・測定間隔

測点	項目	計測機器	記録間隔
a1~a4	気温 湿度 風速	白金温度計 高分子誘電率式 三杯式風速計	主に、 サンプリング周期1s 1分平均
a3のみ	日射量 赤外放射量 正味放射量 地中伝熱量	日射計2台 赤外放射計 放射収支計 熱流計 & サーミスタ	サンプリング周期1s 1分平均 *サーミスタは10分毎
公園内4点 (砂面等)	地表面温度 Globe温度	放射温度計 Globe温度計	10分毎

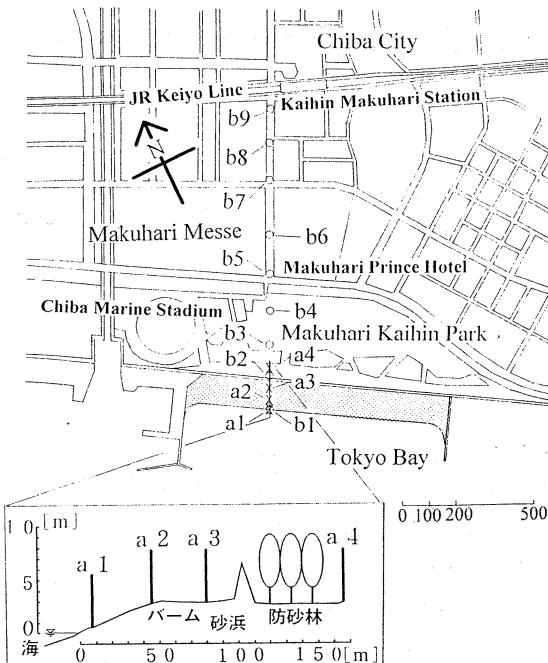


図-1 現地観測実施地点(幕張)

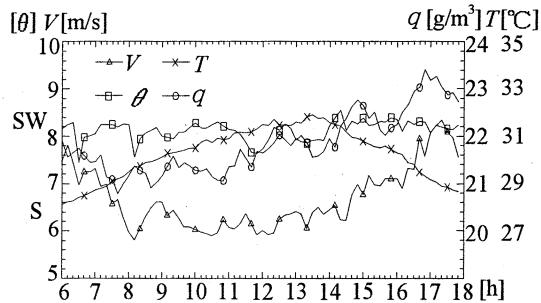


図-2 a3地点での風速V・風向θ・気温T・絶対湿度q

2. 夏季砂浜海岸での現地観測

2.1 観測の概要

図-1に観測場所、図-2に観測当日の気象概況(砂浜中央のa3地点、高さ1.5mでの風速・風向・気温・絶対湿度)、表-1に観測項目等の一覧を示す。観測は、千葉市美浜区の幕張海浜公園人工ビーチにおいて、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。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の海風が吹き続いており、天候は晴れ、雲量はきわめて少なかった。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、砂浜中央のa3地点で放射フラックスを測定した。ここでは、観測結果から、夏季の砂浜海岸の微気象特性、および熱収支解析によって明らかになった砂面の果たす気象学的な役割について述べる。

2.2 砂浜表面付近の大気環境

図-3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・水蒸気量(絶対湿度)を見ると、海風は海上では冷却・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まとめると、図-4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、海風は日射の影響

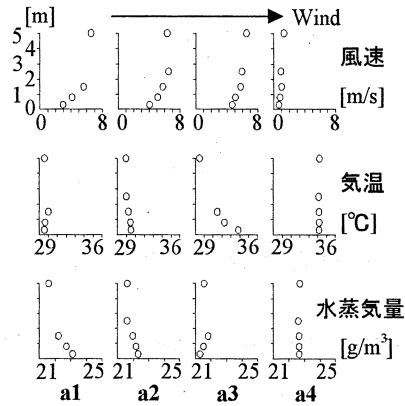


図-3 午後12時での風速・気温・水蒸気量の鉛直分布

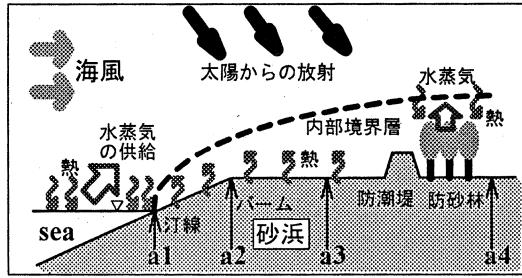


図-4 夏季の砂浜海岸の大気特性の概念図

(後述)によって、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構成している。特に、砂面上では運動量・温度・水蒸気の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の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。

2.3 砂浜表面付近の日射環境

砂浜上の大気に対するこのような加熱・乾燥効果は、砂浜表面付近の日射環境によって直接支配される。そこでここでは、汀線ごく近傍の湿潤砂面上に位置するa1地点と、汀線から離れた乾燥砂面上に位置するa3地点に関して熱収支解析を行うことにより、夏季の砂浜海岸空間の日射環境特性を明らかにすることを試みた。

図-5と図-6に、それぞれa1地点とa3地点での熱収支解析結果を示す。砂面-大気間での熱収支は、式(1)、(2)に従うものとする。

$$R_{net} = Sd + Su + Ld + Lu = (1 - \alpha)Sd + Ld - \epsilon \cdot \sigma Ts^4 \quad (1)$$

$$R_{net} = H + IE + G \quad (2)$$

ここに、 R_{net} :正味放射量、 Sd, Su :下向き短波放射量および反射短波放射量、 Ld, Lu :大気放射量および上向き長波放射量、 H :顕熱フラックス、 IE :潜熱フラックス、 G :地中伝熱量(以上 $[W/m^2]$)、 Ts :地表面温度 $[K]$ 、 ϵ 、 α :地表面の射出率とAlbedo、 σ :Stefan-Boltzmann定数、である。顕熱・潜熱フラックスは、大気が強制対流の状態であったとみなして傾度法により算定している。ただし、汀線近傍のa1地点では、内部境界層が十分に発達していないことから、傾度法による見積りにはある程度の誤差が含まれることに注意しなければならない。また、熱収支の各成分は直接測定した値を用いているが、a1地点での R_{net} は湿潤砂面のAlbedoを仮定して算出し、熱収支の残差として地中伝熱量 G を推定しており、a3地点での G は地中温度の測定値から算出している。

図-5と図-6を見ると、a3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しまい、 R_{net} 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 $450 W/m^2$ に達しており、浅枝・藤野⁴⁾が求めた夏期のアスファルト面上での日最大値 $350 W/m^2$ をも上回っている。これと比べてa1地点では、 H が相対的に小さく抑えられており、逆に、地中伝熱量 G および潜熱フラックス IE が大きく、日最大で各々約 $450, 400 W/m^2$ にまで達している。つまり、a3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

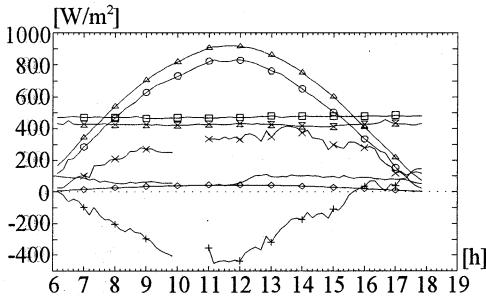


図-5 a1地点(湿潤砂面)での熱収支の日変化

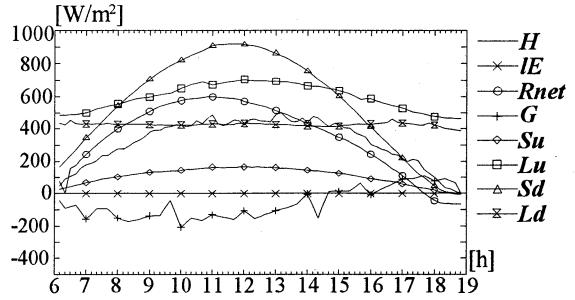


図-6 a3地点(乾燥砂面)での熱収支の日変化

砂中の熱伝達率が低く抑えられることにより地中伝熱量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、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が明らかとなった。

そこで次に、この顕熱フラックスHの大小を支配する地表面温度について、現地での様々な被覆条件の場所での時間変化を調べた(図-7参照)。これを見ると、日向では砂・アスファルトともにほぼ同様のピーク値を示しており、特にアスファルトに関しては浅枝・藤野⁴⁾の測定結果(最大57°C)と同程度の値となっていることが分かる。このように、砂浜はアスファルトに類似した表面温度特性を有しているが、乾燥砂面では表面から約6cm下層での地温が地表面温度よりも最大で20°C低下しており、アスファルトとはやや異なって、蓄熱は地表面ごく近傍に限られている。(図-7で砂面温度のピークが、日射量のピークとほぼ同時刻に現れていることからも、砂浜表層部の蓄熱効果の低さが理解できる。)

一方、日陰の砂浜の表面温度は日向の乾燥砂面のそれより最大で約30°C低くなっている。これは、直達日射光の有無が地表面温度に支配的であることを示すものである。地表面温度は大気下層(地表面付近)の温度環境に、さらには人間の体感にも大きく影響することから、海岸空間デザインにあたっては、天蓋・木陰など、日射光の遮蔽要素が重要になることがわかる。

3. 温熱環境から見た砂浜海岸の快適性

3.1 快適性指標

以上で述べてきた微気象特性は、人間の快適感に関わる物理的な外的因子である。これらを人間の体感に通した出力として快適性指標が定義される。この快適性指標に関しては、これまで生理学・生気象学・空調学・建築学などの分野で活発に研究されているものの、それらは屋内空間を主たる対象としており、環境変動の大きい屋外空間での検討例はまだ少ない(Burt *et al.*⁵⁾、石井ら⁶⁾、神田・土屋⁷⁾など)。そこでここでは、既存の指標

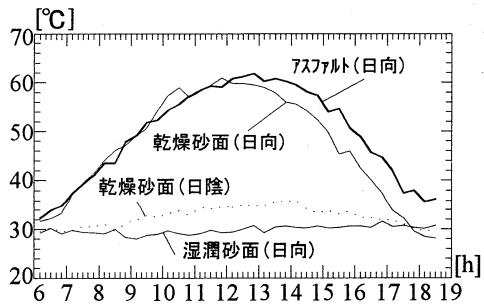


図-7 様々な被覆条件における地表面温度

の中で「人体貯熱フラックス(HS)」と「標準有効温度(SET*)」(詳細はASHRAE⁸⁾)、そして比較のために、最もポピュラーでシンプルな「不快指数(DI)」を用いて、ここで対象とする砂浜海岸での「快適性」について検討した結果を示す。これらの指標のうち、SET*は屋外環境での適用可能性が報告されている例(石井ら⁹⁾)があるものの、後述するように、物理的な意味から言えばHSの方が、屋外環境における適用可能性が高いものと考えられる。そこでここでは、HSを中心検討を行った。以下に、本研究でのHS値の導出背景および算定方法について述べる。

3.2 人体貯熱フラックス(HS:Heat Storage)について

(1) 屋外環境下における快適性指標としてのHS値の導出背景

HSは、Fanger⁹⁾によって提案された指標であり、屋内環境下での人体熱収支の残差である熱負荷量を、熱フラックスとして算定した値で、[W/m²]の単位で表される。SET*などの屋内における既存の快適性指標は、人体が生理学的に皮膚温度・潜熱損失などを調節して熱平衡を保っており、熱負荷がゼロになるという状態を前提としている。しかし、屋外暑熱環境下では、入射フラックスが過大なために、人体は体温調節が十分できず、熱平衡が保てなくなると考えられ、SET*などの考え方の指標は厳密には適用不可能となる。そこで、上記のHSを、屋外環境を対象とした人体熱収支の残差として見積もろうという試みがBurt *et al.*⁵⁾(シミュレーション)や神田・土屋⁷⁾(実測)などによってなされてきた。特に、神田・土屋⁷⁾はHS値を大きく左右する放射項の算定に、室内計測でよく用いられるグローブ球による簡便な計測方法を示している。ここでは、先行研究での様々な知見を合理的に取り込んだ形で、以下のような方法によってHS値を推定することを試みた。

(2) HS値の算定方法について

HS値算定の基礎式は、屋外を対象としたBurt *et al.*⁵⁾にならい、Fanger⁹⁾の人体熱収支式をフルな形で用いた。

$$HS = Rn_{man} + M - Hman - IEman = Rn_{man} + M - (Hres + Hsk + IEres + IEsk + IEsw) \quad (3)$$

ここに、 Rn_{man} :人体に入射する正味放射量、 M :代謝量、 $Hman$:人体からの顕熱損失量、 $IEman$:人体からの潜熱損失量、 $Hres$ 、 $IEres$:呼吸による顕熱、潜熱損失量、 Hsk :皮膚からの顕熱損失量、 $IEsk$:不感蒸泄量、 $IEsw$:発汗による潜熱損失量、(以上すべて[W/m²])である。上式中の右辺のすべての項が算定されれば、それらの残差として人体貯熱フラックスHSが推定される。

ここで、右辺各項の評価は以下のように行った。まず、代謝量Mは人体の作業レベルに応じて外部から一定値を与えた。熱収支に対する寄与の大きい皮膚顕熱量Hsk中の交換係数は神田・土屋⁷⁾が用いたものと同じものを用いた。また、 $IEsw$ 、 $IEsk$ の評価は、人体の生理機能(発汗)を反映させたGagge *et al.*¹⁰⁾の2-Node Modelによってskin wettednessと同時に算定した。呼吸項Hres、 $IEres$ は、Burt *et al.*⁵⁾の方法によって算定した。また、放射項Rn_{man}の評価については、計測の簡便化という観点から、神田・土屋⁷⁾による、グローブ温度を用いる方法によって行った。すなわち、人体とグローブ球のAlbedo、射出率、形態係数が互いに等しいと仮定すること(式(4))により、式(5)で表されるグローブ球の熱収支式(ここで、グローブの蓄熱項と潜熱項は無視できる)を解くことにより、式(4)～(6)によってRn_{man}が算定される。

$$Rn_{man} = Rn_g \quad (4)$$

$$Rn_g = H_g \quad (5)$$

$$H_g = h (t_g - t_a) \quad \text{ここに、} \quad h = Nu \cdot \lambda / D = (2.0 + 0.60 Pr^{1/3} Re^{1/2}) \cdot \lambda / D \quad (6)$$

ここに、それぞれグローブの、 Rn_g :入射する正味放射量、 H_g :顕熱損失量(以上、[W/m²])、 t_g 、 t_a :グローブ温度、気温[°C]、 h :グローブ球の対流熱伝達係数[W/m²°C]、 D :グローブ球の直径[m]、 Nu 、 Pr 、 Re 、 λ :各々流体(空気)のNusselt数、Prandtl数、Reynolds数、平均熱伝達率[W/m²°C]、である。

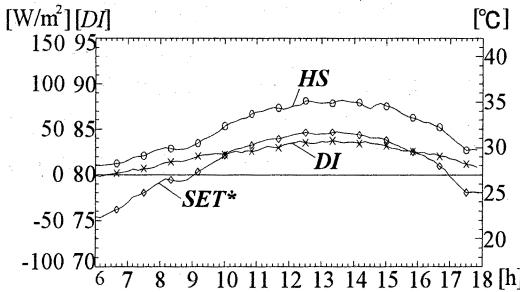


図-8 砂面上日向での各指標値の日内変化

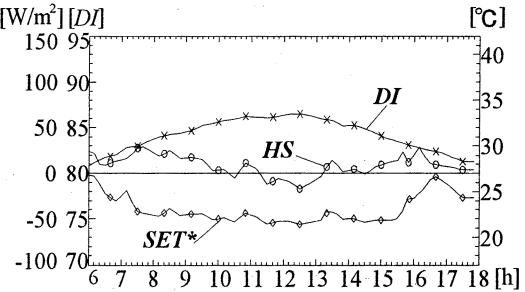


図-9 木陰での各指標値の日内変化

このように算出される Rn_{man} (式(4)より Rn_g) は、a3地点での放射量測定結果による正味放射量と比較して、やや小さい値となった。その意味で、放射項の推定方法については、今後さらに検討が必要である。

3.3 現地データに対する各指標値の特性

図-8に砂浜上の日向空間(気象条件は図-2を参照)での各指標値の時間変化を、また、比較のため図-9に砂浜近くの木陰での各指標値の時間変化を示す。また、砂浜日向での各指標の算出に用いた気温(Ta)・グローブ温度(Tg)と、HS値と同時に算出される平均衣服外表面温度(Tcl)・平均体表面温度(Tsk)・体内温度(Tcr)の時間変化を図-10に示す。ここで、図-8,9中の実線は快適感の上限と考えられる値を示しており、また、 SET^* やHSの算定には、人体条件として簡素な夏服着衣(0.3clo)、安静座位(1.0mct=58.2W/m²)の条件を与えた。以下に、上記の3つの指標を砂浜上の日向空間に適用した結果について、これらの指標の持つ意味と併せて述べる。

(1) 不快指数(DI)

DIは、蒸し暑さの程度を表す「環境指標」である。80度以上でかなりの人が不快感を感じるとされているが、代謝量や着衣量などの人体条件が考慮されておらず、外的因子(気温と湿度のみ)を組み合わせただけの最もシンプルな環境指標であるため、図-9(木陰)に見られるように、植生の蒸発散によって湿度が高かった木陰において、より高い(すなわちより不快な)値を示している。これは、観測中のわれわれの体感から言うと、全く逆の結果となっている。

(2) 標準有効温度(SET^*)

SET^* は、外的因子(日射・風・温湿度)に加えて人体条件(着衣量・代謝量)を含んでおり、空調された屋内気温に直すと何°Cであるかを示している。屋外環境下においても(ただし大学構内)、申告試験との良好な一致がみられ、 $SET^*=$ 約27~28°Cに快適感の上限があることが石井ら⁷によって報告されている。図-8,9を見ると、DIでは「不快」を示した砂浜での朝夕の時間帯や木陰において、 SET^* ではこの上限値を下回っており、すなわち「快適」を示している。これは、木陰や朝夕の砂浜では直達日射量が少ないので、人体に入射する放射フラックスが小さくなっていることに起因すると考えられる。このことから、人体の体感には放射の影響が大きく、このことを反映した指標を用いなければ「快適性」は議論できないことが分かる。また、図-8(砂浜の日向)では、この SET^* を用いても快適感の上限値をはるかに越えた32°Cにまで達している。これらことから、海岸の日向は、たとえある程度の風速が存在しても放射の影響が顕著に表れ、人間にとってかなり「暑い」環境になっていると言える。

(3) 人体貯熱フラックス(HS)

熱収支の非定常項であるHSの大小は結果として平均体表面温度(Tsk)の時間変化をもたらし、 Tsk がある上限値に達すると不快感を感じるようになると考えられる。HS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 Rn_{man} 項に各々反映されることになる。 $HS>0$ のときは、ある上限値を越えると、人体は

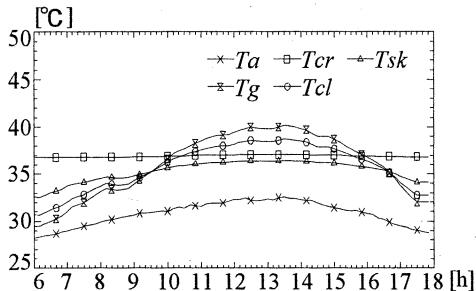


図-10 Ta, Tg, Tcr, Tsk, Tcl の日内変化

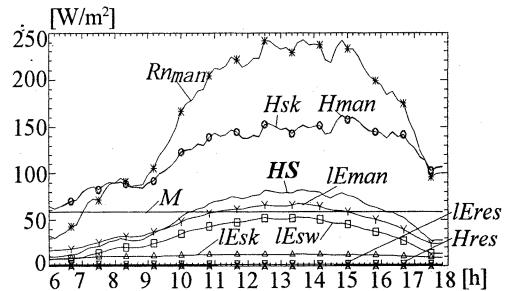


図-11 HS 値の各成分の日内変化

生理機能による体温調節ができずに、熱的な負荷がかかっている状態を表す。逆に $HS < 0$ のときは、ある下限値までは熱的な負荷はゼロであり、「快適」な状態を表す。今回の場合 ($M=1.0\text{met}$)、 SET^* が体感を正しく表現しているとして、図-8より $HS=30\sim40\text{W/m}^2$ 程度に快適感の上限があると考えられるが、厳密には官能試験などと対応づけて、この上下限値を決定していく必要がある。ここでは便宜的に、 $HS=0$ を快適感の上限としている。図-8(砂浜日向)を見ると、 HS 値は最大で約 $80\text{[W/m}^2]$ となっているが、これは人体にかなりの熱的負荷がかかっていることを示している。また、図-9(木陰)では $HS=0$ 前後の値をとっていると思われる。

また、図-11に砂浜日向での HS 値の各成分の時間変化を示す。これを見ると、呼吸による損失項 $Hres$ 、 $lEres$ は数 W/m^2 程度しか現れておらず、特に今回の砂浜海岸のように気象条件の厳しい空間では、人体熱収支にはほとんど寄与しないことが分かる。一方、不感蒸泄項 $lEsk$ など、呼吸以外の項は無視できない大きさとなっており、特に正味放射フラックス Rn_{man} の見積もり方が HS 値の算定精度を大きく左右することに気を付けねばならない。

図-12は、砂浜上各地点(汀線近傍のa1地点、砂浜中央部のa3地点および木陰。*"Nude"*の表示は、clo値=0として算出した。ただし、代謝量 M は高さによらず一定値 1.0[met] を与えた。)での HS 値の日内変化を示している。 HS 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 $70\sim80\text{[W/m}^2]$ も大きくなっている。一方、汀線近傍の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「快適」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の形で現れるが、そのことは人体の快適性の空間分布特性にも密接に関与し、汀線近傍で比較的「快適」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「不快」となることがわかる。

以上、3つの快適性指標の解析結果から、人間の体感への影響は、気温・湿度だけでなく、放射や風の影響が顕著になることが示された。また、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「不快」な空間であり、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的「快適」であ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的狭いスケールの範囲で温熱環境上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本研究で得られた以上のような知見は、先にふれた天蓋・木陰といった日射光

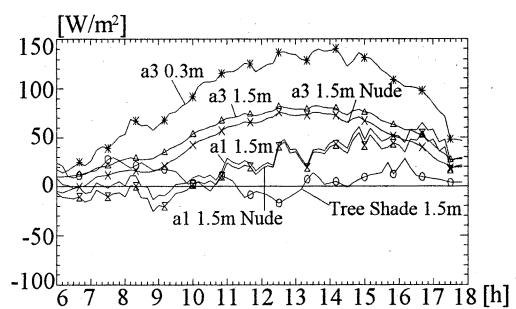


図-12 砂浜上各地点での HS 値の日内変化

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と考えられる。

4. おわりに

本論文では夏季の砂浜海岸で行った微気象観測の解析結果から、日中の砂浜上では、内部境界層の発達を伴う形で大気に対する顕著な加熱・乾燥効果が現れることを明らかにした。

砂浜の持つこのような熱的な効果は人間の体感にも大きく関与するが、快適性指標解析の結果から、夏季砂浜海岸の日向空間は、汀線近くでは冷涼な海風の影響を強く受け比較的「快適」な空間であるものの、内部境界層の発達に対応して、汀線から遠ざかるにつれて、また地表面付近ほど温熱的に「不快」な空間となることが示された。つまり、夏季の海岸空間は、汀線際では比較的冷涼であるのに対し、ある程度流下すると不快感が増大するという、温熱環境的に極めてコントラストの強い空間構造を有していることが明らかとなった。

以上の知見は、アメニティ環境としての海岸空間の持つ特殊性を理解する上で重要な意味を持つ。砂浜直上の空間が温熱環境からみて「不快」であることは、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、温熱環境的に快・不快の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、と考えた方がよい。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論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、デザインの支援ツールとして、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。著者らは現在、その開発を試みており、近々にその成果を発表したいと考えている。

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) 瀧岡和夫・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) 瀧岡和夫・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) 瀧岡和夫：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) 浅枝 隆・藤野 毅：舗装面の熱収支と蓄熱特性について、水文・水資源学会誌、Vol.5, No.4, pp. 3-7, 1992.
- 5) 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.
- 6) 石井明夫ほか：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.
- 7) 神田 学・土屋信夫：微気象観測に基づく人体熱収支解析の試み、水工学論文集、第38巻、pp.419-424, 1994.
- 8) ASHRAE : ASHRAE Handbook, Fundamentals, 1993.
- 9) Fanger, O.P. : Thermal comfort, *Danish Technical Press*, 1970.
- 10) Gagge, A.P., et al. : A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Transaction*, pp.709-731, 1986.