

夏季砂浜海岸空間の微気象特性と人体温熱環境について*

A Micrometeorological Study on Thermal Environments 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

1. はじめに

海岸空間のデザインは、ともすれば通常の都市や公園のwater frontデザイン論的なセンスに基づいて議論されがちである。しかし、われわれは単なる「水辺」とは異なる「海岸」固有の要素に魅力を感じているのであって、通常のセンスに基づいたデザイン手法をそのまま海岸空間に持ち込むのは少なからず問題がある。ここでいう海岸固有の要素とは、例えば、打ち寄せる波の音、潮風、海岸生態系、あるいは夏の日差し等であり、これらは「景観(視覚)」を含む人間の五感全体を通して働きかける要素となっている。つまり、海岸のアメニティ環境を議論する対象として景観は一つの大きな要素ではあるけれども、他の五感的要素や、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。

このような観点から、われわれは、人間の視覚的側面に偏った従来の「景観デザイン」の枠組みを越えた、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」という新たな空間デザイン論の構築を目指している^{1),2),3)}。

トータル空間デザイン論を具体的に展開していく場合、その基礎となる海岸空間認識のプロセスが重要となる。そこでは、海岸空間を特徴づけている上記の個々の環境要素に関して、その実態を明らかにしていくことが必要になる。本研究では、海岸空間を特徴づける重要なファクターの一つであるにも関わらず、これまでほとんど議論されることのなかった海岸微気象(大気環境および日射環境)に着目し、その実態を現地観測結果に基づいて具体的に明らかにすることを試みた。

微気象的な観点を海岸空間デザインに反映させるに

* Key Words : 砂浜海岸, 微気象, 温熱環境, トータル空間デザイン

** 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, tel 03-5734-2589, fax 03-3729-0728)

*** 学生会員: 修(工) 東京工業大学大学院情報理工学研究科修士課程

**** 学生会員: 東京工業大学大学院情報理工学研究科修士課程

は、たとえば、海岸空間に吹き込む比較的冷涼な海風が、砂浜上でどのような形でどの程度加熱・乾燥されるのか、逆に、背後の植生帯等によって熱的な緩和効果がどの程度現れるのかといったような点を、できるだけ定量的に明らかにしていく必要がある。そして最終的には、このようなさまざまな微気象・熱環境特性を統合して、人体に対する温熱環境特性の観点から、空間評価を定量的に行う必要がある。

本論文では、このような点を念頭において行った千葉県幕張海岸での微気象・熱収支観測による現地データの解析結果を示し、さらに、この現地データから、人体温熱環境指標を導入することによって、海岸空間の温熱環境特性を明らかにすることを試みた結果について述べる。

2. 夏季砂浜海岸での現地観測

(1) 観測の概要

まず、東京湾奥部に位置する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、微気象観測結果について述べる。図-1に観測場所を、表-1に観測項目等の一覧(一部)を示す。一般に、夏季の砂浜海岸では、日中、沖→岸方向の風(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、観測から得られた夏季の砂浜海岸の微気象特性のうち、大気環境およびこれを直接支配している日射環境の2点について述べる。

(2) 砂浜表面付近の大気環境

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。これらから、以下のことがわかる。

1) 風速分布をみると、上層風速は約6.5m/sでほぼ一様であるのに対して、汀線から陸側に移るにつれ、次第に速度欠損部領域が拡大しており、内部境界層が明瞭

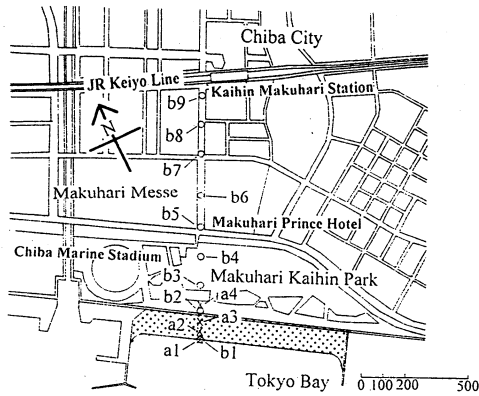


図-1 現地観測実施地点(千葉市美浜区幕張海滨公園)

表-1 主要観測項目・機器・記録間隔

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

に発達している。

2) 気温は、上層ならびに汀線付近の底層で29℃程度であるのに対し、a3地点では底層で34℃にまで上昇している。

3) 水蒸気量(絶対湿度)は逆に、汀線付近の底層で23g/m³程度であるものが、a3地点では底層で21g/m³程度にまで減少している。

これらのことは、海風は海上では冷却・湿潤化されているものの、砂浜上での内部境界層の発達に伴って、汀線から流下するにつれて、気温・水蒸気量も変化し、次第に加熱・乾燥化されていることを示している。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。

これらから、海岸の大気環境の基本的な特性をまとめると、図-3のようになる。すなわち、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(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、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

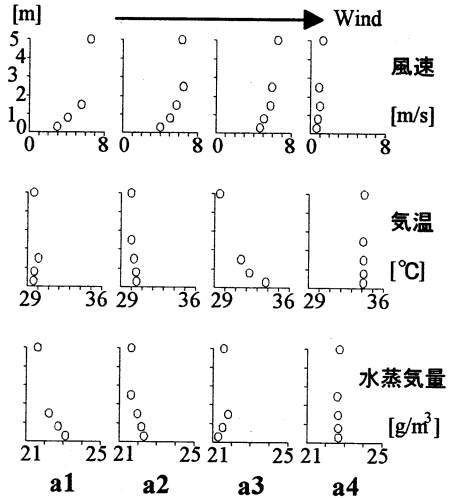


図-2 風速・気温・湿度の鉛直分布(午後12時)

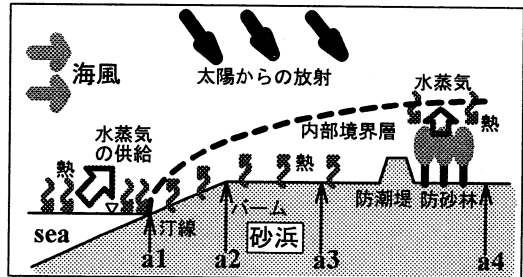


図-3 夏季の砂浜海岸の大気特性の概念図

うきわめて複雑な場を構成している。特に、地表面付近の空間は、汀線から明瞭に発達している運動量・温度・水蒸気の内部境界層の中に含まれている。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、汀線からの距離および身長スケールでの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、汀線近く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⁴⁾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る。図-4と図-5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、対象とする表面に流出入する熱量、すなわち正味放射量、顕熱

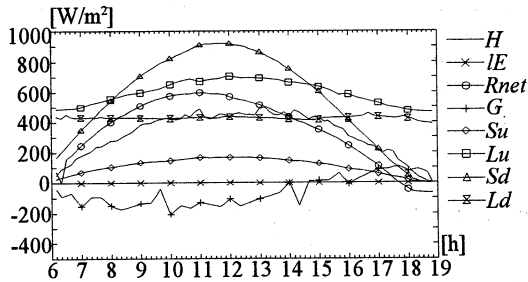


図-4 乾燥砂面上に位置するa3地点での熱収支

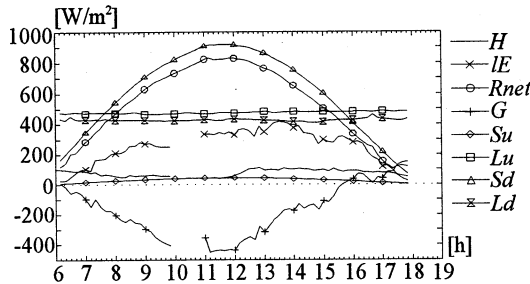


図-5 湿潤砂面上に位置するa1地点での熱収支

フラックス、潜熱フラックス、表面から地中への熱伝導量は平衡していると仮定できるので、式(1)が成り立つ。ただし、左辺の正味放射量は表面が獲得する放射エネルギーであり、式(2)で表される。

$$R_{net} = H + IE + G \quad (1)$$

$$R_{net} = Sd + Su + Ld + Lu = (1 - \alpha)Sd + Ld - \epsilon \cdot \sigma T_s^4 \quad (2)$$

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 :地中熱伝導量(以上 $[W/m^2]$)、 T_s :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⁹⁾により算定している。図を見ると、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おり、 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。これと比べてa1地点では、 H は相対的に小さく抑えられており、逆に、潜熱フラックス IE および地中熱伝導量 G が大きくなっている。

以上の結果から、地表面付近では、乾燥砂面はこの大きな顕熱フラックス H によって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 がほぼゼロであることが、大気の乾燥化に大きく寄与していることがわかる。

次に、顕熱フラックス H の大きさ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

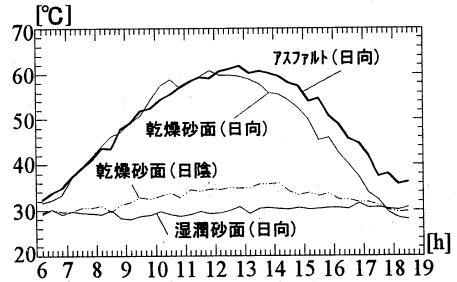


図-6 種々の被覆条件での表面温度の時間変化

化を調べた(図-6参照)。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⁵⁾の測定結果(最大 $57^{\circ}C$)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、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、砂浜表層部の蓄熱効果は低く、蓄熱は地表面ごく近傍に限られていると考えられる。

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 $30^{\circ}C$ 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. 微気象データに基づく温熱環境解析

(1) 人体温熱環境指標

アメニティ環境としての砂浜海岸空間を、微気象および温熱環境面から定量的に評価することを試みる。ここでは、生気象学・建築学などの分野で活発に研究されている「温熱環境指標」を海岸空間評価尺度として用いる。この温熱環境指標を用いることにより、前節で示したさまざまな微気象・温熱特性を、人体表面での熱フラックス収支の形で、統合された一つのパラメータとして空間評価を行うことができる。しかし、従来の温熱環境指標の多くは、屋内空間を主たる評価対象として構築されており、環境変動の大きい屋外空間においても適用可能な指標は少ない。

本研究では、既存の指標の中でも、海岸空間において適用できると考えられる「人体過剰熱フラックス(EHF)」と「標準有効温度(SET^*)^{6,7)}」、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人体の温熱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、*EHF*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、*EHF*を中心に検討を行った。以下に、本研究での*EHF*値の導出背景および算定方法について述べる。

(2) 人体過剰熱フラックス(*EHF*)について

温熱環境指標を人体熱収支の立場から定式化する基本的な枠組みは、Fanger⁹⁾によって示されている。その後、Burt *et al.*¹⁰⁾や中村・平岡¹¹⁾はFanger⁹⁾の熱収支式をベースとしつつ、それを屋外環境下での温熱環境評価に用いることを試みている。特に中村・平岡¹¹⁾は、Fanger⁹⁾の取り扱いにおける人体の熱平衡状態の前提をはずし、平衡状態からの残差を表わす熱フラックス(一般に「熱負荷」と呼ばれている)を屋外の温熱環境指標として用いることを提案している。

中村・平岡¹¹⁾は、この考え方に基づいて、数値シミュレーションにより屋外温熱環境の解析を試みているが、最近、神田・土屋¹²⁾は、屋外実測データに基づいた解析を、基本的に中村・平岡¹¹⁾と同じ取り扱いによって行っている。本研究でも同様の解析を行うが、本来、人体の熱的応答も含んで決まる上記の残差フラックスを「熱負荷」と呼ぶことには若干問題があるので、ここでは、人体過剰熱フラックス(*EHF*: excess heat flux)と呼ぶ(著者等は先にこの量を「人体著熱フラックス(*HS*)」と呼んでいるが¹³⁾、今後は、内容をより適切に表現するこの「人体過剰熱フラックス(*EHF*)」に改めることにする)。そして、現地での微気象データに基づいて*EHF*を具体的に算出することを試みる。

この*EHF*は、人体表面を平均的に通過するある瞬間の入力熱フラックス(主に放射)と出力熱フラックス(主に気流による顕熱・潜熱損失)の差を見積もったものである。実際の人体は、発汗等の様々な生理機能によって熱平衡を保持しようとする。しかし、屋外空間、特に砂浜上では、日射などの入力熱フラックスが大きいため、砂浜上では、その環境におかれた瞬間の人体は熱的非平衡状態にある。そのため、砂浜上の人体では、*EHF*はゼロではない有意な値を持つことになる。これに対して*SET**は、屋内環境下での適用を前提としているため、人体の熱的平衡状態を仮定している。したがって、屋外環境下に用いた場合に得られる値は、あくまで屋内環境からのいわば外挿値である。

*EHF*値の推定は、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行うことを試みた。

まず、*EHF*算定の基礎式としては、屋外を対象としたBurt *et al.*¹⁰⁾にならない、Fanger⁹⁾の人体熱収支式をフルな形で用いた。

$$EHF = Rn_{man} + M - (H_{res} + H_{sk} + I_{Eres} + I_{Esk} + I_{Esw}) \quad (3)$$

ここに、*Rn_{man}*: 人体に入射する正味放射量、*M*: 代謝量、*H_{res}*、*I_{Eres}*: 呼吸による顕熱、潜熱損失量、*H_{sk}*: 皮膚からの顕熱損失量、*I_{Esk}*: 不感蒸泄量、*I_{Esw}*: 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過剰熱フラックス*EHF*が推定される。この*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*Rn_{man}*項に各々反映される。

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*H_{sk}*中の交換係数は中村・平岡¹¹⁾が用いたものと同じものを用いた。また、*I_{Esw}*、*I_{Esk}*の評価は、人体の生理機能(発汗)を反映させたGagge *et al.*⁷⁾の2-Node Modelによって*skin wettedness*と同時に算定した。呼吸項*H_{res}*、*I_{Eres}*は、Burt *et al.*¹⁰⁾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、屋内温熱環境の測定に頻繁に使われるグローブ温度計を用いる方法¹²⁾によって行った。

(3) 現地データに対する各指標値の特性

図-7に砂浜上日向での風速・風向・気温・絶対湿度の時間変化を、また、図-8-a, bに砂浜上日向と木陰での各指標値の時間変化を示す。ここで、*SET**や*EHF*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(1.0met)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。

(a) 不快指数(*DI*)・・・蒸し暑さの程度を表す指標である。80程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-8-b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「暑い」)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。

(b) 標準有効温度(*SET**)・・・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℃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)申告試験と良好に一致し、約27~28℃に快適感の上限があることが報告されている⁸⁾。つまり、これを上回ると暑熱感が顕著になると考えられる。図-8を見ると、*DI*による評価では暑熱感を示した砂浜での朝夕の時間帯や木陰においては、人体への直達日射量が少ないため、

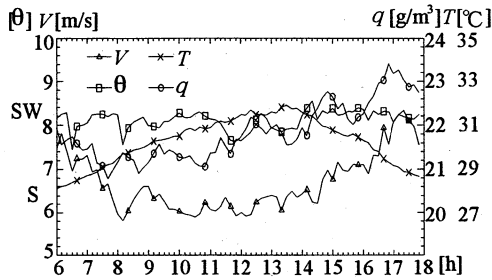


図-7 砂浜日向(a3地点)での風速 V ・風向 θ
・気温 T ・絶対湿度 q の日内変化

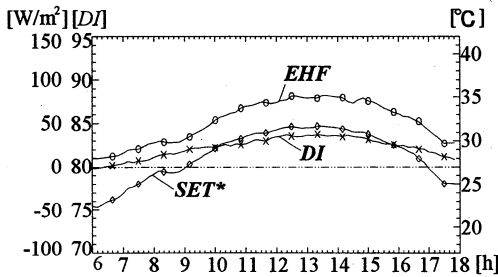


図-8-a 各指標値の砂浜日向での日内変化

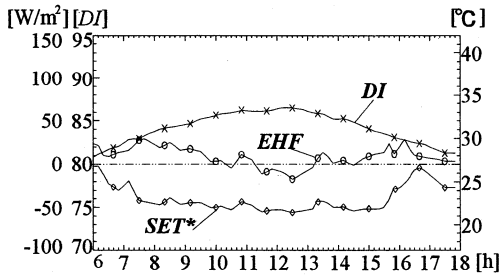


図-8-b 各指標値の木陰での日内変化

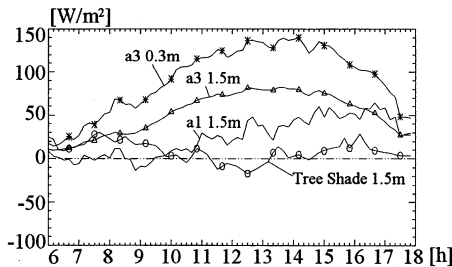


図-9 砂浜上各地点でのEHF値の日内変化

SET*ではこの上限値を下回っており、すなわち暑熱感が緩和されたことを示している。また、図-8-a(砂浜の日向)では、このSET*を用いても先の上限値をはるかに越えた32℃にまで達している。このことから、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、人間にとって暑熱感の著しい環境になっていると推察される。

(c) 人体過剰熱フラックス(EHF)……人体熱収支の残差項(非平衡項)であるEHFの大小は、結果として平均体表面温度の時間変化をもたらし、EHF>0のときは、平均体表面温度がある上限値に達し、人体は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ストレスはゼロであり、熱的に中立な状態を表す。これらのthresholdの具体的な値は今後、申告試験などによって決定していく必要があるが、図-8-a(砂浜日向)を見ると、EHF値は最大で約80[W/m²]となっており、人体にかなりの熱的負荷がかかっていることがわかる。これに対して、図-8-b(木陰)ではEHF=0前後の値をとっている。

図-9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、代謝量は高さによらず一定値1.0[met]を与えた)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低い値を示している。

これらの結果は、砂浜上の内部境界層の発達パターンとその空間規模を考慮することによって理解される。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、汀線近傍で比較的冷涼な海風は、砂面上を吹送するにつれて、また地表面に近いほどEHF値を増大させる形で温熱的に急激な変質を受けることになる。そして、内部境界層の鉛直スケールが、砂浜上で高々2m前後であることが、わずかな鉛直位置の違いにより、EHF値を大きく変化させる結果となっている。

4. 温熱環境からみた海岸空間デザインの課題

以上では、トータル空間デザイン論の構築に向けた夏季海岸空間評価の一手法として、3つの温熱環境指標(EHF, SET*, DI)による解析を行った。その結果、気温・湿度に加えて放射や風が夏季海浜の温熱環境に顕著な影響を及ぼすことが示された。また、夏季の海岸空間のうち、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暑熱感の著しい空間で、人体は環境から大きな熱的ストレスを受けることになるのに対し、海からの冷涼な風を直接感じることで汀線近傍や砂浜背後地の木陰などは比較的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

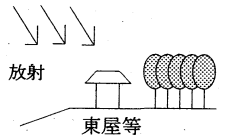
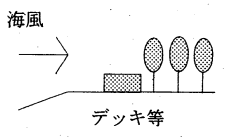
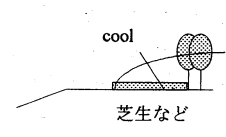
<p>放射環境の制御</p> <p>日射光の遮蔽要素 (樹木・構造物)の配置</p>	 <p>放射 東屋等</p>
<p>通風の制御</p> <p>植生配置・植生密度 構造物の高上げ</p>	 <p>海風 デッキ等</p>
<p>地表面条件の制御</p> <p>浜幅・地表面条件の改変</p>	 <p>cool 芝生など</p>

図-10 EHF値を制御する海岸空間デザイン要素例

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。

この課題に対するいくつかの可能性として、図-10に例を示すような植栽・構造物配置などのデザイン要素を組み合わせることによって、海岸空間デザインに温熱環境の視点を取込んでいくことが考えられる。これらは、造園デザイン的にはありふれたデザイン要素であるが、本研究での知見を踏まえて、微気象・温熱的観点から評価すると、以下のような新たな観点を空間デザイン論に持ち込むことができる。

- ①放射環境の制御：先にふれた天蓋・木陰といった日射光の遮蔽要素は、人体熱収支の放射項を低減させ、EHF値を大幅に緩和する場所を提供する。
- ②通風の制御：通風に関わる植生やデッキなどの配置により、内部境界層外の冷涼な海風を感じることで、できる空間を創出する。
- ③地表面条件の制御：芝生等によって地表面条件を改変することによって、地表面付近の気温を低下させることや、浜幅の改変によって内部境界層の厚さを制御し、加熱・乾燥効果の影響範囲をコントロールする。

ここで重要なことは、このような温熱環境的な視点を海岸空間デザインに具体的に活かしていくためには、何らかの定量的な温熱環境予測手法が確立されなければいけないということである。温熱環境デザインでは、景観デザインの場合のようにデザイン上の検討を絵図面上で簡単に行うわけにはいかない。対象とするデザ

イン案を温熱環境面から評価するには、内部境界層その他の微気象環境を定量的に具体的に知る必要があり、それらの結果をさらにEHFのような定量的温熱環境指標によって統合した形で評価せねばならない。具体的には、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」をデザイン支援ツールとして開発することが不可欠となる。本研究で得られた様々な定量的な知見は、そのためのベースとなり得るものであるが、著者らは現在、その開発を実際に試みており、近々にその成果を発表する予定である¹⁴⁾。

5. おわりに

本論文では、夏季の砂浜海岸空間を特徴づける重要な要素の一つであるにも関わらず、これまでほとんど具体的に議論されることのない微気象に着目し、現地観測によってこれらを詳細に把握し、解析することを試みた。以下に、本研究で得られた主要な結論を示す。

- (1)夏季海岸の砂浜は周辺の大気に対する顕著な加熱・乾燥作用を有するが、その具体的なプロセスは、汀線から発達する内部境界層の形成の形で現れる。この内部境界層の砂浜上での鉛直スケールは高々2,3mで、ヒューマン・スケールと同程度である。
- (2)砂浜上のこのような気象学的空間構造は、人体の温熱環境においてもかなり特徴的な空間依存性をもたらす。すなわち、温熱空間評価尺度として導入した温熱環境指標EHF値の解析結果によれば、汀線近傍は冷涼な海風の影響を強く受けてEHF値が比較的小さいのに対し、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EHF値が増大し、暑熱感が著しい空間となる。
- (3)このように、夏季の海岸空間は、内部境界層の外でEHF値が著しく異なっており、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。しかも、このコントラスト構造は、砂浜上での内部境界層のスケールに対応して、ヒューマン・スケールに近いスケールで存在する形になっている。

本論文では、さらに、これらの知見をもとに、海岸空間デザインにこのような温熱環境的な視点を導入する場合のデザイン要素例を示し、それによって上記の温熱環境的コントラストの演出を具体化する可能性について論じた。また、そのようなデザインを実際に行っていく上で、何らかの定量的な温熱環境予測手法すなわち「温熱環境シミュレータ」を、デザイン支援ツールとして開発していくことが不可欠であることを示した。

もちろん、本論文の冒頭で述べた「トータル空間デザイン」の実現のためには、デザイン支援シミュレータとして、この「温熱環境シミュレータ」だけでなく、他にも、「景観シミュレータ」、「音環境シミュレータ」、「水質・生態環境シミュレータ」、「漂砂・飛砂・飛塩シミュレータ」など、海岸空間を特徴づける様々な環境要素に関するシミュレータが必要となる。著者等は、すでにこれらの一部について開発を行っているが^{2),14),15)}、最終的には、これらのすべてのシミュレータを実現していきたいと考えている。そのためには、今後さらに、それぞれの環境要素の実態をできるだけ具体的にかつ定量的に明らかにしていくことが必要になる。

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) 灘岡和夫・徳見敏夫：海岸環境構成要素としての波の音について，土木計画学研究・講演集，No.11，pp.317-324，1988.
- 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ー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) 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.
- 5) 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.
- 6) ASHRAE:ASHRAE Handbook of fundamentals, Chap.8, 1993.
- 7) Gagge, A. P., et al.: A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Transaction*, pp.709-73, 1986.
- 8) 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.
- 9) Fanger, O.P.: Thermal comfort, *Danish Technical Press*, 1970.
- 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) 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熱環境解析，土木学会論文集，No.509/II-30, pp.35-44, 1995.
- 13) 灘岡和夫・内山雄介・山下哲弘：微気象からみた夏季の砂浜海岸の快適性について，土木計画学研究・講演集，No.17，pp.1087-1090，1995.
- 14) 灘岡和夫・内山雄介・山下哲弘：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，土木学会論文集，II(投稿中).
- 15) 灘岡和夫・星野文夫・田端竹千穂・児玉勝美・小野信良：新たなデザインコンセプトに基づく人工海浜CG景観設計の試み，土木計画学研究・講演集，No.16(1)，pp.357-363，1993.

夏季砂浜海岸空間の微気象特性と人体温熱環境について

灘岡和夫・内山雄介・山下哲弘

防災面上の基本要請に加えて高いアメニティ性が求められる海岸空間でのデザインは、従来の視覚的側面に偏向した景観デザインの枠組みを越えて、固有の空間特性や人間の五感による空間認識プロセスを統合して議論されるべきであるとの基本認識のもとに、海岸空間を特徴付ける重要なファクターの一つであるにも関わらずこれまで議論されることのなかった砂浜海岸の微気象と温熱環境特性を、現地データの解析によって明らかにし、さらに人体温熱快適性の議論に結び付けることを試みた。その結果、夏季砂浜海岸では汀線から内部境界層が明瞭に発達し、砂浜が周辺大気に対する顕著な加熱・乾燥作用を及ぼすことから、内部境界層内では有意な大きさの昇温、ならびに湿度低下が生じることが示された。また、人体の熱収支解析に基づく温熱環境指標の解析により、この内部境界層の内外で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ことなどを明らかにした。

A Micrometeorological Study on Thermal Environments on Sandy Beaches in Summer

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 *EHF* calculated with the observed data show that the sandy beach and its surroundings provide a highly contrasted spatial structure in thermal comfort.