

微気象からみた夏季の砂浜海岸の快適性について*

A Micrometeorological Study on Thermal Comfort on Sandy Beaches in Summer

灘岡和夫**・内山雄介***・山下哲弘****

Kazuo NADAOKA, Yusuke UCHIYAMA and Tetsuhiro YAMASHITA

1. はじめに

海岸の「景観デザイン」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、このような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魅力とは、白い砂浜、松林、打ち寄せる波の音、潮風、海岸生態系、あるいは夏の日差しなどであるが、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」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)}。そして、本研究では特に、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。さらに、これを人間の「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した。

2. 夏季砂浜海岸での現地観測

(1) 観測の概要

図-1に観測場所、表-1に観測項目等の一覧(一部)を示す。観測は、千葉市美浜区の幕張海滨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、天候は晴れであった。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。

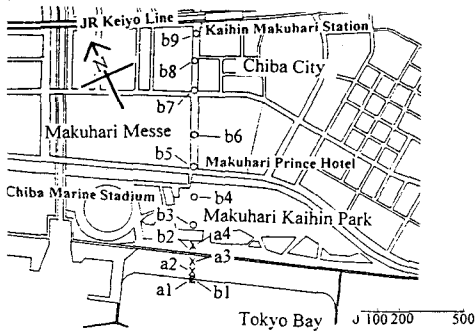


図-1 観測場所

表-1 観測項目・機器・測定間隔の一部

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1s 1分平均
	湿度	高分子誘電率式	
	風速	三杯式風速計	
a3のみ	日射量	日射計2台	サンプリング1s 1分平均
	赤外放射量	赤外放射計	
	正味放射量	放射収支計	
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	

* Key Words :砂浜海岸、微気象、快適性、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)

*** 学生会員:東京工業大学理工学研究科土木工学専攻

****学生会員:東京工業大学工学部土木工学科

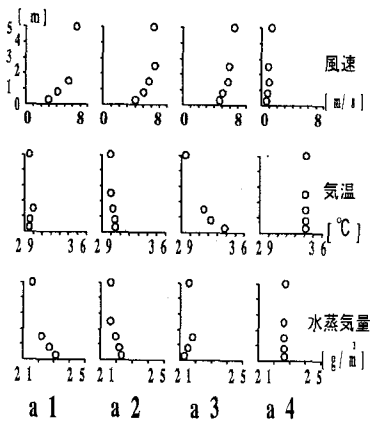


図-2 風速・気温・湿度の鉛直分布（午後12時）

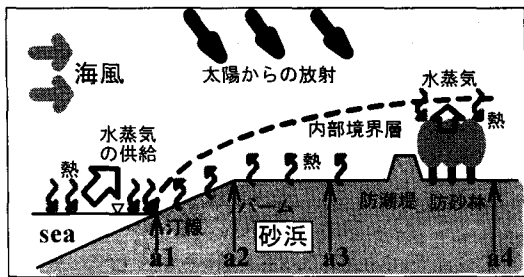


図-3 夏季の砂浜海岸の大気特性の概念図

(2) 砂浜表面付近の大気環境

図-2は、12時での（傾向は他の時間帯でも同様であった）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。

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。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。

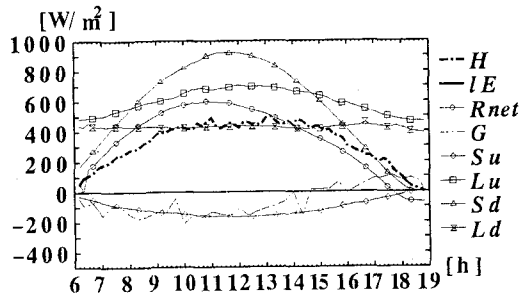


図-4 乾燥砂面上に位置するa3地点での熱収支

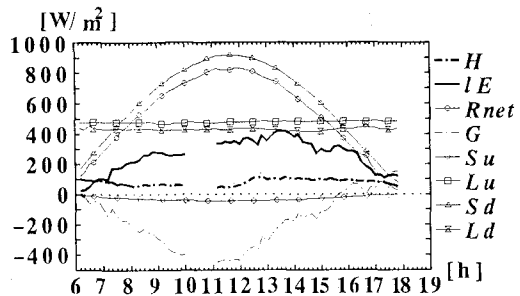


図-5 湿潤砂面上に位置するa1地点での熱収支

(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、次式、

$$R_{net} = H + LE + G$$

に従う。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 LE （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 LE および地中伝熱量 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、

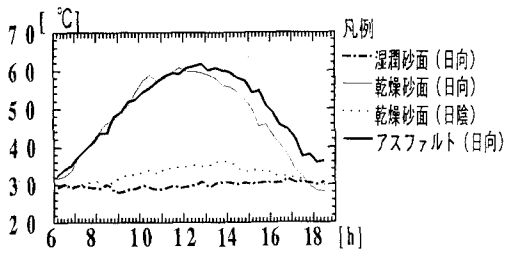


図-6 種々の被覆条件での表面温度の時間変化

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。

そこで次に、この顕熱フラックス 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、砂浜はアスファルトにきわめて類似した熱的特性を有していることがわかる。

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も低くなっている。これは、直達日射光の有無が表面温度に支配的であることを示すものである。表面温度は、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

(1) 快適性指標

以上で述べてきた微気象特性は、人間の快適性に関す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。空調学・建築学などの分野で研究されている快適性指標は主に屋内空間を対象としており、環境変動の大きい屋外空間において適用が可能な指標はきわめて少ない。そこでここでは、その中でも、屋外環境での使用可能性が報告されている指標として「標準有効温度(SET^*)」(詳細は文献5),6))、環境が人体に与えるストレスを物理量として直接見積もった「人体貯熱量」(HS)、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各指標値を算定した結果について、各指標の持つ意味と併せて、以下に述べる。

(2) 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・気温・湿度・グローブ温度の時間変化を、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。快適感の上限と考えられる値を図-8中の点線に示している。ここで、 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(1.0met)の条件を与えた。

(a) 不快指数(DI)……蒸し暑さの程度を表す「環境指標」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-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。

(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°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)申告試験と良好に一致し、約27~28°Cに快適感の上限があることが報告されている⁷⁾。図-8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では人体への直達日射量が少ないため、 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。また、図-8-a(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、人間にとってかなり「暑い」環境になっていると言える。

(c) 人体貯熱量(HS)……人体熱収支解析に基づいて算出される、暑熱環境下での人体に蓄えられる熱フラックス(単位は $[W/m^2]$ 、算定式は文献8)に準ずる)である。 $HS>0$ のときは、発汗作用だけでは体温調節ができず、人体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。図-8-a(砂

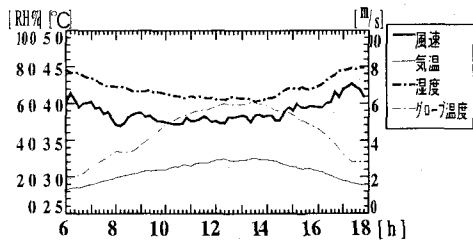


図-7 砂浜日向での気象条件の時間変化

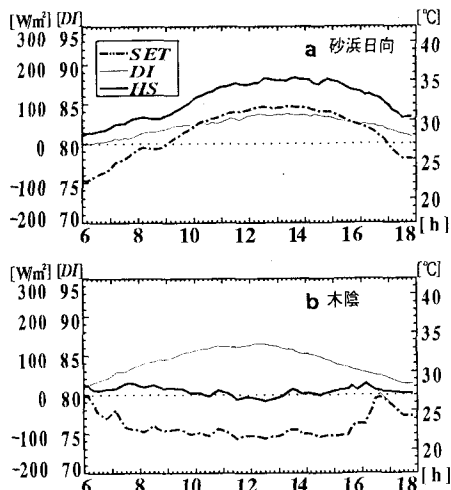


図-8 各指標値の砂浜日向(a)・木陰(b)での時間変化

浜日向)を見ると、 HS は最大で $166[W/m^2]$ 程度となっているが、これは人体にとって、約 $21^{\circ}C$ の環境下において時速 $5km$ 程度で走っている状態の熱量に相当する。

以上、3つの快適性指標の解析結果から、夏季の海岸空間を温熱環境の面から見るとむしろ非常に不快な空間であり、人間は環境から大きなストレスを受けていることが明らかになった。そして、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。

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・木陰などの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、芝生など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、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が温熱環境的にはかなり「不快」空間であることが示された。

このことは、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極めて重要な意味を持つ。そもそも、温熱環境に関する快適性指標の多くは、日常空間を主たる評価対象として開発されたものである。したがって、ここでの快適性指標が総じて「不快」という結果を示したからといって、単純に海岸空間を「不快」と決めつけるのは短絡的である。これはあくまでも、日常空間の延長として海岸空間の温熱環境を見たときに「不快」であるということにすぎない。むしろ、なぜそのような「不快」な海岸空間に多くの人々が引きつけられるのかを考えなければならない。つまり、今後、海岸空間の持つ特殊性をよりトータルな観点から把握していく必要がある。

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) 例えば、ASHRAE：ASHRAE Handbook of fundamentals, Chapter 8, 1993.
- 6) Gagge, A.P., et al. : A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Transaction*, pp. 709-731, 1986.
- 7) 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.
- 8) 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.