

脳波計測と官能試験による河川空間等の快適性の定量化
Quantification of comfortable shorelines by means of
electroencephalogram measurements and psychological response tests

木内 豪^{*}、小林裕明^{**}、神田 学^{***}、栗城 稔^{****}

By Tsuyoshi KINOCHI, Hiroaki KOBAYASHI,
Manabu KANDA and Minoru KURIKI

This paper describes the relation between comfort of shorelines and psychological and physiological human responses deduced from the measurement results of electroencephalogram (EEG) and electrocardiogram (ECG), and questionnaire on comfort sensation and other related sensations. Regression analysis showed that the comfort sensation depends on aesthetics of landscape, noise, smell and temperature sensations under specific situations. It was found that the content ratio of some components of EEG frequency spectrum has a plausible relation to the comfort sensation, and shorelines are relatively comfortable in psychological and physiological senses

Key words: river environment, comfort, shorelines, psychological response, EEG

1. はじめに

日常生活で出会う河川や湖沼などの水辺には貨幣では表現し得ない様々な価値が潜み、我々に多くの恩恵をもたらしてくれる。水辺で得られるやすらぎ・快適性もその一つで、晴れた日に何気なく水辺を散歩し、さわやかな風を体に受け、小鳥のさえずりを耳にすると非常に心地よい気分になる。水辺は人工物が蔓延る都市の生活空間ではとりわけ貴重な存在として今後も大切に保存していかなければならないが、往々にして人間の手が加わる水辺空間の整備では空間を構成していた景色・音・気候・香りなどの要素を何らかの形で変えてしまうことが多く、ひいては快適性を失ってしまうことになる。

筆者らは快適な都市の水辺空間をどのような評価に基づき計画・設計すればよいのかを検討するため、河川や沼地などを主な対象とした環境調査を実施してきた。この調査では複合的に存在する熱環境・音環境など（様々な環境を包含して複合環境と呼ぶ）の物理量を測定するとともに、その時の人間の心理的な反応をいくつかの感覚尺度（快適感など）に分けて申告実験により把握し、快適性の支配構造を左右する心理反応と物理量との対応や感覚尺度間の関係について整理してきた¹⁾。本論文では、筆者らの従前の調査を拡張して行った水辺空間の複合環境調査結果について述べた後、水辺空間における環境と人間のつながりをより明確にするために行った人間の生理反応の測定結果について報告する。生理反応の測定では自律神経系の反応や脳波の計測を行っており、最近いわれるようになった水辺が心療効果を有するのではないかということについて実証を試みた。

2. 複合環境調査の概要

複合環境調査と心理反応に関する官能試験（被験者実験）は表-1に示す生理反応測定時並びに多摩川兵庫島周辺（H7.9.5）、仙台市広瀬川（H7.8.3）で行った。なお、多摩川と広瀬川では生理反応の測定は行っていない。

複合環境の測定項目と官能試験における心理反応の回答項目を図-1に示す。官能試験では5名（生理反応測定時は2名）の被験者が河川空間内と周辺市街地の数箇所に各5分間立位状態で居た後、図-1の回答項目ごとに6～7段階の選択肢より最も適当と思われるものを選んでもらった。昨年8月と本年3月にも同様の調査を実施している²⁾が、測定項目や官能試験における回答項目に追加・見直しを行い、音の周波数分布、臭気強度、照度、明度感、緑量感、人工物感、色彩の調和感、景色の美感、落ちつきを今回新たに加えた。

^{*} 工修 建設省土木研究所企画部企画課（〒305 茨城県つくば市大字旭一番地） ^{**} 同河川部都市河川研究室

^{***} 工博 東京工業大学工学部開発システム工学科 ^{****} 工修 建設省土木研究所河川部都市河川研究室

過去に実施した現地調査の分析結果によると、複合環境の中でも熱環境(温冷感や発汗感)・音環境(喧騒感)・視環境(開放感)がそれぞれ同程度に快適感に影響を及ぼすことがわかっている。また、心理量と物理量との関係については、例えば、神田ら³⁾が人体への熱負荷と発汗作用とのフィードバック機構を考慮した熱収支解析を行い、熱環境における温冷感を評価するための人間の体感指標の屋外環境への適用性の検討を行っている。ここでは、今回の調査結果から一次的な感覚量と快適感との関係について分析した結果を示すとともに、水辺空間における快適性評価の一般性について述べる。

図-2は回答項目を追加して行った官能試験結果をもとに快適感を表す重回帰式を求め、回帰式と申告値の比較を行ったものである(快適感の数字は図-1の選択肢に対応している)。重回帰式に用いたのは景色の美観、喧騒感、芳香感、温冷感で、偏相関係数はそれぞれ-0.60、-0.39、0.39、0.32である。図中、□で囲んである水際・堤防上では相対的に快適性が高くなっているが、環境条件によっては必ずしも快適感が高いとは限らないことがわかった。また、既報で快適性との相関の高かった温冷感、喧騒感、開放感のみを用いた重回帰式で評価すると図-3のようになることから、今回の調査では匂いや景色の影響が相対的に高くなっていることがわかる。昨年度の結果は気温が27℃～39℃の範囲の回答結果に基づくものであるのに対し、今回の測定時の気象条件は広瀬川で平均気温が28℃、表-1の測定時も20℃から28℃であり、このような状況のため熱環境の影響が相対的に低くなったと考えられる。このことは、より一般的な快適性の評価指標を見いだすためには様々な条件下での多くのデータの蓄積と、複合環境を表す物理指標—一次感覚量—快適性のつながりの解明が必要であるとともに、盛夏における熱環境の重要性を物語っている。

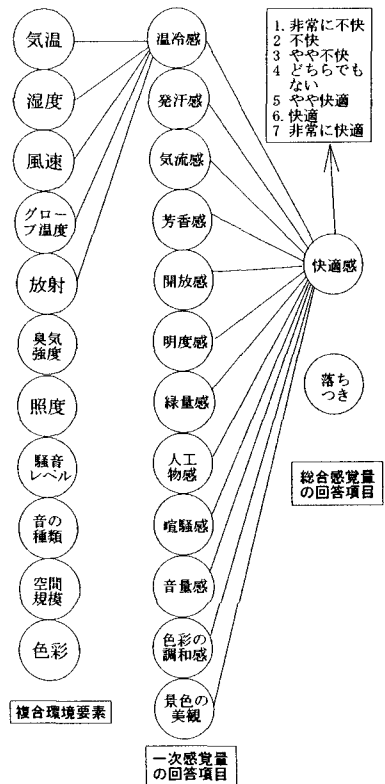


図-1 外部空間の複合環境—心理反応の関係

3. 複合環境下の水辺における心理反応・生理反応の測定

3. 1 概要

快適感の申告の客観性を検証するとともに、生理的に安定した状態をもたらすための環境条件は何か、水辺はどのような条件を満たすのか、いわゆる水辺の心療効果というものは存在するのか、といった点を明らかにするため、外部環境条件、快適感などの心理反応、生理反応の同時調査を行った。

生理反応にも様々なものがあるが、今回の調査では、既に快適性との関連性が指摘されている脳波を主な測定対象とした。

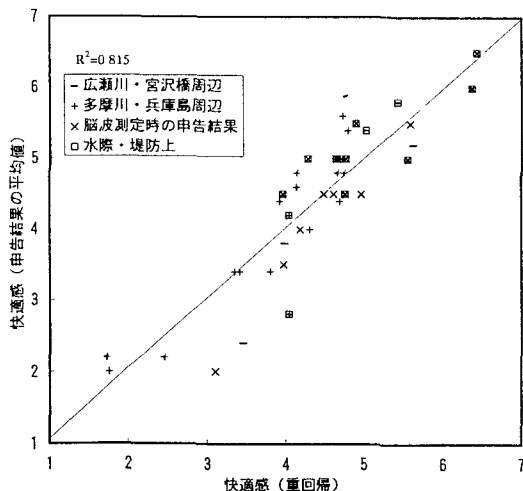


図-2 快適感の回帰結果と申告値の関係 (4項目)

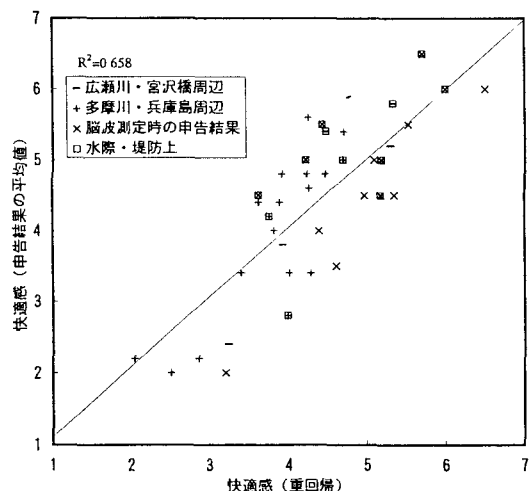


図-3 快適感の回帰結果と申告値の関係 (3項目)

また、自律神経反射の心電図、血圧、脈拍と体温も測定した。外部環境条件に応じて自律神経反射が起こり、さらに、これで不十分な場合には快・不快の情動を生起させるから、自律神経反射は快適性に影響する一次感覚量との関連性が強く、また、脳波は快適性そのものとの結びつきが大きいと予想される。

脳波記録には発汗の影響を受けるとアーチファクト(脳波記録の中に混入する脳の電位変動以外の電位変動など)が発生するので、快適性と熱環境との関連性については脳波を用いるのは不適當であると考えられる。熱環境との関連を見る生理反応としては発汗量、血流量、体表面温度を利用する方法が考えられる。

3. 2 生理反応の測定方法

生理反応・心理反応・複合環境の同時測定は5日間にわたって行った。測定場所等を表-1に示す。測定6では堤防上の測定時に小雨が降ってきたため、それ以降に予定していた地点の測定は中止した。

被験者は健康な23歳の男女各1名である。被験者はサマーベッド(場所によっては椅子、ヘッドレスト付きが望ましいが今回は会議椅子を使用)に腰掛け5分間脳波の測定を行った。まず閉眼状態から始めて1分毎に閉眼と開眼をくり返し、3分間の閉眼時と2分間の開眼時の記録を得た。開眼時は前方・視野の範囲を眺めさせ、なるべく瞬きを少なくするように指示した。心電図は脳波計の入力チャンネル数の都合から、5分間の内後半の2分間だけ測定した。脈拍・血圧は脳波測定の前後に1回ずつ測り、体温測定と心理反応の申告は5分間終了時のみに行った。複合環境の測定も脳波の測定時間帯に行った。測定項目と使用機器を表-2に示す。

表-1 測定日時と測定場所の概要(1995年9月～10月)

	測定日	測定時間	時間内天候	気温	場所	地点種別
測定1	9. 27	13:40-16:10	曇り後晴れ	25. 9-26. 8	つくば市洞峰公園	駐車場、緑陰、芝地(サッカー場)、洞峰沿水際
測定2	9. 28	10:35-11:25	晴れ	26. 5	墨田川・桜橋下流	右岸親水テラス上
測定3	9. 28	14:45-17:00	晴れ	26. 7-28. 0	荒川西新井橋下流	右岸水際、堤防法尻、堤防上(堤内側・堤外側)
測定4	10. 3	14:50-17:40	晴れ	23. 9-27. 1	江戸川(松戸市)	堤内地(松戸排水機場敷地)、左岸堤防上、高水敷、水際
測定5	10. 4	14:40-16:55	曇り	20. 1-24. 3	裏筑波・つくば市	裏筑波男女川(溪流)、森林、国道408号沿道
測定6	10. 5	14:15-16:25	曇り後小雨	23. 1-24. 5	江戸川	左岸水際、堤防上(測定4と同一地点)

表-2 複合環境の測定概要

測定項目	使用機器・条件
気温・湿度	白金温度計・静電容量式湿度計、高度1. 0m
風速	三杯式微風速計
グローブ温度	直径150mm、高度1. 0m
音圧レベル等	普通騒音計(リオンNA-20) FFTアナライザー(小野測器CF-5210)
照度	ミノルタT1M
血圧/体温	オムロンHEM-755C/テルモ家庭用電子体温計
脳波/心電図	本文参照

表-3 脳波計の設定条件

設定条件	設定値
インピーダンスしきい値	40～50kΩ
フィルタ周波数(高域)	100 Hz (10/5のみ60Hz)
感度	50μV
サンプリングレート	100 Hz

グローブ温度計の値は平衡状態になるまで20分程度を要することから、各地点には20分程度前から設置しておいた。また、測定高さは被験者の頭部の高さとはほぼ等しくした。

脳波の測定には日本光電製生体アンプ(MME3132)を用い、データレコーダ(ソニー製PC-216A)に記録した。記録中はパソコン上で生体信号用ソフトBimutasにより脳波をモニターをしながら、アーチファクトの多少や脳波の状態を確認した。脳波の測定は国際式10-20法に基づき電極が配置されているエレクトロキャップ電極を用いて、16電極(FP1, FP2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5,

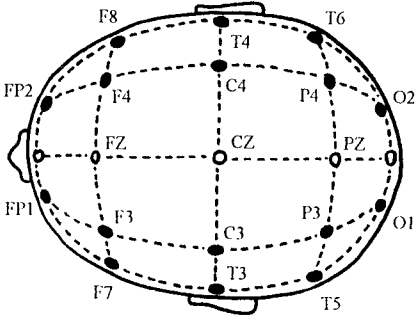


図-4 10-20法による電極の配置(16電極:黒丸)

T6)で行った(図-4)。脳波の導出は耳タブを基準電極とする基準電極導出法を用いた。その他の条件は表-3に示す。

3. 3 脳波と快適性の関係

頭皮で計測される脳波（頭皮上脳波）は数mV～数百mVまでの非常に微弱な1～60Hzの周波数の成分が重合した電位変動で、大脳の神経細胞の活動電位である。国際脳波学会用語委員会によると、脳波の各周波数成分の名称と出現時の特徴は表-4のようになっている。脳波に基づく快適性の評価の可能性についての吉田の研究⁹⁾によると、α波の周波数ゆらぎのスペクトルのうち、低周波数領域でのスペクトルの傾斜度と快－不快感情の間に対応があることが示唆されている。ここで、α波の周波数ゆらぎとは8～13Hzのフィルターを通過した脳波が基準電位を超える個々の時点間の時間幅の逆数（瞬時周波数）の時系列のことを意味している。本研究では、直接的に脳波の時系列記録のスペクトル解析を行い、脳波のパワースペクトルと快適感の申告結果との関係の有無について検討を行った。

パワースペクトルの算定は、5分間の測定の中の最後約1分間の閉眼時の脳波記録を用いてFFTにより行った。FFTの前処理として、諸々のアーチファクトの影響を取り除くため原則として4～20Hzのバンドパスフィルターをかけた。FFTの基本周波数幅は約0.1Hz、窓関数にはブラックマン窓を用い、平均回数は原則5回（一部データにラジオ電波が混入しているところについては1回のものもある）とした。ブラックマン窓は $Wn=0.423-0.498\cos(2\pi n/N)+0.0792\cos(4\pi n/N)$ ($0\leq n\leq N-1$)、 $Wn=0.0$ (前記以外)と表される。

まず、同一観測日の地点間の脳波のパワースペクトルについて比較してみる。図-5～8は測定5の裏筑波の溪流脇と土木研究所前の国道沿いでの男子被験者の脳波のパワースペクトルの一例を示したものである。なお、溪流脇と国道沿いではそれぞれ「非常に快適」と「不快」の申告をしている。これらより、P3、O1、F7、T3電極部位での脳波のパワースペクトルがピーク値を示す周波数（ピーク周波数）が溪流際の方でやや小さくなっていること、およびP3、O1では8～9Hz程度の間のパワースペクトル密度が高くなっていることがわかる。この2地点については他の電極部位でもピーク周波数の違いについては同様の傾向がみられた。次に、測定1の駐車場、水辺、芝地（サッカー場）について同様に比較してみる（図-9, 10）。なお、駐車場、水辺、芝地での快適感の申告結果はそれぞれ「どちらでもない」、「快適」、「やや快適」となっていた。この場合は、必ずしも駐車場、芝地、水辺の順に快適度が高くなるのに対応してピーク周波数が小さくなるという傾向は認められなかった。一方で、8～9Hzの周波数成分の占める割合が高くなっている傾向がみられた。8～9Hzという範囲はα波（8～13Hz）の下限であり、α波の表れやすい後頭部（O1：視覚野）、思考・認識を司る頂頭部（P3）でこのような変化がみられたということは、快適感という心理反応がα波の変化として表われた可能性が高く、前述の吉田の研究結果とも符合してくる。

以上の結果を踏まえて、パワースペクトル密度のなかで8～9Hzの周波数成分の占める割合（含有率）を求め、快適感の申告結果との関係を整理したのが図-11である。一部データでは快適感が比較的高いにもかかわらず含有率が低いものもあるが、O1, O2, P3, P4電極における8～9Hz成分の含有率の平均値と快適感との相関が高いことがわかる（相関係数0.81）。なお、他の電極での含有率と快適感との間にはほとんど相関が見られなかった。図-12は女性の被験者の脳波について図-11と同様にO1, O2, P3, P4電極における8～9Hz成分の含有率の平均値と快適感との関係を示したものである。土研前車道沿いでの含有率が極端に高くなっているのを除くと、快適性との相関が見られる。しかしながら、図-11と図-12から快適性と含有率の間の関係は被験者間で異なることがわかる。これは、脳波自体の個人差が大きいことに加えて、快適性の感じ方にも個人差が存在することによるものと考えられる。脳波と快適性の間のより一般的な関係を見いだすには多く被験者による現地データを集めて、個人差の影響の少ない評価尺度を見つける必要があると考えられる。

3. 4 心電図と快適性の関係

心電図は心筋の興奮に伴って時々刻々移り変わる心臓の電位現象である⁵⁾。一般的な心電図の波形は図-13のようになっている。心電図で最も高いピークを示すR波と次のR波の間隔（R-R間隔）はゆらいでおり、R-R間隔のばらつ

表-4 脳波の分類

名称	周波数帯	特徴
δ波	4Hz未満	正常成人では睡眠期意外に目立って出現することはない
θ波	4Hz以上8Hz未満	睡眠時に連続的に、高振幅に出現する
α波	8Hz以上13Hz以下	正常成人の安静・覚醒・閉眼時に後頭、頂頭部に優位に出現する波
β波	13Hzより高い	開眼や精神活動時にあたかもα波に置き代わって出現する

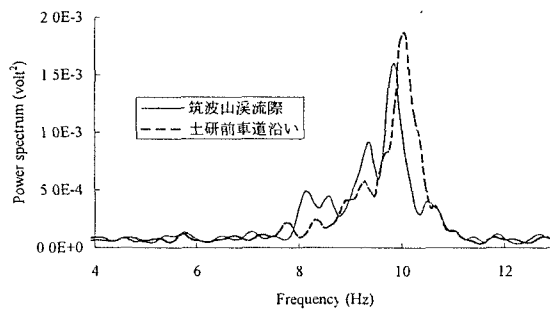


図-5 脳波のパワースペクトル (電極 P3)

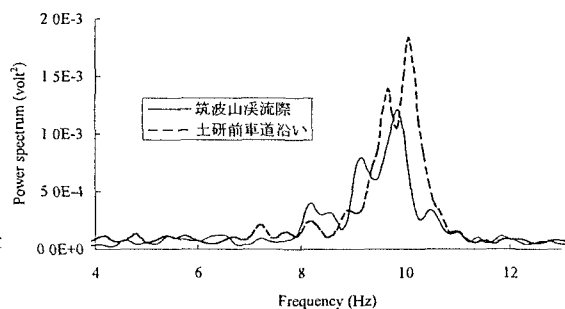


図-6 脳波のパワースペクトル (電極 O1)

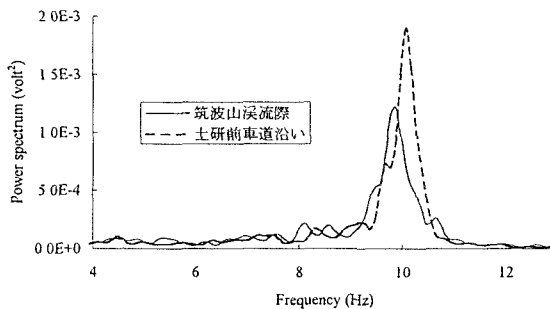


図-7 脳波のパワースペクトル (電極 F7)

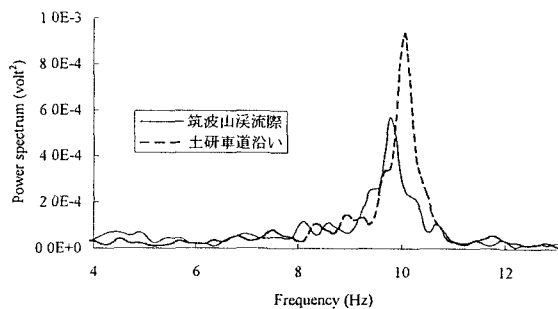


図-8 脳波のパワースペクトル (電極 T3)

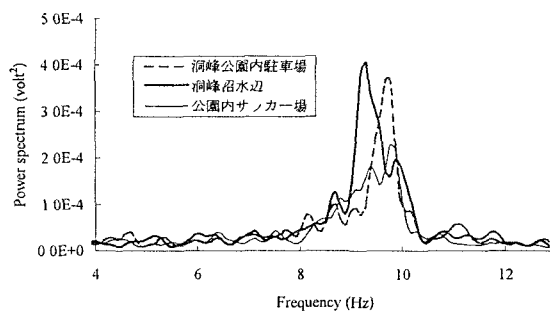


図-9 脳波のパワースペクトル (電極 P3)

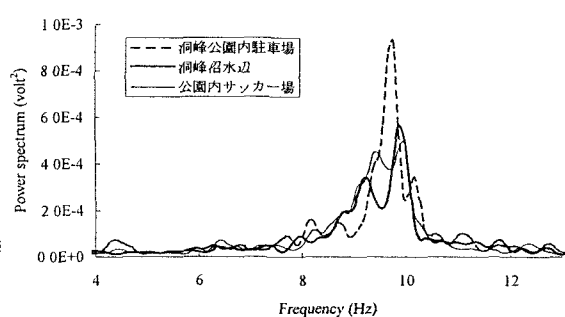


図-10 脳波のパワースペクトル (電極 O1)

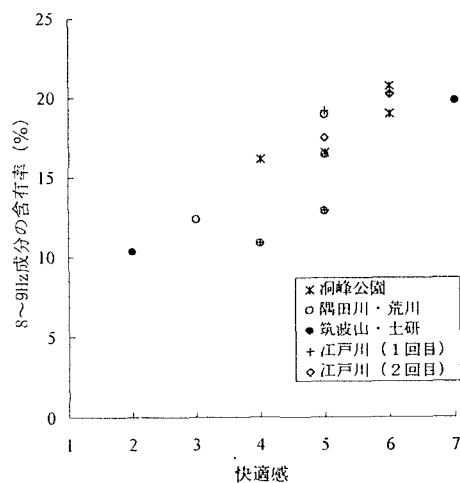


図-11 スペクトル含有率と快適感の関連性(男性)

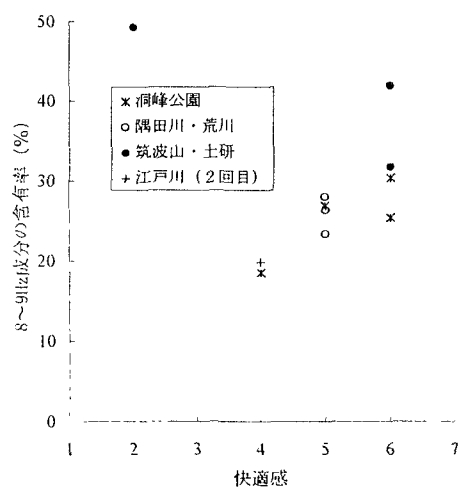


図-12 スペクトル含有率と快適感の関連性(女性)

き具合が集中力やストレス状態と関係していることが知られている⁶⁾。具体的には、軽度ストレス状態でR-R間隔が減少し、ゆらぎの程度も小さくなる⁶⁾。

今回の計測で得られた心電図についてR-R間隔を算出し時系列変化であらわしたものが図-14(男性被験者)である。図-14は計測1における3地点でのR-R間隔の時間変化を示しており、駐車場、サッカー場、水辺での快適感の申告値はそれぞれ「どちらでもない」「やや快適」「快適」であった。R-R間隔の時間平均値と快適感との関連性は無いが、水辺の方が低周波のゆらぎが表れている。しかし、異なる計測日のものをまとめて比較してみると、快適感の最も高かった筑波山・溪流脇でのR-R間隔はそれ以外の場所に比べて小さく、また、周波数ゆらぎの地点間の違いもあまり見られず、軽度ストレス状態における上述の傾向がほとんど表れていないことがわかった。

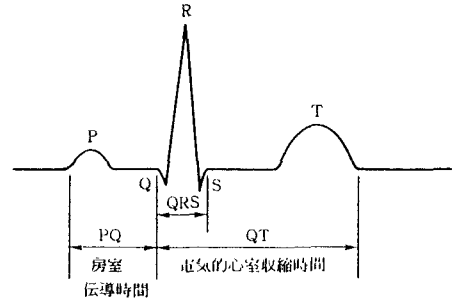


図-13 心電図の波形

4. おわりに

本調査は水辺の快適性について従来の官能試験による心理反応を尺度としたアプローチに加え、人間の生理反応を直接測定し、心理反応との対応関係について検討したものである。生理反応としては脳波が快適性を評価するのに有効であり、 α 波の含有率が具体的な評価尺度となりうるということが明らかになったと同時に、官能試験における快適感の申告が生理反応と連動している可能性が高いことが示された。

現在のところ水辺の存在が心と体の健康に与える効果については不明な点が多いが、今回の調査では、水辺が心理的・生理的に快適な空間として

高いポテンシャルを持っていることが明らかになったとともに、水辺空間の様々な複合環境条件のうち、温冷感、景色の美感、匂い、喧騒感が快適性に大きな影響を与えることがわかった。この結果には、官能試験の方法、季節や場所による環境条件が影響しており、より一般的な快適性の評価指標を見いだすためには、今後多くのデータの蓄積を行うとともに、複合環境を表す物理指標—人間の一次感覚尺度—快適性のつながりを解析する必要がある。

脳波測定用の機器・ソフトウェアは日本光電東関東(株)、ソニーマグネスケール(株)、キッセイコムテック(株)のご厚意により使用させていただいたものであり、日本光電つくば営業所の森田浩司氏には大変ご助力を頂いた。ここに記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) 木内、栗城、小林: 複合環境下における河川空間と周辺市街地の快適性評価、環境システム研究 23、1995. 8.
- 2) 木内、栗城、小林: 複合環境下における水辺と緑地の快適空間評価の基礎的研究、土木技術資料Vol. 37-8、1995.
- 3) 神田、木内、小林: 新しい屋外温熱感指標による河川熱環境評価の有効性について、水工学論文集第40巻、1996.
- 4) 吉田倫幸: 脳波のゆらぎ計測と快適性評価、日本音響学会誌、46、1990.
- 5) 日本光電: 心電計の基礎知識、1990.
- 6) 宮崎良文: 官能評価の客観化、ぶんせき、1993. 4.
- 7) NEC三栄: 脳波の初歩、1995.

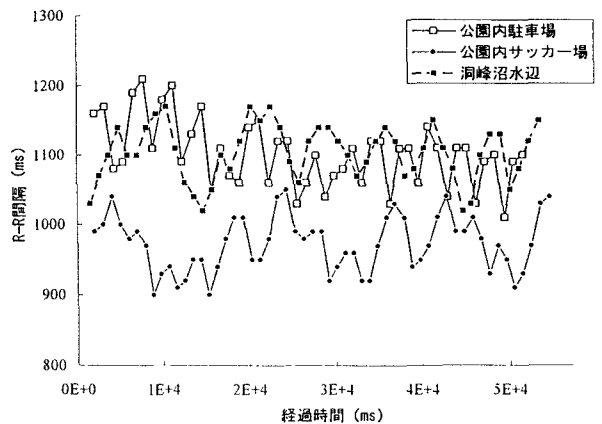


図-14 R-R 間隔の時間変動