

# 屋外空間における快適性と脳波の関連について

木内 豪<sup>1</sup>・小林裕明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 建設省土木研究所河川部都市河川研究室主任研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭一番地)

<sup>1</sup>正会員 同 研究員 ( 同 上 )

本論文では、河川、公園、沿道等の屋外空間における人間の脳波記録と快適感等の申告実験結果をもとに、生理反応と快適性との関連及び生理反応に基づいた快適性把握の可能性について、相関分析、周波数分析、脳波トポグラフィを用いた検討結果を述べたものである。本検討により、 $\alpha$ 波の等価電位の頭皮上分布が快適感と対応している可能性のあることや、 $\alpha$ 波のスペクトル密度分布のうち、8~9Hzの周波数帯の含有率が快適感と対応している可能性のあることなどが示された。

*Key Words: electroencephalogram; comfort, outdoor environment, power spectrum, psychological response*

## 1. 序論

高齢化の時代・ゆとりの時代を迎えた今、様々な社会・生活基盤施設により構成される生活環境が人間に及ぼす心理的・生理的影響を明らかにし、人々に精神的な安らぎを与えたり、我々を癒し、快くしてくれる空間を創造することは今後の重要なテーマであると考えられる。建設省にあっては、生活福祉空間づくり大綱(平成6年6月)、緑の政策大綱(平成6年9月)、新連携時代の快適生活ビジョン(平成7年11月)といった横断的な施策の基本方針等により快適な空間づくりを提唱しているものの、水辺、公園、自然の森などの公共的空間が市民にもたらす精神的効果や交通に伴う騒音、悪臭などによるストレスといった人体への影響についての科学的な検討がなされていないのが現状である。また、河川を持つ診療的効果が最近注目されており、河川審議会答申では今後解明すべき技術課題として位置付けている。

そこで、本論文では、河川空間、街路空間等様々な屋外環境が人間の生理反応にどのような影響を及ぼすのか、また、人間の生理反応に基づく屋外環境の快適性の定量化が可能であるかという点を明らかにするため、屋外空間にて行った脳波計測データの分析結果に基づく検討を行った。なお、感情を司るのは大脳であるが、脳内の情報伝達メカニズムまで踏み込んで快適性を捉えるのは非常に難しいことから、本論文ではあくまでも快適感と生理反応の対応関係を探ることに主眼を置くことにした。

また、快適感は様々な刺激を受けて発生する統合的な感情であることから、本検討のような刺激が完全に制御されていない屋外空間での計測であっても快適感と脳波の関係を調べることができると考えられる。

## 2. 生理反応に基づく快適性定量化の可能性

これまで、快適性やストレスを生理反応に基づいて定量的に捉え、従来までの心理反応試験の客観性の向上を図る試みがいくつか行われている<sup>1)~3)</sup>。心理反応と生理反応の間の対応付けを行うことは、快-不快という人間の心理現象の発生機序を解明するのにも役立ち、さらに、環境の状態を表す様々な要素と心理反応の関係についてもより定量的な分析が可能となる。

人間の不快感やストレスの計測を行う際の評価指標は、自律神経系、脳波・脳血流量、内分泌系、作業能率・疲労などに分類される<sup>3)</sup>。それぞれの分類における生理学的指標の例を表-1に示す。検討の主眼とする情動によりどの指標が有効かも変わってくる。例えば、快適感にはドーパミンが、逆に不快感にはアドレナリンの分泌が関係していることが知られている<sup>4)</sup>。また、快・不快は大脳を舞台にした各種の情報伝達機構により形成される個人の情動として捉えられることから、大脳皮質や頭皮上で計測される脳波は様々な環境条件が存在する屋外空間における快適性を定量するのに適していると考えられる。

感情の状態を測る有効な指標となりうる脳波と快・不

表-1 人間の情動を計測するための生理学的指標 (例)

分類	生理学的指標の例
自律神経系	R-R間隔 瞳孔光反射 末梢皮膚温
内分泌系	アドレナリン ノルアドレナリン ドーパミン
脳波・脳血流量	$\alpha, \beta, \theta, \delta$ 波 誘発脳電位
作業能率・疲労	フリッカー値

快との関連性についての研究は、人間工学、環境工学、生理学等の学際領域に位置するテーマであり、それぞれの立場からの取り組みがなされている。脳波の計測と同時に心理状態についての申告を行い、お互いの関連性について検討を行った事例は少ないが、吉田<sup>9)</sup>によると、 $\alpha$ 波の周波数ゆらぎスペクトルのうち、前頭部 $\alpha$ 波の低周波数領域でのスペクトル傾斜度と快-不快感の間に対応があることが示されている。また、頭皮上脳波の計測データから、怒り、悲しみ、喜び、リラックスといった感性の状態を推定する方法として、電極間の脳波の相互相関係数を用いる手法が開発されている<sup>9)</sup>。その他、音、光、匂いや各種視覚情報などの外的刺激を人間に加えたときの生体反応を確かめる試み<sup>9)~11)</sup>も行われており、音や匂いに伴う快・不快感により周波数ゆらぎスペクトルの波形に違いが生じることが明らかにされている。

これらの検討は刺激条件の制御された室内実験に基づくものであり、屋外空間を対象とした計測はほとんど行われていない。実際、屋外空間は匂い、音、景色などの様々な要素環境が複合した状態(複合環境)にあるため、複合環境下での外的な刺激と、人間の生理反応・心理反応との関係については室内実験で捉えきれない面があると考えられる。また、複合環境下における快適性が生理学的指標により裏付けられれば、複合環境を構成する温熱環境、視環境等の個々の環境が快適性に及ぼす影響に関する心理反応の分析<sup>9)</sup>も信頼できるものとなる。

### 3. 脳波とその計測・分析の基礎

計測結果について説明する前に、ここでは脳波に関する基礎的事項について概説する。

脳波は脳内の情報伝達により発生する大脳の神経細胞の微弱な活動電位を捉えたもので、頭皮で計測される脳波(頭皮上脳波)は生体の有する静止電位に上乘せされる数 $\mu$ V~数百 $\mu$ Vまでの非常に微弱な1~60Hzの周波数の成分が重合したさざ波のような電位変動となって現れる。脳波の各周波数成分の名称と出現時の特徴は図-1のように表される。ただし、周波数を用いた脳波の分類は研究者によって多少の相違がある。なお、 $\alpha$ 波はさらに $\alpha_1$ (8Hz以上9Hz未満)、 $\alpha_2$ (9Hz以上11.5Hz未満)、 $\alpha_3$ (11.5Hz以上13Hz未満)に細分類される場合がある<sup>9)</sup>。また、 $\theta$ 波、 $\delta$ 波は合わせて徐波と呼ばれている。

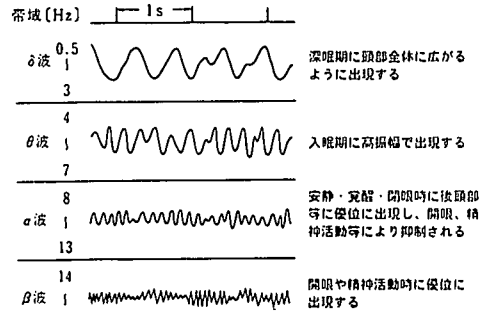


図-1 脳波の分類

脳波は、個体差、年齢、意識状態、精神状態などにより異なる像を示す。また、身体外からの刺激によっても影響が現れるため、開眼、閉眼の別で著しく異なる波形を示す。逆に、人種、民族、性などによる著しい相違は示さず、同一個体における時間による差異も少ない<sup>9)</sup>。

成人の正常脳波は主に $\alpha$ 波と $\beta$ 波から構成され、明瞭な $\theta$ 波、 $\delta$ 波は存在しない。 $\alpha$ 波の周波数は普通10Hz前後といわれている。山本<sup>10)</sup>の実験によると、優勢周波数は9.5Hzが最も多く、8Hzから10.5Hz程度までの間に分布している。 $\alpha$ 波は普通、頭頂部や後頭部に優勢に出現するが、その理由は定かになっていない<sup>9)</sup>。また、 $\alpha$ 波はほぼ左右対称であるが、右脳の振幅が大きいと報告が多いとされている<sup>9)</sup>。さらに、中心部や前頭部に現れる $\alpha$ 波は後頭部 $\alpha$ 波の単なる物理的伝導ではなく生理学的な伝達との相互作用により発生すると考えられている<sup>11)</sup>。

脳波は基本的には頭皮上に電極を一定の方式に従って配置し、電極から伝えられる微少の電位変動をもとに、直流成分を除き、増幅を行った後に得られる。脳波の計測に当たっては、脳波以外のノイズ(アーチファクト: artifact)を除去して、如何に良好な記録を得るかが鍵となる。屋外での計測においては送電線やラジオ電波などによるアーチファクトに気をつけなければならない。

脳波の時系列データから規則性などの特徴を捉えるための分析法として相関分析や周波数分析が用いられる。脳波の周波数分析結果の報告によると、スペクトル密度分布の形状は一山や二峰性など、様々なものがある<sup>12)</sup>。また、電極ごとの分析結果から頭皮上全体の脳波活動を2次元的に図示して、単一の部位のみの検討では把握できない様々な特徴を把握する方法として、各部位の値を数学的に補間して等電位図等を描く脳波トポグラフィの方法がある<sup>9)</sup>。

### 4. 屋外空間における脳波・心理反応と複合環境の同時計測

#### (1) 概要

外部環境条件、心理反応、生理反応の同時計測は、計

表-2 測定時の天候と測定場所(1995/9/27~10/5)

No.	月日	天候	場所	測定地点と測定順
1	9/27	曇後 晴れ	つくば市洞峰公園	駐車場→緑陰→芝地→水際 (洞峰沼)
2	9/28	晴れ	隅田川桜橋下流	水際(親水テラス上)
3	9/28	晴れ	荒川西新井橋下流	水際→高水敷(堤防法尻)→ 堤上街側→堤上川側
4	10/3	晴れ	松戸市・江戸川	堤内地→堤上川側→高水敷 →水際
5	10/4	曇り	つくば市裏筑波	溪流(裏筑波男女川)→森林 →国道(408号沿道)
6	10/5	曇後 小雨	松戸市・江戸川	水際→堤防上(測定4と同一 地点)

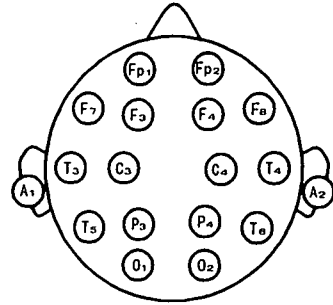


図-2 頭皮上の電極配置

5日間にわたって行った。測定場所等を表-2に示す。測定No. 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。

人間の脳波は個人差が比較的大きいことから、地点間の環境条件の違いが脳波に及ぼす影響をより明確に捉えるため、同一被験者を対象に異なる環境の複数地点で計測を行った。また、同一地点で多数の被験者の測定をほぼ同時に行うことが機器の都合から困難であったことから健康な20代の男女各1名を対象とした。残念ながら、女性被験者の脳波記録は振幅が小さく、かつ、 $\alpha$ 波の広い周波数範囲に分布していたため、このデータを用いて快適性ととの関係や $\alpha$ 波発生の機序を考察するには至っていない。男性被験者の計測記録のみの分析結果からすぐに一般的な結果を導き出すことは困難であるが、前述した正常成人脳波の一般的特性から逸脱していない限りにおいては、屋外空間において生理反応と心理反応及び環境条件を同時に把握した貴重な計測データとして十分意義のある分析結果を提示するものであると考え。また、快適感と生理現象との関係を捉えるには、まず、個々人の反応についての詳細な検討を踏まえた上で一般化する必要があることから、本論文では既往の研究成果を踏まえながら、脳波と心理反応の関係の特徴を細かく検討することに主眼を置いた。

## (2) 脳波等生理反応の測定

計測で対象とした生理反応は、快適性ととの関連が指摘されている脳波の他に、自律神経反射の心電図、血圧、脈拍、体温である。なお、脳波以外の計測結果については心理反応との関連性を見出すには至らなかったことから、以下では脳波についてのみ記述する。

被験者はサマーベッド(場所によっては椅子を使用した。筋電図の影響除去のため、ヘッドレスト付きが望ましいが今回は会議椅子を使用した。)上で安静にし、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分間終了時のみ行った。

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を用いて脳波をモニターしながら、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電極で行った(図-2)。脳波の導出は左右の耳タブを基準電極とする基準電極導出法を用いた。フィルタ周波数(高域)は100 Hz(10/5のみ60Hz)、感度は50 $\mu$ V、サンプリングレートは100 Hzに設定した。測定No.4のうち、堤内地を除く地点では、電極と生体アンプを結ぶリード線がアンテナとなってラジオ電波が混入したため、この時のデータは分析に使用しなかった。

後述する相関分析、周波数分析には5分間の測定の内最後の約1分間の閉眼時の脳波記録を用いた。これは、閉眼時の方がアーチファクトの影響を取り除くことができるのと、5分間の内では心理状態が最も安定している時間帯と考えられることによる。周波数分析は高速フーリエ変換(FFT)により行った。FFTの基本周波数幅は約0.1Hz、サンプリング間隔は100Hz、データ数は約1200で、窓関数にはブラックマン窓を用い、平均回数は原則5回とした。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4~20Hzのバンドパスフィルターをかけた。

## (3) 心理反応及び複合環境の測定

心理反応の申告実験では、各地点において各被験者の生理反応測定が終了した時点で、表-3の回答項目について、相対する6~7段階の選択肢より最も適当と思われるものを申告させた。回答項目、尺度は筆者らが過去に行った調査で用いたものや既往研究<sup>13)</sup>を参考に設定した。複合

表-3 心理反応の申告実験で用いた項目と選択肢

<p>1. 温冷感</p> <p>1. 非常に暑い</p> <p>2. 暑い</p> <p>3. やや暑い</p> <p>4. どちらでもない</p> <p>5. やや涼しい</p> <p>6. 涼しい</p> <p>7. 非常に涼しい</p>	<p>2. 発汗感</p> <p>1. 全くない</p> <p>2. ごくわずかにある</p> <p>3. わずかにある</p> <p>4. ある</p> <p>5. かなりある</p> <p>6. 汗が流れている</p>
<p>3. 気流感</p> <p>1. 感じない</p> <p>2. ごくわずかに感じる</p> <p>3. わずかに感じる</p> <p>4. 感じる</p> <p>5. かなり感じる</p> <p>6. 非常に感じる</p>	<p>4. 芳香感</p> <p>1. 非常に悪い臭いがする</p> <p>2. 悪い臭いがする</p> <p>3. やや悪い臭いがする</p> <p>4. どちらでもない</p> <p>5. やや良い香りがする</p> <p>6. 良い香りがする</p> <p>7. 非常に良い香りがする</p>
<p>5. 開放感</p> <p>1. かなり閉鎖的な感じ</p> <p>2. 閉鎖的な感じ</p> <p>3. やや閉鎖的な感じ</p> <p>4. どちらでもない</p> <p>5. やや開放的な感じ</p> <p>6. 開放的な感じ</p> <p>7. かなり開放的な感じ</p>	<p>6. 明度感</p> <p>1. 非常に明るい</p> <p>2. 明るい</p> <p>3. やや明るい</p> <p>4. どちらでもない</p> <p>5. やや暗い</p> <p>6. 暗い</p> <p>7. 非常に暗い</p>
<p>7. 周囲の草木等の緑の量</p> <p>1. 非常に多い</p> <p>2. 多い</p> <p>3. やや多い</p> <p>4. どちらでもない</p> <p>5. やや少ない</p> <p>6. 少ない</p> <p>7. 非常に少ない</p>	<p>8. 周囲の建物や構造物の様子</p> <p>1. 非常にごちゃごちゃしている</p> <p>2. ごちゃごちゃしている</p> <p>3. ややごちゃごちゃしている</p> <p>4. どちらでもない</p> <p>5. ややすっきりしている</p> <p>6. すっきりしている</p> <p>7. 非常にすっきりしている</p>
<p>9. 喧騒感(音の心地よさ)</p> <p>1. 非常に心地よい</p> <p>2. 心地よい</p> <p>3. やや心地よい</p> <p>4. どちらでもない</p> <p>5. やや耳障りである</p> <p>6. 耳障りである</p> <p>7. 非常に耳障りである</p>	<p>10. 音の大きさ</p> <p>1. 音が全くない</p> <p>2. 音がわずかにする</p> <p>3. 音がする</p> <p>4. 大きい音がする</p> <p>5. かなり大きい音がする</p> <p>6. 非常に大きい音がする</p>
<p>11. 周囲の色彩</p> <p>1. 非常に調和している</p> <p>2. 調和している</p> <p>3. やや調和している</p> <p>4. どちらでもない</p> <p>5. やや調和していない</p> <p>6. 調和していない</p> <p>7. 非常に調和していない</p>	<p>12. 周囲の景色の美観</p> <p>1. 非常に美しい</p> <p>2. 美しい</p> <p>3. やや美しい</p> <p>4. どちらでもない</p> <p>5. やや醜い</p> <p>6. 醜い</p> <p>7. 非常に醜い</p>
<p>13. 精神的なリラックス感</p> <p>1. 非常に落ちつく</p> <p>2. 落ちつく</p> <p>3. やや落ちつく</p> <p>4. どちらでもない</p> <p>5. やや落ちつかない</p> <p>6. 落ちつかない</p> <p>7. 非常に落ちつかない</p>	<p>14. 総合的な快適感</p> <p>1. 非常に不快</p> <p>2. 不快</p> <p>3. やや不快</p> <p>4. どちらでもない</p> <p>5. やや快適</p> <p>6. 快適</p> <p>7. 非常に快適</p>

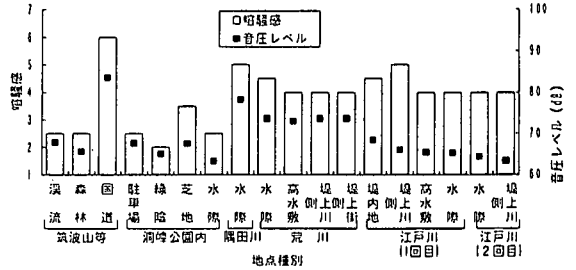
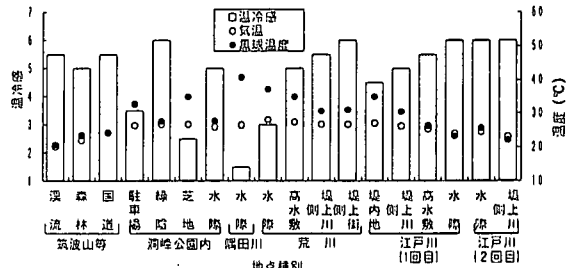


図-3 地点別の環境条件と温冷感、喧騒感の申告値

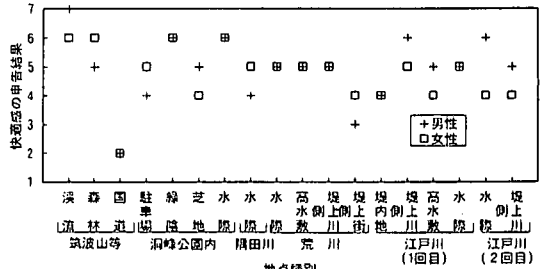


図-4 快適感の地点別申告結果

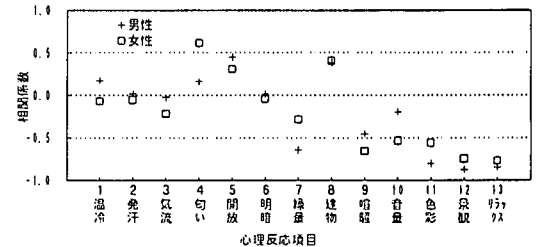


図-5 快適感と各心理反応項目との相関

環境条件のうち、気温、湿度、風速、黒球温度、音圧レベル、照度等について脳波の測定時間帯に測定した。気温、黒球温度は白金抵抗測温体で測定した。気温測定にはステンレス製強制通風管を用い、黒球温度計は被験者の頭部と同じ高さに設置した。音圧レベル測定には騒音計(リオンNA-20)を使用した。

### 5. 心理反応結果

脳波等の計測データの分析結果について見る前に、対象地点における被験者の心理反応と環境条件の関係について把握する。

図-3に温冷感の男女平均値と気温、黒球温度の測定時間帯内平均値、並びに喧騒感の男女平均値と音圧レベルの

時間内平均値を示す。公園芝地、隅田川の水際で相対的に温冷感の申告値が小さい(暑さの度合いが高い)以外は、概ね温熱的には快適であったものと考えられる。音圧レベルは国道で最も高い値を示した他、河川空間においても車両等の影響により高くなっているが、瞬時値ではないため必ずしも、喧騒感と対応したものとなっていない。

図-4には、各地点における心理反応の申告結果のうち、被験者別の総合的な快適感(以下、単に快適感と呼ぶ)の申告値を示す。男女ともに快適感が高く、「非常に快適」あるいは「快適」と答えたのは森林の中の溪流、公

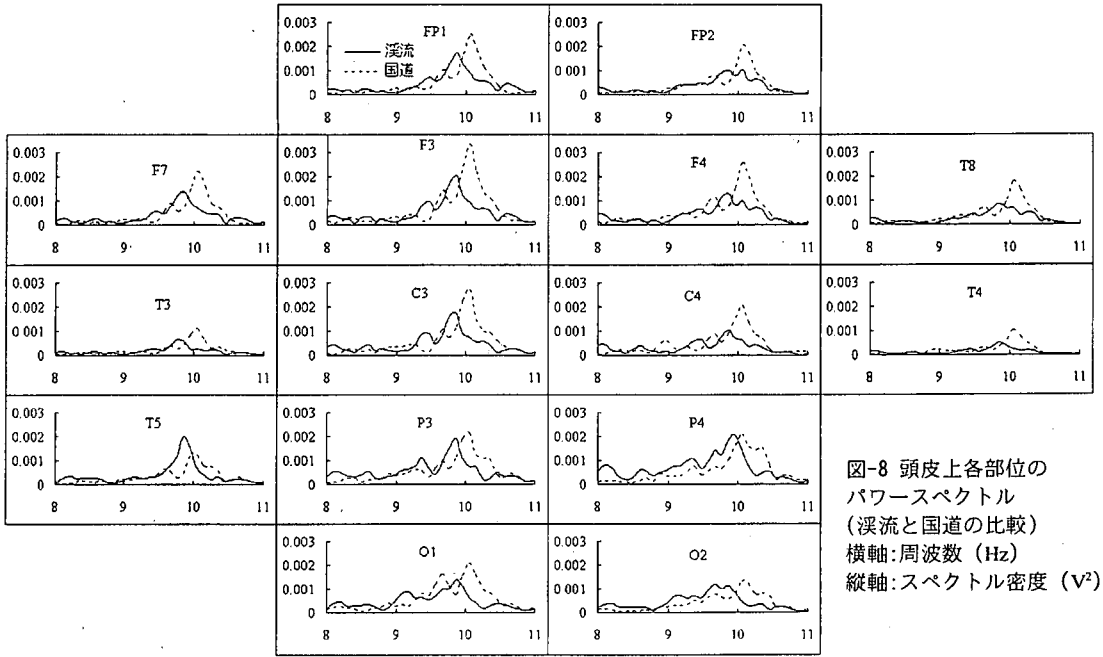


図-8 頭皮上各部位の  
パワースペクトル  
(溪流と国道の比較)  
横軸:周波数 (Hz)  
縦軸:スペクトル密度 ( $V^2$ )

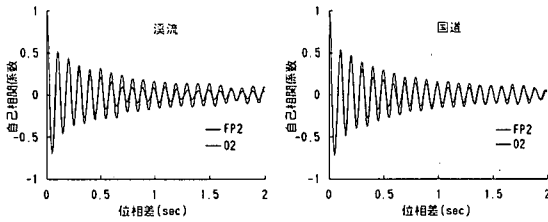


図-6 自己相関係数

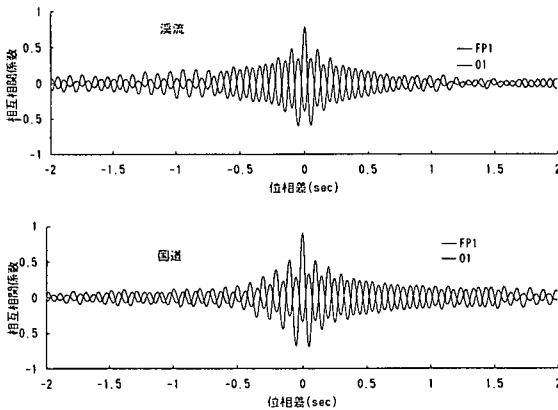


図-7 相互相関係数

園内の緑陰と水際であった。溪流地点ではせせらぎの音の心地よさや緑が多く、色彩、景観が優れているという印象が大きく影響したものと考えられる。同様に、公園内の水際や緑陰も景観や色彩、静寂感などが快適と回答した要因である。逆に、男女とも「不快」あるいは「や

や不快」と申告した国道沿いでは、通過交通に起因する騒音に対する喧騒感や音量感が大きく影響している。都市の貴重な自然空間である河川については概ね快適と回答しているが、その度合いが低いのも喧騒感等の影響である。

また、図-5の快適感申告値と他の心理反応項目との相関係数をみると、今回の調査ではいずれの日も気温がさほど高くなく涼しかったことや、匂いに関しては回答のばらつきがほとんどなかったこともあって、視覚と聴覚に関わる項目が他より高い値となっている。

## 6. 心理反応と脳波の関連性

脳波の時間による差異は少ないと言いつながらも、心理状態はその時の体調とも関連してくると思われるため、以下では計測日毎の地点間比較を行うことで体調の影響を除いた快適感と脳波との関連性について検討する。

### (1) 溪流と幹線道路沿いの比較

まず、測定No.5について比較する。溪流では流水が岩肌当たってできるせせらぎの音が卓越し、周囲は樹木に覆われていた。また、国道は土木研究所前地点で、計測時、乗用車、トラック等が走り抜けていた。計測時に男性被験者が申告した快適感は溪流で「非常に快適」、道路沿いで「非常に不快」となっており、この2地点では心理状態が極端に異なる。

図-6に男性被験者の脳波の相関分析結果を示す。溪流地点では、右後頭部O2と右前頭部FP2で相関係数の減衰傾向に違いがみられるが、国道沿いでは両者がほぼ同じと

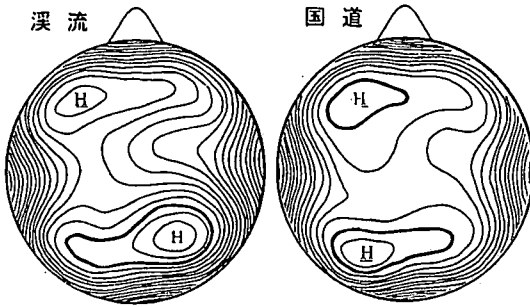


図-9 溪流と国道の脳波トポグラフィ (8~13Hz)  
(Hは相対的に高いことを意味する。  
等高線間隔は1 $\mu$ V, 太線は等価電位20 $\mu$ Vの等高線)

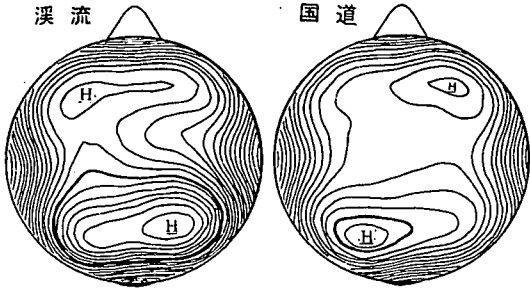


図-10 溪流と国道の脳波トポグラフィ (8.5~9.5Hz)  
(等高線間隔は1 $\mu$ V, 太線は等価電位20 $\mu$ Vの等高線)

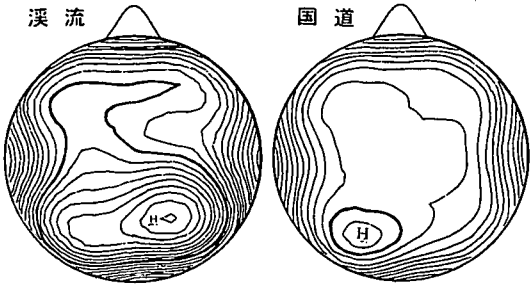


図-11 溪流と国道の脳波トポグラフィ (8~9Hz)  
(等高線間隔は1 $\mu$ V, 太線は等価電位15 $\mu$ Vの等高線)

なっている。右後頭部O2に対する左脳の相互相関係数(図-7)でみると、前頭部の相互相関係数が位相差ゼロを境に溪流では負側が、国道では正側の値が大きいという特徴がある。この特徴は右脳に対しても、また、O1を基準とする相互相関係数にも見られた。このことは、情報の伝達が、溪流地点では前頭部から後頭部へ、国道地点では逆に後頭部から前頭部へ向かっていたことを意味すると解釈される。

次に周波数分析結果について説明する。図-8に示す部位ごとのパワースペクトル密度分布からわかるように、いずれの部位でも溪流の方が国道よりも低い周波数でピークを持つ分布形となっている。左側のF3, C3, P3で

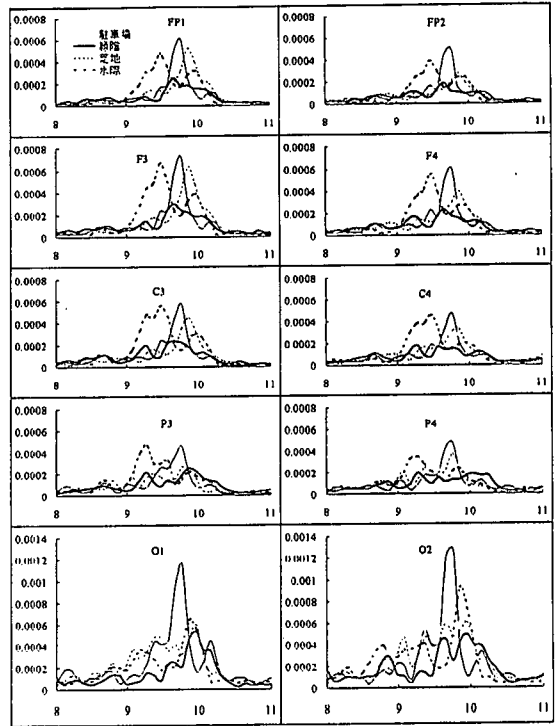


図-12 各部位のパワースペクトル(公園内4地点)

は10Hz弱のピークとともに、9.5Hzにも極大値を持つ二峰性が現れており、自己相関曲線の減衰が早いのは、この影響によるものと考えられる。また、溪流では $\alpha$ 波の中でも脳の休息やリラックス状態を示すと言われる8~9Hz帯のスペクトルの含有率が主として後頭部で高くなっていることがわかる。さらに、右側は左側の同部位に比べて概ねスペクトルのピーク値が小さく、スペクトル分布がなだらかとなっている。国道沿いの場合には左右ともに前頭部におけるスペクトル分布の尖鋭化が顕著で、若干、左側のパワーが大きい。

図-9は男性被験者について、図-8のパワースペクトルから求めた $\alpha$ 波帯(8Hz~13Hz)成分の等価電位をもとに頭皮上の電位分布を2次元的に図示したものである。図化には、領域の制限された平面上の離散データを補間するための標準化関数<sup>14)</sup>を用いた。溪流、国道ともに前頭部、後頭部に極大値を有しており、閉眼時の一般的特徴と合致しているが、後頭部の極大位置が左右逆になっている。また、左右差は正常成人の範囲内であるが、溪流の方が国道よりも全体的に大きい特徴が見られた。

スペクトル分布で9.5Hz付近の極大値が見られることから、同様の2次元分布図を8.5から9.5Hzまでの間の等価電位をもとに示したものが図-10である。溪流の場合は図-9と類似の特徴が現れているが、国道沿いの分析結果では、図-9とは異なり、右前頭部と左後頭部に極大化がみられる。さらに、8~9Hzの等価電位の頭皮上分布(図-

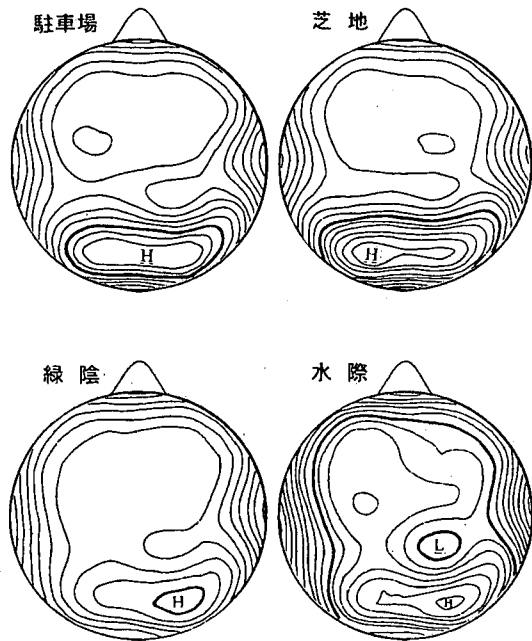


図-13 公園内各地点の脳波トポグラフィ(8.5Hz~9.5Hz)  
 (Lは相対的に高いことを意味する。  
 等高線間隔は1 $\mu$ V, 太線は等価電位12 $\mu$ Vの等高線)

11)で見ると、溪流では図-10と同様の傾向が、また、国道では左右差がない平坦な分布となっていた。

### (2) 公園内4地点(駐車場・雑木林の緑陰・芝のサッカー場・池の水際)の比較

次に、測定No.1の駐車場、緑陰、芝地(サッカー場)、水際について各部位のスペクトル密度分布による比較を行う(図-12)。

水際にはスペクトルがピークを示す周波数が他の地点よりも小さくなる傾向が各部位で見られる。駐車場と芝地の比較では、快適度が相対的に高い芝地でピーク周波数が大きい傾向にあり、必ずしもピーク周波数が低いほど快適感が高いわけではないことがわかる。また、水際のスペクトル分布は後頭部で9.2Hz近辺にピークがあるが、前頭部に移るにしたがい9.5Hz付近に極大値が移り、9.2Hzの成分と重合している。駐車場地点の脳波スペクトルは、いずれの部位も9.7Hz付近に比較的鋭いピークを持つ分布となっているのに対して、他の地点では前頭部ではやや鋭いピークを示すが、後頭部ほど分布形が幅広になっている。正常成人脳波のスペクトル構造の特徴として、後頭部脳波ではシャープなピークを示す一方、前頭部では幅広で、かつ、ピーク周波数の移動やピークの高さの変動がより大きいことが紹介されている<sup>13)</sup>が、同一人の地点間比較から明らかなように必ずしもこのことが当てはまらない状況が見られる。

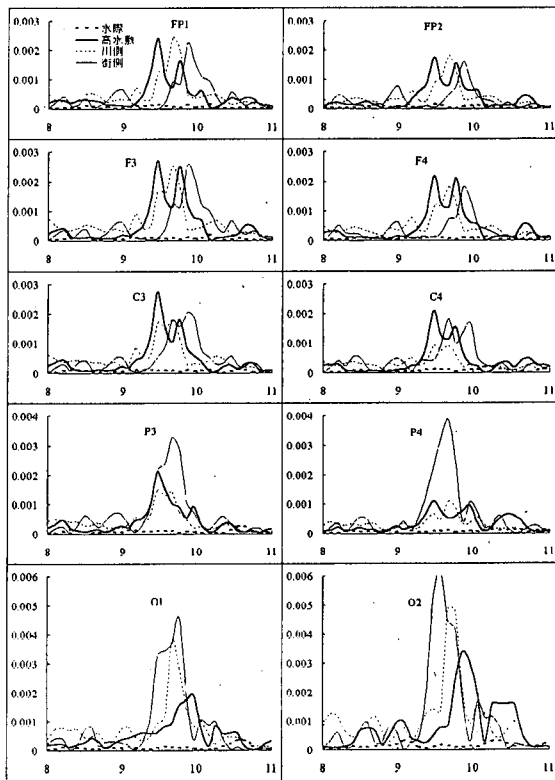


図-14 各部位のパワースペクトル(河川空間)

(1)と同様に脳波トポグラフィ(図-13)で見ると4地点ともに後頭部の等価電位が大きいが、左右の大きさがそれぞれに異なる特徴を有しており、「6:快適」と回答した緑陰と水際はいずれも右後頭部に極大化傾向にある。申告結果は緑陰と水際ではほぼ同じであるが、リラックス感の水際の方が高くなっており、左前頭部に極大が存在する水際の方が快適感の潜在意識としてリラックス感が高かったのではないかと考えられる。

### (3) 河川空間内の比較

図-14に、荒川河道内各地点で測定した頭皮上各部位の脳波のパワースペクトルを示す。水際の計測では $\alpha$ 波の振幅が他より1オーダー小さくなっているが、他の地点との相違が大きいことから計測上の問題の可能性が高いと考えられる。この図では前頭部においてピーク周波数の違いが顕著に見られ、快適感の低い堤防上で市街地側を向いたときに高いピーク周波数を示していることがわかる。また、高水敷上と堤防上川側ともに、前頭部の9.5Hz前後に二つの極大値を持つ二峰性の分布になっているが、後頭部ではこのような特徴はみられないことから、前頭部から中心部にかけて9.5Hzの周波数成分が快適性と関連する脳波として現れたのではないかと考えられる。これについては、閃光刺激時の脳波特性に関する研究<sup>14)</sup>

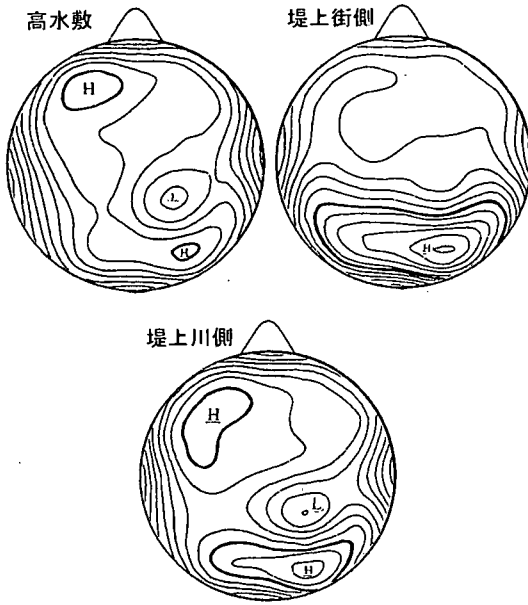


図-15 河道内各地点の脳波トポグラフィ  
(等高線間隔は2 $\mu$ V, 太線は等価電位24 $\mu$ Vの等高線)

から、閃光の周波数と強度に応じてもともと存在していた後頭部の周波数成分と異なる脳波が駆動されることが知られている。しかしながら、今回の計測環境では周期的変動を持つ外的刺激は存在しないことから、内因性のものである可能性が高いと考えられる。

河川空間内3地点の脳波トポグラフィ(8.5~9.5Hz等価電位)を図-15に示す。堤防上で市街地側を向いて行った計測以外は、(1)(2)で述べた筑波山の溪流や公園内の水際と類似し、左前頭部と右後頭部に極大値が現れる分布となっており、申告値「5:やや快適」を裏付ける結果となっている。市街地を向いた場合の特徴として、左前頭部、右後頭部ともに反対側の同部位との電位差はそれほど大きくないことがわかる。

## 7. 考察

6. で述べた結果から、脳波のパワースペクトルの極大値を示す周波数が9.5Hzより大きいとき快適感が低い傾向にあることと、スペクトル分布が尖鋭化しているほど快適感が低い傾向にあることが推測される。必ずしもピーク周波数が高いことと快適感が一義的に対応していないのは、スペクトル分布の尖鋭度との関係によると推察される。また、快適時の頭皮上の分布として左前頭部と右後頭部の電位の極大化が見られた。ただし、これらの結果はあくまでも今回の被験者から得られた特徴であって、一般的特徴と結論づけるには至っていない。また、各地点でのパワースペクトルのピーク値と申告結果

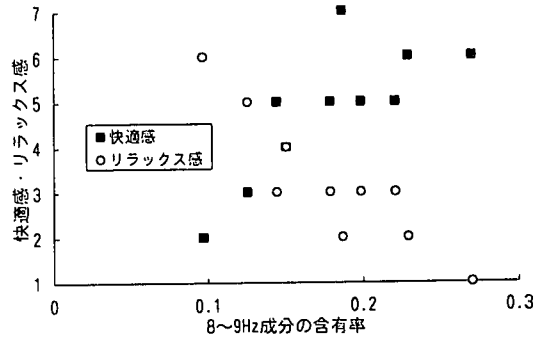


図-16  $\alpha$ 波(8~9Hz成分)の含有率と快適感・リラックス感の関係

との対応関係から、ピーク値の大小は、快-不快尺度上の位置を識別するというよりは、快あるいは不快いずれかの程度を表すのみで、いずれの状態であるかは示さないと判断される<sup>1)</sup>。

吉田<sup>1)</sup>は周波数ゆらぎの概念を導入し、 $\alpha$ 波の周波数ゆらぎのスペクトルのうち、左前頭部における低周波数領域でのスペクトルの傾斜度合いと快-不快の自己評定値の間に対応があることを示している。(ここで、 $\alpha$ 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。)武者<sup>2)</sup>も同様にリラックス時の脳波には左前頭部の $\alpha$ 波成分が寄与していると述べている。本研究では快適感と前頭部 $\alpha$ 波との関連性が頭皮上等価電位の極大化と言う形で捉えられたが、同時に後頭部にも特徴的な現象があらわれている。すなわち、今回の計測結果からは後頭部左側と右側の電位の大きさの違いが快適感と関連があり、快適感が高いほど後頭部右側の電位の極大化の度合いが大きいことがわかった。

また、快適時に後頭部で9Hz以下の比較的遅い $\alpha$ 波成分が増加するののもう一つの特徴である。9~10Hzの $\alpha$ 波が主体を為しながらも、より脳のリラックスした状態を表す8~9Hz<sup>4)</sup>の含有率が高くなることは快適感を表す指標として活用しうるものであると考えられる。そこで、後頭部の02電極におけるパワースペクトル密度のなかで8~9Hzの周波数成分が $\alpha$ 波帯全体に占める割合(含有率)を求め、快適感及びリラックス感の申告結果との関係を整理したのが図-16である。この図では、縦軸の数字が大きいほど快適感が高くなり、逆にリラックスの度合いが小さくなるように表示してある。申告結果が中間的な値の場合にはばらつきが大きくなるものの、8~9Hz成分の含有率と快適感、リラックス感との相関が高いことがわかる。なお、前頭部から中心部にかけて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。



脳波は覚醒度とも大きく関係しており、覚醒度が低下すると脳波の徐波帯のパワーが大きくなることから、比較的遅い $\alpha$ 波を快適性の指標として捉えることは覚醒度との関係も考慮した上で考えなければならない。今回の計測では居眠り等はしないように喚起したものの、覚醒度の申告は行っておらず、8~9Hzにおけるパワースペクトルの含有率と快適性の相関関係に覚醒度がどの程度関与しているかについては明らかにできなかった。

視覚条件が脳波に及ぼす影響としては、色彩の生理的影響を検討した例があり、 $\beta$ 波と色の種類との関連性が指摘されている<sup>1)</sup>。今回の計測では、堤防上で川側を向いた時と市街地側を向いた時に（音や匂いの条件はほぼ同じで）視覚的条件だけが大きく変わることから、両者の比較により視覚条件と脳波の関連性を検討したところ、街側を向いたときには、8~9Hz帯、8.5~9.5Hz帯のいずれも左前頭部の極大化を示しておらず、右後頭部では8~9Hz帯の $\alpha$ 波が川側よりも若干減少するという傾向が現れており、視覚に関連する項目（開放感、緑量感、色彩感）の申告値が両地点でそれぞれ3段階異なっていたという結果と対応している。解析に用いた脳波は閉眼の記録であるが、記憶された視覚情報によって快適性等の感情が形成されるとすれば、視覚条件の違いが視覚野である後頭部での変化及び感情を司る前頭部での変化として現れたものと考えられる。

騒音が脳波に及ぼす影響について、例えば三宅ら<sup>16)</sup>は騒音で不快と感じるときに $\alpha$ 波が減少し、徐波が増すことを示している（ただし、頭頂部のみ分析結果となっている）。今回の計測結果のうち、喧騒感や音圧レベルが大きく異なる溪流と国道で比較すると、前頭部とともに後頭部で極大位置の左右逆転が生じており、視覚条件とともに騒音の大小も大きく影響しているものと考えられる。

## 8. 結論

本論文は屋外の様々な空間を対象とした生理学的快適性評価の基礎的研究として、脳内の情報伝達の結果現れる頭皮上の脳波を手がかりにして人間の心理反応と生理反応の関連性を見出すとともに、より定量的な快適性評価の可能性を検討したものである。臨床脳波の分野で主に用いられてきたスペクトル解析により、快適度に応じた脳波のスペクトルの特徴を抽出し、また、申告実験による心理反応を尺度とした快適性評価の妥当性について検証を試みた。今回の計測結果に基づく分析・考察により以下に示すいくつかの事実と可能性を見いだした。

- 1) 屋外空間の環境条件の違いを反映して、前頭部と後頭部ではピーク周波数の値が異なる場合があり、前

頭部では後頭部のものと重畳した二峰性のスペクトル分布となっていた。特に、快適時には9Hzから9.5Hzまでにスペクトルの極大値を持つ脳波が出現していた。

- 2) 脳波トポグラフィによる分析結果から、右後頭部と左前頭部で高い等価電位を示すときに、快適度も高くなる傾向があることがわかった。
- 3) 脳波のスペクトル密度分布の分析結果から、快適度が高いほどスペクトル分布の形状がブロード化する傾向にあり、特に、後頭部の8~9Hz帯の含有率が快適感と関連する可能性のあることが示された。
- 4) 河川等の水辺空間は心理的にも快適である場合が多いが、生理的にも脳がリラックスした状態となっていた。

脳波と快適性とのより一般的な関係は多くの被験者による計測データに基づく分析を必要とするのももちろんである。また、屋外での測定という制約から同一地点、同一環境条件で脳波と心理反応の再現性を確認することができなかった。これらは今後の検討課題である。

謝辞：脳波の測定にあたっては日本光電東関東（株）つくば営業所の森田浩司氏をはじめ、ソニーマグネスケール（株）、キッセイコムテック（株）各位のご協力を頂いた。ここに記して深く感謝致します。

## 補遺

時間に関する不規則変動 $x(t)$ の自己相関関数 $C(\tau)$ は次式により表される<sup>17)</sup>。

$$C(\tau) = \frac{\overline{x(t)x(t+\tau)}}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau) dt$$

一方、パワースペクトルは、フーリエ変換、逆フーリエ変換の関係

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt$$

を用いて、次式により定義される。

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$$

ここに、 $S(\omega)$ はパワースペクトル密度関数、 $\omega=2\pi f$ は各周波数、 $f$ は周波数である。

ブラックマン窓は次式で表される。

$$W_n = 0.423 - 0.498 \cos(2\pi n/N) + 0.0792 \cos(4\pi n/N)$$

$$(0 \leq n \leq N-1)$$

$$W_n = 0.0$$

$$(前記以外)$$

ここに、 $W_n$ は窓の大きさ、 $N$ は分析時間内の全データ数、 $n$ はデータ始点からの数である。

#### 参考文献

- 1) 吉田倫幸：脳波レベルからみた1/fゆらぎの意義, 日本ME学会雑誌BME, Vol. 8, No. 10, 29-35, 1994.
- 2) 武者利光：「こころ」を測る, 日経サイエンス1996年4月号.
- 3) 宮崎良文：官能評価の客観化, ふんせき, 1993.4.
- 4) 志賀一雅：潜在脳, ダイヤモンド社, 1997.
- 5) 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.
- 6) 永田晟：溪流のせせらぎとストレス解消, 月刊河川 No. 596, 6-12, 1996.
- 7) 金恩一, 藤井英二郎：植物の色彩の生理・心理的效果に関する基礎的研究, ランドスケープ研究, 58(5), 141-144, 1995.
- 8) 木内豪, 栗城稔, 小林裕明：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, Vol. 23, 1995.
- 9) 大熊輝雄：臨床脳波学第4版, 医学書院, 1991.
- 10) 山本紘世：波形認識法を用いたコンピュータ解析による健康成人脳波諸要素の正常値に関する研究, 精神経誌, 79, 309-347, 1977.
- 11) 鈴木宏哉：前頭部と後頭部のアルファ・リズム, 臨床脳波, Vol. 14, No. 9, 505-514, 1972.
- 12) 藤森周一, 佐藤時治郎, 寿原健吉, 斉藤正男, 大熊輝雄, 佐藤謙助編集, 脳の電気現象の分析法とその応用 (第4章 連続スペクトル分析器による分析法), 98-118, 医学書院, 1966.
- 13) 石井昭夫, 片山忠久, 塩月義隆, 吉水久雅, 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, 第386号, 28-36, 1988.
- 14) 上野照剛, 松岡成明：徐波を示す異常脳波の抽出とその表示法, 医用電子と生体工学, 第14巻第2号, 118-124, 1976.
- 15) Sato, K. and Kitajima, K.: On the average EEG response activities in relation to the intensity of flicker stimulation. *Japanese Journal of Physiology*, 15, 596-622, 1965.
- 16) 三宅普司, 田中豪一, 斉藤和雄：不快音の脳波に及ぼす影響, 日本衛生学雑誌, Vol. 39, No. 2, 523-534, 1984.
- 17) 日野幹雄：スペクトル解析, 朝倉書店, 1977.

(1998.9.21受付)

## ON THE RELATION BETWEEN OUTDOOR COMFORT AND ELECTROENCEPHALOGRAM

Tsuyoshi KINOCHI and Hiroaki KOBAYASHI

This paper describes the observational results concerning the relation of human electroencephalogram (EEG) and the psychological response to complex outdoor environments. With the aid of correlation analysis, spectrum analysis and EEG topography technique, it was shown that EEG topography of power spectrum has distinctive features corresponding to comfort sensation and the content ratio of power spectrum for a specific range of alpha wave to the total alpha wave has plausible relation with the comfort sensation.