

森林空間における視覚的変化の定量分析と その脳波反応

副田和哉¹, 大津敬太¹, 松田翔太², 山田猛矢²

¹第一工科大学 工学部 建築デザイン学科 (〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2) k-soeda@daiichi-koudai.ac.jp

²第一工科大学 工学部 情報電子システム工学科 (〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2) t-yamada@daiichi-koudai.ac.jp

Quantitative Analysis of Visual Changes in Forest Spaces and its EEG Response

Kazuya SOEDA¹, Keita OTSU¹, Shota MATSUDA², Takeshi YAMADA²

¹Department of Architecture Design, Daiichi Institute of Technology

(1-10-2 Kokubuchou, Kirishima City, Kagoshima, 〒899-4395) k-soeda@daiichi-koudai.ac.jp

²Department of Department of Information and Electronic Systems Engineering, Daiichi Institute of Technology

(1-10-2 Kokubuchou, Kirishima City, Kagoshima, 〒899-4395) t-yamada@daiichi-koudai.ac.jp

Abstract: This study investigates the influence of sequential spatial experiences in forest environments on human brain activity, focusing on two distinct routes (A and B). EEG measurements, specifically alpha and beta waves, were analyzed, revealing distinctive patterns corresponding to each route. Fourier and wavelet transform analyses further elucidated these EEG responses' temporal variability and frequency-based characteristics. Correlation and wavelet analyses for particular subjects illustrated shared and individual brain activity patterns, affirming the dynamic and individualized nature of these experiences. The study provides a novel AI-assisted methodology for quantitative analysis of visual changes in forest spaces, offering a foundation for the efficient evaluation of natural spaces.

Keywords: VR Photography, Sunlight Filtering through Trees, ElectroEncephaloGraphy, Fourier, Wavelet

1. はじめに

この研究は、全周パノラマ画像を用いた視覚変化の定量分析方法を提案し、木漏れ日が形成する森林空間におけるシーケンシャルな空間特性とその脳波反応についての基礎的知見を得ることを目指す。

近年、視覚情報分析は、空間要素の定量分析を通じて建築空間と都市空間を考察する方法として注目を集めている。しかし、従来の空間記述と分析は、写真撮影時の方向や視野角に大きく影響される静止カメラやビデオカメラからの切り抜き画像と動画に依存している。また、視覚情報に基づいた空間分析でも、空間体験によって影響を受ける生理現象に関する分析はほとんど行われていない。すなわち、この研究では、視野内の事物の比率を定量的に把握することを可能にする全周パノラマ画像を利用し、空間体験の影響を考慮したVRの呈示と簡易脳波分析を利用して、シーケンシャルな空間体験を定量的に捉える実用モデルを提示する(図1)。

したがって、この研究は、シーケンシャルな空間体験中の脳波の変動に焦点を当てている。これまでも多極性脳波計を使用した脳波に関する研究は存在するが、装置の装着に必要な時間と装置自体の専門性から、簡易な形での脳波分析を行うことは困難であった。しかし、近年のVR技術や実験装置の開発により、そのハードルは下がっている。簡易脳波分析を用いることで、より無意識的な心理状態や知覚を客観的に捉え、定量データに基づいたシーケンシャル空間の特性を分析することが可能になる。これにより、空間の質についての従来の定性的アプローチを補完する定量的アプローチを提示することができる。

さらに、この研究では、視覚情報の定量分析方法を自動化し、主観的な側面と作業負荷を減らし、フィールド調査に基づいた豊かな森林空間の比較分析を行い、その方法の汎用性を示すモデル研究とすることを目指している。著者はこれまでも、特定の方向に依存しない視野内の事物の比率(立体角と立体角量)を定量的に把握することができる全周パノラマ画像を用いた

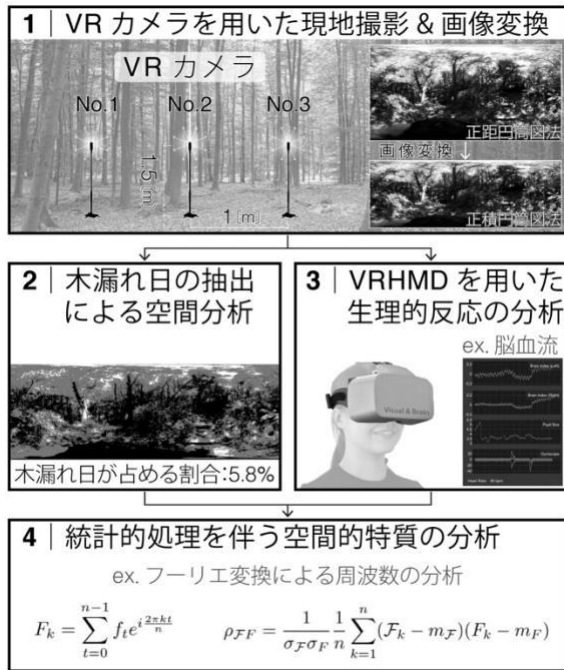


図1 本手法の流れ

離散的視覚情報の変化の定量分析方法（以下、「QDP方法」）を提案している。ここでの離散的視覚情報とは、一連を形成する各シーンと各視点から取得される独立した視覚情報を指す。この研究は、そこで得られる視覚情報の変化の影響に焦点を当て、空間を体験する人々の視点から空間の一連の体験を定量的に捉えるものである。視覚的な変化をもつ森林空間を対象とすることにより、その変化に焦点を当てる。森林空間に対する理論的かつ社会的な需要が高まる中、豊かな空間体験を持つ先例の議論は、持続可能な森林・人間の共生にとって重要である。

本研究の目的は、森林空間の代表的な環境要素の一つである木漏れ日を、森林の陽班の一部として客観的かつ定量的に抽出する分析方法を提案し、その空間特性と生理的効果を明らかにすることである。

2. 分析の方法

2-1. 調査対象

まず、データ収集とフィールド調査の概要を示す。先行研究¹⁾²⁾を参考に、夏季における森林空間の木漏れ日の視覚的特性を定量的に評価するため、本研究では全天球カメラを使用して130秒間のビデオ撮影を行った。画像データは正積分筒図法に変換し、各明度が占める割合を抽出した。陽班の抽出には、画像内の明るい箇所を自動的に識別し、木漏れ日の面積比率と数を計算した。

本研究では、鹿児島県の森林空間における2つのルート（ルートAとルートB）を撮影した。

ルートAは、全体的な印象として暗い部分で、林冠（森林の頂部で枝葉の茂った部分）がやや閉じている。林相（樹木の種類や生え方などからみた森林の状

態）の一部は杉の人工林で、他方は常緑広葉樹林である。このルートは、閉じた林冠の中で木漏れ日が絶えず変化し、時折林冠ギャップ（林冠の大きなすきま）により明るい開放空間が現れるという特徴がある（図2）。

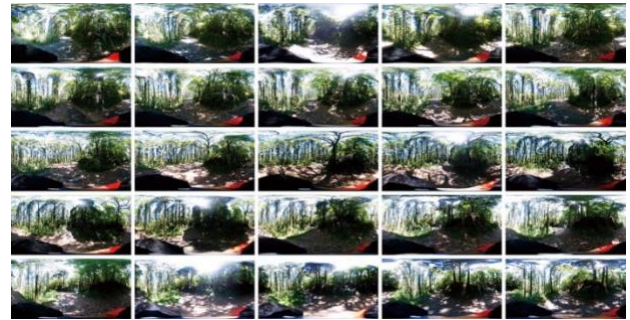


図2 ルートAの画像データ群

ルートBは、開放的で明るい空間から始まり、徐々に木漏れ日の差し込む空間に移動するルートである。林冠はやや閉じており、林相は常緑広葉樹林である。ルートの終盤には、林冠ギャップにより明るい開放空間が現れ、最後には森林の冠層が完全に閉じて暗い空間が残る（図3）。

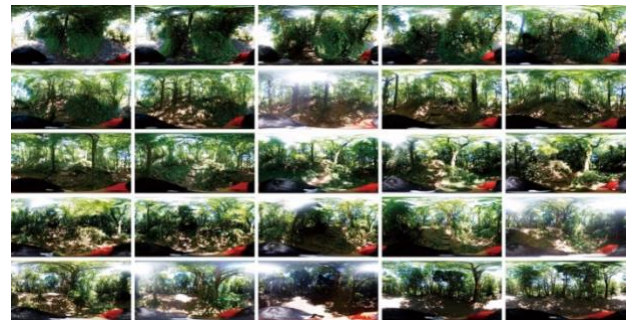


図3 ルートBの画像データ群

2-2. 木漏れ日の定量分析の概要

具体的には、全天球カメラ（RICOH THETA Z1）を使用し、森林空間のスタート地点からゴール地点までの130秒間を人間の目の高さに近い1700mmの高さから撮影した。カメラはオートモードに設定した。森林空間における季節性については、木漏れ日を形成する2つの季節要素である日光の強さと葉の成長の厚さを考慮して、夏に撮影を行うことにした。「太陽の高度」や「風による木々の揺れ」などの要素については、太陽の高度が一日の中で最も高い11:00から13:00の間に撮影を行い、風速は気象庁の「地上気象観測基準」で定義された軽風の上限である3.4m/s以下の条件を確認した。次に、撮影された動画データを1fpsの間隔で画像として書き出し、連続する画像データ群を取得した。書き出された画像データは、正確な面積比を示す正積分筒図法の全周パノラマ画像に変換した。本手法では、明るさの指標として明度を使用し、0から255のL*a*b*色のL*値を基に、最も明るい領域を簡易的

に抽出する。したがって、画像データの色情報は破棄され、明度だけが残る。画像変換後、木漏れ日の面積比を抽出する。陽斑は、樹冠や樹幹に遮られていない明らかに明るい領域、つまり明るさで最も明るい領域から抽出した。本研究では、最も明るい領域を明るさのトップ10% (230-255) と定義した。カメラのダイナミックレンジは、実空間の輝度分布よりも狭いものである。しかし、本研究で設定した明るさの範囲は、空間の明暗要素の配置を大まかに把握するのに十分な精度があると考え、分析モデルの一例として採用した。ダイナミックレンジの限界により画像の一部で白飛びや黒潰れが発生したとしても、その部分が空間の体験者に対して他の部分よりも明るくまたは暗く見えるという事実には違いはないと考えている。本研究では、「木漏れ日の面積比」を全画像のピクセル数に対する最も明るい領域のピクセル数の比率と定義し、「木漏れ日の数」を1ピクセル以上の面積の数と定義した。そして、「木漏れ日の面積の割合」を「木漏れ日の数」で叙したものを「木漏れ日率」と定義した。

以上のプロセスから得られる木漏れ日の視覚的特性に焦点を当てることで、森林空間における視覚情報の経時変化を定量的に把握し、森林の空間的価値を評価すること可能になる。

2-3. 簡易脳波分析の概要

次に、効果検証としての簡易脳波分析の概要について説明する。本研究では、現実空間の代替手段として指摘されているVRHMDを用いた空間呈示を行い、被験者に2つのルートのシーケンスを呈示し、その間の脳波の経時変化を測定した。これは、VRを用いた空間呈示に関する先行研究で「[現場] (現実) と[全天球]

(VR) は類似している³⁾」との結果が出ていること、そして、VRによる現実空間の再現性についての他の研究が進められていることを考慮したものである。

脳波の測定には、Good Brain社の“Focus Calm”というワイヤレス脳波測定装置を使用した。この装置は、頭部の3点に電極を接続することで脳波測定を可能にする。ワイヤレスでコンパクトな簡易脳波測定装置を使用することで、被験者への負担を最小限に抑えた測定が可能である(図4)。測定データは同社が提供するアプリケーションを使用して収集し、データをCSV形式に書き出すことで脳波データを取得した。

実験は、健康な大学生(18歳~22歳)を対象に行った。被験者は実験について説明を受け、同意書に署名した。測定手順は、閉眼状態の1分間の安静状態から始まり、その後、2つのルートのシーケンスを各被験者に3分間呈示し、2つの間には、閉眼状態の安静状態で1分間の間隔をおいた。

分析データは、観察値における計測上のばらつき変動が大きかった被験者を除いた6人分の測定値で、本研究ではこのデータ群に対して統計処理を行う。具体的



には、数値化された脳波周波数はまず次の周波数帯に分類する： $1\text{Hz} < \delta < 3\text{Hz}$ 、 $4\text{Hz} < \theta < 7\text{Hz}$ 、 $8\text{Hz} < \alpha < 13\text{Hz}$ 、 $14\text{Hz} < \beta < 40\text{Hz}$ 、 $40\text{Hz} < \gamma$ 。それぞれの成分比率を決定し、各秒ごとに平均化した。各波が1秒間に発生する

図4 測定の様子

割合(%)である出現率を使用した。さらに、各被験者における時間軸上の微小な差異を考慮し、この周波数の発生率を5秒ごとの移動平均の値として使用した。

ここで脳波について説明する。脳波は、脳表面の電極によって捕捉された脳の電気活動の記録と定義されている⁴⁾。これは中枢神経系活動の指標の一つであり、人間の心と行動を生み出す脳に焦点を当てた脳波は、その客観性、定量性、リアルタイム性、連続性、非言語性、生物機能性⁵⁾といった利点から多くの研究が積み重ねられてきた。前述のように、脳波は周波数で分類され、5つの周波数帯に分けられる。これらの中で、 α 波はリラクゼーションの指標とされ、 β 波は緊張・興奮状態の指標とされている⁶⁾。本研究では、「視覚処理が活発であるときに β 波の発生量が多い⁷⁾」、「思考活動などの精神活動が活発なときに β 波が主に現れる⁸⁾」など、いくつかの先行研究を考慮した。本研究では、 α 波と β 波に焦点をあて、その脳活動への影響を把握する。

2-4. 周波数解析の概要

本研究では、各被験者の脳波変動を比較するために、フーリエ変換とウェーブレット変換を用いてパワースペクトル解析とその相関を比較する。フーリエ変換^{注1)}は、周波数の構造を比較し、相関を確認するため、そして全体的な動的視覚情報を含む特徴を比較するために使用する。次に、ウェーブレット変換^{注2)}を使用して、常に変化する脳波を分析し、部分の変化を考慮した動的視覚情報を内包する特徴を比較する。これは、フーリエ変換を用いた解析では時間軸に沿った対象間隔のスペクトルのみが得られ、時間情報が失われると指摘されていることを考慮したものである⁴⁾。他の方法としては、短時間フーリエ変換などが提案されているが、周波数解像度の低下¹⁰⁾などの問題が指摘されている。

フーリエ変換を用いた解析と比べて、ウェーブレット変換を用いた時系列データの解析は、周波数特性が時間の関数として与えられ、時間軸、周波数軸、パワースペクトルの三次元情報として得られるという利点があり、非定常生物信号の時間変動を分析する効果的な方法となっている。本研究では、これら2つのパワースペクトル解析を用いて相関係数を把握する。相関係数の値とその相関は以下の通りである：「 $-1 \leq r \leq -0.7$: 強い負の相関, $-0.7 \leq r \leq -0.4$: 負の相関, $-0.4 \leq r \leq -0.2$: 弱い負の相関, $-0.2 \leq r \leq 0.2$: ほとんど相関なし, $0.2 \leq r \leq 0.4$: 弱い正の相関, $0.4 \leq r \leq 0.7$: 正の相関, $0.7 \leq r \leq 1$: 強い正の相関」である。

この解析は、一見異なる各個体の脳波の類似性の傾向を定量的に把握することを目的としている。先行研究では、「同一被験者間で比較的類似した傾向を示すものの、各景観映像において共通した β 波の推移は認められず、各被験者間で差が見られた。⁹⁾」「被験者」については全ての帯域で有意な差があり、逆に「模様の種類」(対象)については全ての帯域で有意な差が認められず、(対象)に対する脳波の変化は個人差が大きいという結果となった。¹¹⁾」これらの結果は、各被験者の反応のばらつきを指摘している。

3. 定量分析の内容

3-1. 木漏れ日の定量化

まず、木漏れ日の空間的特性について定量化により議論する。

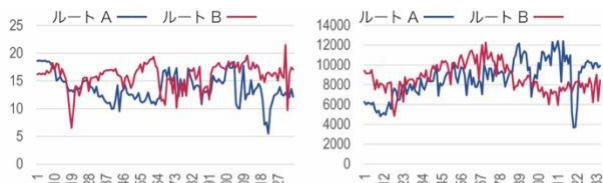


図5 明るさの割合

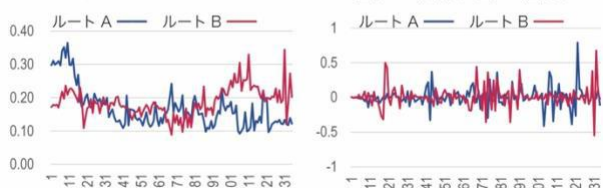


図6 木漏れ日の個数

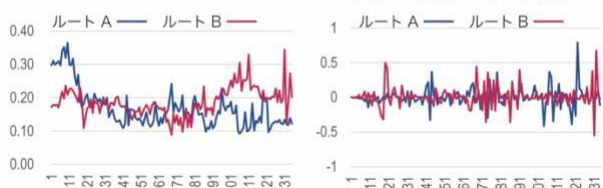


図7 木漏れ日率

本研究では最初に、ルートAとルートBの各地点での明るさ比を分析した(図5)。ルートAの明るさ比は全体的に減少傾向を示す。特に、地点No.1からNo.8までは明るさの割合が比較的安定しており、No.9からNo.38までは徐々に減少し、No.38で最小の10.95%に到達する。明るさの割合は常に変動を示し、No.122で最小の5.54%に到達する。一方、ルートBの明るさの割合は全体的に揺らぎの傾向を示している。特に、No.1からNo.8までの明るさ比は比較的安定しており、No.9でピークに達し、No.19で最小の6.54%に達する。その後、明るさの割合は常に変動を示し、

No.131で最大の21.49%に達する。ルートAとルートBの明るさの割合を比較すると、両方のルートが10%から20%の間で揺れ動いている。しかし、ルートAは全体的に減少傾向にあり、一方、ルートBは揺れ動く傾向がある。また、明るさの割合は特定の地点で大きく変動している。

次に、ルートAとルートBの木漏れ日の数を分析した(図6)。ルートAの木漏れ日の数は地点ごとに大きく変動する。木漏れ日の最小数は3,685で、最大は12,419である。平均値はおおよそ8,682である。データの分散または広がりを示す標準偏差はおおよそ1,881で、これはルートAの異なる地点での木漏れ日の数に大きな変動があることを示している。ルートBの木漏れ日の数も地点ごとに大幅に変動する。平均値はおおよそ8,713で、標準偏差はおおよそ1,401である。ルートBで観測された木漏れ日の最小数は4,858で、最大は12,264である。これはルートBの異なる地点での木漏れ日の数に変動があることを示している。ルートAとルートBの木間の木漏れ日の数を比較すると、全体的にルートAが木間の木漏れ日の数が多い傾向にある。

次に、ルートAとルートBでの木漏れ日率を分析した。木漏れ日率は、特定の点での明るさの割合を木漏れ日の数で割った比率である。本研究では、各ルートの各地点での木漏れ日率を測定し、変化と傾向を分析した(図7)。

ルートAでの木漏れ日率は初期の地点(No.1からNo.6)で約0.30を維持していたが、No.7で0.34まで増加した。その後、No.7からNo.20までの全体的な木漏れ日率は減少し、特にNo.20で0.20になった。その後、No.21からNo.33までは、木漏れ日率は比較的安定しており、最低の木漏れ日率はNo.33で0.14まで下がった。しかし、No.33以降は木漏れ日率が減少し、No.41で最低の0.11に達した。その後、木漏れ日率は再び上昇し、No.43で0.21のピークに達した。その後の変動では、No.67で0.20のピーク、No.74で0.21のピーク、No.81で0.21のピークを示したが、逆にNo.87で0.10、No.106で0.09、最終地点のNo.135で0.12の低下が見られた。これらの動きにより、木漏れ日率には大きな変動が見られ、上昇と下降が繰り返された。一方、ルートBでの木間の木漏れ日率も初期の地点(No.1からNo.6)で0.18前後に変動していたが、No.7で0.22まで顕著に増加した。その後、No.7からNo.17までの全体的な木漏れ日率は上昇し、No.17で0.23のピークに達した。その後、No.24まで木漏れ日率はゆっくりと上下した。その後、木漏れ日率は上昇と下降を繰り返し、特にNo.86で0.23、No.96からNo.98で0.23、No.101で0.25、No.103で0.27、No.106で0.31と高い値を示した。一方、No.68で0.09、No.70で0.12という低下が見られた。木漏れ日率がルートの終わりに向かって増加する傾向は、樹冠

ギャップ（大きな森林の樹冠）によって作られる明るい開放空間によるものと考えられる。ルートAとルートBの両ルートで木間の木漏れ日率が大きく変動することが明らかになり、この変動は空間的特性と関連していることがわかった。

最後に、ルートAとルートBの明るさの変化率の変動を分析した（図8）。変化率は、明るさが基準値に対してどれだけ増加または減少したかの値で、“変化率 = {決定点の値 - 開始点の値} / 開始点の値”と定義されている。この研究では、各ルートの各地点での明るさの変化率を調査し、変化と傾向を分析した。

ルートAの明るさの変化率は地点により大きく変動する。初期の地点（No. 1からNo. 5）の変化率はほぼゼロで、No. 6でわずかに増加した後、すぐにNo. 7で-0.02まで減少した。No. 7からNo. 10までは、全体的な明るさの変化率は減少の傾向にあり、No. 10で-0.14という大きな負の値を示した。変化率は、No. 12で0.03まで上昇し、No. 14で-0.02まで下降するなど、一定の上下動を示した。特に、No. 42で0.22という最大値を記録し、No. 43で-0.33という大きな落ち込みが見られた。地点が進むにつれて、変化率は上昇と下降を繰り返す。No. 66で0.21の増加からNo. 70で-0.17の大きな下降、No. 79で0.36の増加からNo. 86で-0.22の下降と変動した。特に目立った変化は、No. 104で-0.41という大きな下降があり、その後No. 107で0.37まで上昇し、再びNo. 109で-0.34まで大きく下がり、No. 119も観察された。最終地点のNo. 134では、変化率は0.02とほぼ無変化であった。

一方、ルートBの明るさの変化率も地点ごとに大きく変動する。初期の地点（No. 1からNo. 5）での変化率はほぼゼロで、No. 6で0.05に増加し、No. 7で-0.05に減少した後、No. 9で再び0.08に増加した。その後、変化率はNo. 12で0.13、No. 14で-0.10、No. 18で0.16というように、一定の上下動を繰り返した。No. 28で-0.27という最大の下降が見られた後、No. 30で0.21という最大の上昇が見られた。これらの変動はルートB全体で見られ、特にNo. 45で-0.29、No. 47で0.27、No. 65で-0.30、No. 67で0.35という大きな変動があった。最終地点のNo. 135では、変化率は0.03とほぼ無変化であった。この結果は、ルートAとルートBの明るさの変化率が大きく変動することを示しており、この変動は空間的特性と関連していると言える。

以上の結果から、木漏れ日の空間的特性についての定量的な評価が可能になり、それぞれのルートにおける変動のパターンが明らかになった。

3-2. 脳波の定量化

次に、脳波測定から得られる生理的反応について述べる。まず、ルートAを経験した各被験者の各地点でのα波とβ波の変化を調査し、その変化と傾向を分析した（図9）。

ルートAを経験した被験者のα波は地点により大きく変動した。特に、ルートAの中間部（約No. 50付近）では、全ての被験者が比較的類似したα波値を示し、こ

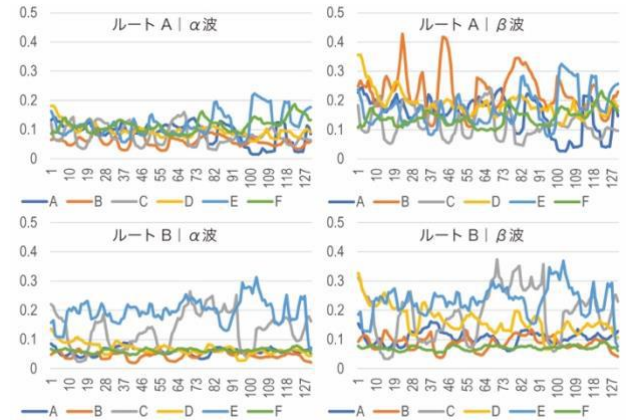


図9 被験者ごとの脳波の出現率

れは被験者がルートAのこの部分に対して共通の経験と反応を共有している可能性を示唆している。ルートAの後半部（約No. 100付近）では、被験者Aのα波が他の被験者よりも高くなる傾向が見られた。これは、被験者Aがルートの終わりにリラックスし、瞑想的な状態になっていたことを示唆している。β波も地点により大きく変動した。具体的には、全ての被験者において、β波値は全体的に時間と共に減少する傾向があるが、大きな変動が見られた。これは、実験を通じて積極的な集中力と注意力が減少したことを示唆している。一方で、特定の被験者に対してβ波値が大幅に増加または減少するいくつかの地点があった。例えば、被験者BはNo. 22でβ波が大幅に増加し、No. 45でも高い値を示しており、これは高度な警戒感と集中期間であることを示唆している。

一部の被験者では、特定の地点でα波とβ波の大幅な増加または減少が観察された。これは、その地点に何らかの特異な状況が存在した可能性を示唆している。例えば、一部の被験者は特定の地点で極端な値を示すことがある。これは、ルートAの特定の変化がこれらの被験者に強く影響を与えた可能性を示唆している。終盤（No. 130付近）では、全ての被験者が開始時（No. 1付近）よりもβ波活動が低下していた。これは、ルートAが全体的に落ち着かせる効果を持っていた可能性を示している。これは、ルートAの経験が被験者のリラクゼーションと思考活動に影響を与える可能性を示している。

次に、ルートBを用いて各被験者の各地点でのα波とβ波の変化を調査し、その変化と傾向を分析した。ルートBを経験した被験者のα波は地点により大きく変動した。具体的には、α波の値はNo. 1からNo. 10までの間で大部分の被験者で減少傾向にあり、その後再び増加し始めた。この傾向は全ての被験者に一様ではないが、多くの場合で確認されるパターンである。終盤に向かって（No. 100からNo. 130）、大部分の被験者の

α 波の値が増加するように見える。これは、終盤において脳活動の変化があったことを示唆する。 β 波も地点ごとに大きく変動した。その中にはいくつかの傾向がある。例えば、被験者Aの場合、 β 波の値は地点No. 1からNo. 40付近まで増加し、その後No. 70付近まで減少し、その後再び終わりまで増加した。他の被験者も同様の傾向を示すが、具体的な増加または減少地点は異なる。一方、 β 波の測定値は被験者により大きく異なった。例えば、被験者Aの場合、それらは0.061から0.161の範囲にあった。この高い変動性は、 β 波の測定値が非常にダイナミックであり、時間と共に大きく変化することを示唆している。被験者間でも明らかな違いがある。一部の地点では、全ての被験者の β 波の測定値が増加または減少するように見える。例えば、No. 70付近では、全ての被験者の値が増加するように見える。 α 波と β 波の読み取り値を比較すると、同じ地点や時間帯での β 波の読み取り値が α 波の読み取り値よりも高いことがわかる。これは、被験者が自身の思考と集中度により活動的であったことを示唆する。

本研究では、ルートBを経験した被験者の α 波と β 波の変化を分析した。その結果、ルートBの経験が被験者の脳波活動、特に β 波の変化に影響を与えたことが確認された。これは、ルートBの経験が被験者の思考活動に影響を与える可能性を示している。

この研究では、各ルートを経験した被験者の α 波と β 波の変化を分析した。その結果、ルートAとルートBの間で α 波と β 波の変化に明確な違いがあったことが明らかになった。これは、ルートAとルートBの経験が被験者の脳波活動に異なる影響を与える可能性を示唆している。

3-3. 脳波のフーリエ解析

ここからフーリエ変換を実施し、脳波の全体的な時間変動をより把握する(図10)。

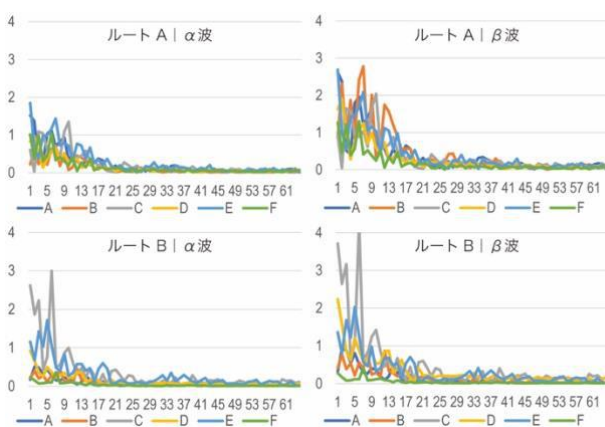


図10 被験者ごとの脳波のフーリエ変換

まず、被験者がルートAを経験したときの脳波、特に α 波と β 波の変化を分析した。ルートAの α 波のフーリエ変換解析の結果は以下のとおりである。

平均値：被験者A 0.76、被験者B 0.22、被験者C 0.35、被験者D 0.32、被験者E 0.45、被験者F 0.32
標準偏差：被験者A1.89、被験者B0.99、被験者C0.92、被験者D0.99、被験者E1.27、被験者F1.06
これらの値は、 α 波のデータが広範な値を含み、地点によって大きく変動することを示す。また、平均値は最大値に比べて比較的lowく、低周波成分が支配的であることを示唆している。さらに、標準偏差は比較的高く、異なる時点での α 波のデータが広範囲に変動していることを示している。

次に、ルートAの β 波のフーリエ変換解析の結果を示す。

平均値：被験者A 1.93、被験者B 1.87、被験者C 0.89、被験者D 0.88、被験者E 0.91、被験者F 0.64
標準偏差：被験者A 3.12、被験者B 3.65、被験者C 1.30、被験者D 1.36、被験者E 1.43、被験者F 0.89
これらの値は、被験者Aと被験者Bが他の被験者よりも平均的に β 波が高かったことを示している。また被験者Bの β 波が最も変動性があり、被験者Fの β 波が最も変動性が少なかったことも示している。

次に、ルートBの α 波のフーリエ変換解析結果を示す。

平均値：被験者A 0.07、被験者B 0.09、被験者C 0.57、被験者D 0.20、被験者E 0.39、被験者F 0.04
標準偏差：被験者A0.09、被験者B0.08、被験者C0.69、被験者D0.15、被験者E0.38、被験者F0.04

これらの値は、 α 波のデータが広範な値を含み、地点によって大きく変動することを示す。平均値と標準偏差はまた、被験者間での α 波のパターンが一様でないことを示している。一部の被験者(例えば、被験者Cと被験者E)は平均値が高く、データの変動性が大きいことから、より複雑で激しい脳活動を示している可能性がある。

次に、ルートBの β 波のフーリエ変換解析の結果を示す。

平均値：被験者A 0.16、被験者B 0.17、被験者C 0.84、被験者D 0.55、被験者E 0.52、被験者F 0.04
標準偏差：被験者A0.18、被験者B0.17、被験者C0.84、被験者D0.55、被験者E0.52、被験者F0.04

これらの値は、 β 波のデータが広範な値を含み、地点によって大きく変動することを示している。特に、被験者Cのデータは平均値が最も高く、実験中に最も脳活動があった可能性があることを示唆している。被験者Fのデータは平均値が最も低く、この被験者は最も活動的な脳活動がなかった可能性を示している。

この研究では、被験者のルートAおよびルートB体験中の脳波の α 波と β 波のフーリエ解析を実施し、 α 波と β 波のデータが広範な値を含み、地点によって大き

く変動することが示された。これらの値は、一連のシーケンスでの全体的な脳波応答の特性を比較することを可能にするものである。

3-4. 脳波のウェーブレット解析

さらに、これらのフーリエ変換の結果について相関分析を行い、両ルートで各被験者と強い相関を示した被験者Aと被験者Eのα波について、部分的な時間変動をより詳しく把握することを可能にするウェーブレット変換を実施した（表1・表2・図11）。

表1 ルートA | α波のフーリエ変換の相関係数

相関	被験者A	被験者B	被験者C	被験者D	被験者E	被験者F
A	-	0.71	0.51	0.91	0.83	0.77
B		-	0.61	0.78	0.79	0.60
C			-	0.57	0.69	0.62
D				-	0.82	0.78
E					-	0.76

表2 ルートB | α波のフーリエ変換の相関係数

	被験者A	被験者B	被験者C	被験者D	被験者E	被験者F
A	-	0.71	0.51	0.91	0.83	0.77
B		-	0.61	0.78	0.79	0.60
C			-	0.57	0.69	0.62
D				-	0.82	0.78
E					-	0.76

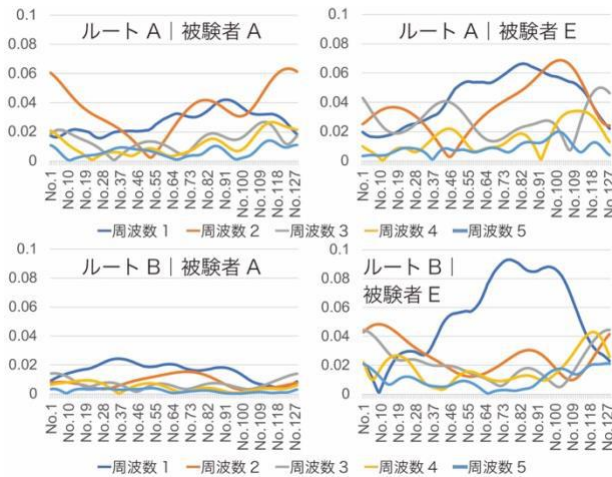


図11 被験者A・Eの脳波(α波)のウェーブレット変換

ルートAのα波の解析では、被験者両方とも、周波数帯域1が初めに増加し、ピークに達した後、減少するように見える。これは、ルートの最初の部分で特定の反応が続いて減少することを示唆している。また両方のケースで、周波数帯域2もルートに沿って減少・増加する。これは、時間と共にルートへの順応または慣れを示唆するものである。一方で、特定の値やピークと谷の正確な地点には違いがある。これは、脳反応の個々の違いを反映している可能性がある。

次に、ルートBのα波の解析結果である。被験者両方とも、周波数1と2が他の周波数よりも高い値を示す。これらは、これらの被験者のα波の主要な周波数である可能性がある。一部の周波数は位置による傾向を示している。例えば、被験者Aの場合、周波数1は最初に増加してから減少し、周波数3は最初に減少してから増加するように見える。これは、ルートBの特定の地点が異なる脳波反応を引き起こすことを示唆している。特徴的な点は、周波数値が大きく変化する地点である。例えば、No. 40近くでは、周波数1と3が大幅に変化する。これは、この地点での直射日光が原因で、ルートBではこの地点が被験者の脳波パターンの変化を引き起こす可能性がある。

この研究では、ルートAとルートBを体験した2人の被験者の脳波のα波がウェーブレット解析によって解析された。結果は、相関性のある被験者であっても、ルート上の異なる地点によって脳反応が異なり、同じルートに対する脳波反応に個人差があることをより詳細に示した。

3-5. 分析のまとめ

本研究では、連続する視覚的変化の定量分析方法を確立し、この方法を用いて森林空間を体験する人々の脳活動の経時変化に伴う変動を分析した。特に、木漏れ日による視覚情報の変化が空間を体験する人々の脳活動にどのように影響するかを確認した。具体的には、2つのルート（ルートAとルートB）を設定し、各ルートの体験における脳波（特にα波とβ波）の変動を測定した。ルートAとルートBの間でα波とβ波の変動には明確な違いがあり、これらのルートが体験者の脳波活動に異なる影響を及ぼすことを示唆している。ルートAでは、α波の変動が特に顕著であり、このルートの体験が体験者にリラクゼーション効果をもたらしたことを示している。特にルートAの中間部分（No. 50付近）では、すべての被験者が比較的一致したα波の値を示し、共通の体験と反応を共有する可能性を示している。一方、ルートBでは、β波の変動がより顕著であり、活発な思考と集中力に影響を与えることを示唆している。特に、一部の被験者では特定の点でα波とβ波の著しい増加と減少が観察され、これらの点で特異な状況が存在した可能性を示している。また、フーリエ変換とウェーブレット変換の解析を用いて、これらの脳波の全体的および部分的な時間変動を分析した。結果は、被験者の脳波反応には個人差が存在し、同一ルートでも脳波反応に個人差があることを明らかにした。

4. おわりに

本研究では、2つの森林空間における視覚情報の変化と、それに対する人々の脳波活動を調査し、その間の相互作用について初歩的な知見を得ることができた。

木漏れ日による視覚情報の変化が空間を体験する人々の脳波活動にどのように影響するかを確認した。しかし、これは極めて初本的なモデルであり、以下の点を今後の課題として取り組む必要がある。

各被験者はそれぞれ一意であり、反応は異なる場合がある。年齢、性別、健康状態、心理状態、過去の経験などが脳波活動に影響を及ぼす可能性がある。本研究ではこれを補完するために、気分プロフィールなどの主観的な分析を組み込んだが、その有効な相関関係は確認できなかった。さらに、AI技術は大量のデータを処理し、複雑なパターンを見つける能力があるため、さらなる脳波解析に特に適している。AI技術は日進月歩で進歩しており、新たなアルゴリズムや技術が出てくるとともに、さらに洗練され効率的な解析が可能になると考えている。その一環として、本研究でも昨今一般化してきた生成AIであるLarge Language Models (LLMs) を活用した。分析そのものも、深層学習などの最新のAI技術を活用し、さらに高度な解析を行う可能性がある。

しかしながら、この研究の不十分さは、それが本質的かつ空間的な問題を抱えているわけではない。本研究で使用された方法は他の空間にも適用可能であり、言い換えれば、これを一般化することが可能であり、それはこの方法が明確化されたことに他ならない。つまり本研究で提案された方法は、シーケンシャルな視覚変化の定量分析における有効性が示されている。本研究の立場は、特定の実際の空間、ここでは森林空間に対して一定の客観性を保証する定量分析方法としてこの方法を利用することであり、このような方法が存在することが望ましいというものである。この研究の視点は、これからの社会が求める豊かな森林空間の価値を正確に評価するための有用なツールを提供し、ただ緑と木々の蓄積以上の社会的意義を持つことになる森林空間の意味と価値について議論するための足がかりを提供することであり、ひいては空間の新たな意味を考える上で重要な視点となるであろう。

謝辞

本研究を進めるにあたって、第一工科大学の学生に多くの協力を頂いた。また本研究は「公益財団法人大林財団」の助成によるものである。記して感謝する。

参考文献

- 1) 副田和哉, 平瀬有人, 三島伸雄: 全周パノラマ画像を用いた離散的視覚情報の変化の定量分析手法 パラッツォ型鑑賞空間を対象とするモデル的研究, 日本建築学会計画系論文集, 第86巻 第780号, pp425-435, 2021. 2
- 2) 副田和哉, 平瀬有人, 三島伸雄: 全周パノラマ画像を用いた離散的視覚情報の変化の定量分析手法 直列および並列房状鑑賞空間を対象とする比較検証, 日本建築学会計画系論文集, 第87巻 第802号, pp2699-2709, 2022. 12

- 3) 杉田宗, 西名大作, 小林亮, 被験者A 貴宏, 大石洋之: 全天球画像評価による屋外空間の心理的評価の代替可能性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第83巻 第745号, pp235-245, 2018. 3
- 4) 大熊輝雄, 松岡洋夫, 上埜高志: 脳波判読入門編(第4版), 医学書院, 2009
- 5) 李早, 宗本順三: 脳波解析法を用いた水景空間と非水景空間の比較研究 中国の住宅団地の外構に対する視聴覚実験による脳波計測-, 日本建築学会計画系論文集, 第75巻 第647号, pp67-74, 2010. 1
- 6) 金子真由美, 乗松貞子: 腰背部温罨法における湿熱法と乾熱法によるリラクゼーション効果の比較, 日本看護研究学会雑誌, 第35巻 第4号, pp37-46, 2012.
- 7) 大谷一郎, 梨木守, 北川美弥, 尾上桐子: 草地景観の静止画とビデオ画像による呈示の脳波反応の比較, 日本草地学会誌, 第48巻 第6号, pp522-525, 2003.
- 8) 佐藤仁人: 室内の窓や植栽・絵画が脳波等に及ぼす影響 執務空間における視環境の生理心理的影響に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第461号, pp87-95, 1994. 7
- 9) 横山広充, 福島和朗, 宮岸幸正: 眺望景観把握時の脳波特性に関する基礎的研究 高取山と大文字山からの眺望景観映像を対象として, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 857-858, 2015. 9 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第55号, pp. 797-800, 2015. 6
- 10) 本多薫, 若井正一: 地下街歩行時の心拍変動を指標とした生体負担の測定に関する実験的検討, 日本建築学会計画系論文集, 第603号, pp57-64, 2006. 5
- 11) 尾形一樹, 秋田剛, 佐野奈緒子, 宇治川正人: 壁紙模様の反復性による心理・生理的効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 39-40, 2016. 8

注釈

注1) 離散フーリエ変換 (DFT) は、離散信号を周波数領域の三角関数へと分解するツールで、その計算式は(1)に示す。これにより、信号の持つ周波数成分を定量的に把握し、隠れたパターンや特徴を明らかにすることができる。本研究では、離散的な脳波データへDFTを適用し、データの周波数領域での特徴を解析する。

$$F(\omega) = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{-i \frac{2\pi\omega x}{N}} \quad (1)$$

注2) 連続ウェーブレット変換 (CWT) は、特徴が様々な規模で変化するデータを解析する手法で、正弦波と異なり速やかに減衰するウェーブレットを用いる。通常のフーリエ変換が失われがちな時間情報を保持し、時間軸、周波数軸、振幅の3つの次元での解析ができる。マザーウェーブレットの定義式は(2)、CWTの計算式は(3)に示す。

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{i2\pi f_c x} e^{-\frac{x^2}{f_b}} \quad (2)$$

$$W_\psi[f(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{a,b}^*(x) dx \quad (3)$$