

ハイパーソニック・エフェクトによる
脳賦活に基づく音環境快適化の研究
——鉄道騒音環境改善への応用——

総合研究大学院大学

文化科学研究科 メディア社会文化専攻

20070504 小野寺英子

主任指導教員：仁科エミ教授 指導教員：広瀬洋子教授・近藤智嗣准教授

目次

第1章	序論.....	1
1.1.	研究の背景.....	2
1.2.	研究の目的.....	4
1.3.	論文の構成.....	4
第2章	関連領域の動向と先行研究.....	8
2.1.	鉄道における騒音対策.....	9
2.2.	鉄道の音環境評価～音量評価から音質評価へ.....	10
2.3.	騒音に対する不快感に関わる研究～音を受容する人間の側への注目.....	13
2.4.	ハイパーソニック・エフェクト研究.....	14
2.4.1.	ハイパーソニック・エフェクトの概要.....	14
2.4.2.	脳イメージングが見出したハイパーソニック・エフェクト.....	17
2.4.2.1.	一対比較法への疑義と研究手法の再構築.....	17
2.4.2.2.	脳波を指標とする検討.....	20
2.4.2.3.	ハイパーソニック・エフェクトの遅延と残留を考慮した心理実験デザイン の構築.....	24
2.4.2.4.	脳血流を指標とする検討.....	27
2.4.3.	ハイパーソニック・エフェクトによる基幹脳活性化の現実的指標.....	29
2.4.4.	二次元知覚モデル.....	30
2.4.5.	ハイパーソニック・エフェクトを発現させる〈ハイパーソニック・サウ ンド〉.....	33
2.4.5.1.	自然音におけるハイパーソニック・サウンド.....	33
2.4.5.2.	人工高周波に関する検討.....	34
2.4.6.	ハイパーソニック・エフェクトを応用した音環境快適化の事例.....	35
2.4.6.1.	図書室での実験.....	36
2.4.6.2.	都市環境音を仮想的に再現した実験室での実験.....	36
2.4.6.3.	実在の市街地への応用事例.....	37
2.4.7.	本研究の位置づけと課題.....	39

第3章	研究の方法	41
3.1.	実験空間の設定と実験方法	42
3.2.	環境音収録・分析手法の構築	43
3.2.1.	騒音レベルの計測	43
3.2.2.	超広帯域収録システムの構築と予備的計測	43
3.2.2.1.	マイクロフォン	44
3.2.2.2.	レコーダー	45
3.2.3.	超広帯域収録システムの再構築	47
3.2.3.1.	マイクロフォン	48
3.2.3.2.	レコーダー	49
3.2.3.3.	分析システム	50
3.3.	実験用音試料	50
3.3.1.	駅ホーム環境音／車両内環境音の超広帯域収録	50
3.3.2.	〈仮想駅ホーム環境音〉〈仮想車両内環境音〉の作成	51
3.3.3.	〈ハイカット・アナウンス／発車ベル〉の作成	51
3.3.4.	超高周波成分〈ハイパーソニック・シャワー〉の作成	52
3.3.5.	〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉の作成	52
3.4.	再生システム	53
3.4.1.	実験室内用再生システム	53
3.4.2.	駅臨時ホーム用再生システム	55
3.4.3.	試験用車両用再生システム	57
3.5.	心理学的指標による評価手法	58
3.6.	生理学的指標による評価手法	58
3.7.	音呈示順序	60
3.8.	実験参加者	61
第4章	鉄道空間の音環境の物理構造	62
4.1.	駅ホームの音環境の物理構造	63
4.1.1.	騒音レベルの計測	63
4.1.2.	駅ホーム環境音の超高帯域収録と分析結果	64

4.1.3. 考察.....	64
4.2. 車両内の音環境の物理構造の把握	66
4.2.1. 騒音レベルの計測	66
4.2.2. 車両内環境音の超広帯域収録と分析結果	66
4.2.3. 考察.....	67
第5章 駅ホーム環境音を用いた予備的検討	69
5.1. 実験空間および呈示条件.....	70
5.2. 心理学的指標による評価実験.....	72
5.2.1. 概要.....	72
5.2.2. 結果.....	73
5.3. 生理学的指標による評価実験.....	75
5.3.1. 概要.....	75
5.3.2. 結果.....	75
5.4. 考察	76
第6章 鉄道空間の音環境への超高周波成分の付加呈示が及ぼす影響の検討... 77	
6.1. 駅ホーム環境音への超高周波成分付加呈示が及ぼす影響の検討～	
【フル・ハイパーソニック条件】の効果の検討	78
6.1.1. 実験空間及び呈示条件	78
6.1.2. 心理学的指標による評価実験.....	83
6.1.2.1. 概要	83
6.1.2.2. 結果	84
6.2. 車両内環境音への超高周波成分付加呈示が及ぼす影響の検討～【フル・ハイパーソニック条件】の効果の検討	86
6.2.1. 実験空間および呈示条件.....	86
6.2.2. 生理学的指標による評価実験.....	91
6.2.2.1. 概要	91
6.2.2.2. 結果	91
6.2.3. 心理学的指標による評価実験.....	92
6.2.3.1. 概要	92

6.2.3.2. 結果	94
6.3. 【ハイパーソニック・シャワー条件】の効果の検討	97
6.3.1. 生理学的指標による評価実験.....	97
6.3.1.1. 概要	97
6.3.1.2. 結果	98
6.3.2. 心理学的指標による評価実験.....	99
6.3.2.1. 概要	99
6.3.2.2. 結果	99
6.4. 超高周波成分の呈示時間についての検討.....	101
6.4.1. 生理学的指標による評価実験の概要	101
6.4.2. 生理学的指標による評価実験の結果	101
6.5. イヤフォン装着者におけるハイパーソニック・エフェクトの検討	103
6.5.1. 生理学的指標による評価実験.....	103
6.5.1.1. 概要	103
6.5.1.2. 結果	105
6.5.2. 心理学的指標による評価実験.....	105
6.5.2.1 概要.....	105
6.5.2.2 結果.....	106
第7章 考察.....	109
7.1. 本研究における生理学的指標・心理学的指標の意義	110
7.2. 騒音環境におけるハイパーソニック・エフェクト発現.....	115
7.3. 可聴音と起源を異にする超高周波の付加によるハイパーソニック・エフェ クト発現	115
7.4. 超高周波成分の安全性に関する検討	118
7.5. 公共性空間への応用にむけての成果	120
7.5.1. 公共性空間で現在行われている騒音対策・音演出と本研究との相違.	120
7.5.2. 実装手法の成果.....	121
7.6. 今後の課題.....	122
第8章 結論.....	124

謝 辭	128
文 獻	130

第1章 序論

1.1. 研究の背景

私たちを取り巻く環境では自然の環境音が減少する一方、人工的な騒音が増え続けている。とりわけ都市の鉄道空間は、騒音源となりうる列車が数多くの利用者と避けがたく近接して所在するという点で、その典型といえる。多数の列車が発着し大勢の人々が行き交う都市の駅のホームには、列車走行に伴う音、利用者の発する話し声をはじめとするさまざまな音、アナウンスや発車ベル（チャイム）など多様な音が重畳して存在し、その音環境はかねてから、不快・劣悪であると指摘されている。列車内は、不特定多数の人々が閉鎖空間内で互いに密接し騒音源に囲まれて運ばれる空間であり、そうした時間空間の体験は不快感の発生を避けがたい。

音環境の不快感をひきおこす要因の主なものは、従来、音の大きさにあるといわれてきた。そこで、「音の発生そのものを抑制」しようとする音源対策、「発生した音を減らす」ための遮音・吸音を中心とする伝搬系対策が、さまざまな局面において進められている[北川, 2012]。しかし、利用者の不快感に影響を及ぼすと考えられる要因は多様であり、騒音レベル、周波数分布、持続時間など音それ自体のもつ物理的要因に加え、発生源の公共性、音の必要性といった社会的要因に結びついた受忍限度の個人ごとの相違、音をきく人の健康状態、嗜好、過去の経験を背景とする音に対する感受性の個人差など、さまざまな要素が影響している[山本, 1990]。こうした状況の中で、各種の騒音低減策がそれぞれの効果を発揮し成果をあげてはいるものの、騒音による不快感は依然として解決されるに至っていない。なかでも鉄道空間では、列車が騒音発生源となるだけでなく、アナウンスや発車ベルなど情報伝達のための音を付加することが欠かせない上に、利用者が発する制御不可能な多様な音がさらに加わる。そのため、騒音低減策の限界は著しい。特に、アナウンスや発車ベルなどのサイン音は、まったく同一の音が、ある人にとっては「大きすぎてやかましい」一方、別の人にとっては「小さすぎて聞きとれない」といった矛盾する反応を導くことも少なくない。騒音レベルが高い鉄道空間において、アナウンス等が不特定多数の利用者に確実に聞き取れる音質や明瞭度をもつことと、利用者にとって過大音量とならず不快感なく受容されることとを両立させるのは、大変難しい課題となっている。

こうした複雑な問題を解決しうる従来とまったく異なるアプローチとして、著者は、新しい脳科学の知見とそれを可能にした新しいメディア技術に注目した。それは、人間の可聴域上限（20 kHz）を超え複雑に変化する高周波を含むある種の音が、間脳・中脳を含む〈基幹脳ネットワーク〉を活性化し、多様なポジティブ効果を生理的・心理的に発現するという脳科学の最新知見である。この一連の効果は 1990 年代に大橋によって日本で見いだされ、〈ハイパーソニック・エフェクト〉と総称されている [Oohashi et al., 1991]。

第 2 章で述べるように、可聴域上限をこえる高複雑性超高周波 [Maekawa et al. 2013] が可聴音と共存することによってこれまで、音のより美しく快適な受容 [Oohashi et al., 1991, 2000]、認知機能の向上 [鈴木ら, 2012] などの心理的効果や、超高周波を含む音をより大きな音量で聴くよう振る舞うという接近行動 [八木ら, 2003] が見出されている。また、視聴覚をはじめ環境質に対する好感度が高まるという興味深い働きも見出されている [仁科ら, 2005, 2007]。これらの効果は、〈報酬系〉を中心とする情動の脳機能のよりポジティブ側への転化によってもたらされ、この働きは〈好感度・高評価脳機能の増幅〉と呼ばれている [大橋, 2013]。よって、同一の可聴音でありながら、その音を受容する人間の情動の脳機能がハイパーソニック・エフェクトによってよりポジティブ側に転化し、快適性や音の認知度が高められて受容されるならば、騒音低減効果の限界が著しく、一種行き詰まりの観を呈している鉄道の騒音環境の改善にブレイクスルーをもたらすばかりでなく、音以外の感覚感性情報サービスに対しても好感度・高評価を導くことが可能かもしれない。

さらに、高複雑性超高周波を含む音（以下、「ハイパーソニック・サウンド」という）の呈示によって、ストレス関連ホルモンであるアドレナリン血中濃度の低下、がんの一次防御にかかわる NK 細胞の活性化などの生理的反応 [仁科ら, 2005, 2007] がみられることも報告されている。〈自律神経系〉〈免疫系〉〈内分泌系〉の活性化によるこの働きは、〈健康増進脳機能の高まり〉と呼ばれている [大橋, 2013]。ハイパーソニック・エフェクトが鉄道空間において発現するならば、音環境や環境質全体の快適化とともにこれらのポジティブな生理的効果が生じることも期待される。

一方、これまでのハイパーソニック・エフェクト研究のための実験は、音響実験室や比較的静かな屋外空間において、音楽や自然環境音など快適性の高い音を音源とし

て行われてきた。したがって、鉄道空間のような騒音環境においてハイパーソニック・エフェクトを発現させることが可能かどうか、さらにもともとその環境に所在する可聴音とは起源を異にする超高周波の付加によってもそうした効果が認められるかどうかは、応用上重要であるばかりでなく基礎論としても未知の研究課題である。また、特殊な機能空間である鉄道空間に超高周波成分を付加するためには、どのようなソフトウェア（音源）およびハードウェア（装置）を用いることが有効であるかなど、検討すべき応用上の課題も多い。すなわち、鉄道空間においてハイパーソニック・エフェクトを発現させるためには、基礎・応用両面において検討すべき多くの課題がある。

1.2. 研究の目的

以上の背景および問題意識を踏まえ、この研究では、〈ハイパーソニック・エフェクト〉という可聴域上限をこえる高複雑性超高周波が心身にもたらすさまざまなポジティブな効果のうち、人間の感覚感性を司る脳機能を賦活して視聴覚をはじめとする感覚感性情報総体に対する好感度・高評価脳機能を増幅する効果に着目した。そしてこれを応用して、音を「除く」「減らす」のではなく、知覚限界を超える高周波を環境に「加え」てハイパーソニック・エフェクトを発現させ、同一の可聴音をより快適に知覚させることによって、鉄道の騒音環境改善に寄与できるのではないかという作業仮説を立てた。そして、モデル的な実験環境を構築して知覚限界を超える高周波成分を騒音環境に付加するためのソフトウェアを開発し、生理学・心理学的評価実験を行うことによってこの作業仮説を検証することを研究の目的とした。

1.3. 論文の構成

この論文は、本章を含め8章で構成する。

第1章では、この研究の背景、目的、論文の構成を述べる。

第2章では、鉄道騒音対策およびハイパーソニック・エフェクトに関連する先行研究を概観する。また、従来の騒音低減による問題解決の有効性と限界を検討するとともに、この研究で取り組むべき基礎・応用面にわたる課題を明らかにする。

第3章では、この研究における実験の方法とその特徴について述べる。実用に供されている駅ホームや列車内では実験条件を統御できず再現性のある評価実験が実施できないため、実験室、駅臨時ホーム、試験車両などに鉄道空間の音環境を再現可能な

状態で仮想的に造成して実験を行うこととした。また、そこに付加する熱帯雨林環境音から抽出した超知覚高周波成分〈ハイパーソニック・シャワー〉の開発および付加呈示方法を述べる。あわせて、効果を評価する指標として、第一に基幹脳活性と高い正の相関を有する生理学的指標（脳波 $\alpha 2$ ポテンシャル）、第二に質問紙調査による心理学的指標、という原理を異にする2指標としたこと、およびそれぞれの方法について述べる。

第4章では、鉄道空間の音環境の物理構造を把握し実験環境を構築するために必要な鉄道空間の環境音の収録・分析、およびその結果について述べる。多数の利用者が往来する駅ホームや車両内の環境音を高忠実度で収録しうるポータブル超広帯域収録システムを構築して、環境音を収録・分析し、その結果を他の通常の都市道路騒音や自然性の高い森林環境音などと比較し、鉄道空間の音環境の特徴を明らかにする。

第5章では、この研究における作業仮説の妥当性に関して行った予備的検討について述べる。実験室内に仮想駅ホーム音環境を再現してハイパーソニック・サウンドを付加呈示し、その効果を心理学的指標および生理学的指標によって検討した。その結果、音環境に対する印象が改善されるとともに、基幹脳活性の賦活を示す脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルが増強されることが見いだされ、作業仮説を支持する結果が得られたことを述べる。

第6章では、実在の鉄道空間により近い駅の臨時ホーム上および試験車両内で行った一連の実験について述べる。まず、第一の実験空間として設定した駅の臨時ホームの実験空間に駅ホーム音環境を仮想的に再現し、〈ハイパーソニック・シャワー〉、および既存のアナウンス・発車ベルの音圧の時間的変化に相関させて超高周波を付加した〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉を造成・呈示して、心理学的指標による評価実験を行った結果について述べる。すなわち、超高周波成分の付加呈示によって、アナウンスの聞き取りやすさ、発車ベルの音質、環境音全体の音質についての評価がよりポジティブに転じ、音環境の印象が有意に改善された。第二の実験空間として、試験用車両内および補助的に実験室内に走行時の車両内音環境を仮想的に再現し、〈ハイパーソニック・シャワー〉および〈ハイパーソニック・アナウンス〉を造成・呈示して、生理学・心理学的指標による複数の実験を行った結果について述べる。すなわち、超高周波を付加呈示することによって、基幹脳活性の賦活を示す脳波 $\alpha 2$ ポ

テンシヤルが増大するとともに、音環境の印象が改善されることを、統計的有意に見出した。さらに、〈ハイパーソニック・アナウンス〉を使わず〈ハイパーソニック・シヤワー〉だけを付加呈示しても $\alpha 2$ ポテンシヤルの増大と音環境の印象改善効果とが認められること、超高周波による脳活性の賦活は時間とともに増強される一方、超高周波を含まない音呈示ではそうした脳活性の上昇は見られないこと、イヤフォン装着によって超高周波の鼓膜への到達が阻まれている条件下でも生理的・心理的効果が発現することを、いずれも統計的有意に見出した。

第7章では、実験を通じて得られた生理学的指標の意義について先行研究による知見とあわせて考察し、それらの心理学的指標との関連、およびこの研究の作業仮説の妥当性・有効性について論じる。続いて、可聴音とは起源を異にする超高周波成分の付加によって、騒音環境下においてもハイパーソニック・エフェクトが発現するというこの研究で得られた新規性の高い知見の基礎研究上の意義についても述べる。さらに、人間の心理反応の個別性と生理反応の普遍性とを矛盾なく融合させたこの研究の音環境改善手法としての有効性と応用上の意義、そして、鉄道騒音環境にこの研究成果を応用するうえでの課題について述べる。

第8章では、この研究で得られた成果をまとめ、ハイパーソニック・エフェクトという基礎的研究成果を実用に結び付ける橋渡し研究（トランスレーショナル・リサーチ）としての意義ならびに成果、この成果の実用化が待望されている社会状況について述べ、結びとする。

なお、この研究では、人間の可聴域上限とされる 20 kHz を上回る高周波成分を「超高周波」「超高周波成分」「可聴域を超える高周波」というように「超」をつけて記述し、可聴周波数帯域のなかの比較的高い帯域を「高周波」「高周波成分」と記述した。それは、「高周波」という用語が比較的周波数の高い音波・電波などを指す相対的な表現である上、無線通信の搬送波に使われる周波数の電気信号や電波を指すこともあり、これら既存の用法との混乱を避けるとともに、人間の可聴域との関連を明示するためである。また「超音波」という用語は、可聴域上限（20 kHz）を超え、あるいは下限（20 Hz）を下まわり、人の耳に聴こえない音を指す学術用語である一方、医療や産業応用などの分野で固有の意味内容をもって使用されることも多く、その場合に使わ

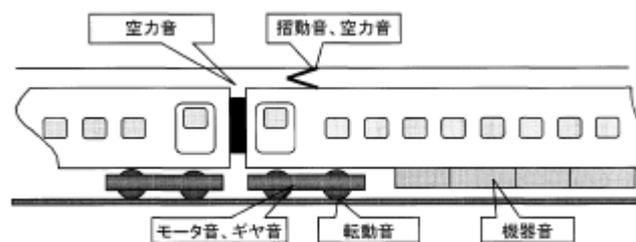
れる周波数帯域は数 MHz から数十 MHz 程度であるため、この研究では用いなかった。

第2章 関連領域の動向と先行研究

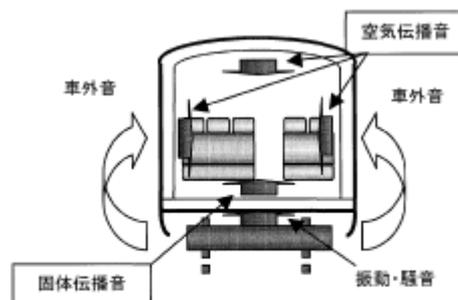
2.1. 鉄道における騒音対策

巨大な重量物が高速で移動する鉄道では、大音量の騒音の発生が避けられない。したがって、まず騒音の量を減らすことが鉄道の音環境改善の第一の課題とされてきた。鉄道騒音を効果的に低減するには、音源の性質及びその寄与度を理解し、寄与度の大きい音源に対して優先的に対策を行うことが重要とされ、これまでの鉄道騒音対策は概ねこの方針のもとに行われてきたといえる。その結果、騒音レベルは時代とともに低減されてきている。しかしながら、「依然として鉄道騒音に対する苦情の発生があることも事実」とされている[長倉，2008]。

鉄道車両の主要な騒音源は、車両がレールの上を転がる際に発生する「転動音」、台車内モータやギヤあるいは床下機器から発生する「機器音」、パンタグラフや車両間の連結部の隙間等で発生する「空力音」などに分類されている（図 2-1）。これらが車内に伝播した騒音が「車内騒音」、沿線に伝播したものが「沿線騒音」と呼ばれる[山本，



鉄道車両の騒音源



騒音伝搬経路

図 2-1 鉄道車両の騒音源と騒音伝搬経路（山本，2007 より）

2007]。

一般に騒音の低減対策は、音源対策と伝搬経路での対策とに大別され、鉄道騒音も同様である[北川，2012]。音源対策の例はレール表面の平滑化、車両の平滑化など、伝搬系対策の代表例は遮音・吸音であり、防音壁の形状の検討、防音壁への吸音材の貼付、軌道路盤面の吸音化などが行われている。最近では能動騒音制御手法（アクティブノイズコントロール）も開発され、自動車や航空機では実績があるものの、鉄道においては実用化に至っていない。その理由は、鉄道の「車内空間の大きさ」と「制御対象系の状態変化」が障害になっていると考えられている[山本，2007]。

さまざまな対策によって、騒音低減が図られている一方、別の目的をもった技術開発が期せずして騒音を増大させてしまうこともある。たとえば、軌道の狂いが生じにくくメンテナンスが軽減できるスラブ軌道（コンクリート路盤の上にスラブと呼ばれるコンクリート製の板を設置しその上にレールを敷く軌道）では、バラスト（砂利）による吸音が失われ、コンクリート板表面で反射する音も加わり、車両内外ともに騒音が大きくなる。また、駅舎の耐震強化を目的により強度の高い建築材が用いられる場合、そうした建築材は音の反射性が高いことが多く、騒音低減とは逆行する。さらに、乗客への注意喚起や情報伝達を目的に、アナウンス、発車ベルなど各種の音が用いられており、近年それらがいっそう頻繁に活用される傾向にある。加えて、混雑する駅や車両内では乗客の発する足音や話し声が存在し、それらの音を総合的に制御することは極めて難しい。

2.2. 鉄道の音環境評価～音量評価から音質評価へ

従来の駅の音環境評価研究は、騒音レベルを主要な指標とし、質的評価としては心理的主観評価が主流となっている。一例として、首都圏の駅を対象に騒音レベル、残響時間、明瞭度を計測した結果及びそれらの環境に対する主観的評価についての鉄道総合研究所による報告を要約すると以下のとおりである[伊積ら，1998, 2001, 2003, 2007][濱口ら，2000]。

- ・コンコースの騒音レベルは、60dB～70dB程度であり、一部の駅では70dBを超える。日本建築学会「建築物の遮音性能基準」における室内騒音に関する適用等級では、商業建物の3級で55dBとなっており、駅の騒音レベルは一般にこれを上回る。

- ・残響時間は、吸音処理されていないコンコースでは2.0～2.5秒程度、吸音処理されているコンコースでは1.5～1.7秒程度である。
- ・音の明瞭度評価の指標のひとつであるSTI（Speech Transmission Index、話声伝送指数）は、音源から10mの地点で調べると、吸音処理をされていないコンコースでは0.64、吸音処理されているコンコースでは0.67である。また、指向性スピーカーを使用した方がSTIは0.1程度高くなり、明瞭度が高まる。（STIとは、会話音声の特徴を信号強度の時間的変化として捉え、音源の信号強度の時間的変化が受音位置でどの程度保たれているかで品質を評価する指数。0～1の値をとり、値が高いほど音声伝達品質が高いことを示す。）
- ・駅での音の大きさや会話のしやすさについての主観評価試験結果では、「非常にうるさい」及び「かなりうるさい」と答えた人の割合は、等価騒音レベル75dBでは100%、70dBでは約80%となっているが、65dBでは約25%と大幅に減少している。また、会話のしやすさについて、騒音レベルが70dBを超えると「会話ができそうにない」「居間よりも相当大きい声を出さないと会話ができそうにない」と回答した人の合計が80%以上となっているが、65dBになるとそれが10%程度と大幅に低くなる。したがって、騒音レベルが65dB以下となれば駅利用者が大きな不満を持つ可能性は小さいと考えられる。
- ・案内放送の聴き取りやすさはSN比（案内放送とそれ以外の騒音の騒音レベル差）の影響が大きく、反射音の影響はSN比よりは小さい。

これらは、全体的に見ると騒音レベルを指標とする評価といえる。

車両内の音に対する評価においても、騒音レベルの時間的平均値やピーク値が用いられてきた。こうした状況に対して、山本は、「近い将来、これまでの音『量』評価から、人間工学的な観点をベースとした音『質』評価にシフトすると考えられる」と述べ、騒音レベル低減だけでは不快感の緩和に限界があり、人間にとっての「質」に注目した評価が必要であることを示唆している[山本, 2007]。

音量評価から音質評価へという指摘は他にもあり、安部は、車内の騒音レベルが低減されたにも関わらず、不快に感じる音の存在が無視できなくなっている現状に対して、「騒音の大きさだけでなく、音の質的な側面（音質）から人間の感じる“不快感”を考慮した評価を行う必要がある」として、不快感と相関の高い車内騒音の評価手法

を検討した[安部, 2010]。その結果、「不快感推定値 = $\alpha \times$ ラウドネス + $\beta \times$ シャープネス + $\gamma \times$ トーナリティ + $\sigma \times$ 変動強度 + ε 」とする評価式を提案している。ラウドネスは音の大きさ、うるささの指標であり、シャープネスは音の甲高さ（周波数成分に依存し、近似的には周波数スペクトルの重心が対応する）、トーナリティは純音度（音の成分に純音が含まれている割合）、変動強度は音の変動感で、ラウドネスが 4Hz の長い変調周期で変動する場合に最も大きいとされている。このなかでもラウドネスの相関が最も高いとされ、まず騒音レベルを低減することが必要であり、それでもなお不快感が低減しない場合には「音質」の観点からも評価することにより、効果的な対策を講ずることができるようになると期待されている。さらに、SD 法 (Semantic Differential Method) を用いた分析により、シャープネスを小さくすることによって柔らかく耳当たりの良い音に変えていくことが、質的により好ましい車内音環境を検討する上で有効としている[安部, 2013]。

なお、シャープネスは、『新版音響用語辞典』（日本音響学会編）によれば、次式のように提案されている。これは、臨界帯域ごとのラウドネスに、周波数が高いほど値が大きくなる重み付けをして加算した値の、全体のラウドネスに対する比率に係数 0.11 をかけた値である。臨界帯域とは人間の可聴帯域を 24 の帯域に分割したものであり、したがってシャープネスはあくまでも可聴音に対する評価指標であり、可聴域上限を超える成分は評価の対象としていない。

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24\text{Bark}} N' g(z) z dz}{\int_0^{24\text{Bark}} N' dz} \quad [\text{acum}]$$

N' : 臨界帯域ごとのラウドネス
 $g(z)$: 臨界帯域の関数として与えられる重み関数 (下図)

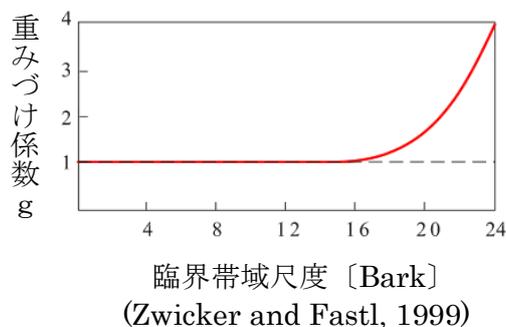


図 2-2 臨界帯域に対する重み関数 (日本音響学会, 2003 より)

2.3. 騒音に対する不快感に関わる研究～音を受容する人間の側への注目

騒音に対する人の反応として May は、ラウドネス、ノイジネス、アノイアンスおよび会話妨害を挙げている [May, 1978]。『新版音響用語辞典』による定義は次のとおりである。

「ラウドネス：ある音の感覚的な大きさを表す心理尺度。JIS によれば『音の強さに関する聴感上の属性』。

ノイジネス：音そのものに付随した不快感、音色の悪さなどを表す属性。

アノイアンス：音の大きさ（ラウドネス）、ノイジネスとともに騒音の心理的属性の一つ。大きさやノイジネスが音そのもののもつ性質に依存した属性であるのに対して、アノイアンスには人間関係や恐怖感など非音響的な要因も関与する。（以下略）」

ラウドネスを低減することは騒音対策の基本といえる。ノイジネスについては、機械音に起因するノイジネスを中心に、音質に関係する種々の物理的な指標と関連づけての研究が進んでいる。一方、難波によれば、「アノイアンスは非音響学的要因が関与し、実験室的研究は難しく、騒音に対する慣れに関する個人差など騒音への感受性についてはある程度調べられているが、現場におけるアノイアンスをとらえるにはほど遠いレベルにある」「集団としてのアノイアンス判断と騒音レベルとの間に良い対応関係が見られる一方、個人のアノイアンスの場合は、音に対する感受性の相違など種々の個人差や騒音に曝された状況の相違によって、大きな相違があるものと思われ、音以外の条件に大きく左右されるだけにそのメカニズムについて明確にすることは難しい」「したがって、受音点での『音の受け取り方』は多くの要因が介在し、残された課題は多い」とされている [難波, 2008]。

また、国内外の騒音公害問題への対応実績が豊富な中野は、「従来の騒音対策は、主として機械等の発生する『音波の制御』という物理、工学の問題、まさに騒音制御工学そのものであり、音波の発生低減によって騒音問題の解決が図られてきた。しかし最近では、音波を音として感じる人間の感覚、心理が問題になってきている。同じ強さの音波であっても、安眠、聴取、健康、習慣、利害、気質等によって音の感じ方が異なり、様々なトラブルが生じている。このトラブル解決のためには、人間の思いを変えること、いわば『人間の制御』が必要なようである。」と述べている [中野, 2013]。

騒音問題がもはや量の低減だけでは解決せず、人間の感覚感性や心理をふまえて人間に働きかける質的解決、個別性を超越した解決が求められていることが伺われる。

2.4. ハイパーソニック・エフェクト研究

2.4.1. ハイパーソニック・エフェクトの概要

この研究で着目している〈ハイパーソニック・エフェクト〉とは、20 kHz程度とされる人間の可聴域上限を超えマイクロな時間領域で複雑に変化する超高周波成分を豊富に含む音〈ハイパーソニック・サウンド〉が、人間の間脳・中脳を中心とする脳の領域〈基幹脳ネットワーク〉を活性化し、心身両面にさまざまなポジティブな効果をもたらす現象をいう [Oohashi et al., 1991, 2000][大橋, 2003]。このような効果をもたらす音として、自然性の高い森林環境音やある種の民族楽器音には、可聴域上限を上回る超高周波数成分を豊富に含むものがあることが報告されている (図 2-3) [Oohashi et al., 1991, 2000][大橋, 2003] [仁科ら, 2005]。

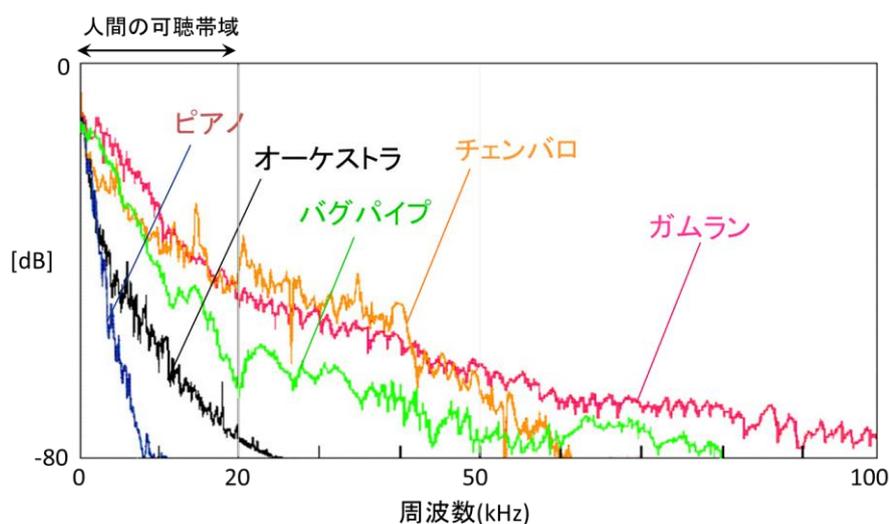


図 2-3 さまざまな楽器音の周波数パワースペクトル
(仁科ら, 2005 より)

ハイパーソニック・エフェクトの根本現象は、基幹脳ネットワークの活性化と考えられている。そして、基幹脳ネットワークに含まれる〈報酬系神経回路〉の活性化を反映して、超高周波を含む音がより美しく快く感動的に聴こえるという心理反応 [Oohashi, et al., 1991, 2000]や、超高周波を含む音をより大きな音量で聴くように振る舞うという接近行動[Yagi et al., 2003]が見出されている。音に関わる反応のみならず、視るものがより鮮やかに美しく感じられたり、音がはっきり聴こえたりする好感度の高まり [中村ら, 2003] [仁科ら, 2005, 2007, 2010]や認知能力の向上 [鈴木ら, 2012]も報告されている。さらに、〈自律神経系〉〈内分泌系〉〈免疫系〉の活性が向上し、がんの一次防御に関わる NK 細胞などの免疫活性の向上、アドレナリンやコルチゾールといったストレスホルモンの減少が引き起こされることも報告されている [仁科ら, 2005, 2007]。このように、超高周波を含む音 (ハイパーソニック・サウンド) は、心身の健康にとって多様なポジティブ効果をもたらす (図 2-4)。

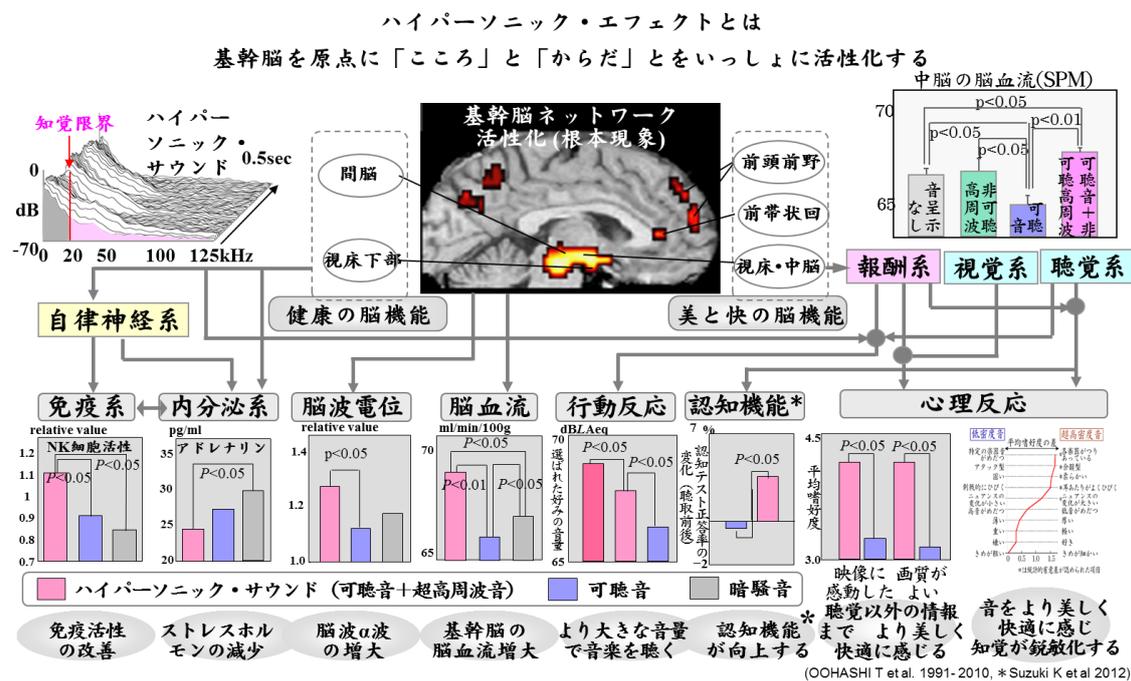


図 2-4 ハイパーソニック・エフェクトの全体像 (大橋, 2003 ほかより)

ハイパーソニック・エフェクトの発現と年齢・性別との間で相関があるという報告はなされておらず、むしろ年齢・性別と相関をもたない現象である可能性が高いとされている。ただし、ハイパーソニック・エフェクトの出現には個人差があり、同一の人間であっても、ときと場合によってその現れ方に違いがある。それは、たとえば医薬品の効果が、服用する患者の状態によって同じ効果を導くとは限らないという現象と似ている。特に、ハイパーソニック・サウンドによって賦活される基幹脳は、全身からの情報入力の合流点でもあり、さまざまな要因が複雑に相互作用を及ぼしあうため、単純な入出力システムに還元して捉えることは困難という特徴がある。こうしたことにもかかわらず、ハイパーソニック・サウンドによる基幹脳の賦活が統計的有意性をもって認められることは、この現象が人類という種において生物学的普遍性をもつ可能性が高いという認識を支持すると考えられている[大橋, 2013]。

ハイパーソニック・エフェクト研究は、1980年代前半、コンパクトディスク（CD）の登場を契機に開始された。CDの規格は、20kHzを超える高周波の存在は音質知覚に影響を及ぼさないとする複数の報告を背景として、その標本化周波数は44.1kHz（記録再生周波数上限22.05kHz）に設定された。一方、レコーディングスタジオでの音楽制作のなかで、可聴域上限を上回る高周波の有無が音質差として知覚されることを確信していた音楽家山城祥二こと大橋力は、従来の心理実験を中心とする実験手法に疑義を呈し、生理学的手法を視野にいれた新しいアプローチを構築した[大橋, 2003]。具体的には、音源の探索、記録再生系の高度化、呈示法の見直しをはかるとともに、脳波 α 波を指標とした生理学的検討を導入した。これによって、超高周波の有無が脳活性に影響を及ぼし、しかもその発現には遅延と残留を伴うという時間的非対称性があることが明らかになった。大橋は、この時間的特性に着目し、当時の正統的手法よりも長い音呈示時間を採用して主観的印象評価実験を行い、適切な音呈示が行われた場合には超高周波の有無が音質差として知覚されることを見出した。これらの成果は1991年に国際的に発表され[Oohashi et al., 1991]、以後、脳血流や生理活性物質を指標とする各種の生理学的指標による検討、行動学的方法による検討などが積み重ねられて、高複雑性超高周波成分を豊富に含む音のもたらす多様なポジティブな効果が次々と見出されている。これら一連の発見は、いわゆる次世代オーディオとしてのス

ーパーオーディオ CD や DVD オーディオ、そしてハイレゾリューション・オーディオの普及を促す原動力となっている。

2.4.2. 脳イメージングが見出したハイパーソニック・エフェクト

2.4.2.1. 一対比較法への疑義と研究手法の再構築

研究手法の変遷という観点から、あらためてハイパーソニック・エフェクト研究について概観する。

ハイパーソニック・エフェクト研究に先立つ 1980 年前後、デジタル・オーディオの規格の標準化をめぐる、人間の音質知覚に影響を及ぼす周波数の上限について、アメリカ、ドイツ、日本などで心理学的音質評価実験が大規模に行われた。これらの実験は、呈示音の高域をフィルターによって電子的に制限し、フィルターの制限開始周波数を変化させて、呈示音に対する心理的反応を検出する方法であり、CCIR

(Commite Consultatif International des Radiocommunications、現在の ITU-R、国際無線通信諮問委員会) が推奨する一対比較法に準拠して行われた。その方法では、人間の短期記憶の限界を根拠に、音試料は 15～20 秒以上長く続くべきではなく、音試料の間隔は 0.5～1 秒程度であるべきと推奨されている [CCIR, 1978]。この方法に準拠して行われた実験の結果、音質差に影響を及ぼす周波数の上限について、村岡らは平均で 15 kHz (最高で 20 kHz) [Muraoka et al., 1978]、プレングらは通常 15k Hz (特殊な場合は 20 kHz) [Plenge et al., 1979]、東らは平均で 15 kHz (最高で 20 kHz) [東ら, 1982] であるとした。これらの結果はデジタル・オーディオ・メディアの規格策定に大きな影響を及ぼし、1982 年、初の民生用デジタル・オーディオ・メディアとして標本化周波数 44.1 kHz、量子化ビット数 16 bit の規格によるコンパクト・ディスク (CD) が登場した。

一方、LP レコードの制作は、CD 登場時点で技術的絶頂期を迎えていた。当時の商業音楽制作の現場では、20kHz を上回る高周波の存在によって音がより豊かに味わい深く感じられると確信するスタジオエンジニアやミュージシャンが居り、超高周波成分を記録したり増強することができるアナログ機材が存在していた。事実、LP レコードには、可聴域上限を上回る高周波成分が記録されているものが少なからずあることが、後に確認されている。しかし標本化周波数 44.1 kHz の CD では、記録される

帯域は理論的に 22.05 kHz までに制限される。そうした CD の音質に対して、「クリアである」という評価が見られる一方、LP の音に比べて「冷たい」、「硬い」などの意見が、スタジオエンジニアやオーディオ評論家だけでなく一般ユーザーの間にも見られた。このような状況において、同じアナログマスターテープから制作された LP と CD とを聴き比べてその音質差（CD の音質が LP のそれに比べて明らかに劣っていた）に驚いた大橋は、その体験と学術的な実験結果とが異なるならば、実験手法に何か見落とされている問題があるのではないかと考え、従来の実験における方法論を根本から見直し、研究方法を全面的に再構築することに取り組んだ。

まず、実験に用いる呈示用音源は、超高周波成分をできるだけ豊富に含む音源を使うことが望ましい。しかし、研究が開始された 1980 年代には、超高周波に対応した周波数分析器はほとんど普及しておらず、したがって超高周波を豊かに含む音源があるのかどうか、それはどのような音であるかについても五里霧中だったという。そこで大橋は、世界のさまざまな文化圏の環境音や楽器音を調査し、自らの感覚感性反応に基づき、インドネシア・バリ島の青銅製打楽器アンサンブル「ガムラン」の演奏音を、超高周波を豊富に含み、かつ実験における繰り返しの聴取に耐えうる快適な可聴音をもつ音源の有力な候補として注目した。しかし、当時、20kHz を上回る周波数応答をもつ録音機材は少なく、フィールドでの超広帯域収録が可能なデジタル録音機は存在していなかった。そこで、山崎の開発による高速標本化 1 ビット量子化方式（標本化周波数 2.8224 MHz～5.6448 MHz）[Yamasaki, 1991]のレコーダー制作を山崎に委嘱し、これを導入して、ガムランをはじめさまざまな楽器音や環境音の超広帯域収録が蓄積された。その後、広帯域にわたる高速フーリエ解析が可能になり、ガムランの音には特に強力な超高周波成分が含まれることが確認され、以後、ハイパーソニック研究における中心的な実験用音源として用いられている。

次に再生系について、大橋らは、超高周波帯域まで良好な応答をもつスーパーツイーターを探索するとともに、非結晶型ダイヤモンド振動版を用いたオリジナルスーパーツイーターを用いて、100 kHz に及ぶ超広帯域にわたる周波数特性と高い解像力を有するフルレンジスピーカーを開発した（図 2-5）[大橋ら, 1994]。

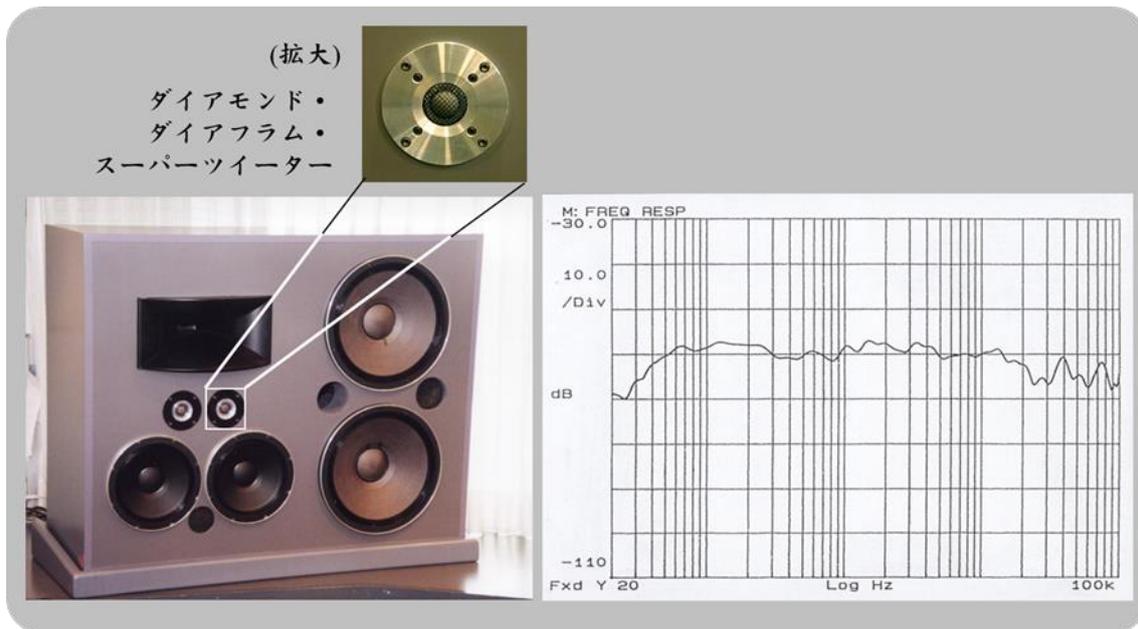
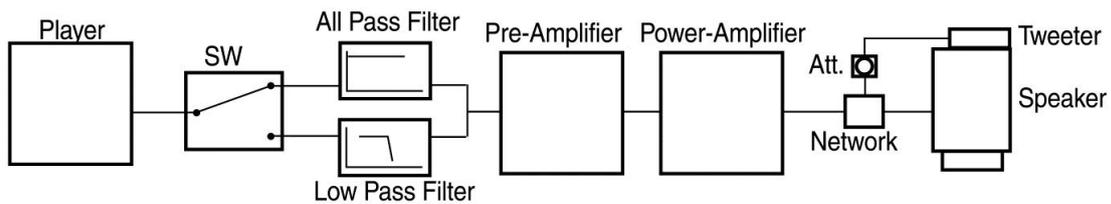


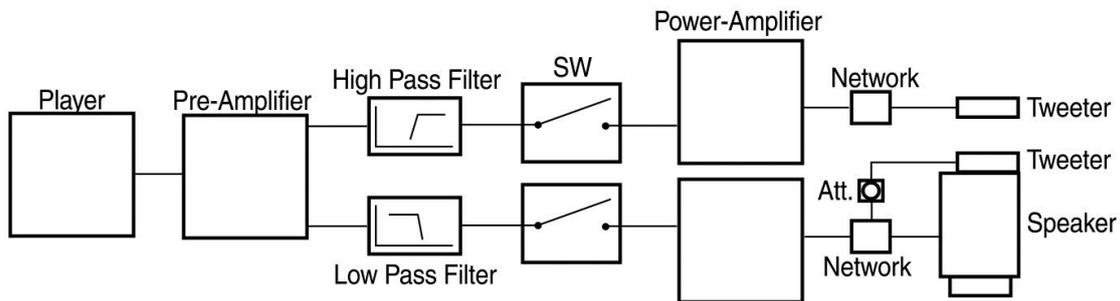
図 2-5 開発された超広帯域フルレンジスピーカーの特性(大橋ら, 1994 より)

音呈示システムの構成についても、大橋はより厳密なシステムを考案した。それまでの高周波知覚に関する実験で一般に用いられていた音呈示システムでは、信号は、ローパスフィルターを通過させるか、オールパスフィルターを通過させるかのいずれかの回路を通るように切り替えられ、フィルター通過後は、同一のアンプとスピーカーを用いて増幅、再生されていた。このシステムでは、フィルター回路の平坦性、群遅延特性の差などによって、フィルター通過による可聴域成分の違いが生じる可能性がある。さらに、フィルター通過後の再生系内で非線形歪が生じ、可聴帯域内に差が生じる可能性がある。そこで、こうした問題の発生を防ぐため、信号を特定の周波数以上の高周波成分とそれ以下の低周波成分とにあらかじめ分割し、独立して増幅、再生するバイチャンネル再生システムが開発された(図 2-6) [大橋ら, 1984]。

ちなみに、バイチャンネル再生システム以前の音呈示システムでは、超高周波成分の有無によって音質差が検出された場合、その原因は超高周波の影響ではなく可聴帯域に発生する非線形歪によるものである可能性を否定できない。この問題点に焦点を当てた〈非線形歪説〉が、かつて、超高周波の影響を否定する論拠となっていた[宮坂, 1999]。しかし、バイチャンネル再生システムが開発され採用された実験においては、そうした問題は回避されており、非線形歪説は成立しない。



従来の一般的な音質評価用再生システム



バイチャンネル再生システム

図 2-6 従来の再生系とバイチャンネル再生システム (八木, 2013 より)

2.4.2.2. 脳波を指標とする検討

超高周波の有無による音質差の弁別実験に用いられた一対比較法は、実験参加者の意識の介入が避けられない間接的な方法である点で、超知覚情報の評価に適用するうえで限界があることは否めない。そこで、実験参加者の生理的反応、とりわけ脳活性を直接計測するアプローチがとられ、これによってブレイクスルーがもたらされた。

脳活性を観測する第一の手法として、計測が比較的容易な脳波が用いられた。脳波は、脳神経系の電気活動を包括的に反映し、過度特性がよく、刻々と変化する脳機能を把握する上で適合性が高いとされる。大橋らの研究では、脳波 α 波が指標とされた。 α 波は、不快な音によって抑制され[三宅, 1984]、快適な音によって増強される[Sato et al., 1983]ことが報告されている。しかし、一般的な脳波計測手法では、実験参加者に仰臥安静状態をとらせるなど、ノイズの混入を避けるために実験参加者の体の動き

を制限する必要がある、実際に音楽を聴取・鑑賞する状況との隔たりは大きかった。そのため、計測によるストレスが大きく、実験参加者の感覚感性に及ぼす負の影響への配慮も乏しい。そこで、実験参加者の拘束感を最小限に抑えるために、無線で脳波データを送信しノイズに強いテレメトリ・システムが導入された。また、電極付のキャップを導入し、これをさらに改良してノイズを一層低減させるとともに、電極の装着感も低減させた。これらを用いて、視覚的にも快適性を損なわないように設計された実験室で、リスニングルームで音楽を楽しむような状態で脳波計測を行う手法が開発された。解析は、典型的脳波波形を抜粋して示すという当時一般的だった手法をとらず、通常の 10 倍以上の時間長のデータを高速フーリエ解析によって時間平均し、その周波数分布を求める方法がまず行われた。次に、電極位置ごとの脳波の帯域別パワーの定量化手法が開発された。さらに、脳電位図 (Brain Electrical Activity Mapping) が導入された[上野ら, 1976][Duffy et al.,1979]。これは、国際 10-20 法に基づく頭皮上 12 点から記録された自発脳波の帯域別平均パワーレベルの平方根を算出し、これを各電極位置におけるその帯域のポテンシャルとして、その値をもとに線形補間した 2553 点および実測した 12 点、合計 2565 点の値から頭皮上の脳電位の分布状態を図示する脳波等電位図を描くものである。さらにまた、2565 点の帯域別の電位値の総和値を計算するプログラムが開発され、呈示条件ごとの帯域別パワーの増減率を定量的に比較することが可能になった[仁科ら, 1991]。

時間解像度の高い脳波を指標とする実験の結果、ハイパーソニック・エフェクトには、固有の時間的な非対称性が伴うことが明らかにされた。およそ 200 秒間のガムラン音楽を音試料として、超高周波成分を含むフルレンジ音 (Full Range Sound) の呈示に続けて、26kHz 以上の超高周波をカットしたハイカット音 (High Cut Sound) を呈示すると、脳波 α 波のパワーは、フルレンジ音の呈示開始数十秒かけてゆっくり増大し、フルレンジ音が呈示されている間その活性が維持され、フルレンジ音の呈示終了後も 100 秒程度残留することが見出されたのである (図 2-7) [Oohashi et al., 1991, 2000]。

(N=11)

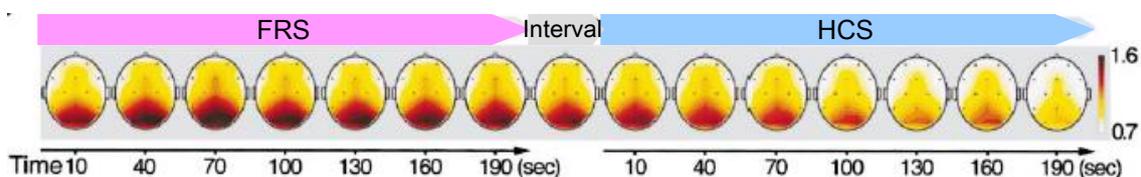


図 2-7 ハイパーソニック・エフェクトの遅延・残留効果
(Oohashi et al., 2000 より)

この時間的な非対称性は、快感を司る神経ネットワークである脳の報酬系神経回路において作用する神経伝達物質の性質によって、次のように説明されている。

神経伝達物質がシナプス間隙に放出されると、受け手側の神経細胞の表面にある受容体に、鍵と鍵穴のように結合して興奮を伝達する。たとえば、感覚神経系、運動神経系などで興奮を伝達するグルタミン酸による興奮伝達にかかわる受容体はイオンチャンネル型受容体と呼ばれ、神経伝達物質が受容体に結合すると即座にイオンチャンネルが開いてイオンが受け手側の神経細胞に移動して興奮を引き起こし、受容体からはずれると即座にゲートが閉まり興奮が停止する。その反応速度、持続速度はミリ秒単位のオーダーといわれている。

これに対して、報酬系神経回路で作用するドーパミンやオピオイドペプチドなどの神経伝達物質は、感覚神経系、運動神経系などで興奮を伝達する神経伝達物質とは、極めて異なった時間特性をもっていることが知られている[Nicholls et al., 2001]。報酬系で作用するドーパミンなどのモノアミン系やオピオイドペプチド系の神経伝達物質の受容体は、代謝型受容体と呼ばれ、神経伝達物質（一次メッセンジャー）との結合シグナルを受け手側の神経細胞内にある〈二次メッセンジャー〉の濃度変化に変換し、より複雑で間接的な代謝経路を介して興奮を引き起こす。そのため、イオンチャンネル型受容体よりも反応速度は遅く、秒オーダーといわれている。また、神経伝達物質が受容体から離れてもその効果が残留し、持続時間は長く、秒から分オーダーといわれている。さらに伝達物質の除去機構の点でも、グルタミン酸が細胞膜グルタミン酸トランスポーターの存在によって速やかに除去されるのに対して、オピオイドペ

プチド系の神経伝達物質は、主として受動的な拡散現象によってシナプス間隙から除去されるため、シナプス間隙内の滞在時間が長くなる。これらにより、モノアミン系やオピオイドペプチド系が作用する報酬系神経回路は、刺激に対して数秒から分単位、長い場合は時間単位の遅延と残留をともなう過度応答を示しうるということが知られている [本田, 2013][渡辺, 2008]。

このような遅延と残留の影響を排除するため、およそ 200 秒のガムラン音楽の呈示時間の後半 100 秒間を対象に α 波のパワーの平均を算出し、脳電位図を描くと、図 2-8 のようにフルレンジ音 (Full Range Sound) を呈示しているときには、ハイカット音 (High Cut Sound) を呈示しているときと比べて脳波 α 波が統計的有意 ($p < 0.05$) に増大することが見出された。

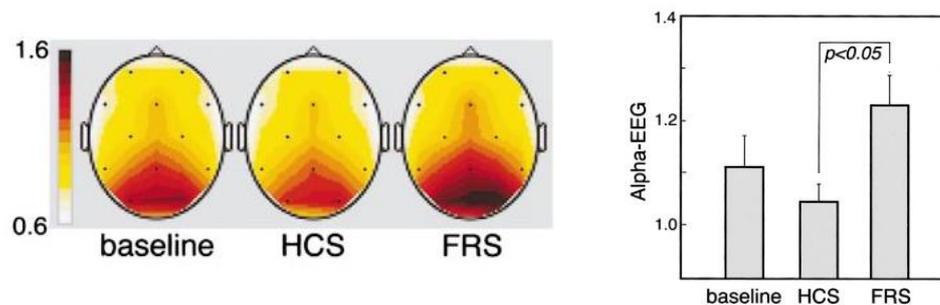


図 2-8 超高周波成分の共存による脳波 α 波の増強 1
(Oohashi et al., 2000 より)

さらに、同じくおよそ 200 秒間のガムラン音楽を用いて、フルレンジで呈示したとき、22kHz 以上の超高周波をカットしたハイカットで呈示したとき、暗騒音状態のとき、22kHz 以上の超高周波成分 (Low Cut Sound) だけを呈示しているときの脳波が計測され、脳電位図が描かれた。その結果、図 2-9 のようにフルレンジのガムラン音楽を呈示しているときにのみ、他の条件と比べて脳波 α 波が統計的有意 ($p < 0.05$) に増強することが見出された一方、ハイカット音や超高周波成分だけを呈示しているときには、暗騒音だけ (baseline) のときと比べて α 波の増強は認められなかった。このことから、ハイパーソニック・エフェクトは、可聴音と超高周波成分が共存するときに発現し、超高周波成分だけを呈示しても発現しないことが見出されている。

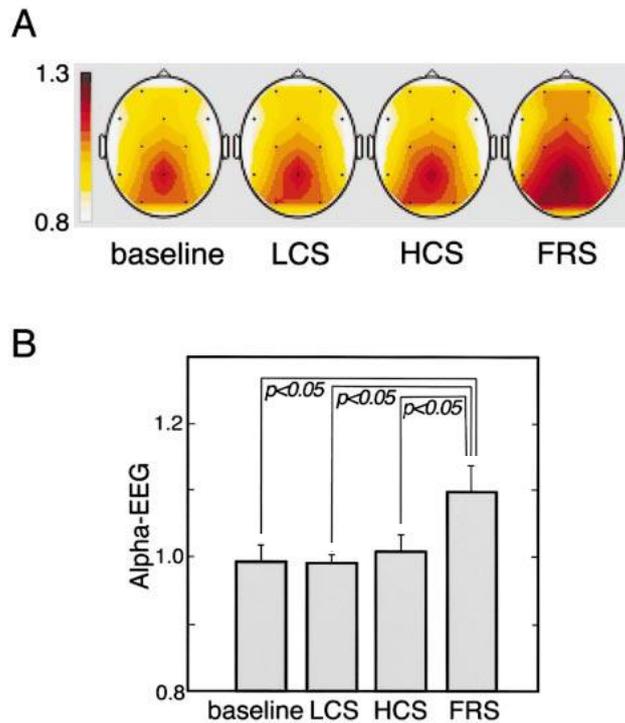


図 2-9 超高周波成分の共存による脳波 α 波の増強 2
(Oohashi et al., 2000 より)

2.4.2.3. ハイパーソニック・エフェクトの遅延と残留を考慮した心理実験デザインの構築

ハイパーソニック・エフェクトの発現における時間的非対称性の発見により、「超高周波の有無は音質差に影響を及ぼさない」という結論を導いた CCIR の推奨する一対比較法の限界が、生理学的根拠のもとに示されることになった。当時、音質差弁別実験は、CCIR 勧告に基づく正統的実験法として、20 秒以下の短い音試料を 0.5 ないし 1 秒程度の短い間隔で切替えて呈示する一対比較法によって行われた。短い時間で音を切り替えるこの方法では、上述のような神経伝達物質の特性によって脳の状態の変化が音の切替え時間よりも遅れて起きるため、現在聴いている音に対する反応と、以前に呈示された音に対する反応とが混在する危険性を排除できない。そのため、必然的に結果が混乱し、二つの音質の違いを判別することが困難になったと解釈できる。

この解釈を裏付けるものとして、次の実験結果が報告されている [Oohashi et al., 1991]。これは、同一のガムラン音源から作成した、超高周波帯域まで含むフルレンジ音 (FRS) と、26 kHz 以上の超高周波成分をカットしたハイカット音 (HCS) との音質差の弁別実験である。CCIR の推奨する一対比較法に基づき、12 秒間の呈示音を連続して一対として呈示し、実験参加者はそれが「同じ」か「違う」かを回答した。一対ごとのインターバルは 3 秒である。2 つの音試料の組み合わせ 4 種 (「フルレンジーフルレンジ」「ハイカットーハイカット」「ハイカットーフルレンジ」「フルレンジーハイカット」) のそれぞれが 5 組ずつ呈示された。同一実験参加者に対し「同じ」ペア (「フルレンジーフルレンジ」または「ハイカットーハイカット」のいずれか一種類) 5 組、「違う」ペア 5 組、合計 10 組をシャッフルして試行したのち、5 分間の休憩をとり、今度は「同じ」ペアを他方の組み合わせにかえて同様に 10 回試行された。「同じ」ペアとして、ハイカットとハイカットの組み合わせが呈示されたセッションを「X」、フルレンジとフルレンジの組み合わせが呈示されたセッションを「Y」とすると、超高周波成分を含む音の出現率はセッション「X」では 5/20、セッション「Y」では 15/20 となる。このような音の出現率は、CCIR の推奨する一対比較法実験のなかである確率で起こりうるものである。

実験の結果、セッション「X」と「Y」を統合した全体のスコアからは、音質差は弁別されていないという結果になった (図 2-10)。しかし、超高周波の出現率が低いセッション「X」では音質差は統計的有意 ($p < 0.05$) に弁別されていた。一方、超高周波の出現率が高いセッション「Y」では、音質差は統計的有意 ($p < 0.05$) に負の弁別をされている、すなわち有意に間違いが多いという結果になった。これらは正反対の方向であるため、それらが統合されると音質差が弁別されていないというスコアを形成していたのである。ここから、実験参加者はフルレンジ音とハイカット音の音質差を認識できないという誤った結論が導かれたと考えうる。

さらにセッション「Y」における間違いは、フルレンジ音がハイカット音と誤認された数は偶然による間違いとの間に有意差はなく、ハイカット音がフルレンジ音と誤認された数は、偶然による間違いと比較して統計的有意 ($p < 0.005$) だった。つまり、フルレンジ音が頻繁に出現すると、ハイカット音をフルレンジ音と認識する確率が高まることを示している。

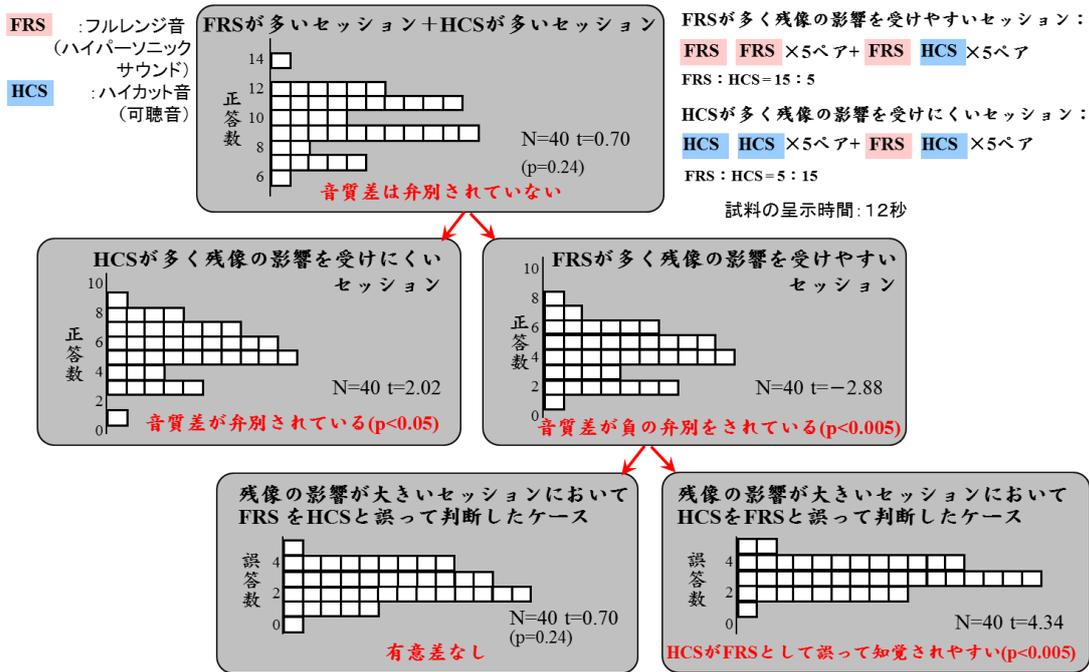


図 2-10 ハイパーソニックの遅延・残留効果による
呈示時間の短い弁別実験の混乱

(Oohashi et al., 1991 より)

こうして、CCIR が推奨する呈示時間の短い音資料をもちいた一対比較法による結論は、実際には音質差が弁別可能であるにもかかわらず、ハイパーソニック・エフェクトの遅延・残留効果による混乱によってそれが打ち消された結果であることが示された。

そこで、このような遅延・残留効果の影響をできるだけ低減する方法として、200 秒間という長い音呈示時間が採用されるとともに、シェッフエの一対比較法を応用した主観的印象評価実験がデザインされた。この方法によって、超高周波成分の有無が音質差として知覚されることが、統計的有意性のもとに見出された (表 2-1) [Oohashi et al., 1991, 2000]。以後、ハイパーソニック・エフェクト研究における心理評価は、この手法を発展させた形で行われている。

これらの一連の研究結果は、音に対する心理的応答が脳活性と密接に関連していることを示すと同時に、ハイパーソニック・エフェクトに関する検討においては、時間的非対称性を考慮に入れることが不可欠であることを示している。

表 2-1 従来よりも長時間の音呈示によって見出された
 超高周波成分の有無がもたらす印象の違い
 (Oohashi et al., 2000 より)

評価語対	有意水準 (p)	統計検定量 (q)
柔らかいー固い	<0.01	5.33
余韻型ーアタック型	<0.01	5.01
楽器や音源がつりあっているー特定の楽器がめだつ	<0.01	4.57
耳当たりよく響くー刺激的に響く	<0.01	4.44
ニュアンスの変化が大きいーニュアンスの変化が小さい	<0.05	3.63
低音がめだつー高音がめだつ	-	2.25
厚いー薄い	-	1.70
軽いー重い	-	1.13
好きー嫌い	-	1.12
きめがこまかいーきめがあら	-	0.14

2.4.2.4. 脳血流を指標とする検討

脳波という生理学的指標は時間的解像度に優れている一方、脳のどの部位が活性化しているのかといった空間情報をほとんど与えてくれない。一方、脳の神経活動が活性化すると、神経細胞が必要とする酸素やグルコースを運ぶためにその領域の脳血流が増加することが知られている。そこで、空間解像度に優れた脳機能イメージング手法であるポジトロン断層撮像法 (PET) による脳血流計測と、時間分解能に優れた脳波計測とを組み合わせると同時に実施するという、当時、国際的にもほとんど先例のなかった実験が行われた。その結果、超高周波成分を豊富に含む音を呈示しているとき、中脳、および間脳の一部である〈視床〉を中心とする領域での血流量の増大が有意に見出された (図 2-11) [Oohashi et al., 2000]。さらに、主成分分析法による解析により、中脳・間脳全体の血流量が一体化して増大するとともに、〈前帯状回〉、〈内側前頭前野〉などの部位の血流量も連動して増大し、これらの領域が神経ネットワークとして活動していることが示唆された (図 2-12) [大橋, 2003] [本田, 2013]。

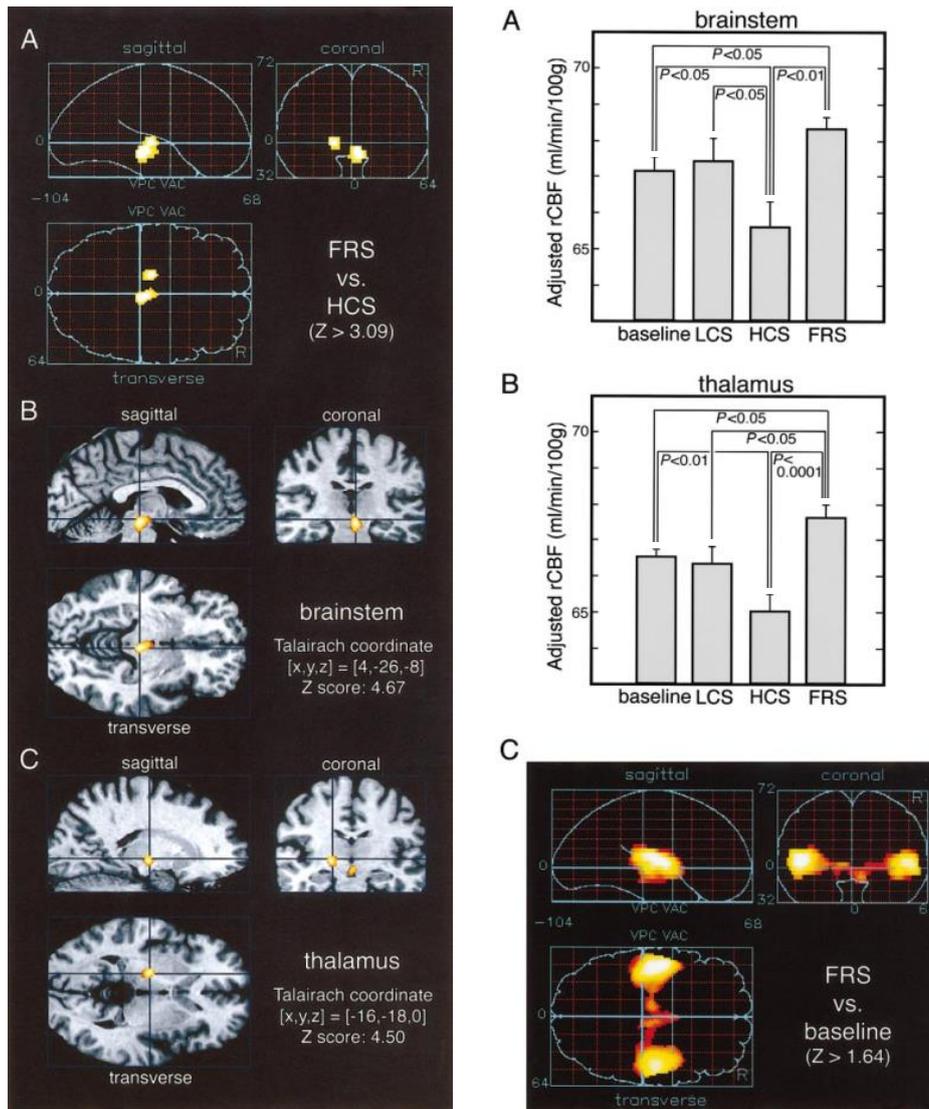


図 2-11 可聴音と超高周波を同時に聴かせた時（FRS）に、可聴音のみを聴かせた時（HCS）よりも神経活動が増加した脳の部位（Oohashi et al., 2000 より）

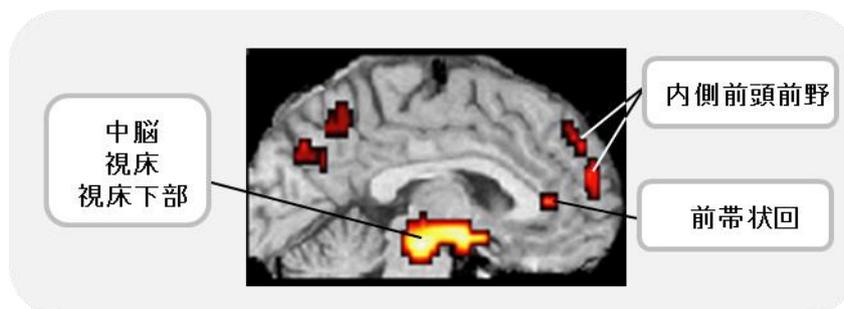


図 2-12 ハイパーソニック・サウンドによって活性化する脳の部位（本田, 2013 より）

中脳は、そこから脳内各部位に投射する〈広範囲調節系〉と呼ばれる神経ネットワークの拠点となる部分である。特に、この実験によって血流量の増大が見出された〈前帯状回〉、〈内側前頭前野〉などの前頭葉の各部位には、中脳からドーパミンやセロトニンを神経伝達物質とする〈モノアミン作動性神経系〉が投射しており、快感を生み出す脳の〈報酬系神経回路〉として作動することが知られている。つまり、ハイパーソニック・サウンドによって、脳の中の〈報酬系神経回路〉が活性化される可能性が高いことが明らかにされた。

中脳、間脳は、〈自律神経系〉や〈内分泌系〉の中核として身体の中の環境を一定に保つ役割を果たすと同時に、〈免疫系〉の重要な拠点である。また、上述のように〈報酬系神経回路〉の拠点でもある。このように生きていく上で必要不可欠な脳の基幹的調節機能を担っていることから、これらの領域を〈基幹脳〉と呼び、基幹脳から発する〈自律神経系〉〈内分泌系〉〈免疫系〉〈報酬系〉といった神経システムの全体を〈基幹脳ネットワーク〉と呼ぶことが提案されている[大橋, 2013]。

2.4.3. ハイパーソニック・エフェクトによる基幹脳活性化の現実的指標

これまで述べたように、ハイパーソニック・エフェクトは、可聴域上限を大幅に上回り複雑に変化する超高周波成分を含む音によって、人間の間脳・中脳を含む〈基幹脳ネットワーク〉が活性化することを根本現象としている。したがってハイパーソニック・エフェクトの発現状態を計測するには、間脳・中脳を含む脳の血流量を調べることもっとも直接的な方法といえる。しかし、これにはサイクロトロンを含むポジトロン断層撮像法（PET）のような大掛かりな実験装置を必要とするため、予算、実験頻度、実験場所などに大きな制約があり、頻繁にその計測を行うことは現実性が乏しい。

そこで先行研究では基幹脳の活性を示す現実的な指標を模索して、脳血流と脳波との同時計測の結果から、基幹脳の血流量と自発脳波の $\alpha 2$ 成分（10～13Hz）とが高い正の相関をもつことを見出した[Nakamura et al., 2004]。以来、基幹脳の活性状態の指標として、特定の頭皮状の領域から導出された〈脳波 $\alpha 2$ ポテンシャル〉が有効性を発揮している。脳波は、脳血流に比べてその計測が容易であり、計測環境の自由度がきわめて高い。 $\alpha 2$ ポテンシャルを指標とすることにより、脳活性を容易に把握することが可能となった。

2.4.4. 二次元知覚モデル

音として知覚できない超高周波成分がもたらすこの特異な現象は、従来の聴覚生理学や音響学の知識によって説明することは難しい。また、超高周波成分に対する反応が脳へ伝達される経路についても、まだ十分な知見は得られていない。とはいえこの現象を説明するモデルとして、空気振動に対する人間の反応は、可聴音に対する聴覚反応と、人間の可聴域上限をこえる超高周波成分に対する反応の二次元によって構成されるという〈二次元知覚モデル〉が構築され、現時点におけるもっとも有力なモデルとされている。

このモデルの祖形は1988年に形成され[大橋ら, 1988]、研究の進展とともに改訂されて[Oohashi et al., 1991][大橋, 2003][仁科, 2009]、現在は図2-13のように考えられている[八木, 2013]。それによれば、第一の次元は、可聴音に対する反応である。可聴音は、聴覚器官（気導系）で受容され、聴覚系ネットワークで処理されて〈メッセージ・キャリアー〉として作用する。第二の次元は、超高周波成分に対する反応である。超高周波成分は、何らかの伝達経路を經由して脳の内部状態を変化させ、音刺激をはじめ感覚刺激に対する応答全般をより美しく快適に感じる方向に変調させる〈モジュレーター〉の機能を果たすとされる。そしてその受容は体表面にあるとされている。

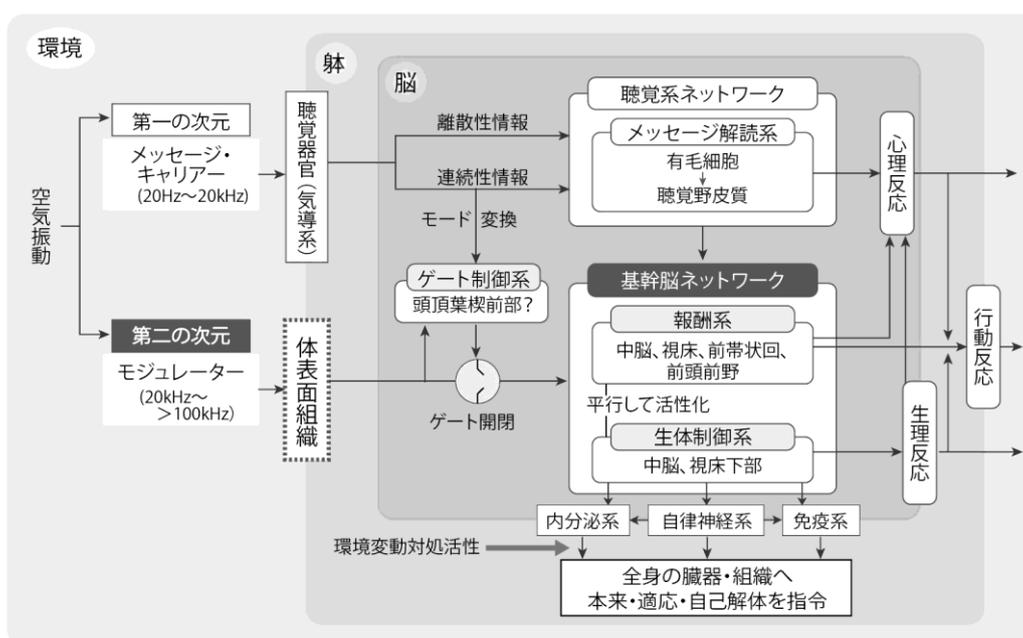


図2-13 二次元知覚モデル(2013) (八木, 2013 より改変)

ハイパーソニック・エフェクトは、可聴音と超高周波成分とが共存するときに発現することが認められている。しかし、ハイパーソニック・エフェクトを発現させることが確認されているガムラン音楽をもちいて、可聴音をカットし超高周波成分だけを呈示しても、ハイパーソニック・エフェクトは発現しない。このことについて、二次元知覚モデルでは、第一の次元である気導聴覚系に音楽のような連続性の情報が入力されている状態で、第二の次元である体表面に超高周波成分が受容されたときにはじめて、超高周波成分によって励起された信号が報酬系に向かう途上に置かれたゲートが開き、ハイパーソニック・エフェクトが発現するというモデルを構築している。

これらのモデルが脳のどの部位に対応するか、ポジトロン断層撮像法によってえられた結果と主成分分析法によって分析した結果、次のように考えられている。第一の次元には可聴音に反応する領域群、すなわち左右の脳半球の聴覚野に対応する。第二の次元には超高周波成分に反応する領域群、すなわち基幹脳ネットワークに対応する。そして〈ゲート制御系〉には、超高周波成分に反応して活性化する領域のうち、報酬系、自律神経系、免疫系のいずれにも属さず、かつ、音楽の存在によってのみ脳波β波が増強する頭頂葉楔前部がその候補と考えられている[大橋, 2003]。

このモデルに関して、次のような検証実験が行われている(図 2-14) [Oohashi et al., 2006] [八木, 2013]。ガムラン音を 22kHz 以上の超高周波成分と 22kHz 以下の可聴域成分とに分け、次の4つの条件で呈示したときに、ハイパーソニック・エフェクトの発現に差が生じるかどうかについて、脳波を指標とする生理学的計測法と最適聴取音量調整法による行動学的評価法とによって検討された。音呈示には、50kHz を超える帯域まで良好な応答をもち、バイチャンネルの構成をもつイヤフォンを開発して用いている。

条件 A：可聴域と超高周波の両方をスピーカーから実験参加者の全身に呈示する。

条件 B：可聴域と超高周波の両方をイヤフォンを用いて実験参加者の耳（気導聴覚系）のみに呈示する。

条件 C：可聴域はイヤフォンを通じて気導聴覚系に、超高周波はスピーカーから実験参加者の耳以外の全身に呈示する。

条件 D：可聴域はイヤフォンを通じて気導聴覚系に、超高周波はスピーカーから実験参加者の全身に呈示するが、実験参加者の身体を遮音材で覆い、スピーカーから呈示される超高周波の体表面への到達を遮断する。

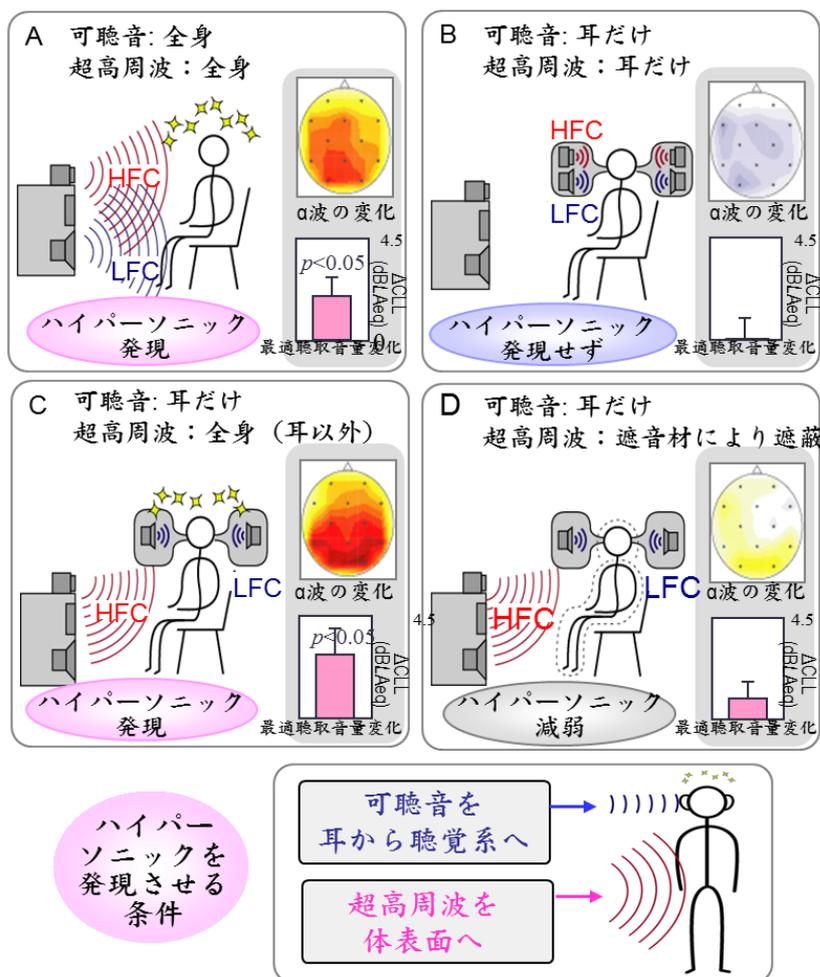


図 2-14 ハイパーソニック・エフェクトを発現させるには可聴音を聴覚系へ、超高周波を体表面へ (八木, 2013 より)

この実験の結果、可聴音と超高周波の両方をスピーカーから実験参加者の全身に呈示した条件 A ではハイパーソニック・エフェクトが発現したが、可聴音と超高周波の両方をイヤフォンから呈示した条件 B ではハイパーソニック・エフェクトは発現しなかった。可聴音を気導聴覚系に、超高周波を体表面に呈示した条件 C ではハイパーソニック・エフェクトが発現した。一方、超高周波成分の体表面への到達を遮断した条

件 D では、ハイパーソニック・エフェクトの発現は顕著に抑制された。つまり、可聴音が耳に、超高周波が体表面に到達するように呈示されたときにのみハイパーソニック・エフェクトが発現することが見出され、二次元知覚モデルの妥当性が裏付けられた。また、超高周波成分のなんらかの受容器が体表面に存在することが推定され、それを特定するための研究も開始されている。

なお、ハイパーソニック・エフェクト発現に関する実験は、これまでのところ、健康で正常な聴力を有する人々のみを対象として行われており、聴覚障害者に対する影響は報告されていない。しかし、可聴周波数の上限が低下している高齢者においても効果があることが見出されている。この研究においても 60 代の実験参加者に対してハイパーソニック・エフェクトが発現することが観察された。このことは、二次元知覚モデルにおいて、超高周波成分の受容器が聴覚系ではなく体表面にあると考えられていることと矛盾しない。

2.4.5. ハイパーソニック・エフェクトを発現させる〈ハイパーソニック・サウンド〉

2.4.5.1. 自然音におけるハイパーソニック・サウンド

ここであらためて、ハイパーソニック・エフェクトを発現させる音〈ハイパーソニック・サウンド〉のもつ構造について先行研究における知見をまとめる。ハイパーソニック・エフェクトを導く自然音には共通して、人間の可聴域上限を大幅に上回る帯域におよび、ミリ秒単位のマイクロな時間領域で複雑に変化する超高密度・高複雑性の超高周波成分が豊富に含まれていることが見出されている。ハイパーソニック・エフェクトの発見を導いたインドネシア・バリ島の青銅の打楽器オーケストラ、ガムラン音の周波数の上限は、時として 200 kHz に達している(図 2-15)。

このような特徴を備えた自然由来のハイパーソニック・サウンドとして、ガムラン音以外に、チェンバロ、薩摩琵琶、普化尺八などの楽器音、インドネシア・ジャワ島、マレーシア・ボルネオ島、アフリカ・カメルーン、ブラジル、パナマ・バロ・コロラド島の熱帯雨林環境音、インドネシア・バリ島の農村の環境音、モンゴルの小川のせせらぎ、ブルガリアの民族合唱、アフリカ狩猟採集民の歌声などが報告されている[大橋, 1989, 2003][仁科ら, 2001][Morimoto et al, 2004] [Nakamura et al, 2004][仁科ら, 2005] [森本ら, 2006] [八木ら, 2011] [河合ら, 2013]。

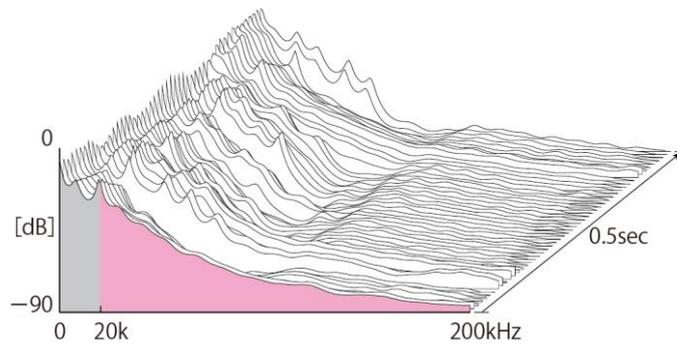


図 2-15 最大エントロピースペクトルアレイ法によるガムラン音の構造
(河合ら, 2013 より)

2.4.5.2. 人工高周波に関する検討

ハイパーソニック・エフェクトは、複雑に変化する超高周波成分を豊富に含む楽器音や自然環境音を聴いているときに発現する。それでは、人工的に合成された超高周波成分ではどうだろうか。

これまでの検討では、ホワイトノイズから合成された定常的な超高周波ではハイパーソニック・エフェクトは発現しないことが実験によって確かめられている(図 2-16) [Morimoto et al., 1998]。この実験では、ガムラン音楽とホワイトノイズのそれぞれからカットオフ周波数 26kHz のフィルターを用いて超高周波を抽出し、両者の時間平均スペクトルとほぼ等しくなるよう、ホワイトノイズから作成した超高周波にイコライジングが施された。ガムラン音の可聴音にガムラン音の超高周波を組み合わせる場合と、ガムラン音の可聴音にホワイトノイズから作成した超高周波とを組み合わせる場合の脳波 α 波が計測された。その結果、ガムラン音の超高周波を用いた場合には α 波の増強が認められたが、ホワイトノイズ由来の超高周波の共存では α 波の増強はみられなかった。

ガムランの超高周波とホワイトノイズ由来の超高周波の時間平均周波数パワースペクトルは近似している。しかし、ミリ秒単位のスペクトルの変化をみると、ガムランの超高周波が複雑に変化し非定常的であるのに対し、ホワイトノイズの超高周波はほぼ定常的である。このことから、ハイパーソニック・エフェクトを発現させる超高周

波成分の特性として、時間的にマイクロな領域で複雑に変化する非定常性、高複雑性をもつことが必要と考えられている。

ハイパーソニック・サウンドについてのより詳細な数理的・物理的構造の分析やその発生源についての研究も別途行われている [Maekawa et al, 2013]。

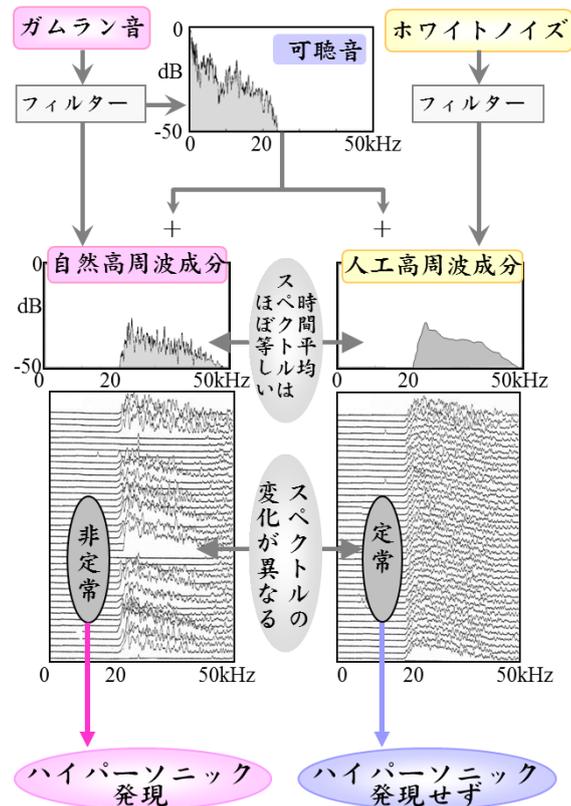


図 2-16 ホワイトノイズのような定常性超高周波ではハイパーソニック・エフェクトは発現しない (Morimoto et al., 1998 より)

2.4.6. ハイパーソニック・エフェクトを応用した音環境快適化の事例

ハイパーソニック・サウンドの高忠実度の録音物を再生することによってハイパーソニック・エフェクトを発現させ、環境の快適化がもたらされることを示した実験および先行的な応用事例について概観する。すでに、高校の図書室での実験[中村ら, 2003]、都市環境音を仮想的に再現した実験室での実験[仁科ら, 2005]、実在の市街地での応用事例[仁科ら, 2007]が報告されている。

2.4.6.1. 図書室での実験

この実験では、可聴域を大幅に上回る超高周波成分を豊富に含むインドネシア・ジャワ島の熱帯雨林の自然環境音を音源とし、それを超高周波成分を豊富に含む状態で呈示する条件、22kHz以上の成分をカットして呈示する条件、環境音を呈示しない条件という3条件を設定した。それぞれの条件を2日ずつ設定し、その間に図書室に来室した生徒を対象にした質問紙調査が行われた[中村ら, 2003]。質問紙は、実験参加者が来室したときの図書室環境についての印象を尋ねる質問群と、実験参加者が図書室に入る前と図書室滞在後の自己の内部状態とについて内省比較を求める質問群から構成されている。

図書館環境に対する印象に関する質問項目については、超高周波を豊富に含む自然環境音に対する評価として、図書室の「雰囲気よかった」「空気が澄んでいた」「やさしい」「ゆっくりしたいと感じた」といった項目で統計的有意性をもったポジティブな評価が見られた。一方、高周波を含まない環境音ではこうした効果は見られなかった。

図書室滞在後の内部状態についての質問の結果、超高周波を豊富に含む環境音をある程度の時間にわたって体験することによって、入室前よりも、「さわやかになった」「頭が軽くなった」「はっきり音が聴こえる」「はっきり物が見える」と統計的有意に感じ取られていることが見出された。超高周波成分を含まない条件ではこのような効果は認められず、むしろ、呈示音のないベースラインよりも低い評価を示した。

2.4.6.2. 都市環境音を仮想的に再現した実験室での実験

この実験では、録音した都市環境音のみをスピーカーから再生する条件、都市環境音とマレーシア・ボルネオ島の熱帯雨林環境音とをミックスして再生する条件という2条件を設定し、そこに所在する実験参加者の脳波、血液中の生理活性物質、主観的印象評価の計測が行われた[仁科ら, 2005]。熱帯雨林環境音は可聴域において感性的に優れたものであると同時に、可聴域上限を大幅にこえ100kHzを上回る高複雑性の超高周波成分を豊富に含むものが用いられている。呈示時間は各40分で、10分間の休憩をはさんで2つの条件で環境音が呈示された。採血は、1回目の環境音呈示直前、1回目と2回目の環境音呈示の間の休憩中、2回目の環境音呈示直後に行われた。主観的印象評価は、2種類の環境音呈示直後に行われた。質問紙は、図書室での実験と

同様に、実験参加者が滞在した音環境についての印象を評価する質問群と、実験参加者が環境音に接する前と後の自己の内部状態について内省比較を求める質問群とから構成された。

実験の結果、都市環境音と熱帯雨林環境音とをミックスして再生すると、都市環境音だけを再生しているときに比べ、脳波 α 2 ポテンシャルの増大、ガンの一次防御効果やウィルス感染防止効果をもつ NK 細胞活性の増大、免疫活性を指標する免疫グロブリン濃度の増大、攻撃性の増大を指標するアドレナリン濃度の低下などが統計的に有意に認められた。また、心理的には、都市環境音に熱帯雨林の環境音をミックスすることによって、「雰囲気がよかった」「空気が澄んでいた」「やすらいだ」「ゆっくりいたいと感じた」などすべての項目でポジティブな評価が見られた。また、都市環境音に熱帯雨林の環境音をミックスして呈示することにより、音を聴く前よりも「さわやかになった」「頭が軽くなった」という全身的状态の自覚的改善効果とともに、「はっきり音が聴こえる」「はっきり物が見える」という視聴覚的情報処理系の活性改善が示唆される結果がいずれも有意に得られている。

ハイパーソニック・エフェクトによって活性化する部位が、脳の活性水準を制御するとともに視聴覚情報処理全般にも関わっている脳の基幹部に該当し、なかでも中脳は情動を制御するモノアミン神経系やオピオイド神経系の首座となっていることや、視床は、視聴覚、体性感覚を含む大部分の感覚神経の中継拠点であり感覚情報処理にモジュレーションを加える機能をもつことが知られていることから、これらの主観的印象評価の結果は、熱帯雨林環境音のミックスによって導かれた基幹脳の活性化を反映している可能性を示すと解釈されている。

2.4.6.3. 実在の市街地への応用事例

滋賀県彦根市で「街なか再生」事業に取り組んでいる〈四番街スクエア〉地区において、2003年から2005年までの3年にわたる準備期間を経てハイパーソニック・サウンドシステムが実装され、以後、その稼働が継続している。これは、文部科学省独自の革新技术開発研究のひとつとして行われた[仁科ら, 2007]。

この街のもともとの環境音は 20kHz 以下の成分しか含まない環境音である。そこに再生するコンテンツとして、マレーシア・ボルネオ島の熱帯雨林の自然環境音を素材にシンセサイザーなどによる音響を加えた 100 kHz を上回る超高周波成分を含む

コンテンツが開発された（図 2-17）。このコンテンツを忠実に再生するプレーヤー、屋外での長時間駆動に対応させた超広帯域振動再生装置、それらをつなぐネットワークもオリジナルに開発された。それらによって再生されたコンテンツの周波数帯域は 150 kHz に達している。

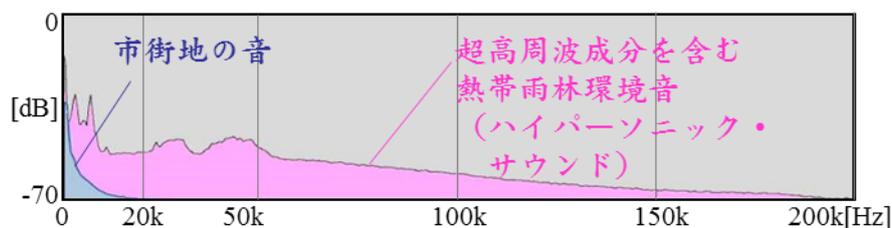


図 2-17 彦根市四番町スクウェアに造成した音環境の周波数パワースペクトル（仁科ら，2007 より）

このシステムからの音再生がない状態でその空間に所在しているとき（すなわち、もともとの都市環境音だけに接しているとき）と、そこに開発したシステムによってコンテンツを付加再生したときとについて、実験参加者の脳波、血液中の生理活性物質、主観的印象評価の計測が行われた。質問紙は、前述の実験室内での実験と同様である。その結果、熱帯雨林環境音を含むコンテンツの呈示によって、基幹脳活性と高度に相関する脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルの増大、ストレスの低下を示す唾液中のコルチゾール濃度の低下が、いずれも統計的有意に認められるとともに、免疫力の上昇を示す NK 細胞活性が増大する傾向が示された。心理的には、「潤いを感じた」「リラックスした」「やすらいだ」「雰囲気よかった」などすべての項目で統計的有意性をもったポジティブな評価がみられた。さらに、このコンテンツに接することによってこの空間に滞在する前よりも「さわやか」「頭が軽い」「はっきり音が聴こえる」「はっきり物が見える」という視聴覚情報処理系の活性改善が示唆される結果が得られた。

この街を訪れる観光客にもアンケートを行った結果、評価は極めて高く、自由記述では「もっと環境音大きい方がよい」という意見も見られた。また、この街は都市計画関係の賞を数多く受賞しており、その授賞理由のひとつがこの「音の街づくり」だったといわれている。

2.4.7. 本研究の位置づけと課題

以上の先行研究を踏まえてこの研究は、ハイパーソニック・エフェクトを鉄道の騒音環境改善に応用することを試み、その効果を実証的に検討しようとするものである。そもそも鉄道空間の音環境改善にハイパーソニック・エフェクトを応用するという着想には前例が無く、これを実現するためのハードウェア、ソフトウェア(コンテンツ)、そしてその運用についても、課題はきわめて多い。鉄道空間に適合性の高いハイパーソニック・コンテンツの開発、その呈示用システムの開発、そしてその呈示方法の開発が必要となる。そこでこの研究においては、モデル的な空間を設定し、そこにシステムを実装し、独自に開発したコンテンツを再生呈示して、その効果をひとつひとつ確認しつつ研究開発を進めることにした。

また、鉄道空間は、人間が列車という騒音源に至近距離で所在し、列車を利用しようとする限りその騒音から逃れられないという点で、都市環境のなかでも深刻な騒音環境といえる。このような鉄道の騒音環境において、2.4.1 で述べたような効果が得られるならば、ハイパーソニック・エフェクトの応用は、騒音低減効果の限界が著しい鉄道の音環境を快適化するあらたな手法となることが期待される。しかし、これまで述べた実装事例はいずれも、図書室、実験室、商店街で行われており、実験室では都市騒音を再生して実験が行われたとはいえ、鉄道騒音の音圧には及ばない。つまり、騒音レベルの高い鉄道環境でもハイパーソニック・エフェクトが発現して不快感が改善されるかどうかについての研究は、未だ行われていない。したがって、騒音レベルが高く不快感が報告されている環境においてもハイパーソニック・エフェクトが発現するかどうかを検討することは、この研究の基礎論上の重要な課題となる。

また、これまでの実装事例では、熱帯雨林環境音または熱帯雨林環境音を主な素材としてこれに音楽的要素を加えた音源をコンテンツとして再生している。しかし、鉄道の駅や車両内において同様のコンテンツを再生することは、必ずしも適当ではない。なぜならそれは、すでに相当に高いレベルにある騒音レベルをさらに押し上げることになり、現在使われているアナウンスや発車ベルなどの情報伝達の妨げになる可能性もあるからである。そこでこの研究では、知覚上限を上回る超高周波成分だけを環境音に加えることによって、同様の効果がえられないかどうかを検討することにした。このような方法によってハイパーソニック・エフェクトが発現するかどうかは、いま

だ本格的に検証されておらず、これを明らかにすることは基礎論上も応用上も重要な課題と考えられる。

第3章 研究の方法

3.1. 実験空間の設定と実験方法

鉄道の音環境に超高周波成分を付加し、その効果を検証することが、この研究の目的である。しかし、不特定多数の乗客が利用する実在の駅ホームや列車内においてその効果を検討する実験を行うと、外乱要因が多数存在するため実験条件を統御できず、再現性のある評価実験が不可能である。しかも、利用者対応や列車運行の安全性の確保など困難な課題も多く、実現性がきわめて低い。

そこでこの研究では、実験条件の統御を優先して実験空間を設定することにした。すなわち、まず実験室内に予備実験のための実験空間を設定し、ここに駅ホームの音環境を仮想的に造成して予備的な検討を行う。次いで、実在の鉄道空間に近い環境として、駅の臨時列車用のホーム（以下「駅臨時ホーム」と呼ぶ）の列車の入線がなく乗客が滞在しない時間帯に実験を行うことにした。さらに、研究開発施設内に設置された車両（以下「試験用車両」とする）内に、鉄道空間の音環境を仮想的に造成して、より本格的な実験を行うこととした。

これらの実験空間には、現実の鉄道の音環境をできるだけ忠実に再現する必要がある。そこで、列車の発着音や走行音、アナウンス、発車ベル、乗客の発する足音や話し声など、多様な音が重畳し、かつ列車という最大の発音源が高速で移動するという特徴をもつ音環境を再現するため、駅ホーム環境音および車両内環境音の超広帯域収録を行った。そうして得られた録音物に最新の音響編集技術による音場構成手法を適用して、音環境造成用の音試料を作成した。それらを極力忠実に再現するために、高い解像力を有するシステムを構成し、実験空間内に仮想的に駅ホームおよび車両内の音環境を造成した。そして、これらの実験空間に、この研究で開発した方法によって複数の条件で超高周波成分を付加呈示し、その効果を調べることにした。

効果を評価する指標として、生理学的指標と心理学的指標という互いに原理を異にする2つの指標を設定した。情動脳機能のポジティブ側への転化状態については、駅臨時ホームや試験用車両内でも計測可能な自発脳波から基幹脳血流と高い正の相関を有する脳波 α 波ポテンシャルを算出して、評価指標とした。情動脳機能のポジティブ側への転化が導く音環境や環境質全体に対する印象の好感度化は、質問紙調査による心理学的指標を使って調べた。質問紙は先行研究をふまえて構成した[八木ら, 2003][中村ら, 2003][仁科ら, 2007]。

本章では、上記についての基本的な手法を述べる。各実験空間の特徴や実験空間ごとに異なる詳細は、第5～6章で述べる。

3.2. 環境音収録・分析手法の構築

駅ホーム音環境／車両内音環境を仮想的に実現するため必要な音試料を作成すると同時に鉄道空間の音環境の物理構造を把握するために、環境音の計測・収録を行った。

騒音環境の把握において重要となる量的評価指標として、従来の騒音対策で主要な役割を果たしている騒音レベルを用いた。環境音の質的側面の把握には、広帯域にわたる周波数パワースペクトルを用いることとした。

3.2.1. 騒音レベルの計測

環境音の量的指標として、等価騒音レベルを用いた。近年、環境騒音の指標として等価騒音レベルが一般的に用いられ、鉄道においても、「在来鉄道の新設または大規模改良に際しての騒音対策指針」は等価騒音レベルを表す L_{Aeq} を単位として設定されているからである。

計測は、JIS C 1505、IEC 60651・60804 Type 1、ANSI S1.43 Type 1 に準拠した積分形広帯域精密騒音計 LA-5111（小野測器、神奈川、日本）で行った。一般に騒音計は、人間の可聴周波数上限が 20 kHz 程度であることを前提に設計されており、国際電気標準会議 IEC の定義する標準的な騒音計測では、人間に知覚できる周波数範囲 20Hz から 20kHz のなかの 63Hz から 8kHz、精密計測用で 16kHz までの領域での騒音暴露量のみを対象としている。この研究で用いた騒音計の計測対象はそれよりやや広く、20Hz～20kHz のいわゆる可聴帯域に対応している。計測手法は、JIS Z 8731 に準拠した。

3.2.2. 超広帯域収録システムの構築と予備的計測

先行研究によって、鉄道空間には 20kHz を上回る周波数成分が存在することが報告されており[蘆原, 2009]、著者らもそれを確認している[小野寺ら, 2011]。そこで、駅ホームや車両内の環境音を高い忠実度で、現実さながらのリアリティをもって収録するために、従来の鉄道の音環境評価の主な対象である可聴音だけでなく、超広帯域にわたる音の収録を高精度で行うこととした。

超広帯域環境音の収録には、可聴域上限を十分こえる超広帯域にわたって平坦な周波数応答をもちノイズレベルの低いデジタル録音を、臨場感の高い2チャンネル以上のチャンネル数で行うことが必要と考えられる。また、環境音収録を大勢の利用者が往来する駅のホームや車両内で支障なく実施するためには、収録システムは、小型軽量で持ち運び易いこと、少人数で運用可能であること、コンセントからのケーブルを介した電力供給が必要な交流電源を使用せずバッテリーを電源とする直流方式で長時間稼働できる省電力性の高いシステムであることが望ましい。こうした厳しい条件を満たす収録システムを構築することを検討した。

3.2.2.1. マイクロフォン

可聴域上限をこえる広帯域の周波数特性を有する複数のマイクروفオンを対象に、この研究への適合性を検討した。その結果、1/4インチ・フリーフィールド・コンデンサー・マイクروفオン B&K 4939 (Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement, デンマーク) が、周波数特性、S/N 比ともにこの研究に適合性が高いことがわかった (図 3-1)。より広帯域に適用可能な 1/8 インチ・フリーフィールド・コンデンサー・マイクروفオン B&K4138 は S/N 比が極端に悪く、この研究で重視すべき可聴音の計測に支障があった。なお、超高周波帯域の感度を強調したマイクروفオンとして SANKEN CO-100K があるが、周波数特性の平坦性を重視してこの研究では採用しなかった。

また、マイクروفオン・アンプリファイアは、100kHz に及ぶ広帯域まで良好な特性をもち、ノイズフロアが低く、十分な増幅率をもつものとして、B&K5935 を選択した。この機材は、電池で駆動され、マイクروفオンへの電源供給を行うパワーサプライとしての機能も備えており、パワーサプライとアンプリファイアの機能を一台の機材で担うことにより、システムの可搬性を大幅に向上させることができた。

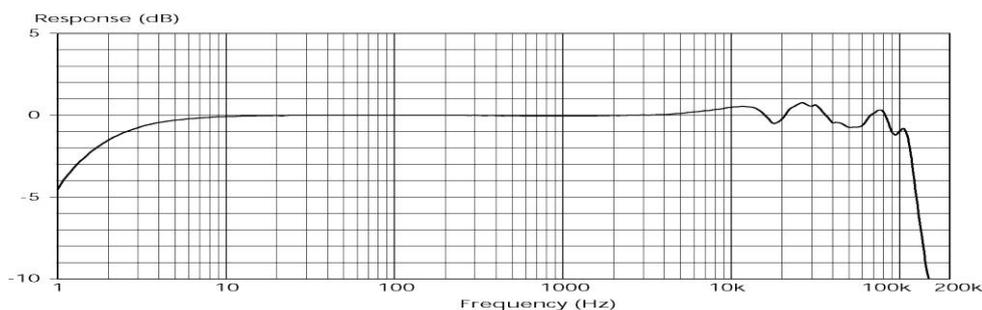


図 3-1 マイクロフォン B&K4939 の周波数特性（メーカー測定図）

3.2.2.2. レコーダー

デジタル録音では、その方式によって収録周波数帯域上限が原理的に異なる。現在主流の PCM (Pulse Code Modulation パルス符号変調) 方式で、100 kHz に及ぶ収録システムを構築するためには、標本化周波数 192 kHz 以上のレコーダーが必要となる。そうした性能をもつレコーダーは、スタジオ用の音響収録機器としては実用化されているが、この研究で必要とする程度の可搬性を備え交流電源を使用せずに稼働できる機器は、この研究を開始した時点では見出されなかった。

一方、PCM 方式とは異なるデジタル方式で、ハイパーソニック・エフェクト研究で実績をもっているのは、100 kHz を超える周波数応答を持つ高速標本化 1 ビット量子化方式である。SACD に採用されている DSD (ダイレクト・ストリーム・デジタル) 方式はこの方式にもとづく規格のひとつである。この方式は、その音質が原音に忠実で良好であることが評価され、急速に実用化が進んでいる。高速標本化 1 ビット方式による小型軽量・電池稼働が可能な録音機として、KORG 社の MR-1000 が登場していることがわかった。このレコーダーの標本化周波数は 2.8224 MHz と 5.6448 MHz とが選択可能である。重量は約 1 kg、単 3 電池 8 本で連続約 4 時間（標本化周波数 2.8224 MHz の場合）の録音が可能であり、鉄道空間での録音に必要な小型軽量性、交流電源不要という条件を満たしている。

ただし、この方式には、量子化に伴うノイズ（いわゆる 1 ビットノイズ）が高周波帯域に重畳するという原理的な問題がある。そこで、同機の 1 ビットノイズフロアを実測した。その結果、標本化周波数を 2.8224 MHz に設定した場合には、およそ 30kHz

以上の帯域に大きな1ビットノイズが重畳し、この研究目的には適合しない状況が観測された。しかし、標本化周波数を5.6448 MHzに設定した場合には、1ビットノイズはおよそ65kHz以上の帯域でのみ観測され、それ以下の帯域には影響を及ぼしていないことが見出された(図3-2)。そこで、5.6448 MHzでの録音を行い、60 kHzまでを分析対象とすることによって、この録音機を採用することとした。なお、MR-1000にはPCMモードがあり標本化周波数192 kHzでの収録が可能ではあったが、入力の初段にローパスフィルターが組み込まれていて超高周波成分が制限されるため、この研究ではPCM方式での使用はできない。

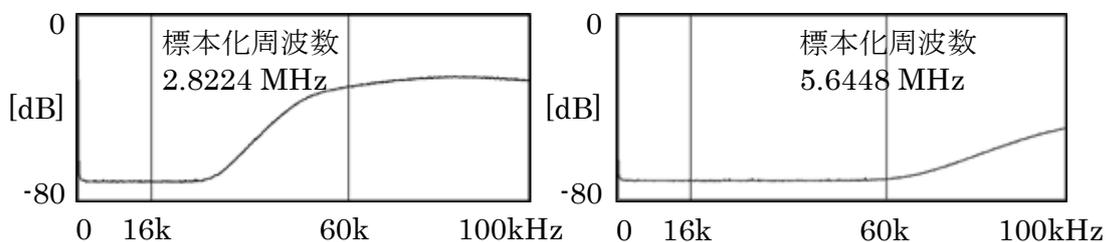


図 3-2 MR-1000 で観察された1ビットノイズ

以上の検討に基づいて選択した機器によって、以下のような超広帯域収録システムを構成して第一段階の環境音収録システムとした(図3-3、写真3-1)。

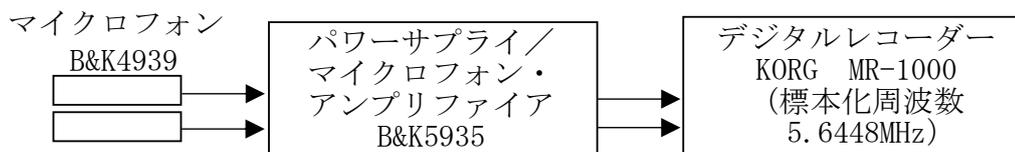


図 3-3 環境音収録システムのブロックダイアグラム



マイクロフォン B&K4939



パワーサプライ／マイクロ
フォンアンプ
B&K 5935



レコーダー
KORG MR-1000

写真 3-1 環境音収録システムのマイクロフォン、マイクロフォンアンプ、
レコーダー

これを実在の公共交通機関内で運用するためには、マイクロフォンからレコーダーまでをひとりの計測者が目立たないように運搬・操作・モニターできる形態を構成する必要がある。そこで、適切な大きさのバッグを準備し、これにマイクロフォンを装着するとともに、その他の機材を目立たないように収納した。屋外での試行を繰り返し、録音システムを内蔵したバッグを携帯し操作する録音者1名、積分騒音計で等価騒音レベルを計測する計測者1名、計測環境について記録するとともに他の鉄道利用者等の動きに配慮するナビゲータ1名の3人チームでの運用形態を構築した。

3.2.3. 超広帯域収録システムの再構築

このシステムには、次のような限界が見出された。まず、高速標本化1ビット方式のレコーダーを用いたこのシステムでは、既に述べたように量子化ノイズが無視できないレベルで混入する。レコーダーの標本化周波数を2.8224MHzに設定した場合にはおよそ30kHz以上の帯域に、標本化周波数を5.6448MHzに設定した場合にはおよそ65kHz以上の帯域に1ビットノイズが観測され、5.6448MHzで録音した場合であ

っても有効な周波数帯域の上限は 60kHz くらいまでに制限される (図 3-2)。しかし、予備的計測の結果、計測分析対象の上限が 60kHz では不十分であることが示唆された。

また、コンデンサー・マイクロフォン B&K4939 は優れた特性をもつ一方、DC200V の電源供給を必要とするため、パワーサプライとともに運用しなければならない。マイクロフォンアンプ B&K5935 は、マイクロフォンへの電源供給機能とマイクロフォンからの入力信号の増幅機能とを 1 台で担うことのできる製品であるが、132.6mm×69.5mm×200m、1.1 kg というサイズと重量のため、小型軽量性・可搬性を著しく損なうという限界があった。さらに、マイクロフォン B&K4939 は音響測定用マイクロフォンであり、振動板に通常のマイクロフォンよりもはるかに高い電圧をかけて動作しているため、スタジオ用マイクロフォンと比べて空気環境条件に鋭敏である。そのため、湿度の影響を受けて破損する恐れがあり、取り扱いに細心の注意を要し、運用に困難を伴っていた。

こうした課題を解決するため、収録システムをさらに見直すことにした。

3.2.3.1. マイクロフォン

各種のコンデンサー・マイクロフォンについて、有力なものを検討し、無指向性コンパクト・コンデンサー・マイクロフォン、DPA4033 (DPA Microphones、デンマーク) を選択した。DPA Microphones 社は、B&K 社の精密加工技術、音響測定技術を引き継いだ音楽用マイクロフォン専門の設計会社である。このモデルは、レコーダーやミキサーから供給できる 48V のファンタム電源で駆動されるので、B&K4939 のように専用のパワーサプライを必要とせず、駅ホームや車両内での録音に必要な小型軽量性と運用の容易さを備えている。公表されている周波数特性は 20 kHz~40 kHz±2dB であるが、実測を行って B&K4939 と比較したところ、65 kHz 程度まで両者がほぼ変わらない特性を有している上に、4033 は 100 kHz 以上に及ぶ周波数応答をもっていることが確認されたので、これを選択した (図 3-4)。

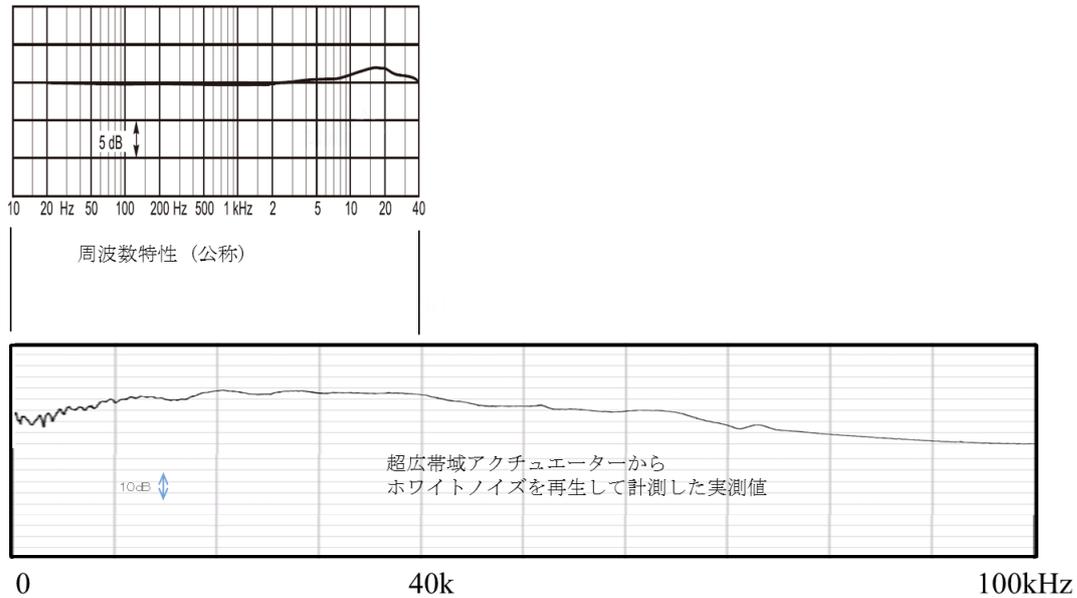


図 3-4 マイクロフォン DPA4033 の周波数特性(メーカー測定図および実測値)

3.2.3.2. レコーダー

レコーダーは、PCM 方式の小型マルチトラックレコーダー SX-R4 (SONOSAX、スイス) を選択した。このモデルは、標本化周波数 192 kHz、量子化ビット数 24 bit、4 チャンネルの収録が可能でありながら、重量は 800 g と軽量であり、バッテリーで駆動できる。マイクロフォンに 48V のファンタム電源を供給できると同時に、入力レベル調整機能も整っており、外付けのマイクロフォン・アンプファイアを必要としない。つまり、マイクロフォンとレコーダーとを直結するだけで録音を行うことができる。

以上により再構成した収録システムのブロックダイアグラム (図 3-5) と写真 (写真 3-2) を下記に示す。

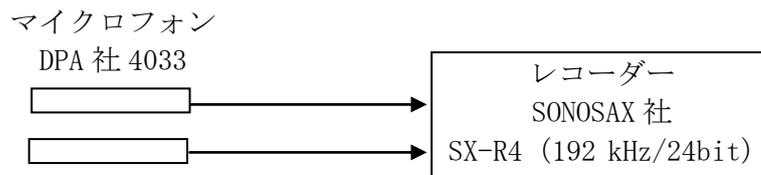


図 3-5 再構築した環境音収録システムのブロックダイアグラム



写真 3-2 再構築した環境音収録システムのマイクロフォンとレコーダー

3.2.3.3. 分析システム

収録した環境音の物理構造の分析としては、先行研究を踏まえ、音の大きさ（音圧または振幅）だけでなく、音の周波数成分を含む構造を精密に視覚化し解析する手段として広く用いられている高速フーリエ変換法（FFT）による解析を行い、一定時間領域あたりの平均値を示す時間平均周波数パワースペクトルを描いた。分析には、100 kHz までの解析が可能な専用機として定評のある FFT アナライザー CF-5220（小野測器、神奈川、日本）を使用した。分析結果は、第 4 章で述べる。

3.3. 実験用音試料

3.3.1. 駅ホーム環境音／車両内環境音の超広帯域収録

構築した超広帯域環境音収録システムをもちいて、駅ホーム環境音は 2 チャンネルのステレオ録音、車両内環境音は走行感をよりリアリティ高く収録するため 4 チャンネルで録音した。マイクアレイメントは、その後の編集プロセスに最適化するように構成した。あわせて、実験での呈示レベルを設定する基本情報を得るために、騒音レベルを同時に計測した。すでに述べたように、高速標本化 1 ビット方式による予備的検討を経て、最終的には標本化周波数 192 kHz、量子化ビット数 24 bit の PCM 方式で収録した。

3.3.2. 〈仮想駅ホーム環境音〉〈仮想車両内環境音〉の作成

収録した駅ホーム環境音／車両内環境音を用いて、実験用音試料を作成した。収録音には、突発性ノイズや至近距離で乗客が発した声や音なども含まれている。実験時に支障となる可能性があるこれらの音を、標本化周波数 192 kHz、量子化ビット数 24 bit のフォーマットでの編集が可能なデジタル・オーディオ・ワークステーション SADiE PCM8 (Prism Media Products、イギリス) を用いて取り除き、実験用音試料を作成した。

実験室での予備実験 (第 5 章) では、アナウンスと発車ベルの音は取り除かず、そのままとした。駅臨時ホームおよび試験用車両内での実験 (第 6 章) では、アナウンスや発車ベルをハイパーソニック化する効果を検討するために、収録した環境音から突発性ノイズだけでなくアナウンスと発車ベルの音も取り除いた。こうして作成した音試料を〈仮想駅ホーム環境音〉〈仮想車両内環境音〉とした。音試料の長さは実験により異なり、その詳細は第 5～6 章で述べる。

3.3.3. 〈ハイカット・アナウンス／発車ベル〉の作成

アナウンスや発車ベルを含まない〈仮想駅ホーム環境音〉〈仮想車両内環境音〉に付加するアナウンスや発車ベルの音試料を準備するために、実際に使用されている自動アナウンスおよび発車ベルの音源データを入手した。ホームでのアナウンスは男女それぞれの声、車両内のアナウンスは女性の声による。いずれも標本化周波数 44.1 kHz、量子化ビット数 16 bit で記録されていた。したがってこれらのアナウンスおよび発車ベルに含まれている周波数の上限は、22.05 kHz を超えない。

これらの音源を〈仮想駅ホーム環境音〉〈仮想車両内環境音〉と同時に再生するために、標本化周波数 192 kHz、量子化ビット数 24 bit のフォーマットに変換した。フォーマットを変換しても、データに含まれる周波数の上限は 22.05 kHz を超えないままである。これらのアナウンスと発車ベルが、〈仮想駅ホーム環境音〉〈仮想車両内環境音〉と調和して適切なタイミングで再生されるような時間構成を設計し、編集を行った。超高周波成分が含まれていないという意味で、これらを〈ハイカット・アナウンス／発車ベル〉と呼ぶ。〈仮想駅ホーム環境音〉〈仮想車両内環境音〉と〈ハイカット・アナウンス／発車ベル〉とを組み合わせることで再生することによって、駅ホーム音環境／車両内音環境を造成することにした。

3.3.4. 超高周波成分〈ハイパーソニック・シャワー〉の作成

実験に用いる超高周波成分は、ハイパーソニック・エフェクトを発現させた実績を有するものが必要となる。しかも、安全性が高度に保証されたものでなければならない。これらの条件を満たす音試料として、先行研究では、人類の遺伝子を育んだ環境の最有力候補とされる熱帯雨林において高忠実度で録音された自然環境音や、数百年の歴史を有する楽器で演奏された音楽を超広帯域で収録した音素材のなかから、超高周波成分を豊富に含むものを選択して使用している [Oohashi et al., 2000][中村ら, 2003][仁科ら, 2007]。ただし、音楽については人々の嗜好の多様性が著しいので、実在の市街地など不特定多数の人々が往来する環境を想定した実験では、熱帯雨林で収録された自然環境音が使用されている。そこでこの研究でも同じ音源を使用することにした。

市街地への実装例では、鳥の声や虫の音などから構成される熱帯雨林環境音に、シンセサイザーなどによって音楽的演出を加えたコンテンツが開発・使用されている。この研究では、音に対する個人の嗜好の個別性の影響を排除するとともに、騒音レベルが高い駅ホームや車両内に新たに「聴こえる音」を付加することを避けるため、この音素材から可聴域成分を除外した〈ハイパーソニック・シャワー〉と呼ばれる超高周波成分だけを使用することにした。

以上に基づき、ボルネオ島の熱帯雨林で、標準化周波数 5.6448 MHz の高速標準化 1 ビット方式によって録音され、100 kHz を超える帯域までの周波数成分を含むことが確認され、ハイパーソニック・エフェクト発現実績を有する自然環境音録音物を素材とした。これを、標準化周波数 192 kHz、量子化ビット数 24 bit のフォーマットに変換した。カットオフ周波数 24 kHz、減衰傾度 -80dB/oct. のアナログ・ハイパス・フィルタ DV-7FH (エヌエフ回路設計ブロック、神奈川、日本) を用いて可聴域成分を取り除き超高周波成分〈ハイパーソニック・シャワー〉を作成した。

3.3.5. 〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉の作成

鉄道空間に超高周波成分を付加する方法として、前項の〈ハイパーソニック・シャワー〉を再生することに加え、アナウンス、発車ベルといった鉄道空間で使用されている音源に、あらかじめ超高周波成分を付加してこれを再生する手法を考案した。そのため、〈ハイカット・アナウンス／発車ベル〉に、その音圧の時間的変化に相関させ

て〈ハイパーソニック・シャワー〉を付加した音試料を作成した。これらを〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉と呼ぶ。これらの音試料は、駅臨時ホーム、車両内実験で利用した。

3.4. 再生システム

再生システムは、駅ホーム／車両内の音環境をリアリティ高く再現するための音環境造成用システムと、超高周波成分付加呈示用システムとの2系統を準備し、これらを組み合わせて構成した。音環境造成用システムには、多様な音が重畳する大音量の鉄道の環境音を再現可能な解像度と出力、超高周波成分付加呈示用システムには、100 kHz に及ぶ帯域まで再生する良好な特性が求められる。こうした条件を満たす装置を実験空間に応じて選択し、再生システムを構成した。

3.4.1. 実験室内用再生システム

駅ホーム音環境造成用システムとして、100 kHz に及ぶ超広帯域にわたる周波数特性をもち、解像力が高く、ハイパーソニック・エフェクト研究に用いられてきた実績のあるスタジオ用フルレンジ・モニター・スピーカーOohashi Monitor プロトタイプを2台、同レファレンスモデルを2台（いずれも特注、東京、日本）を使用した（図3-6）。レファレンスモデルの最大出力は120dBであり、駅ホームの音環境の再現に十分な出力をもつ。さらに、駅ホームの音環境には車両から発する低域の周波数成分が豊富に含まれていることを考慮し、低音再生用にサブウーファーLS500（NEXO、フランス）を2台用いた。

超高周波成分付加呈示用システムには、再生周波数上限120 kHzとされ、実測ではさらに高い帯域まで良好な特性をもつことが確認されているスーパートゥイーターPT-R9（パイオニア、東京、日本）を4台用いた（図3-7）。

プレイヤーはMR-2000（コルグ、東京、日本）を2台用いた。1台は駅ホーム環境音再生用とし、もう1台は超高周波成分〈ハイパーソニック・シャワー〉再生用とした。

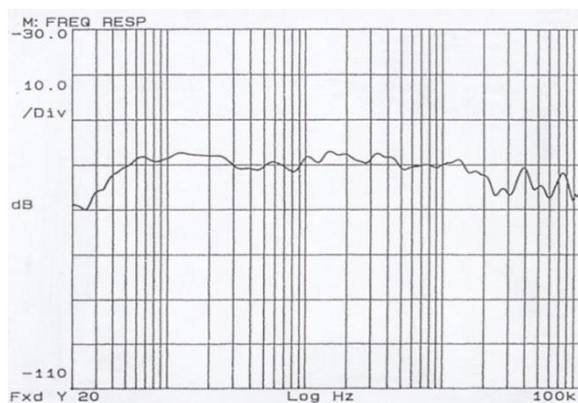
四方八方に発音源がある駅ホームの音環境をリアリティ高く再現するため、実験参加者の前面にプロトタイプを2台、背面により出力の大きなレファレンスモデルを2台配置した。再生システムのブロックダイアグラムを図3-8に示す。



Oohashi Monitor レファレンスモデル



Oohashi Monitor プロトタイプ



Oohashi Monitor レファレンスモデルの特性

図3-6 実験室で用いた駅ホーム音環境造成用システム

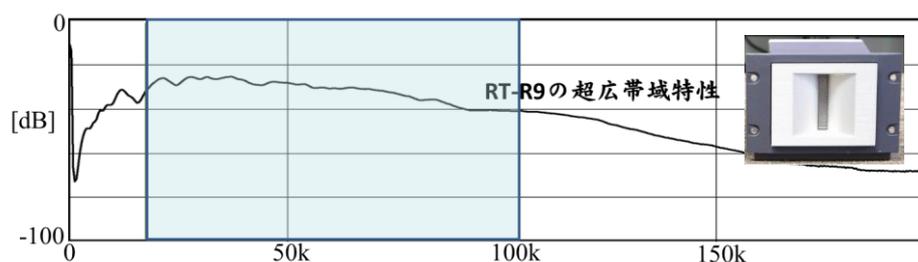


図 3-7 スーパーツイーターPT-R9 の超広帯域特性（実測による）

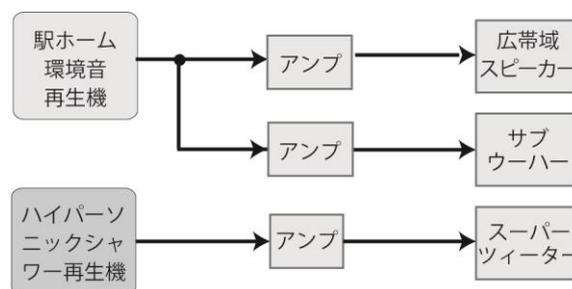


図 3-8 実験室に構成した再生システムのブロックダイアグラム

3.4.2. 駅臨時ホーム用再生システム

駅臨時ホームに設定した実験空間は、半屋外環境であり、スペースも限られているため、実験室で用いたスタジオ仕様の大型モニター・スピーカーを用いることができない。そこで、解像度、出力、再生周波数帯域、大きさ、屋外使用への適合性などを考慮して、システムを再構成した。

駅ホーム音環境造成用には、比較的コンパクト（52cm×32cm×28cm）でありながら最大音圧 127dB SPL と出力が大きく、解像度のすぐれた音再生を特徴とする屋外仕様のコンサート PA 用システム、PS-10（NEXO、フランス）を 4 台と、低域再生

用のサブウーファーARTIST SYSTEM 5000（APOGEE、アメリカ）を4台用いた。これらによって〈仮想駅ホーム環境音〉を再生した。

〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉およびその対照となる〈ハイカット・アナウンス／発車ベル〉の再生には、100 kHzを上回る周波数帯域まで再生可能な小型3ウェイ方式のパワード・スピーカーOohashi Monitor Op.5（特注、東京、日本）を選択した。このモデルは、市街地へのハイパーソニック実装用に開発され、図3-9に示すように超広帯域にわたり良好な特性をもつとともに、屋外での長時間連続運転に耐える堅牢性を備えたアルミ鋳物製全天候型のスピーカーである。これを6台用いた。

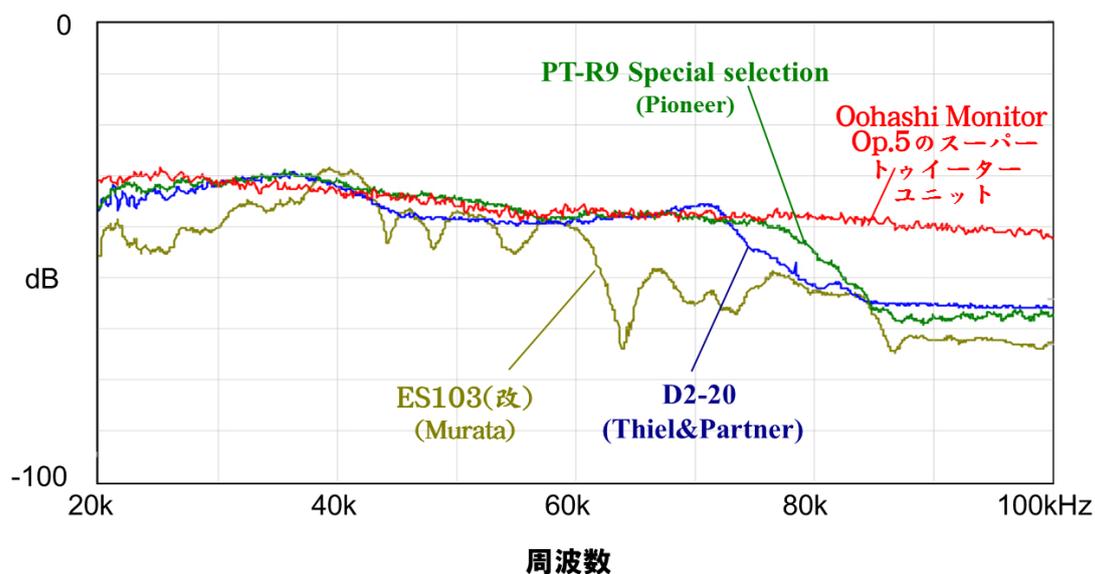


図 3-9 市販スーパートゥイーターと Oohashi Monitor Op.5 スーパートゥイーターユニットとの特性

超高周波成分を付加呈示する〈ハイパーソニック・シャワー〉再生用には、実験室と同様、スーパートゥイーターPT-R9を14台用いた。

音試料はデジタルオーディオワークステーションから再生した。D/Aコンバーターには標本化周波数192 kHz、量子化ビット数24 bitのD/AコンバーターROSETTA800（APOGEE、アメリカ）を用いた（図3-10）。

これらのスピーカーシステムを、ホーム上の実験参加者スペースの外周に実験参加者を取り囲むように配置した。再生システムのブロックダイアグラムを図 3-10 に示す。

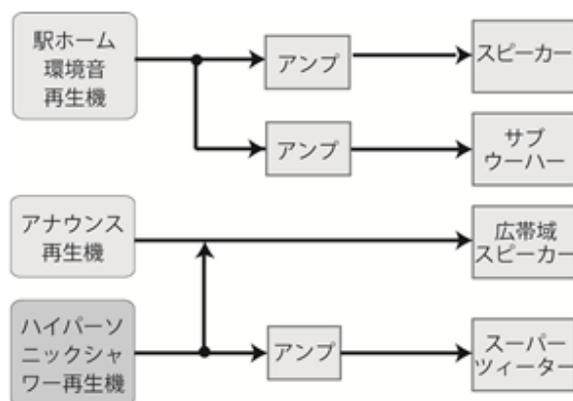


図 3-10 駅臨時ホームに構成した再生システムのブロックダイアグラム

3.4.3. 試験用車両用再生システム

試験車両内用再生システムは、駅臨時ホーム用再生システムをベースとし、実験空間および作成した音試料にあわせて配置と台数を最適化した。その結果、音環境造成用として、PA用スピーカーPS-10を4台とサブウーファーARTIST SYSTEM5000を2台用いて〈仮想車両内環境音〉を再生した。〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉およびその対照となる〈ハイカット・アナウンス／発車ベル〉の再生用にはOohashi Monitor Op.5を2台用いた。超高周波成分を付加呈示する〈ハイパーソニック・シャワー〉用にはスーパートゥイーターPT-R9を8台用いた。

これらのスピーカーシステムを実験参加者を取り囲むように配置した。再生システムのブロックダイアグラムを図 3-11 に示す。

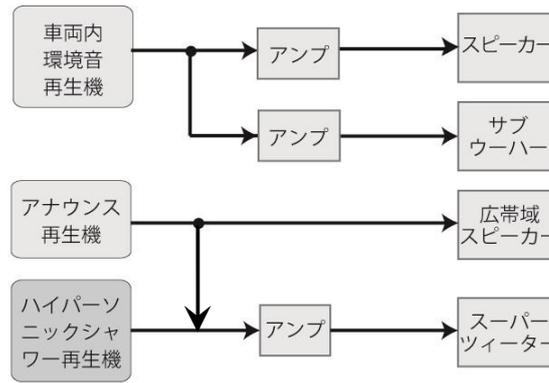


図 3-11 試験用車両内に構成した再生システムのブロックダイアグラム

3.5. 心理学的指標による評価手法

現在の鉄道の音環境に対する印象がどのようなものであるか、そしてそこに超高周波成分を加えた場合に印象の改善がみられるかどうかを明らかにするために、質問紙を用いた主観的印象評価実験を行った。ハイパーソニック・エフェクト研究においては、心理反応の基盤をなす生理反応をとらえることによってブレイクスルーが実現してきた。しかし、この研究では騒音環境の不快感の緩和ないし快適化が重要な課題であるため、まず心理学的指標を用いてその可能性・有効性を検討することとした。

質問項目は、先行研究を参考に、鉄道空間にあわせて設定した[八木ら, 2003][中村ら, 2003][仁科ら, 2007]。アナウンスに関する項目、発車ベルに関する項目、列車の音に関する項目、全体的印象に関する項目で構成した。イヤフォンを使用した実験のみ、イヤフォンから再生される音楽に関する項目を追加した。質問項目は、実験ごとに呈示音にあわせて若干の変更を行った。

実験参加者は、仮想的に再現された駅ホーム／車両内の音環境と、それに超高周波成分を付加した音とを呈示され、呈示直後にそれぞれの音についての印象を、あらかじめ配付された質問紙の評価尺度上に5段階で記入した。得られた結果は、Wilcoxonの符号付順位検定に付した。

3.6. 生理学的指標による評価手法

ハイパーソニック・エフェクトによる基幹脳活性化を評価するには、基幹脳の領域脳血流の変化を計測することがもっとも直接的であることはいうまでもない。しかし、

第2章で述べたように、基幹脳の領域血流量の計測にはポジトロン断層撮像法をはじめとする大型の脳イメージング装置が必要であり、そうした装置を駅ホームや車両内に設置することは不可能である。また、最近普及しつつある近赤外線をもちいた脳血流計測装置 (NIRS) では、大脳皮質領域での血流の状態しか計測することができず、脳深部に所在する基幹脳における血流の状態を計測することはできない。そこでこの研究では、先行研究において基幹脳ネットワークの領域血流量と高い正の相関をもつことが見出されている脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルを現実性のある有効な指標として選択した [Nakamura, 2004]。

脳波の計測と分析は、先行研究において用いられている方法に準拠した [Oohashi et al. 2000]。すなわち、国際 10-20 法に基づく頭皮上 12 電極 (Fp1、Fp2、F7、Fz、F8、C3、C4、T5、Pz、T6、O1、O2) から、耳朶連結を基準電極として自発脳波を導出・記録した (図 3-12)。脳波計は、実験参加者に対する計測時の拘束を最小限にするため、実験参加者と脳波計とを無線でつなぐテレメトリ方式とし、EEG-9100 および WEE-1000 (日本光電、東京、日本)、サイナクト MT-11 (日本電気、東京、日本)、オリジナルに開発されたウェアラブル脳波計を用いた。アーチファクトを含む区間を除外した後、1 秒ずつオーバーラップさせた 2 秒の解析区間について 256 Hz のサンプリング周波数、0.5 Hz の周波数解像度で高速フーリエ変換 (FFT) を行い、電極ごとのパワーを求めた。それから各電極における 10.0–13.0 Hz の帯域成分のパワーの平方根を $\alpha 2$ 帯域脳波の等価電位として算出した。実験参加者間のばらつきを取り除くため、各電極のデータは実験参加者ごとにすべての解析区間、すべての電極、すべての実験条件を通して平均した値でノーマライズした。中心頭頂後頭部の 7 電極 (C3、C4、T5、Pz、T6、O1、O2) から得られたデータを平均し、その値 (脳波 $\alpha 2$ 等価電位) を全実験参加者について平均して (脳波 $\alpha 2$ ポテンシャル) とした。前頭部電極から得られたデータを除外した理由は、開眼状態では、眼球運動によって前頭部に生じる筋電の影響を排除するためである。

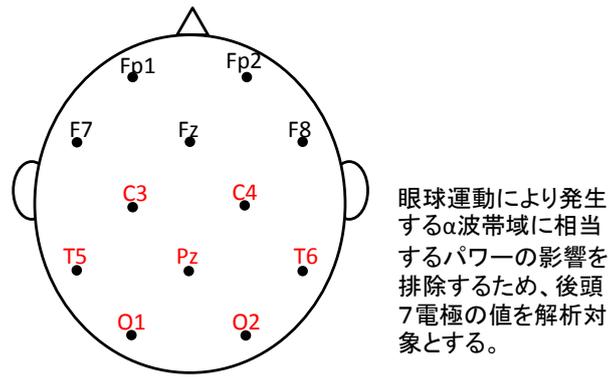


図 3-12 国際 10-20 法に基づく電極位置

実験参加者は、眼を開けた状態でリラックスしてその環境に所在するように指示された。実験手続きについての教示のあと、音呈示のない暗騒音状態で2分間脳波が計測され、これに続く音呈示の間、連続して脳波が記録された。脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルは、対応のあるt検定によって検定した。

3.7. 音呈示順序

造成された駅ホーム/車両内の環境音と、そこに超高周波成分を加えた場合とを比較呈示するために、実験参加者は、まず駅ホーム/車両内の環境音を呈示され、次にそれに超高周波を加えた音を呈示された。このような呈示順序をとった理由は、第2

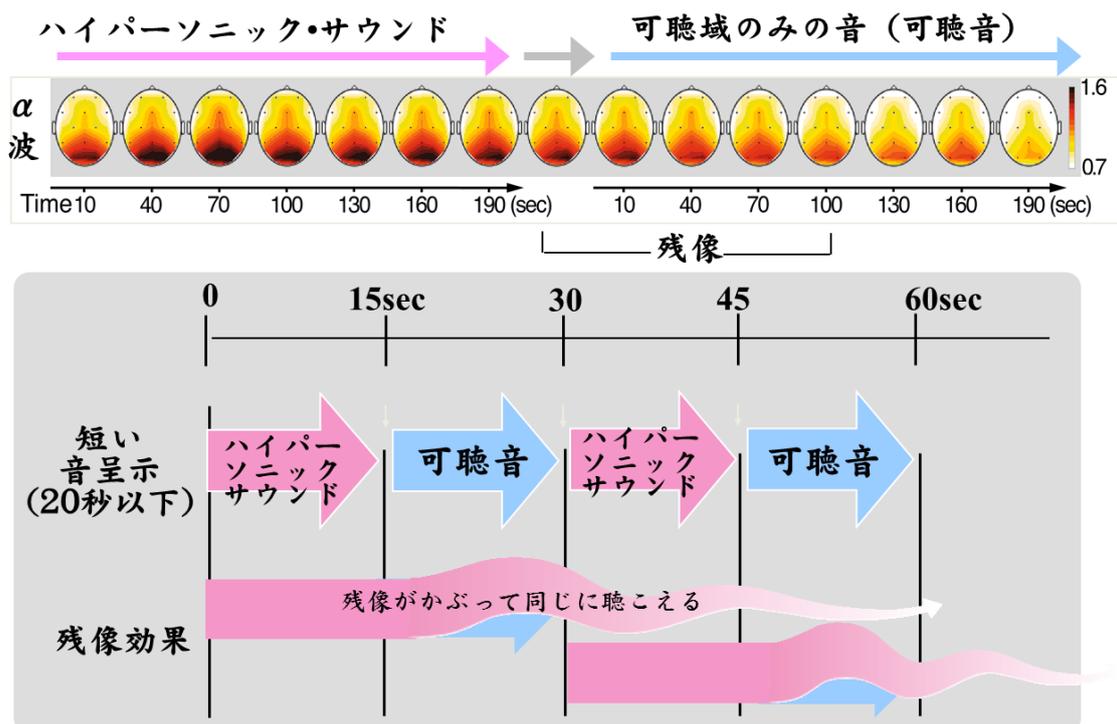


図 3-13 ハイパーソニック・エフェクトの遅延・残留効果 (Oohashi et al., 1991, 2000 より)

章で述べたように超高周波の効果に遅延と残留があることによる。ハイパーソニック・エフェクトによる基幹脳の活性を指標する脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルの増大は、超高周波を含む音の呈示開始から数十秒遅れて現われ、その呈示終了後も 100 秒程度残留することが見出されている [Oohashi et al., 1991, 2000] (図 3-13)。したがって、呈示時間が短い実験において、超高周波を含む音を先に呈示すると、その音に対する反応が、次の超高周波を含まない音の聴取時にまで残留し、前に呈示された音に対する反応と後から呈示された音に対する反応とが分離不能な状態でオーバーラップして、結果が混乱する可能性がこれまでも指摘されている。さらに、認知機能に対する影響は、少なくとも 10 分以上残留することを示唆する報告もあり [鈴木ら, 2012]、その残留影響を避けるために、どの程度のインターバルを取るべきかについてはまだ十分な知見が得られていない。そこで、この残留影響を排除するために、今回の実験では全実験参加者に対して、超高周波成分を含まない音を先に呈示する順序で音呈示を行うこととした。

3.8. 実験参加者

健康で正常な聴力を有する男女延べ 29 名 (男 15 名、女 14 名、年齢 15~70) が実験に参加した。

すべての実験参加者に対して、事前に実験の目的・内容・方法に関する概要の説明を行い、実験参加者となることについて書面で同意を得た。実験は、国立精神・神経医療研究センター倫理委員会の承認を得て、ヒトを対象とする医学研究に関わる倫理的原則であるヘルシンキ宣言に規定された倫理基準に従って実施した。ただし実験の具体的目的や実験条件の詳細については、実験参加者は一切知らされなかった。

なお、脳波計測は、経験のない実験参加者にとっては緊張やストレスを与えることになり、その影響が呈示音の効果を上回るおそれがあるため、実験参加者は脳波計測の経験のある者を優先して選択した。そのため、実験参加者によってはこの研究のなかの複数の実験に参加している。複数の実験に参加することが結果に影響を及ぼすかどうかについては、実験のなかで検討することとした。

第4章 鉄道空間の音環境の物理構造

4.1. 駅ホームの音環境の物理構造

第3章で述べたシステムを用いて、複数の駅ホームの環境音の等価騒音レベルの計測と、超広帯域環境音収録による周波数パワースペクトルの分析を行った。

4.1.1. 騒音レベルの計測

東京都内で計測した複数の駅ホーム環境音のなかから、規模と特徴の異なる3駅のホームの計測結果を示す。ホーム数が1本で利用客もそれほど多くないため基本的な駅ホーム環境音の特性が把握しやすいと考えられるA駅、A駅に隣接し複数のホームが並列し多数の利用客が存在するC駅、そして、それらの中間的な規模にあたるB駅である。

ホームに電車が停車しておらずアナウンスもない状態（これを「背景音」と呼ぶ）の騒音レベルは、A駅ではおよそ66~70 $dB_{L_{Aeq}}$ 、B駅ではおよそ71~79 $dB_{L_{Aeq}}$ 、C駅ではおよそ80~83 $dB_{L_{Aeq}}$ だった。アナウンスや発車ベル、電車の到着などによって騒音レベルが上がり、スピーカー付近では、A駅では最高で88 $dB_{L_{Aeq}}$ 、B駅では90 $dB_{L_{Aeq}}$ 、C駅では98 $dB_{L_{Aeq}}$ を記録した（表4-1）。

表4-1 駅ホームの環境音の等価騒音レベル

	電車なし		電車停車中		一日当たり乗降人員	ホーム数
	アナウンス・発車ベルなし(背景音)	自動アナウンス中	自動アナウンス中	発車ベル中		
A駅ホーム	66~70	85~86	83~87	88前後	約5万人	1面2線
B駅ホーム1	71~77	85~87	87~89	89~90	約85万人	3面6線
B駅ホーム2	73~79	83前後	86前後	83~86	約85万人	3面6線
C駅ホーム	80~83	88~90	87前後	95~98	約153万人	8面16線

単位： $dB_{L_{Aeq}}$

4.1.2. 駅ホーム環境音の超高帯域収録と分析結果

収録した環境音の周波数スペクトルを、FFT アナライザーCF5220 を用いて分析した（図 4-1）。駅ホーム環境音の周波数分布は、20 kHz 以下の帯域、特に 10 kHz 以下の帯域にエネルギーが集中している一方で、周波数の上限は時として 40 kHz 程度まで及ぶことが見出された。また、電車の発着に伴って鋭いスペクトルピークが可聴域・超可聴域に渡って出現するという質的な変動もみられた。

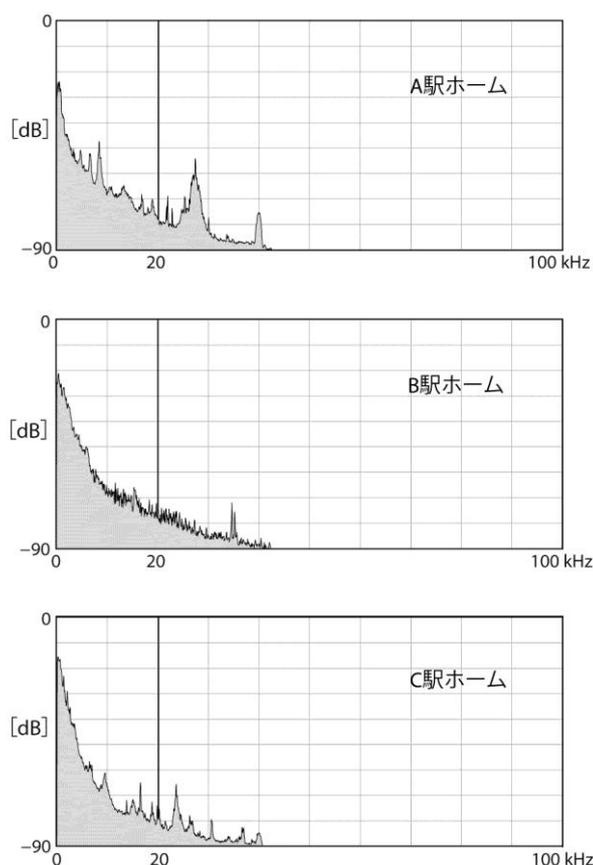
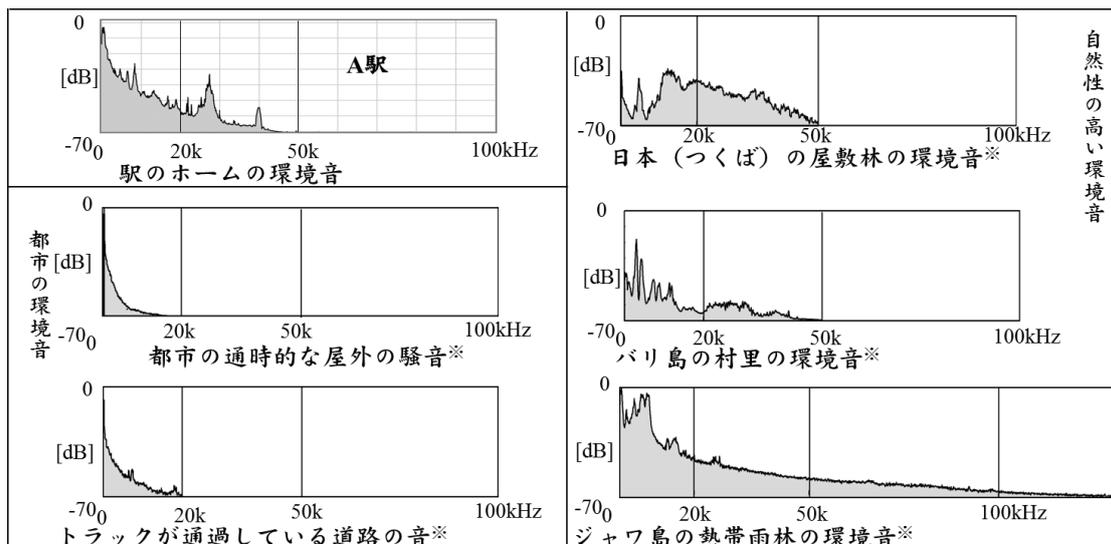


図 4-1 駅ホームの環境音の例（180 秒間の周波数パワースペクトル）

4.1.3. 考察

ここで見出された駅ホームの環境音の周波数パワースペクトルを、先行研究【大橋, 2003】によって明らかにされている都市環境音、自然性の高い熱帯雨林環境音の周波数パワースペクトルと比較検討した（図 4-2）。



(※は大橋,2003 から引用)

図 4-2 駅ホーム環境音とその他の環境音との比較

これまでに、都市化が進行している市街地環境音では可聴帯域である 20 kHz 以下の帯域へのエネルギーの集中がみられる一方、自然性の高い熱帯雨林環境音には 20 kHz を大幅に上回り、熱帯雨林では時として 100 kHz に及ぶ高周波成分が含まれるという、周波数分布上の特徴が指摘されている[大橋、2003]。駅ホームの環境音では、20 kHz 以下の可聴域、特に 10 kHz 以下の帯域にエネルギーが集中している。また、可聴域をこえる高周波成分の存在状態は、市街地環境音に比べるとより広い周波数帯域に及ぶものの、熱帯雨林環境音のそれには及ばない。そして、可聴域を上回る帯域で鋭いスペクトルピークが観察された。自然性の高い環境音ではこうしたスペクトルピークはあまりみられないことは注目される。

先行研究における駅前で行われた環境音の計測では、ほとんどのエネルギーが 20 kHz 以下に集中しているという結果が報告されており[蘆原、2009]、この研究で計測・分析した電車の発着がない状態での駅ホームの環境音分析結果と整合している。また、駅前環境音では 15 kHz を超える帯域における顕著なスペクトルピークが観察されたとも報告されており、このピークは電車の発着によって生じている可能性が考えられる。

4.2. 車両内の音環境の物理構造の把握

駅ホーム環境音計測と同様のシステムを用いて、車両内環境音の等価騒音レベルの計測と、超広帯域環境音収録による周波数パワースペクトルの分析を行った。計測・収録は、東京都内を走行する普通列車で行った。

4.2.1. 騒音レベルの計測

走行する列車内で等価騒音レベルを計測した。計測は、一般的な普通車両内の中央付近で、アナウンスが再生されるスピーカーの近傍で行った。計測結果を表 4-2 に示す。

今回計測した結果では、アナウンスがない状態（これを「背景音」と呼ぶ）の騒音レベルは 71～83 $\text{dB}L_{\text{Aeq}}$ 、アナウンス中は 80～91 $\text{dB}L_{\text{Aeq}}$ 程度だった（表 4-2）。

表 4-2 車両内環境音の等価騒音レベル

収録地点 \ 状況	走行中		
	アナウンスなし (背景音)	自動アナウンス (日本語) 中	自動アナウンス (英語) 中
A	71～79	80～83	81～85
B	77～83	85～87	90～91

単位： $\text{dB}L_{\text{Aeq}}$

4.2.2. 車両内環境音の超広帯域収録と分析結果

分析の結果、いずれの車両内環境音でも、環境音の周波数分布は低い帯域に集中しており、環境音に含まれている周波数の上限は 50 kHz を超えなかった（図 4-3）。また、アナウンス音の周波数上限は 7 kHz 程度であること、列車のすれ違い時には 7 kHz～20 kHz を上回る帯域の音が列車内に存在していることなどが見出された。

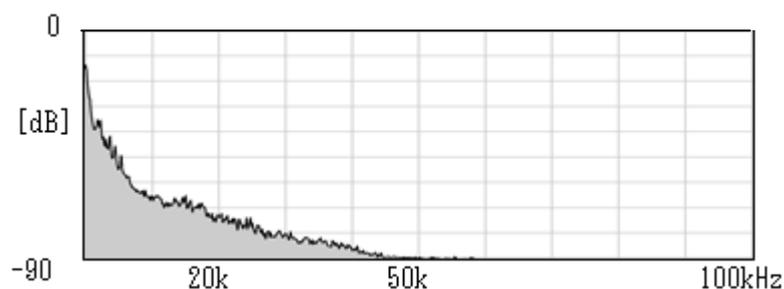


図 4-3 走行中の車両内環境音の例（180 秒間の周波数パワースペクトル）

4.2.3. 考察

まず、車両内環境音の騒音レベルを駅ホーム環境音と比較検討した（図 4-4）。駅ホーム背景音の騒音レベルは、ホームが一本しかない駅では 66～70 $\text{dB}L_{\text{Aeq}}$ 程度、ホームが多数の駅では 80～83 $\text{dB}L_{\text{Aeq}}$ 程度という結果が得られている。今回計測された車両内の背景音の騒音レベル 71～83 $\text{dB}L_{\text{Aeq}}$ の上限は、ホームが多数の駅のホームの背景音の騒音レベルに近い。車両内のアナウンス中の騒音レベルは 80～91 $\text{dB}L_{\text{Aeq}}$ 程度であり、中間的規模の B 駅ホームで計測された騒音レベルの最高値（90 $\text{dB}L_{\text{Aeq}}$ ）に匹敵するレベルであることがわかった。

次に、車両内環境音の周波数パワースペクトルを、駅ホーム環境音、先行研究により明らかにされている都市環境音、熱帯雨林環境音の周波数パワースペクトルと比較検討した。駅ホームの環境音にみられた 20 kHz 以下の可聴帯域、特に低周波領域にパワーが集中し、超高周波成分の分布状況は市街地環境音に比べるとより広い周波数帯域に及ぶものの、熱帯雨林環境音には及ばないという特徴は、車両内環境音にも共通している（図 4-4）。

	騒音レベル	周波数パワースペクトル
駅ホーム 環境音	背景音(電車停車なし 66~83dB _{L_{Aeq}} アナウンス発車ベルなし) 電車停車中 83~98dB _{L_{Aeq}} (アナウンス発車ベルあり)	<p>A 駅ホーム</p>
走行中の 車両内 環境音	アナウンスなし 71~83dB _{L_{Aeq}} アナウンス中 80~91dB _{L_{Aeq}}	<p>在来線車両内</p>
市街地 環境音	【参考】 東京都環境基準 70dB(A) (幹線道路近接空間、昼間) 東京都建設工事規制基準85dB(A) (特定建設作業)	<p>東京都中野区</p>
自然性の 高い 環境音	低くて50dB _{L_{Aeq}} 前後 高い場合には70dB _{L_{Aeq}} をこえ 80dB _{L_{Aeq}} をこえることもある ¹⁾	<p>ボルネオ熱帯雨林</p>

図 4-4 鉄道空間の環境音と市街地環境音、自然性の高い環境音の周波数パワースペクトル

第5章 駅ホーム環境音を用いた予備的検討

この章では、ハイパーソニック・エフェクトを応用して鉄道騒音環境における不快感の低減ないし快適化を図るというこの研究の作業仮説の妥当性を予備的に検討するため、実験室内に仮想的に駅ホームの音環境を再現して行った実験について述べる。

5.1. 実験空間および呈示条件

実験は、生理実験用に整備された専用実験室（幅 5.7m×奥行 10.8m×天井高 2.9m）で行った。実験室の残響時間は約 0.23 秒、暗騒音レベルは 39dB L_{Aeq} である。

収録した駅ホーム環境音の音素材のなかで、もっとも高い等価騒音レベルを記録した C 駅のホーム環境音収録物を編集して、〈仮想駅ホーム環境音〉を作成した。C 駅はターミナル駅の一つで、多数のホームが並列し、列車の発着が錯綜し、ホーム環境音には複数のアナウンスや発車ベルが重畳する。呈示する音試料の長さは、先行研究においておよそ 200 秒の音試料が用いられていることを参考に、180 秒（3 分）間とした [Oohashi et al,2000]。

〈仮想駅ホーム環境音〉だけを呈示する条件を【コントロール条件】とし、そこに〈ハイパーソニック・シャワー〉を加える条件を【ハイパーソニック・シャワー条件】と名付けた（表 5-1）。

表 5-1 実験室内実験における呈示条件と音試料の構成

呈示条件	音試料構成要素	
コントロール条件	仮想駅ホーム環境音 [※]	—
ハイパーソニック・シャワー条件	仮想駅ホーム環境音 [※]	ハイパーソニック・シャワー

※仮想駅ホーム環境音はアナウンス、発車ベルを含む

〈仮想駅ホーム環境音〉の電気信号の周波数パワースペクトル、および、その再生音を実験時の実験参加者の聴取位置にマイクロフォンを置いて計測した周波数パワースペクトルを、図 5-1 に示す。再生音量は、実験参加者が最初に耳にする大音量の発車ベルについて、駅ホームと実験室内での騒音レベルが一致するように調整した。その結果、実験参加者位置で計測した呈示音 3 分間の等価騒音レベルは 78dB L_{Aeq} となった。両者のスペクトル形状はよく一致し、周波数分布として忠実度の高い再生が実

現していることが確認された。聴感的にも、目を閉じれば駅ホームにいるのと同じ様に感じられる高臨場感の音環境が実現したと判断した。

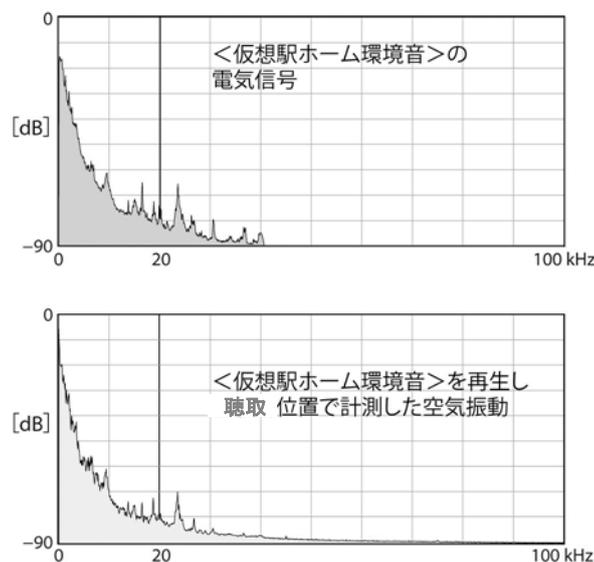


図 5-1 実験室内実験の呈示音の周波数パワースペクトル

<仮想駅ホーム環境音>だけを再生する【コントロール条件】場合と、<仮想駅ホーム環境音>に<ハイパーソニック・シャワー>を加えて再生する【ハイパーソニック・シャワー条件】それぞれの呈示音を、実験参加者の聴取位置にマイクロフォンを置いて計測した周波数パワースペクトルを図 5-2 に示す。【ハイパーソニック・シャワー条件】では 80 kHz を超え 90 kHz に及ぶ超高周波成分が実験参加者に到達することが確認された。また、<ハイパーソニック・シャワー>を加えても、騒音レベルや、10 kHz 以下の低域の周波数スペクトルにほとんど影響が生じないことを確認した。

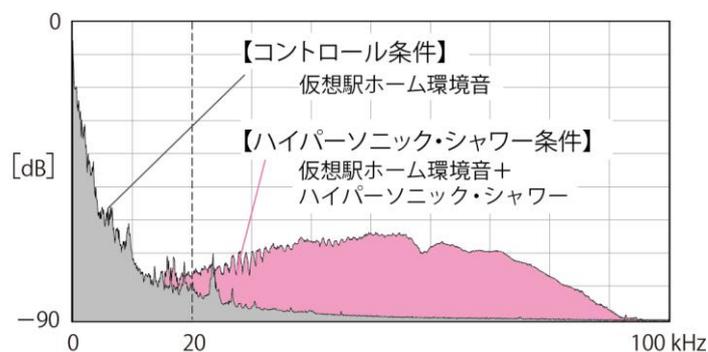


図 5-2 実験室内実験の呈示音の実験参加者の聴取位置で計測した周波数パワースペクトル

5.2. 心理学的指標による評価実験

5.2.1. 概要

〈仮想駅ホーム環境音〉だけを呈示した場合の心理的印象、すなわち現在の駅ホームに近似した音環境に対する印象がどのようなものであるか、そして、そこに〈ハイパーソニック・シャワー〉を加えた場合にその印象に何らかの変化や改善がみられるかどうかを明らかにするために、質問紙を用いた主観的印象評価実験を行った。第3章で述べたように、質問紙は、先行研究を参考に、20の評価語対による評価項目で構成した。アナウンスに関するもの8項目、発車ベルに関するもの5項目、列車の音に関するもの2項目、全体的印象に関するもの5項目である（表5-2）。

表 5-2 実験室内実験で用いた評価語対

アナウンスについて	
男性アナウンスがうるさい	- 男性アナウンスがうるさくない
男性アナウンスの言葉が聞き取りにくい	- 男性アナウンスの言葉が聞き取りやすい
男性アナウンスがよい声に聞こえない	- 男性アナウンスがよい声に聞こえる
女性アナウンスがうるさい	- 女性アナウンスがうるさくない
女性アナウンスの言葉が聞き取りにくい	- 女性アナウンスの言葉が聞き取りやすい
女性アナウンスがよい声に聞こえない	- 女性アナウンスがよい声に聞こえる
アナウンスに冷たく機械的なものを感じる	- アナウンスにぬくもりと人間味を感じる
アナウンスの音が混沌としている	- アナウンスの音が分離して聞こえる
発車ベルについて	
発車ベルがうるさい	- 発車ベルがうるさくない
発車ベルの音が悪い	- 発車ベルの音がよい
発車ベルの作曲が悪い	- 発車ベルの作曲がよい
発車ベルの楽器が悪い	- 発車ベルの楽器がよい
発車ベルの演奏が悪い	- 発車ベルの演奏がよい
列車の音について	
列車の音がうるさい	- 列車の音がうるさくない
列車の音がとにかく不快	- 列車の音が意外に快感
全体として	
音が騒々しい	- 音が騒々しくない
雰囲気が不快	- 雰囲気が不快でない
音が濁っていた	- 音が澄んでいた
疲れた	- 疲れなかった
長くはいたたまれない	- ある程度我慢できる

実験参加者は健康で正常な聴力を有する学生および社会人 10 名（男性 5 名、女性 5 名、年齢 21～61 歳）である。

実験参加者は実験空間内の椅子にリラックスして座るよう指示され、先に【コントロール条件】、次に【ハイパーソニック・シャワー条件】の音を呈示された。呈示時間はそれぞれ 180 秒（3 分）間である。実験参加者は、それぞれの音についての印象をあらかじめ配付された質問紙の評価尺度上に 5 段階で記入した。ふたつの音呈示の間には、質問紙記入のため約 30 秒のインターバルをとった。

5.2.2. 結果

【コントロール条件】の音すなわち現在の駅ホーム環境音に対する評点について、中点 0 との差を Wilcoxon の符号付順位検定によって検討した。その結果、20 の評価項目のうち 12 項目（図 5-3 左側に太字で表示）において、現在の駅ホーム環境音は実験参加者にネガティブな印象を与えていることが統計的有意に見出された。すなわち、駅ホーム環境音は、全体として「音が騒々しい」「雰囲気が不快」「音が濁っていた」「疲れた」「長くはいたたまれない」という印象を与え、男性アナウンスが「うるさい」「言葉が聞き取りにくい」「いい声に聴こえない」、発車ベルが「うるさい」「音が悪い」、列車の音が「うるさい」「とにかく不快」と有意に感じられていた。

一方、【ハイパーソニック・シャワー条件】の音に対して有意にネガティブな項目は、「疲れた」の 1 項目だけ（図 5-3 左側に下線付で表示）で、逆に有意にポジティブという評価が「女性アナウンスの言葉が聞き取りやすい」という 1 項目で得られた（図 5-3 右側に太字で表示）。

【コントロール条件】と【ハイパーソニック・シャワー条件】というふたつの条件間の印象の差に統計的有意性が認められた項目は、図 5-3 のグラフに「*」（ $p<0.05$ ）または「**」（ $p<0.01$ ）で示した 11 項目であった。そのうち 8 項目は【コントロール条件】で有意にネガティブな印象が認められたものである。ハイパーソニック・シャワーを駅ホーム環境音に付加すると、それが付加されない場合を感じられていた、全体として音が「騒々しい」「雰囲気が不快」「長くはいたたまれない」という印象が緩和され、同じく、男性アナウンスが「うるさい」「いい声に聴こえない」、発車ベルが「うるさい」、列車の音が「うるさい」、「とにかく不快」といった項目で印象がより

ポジティブな方向に改善されることが統計的に有意に見出された。そのほかにも、女性アナウンスが「うるさくない」「いい声に聴こえる」「アナウンスにぬくもりと人間味を感じる」という方向への改善が有意に見られた。以上の結果は、超高周波成分を付加することによって、駅ホーム音環境に対する不快感が緩和され、快適化されることを示している。

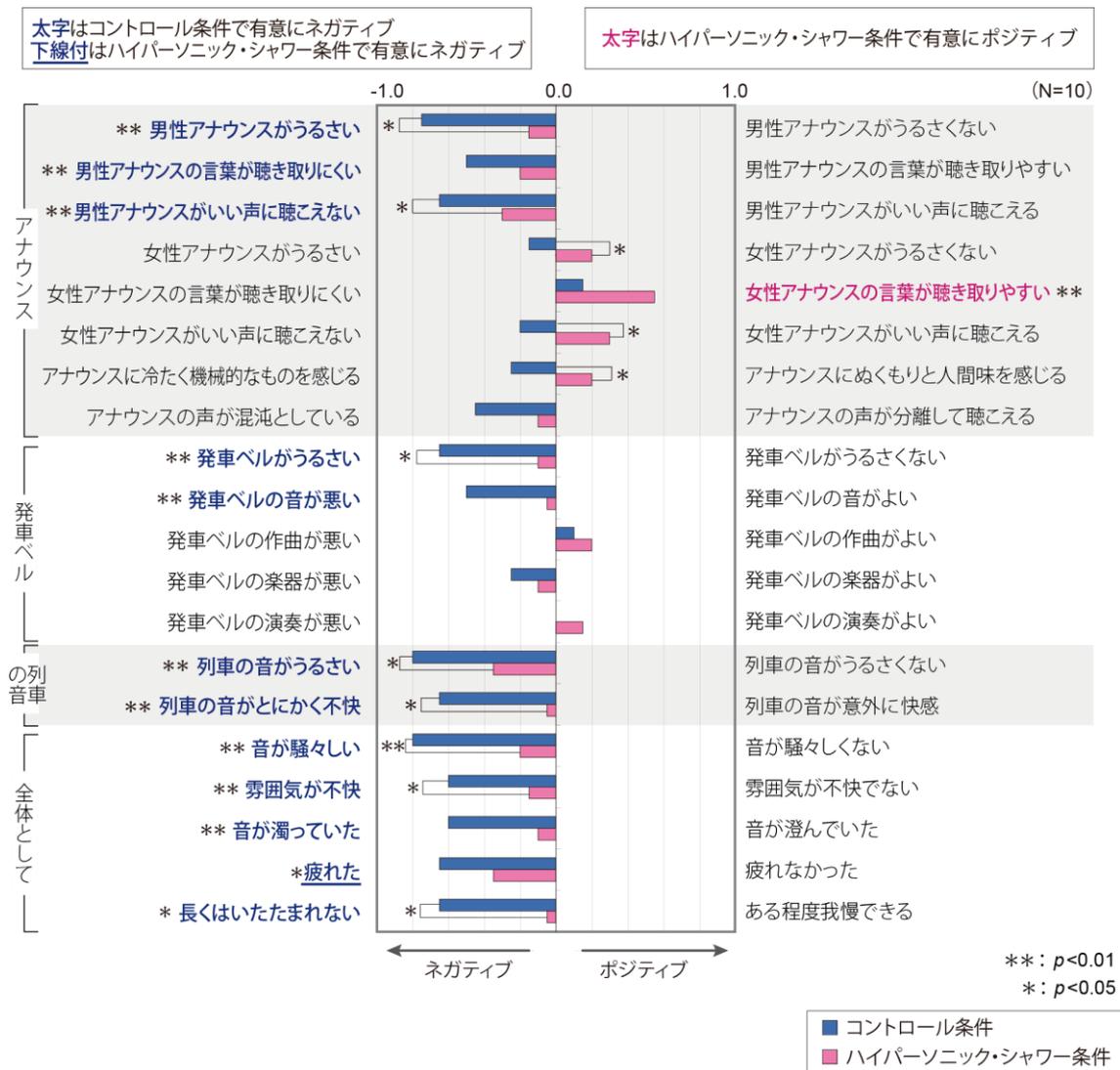


図 5-3 実験室内心理実験における超高周波成分付加による音環境印象改善効果

5.3. 生理学的指標による評価実験

5.3.1. 概要

心理学的指標による評価実験により、超高周波成分を付加呈示することによって駅ホーム音環境の印象が改善・快適化されることが有意に示された。この反応は、ハイパーソニック・エフェクトによる基幹脳活性化を反映している可能性がある。そこでこのことを確認するために、この実験室内において、脳波 α_2 ポテンシャルという生理学的指標を用いた評価実験を行った。実験参加者は健康で正常な聴力を有する10名（男性7名、女性3名、年齢15～70歳）である。実験参加者は、実験空間内の椅子に開眼状態でリラックスして座るよう指示された。呈示音、呈示音の音圧レベル、呈示時間及び呈示順序は、5.2で述べた心理学的指標による実験と同様とし、180秒（3分）間の音試料を用いて、先に【コントロール条件】を呈示し、次に【ハイパーソニック・シャワー条件】を呈示した。

5.3.2. 結果

【ハイパーソニック・シャワー条件】では【コントロール条件】に比べて脳波 α_2 ポテンシャルが高い有意性のもとに増大することが見出された（ $p < 0.005$ ）（図5-4）。このことは、実験参加者の基幹脳活性が高まってハイパーソニック・エフェクトが発現したことを示唆している。

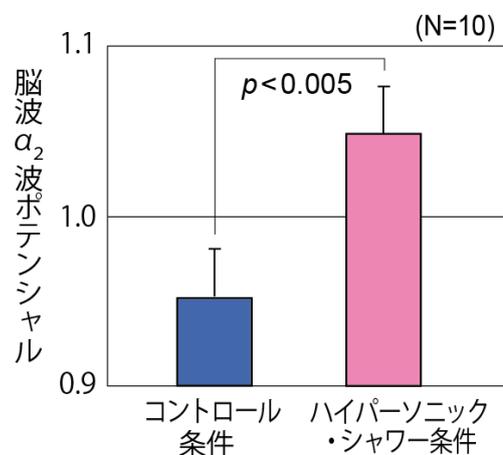


図5-4 実験室内生理実験における超高周波成分による脳波 α_2 ポテンシャルの増大

5.4. 考察

以上の検討により、実験室内に造成した〈仮想駅ホーム環境音〉は実験参加者に不快な印象を与えていること、そこに〈ハイパーソニック・シャワー〉を付加呈示することによって、音環境に対する不快感が緩和されるとともに、基幹脳活性の賦活を示す脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルが増強されることが、いずれも統計的有意に見出された。これらにより、知覚限界を超える高周波（超高周波）を鉄道空間に付加してハイパーソニック・エフェクトを発現させ、同一の可聴音をより快適に知覚させることによって、鉄道の騒音環境改善に寄与できるのではないかというこの研究の作業仮説について、支持材料が得られたと判断した。

第6章 鉄道空間の音環境への超高周波成分の付加呈示が及ぼす影響 の検討

この章では、実在の鉄道空間により近い駅臨時ホーム上および試験用車両内で行った一連の実験について述べる。

6.1. 駅ホーム環境音への超高周波成分付加呈示が及ぼす影響の検討～

【フル・ハイパーソニック条件】の効果の検討

実際に列車の発着に使用され利用者が所在しているホームで生理学・心理学的指標をもちいた評価実験を実施しようとする、利用者対応が困難である上、視聴覚情報環境が時々刻々と変化し、比較対照実験に必要不可欠な視聴覚情報環境の再現性が得られない。そこで、次善の実験実施環境として、駅構内にありながら列車の発着が行われていないホームを使用できないかどうかを検討した。その結果、東京都内のターミナルD駅の臨時列車用ホーム（以下、「臨時ホーム」とする）に列車が入線せず利用者が所在しない時間帯があり、そこを実験に使用するという設定が可能になった。

呈示音以外の要素によってネガティブな情動反応が導かれないように制御されている実験室に比べて、駅ホームには快適感を低下させる要因が多いと想定される。そこで、超高周波成分をより強く呈示することとし、〈ハイパーソニック・シャワー〉だけでなく、アナウンスや発車ベルの音にあらかじめ〈ハイパーソニック・シャワー〉をミックスした〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉も用いることにした。これらによって、駅ホーム環境音に超高周波成分を加える効果を、心理学的指標によって検討した。

6.1.1. 実験空間及び呈示条件

D駅の臨時ホーム上の構造物や柱で区切られた一角（6.4m×3.1m）を実験参加者が所在する実験空間とした。これと至近距離の臨時ホーム上に、音の送出や脳波記録装置を設置する実験者スペースを設定した。実験空間に所在している構造物を利用することによって、実験者スペースが実験参加者の視野に入らない設定が可能となった（図6-1）。列車の進入がないときのこの空間の暗騒音レベルは62dB L_{Aeq} だった。



図 6-1 駅臨時ホーム上の実験参加者スペースと実験者スペース

列車が実際には入線しない時間帯にこの臨時ホーム上でハイパーソニック・エフェクト応用効果を検証する実験を行うためには、列車入線時の環境音をできるだけ忠実に再現する新たな〈仮想駅ホーム環境音〉を構成する必要がある。そのために、D 駅の別のホームにおいて、列車が頻繁に発着する平日夕方方の環境音を超広帯域で収録した。収録した環境音から、突発性ノイズや至近距離で発生した音、アナウンスと発車ベルの音を取り除いて〈仮想駅ホーム環境音〉を作成した。音試料の長さは実験室内実験と同じ 180 秒（3 分）間とした。

D 駅で実際に使用されている男性・女性の声による自動アナウンス、および発車ベルの音源データ（44.1 kHz 標本化 16 bit 量子化フォーマットで記録）を入手し、〈ハイカット・アナウンス／発車ベル〉を作成した。この〈ハイカット・アナウンス／発車ベル〉の音圧の時間的変化に相関させて〈ハイパーソニック・シャワー〉を付加して、〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉を作成した。

〈仮想駅ホーム環境音〉と〈ハイカット・アナウンス／発車ベル〉を組み合わせることで再生することによって D 駅ホームの音環境を再現し、これを【コントロール条件】とした。〈仮想駅ホーム環境音〉〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉〈ハイパー

ソニック・シャワー〉をともに再生する条件を、【フル・ハイパーソニック条件】と名付けた（表 6-1）。

表 6-1 駅臨時ホーム実験における呈示条件と音試料の構成

呈示条件	音試料構成要素		
コントロール条件	仮想駅ホーム環境音	ハイカット・アナウンス ハイカット・発車ベル	—
フル・ハイパーソニック条件	仮想駅ホーム環境音	ハイパーソニック・アナウンス ハイパーソニック・発車ベル	ハイパーソニック・シャワー

これらの音試料を再生する再生システムを、図 6-2 のように、実験参加者スペースの外周に実験参加者を取り囲むように配置した。

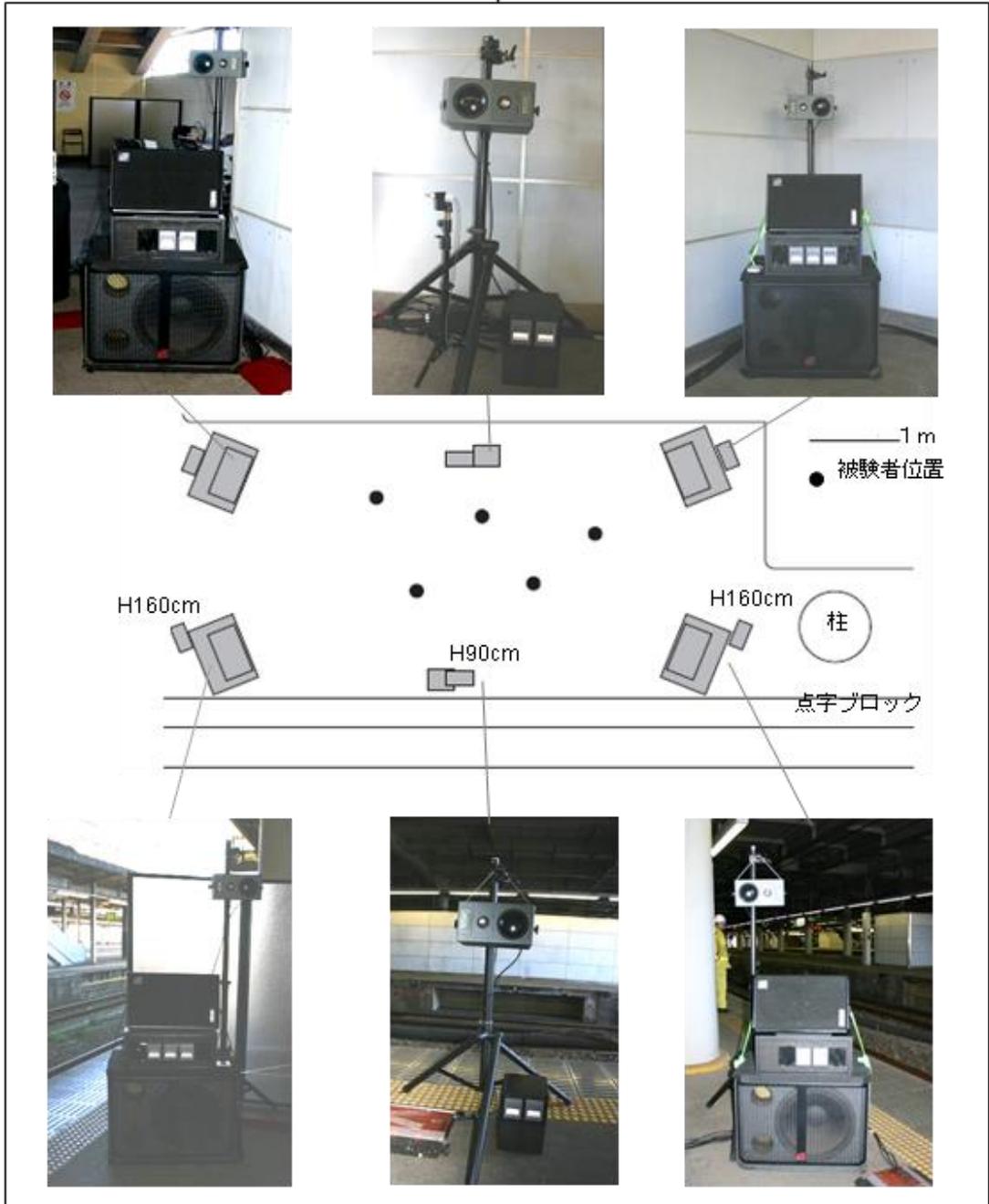


図 6-2 駅臨時ホーム実験の再生システム配置

〈仮想駅ホーム環境音〉に〈ハイカット・アナウンス／発車ベル〉を加えた呈示音の電気信号の周波数パワースペクトル、および、その再生音を実験時の実験参加者の聴取位置にマイクロフォンを置いて計測した周波数パワースペクトルを図 6-3 に示す。実験参加者位置で計測した呈示音の3分間の等価騒音レベルは 81dB L_{Aeq} である。両者のスペクトル形状は近似し、周波数分布として忠実度の高い再生が実現していることを確認した。聴感的にも、列車の入線こそないものの、実際に乗降するホームで列車を待つ状態に近似した音環境が造成されたと判断した。

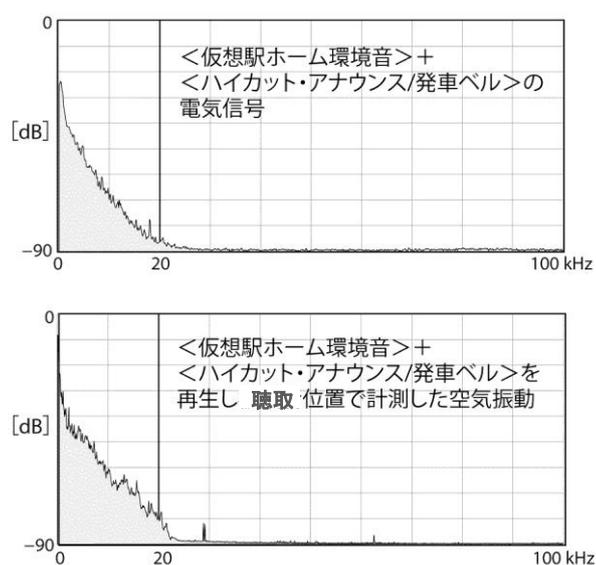


図 6-3 駅臨時ホーム実験の呈示音の周波数パワースペクトル

〈仮想駅ホーム環境音〉 + 〈ハイカット・アナウンス／発車ベル〉を再生する【コントロール条件】と、〈仮想駅ホーム環境音〉 + 〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉 + 〈ハイパーソニック・シャワー〉を再生する【フル・ハイパーソニック条件】それぞれの再生音について、実験時の実験参加者の聴取位置にマイクロフォンを置いて計測した周波数パワースペクトルを図 6-4 に示す。【フル・ハイパーソニック条件】のとき、実験参加者に到達している周波数成分の上限は 80 kHz に及ぶことが確認された。

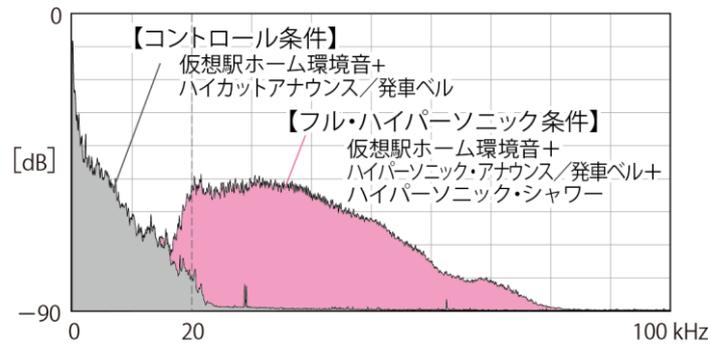


図 6-4 駅臨時ホーム実験の呈示音の
実験参加者の聴取位置で計測した周波数パワースペクトル

6.1.2. 心理学的指標による評価実験

6.1.2.1. 概要

音試料の内容にあわせて実験室内実験で使用した質問紙の評価項目を見直し、男女別アナウンスについての質問項目を一括した。その結果、質問紙は、アナウンスに関するもの 5 項目、発車ベルに関するもの 2 項目、列車の音に関するもの 2 項目、全体の印象に関するもの 5 項目の、全 14 項目で構成した（表 6-2）。

表 6-2 駅臨時ホーム実験で用いた評価語対

アナウンスについて	
アナウンスがうるさい	- アナウンスがうるさくない
アナウンスの言葉が聞き取りにくい	- アナウンスの言葉が聞き取りやすい
アナウンスの声が悪い	- アナウンスの声がよい
男女のアナウンスが混じり合って聞きわけにくい	- 男女のアナウンスが分離して聞きわけやすい
アナウンスが不快	- アナウンスが快適
発車ベルについて	
発車ベルがうるさい	- 発車ベルがうるさくない
発車ベルの音が悪い	- 発車ベルの音がよい
列車の音について	
列車の音がうるさい	- 列車の音がうるさくない
列車の音がとにかく不快	- 列車の音が意外に快感
全体として	
頭にくるほどひどい音だ	頭にくるほどひどい音ではない
雰囲気が不快	- 雰囲気が不快でない
音が濁っていた	- 音が澄んでいた
いらつく	- いらつかない
長くはいたたまれない	- ある程度我慢できる

実験参加者は健康で正常な聴力を有する学生及び社会人 14 名（男性 7 名、女性 7 名、年齢 16～57 歳）である。

実験参加者は、ホームで電車を待っているときと同様に、実験空間内で立った状態で音を聴取した。先に【コントロール条件】、次に【フル・ハイパーソニック条件】の音が呈示された。呈示時間はそれぞれ 180 秒間である。実験参加者は、それぞれの音についての印象を、あらかじめ配付された質問紙の評価尺度上に 5 段階で記入した。ふたつの条件の間には、質問紙記入のため約 30 秒間のインターバルをとった。

6.1.2.2. 結果

【コントロール条件】の音と比較して【フル・ハイパーソニック条件】の音は、すべての項目においてより好感度の高い印象を与える傾向が見出された。

ふたつの条件の各評価項目の評点と中点 0 との差について、Wilcoxon の符号付順位検定により検討した。【コントロール条件】すなわち現在のホーム環境音に対する印象は、14 の評価項目のうち 6 項目において有意にネガティブな印象を与えていた。すなわち、現状のホーム環境音は、「アナウンスがうるさい」、「発車ベルがうるさい」、列車の音が「うるさい」「とにかく不快」、全体として「雰囲気不快」「音が濁っていた」と感じられている。

一方、これに〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉と〈ハイパーソニック・シャワー〉を付加した【フル・ハイパーソニック条件】では、「アナウンスの言葉が聴き取りやすい」「男女のアナウンスが分離して聴き分けやすい」「発車ベルの音がよい」「頭にくるほどひどい音ではない」という 4 項目においてポジティブな印象を与えている。ふたつの条件間の印象の差に統計的有意性が認められた項目は図 6-5 のグラフに「*」または「**」で表示した 7 項目で、【コントロール条件】でネガティブな評価だった「アナウンスがうるさい」「発車ベルがうるさい」「雰囲気が不快」「音が濁っていた」という不快な印象が有意に緩和され、アナウンスの分離と快適感、発車ベルの音のよさについても評価が有意に改善された。以上の結果は、超高周波成分を付加することによって、駅ホーム音環境の印象が改善され、快適化されることを示している。

〈ハイパーソニック・シャワー〉及び〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉によって、アナウンスや発車ベルだけでなく、全体の雰囲気も快適化していることが

見出された。特に、重畳しているアナウンスの音の分離がよいと感じられていることには、アナウンスの伝達を改善する可能性が期待され、応用上注目に値する。

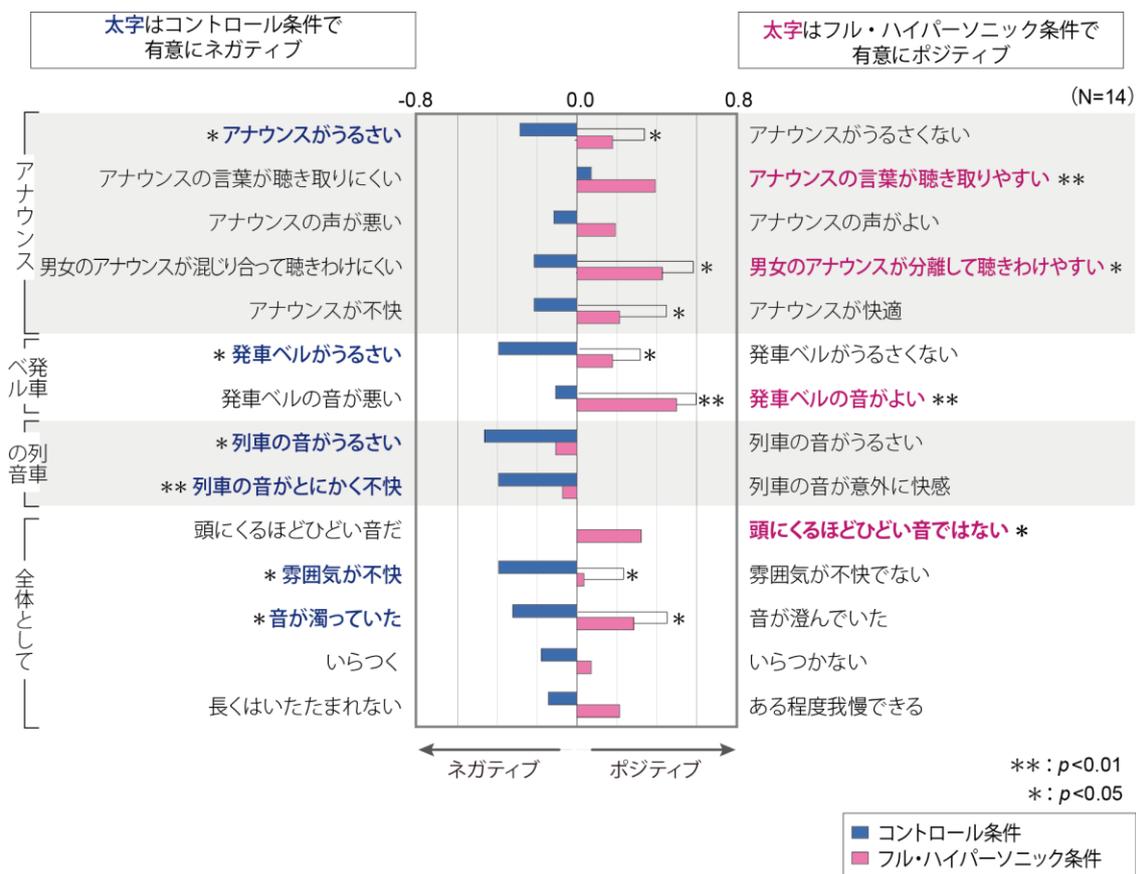


図 6-5 駅臨時ホーム実験における【フル・ハイパーソニック条件】による音環境印象改善効果

6.2. 車両内環境音への超高周波成分付加呈示が及ぼす影響の検討～【フル・ハイパーソニック条件】の効果の検討

これまでの実験により、超高周波成分の付加呈示によって駅ホームの音環境の不快感が緩和され、より快適に受容されることが見出された。そこで、同様の効果が、車両内の音環境に対しても見られるかどうか確かめる実験を行った。

実験空間として、東日本旅客鉄道会社が保有する試験用車両（シミュレーター）に注目した（写真 6-1）。この試験車両は、静止しているため視聴覚および振動環境の変化はない一方、不特定多数の乗客を収容し所定の路線を所定の時間に沿って走行することがないため実験条件の統制が容易で、厳密で再現性の高い実験が可能である。そこで、この試験車両および実験室に車両内音環境を造成して、ハイパーソニック・エフェクトを応用した音環境の快適化を検討する 5 種類の実験を行った。



写真 6-1 試験用車両

6.2.1. 実験空間および呈示条件

試験車両のなかの向かい合う 2 列の座席スペース（幅 3.6m×奥行 2.8m×天井高 2.3m）を実験参加者スペースとし、ドアをはさんだ隣の列の座席スペースを実験者ス

ペースとした。実験参加者から実験者が見えないように、両者の間はパーテーションで仕切った。試験車両内の暗騒音レベルは $32\text{dB}L_{\text{Aeq}}$ である（図 6-6）。



図 6-6 試験用車両内の実験スペース

高速で走行している車両内の音の移動感を再現するため、駅ホーム環境音の収録で用いたレコーダーSONOSAX SX-R4 とマイクロフォン DPA 4033 から成るシステムを拡張し、マイクロフォンを 4 本使用する車両内環境音収録システムを構成した（図 6-7）。

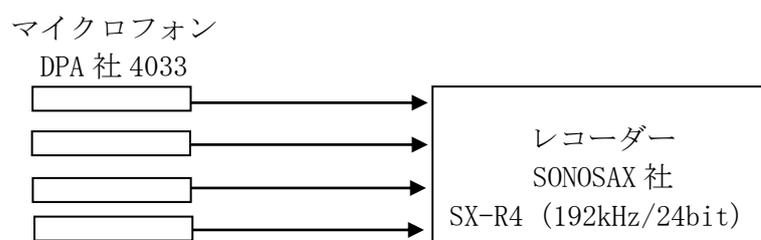


図 6-7 車両内環境音収録用システムのブロックダイアグラム

このシステムを用いて、東京都心から郊外に向かう、比較的駅と駅との間の走行時間が長い路線の列車のなかで、平日の夕方に環境音の超広帯域収録を行った。

収録した環境音から、突発性ノイズや至近距離で発生した音およびアナウンスの音を取り除いて 12 分間の〈仮想車両内環境音〉を作成した。次いで、これらの 4 チャ

ンネルの信号を超広帯域ミキシング・コンソール AMEK 9098i (イギリス) に入力し、そのサラウンド編集機能を用いて、4本のマイクロフォンで収録した音が、後述する前方左・前方右・後方左・後方右に設置したスピーカー配置にあわせて適切に定位するように再構成した。

アナウンスは、列車内で実際に使用されている女性の声による自動アナウンスの音源データ (44.1 kHz 標本化 16 bit 量子化) を入手し、〈ハイカット・アナウンス〉を作成した。この〈ハイカット・アナウンス〉の音圧の時間的变化に相関させて〈ハイパーソニック・シャワー〉を付加して、〈ハイパーソニック・アナウンス〉を作成した。

〈仮想車両内環境音〉と〈ハイカット・アナウンス〉とを組み合わせ再生することによって車両内の音環境を再現し、これを【コントロール条件】とした。〈仮想車両内環境音〉とハイパーソニック・シャワー〉及び〈ハイパーソニック・アナウンス〉を再生する条件を【フル・ハイパーソニック条件】とした (表 6-3)。

表 6-3 試験用車両内実験における呈示条件と音試料の構成

呈示条件	音試料構成要素		
コントロール条件	仮想車両内環境音	ハイカット・アナウンス	—
ハイパーソニック・シャワー条件	仮想車両内環境音	ハイカット・アナウンス	ハイパーソニック・シャワー
フル・ハイパーソニック条件	仮想車両内環境音	ハイパーソニック・アナウンス	ハイパーソニック・シャワー

これらの音試料を再生する再生システムを、写真 6-2 のように実験参加者スペースの外周に実験参加者を取り囲むように配置した。



写真 6-2 車両内実験空間の再生システムの配置

〈仮想車両内環境音〉に〈ハイカット・アナウンス〉を加えた【コントロール条件】の呈示音の電気信号の周波数パワースペクトル、および、その再生音を実験時の実験参加者の聴取位置にマイクロフォンを置いて計測した周波数パワースペクトルを、図 6-8 に示す。実験参加者の聴取位置で計測した呈示音の騒音レベルは $75 \text{ dB}_{L_{Aeq}}$ である。再生音は、可聴域を上回る帯域の特性がやや落ちるものの、 27 kHz 付近にピークのある音試料の周波数特性を再現している。聴感上も、走行中の車両内に存在しているかのような臨場感ある音環境が造成されたと判断された。

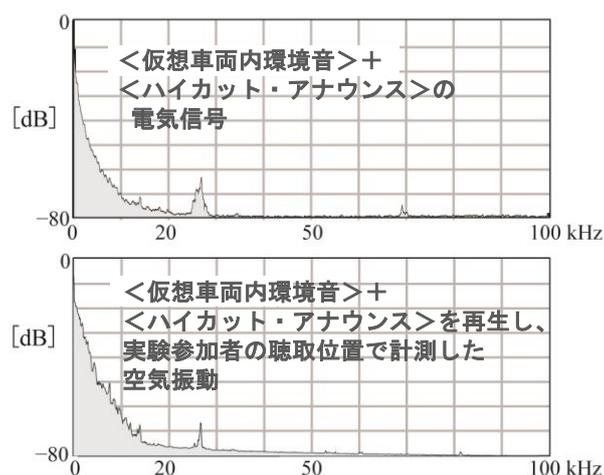


図 6-8 試験用車両内実験の呈示音の周波数パワースペクトル

【コントロール条件】すなわち〈仮想車両内環境音〉＋〈ハイカット・アナウンス〉を再生する場合と、【フル・ハイパーソニック条件】すなわち〈仮想車両内環境音〉＋〈ハイパーソニック・アナウンス〉＋〈ハイパーソニック・シャワー〉を再生する場合のそれぞれの再生音を、実験時の実験参加者の聴取位置にマイクロフォンを置いて計測した結果周波数パワースペクトルを図 6-9 に示す。【フル・ハイパーソニック条件】のとき、実験参加者の聴取位置には 80 kHz を超え 90 kHz に及ぶ超高周波成分が到達していることが確認された。

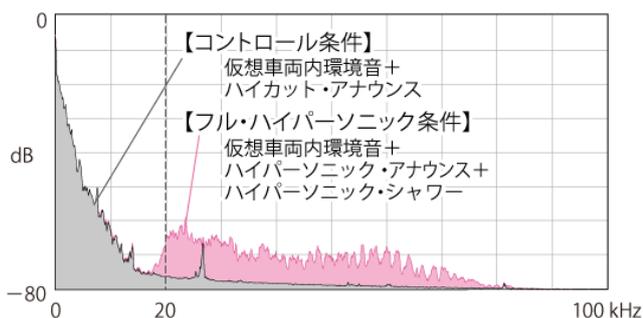


図 6-9 試験車両内実験の呈示音の実験参加者の聴取位置で計測した周波数パワースペクトル

6.2.2. 生理学的指標による評価実験

6.2.2.1. 概要

車両内環境での第一の実験として、〈ハイパーソニック・シャワー〉と〈ハイパーソニック・アナウンス〉によって超高周波成分を付加呈示する【フル・ハイパーソニック条件】によって、車両内においてもハイパーソニック・エフェクトが発現するかどうかを検討した。

〈仮想車両内環境音〉+〈ハイパーソニック・アナウンス〉+〈ハイパーソニック・シャワー〉を呈示する【フル・ハイパーソニック条件】と、〈仮想車両内環境音〉+〈ハイカット・アナウンス〉を呈示する【コントロール条件】とを設定し、それぞれの条件の音を聴いている実験参加者の脳波を計測して、脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルを算出し、両者の比較を行った。

実験参加者は健康で正常な聴力を有する 14 名（男性 8 名、女性 6 名、年齢 34~62 歳）である。

呈示時間は、駅ホーム環境音を用いた実験では先行研究を参考に 180 秒間（3 分間）としていたが、電車に乗車している時間は 1 回あたり 3 分よりも長いことが一般的であることを考慮し、各条件とも 12 分間とした。実験参加者は実験空間の電車の座席に開眼状態でリラックスして座るよう指示され、眠気を感じた場合には立ち上がってもよいと指示された。はじめに、【コントロール条件】、続けて【フル・ハイパーソニック条件】の音を呈示された。

6.2.2.2. 結果

【フル・ハイパーソニック条件】では【コントロール条件】に比べて脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルが増大することが、 $p=0.006$ という高い統計的有意性のもとに見出された。このことは、実験参加者の基幹脳活性が高まってハイパーソニック・エフェクトが発現したことを示唆している（図 6-12）。

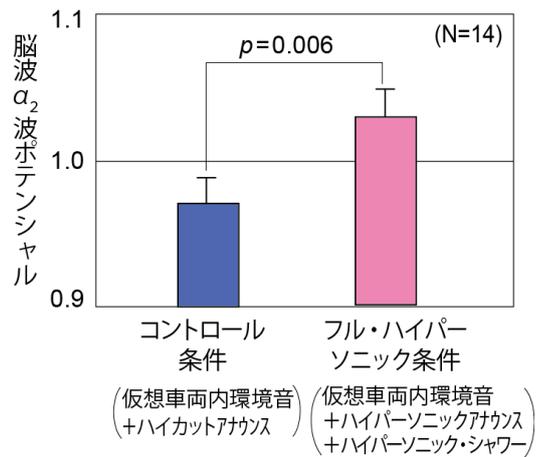


図 6-12 フル・ハイパーソニック条件による脳波 α_2 ポテンシャル増強効果

6.2.3. 心理学的指標による評価実験

6.2.3.1. 概要

【フル・ハイパーソニック条件】による車両内音環境の印象改善効果を検討するため、【フル・ハイパーソニック条件】と【コントロール条件】との間に、音の印象の違いがあるかどうかについて、質問紙を用いた主観的印象評価実験を行った。

質問紙の評価項目は音試料の内容にあわせて再検討した。発車ベルに関する項目を削除し、アナウンスが女性だけであることに対応して質問項目を変更したほか、呈示時間を長くしたことから疲れに関する質問項目を加えた。その結果、質問紙は、アナウンスに関するもの 5 項目、列車の音に関するもの 2 項目、全体の印象に関するもの 6 項目の、全 13 項目で構成した (表 6-4)。

表 6-4 試験車両内実験で用いた評価語対

アナウンスについて	
アナウンスがうるさい	- アナウンスがうるさくない
アナウンスの言葉が聞き取りにくい	- アナウンスの言葉が聞き取りやすい
アナウンスの声が悪い	- 男性アナウンスの声がよい
アナウンスに冷たく機械的なものを感じる	- アナウンスにぬくもりと人間味を感じる
アナウンスに落ち着きがない	- アナウンスに落ち着きがある
列車の音について	
列車の音がうるさい	- 列車の音がうるさくない
列車の音がとにかく不快	- 列車の音が意外に快感
全体として	
頭にくるほどひどい音だ	- 頭にくるほどひどい音ではない
雰囲気不快	- 雰囲気が不快でない
疲れた	- 疲れなかった
音が濁っていた	- 音が澄んでいた
いらつく	- いらつかない
長くはいたたまれない	- ある程度我慢できる

実験参加者は健康で正常な聴力を有する 16 名（男性 9 名、女性 7 名、年齢 34～62 歳）である。

呈示時間は各条件とも 120 秒（2 分）間とした。これまでの実験では先行研究を参考に 180 秒（3 分）間としていたが、より短い 120（2 分）秒でも音環境に対する印象が形成されることが確認されたため 120（2 分）秒とした。

呈示順は、最初に【コントロール条件】、次に【フル・ハイパーソニック条件】、最後に確認のためもう一度【コントロール条件】とした。実験参加者には最初に呈示する音を「A」の音、2 番目に呈示する音を「B」の音とし、最後にもう一度 1 回目と同じ「A」の音を呈示することを教示し、1 回目の「A」の印象と 3 回目の「A」の印象が違っていた場合は、回答を修正してよいと指示した。この方法によって、呈示順序による効果の解消を図った。

実験参加者はそれぞれの音についての印象をあらかじめ配付された質問紙の評価尺度上に 5 段階で記入した。各条件の間には、質問紙記入のため約 30 秒間のインターバルをとった。

6.2.3.2. 結果

【コントロール条件】の音すなわち現在の車両内環境音に対する評点について、中点 0 との差を Wilcoxon の符号付順位検定によって検討した。その結果、13 の評価項目のうち 8 項目 (図 6-11 左側に太字で表示) において、ネガティブな印象を与えていることが統計的有意に見出された。すなわち、現在の車両内環境音は、アナウンスが「うるさい」「冷たく機械的なものを感じる」、列車内の音が「うるさい」「とにかく不快」、「雰囲気が不快」「疲れた」「音が濁っていた」「長くはいたたまれな」と感じられていた。一方、【フル・ハイパーソニック条件】の音に対しては、有意にネガティブな項目はなく、逆に有意にポジティブという評価が「アナウンスの言葉が聴き取りやすい」「アナウンスの声がよい」「頭にくるほどひどい音ではない」「ある程度我慢できる」の 4 項目 (図 6-11 右側に太字で表示) で得られた。

ふたつの条件の間の印象の差に統計的有意性が認められた項目は、図 6-11 のグラフに「*」($p < 0.05$) または「**」($p < 0.01$) で示した 11 項目であった。そのうち 7 項目は【コントロール条件】で有意にネガティブな評価が認められたものである。ハイパーソニック・シャワーを駅ホーム環境音に付加すると、それが付加されない場合に感じられていた、「アナウンスがうるさい」「アナウンスに冷たく機械的なものを感じる」、列車の音が「うるさい」、「とにかく不快」、「雰囲気が不快」「音が濁っていた」「長くはいたたまれない」という印象が緩和され、よりポジティブな方向に改善されることが統計的有意に見出された。そのほかにも、「アナウンスの言葉が聴き取りやすい」「アナウンスの声がよい」「頭にくるほどひどい音ではない」「いらつかない」という方向への改善が有意に見られた。以上の結果は、超高周波成分を付加することによって、車両内音環境に対する不快感が緩和され、快適化されることを示している。

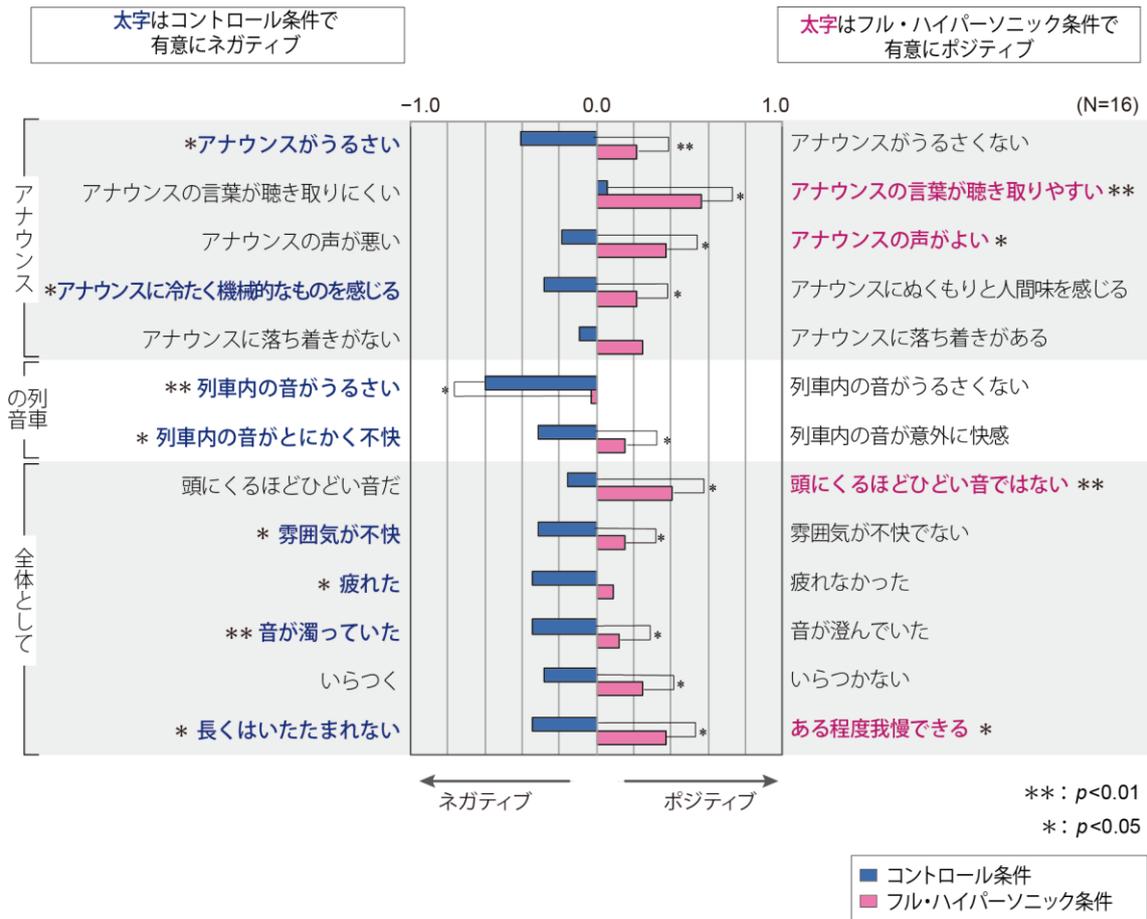


図 6-11 試験用車両内実験における【フル・ハイパーソニック条件】による音環境印象改善効果

なお、この実験の実験参加者 16 名は、一連の実験への参加経験がはじめての参加者 4 名、2 回目の参加者 10 名、3 回の参加者 2 名からなる。そこで、実験参加者経験回数によって心理評価の傾向に違いがあるかどうか検討した（図 6-12）。人数が少ないため統計検定はできないが、全評価項目の評点の平均は、どの群でもハイパーソニック条件の音ではポジティブ、コントロール条件の音ではネガティブな評価を共通して示した。加えて、個別の評価項目別に見た場合も、どの群でもハイパーソニック条件の音はポジティブ、コントロール条件の音はネガティブという傾向が共通して認められた。すなわち、実験経験回数によって、実験参加者の音質評価に対する影響が変化したとは解釈しにくい。すなわち、この研究における心理実験は、実験参加者に呈示条件を答えさせるものではなく、受動的な印象を申告させるものであり、実験終了後に実験参加者はどの呈示条件だったかを知らされることがなかったため、実験参加者において実験条件の学習が行われることが無かったと考えられる。したがって、実験参加者の参加経験が結果に及ぼす影響は無視して差支えないものと判断した。

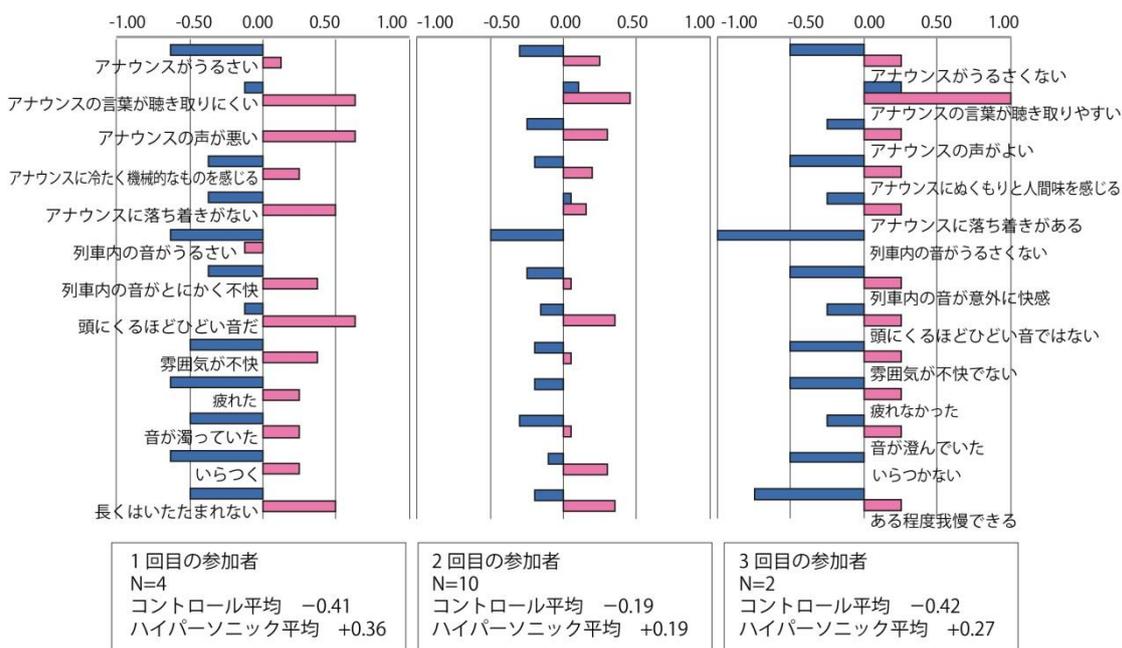


図 6-12 参加経験別の音環境印象改善効果

6.3. 【ハイパーソニック・シャワー条件】の効果の検討

車両内で用いられるアナウンスは路線によって異なるため、もしもこれらをすべてハイパーソニック化しようとする膨大な時間や費用を要し、実現性が低い。それに対して、超高周波成分だけを車両内音環境に付加することによってハイパーソニック・エフェクトを発現させることができるならば、そうした個別性の高い対応を必要としないためコストが抑制され、この効果の応用普及が促進されると期待される。

そこで、第二の実験として、アナウンスは現状のハイカットのままで、ハイパーソニック・シャワーのみを付加する【ハイパーソニック・シャワー条件】の効果を検討した。

6.3.1. 生理学的指標による評価実験

6.3.1.1. 概要

〈仮想車両内環境音〉＋〈ハイカット・アナウンス〉＋ハイパーソニック・シャワーを呈示する【ハイパーソニック・シャワー条件】と、〈仮想車両内環境音〉＋〈ハイカット・アナウンス〉を呈示する【コントロール条件】とを設定し、それぞれの条件の音を聴いている実験参加者の脳波を計測して、脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルを算出し、両者の比較を行った。

実験参加者は健康で正常な聴力を有する14名（男性8名、女性6名、年齢34～62歳）である。

実験参加者の聴取位置にマイクロフォンを置いて計測した呈示音の周波数パワースペクトルを図6-13に示す。実験参加者の聴取位置には、80 kHzを超える超高周波成分が到達していることが確認された。

呈示時間は、【フル・ハイパーソニック条件】の実験同様、各条件とも12分間とした。実験参加者は実験空間の電車の座席に開眼状態でリラックスして座るよう指示され、眠気を感じた場合には立ち上がってもよいと指示された。はじめに、【コントロール条件】、次に【ハイパーソニック・シャワー条件】の音を呈示された。

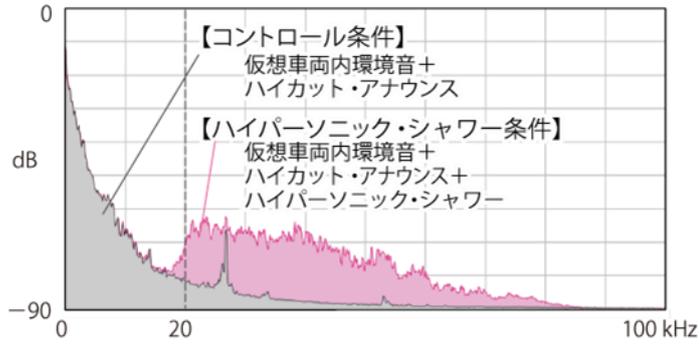


図 6-13 実験参加者の聴取位置で計測した呈示音の周波数パワースペクトル

6.3.1.2. 結果

【ハイパーソニック・シャワー条件】では【コントロール条件】に比べて脳波 α_2 波ポテンシャルが増大することが、 $p < 0.05$ の統計的有意性のもとに見出された。実験参加者の基幹脳活性が高まってハイパーソニック・エフェクトが発現したことを示された (図 6-14)。

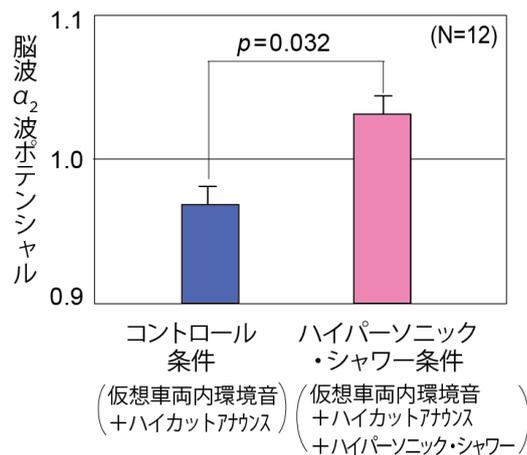


図 6-14 ハイパーソニック・シャワー条件による脳波 α_2 ポテンシャル増強効果

6.3.2. 心理学的指標による評価実験

6.3.2.1. 概要

ハイパーソニック・シャワー条件による音環境の印象改善効果を検討するため、**【ハイパーソニック・シャワー条件】**と、**【コントロール条件】**との間に、音の印象の違いがあるかどうか、質問紙を用いた主観的印象評価実験を行った

質問紙、呈示時間、呈示順、回答方法は**【フル・ハイパーソニック条件】**の実験と同一とした。

実験参加者は健康で正常な聴力を有する13名（男性7名、女性6名、年齢37～62歳）である。

6.3.2.2. 結果

【コントロール条件】の音すなわち現在の車両内環境音に対する評点について、中点0との差をWilcoxonの符号付順位検定によって検討した。その結果、4の評価項目のうち8項目（図6-14左側に太字で表示）において、ネガティブな印象を与えていることが統計的有意に見出された。一方、**【ハイパーソニック・シャワー条件】**の音に対して有意にネガティブな項目はなく、逆に有意にポジティブという評価が「アナウンスの言葉が聞き取りやすい」という1項目（図6-15右側に太字で表示）で得られた。

ふたつの条件の間の印象の差に統計的有意性が認められた項目は、図6-15のグラフに「*」（ $p<0.05$ ）で示した4項目であった。この4項目はすべて**【コントロール条件】**で有意にネガティブな評価が認められたものである。ハイパーソニック・シャワーを駅ホーム環境音に付加すると、それが付加されない場合に感じられていた、列車両内の音が「うるさい」、「とにかく不快」、「疲れた」「いらつく」という印象が緩和され、よりポジティブな方向に改善されることが統計的有意に見出された。以上の結果は、ハイパーソニック・シャワーのみを呈示して超高周波成分を付加することによっても、車両内音環境に対する不快感が緩和され、快適化されることを示している。

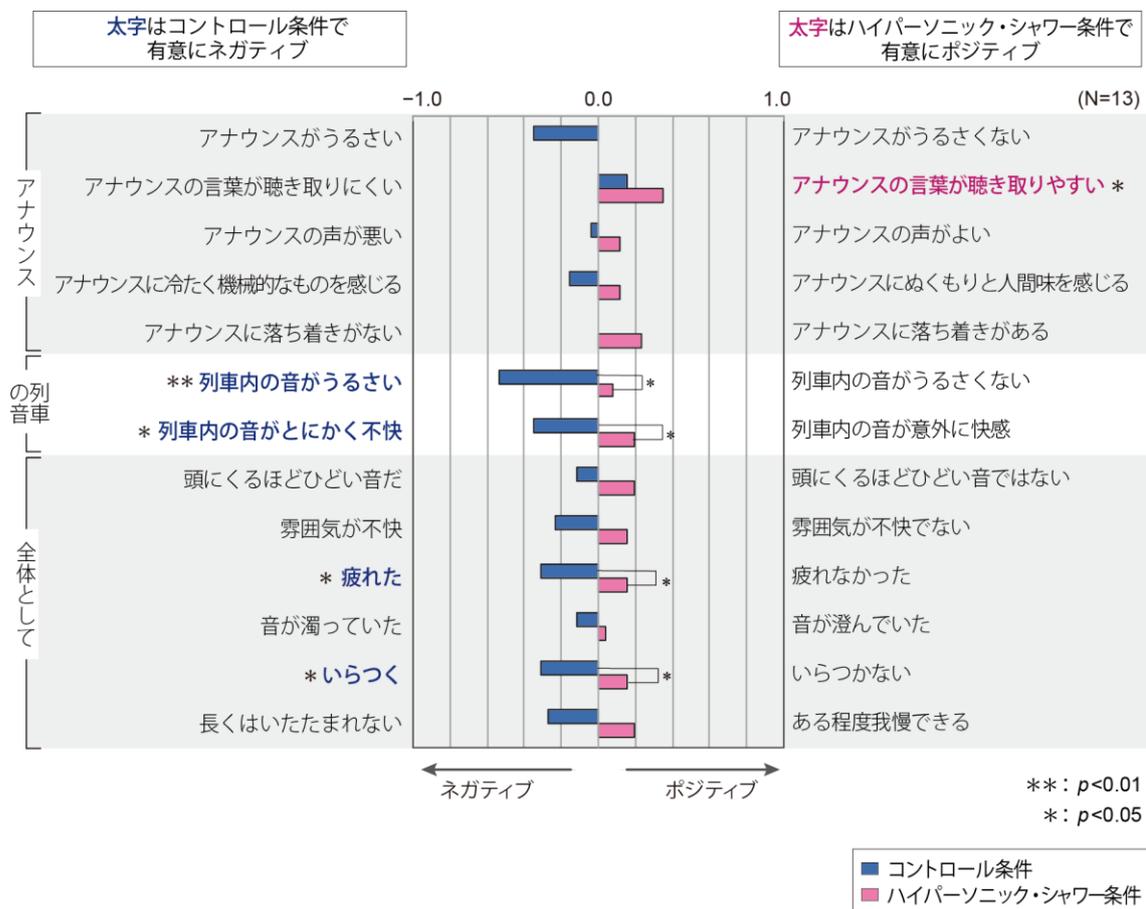


図 6-15 試験用車両内実験における【ハイパーソニック・シャワー条件】による音環境印象改善効果

6.4. 超高周波成分の呈示時間についての検討

これまで車両内で行った生理学的評価実験では、音呈示の長さは1回12分間だった。しかし、実際の乗車時間はそれよりも長い場合が少なくない。そこで、より長い21分間にわたって超高周波成分を付加呈示し、その時間的影響を脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルを指標にして検討した。呈示音は、これまで使用してきた12分の音試料をデジタルオーディオワークステーション上で21分に編集した。

6.4.1. 生理学的指標による評価実験の概要

実験参加者は、まず【コントロール条件】、続いて同じ【コントロール条件】または【ハイパーソニック・シャワー条件】のいずれかの音をそれぞれ21分間ずつ計42分間呈示され、その間の脳波が連続記録された。【コントロール条件】と【ハイパーソニック・シャワー条件】を呈示された実験参加者は9名（男性5名、女性4名、年齢38～62歳）だった。【コントロール条件】に続けて【コントロール条件】を呈示された実験参加者は9名（男性3名、女性6名、年齢38～62歳）だった。得られたデータを180秒間（3分間）ごと7区間に区切って分析した。

実験参加者は実験空間の電車の座席に開眼状態でリラックスして座るよう指示され、眠気を感じた場合には立ち上がってもよいと指示された。

なお、【コントロール条件】を続けて2回呈示する実験は、予備的検討を行った実験室内に、試験車両内と同じ再生システムを設置して実施した。

6.4.2. 生理学的指標による評価実験の結果

【コントロール条件】に続けて【ハイパーソニック・シャワー条件】を呈示した実験においては、【ハイパーソニック・シャワー条件】の時の脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルの値は、7つの時間区間すべてにおいて、【コントロール条件】の時よりも上回っていた（図6-16a）。21分間全体を対象に統計検定を行うと、実験参加者数が10名以下であるかわらず $p<0.061$ という、あらかじめ設定した統計的有意水準 $p<0.05$ に近似する値が得られた（図6-16b）。さらに、 $\alpha 2$ ポテンシャルの時間的推移を180秒間（3分間）きざみで詳細に追跡すると、呈示開始15分～18分の区間で $p<0.05$ 、18分～21分の区間で $p<0.001$ という高い有意性で【ハイパーソニック・シャワー条件】において【コ

ントロール条件】よりも脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルが増大し時間とともに差が拡大したことが認められた。一方、【コントロール条件】を2回続けて呈示した場合においては、1回目の呈示と2回目の呈示の間に、そうした時間に伴う変化は認められなかった。

これらの結果は、ハイパーソニック・エフェクトが時間とともに強く発現していく可能性を示唆している。長時間にわたる超高周波成分の車両内呈示は、ネガティブな効果をもたらさないばかりか、より長い呈示ほどより大きな効果をもたらすことを期待させる。

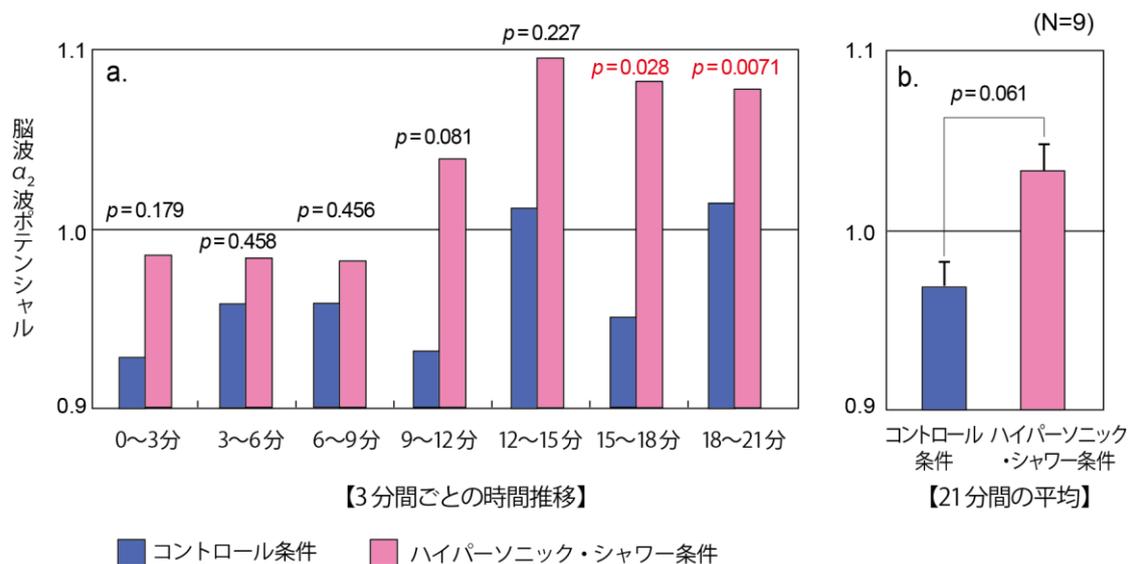


図 6-16 より長時間の音呈示による基幹脳活性化効果

一方、コントロール条件を2回繰り返し呈示した場合、180秒間（3分間）ごとに区切って分析した7区間のどこをとっても、1回目の音呈示と2回目の音呈示との間で脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルの値に有意な差は認められなかった（図 6-17）。以上の結果から、「同じ音を2回繰り返して呈示すると、どのような種類の音であっても2回目に聴取する音の方が基幹脳活性を向上させる」という仮説は成立しがたいことが示され、図 6-16 に示された $\alpha 2$ ポテンシャルの増大は、順序効果によるものではなく、【ハ

【ハイパーソニック・シャワー条件】による基幹脳活性化による、という結果の信頼性が支持された。

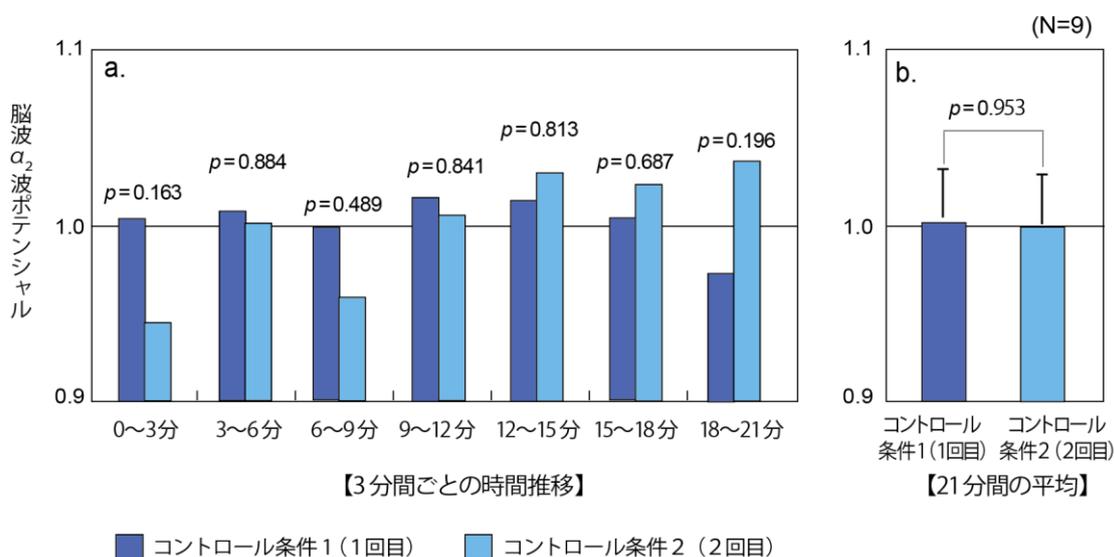


図 6-17 同じ音を 2 回繰り返したときの基幹脳活性の状態

6.5. イヤフォン装着者におけるハイパーソニック・エフェクトの検討

列車のなかでイヤフォンを使用する乗客が急増している。一方、イヤフォンから高周波成分を呈示してもハイパーソニック・エフェクトは発現せず、ハイパーソニック・エフェクトの決定的要因である超高周波成分の受容部位は、聴覚系ではなく体表面に所在するという知見がある [Oohashi et al., 2006] [八木ら, 2013]。このことは、イヤフォンによって聴覚系への超高周波成分の入力が妨げられている乗客に対しても、体表面に超高周波成分を呈示すればハイパーソニック・エフェクトの発現が期待できることを意味する。そこでこの知見を活用して、イヤフォンを使用している乗客に対して、超高周波成分の体表面への呈示が有効性を発揮しうるかどうかを検討した。

6.5.1. 生理学的指標による評価実験

6.5.1.1. 概要

実験参加者にはあらかじめ、いつもよく聴いている自分の好みの音楽を自身のポータブル・プレーヤーに記録して持参するよう指示し、それによって再生される音楽を

イヤフォンのみを通じて聴取するように指示した。実験参加者が装着するイヤフォンは共通のものとし、密閉型インナー・イアタイプのイヤフォン ATH-CKP330（オーディオ・テクニカ、東京、日本）とした。実験参加者はこれを両耳に装着した。このイヤフォンの再生周波数帯域は 20～20 kHz であり、ポータブル・プレーヤーから再生される音楽は MP3 フォーマットで記録されているため、可聴域上限を上回る超高周波成分を含まないハイカット・デジタル音声である。実験参加者には、イヤフォンから再生される音楽は、音呈示の度ごとに、同一箇所を再生聴取するよう指示した。したがって、この実験で実験参加者がイヤフォンから聴取する音楽は、ひとりひとり異なる一方、一個人においては毎回同一である。

呈示条件は、【フル・ハイパーソニック条件】と【コントロール条件】との比較とした。【フル・ハイパーソニック条件】では、〈仮想車両内環境音〉＋〈ハイパーソニック・アナウンス〉＋〈ハイパーソニック・シャワー〉が全身に呈示され、〈ハイカット音楽〉がイヤフォンを通じて気導聴覚系から呈示される。【コントロール条件】では、実験参加者には、〈仮想車両内環境音〉＋〈ハイカット・アナウンス〉が全身に、〈ハイカット音楽〉がイヤフォンを通じて気導聴覚系から呈示される（表 6-5）。

表 6-5 イヤフォン装着者に対する実験における呈示音

呈示条件	全身に呈示			イヤフォンを通じて気導聴覚系から呈示
コントロール条件	仮想車両内環境音	ハイカット・アナウンス	—	ハイカット音楽
フル・ハイパーソニック条件	仮想車両内環境音	ハイパーソニック・アナウンス	ハイパーソニック・シャワー	ハイカット音楽

実験参加者は健康で正常な聴力を有する 14 名（男性 8 名、女性 6 名、年齢 34～62 歳）である。実験参加者は実験空間の電車の座席に開眼状態でリラックスして座るよう指示され、眠気を感じた場合には立ち上がってもよいと指示された。

呈示時間はそれぞれ 12 分間とし、最初に【コントロール条件】、次に【フル・ハイパーソニック条件】の順で呈示した。

6.5.1.2. 結果

【フル・ハイパーソニック条件】下でイヤフォンからの音楽を聴取した実験参加者の脳波 α_2 ポテンシャルは、【コントロール条件】の時に較べて統計的有意に高まることが見出された (図 6-18、 $p=0.014$)。すなわち、車両内音環境がハイパーソニック化されると、イヤフォン装着者においてもハイパーソニック・エフェクトが発現し顕著な基幹脳の活性化が導かれることが高い統計的有意性のもとに示された。

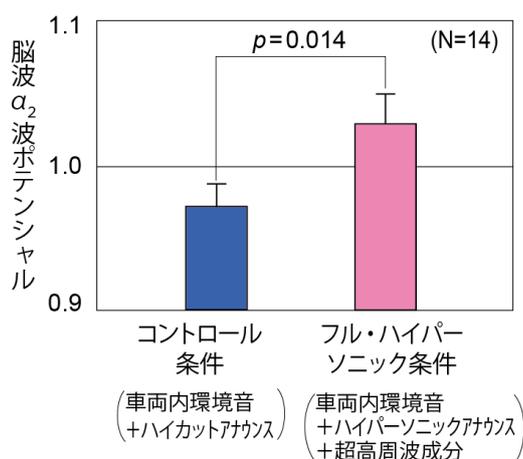


図 6-18 イヤフォン装着者のフル・ハイパーソニック条件による脳波 α_2 ポテンシャルの増強効果

6.5.2. 心理学的指標による評価実験

6.5.2.1 概要

質問紙は、イヤフォンの音楽に関する 2 項目を加え、全 15 項目で構成した (表 6-5)。

実験参加者は健康で正常な聴力を有する 16 名 (男性 9 名、女性 7 名、年齢 34~62 歳) である。実験参加者には、生理学的指標による評価実験と同様に、いつもよく聴いている自分の好みの音楽を自身のポータブル・プレーヤーに記録して持参し、それによって再生されるハイカット・デジタル音声をイヤフォンのみを通じて聴取することを指示した。あわせて音呈示の度ごとに、同一箇所を再生聴取するよう指示した。

呈示時間、呈示順、回答方法は、イヤフォンを用いないフル・ハイパーソニック条件の実験と同様とした。呈示時間は 120 秒 (2 分) 間である。呈示順は、最初にコントロール条件、次にフル・ハイパーソニック条件、最後に確認のためもう一度コント

ロール条件とした。実験参加者には最初に呈示する音を「A」の音、2番目に呈示する音を「B」の音とし、最後にもう一度「A」の音を呈示すると教示した。実験参加者はそれぞれの音についての印象をあらかじめ配付された質問紙の評価尺度上に5段階で記入した。各条件の間には、質問紙記入のため約30秒間のインターバルをとった。

表 6-6 イヤフォン装着者による印象評価実験の質問項目

アナウンスについて	
アナウンスがうるさい	- アナウンスがうるさくない
アナウンスの言葉が聴き取りにくい	- アナウンスの言葉が聴き取りやすい
アナウンスの声が悪い	- 男性アナウンスの声がよい
アナウンスに冷たく機械的なものを感じる	- アナウンスにぬくもりと人間味を感じる
アナウンスに落ち着きがない	- アナウンスに落ち着きがある
列車の音について	
列車の音がうるさい	- 列車の音がうるさくない
列車の音がとにかく不快	- 列車の音が意外に快感
全体として	
頭にくるほどひどい音だ	頭にくるほどひどい音ではない
雰囲気が不快	雰囲気が不快でない
疲れた	疲れなかった
音が濁っていた	音が澄んでいた
いらつく	いらつかない
長くはいたたまれない	ある程度我慢できる
イヤフォンの音楽について	
イヤフォンの音楽がいつもより悪く感じる	- イヤフォンの音楽がいつもよりよく感じる
イヤフォンの音楽が聴き取りにくい	- イヤフォンの音楽が聴き取りやすい

6.5.2.2 結果

【コントロール条件】の音すなわち現在の車両内環境音に対する評点について、中点0との差をWilcoxonの符号付順位検定によって検討した。その結果、「イヤフォンの音楽が聴き取りにくい」という1項目(図6-18左側に太字で表示)において、ネガティブな印象を与えていることが統計的に有意に見出された。車両内環境音に対してこれまで見出されていたネガティブな評価が見出されないことは、イヤフォンの装着によって好みの音楽を聴取することによって、車両内音環境の不快感の緩和が実現し

ていることを意味すると考えられる。一方、【フル・ハイパーソニック条件】の音に対しては、有意にネガティブな項目はなく、逆に有意にポジティブという評価が5項目で得られた。すなわち、アナウンスが「うるさくない」、「言葉が聞き取りやすい」、「声がよい」、「頭にくるほどひどい音ではない」「いらつかない」である（図 6-19 右側に太字で表示）。

ふたつの条件の間の印象の差に統計的有意性が認められた項目は、図 6-19 のグラフに「*」（ $p<0.05$ ）で示した1項目で、「列車の音が意外に快感」を感じられる方向への改善が有意に見られた。以上の結果は、超高周波成分を付加することによって、イヤフォン装着者においても、車両内音環境に対する不快感が緩和され、快適化されることを示している。

イヤフォンを装着して音楽を聴いている条件下でも超高周波成分付加呈示による生理的・心理的効果が発現することが、いずれも統計的有意に見出された。ふたつの条件の間の印象の差に有意差が認められた項目数が、イヤフォンを用いていないフル・ハイパーソニック条件の実験（図 6-11）と比べて少ないのは、気導聴覚系に音楽を呈示しているため、意識レベルではその影響が大きいと考えられる。しかし生理学的指標では、イヤフォンを用いていない実験と同様の結果が示されている。この実験で用いたイヤフォンは密閉型インナー・イアタイプで、イヤフォンを装着していないときにくらべて、スピーカーから再生されている可聴音および超高周波成分の鼓膜への到達が阻まれている。それにもかかわらず、ハイパーソニック・エフェクトの発現が確認されたことは、超高周波成分は気導聴覚系ではなく体表面で受容されるとする〈二次元知覚モデル〉を支持する結果といえる。

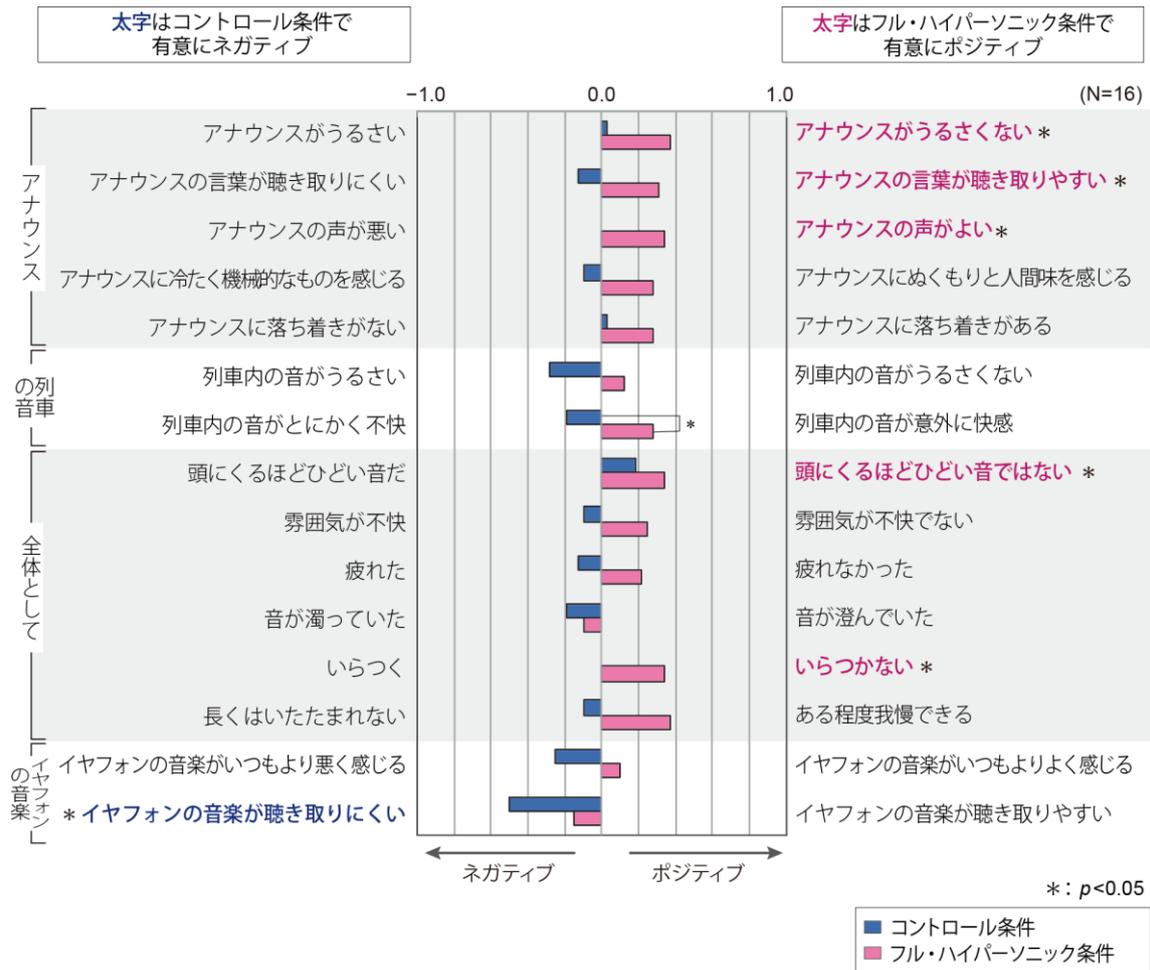


図 6-19 イヤフォン装着者における【フル・ハイパーソニック】条件による印象改善効果

第7章 考察

7.1. 本研究における生理学的指標・心理学的指標の意義

この研究の結果、実験空間に造成した〈仮想駅ホーム環境音〉〈仮想車両内環境音〉に〈ハイパーソニック・シャワー〉〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉を付加呈示することによって、基幹脳活性の賦活を示す脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルが増大するとともに、音環境および環境質全体に対する心理的印象が好転して不快感が緩和されることが、ともに統計的有意に見出された。さらに、〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉を使わず、〈ハイパーソニック・シャワー〉だけを付加呈示しても脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルの増大と音環境および環境質全体に対する印象好転効果が認められること、超高周波による脳活性の賦活は時間とともに増強される一方、超高周波を含まない音呈示ではそうした脳活性の上昇は見られないこと、イヤフォン装着によって超高周波の鼓膜への到達が阻まれている条件下でも生理的・心理的效果が発現することが、いずれも統計的有意に見出された。

ここでまず、これらの実験で用いた生理学的指標、心理学的指標の意義についてあらためて考察する。生理学的指標として選択した脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルは、先行研究における脳血流と脳波との同時計測によって、中脳・間脳を拠点とする基幹脳ネットワークの全般的な活動と正の相関を高い有意性とともを示す優秀な指標とされている[Nakamura,2004]。したがって、超高周波成分を駅ホーム環境音や車両内環境音に付加呈示したとき、現状の駅ホームや車両内の音環境をシミュレートしたコントロール条件と較べてこの脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルが有意に増大したということは、ハイパーソニック・エフェクトが発現し、心身の働きの基礎を担う基幹脳の活動が高められていることを意味している。

それでは、基幹脳の活性が高まることには、どのような意義があるのだろうか。第2章で述べたように、ポジトロン断層撮像法を用いた先行研究において、脳血流データを主成分分析した結果、超高周波成分を豊富に含む音を聴いているとき、中脳、視床を中心領域としつつ、〈前帯状回〉、〈内側前頭前野〉などの部位の血流量が連動して増大することが見出されている(図7-1)。中脳は、そこから脳内各部位に投射する広範囲調節系と呼ばれる神経ネットワークの拠点である。特に、主成分分析によって連動して活性化することが明らかになった前帯状回、内側前頭前野などの前頭葉の各部

位には、中脳腹側被蓋野から側坐核を結ぶ中脳辺縁系など、ドーパミンやセロトニンを神経伝達物質とするモノアミン作動性神経が投射しており、これらは報酬系神経回路として作動することが知られている。すなわち、ハイパーソニック・エフェクトによる基幹脳の活性化によって、脳の中の報酬系神経回路が活性化される可能性が高いと考えられている。

報酬系神経回路の活性が高まると、環境から入ってくる感覚感性情報は、より美しく快適に感じられる。すなわち、この研究における心理実験の結果は、駅ホーム環境音あるいは車両内環境音に知覚できない超高周波成分を付加することによって、ハイパーソニック・エフェクトが発現し、脳の報酬系神経回路の活性が高まり、それによって音環境がより快適に受容され、不快感が緩和されたことを反映していると考えられる。

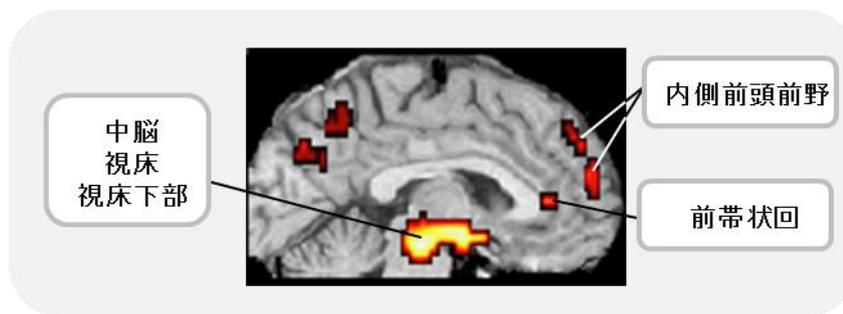


図 7-1 ハイパーソニック・サウンドによって活性化する脳の部位
(大橋, 2003、本田, 2013 より)

このことをより直接的に検討するために、この研究で得られたデータにおいて基幹脳活性を指標する脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルと心理学的指標との間に相関がみられるかどうかを検討した。この研究では、生理実験と心理実験とは別個に行っており、実験参加者のなかには同一日に生理実験・心理実験双方に参加した者も、そうでない者もいる。そこで、実験参加者の生理状態が日によって変動することを考慮し、同じ日に行われた生理実験と心理実験の両方に参加した実験参加者を対象として、脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルと各心理学的指標との対応を調べた。検討対象となったのは、車両内で行っ

たフル・ハイパーソニック条件の実験参加者 14 人とハイパーソニック・シャワー条件の実験参加者 12 人、のべ 26 人のそれぞれ 2 条件のデータ、合計 52 セットである。

心理学的指標全体をあらわすものとして、質問紙の全 13 項目の評点の平均を算出して用いた。各項目の評点は、5 段階のもっともネガティブな評価を -1 点、もっともポジティブな評価を +1 点として、0.5 点刻みとした。α2 ポテンシャルと上記の心理学的指標との相関を調べた結果、両者の間に有意に近い正の相関がみられた

($r=0.2586$ 、 $p=0.0642$) (図 7-2)。しかし、あらかじめ設定した有意水準 ($p<0.05$) に至らなかった。

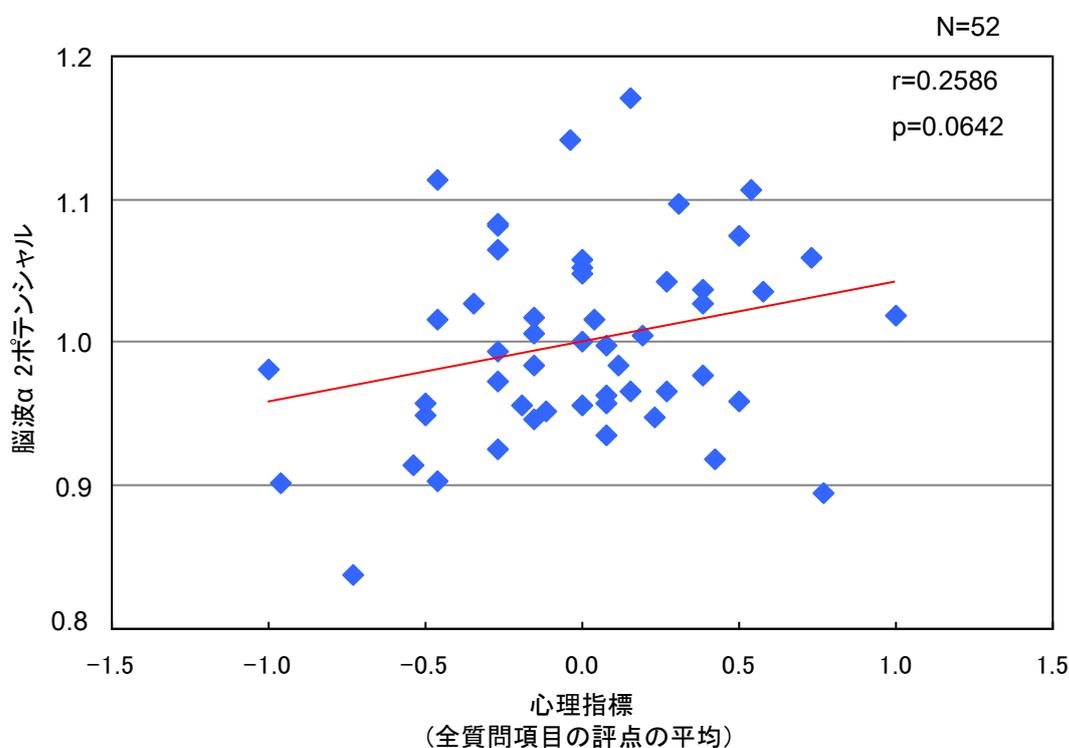


図 7-2 脳波 α2 ポテンシャルと心理学的指標との相関

そこで次に、各質問項目別に、α2 ポテンシャルと評点との相関を調べた。この場合、評点は順序尺度であり 0.5 刻みの値をとるため、Spearman の順位相関係数を調べた。その結果、「アナウンスがうるさいーうるさくない」「アナウンスの音が聴きと

りにくい—聴き取りやすい」「アナウンスに落ち着きがない—落ち着きがある」という3項目で、 $\alpha 2$ ポテンシャルと心理学的指標とが有意な相関を示した（表 7-1）。

表 7-1 脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルと各評価項目の評点との間の Spearman の順位相関係数

No	評価項目	Spearmanの順位相関係数 (ρ)	p値
Q1	アナウンスがうるさい — アナウンスがうるさくない	0.3623	<0.01
Q2	アナウンスの言葉が聴き取りにくい — アナウンスの言葉が聴き取りやすい	0.3512	<0.05
Q3	アナウンスの声が悪い — アナウンスの声がよい	0.1777	n.s.
Q4	アナウンスに冷たく機械的なものを感じる — アナウンスにぬくもりと人間味を感じる	0.2119	n.s.
Q5	アナウンスに落ち着きがない — アナウンスに落ち着きがある	0.2768	<0.05
Q6	列車の音がうるさい — 列車の音がうるさくない	0.2473	n.s.
Q7	列車の音がとにかく不快 — 列車の音が意外に快感	0.0819	n.s.
Q8	頭にくるほどひどい音だ — 頭にくるほどひどい音ではない	0.1629	n.s.
Q9	雰囲気が不快 — 雰囲気が不快でない	0.1553	n.s.
Q10	疲れた — 疲れなかった	0.2222	n.s.
Q11	音が濁っていた — 音が澄んでいた	0.1708	n.s.
Q12	いらつく — いらつかない	0.2199	n.s.
Q13	長くはいたたまれない — ある程度我慢できる	0.1394	n.s.

以上により、 $\alpha 2$ ポテンシャルと心理学的指標との間に相関があることが示された。ただし、これらの値は同一日に計測されたものではあるものの、同時に計測されたものではないため、呈示音以外の要因による実験参加者のコンディションの変化なども包含している可能性を排除できない。

そこで、先行研究において、基幹脳の活性状態と心理的反応とをより時間的に連続して計測した研究事例を調べたところ、この目的に適合した実験結果が見出された。その実験では、さまざまなストレス性疾患と関わりが深い心理学的指標として実績のある不安測定心理検査のひとつで、その時々々の不安状態を反映する状態不安尺度 STAI (Y-1) と、 α 波から導かれる基幹脳活性指標との間に負の相関が存在する、すなわち α 波の増大が出現しているときに状態不安指数が低下することが統計的有意に見出さ

れている（図 7-3）[本田，2013]。このデータは、実験参加者に 20 分間にわたり超高周波成分を豊富に含む音と環境映像による音響映像を呈示し、音響映像呈示の前後に、脳波と状態不安尺度を計測した結果である。脳波と心理学的指標とが時間的にごく近接して計測されているため、その相関の信頼性は高い。この知見は、この研究で見出された心理状態の変化が基幹脳の活性状態を反映しているとする解釈を支持するものといえる。

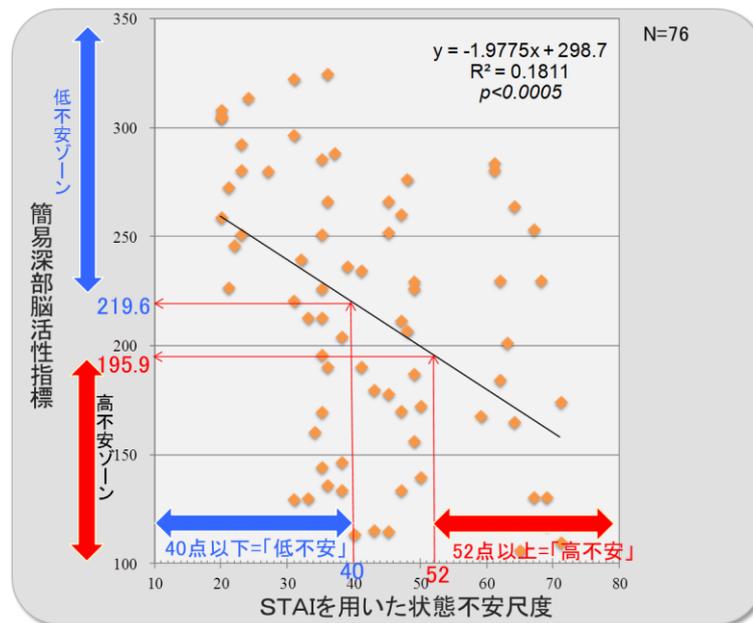


図 7-3 脳波 α 波と STAI による状態不安尺度との相関（本田，2013 より）

その他の先行研究で、実験室内に都市環境音だけを呈示したときと都市環境音に超高周波成分を豊富に含む熱帯雨林環境音をミックスした音を呈示したときとの 2 条件について、音呈示中の α 波計測と、音呈示直後の質問紙による印象評価を行った例では、超高周波成分を豊富に含む熱帯雨林環境音の付加によって脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルが増大し、心理的にも快適性が高まる結果が得られている[仁科ら，2005, 2007]。

また、時間的に連続してはいないが、超高周波成分の増強による快適音量の能動的調整行動と脳波計測、主観的印象評価の 3 つを組み合わせた研究では、超高周波のレベルを、増強なし、6dB 増強、12dB 増強という 3 条件で呈示し、6dB 増強して呈示したときに、快適調整音量および脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルがともに最大になり、心理的にも音をもっとも好ましく感じていることが見出されている[八木ら，2003]。

以上から、超高周波成分の付加呈示によって、脳波 $\alpha 2$ ポテンシャルが増大するとともに、心理的には快適性が向上し不快感の緩和がみられたというこの研究の結果は、実験参加者にハイパーソニック・エフェクトが発現して報酬系神経回路の活性が高まったことの反映として、音環境がより快適に受容され不快感が緩和されたと解釈することが支持される。より厳密な相関の検討が今後行われることが期待されるが、現在のデータからでも、超高周波を付加呈示することによって同一の可聴音をより快適に受容させるというこの研究の作業仮説は支持されたと考える。

7.2. 騒音環境におけるハイパーソニック・エフェクト発現

この研究で見出された、騒音環境におけるハイパーソニック・エフェクト発現について、その意義を考察する。

既に述べたように、ハイパーソニック・エフェクト発見の端緒は商業音楽を制作するレコーディング・スタジオにあり、超高周波の共存によって音の快適性が高まるというアーティストの確信から出発している。このことが端的に示しているように、ハイパーソニック・エフェクト研究における問題意識は、音楽メディアとしてのデジタル音響規格の策定や、音や音楽による快適性の増幅と深く関わりをもちつつ現在に至っている。そのため、ハイパーソニック・エフェクトに関する実験は、静謐な実験室や比較的騒音レベルの低い市街地において行われ、この研究が対象とする鉄道環境のような騒音レベルの高い環境を想定して行われてこなかった。

この研究により、騒音レベルの高い鉄道環境でもハイパーソニック・エフェクトが発現し、それによって快適性が高まり不快感が緩和されることが初めて明らかになった。これによって、ハイパーソニック・エフェクトの応用範囲が一挙に拡大した意義は大きい。

この効果の発現機序に関しては、次項で〈二次元知覚モデル〉と関連づけて考察する。

7.3. 可聴音と起源を異にする超高周波の付加によるハイパーソニック・エフェクト発現

この研究で見出された、超高周波成分単独の付加によるハイパーソニック・エフェクト発現について、先行研究との関連とその意義について考察する。

ハイパーソニック・エフェクトは、可聴域をこえる高周波を豊富に含む音と、そこから超高周波成分とを除外した音との比較を通じて発見された。そして、同じ音源にもともと含まれている可聴音と超高周波とが共存するときに発現することが、先行研究によって見出されている [Oohashi et al., 2000]。その研究では、「超高周波成分を含むガムラン音を全帯域にわたって呈示する場合」、「高周波を除外して可聴音だけを呈示する場合」、「可聴音を除外して超高周波だけを呈示する場合」、そして「暗騒音のみの場合」、という4つの条件における脳血流および脳波が計測された。その結果、可聴音と超高周波が共存したときには、暗騒音だけのときと比較して中脳・視床の領域血流量の増大および脳波 α 波の増強が統計的有意に認められた一方、超高周波成分だけを呈示しても、脳血流の増大や α 波の増強は認められなかった (図 2-9、図 2-14)。また、可聴音だけを呈示した場合、中脳、視床の血流量は、暗騒音だけのときにくらべて有意に減少することも見出された。つまり、ハイパーソニック・エフェクトは超高周波成分単独でも、可聴域成分単独でも発現せず、両者が共存するときにだけ発現することが知られている。

それに対して、この研究で実施した実験条件は、鉄道の騒音環境に、熱帯雨林環境音から抽出した超高周波成分だけを加えたものである。この実験条件は、鉄道騒音を暗騒音とみなせば、上記の先行研究における「可聴音を除外して超高周波だけを呈示する場合」に該当するようにもみえる。しかし、上記の先行研究における暗騒音のレベルはきわめて低いので、今回の実験条件は、鉄道の騒音という可聴音に、それとは起源が異なる超高周波を付加した条件でハイパーソニック・エフェクトが発現した、ということになる。このような互いに起源を異にする可聴音と超高周波との共存という条件下でのハイパーソニック・エフェクトの発現は、これまで報告されていない。

このように、鉄道の音環境に超高周波成分だけを付加呈示してハイパーソニック・エフェクトが発現したことについて、第2章で述べたハイパーソニック・エフェクトの発現機序に関する〈二次元知覚モデル〉をふまえ、可聴音と超高周波それぞれについて先行研究で得られている知見との整合性を考察する [Oohashi et al., 1991] [大橋, 2003] [仁科, 2009] [八木, 2013]。まず、今回の実験で再現した鉄道の音環境は、75~81dB_{L_{Aeq}}の可聴音が存在する騒音環境である。これは、超高周波成分単独の呈示がハイパーソニック・エフェクトを導かないことが見出された実験環境とは大きく異

なる。そして、その可聴音が、〈ゲート制御系〉の候補である頭頂葉楔前部の反応を導きうる「時間的に連続して変容しつつ持続する情報構造」をもつかという点では、車両内環境音では列車の走行音が持続しており、駅ホーム環境音では多数の乗客が発する音・列車の発着音・アナウンス・発車ベルなどが重畳して、時間的に連続して変容しつつ持続する情報構造としての要件を満たしていると考えられる。

次に、超高周波成分について検討する。これまでハイパーソニック・エフェクトは、ガムラン音楽に含まれる可聴音とその倍音成分からなる超高周波の共存というように、可聴音と何らかの対応のある超周波成分の共存によって発現する事例が対象とされてきた。それに対してこの研究では、熱帯雨林環境音から抽出した超高周波成分を鉄道の環境音という起源を異にする可聴音に付加した場合でありながら、ハイパーソニック・エフェクトが発現した。さらに、イヤフォンによって気導聴覚系に高周波成分を含まない音楽を呈示し、超高周波成分が鼓膜に到達することが妨げられている条件下でも、熱帯雨林環境音から抽出した超高周波成分が体表面に呈示されることによって、ハイパーソニック・エフェクトが発現した。

このような効果が得られた理由として、今回の実験に用いられた熱帯雨林環境音固有の特性が関与している可能性が考えられる。音楽のように持続的な音を伴いつつも離散的な構造をもつ音の場合は、可聴域の音圧レベルと超高周波のレベルとの対応は明瞭である。それに対して、虫や鳥などのきわめて多様な多数の発音源がランダムに音を発し、それらが重畳している熱帯雨林環境音では、可聴域の音圧レベルと超高周波成分のそれとの対応は相対的に希薄と考えられる。現に、熱帯雨林環境音の録音物を分析すると、可聴域成分と超高周波成分との間に、時間的に対応のない変動が観察されることが珍しくない。したがって、熱帯雨林環境音から抽出した超高周波成分には、可聴域の音構造に左右されることなくハイパーソニック・エフェクトを発現させる汎用性があるのかもしれない。これについてはさらなる検証が必要であるが、もしそうであった場合は、ハイパーソニック・エフェクトを導くうえで高度の汎用性のある優れた音源が実現できたことになる。このような音源を実現できたとすれば、その基礎研究上、応用上の価値はきわめて多大なものといえる。

7.4. 超高周波成分の安全性に関する検討

物質・情報を問わず何らかの要素を環境に付加する場合、その安全性について議論することはきわめて重要である。

地球生命にとっての環境の安全性は、その遺伝子との適合性という観点から次のように整理することができる[大橋,2003]。地球生命は、その種が進化的適応を遂げた環境の構造に適合し、鍵と鍵穴のようにぴったり合った活性を〈本来〉の活性として保有していると考えられる。よって〈本来〉の環境では、〈本来のプログラム〉だけでストレスフリーに生きていくことができ、それは生命にとって最も安全性が高い。それに対して、生命の棲む環境がその本来の環境とずれている時にはさまざまな環境不適合が生じ、それが発生させる〈ストレス〉が引金を引いて、遺伝子の中に準備されている〈適応のプログラム〉を立ち上げて生存をはかる。しかし、適応には限界があり、あらゆる適応のプログラムを動員しても適応が実現できないほど生命と環境との不適合が著しくなったときには、〈自己解体プログラム〉というものを発現させ、自ら生命を終結に導くとともに、その体を、他の生命による再利用に適した共通部品に自ら分解するという現象（プログラムされた自己解体）が見出されている[大橋ら, 1987]。このような高度に不適合な環境が、生命にとって最も危機的といえる。このように、地球生命は〈本来〉、〈適応〉、〈自己解体〉という三つのモードのいずれかをとり、そのなかの〈本来〉のモードで生存しているときがもっとも安全・健康・快適で、ストレス、コスト、リスクが少ないと考えられている。

こうした知見からすると、人類という生物にとってもっとも適合性が高い環境すなわち〈本来〉の環境とは、人類の遺伝子が形成された環境にほかならず、そうした環境の音環境こそが人類にとって最も高度に安全性が保証された音環境と考えられる。人類の誕生の地についてはさまざまな学説・論争を経て、約 700 万年前と推定される人類最古の化石サヘラントロプス・チャデンシスがアフリカ中部のチャド共和国で発見された [Brunet et al, 2002] ことが決定打となり、現在ではアフリカ熱帯雨林環境が人類誕生の地と考えられている。人類の遺伝子は、オランウータンの祖先から数えると 2000 万年以上、熱帯雨林のなかで進化して今日に至っていると考えられる。現生人類の誕生は、アラン・ウィルソンら、宝来聰らのミトコンドリア DNA 解析によって、14 万 3000 年前±1 万 8000 年と推定され、さらに、ホモ・サピエンス・サピ

エンス最古となる約 16 万年前の化石がエチオピアで発掘されていることから、およそ 16 万年前ごろと考えられている。現生人類の出アフリカは 7 万から 5 万年前とされ、さらに農耕牧畜の開始は 1 万 2 千年くらい前、農耕牧畜の開始を契機として第二次産業、第三次産業へとライフスタイルを急激にかえていったのは、1 万年以内に過ぎない。人類が超高周波成分をほとんど含まない都市型環境のなかに進出していったのはたった数千年前であり、人類を含む大型類人猿が熱帯雨林環境で遺伝子を形成した 2000 万年という長さからみると、圧倒的に短い。すなわち、人類の遺伝子が形成された〈本来〉の環境である熱帯雨林の音環境は、現生人類の脳機能と高い適合性を有すると考えられる。むしろ、第 4 章で述べたように、現代都市あるいは鉄道空間の音環境が、熱帯雨林環境の音環境と大きく隔たった人類にとって未曾有の人工的音環境を形成していることが人間の健康な生存に負の影響を及ぼしていないかを真剣に吟味すべき状況に立ち至っていると考えられる。

この観点からこの研究のアプローチを見てみると、実験には熱帯雨林で録音された自然由来の高周波成分を用いており、それは、人類の遺伝子レベルでみる限り、音環境に新たに何ものかを付け加えるのではなく、現在の都市の音環境から欠落している情報を回復させ、音環境を本来の状態に修復する取り組みと見ることができる。しかも、超高周波を再生する音圧レベルは、熱帯雨林での録音時を上回ることはないレベルに設定している。さらにこの音源は、市街地の音環境演出というかたちですでに 7 年以上にわたって使用され、問題や苦情の発生がないことが実績によって確認されており[仁科,2013]、少なくともこの音源由来の超高周波を加えることによる副作用は報告されていない。以上により、この研究で用いた音源は、高度な安全性をそなえていると考えられる。

もちろん今後、これまで見落とされていた負の生理的・心理的影響が見出される可能性は皆無ではないため、常に慎重な検討が継続される必要があることはいうまでもない。一方、齧歯類をもちいた動物実験、入院病棟等の医療施設での応用研究など、医学・生理学領域でのハイパーソニック・エフェクト研究が進められており、その研究の進展にも期待したい。

なお、この研究で用いた超高周波成分と紛らわしいものとして、人類の可聴域上限近傍の周波数帯域の音、いわゆる「モスキート音」がある。可聴域上限近傍の周波数

の合成音を大音量で発生する装置が、若者撃退装置、鼠撃退機などとして商品化されている。例えば、英国コンパウンド・セキュリティ社の商品 MT4 の日本仕様では、17.6 kHz の音が最大 104dB で出力可能とされている。実測により、18 kHz～19 kHz 程度の周波数の正弦波が 100dBSPL を超えるほどの高いレベルで再生されていることが報告されている[葦原, 2009、上田ら, 2013]。聴覚が敏感な若年者にはこうした周波数帯域の空気振動は音として知覚されることが知られており、より高齢の実験参加者にも不快感を誘起していることが報告されている[上田ら, 2013]。このようにモスキート音は、知覚領域の現象であるのみならず、自然界にもともと存在しない合成音である点で、ハイパーソニック・エフェクトとは本質的に異なることに注意を要する。

7.5. 公共性空間への応用にむけての成果

この研究成果を鉄道の騒音環境改善に応用する上での意義について考察する。

7.5.1. 公共性空間で現在行われている騒音対策・音演出と本研究との相違

この研究は、不快感が指摘される駅ホームや車両内の音環境を改善・快適化するために、原因をなす音を特定してそれを取り除いたり減弱させたりするこれまでの研究アプローチと基本的に異なる原理に基づく。可聴域を超える高複雑性超高周波を駅ホームや車両内空間に放出して、そこに所在する利用者にハイパーソニック・エフェクトを発現させ、報酬系を含む基幹脳活性を賦活して音に対する感受性をモデュレートすることにより、そうでない条件下では不快に感じていた環境音を快適なものと感じさせて問題を解決しようという、従来にない新しい発想に立つものである。

ここでハイパーソニック・エフェクトを発現させるうえで決定的役割を果たしたのは熱帯雨林自然環境音から抽出した安全性の高い超高周波成分であり、音として聴こえる成分はあらかじめ取り除かれている。そのため、これを駅ホームや車両内で呈示しても、騒音レベルが上昇したり、サイン音（発車ベル、アナウンスなど）として機能している他の音の伝達を妨げるといった問題は発生しない。この点で、この手法は、騒音環境の音環境改善手法として適合性が高い。

さらに、音として知覚されない超高周波成分は、可聴音に対するような個人の好き・嫌いの反応を導くことがまったくないことは重要である。従来、公共空間において何らかの音を再生付加することにより音環境造成を行う場合、音や音楽に対する個々人の嗜好が大きく異なるため、この嗜好の個別性によって、社会集団レベルにおいて普遍性が認められるような、いかえれば統計的有意性を持つようなポジティブな効果を導くことは極めて困難とされていた。それに対してこの研究では、熱帯雨林環境音の可聴域成分をあらかじめ除外し、音として知覚できないゆえに何人にも好き・嫌いの反応を導くことのない超高周波成分だけを抽出して公共空間に供給することによって、不特定多数の人々にハイパーソニック・エフェクトを発現させ、快適性を向上させることに成功した。特に、イヤフォンから個人ごとに好みの音楽を別個に供給しながら、聴こえない超高周波成分を体表面に供給することによって、個々人の個別的嗜好を満足させながら、不特定多数の人々にハイパーソニック・エフェクトを発現させて快適化を導きうるということが確かめられた。このような知覚できない超高周波成分の効果を活用する音環境快適化手法は、従来困難視されていた人間の心理反応の個別性と生理反応の普遍性とを矛盾なく両立させ、相乗効果をももたらす合理的方法であり、不特定多数の人々が利用する公共空間の音環境改善手法として高い適合性、応用性を有すると考える。

前項で述べたように、騒音環境においてもハイパーソニック・エフェクトを発現させるうる安全性・汎用性のある音源——熱帯雨林環境音から抽出した超高周波成分——が得られたことは、今後の研究応用上、きわめて価値が高いと考えられる。これを用いることによって、これまでの、「静穏な実験室」における「快適な音楽や環境音」をもちいた実験から一步踏み出した応用の展開が可能になると期待されるからである。

7.5.2. 実装手法の成果

この研究を実現可能ならしめた手法上の成果のうち、とくに重要な点について述べる。まず、駅ホームや車両内の環境音を仮想的に実現するために、実際の駅ホームや車両内の環境音を超高精度で収録・編集して、臨場感の高い仮想音環境を実験空間内に造成する手法を開発した。この手法は、実在空間での実証実験が困難な条件をもつ現象の評価実験に応用可能であり、今後、大きな有用性を発揮すると期待される。

また、こうして構築したリアリティの高い音空間に調和した状態で超広帯域に及ぶ超高周波成分を高忠実度で再生呈示するシステムを構築した。コンテンツに含まれている超高周波成分を損なうことなく広い空間に再生することには、従来から大きな困難が伴っており、それを今回、解決しうるシステム設計を実現することができた。

さらに、駅ホームや車両内の音環境快適化のためのコンテンツ開発手法、すなわち熱帯雨林環境音からハイパーソニック・エフェクト誘起に必須の超高周波成分を抽出した〈ハイパーソニック・シャワー〉の開発、そして可聴域成分しか含まれていない現状のアナウンス・発車ベルにこれを付加して〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉を開発する方法も確立した。

これらの手法は、この研究の成果を実用化に結び付ける上で有用性が高いと考えられる。

7.6. 今後の課題

最後に、この研究では検討が及ばなかった問題やこの研究によって新たに見出された基礎論上の研究課題、そして、鉄道空間をはじめとする騒音環境に超高周波振動発生装置を実装する上での技術的課題について述べる。

まず、この研究では検討が及ばなかった問題として、同一実験参加者の反応が異なる実験条件下でどのように変化しているかの検討、年齢差や性差に注目した検討が挙げられる。また、より長時間の音呈示や超高周波成分の呈示レベルを増減させた実験、音呈示順序を入れ替えた呈示実験などを行うことにより、さらに有用な知見が蓄積される可能性がある。今後、こうした検討がなされることによって、さらに精密な知見が得られると考えられる。

また、この研究によって新たな興味深い研究課題が見出されたことも重要と考える。超高周波成分を騒音環境に付加呈示することによって、「雰囲気不快でない」「疲れなかった」など、音以外の環境質に対しても好感度が高まることを見出された。こうした特定の感覚に限定されない独特の全方位的な効果について、大橋は、報酬系神経経路の活性化による〈好感度・高評価脳機能の増幅〉と名付けている（大橋，2013）。ハイパーソニック・サウンドによるハイパーソニック・エフェクトの発現が音以外の感覚性情報に対してどのような効果を及ぼすか、知見の蓄積が期待される。

さらに、この研究では、超高周波成分を騒音環境に付加呈示することによって、音および環境質全体に対する好感度の高まりとともに不快感の緩和が見出された。ザトーレらは、音楽を聴いていて感動が得られているときに脳の報酬系すなわち中脳、前頭葉、前帯状回などで神経活動が高まるとともに、扁桃体など負の情動に関わる脳の〈懲罰系〉の活性が抑制されることを見出している[Blood et al.,2001]。この研究で見出された不快感の緩和は、ザトーレらの見出した懲罰系の活性の抑制と関連があるのかもしれない。脳イメージング等によって検討されることが期待される。

さらにまた、超高周波成分を付加することによりアナウンスが聴き取りやすくなるなどの認知機能の向上が示唆された。鈴木らは超高周波成分を含む音楽を聴取した後は認知テストの正答率が高まることを報告している[鈴木ら, 2012]。これについてより詳細な知見が得られるならば、輻輳するさまざまな音情報のなかでも必要な音情報を瞬時に明瞭に伝達する必要性の高い環境への応用など、ハイパーソニック・エフェクトの応用領域がいつそう広がるものと展望される。

可聴音と起源を異にする超高周波成分の付加によってハイパーソニック・エフェクトがもたらされたことについても、さらなる吟味が期待される。この現象が、この研究で用いた音試料固有の効果なのか、それ以外の音試料でも同様の効果が得られるのか、そしてどのような構造をもつ音ならばこの効果が得られるかは、重要な研究課題といえる。第2章で述べたハイパーソニック・エフェクトを発現させる音の詳細な構造の分析やその発生源の研究とあわせて、解明の進展が期待される。

実用化を視野に入れた場合、解決すべき課題は少なくない。可聴音との関係において超高周波成分をどのような強度で、どのような時間長で付加呈示するのが効果的かつ安全であるか、多数の人々が空間に所在することによる超高周波成分吸収の影響はどうか、移動する利用者に対する効果はどうか、などについて、さらに検討を続けていきたい。また、ハイパーソニック・サウンドを能率よく広い指向性で再生する再生端末は、現状ではかなり高価にならざるを得ない。現実的な価格の再生端末の開発やそれらの配置設計、端末への超高周波を供給するシステム設計、それらに搭載するコンテンツ制作など、実装のための開発課題も存在している。それらについて引き続き取り組んでいきたいと考えている。

第8章 結論

序論で述べたように、多数の列車が発着し大勢の人々が行き交う駅ホームをはじめとする鉄道空間は、列車走行に伴う音、利用者の発する声をはじめとするさまざまな音、アナウンスや発車ベル（チャイム）など多様な音が重畳して存在し、その音環境は不快・劣悪であると指摘されて久しい。この不快感を引きおこす要因として従来、「音の大きさ」が注目され、「音の発生そのものを抑制」しようとする音源対策、「発生した音を減らす」ための遮音・吸音対策などが徹底して進められてきた。しかしその効果は限界に近づいている。その上、まったく同一のアナウンスや発車ベル音が、ある人にとっては大きすぎてやかましい一方、別の人には小さすぎて聞き取れないといった矛盾した反応を導くことも少なくない。こうした矛盾を抱え、限界にまで抑制に努めながらなお不快感の著しい鉄道騒音の対策には、新たなアプローチが求められている。

この研究では、脳科学の新しい知見を応用して、鉄道騒音をさらに「減らす」のではなく、知覚限界を超える高複雑性超高周波を環境に「加え」て基幹脳を賦活しハイパーソニック・エフェクトを発現させることにより、あるがままの鉄道騒音をより快適に知覚させ、よって鉄道の騒音環境改善に寄与できるのではないかという作業仮説を立て、生理学・心理学双方の指標を使ってこれを検証することを試みた。人間の感覚感性を司る基幹脳のハイパーソニック・サウンドによる賦活が、視聴覚をはじめとする感覚感性情報総体に対する好感度・高評価脳機能を増幅する効果をもつことに着目したのである。

そのために、熱帯雨林環境音から可聴音を取り除いた知覚限界を超える高複雑性超高周波成分を用いて、〈ハイパーソニック・シャワー〉や〈ハイパーソニック・アナウンス／発車ベル〉といった超高周波成分供給手法を開発し、これらの手法によって供給される超高周波成分によって鉄道騒音下にある人間の基幹脳活性を賦活することに成功し、まったく同一の可聴音であるにもかかわらず、それをより快適なものと感じさせて問題を解決できる可能性を見出した。騒音環境下におけるハイパーソニック・エフェクトの発現、そして、可聴音と起源を異にする超高周波成分によるハイパーソニック・エフェクトの発現は、この研究が初めて本格的に見出した知見である。また、

この研究における実験を実現するために開発した音試料と再生システムは、実在の鉄道空間に実装する音源やシステムのプロトタイプとなりうる水準に近いといえる。

いまやハイパーソニック・エフェクト研究には、次々と明らかになる基礎的研究成果を、現実社会の問題解決に応用することが求められている。それは、この研究のブランドデザインが、現代科学技術文明社会が喪失した自然性の高い環境情報を、最先端の科学技術を駆使して現代社会によみがえらせ、現代文明の病理を克服することに貢献しうる可能性をもっているからである。ハイパーソニック・サウンドによって活性化される基幹脳ネットワークの中には、快適感や共感などを生み出すとともに、感覚を鋭敏化し覚醒水準を保ってヒューマンエラーを防止する働きを持つ神経組織が含まれている。さらに、うつ・自殺・暴力をはじめとする精神と行動の異常、認知症、がんを含む生活習慣病など、その機能の低下が広いスペクトルをもった現代病の原因となる神経組織が集中して含まれている。このような部位の活性を「薬品」ではなく「情報」によって改善するハイパーソニック・エフェクトの社会応用は、心の豊かさの増進と現代病の防御を導き、健康・快適・安全・安心な社会の構築に大きく貢献することが期待されている。薬物をまったく使わないため副作用がなく、しかも薬物に劣らない作用を発揮するこのような独特の効果をもつアプローチは、これまでの生理学・医学領域ではまったく知られていない。

こうした特徴をもつハイパーソニック・エフェクト研究は、医学領域などでいう〈トランスレーショナル・リサーチ（橋渡し研究）〉としての性格を有していることも指摘しておきたい。医学や生物学などの有望な基礎研究成果を応用に橋渡しする研究は、平成18年の「第3期科学技術基本計画」などでもその重要性が謳われている。そこでは、倫理的な妥当性や安全性の確保が重要視される。また臨床応用に当たっては、被験者の権利が十分に尊重され、説明責任が果たされなければならない。さらに、応用に先立って、知的財産権の確保についても適切な措置がなされる必要がある。これらの課題を効率的・効果的に解決して実用化に結びつけるためのプロセスを一体的に視野に入れた開発戦略が必要となっている。

ハイパーソニック・エフェクトを鉄道騒音環境の改善に応用しようというこの研究は、トランスレーショナル・リサーチの一連のプロセスと一致する部分が多いことを念頭において進めた。すなわち、まずハイパーソニック・エフェクトという基礎研究の知見に

着目し、これを実在の鉄道環境で応用することを構想した。そして、実験室、駅臨時ホーム、試験車両など再現性のある実験が可能な空間に実験環境を設定し、生理学的指標および心理学的指標をもちいた厳密な実験を重ねて、安全性・実現性に配慮しつつ、応用に必要な知見を蓄積した。ハイパーソニック・エフェクトを鉄道環境に応用するためには、ここに述べた研究結果だけで十分ではないことはいうまでもない。しかし、この研究は、ハイパーソニック・エフェクトという基礎的研究成果を実用に結び付けるトランスレーショナル・リサーチとして一定の有効性を実証し、その実用への道筋をつけることができたと考える。

鉄道をはじめ、騒音低減に限界の大きい都市の騒音環境では、騒音の音量そのものを減らす対策とともに、さらに新しい問題解決のアプローチが待望されている。この研究の成果は、鉄道環境の音環境改善にとどまらず、音環境の改善が求められている都市環境のさまざまな局面にも少なからず貢献できるものと考ええる。

第9章 謝 辞

この研究にあたり、主任指導教員として機材の取扱いから実験の準備・実施・解析に至るすべてにわたりご懇切なご指導を賜りました総合研究大学院大学文化科学研究科メディア社会文化専攻 仁科エミ教授に深く感謝申し上げます。同じく指導教員としてさまざまな視点からご指導を賜りました広瀬洋子教授、近藤智嗣准教授に深く感謝申し上げます。また、本論文の審査委員長として貴重なご指導を賜りました山田恒夫教授をはじめ、数々のご懇切なご助言を賜りましたメディア社会文化専攻の諸先生方に感謝申し上げます。外部審査委員である東京大学工学部都市工学科 小出治教授、国立精神・神経医療研究センター神経研究所疾病第七部 本田学部長にも、多くのご示唆をたまわりました。篤く御礼申し上げます。

実験の実施およびデータ解析にあたり、公益財団法人国際科学振興財団 河合徳枝博士、東京成徳短期大学 八木玲子博士、故森本雅子博士、放送大学 福島亜理子博士、四日市大学 前川督雄博士、国立精神・神経医療研究センター神経研究所 上野修博士ほかのみなさまには、多大なるご協力と絶大なご支援をいただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。また、研究の枠組みの構築から貴重な音源の提供をはじめ、研究全体を通じて多くのご助言とご指導を賜りました公益財団法人国際科学振興財団 大橋力博士に、衷心から深謝申し上げます。あわせて実験参加者の皆様に御礼申し上げます。

東日本旅客鉄道株式会社お客さまサービス部在籍中に、社会人学生としてこの研究を志して以来、温かく見守り、後押ししてくださった見並陽一元常務取締役をはじめ、お客さまサービス部、サービス品質改革部の上司ならびに同僚の皆様に、深く感謝申し上げます。特に、この研究について深いご理解を賜り、実験実現にむけ絶大なご支援を賜りました澤本尚志常務取締役（前サービス品質改革部長）、阪本未来子サービス品質改革部長、中川剛志フロンティアサービス研究所上席研究員、そのほか実験実施にご協力いただきました関係部署の皆様に心から御礼申し上げます。また、博士号取得にむけて激励くださった石塚哲夫フロンティアサービス研究所長、この研究にご理

解を賜り成果の応用にむけてご尽力くださっている溝部達也サービス品質改革部次長に心から感謝申し上げます。

最後に、入学以来さまざまなご支援を賜りました文化科学研究科メディア社会文化専攻 太田美佐子様、在学中研究生活をともにした学生の皆様、そして大須理英子博士はじめ、書き尽くせないご支援をいただいた多くの友人に心から感謝申し上げます。

第10章 文 献

安部由布子, 水上直樹: 人間の不快感と相関の高い車内騒音の評価手法, 鉄道総研報告 24-11, 41-46(2010)

安部由布子, 鈴木綾子: 車内音に対する印象評価の分析, 鉄道総研報告 27-3, 5-10 (2013)

蘆原郁: 身のまわりにある超高周波音の実態調査, 日本音響学会誌 65-1, 23-28 (2009)

Azuma K, Morita A, Mizoguchi A: Upper limit Frequency of Bandwidth for Audio Signal Transmission, Proceeding of Autumn Meeting, Acoustic Society Japan, 323-324 (1982)

Blood, A. J., Zatorre, R.J.: Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward emotion, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 98, 1181-11823 (2001)

Brunet, M. et al.: A new hominid from the Upper Miocene of Chad, Central Africa, Nature, 418, 145-151 (2002)

CCIR: Subjective assessment of sound quality, CCIR Recommendation, 562 (1978)

Duffy, F.H., Burchfiel, J.L., Lombroso, C. T: Brain electrical activity mapping (BEAM), A method for extending the clinical utility of EEG and evoked potential data, Ann Neurol. 5, 309-321 (1979)

長倉清: 鉄道騒音問題の現状と展望, 日本音響学会誌 64-10, 624-628 (2008)

濱口雅義, 薄田常雄, 橘秀樹, 藤井光治郎, 横山栄, 伊積康彦: 駅空間の音環境評価法に関する研究 その1 駅コンコースにおける音響特性実測結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 39-40 (2000)

本田学: ハイパーソニック・エフェクトの脳科学——美と快の脳イメージングが拓いた新しい音世界, 科学 83-3, 328-340, 岩波書店 (2013)

本田学: 脳に安全な情報環境をつくるウェアラブル基幹脳機能統合センシングシステム, 安全安心な社会を実現するための先進的統合センシング技術の創出, 独立行政法人科学技術振興機構, 235-250 (2013)

伊積康彦, 藤井光治郎, 野口祐司, 鈴木浩明, 藤浪浩平, 川崎たまみ: 駅コンコースの快適性に関する実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 40470, 963-964 (2004)

伊積康彦, 薄田常雄, 藤井光治郎: 駅の音環境実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 107-108 (1998)

伊積康彦, 藤井光治郎, 佐藤隆: 駅空間の音環境評価法に関する研究 その2 地下コンコースの音響特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 93-94 (2001)

伊積康彦, 藤井光治郎, 佐藤隆: 駅空間の音環境評価法に関する研究 その3 地下ホームの音響特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 197-198 (2003)

伊積康彦, 佐藤洋, 佐藤隆, 佐藤逸人, 森本政之: 駅空間の音環境評価法に関する研究 その4 吸音処理が物理的及び心理的環境に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 297-298 (2007)

河合徳枝, 大橋力: ハイパーソニックの光景, 科学 83-3, 290-295, 岩波書店 (2013)

北川敏樹, 長倉清: 鉄道騒音における伝搬系対策, 日本音響学会誌 68-12, 622-627 (2012)

Maekawa T, Honda M, Nishina E, Kawai N, Oohashi T: Structural complexity of sounds necessary for the emergence of the hypersonic effect: Estimation of autocorrelation order, , Asiagraph Journal Vol.8, No.2, 35-40 (2013)

May, D. N.: Handbook of Noise Assessment, Van Nostrand Reinhold Company (1978)

三宅晋司, 田中豪, 斉藤和雄: 不快音の脳波に及ぼす影響, 日本衛生学会誌 39-2, 523-534 (1984)

宮坂栄一: 高周波音の知覚について, 日本音響学会誌 55 巻, 569-572 (1999)

森本雅子, 仁科エミ, 不破本義孝, 河合徳枝, 八木玲子, 大橋力: 人工的加工音と自然音が脳に及ぼす影響のちがいについて, 日本バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集, 320-323 (1997)

森本雅子, 仁科エミ, 不破本義孝, 河合徳枝, 八木玲子, 大橋力: 音の現実感と脳電位の過渡的变化, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 3-1, 21-28 (1998)

Morimoto M, Nishina E, Yagi R, Kawai N, Nakamura S, Honda M, Maekawa T, Oohashi T: Transcultural study on frequency and fluctuation structure of singing voices, Proceedings of the 18th International Congress on Acoustics, I-493-494 (2004)

森本雅子, 本田 学, 河合徳枝, 仁科エミ, 八木玲子, 前川督雄, 大橋力: ハイパーソニック・エフェクト誘起音源解析のためのスペクトルアレイ分析法について, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 735-736 (2006)

Muraoka T, Yamada Y, Yamazaki M: Sampling-frequency consideration in digital audio, Journal of Audio Engineering Society 26, 252-256(1978)

Nakamura S, Sadato N, Oohashi T, Nishina E, Fuwamoto Y, Yonekura Y : Analysis of music-brain interaction with simultaneous measurement of regional cerebral blood flow and electroencephalogram beta rhythm in human subjects, Neuroscience Letters 275, 222-226 (1999)

中村聡, 仁科エミ, 八木玲子, 森本雅子, 河合徳枝, 大橋力: ハイパーソニック・エフェクトを応用した屋内音環境改善効果の検討——ハイパーリアル・エフェクトの研究 (II), 2003年日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 723-724 (2003)

Nakamura S, Honda M, Morimoto M, Yagi R, Nishina E, Kawai N, Maekawa T, Oohashi T: Electroencephalographic evaluation of the hypersonic effect, Society for Neuroscience Abstract, 752.1 (2004)

Nakamura S, Morimoto M, Nishina E, Yagi R, Kawai N, Honda M, Maekawa T, Oohashi T: Frequency and fluctuation structure of various environmental sounds, Proceedings of the 18th International Congress on Acoustics, V-3459-3460 (2004)

中野有朋: 騒音問題と関わって 50 年あまり, 騒音制御 37-1, 44 (2013)

難波 精一郎: 音の受け取り方に及ぼす様々な要因, 騒音制御 32-3, 152-157, 日本騒音制御工学会 (2008)

Nicholls J.G, Martin A. R, Paul A. F, David A. B, Mathew E. D, David A. W: From Neuron to Brain, 27-42, Sinauer Associates (2001)

日本音響学会編：新版音響用語辞典，コロナ社（2003）

仁科エミ，大橋力：情報遮閉性居住空間における音環境の生理的影響に関する基礎的研究，第26回日本都市計画学会学術研究論文集，367-372（1991）

仁科エミ，八木玲子，森本雅子：民族音楽における非記号・非知覚構造--モンゴルの伝統的歌唱法ホーミーを事例として，民族芸術 17，138-143（2001）

仁科エミ，河合徳枝：癒しの音楽としてのガムラン，民族芸術 21，169-175（2005）

仁科エミ，大橋力：超高密度高複雑性森林環境音の補完による都市音環境改善効果に関する研究—脳波、血中生理活性物質、主観的印象評価の組み合わせによる評価，日本都市計画学会都市計画論文集，No.40-3，169-174（2005）

仁科エミ，大橋力：ハイパーソニック・エフェクトを応用した市街地音環境の改善とその生理・心理的効果の検討，日本都市計画学会都市計画論文集，No42-3，139-144（2007）

仁科エミ：ハイパーソニック・エフェクトの発現メカニズムに関する研究の進展，日本音響学会誌 65-1，40-45（2009）

Nishina E, Morimoto M, Fukushima A, Yagi R: Hypersonic sound track for Blu-ray Disc “AKIRA”, Asiagraph, Vol.4 No.1, 53-58（2010）

仁科エミ：文明の病理と本来・適応・自己解体，科学 83-3,304-310，岩波書店（2013）

小野寺英子，河合徳枝，仁科エミ，八木玲子，大橋力：駅ホーム環境音の広帯域周波数パワースペクトル分布の検討，日本建築学会学術講演梗概集，40168，361-362（2011）

小野寺英子，仁科エミ，中川剛志，八木玲子，福島亜理子，河合徳枝，大橋力，公共交通機関における音環境改善のための予備的検討，日本音響学会 2012 年秋季研究発表会講演論文集，1067-1068（2012）

小野寺英子, 仁科エミ, 中川剛志, 八木玲子, 福島亜理子, 河合徳枝, 大橋力, 駅ホーム音環境改善のための基礎的研究——高複雑性超高周波成分付加による印象改善効果について, 日本音響学会 2013 年春季研究発表会講演論文集, 1119-1120 (2013)

Onodera E, Nishina E, Nakagawa T, Yagi R, Fukushima A, Honda M, Kawai N, Oohashi T: New technology toward improving the acoustic environment of passenger railway cars, An application of the hypersonic effect, *Asiagraph* 7-1, 81-90 (2013)

小野寺英子, 仁科エミ, 中川剛志, 八木玲子, 福島亜理子, 本田学, 河合徳枝, 大橋力, ハイパーソニック・コンテンツを活用した駅ホーム音環境の快適化——高複雑性超高周波付加の心理的生理的效果について駅ホーム音環境改善のための基礎的研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 18-3, 315-325 (2013)

大橋力, 渡辺一成: 非定常音の高域制限による音質変化検知について, 日本音響学会聴覚研究会資料, H-84-42 (1984)

大橋力, 中田大介, 菊田隆, 村上和雄: プログラムされた自己解体モデル, 科学基礎論研究 68, 79-87(1987)

大橋力, 仁科エミ, 河合徳枝: 環境高周波音の生理的・心理的機能に関する“トランス誘起モデル”とその検証, 日本音響学会聴覚研究会資料, H-88-66, 1-8 (1988)

大橋力, 松尾梨江子, 仁科エミ, 渡辺典子: トランス誘起性音楽の高周波成分について, 電子情報通信学会, EA88-77, 11-15 (1989)

大橋力: 情報環境学, 朝倉書店 (1989)

Oohashi T, Nishina E, Kawai N, Fuwamoto Y & Imai H, High-frequency sound above the audible range affects brain electric activity and sound perception, *Audio Engineering Society 91st Convention Preprint* 3207,1-25 (1991)

大橋力, 仁科エミ, 小田晋, 柴崎浩, 山崎芳男, 河合徳枝, 不破本義孝: 可聴域上限をこえる高周波の生理的・心理的効果(ハイパーソニック・エフェクト)について, 研究報告 7, 1-154, 放送教育開発センター(1994)

Oohashi T, Nishina E, Honda M, Yonekura Y, Fuwamoto Y, Kawai N, Maekawa T, Nakamura S, Hukuyama H and Shibasaki H: Inaudible high-frequency sounds affect brain activity, A hypersonic effect, Journal of Neurophysiology 83, 3548-3558 (2000)

大橋力, 河合徳枝, 本田学, 中村聡, 仁科エミ, 八木玲子, 森本雅子, 前川督雄: ハイパーソニック・エフェクトの生理学, AES 東京コンベンション 2003 予稿集, 94-97 (2003)

大橋力: 音と文明—音の環境学ことはじめ, 岩波書店 (2003)

Oohashi T, Kawai N, Nishina E, Honda M, Yagi R, Nakamura S, Morimoto M, Maekawa T, Yonekura Y, Shibasaki H, The role of biological system other than auditory air-conduction in the emergence of the hypersonic effect, Brain Research 1074-1074, 339-347(2006)

大橋力: ハイパーソニック・エフェクトへの招待, 科学 83-3, 296-301, 岩波書店 (2013)

Oohashi T. : Personal Communication(2013)

Plenge G.H., Jakubowski H.,Schone P: Which bandwidth is necessary for optimal sound transmission, Proceeding of 62nd Audio Engineering Society Convention , 1449 (1979)

Sato Y, et al.: An objective evaluation of anxiolytic effect of music for surgical patients Masui 32, 1206-1211 (1983)

鈴木和憲, 川勝真喜: 休憩時に聞く楽曲に含まれる超音波の有無が認知活動へ与える影響, 日本音響学会 2012 年秋季研究発表会講演論文集, 1253-1254 (2012)

荘美和子, 木村翔, 唐沢亮: 商業空間の音環境に対する利用者意識に関する研究, 日本建築学会計画系論文集.519, 9-15 (1999)

外山直也, 藤井光治郎, 伊積康彦, 山本昌和: 駅空間の総合快適性評価に関する研究 その1 視環境と音環境が総合快適性評価に与える影響について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 937-938 (2005)

外山直也, 藤井光治郎, 伊積康彦, 山本昌和: 駅空間の総合快適性評価に関する研究
その2 温熱環境が総合快適性評価に与える影響について, 日本建築学会大会学術講演
梗概集, 875-876 (2006)

上田麻理, 高橋弘宜, 太田篤史: 公共空間における高周波音の実態調査-その2 暴露空
間近傍勤務者の反応, 2013年日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 1115-1118
(2013)

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
14, 24-30(1976)

渡辺雅彦: みる見るわかる脳・神経科学入門講座改訂版 前編・後編, 羊土社(2008)

Yagi R, Nishina E, Honda M, Oohashi T: Modulatory effect of inaudible
high-frequency sounds on human acoustic perception, *Neuroscience Letter* 351,
191-195 (2003)

八木玲子: ハイパーソニックは体のどこから受容されるのか—受容経路と二次元知覚
モデル, 科学 83-3, 316-327, 岩波書店 (2013)

八木玲子, 中村明一, 仁科エミ: 〈江戸の音〉の超知覚構造—「98尺八の響きを対
象として, 民族藝術 27, 110-115 (2011)

山本克也: 鉄道車両の車内騒音の低減方法, 騒音制御 31-5, 368-373 (2007)

山本剛夫, 高木興一, 平松幸三: 騒音の科学, 海青社(1990)

Yamasaki Y: Signal Processing for Active Control - AD/DA Conversion and High
Speed Processing. In *International Symposium on Active Control of Sound and
Vibration*. 21-32 (1991)

Yamasaki, Y.:United States Patent No. 5351048, (1991)