

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月20日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22241040

研究課題名（和文） 公共空間における安全確保のための音響情報伝達に関する研究

研究課題名（英文） A study on transmission of acoustical information to ensure the safety in public spaces

研究代表者

橘 秀樹（TACHIBANA HIDEKI）

千葉工業大学・附属総合研究所・教授

研究者番号：80013225

研究成果の概要（和文）：公共空間における音響情報の伝達について、音源の設計（音声合成、サイン音設計）、伝送系に関する検討（電気音響システム、音環境・伝搬系）、情報を受け取る人の知覚に関する検討（聴覚・認識）に整理し、包括的に多くの研究を進めた結果、公共空間における音響情報の明瞭性向上のための研究システムについて、そのプロトタイプを構築するに至った。

研究成果の概要（英文）：A series of studies on transmission of acoustical information in public spaces have been performed on the basis of a comprehensive framework for the information transmission system in public spaces. The framework consisted of five parts, which were 1: speech synthesis, 2: sign-signal design, 3: electro-acoustic system, 4: sound environment and acoustical transmission characteristics in public spaces and 5: auditory perception and cognition. As a result, a prototype of the simulation system for ensuring intelligibility of acoustical information has been established.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	23,900,000	7,170,000	31,070,000
2011年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2012年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
総計	35,500,000	10,650,000	46,150,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、社会システム工学・安全システム

キーワード：公共空間、安全性、避難誘導、防災行政無線、明瞭性、サイン音、発話速度、音声強調

### 1. 研究開始当初の背景

我々は2005年度より音響情報フロンティアセンターを学内に組織し、音の情報性・文化性・福祉性・安全性・快適性について議論を重ねてきた。その中で、音響情報による安全確保の手法の開発が一つ喫緊の課題としてあげられた。また、2008年（本助成の申請をした前年）は、都市部で集中豪雨が多数発生し、“ゲリラ豪雨”という呼称が一般に広く使用されるようになった年である。不特

定多数の人々が行き交う公共空間では音の情報性が極めて重要であり、安全性の確保のためにも確実な音響情報伝達の実現の必要性を強く認識し、本助成の申請に至った。申請が採択された年度（2010年度）の末には、3.11 東日本大震災に見舞われたことは記憶に新しい。

### 2. 研究の目的

公共空間では、平常時の案内アナウンスな

どの明瞭な音声情報伝達はもとより、非常災害時には、視覚情報と同時に音声あるいはサイン音による警報・避難誘導情報の正確な伝達が必要である。しかし、実際には背景騒音や空間の残響などの影響によって音響信号による的確な情報の伝達が困難となっているケースが少なくない。このような問題を解決するために、各種アトリウム、地下街、トンネルなどの公共空間を対象とし、その内部の音響伝達特性や背景騒音を考慮するとともに、音源信号となる音声やサイン音について検討することとした。また、音響信号を発信するデバイスや音響情報を受容する人間の聴覚特性を考慮することにより、様々な公共空間に適応可能な、情報を音響信号として正確かつ効率的に人間に伝達可能なシステムについて総括的に研究を行った。

### 3. 研究の方法

本研究の特色は、音の重要な属性のひとつである情報性に着目し、都市空間における安全性確保のために、音声学、聴覚生理・心理学、環境音響工学（建築音響、騒音制御）、電気音響・デジタル信号処理工学などの音響関連諸分野を統合して研究することにある。幸い、我々の研究グループは上記の各分野を専門とする者の集まりであり、各自の知見ならびに研究実績を活かして共同研究体制を組むこととした。すなわち、本研究を構成する各専門分野における最新の研究情報を横糸とし、それを安全性確保の目的を縦糸として有機的に研究を進めることとした。具体的には、本研究の内容を音響情報の伝達に関して大別すると、音源の設計（音声合成、サイン音設計）、伝送系に関する検討（電気音響システム、音環境・空間伝搬系）および情報を受容する人間の聴覚・心理に関する検討（聴覚・認識）となる中、(1) 音声合成、(2) サイン音設計、(3) 電気音響システム、(4) 音環境・伝搬系、(5) 聴覚・認識、の5つに分担し、互いに連携をとりながら研究を遂行した。

### 4. 研究成果

#### (1) 音声合成

残響のある公共空間等において災害が発生した場合、避難誘導のためのアナウンス音声聞き取りにくくなる問題がある。アナウンス音声を音声合成器により合成することで、ポーズ挿入や話速の制御や信号処理を適応的に行えるようになり、耐残響性を向上できる可能性がある。そのための方法として、3 種の方法（適応的ポーズ挿入法、話速制御法、合成音声への信号処理法）を試みた。

#### ① 適応的ポーズ挿入法

残響下における音声の明瞭度の低下は主として過去に発生された音声、その残響に

よって現在の音声をマスクすることが原因である。従って、適切な長さのポーズを音声の区切りに挿入することで明瞭度の向上が期待できる。ここでは、先行音声の発話が終了した後の時刻を  $t=0$  とし、後続音声の継続長  $N$  の窓をスライドさせながら残響信号を切り出して測定したエネルギーを残響エネルギー  $R(t)$ 、後続音声のエネルギー  $S$  との比を  $SR$  比と定義し、これが一定の閾値  $th$  以上になるまでポーズを挿入するアルゴリズムを提案した。提案方式の効果を評価するために、 $SR$  比をパラメータとしてポーズ長を制御し、最適な  $SR$  比を求める明瞭度試験を行なった。その結果、ポーズ挿入により明瞭度の向上が確認され、最適ポーズ条件があることが分かった ( $SR$  比=2dB)。また、この条件で挿入される総ポーズ長を等分して挿入した場合と比較した結果、提案法により適応的にポーズを挿入した方が明瞭度が向上した。

#### ② 話速制御法

合成音声の話速変更は、自然発話音声の話速調整とは異なり、TD-PSOLA 法により有声音部分の伸縮により行われるため、残響下での明瞭度に話速がどのように影響するかを調べ、最適な話速を求める実験を行った。話速変更には STRAIGHT を利用し、ポーズ挿入法を評価する実験で使用した試験音を話速変更したものに固定長のポーズを挿入した。明瞭度試験の結果、合成音声においては発話速度を若干早くする (0.8 倍時間) ことにより明瞭度が向上することが確認された。

#### ③ 合成音声への信号処理法

合成音声は、ラベル等の発話情報データを利用できるので、発話内容に応じた信号処理が可能である。そこで、残響下での明瞭度向上に有効な信号処理を見出すために、ピッチ周波数の調整、またスペクトル包絡の伸縮を行い、その明瞭度への影響を調査した。明瞭度試験の結果、合成音声のピッチ周波数と、スペクトル包絡を調整することにより、残響下での明瞭度が改善できることを確認した。ピッチ周波数は 1.5 倍として通常よりも高音とすることが効果的であり、スペクトル包絡は 1.1 倍として若干フォルマントを高域にシフトすることが効果的であることが分かった。原因はいずれも低域成分の相対的な減少にあると考えられる。

#### (2) サイン音設計

長い残響下で避難口への誘導にサイン音を使用する場合、どのような特性のサイン音がよいかを探索するための検討を行った。この場合、サイン音を発している音源の方向が明瞭に知覚されなければならない。一方、緊急時の注意喚起を意図したサイン音は周波数スペクトルが時間変化するスイープ音と、ピンポンで表される 2 連短音の 2 つに代表さ

れる。そこでこれらについて、どのような物理特性が適切か検討を行った。

#### ①スweep音の音像の質

400 Hz から 800 Hz までスweepする鋸波に中域残響時間約 3 秒の空間の両耳インパルス応答を畳み込んだ。無音区間長さ、スweep時間長さ、オクターブあたり一定の高域強調の 3 種の変化による音像の質の変化を調べた。その結果、最も顕著に良好な音像となったのはオクターブあたり 6dB の高域強調であり、音像の大きさが小さく方向が判断しやすいことが分かった。続いて、スweep時間長さが 0.15 s と短い方が良好な音像となった。これは音像の質を劣化させる空間の残響エネルギーが成長する前に音源が停止するためと思われる。

#### ②2連短音の音像の質

ここでは誘導音装置の警報音を基に、最適な特性を探索した。2 連短音間の無音区間長さ、波頭カットイン長さ、第 2 音の長さ、短音波形の指数減衰度、高域強調の 5 種の変化による音像の質の変化を調べた。残響には中域残響時間約 8 秒の空間の両耳インパルス応答を用いた。その結果、特に顕著に音像の質が良好になったのは高域強調で続いて波頭カットインが短く波形立ち上がり鋭いことであった。これらはいずれもサイン音の波頭の振幅が鋭く立ち上がっており、直接音が到来した瞬間の音像定位に寄与し音像の質が向上したものと考えられる。

#### ③避難誘導音としての心象性

上昇および下降の 2 連短音と同じく上昇および下降のスweep音の 4 種の音に中域残響時間約 3 秒の空間の両耳インパルス応答を畳み込み、どれが避難誘導音らしく聞こえるかを 10 個の評価語を用いて調べた。その結果、下降 2 連短音が「安全な」「安心な」「誘導音に聞こえる」という評価語に対し順位が高く、4 種の音の中では最も避難誘導音に適していることが判明した。一方、上昇スweep音は「緊張する」「せっぱつまった」という評価語の順位が高く、過度な緊張感を与えることがわかり避難誘導音には不向きであった。

### (3)電気音響システム

公共空間におけるアナウンス放送の明瞭性を改善するためのスピーカシステムについて、以下の 3 項目について検討を行った。

#### ①数値計算によるスピーカ指向性の再現性の確認

公共空間内で用いられるスピーカは設置される空間、取付け場所、サービスエリアの多様性から様々な指向特性のものが用いられる。そこで、目的に応じた指向性を持つ音源スピーカの開発手段として、数値解析手法の一つである時間領域有限差分法の適用可能性について検討を行った。まず、基礎的検

討として、一般的な形状の音源スピーカを対象とし、計算結果と実測結果の対応から指向性の再現精度を確認した。さらに複数の音源スピーカを用いた指向性の制御例として、12 面体型無指向性音源やラインアレイスピーカの指向性音源を対象とし、計算結果と実測結果の対応から音源のモデル化手法やスピーカシステムのアレイ化の効果について検討を行った。その結果、FDTD 法を用いてスピーカシステムの指向特性の数値シミュレーション方法が精度よく可能であるとの結論を得た。

#### ②残響空間における明瞭性の改善

大空間・公共空間においては残響が過大となりやすく、拡声放送の明瞭性を確保することが困難な場合がある。このような場合に、スピーカに適切な指向性を持たせることにより明瞭性の改善を行える可能性があるが、設置位置や台数など多様な条件について現場実測によって検討を行うのは困難が伴う。そこで FDTD 法により 3 次元音場内に種々の指向性音源を設置した際のインパルス応答を求め、それらの結果から明瞭性の評価指標である STI を算出し、空間全体の明瞭性の改善について検討した。体育館小アリーナ（容積 2,644 m<sup>3</sup>、残響時間 5 s）を対象にアレイスピーカを設置した場合について、数値計算および実測により検証を行い、精度よい対応が得られた。また、別途伝送系の周波数特性に着目した主観評価実験による検討として、残響室（室容積 164 m<sup>3</sup>）の残響を畳み込んだ拡声音声にハイパスフィルタをかけて低域をカットしたところ、音声の明瞭度が向上し最も良いカットオフ周波数がおおよそ 600 Hz であることが分かった。

#### ③道路トンネル内における明瞭性の改善

トンネル内の避難誘導システムでは、マルチパスエコーを避けるために連続時間遅延システムを用いている。この方式ではスピーカ後方への音波がマルチパスエコーとなるため、指向性スピーカにより後方への音の伝搬を少なくする必要がある。ここではスピーカの鋭指向性化の効果について、幾何音響理論に基づく数値計算法を用いた基礎的検討を行い、その適用可能性について知見を得た。

### (4)音環境・伝搬系

音声情報や各種サイン音が発せられて伝搬する空間の音環境や音響的諸特性に関する検討として、以下の 3 項目について検討を行った。

#### ①公共空間における拡声放送・環境音の実測調査および聴感実験

鉄道駅や空港など約 20 ヶ所の公共空間において、拡声放送を含む環境音を収録すると共に建築的条件について調査した。収集したアナウンス音について、音圧レベルおよびス

ペクトル分析を行った。また、話速（単位時間あたりの音節数）についての分析結果は、およそ4~9 syllable/sec.に分布しており、マニュアル放送は自動放送（合成音声）に比べて約1.3倍の速さであった。以上の結果から次の聴感実験を実施した。

(i)残響および背景音が音声の聞き取りに及ぼす影響についての単語／文章了解度試験では、日本人被験者群と外国人被験者群によって了解性や聞き取りにくさの程度には明らかかな差がみられ、背景音のレベルが高い場合には留学生の聞き取りの正答率が50%以下となるケースも多くみられた。

(ii)拡声放送の聞き取りにくさと暗騒音との関係についての主観評価実験では、特にマニュアル放送の場合に拡声放送が顕著に聞き取りにくい傾向がみられた。

(iii)拡声放送の話速が了解性に及ぼす影響についての主観評価実験(正答率)では、日本人では話速、残響の影響は小さいが、話速が速いほど正答率が低く、最も速い条件では正答率が73%まで下がった。留学生では全体的に正答率が低く、特に残響時間が3.0 sec.の条件では話速によらず60%前後となった。「聞き取りにくさ」では、被験者群による差が顕著であり、全体的に残響が長く、話速が速い程、聞き取りにくい結果となった。

#### ②公共空間におけるインパルス応答測定法

鉄道駅、空港ターミナルビル、地下街等における音響測定において、インパルス応答計測が可能であれば非常に有用なデータが得られる。しかしながら、日頃我々が得意として使用している Swept-sine 法のような技術は、その信号音の特殊性から使用しがたい。Swept-sine 音はサイレン音に似た信号であり、日常の恐々空間の実使用環境においては不向きである。そこで、音楽信号に Swept-sine 信号を組み込む方法、音楽信号そのものをを用いる方法（クロススペクトル法）、アンビエント音を音源としたクロススペクトル法等に関する検討を行った結果、いずれの方法においても残響時間の値を得られる程度のインパルス応答計測が可能であることが分かった。また、音場の時変の影響を考える場合には、音楽に Swept-Sine 信号を組み込む手法の有効性を見いだした。

#### ③防災行政無線の明瞭性改善のための予測・測定・評価

防災放送等の明瞭性改善を目的として、屋外音場の予測手法、測定手法、可聴化シミュレーション手法について検討を行った。その結果、予測手法として幾何音響シミュレーションにより明瞭性を低下させる一つの大きな原因となるロングパスエコーの時間特性の把握が可能であることが分かった。測定手法としては、日常定時に流れている試験放送のアナウンス信号を用いて、クロススペクトル

ル法により屋外音場の反射音構造の特徴が計測できることが分かった。また、幾何音響予測手法と6ch-3次元音場シミュレーション手法を組み合わせた、屋外音場の可聴化シミュレーション手法の検討を行った結果、この手法が、今後防災行政無線の設計に必用な評価指標を検討していくためのツールとして有効に使用できる可能性を示した。

#### (5)聴覚・認識

公共空間における音声情報伝達性能の向上を目的として、人の聴覚特性および認識特性の観点から、以下の3項目について検討を行った。

##### ①公共放送文の作成方法

理解しやすい公共放送文は、放送文に使用される単語の音声単語親密度だけでなく文脈や聴取する状況から連想される連想語が放送文内容理解の向上に大きく貢献することを示した。また、文構成について検討したところ、放送文の内容を理解するためのキーワードと考えられる名詞または副詞とこれに対応する動詞間の距離が放送文の内容理解に影響を与えることに加え、確実に情報を伝えるためには1文に含める事が可能な情報量は多くても4個程度であり、伝える情報量が多くなる場合は、複数文に分けることが有効であることを明らかにした。さらに、放送文を読み上げる話速やポーズ長について検討した結果、雑音や残響がある条件ではポーズ長が聞き取りやすさに大きく関与し、特に高齢者では話速を遅くするよりも十分なポーズ長を設けたほうが聞き取りやすく、理解しやすいことを明らかにした。また、同一内容の放送を2回以上繰り返すことが内容理解の有意な向上に繋がることも示した。

##### ②音声の到来方向に関する知識

非常時などの高騒音下の音環境における音声情報伝達特性の向上を目的として、アナウンス音声の到来方向の知識が単語了解度に及ぼす影響を実験により検証した。実験では、無響室で被験者の前方0°および±30°に設置した3個のスピーカから異なる単語を同時に提示し、被験者は聴きとれた全ての単語を回答した。その結果、無響室を消灯した場合と比較して、照明のある場合は単語了解度が向上した。さらに、3個のスピーカのうち1つをLEDで点灯したところ、そのスピーカから提示された単語の了解度が向上した。これらの結果は、アナウンス音声の到来方向の知識が単語了解度を向上させる可能性を示している。

##### ③視聴覚相互作用

災害時避難の実空間に近い仮想環境を用い、方向を指示する視覚情報と聴覚情報がどのように作用しあうのかを検討した。CGで作成した地下街を模倣した通路の天井に吊り

下げられた通路誘導灯を視覚刺激とし、前記(2)のサイン音設計で検討した2連短音に残響を付加したものを聴覚刺激とし、心理実験を行った。その結果、聴覚刺激に基づく方向判断において、視覚刺激が呈示されることによるトリガー効果（一致した方向を示すことによる促進効果）とマッチング効果（不一致の方向を示すことによる妨害効果）が確認された。これらのことから、モダリティが異なる複数のサインに対して、必要なサインの認識をしやすくし、サイン同士が認識を妨げあわないよう、サイン呈示を計画的に行う必要性が示唆された。

(6) ケーススタディ（総括として）

以上、公共空間における音響情報の伝達について、音源の設計（音声合成、サイン音設計）、伝送系に関する検討（電気音響システム、音環境・伝搬系）、情報を受け取る人の知覚に関する検討（聴覚・認識）に整理し、総合的な研究を進めた結果、公共空間における音響情報（speech, sign）の明瞭性向上のための研究システムのプロトタイプ（図1）を構築した。

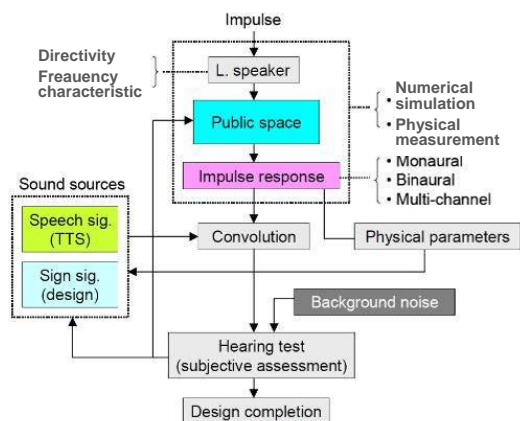


図1 公共空間における音響情報の明瞭性向上のための研究システム

上図のシステムに則り、K駅のアトリウム空間を対象として行ったケーススタディは以下の通りである。

- ①空間のインパルス応答の測定と予測  
モノラル收音、バイノーラル收音、6ch. 收音、各種方式によってインパルス応答計測を行った。また幾何音響シミュレーションによってインパルス応答を求めた。それらの結果を図2に示す。
- ②音声アナウンスの合成  
上述のインパルス応答に音声アナウンスをたたみ込み合成し視聴した結果、明瞭性は非常に悪かった。合成波形を図3(上)に示す。
- ③明瞭性改善のための音声アナウンスの適応処理

前述（4. 研究成果、(1) 音声合成の①）の適応的ポーズ挿入法により、音声アナウンスの改善を図った。明瞭性は非常によく改善された。処理後の合成波形を図3(下)に示す。

④今後  
空間の建築設計、アナウンス信号の最適化設計、またそれら設計手法の確立に役立てるべく、6ch. 再生システム等により各種聴感実験を進めていく。

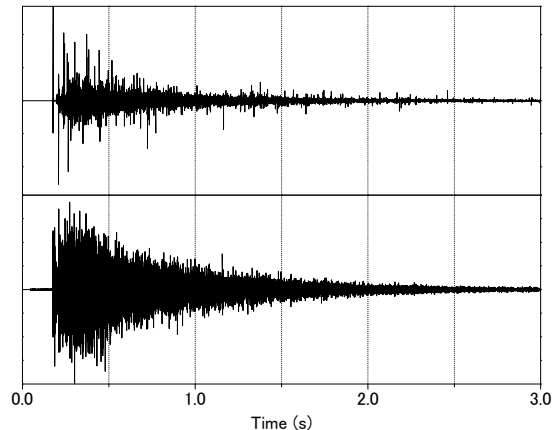


図2 K駅のインパルス応答波形シミュレーション（上）と実測（下）

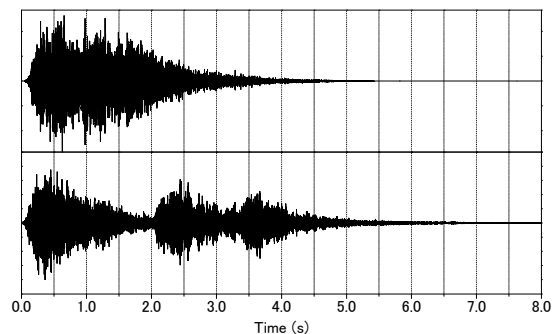


図3 音声アナウンスとインパルス応答のたたみ込み合成結果  
適応的ポーズの挿入前(上)と挿入後(下)

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計4件）

1. Junichi Mori, Fumiaki Satoh, Sakae Yokoyama, Hideki Tachibana, “Prediction of outdoor sound propagation by geometrical computer modeling”, Acoustical Science and Technology, 採録決定（2013-03-01 受理）, 査読有り
2. 飯田一博 他（1/4）, “横断面に配置した2スピーカーによる3次元音像制御”, 日

本音響学会誌, 68 巻 7 号, pp. 331-342, 査読有り (2012)

3. Shigeki Okawa et al. (2/4), “Temporal AM-FM combination for robust speech recognition”, *Speech Communication*, 53(5), pp.716-725, 査読有り (2011)  
[学会発表] (計 6 5 件)
1. Hideki Tachibana, “Public space acoustics for information and safety”, *ICA 2013*, 2013-6-7, Montreal (Canada)
2. Fumiaki Satoh, “Impulse response measurement in public space using musical signal including Swept-Sine signals”, *ICA 2013*, 2013-6-5, Montreal (Canada)
3. Hideki Tachibana, “Auralization of municipal public address announcements by applying geometrical sound simulation and multi-channel reproduction techniques”, *ICA 2013*, 2013-6-7, Montreal (Canada)
4. Sakae Yokoyama, “Subjective experiment on suitable speech-rate of public address announcement in public spaces”, *ICA 2013*, 2013-6-5, Montreal (Canada)
5. 柳川博文, “トンネルを想定した残響下における拡声方法の検討”, 秋季音響学会, 2012-9-20, 信州大学
6. Fumiaki Satoh, “Measurement of outdoor sound propagation characteristics of municipal public address system using Cross-Spectrum”, *Inter-noise 2012*, 2012-8-21, New York (USA)
7. Hideki Tachibana, “Subjective tests on listening difficulty of public address announcement in public spaces”, *Inter-noise 2012*, 2012-8-21, New York (USA)
8. 木幡稔, “残響下において聞き取りやすいアナウンス音声合成に関する検討”, 春季音響学会, 2012-3-13, 神奈川大学
9. Hideki Tachibana, “Prediction of outdoor sound propagation by applying geometrical sound simulation technique”, *Inter-noise 2011*, 2011-9-6, Osaka (Japan)
10. Hiroo Yano, “Laboratory experiment on intelligibility of public address announcements in public spaces”, *Inter-noise 2011*, 2011-9-7, Osaka (Japan)
11. 世木秀明, “公共空間における拡声放送の了解性に関する評価実験”, 春季音響学会, 2011-3-9, 早稲田大学

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: アナウンス明瞭化装置

発明者: 木幡稔

権利者: 千葉工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-053799

出願年月日: 24年3月8日

国内外の別: 国内

[その他]

第 6 回 CIT 音響フォーラム「公共空間における安全確保のための音響情報伝達に関する研究」開催, 2013-3-2, 千葉工業大学にて

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋 秀樹 (TACHIBANA HIDEKI)

千葉工業大学・附属総合研究所・教授

研究者番号: 80013225

### (2) 研究分担者

飯田 一博 (IIDA KAZUHIRO)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号: 60458627

大川 茂樹 (OKAWA SHIGEKI)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号: 40306395

木幡 稔 (KOHATA MINORU)

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号: 30186720

佐藤 史明 (SATO FUMIAKI)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号: 50286150

須田 宇宙 (SUDA HIROSHI)

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号: 60296324

世木 秀明 (SEKI HIDEAKI)

千葉工業大学・情報科学部・准教授

研究者番号: 60226636

柳川 博文 (YANAGAWA HIROFUMI)

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号: 70296309

矢野 博夫 (YANO HIROO)

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号: 70114692

山崎 治 (YAMAZAKI OSAMU)

千葉工業大学・情報科学部・准教授

研究者番号: 90337709

### (3) 連携研究者

横山 栄 (YOKOYAMA SAKAE)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号: 80512011