

# MRI 騒音のあるオペレーション室を想定した ANC ヘッドセット応用双方向会話システムとその了解度

○山根 悠, 近藤和弘(山形大)

## 1.はじめに

核磁気共鳴画像法(Magnetic Resonance Imaging, MRI)とは核磁気共鳴現象を用いて体内の内部の情報を画像にする手法であり 3 次元的な画像情報などが容易に得られるなどのメリットがあり、広く普及している。しかし、MRI ではその撮像において傾斜磁場コイルが振動することによる非常に大きな騒音(MRI 騒音)が発生する。そのため、スタッフ間の会話を妨げるだけでなく、日常的に騒音に曝される MRI 機器を操作する医療スタッフ(オペレータ)やオペレータールーム内の他の医療スタッフへのストレス増大を招くことが懸念される。

オペレータへの MRI 騒音を低減するための手法として、受動騒音制御(Passive Noise Control, PNC)ならびに、能動騒音制御(Active Noise Control, ANC)[1]の効果が期待されるオーバヘッド型の ANC ヘッドホンの利用が挙げられる。PNC とは防音材等による騒音制御手法であり、ANC とは騒音に同振幅、逆位相の擬似騒音を重ね合わせることで打ち消す制御手法である。

しかし、ANC ヘッドホンを日常的に装着した場合は、両耳を塞いでしまいスタッフ間の会話や、MRI 騒音以外の有用な環境音まで遮断してしまう。そこで MRI 騒音環境下における会話システムとして、ANC ヘッドホンと ANC マイクロホン組み合わせた ANC ヘッドセットによる双方向会話システムを提案する。これはマイクロホンにも ANC 機能を持たせることで、入力音声への混入雑音の低減が期待できる。

本研究では、MRI 騒音のあるオペレーション室での提案システムの使用を想定し、音声了解度(音声の聞き取りやすさ)を測定する。音声了解度は二者択一型日本語音声了解度試験(Diagnostic Rhyme Test:DRT)[2]によって評価し、オペレータ間の会話システムとしてのフィージビリティを検討する。

## 2.ANC ヘッドセットを用いた音声システム

### 2.1.提案システム

本研究では ANC ヘッドホンと ANC マイクロホンを組み合わせた ANC ヘッドセットを、オペレーション室にいるオペレータが装着し、オペレータ間での会話を行うことを想定する。ブロック図を Fig.1 に示す。

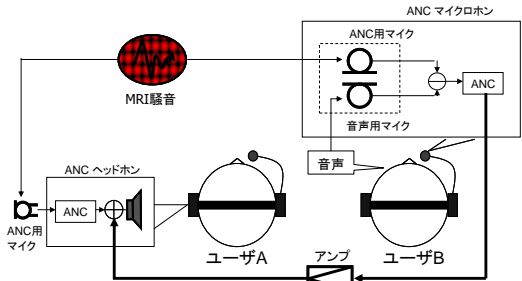


Fig.1.提案システムのブロック図

### 2.2.ANC ヘッドホン

本研究で用いる ANC ヘッドホン HP-NC22.OH-BK を Fig.2 および Table.1 に示す。HP-NC22.OH-BK はフィードバック方式[1]を用いており、アナログ ANC 回路により ANC を行う。



Fig.2.ANC ヘッドホン HP-NC22.OH-BK

Table.1.HP-NC22.OH-BK の仕様

形式	密閉ダイナミック型
使用ユニット	直径 40mm
インピーダンス	32Ω
音圧感度	99dB/mW(電源 ON 時)
	102dB/mW(電源 OFF 時)
再生周波数帯域	20～20,000Hz
雑音抑止周波数帯域	60～520Hz
雑音抑圧量	約 22dB(200Hz にて)
方式	フィードバック方式
	アナログ

### 2.3.ANC マイクロホン

本研究で使用するマイクロホンを Fig.3 に示し、その仕様を Table2 に示す。



Fig.3.ANC マイクロホン

Table.2.ANC マイクロホンの仕様

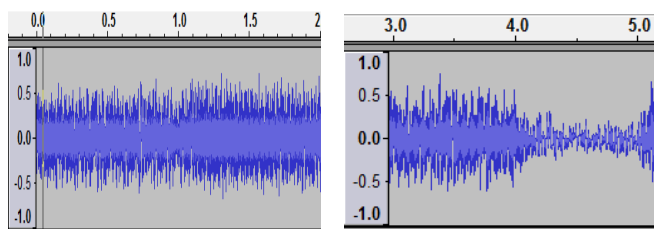
Noise Cancellation	4dB / octave
Frequency Range	200 ~ 10,000Hz
Signal to Noise Ratio	60dB
Sensitivity	-36.5 ± 3dB

## 3.MRI 騒音

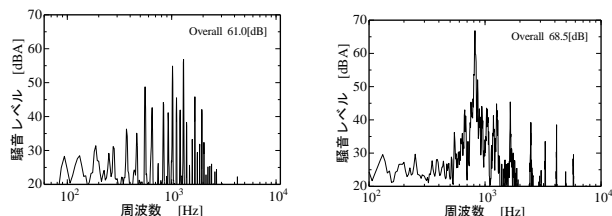
本研究で評価対象にした MRI 騒音は、実際に山形大学医学部附属病院で使用されている MRI 装置からの騒音を録音し用いる。Fig.4(a), (b)に示す時間波形を持つ騒音をそれぞれ MRI 騒音 A, MRI 騒音 B と呼ぶ。Fig.5 にはそれぞれの周波数解析によって得られた周波数スペクトルを示す。

MRI 騒音 A は定常的な騒音である。Fig.5(a)から 1kHz 周辺にピークを持つ騒音であることが分かる。

MRI 騒音 B は非定常な騒音である。Fig.5(b)から 800Hz 周辺に鋭いピークを持ち、倍次成分の高周波が目立つ騒音であることがわかる。



(a)MRI 騒音 A (b)MRI 騒音 B  
Fig.4.MRI 騒音の時間波形



(a)MRI 騒音 A (b)MRI 騒音 B  
Fig.5.MRI 騒音の周波数スペクトル

## 4.MRI 騒音に対する ANC ヘッドホン特性

### 4.1.特性評価実験

Fig.6 のように各 MRI 騒音環境下の ANC ヘッドホン内部の音を、人間の両耳効果に対応した録音系であるバイノーラル録音 [3] 用の小型マイクロホンを用いて収録した。バイノーラル録音自体は高臨場感録音の一種だが、小型のマイクロホンを外耳道入口付近の装着するため、ヘッドホン内の音を収録するのに適している。

収録した音を DFT を用いた周波数解析をすることで、ヘッドホン外からの MRI 騒音に対する ANC ヘッドホンの遮音特性および ANC 特性を評価する。ここで遮音特性とは、ANC を OFF の状態でヘッドホンを装着したときの特性であり、ANC 特性とはその状態で ANC 動作を ON にしたときの特性である。録音条件を Table.3 に示す。

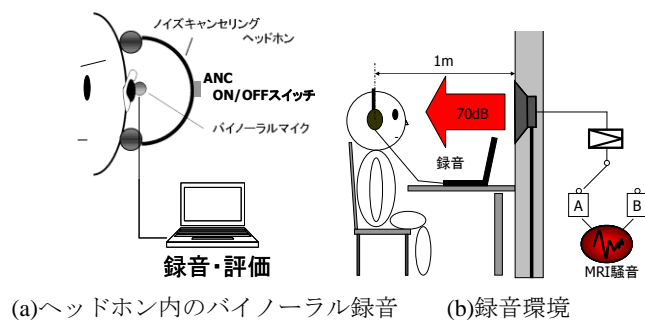


Fig.6.実験方法

Table.3.録音条件

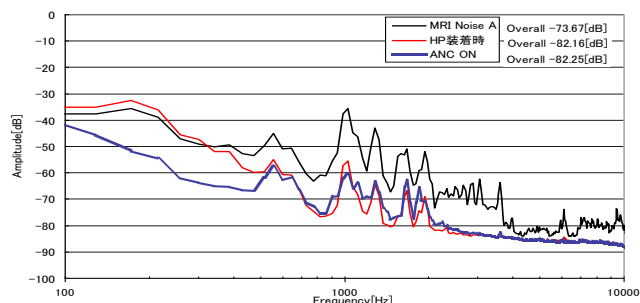
録音機器	BME-200
録音形式	16bit PCM
サンプリング周波数	22.5kHz
騒音源(スピーカ)からの距離	1.0m
床からの高さ	1.1m
騒音源(スピーカ)の床からの高さ	1.3m
騒音	70dB

### 4.3 ANC ヘッドホン特性

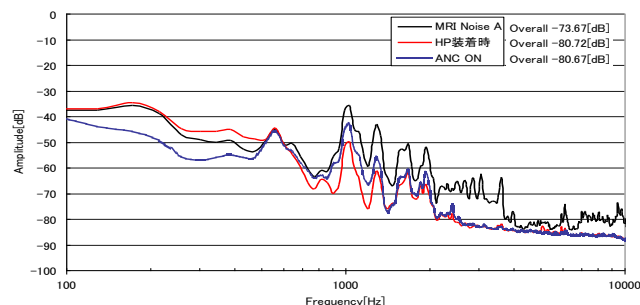
Fig.7 に各 MRI 騒音に対する遮音特性および ANC 特性であるヘッドホン特性を示す。解析は窓長 512 サンプルでハミング窓を用いた DFT によるパワースペクトルである。この図は Fig.5 と異なり最大録音レベルを 0 dB と定義している。また、周波数解析によって得られた全帯域の音圧レベルの平均をオーバーオール値として Table.4 に示す。

MRI 騒音 A はオーバーオール値がヘッドホン着用前から最終的には約 10 dB 低減されており、MRI 騒音 B は約 15 dB 低減された。しかし ANC の ON/OFF による騒音低減量は僅かであり、ヘッドホンの遮音特性が大きいことがわかる。

Fig.7(a) より、500 Hz を境に ANC 効果が見られる帯域とそうでない帯域に分かれる。これは、Table.1 にあるように 200 Hz での効果が高くなるように設計されているからと考えられる。これに対し Fig.5 より MRI 騒音 A は 500 Hz から 1.5 kHz 前後にかけてピークを持ち、MRI 騒音 B は 800 Hz 前後にピーク成分を持つ。よって今回のヘッドホンの ANC ではピーク成分が十分低減されないためオーバーオール値の変化は僅かであった。



(a)MRI 騒音 A



(b)MRI 騒音 B

Fig.7.MRI 騒音に対するヘッドホン特性

Table.4.オーバーオール値

MRI Noise	HP なし Amplitude[dB]		
		OFF[dB]	ON[dB]
A	-73.67	-82.16	-82.25
B	-64.42	-78.19	-79.93

## 5.日本語了解度試験

### 5.1.評価概要

本研究では、提案システムの音声了解度の評価に日本語音声了解度試験[2]を用いた。DRT は 6 音素特徴 60 単語対 120 単語を評価する。その一例を Table.5 に示す。例示した単語対のうち左側が音素特徴の有意な単語である

Table.5.DRT 単語の音素特徴

有声性 (Voicing)	声帯の振動を伴う音, 伴わない音の分類 例:財(zai)-才(sai)
鼻音性 (Nasality)	呼気が鼻腔を通り共鳴を伴う音, 伴わない音の分類 例:万(man)-番(ban)
継続性 (Sustention)	発音した音の, 継続性の有無の分類 例:箸(hashi)-菓子(kashi)
不規則性 (Sibilation)	発音した音の波形の不規則性に関する音の分類 例:ジャム(jamu)-ガム(gamu)
抑音性 (Graveness)	スペクトル上のエネルギーが低周波に集中する, 高周波に集中するの分類 例:柶(waku)-楽(raku)
集中性 (Compactness)	スペクトル上のエネルギーが一つのフォルマント周波数へ集中か, 分散かの分類 例:焼く(yaku)-沸く(waku)

DRT ではヘッドホンもしくはスピーカから提示された単語がどちらに聞こえたかを選択しその正答率を求める。DRT では日本語音声理解度の計算に, 二者択一試験という評価の特性から以下の式を用いる。

Correct Response(%)

$$= \frac{\text{Correct\_words} - \text{Incorrect\_words}}{\text{Total\_words}} * 100(\%) \quad (1)$$

## 5.2.評価条件

MRI 騒音のあるオペレーション室で提案システムでの通信を想定して DRT を行う。ヘッドホンおよびマイクロホンそれぞれに ANC が ON/OFF の 2 通りあるのでヘッドセットの組み合わせは全 4 通りとなる。DRT は Table.6 に示す組み合わせで行う。

組み合わせ A と B は MRI 騒音のあるオペレーション室で何も装着しない状態での会話を想定しており, DRT 単語はスピーカ(以下 SP)から提示される。組み合わせ A が ANC マイクを用いずに録音した場合であり, 組み合わせ B が ANC マイクを用いて録音した場合であり ANC マイクの効果のみを評価するのに用いる。

組み合わせ C では組み合わせ A の状態からヘッドホン(以下 HP)のみを装着した状態で DRT を行う。このとき流れる単語は ANC マイクを OFF の状態で録音したものを用いる。

組み合わせ D および組み合わせ E では HP/マイクのどちらかの ANC が ON の状態で DRT を行う。

組み合わせ F では HP/マイク両方の ANC が ON の状態で DRT を行う。本研究で提案する方式で効果が最大なと考えられる組み合わせである。

本実験は, 日本語を母国語とする聴力健常な 20 代の男女 8 名で行った。被験者にはすべての組み合わせを評価してもらった。

Table.6.DRT の単語録音法と単語提示法の組み合わせ

組み合わせ	提示音圧	背景騒音	ANC mic	単語提示	ANC	単語数	
A	80 (dBA)	なし	OFF	SP	なし	120	
B			ON				
C		騒音 A	OFF	HP	OFF		
D			ON		OFF		
E			OFF		ON		
F			ON				

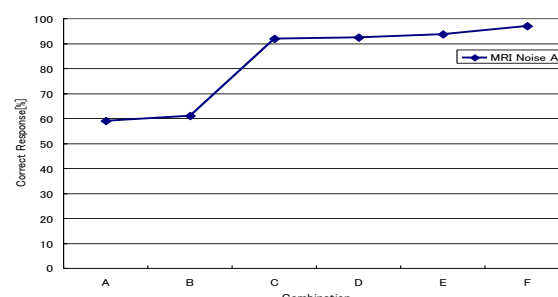
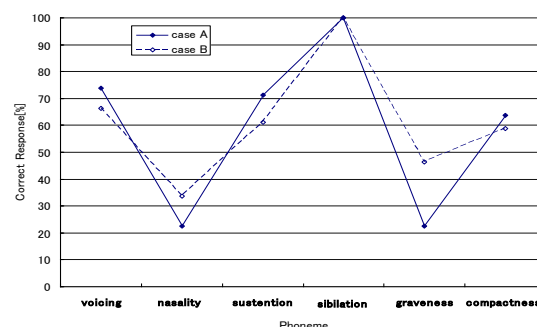
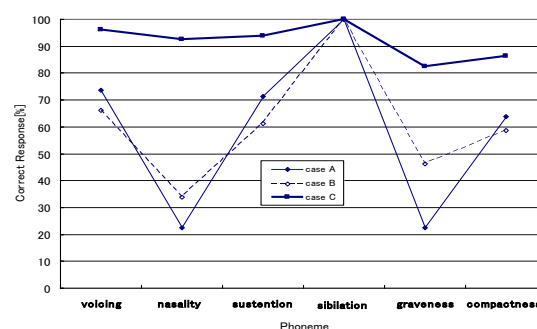


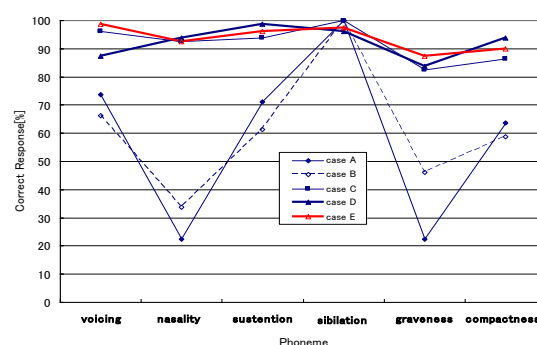
Fig.8 単語提示法ごとの全音素特徴平均



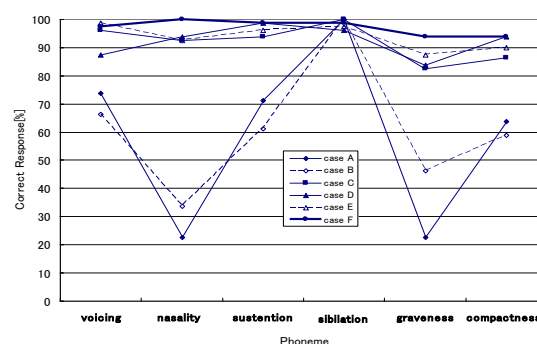
(a)ヘッドホンなし(組み合わせ A, B)



(b)ヘッドホン装着時(組み合わせ C)



(c)ヘッドホン装着時 ANC\_ON(組み合わせ D, E)



(d)ANC\_ON(組み合わせ F)

Fig.9 単語提示法による音素ごとの正答率

5.3.評価結果

本研究ではMRI騒音A、B共に評価を行ったが、両騒音の結果の差が小さかったため、本稿では騒音Aの結果について述べる。

Fig.8に単語の提示法ごとの全音素特徴の平均音声了解度を、Fig.9(a)～(d)に単語の提示法ごとの音声了解度を音素特徴ごとに示す。

Fig.8から、組み合わせAとBの被験者が何も装着しない場合では音声了解度が60%と低く会話に支障をきたすと考えられる。またAとBの間の了解度差は小さくANCマイクの効果はほとんど見られなかった。

組み合わせA、BからC～Fにかけて音声了解度が30%改善した。これは、ヘッドホン装着したことによる遮音特性による音声了解度の改善と言える。これは4.3節でも述べたようにANCによる騒音低減効果が極めて少ないからであると考えられる。

組み合わせFの提案方式はすべての組み合わせの中で了解度が最も高く97%になり、被験者の操作ミス以外の要因ではほとんどミスがないと考えられる。

Fig.9(a)からMRI騒音のあるオペレーション室での会話はnasalityおよびgravenessは音声了解度が60%以下になり非常に聞き取り難いことが分かる。しかし、Fig.9(b)からはヘッドホンの装着によりnasalityおよびgravenessの音声了解度が80%以上へ改善した。これはTable.4に示したようにヘッドホン自体の遮音性で10dBほど騒音が低減されることによるものであると考えられる。

Fig.9(c)からマイクまたはヘッドホンのどちらかのANCをONにした場合(組み合わせC～E)では音素特徴ごとの了解度変化はほとんどみられない。

Fig.9(d)の組み合わせFの場合には組み合わせDおよびEと比べてgravenessの音声了解度の向上がみられる。

gravenessはTable.5に示したように、スペクトル上のエネルギーが低周波または高周波に集中する組み合わせの評価ペアである。ANCは低周波数で消音効果があり、Fig.7に示したようにANCヘッドホンでは低周波数の消音効果がみられる。そのためヘッドホンとマイクのANCによる騒音低減効果の和が了解度向上の閾を超えたと考えられる。

6.分散分析

ここでは5章の結果について被験者内計画を用いた4要因の分散分析(Analysis of variance, ANOVA)を行った。被験者間の誤差をS、音素をA、騒音種をB、単語提示方法をC、単語録音方法をDとした。分散分析表をTable.7に示す。[\*]は交互作用を示す。4つの要因のうち単語録音方法、つまりマイクのANCのON/OFFによる差以外の3要因では単体ではp値が十分に小さく棄却率5%以下で有意差があることが分かる。

更に、有意であった交互作用を要因ごとに分割して単純主効果を検定した結果、マイクのANCがON時にgravenessにおいてヘッドホンのANCのON/OFFでの有意差が認められた。またヘッドホンのANCがON時にgravenessにおいて単語録音方法についての有意差が認められた。加えて、単語提示方法としてスピーカとヘッドホンの違いにおいても有意差が認められた。

以上の結果から、提案システムにおけるgravenessの音声了解度の向上は、ヘッドホンとマイク双方のANCの効果によるものであると確認された。またgraveness以外でのANCによる有意差はないことが確認された。

7.まとめ

日常的にMRI騒音に暴露されているオペレーション室でのオペレータを対象としたANCヘッドセットによる双方向通信システムを提案し、その音声了解度をDRTで評価した。

MRI騒音に対するANCヘッドホンの特性としては500Hz以下の周波数帯域でその効果がみられるが、ピーク成分を含む500Hz以上の周波数帯域ではあまり効果がみられず、オーバーオール値からもANCの効果よりもヘッドホン自体の遮音性によることが分かった。

DRTでは、提案システムによって音声了解度が60%前後から100%に近い値にまで改善した。これにより提案システムのフィージビリティを示すことができたが、ANC自体の音声了解度への貢献は僅かであり、ヘッドホン装着による遮音効果の方が了解度への貢献の方が大きかった。しかしANCヘッドホンとANCマイクの低周波数の消音効果の和によってgravenessの了解度が向上した。これは分散分析でも有意差があった。

今回用いたANCヘッドホンの仕様は200Hzでの騒音低減に最大の効果があるように作られている。今回検討したMRI騒音では、500～1.5kHz周辺にピーク成分を持つMRI騒音に適したANCヘッドホンを用いることで更なる騒音低減と音声了解度の向上が期待できると考えられる。

Table.7.分散分析表

要因	平方和	自由度	分散	F	p
被験者の誤差(S)	14280.44	7	2040.062		
音素(A)	77345.02	5	15469.00	49.535	0.0000
S*A	10929.98	35	312.28		
騒音種(B)	3479.40	2	1739.70	5.368	0.0186
S*B	4537.26	14	324.09		
単語提示方法(C)	175303.70	2	87651.85	176.942	0.0000
S*C	6935.18	14	495.37		
単語録音方法(D)	176.04	2	176.04	1.455	0.2670
S*C	847.10	14	121.01		
A*B	2769.21	1	276.92	2.646	0.0085
S*A*B	7325.23	7	104.64		
A*C	60065.74	10	6006.57	46.003	0.0000
S*A*C	9139.81	70	130.56		
A*D	1591.31	5	318.26	2.956	0.0250
S*A*D	3768.86	35	107.68		
B*C	2040.74	4	510.18	2.705	0.0506
S*B*C	5281.48	28	188.62		
B*D	254.86	2	127.43	1.444	0.2692
S*B*D	1235.87	14	88.27		
C*D	1111.11	2	555.55	4.693	0.0276
S*C*D	1657.40	14	118.38		
A*B*C	5898.14	20	294.90	3.412	0.0000
S*A*B*C	12101.85	140	86.44		
A*B*D	746.52	10	74.65	0.896	0.5411
S*A*B*D	5829.39	70	83.27		
A*C*D	3694.44	10	369.44	3.372	0.0012
S*A*C*D	7670.37	70	109.57		
B*C*D	444.44	4	111.11	0.958	0.4459
S*B*C*D	3248.14	28	116.00		
A*B*C*D	2475.00	20	123.75	1.238	
S*A*B*C*D	13999.07	140	99.99		0.2330
合計	446183.22	863			

参考文献

[1]Sen M.Kuo and Dennis R.Morgan,"Active Noise Control Systems",1996  
[2] 近藤和弘 他"二者択一型日本語音声了解度試験方法の検討"日本音響学会誌,63(4),2007  
[3] 飯田一博,森本政之 編著 '空間音響学,'コロナ社,2010