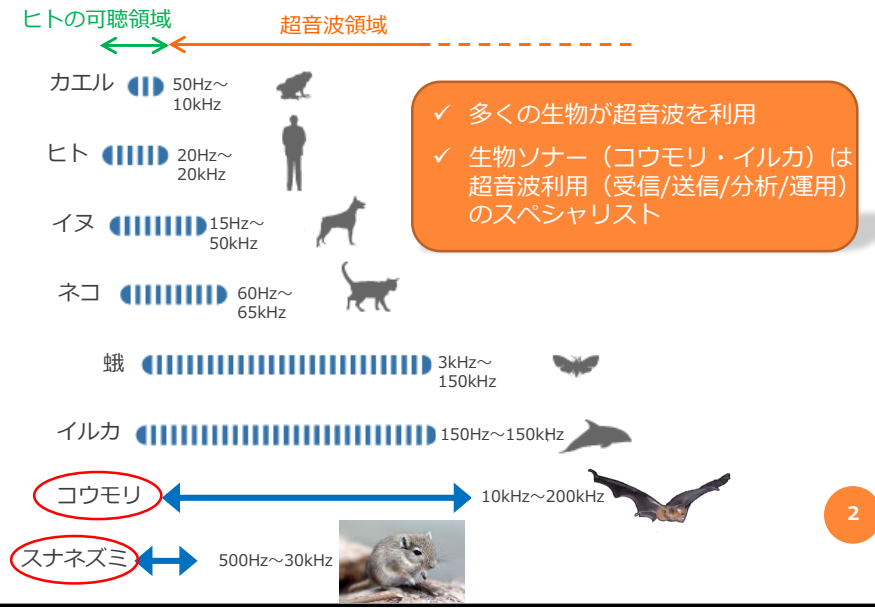
テーマ３
「生物補償行動アルゴリズムを用いた超音波イメージング技術の開発」

生物による超音波利用技術

飛龍志津子・小林耕太（同志社大学　生命医科学部）

文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業
２０１７年度　研究成果公開シンポジウム

生物による超音波利用



- ✓ 多くの生物が超音波を利用
- ✓ 生物ソナー（コウモリ・イルカ）は超音波利用（受信/送信/分析/運用）のスペシャリスト

2

テーマ３：

生物補償行動アルゴリズムを用いた超音波イメージング技術の開発

3

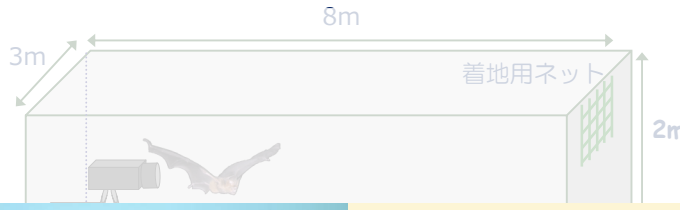
工学・生理・行動面から生物による超音波利用や音情報処理技術の解明

本日の内容

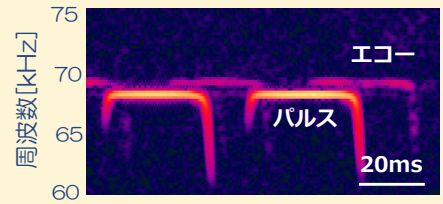
1. 生物補償行動アルゴリズムを用いたドプラ血流測定
2. ノイズ環境下におけるコウモリのソナー行動
3. レーザー照射による音知覚に関する研究

4

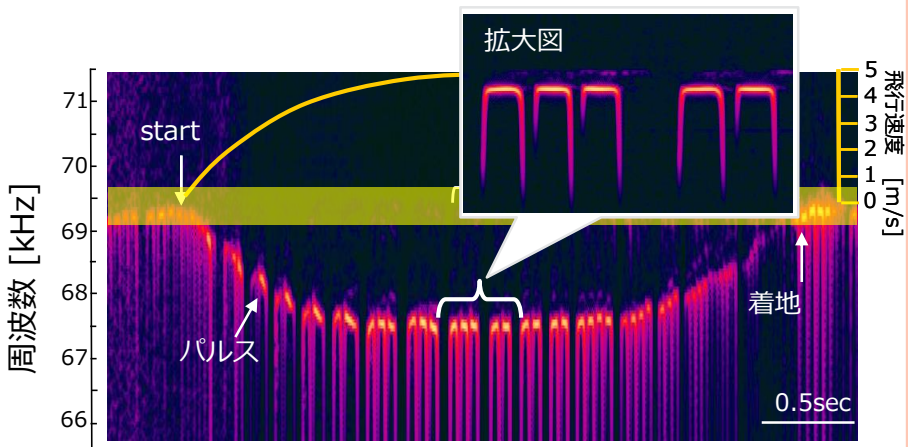
「生物補償行動」とは？



パルスとエコーの計測が可能



ドップラーシフト補償行動



(Hiryu, et al. JCPA 2008)

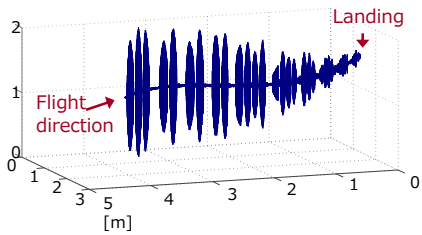
飛行中，コウモリはパルスの周波数を低下させている

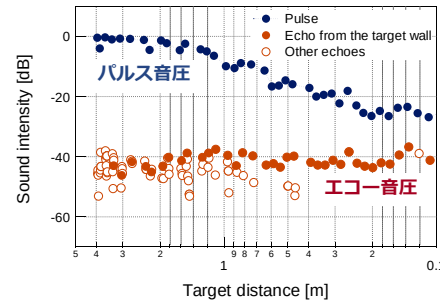
(生理学的に高感度な周波数にエコーを維持，高い周波数分析精度を実現)

6

エコー音圧補償行動

(Hiryu, et al. JASA 2007)



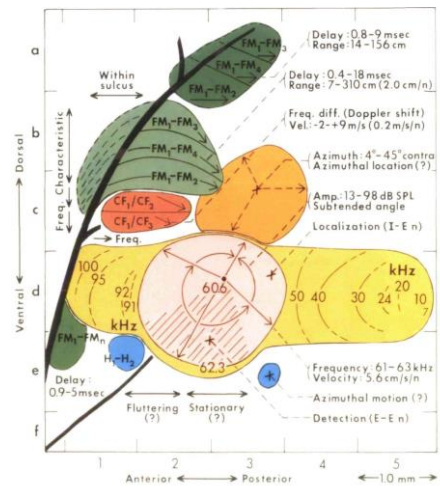


飛行中，コウモリはパルスの音圧も低下させている
（生理学的に感度が高いレンジにエコー音圧を維持）

エコー音圧の安定化が，脳内の高精度な周波数分析をサポート

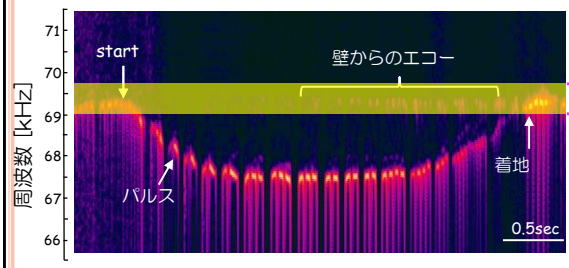
コウモリの聴覚皮質における機能マップ

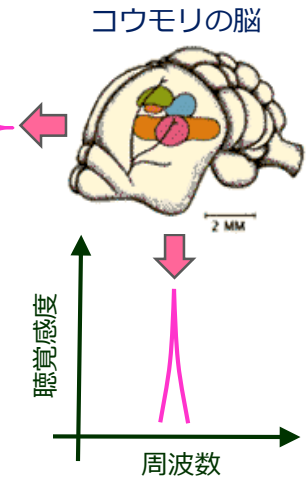
どの部位の神経が，どのような音刺激に対して最もよく反応するのか，
電気生理学的手法により調査.



(Suga, J. Exp. Biol. 1989)

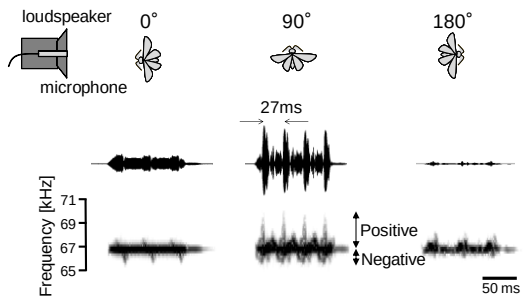
パルスの周波数について





CF-FMコウモリの聴覚系は，特定の狭い周波数に対して
非常に感度が高い→Q値の高い共振回路

ドプラを利用して獲物の情報を検知



(Kinoshita, et al., JCPA, 2014)

昆虫の羽ばたきによって，振幅・周波数変調が生じる

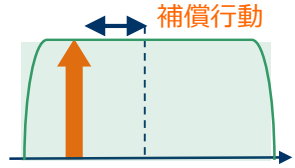
昆虫の羽ばたきによる周波数・振幅の僅かな変化を，
聴覚の感度が最も高いところで検知する

生物による補償行動

生物ソナーの場合

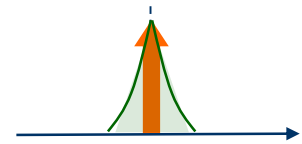
送信信号：変動（広帯域）

補償行動



周波数・音圧

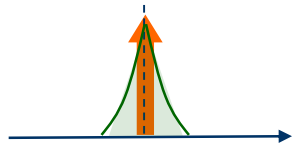
受信信号：固定（狭帯域）



周波数・音圧

一般的な計測方法

送信信号：固定（狭帯域）



周波数・音圧

受信信号：変動（広帯域）

Δを検知

周波数・音圧

超音波診断装置

二極化（ハイエンド化，小型化）

“Aixplorer”, Super Sonic Imagine

“Vscan 1.2”, GE Healthcare

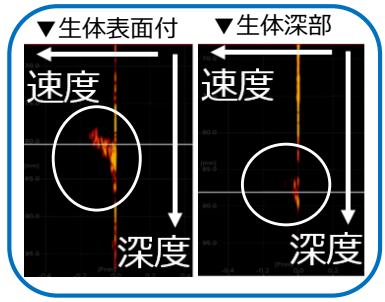
従来ではエコーの信号処理によるSNR改善

小型化ではハード・ソフト面でよりシンプルな工夫が求められる

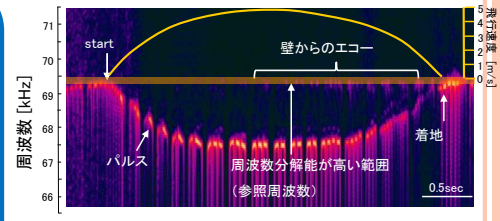
12

小さな脳で上手く超音波を利用しているコウモリに学べないか

問題点と解決案



ドップラーシフト補償行動の実装



壁に着地飛行する際のコウモリのパルスとエコー

【問題点】

周波数依存減衰による中心周波数のシフト→SNRの低下

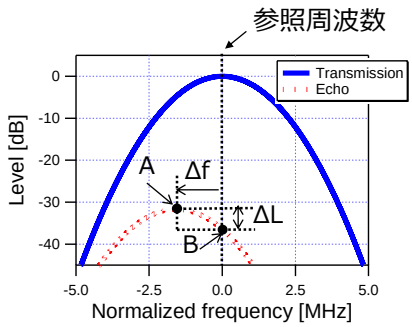
【解決案】

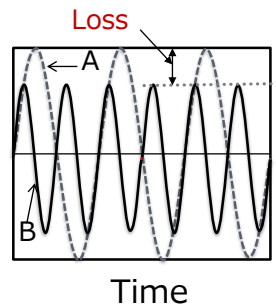
受信信号の周波数シフトを考慮した送信信号の制御

周波数依存性減衰（Frequency dependent attenuation, FDA）

生体組織は周波数に依存した減衰定数をもつ

→エコーの中心周波数が低域側にシフト



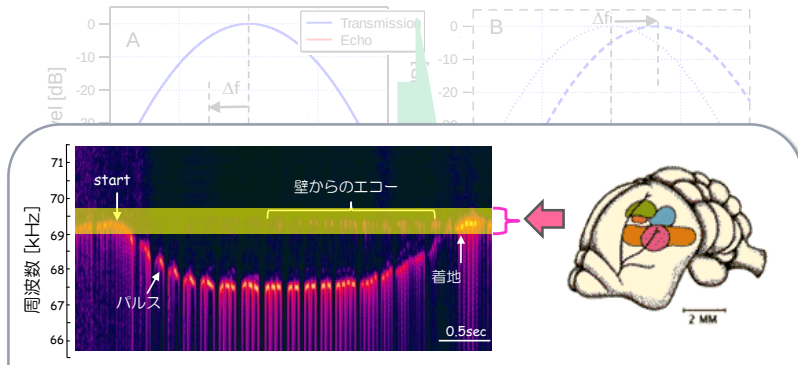


14

A/D変換時に対妨害波の信号対雑音比（SNR）が低下

周波数補償アルゴリズム

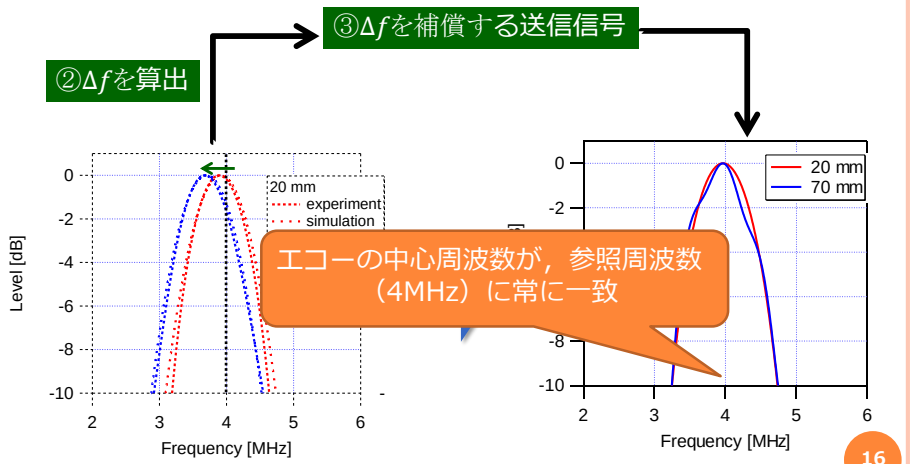
エコーの中心周波数が参照周波数に一致するように，
送信信号の周波数を補償．



コウモリのドプラシフト補償行動をヒントに

15

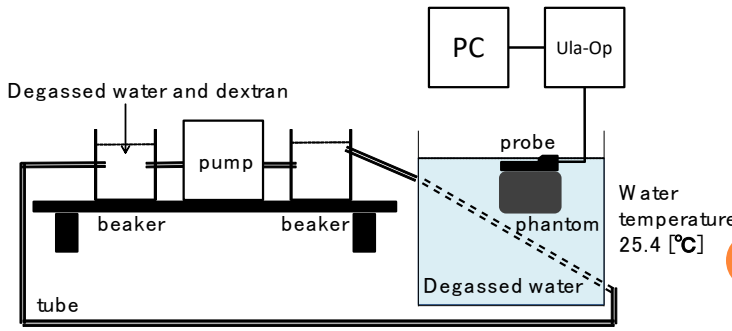
周波数補償アルゴリズム



16

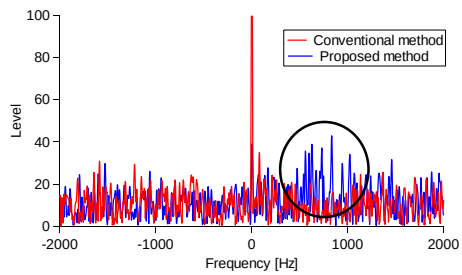
ファントム実験による流速測定精度の検討

▼probe：リニア型64素子，4.6 MHz (*fc*), 95 % (帯域幅)
▼phantom：0.6 dB/cm/MHz
▼散乱体：dextran（Sephadex®，GE Healthcare）
▼超音波診断装置：Ula-Op (University of Florence)
▼流速（定常流）の中心値：150 mm/s (ドプラ周波数：780 Hz)

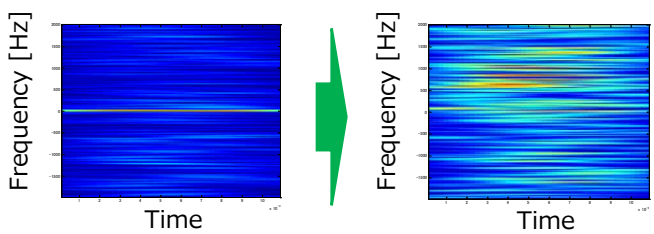


17

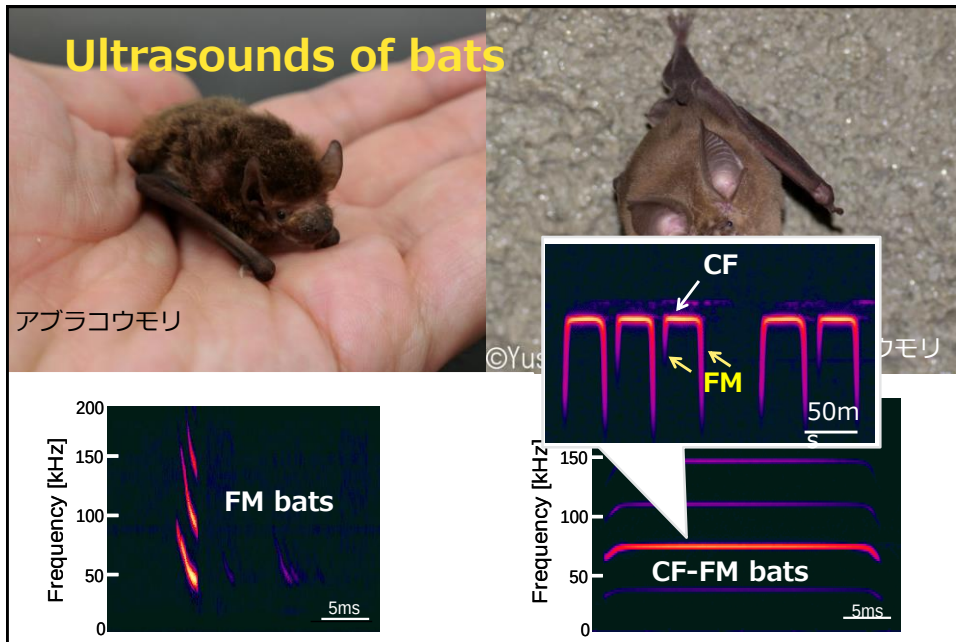
実験による流速測定精度の検討



	平均周波数 [Hz]
従来法	-4.9×10
提案法	6.4×10^2
理論値	7.8×10^2



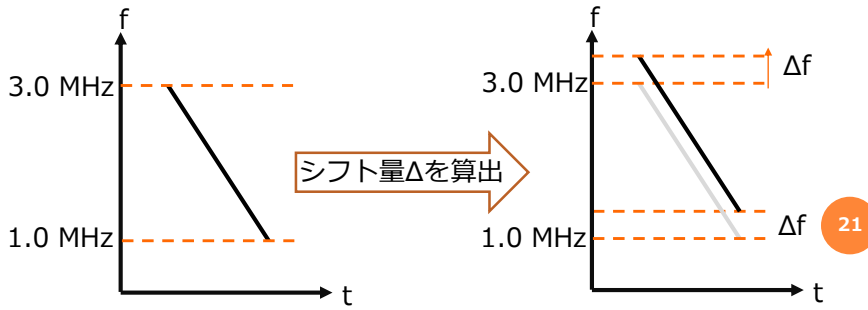
18



ＣＦ音とＦＭ音の組み合わせ→採餌環境に適応した結果

FM信号を用いたドプラ周波数の計測

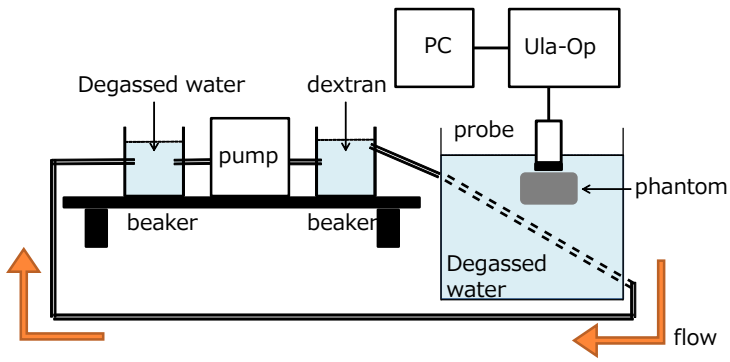
Ula-Op:
Open platform designed
※任意波形を用いた計測が可能



21

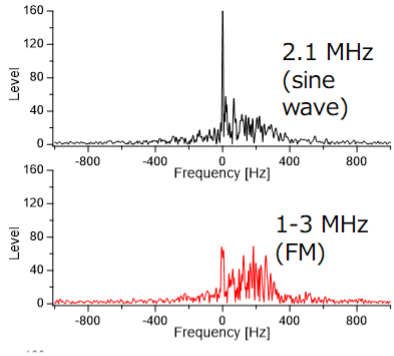
実験系

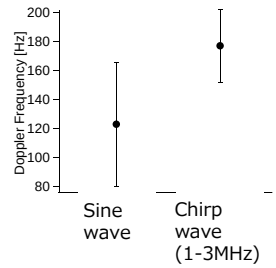
- **probe：**セクタ型64素子，2.1 MHz (*fc*)，帯域幅：1.4 MHz ~ 4.0 MHz
- 生体模擬ファントム：0.7 dB/cm/MHz(厚さ：2.5 cm)
- 散乱体：dextran（Sephadex®，GE Healthcare）
- 超音波診断装置：Ula-Op (University of Florence)
- 流速のドプラ周波数：420 Hz



22

FM信号を用いたドプラ周波数の計測



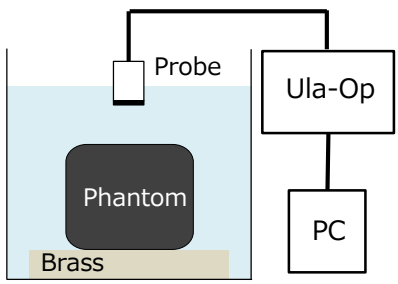


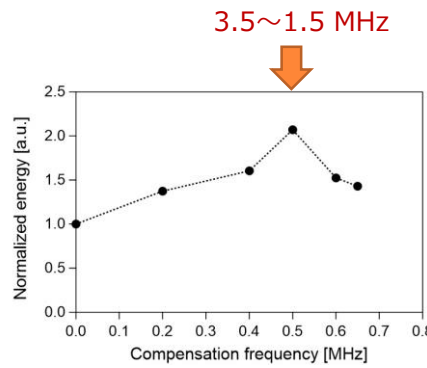
流速部からのエコーが空間的に弁別しやすくなり，ドプラ周波数の期待値↑

FM信号の利用によって24%のエネルギー増加

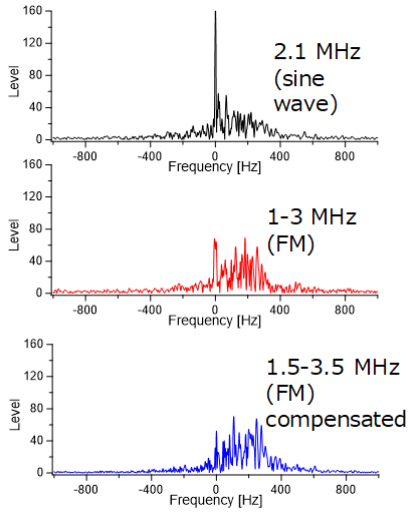
補償周波数の決定

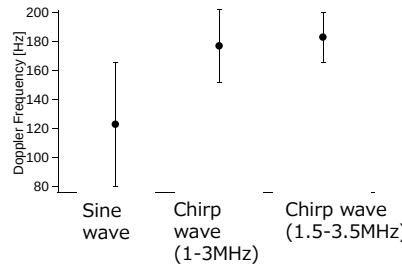
- probe：セクタ型64素子，2.1 MHz (*fc*)，帯域幅：1.4 MHz～4.0 MHz
- 生体模擬ファントム：0.7 dB/cm/MHz(厚さ：2.5 cm)
- 超音波診断装置：Ula-Op (University of Florence)





FM信号を用いたドプラ周波数の計測

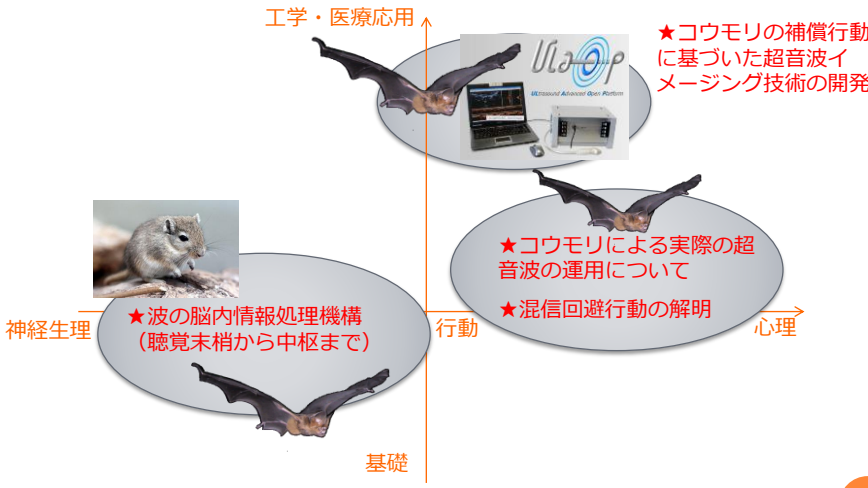




流速部からのエコーが空間的に弁別しやすくなり，ドプラ周波数の期待値↑

周波数補償によって，さらに14%の増加

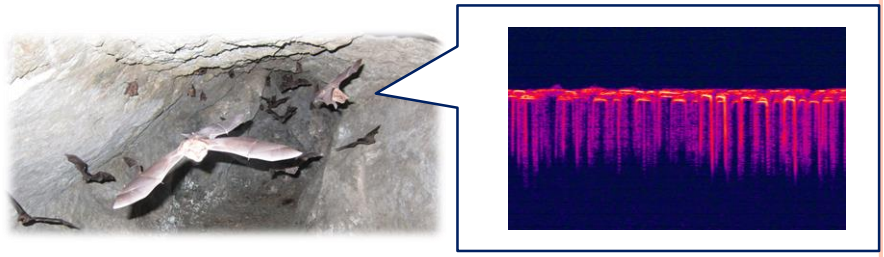
テーマ３：
生物補償行動アルゴリズムを用いた超音波イメージング技術の開発

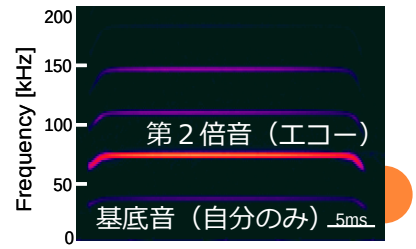


26

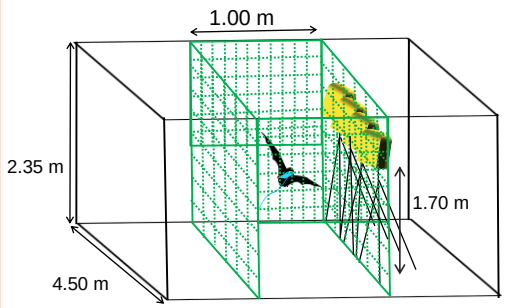
ノイズ環境下におけるコウモリの音響制御に学ぶ

ノイズ環境下におけるコウモリの音響制御

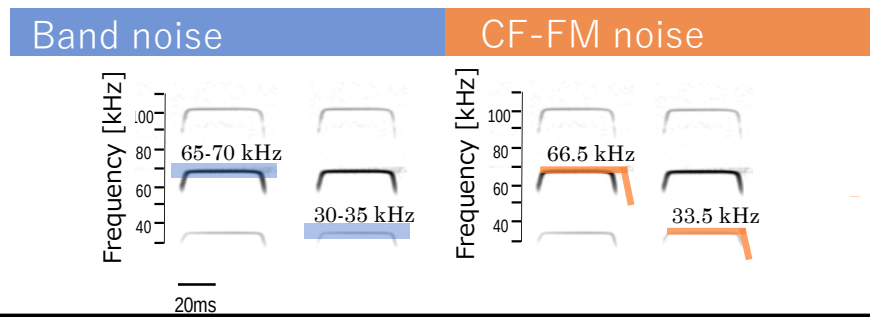




ノイズ環境下におけるコウモリの音響制御

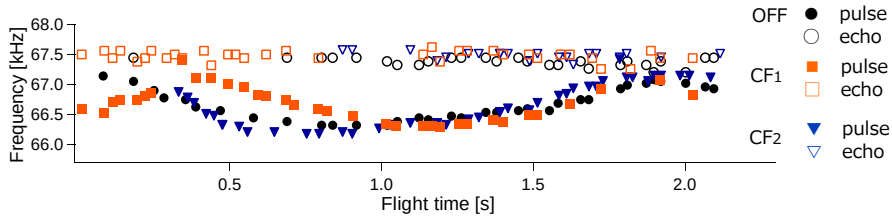


実験順
1. OFF（120 s）
2. ＣＦ１へのノイズ提示 (120 s)
3. ＣＦ２へのノイズ提示 (120 s)

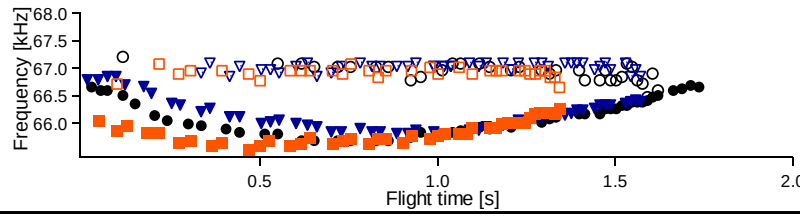


ノイズ環境下におけるコウモリの音響制御

Band noise



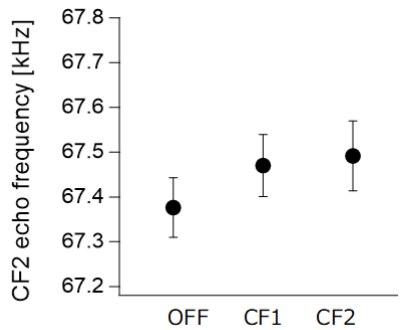
CF-FM noise



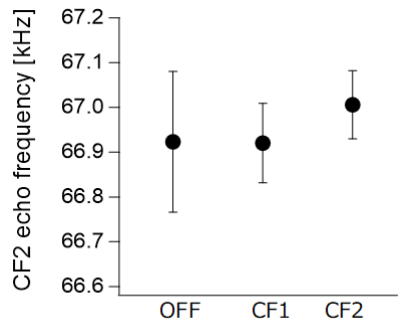
29

ノイズ環境下におけるコウモリの音響制御

Band noise



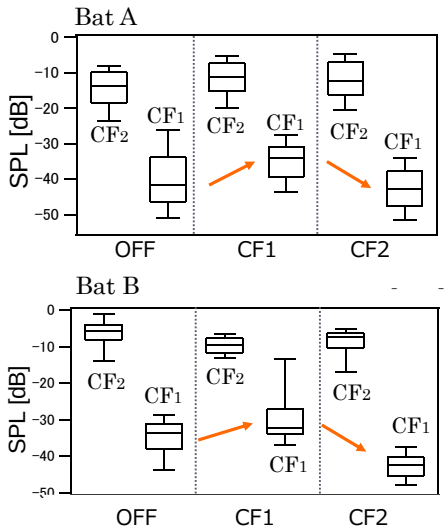
CF-FM noise

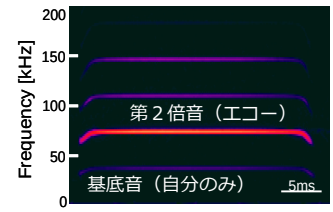


ノイズ呈示環境下でもドップラーシフト補償行動が
精度よく行われていた

ノイズ環境下におけるコウモリの音響制御

CF-FM noise

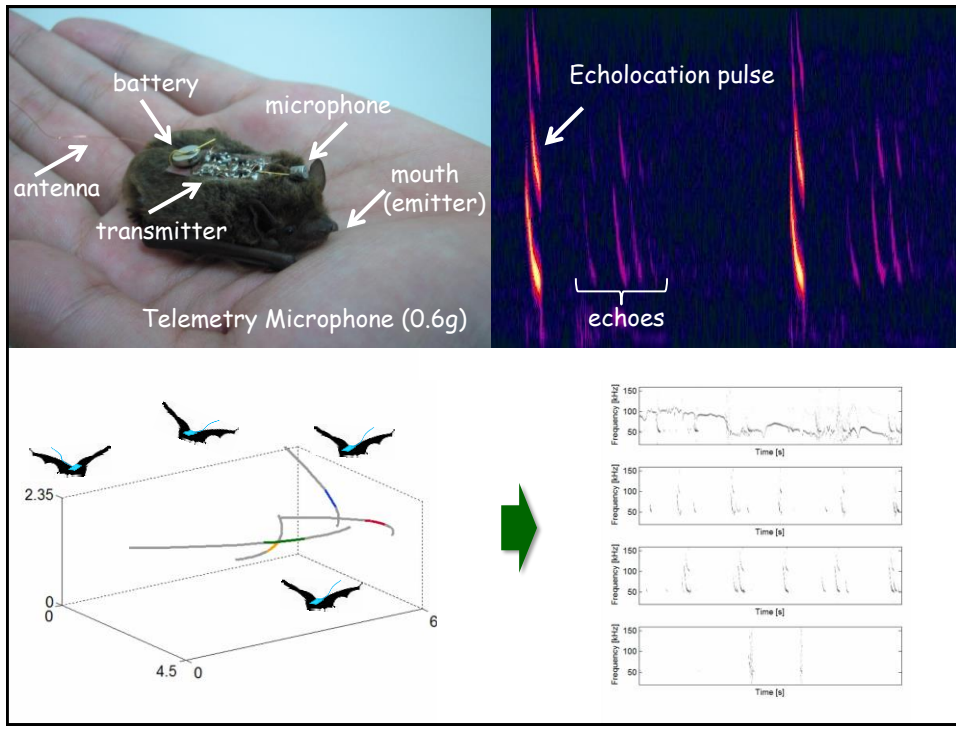




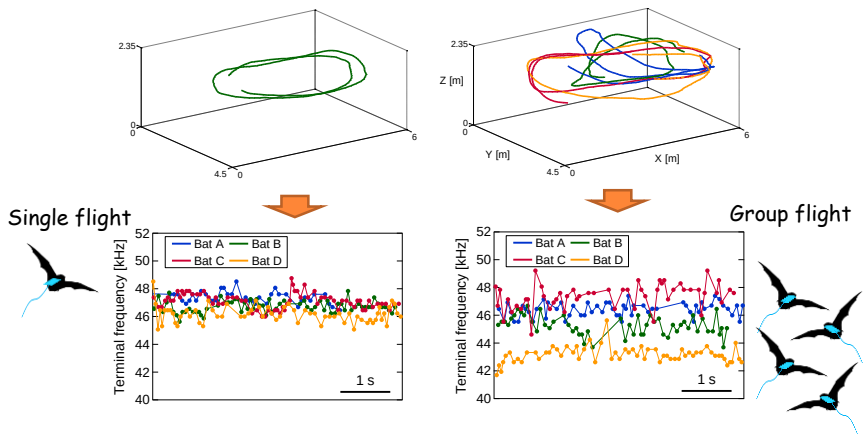
●CF1へのノイズ呈示
CF1を強く放射
→自身の声を聴きやすく

●CF2へのノイズ呈示
CF1を弱く放射
→エコーを聴きやすく

CF1とCF2の音圧比を調整



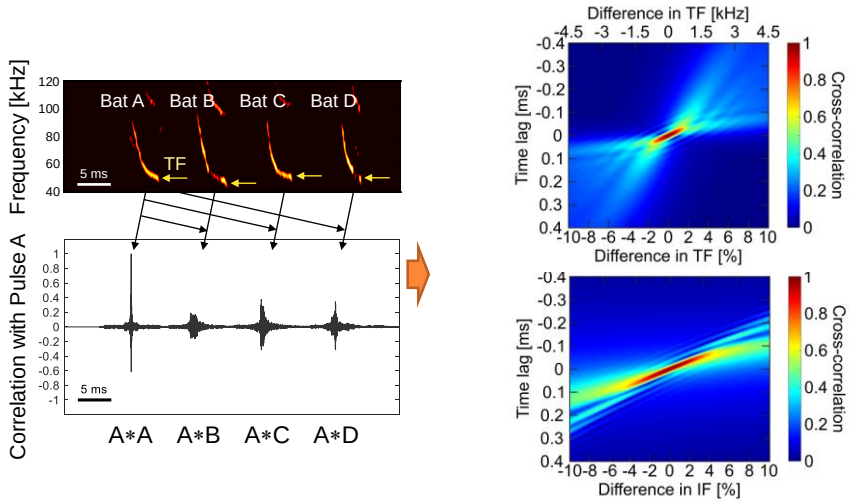
お互いの超音波は混信しないのか？



混信回避のため自身の周波数を僅かにシフトする.

(Hase, et al., under review)

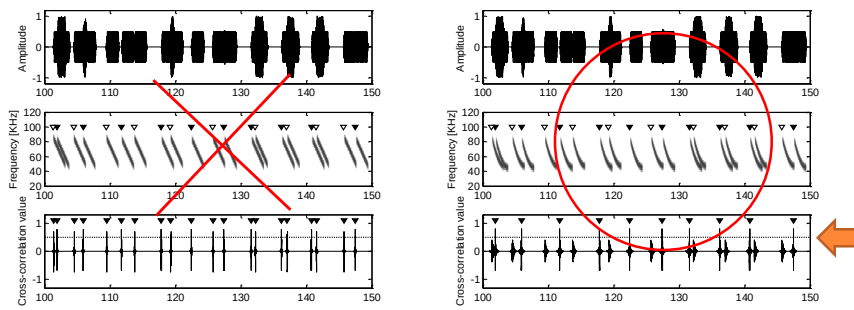
お互いの超音波は混信しない



グループ飛行中，コウモリはお互いの信号の類似度を低下．
TFの調整のみで効果的に類似度が低下する

お互いの超音波は混信しない

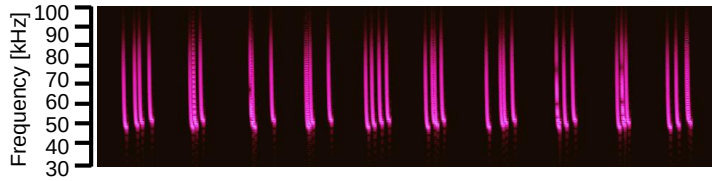
線形チャープ信号　　コウモリの超音波

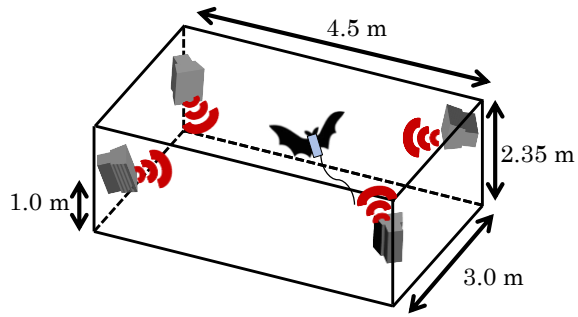


コウモリの超音波であれば，シンプルな相互相関処理で
重畳した信号同士の分離が可能．

プレイバック刺激による反応

4種類の周波数をランダムなタイミングで出現

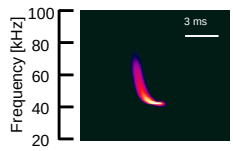


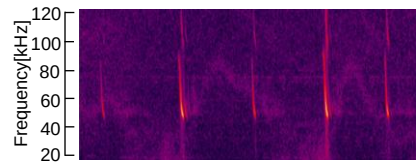


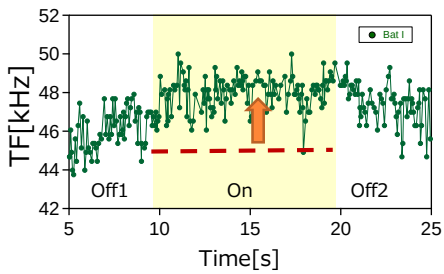
Off1(10s)
↓
On1
↓
Off2(10s)

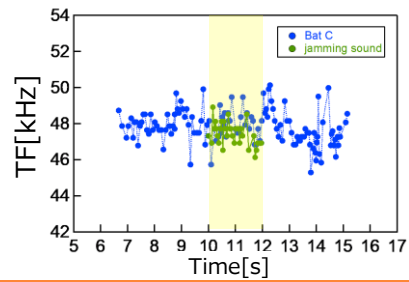
コウモリの実音声に対する反応

FM人工音 | 飛行中のコウモリの実音声









周波数が重畳していても，実音声に対しては変化無し

→コウモリの音声だけに含まれる音響的特徴がある可能性

テーマ３：

生物補償行動アルゴリズムを用いた超音波イメージング技術の開発

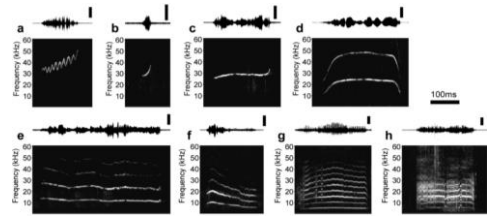
39

超音波を含む音の情報処理に関する神経基盤の解明

超音波コミュニケーション音に対する聴覚皮質の応答の計測

スナネズミ
(*Meriones unguiculatus*)

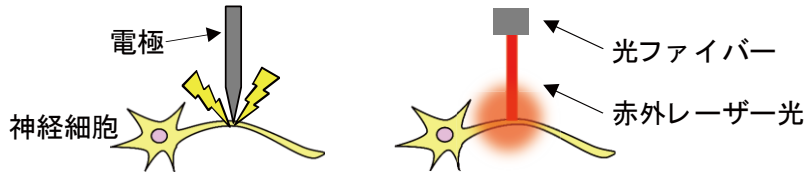
小動物は超音波で会話している



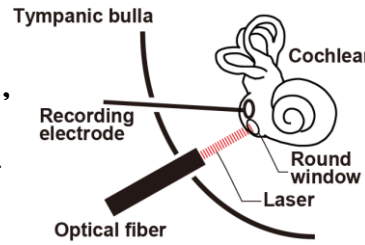
フラビン蛋白蛍光イメージングによる脳活動(代謝)の計測

音の脳内情報処理機構：光で聴覚を生み出す

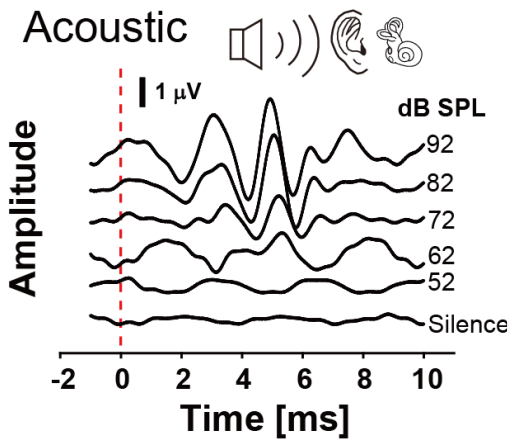
従来法：電気刺激　　赤外線レーザー刺激



レーザーで神経に触れずに，（＝手術等すること無く）神経を刺激し，聴覚を産み出す．



Acoustic

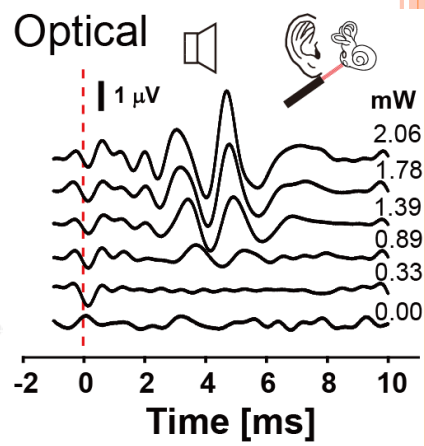


音を聞いている時の聴覚抹消の神経の応答（ABR）

上に行くほど刺激音圧が高い

パルスレーザーで蝸牛を刺激した際の聴覚抹消の神経の応答

上に行くほど刺激が強い



- レーザ刺激は「聴こえ」を生み出ことができる.
- レーザーは聴神経を短期間・同期刺激するためクリック音の様な「聴こえ」を生み出している可能性が高い.

まとめ

グループ３：
生物ソナーの超音波利用の実態に学び，医療や工学分野への知見展開を目指す.

●補償アルゴリズム
簡易型で空間分解能の高い装置への応用展開に向けて，
ドプラ計測の課題解決の一助となる可能性

●ノイズ環境下におけるコウモリの適応反応
混信回避に求められる信号設計論.
送信信号パラメータの柔軟性

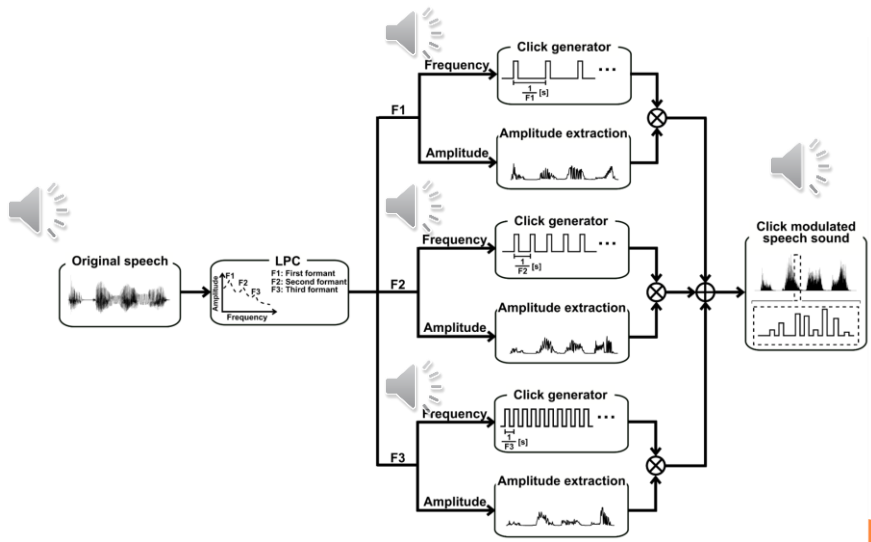
●音の脳内情報処理機構：光で聴覚を生み出す
生体機能を利用した次世代補聴システムの開発

44

本研究は文科省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（平成２５～２９年度）ならびにJSTさきがけの補助を受けて実施した.

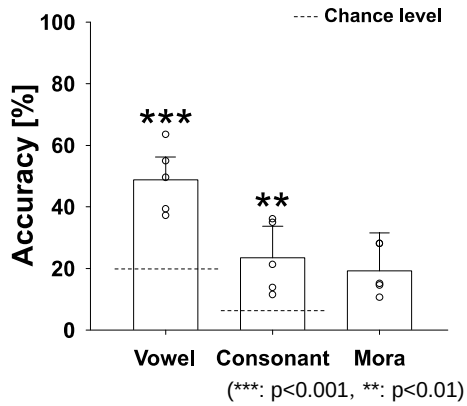
45

レーザー（クリック列）による音声知覚の再建



原音声の振幅崩落とフォルマント周波数の情報を取り出して、
赤外光レーザー人工内耳のシミュレーション音声を作成

赤外光レーザー人工内耳（クリック音列）による無意味音列の知覚



クリック列の組み合わせで音声知覚をある程度再建可能。

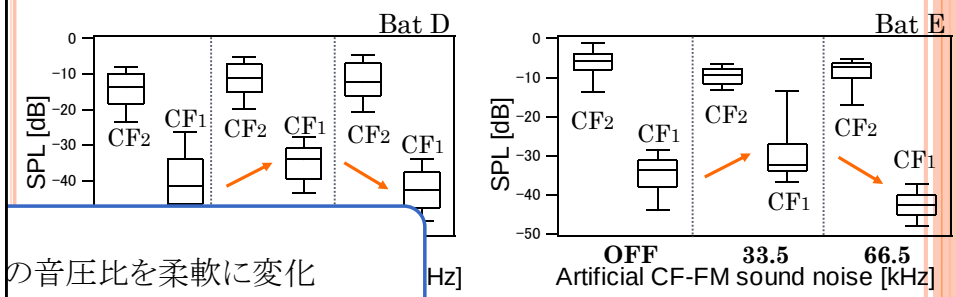
4モーラ（4文字）の無意味単語の知覚では，チャンスレベルより有意に正答率が高かった。

47

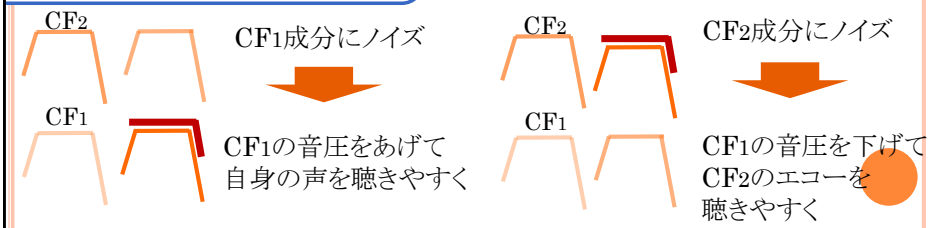
レーザーを刺激に用いた非侵襲人工内耳を開発可能

results & discussion

CF-FM noise　　パルス音圧

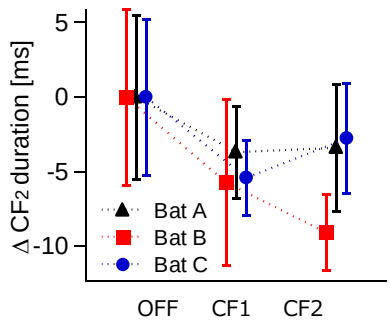


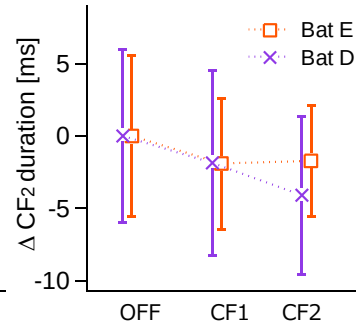
の音圧比を柔軟に変化

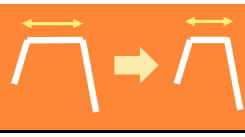


ノイズ環境下におけるコウモリの音響制御

Band noise | CF-FM noise

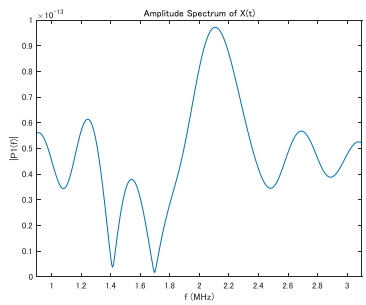






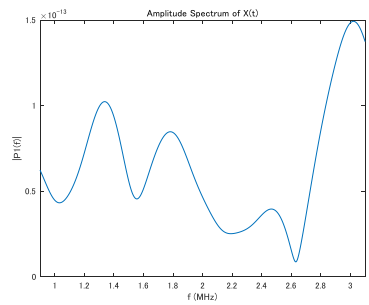
ノイズ呈示環境下では，信号長を短く

エコースペクトルの積分値で比較



Sin wave

積分値
0.061129



FM wave

積分値
0.062515