

光音響波伝搬シミュレーションと 機械学習によるヒト頭部の血管分布解析

2021年 天体形成研究会

筑波大学院 宇宙理論研究室M2 佐藤 大樹
指導教員 矢島 秀伸

目次

- I. 現在使用されている診断手法について
- II. 光音響イメージングについて
- III. ヒト頭部の光音響波伝搬シミュレーション
- IV. 機械学習によるヒト頭部の血管分布解析
- V. まとめ
- VI. 今後の展望

現在使用されている生体内画像診断の例

診断手法名	使用するもの
エコー診断	超音波
磁気共鳴イメージング(MRI)	磁力・電波
X線CT	X線

いずれの診断手法も診断する部位や症状によって使い分けることで広く使われている。
しかし、それぞれの診断手法には**デメリット**も存在している。

既存の生体内画像診断のデメリットの例

診断手法名	デメリット
エコー診断	➤ 骨や空気があると診断するのが難しくなる
磁気共鳴イメージング(MRI)	➤ 大型の装置が必要 ➤ 患者が閉所で長時間静止していることが求められる
X線CT	➤ 大型の装置が必要 ➤ 放射線被曝がある

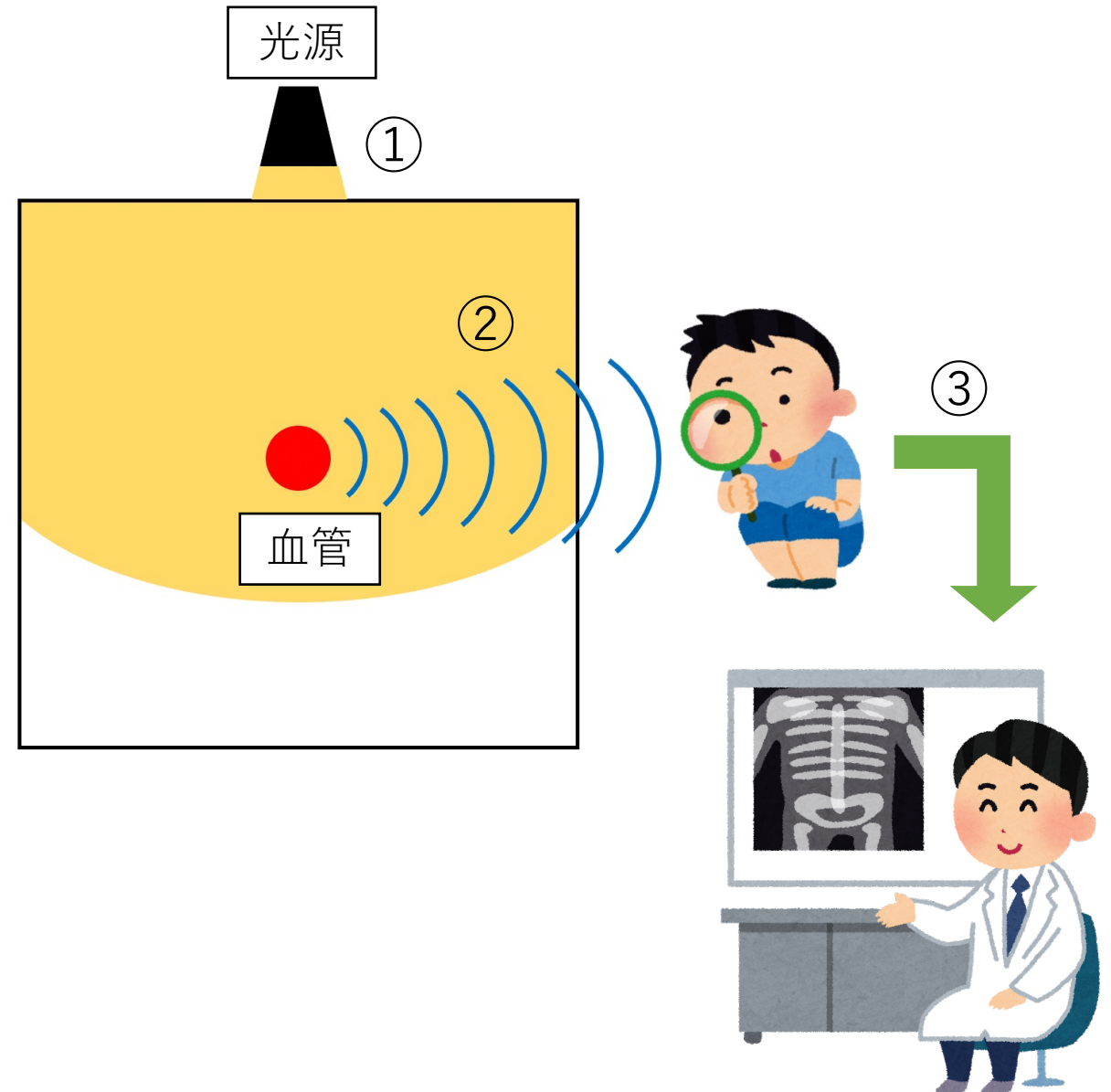
診断部位や病気、患者の状態によっては適切な診断手法を選択できない事や適切な診断手法でも診断できない場合がある。

光音響イメージング (PAT : PhotoAcoustic Tomography)

- 光と音波を使って
生体内部を画像化する診断手法

診断手順

- ① 生体に近赤外光を照射
- ② 血管などの生体組織が熱膨張し、光音響波が発生
- ③ 外部で検出し、そのデータを元に生体内部の画像化を行う



既存の診断手法とPATの比較

既存の診断手法でのデメリット	PATでの場合
骨や空気があると診断が難しくなる	エコー診断に比べ、音波の減衰は小さくなる。 →多くのデータを取ることができる
大型の装置が必要	大型の装置は必要とならない →ベットサイドでの診断が可能
閉所で長時間静止している必要がある	短時間で済むので閉所で静止している必要がない →子供や閉所恐怖症の患者にも使用できる
放射線被曝がある	放射線による被曝はない →妊婦又は妊娠の可能性のある人にも使用可能

PATは既存の診断手法のデメリットの多くを克服した診断手法となる可能性がある！

PATの現状

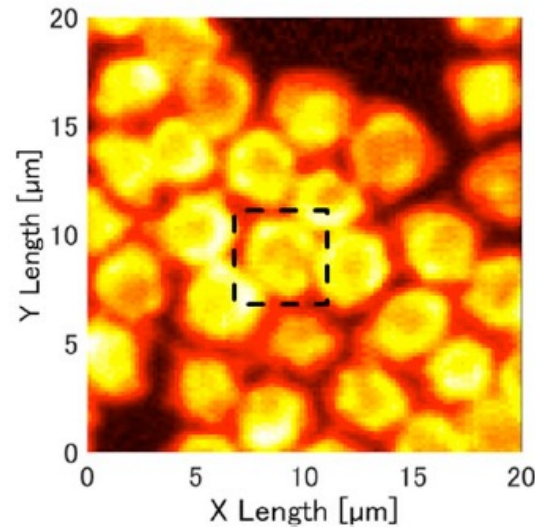
PATは、血管の画像化に優れており、検出された光音響波から血管部分布に加えて、そこに流れる血液の酸素飽和度も知ることができる。

また、非常に細かい赤血球なども画像化することができる。

→ ヒト頭部の血管分布の画像化を行うことができる可能性がある。



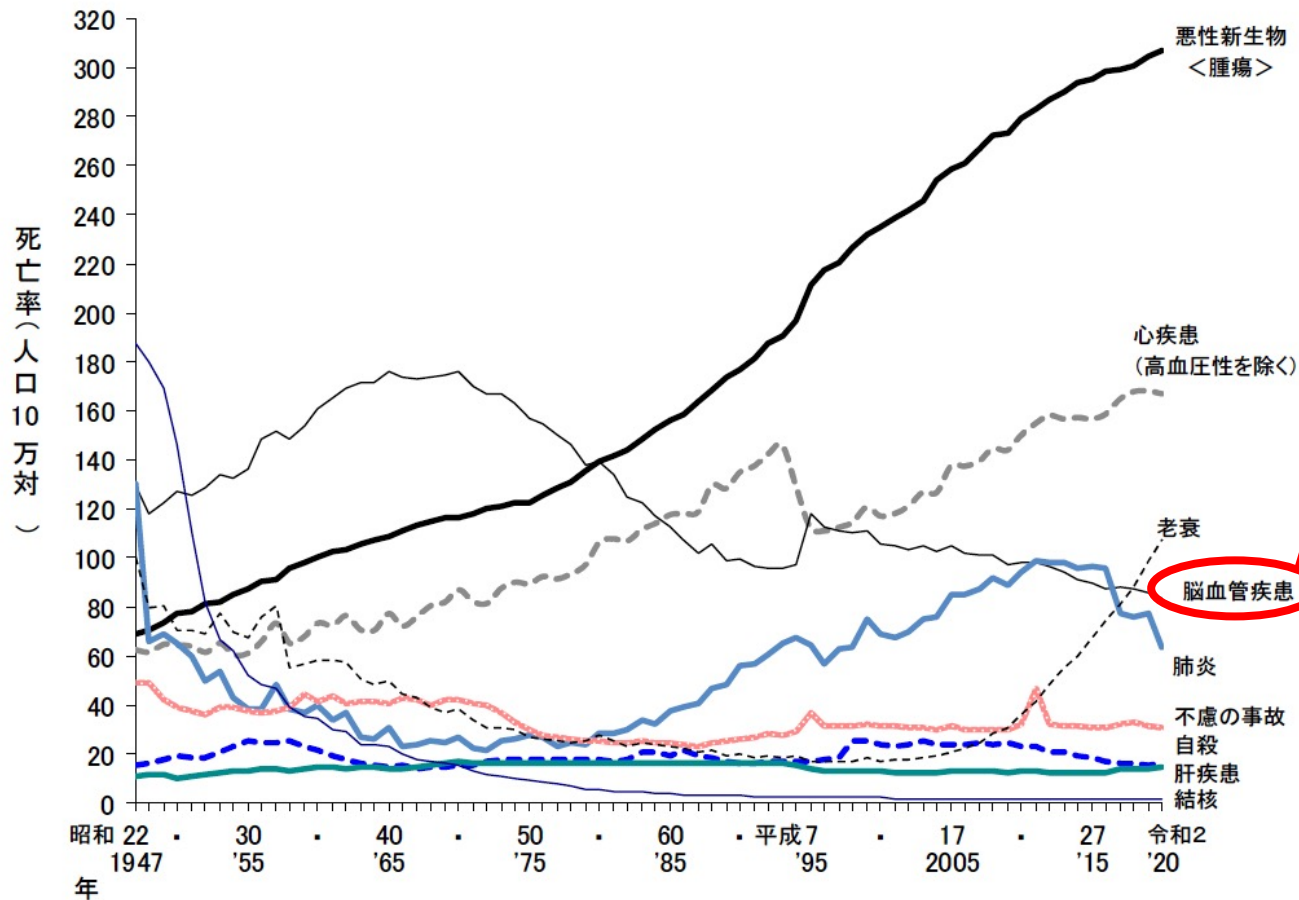
光音響波を用いた人の手の血管の画像
(Canon)



光音響波を用いた赤血球の画像
(Ryo Shintate et al. 2020)

PATの現状

なぜヒト頭部の血管分布を知る必要があるのか



10万2956人（2020年）

年間多くの人々が亡くなる疾患の一つであり、PATを用いてヒト頭部の血管の画像化を行うことで、亡くなる人数を減らすことができる可能性がある。

主な死因別に見た死亡率（人口10万対）の年次推移

（厚生労働省）

実用化には至っていない・・・

何故なのか・・・

- ・ 生体深部まで近赤外光が届きづらい
- ・ 音波は密度や音速の違いによって反射・屈折されてしまう
 - 本来存在しない位置に光音響波の発生源があるかのように見えてしまう「アーチファクト」が発生してしまう。

生体組織と頭蓋骨を想定して高精度な近赤外光の伝搬と光音響波の伝播を組み合わせたシミュレーションは行われておらず、
またそれらのデータを使用した機械学習による血管分布解析も行われていない。



- 近赤外光の伝搬シミュレーションによる、生体組織の各部での吸光量の測定
- 生体組織各部で発生した光音響波の伝搬シミュレーションと検出器での光音響波のシグナルの測定
- 測定された波形を用いた機械学習による血管分布解析の三つについて研究行う。

PATで使用する基礎方程式

照射（近赤外光）

輻射輸送方程式

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I(\mathbf{l})}{\partial t} + (\mathbf{l} \cdot \nabla) I(\mathbf{l}) = -\mu_a I(\mathbf{l}) - \mu_s I(\mathbf{l}) + \mu_s \int \phi(\mathbf{l}, \mathbf{l}') I(\mathbf{l}') d\Omega'$$

I : 輻射強度

μ_a : 吸収係数

μ_s : 散乱係数

$\phi(\mathbf{l}, \mathbf{l}')$: 散乱確率密度

(yajima et al 2021)

検出（光音響波）

光音響波動方程式

$$\nabla^2 P - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -\frac{\beta}{C_p} \frac{\partial H}{\partial t}$$

v : 生体内の音速

β : 熱膨張係数

C_p : 比熱

H : 吸収される光エネルギー密度

$P_0 = \frac{v^2 \beta}{C_p} H$: 発生する光音響波

CIP法を使用してプログラムを作成

ヒト頭部で起こる反射と屈折

ヒト頭部における光音響波伝搬で考慮すべき現象

- 反射(反射角の法則と反射係数Rに従う)

$$R = \frac{Z' \cos \theta_i - Z \cos \theta_t}{Z' \cos \theta_i + Z \cos \theta_t}$$

- 屈折 (屈折角の法則と透過係数Tに従う)

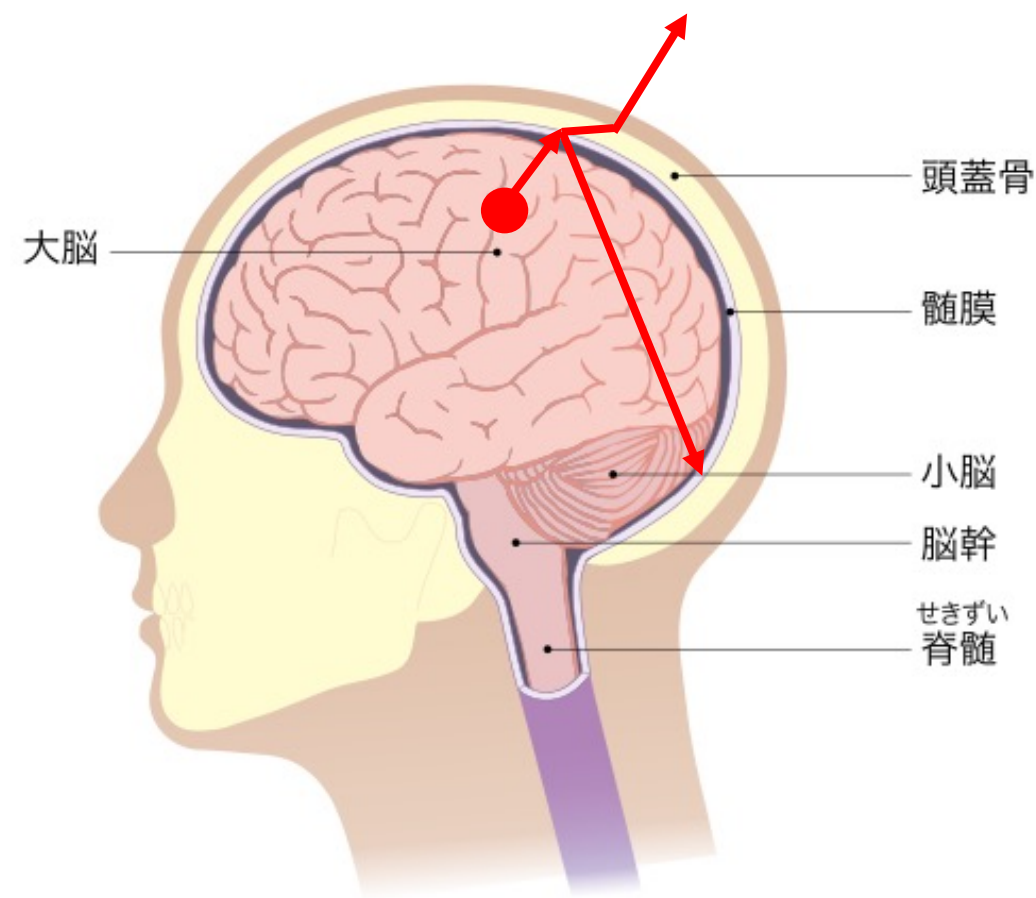
$$T = \frac{2Z' \cos \theta_i}{Z' \cos \theta_i + Z \cos \theta_t}$$

$Z = \rho v$: 入射前の領域での音響インピーダンス

$Z' = \rho' v'$: 入射後の領域での音響インピーダンス

θ_i : 入射角

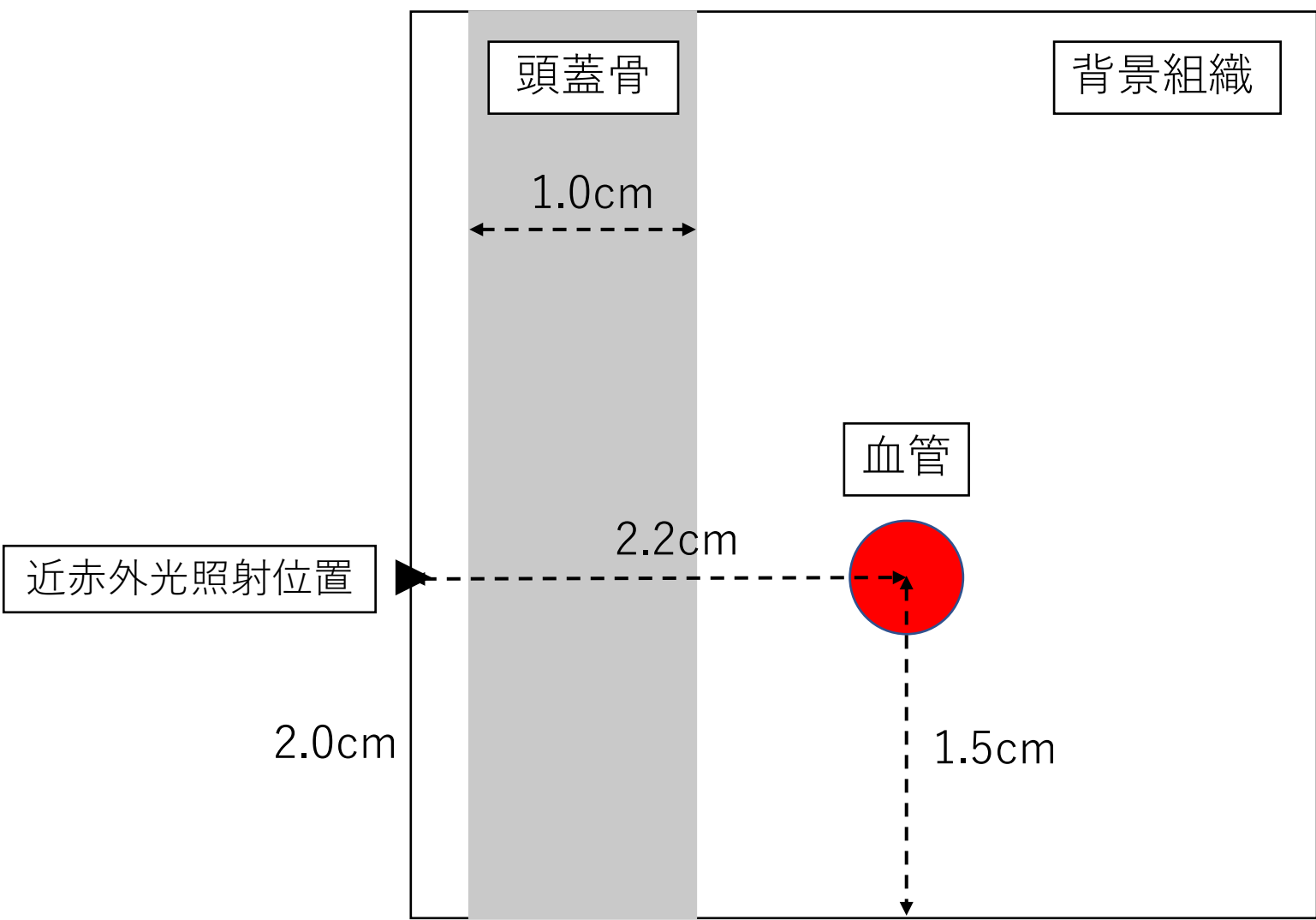
θ_t : 屈折角



(国立がん研究情報センターがん情報サービス)

ヒト頭部を想定した光音響波伝搬シミュレーション

二次元空間(4cm × 4cm)を想定してシミュレーション



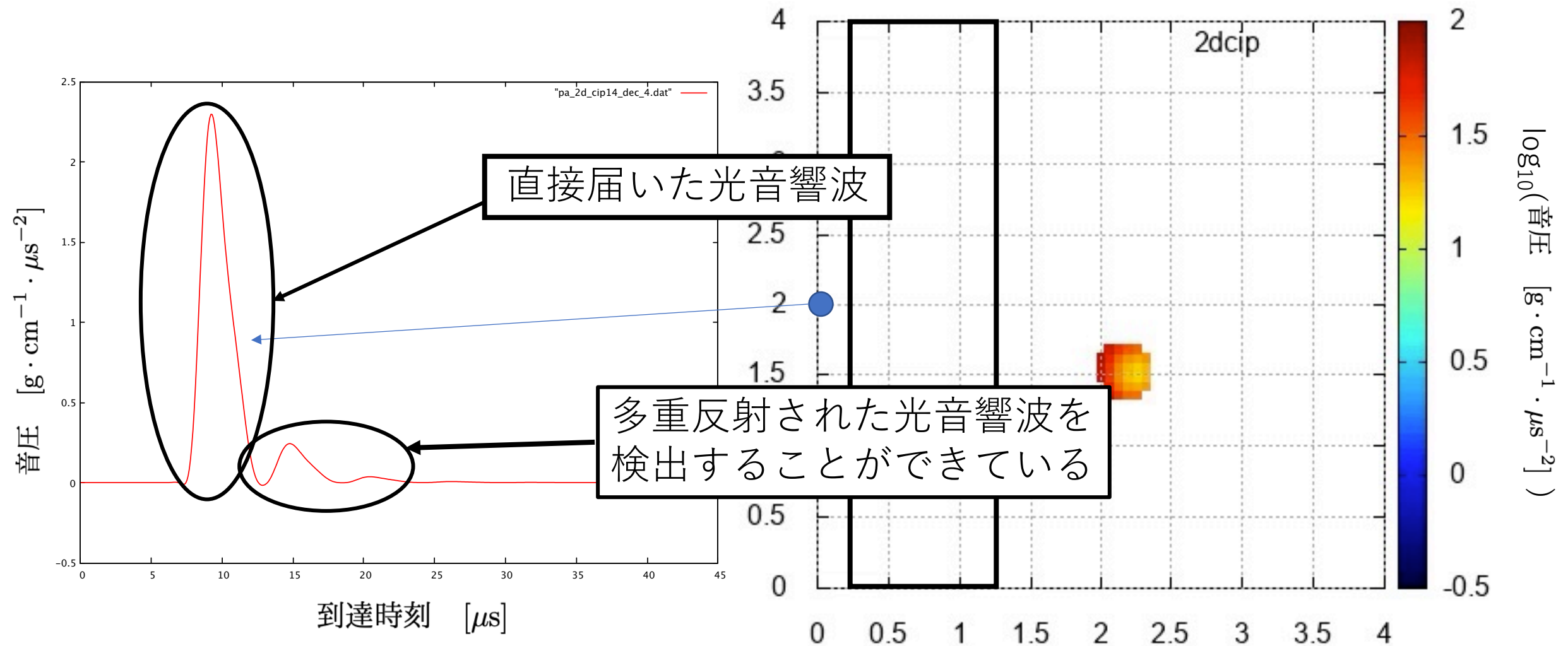
• 光学特性値

	吸収係数 (cm ⁻¹)	散乱係数 (cm ⁻¹)
血管	4.758	675.0

• 音響特性値

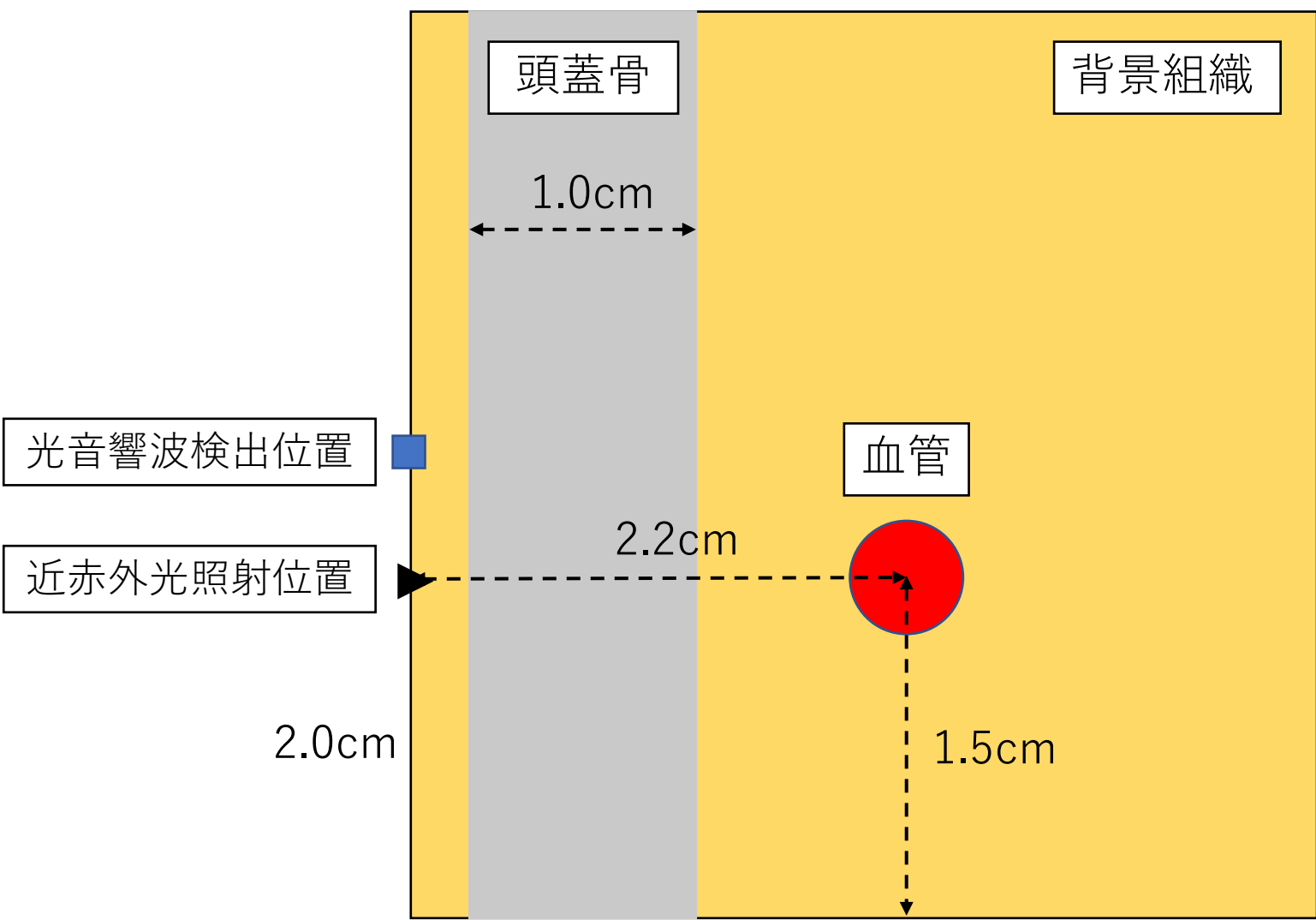
	音速 (cm/μs)	密度 (g/cm ²)
血管	0.15	1.0

ヒト頭部を想定した光音響波伝搬シミュレーション



ヒト頭部を想定した光音響波伝搬シミュレーション

二次元空間(4cm × 4cm)を想定してシミュレーション



• 光学特性値

	吸収係数 (cm ⁻¹)	散乱係数 (cm ⁻¹)
背景組織	0.3	80.0
血管	4.758	675.0
頭蓋骨	0.136	86.0

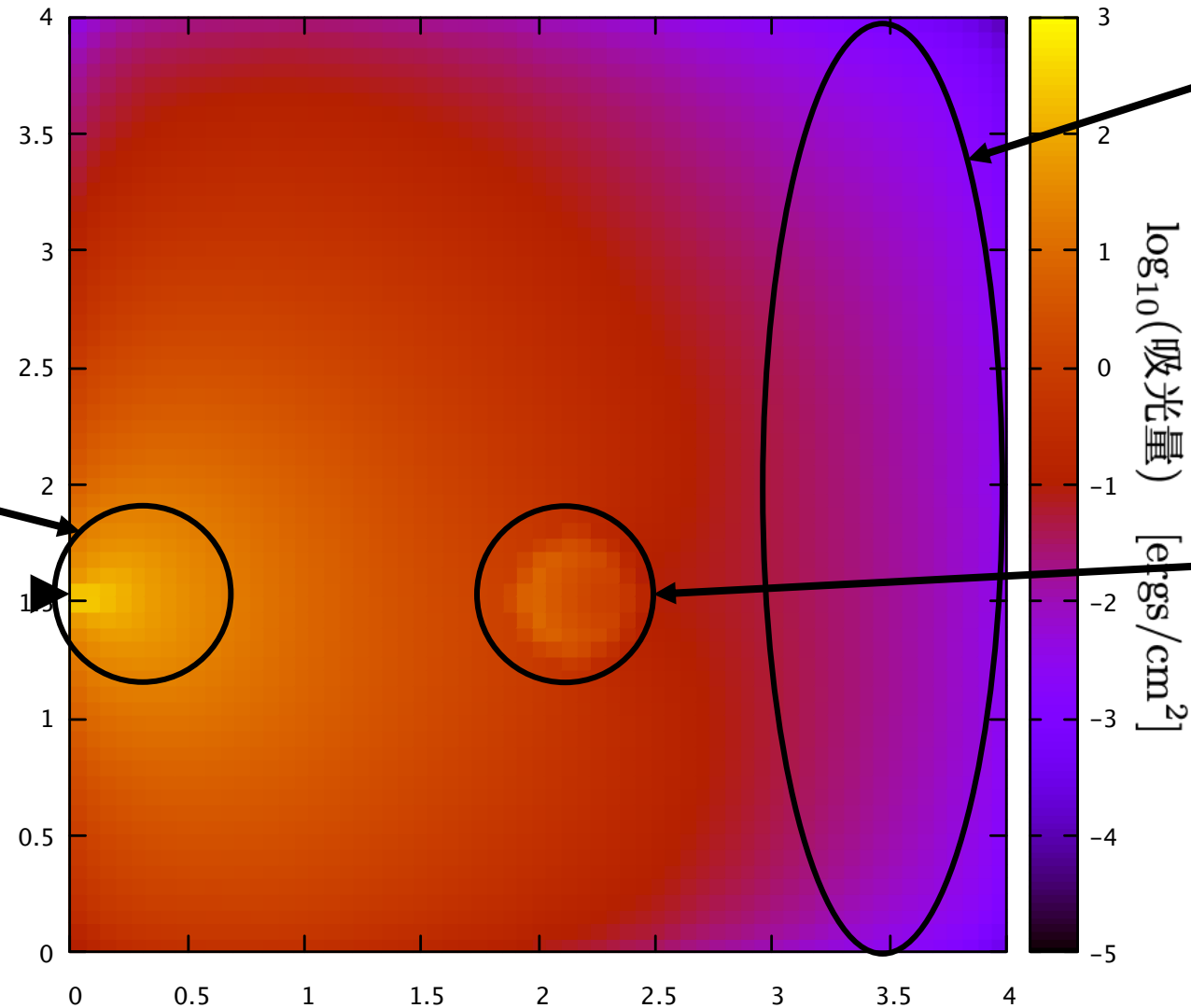
• 音響特性値

	音速 (cm/μs)	密度 (g/cm ²)
背景組織	0.15	1.0
血管	0.15	1.0
頭蓋骨	0.45	1.0

ヒト頭部を想定した光音響波伝搬シミュレーション

近赤外光伝播による吸光量図(5000ps後)

照射位置に近いと吸光量が
多くなっている

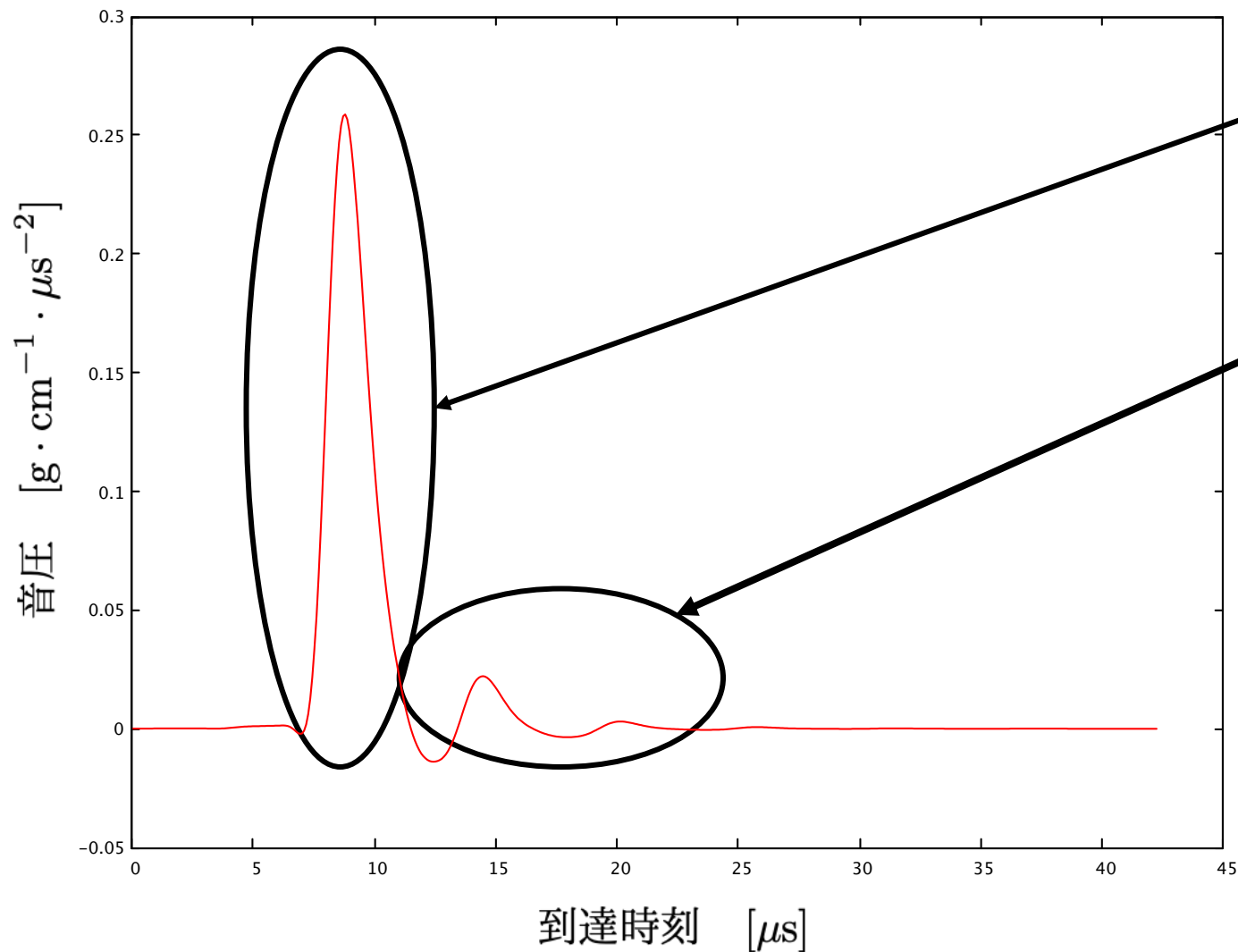


ほとんど光が伝搬
されてこないので
吸光量が少なく
なっている

吸収体での吸光量
は照射位置付近に
比べると2~3程度
オーダーが小さく
なっている

ヒト頭部を想定した光音響波伝搬シミュレーション

光音響波の検出結果（「血管ありの場合」－「血管なしの場合」）



直接届いた光音響波

多重反射された光音響波を検出することができる

血管の位置や本数が未知の場合に、血管からのシグナルなのか多重反射によるシグナルなのか判別できるようにしたい

機械学習による、血管の位置と半径の同定

本研究では、時系列データを用いて機械学習を行う

実用例

- 水疱瘡の発生件数
- 心電図から一年以内に発生する心不全予測 など

本研究では、様々な位置に血管が一本のみあることを想定して、検出器で検出される波形を機械学習に用いる。

完成したモデルに複数本の血管や半径が異なる血管がある場合の波形を入力して、正確に判定できるのかを調べる。

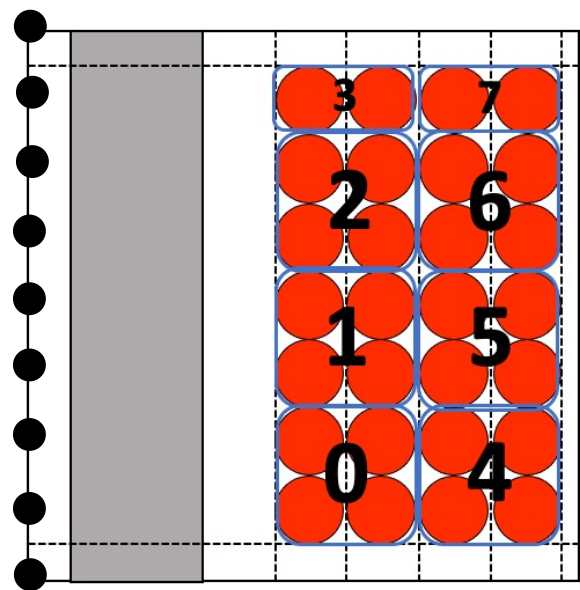
正確に判定が行えた場合には、画像データと合わせてアーファクトの除去が可能となる。

機械学習による、血管の位置と半径の同定

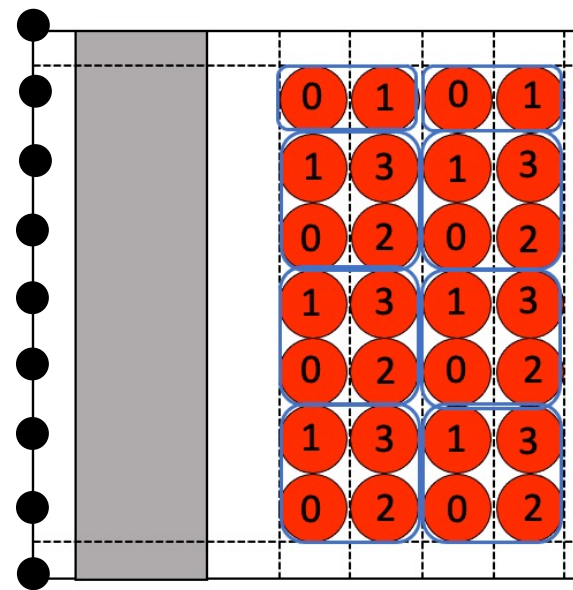
[位置]：全72パターン

[半径]：0.25cm, 0.5cm, 0.75cm

二つの情報を与え、検出器(●)の波形データに人工ノイズを加えて学習を行う。



メイングループ



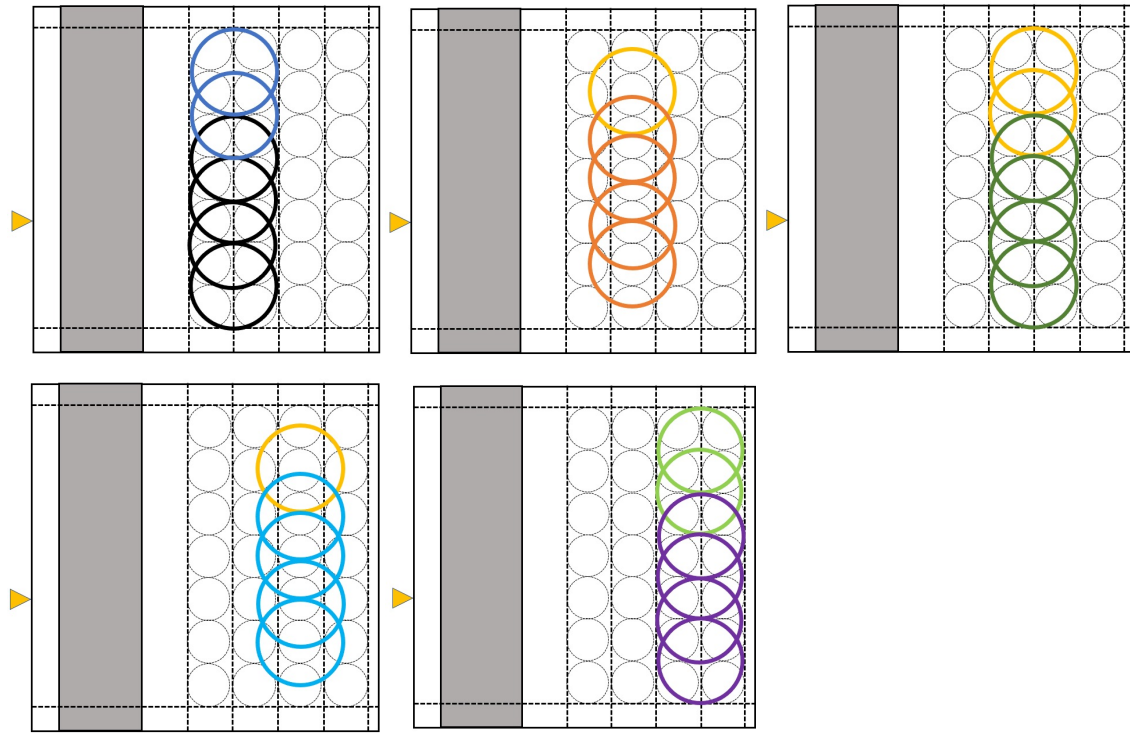
サブグループ



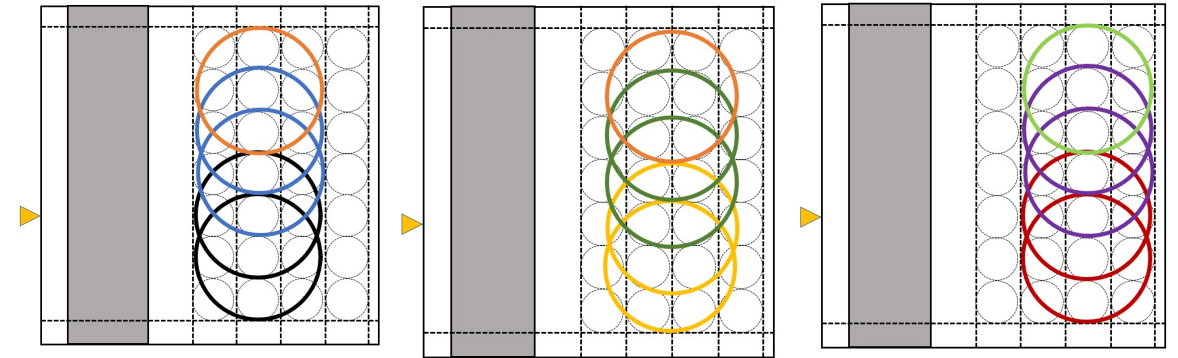
結果

4つの光源の位置とそれぞれで近赤外光の入射角度を変更した計8つのモデルを作成して、それらの結果を重ね合わせる。

機械学習による、血管の位置と半径の同定



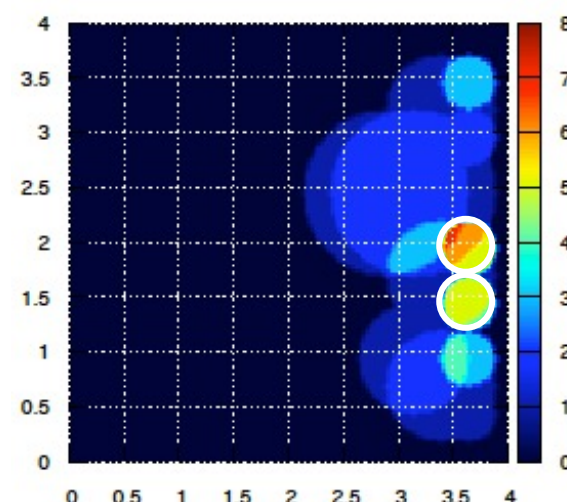
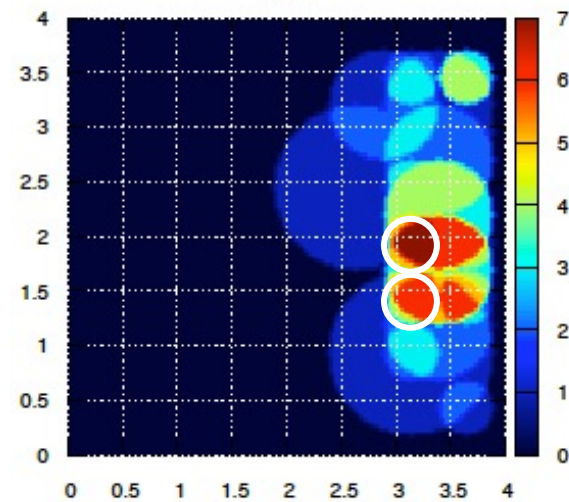
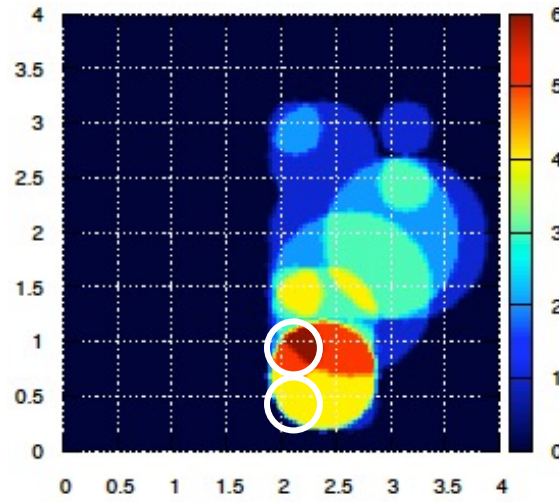
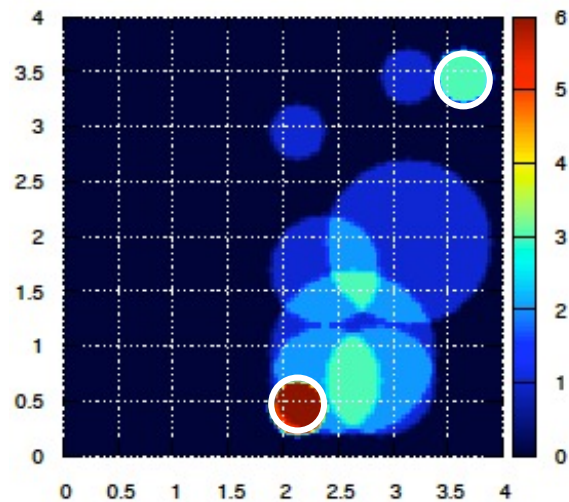
半径0.5cmの血管の位置
色毎にはメイングループを設定



半径0.75cmの血管の位置
色毎にはメイングループを設定

機械学習による、血管の位置と半径の同定

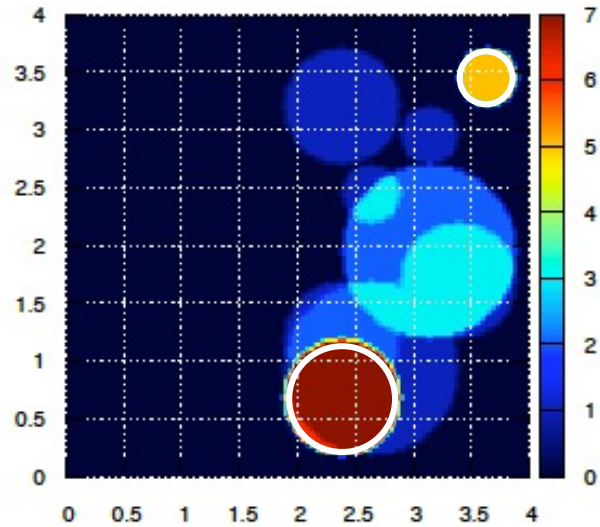
血管が複数本ある場合



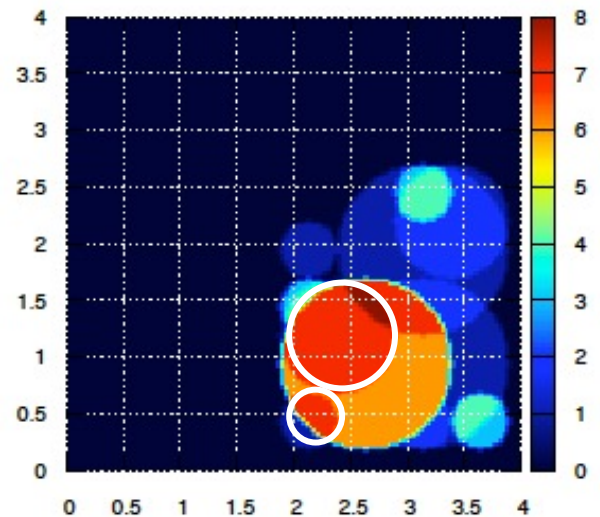
ほぼ正確に判定できているものがある一方で、
まだはっきりと位置や半径を判定できていない場合もある。

機械学習による、血管の位置と半径の同定

半径の異なる血管が複数本ある場合（0.25cmと0.5cm）

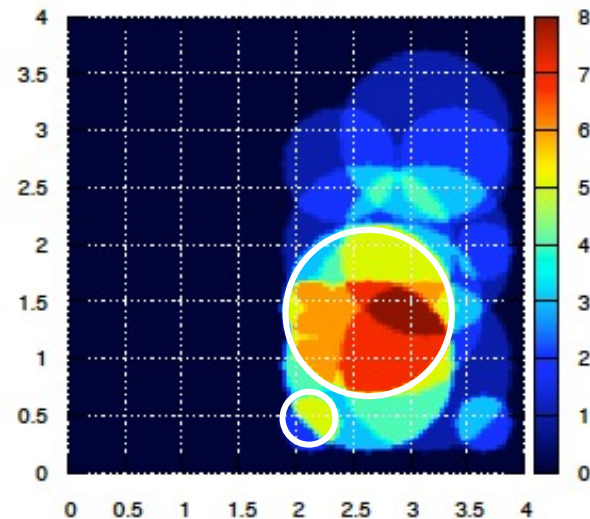
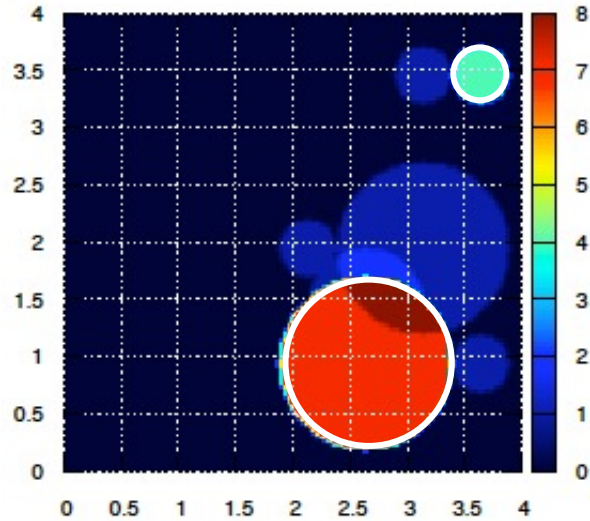


異なる大きさの血管も正確に判定できているものがある一方で、二つの血管が合わさった大きさの判定をしている場合がある。



機械学習による、血管の位置と半径の同定

半径の異なる血管が複数本ある場合（0.25cmと0.75cm）



異なる大きさの血管も正確に判定できているものがある一方で、まだはっきりと位置や半径を判定できていない場合もある。

まとめ

1. 輻射輸送方程式の数値計算プログラムとCIP法を使用して近赤外光・光音響波の伝搬のシミュレーションを行なった。
2. ヒト頭部では直接的な光音響波のシグナルに加えて多重反射によるシグナルも検出することができた。
3. 血管の[位置]と[半径]に関する情報を基に機械学習による判定を行った。

今後の展望

- ✓ 検出器の条件についてより詳細な条件を付与する。
- ✓ 機械学習による判定精度が高い時と低い時の原因を突き止め、判定精度の向上を行う。
- ✓ 出血や血栓が存在する場合を想定してシミュレーションを行い、機械学習と組み合わせることで脳内出血や脳梗塞の予測が可能か調べる。