

光散乱モデルを用いた皮膚と刺青の色評価に関する研究



平成12年度博士論文

島田 美帆



Outline

- 医療用刺青とは
- 拡張Beer-Lambertの法則を用いた推定法
- 実験
- 推定結果
- 結論



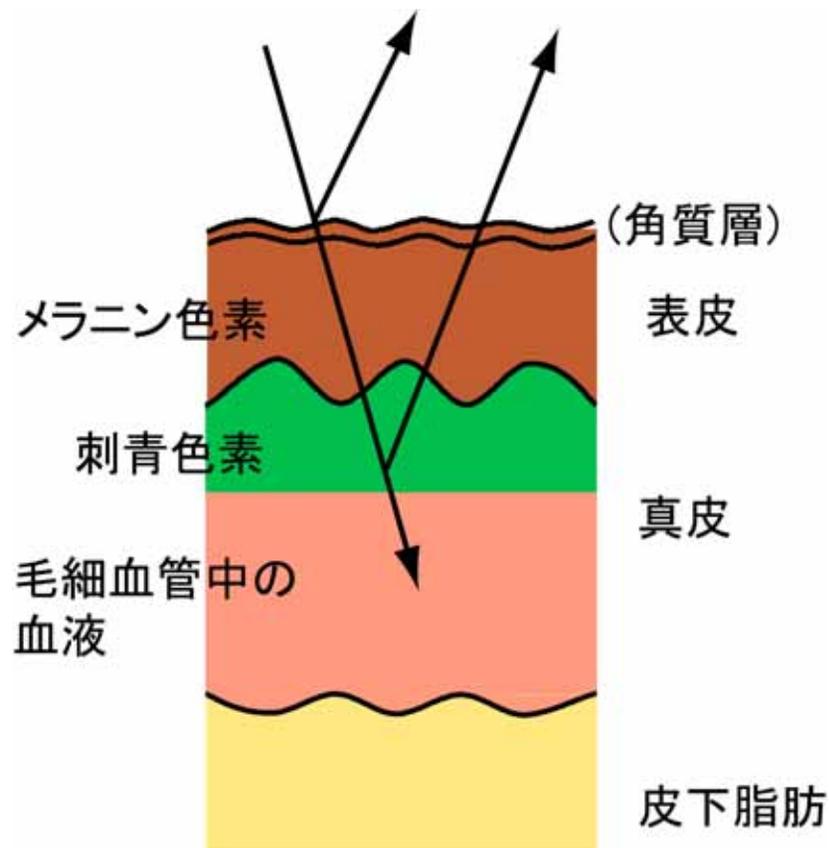
医療用刺青とは

- あざなど、皮膚色の異常の治療にはレーザー治療が有効であるが、適用できない場合がある。
 - メラニン色素が深い位置にあるあざ
 - 移植した皮膚が周囲の色と合わない場合
 - 周囲より色が薄いあざ(白斑)

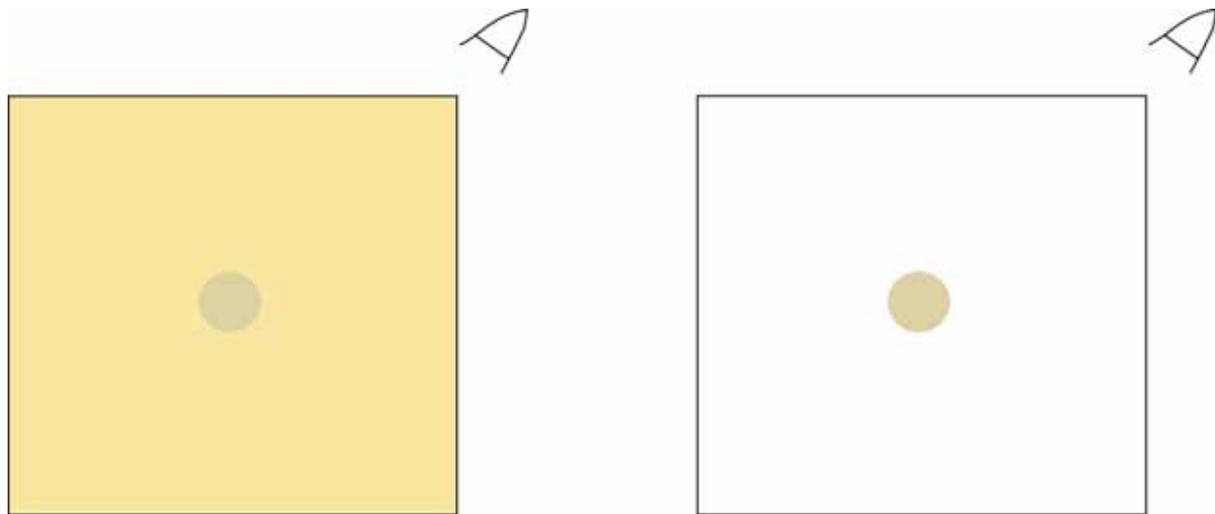
医療用刺青が有効

医療用刺青と皮膚の構造

- 刺青色素は真皮の上層に入る。
- それ以外の部位に入った刺青は新陳代謝によって取り除かれる。

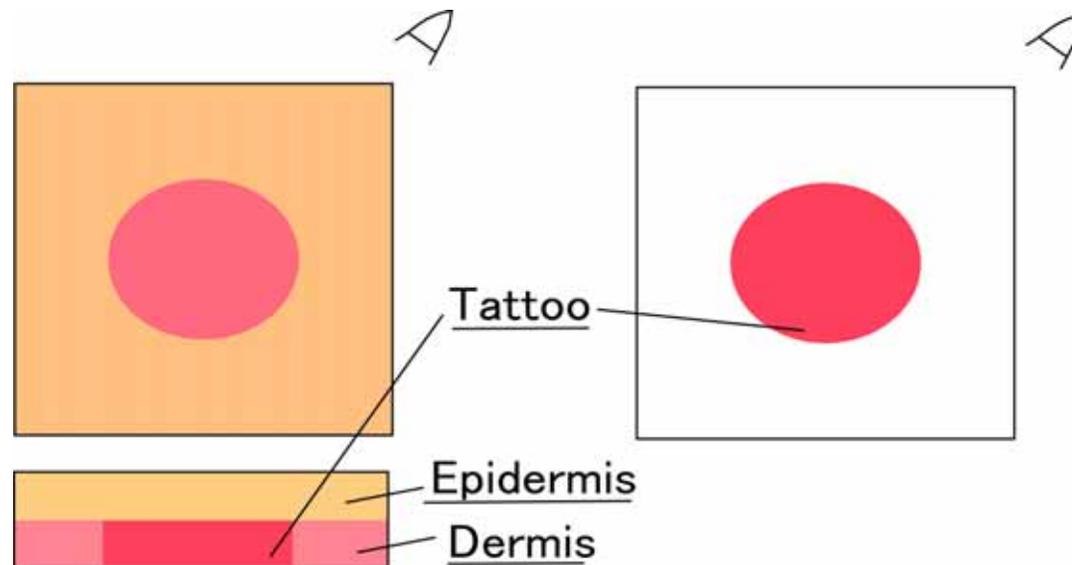


目の錯覚



- 周囲の色によって知覚される色が異なる。
- 大動脈・静脈が青く見えるのは、周囲の色が肌色であるためである。

従来の刺青の色推定法



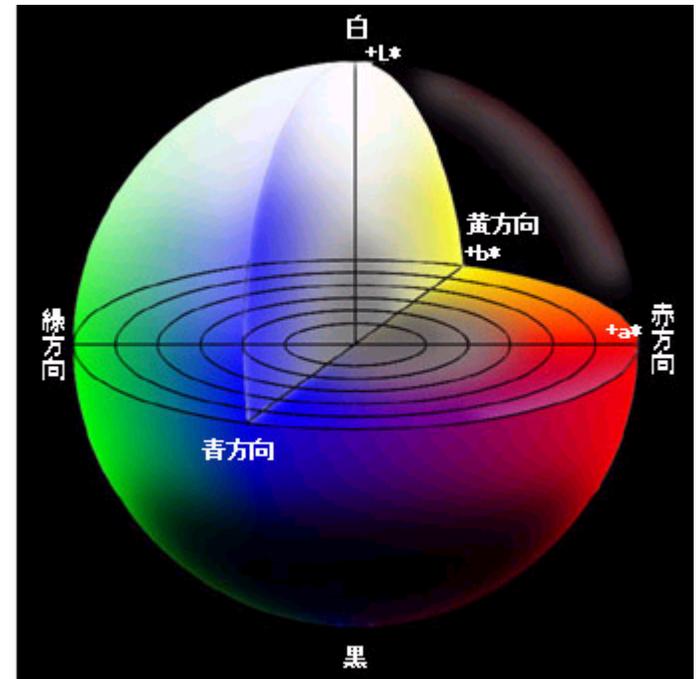
- 経験と勘を頼りに目視で推定しているため、幾度も手術を繰り返している

シミュレーションの必要性

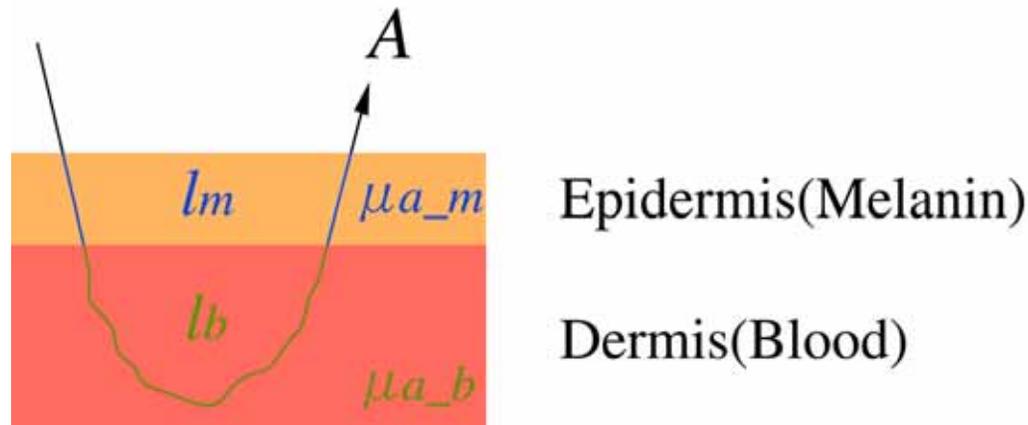
L*a*b*表色系

- 色の差を数値化(色差)するために、国際照明委員会(CIE)によってL*a*b*表色系などが推奨されている
- L^* 明るさ・明度
- a^* 緑(-) 赤(+)
- b^* 青(-) 黄(+)
- 色差 ΔE_{ab}^* は次のように定義される。

$$\Delta E_{ab}^* \equiv \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$



拡張Beer-Lambertの法則と皮膚の構造

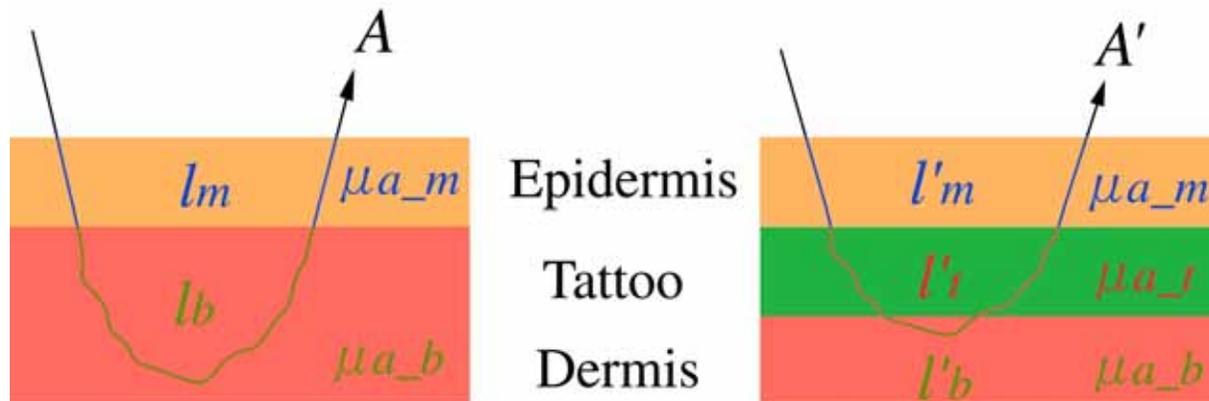


- 健常者の皮膚のAttenuationのスペクトル $A(\lambda)$ は次の式で表すことができる。

$$A(\lambda) = \mu_{a_m}(\lambda)l_m(\lambda) + \mu_{a_b}(\lambda)l_b(\lambda) + G$$
$$\mu_a(\lambda) = \varepsilon(\lambda)C$$

添え字 m および b はそれぞれメラニンおよび血液を表す。

刺青投与後の平均光路長の変化



$$A(\lambda) = \mu_{a_m}(\lambda)l_m(\lambda) + \mu_{a_b}(\lambda)l_b(\lambda) + G$$

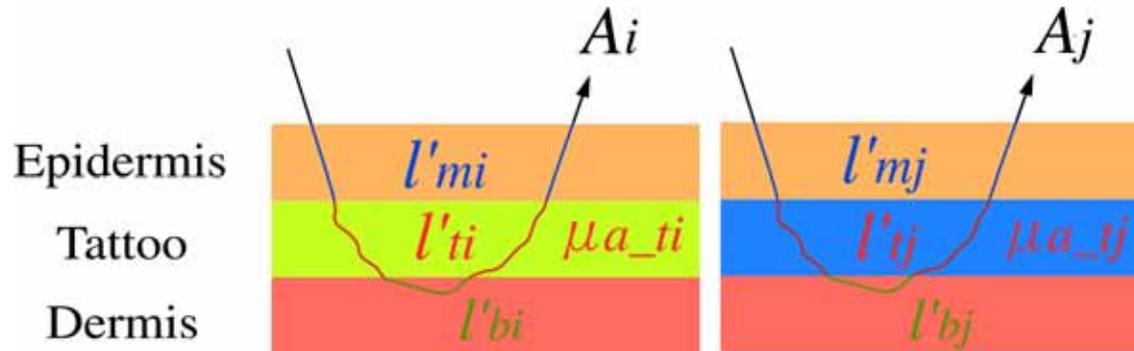
刺青後

$$A'(\lambda) = \mu_{a_m}(\lambda)l'_m(\lambda) + \mu_{a_b}(\lambda)l'_b(\lambda) + \mu_{a_t}(\lambda)l'_t(\lambda) + G'$$

- ダッシュは刺青後を表し、添え字 t は刺青のある層を指す
- 光を強く散乱・吸収する刺青色素によって、皮膚中の平均光路長が大きく変わる。

刺青した皮膚の色推定法(1)

- 同じ皮膚に異なる色の刺青を施す



- 異なる刺青色素を入れた皮膚の吸光度 A_i の差

$$A'_i(\lambda) - A'_j(\lambda) = \mu_{a_m}(\lambda)(l'_{mi}(\lambda) - l'_{mj}(\lambda)) + \mu_{a_b}(\lambda)(l'_{bi}(\lambda) - l'_{bj}(\lambda)) \\ + (\mu_{a_ti}(\lambda)l'_{ti}(\lambda) - \mu_{a_tj}(\lambda)l'_{tj}(\lambda)) + G'_i - G'_j$$

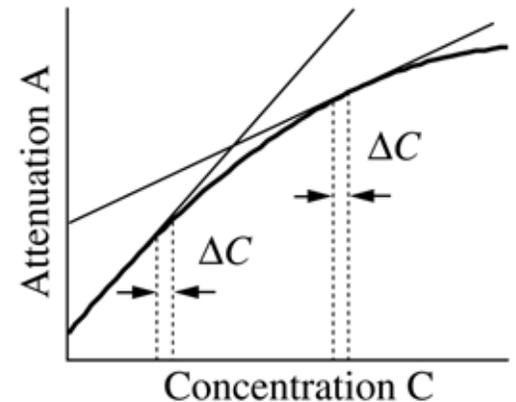
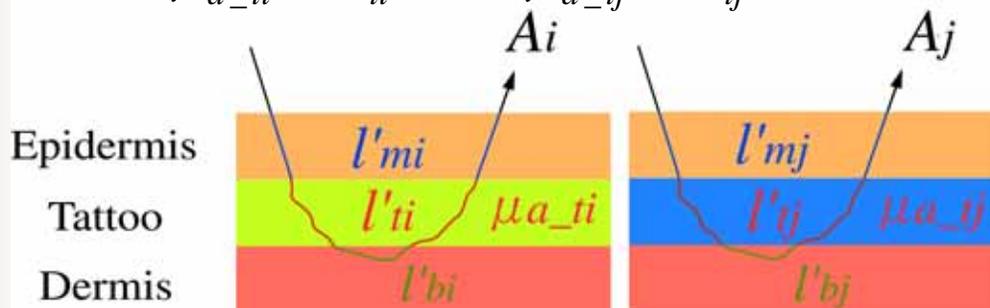
刺青した皮膚の色推定法(2)

- 3つの刺青色素の散乱特性値が等しく、吸収係数のみ異なると仮定する
- 刺青の層の吸収は大きな違いがあるので光路長が同じであるとみなすことができない。
- 刺青の層以外の吸収は同じであると仮定し、平均光路長の違いは無視する。

$$A'_i(\lambda) - A'_j(\lambda)$$

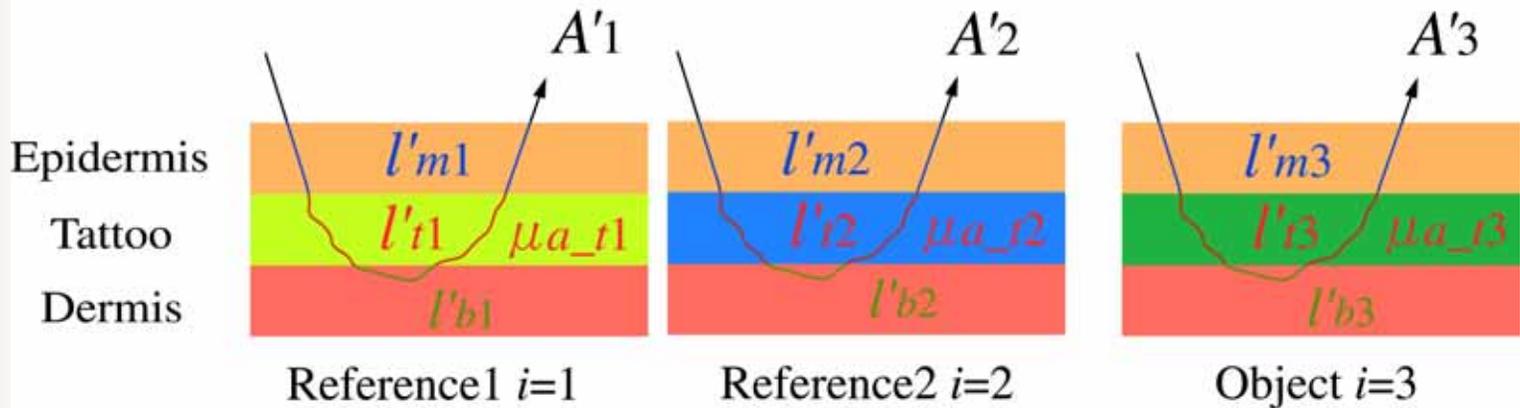
$$= \mu_{a_m}(l'_{mi} - l'_{mj}) + \mu_{a_b}(l'_{bi} - l'_{bj}) + (\mu_{a_ti} l'_{ti} - \mu_{a_tj} l'_{tj}) + G'_i - G'_j$$

$$\approx \mu_{a_ti}(\lambda) l'_{ti}(\lambda) - \mu_{a_tj}(\lambda) l'_{tj}(\lambda)$$



刺青した皮膚の色推定法(3)

- 目的とする刺青と2つの参照とする刺青



$$A'_i(\lambda) - A'_j(\lambda) \approx \mu_{a_ti}(\lambda)l'_{ti}(\lambda) - \mu_{a_tj}(\lambda)l'_{tj}(\lambda) \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

$$A'_3(\lambda) = K(\lambda)(A'_2(\lambda) - A'_1(\lambda)) + A'_1(\lambda)$$

$$\text{ここで } K(\lambda) = \frac{\mu_{a_t3}(\lambda)l'_{t3}(\lambda) - \mu_{a_t1}(\lambda)l'_{t1}(\lambda)}{\mu_{a_t2}(\lambda)l'_{t2}(\lambda) - \mu_{a_t1}(\lambda)l'_{t1}(\lambda)}$$

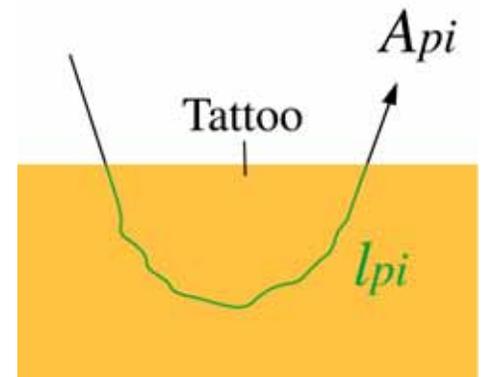
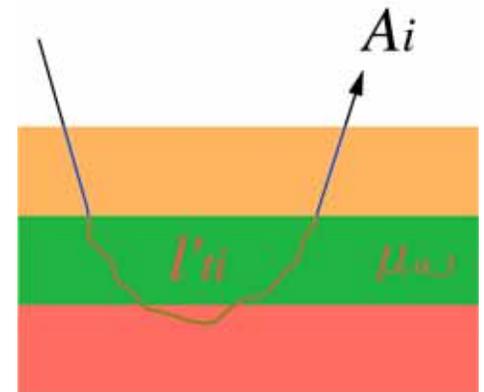
- $A'_1(\lambda), A'_2(\lambda)$ および K が既知であれば $A'_3(\lambda)$ を推定することができる。

Kの推定

- 散乱特性値が等しいなら、色素による刺青の層の光路長 l' の違いは色素のみを計測したときの光路長 l_p の違いと同じと仮定

$$K(\lambda) = \frac{\mu_{a_t3} l'_{t3} - \mu_{a_t1} l'_{t1}}{\mu_{a_t2} l'_{t2} - \mu_{a_t1} l'_{t1}}$$
$$\approx \frac{\mu_{a_t3} l_{p3} - \mu_{a_t1} l_{p1}}{\mu_{a_t2} l_{p2} - \mu_{a_t1} l_{p1}} = \frac{A_{p3}(\lambda) - A_{p1}(\lambda)}{A_{p2}(\lambda) - A_{p1}(\lambda)}$$

- $\frac{A_{p3}(\lambda) - A_{p1}(\lambda)}{A_{p2}(\lambda) - A_{p1}(\lambda)}$ は簡単に測定可能



実験 (1)

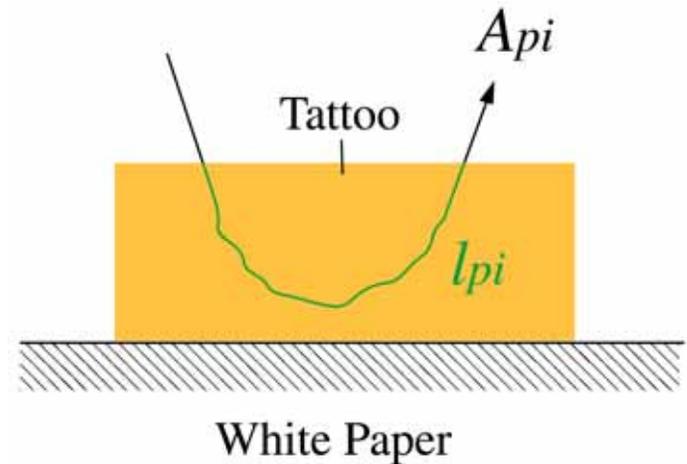
■ 白、ベージュおよび茶の刺青の構成

	Titanium oxide (scattering)	Indian red (absorption)	Yellow iron oxide (absorption)	Glycerin (trans- parency)	IPA (trans- parency)	Water (trans- parency)
white	42%	0%	0%	18%	31%	9%
beige	39%	1%	2%	28%	25%	5%
brown	37%	2%	3%	28%	25%	5%

- 散乱体を青、吸収体をオレンジ、透明な物質は白の枠で表した。
- 散乱体である酸化チタンの割合がほぼ等しいため散乱特性は同じであると仮定。

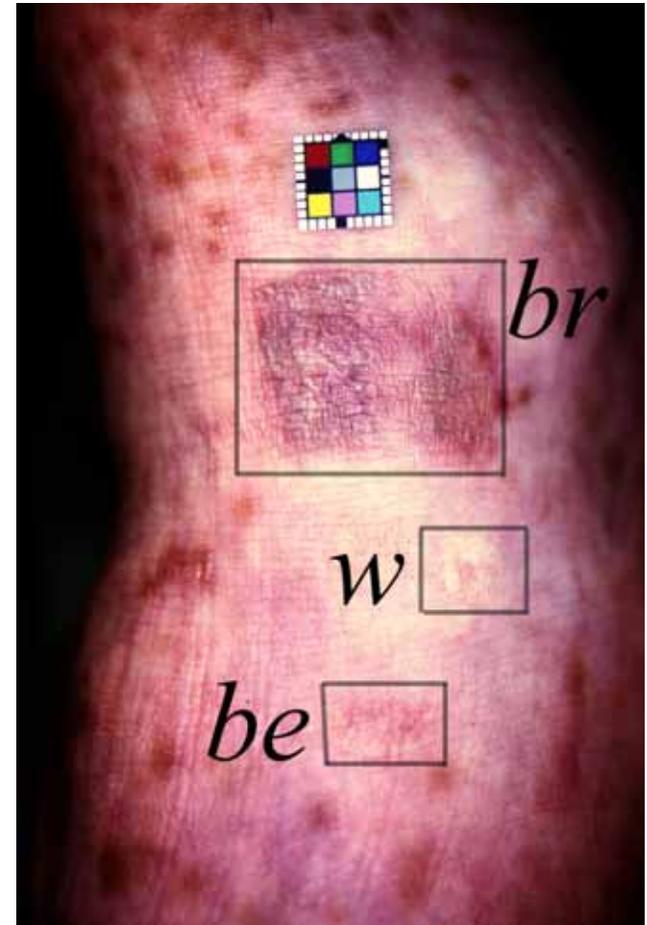
実験 (2)

- 3つの刺青色素を白い紙の上に乗せた。
- 刺青色素は充分厚い。
- ハンディタイプの積分球
CM2022で400nmから700nmまでの反射率を10nmごとに計測

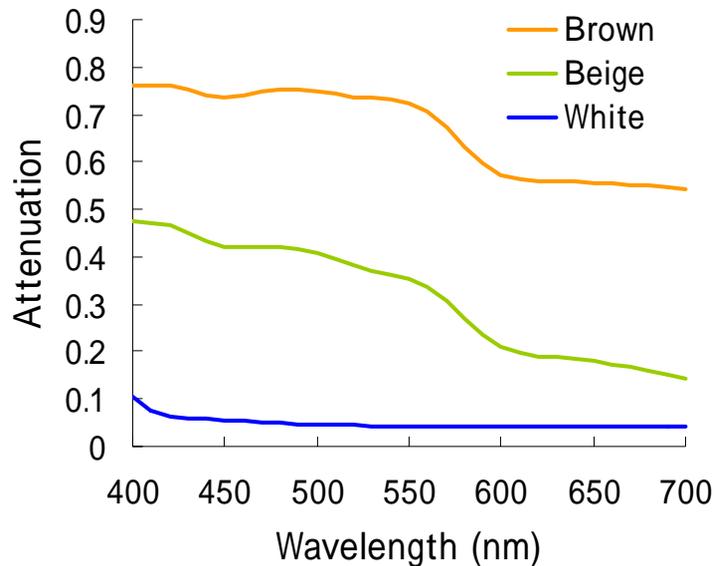


実験 (3)

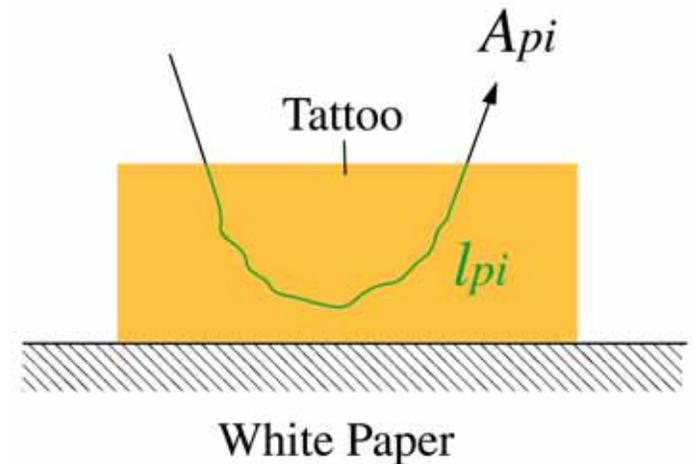
- 白斑(メラニン色素が欠乏している部位)の足の甲に、白、ベージュおよび茶の刺青を投与
- ハンディタイプの積分球で400nmから700nmまでの反射率を10nmごとに計測



刺青色素の吸光度スペクトル

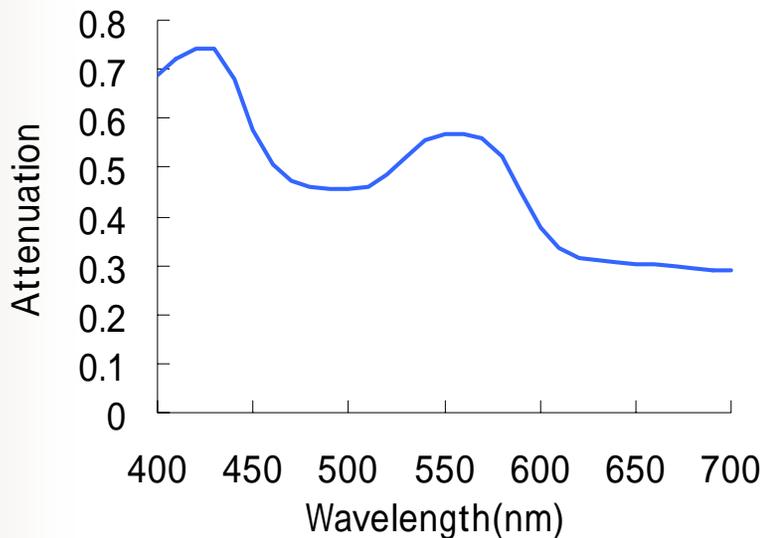


3つの刺青色素の吸光度スペクトル

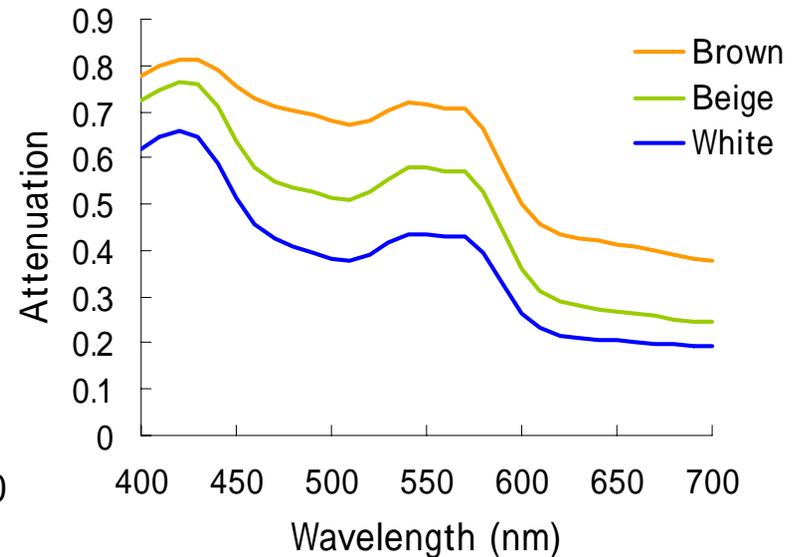


- 白の色素は光をよく反射(散乱)し、茶の色素はよく吸収する。
- ベージュは茶と白の間にある。

刺青前後の皮膚の吸光度スペクトル



刺青投与前の皮膚の吸光度スペクトル

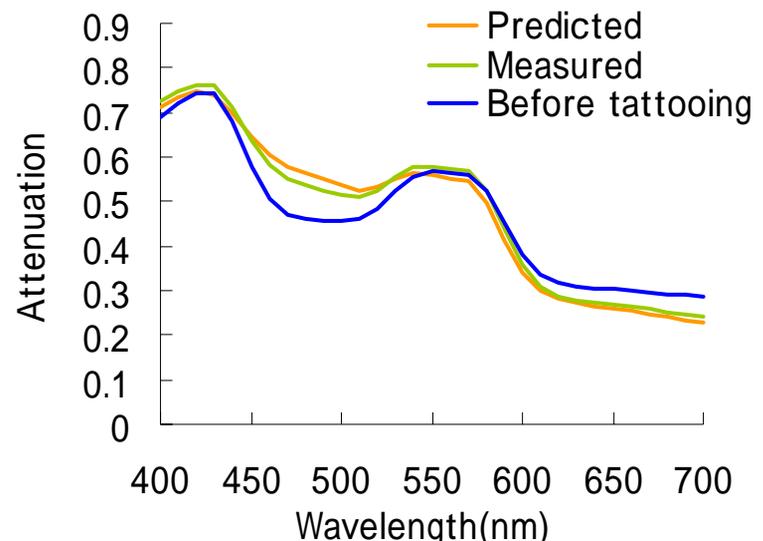


刺青投与後の皮膚の吸光度スペクトル

- 茶色を入れた後では吸収が強くなっており、白色の場合は吸収が弱くなった。
- 刺青を入れた後でも血液による吸収のピークが見られるため、刺青の下の真皮層の色が透けて見えていると考えられる。

刺青後の皮膚の吸光度スペクトル (ベージュ)

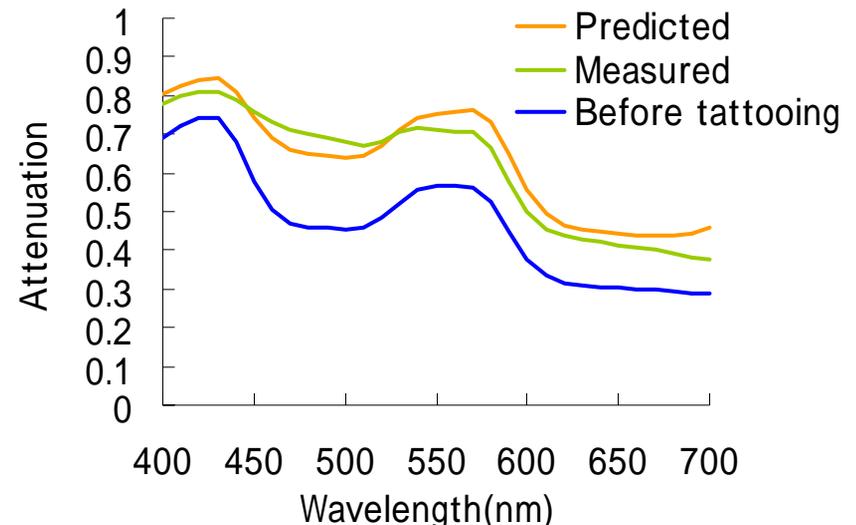
- ベージュの刺青を施した皮膚の色を、参照刺青(白、茶)から推定した結果
- 推定した色と計測した色による色差 ($L^*a^*b^*$ 色座標) は **2.26**であった。これは皮膚のように色がまだらな場合には肉眼では識別しにくいと考えられる。



刺青後の皮膚の吸光度スペクトルの
推定値と測定値

刺青後の皮膚の吸光度スペクトル (茶)

- 茶の刺青を施した皮膚の色を、参照刺青(白、ベージュ)から推定した結果
- 推定した色と計測した色による色差($L^*a^*b^*$ 色座標)は **5.05**



刺青後の皮膚の吸光度スペクトルの推定値と測定値



結論

- 拡張Beer-Lambert の法則が光を強い散乱もしくは吸収する医療用刺青にも適用できることがわかった。
- 2つの参照用の刺青を施すことによって3番目の刺青を入れた後の色を推定できる。
- 本手法によって患者および医師の負担を軽減することができる。