

# 毛髪組織とそのタンパク質の活用と提案 (前半)

-背景、ケラチンフィルムの創出と特徴、毛髪ダメージ分析への応用-

信州大学 繊維学部

藤井敏弘

2026年 4月



# 目次(前半)

## ◎毛髪組織に関連した研究の背景

毛髪組織の役割と特性

タンパク質の可溶化とケラチンフィルムの作製

## ◎ケラチンフィルムの創出と毛髪を中心とした研究開発

研究開発の全体像と2つの概念

セルフリサイクルとケラチンフィルム

## ◎毛髪が受けているダメージとケラチンフィルムを使用した分析

光ダメージの分析

ブリーチ(酸化)ダメージの分析

パーマ(還元-酸化)ダメージの分析

熱ダメージの分析

複合処理(熱+パーマ)ダメージの分析

カラー剤による染色と退色の分析

シャンプー類処理(手触り感)への分析

毛髪研究の諸問題へのケラチンフィルムでの対応

# 毛髪組織の役割と特性

## 役割

- ・各種刺激からの内部組織の保護  
暑さ寒さに対する防御  
外部からの衝撃に対する防御  
紫外線からの防御
- ・生理機能  
水銀や砒素などの毒物の排泄  
老廃物の皮膚を通しての排泄  
感覚機能
- ・ファッション  
男女の魅力のポイント  
アンチエイジング
- ・生体材料(資源)

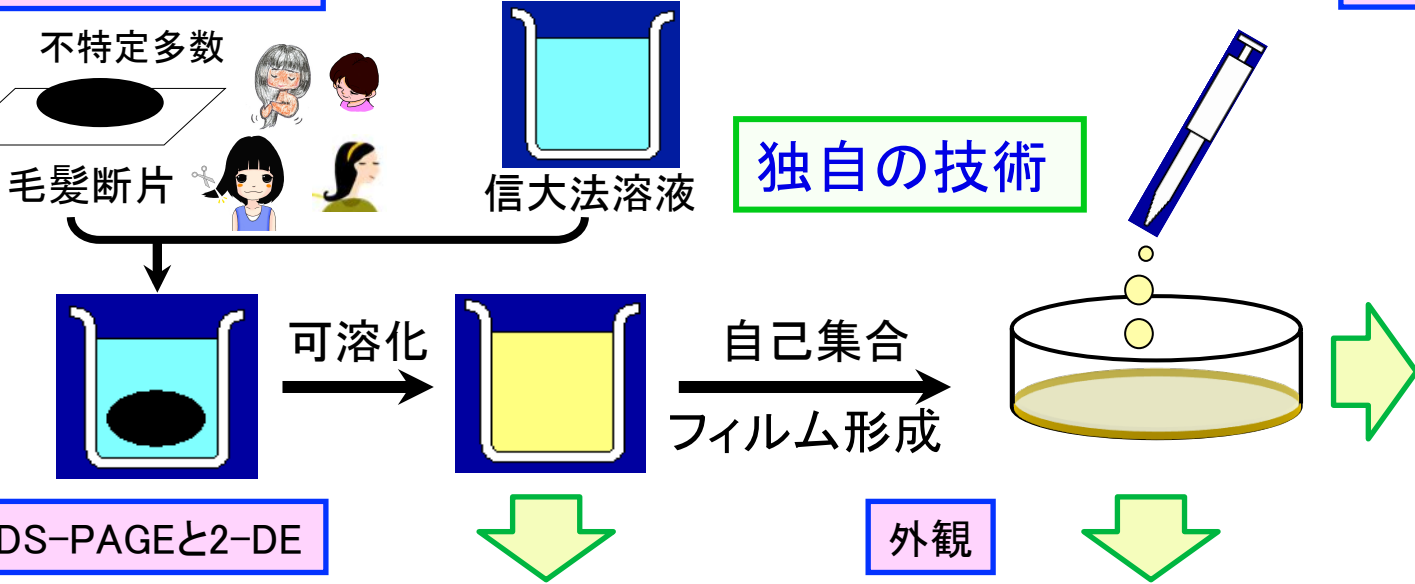
## 特性

項目	特性
採取-1	個人&集団
採取-2	生前&死後
採取-3	無痛&簡便
採取量	比較的多い
生産性	再生産
安全性	高い(素手)
消毒	アルコール、他
構成成分	タンパク質が高含量
溶解性	不溶&可溶
分解性	低い
保存性	高い(室温で長期間)
コスト	安価

毛髪を生体由来の資源と考えることから始まった研究

# タンパク質の可溶化とケラチンフィルムの作製と分析

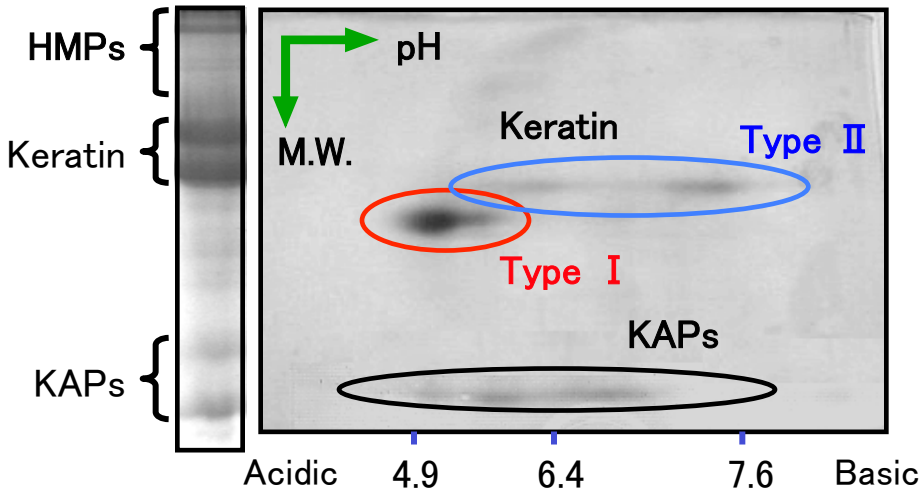
## 作製の流れと分析



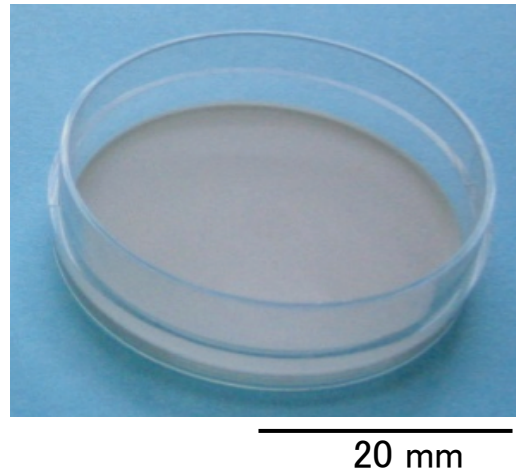
## アミノ酸組成 (mol%)

	Keratin film	Hair keratin
Asp	5.3	4.9
Glu	12.4	11.4
Tyr	2.4	2.0
Lys	1.9	2.7
Arg	7.2	5.8
<b>Cys/2</b>	<b>16.5</b>	<b>17.8</b>
Ser	10.5	11.7
Thr	8.1	6
Ala	4	4.6
Leu	6.2	5.8
Phe	1.6	2.2
Val	5.6	5.8
Ile	2.7	2.6
Gly	5.5	6.4
Pro	8.7	8.4
Hy-Pro	0	0
His	0.9	0.9
Met	0.4	0.6

## SDS-PAGEと2-DE



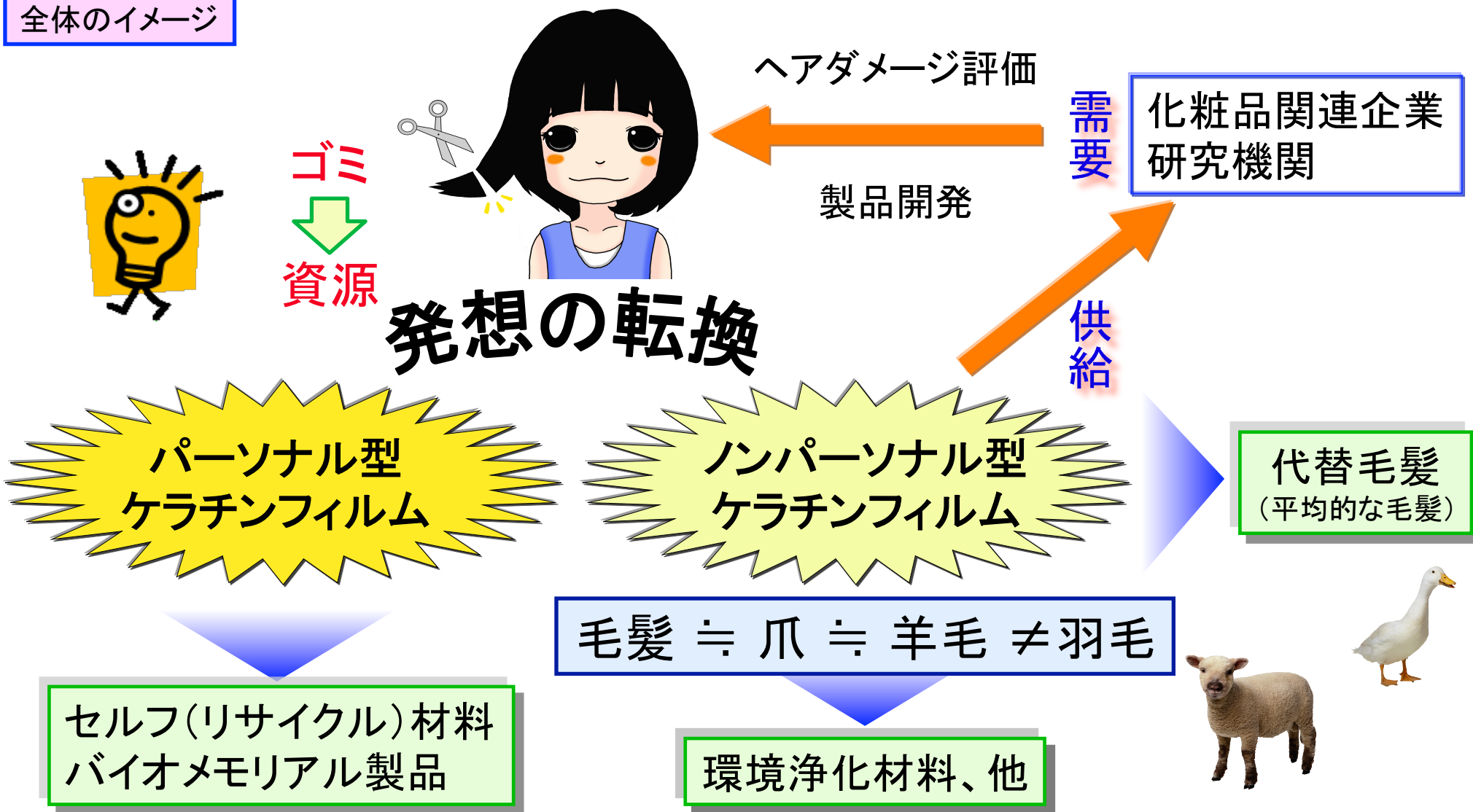
## 外観



簡便な抽出法と自己集合を利用したフィルムへの変換

# ケラチンフィルムを中心とした研究展開のイメージ

全体のイメージ

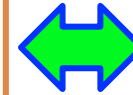


セルフレジ、ケラチンフィルム、バイオメモリアルとは

# 2つの概念とケラチンフィルム

## セルフリサイクル(2002年～)

- ・定義: 動物や他者を使わず本人由来の生体物質(組織、成分)を用いた加工品の創出と適用
- ・目的: 生活・医療面から精神面までの製品をつくり、心身の健康美(QOL)に貢献



個人の毛髪

## バイオメモリアル(2005年～)

- ・定義: 個人、グループ、ペット由来の生体物質(組織、成分)を組み込んだ加工品の創出と適用
- ・目的: 思い出、絆、憧れなどの心・精神的な要素を組み入れた記念品を身近に置いて心の支えとする



個人～グループ  
(+ペット)の毛髪

## ケラチンフィルム(2009年～)

- ・定義: 多くの人あるいは個人の毛髪などに含まれているタンパク質(ケラチン)から形成されるフィルム
- ・目的: 代替毛髪としてヘアダメージ評価と毛髪研究に利用(セルフリサイクル製品とバイオメモリアル製品にも利用)



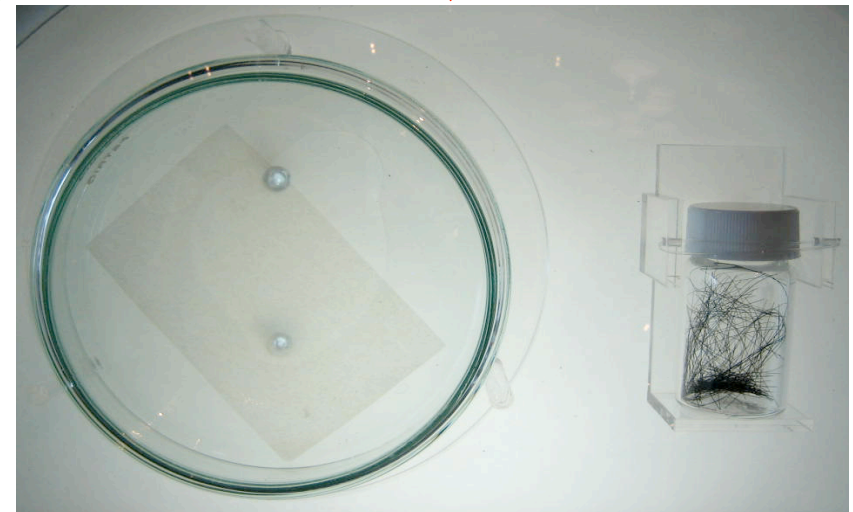
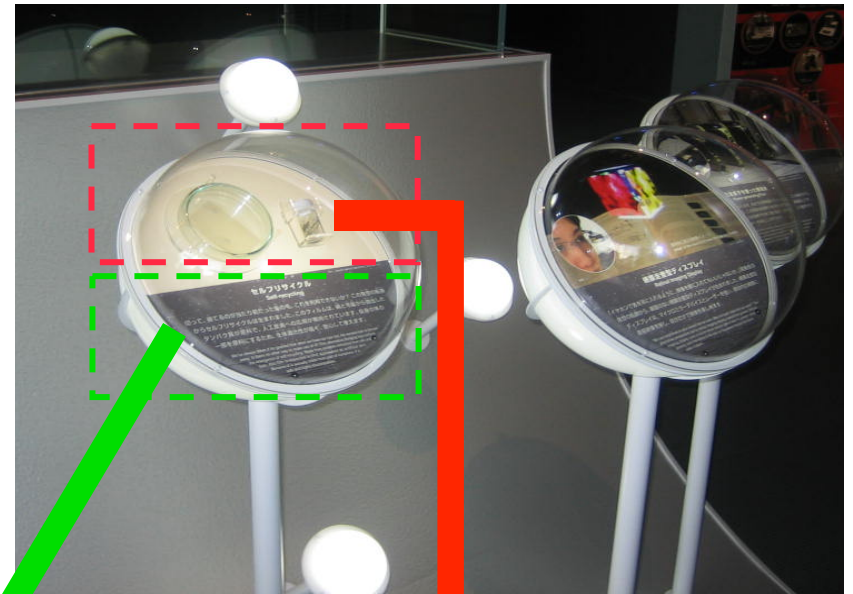
複数人あるいは  
個人の毛髪

# セルフリサイクル (since 2002年)

信濃毎日新聞での報道(2003年1月3日)



日本科学未来館での展示(2009~2019年)



## セルフリサイクル

切って、捨てるのが当たり前だった髪の毛。これを利用できないか？この発想の転換からセルフリサイクルは生まれました。このフィルムは、絹と毛髪から抽出したタンパク質が原料で、人工皮膚への応用が期待されています。

自身の体の一部を原料にするため、生体適合性が高く、安心して使えます。

# セルフリサイクル材料としてのケラチンフィルムの特性

## 必要と思われる特性

1. 皮膚への親和性
2. 免疫原性／アレルギー性
3. 細胞接着性(適合性)
4. 生分解性
5. 強度と柔軟性
6. 保湿性(+抗菌性)
7. その他

## 結果

- 1～3 皮膚及び皮膚関連細胞との接触試験(ヒト)
  - 👉 問題なさそう(例数を増やすべし)
  - 培養細胞との適合性も、特に問題なし
- 2 免疫原性/アレルギー性(マウスとラット)
  - 👉 自己由来の抗原性は低い
  - 肥満細胞への影響は少ない(抑制的)
- 4 分解性(動物 & 微生物由来の酵素、*in vitro*)
  - 👉 蛋白質分解酵素で分解される
- 5～7
  - 👉 実施していない

データの量と質は乏しく、研究は中断



ケラチンフィルムを代替毛髪として活用する研究

# 毛髪研究の問題点とヘアダメージの要因

## 毛髪側 の問題

- ・人種、民族、個人による差
- ・部位差(毛先と根元)
- ・履歴が不明な試料が多い
- ・未処理健全常毛の枯渇
- ・化学処理(消毒など)の影響
- ・取り扱いにくい(静電気など)

## 評価 の問題

- ・感度が低い(痛みを感じないため、損傷の中期～後期)  
機械(物理)的特性の変化  
タンパク質の構造の変化
- ・数値化に不向きな試験が多い  
官能試験(視覚・触覚等)  
キューティクルの形態の変化  
毛髪内部の形態の変化
- ・分析機器の精度の向上
- ・実験の負担  
再現性が低い  
実験回数が増大

## ヘアダメージの要因



- ・毛髪の使用は多くの問題がある
- ・様々なダメージが発生している



ケラチンフィルムでの分析は？

# ケラチンフィルムを使用した研究の対象

刺激/処理	測定対象	毛髪との比較
① 光 (紫外線、他)	カルボニル形成 システイン酸形成	約10倍 数十倍
② ブリーチ (酸化)	カルボニル形成 システイン酸形成	約10倍 5~10倍
③ パーマ (還元-酸化)	-SH/-SS-変換 透明性 溶出性	類似応答 特有の反応 2,000倍以上
④ 熱	色差 溶解性 カルボニル形成	同じ 約2倍 約10倍
⑤ 熱+ パーマ	-SH/-SS-変換 透明性 溶出性	類似応答 特有の反応 抑制(温度依存)

刺激/処理	測定対象	毛髪との比較
⑥ カラー剤 (酸化染毛剤、 半永久染毛料)	視認、測色 スペクトル システイン酸形成	類似 利便性 5~10倍
⑥ カラー退色 (光、水)	色差 スペクトル	短時間 10倍以上
⑦ シャンプー 類	摩擦 結合/吸着	約5倍 利便性

①~⑦の詳細なデータ



ヘアダメージ分析等への活用

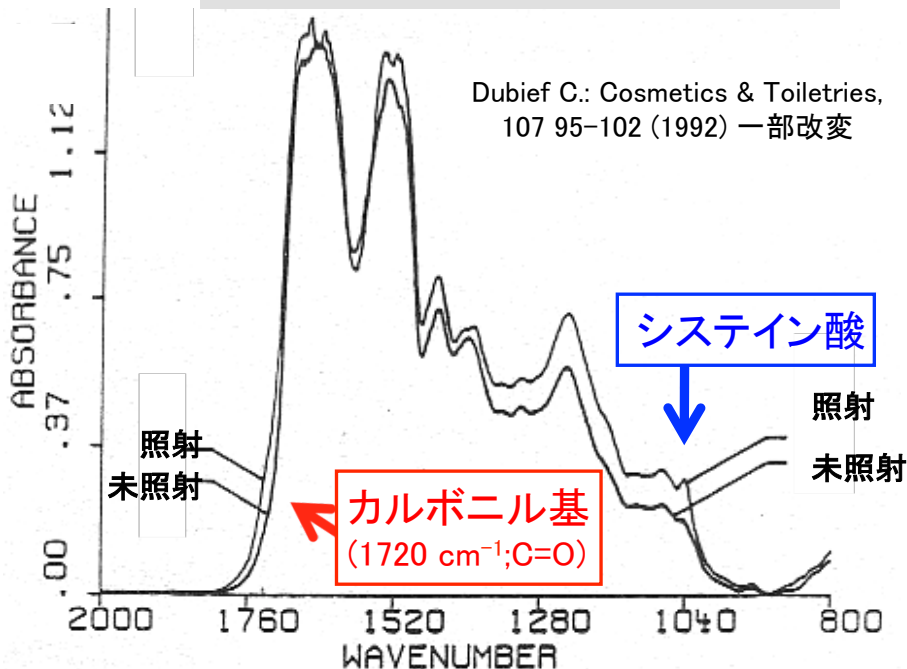
# ① 光刺激によるカルボニル化とシステイン酸の形成

## 背景

毛髪試料を紫外線照射後にIR測定

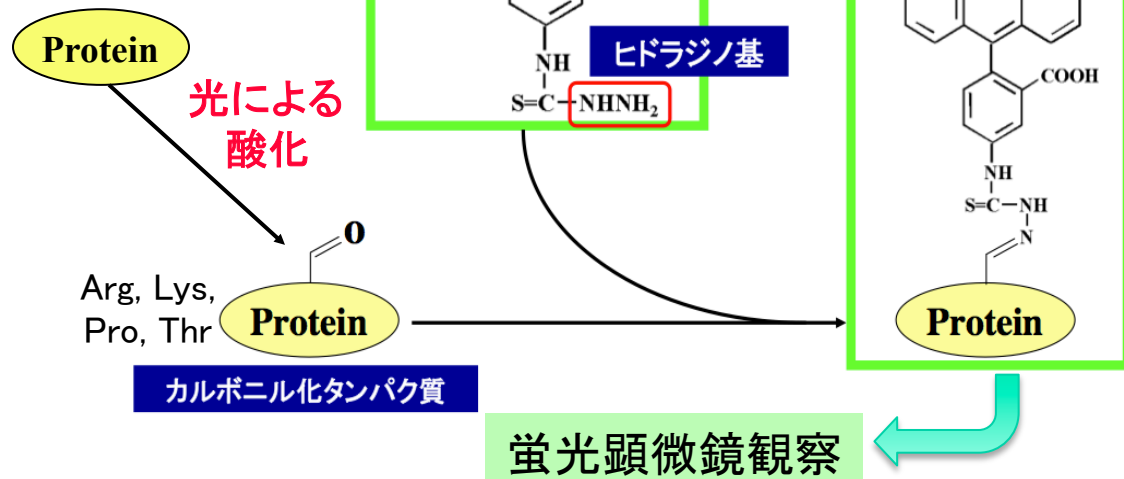
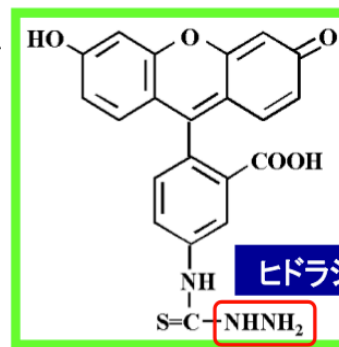
・Total energy: 80,000 J/cm<sup>2</sup>

Dubief C.: Cosmetics & Toiletries, 107 95-102 (1992) 一部改変

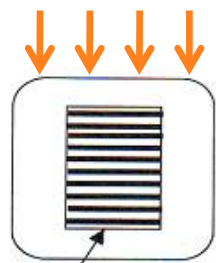


## 方法

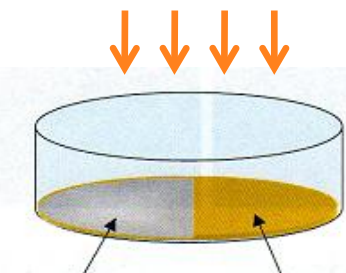
フルオレセイン  
5-チオセミカルバジド  
(5-FTSC)



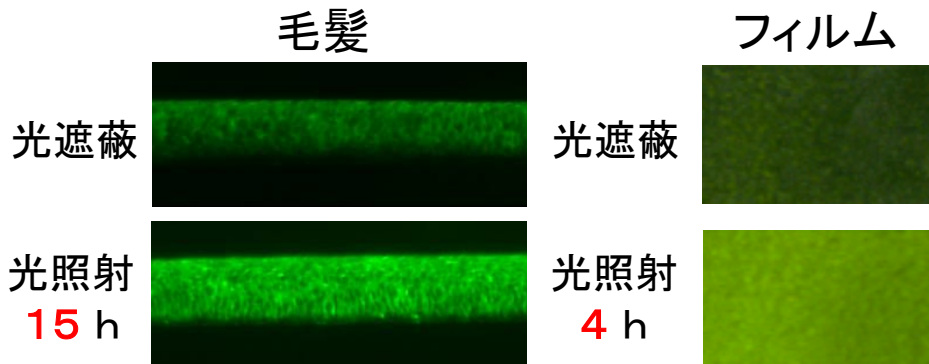
## 人工太陽照射 (300~2500nm)



マウントに10本を固定



ケラチンフィルム  
遮蔽部 照射部

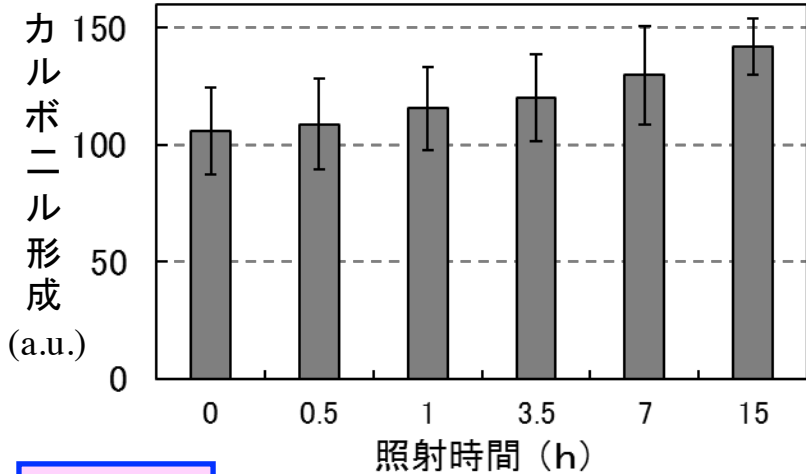


ケラチンフィルムでもカルボニル化は検出

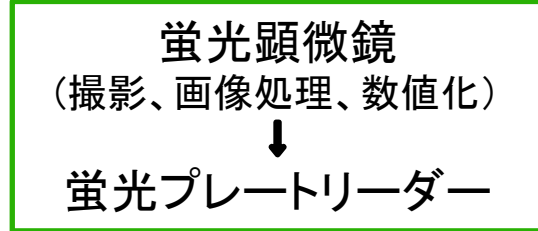
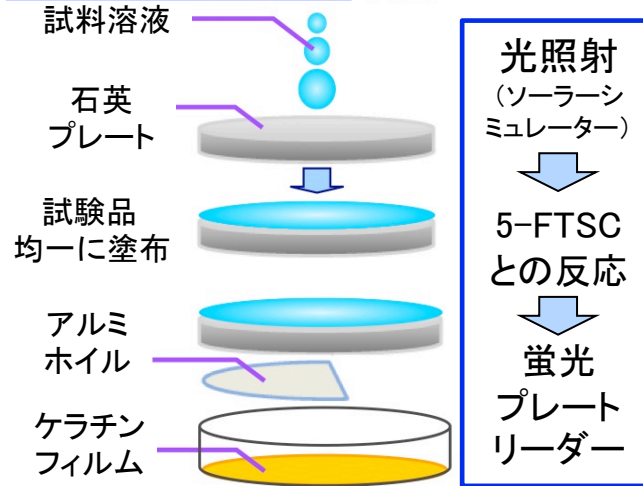
# ① カルボニルの形成-毛髪との比較と薬剤の評価

## 毛髪

露光時間: 15 sec n = 70

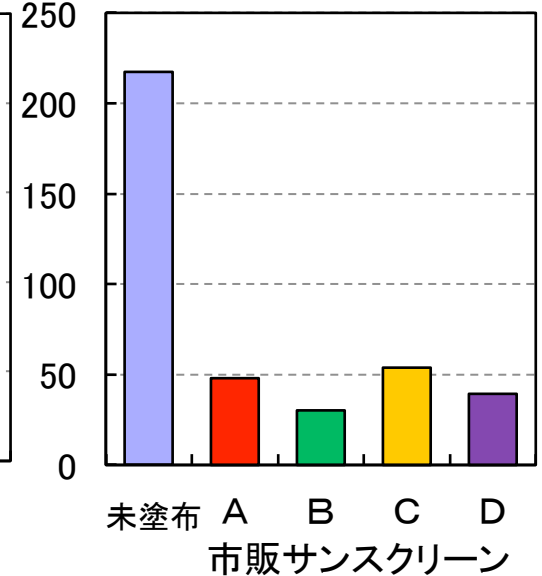
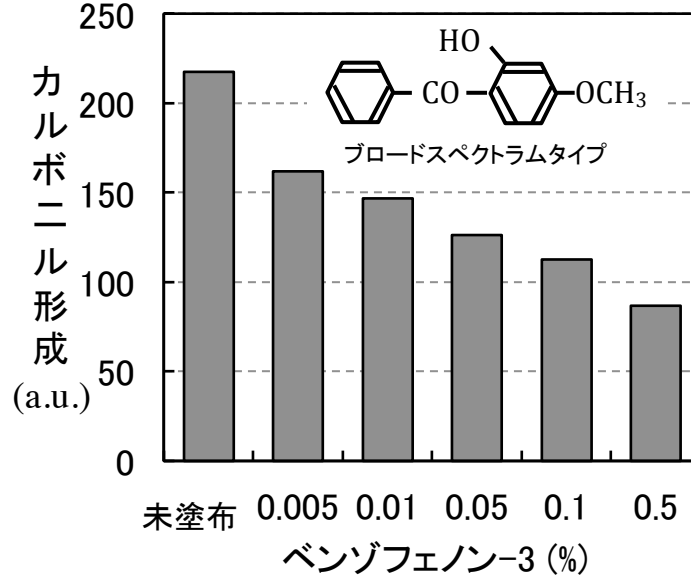
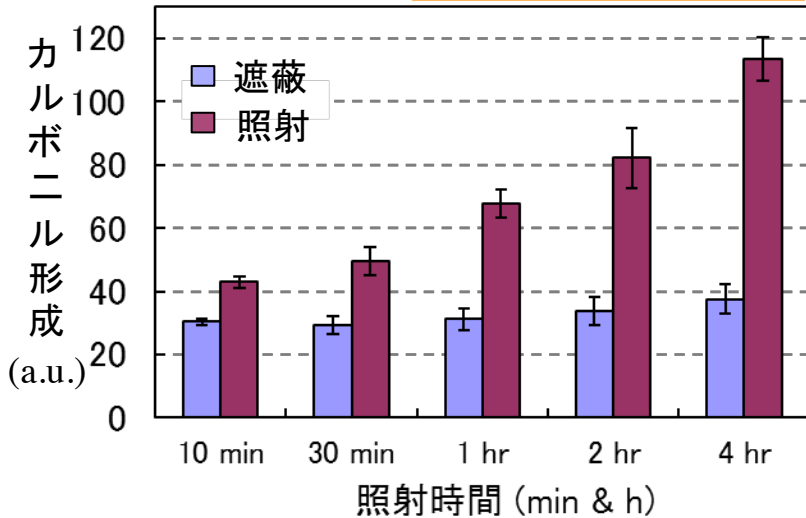


## 薬剤評価の方法



## フィルム

露光時間: 1/4 sec n = 10

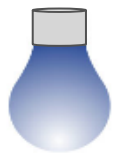


フィルムの方が高感度

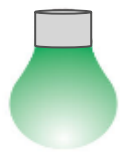
吸収剤に加えて製品の評価も可

# ① カルボニルの形成-光の種類との関連性

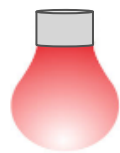
## LEDによる照射



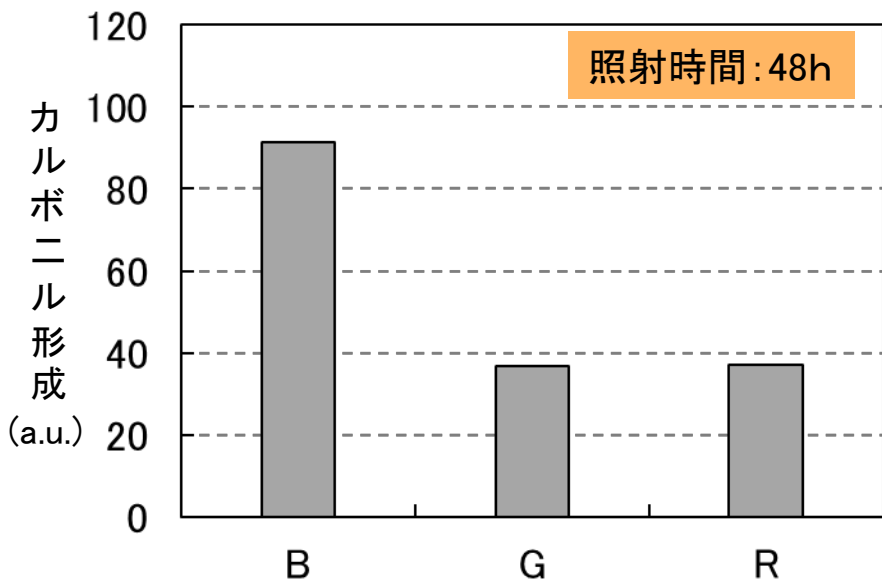
青色光 (B)  
400~500nm



緑色光 (G)  
500~550nm



赤色光 (R)  
600~700nm



## 蛍光顕微鏡

遮光



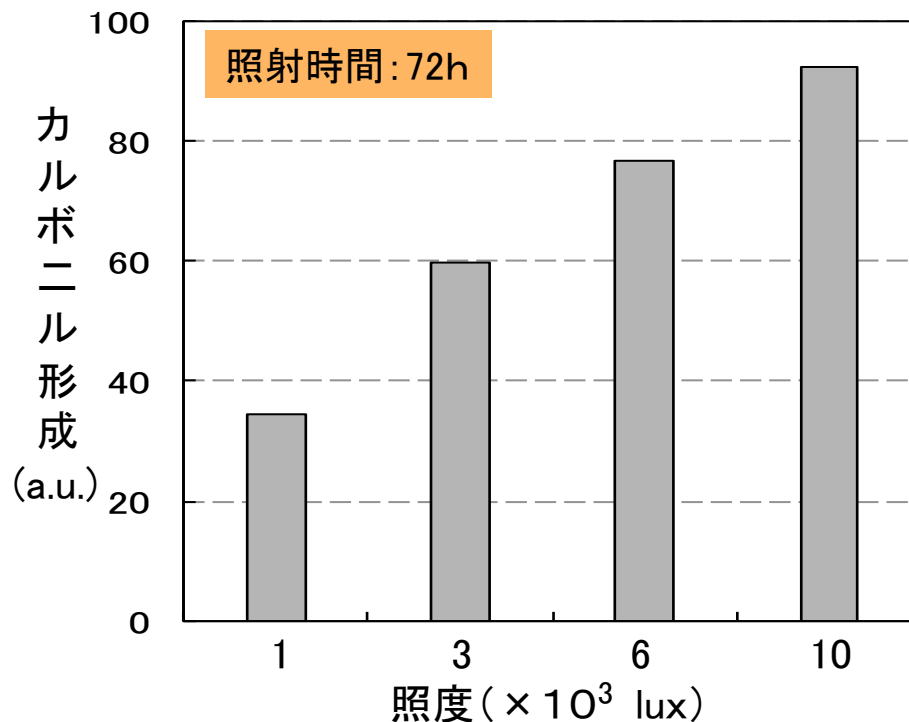
ブルーライト: 48h



太陽光照射システム: 1h

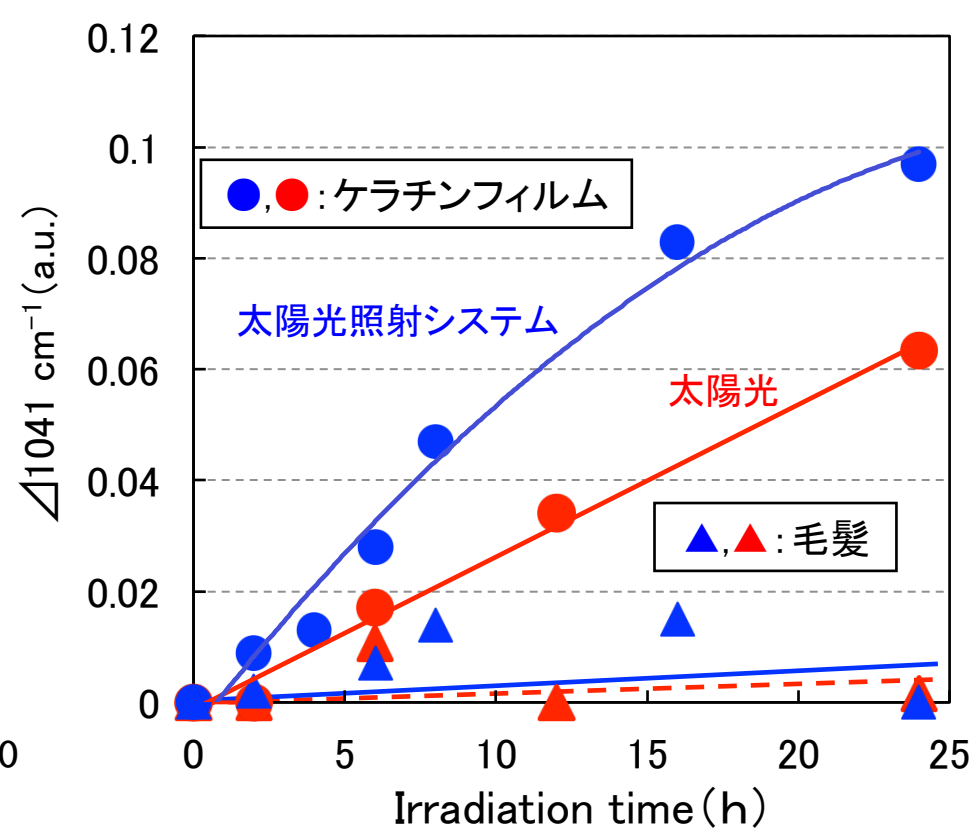
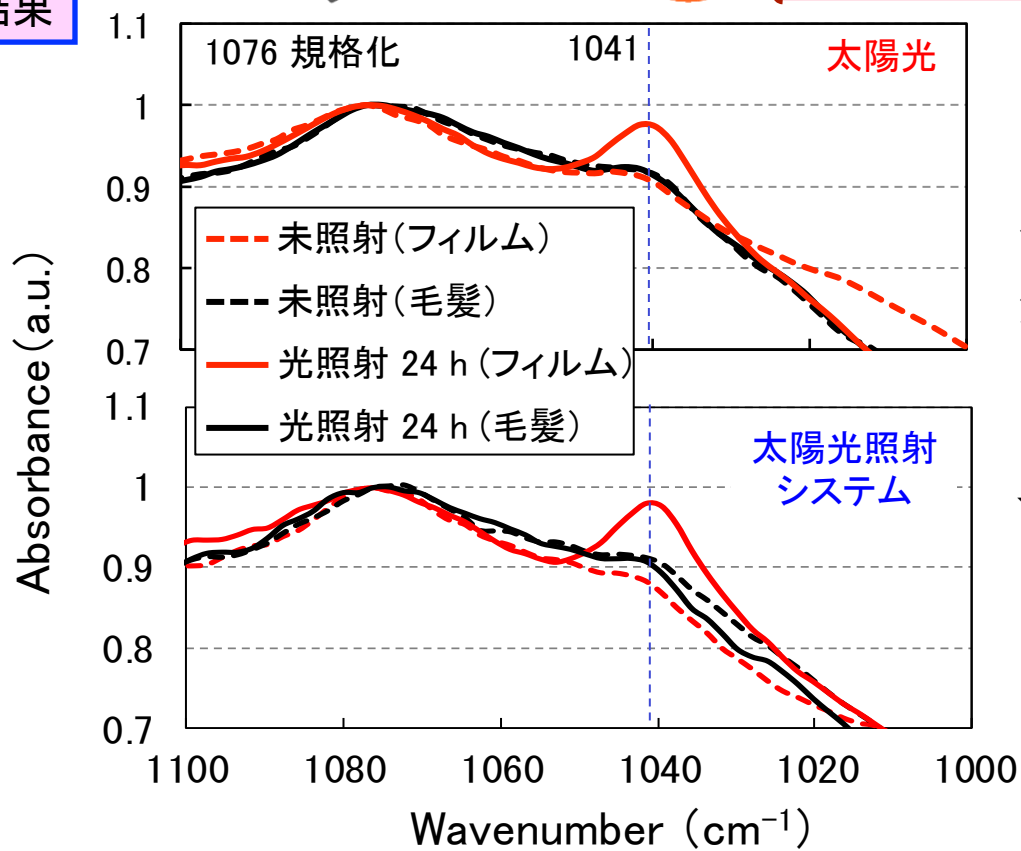
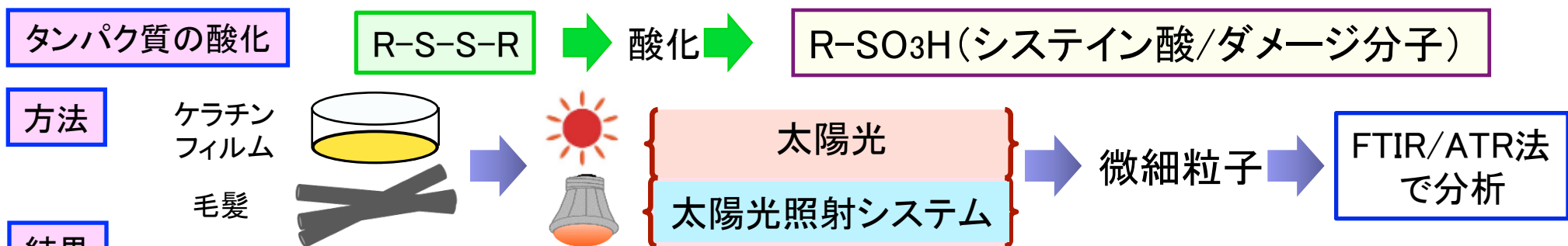


## 照度の影響



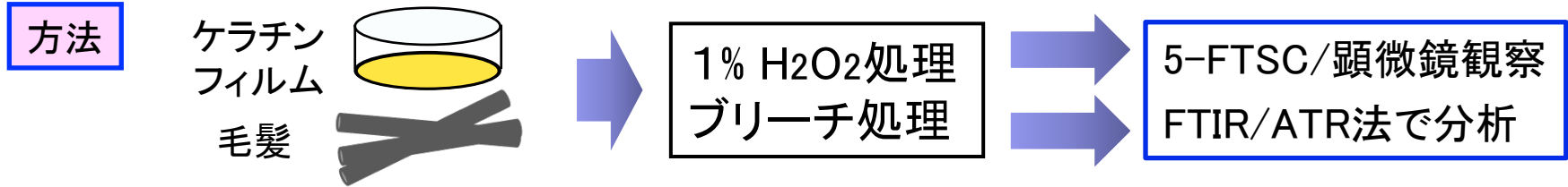
カルボニル形成の検出はブルーライト等の照射下でも可

# ① 光刺激によるシステイン酸の形成



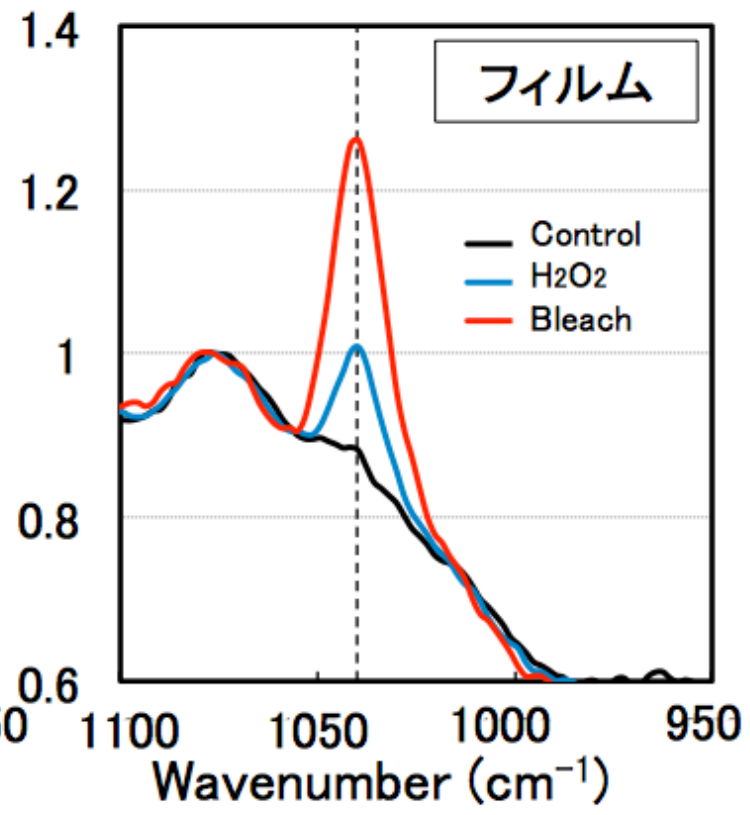
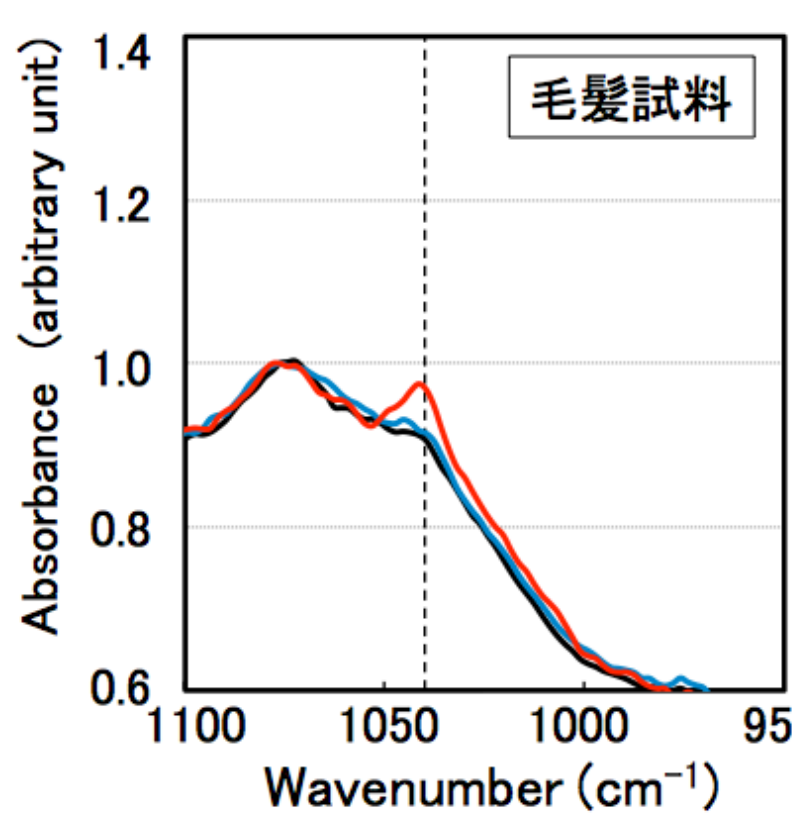
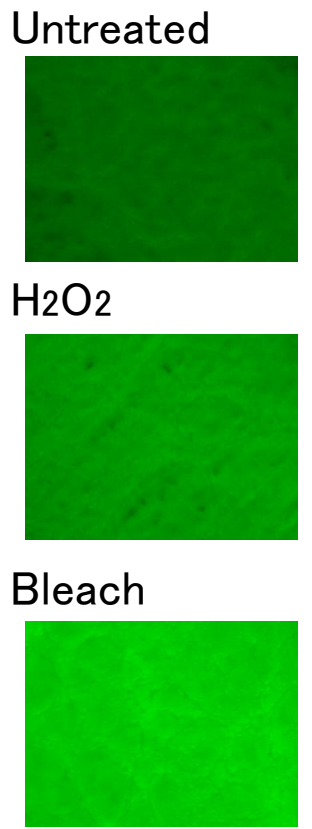
ケラチンフィルムによるシステイン酸の検出は毛髪よりも高感度

# ② ブリーチによるカルボニル化とシステイン酸の形成



**結果 (カルボニル化)**

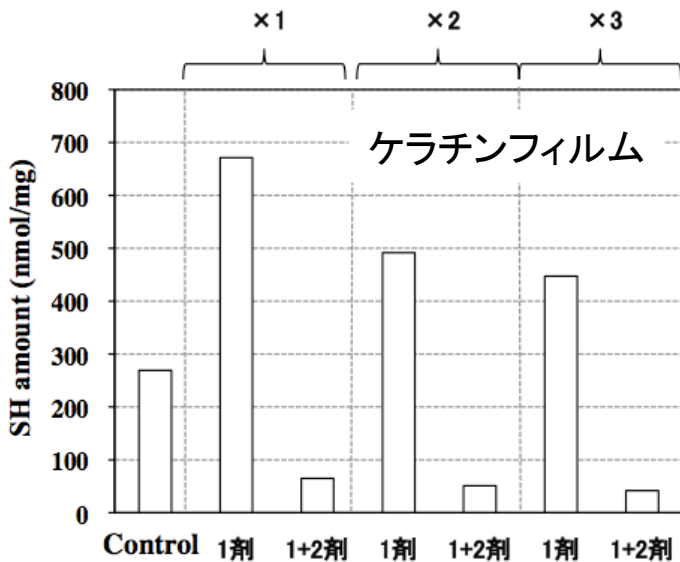
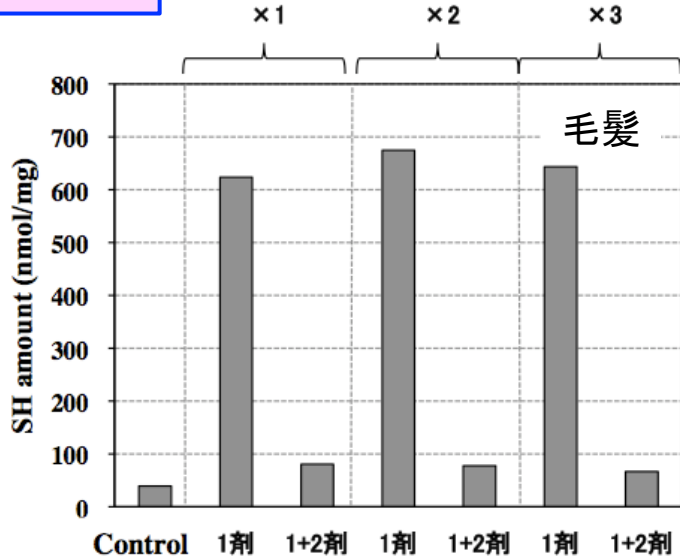
**結果 (システイン酸)**



フィルムの使用でカルボニルとシステイン酸の検出は高感度で簡便

# ③ パーマ剤処理がSH含量と形態へ与える影響

SH含量



外観

コントロール → パーマ1剤 → パーマ2剤 → パーマ2剤(単独)

1  
回  
処  
理

3  
回  
処  
理

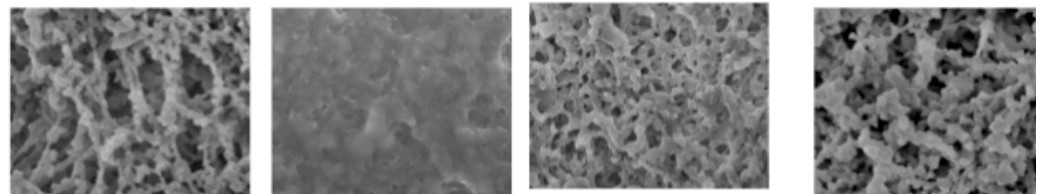
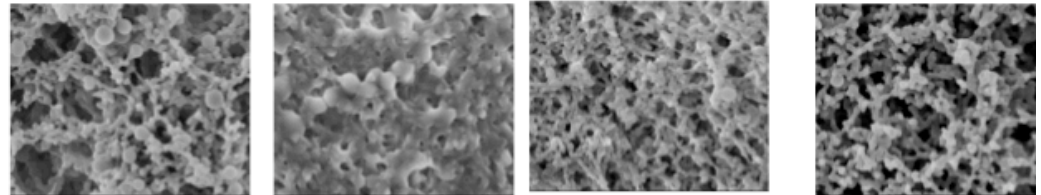


10 mm

SEM

1  
回  
処  
理

3  
回  
処  
理

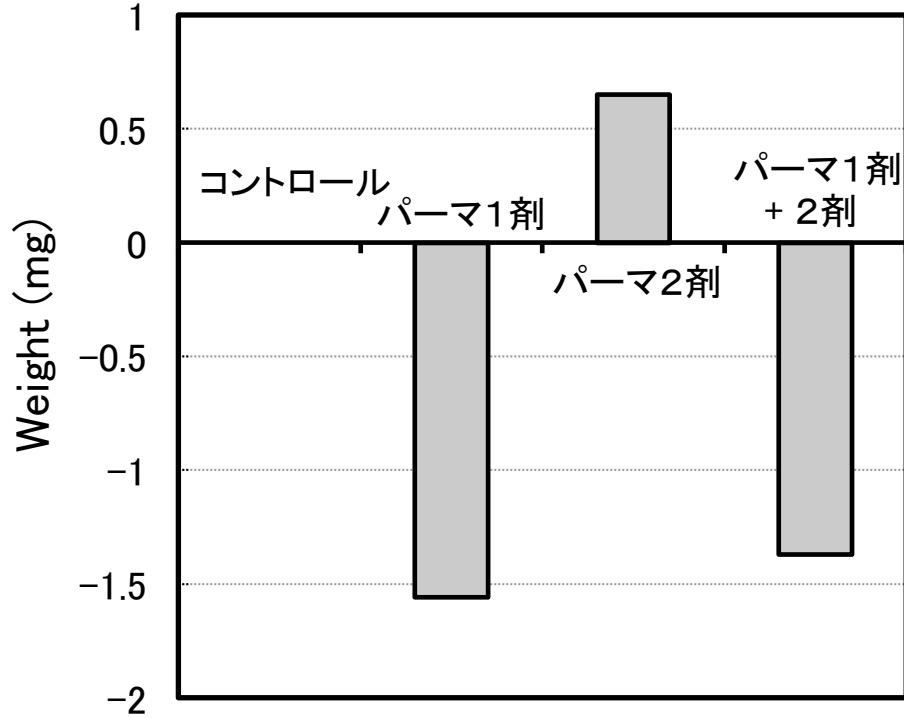


5 μm

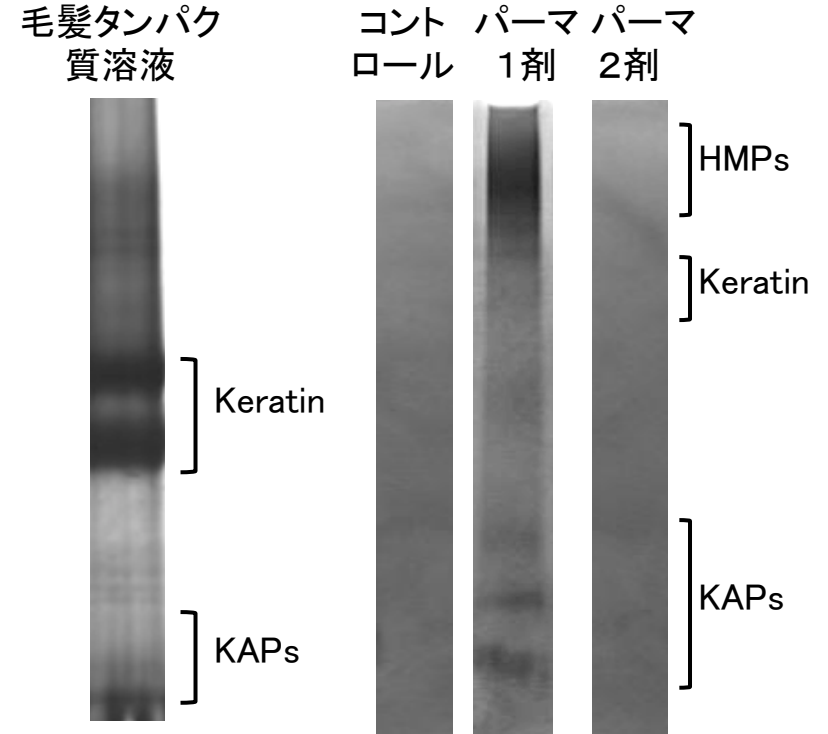
- 還元-酸化に応答したSH含量の変動
- 透明性と微細構造が変化
- 可逆的で繰り返しの変化

# ③ パーマ剤処理による質量減少とタンパク質の溶出

質量変化



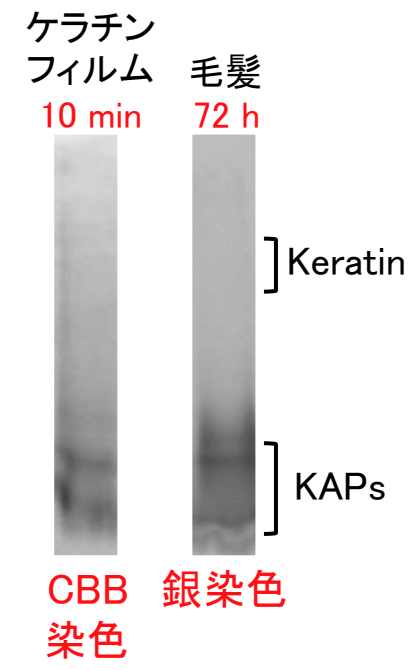
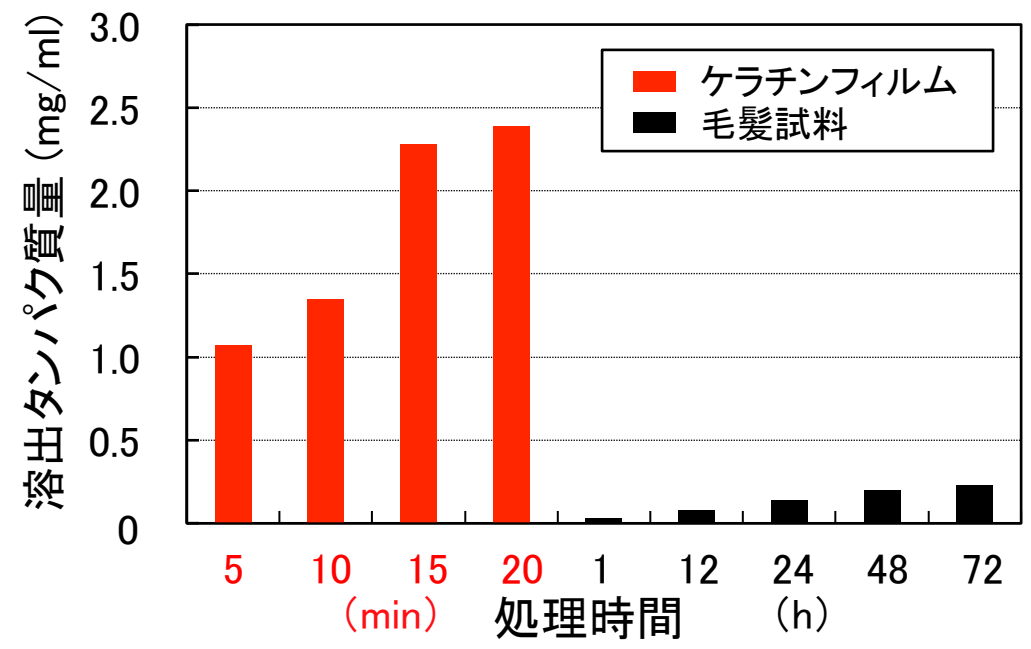
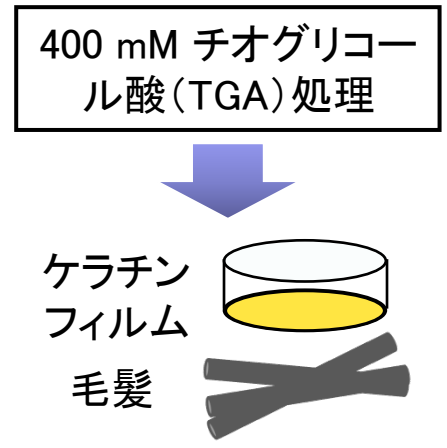
電気泳動



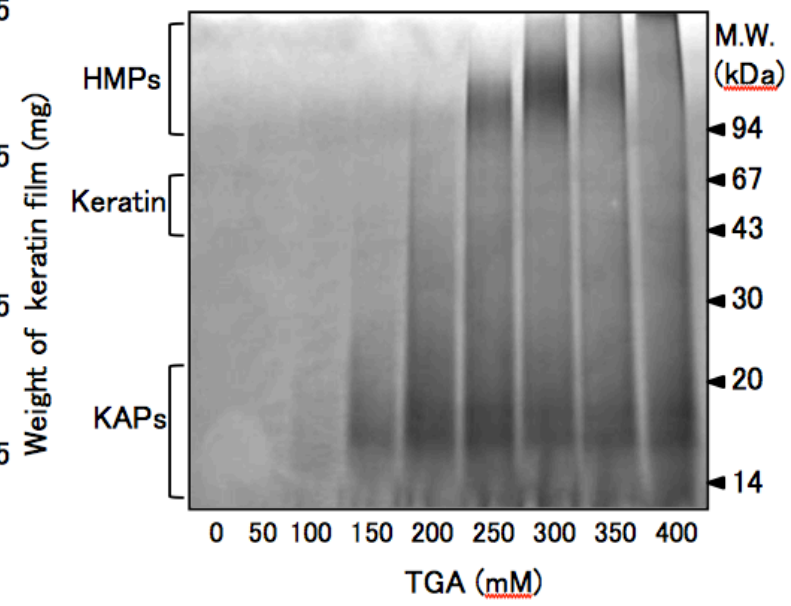
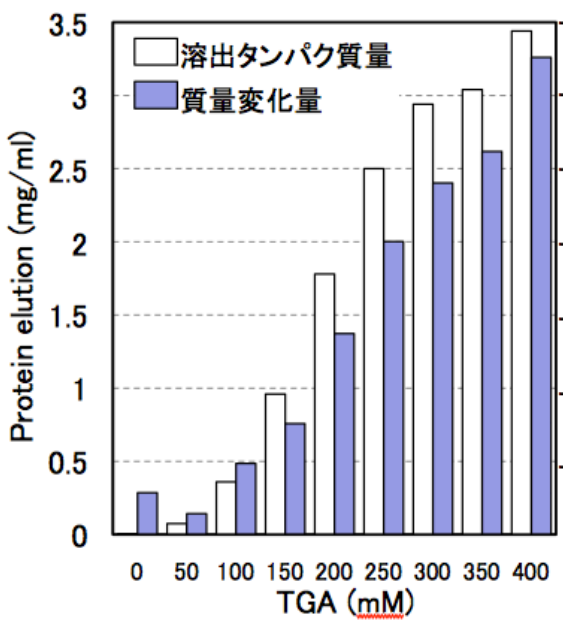
- ・パーマ1剤の処理により質量は有意に低下
- ・パーマ2剤の処理による質量低下は見られない
- ・低分子量のKAPsが溶出

# ③ チオグリコール酸(還元剤)の影響ー毛髪との比較

## 溶出と電気泳動



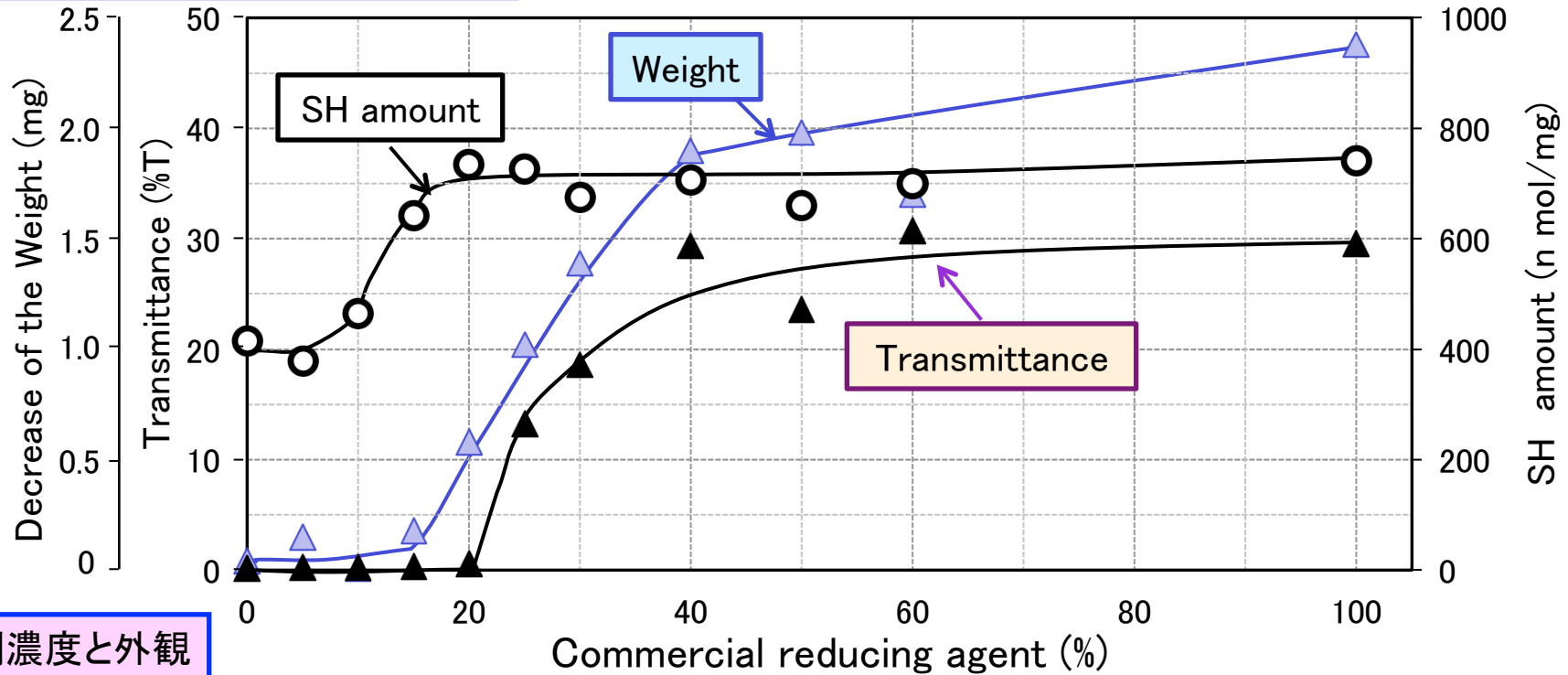
## TGA濃度の影響



- 還元剤の処理により質量低下が生じる
- 毛髪と比べてフィルムでは短時間(1/2,000以下)で検出が可能
- 短時間で簡便で分析・評価が可能

# ③ パーマ1剤がフィルムへ与える詳細な分析

1剤濃度とSH含量、質量、透明性



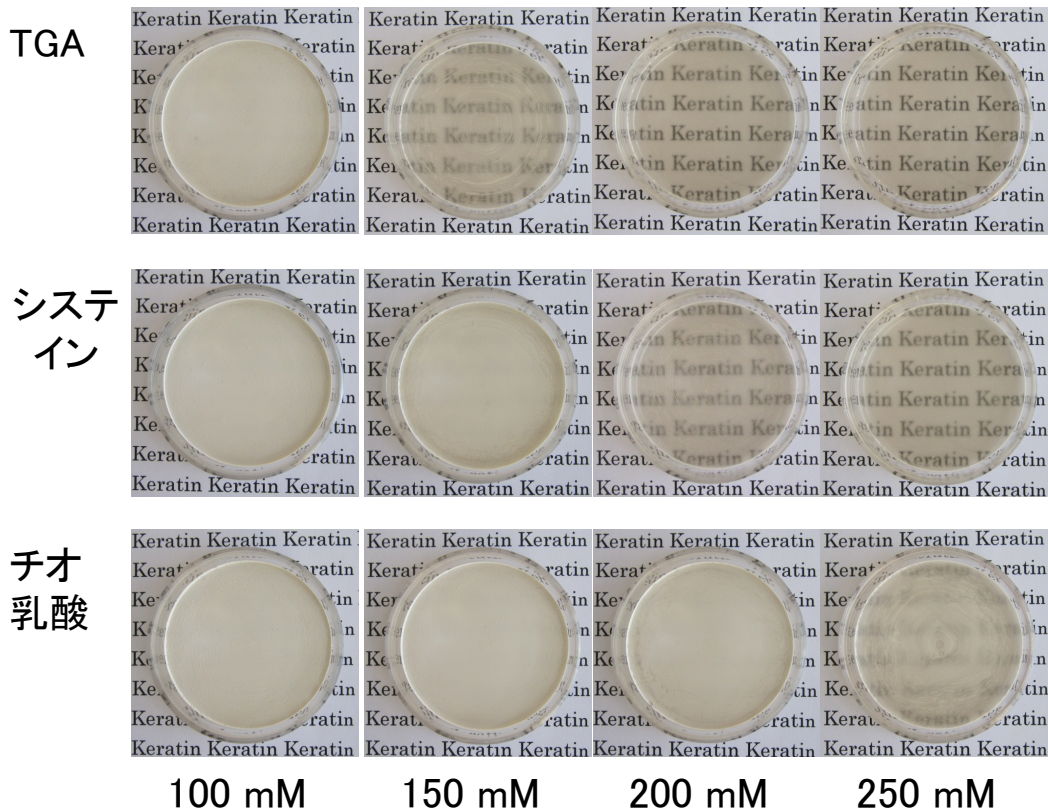
1剤濃度と外観



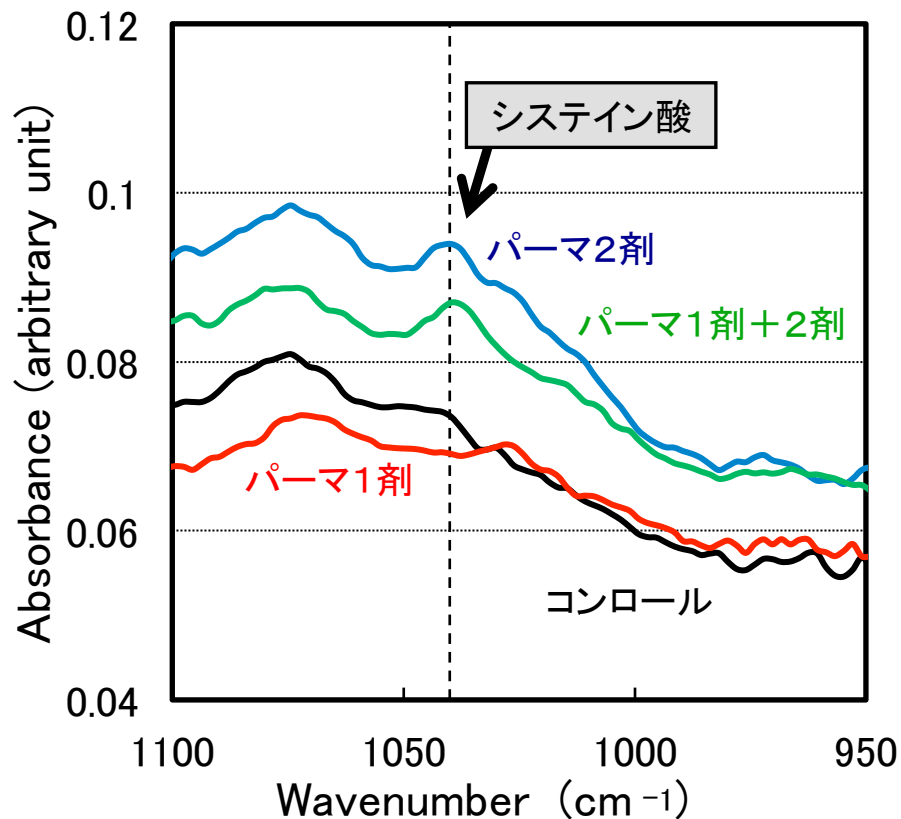
- ・SH含量の増加後に質量と透明性が変化
- ・40%程度の1剤濃度で十分な効果

# ③ 他の還元剤による透明化とシステイン酸の形成

## 他の還元剤



## 市販パーマ剤によるシステイン酸の形成



- ・システイン、チオ乳酸でもフィルムの透明化は観察
- ・作用: TGA > システイン > チオ乳酸 ➡ 評価への活用と比較は?
- ・2剤処理後にシステイン酸は検出できるが少量(保護剤の効果?)

# ④ 加熱処理が与える影響—着色とタンパク質の溶出

色の変化

毛髪

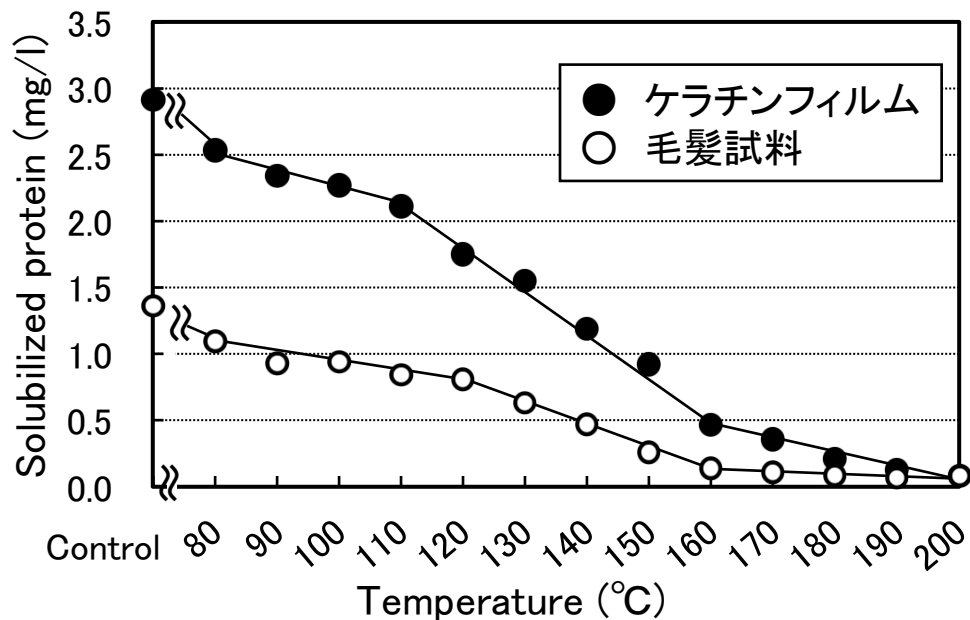


ケラチンフィルム

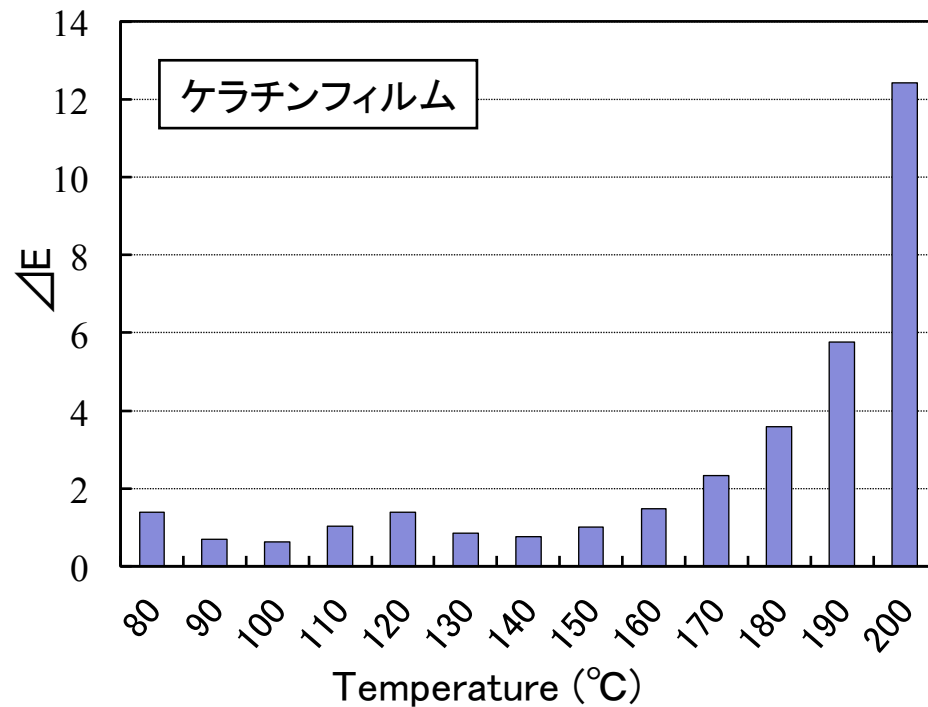


Control      170      180      190      200°C

溶出性の変化



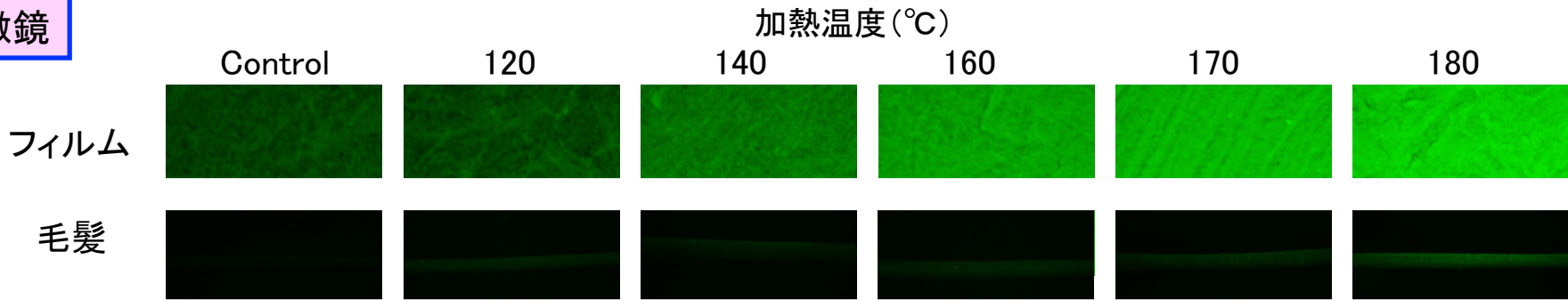
色差



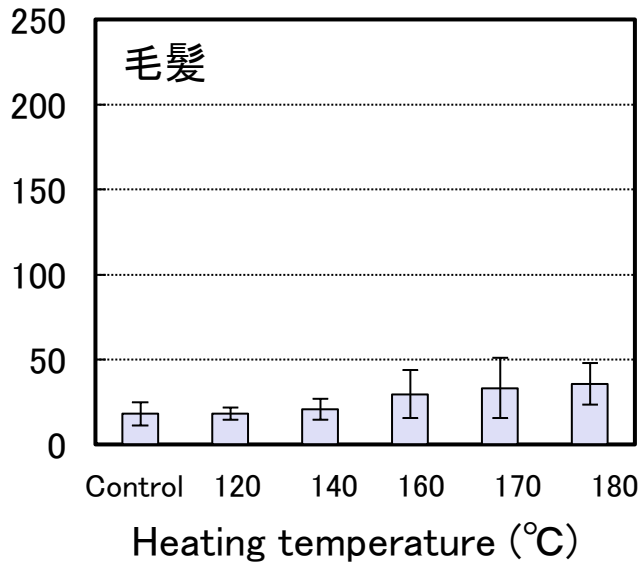
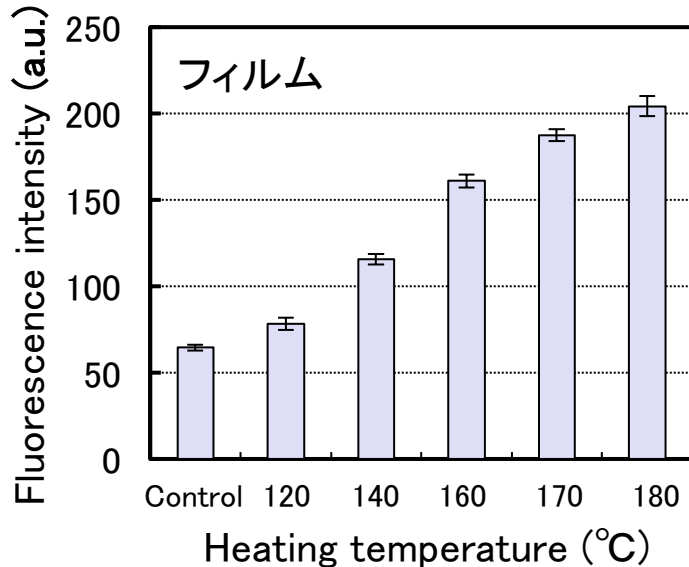
- ・色の変化は両試料間で類似
- ・溶出量の変化も類似
- ・フィルムの方が計測は簡便

# ④ 加熱処理が与える影響-カルボニル形成

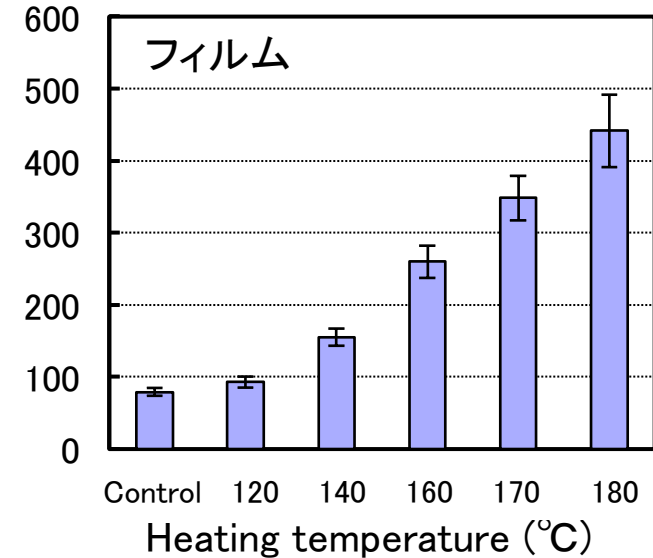
## 蛍光顕微鏡



## 画像からの数値化



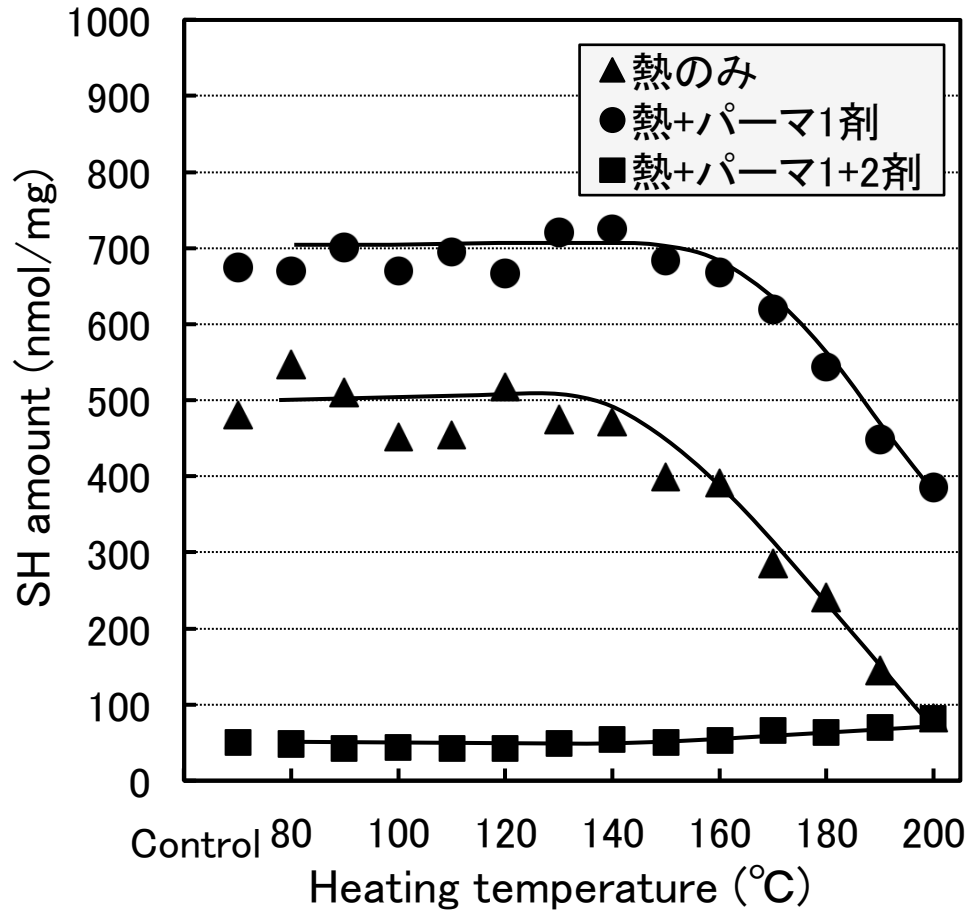
## 蛍光プレートリーダー法



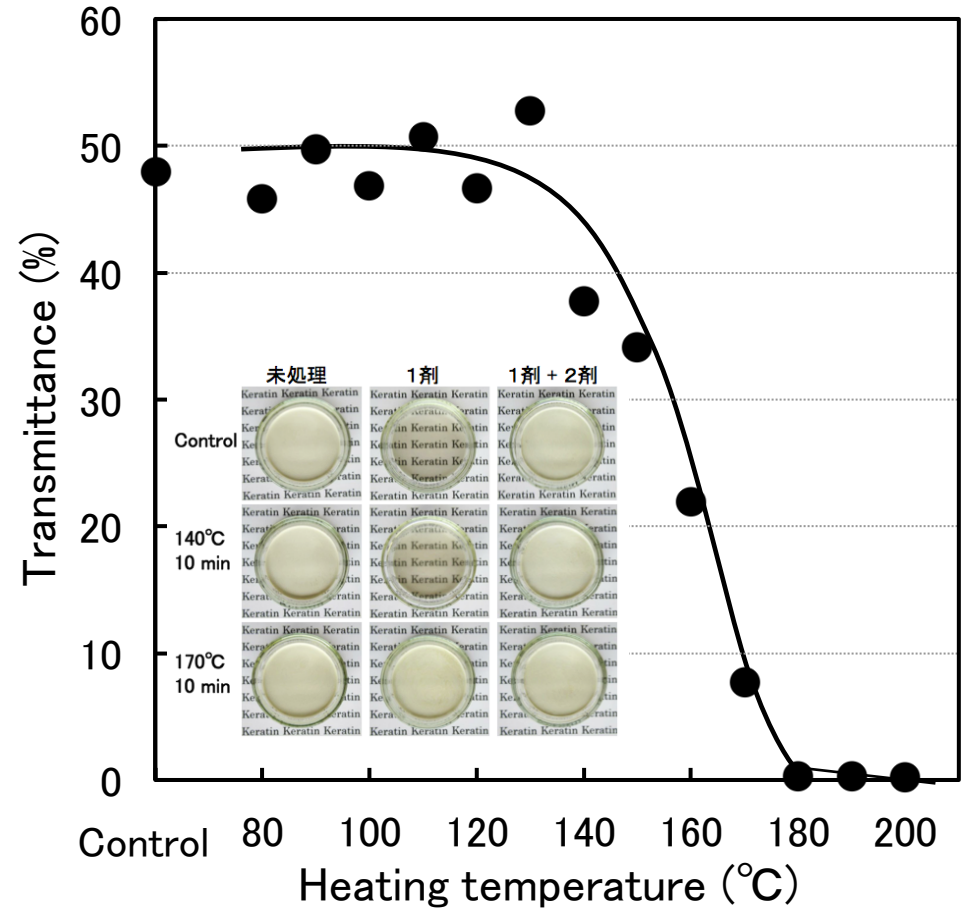
- ・フィルムと毛髪：加熱処理によるカルボニルが形成
- ・感度、再現性、利便性：ケラチンフィルム ≫ 毛髪

# ⑤ 複合(加熱+パーマ剤)処理による応答性-1

SH含量



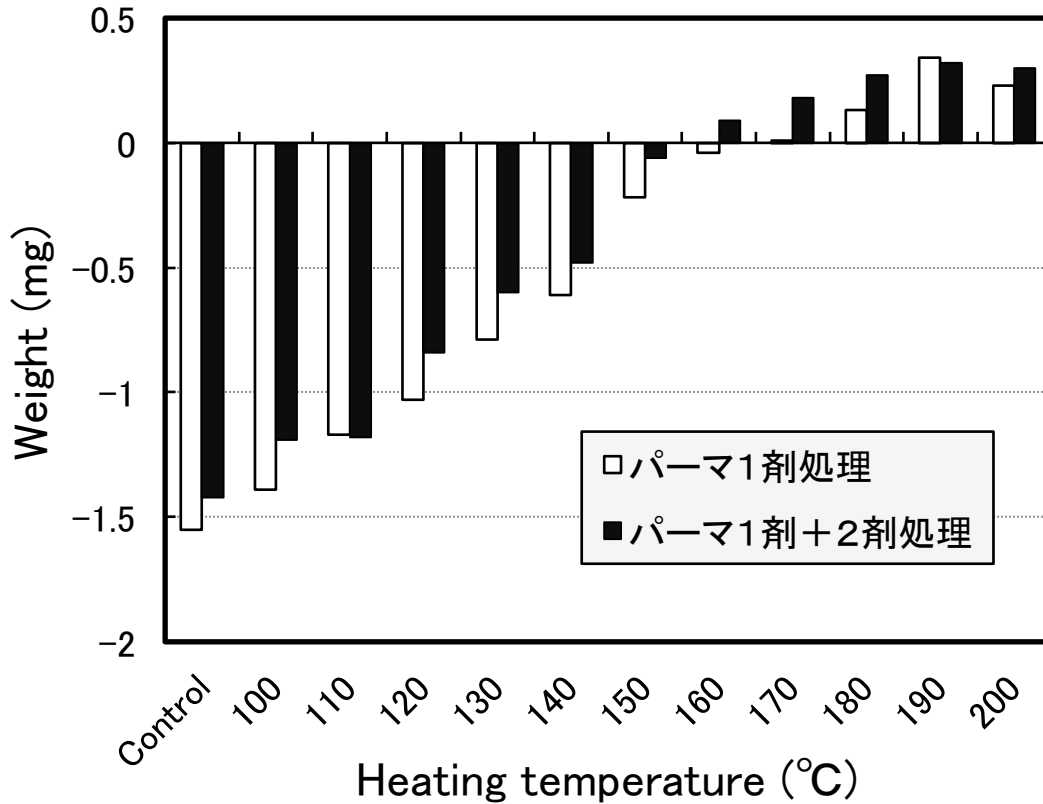
光透過性(形態変化)



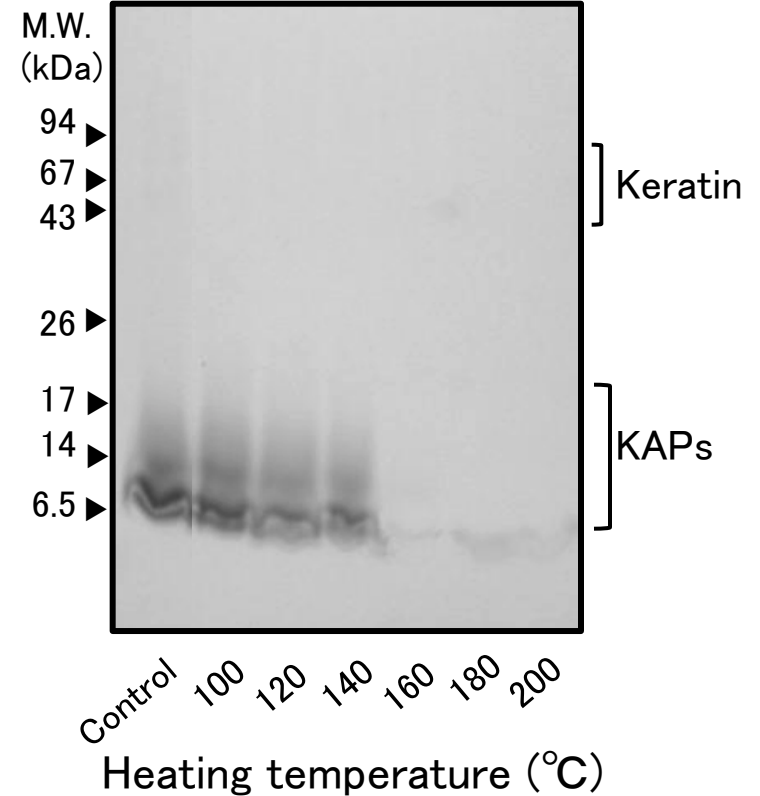
- ・160°C以上の加熱によりパーマ還元作用(SH含量)は低下
- ・130~140°C以上の加熱によりパーマ還元による透明性は低下

# ⑤ 複合(加熱+パーマ剤)処理による応答性-2

質量変化



電気泳動

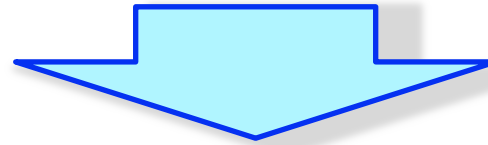


- ・フィルムからのKAPsの遊離する量は加熱温度に比例して減少
- ・150°C以上の加熱で遊離(質量低下)は消失

# ⑤ 複合処理による応答性からの提案

加熱温度とSH量、透過性、質量の関係

要因	未加熱	温度 (°C)						
		130	140	150	160	170	180	200
-SH量 (パーマ効果)	100 (約700nmol/mg)	100	100	98	95	89	78	54
光透過性 (ナイティブ性)	100 (約50%)	96	88	76	52	20	0	0
質量 (ダメージ)	100 (約1.54mg)	50	39	15	2	0	0	0



適切な温度での加熱はダメージレスなパーマ施術？

# ⑥ ヘアカラーリング剤による染色

## 永久染毛剤

透明型 不透明型 毛髪

未処理			
ライト ブラウン			
ダーク ブラウン			
レッド			
ラベンダー			

## 半永久染毛料

透明型 不透明型 毛髪

未処理			
製品A			
製品B			
製品C			
製品D			

ケラチンフィルムは染色される

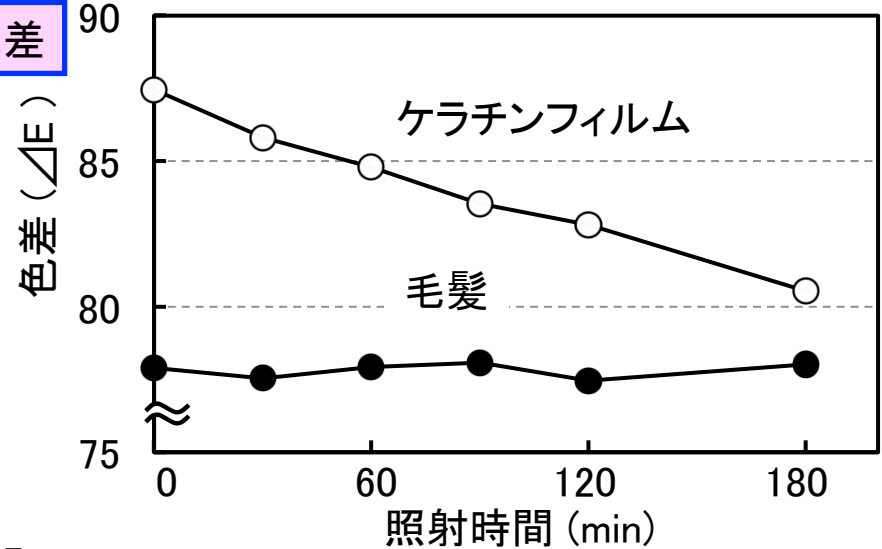
# ⑥ ヘアカラー後の退色-光

方法

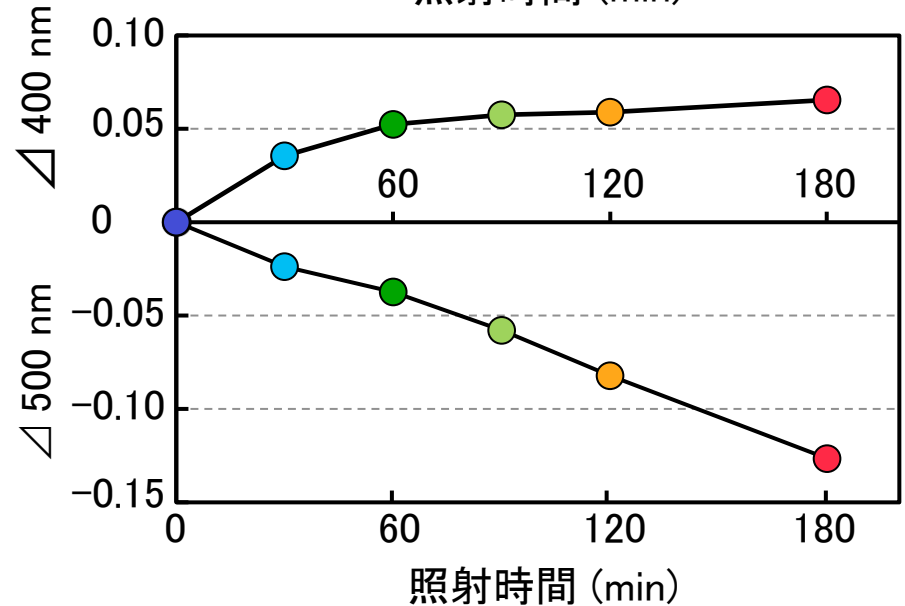
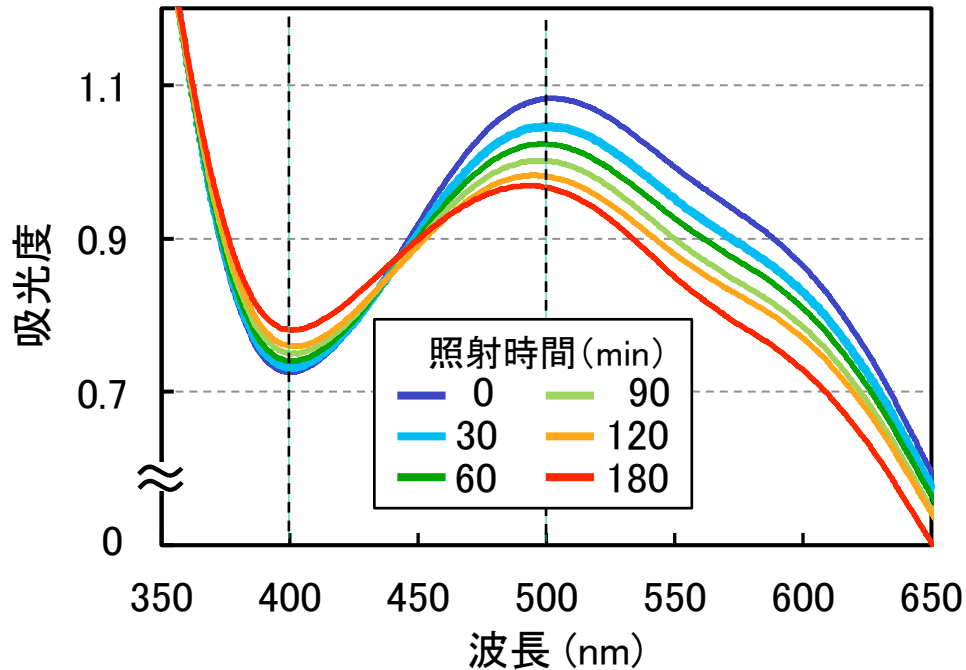


観察  
色差  
吸光度

色差



スペクトル



光照射による退色を分析するのに有効

# ⑥ヘアカラー後の退色-水

方法

酸化染毛剤  
(ダークブラウン)

透明型  
フィルム  
毛髪



浸水試験

蒸留水、水道水、  
CaCl<sub>2</sub> (0.5 mM)  
(40°C 0-120分)

洗浄  
乾燥

観察  
色差  
吸光度

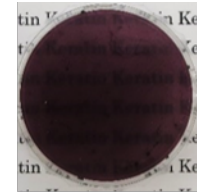
外観

浸水前

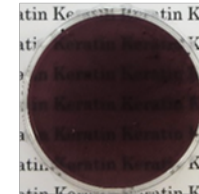
浸水後(60分)



D.W.



水道水



CaCl<sub>2</sub>  
(0.5 mM)



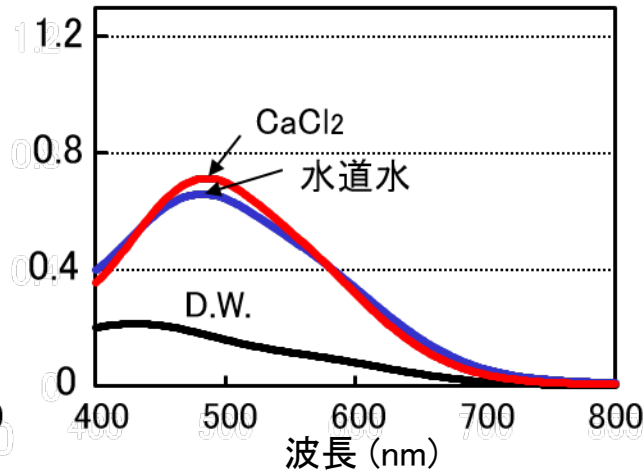
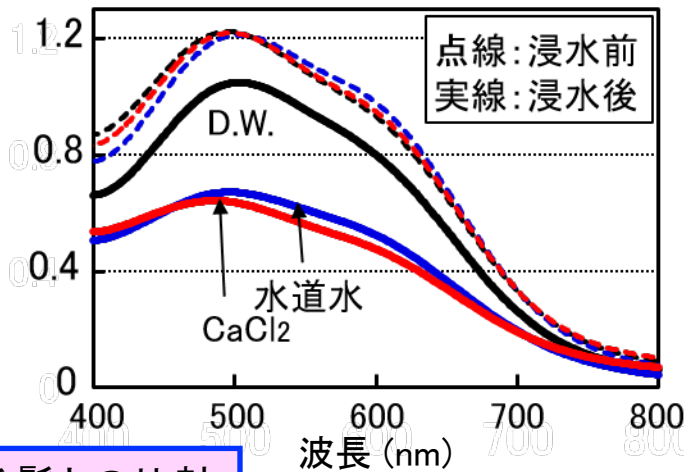
CaCl<sub>2</sub>  
(0.5 mM)



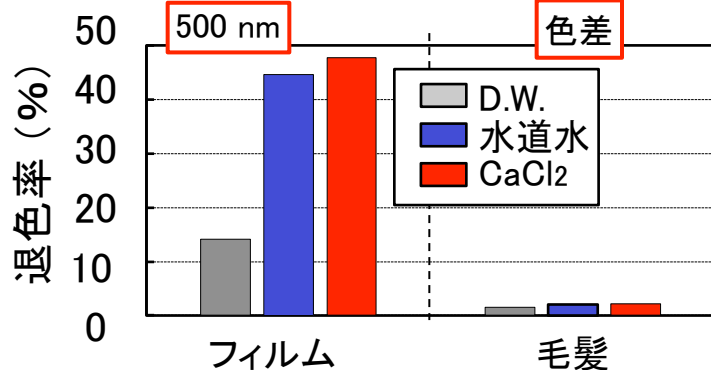
スペクトル

フィルム (60分)

浸水液 (120分)



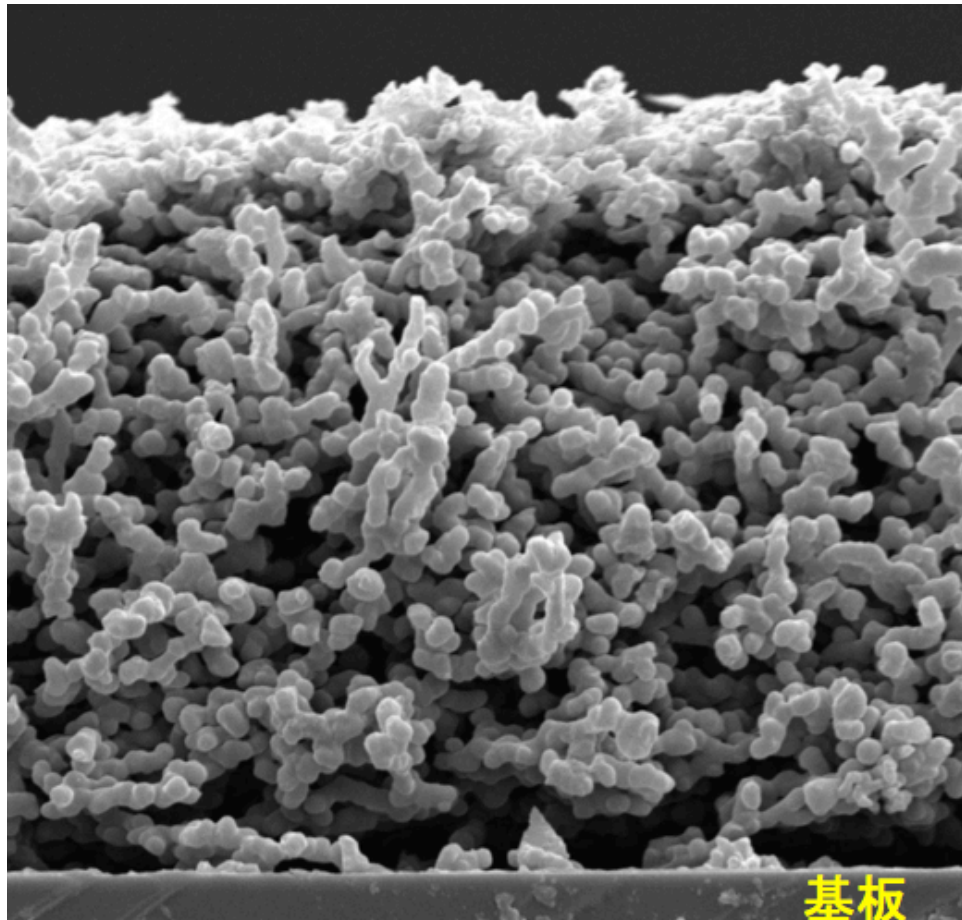
毛髪との比較



・洗髪による退色の分析に有効  
・“染髪毛”にやさしい“水”の開発に活用

# ⑦ キューティクルとケラチンフィルム

断面像 (SEM)



10  $\mu$ m

アミノ酸組成 (mol%)

Amino acid	Keratin film	Hair	Cuticle*
Aspartic acid	5.3	4.9	3.1
Glutamic acid	12.4	11.4	8.9
Tyrosine	2.4	2.0	1.4
Lysine	1.9	2.7	3.5
Arginine	7.2	5.8	3.0
Half-Cystine	16.5	17.8	20.3
Serine	10.5	11.7	17.0
Threonine	8.1	6.0	4.3
Alanine	4.0	4.6	5.2
Leucine	6.2	5.8	4.2
Phenylalanine	1.6	2.2	1.2
Valine	5.6	5.8	6.7
Isoleucine	2.7	2.6	1.9
Glycine	5.5	6.4	8.7
Proline	8.7	8.4	9.4
Tryptophan	-	-	-
Histidine	0.9	0.9	0.6
Methionine	0.4	0.6	0.4

- ・微細なネットワーク構造と凹凸がある表面
- ・毛髪およびキューティクルと類似したアミノ酸組成

\*Wolfram and Lindemann, J. Soc. Cosmet. Chem., 22, 839-850 ((1971))より

# ⑦ シャンプー類処理による応答性-質量と形態

## スキームと分析

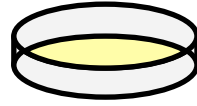


シャンプー類塗布

5 min



浸水洗浄  
(10 min)



乾燥  
(overnight)



- ・質量
- ・外観
- ・微細形態
- ・KES (MIU)
- ・EDS
- ・FT-IR

## 質量と形態への影響

D.W.



18.27  
mg

シャンプー(S)



+0.40  
mg

コンディショナー(C)



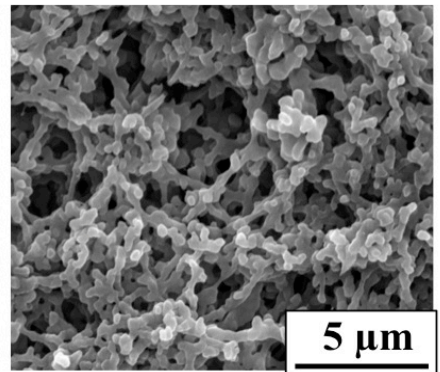
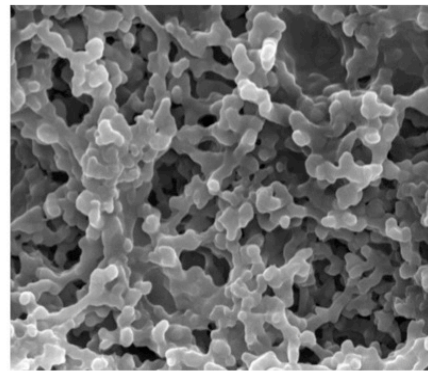
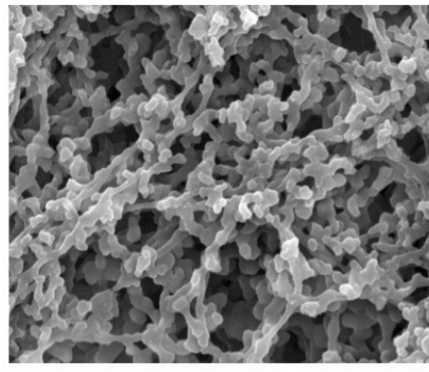
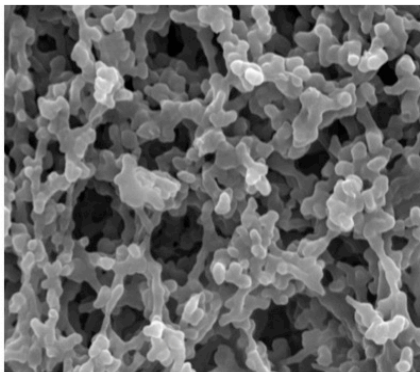
+0.50  
mg

S⇒C処理



+0.17  
mg

10 mm

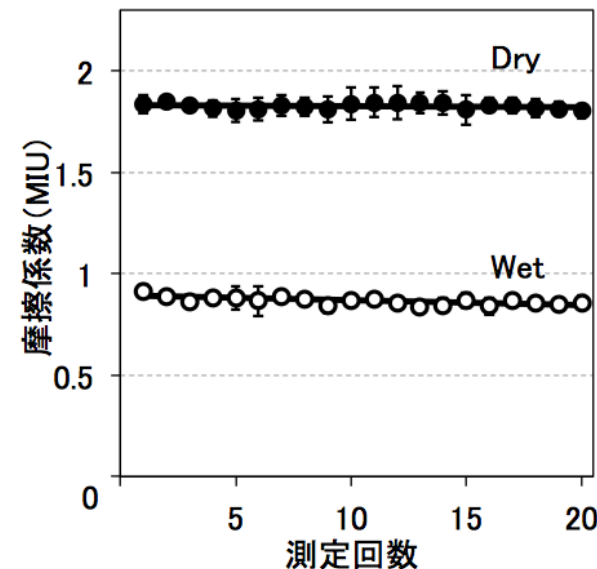
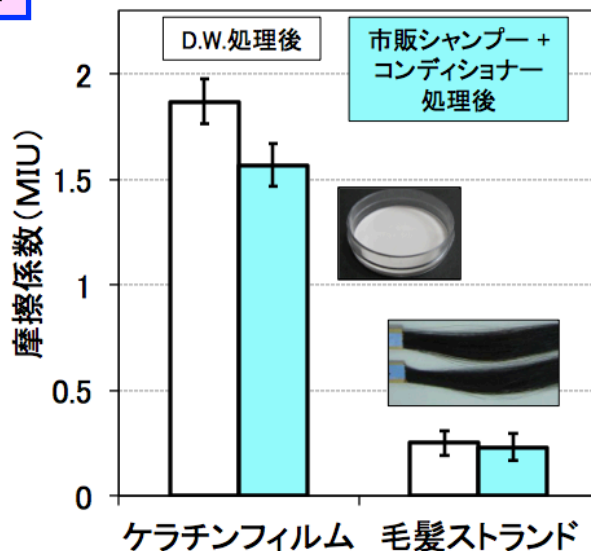
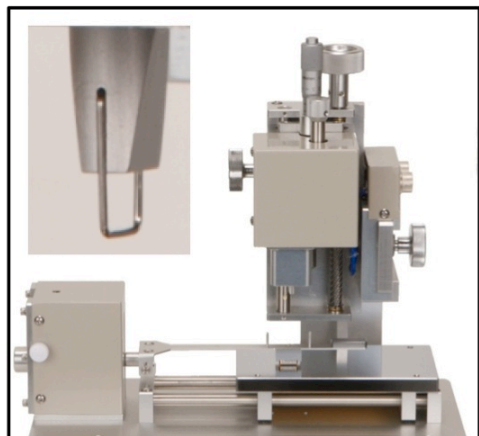


5 μm

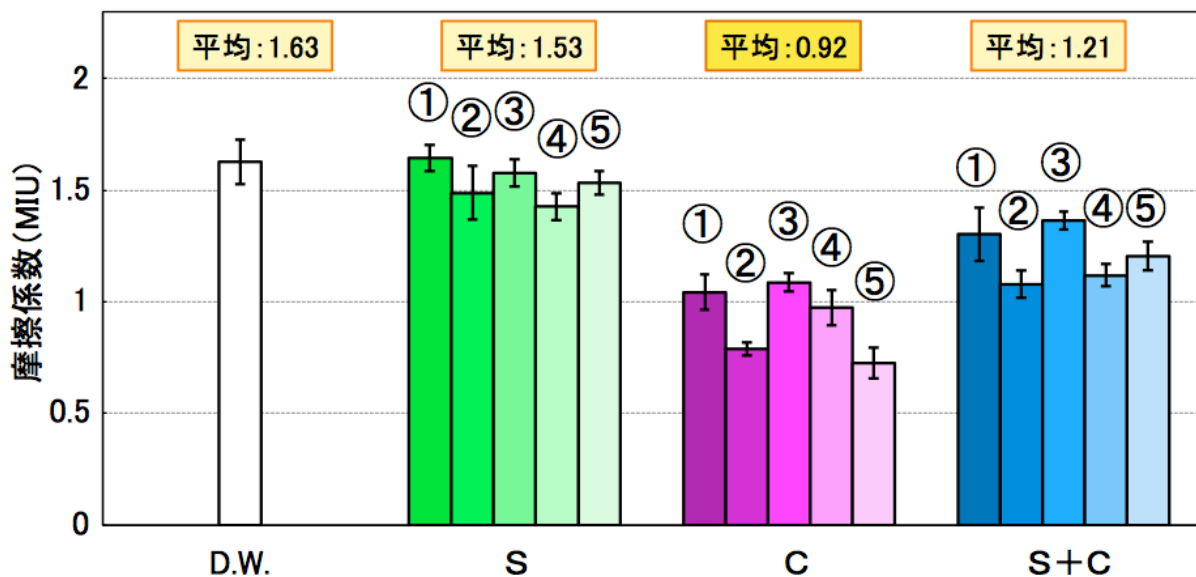
- ・全ての処理で質量の微増が検出
- ・形態への著しい変化は見られない

# ⑦ 摩擦計測とシャンプー類処理による影響

## 摩擦感テスター(KES)と計測結果



## 市販シャンプー類処理の影響



- ・毛髪ストランドより高いMIU値 (6~8倍)
- ・繰り返しの計測が可能 (20回以上)
- ・MIU値はコンディショナー処理で低下
- ・シリコンの影響は見られない

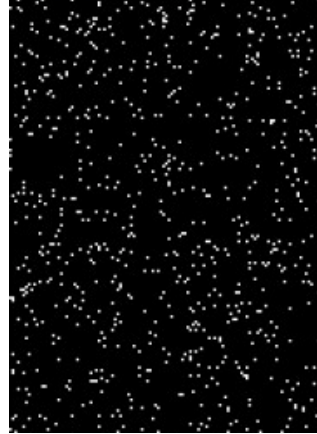
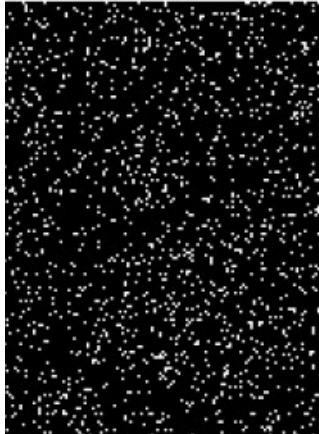
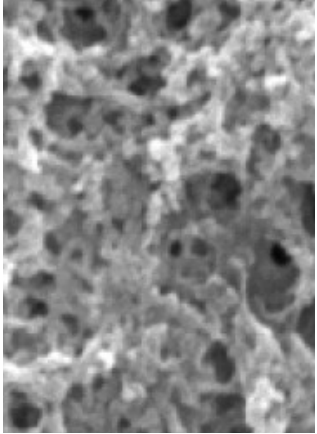
# ⑦ シリコーン(Si)の吸着/結合とMIUへの影響

## EDS分析

SEM像

イオウ(S)の  
マッピング

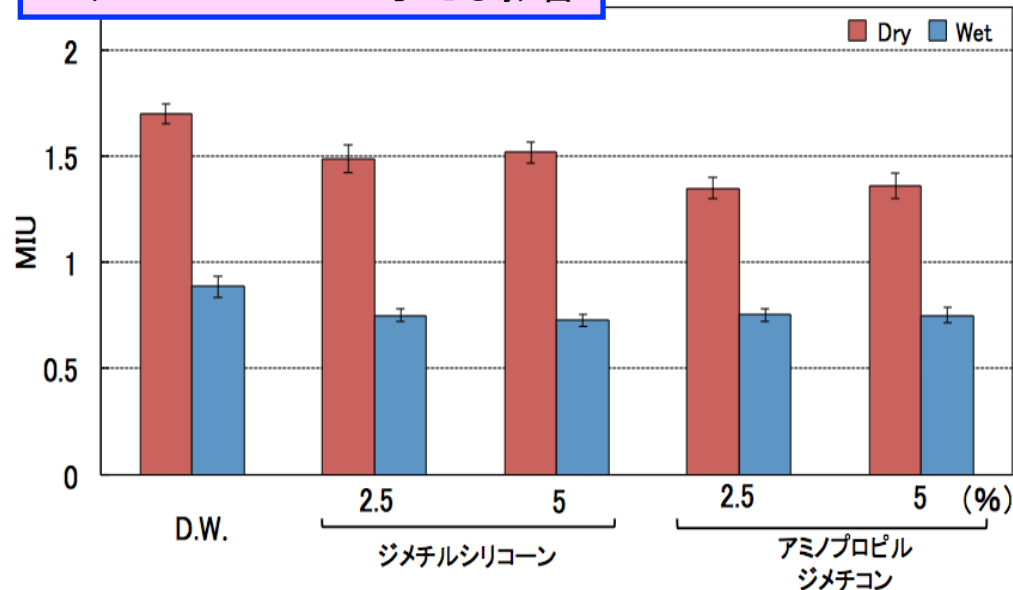
ケイ素(Si)の  
マッピング



5 μm

元素	未処理	製品① (1回)	製品① (2回)	製品② (1回)
質量%				
C	80.5	79.3	77.9	75.0
O	12.5	12.8	14.7	15.0
S	7.0	7.7	6.6	7.8
<b>Si</b>	N.D.	0.3	0.8	2.2

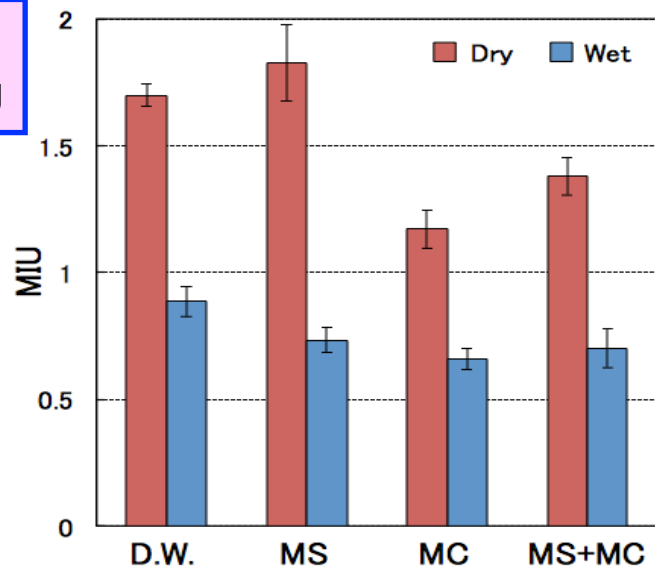
## シリコーンのMIUに与える影響



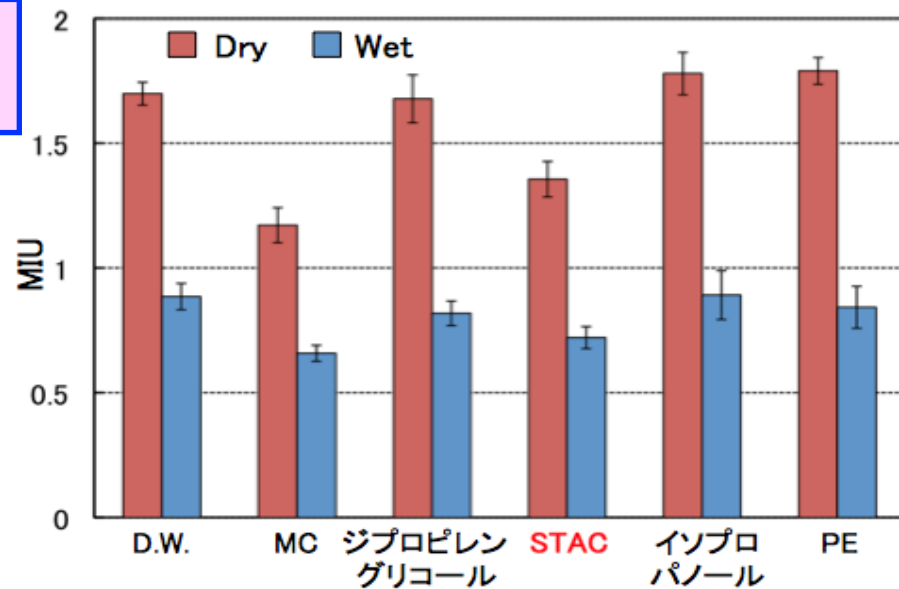
- ・シリコーンはケラチンフィルムとの吸着/結合性がある
- ・シリコーンの添加はMIUを有意に低下させる
- ・効果はアミノプロピルジメチコン > ジメチルシリコーン

# ⑦ MIUを低下させる成分の同定-モデル系での分析

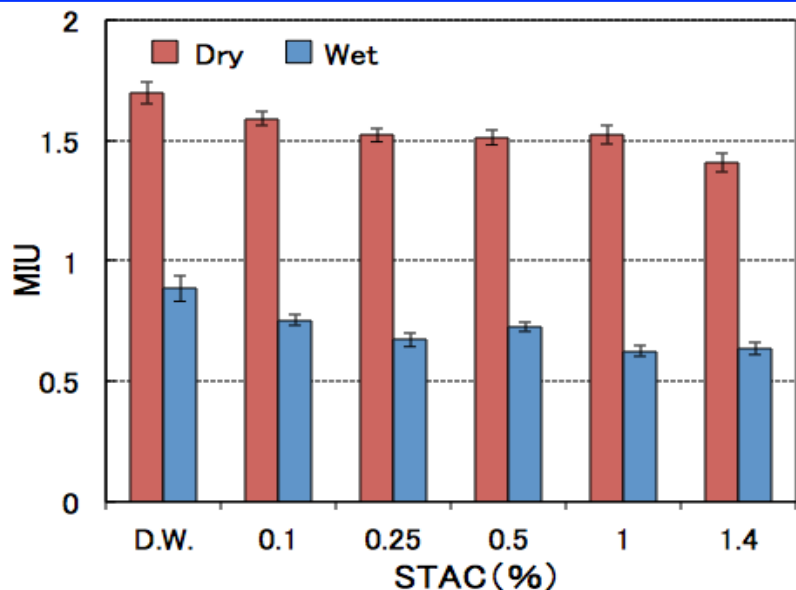
MSとMC  
処理とMIU



各成分  
の作用



STAC(塩化ステアリルトリメチルアンモニウム)濃度とMIU



- ・市販品と類似したMIU変化が観察
- ・MC中のSTACがMIU低下の主な原因物質
- ・STAC濃度に依存したMIU低下も検出

# ケラチンフィルムを使用した成果のまとめ

刺激/処理	測定対象	毛髪との比較
① 光 (紫外線、他)	カルボニル形成 システイン酸形成	約10倍 数十倍
② ブリーチ (酸化)	カルボニル形成 システイン酸形成	約10倍 5~10倍
③ パーマ (還元-酸化)	-SH/-SS-変換 透明性 溶出性	類似応答 特有の反応 2,000倍以上
④ 熱	色差 溶解性 カルボニル形成	同じ 約2倍 約10倍
⑤ 熱+ パーマ	-SH/-SS-変換 透明性 溶出性	類似応答 特有の反応 抑制(温度依存)

刺激/処理	測定対象	毛髪との比較
⑥ カラー剤 (酸化染毛剤、 半永久染毛料)	視認、測色 スペクトル システイン酸形成	類似 利便性 5~10倍
⑥ カラー退色 (光、水)	色差 スペクトル	短時間 10倍以上
⑦ シャンプー 類	摩擦 結合/吸着	約5倍 利便性

- ・多くの刺激と化学反応的な処理に耐えられる
- ・毛髪試料と同様な反応が見られる
- ・毛髪試料と比べて高感度で検出
- ・扱い易さとバラツキが少ないデータ
- ・実験回数と時間の低減

# 毛髪研究の問題点へのケラチンフィルムによる対処

## 毛髪側の 問題と解決

- ・人種、民族、個人による差
- ・部位差(毛先と根元)
- ・履歴が不明な試料が多い
- ・消毒(化学処理)の影響
- ・未処理健全毛の枯渇
- ・取り扱い易さ
- ・分析機器の精度の向上

複数由来の混合毛髪試料  
可溶化と自己集合 に対応

断片毛髪の使用 に対応

均一で二次元の形状 に対応

## 評価法の 問題と解決

- ・感度が低い(損傷の中期~後期)  
タンパク質の構造変化と溶出性  
機械的(物理的)な特性
- ・数値化に不向きな試験が多い  
官能(視覚・触覚等)  
キューティクルと毛髪内部の形態
- ・実験の負担  
再現性が低い  
実験回数が増大

高い反応性  
高い均一性  
取り扱い易さ  
汎用機器での分析  
に対応

