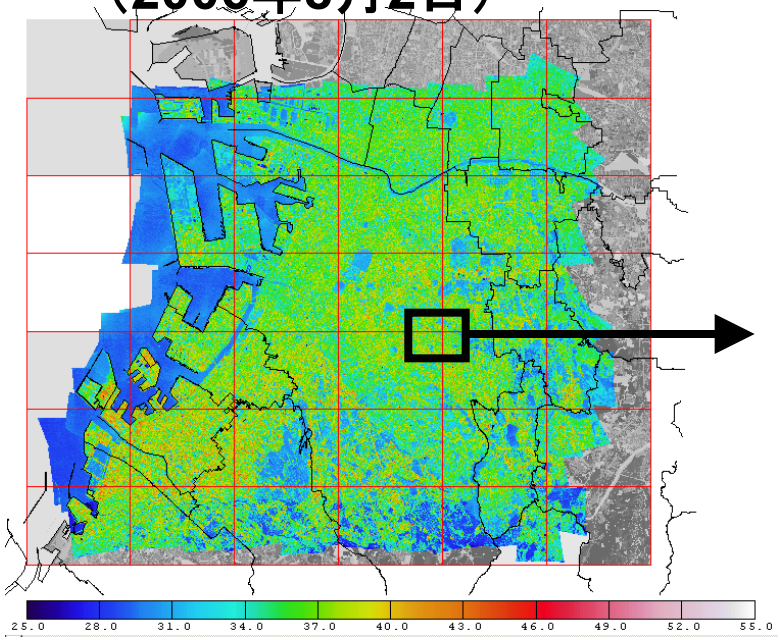
大阪ヒートアイランド対策技術コンソーシアム
ヒートアイランド対策技術公開セミナー
2015年6月12日（金）

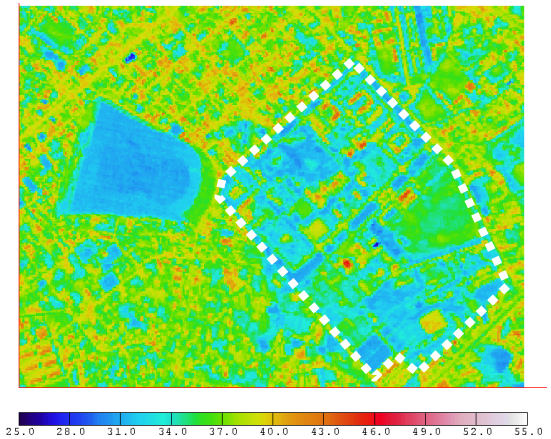
都市表面における日射吸収抑制策

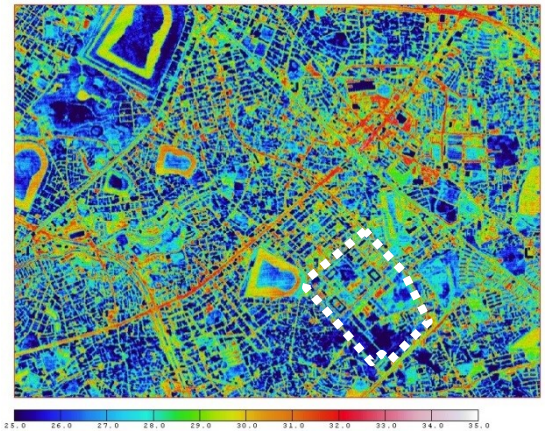
大阪府立大学大学院
工学研究科　機械工学分野
木下進一

ヒートアイランド現象

堺市周辺の熱画像（地表面温度分布図）
（2006年8月2日）







大阪府ヒートアイランド対策推進計画

目標1：住宅地域における夏の夜間の気温を下げ、2025年までに夏の熱帯夜日数を現状より3割減らす。

目標2：屋外空間にクールスポットを創出し、夏の日中の熱環境を改善し、体感的な温度を下げる。

ヒートアイランド現象の原因

- 都市の拡大に伴う人工被覆面の増加

  道路面，建造物・・・コンクリート，アスファルト

  反射率の低下，日射吸収量の増大

  地表面の高温化→顕熱輸送量の増加

  蓄熱量の増大

  夜間での放熱→熱帯夜の原因

- 人間活動による人工排熱の増加

  工場排熱

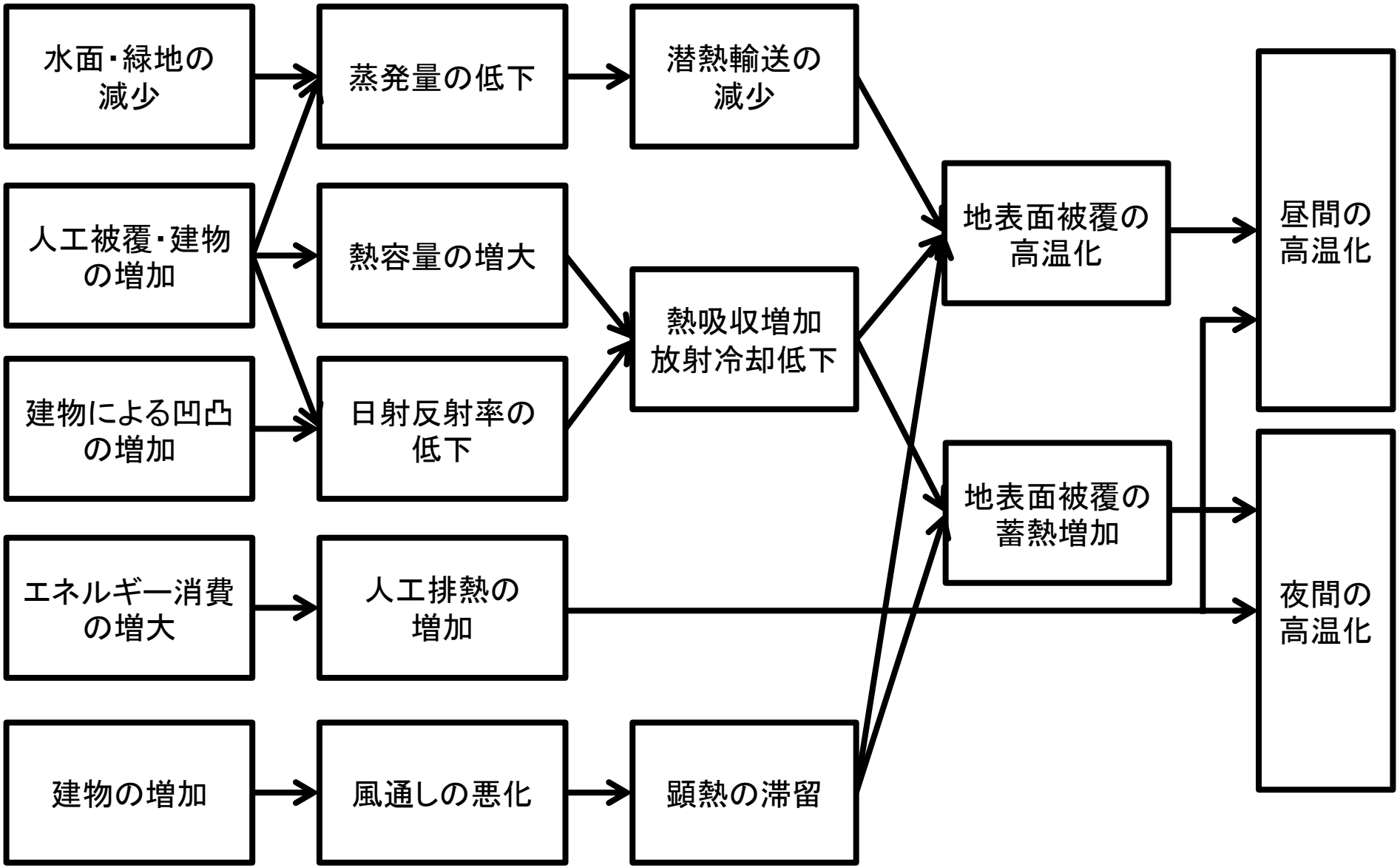
  空調排熱，電気機器，燃焼機器，

  交通排熱

- 建造物等の凹凸による風速の低減効果，日射吸収の増大，赤外放熱の減少

  よどみ，空気の滞留　凹凸面での多重反射

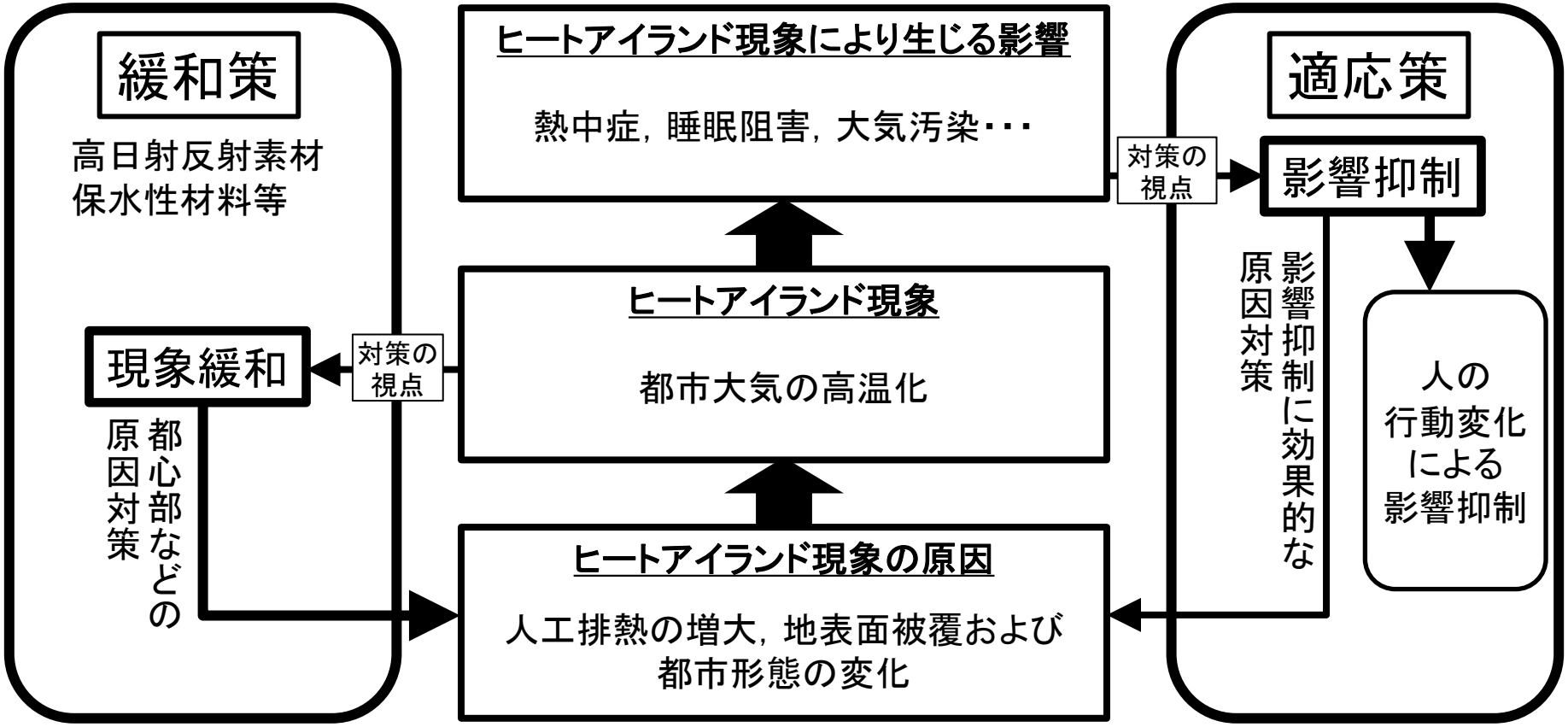
都市の高温化要因



「ヒートアイランド対策マニュアル（H24.3）」より

緩和策と適応策

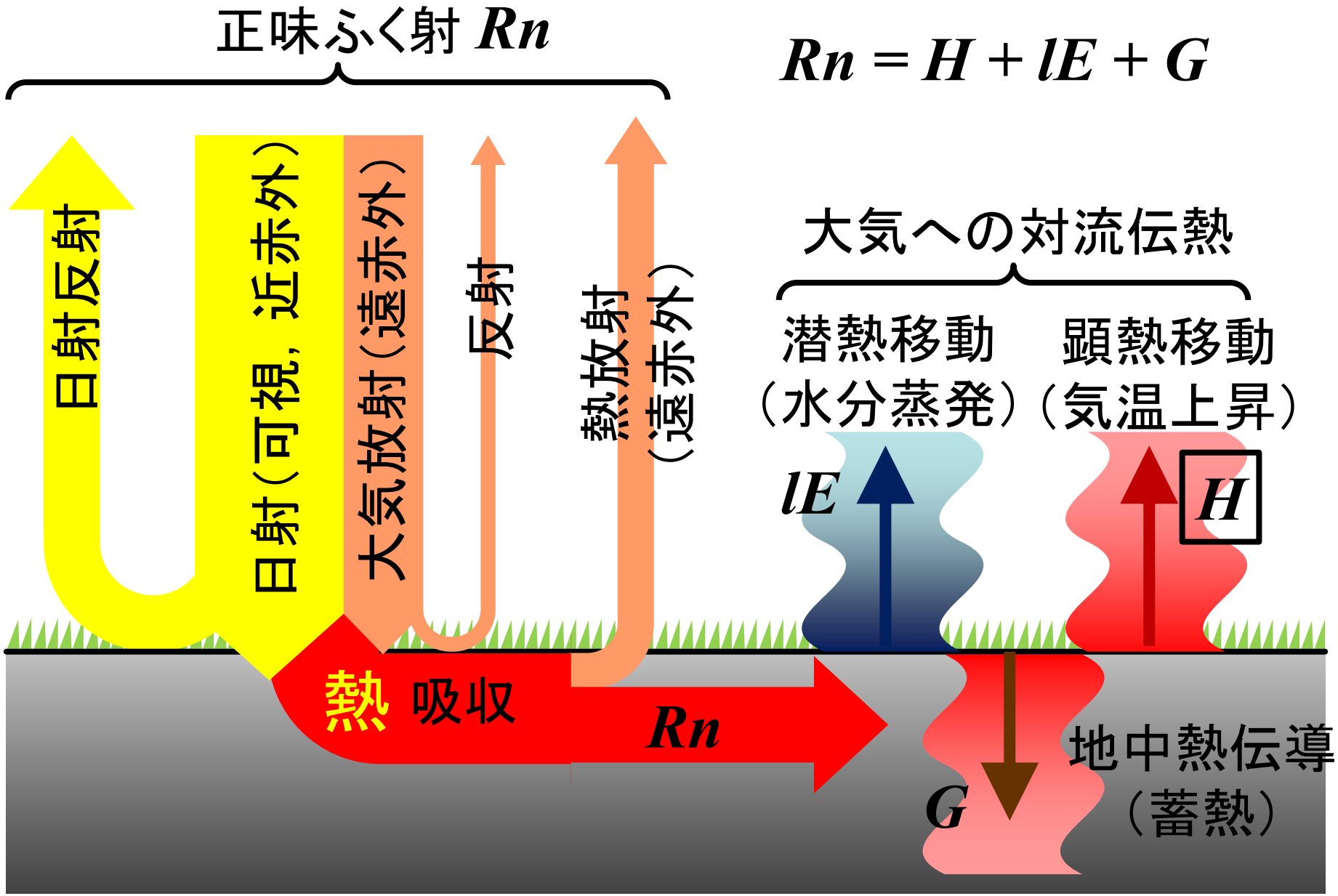
緩和策：ヒートアイランド現象の抑制を目的
適応策：ヒートアイランド現象により生じる影響の抑制を目的
　　原因削減ならびに人の行動変化による影響削減



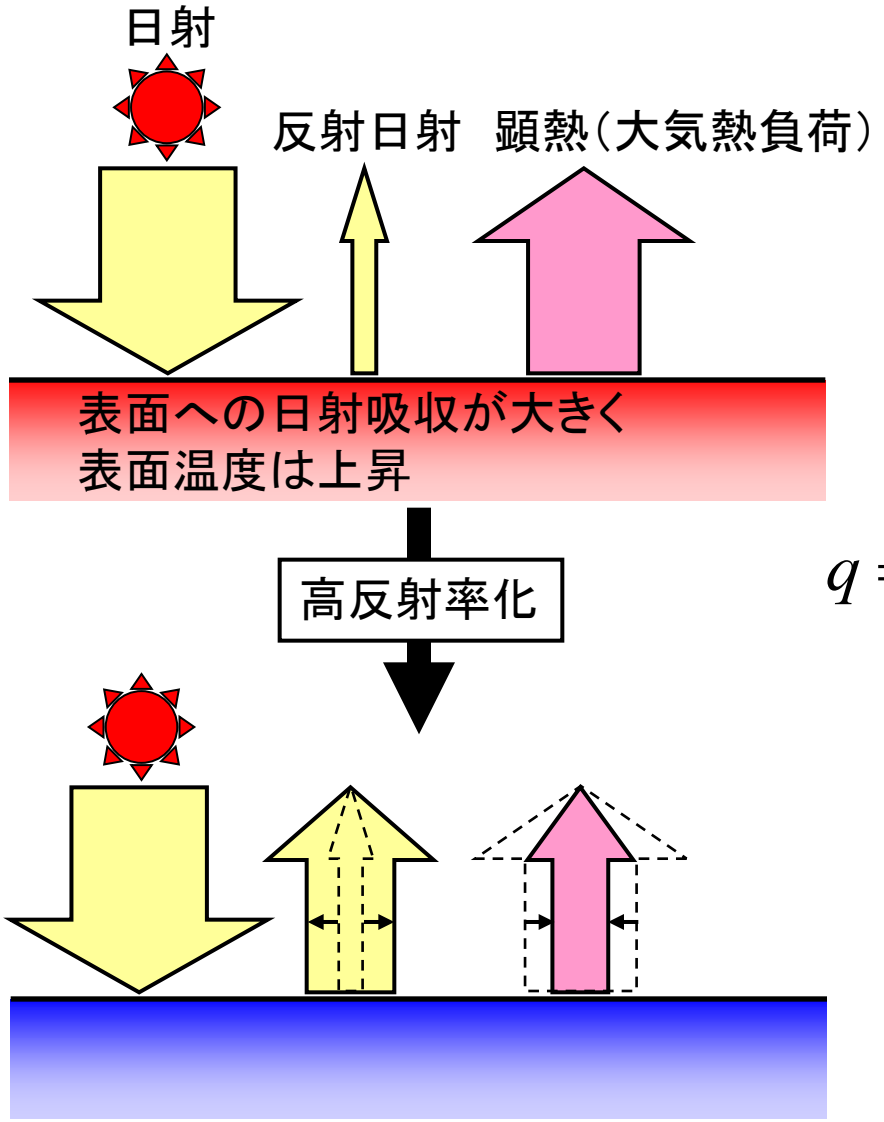
「ヒートアイランド対策マニュアル（H24.3）」より

都市表面でのエネルギーバランス

$$Rn = H + lE + G$$



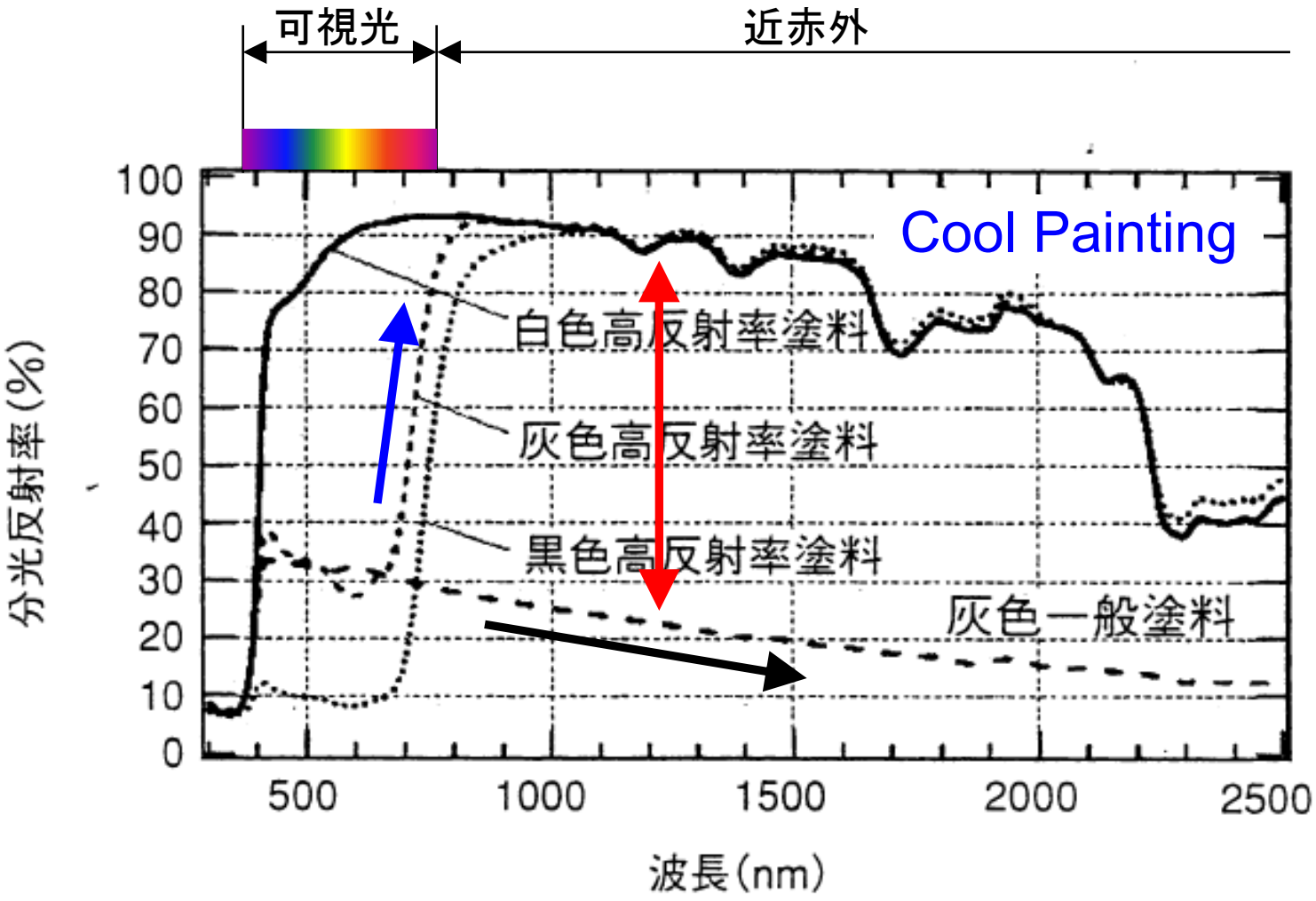
都市表面の高日射反射率化



$$q = h(T_{surf} - T_{air})$$

建物および大気への熱負荷を低減

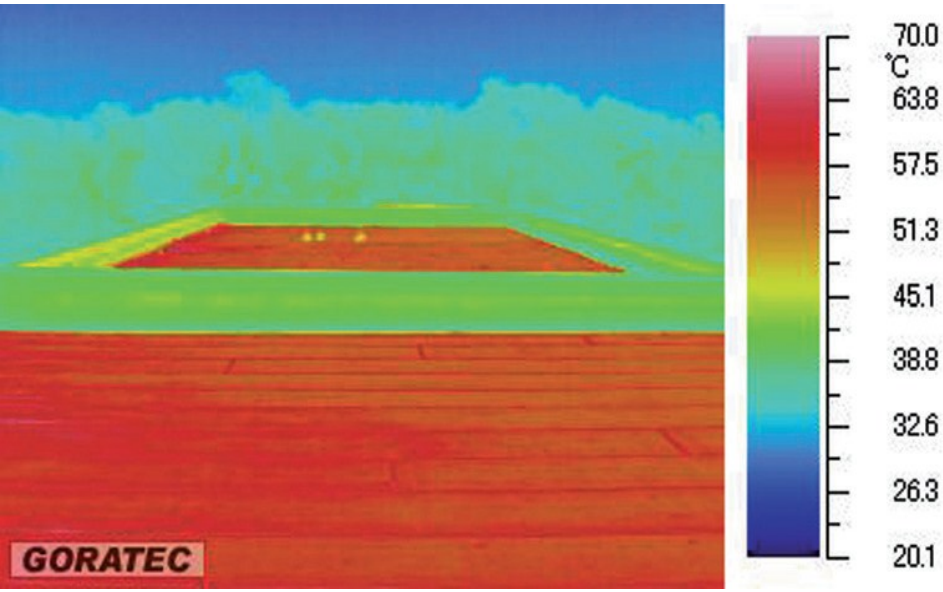
施工事例

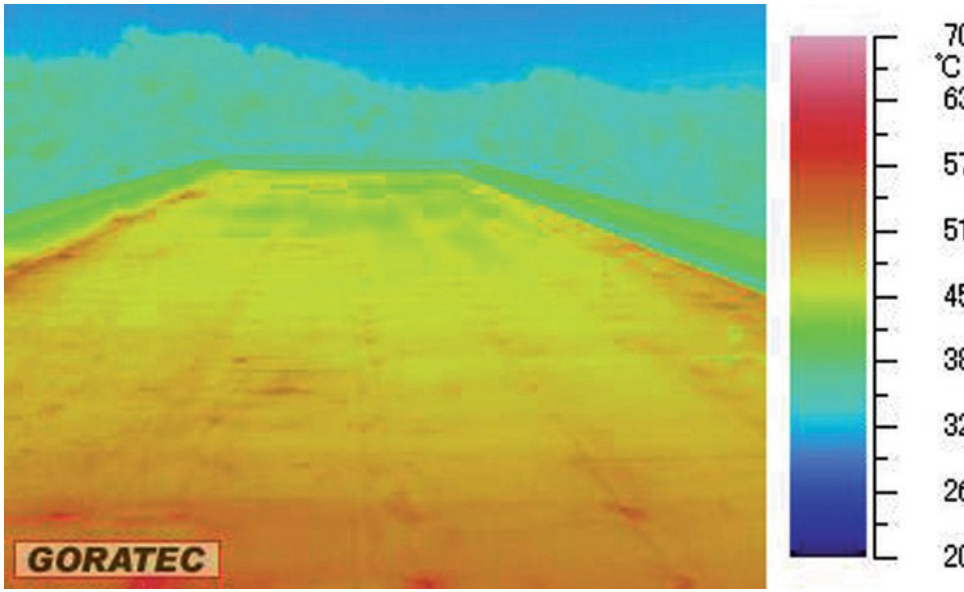


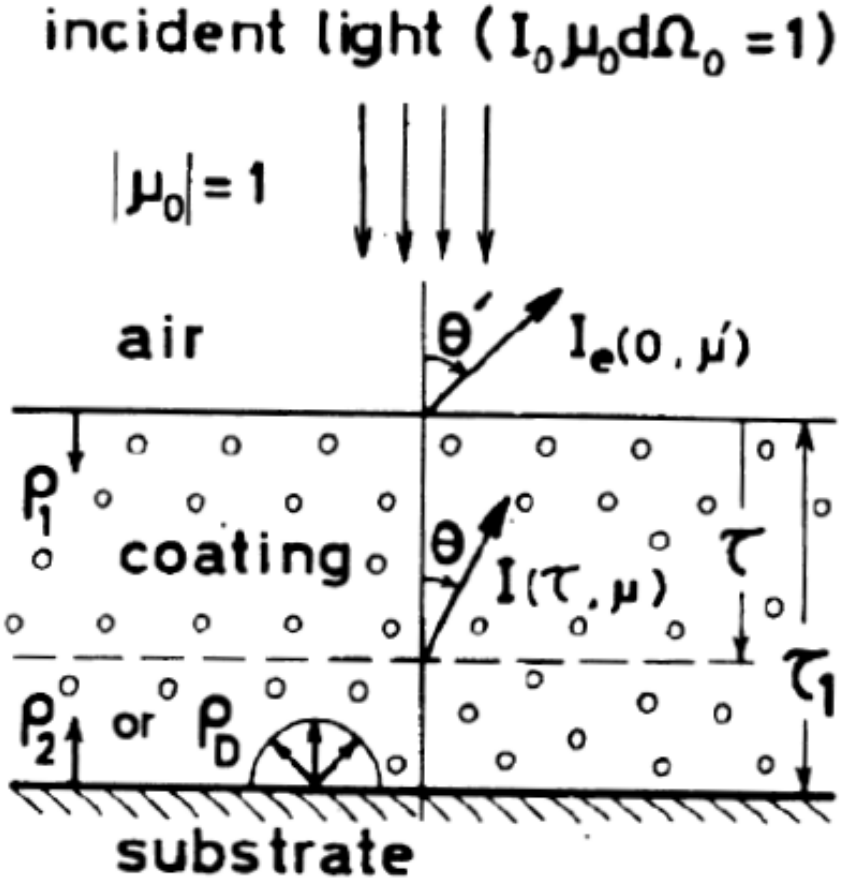
高日射反射率塗料の分光反射率

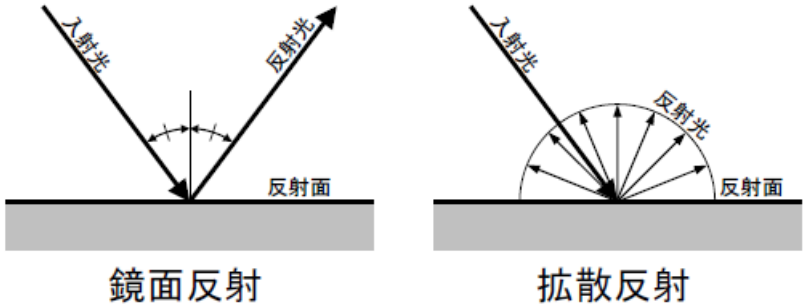
施工前

施工後









表面反射→鏡面反射

内部散乱→拡散反射
顔料（粒径、形状、濃度、複素屈折率）

透過性（下地の影響）

日射反射率　分光反射特性　指向反射特性

反射率試験方法

日本工業規格　JIS K 5602 :2008

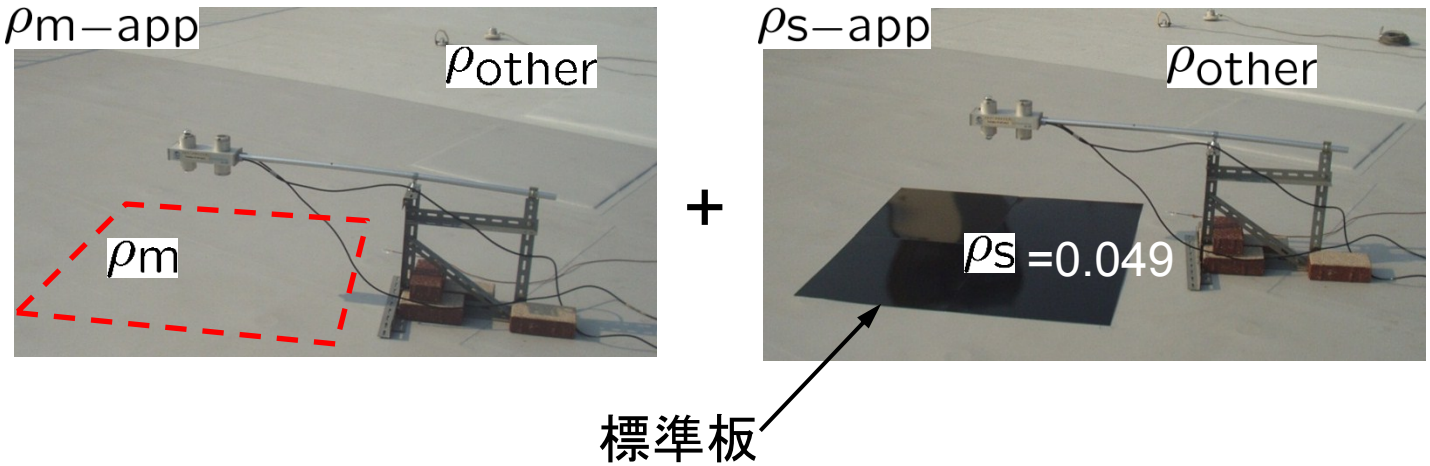
「塗膜の日射反射率の求め方」

- 日射反射率
  - 全天日射（直達日射＋天空日射（散乱日射））に対する反射光束の比率
  - 規定波長域で求めた分光反射率に重価係数を乗じた加重平均により算出
- 分光反射率
  - 分光光度計（300～2500nm，積分球付属）により測定
  - 試料への光線の入射角は15°以内
- 重価係数
  - 基準太陽光（ISO 9845-1:1992）規定，全天日射対象

屋外計測法

１枚の標準板を用いて周囲からの影響を取り除く.

- 標準板を置いたときと置いていないときの見かけの反射率を測定
- 標準板の日射反射率（既知）および2つの見かけの日射反射率の差から対象領域の値を算出

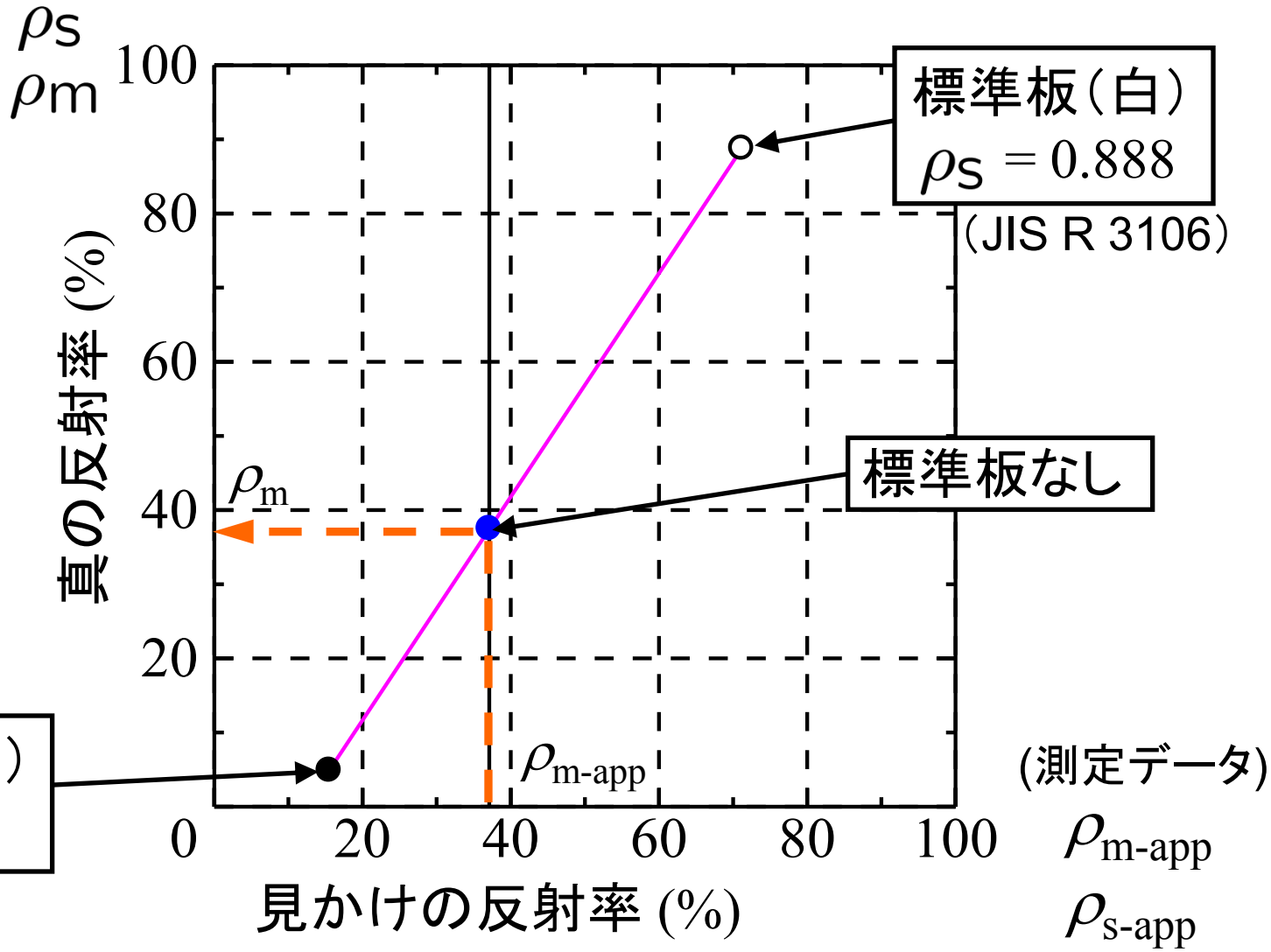


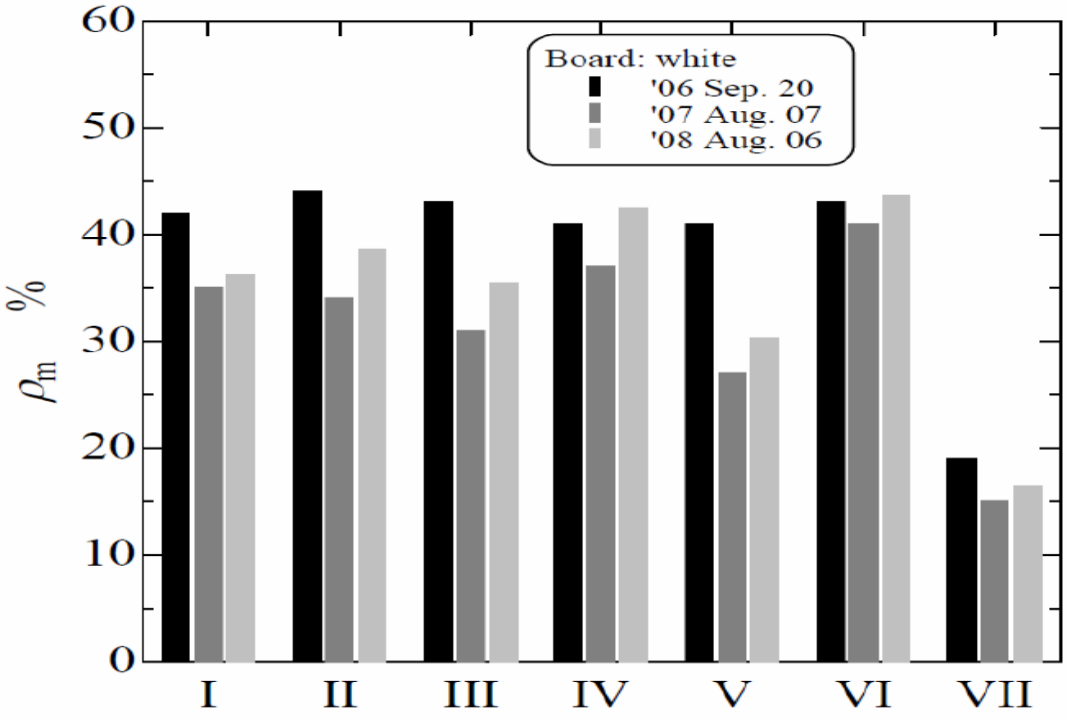
屋外計測法（二点校正法）

２枚の標準板と校正線図を使用

+

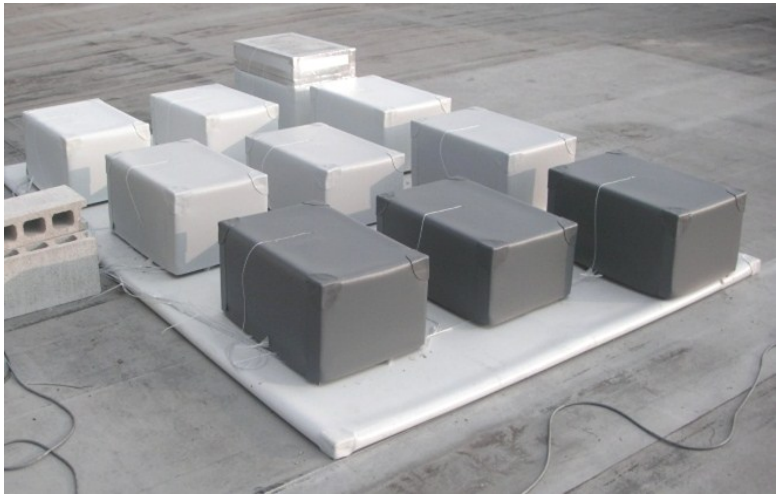
+





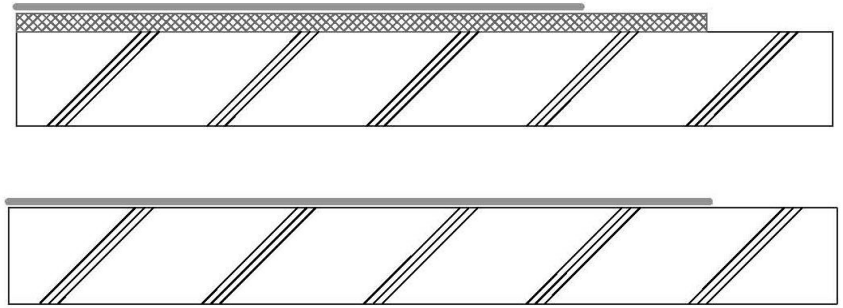
経年変化

Object	Method	Solar reflectance (%) 1st Feb. 6 2007	2nd Aug. 9 2007	3rd Aug. 7 2008
Sheet1 (unwashed)	White	59.8	44.9	42.1
	Black	59.1	43.4	43.7
	2 point correction	59.3	---	42.9
Sheet1 (washed)	White	---	---	54.0
	Black	---	---	55.2
Sheet2 (unwashed)	White	40.3	24.9	25.8
	Black	37.4	27.1	27.2



屋外測定

従来の防水シート vs 高反射率防水シート
断熱方法の影響を検討



大阪府立大学　工学部校舎屋上で測定

防水シートの種類	色	日射反射率	表面温度(2007.9.26測定)		表面温度(2008.1.18測定)	
			非断熱	外断熱	非断熱	外断熱
a. 高反射率防水シート	白	0.61	34.5℃ (32.7℃)	42.4℃ (39.9℃)	11.8℃ (9.9℃)	19.1℃ (17.0℃)
b. 従来防水シート	ライトグレー	0.38	42.1℃ (39.6℃)	52.1℃ (47.9℃)	16.4℃ (14.0℃)	24.3℃ (21.1℃)
c. 従来防水シート	グレー	0.15	–	61.6℃ (55.7℃)	–	28.5℃ (25.4℃)

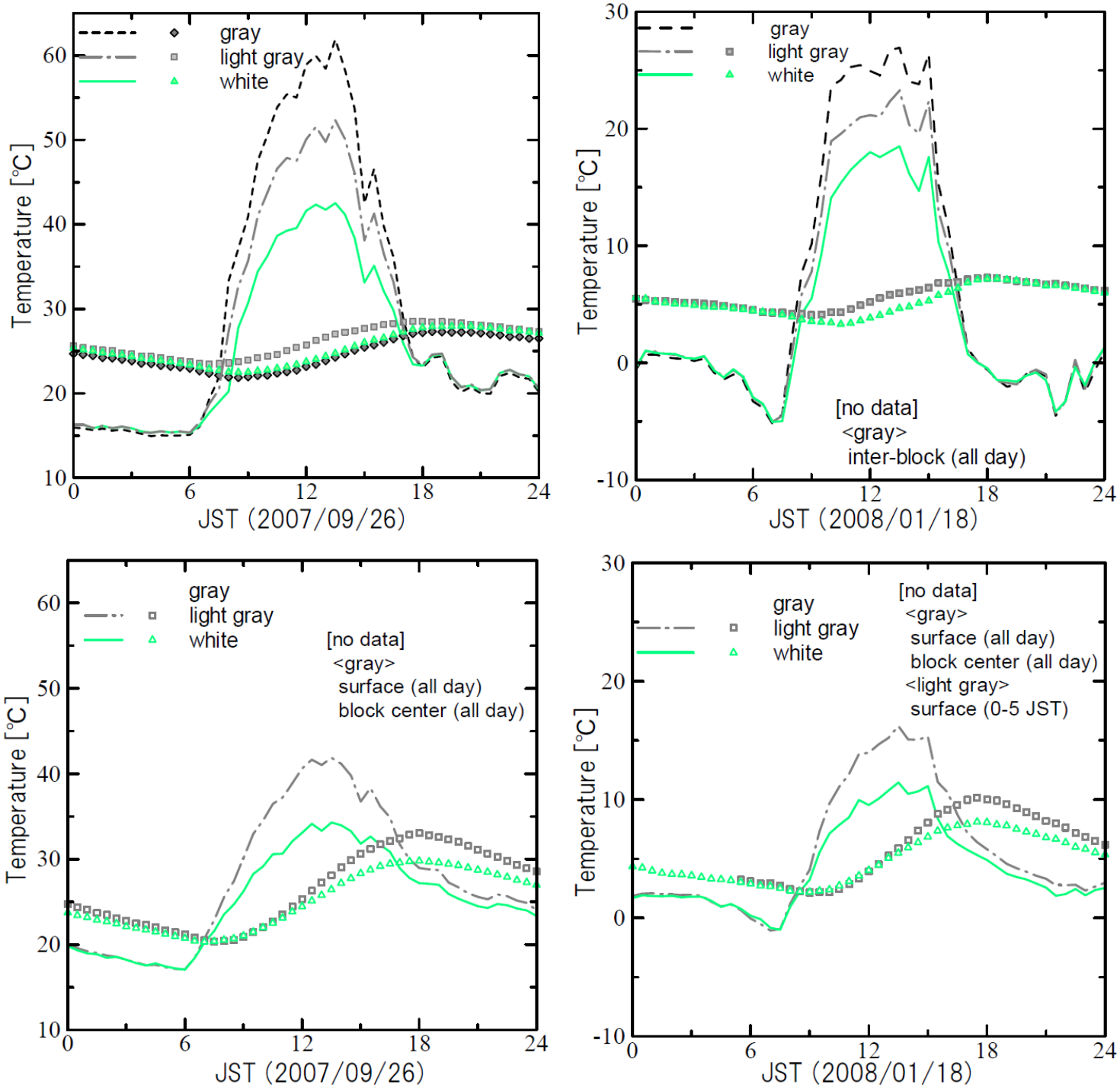
<外断熱工法>

外断熱で防水シートの高反射率化が表面温度低下に大きな効果

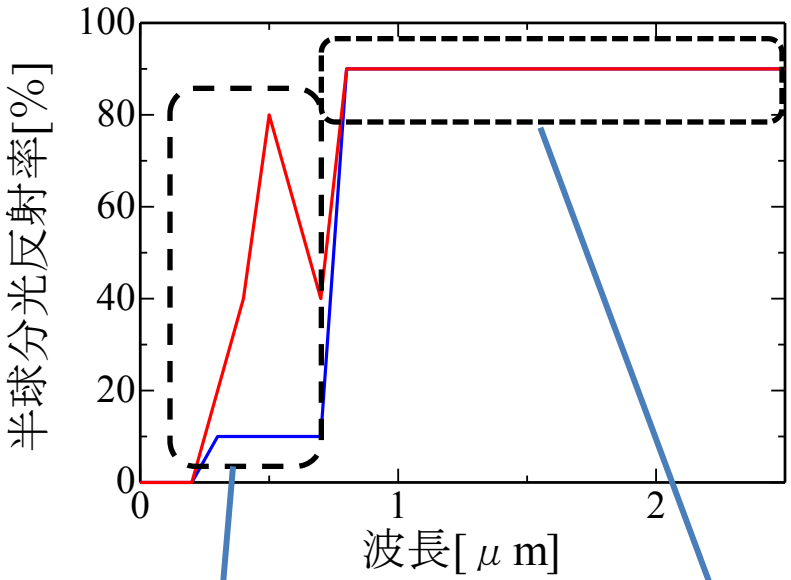
↓

- HI効果大
- 熱劣化防止（耐久性向上）
- 躯体への熱負荷減少

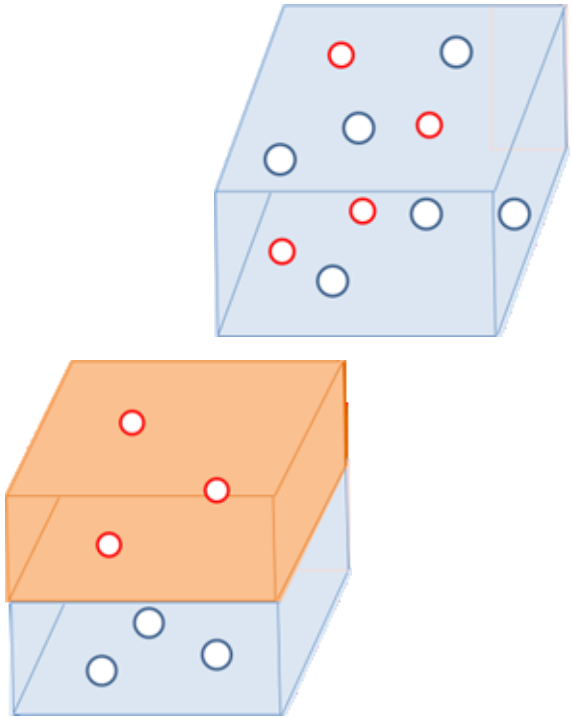
<非断熱工法>



理想的な分光特性を有する高日射反射率塗膜の設計



このような塗膜の
実現のために



可視光域(43%)
任意の反射率

↓

塗膜の色彩の選択性

近赤外域(52%)
高い反射率

↓

塗膜内部への
蓄熱を抑制

単一顔料や単一層だけでは任意の反射特性の実現は困難

→複合顔料や多層構造を用いた塗膜設計が目標

研究目的

これまで述べた散乱の非等方性，複合顔料，多層構造など，実際の使用環境をより考慮した数値解析を行うことで，塗膜設計に貢献したい．

既存数値解析手法(Kubelka−Munk理論など)

・非等方散乱を考慮していないものが多い．

・入射は拡散日射のみを考慮．

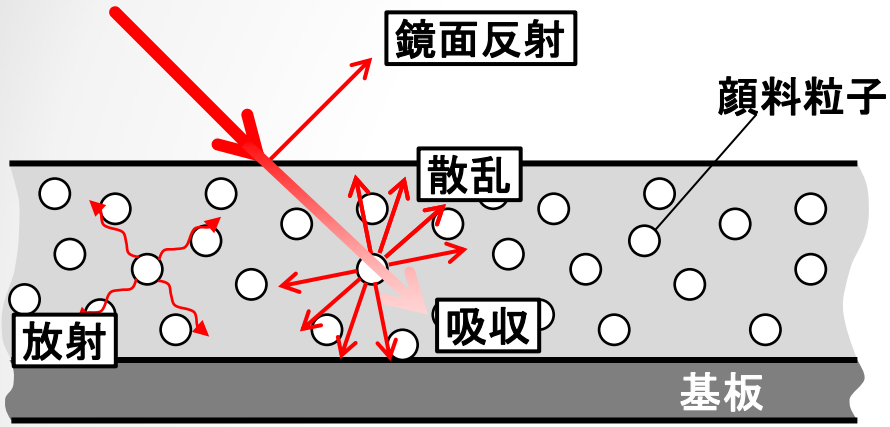
ふく射要素法[1]に基づいた本解析手法

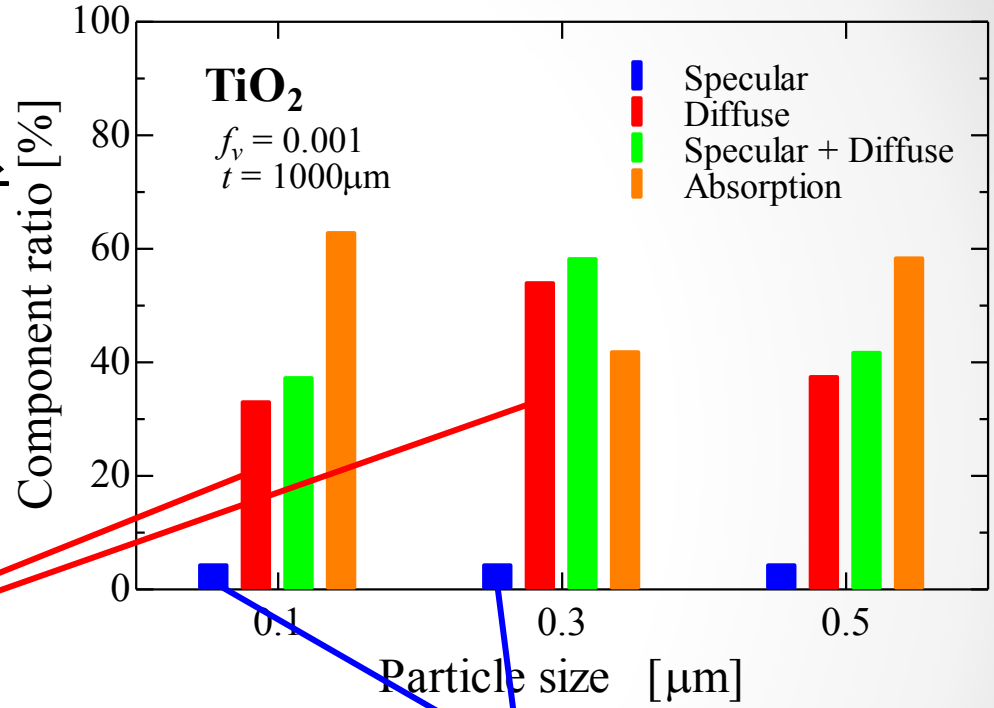
・非等方散乱を考慮できる．

・拡散日射と直達日射の両方を考慮できるなど，

柔軟な条件下での解析が可能．

[1] Maruyama, S.,Int'l J. Heat and Mass Transfer ,41(1988), 2847.





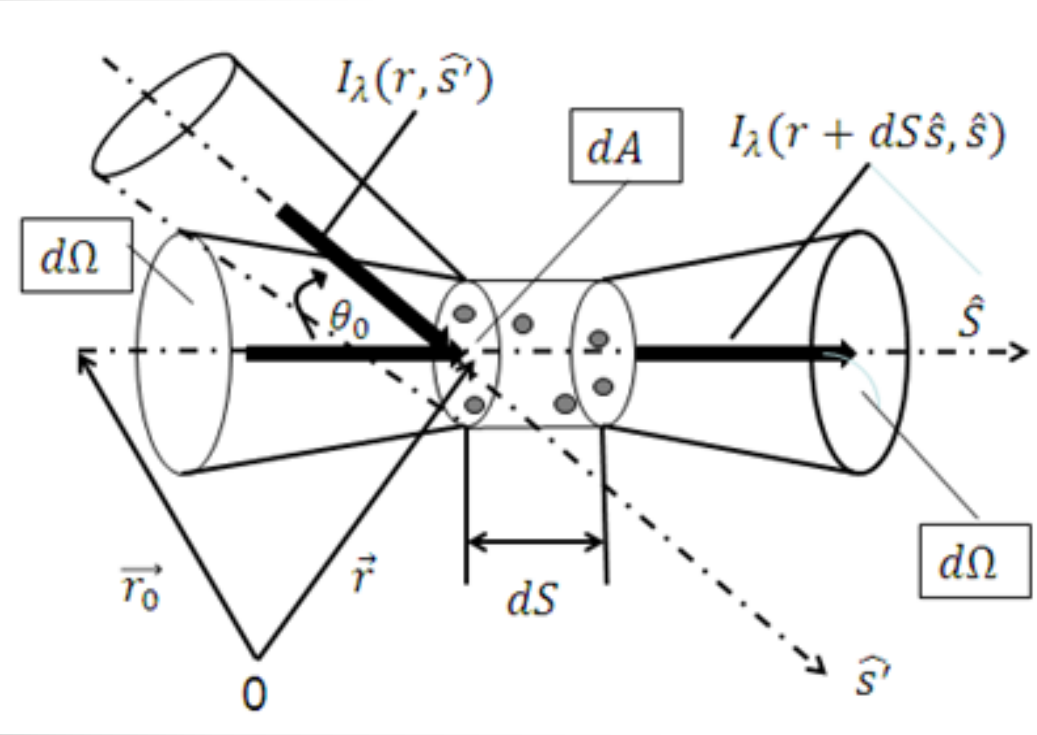
塗膜層中の顔料粒子による拡散反射 >> 塗膜層表面での鏡面反射

基礎方程式

ふく射輸送方程式

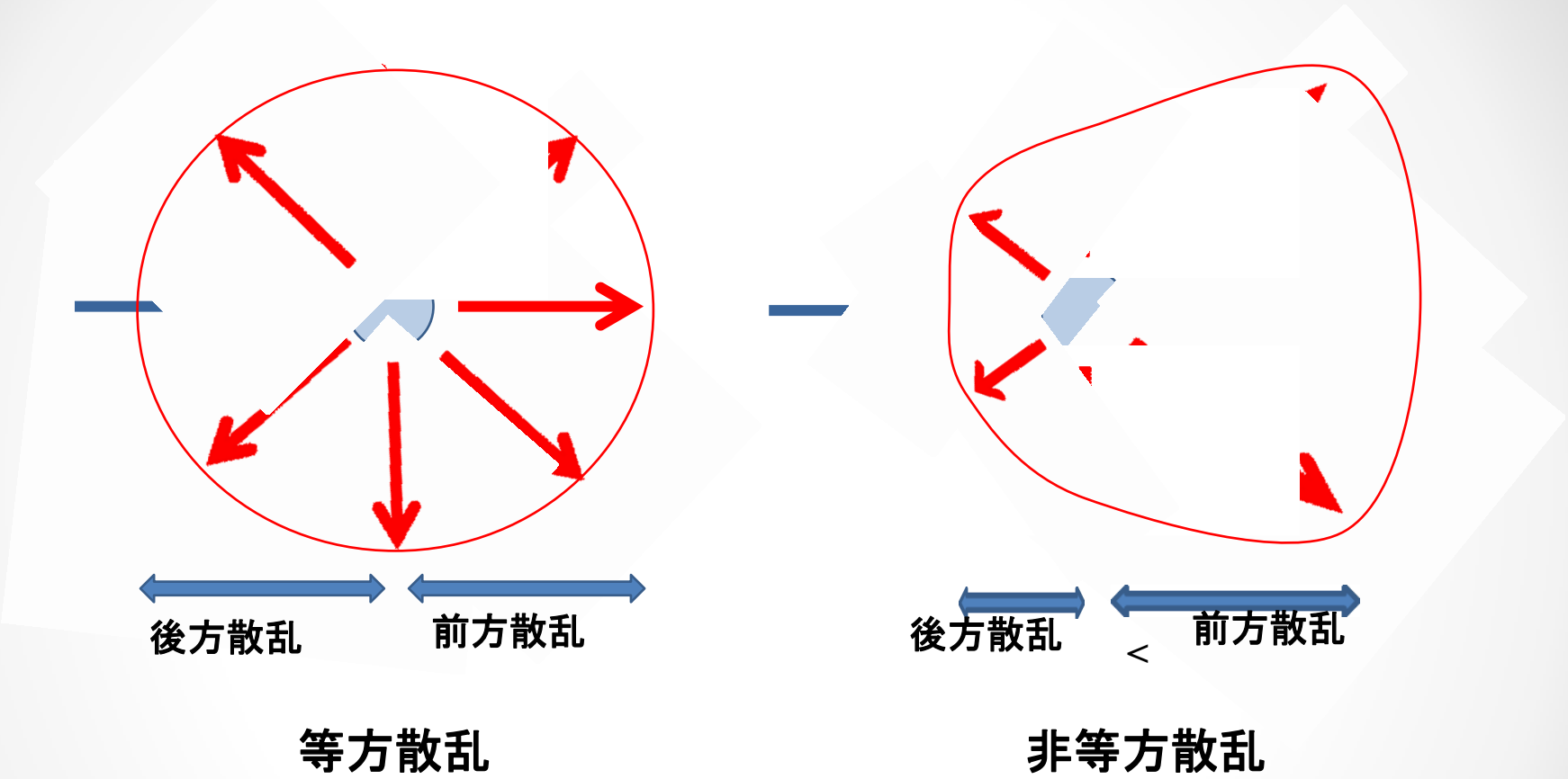
$$\frac{dI_\lambda(\vec{r},\hat{s})}{dS} = \beta_\lambda \left[-I_\lambda(\vec{r},\hat{s}) + (1-\omega_\lambda) I_{b\lambda}(T) + \frac{\omega_\lambda}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\vec{r},\hat{s}') \phi_\lambda(\hat{s}' \to \hat{s})\, d\Omega' \right]$$

方向$\hat{s}'$から方向$\hat{s}$への
散乱位相関数



$I_\lambda(r,\hat{s})$: 位置 r ,方向 $\hat{s}$ における分光放射強度
β_λ : 分光減衰係数
ω : 散乱アルベド
S : 方向 $\hat{s}$の経路長
$I_{b,\lambda}$: 黒体放射強度
Ω : 立体角　T : 温度

非等方散乱



顔料粒子の光学特性の評価には散乱現象に関する非等方性を考慮する必要がある.

ミー散乱および非等方散乱

単分散球形粒子

- 粒子径: d_p
- 入射電磁波の波長: λ
- 複素屈折率: $m = n - ik$

- 散乱係数: σ_λ
- 減衰係数: β_λ
- 位相関数: $\phi(\mu)$

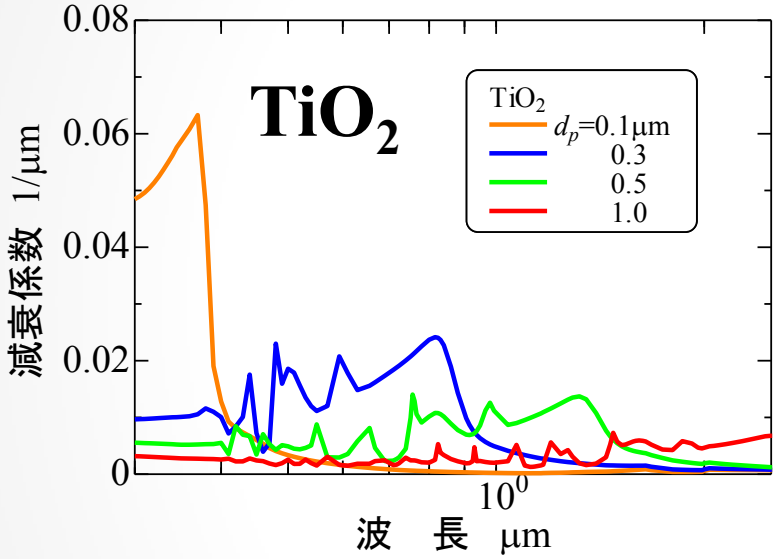
非等方散乱媒体に対する減衰係数およびアルベドの評価

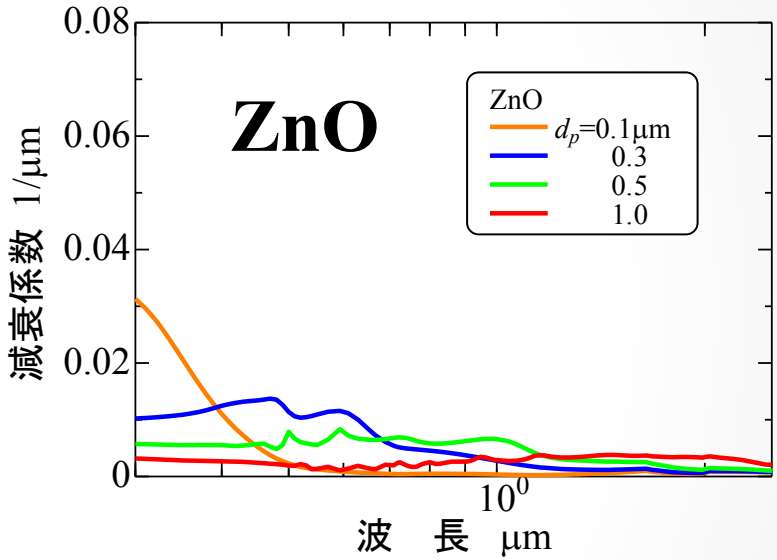
前方散乱パラメータ $$a_1 = \frac{3}{2}\int_{-1}^{1}\Phi(\mu)\mu d\mu$$

修正減衰係数 $$\beta^* = \beta\left(1 - \frac{\omega a_1}{3}\right)$$

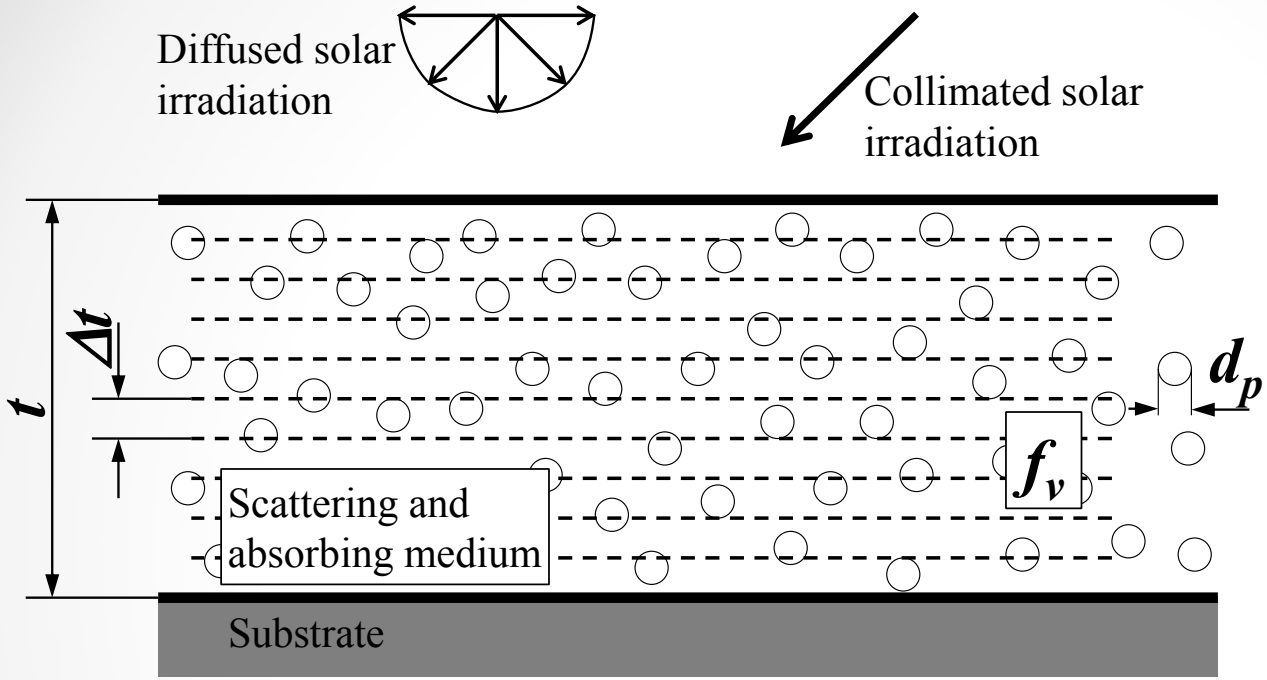
修正アルベド $$\omega^D = \frac{\omega(1 - a_1/3)}{1 - \omega a_1/3}$$

粒径の違いによる減衰係数への影響



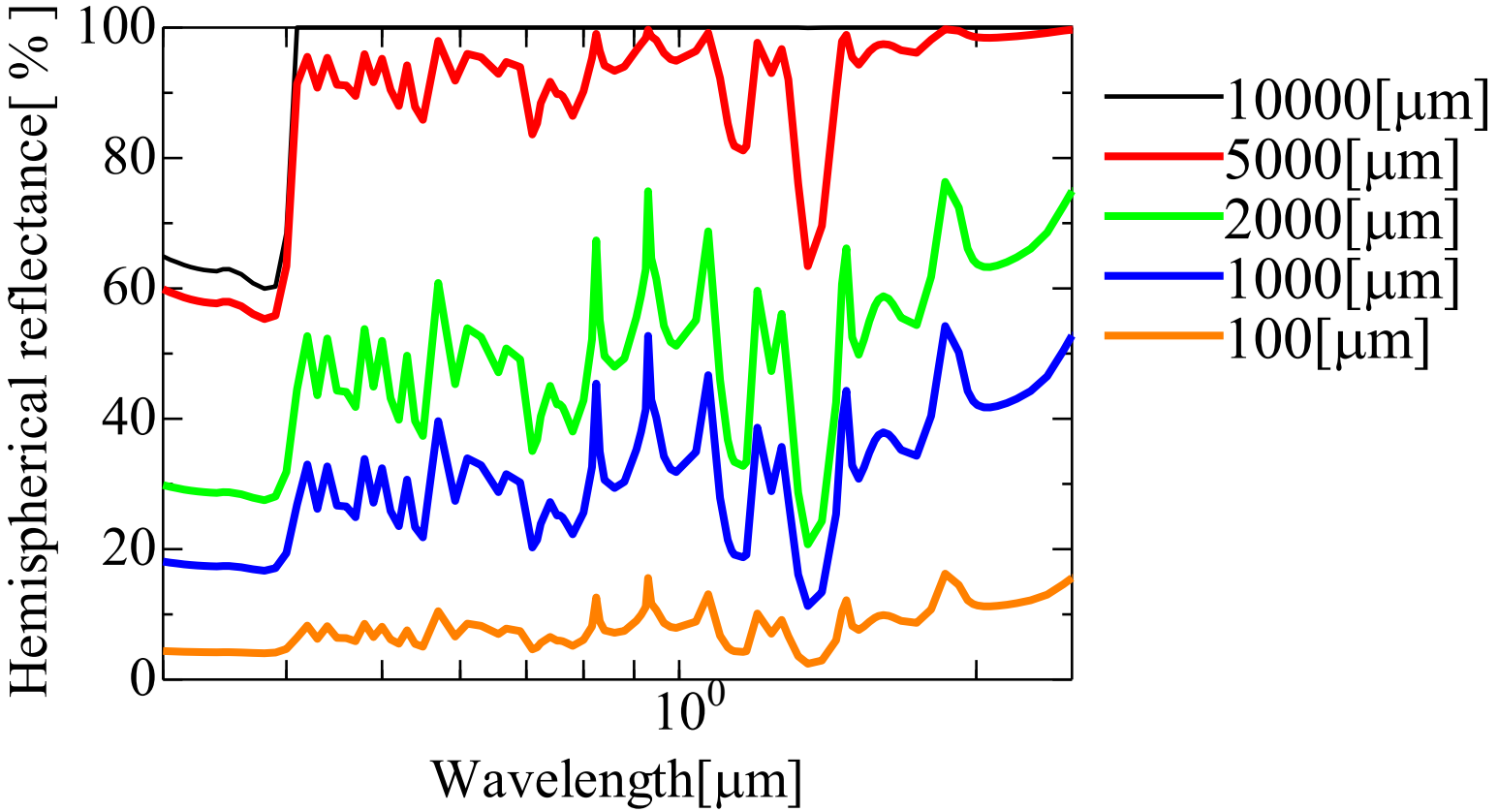


数値解析モデルと境界条件



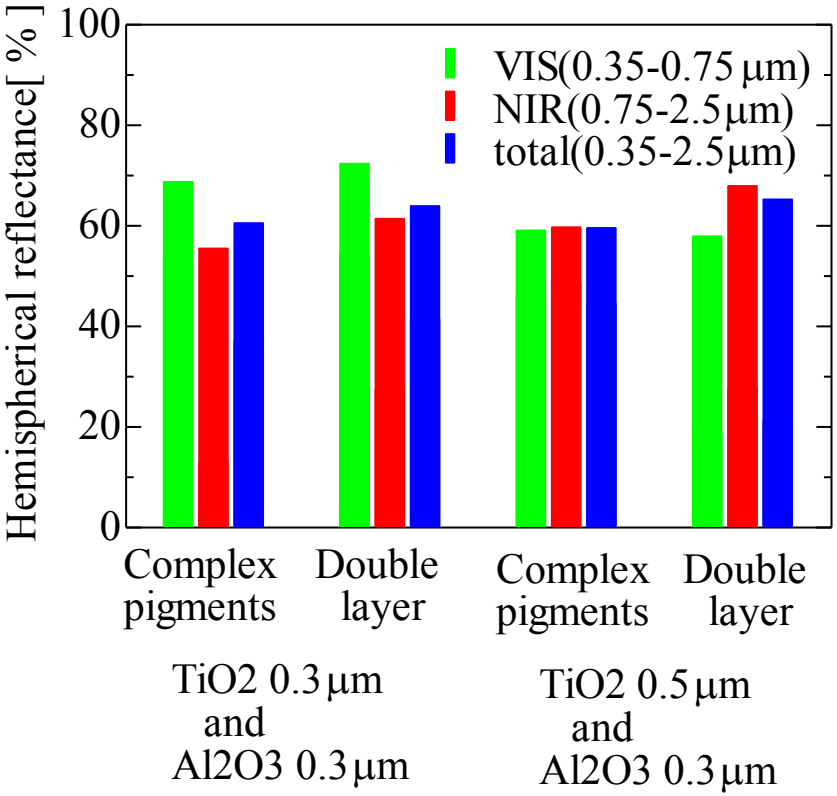
- 塗膜層は一次元平行平板系とし，深さ方向に分割.
- 直達及び散乱日射（0.3~2.5μm）は上部境界より入射
- 下部境界は黒体面または乱反射面
- 上面境界での鏡面反射は空気及びアルキド樹脂の複素屈折率を今日慮してフレネル則にて算出

塗膜厚さを変化させた時のTiO_2粒子を含む塗膜の半球分光反射率



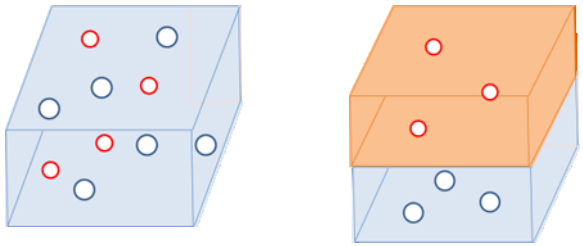
体積分率　$f_v = 0.001$　　TiO_2粒子の粒径　1.0μm

複合顔料及び多層構造塗膜の解析
～同種類，同量の顔料での比較～



今回の解析サンプルでは

複合顔料＜多層構造



ただし，この大小関係は解析条件によるので，適宜評価が必要！

合計塗膜厚さ　$t = 1000\mu m$で一定

同じ顔料の種類，分量を用いても複合顔料，多層構造のどちらを用いるかによって反射特性が異なる．

→解析による評価でより性能の高い構造を選べる．　塗膜設計に貢献！

塗膜サンプルの作成及び計測

本研究における数値解析結果の妥当性，また顔料の形状が反射特性に与える影響を評価するためにTiO_2（球形），ZnO（非球形），Al_2O_3（非球形）を顔料として含む塗膜サンプル制作及び計測を行った.

サンプル制作手順

①顔料（TiO_2，ZnO，Al_2O_3），展色材（アルキド樹脂），分散剤を電子天秤で測り取る.

②材料をビーカーに合わせて，小型攪拌機（MS-1）で一定時間（sample1に関しては10分，sample2,3に関しては20分）攪拌.

③反射率測定のJIS規格に基づき，②で混ぜ合わせた塗料を隠ぺい率試験紙の白色部と黒色部にはけで塗布した.その後，金属へらでならした.

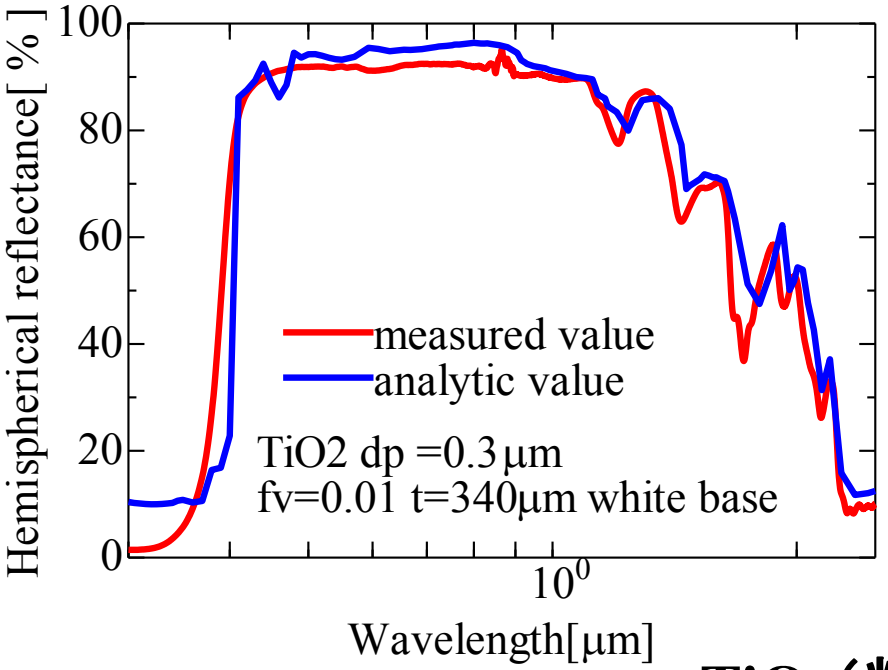
計測概要

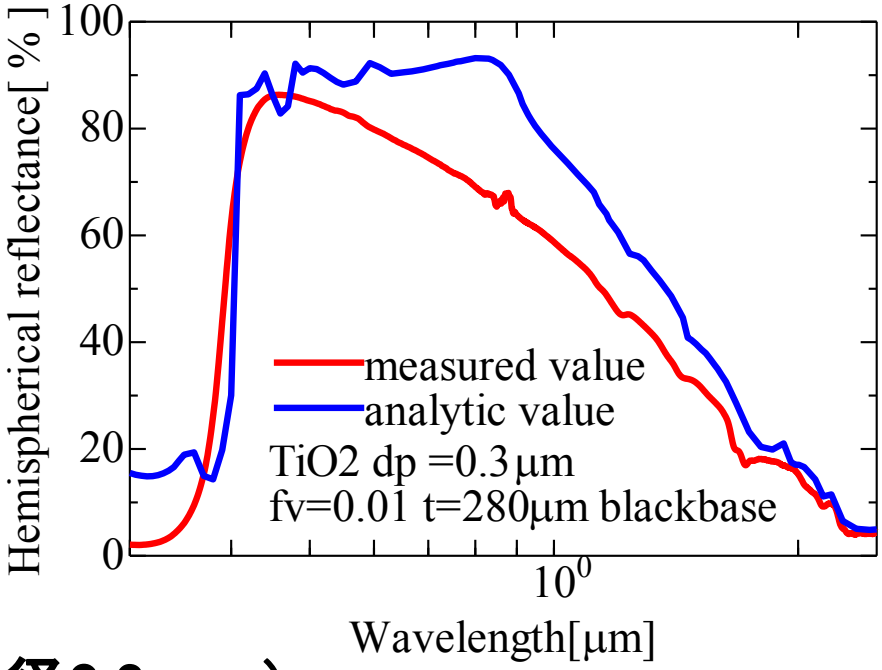
計測機器：積分球つきの分光光度計（UV-3100PC：島津製作所製）

測定波長域：　0.3~2.5μm
測定間隔：　1.0nm
入射角度：　8°
測定：拡散反射率
（Reference　の硫酸バリウムの反射率を100%としてそれに対する相対反射率として算出）

塗料を塗った基盤：隠蔽率試験紙（黒色部と白色部持つ）

塗膜サンプルの測定結果と解析結果の比較
～球形粒子（TiO_2）～

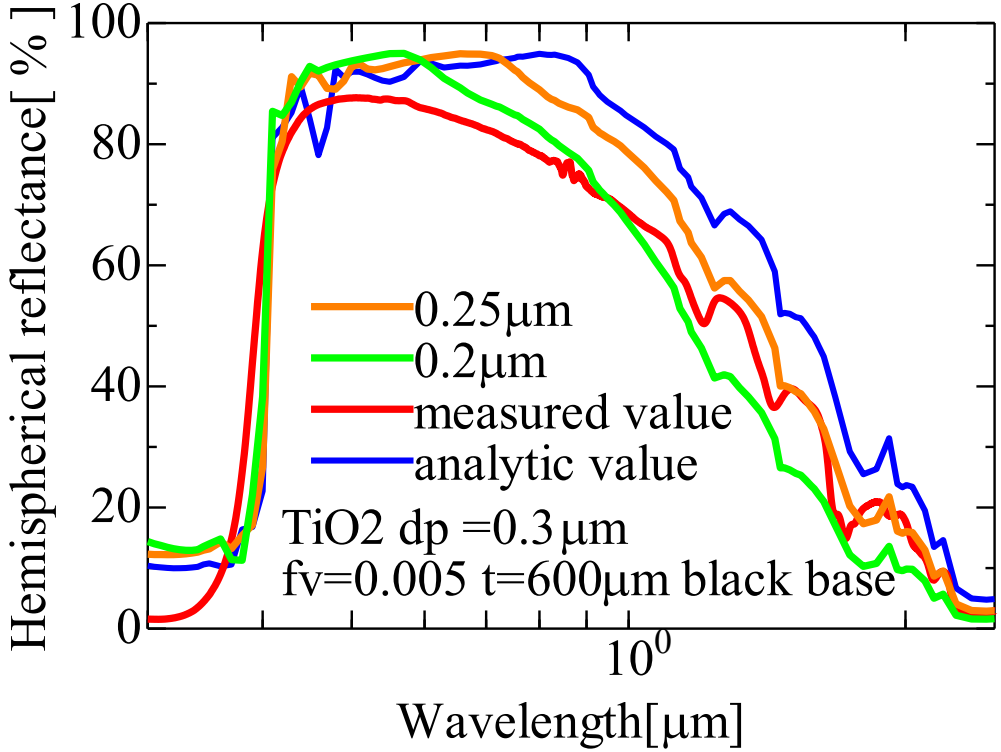




白色基盤　**TiO_2（粒径0.3μm ）**　**黒色基盤**

白色基盤：紫外域を除き，波長依存性の再現に成功.
黒色基盤：波長域1.0μm付近で特に違いが見られる.
→違い生じる原因の考察

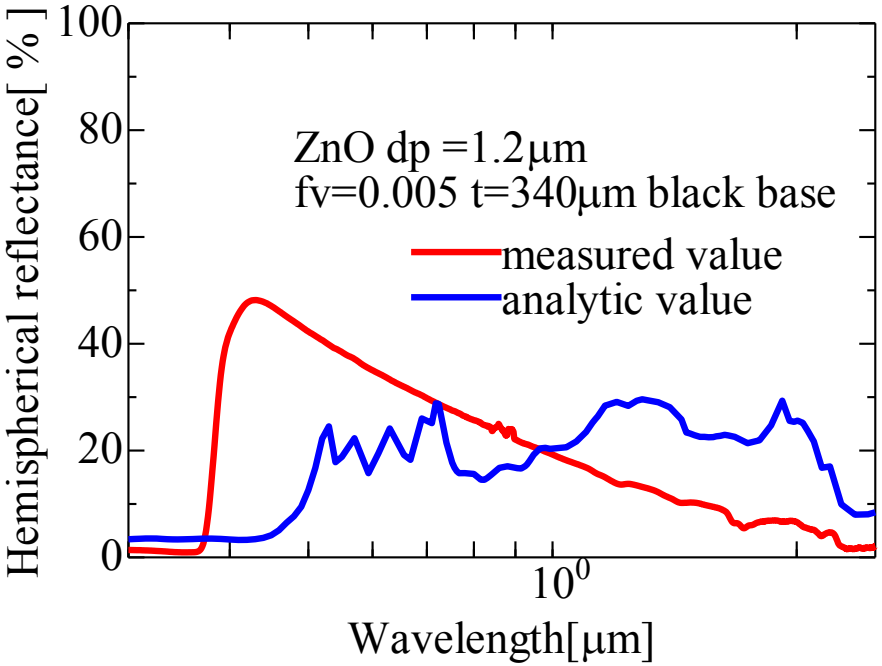
球形顔料での測定結果と解析結果の違いの考察
～顔料の粒径の変化～

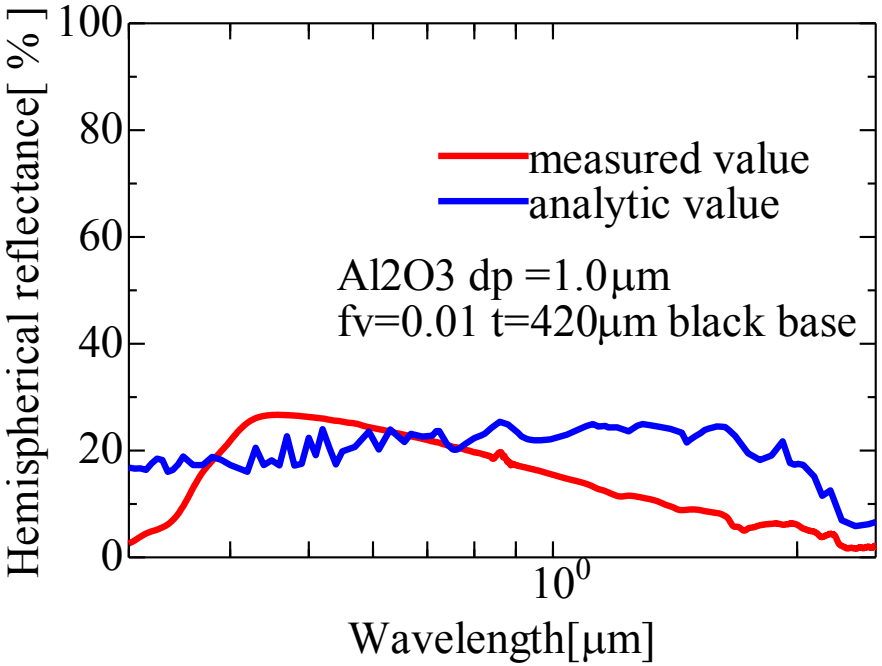


今回用いたTiO_2粒子の平均粒径： 0.3μm（企業から頂いたデータ）
この平均粒径が塗膜調合の過程で変化した可能性などを考慮！
→異なる粒径での解析の結果　粒径0.2~0.25μmで計測値の波長特性を再現

球形顔料において粒径制御を適切に行えれば妥当な反射特性解析が行える！

塗膜サンプルの測定結果と解析結果の比較
～非球形粒子～

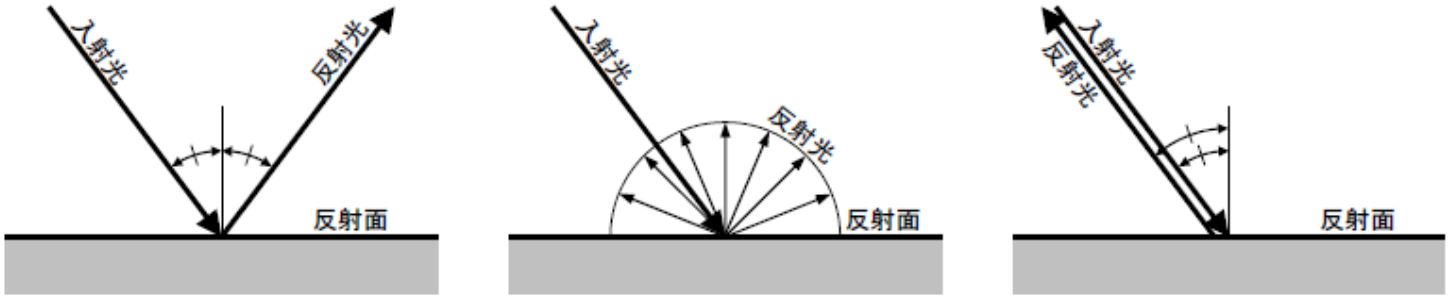




ZnO　　黒色基盤　　**Al_2O_3**

本研究手法をこのまま用いた場合非球形顔料では塗膜の波長依存性を再現するのは難しい！
→非球形顔料で適切に反射特性を再現するための工夫が必要！

再帰性反射材料
→入射方向に反射する



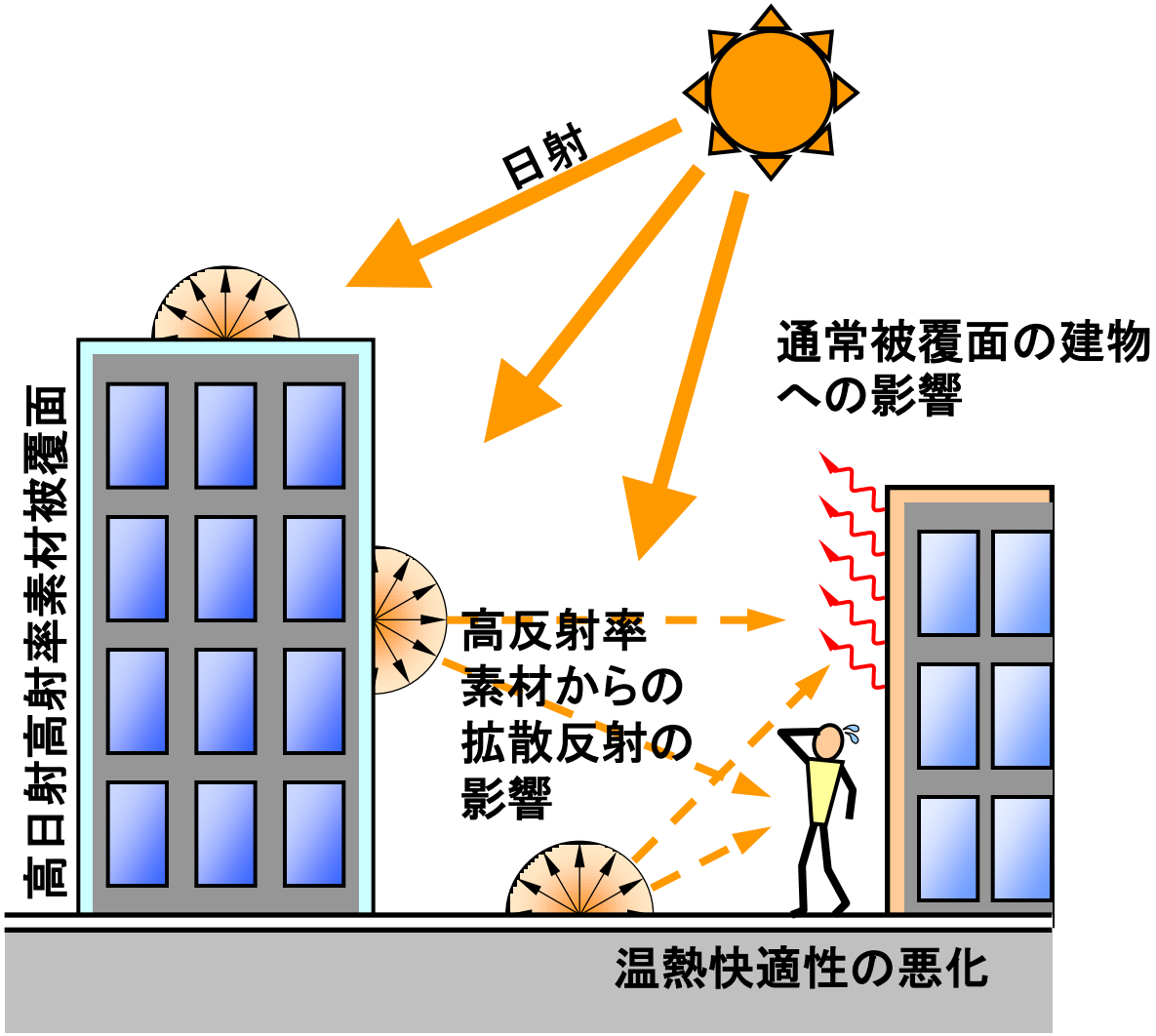
鏡面反射　　拡散反射　　再帰反射

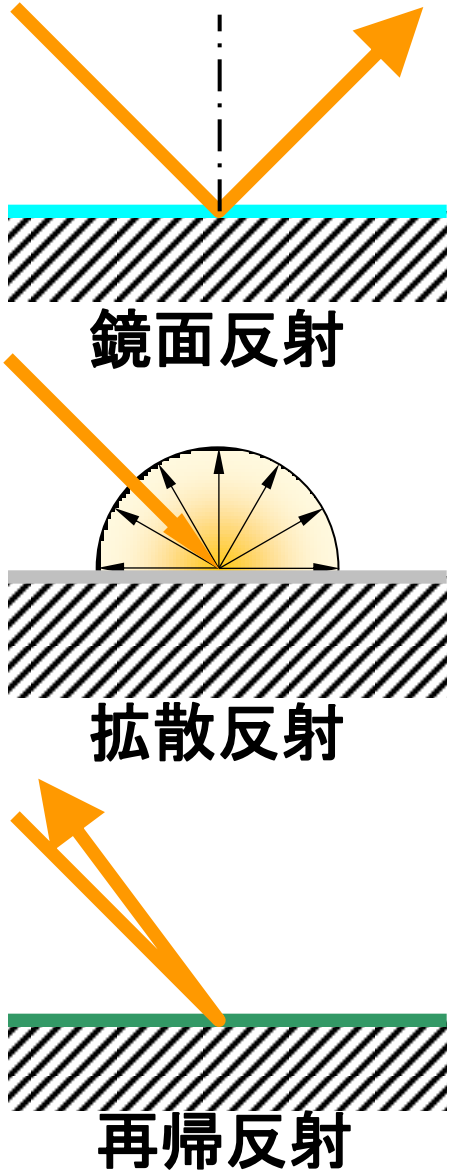
夜間の視認性向上に応用

↓

道路標示、標識

都市表面の高日射反射率化に伴う弊害と反射指向性制御による改善





再帰性反射材料の認証基準

- 対象部位
  - 水平面（路面・地表面）
  - 鉛直面（壁面，窓面）
  - 不透明材料（壁材），透過性材料（窓材）
- 反射指向性（上方・下方）
- 日射の入射方向

適応策に関わる認証基準

- 適応策評価事例の調査
  - 環境省関連の報告書ではWBGTおよびSET*による評価が主流
- 評価基準のための屋外空間モデルの検討
  - 季節：夏場，冬場
  - 街路空間
  - 着衣量
  - 人の姿勢・向き
- ETV事業（環境省実証事業）等での評価手法と統一されていることが望ましい.