



TOHOKU
UNIVERSITY



平成28年度 第1回 人材育成プログラム 基礎・応用実践コース
2016年11月11日 アオバサイエンスホール

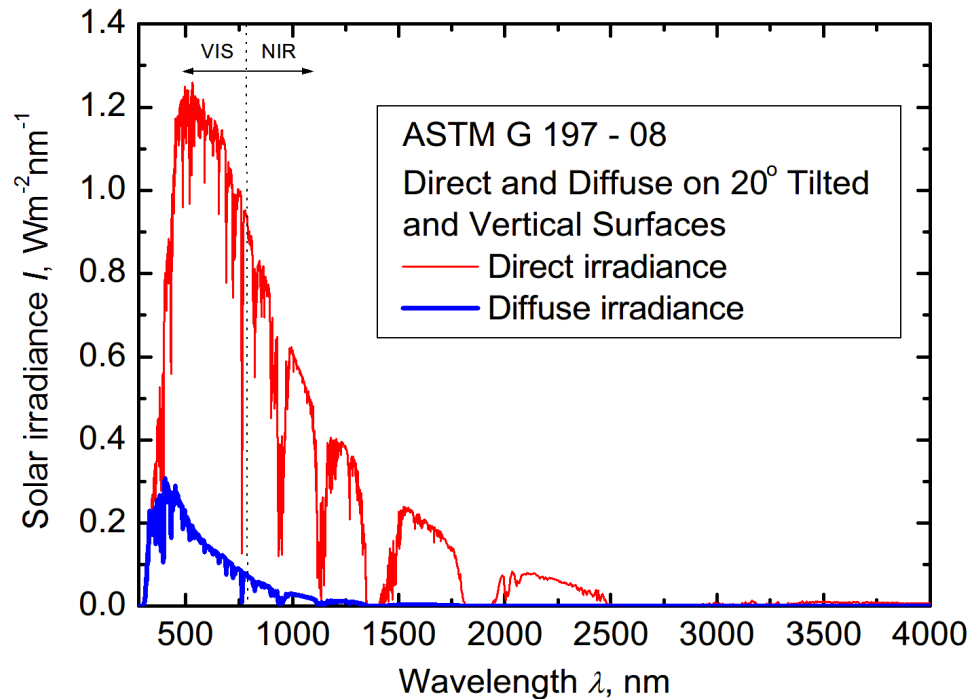
次世代自動車のための産学官連携イノベーション: 震災以降の歩みと今後の展望
第二部「震災以降の歩みと今後の展望/研究・技術紹介2 大学編」

省エネルギー実現のための 光エネルギー制御

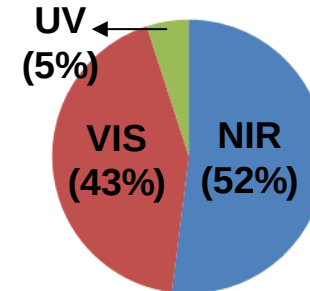
東北大学 流体科学研究所
岡島淳之介, 圓山重直

1. 太陽光とその制御方法

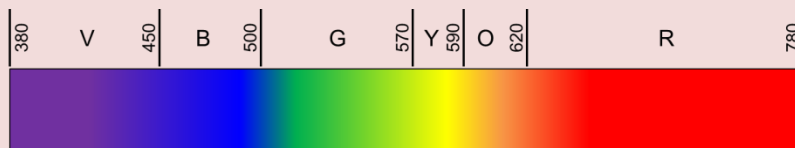
太陽光エネルギー割合



波長に対する太陽放射スペクトル



■ 可視光 (VIS) : 380–780nm



■ 近赤外光 (NIR) : 780–2500nm

熱に最も影響する

1. 太陽光とその制御方法

太陽光 → 物質・媒体
(吸収・反射・透過・散乱) → 周囲との熱のやり取りを経て物質の温度

光が物質表面・物質内部でどのように伝わり、熱に変換されるのか？

ふく射輸送方程式

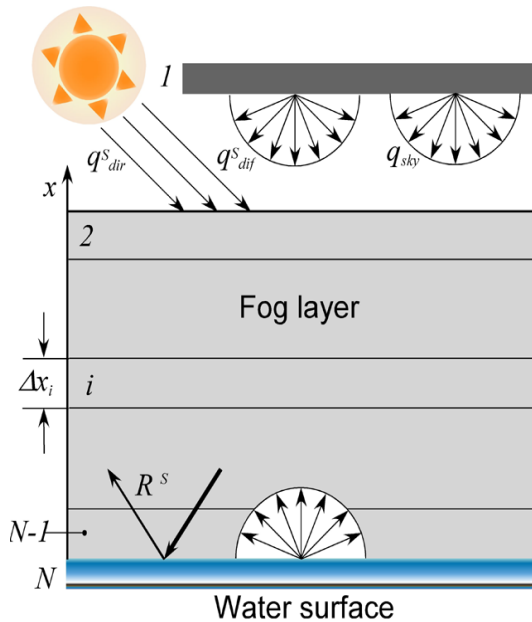
$$\frac{dI_{\lambda}(x, \mu)}{dS} = -(\kappa_{\lambda} + \sigma_{\lambda})I_{\lambda}(x, \mu) + \varepsilon_{\lambda}I_{b,\lambda}(T) + \frac{\sigma_{\lambda}}{2} \int_{-1}^1 I_{\lambda}(x, \mu') \Phi_{\lambda}(\mu') d\mu'$$

光がある部分を通過する際に、どのくらい減衰し(吸収係数 κ , 散乱係数 σ), 自己放射によりどのくらい増幅し(放射率 ε), また他の部分から散乱されてきた光がどのくらい追加されるのか(散乱係数 σ , 位相関数 Φ)を記述した式

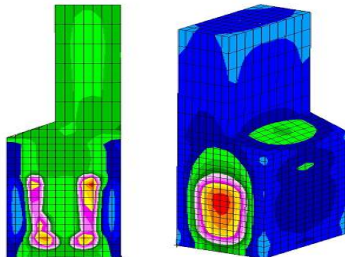
物質・媒体内の光の輸送プロセスを解明→制御

1. 太陽光とその制御方法

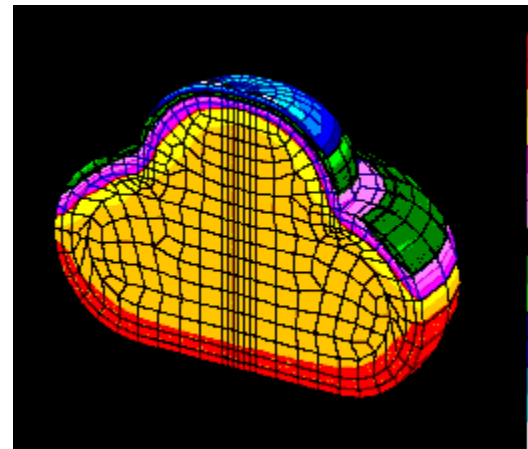
ふく射輸送方程式を解いてエネルギーの流れを解明する



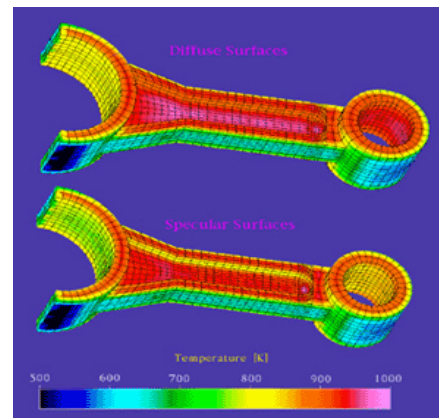
Radiative heat transfer in fog



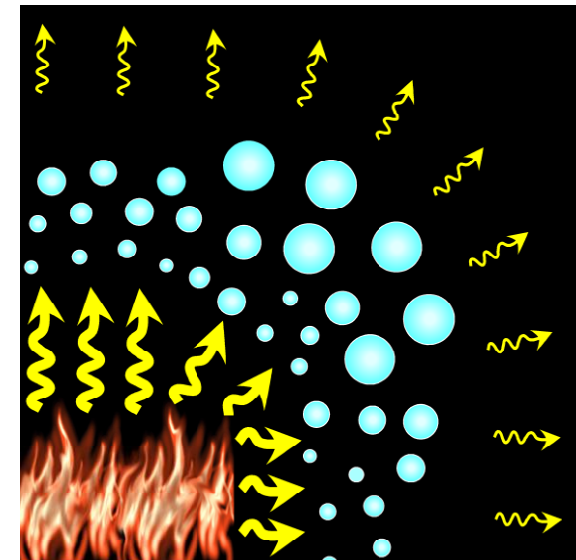
Heat flux distribution in the boiler



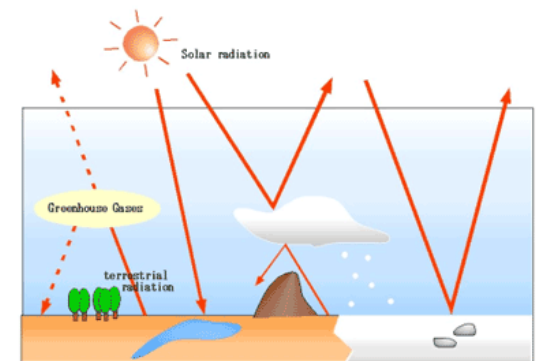
Radiative heat transfer analysis in an arbitrary shaped cloud



Temperature distributions on a connecting rod



Thermal protection performance of a water mist layer



Global warming

冷房負荷低減のための黒色 遮熱塗料の開発

2. 黒色遮熱塗料の開発



<http://image4.kurumaerabi.com/>

□ 利点

美的観点から暗い色調が好まれる

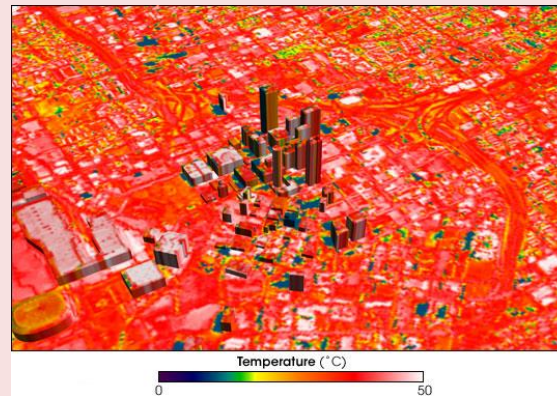
□ 短所

- ✓ 太陽光に対する吸収率が高い
- ✓ 壁面の温度が上がる
- ✓ 冷房負荷の増大

余剰なエネルギー
の使用

環境問題

ヒートアイランド現象



Collect thermal data on metropolitan Atlanta, Georgia
Daytime air temperatures of only about 26.7 degrees
[Wikipedia](#)

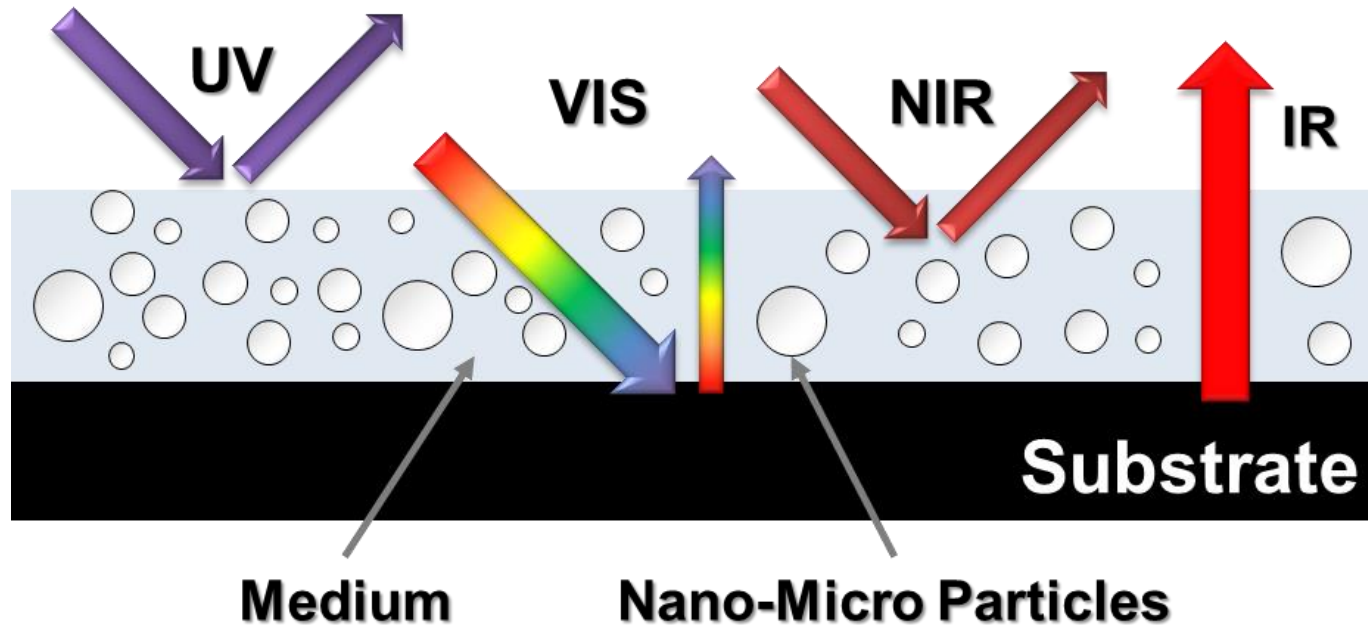
地球温暖化現象



Polar bear struggling to survive on
the small ice left due to global warming
<http://s92zfrt.edu.glogster.com/climate-change-polar-bears-by-jessica-gaalema/>

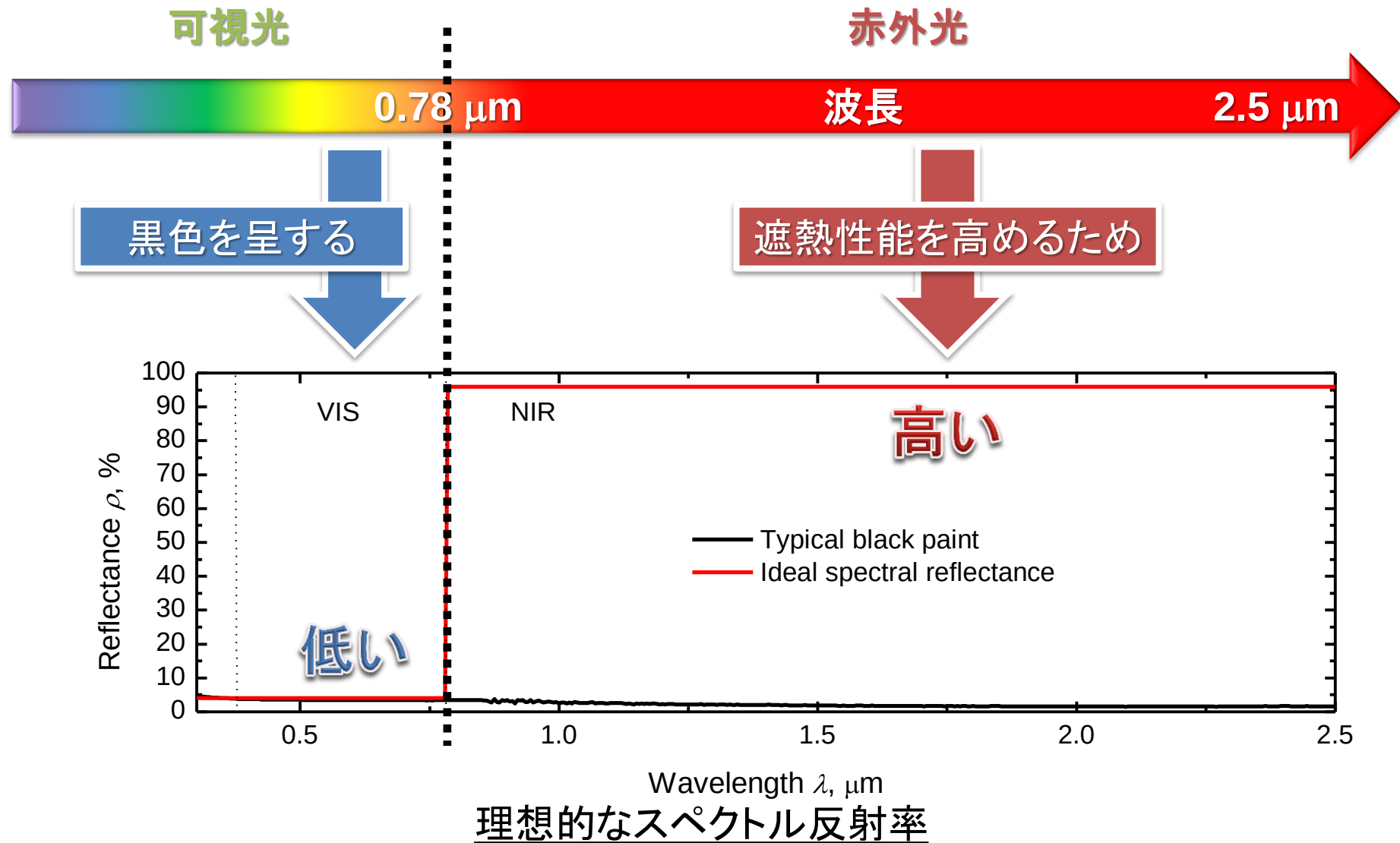
2. 黒色遮熱塗料の開発

ナノ・マイクロ粒子を用いた遮熱コーティングの開発



遮熱コーティングの概念図

2. 黒色遮熱塗料の開発



スペクトル反射率制御

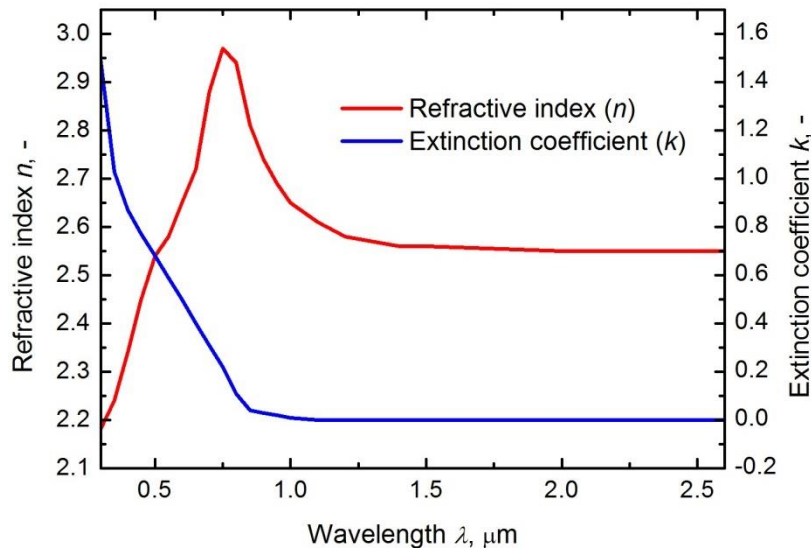
視覚的に影響なく太陽光の吸収を抑えることが可能

2. 黒色遮熱塗料の開発

複素屈折率

$$m = n - ik$$

n : 屈折率
 k : 減衰係数



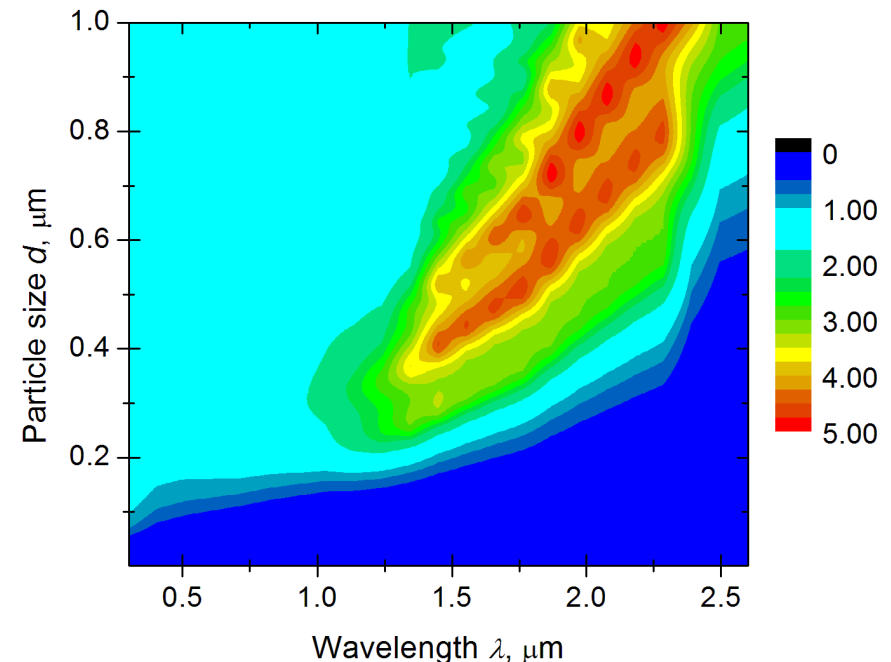
E. D. Palik, editor, "Handbook of Optical Constants of Solids",
Vol. 1-3, Academic Press, 1998.

CuOの複素屈折率

単一粒子のふく射特性の
データベース化

Mie散乱理論

- 散乱アルベド
- 減衰効率
- 前方散乱パラメーター
- 後方散乱効率



単一CuO粒子の後方散乱効率

粒子の大きさが光の特性を大きく変化させる

2. 黒色遮熱塗料の開発

反射率を理論的に計算する

ふく射輸送方程式

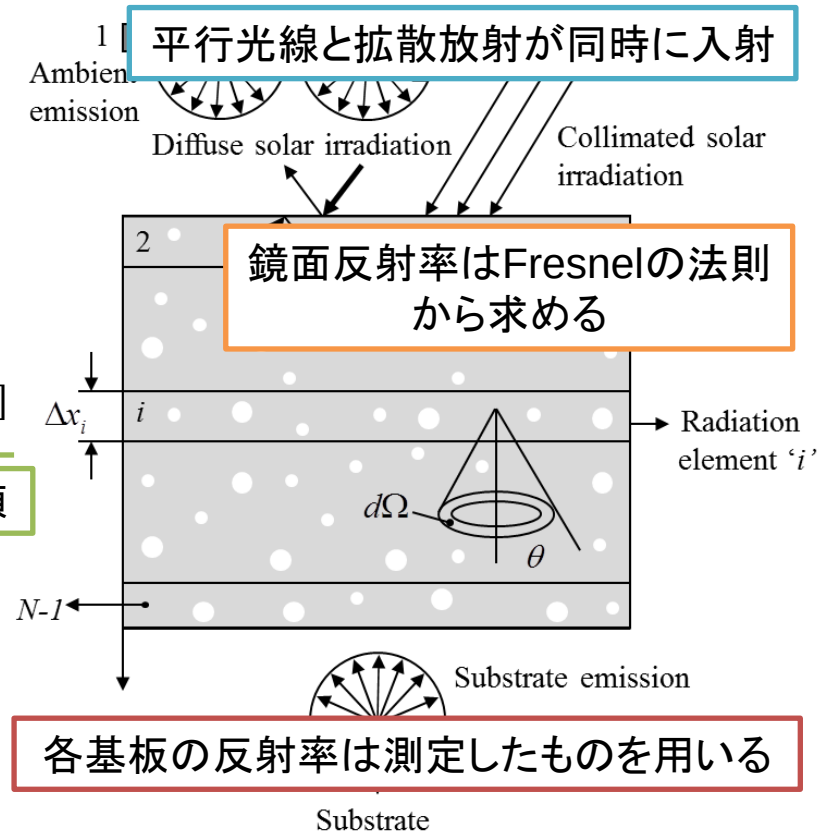
$$\frac{dI_{\lambda}(x, \mu)}{dS} = \beta[-I_{\lambda}(x, \mu) + (1 - \omega)I_{b, \lambda}(T) + \frac{\omega}{2} \int_{-1}^1 I_{\lambda}(x, \mu') \Phi_{\lambda}(\mu') d\mu']$$

散乱、吸収による減衰項

放射項

散乱による増幅項

I_{λ} [Wm⁻²sr⁻¹] : ふく射強度
 S [m] : 要素内の光学距離
 β [m⁻¹] : 減衰係数
 ω [-] : アルベド
 $I_{b, \lambda}$ [Wm⁻²sr⁻¹] : 黒体ふく射強度
 Φ_{λ} [-] : 位相関数



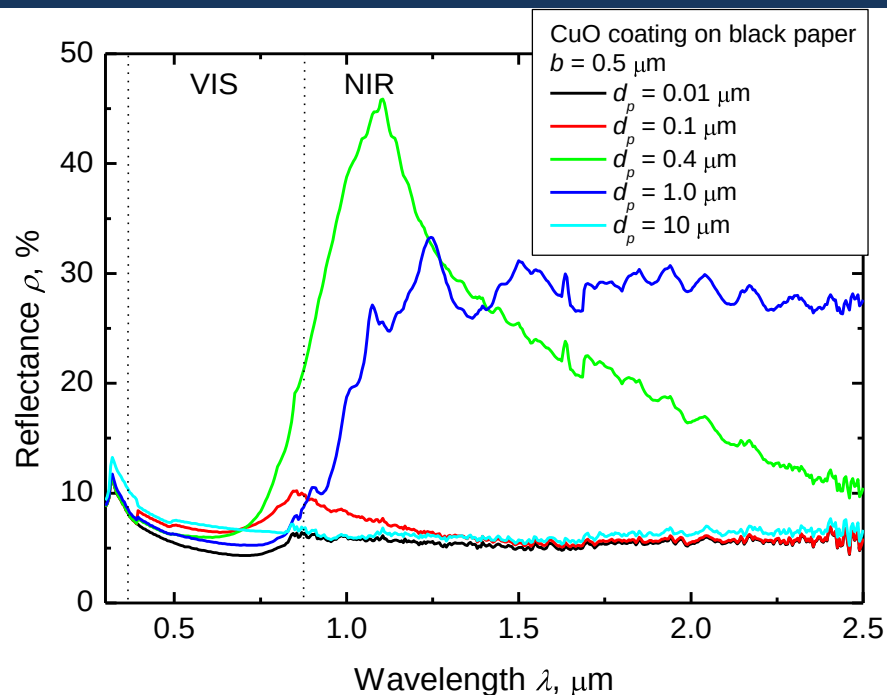
一次元平行平板解析モデル

M. Baneshi, et al., *JQSRT*, 110, (2009), 192.
 M. Baneshi, et al., *J Therm Sci Tech-JPN*, 4, (2009), 131.
 M. Baneshi, et al., *JQSRT*, 112, (2011), 1197.

光線放射モデルによるふく射要素法 (REM²)

S. Maruyama, *Int. J. Heat Mass Tran*, 41, (1998), 2847.

2. 黒色遮熱塗料の開発



反射率の解析結果

粒径 : 0.4 - 0.7 μm

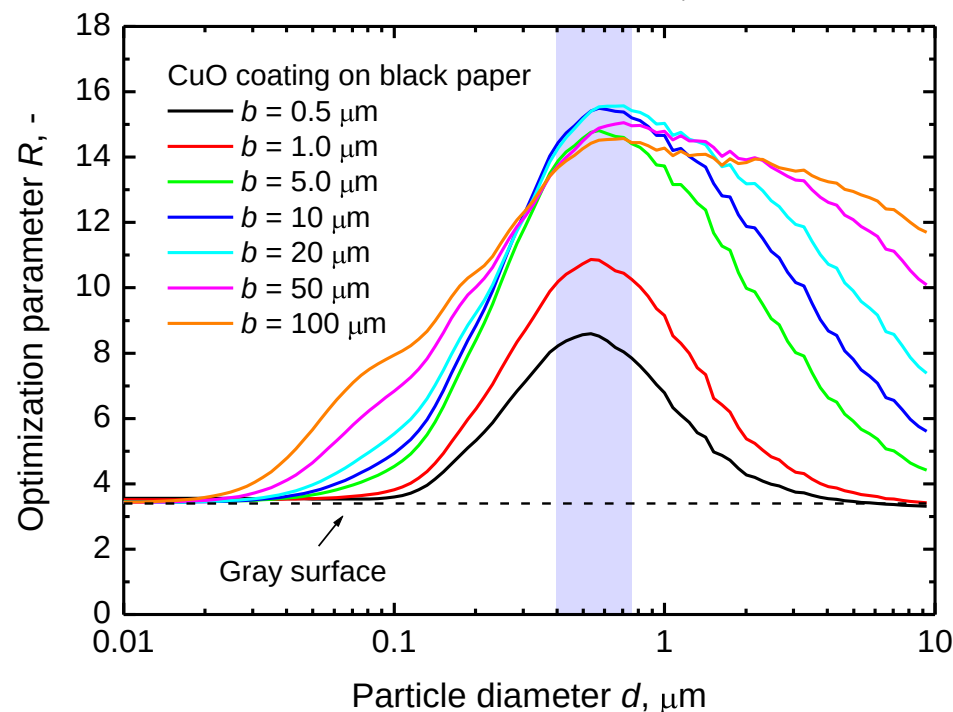
$R \rightarrow$ 最大化

最適粒径の理論解析

反射性能の定量評価

$$R = \frac{\rho_{TSR}}{\rho_{VIS}} = \frac{\int_{0.3}^{2.5} \rho_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda / \int_{0.3}^{2.5} I_{\lambda} d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} \rho_{\lambda} \eta_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda / \int_{0.38}^{0.78} I_{\lambda} d\lambda}$$

η_{λ} : 標準比視感度



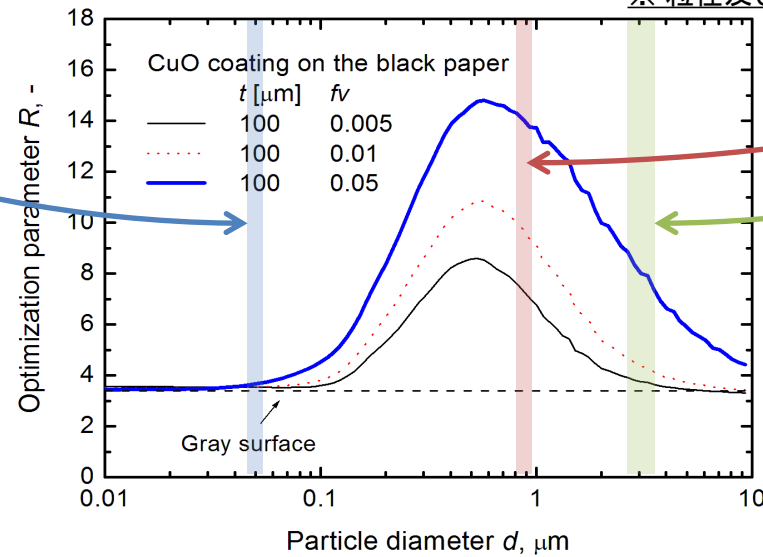
最適化パラメーターに対する粒子径の影響

2. 黒色遮熱塗料の開発

顔料粒子の仕様

Composition	Mean diameter of particles [μm]	Chemical company
CuO	0.050	Wako Pure Chemical Industries
CuO	0.89	Kojundo Chemical Laboratory
CuO	3.0	Wako Pure Chemical Industries

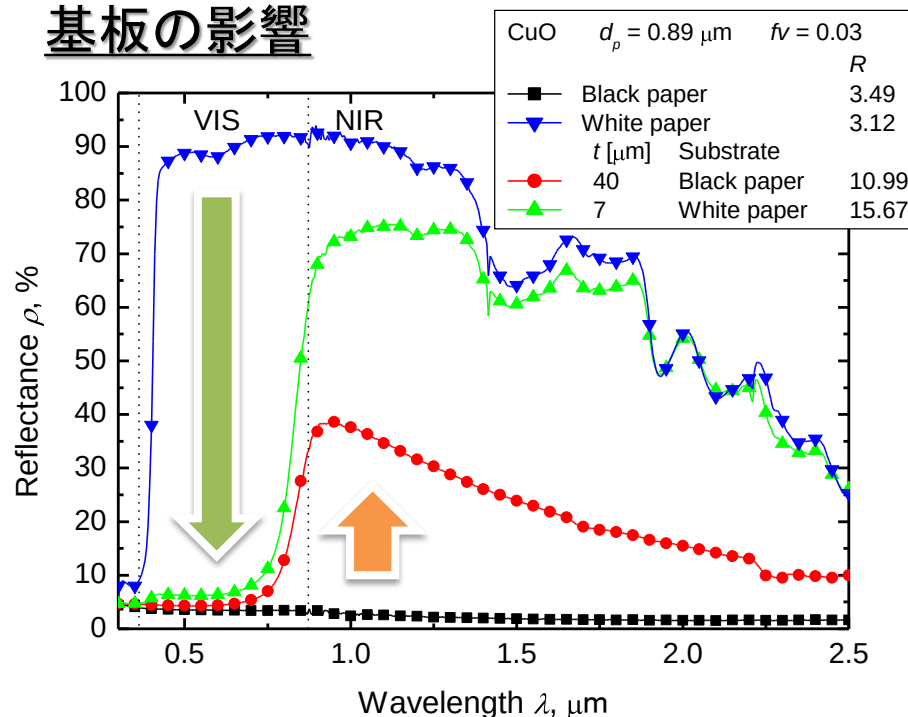
※ 粒径及び純度データは製造元より提供



最適化パラメーターに対する粒子径の影響

2. 黒色遮熱塗料の開発

基板の影響



基板による反射率測定結果の違い

$d_p = 0.89 \mu\text{m}$
低い可視光反射率
高い近赤外反射率

粒子によるスペクトル反射率制御の実現

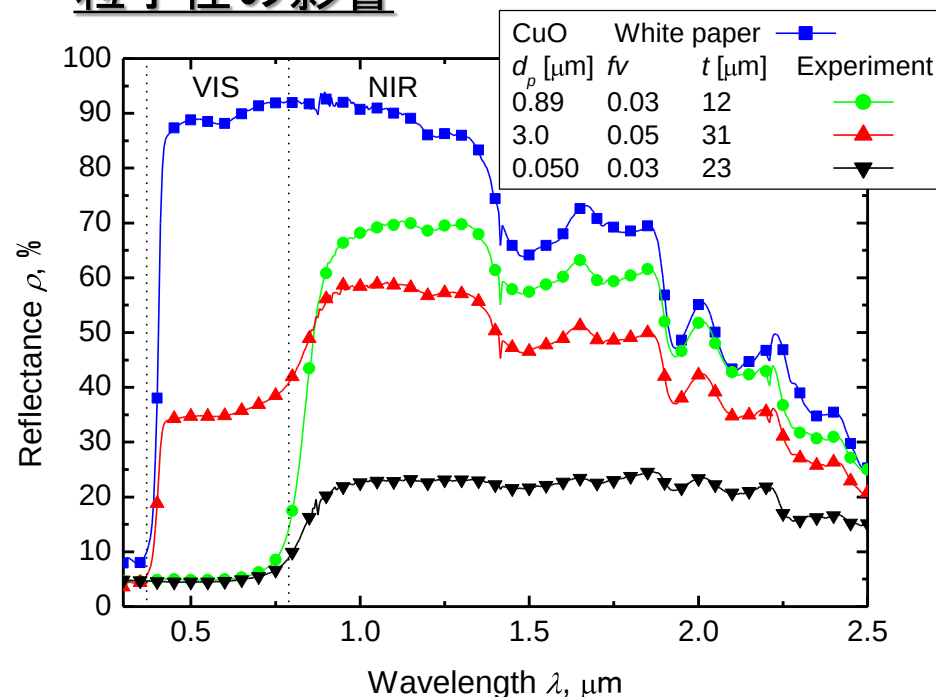
黒色基板

近赤外反射率が選択的に増加

白色基板

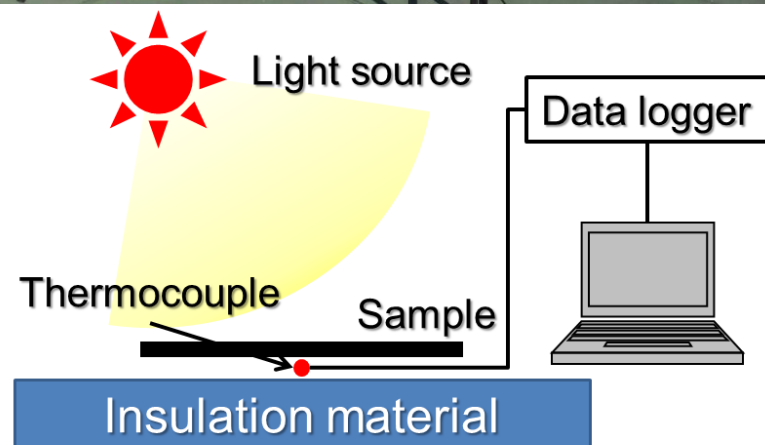
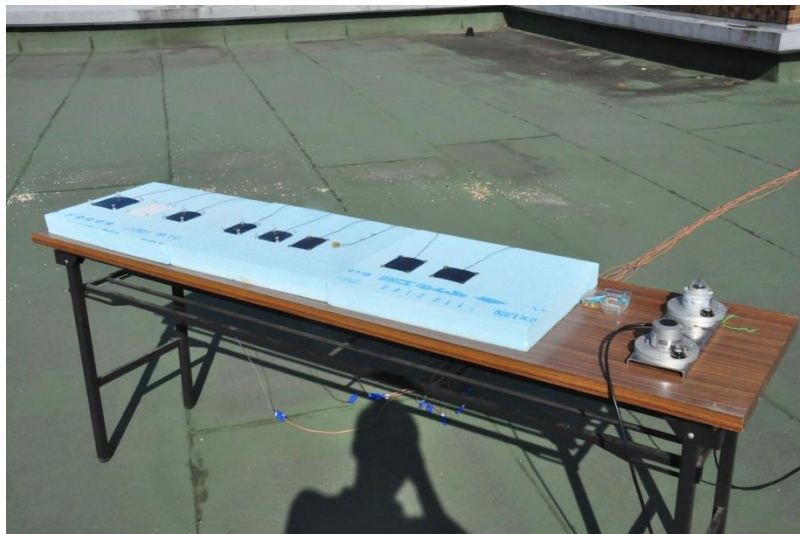
可視光反射率が選択的に減衰

粒子径の影響



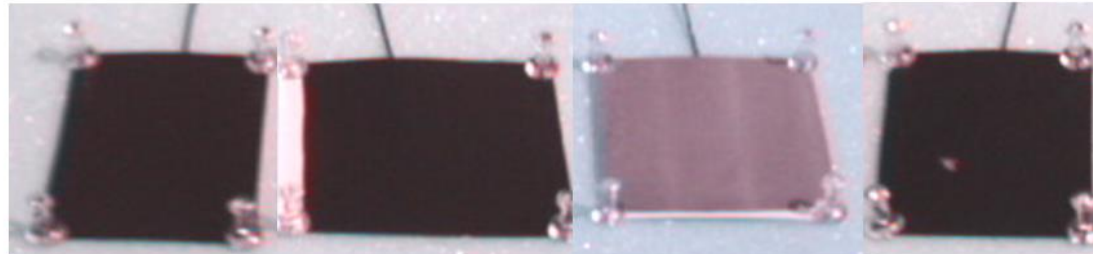
粒子径による反射率測定結果の違い

2. 黒色遮熱塗料の開発



2. 黒色遮熱塗料の開発

(a) Visual image



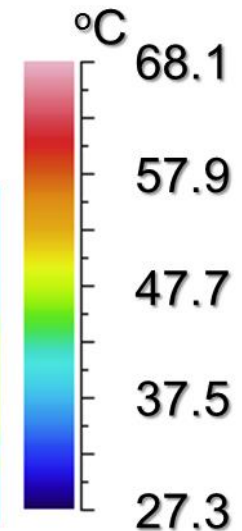
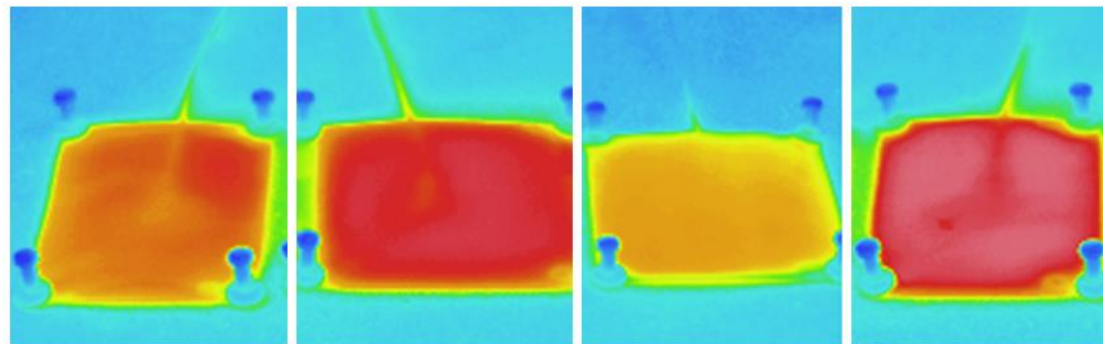
CuO coating
($0.89\mu\text{m}$)

CuO coating
($0.050\mu\text{m}$)

CuO coating
($3.0\mu\text{m}$)

Typical black
paint

(b) Infrared image



理論予測から得られた最適粒径を用いた塗膜が黒色かつ遮熱を実現

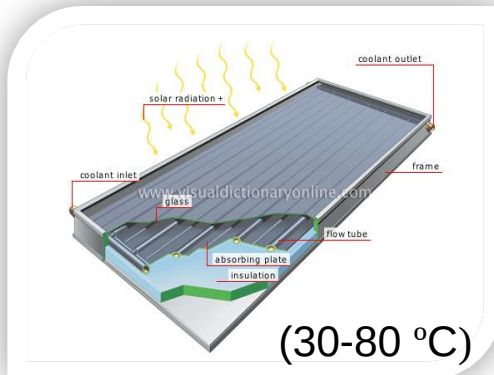
<今後>

複数の材質の粒子の混合物や粒径分布の考慮により設計手法を高度化

太陽熱エネルギー高効率利用 のための非結像型集熱器

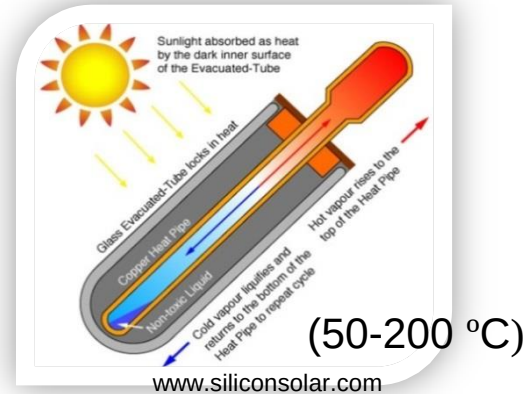
4. 非結像型集熱器

非集光型集熱器

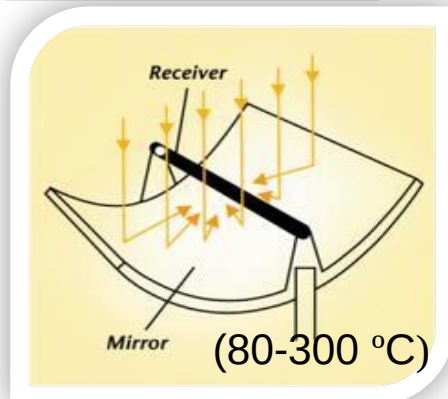


Flat plate collectors (FPC)

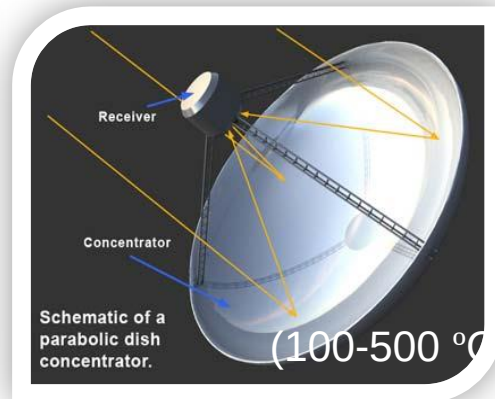
結像型の集熱器



Evacuated tube collectors (ETC)



Parabolic trough collector



Parabolic dish reflector

Advantages & Problems

- ✓ 太陽追尾不要
- ✓ 真空管集熱器は熱損失が少ない
- ✗ 集光していないため温度が低い

Advantages & Problems

- ✓ 高いエネルギー密度
- ✓ 高温(80-500 °C)
- ✗ 熱損失が大きい
- ✗ 追尾システムが必要
- ✗ 維持コスト

追尾不要かつ低熱損失の太陽集熱器が必要

4. 非結像集熱器

複合放物面型集光器

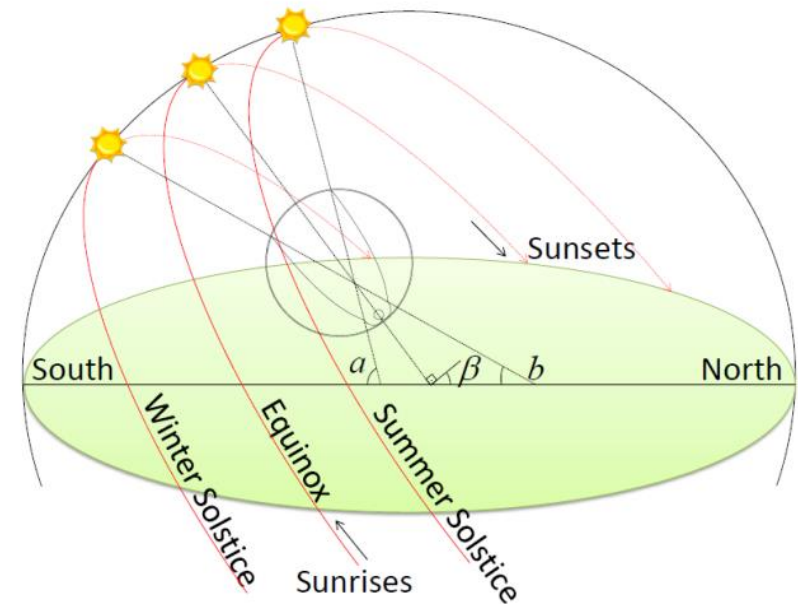
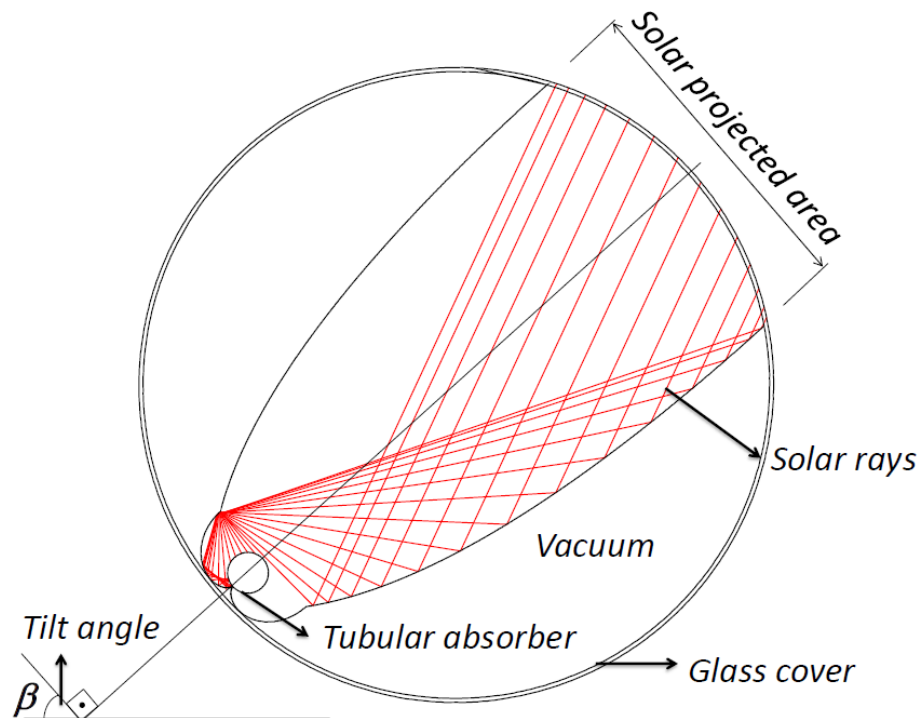
Compound parabolic collector (CPC)

+

インボリュート型反射板

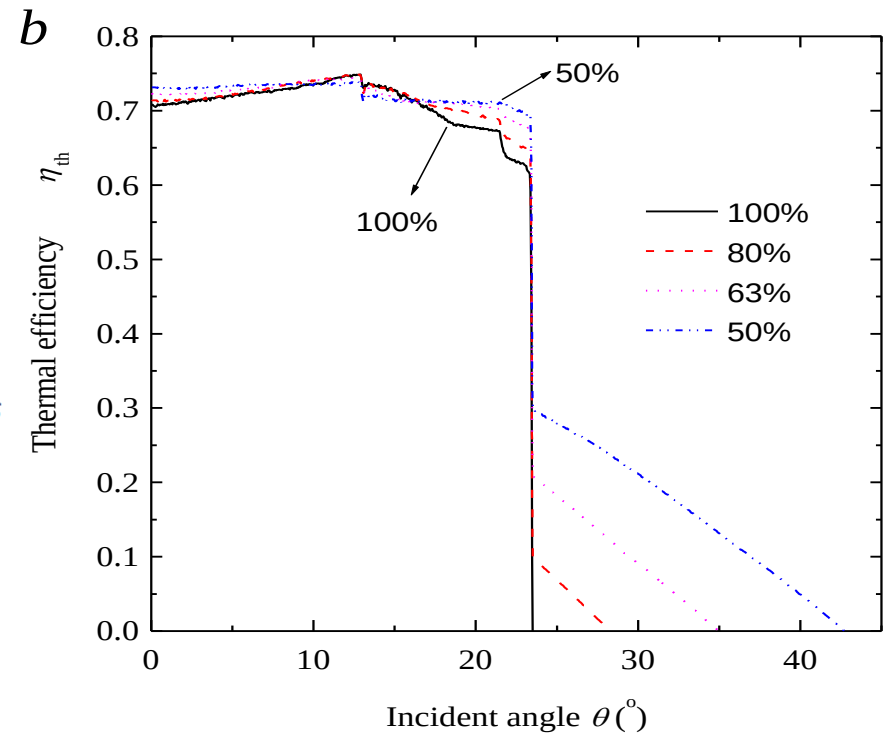
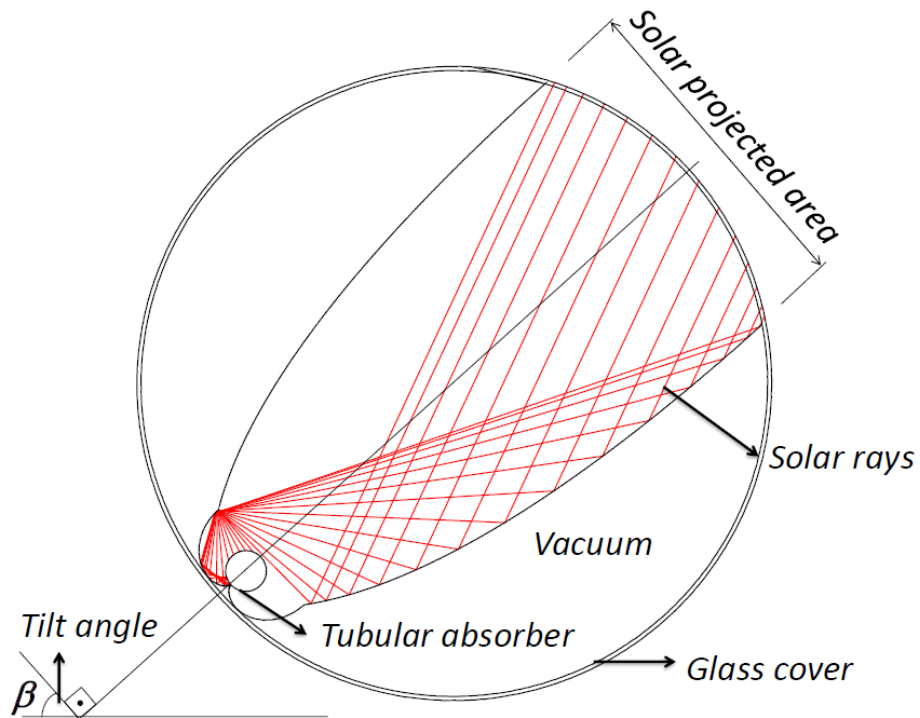
+

真空管



- ある地点の太陽高度変化を基に、反射鏡形状の設計が可能
- ガラス管内に反射鏡を設置後、管内を真空にすることで熱損失を低減

4. 非結像集熱器



- 設計開口角内に太陽がいるときは熱効率70%
- 反射鏡の長さを変化させたところ、放物面長さの50%で熱効率が向上

まとめ

冷房負荷低減のための黒色遮熱塗料の開発

- ✓ 可視光を吸収し、近赤外光を選択的に反射する塗料をナノ・マイクロ粒子を用いて設計・作成した.
- ✓ 太陽暴露実験によりその有効性を確認した.
- ✓ 主に粒子の材質と粒径を制御し、塗料のふく射特性を制御する手法を確立した.

太陽熱エネルギー高効率利用のための非結像集熱器

- ✓ CPCとインボリュート反射鏡を組み合わせた集光器を真空管内に封入した非結像型集熱装置について、その特性を明らかにした.
- ✓ ガラス管や集熱管のふく射特性を考慮することで、今後更なる熱効率向上が期待できる.