大阪HITEC ヒートアイランド対策技術セミナー
2017.1.19

再帰性反射材の最新技術と動向

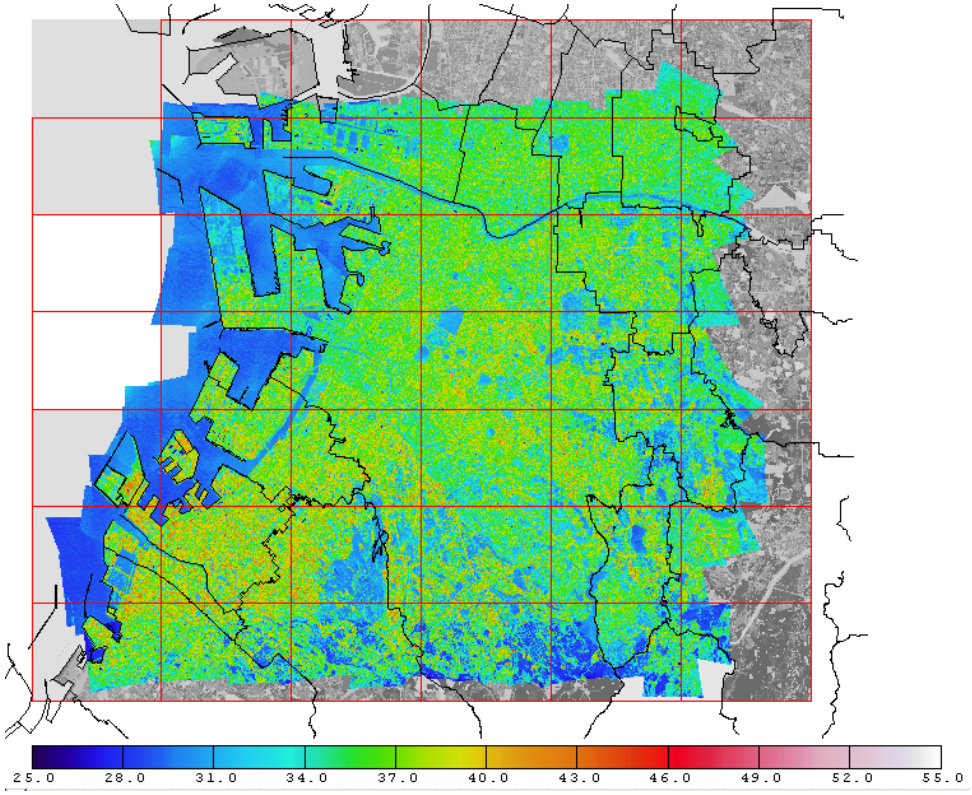
大阪府立大学 大学院工学研究科
機械工学分野
木下 進一

ヒートアイランド現象とその対策

都市の拡大

人工被覆面の拡大

人工排熱の増加



堺市周辺の熱画像（地表面温度分布図）
（2006年8月2日）

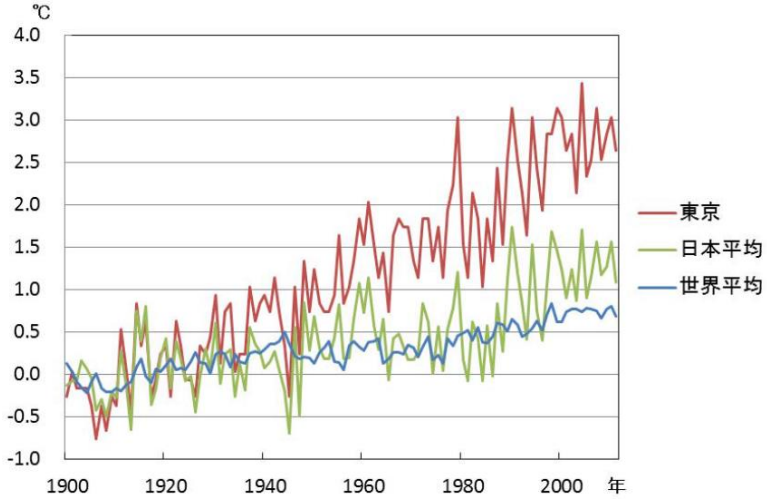
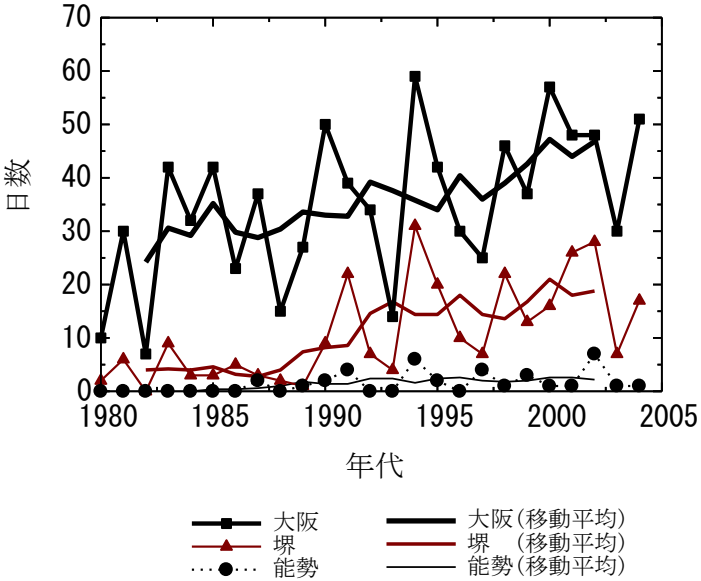


図 1.2　東京と世界の年平均気温の経年変化

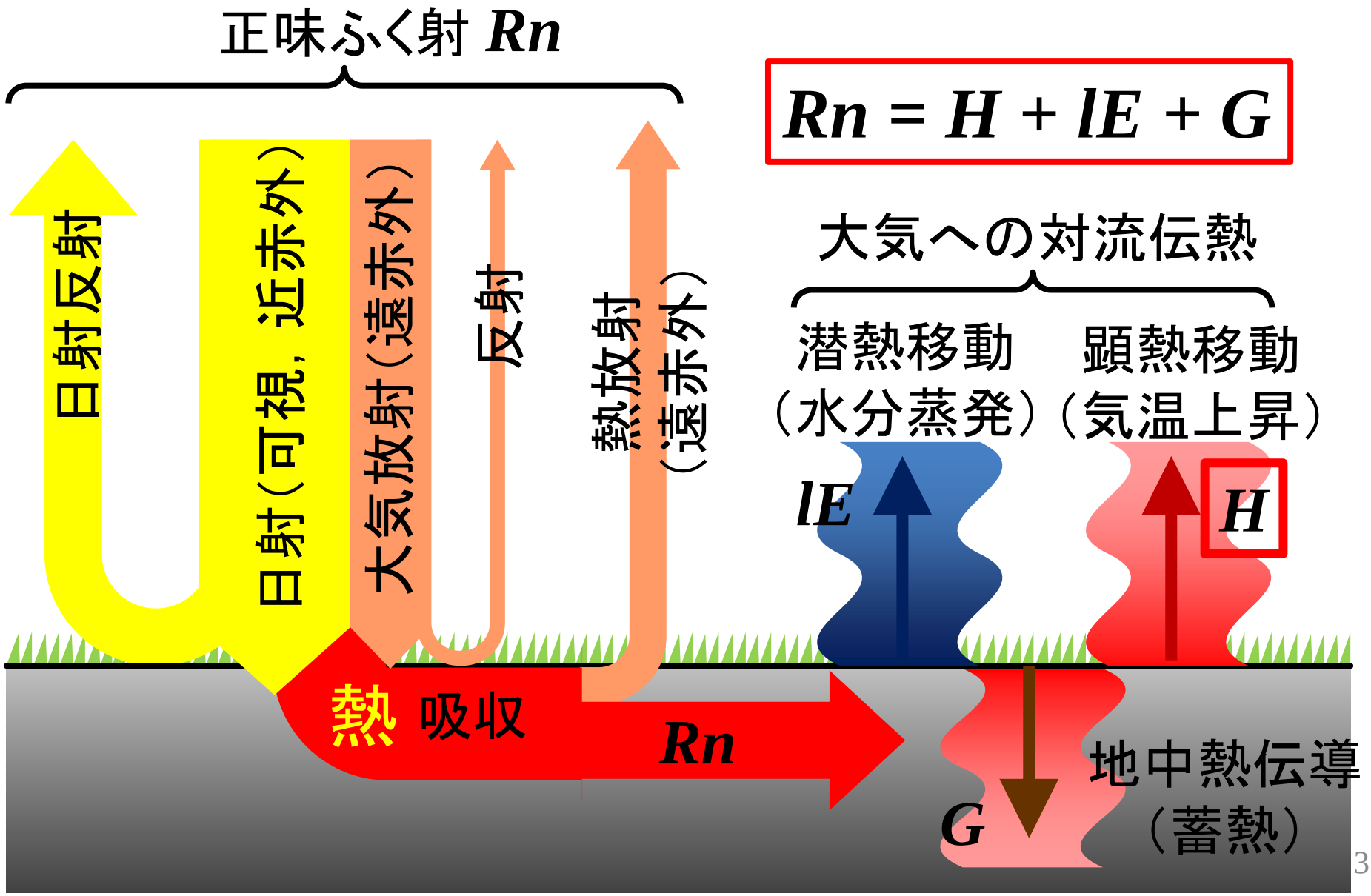
資料）気象庁 HP 掲載データより作成

注：1900 年から 1929 年の 30 年間を基準としてグラフを作成

出典:ヒートアイランド対策ガイドライン　改訂版（環境省 H25.3）

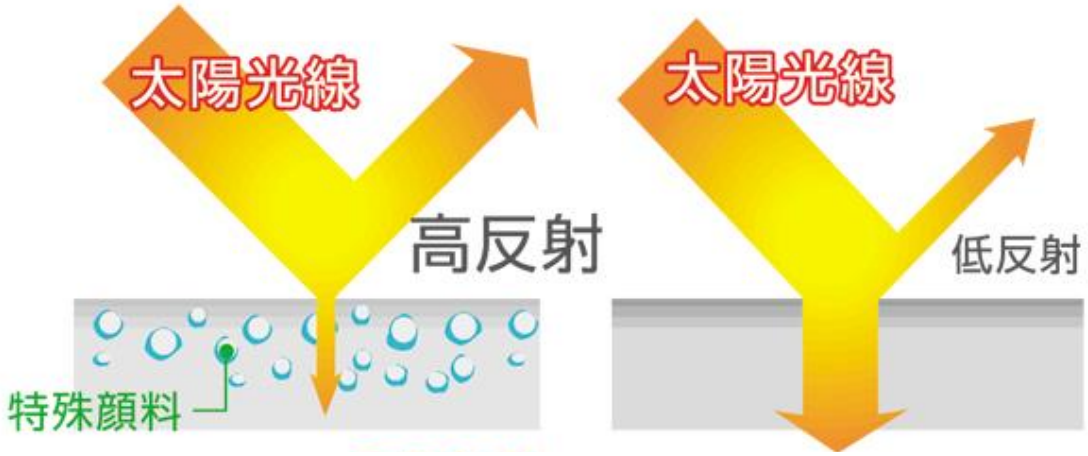


都市表面の熱バランス

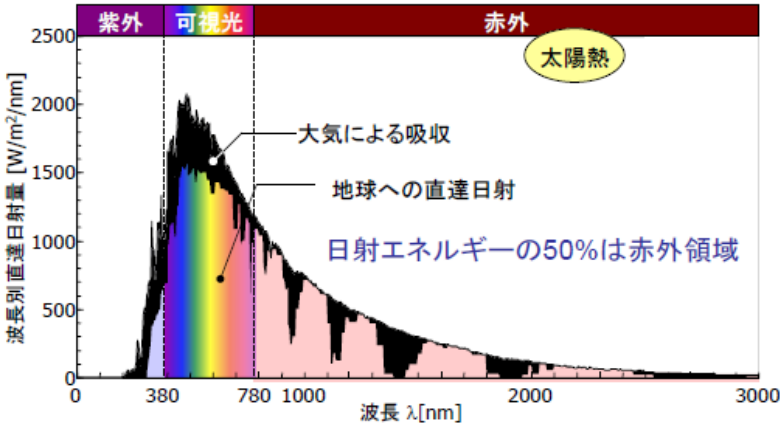


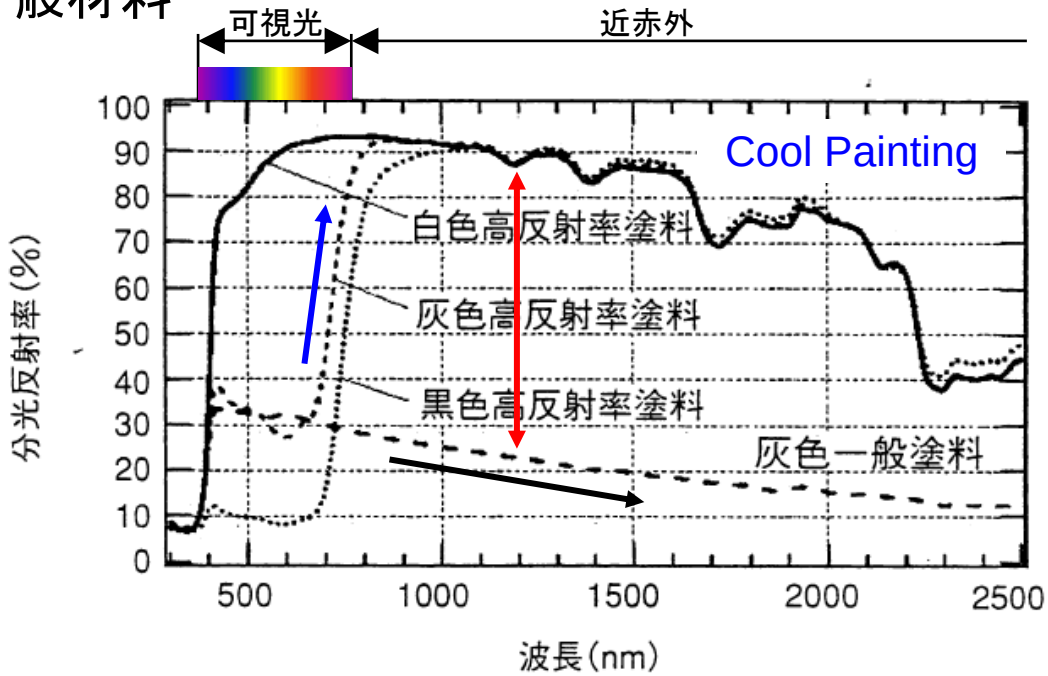
$$Rn = H + lE + G$$

都市表面の高日射反射率化



高反射率材料　　一般材料

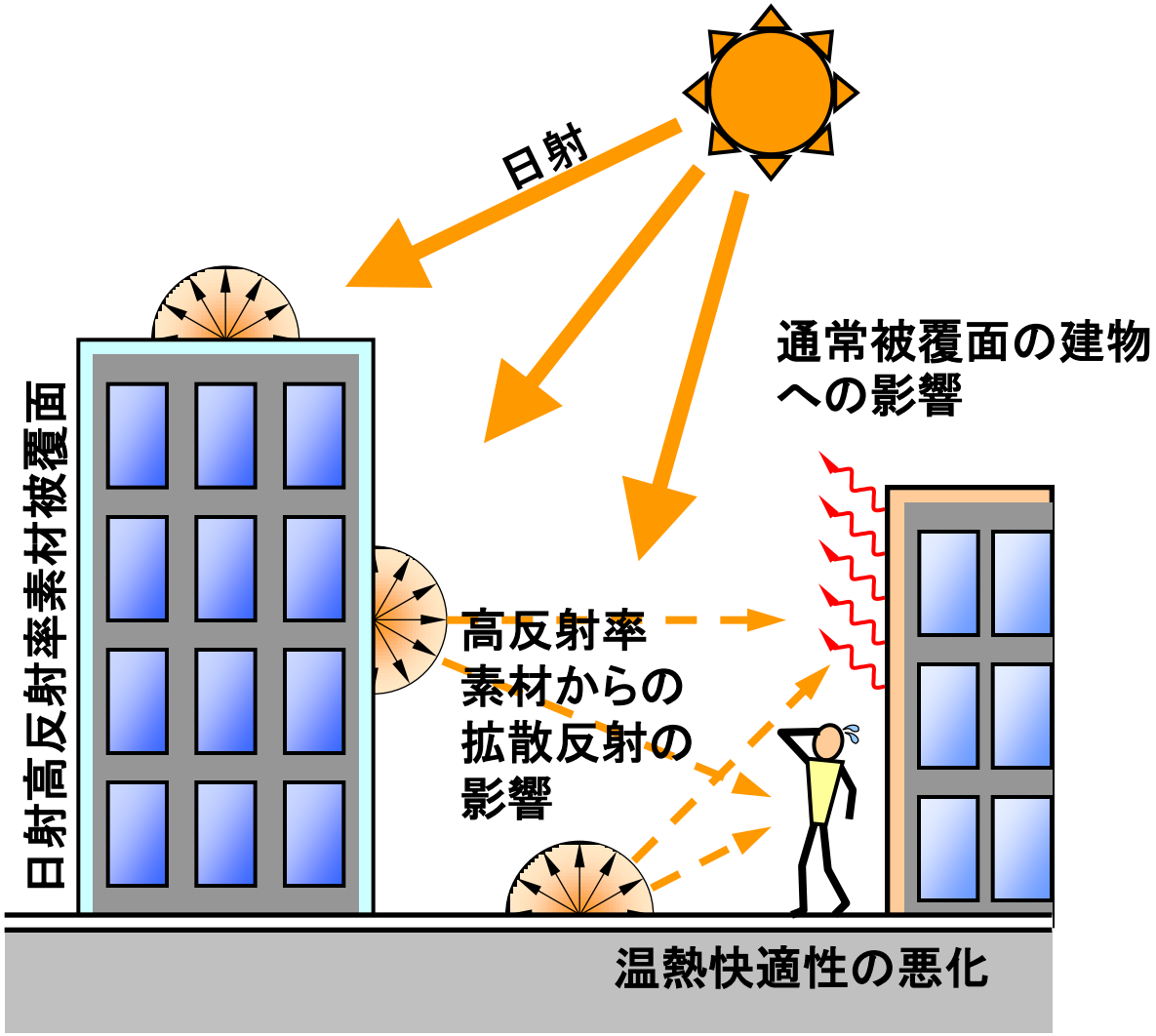


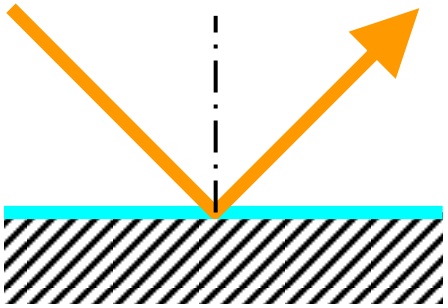


高日射反射塗料の分光反射率

施工事例

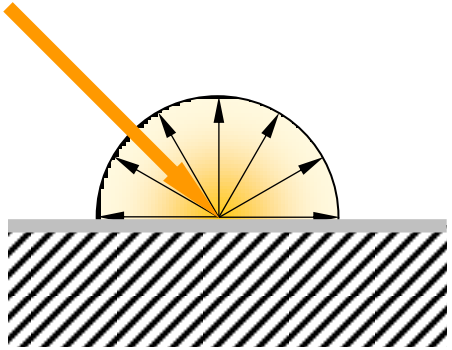
都市表面の高反射率化に伴う弊害と反射指向性制御





鏡面反射

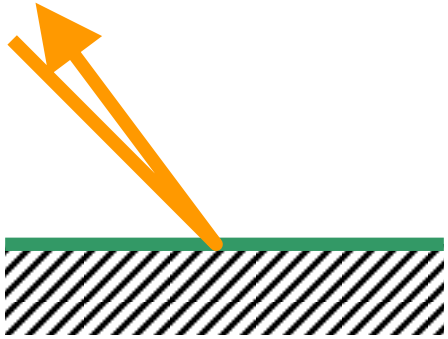
ガラス面，光沢面



拡散反射

外壁面，塗膜面

再帰反射性材料



再帰反射

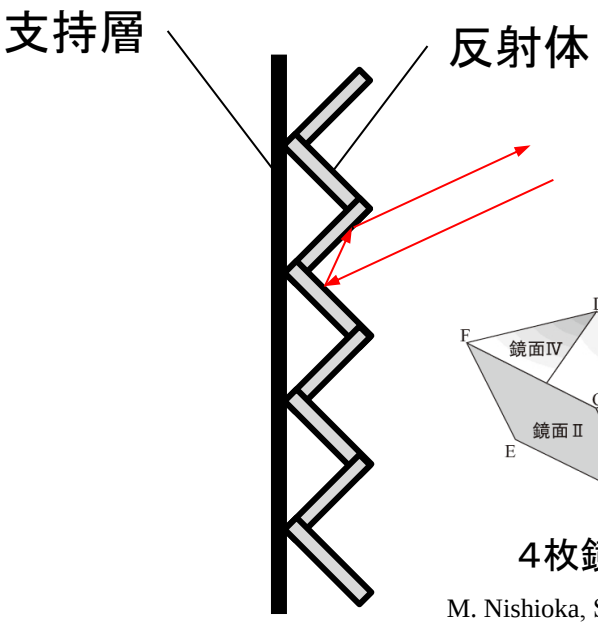
夜間の視認性向上に応用⇒道路標示、標識

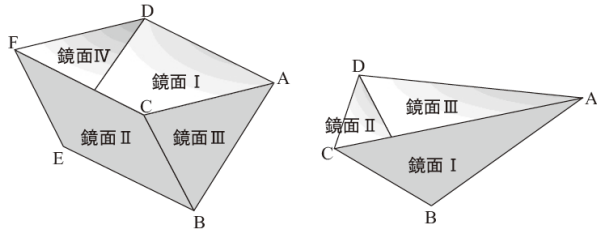
- 再帰反射性能：再帰性反射体が，ある方向から照射されたとき，入射光の方向にほぼ沿うように，選択的に戻る反射光の測光的性能.
- 道路標識，リフレクターとして利用．夜間視認性が評価指標

  JIS Z 8713「再帰性反射体-光学的特性-用語」

  JIS Z 8714「再帰性反射体-光学的特性-測定方法」
- 材料の普及を図るうえで，ヒートアイランド緩和効果の評価は重要で，熱・エネルギーの観点が必要.

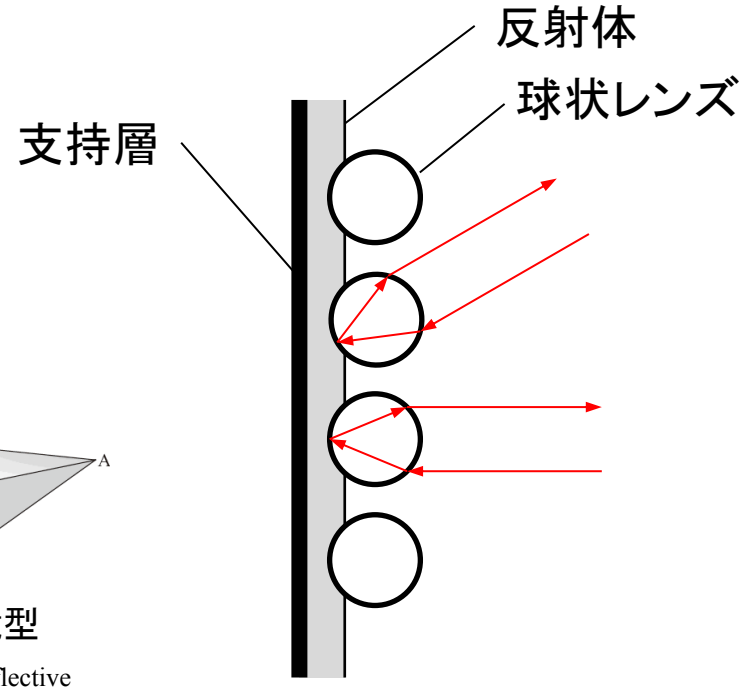
再帰性反射材料





4枚鏡型　　3枚鏡型

M. Nishioka, S. Inoue and K. Sakai, “Retroreflective properties calculating method based on geometrical-optics analysis”, J. Environ. Eng., AIJ, 73,633,1249-1254, 2008.



プリズム型

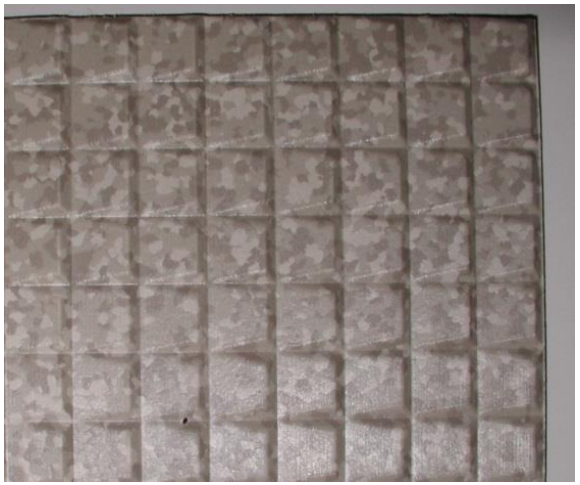
- 複数回反射により入射方向に反射
- 反射効率は高い傾向
- 視認性向上
- 反射経路が複雑

球状レンズ型

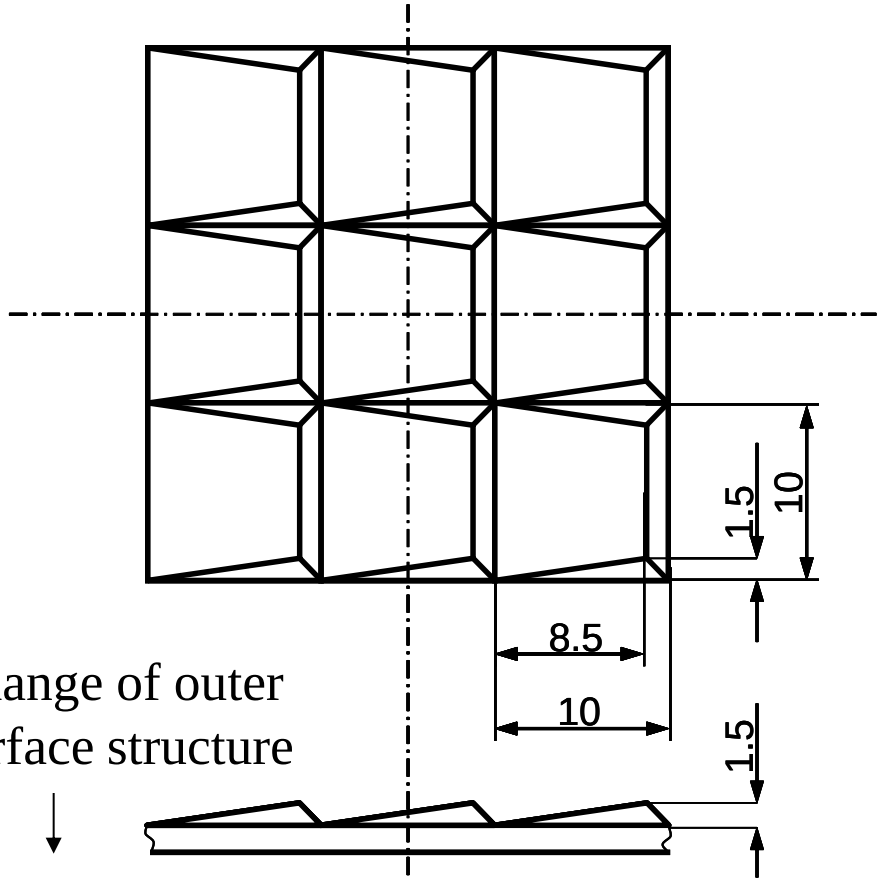
- レンズで後方の反射体に集光・反射させ，入射方向に反射
- 反射効率は劣る．隙間の影響
- 入射方向と集光位置が対応しているため，入射角による反射率の調整が可能

再帰性反射材料

拡散反射面の組合せ（凹凸形状・リブ）による反射指向性制御



全体的には拡散反射
入射方向への反射（上方反射）が比較的強い.



Change of outer surface structure

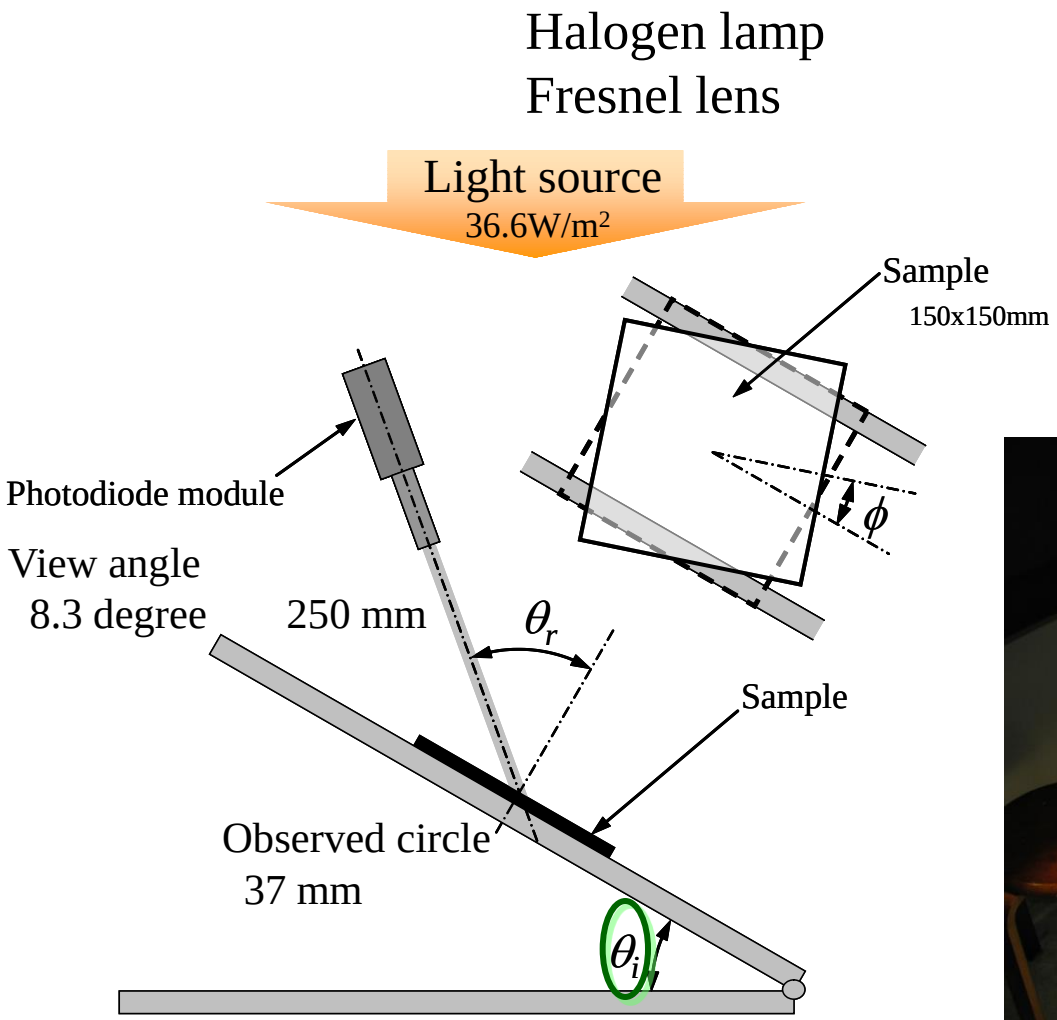
↓

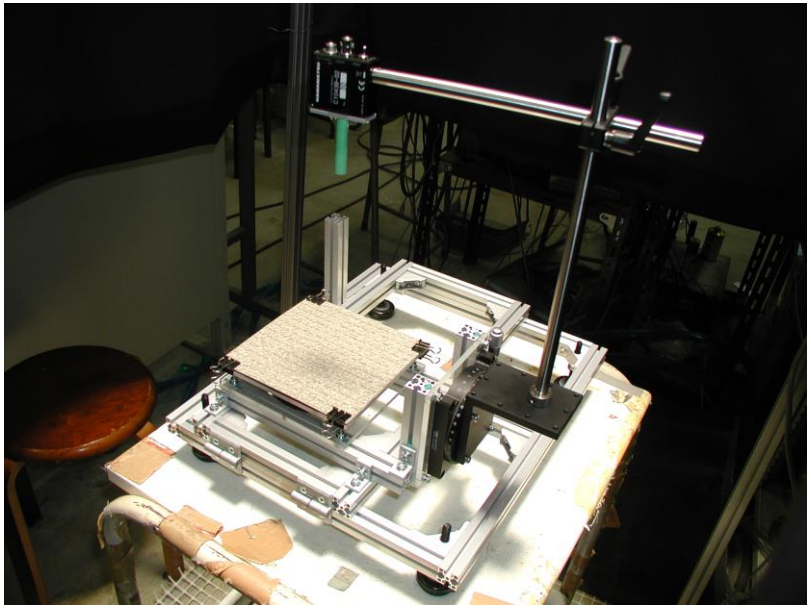
Control of direction of reflection

Flat sheet specimen

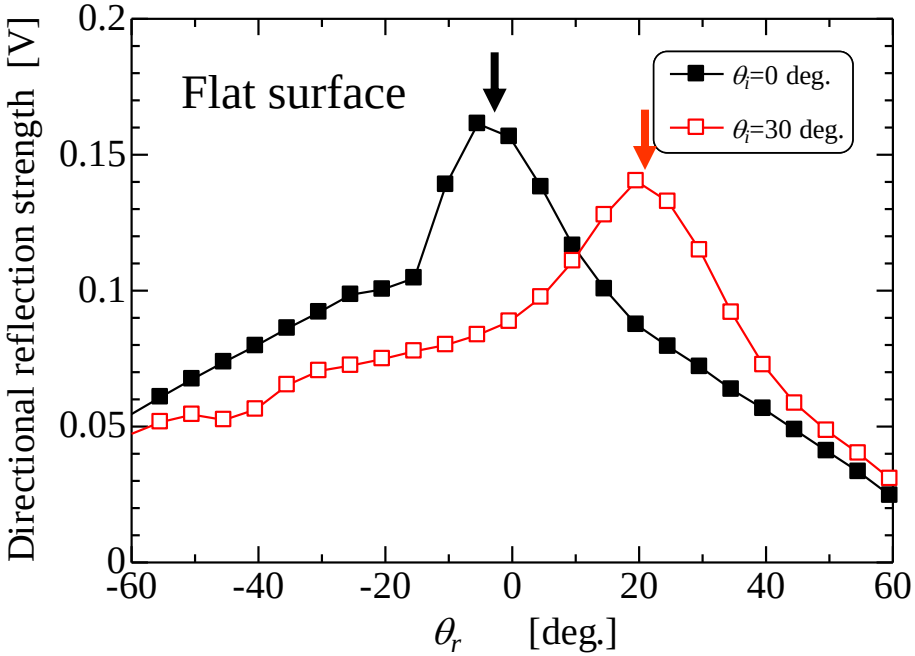
Uneven sheet specimen

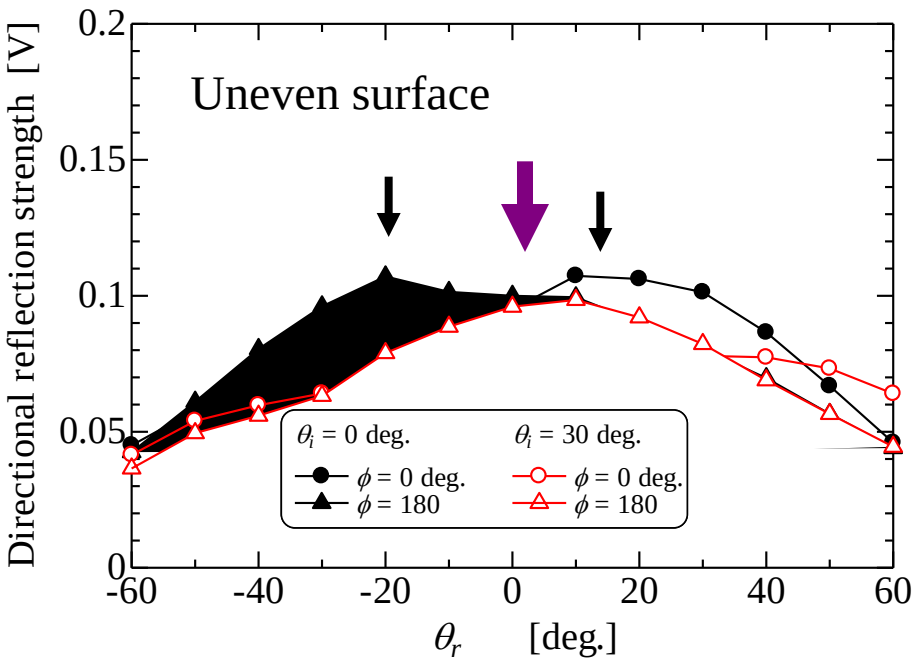
Experiment
(indoor and outdoor)
Numerical simulation

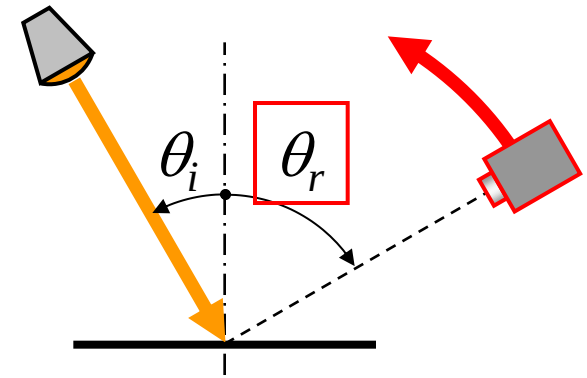


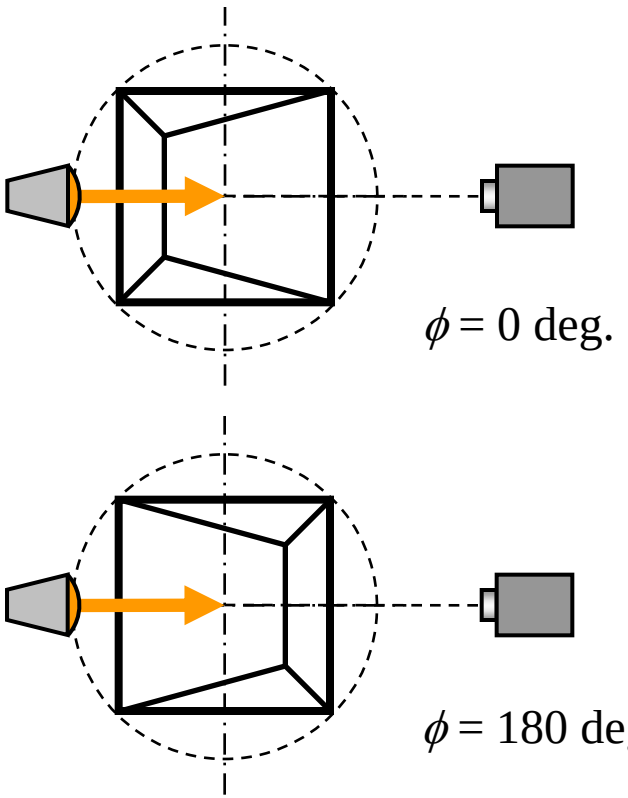


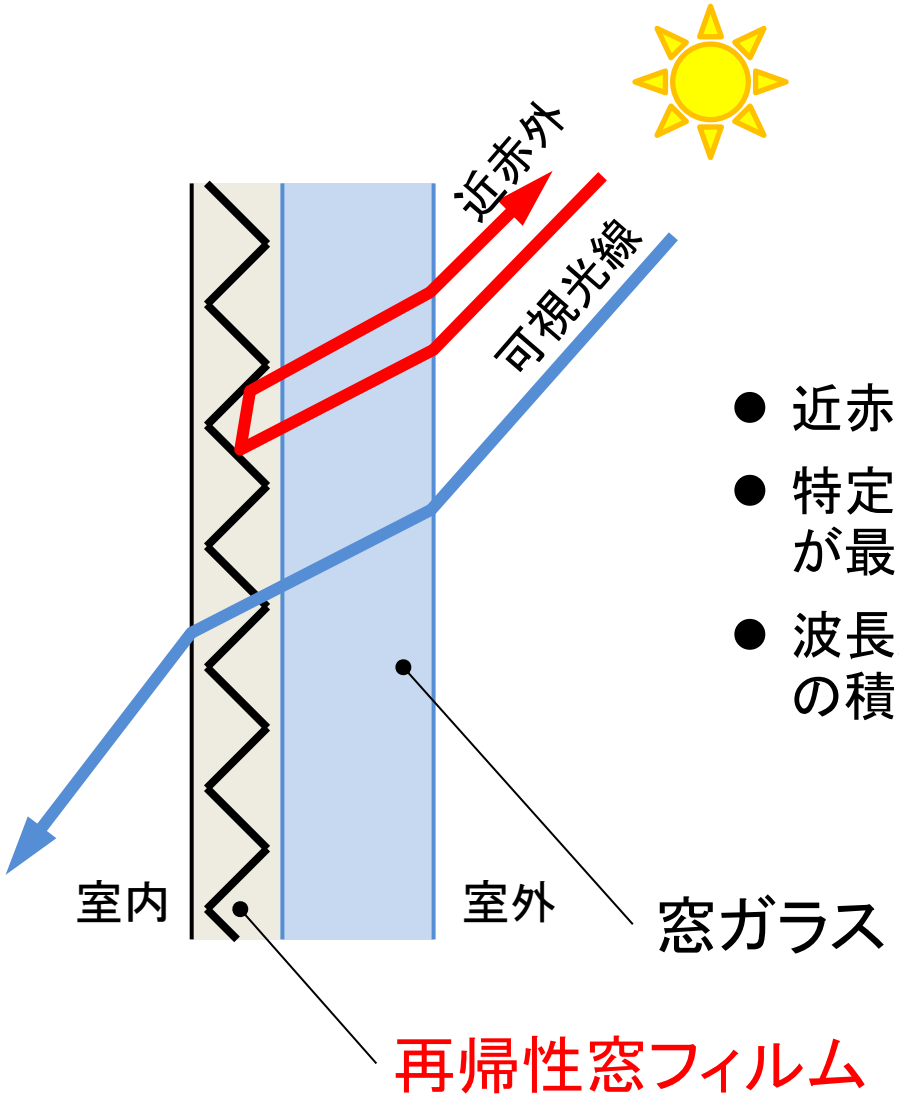
Experimental apparatus


Flat surface
θ_i=0 deg.
θ_i=30 deg.
Directional reflection strength [V]
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-60
-40
-20
0
20
40
60
θ_r [deg.]


Uneven surface
θ_i = 0 deg.
ϕ = 0 deg.
ϕ = 180
θ_i = 30 deg.
ϕ = 0 deg.
ϕ = 180
Directional reflection strength [V]
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-60
-40
-20
0
20
40
60
θ_r [deg.]


θ_i
θ_r


ϕ = 0 deg.
ϕ = 180 deg.



- 近赤外反射層を微細形状斜面を形成
- 特定の高度からの日射に対する反射が最大になるよう形状を検討
- 波長選択性は金属および酸化物材料の積層により実現

大阪HITEC対策技術認証制度（H23.10～）

(1)対象とする技術分野

ヒートアイランド対策の技術分野をできる限り網羅

統一的な制度のもとで評価・認証

(2)評価項目・評価方法

ユーザーが性能を客観的に判断できるよう、個々の技術に応じて科学的手法に基づき適切に設定

(3)評価基準

一定の基準を設け、クリアーしたものを認証

(4)技術の評価

原則として第三者機関が実施．公平性確保．

第三者機関を認定するための認証基準を定める。

関係者の意見を聴いて決定

現状の認証対象技術

- 屋根用高日射反射率塗料
- 高日射反射率舗装（車道除く）
- 高日射反射率防水シート
- 高日射反射率屋根材（瓦、化粧スレート、金属など）
- 保水性舗装ブロック
- 外断熱仕様（屋根面，外壁面）

認証対象技術の追加

- 再帰性高日射反射率外壁材
- 再帰性高日射反射率窓フィルム

認証対象技術の名称

- 再帰性高日射反射率外壁材
- 再帰性高日射反射率窓フィルム

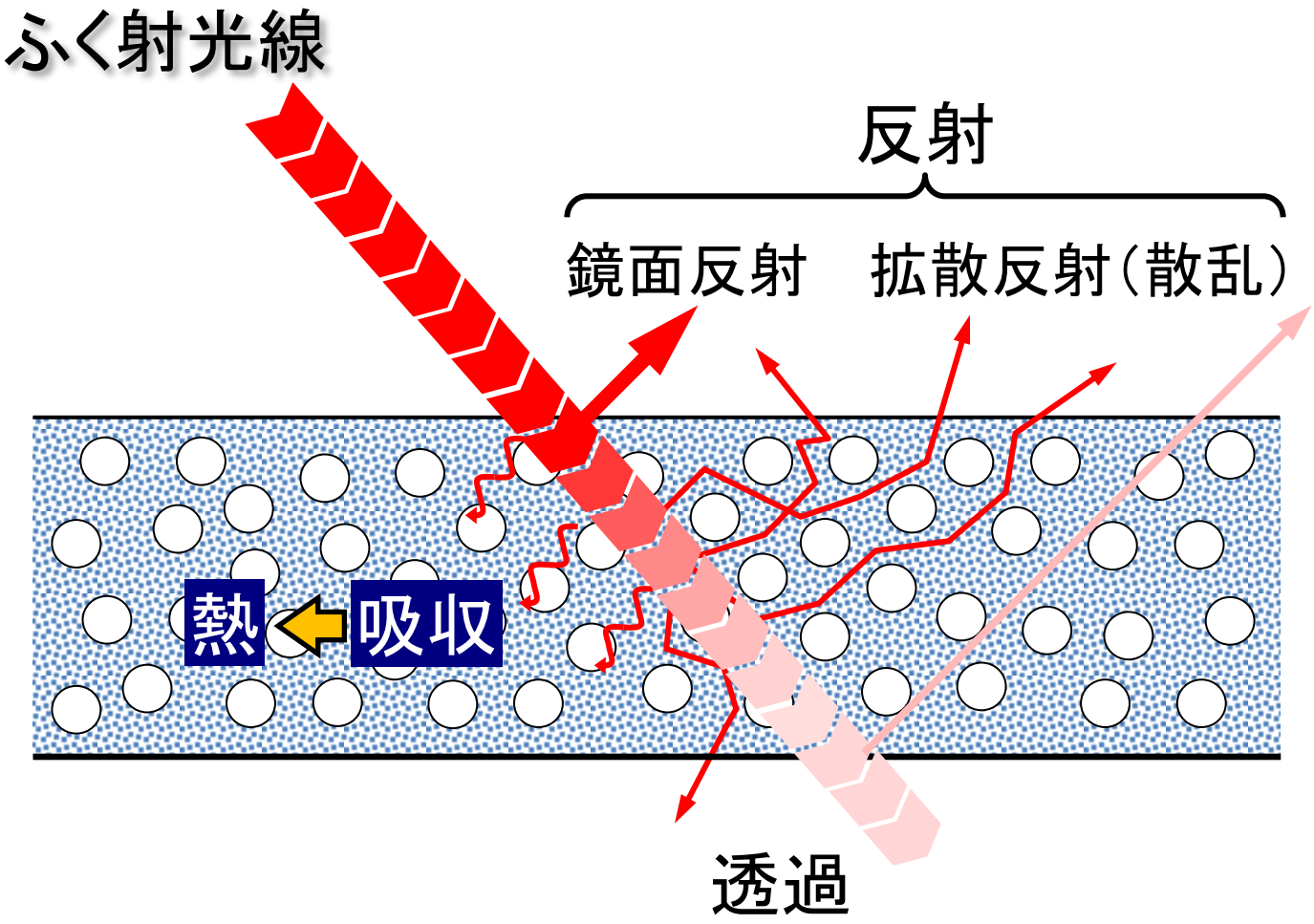
◆「指向性」「異方性」：反射特性を表現しづらい
　　⇒「再帰性」を採用

◆「日射反射」を明記：視認性のための材料と区別する.

◆「高日射反射率」：他の技術名称を考慮

◆「外壁材」：タイルに相当

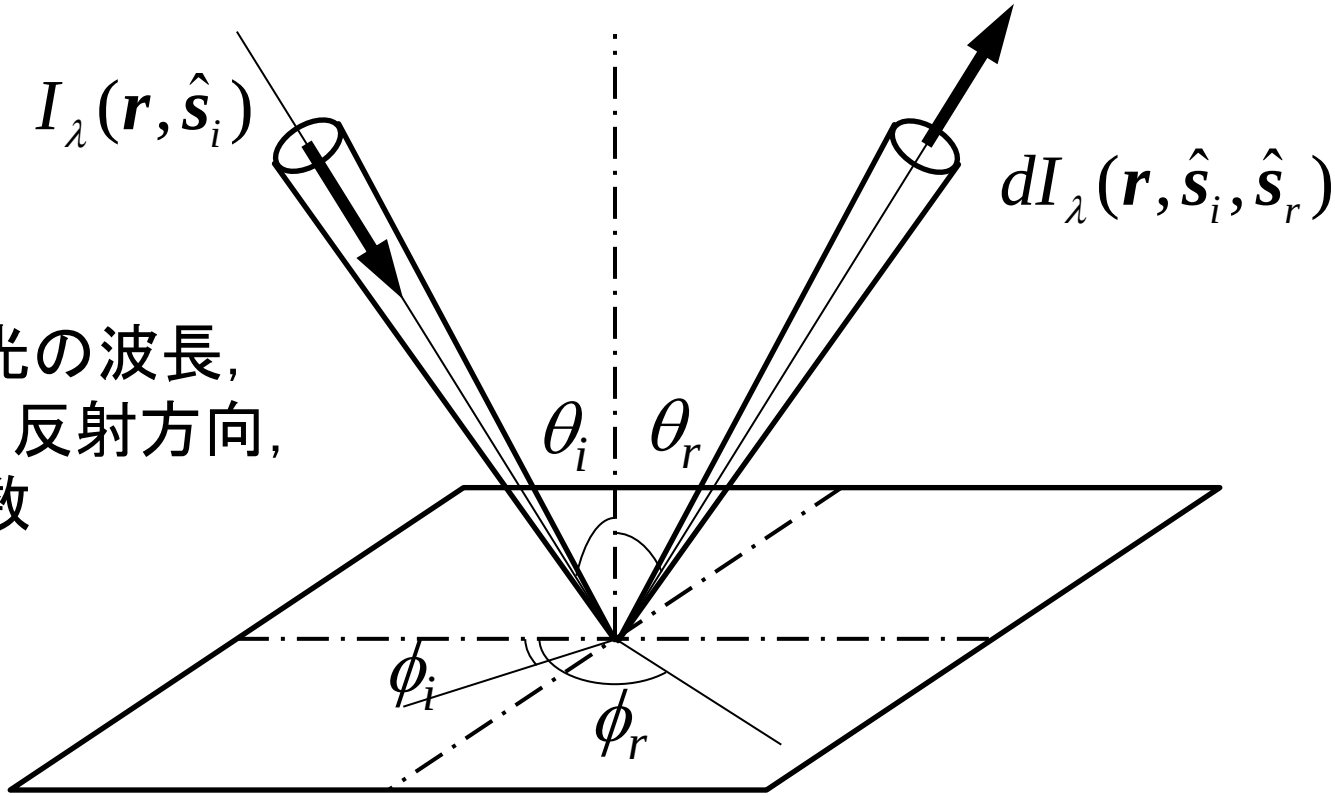
表面のふく射特性



表面の反射特性

分光双方向反射関数（Spectral Bidirectional Reflection Function）

$$\rho''_\lambda(\boldsymbol{r},\hat{\boldsymbol{s}}_i,\hat{\boldsymbol{s}}_r)=\frac{dI_\lambda(\boldsymbol{r},\hat{\boldsymbol{s}}_i,\hat{\boldsymbol{s}}_r)}{I_\lambda(\boldsymbol{r},\hat{\boldsymbol{s}}_i)\cos\theta_i d\Omega_i}$$



反射率は光の波長，
入射方向，反射方向，
場所の関数

表面の反射特性

指向性を有する表面において評価すべき特性

- 全半球反射
  全半球方向からのすべてのふく射に対し，全半球方向に反射されるふく射の割合
- 分光反射率・指向反射率
  波長ごとの反射特性，方向ごとの反射特性

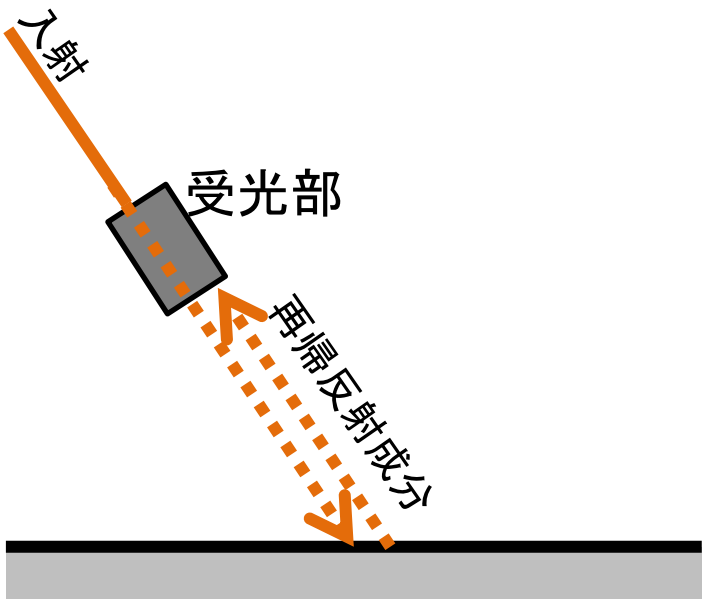
入射条件（平行光，拡散光，入射角），位置に依存

評価目的，材料に応じて測定法，測定項目の検討が必要.

再帰反射の評価法

再帰反射：入射方向に沿うように反射する性質

受光部を入射光軸上に置くことになり，入射光を遮ってしまうため，原理的に入射光軸と反射光軸を一致させた測定はできない．



日射反射率測定

- 日射照射時の材料表面温度上昇から受熱量を推定
- 日射計による全天日射と反射日射の同時測定
- 分光光度計による分光反射率と日射スペクトルの掛け合わせ

再帰反射率推定法

$$\rho_T = \rho_{Spe} + \rho_{Dif} + \rho_{Ret}$$

鏡面反射率
拡散反射率
} 積分球付分光光度計による測定可

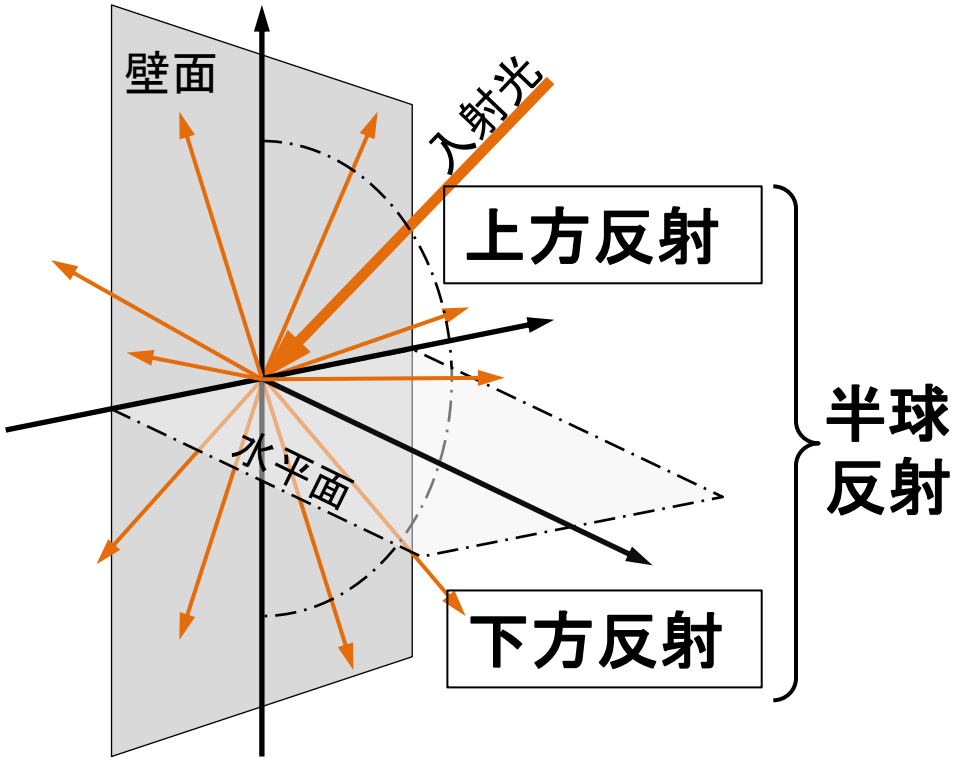
$$\rho_i = \frac{\int \rho_{i\lambda} E_\lambda d\lambda}{\int E_\lambda d\lambda} \quad i = Spe, Dif$$

全反射率（全半球反射率）

- 全反射率既知の参照反射面に対する照射実験を行い，温度上昇と吸収率（1-ρ_T）の関係式を導出
- 全反射率未知の再帰反射面の照射実験を行い，上記の式に基づいて評価
- 全反射率から鏡面および拡散反射率を差し引き，再帰反射率を算出する.

H. Sakai, H. Kobayashi, K. Emura, N. Igawa, “Outdoor measurement of solar reflective performance of Retroreflective materials”, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, 73, 632, 2008, 1713-1718.

反射指向性評価と上方・下方反射率



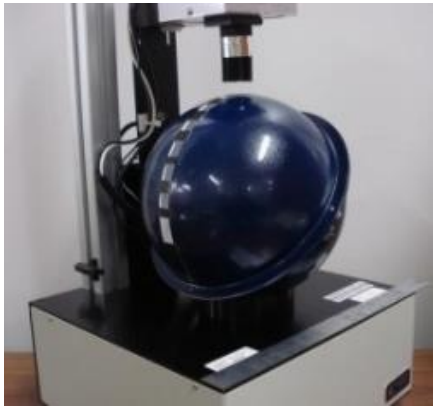
反射指向性：光の波長，入射方向と反射方向の双方向の関数

対策技術として評価するうえでは，より単純なパラメータで性能が望ましい．

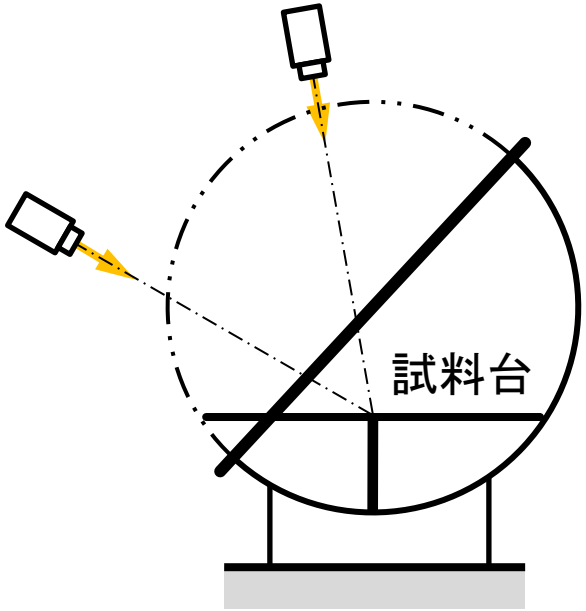
上方反射率

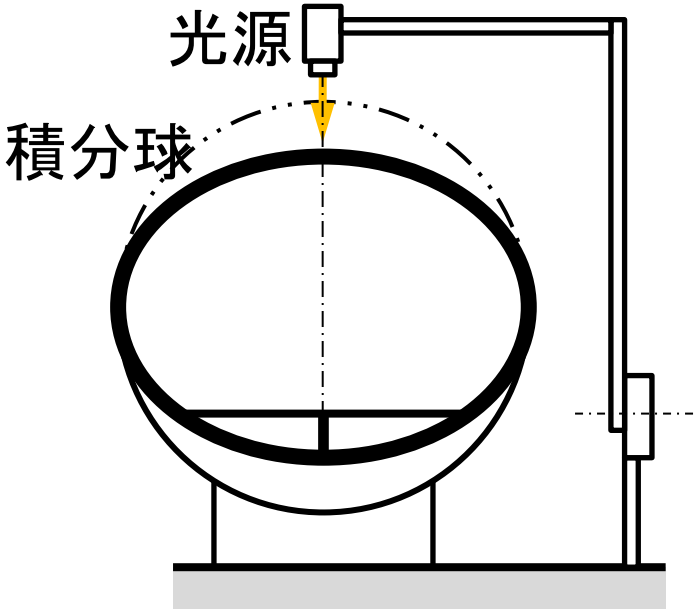
半球反射率のうち，入射側の１／２の反射角範囲の反射率．
光学測定は光が入射する試料表面を積分球内に露出した状態で、水平面を境界とした地表側（下方）に相当する、1/2の反射角度範囲を吸収体で立体的に覆う．下方反射率は半球反射率から上方反射率の差分より求める．

上方･下方反射率評価法

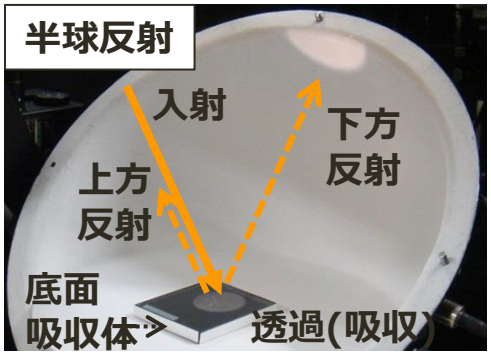


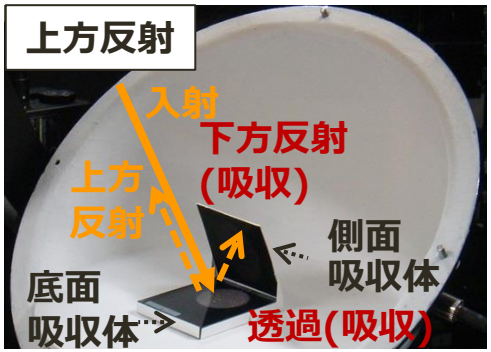
- 光源：波長域300～2500nm連続スペクトルの平行光
- 積分球：入射角変更可能
- 分光測光器：JIS K5602およびJIS R3106規定の測光器に相当するものを使用.

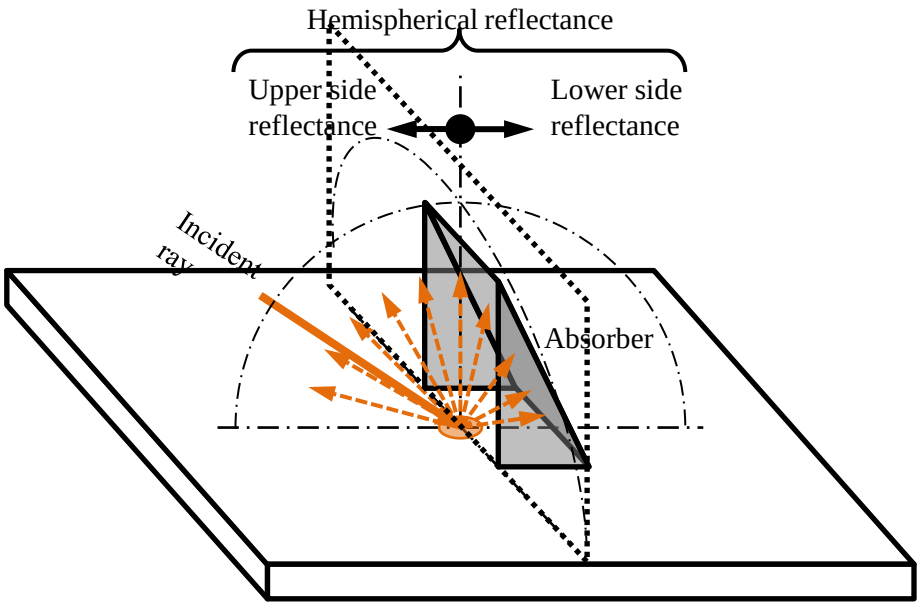




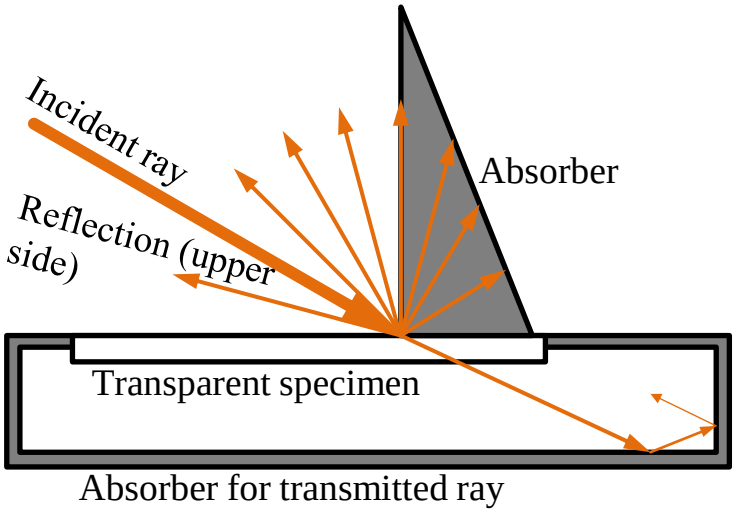
- 測定対象試料
- 標準白色板
- 吸収体
  - 光吸収材
  - 反射吸収体
  - 透過吸収体







不透明材料



透過性材料

半球および上方日射反射率の評価

$$\rho_e = \frac{\sum_{\lambda=300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} \rho(\lambda) E_\lambda \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} E_\lambda \Delta\lambda}$$

$$\rho(\lambda) = \frac{R_s(\lambda)}{I(\lambda)}$$

$$I(\lambda) = \frac{R_{sd}(\lambda)}{\rho_{sd}(\lambda)}$$

$E(\lambda)$ 標準分光日射

$\rho(\lambda)$ 分光反射率

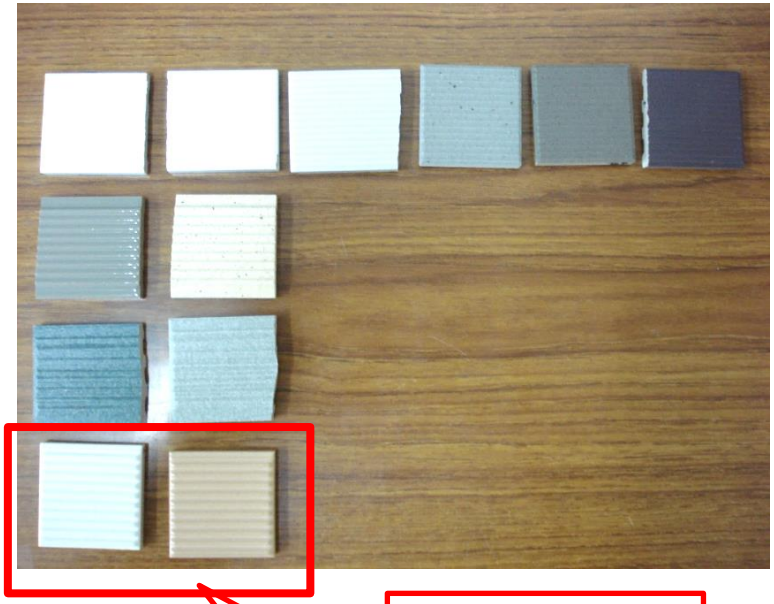
$I(\lambda)$ 基準光量

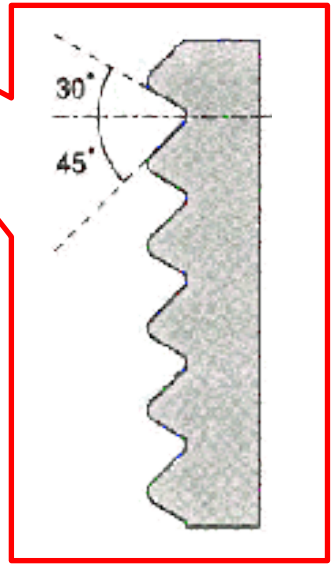
$R_s(\lambda)$ 試料の反射光量

$R_{sd}(\lambda)$ 標準白色板の反射光量

$\rho_{sd}(\lambda)$ 校正分光反射率

外装材（タイル）の再帰反射性能評価

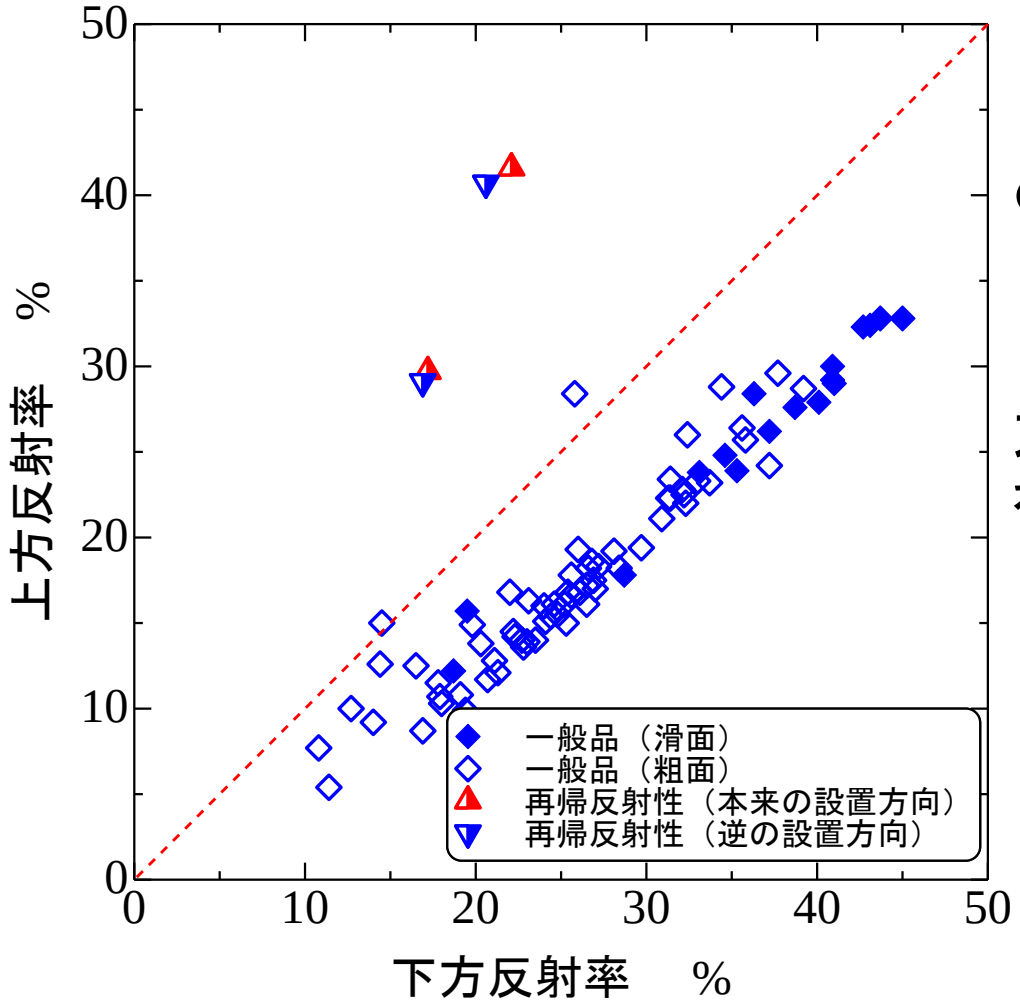




再帰性反射タイル
断面形状模式図

		凹凸形状		
		フラット	規則性模様	ランダム
表面粗さ	滑面	7	8	0
	粗面	37	10	18

全 80点



- 入射角：　60°（試料面法線方向基準）

大阪・夏季・日中の太陽位置を考慮

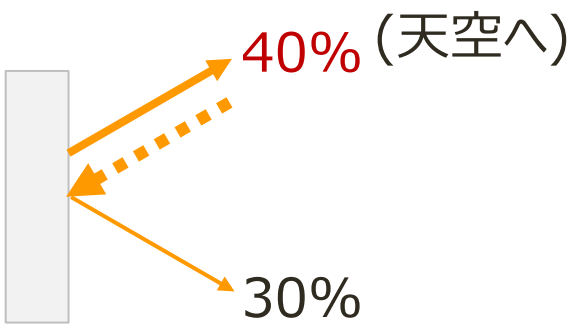
- 一般市場品の反射特性は表面の粗さに関わらず，下方日射反射率が大きい.
- 再帰反射性タイルは上方日射反射率が相対的に高く，色目が濃くなることによって両方の反射率が比例的に減少する.

評価項目および認定基準（外壁材）

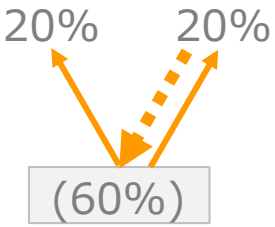
			認証基準		備考
			①上方反射率	②下方反射率	
外壁材	認証基準値		≧40%	<30%	①:高日射反射率屋根材の認証基準より ②:市場品実力値より
	準認証基準値		≧30%	<30% かつ <上方反射率×0.75	①、②:同上 (②の基準値は下図参照)
	(認証対象品実力値)		41%	21%	ー
	タイル実力値	一般品	32%	44%	認証対象品と同質の再帰性能のないタイル
		市場品平均	19%	27%	

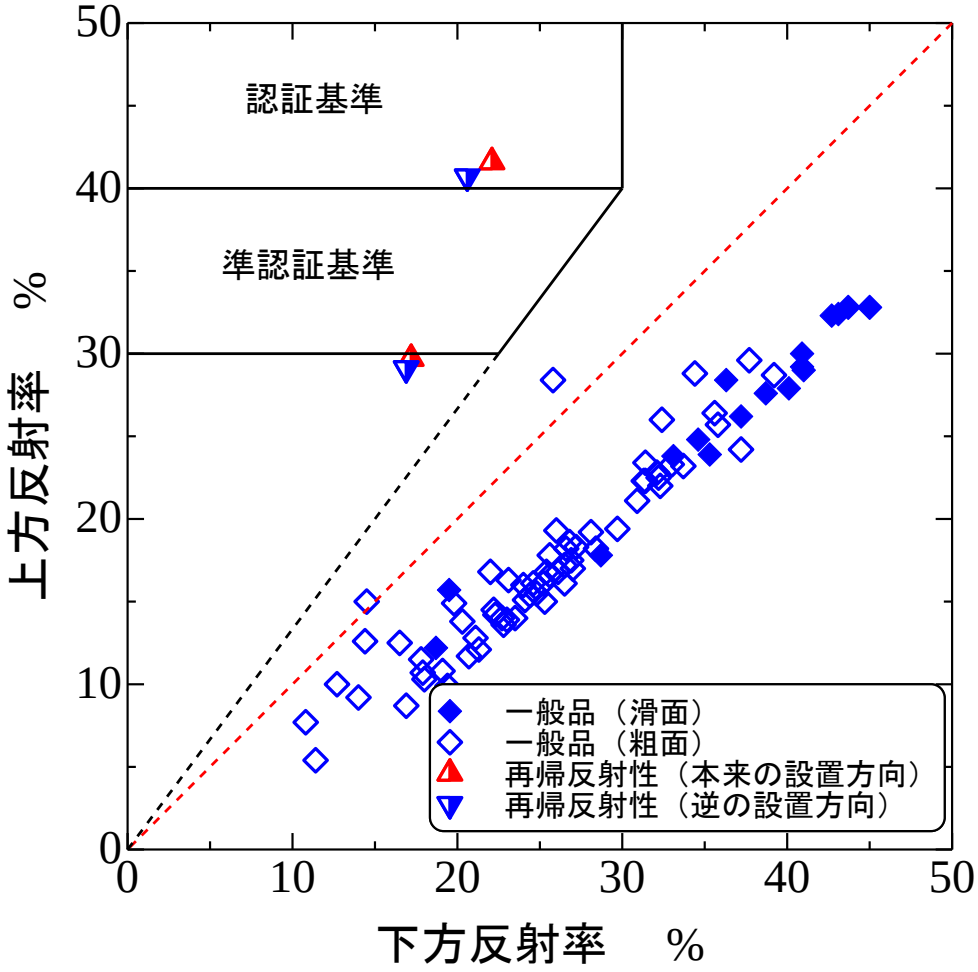
「再帰性高日射反射率外壁材」の基準案根拠

●認証基準(案)



・屋根認証基準：≧40%
(天空へ)





(下方反射率 平均27% (≒30%))

評価項目および認定基準（窓フィルム）

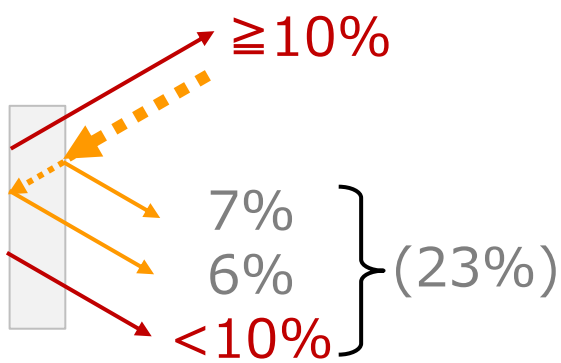
			認証基準		備考
			①上方反射率	②下方反射率	
窓フィルム	認証基準値		≧10%※	<10%※	①、②:市場品実力値より(下記参考文献から推測) ※:基材(FL3)単体の反射率からの増分で規定
	準認証基準値		—	—	準認証設けず
	(認証対象品実力値)		15%	-2%	–
	窓フィルム実力値	一般品(1)	0%	27%	認証対象品と同等半球反射率の窓フィルム
		一般品(2)	0%	22%	遮へい係数JISA5759準拠の反射率下限相当品

窓フィルムの遮へい係数はJIS A5759（建築窓ガラス用フィルム）の試験方法に準じ，0.85以下とする

参考文献：「建築窓ガラス用フィルムの分光特性に関する調査」 日本建築学会技術報告集 14, 28, 487-490, 2008.10.

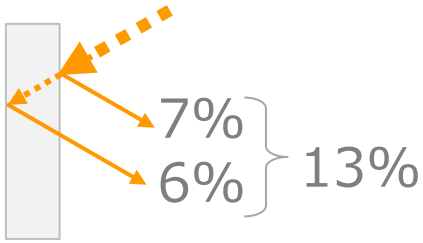
「再帰性高日射反射率窓フィルム」の基準案根拠

●認証基準(案)

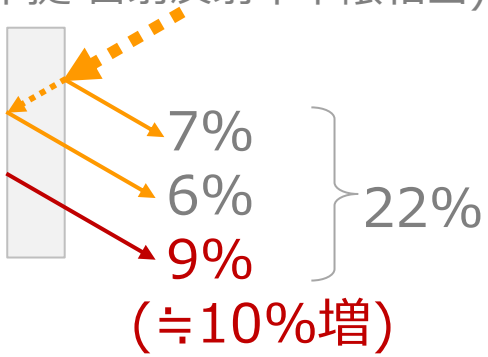


FL単体に対するJIS下限品の反射率増分を基準値とし
・上方反射率(増分)：
基準値以上を発現
・下方反射率(増分)：
基準値未満に抑える
(上方反射＞下方反射)

・FL単体



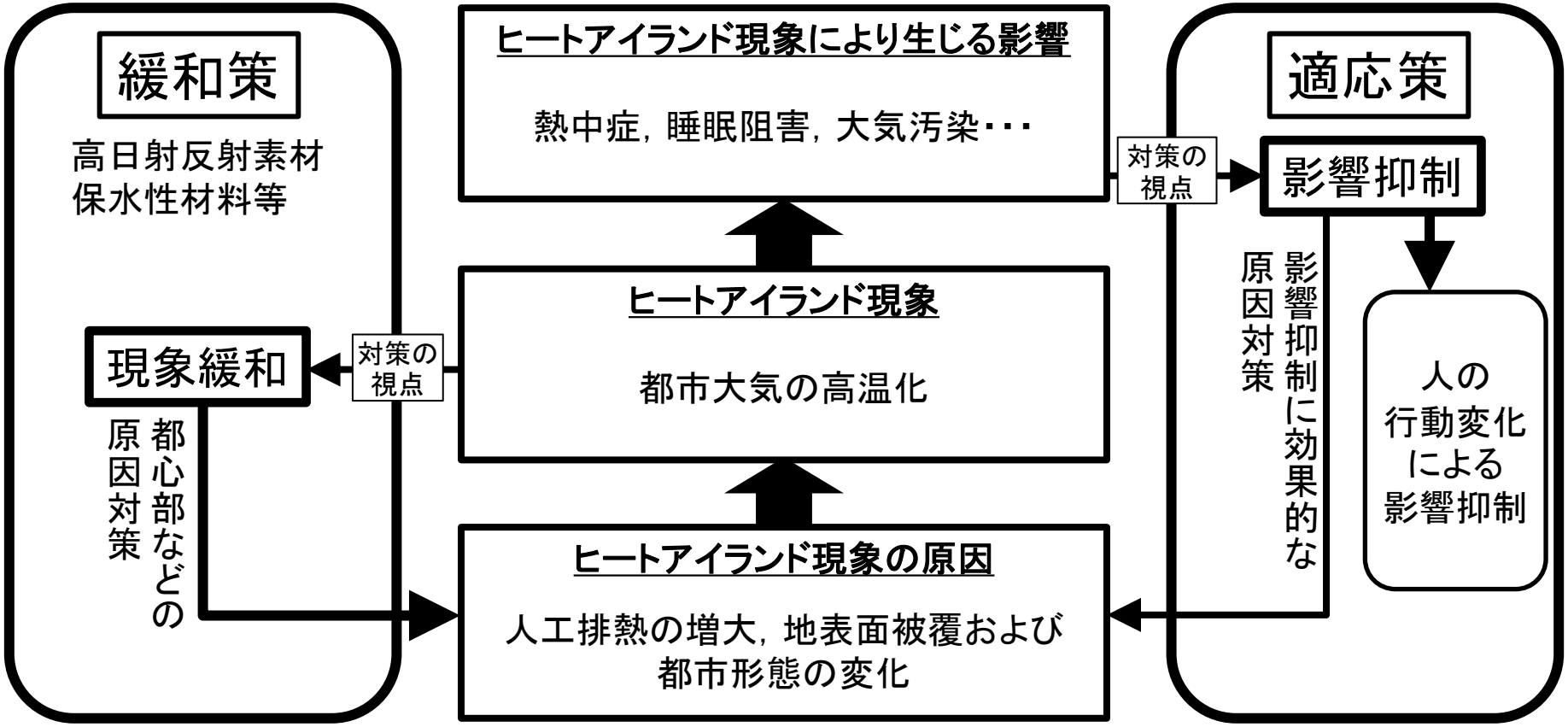
・一般遮熱ﾌｨﾙﾑ
(JIS準拠 日射反射率下限相当)



参考文献：「建築窓ガラス用フィルムの分光特性に関する調査」 日本建築学会技術報告集 14, 28, 487-490, 2008.10.

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

体感指標の意義

現状を把握し，快適空間実現のために・・・

人の温熱快適感は複合的要素である

・体感温度に影響する環境6要素
気温　湿度　放射温度　気流
代謝量　着衣量

評価基準

適切・複合的な 温熱快適性指標 が必要

体感温度に着目

- 人間本意の環境設計
- 省コスト・省エネルギーの実現

温熱環境改善・都市計画

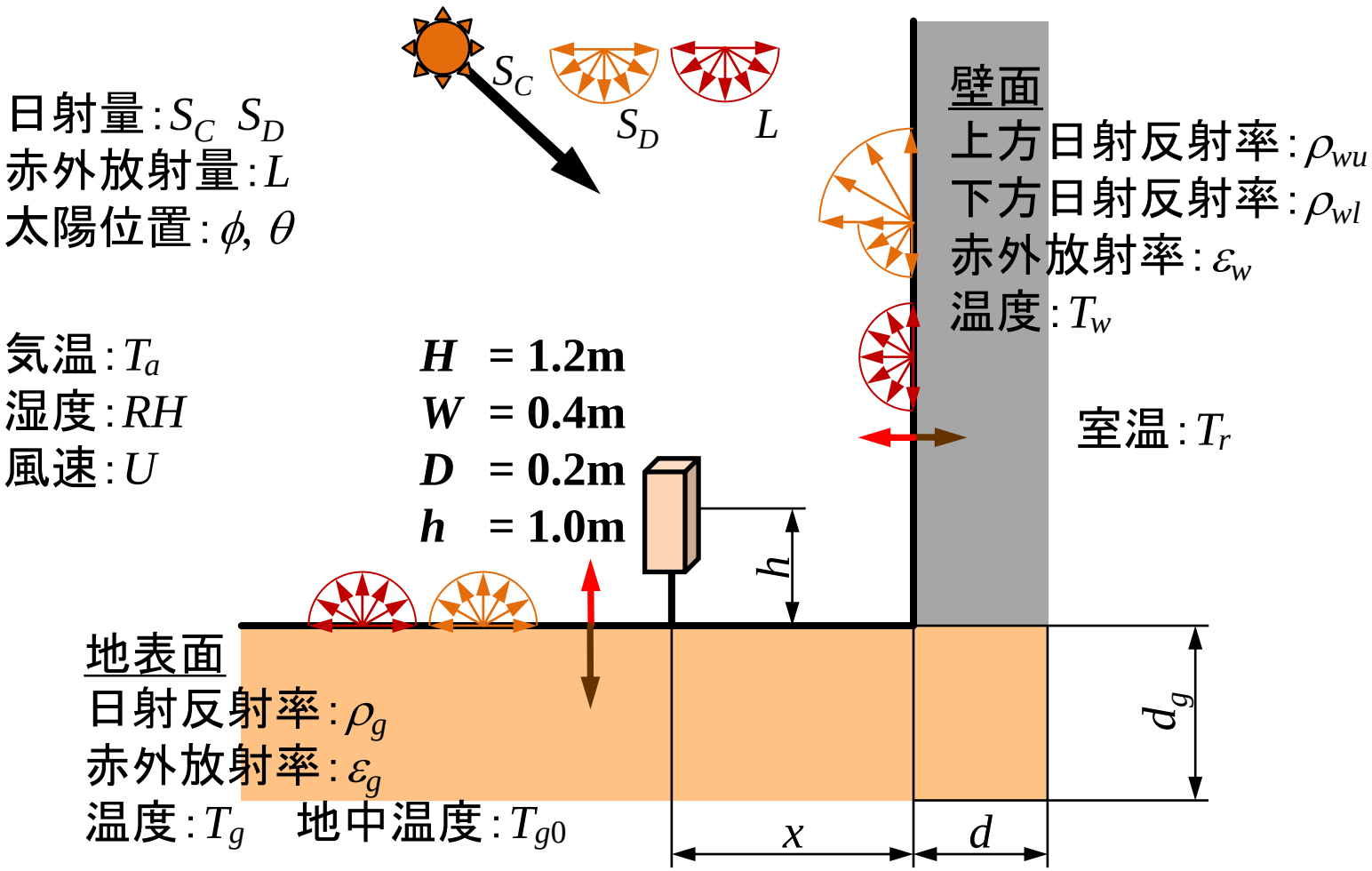
- 屋上緑化
- 高反射性材料
- 保水性材料
- 風の道
- 打ち水/ドライミスト

総合的に温熱環境を改善

▲打ち水大作戦

人体周りの正味ふく射に関する解析モデル

建物条件は奥行き方向に一様
壁面の向きは計算条件として入力



直方体モデルにおける正味ふく射評価

$$R_{net} = (1-\alpha_h)R_S + \varepsilon_h\left(R_L - \sigma T_{skin}{}^4\right)$$

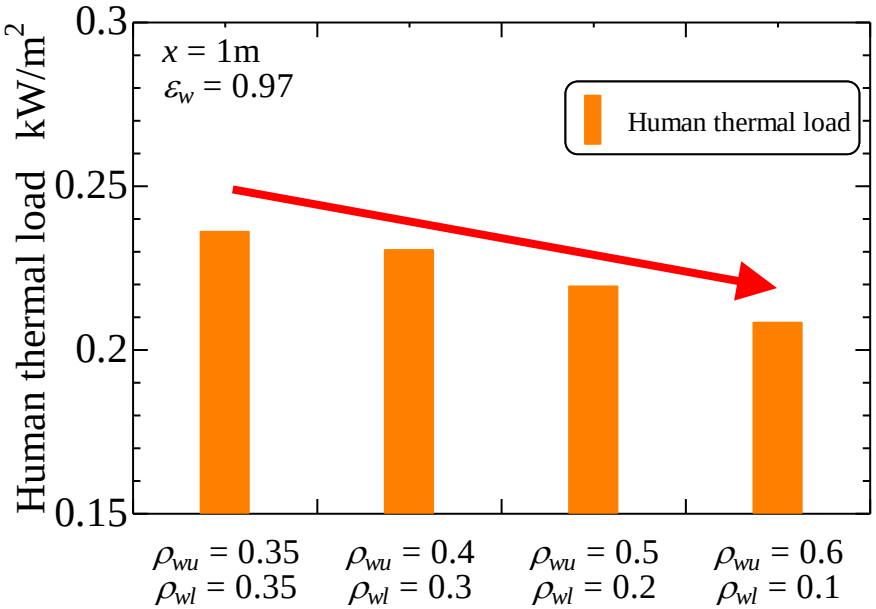
$$R_S = \sum_i A_i S_i \Big/ \sum_i A_i$$

$$R_L = \sum_i A_i L_i \Big/ \sum_i A_i$$

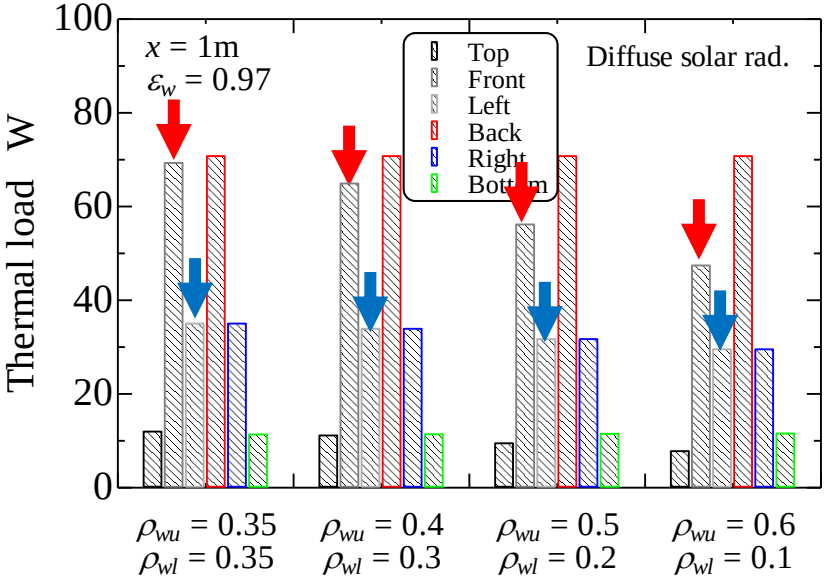
$$S_i = \sum_j F_{ij} S_{wj} \qquad L_i = \sum_j F_{ij} L_{wj}$$

$\boldsymbol{S_i}$: 直方体モデル面i に対する日射量
$\boldsymbol{L_i}$: 直方体モデル面i に対する赤外放射量
$\boldsymbol{S_{wj}}$: 天空または周辺壁面・地表面からの日射量，日射反射量
$\boldsymbol{L_{wj}}$: 天空または周辺壁面・地表面からの赤外放射量
$\boldsymbol{F_{ij}}$:直方体モデル面i から天空または周辺壁面・地表面への形態係数
$\boldsymbol{A_i}$: 直方体モデル面i の表面積
$\boldsymbol{T_{\mathrm{skin}}}$: 平均皮膚温
$\boldsymbol{\alpha_h}$: 人体および衣服の日射反射率
$\boldsymbol{\varepsilon_h}$:人体および衣服の赤外放射量

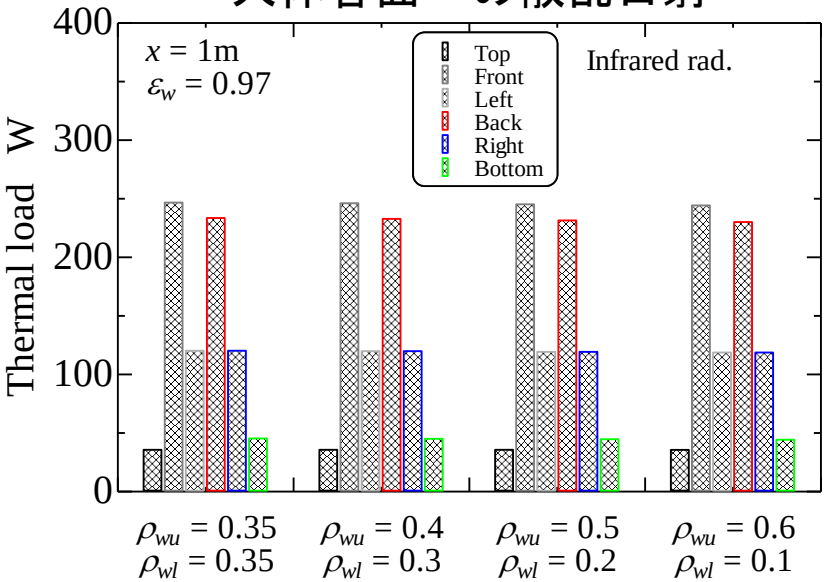
日射反射率の反射指向性の影響



全体表面の正味ふく射
（半球反射率：0.7）



人体各面への散乱日射



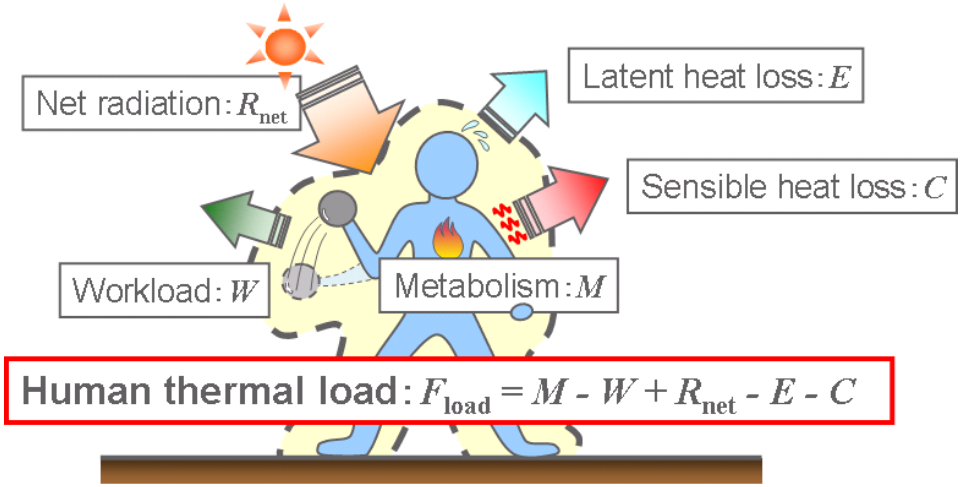
人体各面への赤外放射

体感指標の評価とクールスポットの創出

人体熱負荷量 [W/m²]

人体への熱の授受によって温冷感が生起される
→人体熱収支に基づく熱流束として定義

$$F_{\mathrm{load}} = M - W + R_{\mathrm{net}} - E - C$$



M	代謝量
W	機械的仕事量(外部仕事)
R_{net}	正味ふく射量(日射,赤外放射)
E	潜熱損失量(発汗,不感蒸泄,呼吸)
C	顕熱損失(皮膚,呼吸)

まとめ

- 再帰反射性材料による反射指向性の制御の必要性
- 再帰反射性材料について
- 大阪HITEC対策技術認証制度
  - 再帰性高日射反射率外壁材・窓フィルム
  - 再帰性能の評価法
  - 認証基準の策定と根拠
- 適応策に関わる体感評価