

マイクロ・ナノスケールの 表面構造物による ふく射性質の制御

山田 純
芝浦工業大学

マイクロ・ナノスケール ここだけの定義

- 「ナノ領域」の定義
 - 熱力学の基本である「局所平衡の概念」が成立しない時空間領域
- ふく射の波動性を考慮する必要のあるスケール
 - 可視光（サブミクロン）、赤外線（マイクロン）程度より狭い領域

牧野道場

スペクトル機能性ふく射の制御技術
の開発をめざす分光熱工学のアプローチ
(科学研究費補助金, 基盤研究(A)一般)

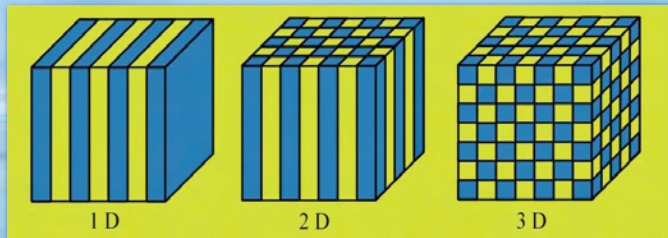
- 牧野俊郎先生（代表）ほか（京都大学）
- 花村克吾先生（東京工業大学）
- 宮崎康次先生（九州工業大学）
- 山田純（芝浦工業大学）

周期的微細構造を有する、ある いは、薄膜をもつ表面のふく射 性質

- 特徴
 - ふく射の波動性が際だつ
(干渉が生じやすい・観察されやすい)
- 狙い
 - 干渉により、そのふく射性質を制御できる可能性がある。

フォトニック結晶 (近い研究)

- フォトニック結晶による光伝播の制御
 - 多層干渉膜 (1次元)
 - フォトニックファイバー, 光スイッチ, 光変調器などの光デバイス

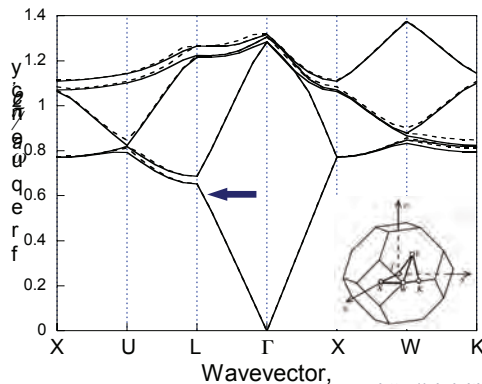


「フォトニック結晶」の研究との違い

- フォトニック結晶の研究では,
 - 対称な面上での性質を主に議論
 - 表面が無い
 - 入射波がある
- 我々の関心
 - どう見えるか? (表面がある, 見る方向はいろいろ)
 - 放射されるふく射は?

MIT Photonic Band (MPB) 宮崎先生

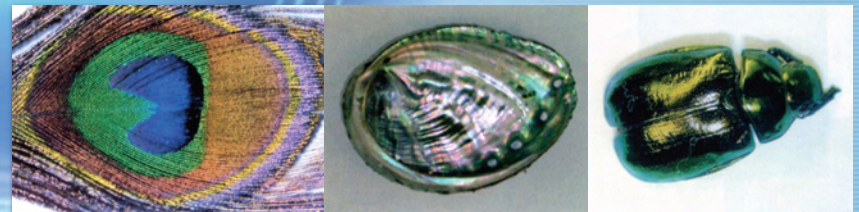
シリカ粒子による最密構造 (FCC) における光の分散関係



計算パラメータ
 $\epsilon=1.96, r/a=0.354$
 フォトニックギャップ $\rightarrow 0.68$
 $\lambda = a/0.68 = \sqrt{2}D/0.68 = 2.08D$
 $D \rightarrow 2\mu\text{m}, 3\mu\text{m}$

http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/MIT_Photonic_Bands

周期的微細構造をもつ表面の反射性質について



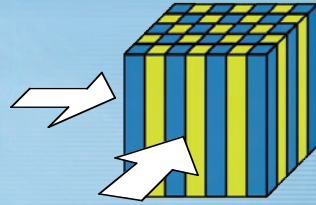
周期的微細構造による発色の例

- デザインツール
- 微細加工技術あるいは自己組織化利用した化学プロセスを利用した微細構造の構築



周期的微細構造をもつ表面ふく射性質を予測するための解析手法の確立

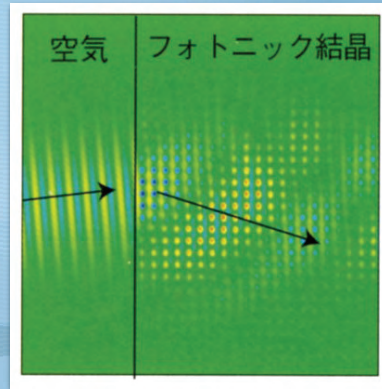
これまでの電磁波解析例



- FDTD法が主流
 - 表面を扱った例は少ない
 - 垂直入射
 - 狭い領域



周期境界導入の難しさ

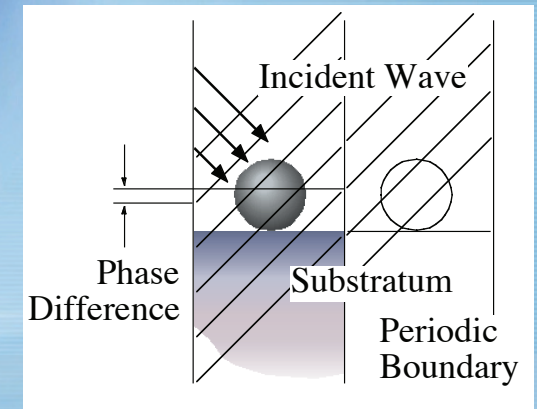


周期境界導入の問題点

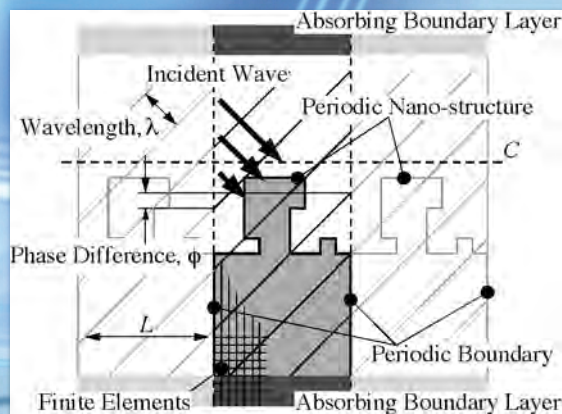
- 電磁波の電解強さが、対応する境界上で位相差をもつ



Blochの定理



解析モデル



- Maxwell Equations

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$



- Helmholtz Equation

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0$$

$$k = 2\pi m / \lambda_0$$

有限要素解析

$$\iint_{\Omega} \left[-\frac{1}{\mu_r} \nabla W(\mathbf{r}) \cdot \nabla E_z^{sca}(\mathbf{r}) + k_0 \varepsilon_r W(\mathbf{r}) E_z^{sca}(\mathbf{r}) \right] ds + \frac{1}{\mu_r} \int_C W(\mathbf{r}) [\mathbf{n} \cdot \nabla E_z^{sca}(\mathbf{r})] dl = \iint_{\Omega} W(\mathbf{r}) f(\mathbf{r}) ds$$

$$\text{where } f(\mathbf{r}) = -\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla E_z^i \right) - k_0^2 \varepsilon_r E_z^i$$

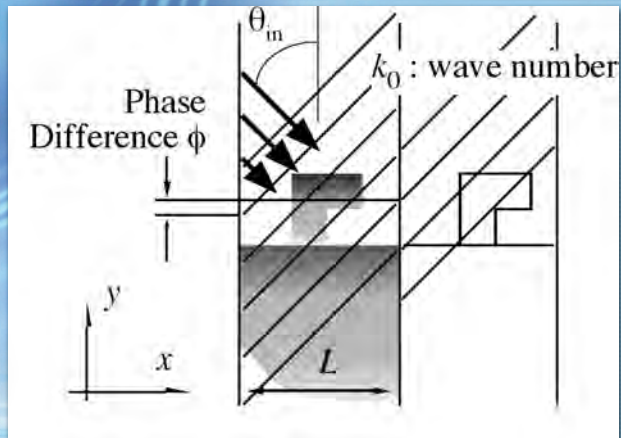
E_z^{sca} : electric field intensity of scattered wave

E_z^i : electric field intensity of incident wave

W : weighting function

Ω : computational domain

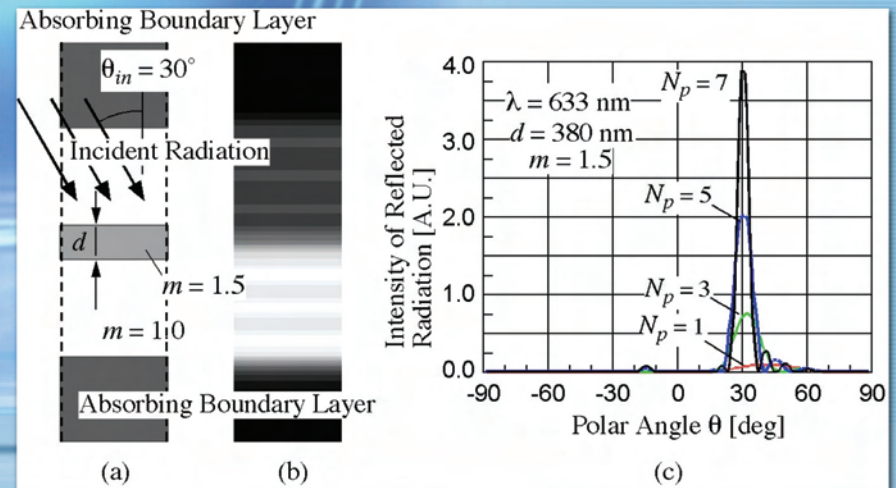
Blochの定理



$$E_z^{sca}(x, y) = \exp(-jk_0 \sin \theta_{in} \cdot x) V(x, y)$$

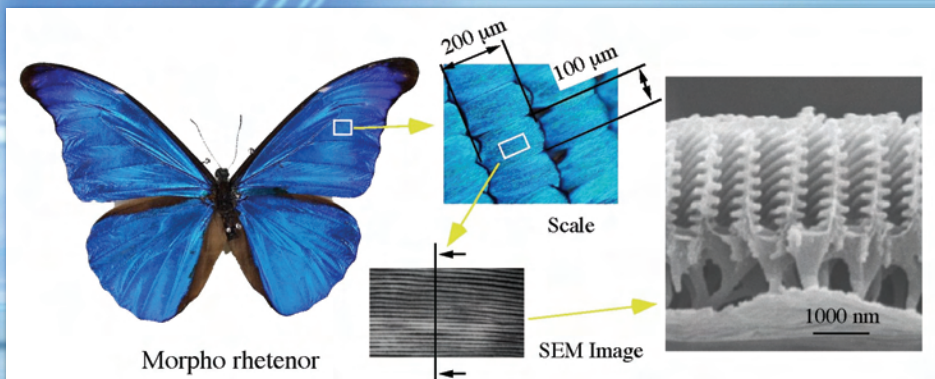
$$V(x, y) = V(x + L, y) \quad : \text{periodic function}$$

解析手法の妥当性の検討

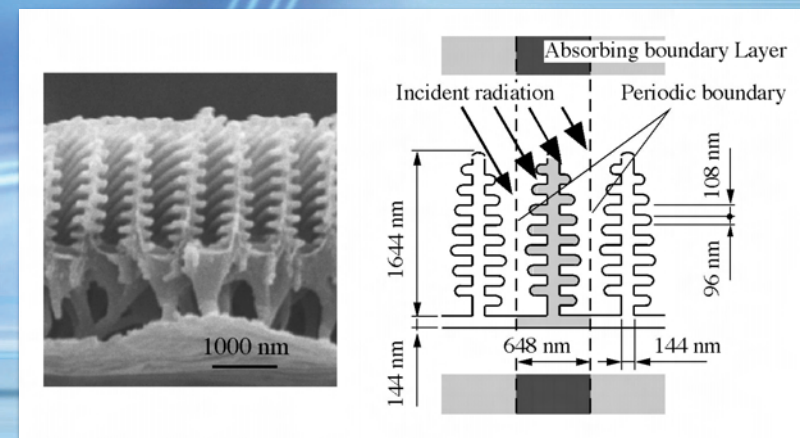


平行平板による光の反射・透過

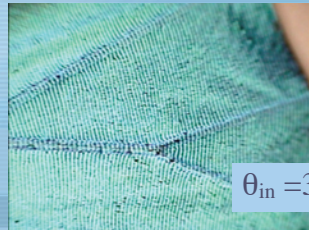
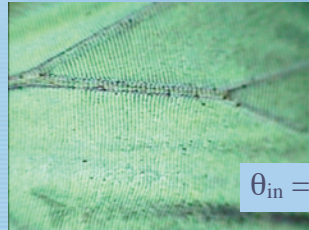
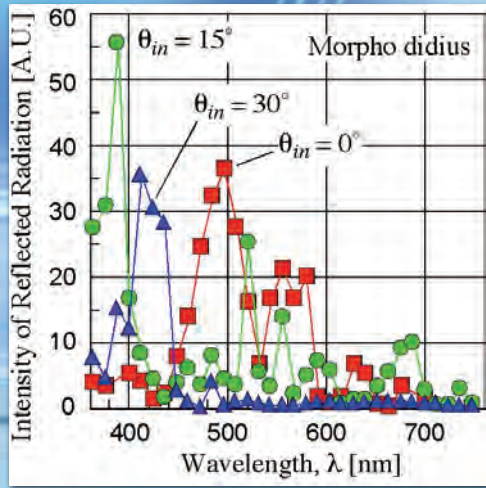
Morpho蝶鱗粉とその微細周期構造



Morpho蝶鱗粉の解析モデル



解析結果および観察結果



研究背景 (宮崎先生)

■ 表面微細周期構造

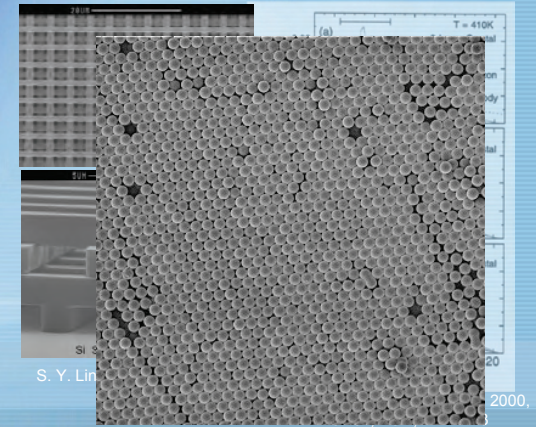
熱ふく射特性の波長選択的制御

■ 微細加工技術

大面積への作製は困難

■ コロイド結晶

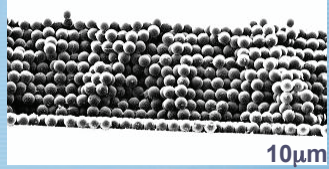
誘電体微小球を配列した構造
大面積に素早く容易に作製できる



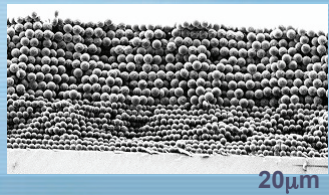
結晶構造

走査型イオン顕微鏡 (JFIB-2300, SII)

■ 単一粒径粒子層を積層
2μmと3μmでそれぞれ3, 5, 8, 10層



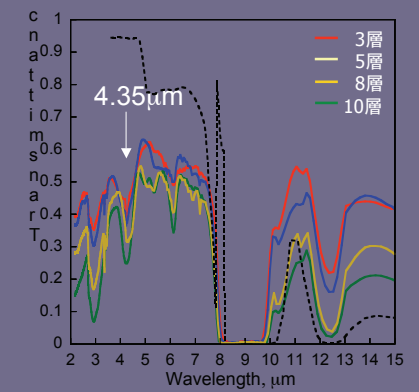
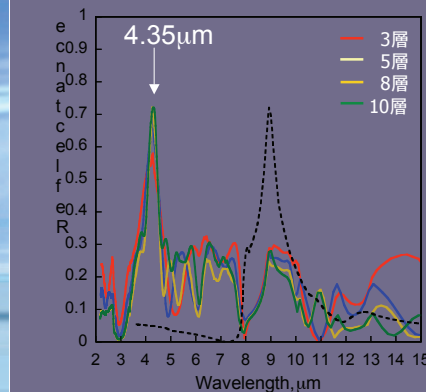
■ 異径粒子層を積層



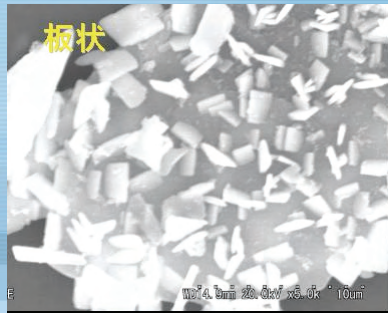
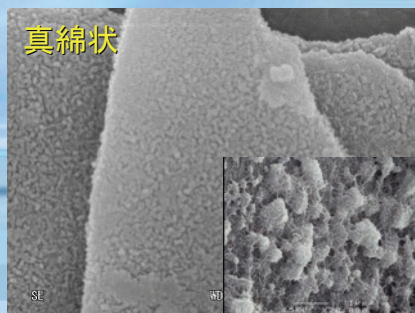
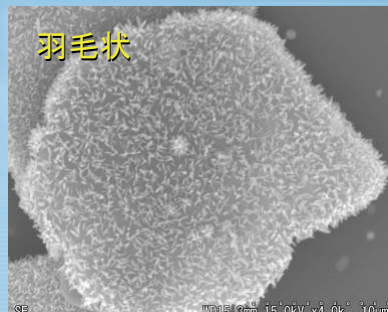
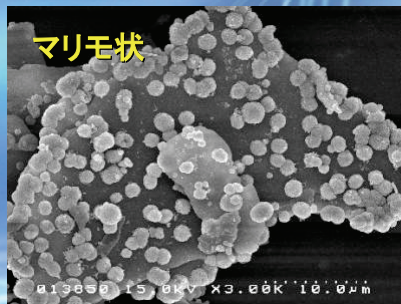
最密構造

測定結果

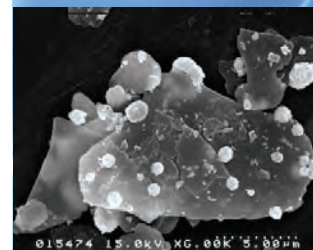
粒径: 2μm



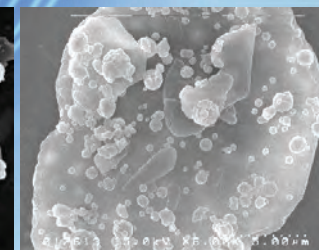
複合粉体 (資生堂)



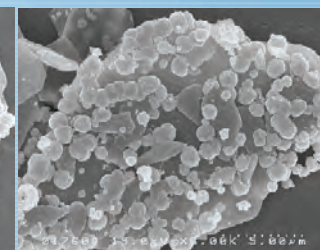
被覆率の制御 (資生堂)



ca 3 %



ca 9 %



ca 30 %

The covering area

Morphotex (帝人)

羽のマイクロ構造

生きた宝石と呼ばれるモルフォ蝶、美しいコバルトブルーの発色は羽の膜の複雑な構造がもたらしています。

モルフォ蝶断面図

Why Ecology? 人に、地球にやさしい

モルフォテックスは光発色繊維のため、染料や顔料が不要です。染色工程を省くためにエネルギーの浪費を抑え、産業廃棄物排出の削減にもつながります。

レッド クリーン ブルー

入射光 反射光(干渉) 透過光

精製

薄膜干渉理論

テイジンのナノテクノロジーを駆使して、モルフォ蝶の発色原理をナイロンとポリエステル薄膜干渉理論におきかえ、光干渉による新素材の開発に成功しました。

How Technology? ナノテクノロジーによる高度な多層構造

繊維断面

15~17ミクロン

【比率】
ナイロン 約15%
ポリエステル 約85%

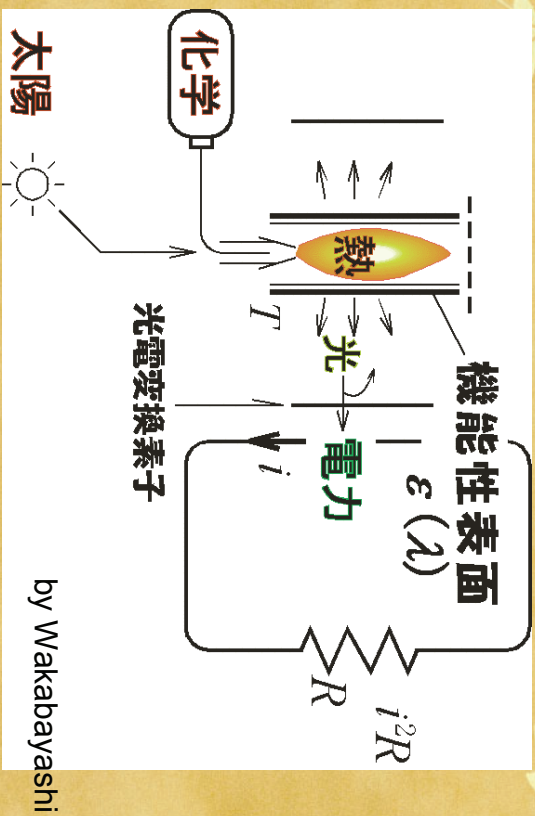
61層

ナイロン
ポリエステル

2層交互積層部拡大

周期的微細構造をもつ表面の放射性質について

もし、熱ふく射が制御できれば..

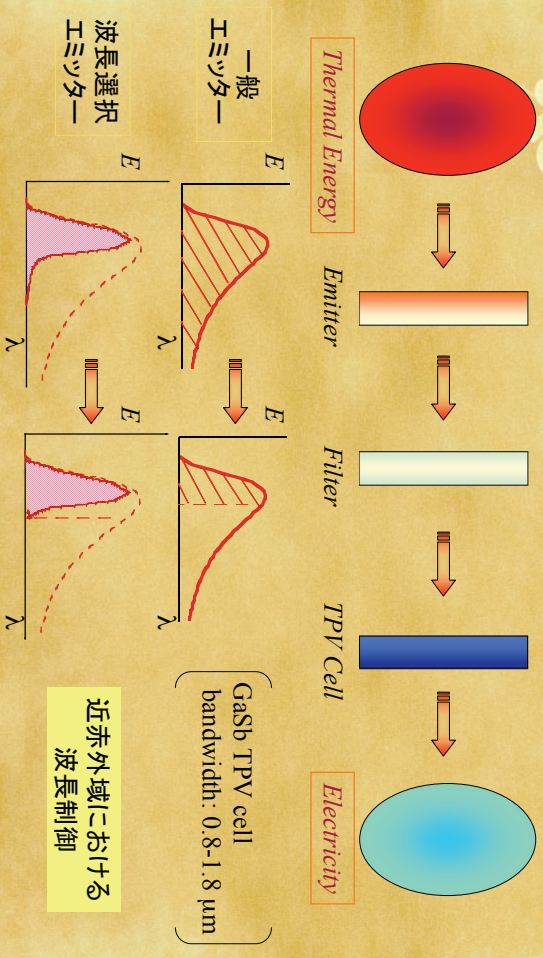


放射される熱ふく射の干渉

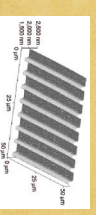
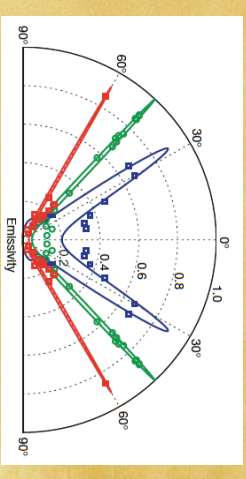
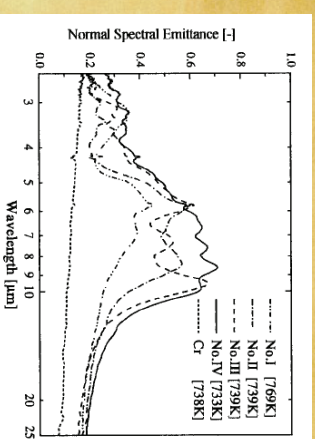
- ☞ 円山らの実験, 解析 (格子構造)
波長依存性, Applied Physics Letter (2001)
- ☞ J-J Greffetらの研究 (溝構造), Nature (2002)
干渉の結果と見られる指向性, 波長依存性
- ☞ 牧野, 若林らの実験 (溝構造)
伝熱シンポジウム (2005)
- ☞ 亀谷, 花村らの解析, 最近の実験 (格子構造)
伝熱シンポ, 熱工学コンファレンス (2005)
- ☞ 山田, 2005年熱物性シンポ
- ☞ 亀谷, 花村, 2006年伝熱シンポ

TPV (Thermophotovoltaic) system

by Kameya



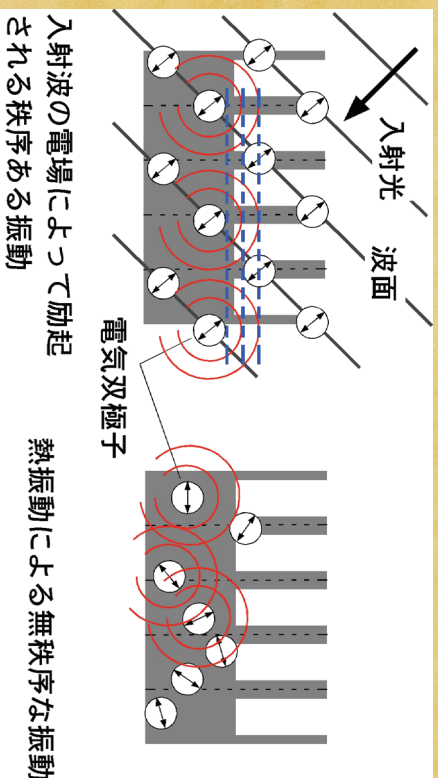
それぞれの背景 空洞共鳴, 可干渉長さ



円山重直, et al., Appl. Phys. Lett., 79(2001)

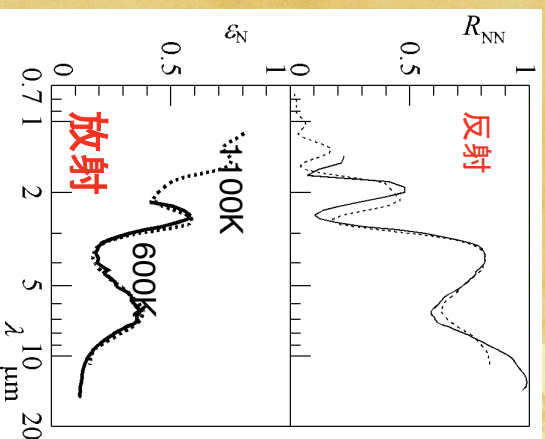
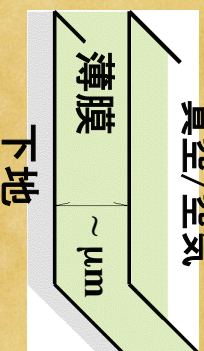
Greffet, J.J., et al., Nature, 416(2002)

ふく射の干渉について — 反射と放射の違い —

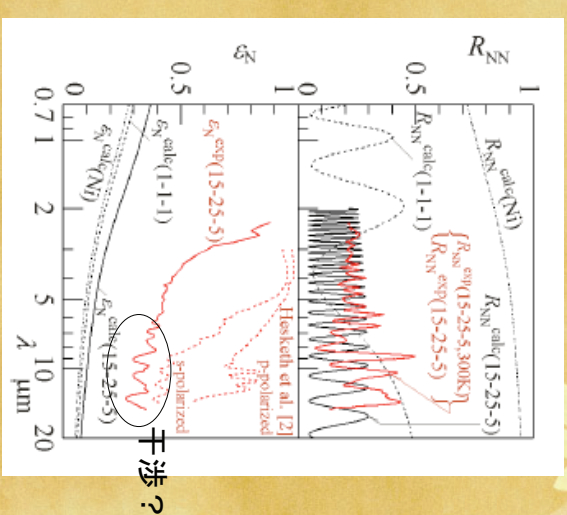
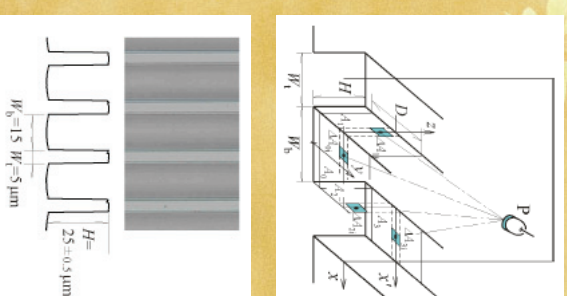


とても干渉が生じるとは思えない...

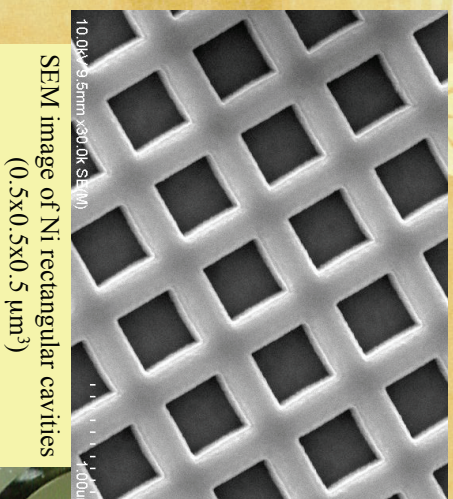
牧野らの実験 (薄膜系)



牧野らの実験 (格子系)



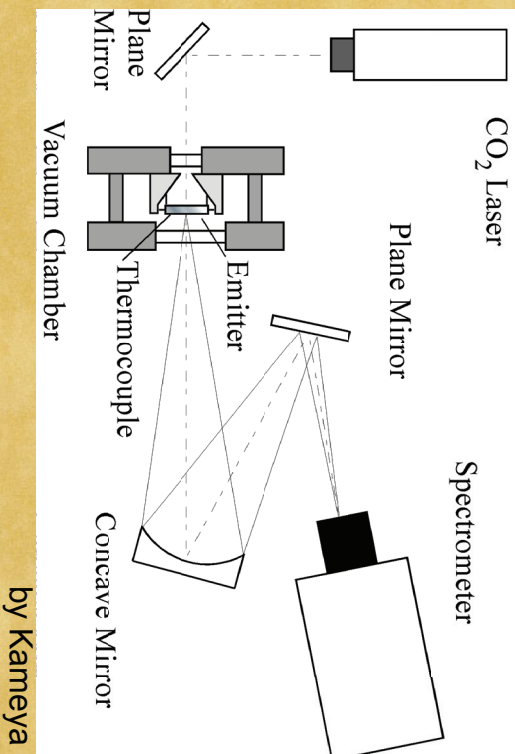
亀谷, 花村らの実験 Ni エミッター



Size of substrate: $\phi 25 \text{ mm}$
Microstructured surface: $2.0 \times 2.0 \text{ mm}^2$



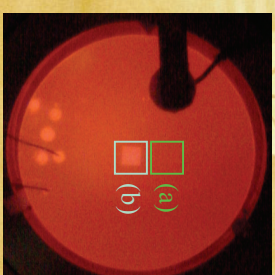
実験装置



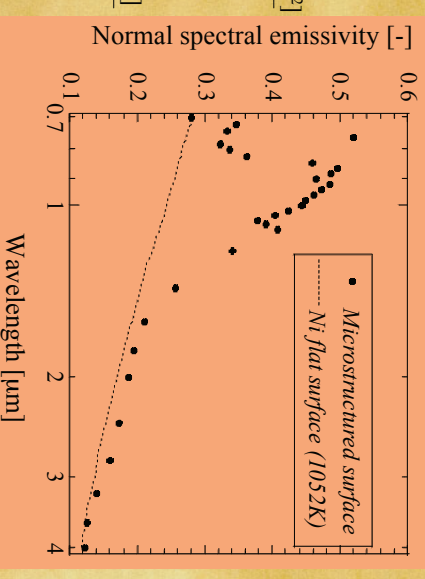
by Kameya

垂直単色放射率の計測結果

by Kameya



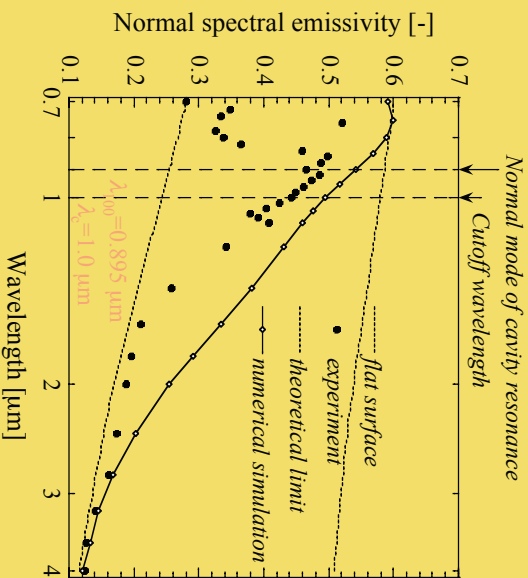
Microstructured surface	2 x 2	Area [mm ²]
Measured surface	4 x 4	
(a) Flat	$V_{flat}(\lambda, T)$	Detector output [V]
(b) Including microstructured area	$V_{ms}(\lambda, T)$	



$$\left[\begin{array}{l} \epsilon_{N,ms}^{measured}(\lambda, T) = \epsilon_{N,flat}^{calculated}(\lambda, T) \left(4 \frac{V_{ms}(\lambda, T)}{V_{flat}(\lambda, T)} - 3 \right) \\ \epsilon_{N,flat}^{calculated}(\lambda, T) : \text{牧野・川崎・国友、機論B 47, 1818(1981)} \end{array} \right]$$

放射スペクトル解析結果

by Kameya

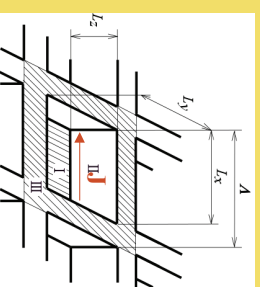


Wavelengths corresponding to cavity resonance

$$\lambda_{nm} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{2l+1}{2L_z}\right)^2}}$$

waveguide

$$\lambda_{nm} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2}}$$



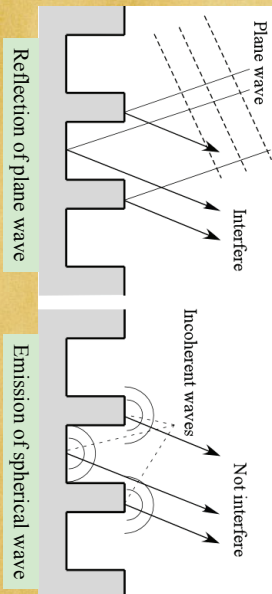
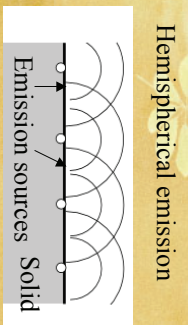
解析的検討について

1. 干渉のメカニズムの検討
2. 機能性表面のデザインツール
→ 大面積の機能性表面の実現

現状

- ☞ 解析ごとに異なる結果？
- ☞ 十分に実験結果を予測できていない
- ☞ 放射源の与え方
- ☞ 遠方電界への展開
- ☞ 複雑形状への適応性

亀谷，花村らの解析 キャビティ内での共鳴（干渉）



Maxwell's equations

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}^s + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Emission source

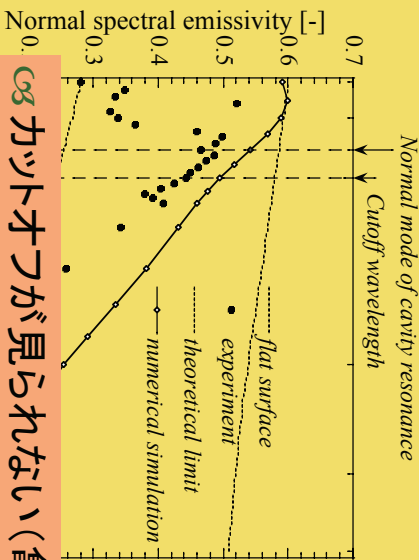
Equations solved using CIP method.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} \mp \epsilon_{ijk} \frac{\partial}{\partial x_j} \right) (E_j \pm B_k) = 0$$

$$\frac{\partial E_j^*}{\partial t} + J_j^* = 0$$

Poynting vector: $\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{E} \times \mathbf{B})$

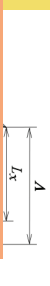
放射スペクトル解析結果(前出) by Kameya



Wavelengths corresponding to cavity resonance

$$\lambda_{\text{cavity}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{2l+1}{2L_z}\right)^2}}$$

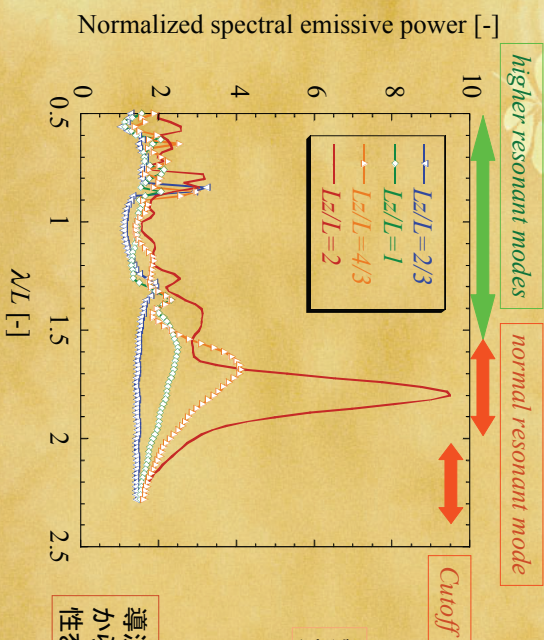
$$\lambda_{\text{waveguide}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2}}$$



0. カットオフが見られない(亀谷さんの悩み)
0. 空洞内での波の干渉は考慮しているが、隣接する空洞との干渉は考えていない。

キャビティからの放射スペクトル特性解析

by Kameya

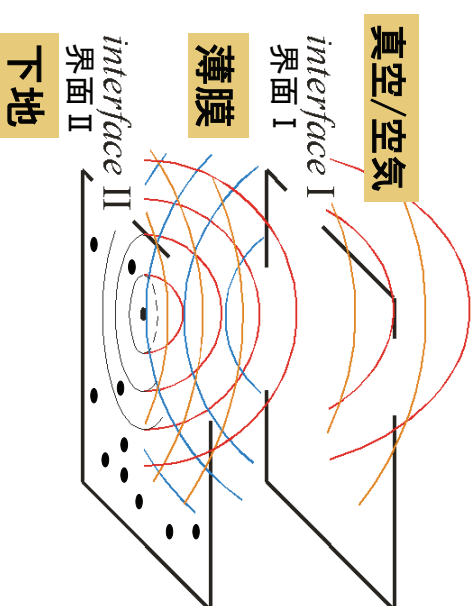


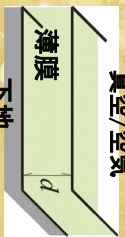
矩形キャビティ内から放射された球面波

導波管及び空洞共振の理論から予測されるスペクトル特性を示す

牧野，若林らの解析

observation 観測点





$T = 700 \text{ K}$
 $d = 0.3 \text{ } \mu\text{m}$
 $\tilde{n}_1 = 2.0 + i0.01$: (=const.) ... 薄膜
 $\tilde{n}_2 = \tilde{n}_2(\lambda, T) = n_2 + ik_2$: ref. [Makino et al.] ... 下地
 $\theta_0 = 15^\circ$

Electromagnetic field on film surface :

$$\hat{E}_{q0}(\mathbf{r}') = \frac{2\pi}{\exp(-\mathbf{k}_{1, \text{imag}} \cdot \mathbf{r}'_0)} \sum_{\mathbf{q}} \{ \mathbf{E}_{q0} \frac{\exp(i\mathbf{k}_{1, \text{real}} \cdot \mathbf{r}')}{\mathbf{k}_{1, \text{real}} \cdot \mathbf{r}'} (\hat{r}_{q(0)})^Y (\hat{r}_{q(2)})^Y (\hat{r}_{q(0)})^Z \}$$

$$|\mathbf{E}_{q0}|^2 = \frac{2\mu\omega}{k_{1n}} |\mathbf{S}_{q0}(\mathbf{r}_0)|^2 = \frac{1}{(2\pi)^2} 2\mu\omega k_{eq2} n^2 \frac{I_B}{2} \exp(-2k_{1r} r_0) r'^2 \Delta\Omega_{11}$$

q : for s- and p-

$\mathbf{S}_{q0}(\mathbf{r}_0)$: Polarization vector at point \mathbf{r}_0

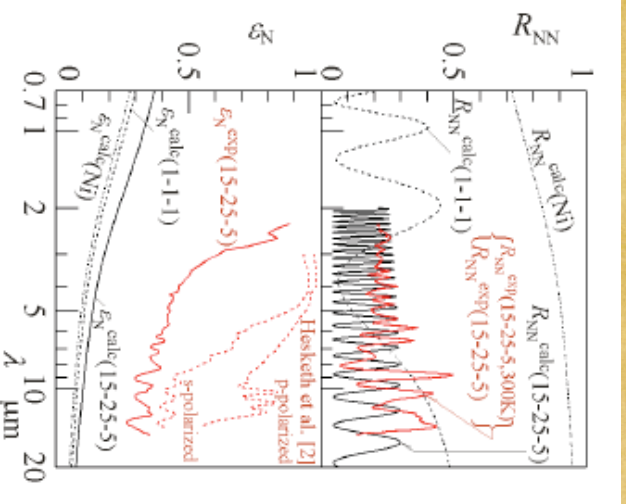
I_B : Intensity of blackbody radiation (Planck)

$\hat{r}_{q(0)}$ $\hat{r}_{q(2)}$ $\hat{r}_{q(1)}$: Fresnel's complex coefficients of refraction and transmission

Emittance : $\epsilon^{(s+p), \text{film}}(\lambda, \theta_0)$

$$\text{放射率} = \frac{\cos\theta_0}{\cos^3\theta_1} \frac{k^2 n_1}{2} \sum_{\mathbf{q}} \sum_{\mathbf{l}} \left\{ \sqrt{\epsilon_{q2l} r'} \cos\theta_{1l} \frac{\exp(i\mathbf{k}_{1, \text{real}} \cdot \mathbf{r}')}{2l+1} \frac{\exp(i\mathbf{k}_{1, \text{real}} \cdot \mathbf{r}')}{\mathbf{k}_{1, \text{real}} \cdot \mathbf{r}'} (\hat{r}_{q(0)})^Y (\hat{r}_{q(2)})^Y (\hat{r}_{q(0)})^Z \right\}^2$$

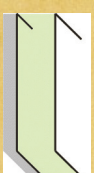
格子系



by Wakabayashi

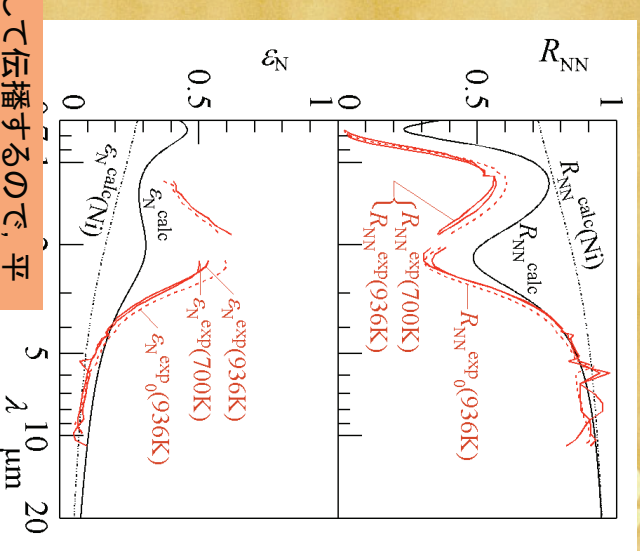
•実験に見られる干渉が解析に見られない

薄膜系



by Wakabayashi

放射ふく射は球面波として伝播するので、平面波のように明確な干渉が観察されない？



有限要素法による山田のモデル

Maxwell Equations

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

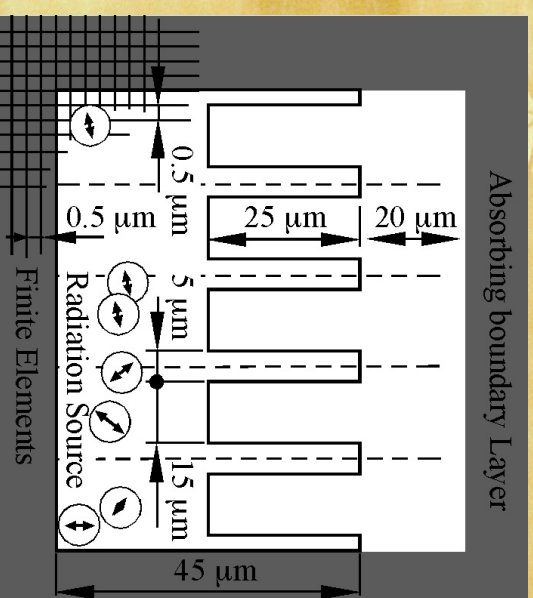
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

Helmholtz Equation

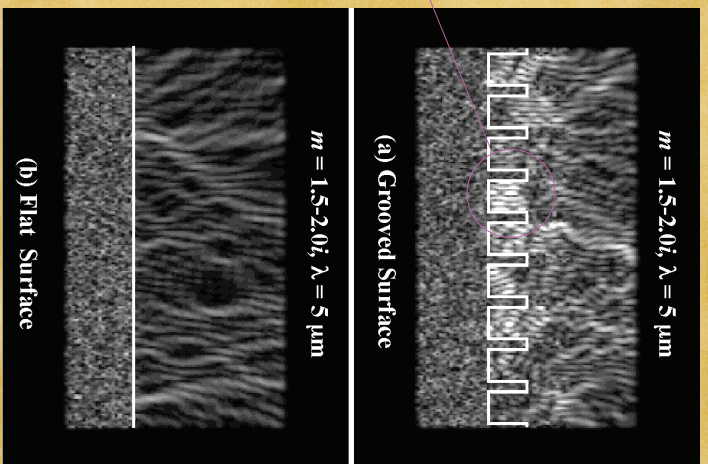
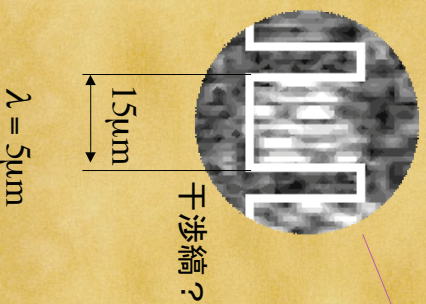
$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0$$

$$k = 2\pi m / \lambda_0$$



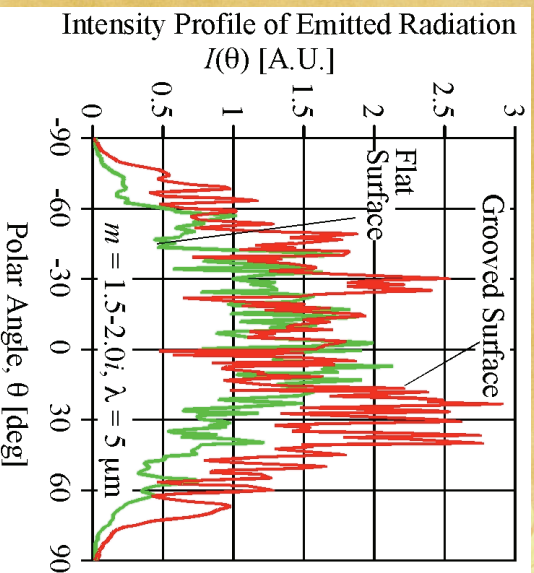
近接電場

電界強さの絶対値 $|E_z|$



遠方電場

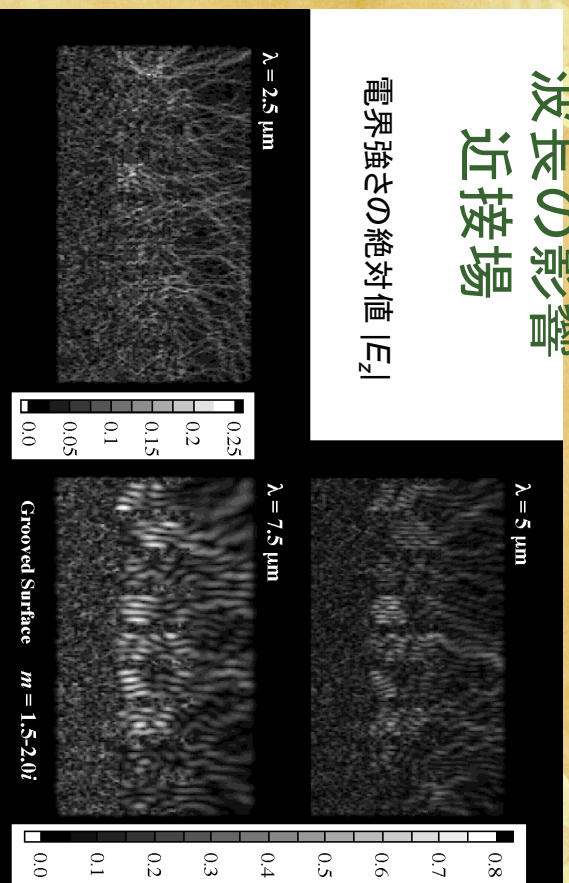
ランダムに振動する電気双極子を想定し、試行ごとに異なる振動を与え、それらの平均を取る。



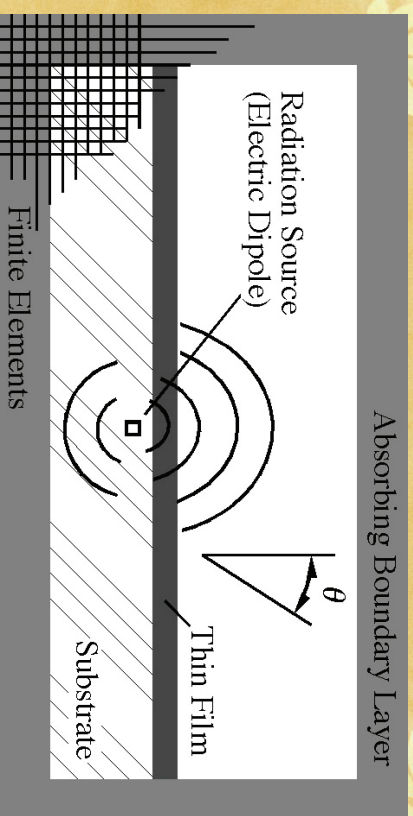
重要な問題
 これまでの解析手法では、金属の指向放射性が表現できていない

波長の影響 近接場

電界強さの絶対値 $|E_z|$

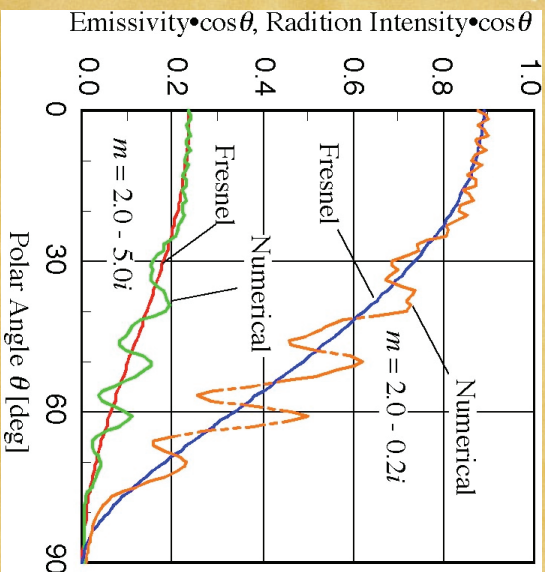


重ね合わせ手法の変更

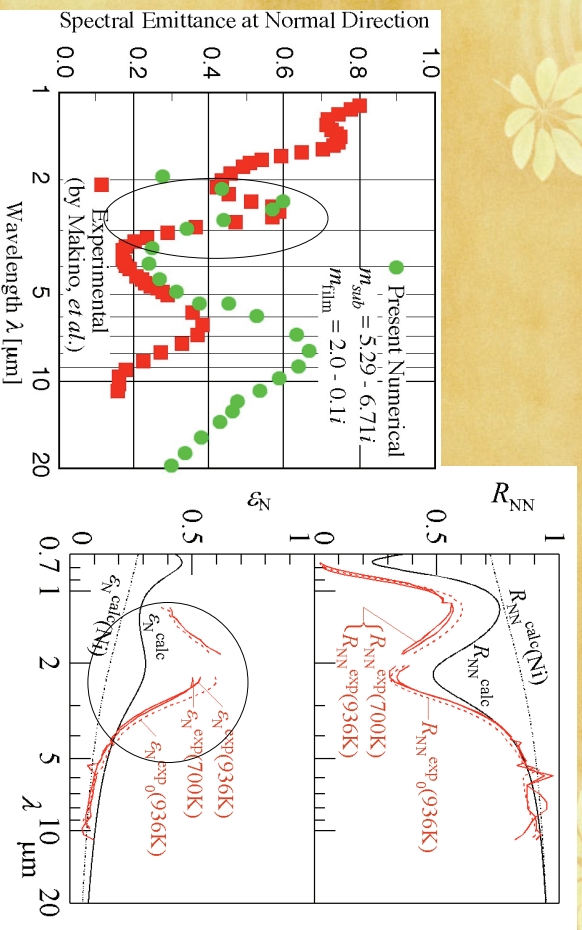


単一の電気双極子から放射されるふく射を、双極子の位置を変えながら、ふく射強さ(intensity)のレベルで重ね合わせる。
 ← 「瞬間ごとの放射ふく射の時間平均をとる」

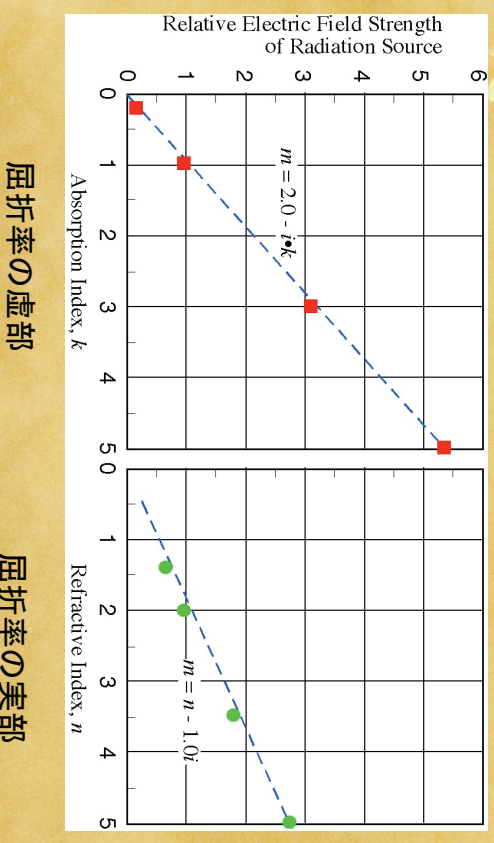
平滑な金属表面の指向性放射率 薄膜のない場合(妥当性の確認)



牧野, 若林らの実験結果との比較



放射源の電場強さと複素屈折率の関係



私自身のまとめ

- 〽️ ふく射の放射性質を予測するための有限要素解析を提案した. その結果,
 - 〽️ 平坦な金属面からの放射性質を予測することができた.
 - 〽️ 報告されている実験結果と比較して, 薄膜を持つ表面の放射の干渉をある程度予測できた.
- 今後の課題
- 〽️ プラズマの放射則と関連
 - 〽️ 高屈折率基板への対応
 - 〽️ TMモード(p偏光)の確認



放射性質全体のまとめ

- 周期的な微細構造, あるいは, 薄膜をもつ表面のふく射性質に関しては, 部分的には理解されている.
- 未だ, J-J Grefetらの, 溝構造について得られ
たふく射性質は理解できていない.
- 牧野, 若林らの薄膜系の放射性質についても,
十分に理解されていない.

結論として, 隣接の複数の双極子は, 同期して振動し, それらの放射するふく射は互いに可干渉的になるかもしれない.