切断近似による偏光放射伝達の効率的計算法の開発

桃井裕広（千葉大学大学院）

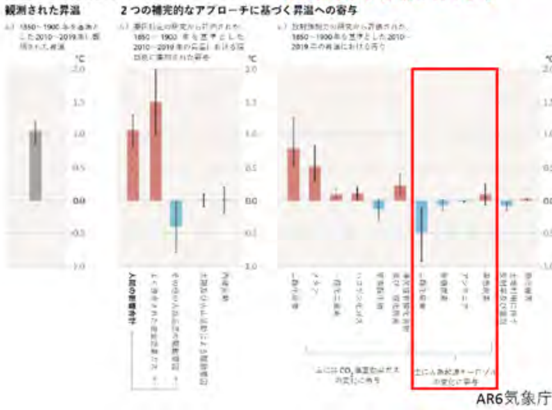
入江仁士・中島映至・関口美保

開発論文：

Momoi et al., 2022, https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107976

地球温暖化の要因

観測された昇温は人間活動による排出により引き起こされているが、温室効果ガスによる**昇温の一部はエーロゾルによる冷却効果で部分的に抑制されている**



AR6気象庁暫定訳

放射観測からの物理量の推定

エアロゾル（や水蒸気など）の大気リモートセンシング

・・・地上・衛星から輝度観測して物理量を得る

放射伝達モデルの精度が物理量の推定に影響を与える

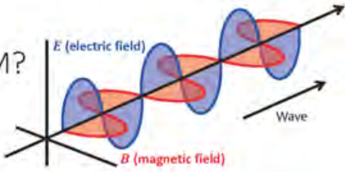
⇨ 近年、偏光を加味したベクトル放射伝達の利用が進んでいる

しかし、ベクトル放射伝達のビックデータ処理にはスパコンが必要であり、高速に計算する理論が求められている [e.g., Sinyuk et al., 20]

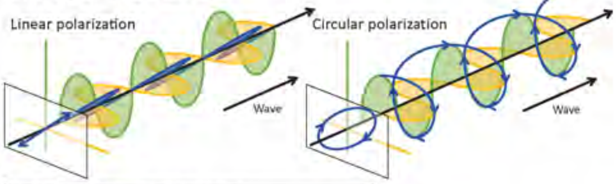
⇨サブテーマ1

Scalar & vector RTM?

放射（電磁波）
- 電場と磁場で構成される
- 電場と磁場は垂直である



放射（電場）の重ね合わせ

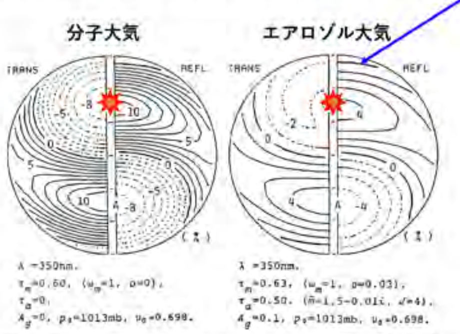


放射輝度は"偏光"成分がある
- Scalar RTM: 放射過程を無偏光と近似する
- Vector RTM: 放射過程に偏光が含まれる

天空輝度の偏光効果

[Ogawa et al., 1989]

$$u_{\mathrm{vector}} = u_{\mathrm{scalar}}[1 + \Delta_{\mathrm{Pol}}]$$



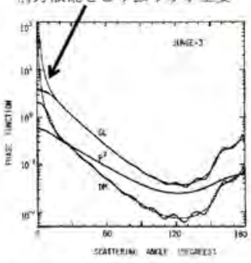
1. Rayleigh散乱が強いUVで偏光効果が大きくなる（~10%）
2. エアロゾルが多いと偏光の影響が弱まる

高速演算のアイデア

Scalar-RTM, Vector-RTM

Point

前方散乱をどう扱うかが重要



放射輝度：$u = u^* + \hat{u}$

Truncated radiance

Forward peak contribution

- δ-S (Potter, 1970; Mitrescu & Stephens, 2004; Waquet & Herman, 2019; etc....)
  ⇨ 前方(Θ_{tr})のピークを切り取る手法
  使用グループ：GRASP (France)
- δ-fit (Hu+, 2000; Hioki+, 2016)
  ⇨ 前方(Θ_{tr})以外の位相関数を級数展開する手法
  使用グループ：TAMU (USA)
- δ-M (Wiscombe, 1977)
  Scalar: IMS (Nakajima & Tanaka, 1988)
  Vector: P^-IMS (Momoi, Irie, Nakajima et al., 2022a)
  ⇨ 前方ピークを球関数（ルジャンドル関数）で近似
  使用グループ：OpenCLASTR (Japan), DISORT (USA)

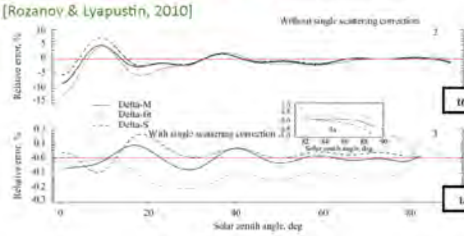
各手法のパフォーマンス

放射輝度：$u = u^* + \hat{u}$

Truncated radiance　Forward peak contribution

δ-fit, δ-SはSystematic errorを引き起こす可能性がある
⇨本質的には、δ-fitとδ-Sは角運動量が保存されていないことに問題がある
⇨δ-Mはルジャンドル展開をすることで角運動量が保存される
δ-M法が最良の手法である [Nakajima & Tanaka, 88; Rozanov & Lyapustin, 10]

[Rozanov & Lyapustin, 2010]



$u^* = u_{\mathrm{Ref}}[1+\varepsilon]$

Single scattering correction

$u^* + \hat{u}_1 = u_{\mathrm{Ref}}[1+\varepsilon]$

DOM + δ-Mによる放射計算の課題

○放射輝度：$u = u^*$ DOM

○位相関数：$P(\Omega,\Omega') = P^*(\Omega,\Omega') + \hat{P}(\Omega,\Omega')$

Spherical harmonics　Truncated P　δ-M truncation　Forward peak

●u^*：DOM + δ-M

$$u^*(\tau^*,\Omega) = \sum_{m=0}^{M^*-1} u_m^*(\tau^*,\mu)\cos(m\phi)$$

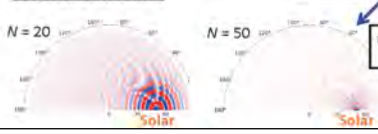
ガウス求積($N = M^*/2$)を使って解くことが可能
⇨計算時間は N^{2-3} で上がっていく

Reference radiance: Large N + 通常の一次散乱補正 (MS; Nakajima & Tanaka, 1988)
- エアロゾル大気: $N \sim 100$ (dust case)
- 雲大気: $N \gg 100$

⇨計算時間は現実的ではない！！

Gibbs型の角振動が生じる
⇨補正が必要

e.x.) dust aerosol case



$u^* = u_{\mathrm{Ref}}[1+\varepsilon]$

u_{Ref} was given by $N = 100$ with MS

Scalar (Nakajima & Tanaka, 1988)　Vector This study

IMS & P^n-IMS理論

(Improved Multiple & Single scattering approximation)

by n-th order multiple scattering correction of the forward Peak)

○放射輝度：$u = u^* + \hat{u}$
DOM　P^n-IMS

○Phase matrix：$P(\Omega,\Omega') = P^*(\Omega,\Omega') + \hat{P}(\Omega,\Omega')$
Truncated P　Forward peak

●$\hat{u}$：IMS/P^n-IMS理論の導入：perturbed RTEを逐次散乱近似による定式化

$$-\mu\frac{d\hat{u}(\tau,\Omega)}{d\tau} = -\mu\left[\frac{du(\tau,\Omega)}{d\tau} - \frac{du^*(\tau,\Omega)}{d\tau}\right]$$

$\hat{u} = \hat{u}_1 + \hat{u}_2 + \hat{u}_3 + \cdots$：逐次散乱近似

$\hat{u}_1 = \bar{\omega}\hat{P}F_0h_1(\tau,\mu^*,\mu_0^*)$ → TMS/P^1-IMS

$\hat{u}_2 = (1-f\omega)\bar{\omega}^2[\hat{P}^2 - 2\hat{P}]F_0h_2(\tau,\mu,\mu_0^*,\mu_0^*)$ → IMS/P^2-IMS

$\hat{u}_n = (1-f\omega)^{n-1}\bar{\omega}^n[\hat{P}^n - 2\hat{P}^{n-1} + \hat{P}^{n-2}]F_0h_n(\tau)\quad (n \ge 3)$

定式化：
- Scalar RTM & **2nd order**: TMS/IMS
  : Nakajima & Tanaka [1988]
- Vector RTM & ***n*-th order**: P^n-IMS
  : This study, Momoi+ [2022a]

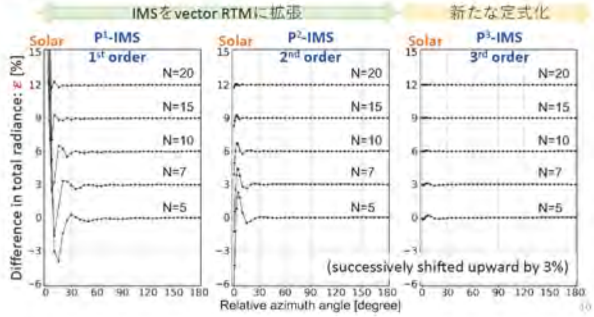
P^n-IMS理論の精度 (dust case)

[Momoi et al., 2022a]

$M^* = 2N$

$u^* + \hat{u} = u_{\mathrm{Ref}}[1+\varepsilon]$

u_{Ref} was given by $N = 100$ with MS [Nakajima & Tanaka, 1988]

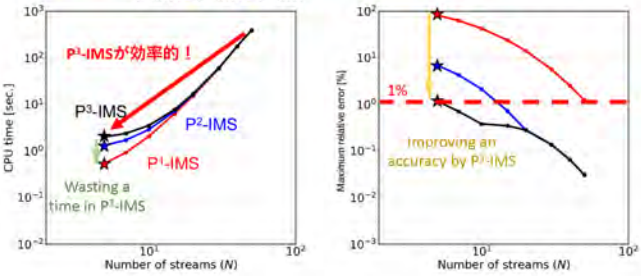


P^n-IMS理論のパフォーマンス

◆ P^n-IMSの導入により計算時間は増加する
P^1-IMS < P^2-IMS < P^3-IMS

◆ P^n-IMSの導入により計算精度は改善する
P^1-IMS > P^2-IMS > P^3-IMS

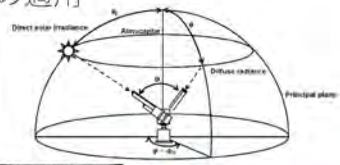
P^1-IMS ⇨ 1st order
P^2-IMS ⇨ 2nd order
P^3-IMS ⇨ 3rd order

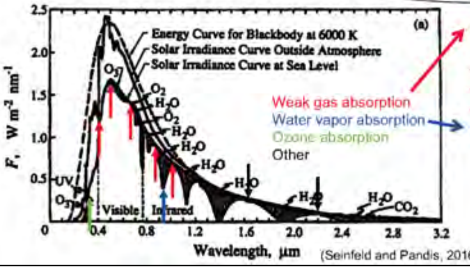


Intel FORTRAN compiler + Intel Math Kernel Library on DELL Precision 3640 (3.5 GHz/20 cores)

実観測（SKYNET）への適用

天空輝度観測
- 太陽直達光（1分値）
- 天空輝度分布（10分値）





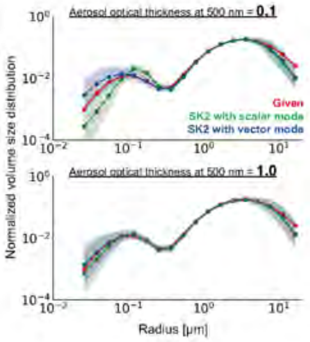
(Seinfeld and Pandis, 2016)

エアロゾルの推定
[e.g., Kudo, Momoi+, 21]
- 粒径分布
- 複素屈折率
- 非球形性 etc...

水蒸気量の推定
[Momoi+, 20]

偏光効果の解析への影響（粒径分布）

Retrieved by SKYMAP ver. 2.0 [Momoi et al., 2020, 2022b]



偏光効果を無視する（Scalar RTMで解析する）と、微小粒子の課題推計を引き起こす

AOTが増加すると・・・・

⇩

偏光効果を無視したモデルでも推定結果に大きな違いは見られない

P^n-IMS理論のまとめ

現状の課題

衛星・地上のデータ解析において**ベクトル放射伝達モデル**の利用が進むが、その解析にはスーパーコンピューターを必要とし、**効率化が必要**

解決方法

高精度演算可能なDOM法をベースに**高速**計算可能なSOS法をハイブリッドに組み合わせた**P^n-IMS理論**の開発を行った

結果

- SOS成分について**3次散乱**を扱うことで、エアロゾル大気下（AOT500 < 1）で**1%以内の輝度再現性**を保ち、**約187倍の高速化**を実現した
- 数値実験から、**偏光成分は1次散乱のみで十分な精度**（< 0.2%）が得られることを示した
- 本効率手法を利用した数値実験から、放射観測において、**偏光効果を無視すると微小粒子の過大推計を引き起こす**可能性があることが示された

将来展望

SKYNETやJAXAで利用されている**放射伝達コードRpSTAR**に組み込まれている（現在、OpenCLASTRからの公開中）