

遠赤外・テラヘルツ対応サブミリ集光器の開発

— ニュートリノ崩壊光検出に向けて —



Ryuki Kashiwagi^A, Yuji Takeuchi^A, Takashi Iida^A, Shinhong Kim^A, Katsumi Ogawa^A,
Takuo Yoshida^B, Takashi Furuya^B, Shuji Matsuura^C, and Kazuya Nakayama^D

^A University of Tsukuba, ^B University of Fukui, ^C Kwansei Gakuin University, ^D Chubu University

ニュートリノ振動はニュートリノ質量がゼロではないことを示している^{[1][2]}が、その絶対値は未だ不明である。

COBAND実験は、宇宙背景ニュートリノからの崩壊光子を高エネルギー分解能で検出することにより、ニュートリノ質量を明らかにすることを目指している。

1. COBAND 実験

重いニュートリノは光子を放出してより軽いニュートリノに崩壊する:

$$\nu_i \rightarrow \nu_j + \gamma$$

宇宙背景ニュートリノ崩壊光子エネルギー E_γ ^[3]

$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_{1,2}^2}{2m_3}$$

m_1, m_2, m_3 : ニュートリノ質量(軽いものから重いものの順)

予想される崩壊光子エネルギー: $\approx 25\text{meV}$

探索領域波長: $40\sim 80\mu\text{m}$

目的

➤ 宇宙ニュートリノ背景崩壊光測定

Method

➤ 超伝導検出器(Nb/AI-STJ、 $40\mu\text{m}$ 角)を使用
➤ ロケット実験により測定

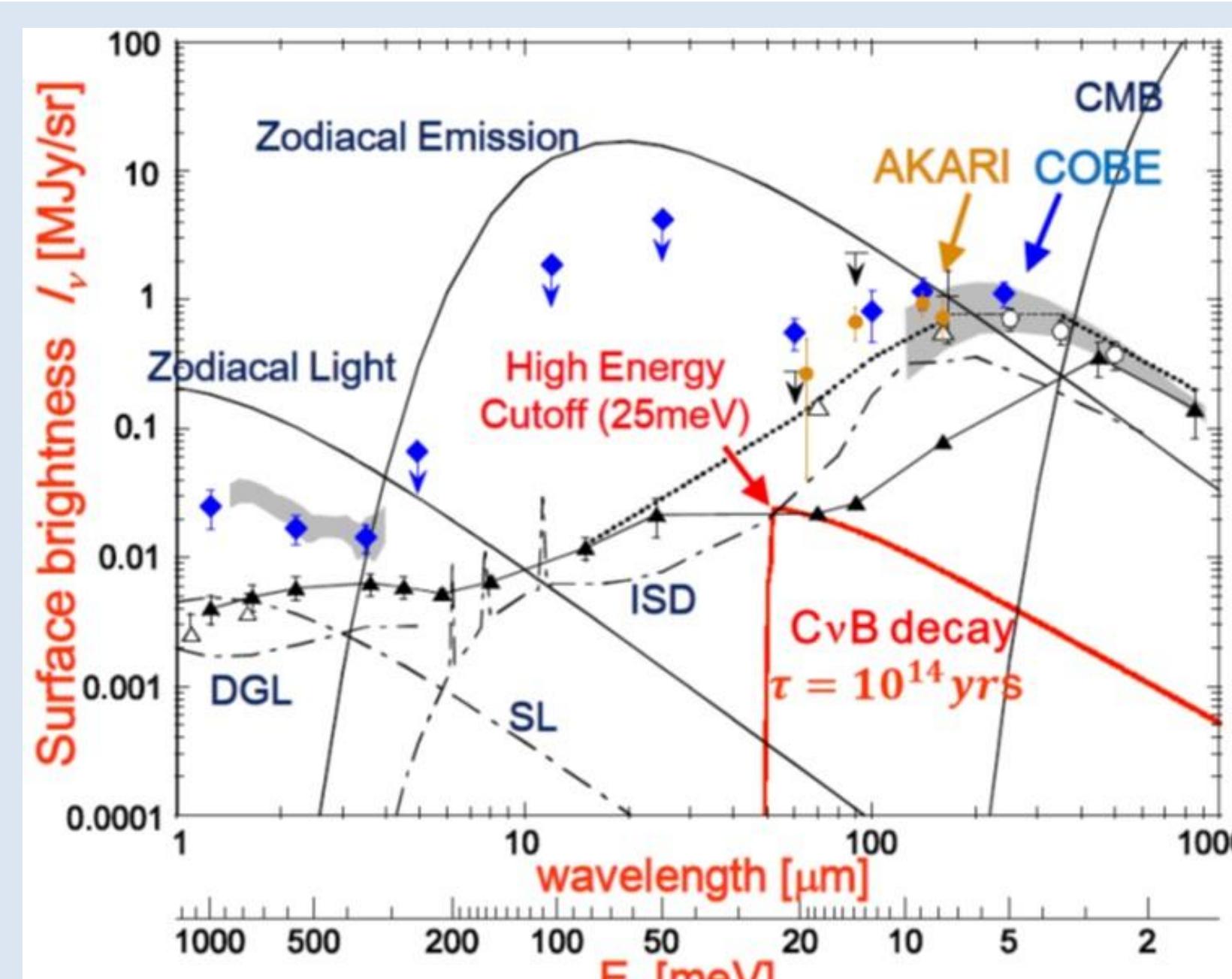


Fig. 1. ニュートリノ崩壊光の波長依存性

2. サブミリサイズ集光器

- 望遠鏡光学系によって集光された崩壊光のスポット径は $400\mu\text{m}\phi$ であり、検出器サイズに対して大きすぎる
→ 集光器を用いてスポット径を $60\mu\text{m}\phi$ まで集光する
- COBAND 光学系全体として要求される積算集光効率 $\geq 40\%$.
- 集光器の設計は、Code-V を用いた実光線追跡シミュレーションにより行った
- 集光器は、厚さ 2 mm の SiO_2 基板を超短パルスレーザー加工することで作製
- 内壁には真空蒸着により AI 薄膜(目標膜厚 500 nm)を成膜

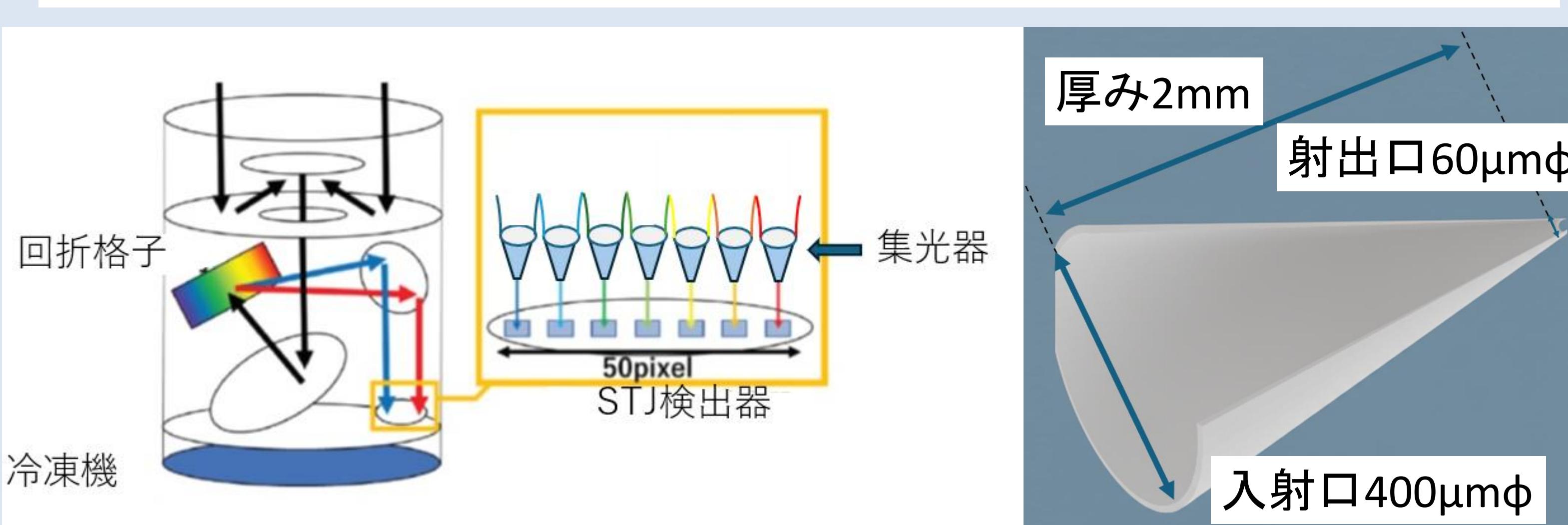


Fig. 2. COBAND 実験における光学系構成。

参考文献

- [1] Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration) : Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562.
- [2] S. Navas et al. (Particle Data Group) : The Review of Particle Physics, Phys. Rev. D 110 (2024) 030001.
- [3] S. H. Kim, K. Takemasa, Y. Takeuchi, and S. Matsuura : Search for Radiative Decays of Cosmic Background Neutrino using Cosmic Infrared Background Energy Spectrum, Journal of the Physical Society of Japan, 81 (2012) 024101.
- [4] R. Kashiwagi, " Development of a sub-millimeter-sized SiO_2 collector for far-infrared wavelengths to search for cosmic background neutrino decay light," Journal of the Japan Society of Infrared Science and Technology, vol. 35, no. 2, 2025 (in Japanese) in press.

3. 集光効率の評価

- 集光効率各入射角における出力光/入力光の比として定義
- 試作した集光器について、入射角依存性を測定し、実光線追跡シミュレーションとの比較を行った
- 測定は、 $0.4\mu\text{m}$ 、 $1.5\mu\text{m}$ 、 $9.6\mu\text{m}$ 、 $57.2\mu\text{m}$ の各波長で実施
- AI 薄膜の実効膜厚は、 χ^2 フィッティングにより評価
- $9\mu\text{m}$ 以下の波長における実効膜厚は、 $0.86 \pm 0.03\text{ nm}$ と見積もられた。
- AI 膜厚 500 nm において、40% の集光効率が達成可能であることが示された。

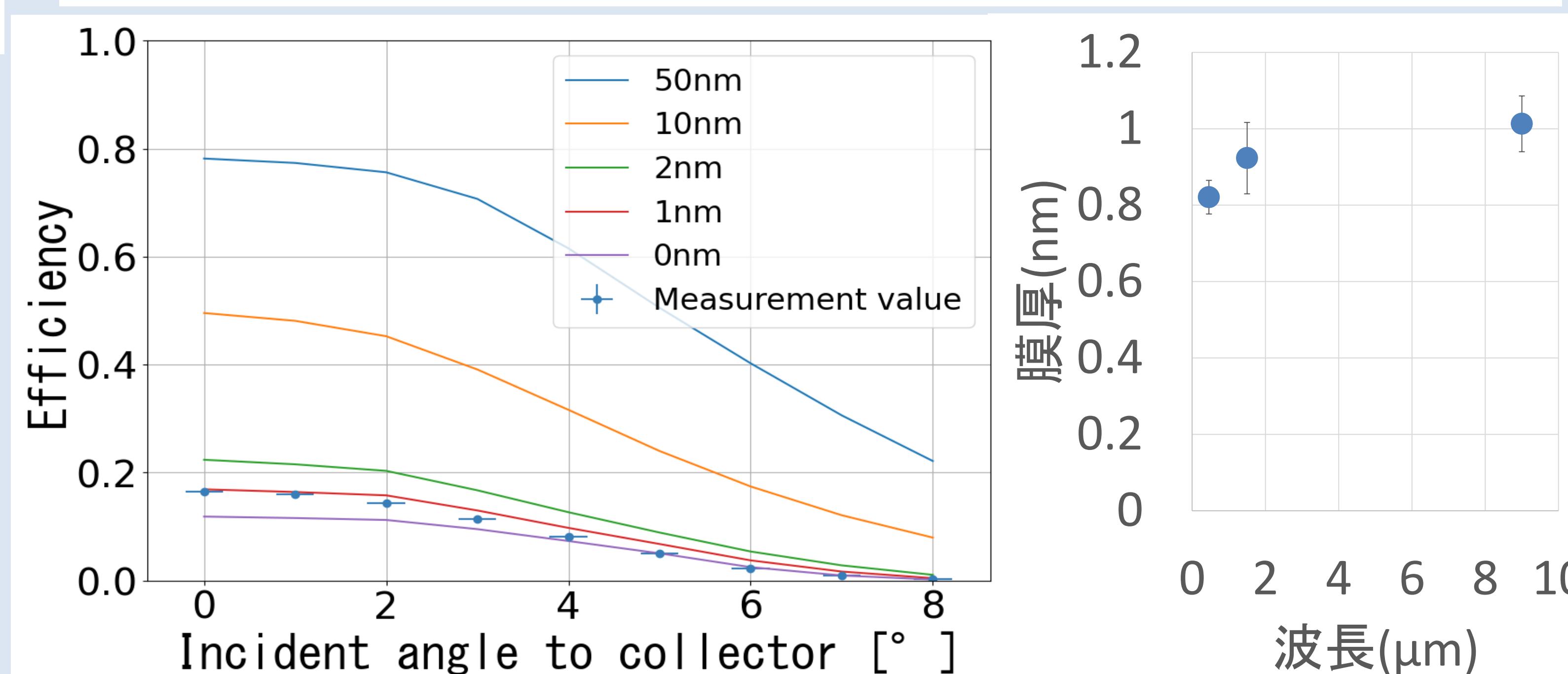


Fig. 3. $\lambda = 9.6\mu\text{m}$ における入射角依存集光効率(異なる AI 膜厚に対するシミュレーションとの比較)^[4]

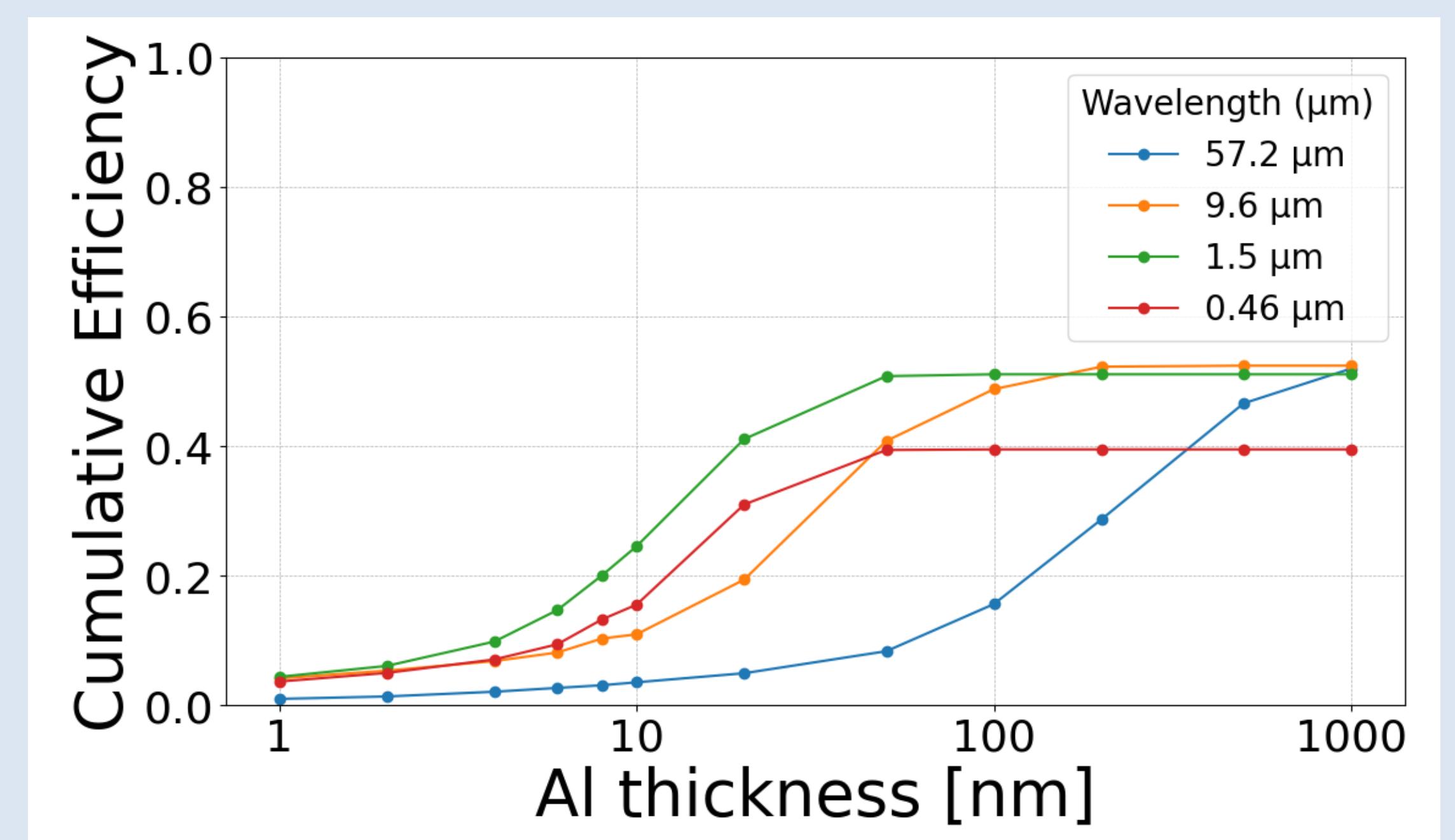


Fig. 4. 各波長において評価された AI 膜厚

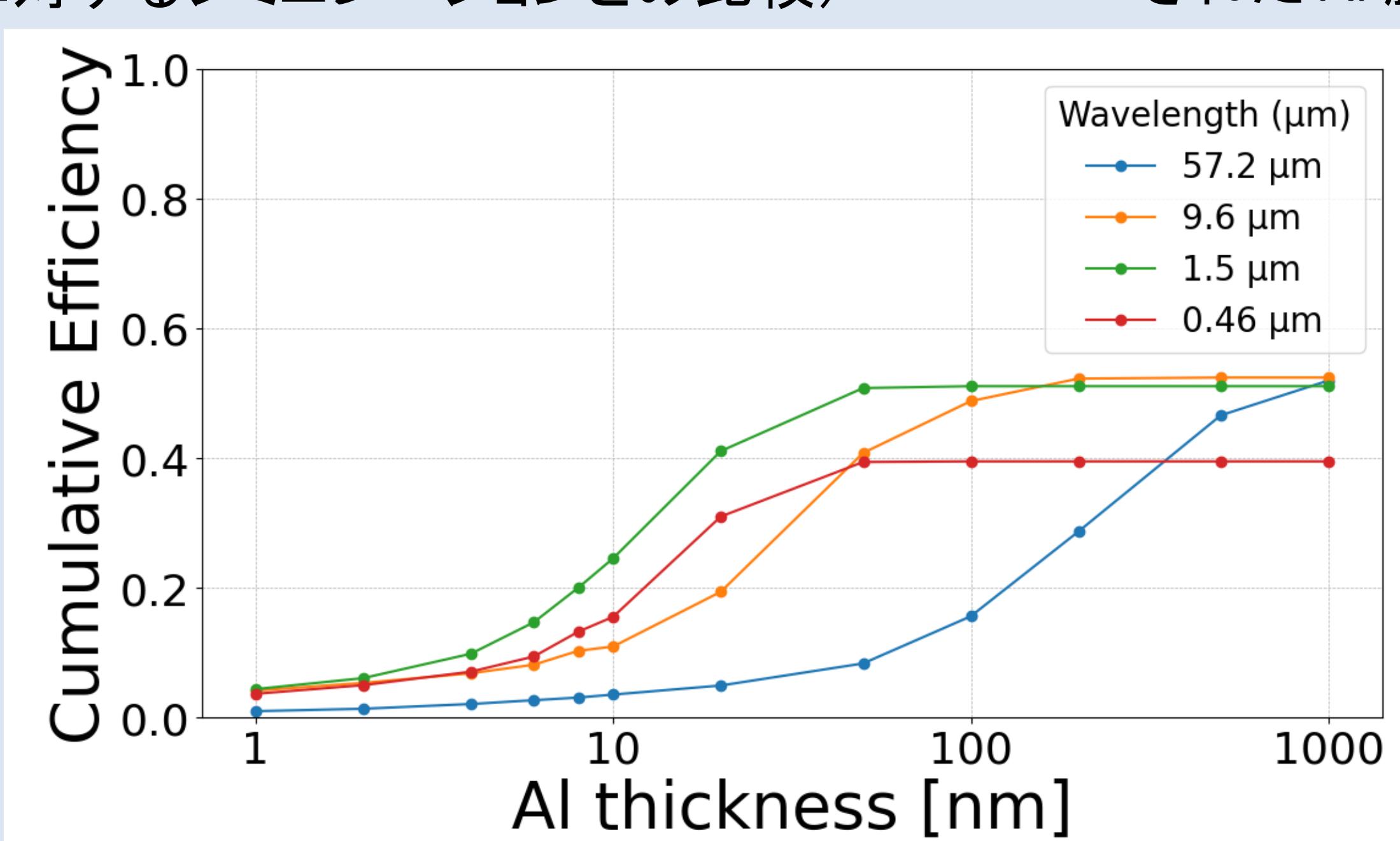


Fig. 5. $57.2\mu\text{m}$ 、 $9.6\mu\text{m}$ 、 $1.5\mu\text{m}$ 、 460 nm における AI 膜厚に対する積算集光効率

4. 今後の方針・THzへの応用

- 膜厚の問題を回避する方法として、現在、金属基板を加工した集光器を開発中
- また、電磁波としての挙動を検証するため、FDTD(有限差分時間領域法: Meep)解析を進めている。
- 本集光器は、遠赤外・テラヘルツ光源を小面積検出器へ高効率に集光できる可能性を示しており、分光やイメージングへの応用が期待される。

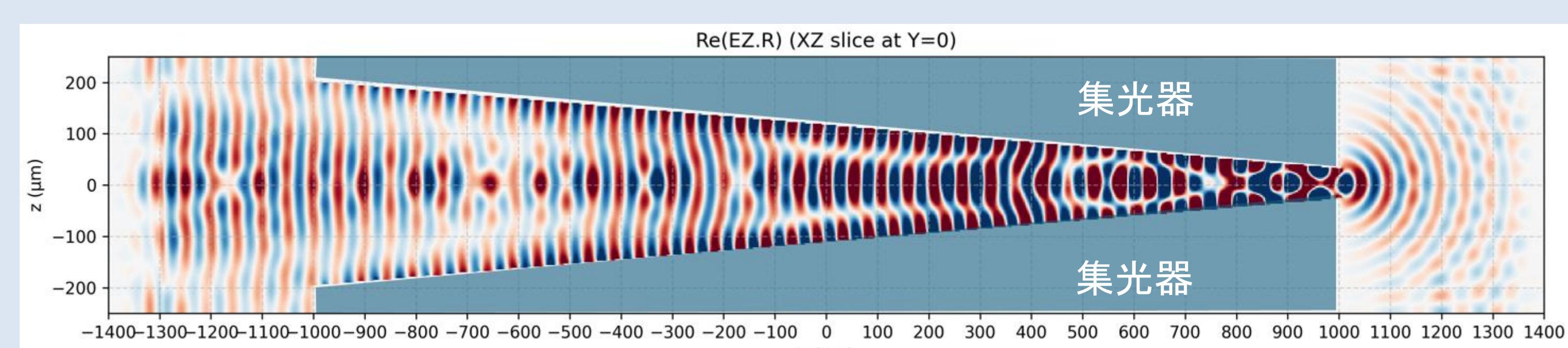


Fig. 6. 波長 $80\mu\text{m}$ の平面波照射に対する FDTD シミュレーション



Fig. 7. 波長 $80\mu\text{m}$ のパルス波照射に対する FDTD シミュレーション

本研究は、JST SPRING(JPMJSP2124) の支援を受けて実施された。