


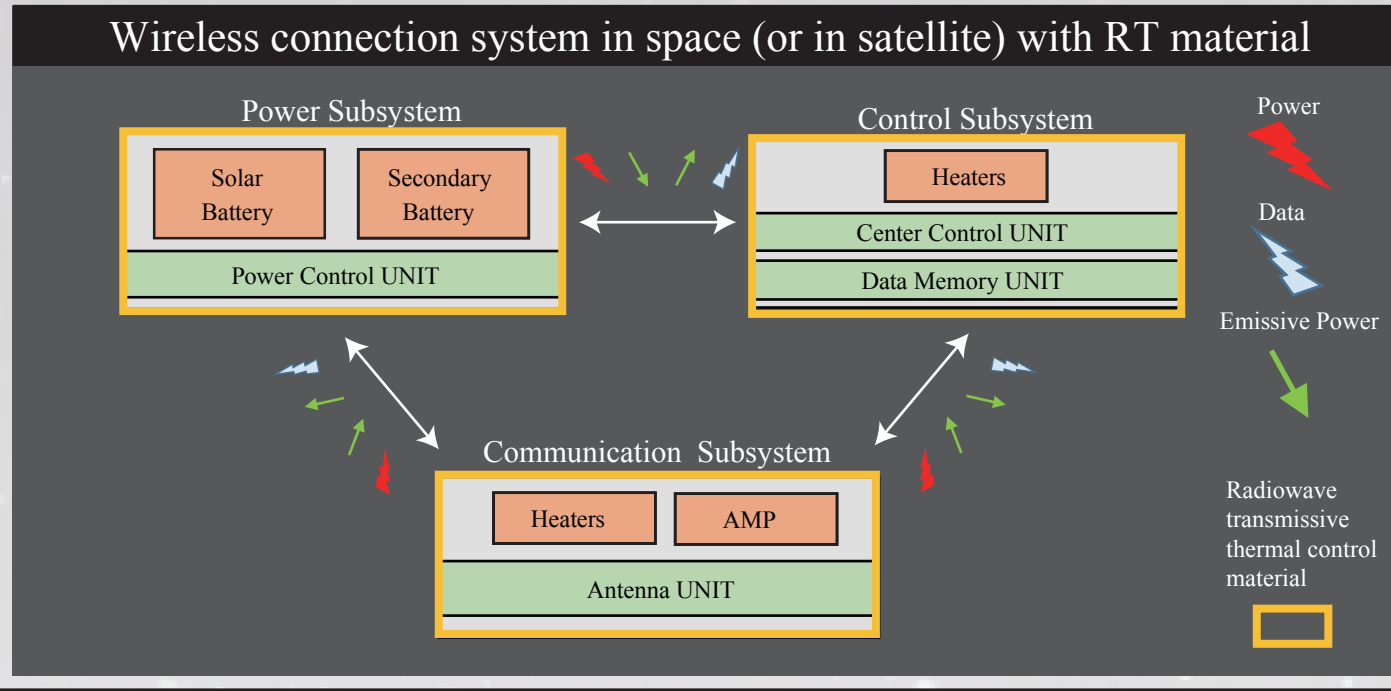
Introduction



月面，深宇宙探査等の低温環境における超高断熱システム

- ・越夜を経験する月面探査  
2週間の日陰（夜），月面表面温度-180℃
- ・深宇宙探査  
長期間の極低温環境，限られた電力リソース（RTGを使用しない場合）

アンテナをまるごと断熱材で覆うような超高断熱技術で，省電力化を目指す



ワイヤレス電力・信号伝送の熱制御

- ・人工衛星のワイヤレス化  
→ ハーネスを無くすことによる軽量化，サブシステムごとの衛星開発等が可能

自在に熱光学特性を選択できる電波透過型熱制御材によって，初めて電波透過と熱制御の両立を目指す

Structure and design method of COSF

誘電体多層膜を用いた電波透過型熱制御材COSF

- ・多層膜の光干渉を用いて，自在な熱光学特性を実現する
- ・フレキシブルな形状(曲面に使用可能)である
- ・金属を使用しないため，優れた電波透過性を備える

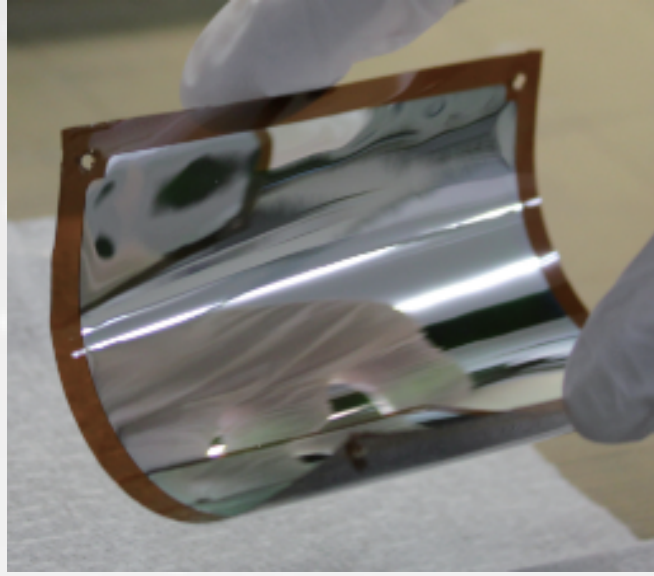


Fig.1 COSF (Controlled Optical Surface Film)

多層膜の設計方法

GA：Genetic Algorithm  
～生物の進化を模倣した確率的探索方法～

- ・0.26～100 μm の反射率を評価関数に従って制御することで，少ない膜数・膜厚で所望の熱光学特性 ( $\alpha_s, \epsilon_H$ ) を示す熱制御材を設計可能。

COSFの設計例，及びその自在な熱光学特性

- A. COSF-Absorber ( $\alpha_s = 0.91, \epsilon_N = 0.16$  ※設計値) 高太陽光吸収材
- B. COSF-IR ( $\epsilon_N = 0.12$  ※測定値) 電波透過型断熱材用，低放射率材
- C. COSF ( $\alpha_s = 0.05, \epsilon_N = 0.77$  ※測定値) 低太陽光吸収率材（かつ高放射率）

- ・低放射率材，低太陽光吸収率材，および誘電体バルク材を組み合わせることによって（Fig. 2）すべての熱光学特性が設計可能。

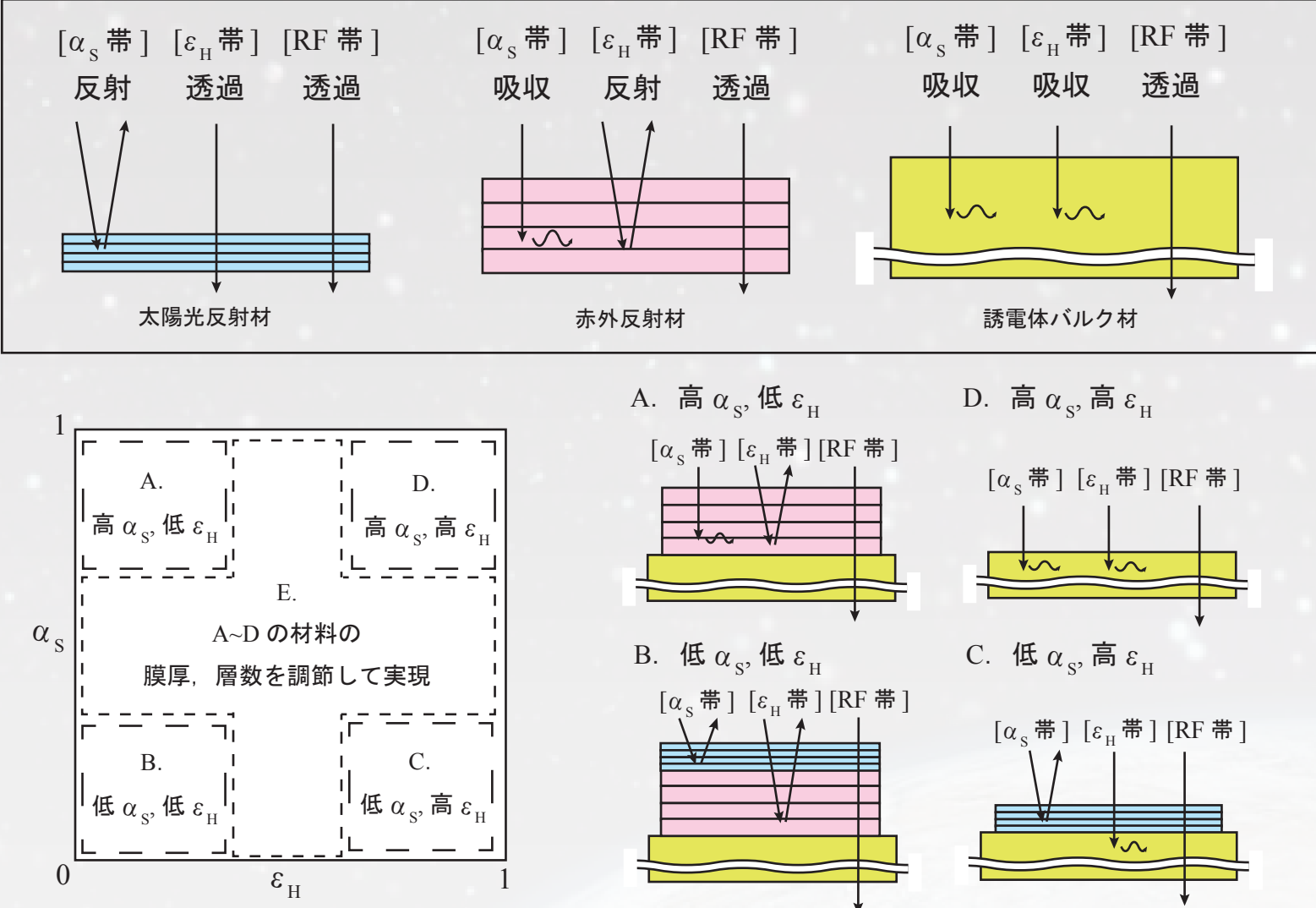


Fig.2 任意に熱光学特性を設計するための必要な多層膜構造。

Thermo-optical properties

Solar Absorptance

$$\alpha_s(\theta) = \frac{\int_{0.26}^{2.5} \{1 - R(\lambda, \theta)\} J_s(\lambda) d\lambda}{\int_{0.26}^{2.5} J_s(\lambda) d\lambda}$$

Normal Emittance

$$\epsilon_N(T) = \frac{\int_{1.67}^{100} \{1 - R(\lambda, \theta)\} i_b(\lambda, T) d\lambda}{\int_{1.67}^{100} i_b(\lambda, T) d\lambda}$$

Total Hemispherical Emittance

$$\epsilon_H(T) = \frac{\int_0^{\pi/2} \int_{1.67}^{100} \{1 - R(\lambda, \theta)\} i_b(\lambda, T) \cos \theta \sin \theta d\lambda d\theta}{\int_0^{\pi/2} \int_{1.67}^{100} i_b(\lambda, T) \cos \theta \sin \theta d\lambda d\theta}$$

λ : wavelength  
T : sample temperature  
θ : incident angle  
 $i_b(\lambda, T)$  : spectral intensity of a blackbody  
 $J_s(\lambda)$  : spectral solar radiation intensity

Measurement method for Thermo-optical properties

Solar Absorptance

○ Reflectance measurement (0.26-2.5 μm)

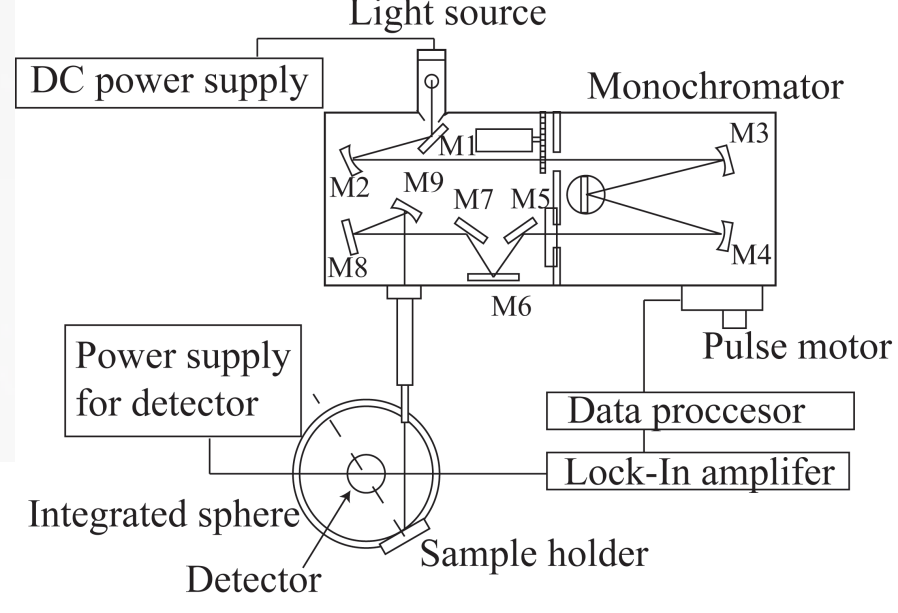


Fig.3 Solar absorptance apparatus

Normal Emittance

○ Reflectance measurement (1.67-100 μm)




Fig.4 FTIR (FTS3100)

Total Hemispherical Emittance

○ Calorimetric method (173-373 K)

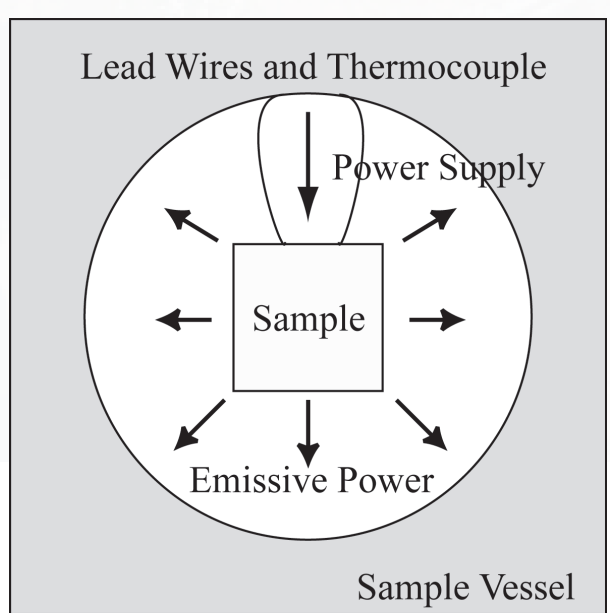


Fig.5  $\epsilon_H$  apparatus

Radiowave transmissive radiator, COSF

Design results of COSF4-RE

Material	: Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> , Si/SiO <sub>2</sub>
Substrate	: UPILEX-S, 125 μm
Layer	: 35 layers
Properties	: $\alpha_s = 0.05, \epsilon_N = 0.80$
Total thickness	: 3.72 μm (without substrate)
Method	: sputtering method

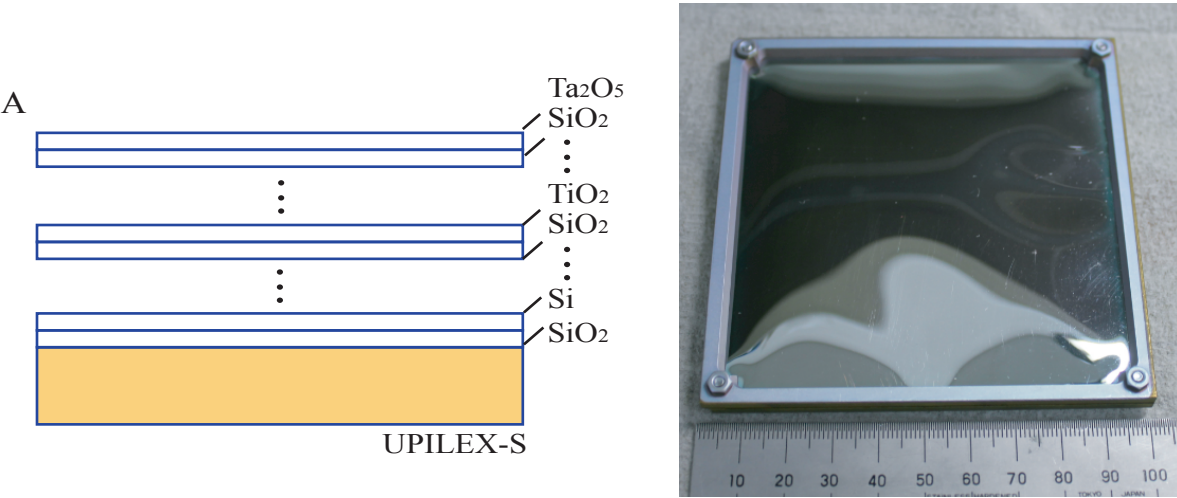


Fig.6 Construction and photography of COSF4

Measurement results of COSF4-RE

	$\alpha_s$	$\epsilon_N$ at 300 K	$\epsilon_H$ at 300 K
COSF4 (UPILEX-S)	0.05	0.77	0.72
COSF4 (Si Substrate)	0.04	0.71	-
Ge-coated Kapton	0.45	0.72	-
OSR	0.07	-	0.8

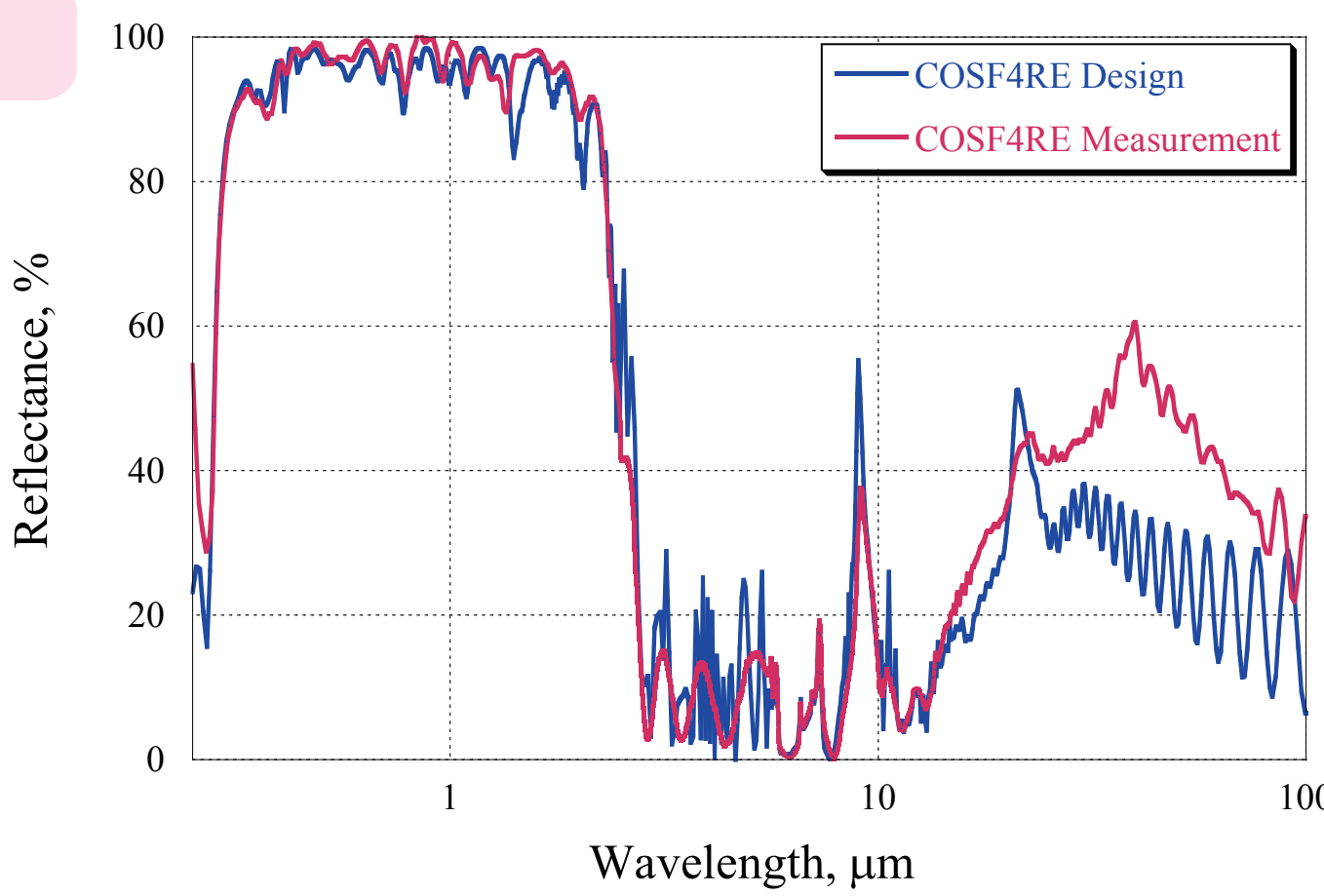


Fig.7 Spectral reflectance of COSF4-RE in wavelength range of 0.26-100 μm.

- COSF4-REの太陽光吸収率は0.05と従来の金属を使った排熱材OSRと比較して小さい値を示していることが分かる。また，放射率も排熱材として高い値を示している。

Radiowave transmissive infrared mirror, COSF-IR

Design results of COSF-IR2

Material	: Ge/ZnS
Substrate	: UPILEX-S, 125 μm or Si substrate
Layer	: 25 layers
Properties	: $\epsilon_N = 0.10$
Total thickness	: 33.4 μm (without substrate)
Method	: vacuum-deposition

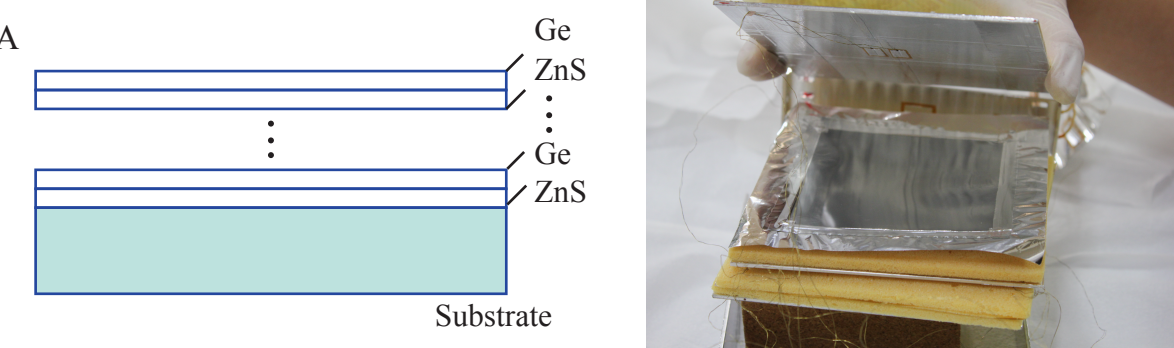


Fig.8 Construction and photography of COSF-IR2

Measurement results of COSF-IR2

	$\epsilon_N$ at 300 K	$\epsilon_H$ at 300 K
COSF-IR2 (Si substrate)	0.08 (Calc.)/0.11	0.11 (Calc.)/0.16
COSF-IR2 (UPI substrate)	0.10 (Calc.)/0.14	0.12 (Calc.)/0.17
Al coated polyimide film	0.03	0.06

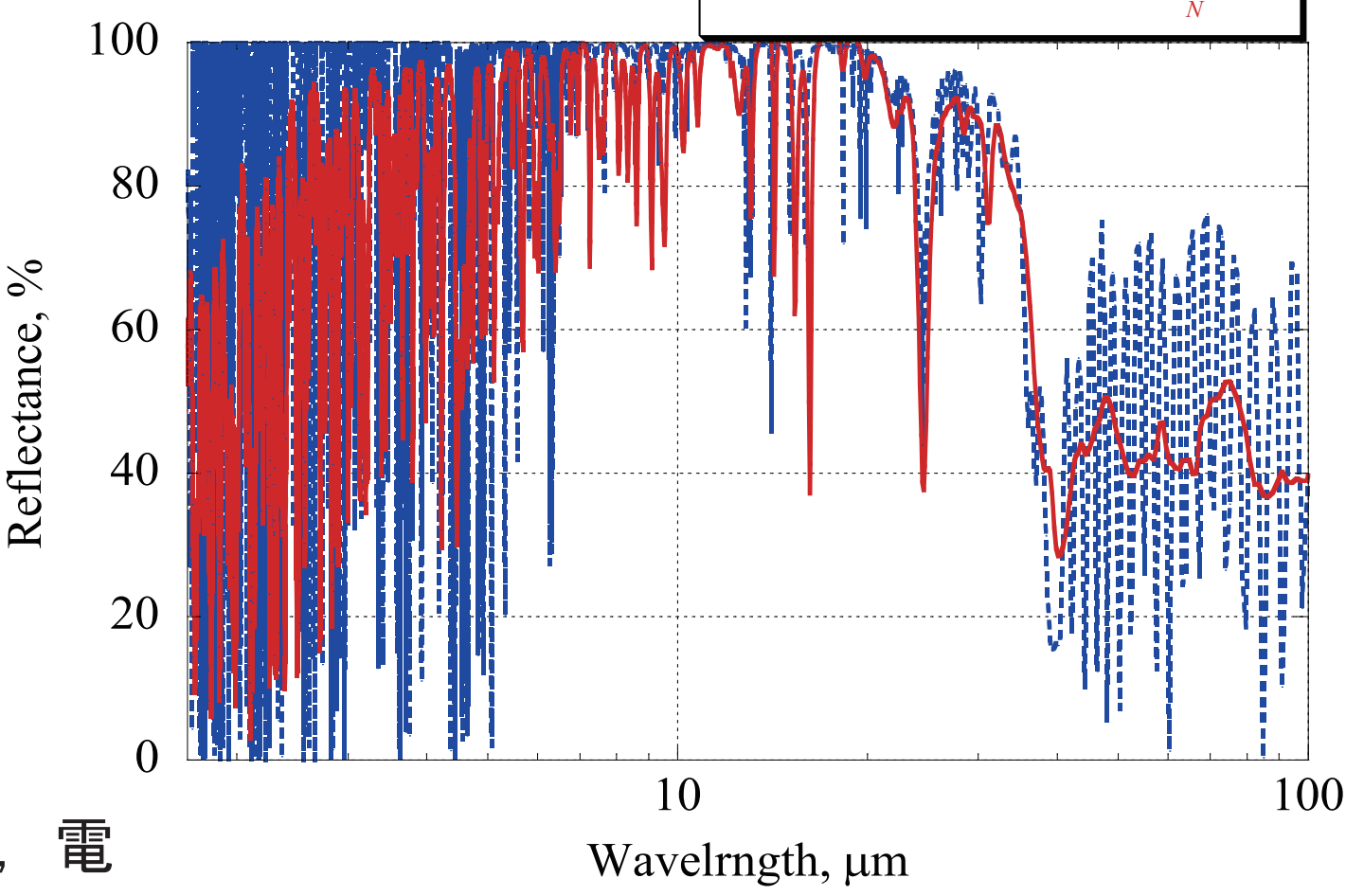


Fig.9 Spectral reflectance of COSF-IR2 in wavelength range of 1.67-100 μm.

- COSF-IR2の垂直放射率は0.12を測定値として示し，電波透過性を示しながら9割近い赤外を反射する初めての熱制御材であることが分かる。

Radiowave transmittance

- 挿入損失法によりX bandにおけるCOSFの電波透過率を測定した。COSFは従来の電波透過型熱制御材Ge蒸着カプトンと同様の透過率を示すことが分かる。
- COSFは金属を使用しないため，基本的に全ての周波数帯の電波を透過する。
- 低周波領域である100 KHz～1000 MHz 帯でも，同様に100 %の透過率を示すことが実験的に分かっている。

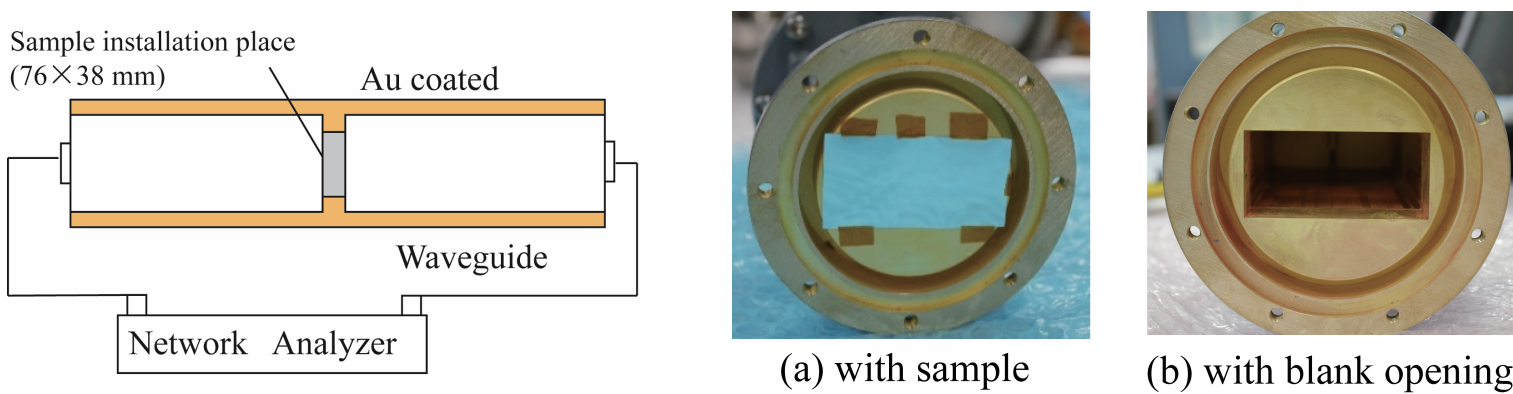


Fig.10 Apparatus of insertion loss method.

Name	L dB	X-band
COSF4	0.0	
COSF-IR2	-0.02	
Ge-coated Kapton	0.0	
Al-coated Kapton film	-33.5	

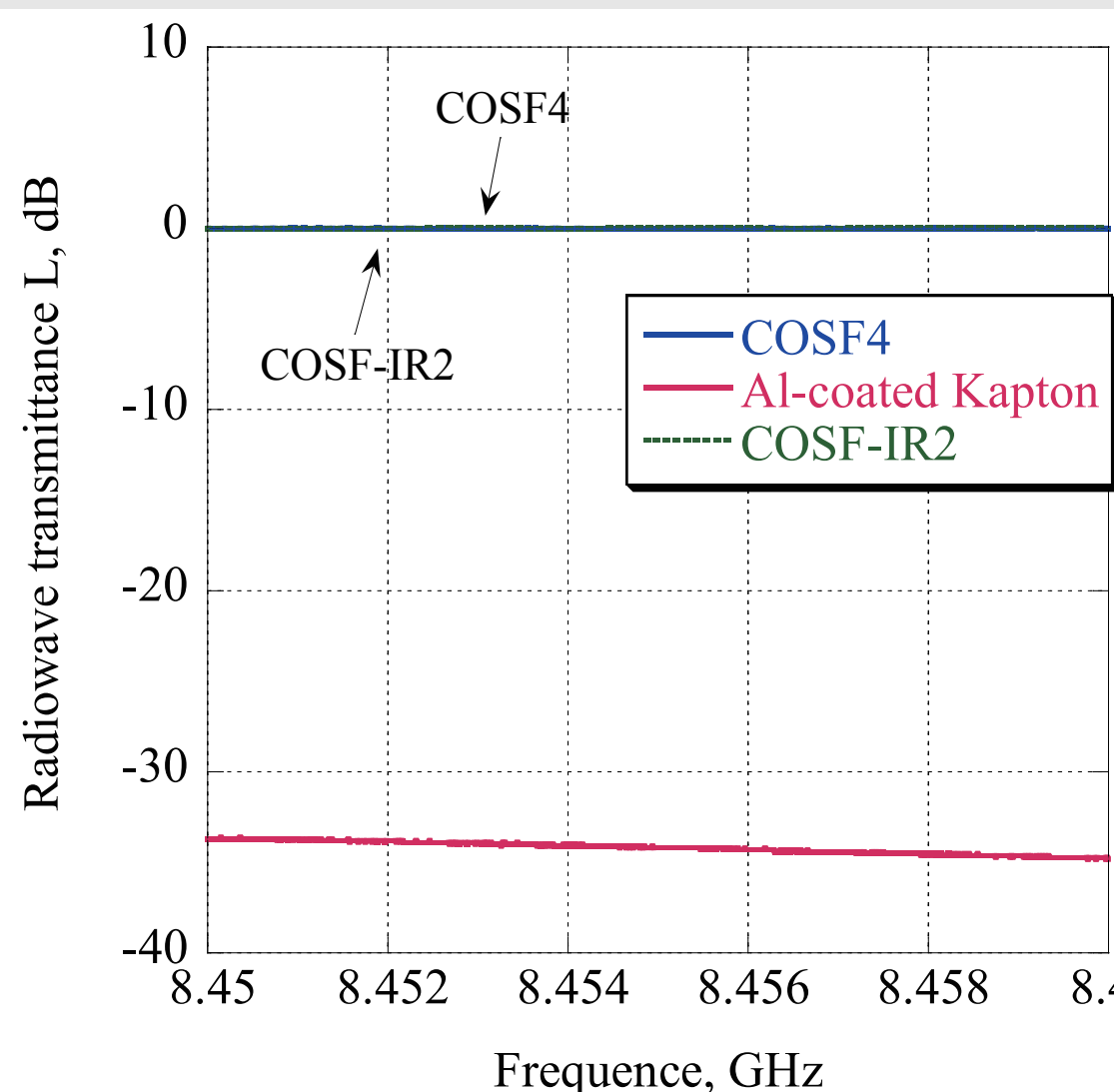


Fig.11 Frequency spectrum of L at X-band.

Experiment in-orbit

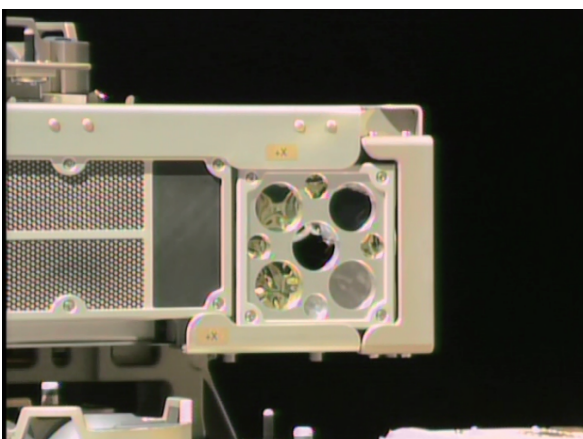
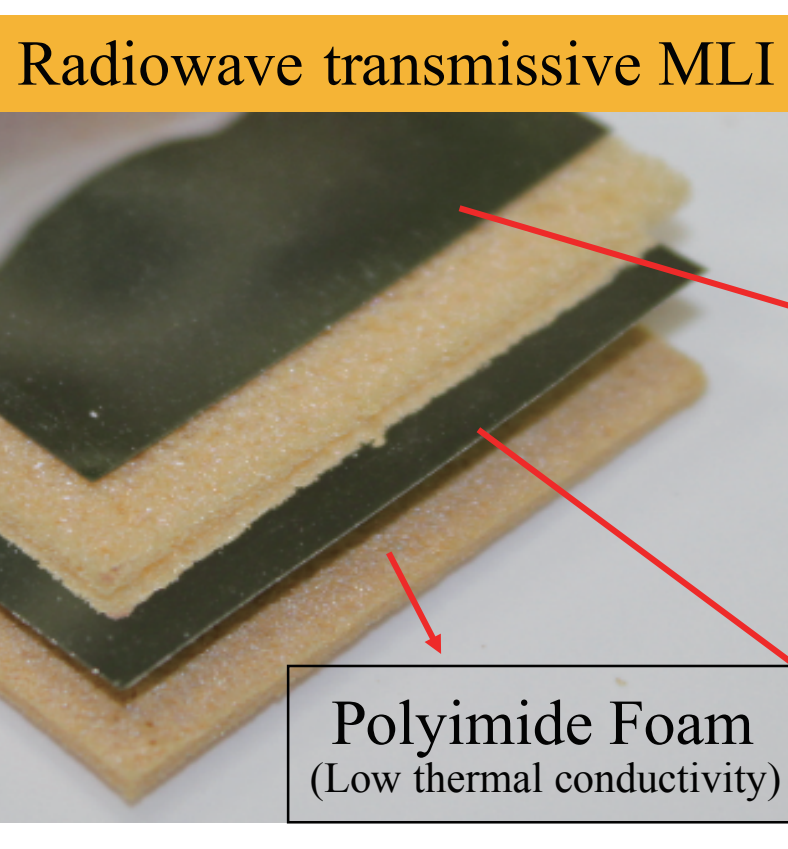


Fig.14 COSF on ISS (2016 launched).

- 2016年からCOSFはARM ミッション（Advanced Radiator Material）においてISS軌道上にて暴露試験を行っている。（1, 2, 3年間）
- 1年暴露品に関しては2017年に地上回収が完了し，COSFの表面光学特性の変化を測定したところ，劣化は見られなかった。
- ヴァン・アレン帯を3年間通過するような放射線環境を想定して(ASTRO-G)，地上劣化加速試験によるプロトン・エレクトロン照射を行った。COSFの太陽光吸収率は照射後，最大で0.02程度上昇し，ほとんど劣化は確認されず，ヴァン・アレン帯を通過するような衛星に適用可能であることが分かった。

RT-MLI (Radiowave Transmissive MLI)

Radiowave transmissive MLI



EX. COSF4-RE

- ・低太陽光吸収率
- ・高放射率
- ・電波透過性

EX. COSF-IR2

- ・低放射率
- ・電波透過性

断熱特性の評価 - 熱伝導率測定 -

Sample	: PF, PF-MLI, RT-MLI
PF type	: BF301, d = 5mm, 2 layers
Low emittance layer	: Al-coated polyester film (PF-MLI), COSF-IR (RT-MLI)
Total thickness	: 10 mm
Condition	: Vacuum (< 3.0 × 10 <sup>-6</sup> torr)
Method	: GHP method

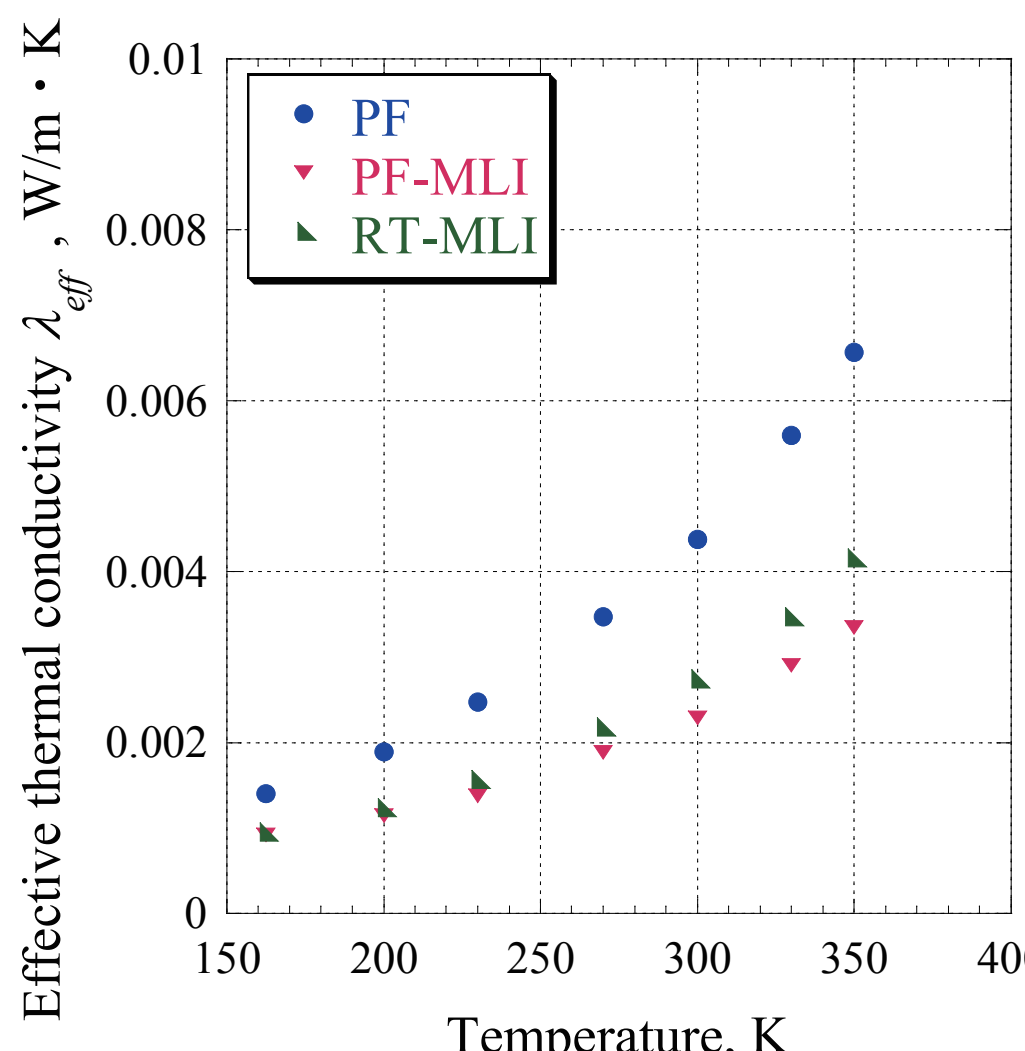


Fig.13 Temperature dependence of effective thermal conductivity of Sample 1 (PF), sample 2 (PF-MLI) and sample 3 (RT-MLI) .

- 300 Kにおいて，PFは4.38 × 10<sup>-3</sup> W/(m・K)，PF-MLIは2.18 × 10<sup>-3</sup> W/(m・K)，RT-MLIは2.65 × 10<sup>-3</sup> W/(m・K)であり，RT-MLIはPF-MLIと同等の低熱伝導率性を示した。また，低放射率材料をPF層間に挟むことでふく射伝熱が抑制され，有効熱伝導率が小さくなったことが実験から確認された。