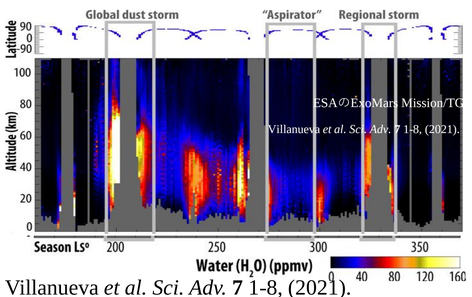
宇宙科学シンポジウム 2023/1/5-6

MACO WG報告：テラヘルツヘテロダイン分光装置による火星大気観測の科学目標と検討状況

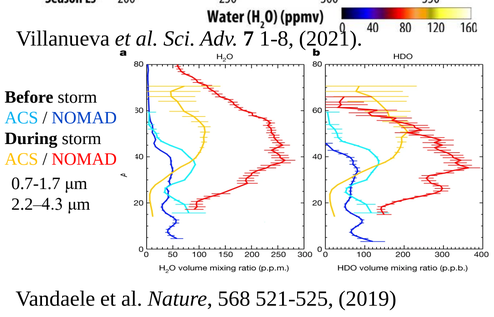
前澤裕之(大阪公大),佐川英夫(京産大),関華奈子,青木翔平,今村剛(東大),寺田直樹,黒田剛史(東北大),西堀俊幸,山崎敦(JAXA)他MACO WGチーム

MACO（周回・探査技術実証による火星宇宙天気・気候・水環境探査)は、火星のハビタブル環境の持続性の理解に向け、火星宇宙天気・気候・水環境の探求と、着陸探査に向けた探査技術実証を目指している。さらにMACO+ではMars Ice Mapper(MIM)との協働も見据え、地球型惑星のハビタブル環境を持続させるための必要条件も理解すべく、将来の着陸探査に必要な技術獲得や、表層・浅部地下水環境の調査を行うことも目指す。こうした中で、周回機による宇宙気候・水環境に関わる大気上下結合パッケージの候補の１つとしてテラヘルツ分光装置(THSS)が検討されている。THSSは、大気の表層境界層における水蒸気分布の観測を実現し、地表・地下の水リザバーと大気の関わりを明らかにするとともに、ドップラー速度の計測による風速場や、高度0-140kmの基本物理量(温度、圧力など)の観測を可能にする。また光化学反応に関わるHOx種など大気の酸化反応プロセスに関わる微量分子の挙動も捉えることができる。THSSは、太陽等の背景光源が不要で、衛星から昼夜問わずあらゆる経度・緯度・LT帯を観測できる特色もあり、また、波長が長いため、火星特有のダストストーム発生時にも内部の微量分子の動態(火星大気の物質循環)を捉えることのできる強力なツールとなっている。将来的には、火星表層の放射から、ごく表層に含まれる物質や水氷など、MIM/SARをサポートする情報も得られる可能性がある。本講演では火星の惑星保護カテゴリーIVも含めたTHSSの検討状況(観測分子と周波数バンド、計算機やアンテナの惑星保護対応など)について簡単に紹介・報告する。

TGOによる水蒸気観測の例から

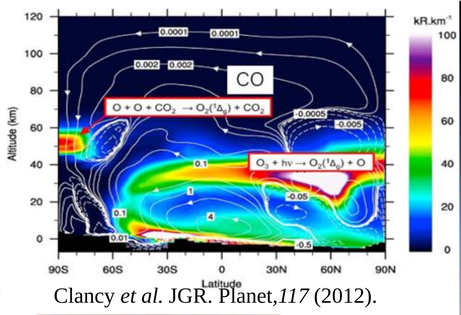


Villanueva *et al. Sci. Adv.* 7 1-8, (2021).

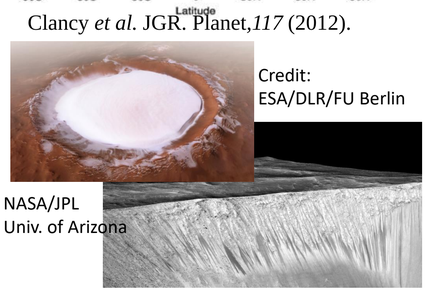


Vandaele et al. *Nature*, 568 521-525, (2019)

火星大気の物質循環と光化学

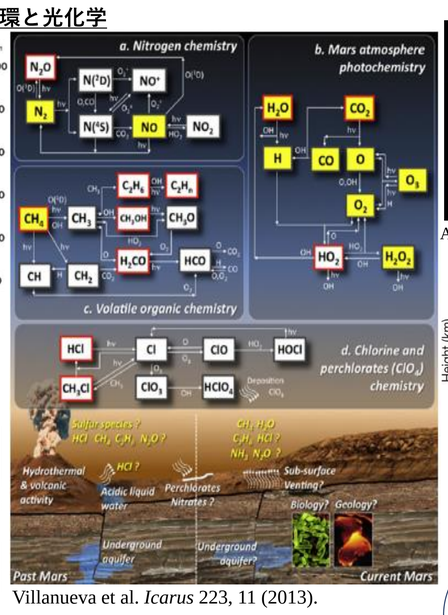


Clancy *et al.* JGR. Planet,*117* (2012).



Credit: ESA/DLR/FU Berlin

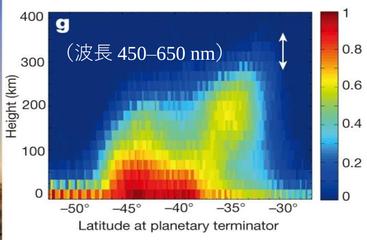
NASA/JPL Univ. of Arizona

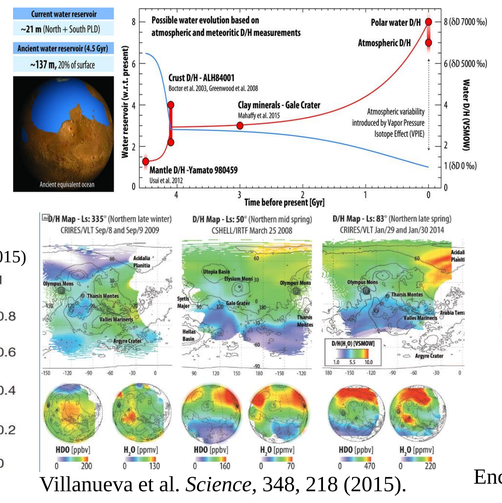


Villanueva et al. *Icarus* 223, 11 (2013).

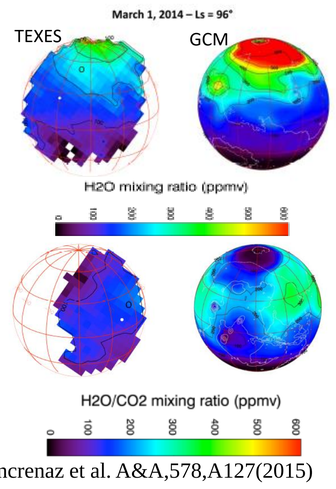
超高層への物質の輸送！？

A Sánchez-Lavega *et al. Nature* ***518*** 525-528, (2015)





Villanueva et al. *Science*, 348, 218 (2015).



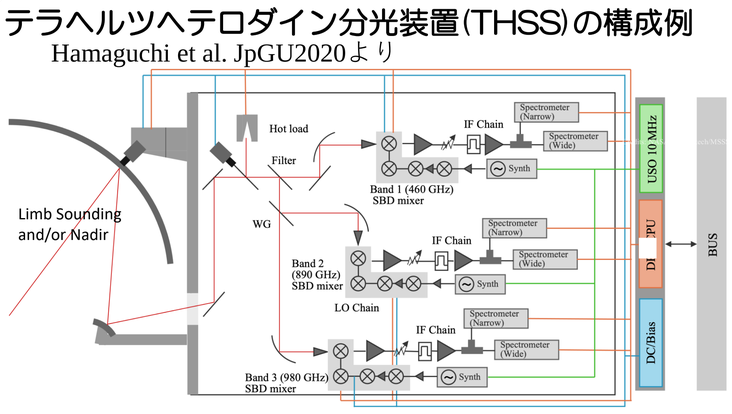
Encrenaz et al. A&A,578,A127(2015)

H_2OとHDOの時空間分布から、水蒸気の輸送源を探ることで火星大気の気象/気候モデルの精緻化が可能になる。また、全球的/全季節のD/H比を通して火星の水の変遷に迫る。

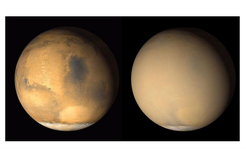
火星にあったと考えられる水は、どの程度/どの様に宇宙に散逸し、また地下に蓄えられたのか。最近では、TGO(ESA)やHSTなどでも、高層まで水蒸気あるいは氷が輸送される様子も観測されており、MACO+におおて火星の過去・現在の気象・気候/ハビタブル環境を理解する上で、こうした火星の物質循環/ダイナミクス(子午面循環や東西風)の理解が重要な課題となっている。THSSのリムサウンディングでは、観測周波数を最適に選ぶことで風速場(ドップラー速度)の観測や、ダストストーム時でも境界層から高度140km程度までの広範囲に渡って水蒸気や圧力・温度分布を4次元的に捉えることが可能である。一方で、大気ダイナミクスとして鉛直輸送も重要な物理量だが、これは直接捉えることが難しい。そこでオプション的に輸送のトレーサーとなる分子(COやH_2OとそのHDOなどの同位体)と、光化学によってこれらの分子に作用する酸化剤分子の時空間分布を同時に捉えていくことで間接的に鉛直輸送の情報も得られると期待される。

テラヘルツヘテロダイン分光装置(THSS)の構成例

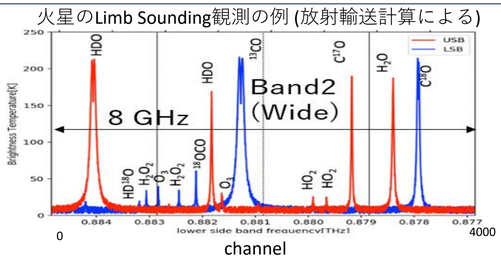
Hamaguchi et al. JpGU2020より



- 背景光源が不要のため、昼夜/太陽に対する位置を問わず観測可.
- 周波数高分解能観測により、Doppler shiftによる風速場や高高度の微量分子や、Dや ^{13}C、^{18}Oなどを含む同位体分子
- 大気の酸化反応に関わる微量分子の観測が可能.
- 波長が長く、塵などによる吸収・散乱の影響を受けにくく、ダストストーム時にも大気内部を見通すことが可能.



火星のLimb Sounding観測の例 (放射輸送計算による)



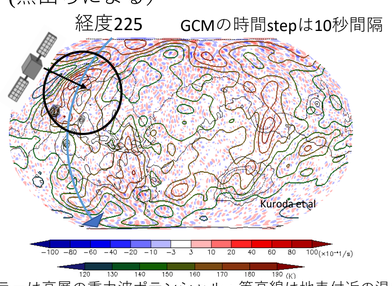
低層の分子のために広帯域、高層の分子やドップラー速度の観測のために周波数高分解能の高速デジタルFFT分光計を開発中(JAXA戦略的開発研究費2022にて基板実装/熱設計、ADCの放射線試験を実施予定)

項目	希望仕様	提案仕様
IF 数	1	
IF 周波数/電力	第１候補 4-12GHz 第２候補 8-16GHz	4-12GHz
AD 変換	-	[サンプリング速度]24Gsps [量子化ビット数] 1bit(2level) or 1.5bit(3level) ※量子化ビット数は消費電力制御のため、動的に変更可能
周波数分解能	[広帯域] 1MHz [狭帯域] 30～60KHz	[動作帯域] ―広帯域＆狭帯域 ―or― 狭帯域のみ [広帯域] 約 1,464 or 約 732KHz [狭帯域] 約 91.6 or 約 45.8KHz ※狭帯域は IF から任意の 200MHz 弱を選択可能 ※FFT チャンネル間隔や動作帯域は消費電力制御のため、動的に変更可能
周波数帯域幅	8GHz	
積分	1 秒	[有効積分時間比] 25 / 50 / 100 % ※1 秒毎に積分したデータを出力するが、有効積分時間比（有効積分時間/1 秒）は消費電力制御のため、動的に変更可能

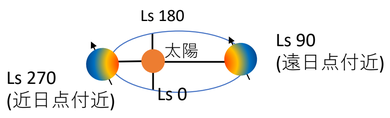
大気重力波により誘起される温度変化/分布の観測例

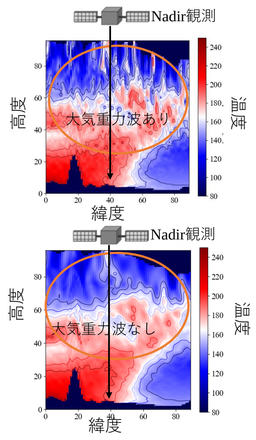
Yamauchi et al. JPGU2022より

General Circulation Model
(黒田らによる)

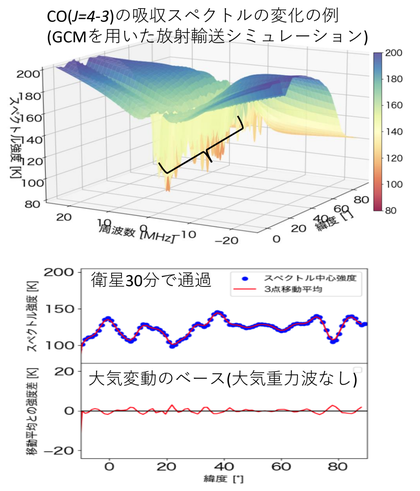


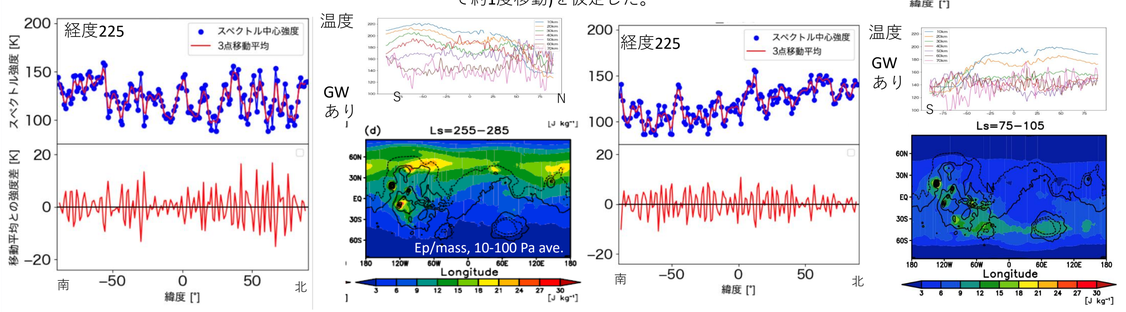
カラーは高層の重力波ポテンシャル・等高線は地表付近の温度





・衛星の軌道高度は300km(20秒で約1度移動)を仮定した。





南半球が夏となるLs 270では北半球(冬)中緯度で、北半球が夏となるLs 90では南半球(冬)中緯度で重力波のPotential Energyが増化傾向を示す(黒田らのGCMの計算結果)。これら大気重力波に伴う上層の細かい温度振幅を、THSSの一酸化炭素スペクトルの観測より、平均場との残差をとることで直接推定できる可能性を示唆。

コールドスプレー鏡面を持つ高精度CFRPによるアンテナの乾熱滅菌処理前後の性能評価 (2020戦略的開発研究費(JAXA), 2022JPGUより)

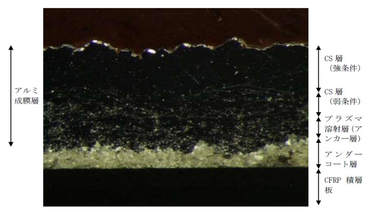
乾熱処理が、残留する不活性ガスやマイクロポーラス(もしあれば)や、コーティング剤/接着面部などに作用した場合、アンテナ/鏡面にどのような影響を与えるかを反射損失で評価

JAXA の研究開発部門センサ研究グループでは，ピッチ系炭素繊維複合材の材料物性（高熱伝導，低熱歪み）を活かし，オールCFRP 製の軽量ハニカムサンドイッチパネルを主構造とするゼロ熱膨張化設計(10^{-7}/K 以下)を施したCFRP 反射鏡パネルの試作研究と国際宇宙ステーションを使った高精度CFRP 鏡の長期宇宙曝露実験（CAGOME）の実績がある

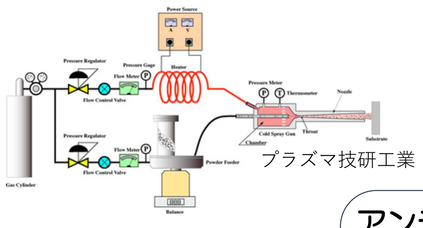
アンテナはCFRP 積層板上のアルミニウム反射層をプラズマ溶射（100-200μm 厚）により形成した後、コールドスプレーでアルミを成膜。その後に酸化物セラミクスとエポキシ樹脂をコーティングし、最後にカーボン表皮を成膜 (Rq:55nm)。

SMILES2-WG-001B　Nishibori et al. 2018 報告書

部位	設計結果	備考
反射面	構成：アルミニウムのCS成膜(厚さ:200μm) 保護膜：無し，曲率半径:450mm，直径:145mm	切削と研磨による仕上げ
スキン	材料：YS160A-30S/NM-31(UDプリプレグ) 積層：[0/45/-45/90/90/-45/45/0]×3]，24ply 厚さ：2.16mm	裏表対称 吸化時ポストキュアなし
接着層	フィルム状接着剤 (Cytec社 FM73U) 厚さ：0.2mm 以下	表皮とコアの接着
コア	UDプリプレグによりハニカムコアを集成 積層：[0/90/0]，3ply，0.3mm 材料:0度 YS160A-30S，90度 T700S-12K	
パネル厚さ	25.68～31.5mm	
質量特性	200g (TBD)	

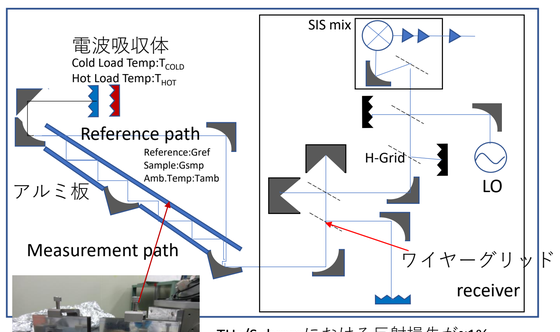


コールドスプレー法
成膜材料粒子を不活性ガスと共に超音速で基材に衝突させる。臨界速度に達した材料粒子は塑性変型して固相接合(材料の原子を原子的配列を起こす距離まで近づけることで接合)し皮膜を形成する。



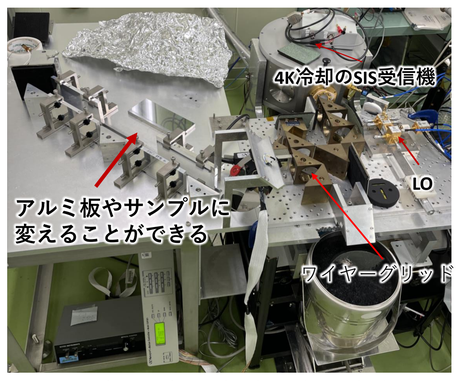
・熱による材料の物性変化を抑える
・ポーラスの少ない緻密な金属皮膜

プラズマ技研工業



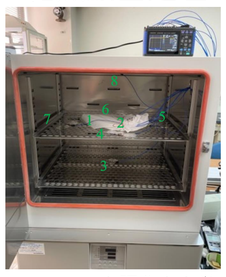
今回の乾熱滅菌処理をした被測定物

THz/Submmにおける反射損失が~1%と小さいため、高感度超伝導SIS受信機を用いたJAXAのSuperconducting *Submillimeter*-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES)用の光学評価系を用いて評価を行った。



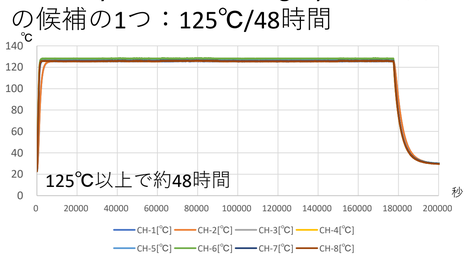
JAXA(つくば)のサブミリ波の伝送計測光学系

乾熱滅菌処理



(大阪公立大学)

Planetary Protection Category IVの滅菌処理の候補の1つ：125℃/48時間



アンテナ(被測定物)の反射損失の計測方法

✓リファレンスの計測 (受信機のデフォルトのY-factor計測)

$$P_{ref}(T_{HOT}) = kG\Delta B(T_{HOT}+T_{RX})$$
$$P_{ref}(T_{COLD}) = kG\Delta B(T_{COLD}+T_{RX})$$
$$\Rightarrow Y = \frac{P_{ref}(T_{HOT})}{P_{ref}(TC_{OLD})} = \frac{T_{HOT}+T_{RX}}{T_{COLD}+T_{RX}}, T_{RX} = \frac{T_{HOT}-YT_{COLD}}{Y-1}$$

k：ボルツマン定数，T_{HOT}：常温，T_{COLD}：液体窒素温度，G：受信機のゲイン，
ΔB：受信機の周波数帯域，P_{ref}：受信機出力，
T_{RX}：受信機の等価雑音温度(この実験では反射率が既知(1/a)のA6061を10回反射するパスで測定したもの)

✓パスの2回反射部をサンプル(乾熱滅菌済)に交換した際のY-factor計測

$$P_A(T_{HOT}) = kG\Delta B[AT_{HOT}+(1-A)T_{HOT}+T_{RX}] = kG\Delta BA[T_{HOT}+T_{RX}]$$
$$P_A(T_{COLD}) = kG\Delta B[AT_{COLD}+(1-A)T_{HOT}+T_{RX}] = kG\Delta BA[T_{COLD}+T_{RX}]$$
$$T_{RX} = \left(\frac{1}{A}-1\right)T_{HOT} + T_{RX}/A$$

A：被測定物の交換に伴って上乗せされる際の相当ゲイン (被測定物の損失が大きいと1より小さい値をとる)

$$\Rightarrow Y_1 = \frac{P_A(T_{HOT})}{P_A(T_{COLD})} = \frac{T_{HOT}+T_{RX}}{AT_{COLD}+(1-A)T_{HOT}+T_{RX}} \quad 従って \quad A = \frac{Y_1-1}{Y-1}\frac{Y}{Y_1}$$

ここでA6061とサンプルの1回の反射率をそれぞれ1/a、1/bとすると、両者の2枚(2回の反射)の交換の場合は $A=(a/b)^2$なので、

サンプルの反射損失: $1-\frac{1}{b} = 1-\sqrt{A}/a$

使用したA6061のaは事前の測定より1.002661145

アンテナの反射損失の測定結果 -乾熱滅菌前後の比較-

測定周波数: 649.2GHz		反射損失				電気伝導率[S/m]
		垂直		水平		
熱処理		平均値[%]	誤差(標準偏差) [%]	平均値[%]	誤差(標準偏差) [%]	
前	2014/5/19	0.77	±0.1	1.65	±0.12	σ =2.2 ×10^{6}
後	2022/2/4	0.7	±0.4			同上
(2021/12/13熱処理)	2022/7/21			1.64	±0.55	

惑星保護カテゴリIV の滅菌処理の候補である乾熱滅菌 125度/48時間の熱処理前後で、アンテナの反射損失や電気伝導率は誤差の範囲で、有意な劣化は見られなかった。乾熱処理が、残留する不活性ガスやマイクロポーラス(もしあれば)やコーティング剤/接着面部などに影響は無いと思われる。

電気伝導率の評価

Z方向に進行する直線偏光平面波を考える

$$\nabla^2\boldsymbol{E} - \sigma\mu_0\frac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial t} - \varepsilon\mu_0\frac{\partial^2\boldsymbol{E}}{\partial t^2} = 0$$
$$\nabla^2\boldsymbol{H} - \sigma\mu_0\frac{\partial\boldsymbol{H}}{\partial t} - \varepsilon\mu_0\frac{\partial^2\boldsymbol{H}}{\partial t^2} = 0$$

解として

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0\exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda_0}kz\right)\exp\{i(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0}nz)\}$$
$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{H}_0\exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda_0}kz\right)\exp\{i(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0}nz)\}$$

を考える。$\boldsymbol{E}_0$と$\boldsymbol{H}_0$は進行方向に垂直なXY面内のベクトルでそれぞれ垂直、kは減衰係数、nは屈折率、λ_0は真空での波長である。このとき複素屈折率$\hat{n}$は

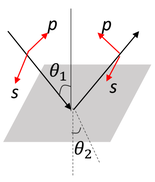
$$\hat{n} = n - ik$$

と表せ、複素誘電率を$\hat{\varepsilon}$とおくと

$$\hat{n} = \sqrt{\hat{\varepsilon}/\varepsilon_0}, \quad \hat{\varepsilon} = \varepsilon - i\left(\frac{\sigma}{\omega}\right)$$

の関係がある。このとき

$$n^2 = \frac{1}{2}\left(\sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2+\left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega}\right)^2} - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)$$
$$k^2 = \frac{1}{2}\left(\sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2+\left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega}\right)^2} + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)$$



フレネルの反射係数は、p(垂直)、s(水平)方向に対して

$$r_p = \frac{\hat{n}\cos\theta_1 - n_0\cos\theta_2}{\hat{n}\cos\theta_1 + n_0\cos\theta_2}, \quad r_s = \frac{n_0\cos\theta_1 - \hat{n}\cos\theta_2}{n_0\cos\theta_1 + \hat{n}\cos\theta_2}$$

である。境界条件から$\hat{n}\sin\theta_2 = n_0\sin\theta$の関係があるので、

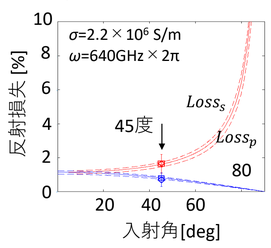
$\hat{n}\cos\theta_2 = \sqrt{\hat{n}^2 - n_0{}^2\sin^2\theta_1}$となり、また入射側の媒質は$n_0$=1なので、

$$r_s = \frac{\hat{n}\cos\theta_1 - \sqrt{1-\sin^2\theta_1/\hat{n}^2}}{\hat{n}\cos\theta_1 + \sqrt{1-\sin^2\theta_1/\hat{n}^2}}, \quad r_p = \frac{\cos\theta_1 - \sqrt{\hat{n}^2-\sin^2\theta_1}}{\cos\theta_1 + \sqrt{\hat{n}^2-\sin^2\theta_1}}$$

となる。さらに、金属の場合、サブミリ波は波長が十分に長く$\sigma/\omega \gg \varepsilon$なので、$n = k = \sqrt{\sigma/(2\varepsilon_0\omega)}$より、$\hat{n} = \sqrt{\sigma/(2\varepsilon_0\omega)}(1-i)$であるから、

$$Loss_p = 1 - |r_p|^2 = 4\cos\theta_1\sqrt{\frac{\omega\varepsilon_0}{2\sigma}}$$
$$Loss_s = 1 - |r_s|^2 = \frac{4}{\cos\theta_1}\sqrt{\frac{\omega\varepsilon_0}{2\sigma}}$$

が得られる。
乾熱滅菌処理前(赤と青のプロット)と比べて熱処理後、誤差の範囲で電気伝導率に優位な劣化は見られず。



今後

[1]今回の測定では、SIS受信機の出力がわずかに不安定で、垂直偏波についてはerror barが大きい結果となった。これは、光学アライメントの微細なズレの影響によるもので、LO信号の照射パワーが、機械式冷凍機の振動によって変動していた為である。次回の測定では、LO/光学系のアライメントの再調整を行う。
[2]実際のアンテナサイズ 口径30-50cm程度でも評価していくことを検討。
[3]アンテナ作成・アセンブリ時に、どの程度汚染微生物数(細胞胞子密度数)を下げることが出来るか、乾熱滅菌処理を回避する手法も検討する。

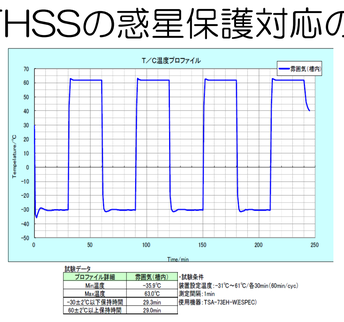
MACO+/THSSの惑星保護対応の宇宙用FPGA/CPU高速計算機の検討・評価

-惑星保護 カテゴリーIVへの耐環境性を考慮した半田付けや固着の工程手法を検討-

2021 戦略的開発研究費 (JAXA)より

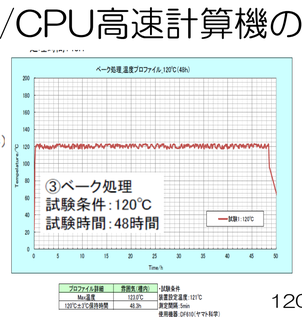
実装評価 → 実装基板設計・作製 → 実装 → 外観検査(外観+X線)

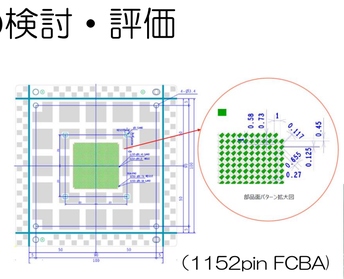
＜実装基板設計・作製＞
基板サイズ：100mm×100mm　t=1.6mm
基板材質：FR-4(2層_両面レジスト有)
ランド表面処理：はんだコート(Sn:63%Pb:37%)
PAD開口：NSMD_φ0.580mm(LSCC_推奨値)
PAD構造：Dog-Bone構造(JAXA-QTS-2140E_付則G準拠)
＜実装条件＞
メタルマスク：PAD開口100%　厚み：120μm
クリーム半田：Sn63 HMI-RMA V14L(Sn:63%Pb:37%)
リフロー条件：J-STD-020(Sn-Pb Eutectic Assembly)



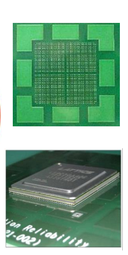
①熱衝撃試験
試験条件：-30℃～60℃
さらし時間：各30min
試験サイクル：4サイクル
使用試験機：TSA-73EH-W(ESPEC)

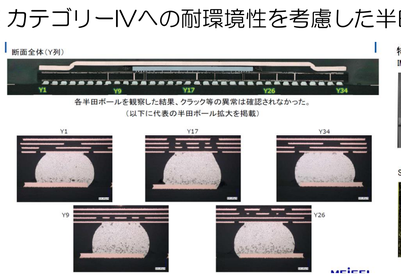
②ランダム振動試験
試験条件：右表参照
トレランス：±3dB
試験方向：3軸(X,Y,Z)
加振時間：各軸120sec
試験機：VS-2000A-140T(IMV製)
加速度センサ：VP-4200 (IMV社製)

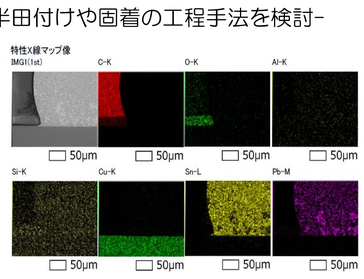




(1152pin FCBA)







120℃を超える乾熱処理や、熱衝撃/振動試験に対して、固着やはんだの手法に問題が無い(クラックやエレクトロマイグレーションが発生しない)ことを確認した。