

# 惑星探査機 (& 地球観測衛星) からみた 3-10 $\mu$ 帯赤外2Dセンサーの現況と課題

笠羽 康正(東北大学)

- I. Near IRセンサー  
with 岩田 (JAXA), Vandaele, Neefs (IASB/Belgium), Korablev (IKI)
- II. 小型冷凍機  
with 鶴 (京大)
- III. Mid IRセンサー  
with 片山 (JAXA), 木股 (立命館大), 田口 (立教大)
- IV. Fiber Optics *<to be continued in next talk>*  
with 平原 (名大), 中川 (東北大)

<火星探査を例>  
2016年初頭に打ち上げられる  
この ESA ミッションでは  
「NIR-MIRでの  
初の高分散分光」  
の実現によって、  
「火星大気の  
生成・消滅  
気候変動」  
の鍵を得ようとしている。

**ExoMars 2016: Trace Gas Orbiter**  
will be launched in early next year.

The **chemical composition**  
of the Martian atmosphere

Mars **climatology** and  
seasonal cycles

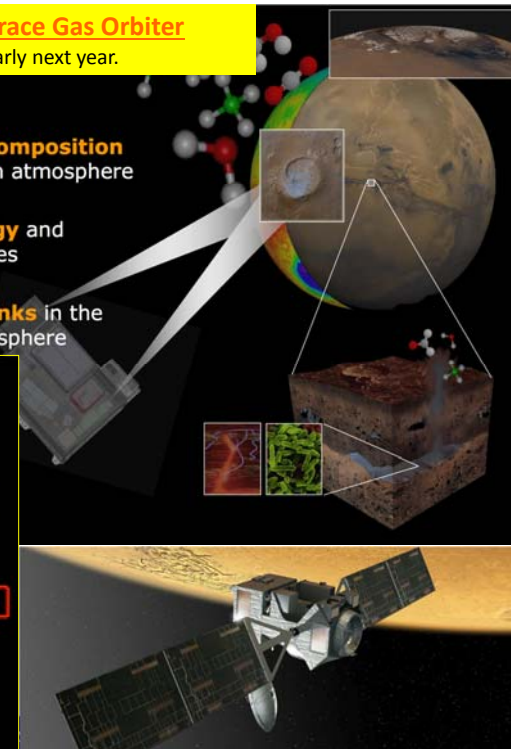
**Sources and sinks** in the  
Martian atmosphere

## “Mars – The Cutting Edge Today”

Trace Gases: CH<sub>4</sub>, CO, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, HDO, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, etc.  
3-D spatial: longitude, latitude, & **vertical**  
1-D temporal: (**diurnal**, seasonal, & inter-annual)  
High resolution (**spectral & spatial**)

Orbiters & Rovers  
MGS, MRO, Mars Express, **Maven, ExoMars 2016**  
**Curiosity, ExoMars 2018, Mars 2020**

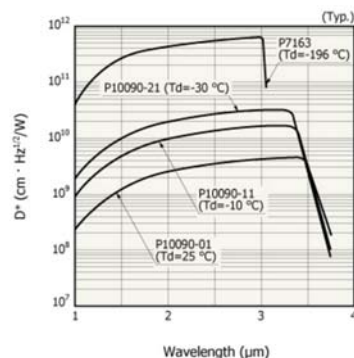
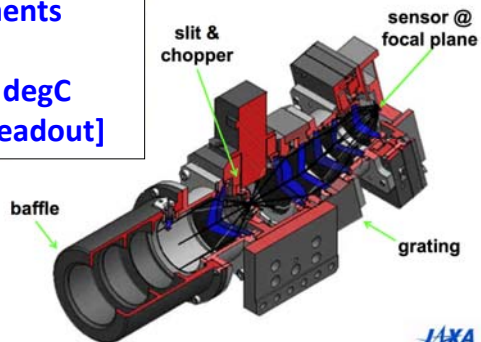
Ground-based  
Keck, NASA-IRTF, VLT  
ALMA, SOFIA



## I. Near IRセンサー with 岩田 (JAXA), Vandaele, Neefs (IASB/Belgium), Korablev (IKI)

国産: Hayabusa-2  
NIRS3等で使用

Hamamatsu  
InAs 1D array  
\* 128 elements  
\* ~3.2  $\mu$ m  
\* -80 ~ -90 degC  
[by fast readout]



残念ながら、国内では、2-4 $\mu$ m帯における探査機用2D素子の目処はない、と言ってよい。

## I. Near IRセンサー with 岩田 (JAXA), Vandaele, Neefs (IASB/Belgium), Korablev (IKI)

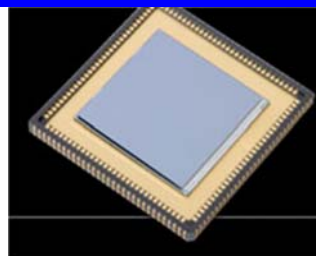
Mars Express,  
(Venus Express, Juno, ...)



ExoMars TGO



Raytheon: HgCdTe 2D arrays  
Teledyne: HgCdTe 2D arrays



‘4-5 $\mu$ m cut’ 100-80 K

<A Problem> Export/Import issue  
(critical for space developments)

SOFRADIR: HgCdTe 2D arrays



‘4.3 $\mu$ m cut’ 110-90 K

\*combined with light-weight cooler unit  
[not suitable for astronomy: larger dark]

**SOFRADIR: 1986-**

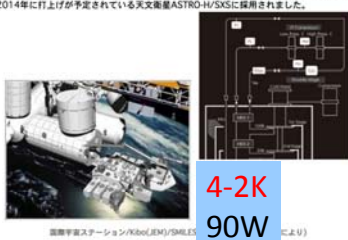
Founded by Thales / Sagem / CEA-LETI  
Linked to “Lab. InfraRouge @ Grenoble

## II. 小型冷凍機 with 鶴(阪大)

搭載用にSHIが優れてPowerfullなものを実用化。  
... 探査機側にMass/Powerさえあれば。

**4K級メカニカル冷凍機**

4K級冷凍機はJT冷凍機と2段スターリング冷凍機との結合で実現されます。JT冷凍機とは、JTコンプレッサーと熱交換器とJTオリフィスから構成されます。本4K級冷凍機は2014年に打上げが予定されている天文衛星ASTRO-H/SXSに採用されました。



**4-2K 90W** (こより)

**20K 90W / 10kg**

**LB2ST: 2段スターリング冷凍機**

LB2STは宇宙用に特化した2段スターリング冷凍機です。この冷凍機は検出器冷却、熱シールド冷却、JT回路の予冷却に使う事ができます。長寿命を達成するための特別なメカニズム(特許取得済)が使われており、本冷凍機は2014年に打上げが予定されている天文衛星ASTRO-H/SXSに採用されています。

仕様表(電源部は除く)	
冷却能力	0.2W at 20K/ 1W at 100K
耐用年限	>3年
熱負荷	<90W
質量	<9.5kg
実績	AKARI(ASTRO-F) 2006/02~ 軌道上海陸中 4.5年 (2010/08現在) SS/Kibo(JEM)/SMILES(JAXA)2009/09~



仕様	
Items	4K級冷凍機 (*He)
冷却能力	20mW at 4.5K
JT冷凍機	
消費電力	≦50W
2段スターリング冷凍機	
冷却能力	200mW at 20K, 1W at 100K
消費電力	≦90W
実績	SS/Kibo(JEM)/SMILES 2009/09~軌道上海陸中 次世代宇宙観測衛星SPICA

**FS1ST: 1段スターリング冷凍機**

The FS1STは宇宙用に特化したコンパクトな長寿命の1段スターリング冷凍機です。本冷凍機は検出器冷却、熱シールド冷却等に最適です。



仕様(電源部は除く)	
冷却能力	1.5W at 70K with 50W input
耐用年限	>50,000時間(地上テストで実証済)
熱負荷	<60W
質量	4.1kg
実績	SUZAKU(ASTRO-E2) 2005/07~ Operating 5 years in orbit (as of 2010/08) KAGUYA(SELENE)2007/09~2009/06 Akatsuki(PLANET-C)2010/05~

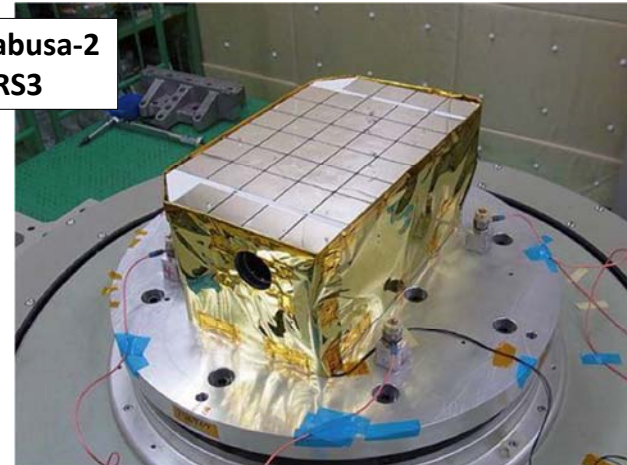
**70K 60W / 4kg**

小型化検討(<1 kg): 2008年以降tryしたが、頓挫

惑星探査機 (& 地球観測衛星) からみた3-10μ帯赤外2Dセンサーの現状と課題 (2015/12/8 東北大)

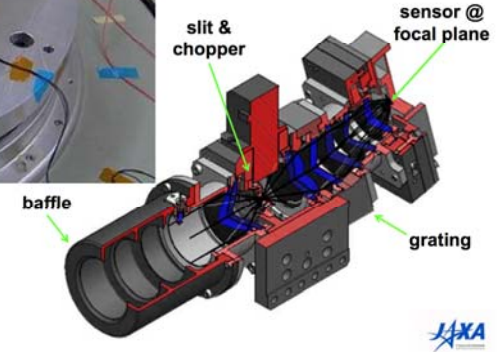
## II. 小型冷凍機 with 鶴(阪大)

### Hayabusa-2 NIRS3



Passive Radiator (7000 cm<sup>2</sup>)で、  
Optics & Detectorの温度  
-85 degC まで達成。

InAs 1D sensor @ -90degC  
→ Darkはまだ大きく、  
積分時間は  
< several msec



惑星探査機 (& 地球観測衛星) からみた3-10μ帯赤外2Dセンサーの現状と課題 (2015/12/8 東北大)

## II. 小型冷凍機 with 鶴(阪大)

### ExoMars TGO: NOMAD & ACS

#### ExoMars 2016: Trace Gas Orbiter



**RICOR (Israel): K508**  
NASA & ESA missions have used it for IR & X/γ-ray instruments to planets.



• Cooler Weight: 450 gr.	• Cooldown Time (250J @77K @23°C): 5 min. Typ.
• Input Voltage: 12-16V or 18-28V	• MTTF > 10,000 Hours
• Steady State Input Power: 7Wdc@220mW, 77K	• Meets Environmental Conditions per MIL-STD-810
• Maximum Input Power: 17WDC	
• Ambient Temperature Range: - Operational: -40°C...+85°C	
- Non-Operational: -56°C...+85°C	

**0.5kg, 7W, Life: >1万時間**  
0.5W@77K の冷却能力しかないが、  
検出器だけここまで冷やすならok。

<問題点> 寿命時のMotor交換(含He補給)・修理は、生産国への送付要。

惑星探査機 (& 地球観測衛星) からみた3-10μ帯赤外2Dセンサーの現状と課題 (2015/12/8 東北大)

## III. Mid IRセンサー

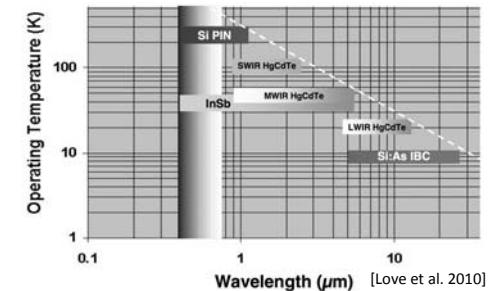
with 片山(JAXA), 木股(立命館大), 田口(立教大)

<天文用> e.g. MIRI @ JWST, TAO

- \* Si:As 5-28 um [Raytheon] **7K!**
- \* Si:Sb 24-38 um **5K!**

Best performance !

... but, we cannot bring it on the long trip !



<地球・惑星観測用 (および、Militaryを含む実用)>

- \* **非冷却** 2D array
  - (1) MEMS Bolometer
  - (2) Thermopile
- \* **冷却(~77K)** 2D array

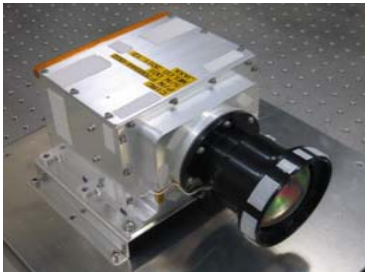
Thermal Imagers  
Fourier Spectrometers  
Special Spectrometers

惑星探査機 (& 地球観測衛星) からみた3-10μ帯赤外2Dセンサーの現状と課題 (2015/12/8 東北大)

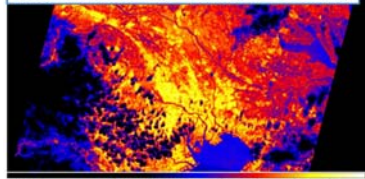


# Uncooled: MEMS Bolometer array

(例) だいち2(ALOS-2, 2014): 小型赤外カメラ (CIRC)



ALOS-2/CIRC 関東地方 2014/09/12 12:01(JST)



輝度 10 13 16 19 22 25 28  
温度 (°C) \* 大気補正、放射率補正なし

「熱撮像」(180-400K)

- 火山観測:  
火口温度のモニター  
溶岩流・火砕流の規模の把握  
噴火総エネルギー量の把握等
- 森林火災:  
森林火災検知  
焼失面積の把握等
- 火災検知:  
延焼域の把握  
焼失面積の把握等
- ヒートアイランド:  
温度分布の面的把握

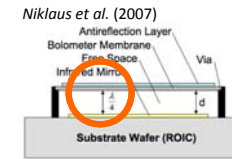
小型、軽量、低消費電力  
短期間、低開発費

項目	特徴
検出器	非冷却赤外検出器 (SOI diode方式 MELCO)
サイズ	11 cm x 18 cm x 23 cm
質量	~3 kg
波長	8 - 12 μm
フォーマット	640 x 480
空間分解能	<200m @ 600km (ALOS-2) <130m @ 400km (CALET)
視野	12° x 9°
ダイナミックレンジ	180 K - 400 K
NEΔT	0.2 K @ 300 K
FPN	0.3 K @ 300 K
校正精度	4 K (目標 2 K @ 300K)
電力	< 20 W

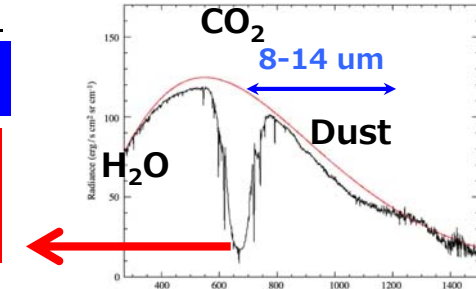
MELCO: 2000x1000 (15 μm<sup>2</sup>)開発にも成

# MEMS Bolometer array: 問題点

「熱撮像」(180-400K) with High Spatial resolution is OK:  
Akatsuki LIR (2010-), Hayabusa-2 TIR (2014-) ...



「Smaller bandwidth」:  
limited by the formation of  
optical cavity structure  
[width: λ/4]

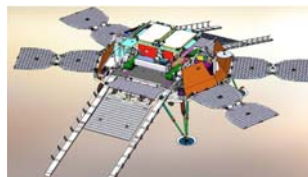


MEX/PFS Martian spectrum [Giuranna et al., 2005]

# Uncooled: Thermopile 2D array

(例) ESA ExoMars 2018: Surface Platform

FAST: a Fourier Imaging Spectrometer



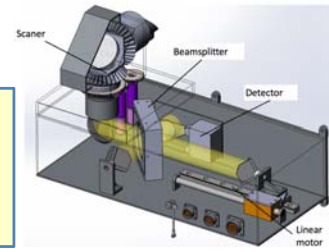
D\* ~ 10<sup>9</sup>

<Wider>

\* 1.7-25μm

<Smaller>

\* 32x32 pixels



# Cooled (~77K): 国産検出器の現状

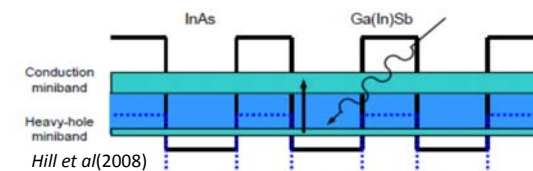
	HgCdTe(PC型)	HgCdTe(PV型)	QWIP/QDIP(GaAs/AlGaAs等)	Type II 超格子 (InAs/GaSb)
メーカー	浜松ホトニクス 富士通	富士通 (防衛省)	富士通 (防衛省)	住友電気工業 (JAXA)
開発実績	ADEOS/OCTS ADEOS-II/GLI ASTER/TIR GOSAT/TANSO などで実績あり	防衛用に480x8(TDI)などを開発(研究は終了) 	防衛用に640x480画素のQWIP, 1024x1024画素の2波長QDIPを開発 	カットオフ波長6μm, 320x256画素のType II 超格子赤外検出器を開発。 
宇宙用への適用性	十分な実績があるが、近年より感度が高く多画素化が可能なPV型が主流になりつつある。	国内製で宇宙用実績はない。GCOM-C/SGLIでは海外製(佐Sofradir)を採用。	海外ではLandsat-8にQWIPを採用。	国内外とも宇宙用実績はない。
海外との比較将来の発展性		海外では2波長化の開発が進んでいる。宇宙用の実績も多数。また画素数では海外に比べかなり遅れている。	感度の面では海外とほぼ同等。海外では多波長化の開発が進んでいる。	海外ではHgCdTeに代わる新しい赤外検出器として、官民共同で大規模に研究が進められている(一部中間赤外で製品化)。

現在宇宙用として主流の赤外検出器 (国産技術は大きく出遅れ)

防衛省/JAXAで新たに取り組んでいる検出器

# Cooled (~77K): 国産検出器の開発 by JAXA/立命館大

## Type II 超格子 (super-lattice) 赤外検出器



Hill et al(2008)

• InAs/GaSb Type II 超格子は、HgCdTeに代わる赤外検出器となりうる。  
[Smith and Mailhot, 1987]]

• 分子線エピタキシー法 (MBE) の発達により高精度結晶が作られるようになった。

目標スペック

Wavelength range	4-15μm Cutoff: 15μm
Number of pixels	100x100
sensitivity D*	>10 <sup>11</sup> cm Hz <sup>1/2</sup> W <sup>-1</sup>

• Type II 超格子の特徴

- ① 高い量子効率を持つ
- ② 幅広い波長幅に対して感度を持つ
- ③ III-V 族化合物半導体技術を利用可

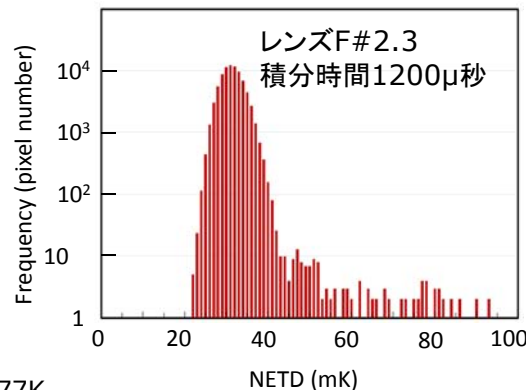
# Cooled (~77K): 国産検出器の開発 by JAXA/立命館大

Type II 超格子赤外検出器の試作: 性能 (カットオフ波長6μm)

住友電気工業と共同でアレイ素子 (320x256) の開発に成功。

オペラビリティ(有効画素数)99%

雑音等価温度差(NETD) 32mK



レンズF#2.3 / 積分時間0.8ms / 動作温度77K

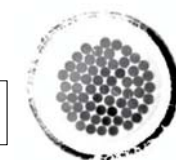
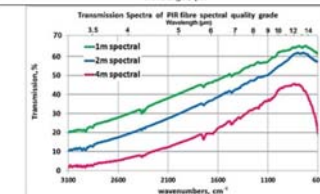
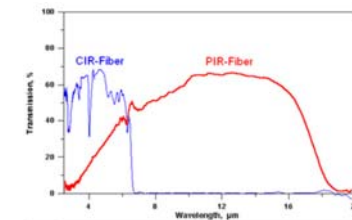
MCTとの差は数倍程度まで短縮。MCTに替わる「MIR Heterodyne 検出器素子」としても期待

ART photonics (Germany)のIRファイバー活用による機器小型化検討

	中赤外用CIRファイバー	遠赤外用PIRファイバー
透過波長帯域	1.5~6 μm	4~18 μm
コア材質/クラッド材質	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /As-S	AgCl <sub>0.25</sub> Br <sub>0.75</sub> /AgCl <sub>0.50</sub> Br <sub>0.50</sub>
保護チューブ	*PTFE/PVCの2層保護コート付	
保護チューブ	PEEK	
コア屈折率	2.4	2.15
有効NA	0.25~0.28	0.25~0.31
使用温度範囲	-200°C~+100°C	-270°C~+150°C
最大透過パワー	1W (CW)	50W (CW)
減衰率	0.2dB/m (2~4 μm)	0.1~0.5dB/m (10.6 μm)

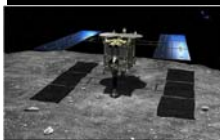
カルコゲナイド(CIR)  
1.5~6 μm

多結晶PIR  
4~18 μm



Bundle (Example)

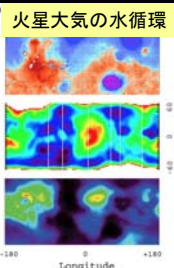
## Dual-Useの赤外線分光器開発 - 火星の“衛星物質分析” & “大気物質分析”



赤外線分光探査  
<ベース機器>  
Hayabusa-2 NIRS3

[Target: 大気 (分散>>400)]  
水蒸気 (2.6μm)  
CO (2.4μm)  
CO2雲/雪 (2.7μm)  
...

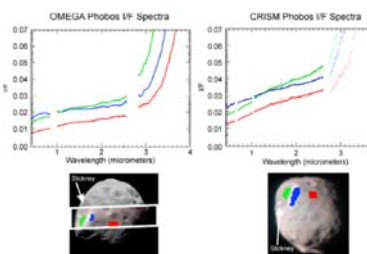
火星大気: 初の赤道面からの  
常時大規模分布monitor



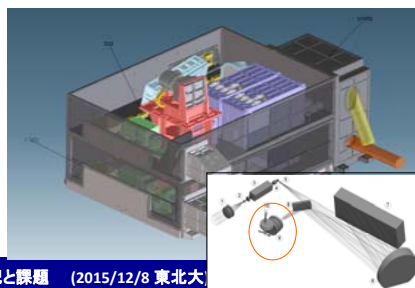
感度 & 波長カバー範囲の  
向上によりDual-Use化

共同研究下にある欧州研究グループ (ベルギー・イタリア)と  
“ExoMars TGOベース”の“検出器&冷凍器ユニット”  
を改良導入、「軽量」で「大気観測」も可能な高性能化へ。  
[輸出規制に起因するリスクの回避も含め、欧と組むのは長期的に有益。]

衛星表面: サンプル取得場所  
& 周囲の組成を得る



[Target: 表層 (分散>400)]  
宇宙風化度 (2.0~2.7μm)  
層状ケイ酸塩の構造水 (2.7~2.8μm)  
分子水 (2.9~3.1μm)  
有機物のCH直鎖構造 (3.3~3.6μm)



突破口 & Suggestionをお持ちの方、  
ございましたらご教示頂けますと幸いです。

### I. Near IRセンサー

with 岩田 (JAXA), Vandaele, Neefs (IASB/Belguim), Korablev (IKI)

### II. 小型冷凍機

with 鶴 (阪大)

### III. Mid IRセンサー

with 片山 (JAXA), 木股 (立命館大), 田口 (立教大)

### IV. Fiber Optics

<to be continued in next talk>

with 平原 (名大), 中川 (東北大)