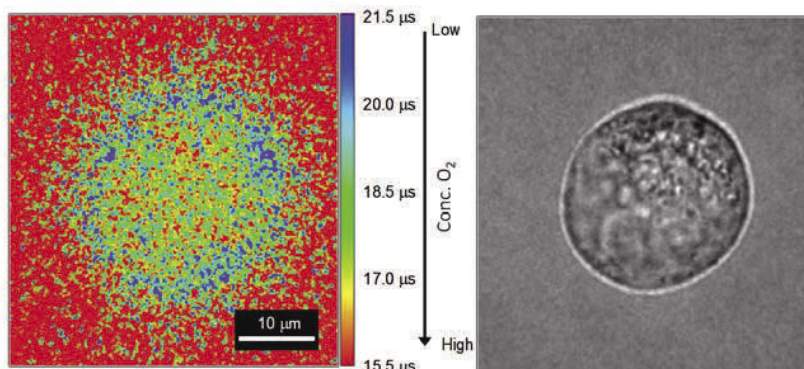
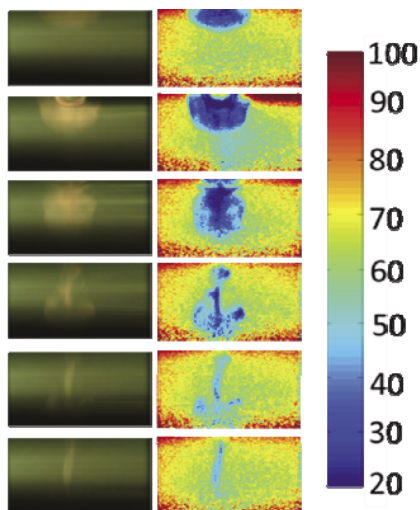
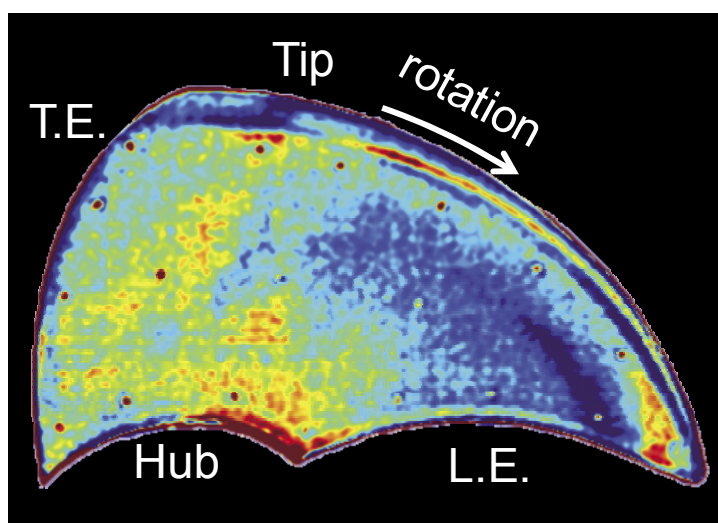
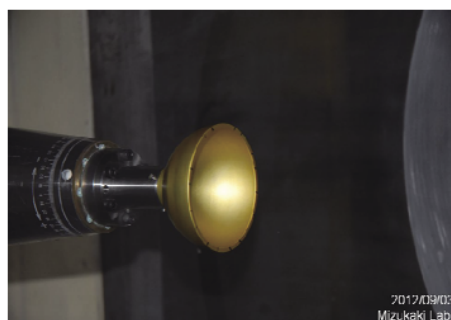


第 10 回学際領域における分子イメージングフォーラム

Proceedings of the 10th Interdisciplinary Forum on Molecular Imaging



主催：宇宙航空研究開発機構(JAXA)

第 10 回学際領域における分子イメージングフォーラム

組織委員・実行委員

組織委員

伊藤 健 (宇宙航空研究開発機構)

大倉 一郎 (東京工業大学)

浅井 圭介 (東北大学)

新美 智秀 (名古屋大学)

小栗 一将 (海洋研究開発機構)

実行委員

坂上 博隆 (宇宙航空研究開発機構)

飯島 由美 (宇宙航空研究開発機構)

中北 和之 (宇宙航空研究開発機構)

守田 克彰 (宇宙航空研究開発機構)

中澤 文恵 (宇宙航空研究開発機構)



フォーラム主催: 宇宙航空研究開発機構

東京都調布市深大寺東町 7-44-1

はしがき

本報告書は、2014年11月7日にJAXA調布航空宇宙センターにおいて開催された第10回「学際領域における分子イメージングフォーラム」の講演要旨を収録したものである。

本フォーラムは流体、化学、光学及び画像処理技術といった異分野間の研究連携による相乗効果を狙い、『分子イメージング』を共通のキーワードに、JAXAの主催により毎年秋に開催されている。講演者、発表者、参加者同士の距離が近い、活発な質疑応答及び意見交換を意図し、大規模なシンポジウムではなく専門家が集う比較的小規模な研究会形式で行うことを特徴としている。

第10回となる今回は外部から分子イメージング技術に関する異なる分野(化学分野、計測分野、地球惑星科学分野、機械工学分野)の研究について、国内の著名な研究者4名を招待し、最先端の研究成果について総括的講演をしていただいた。一方、JAXA内からは分子イメージング技術の航空宇宙分野への適用について、流体に限定せず、構造・材料、エンジンといった多分野への展開を目指す目的で、航空機の運航安全分野での分子イメージング技術へのニーズに関する講演が行われた。

ポスターセッションでは最新の分子イメージング技術の研究成果18件の発表が行われた。感圧・感温塗料計測技術(PSP、TSP)に関する研究発表が大きな割合を占めているが、その中でも高速応答センサ開発や回転体などの移動物体計測といった非定常現象へのPSP/TSP計測技術の応用研究が増える傾向にある。他に、液体や液滴の温度計測など空気力学以外の分野への応用などについても研究が進んでおり、将来の分子イメージング技術に向けたシーズの1つとなることが期待される。

今後も分子イメージング技術の深化と適用分野の拡大、さらには異分野連携の推進によって新たな展開を先導するようなフォーラムとなるよう、関係各位と協力しつつ企画していきたいと考えている。

第10回「学際領域における分子イメージングフォーラム」

組織委員長

伊藤 健

TABLE OF CONTENTS

～招待講演～

ポルフィリンの蛍光，りん光の利用：細胞内の情報を得るために.....	4
大倉 一郎 < 東京工業大学 >	
次世代イメージングを担う科学計測用 CMOS カメラの特徴と今後.....	29
杉下 財 < 浜松ホトニクス株式会社 >	
同位体イメージングの新展開.....	49
坂本 直哉 < 北海道大学 >	
赤外線計測による機械・構造物の非破壊評価.....	70
阪上 隆英 < 神戸大学 >	
航空機冬期運航の安全性維持 / 効率性向上に関する JAXA の取り組み.....	113
神田 淳 < JAXA >	

～ポスターセッション～

P01 PSP 用バインダー poly(HFIPM) の分子構造改変と性能評価.....	123
小幡 誠, 安里 涼 < 山梨大学 >	
満尾 和徳 < JAXA >	
P02 発光性色素が均一分散した高分子光学センサーの開発.....	125
濱崎 愛子 < 東京工業大学 >	
百武 壮 < 土木研究所 >	
坂上 博隆 < JAXA >	
道信 剛志 < 東京工業大学 >	
P03 超高速スプレー型 PSP の開発：溶媒の応答時間への影響.....	127
小西 翔太, 江上 泰広 < 愛知工業大学 >	

- P04 高い圧力感度を有する感圧発光ポルフィリン薄膜の開発 129
荒井 義晴 < 富山県立大学 >
永野 和也 < 佐藤鉄工株式会社 >
谷口 政幸, 大嶋 元啓, 坂村 芳孝, 川端 繁樹 < 富山県立大学 >
- P05 遷音速非定常現象計測のための粒子混合型感圧塗料の開発 131
杉岡 洋介, 沼田 大樹, 浅井 圭介 < 東北大学 >
小池 俊輔, 中北 和之, 古賀 星吾 < JAXA >
- P06 ベークライトを用いた 2 色発光感温センサーの開発 133
飯野 真, 石川 仁 < 東京理科大学 >
坂上 博隆 < JAXA >
- P07 高温衝撃風洞 HIEST への適用を目指した感温塗料(TSP)の改良とその実証試験結果 ... 135
長山 剛大, 洞桐 健人, 永井 大樹 < 東北大学 >
丹野 英幸, 小室 智幸 < JAXA >
- P08 非定常感圧塗料の応答性に対する周囲圧力の影響 137
佐々木 大介, 沼田 大樹, 浅井圭介 < 東北大学 >
- P09 AA-PSP/TSP における二色発光スペクトル解析 140
平田 祐樹 < 東京大学 >
山田 有希, 呉屋 英樹 < 電気通信大学 >
坂上 博隆 < JAXA >
- P10 感温色素溶液の濃度による発光量変化 142
菊池 直樹, 田中 滯, 木村 茂雄 < 神奈川工科大学 >
坂上 博隆 < JAXA >

- P11 二色発光を用いた過冷却水滴の温度計測法 144
田中 濤 < 神奈川工科大学 >
守田 克彰 < JAXA >
木村 茂雄 < 神奈川工科大学 >
坂上 博隆 < JAXA >
- P12 レーザー誘起蛍光法によるマイクロ超音速ノズル内流れの数密度測定法に関する研究 ... 146
田中 晃平, 神原 秀仁, 半田 太郎 < 九州大学 >
- P13 感温 2 色発光溶液を用いた液体温度計測 148
呉屋 英樹, 宮崎 武 < 電気通信大学 >
坂上 博隆 < JAXA >
- P14 AA-PSP による超音速流中での前向き凹状物体内部の圧力変動の可視化 150
末木 未来, 杉木 康彦 < 東海大学 >
山田 和彦, 安部 隆士 < JAXA >
水書 稔治 < 東海大学 >
- P15 低ゲージ圧領域への PSP の適用 153
森 英男, 大村 尚登, 前田 恭平, 内田 祐樹, 竹田 敬士郎 < 九州大学 >
- P16 感圧塗料 (PSP) を用いた回転体表面圧力分布計測 155
栗原 大輝, 石川 仁 < 東京理科大学 >
坂上 博隆 < JAXA >
- P17 Motion Capture PSP 法を用いた 1.27m 極超音速風洞試験 157
山田 有希, 宮崎 武 < 電気通信大学 >
坂上 博隆 < JAXA >

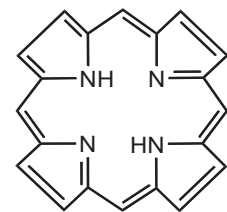
ポルフィリンの蛍光、りん光の利用 細胞内の情報を得るために

蛍光を利用するがんの検出 細胞内の酸素濃度測定

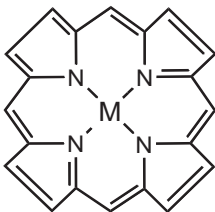
大倉一郎

Porphyrin

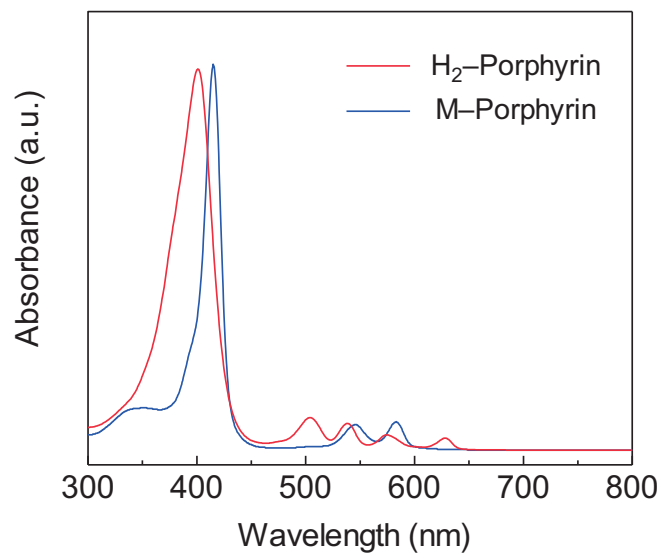
Hemoglobin	Fe-Porphyrin
Myoglobin :	Fe-Porphyrin
Vitamin B ₁₂ :	Co-Porphyrin
Chlorophyll :	Mg-Porphyrin



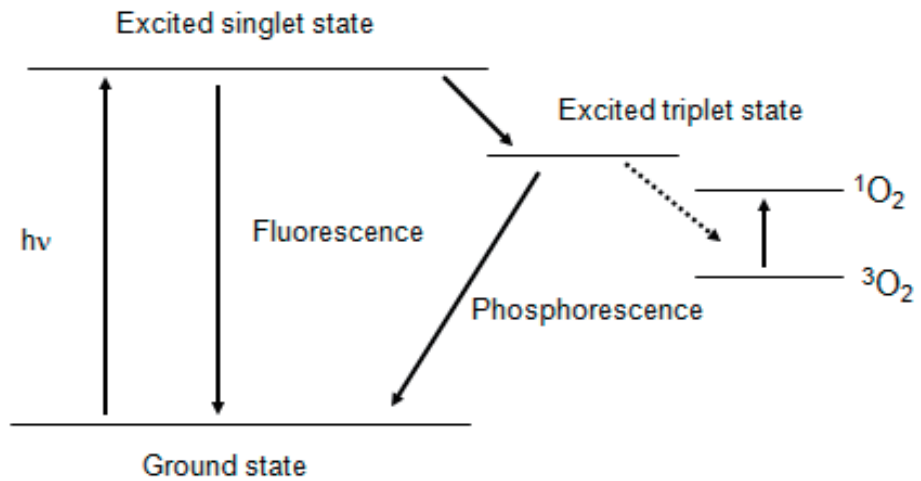
H₂ - Porphyrin



M - Porphyrin



Energy diagram



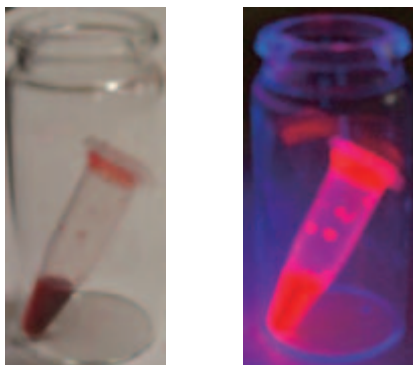
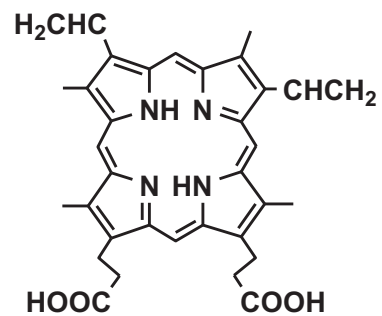
Protoporphyrin IX

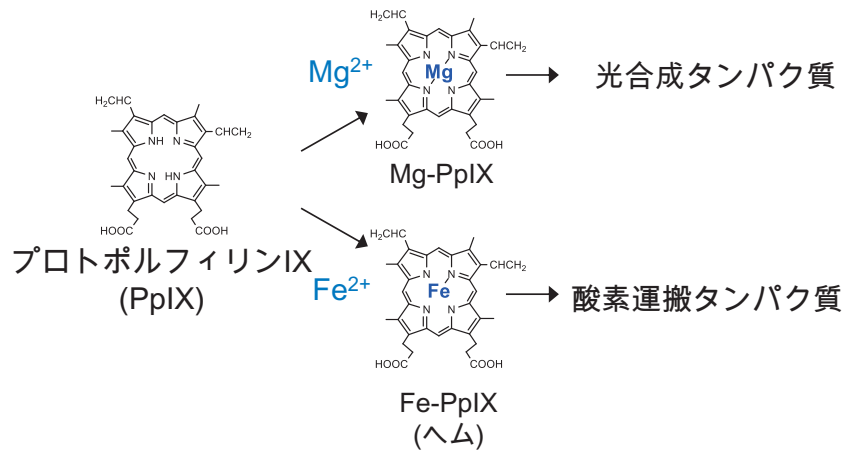
強い赤色蛍光を発する

→がんの蛍光診断・迅速診断

光照射によって活性酸素種を生成する

→がんの光線力学治療

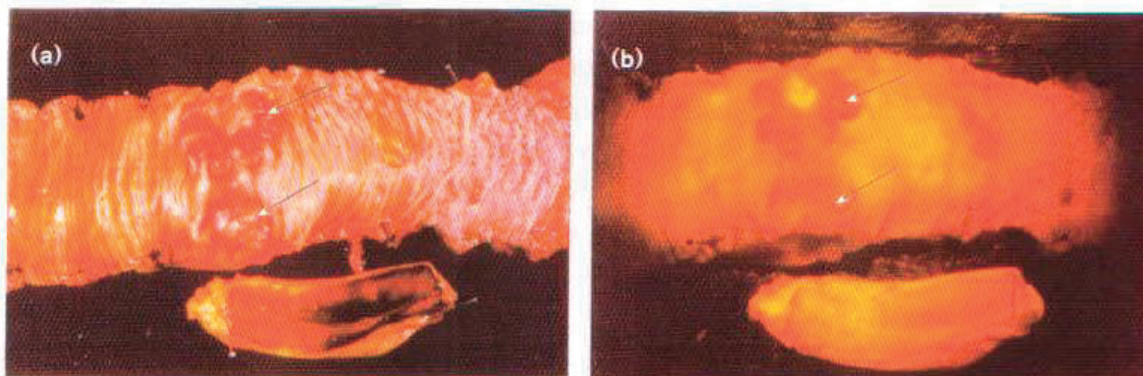




ポルフィリンの蛍光、りん光の利用
細胞内の情報を得るために

蛍光を利用するがんの検出
細胞内の酸素濃度測定

Human Abdominal Cancer



Methods of Extraction of Solid Tumor

Solid tumor

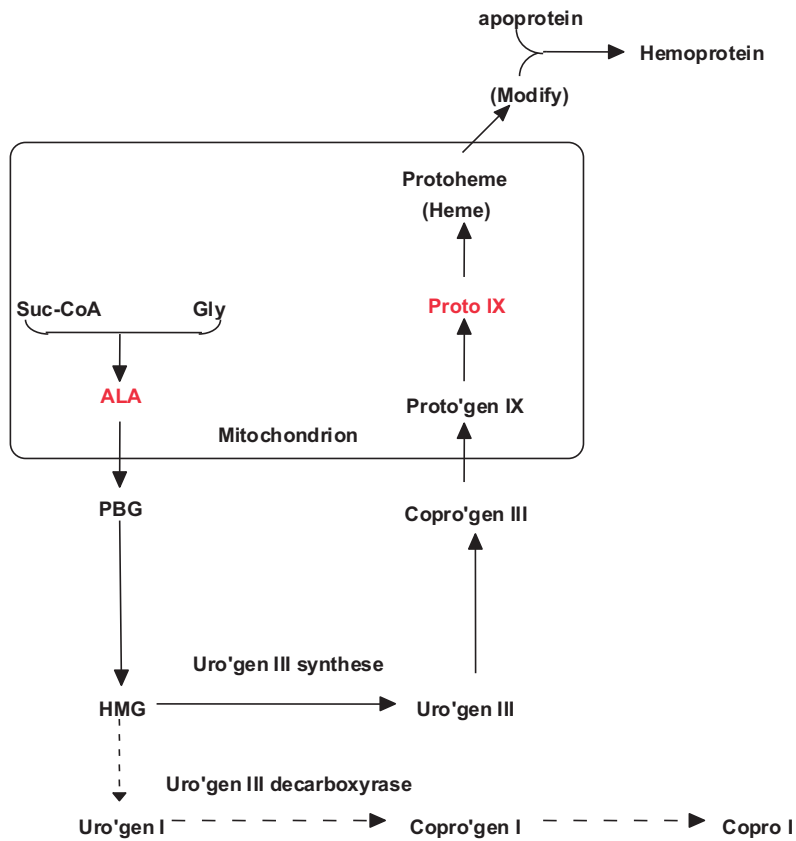
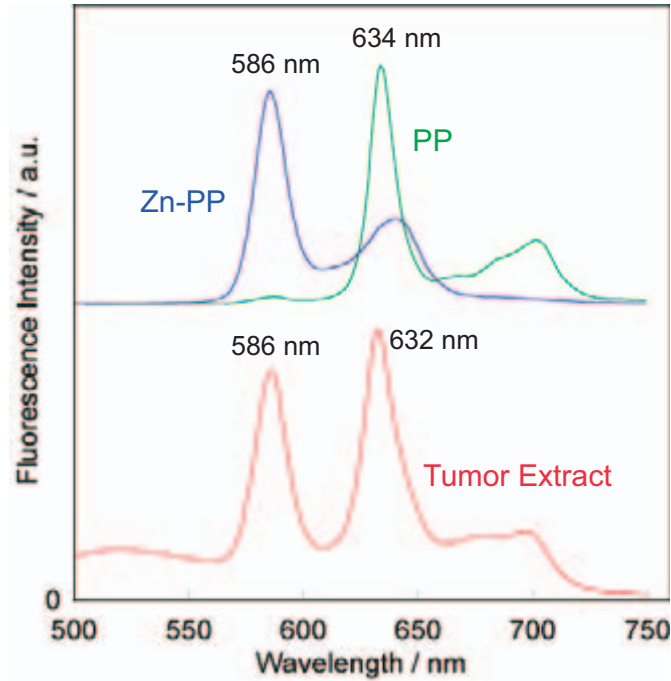
acetic acid : ethyl acetate (4 : 1, v/v) 3 ml

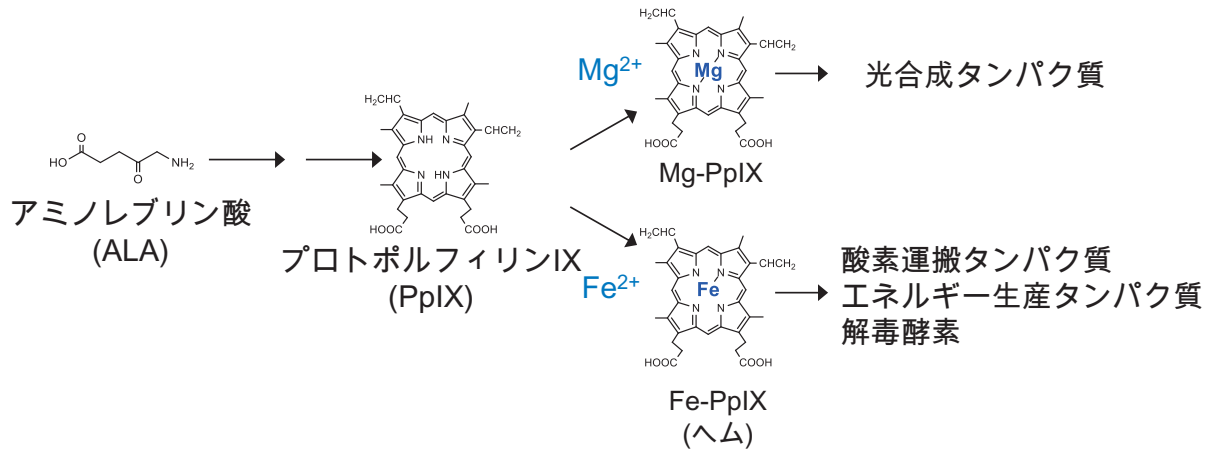
Homogenized

Centrifugated (2000 x g, 2 min, 4°C)

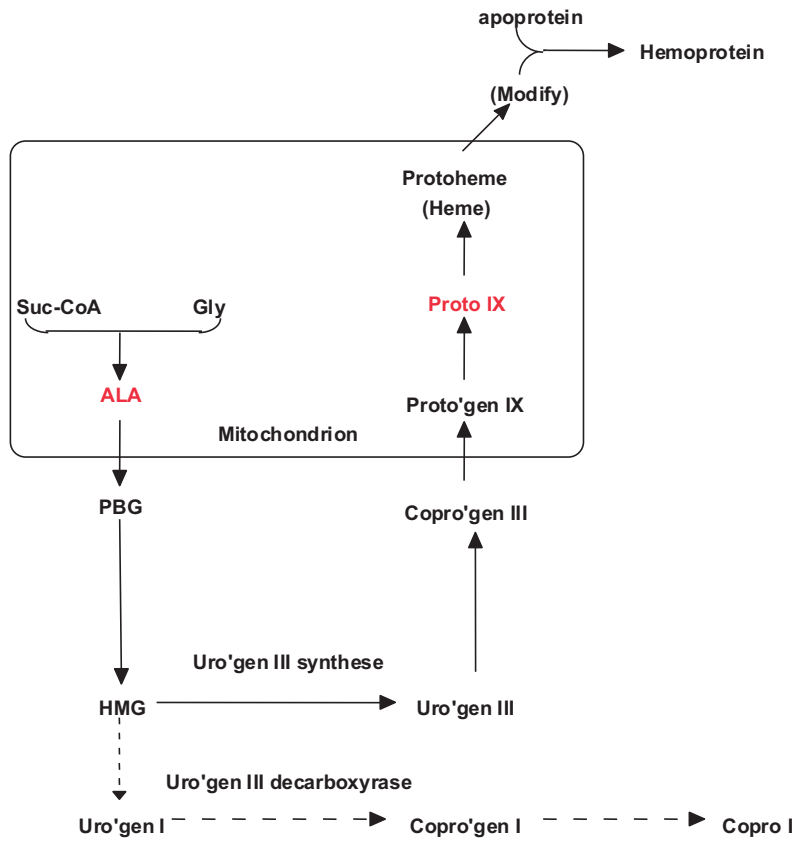
HPLC, Fluorescence

Fluorescence Spectrum from Tumor Extract

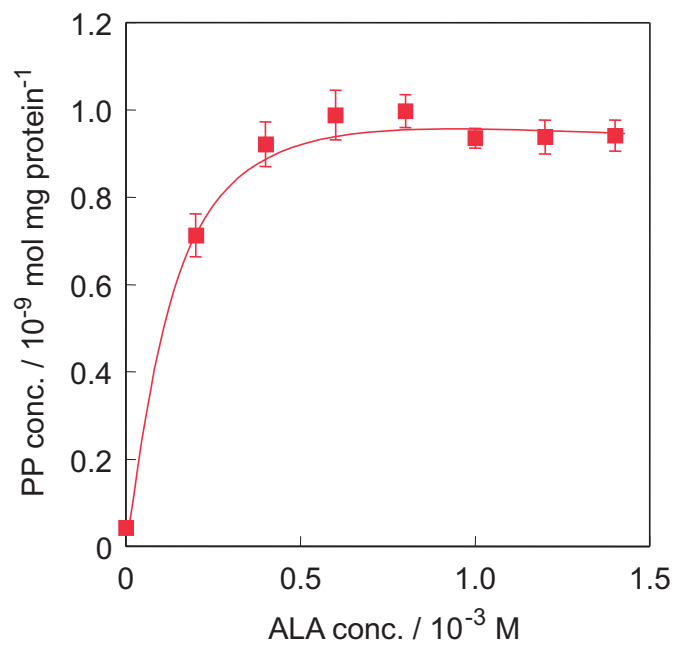




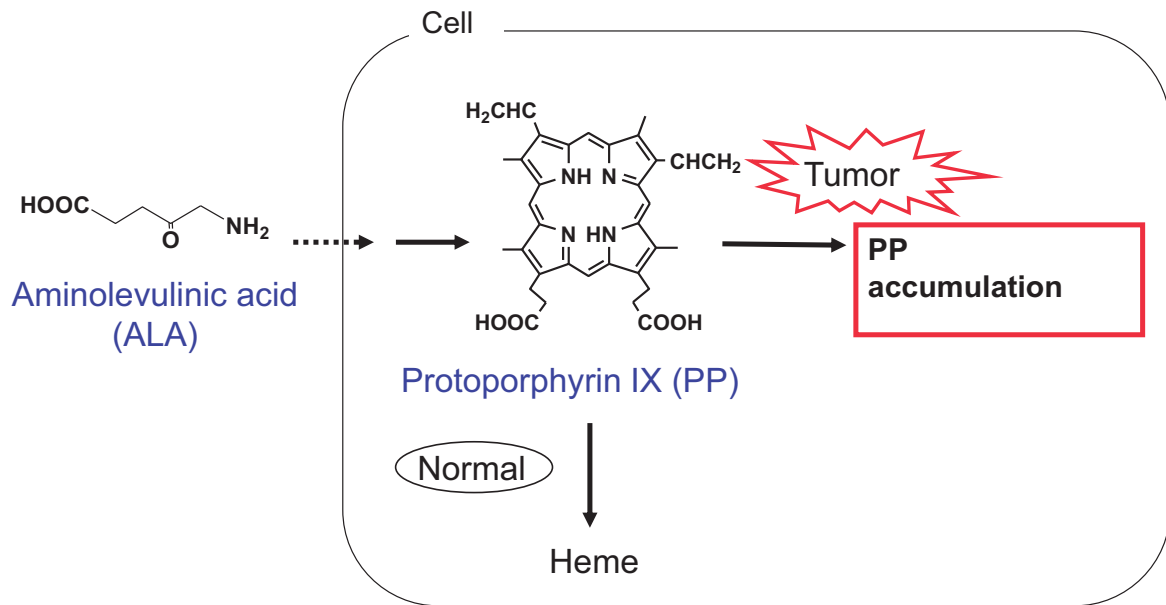
ALAを配合した肥料で栽培したサラダ菜
 ALA配合肥料で生育したサラダ菜(右)およびALA非配合肥料で生育したサラダ菜(左)



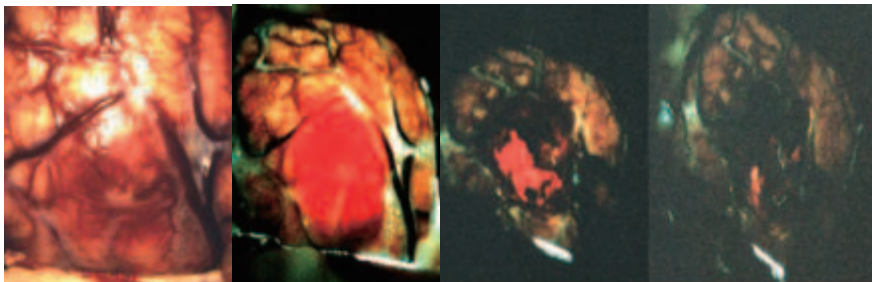
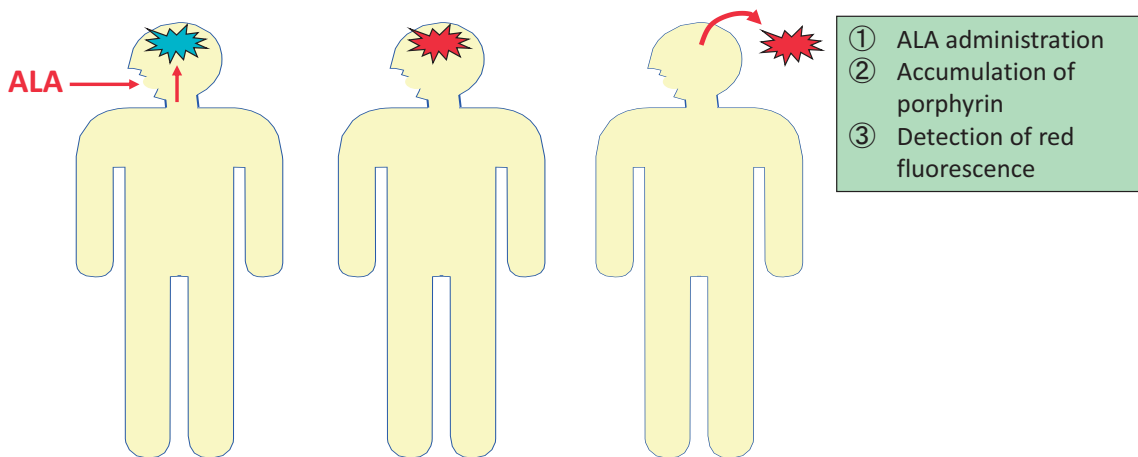
PP accumulation in HeLa cells

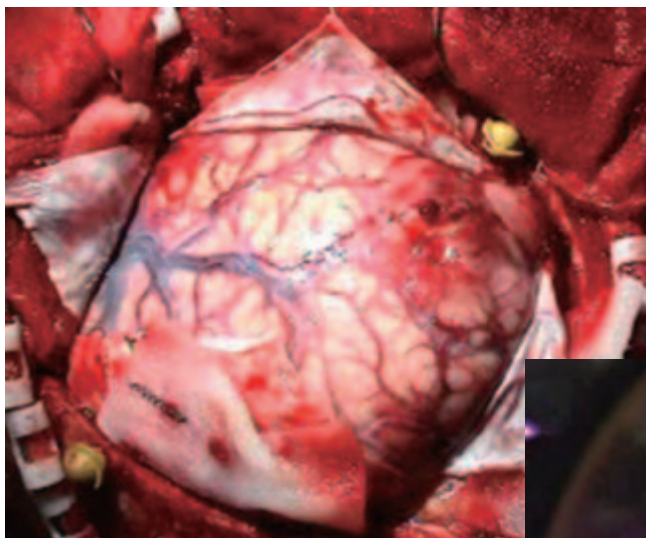


Protoporphyrin IX accumulation after ALA administration

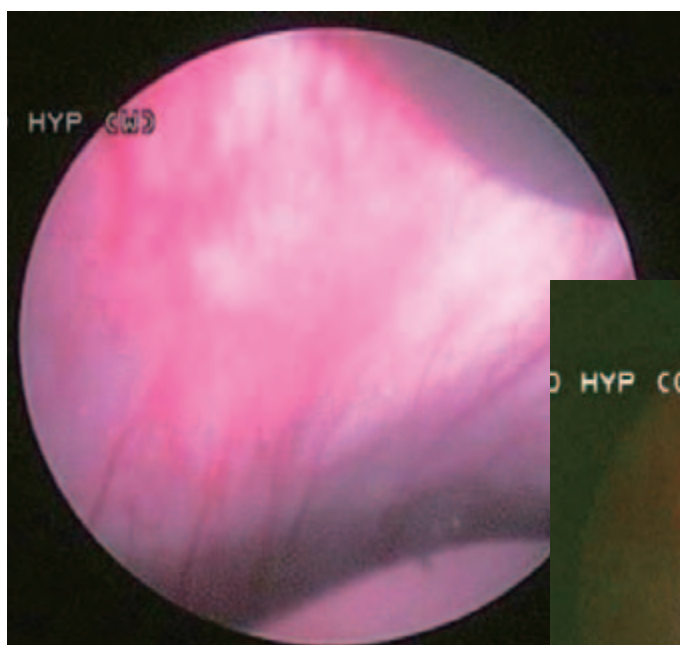
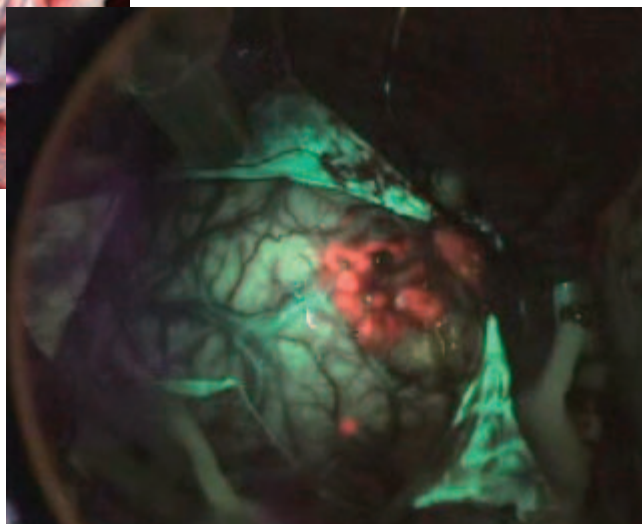


Diagnosis of brain tumor using ALA

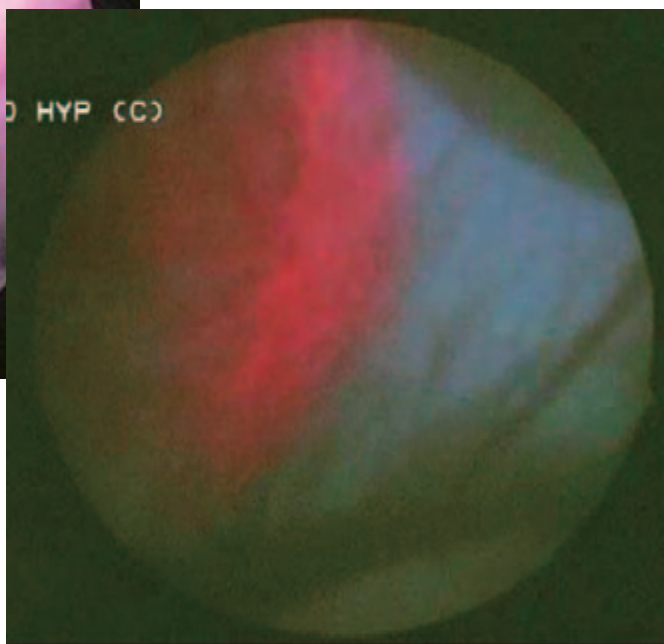




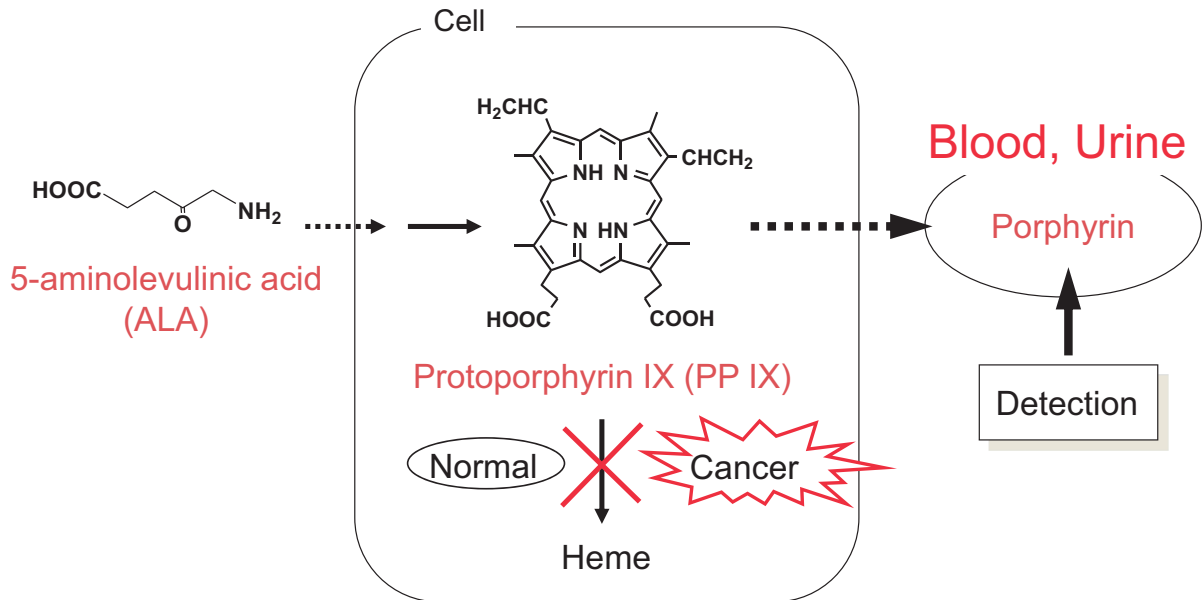
ALAを用いた
脳腫瘍の術中診断



ALAを用いた
膀胱癌の術中診断

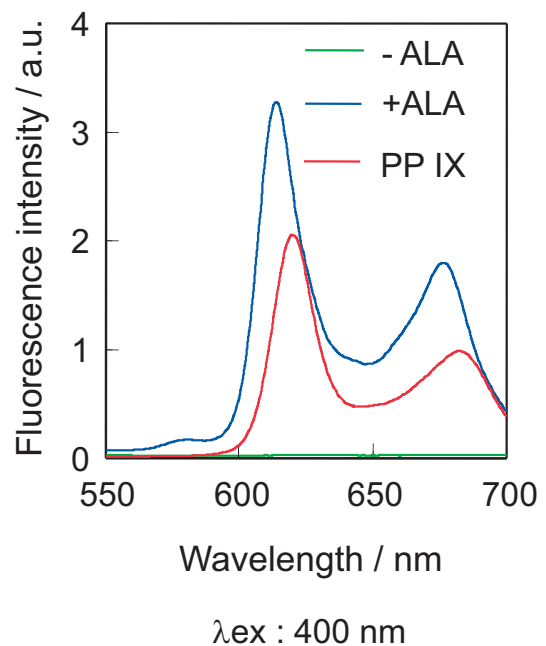
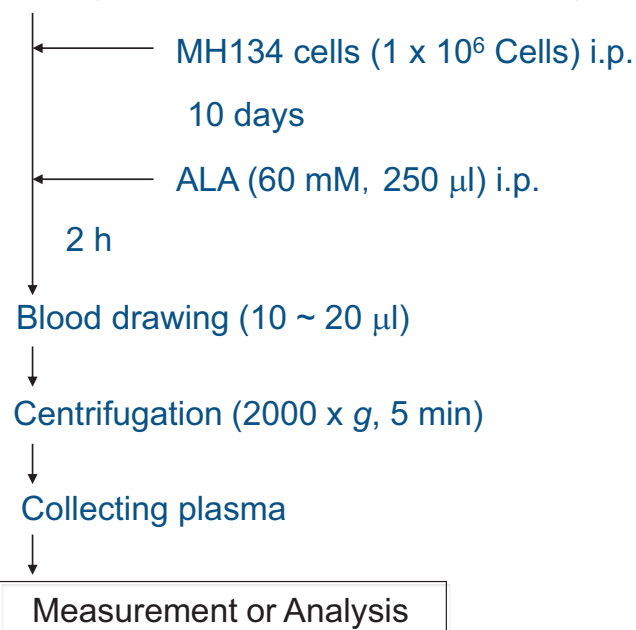


Analysis of porphyrins after administration of ALA

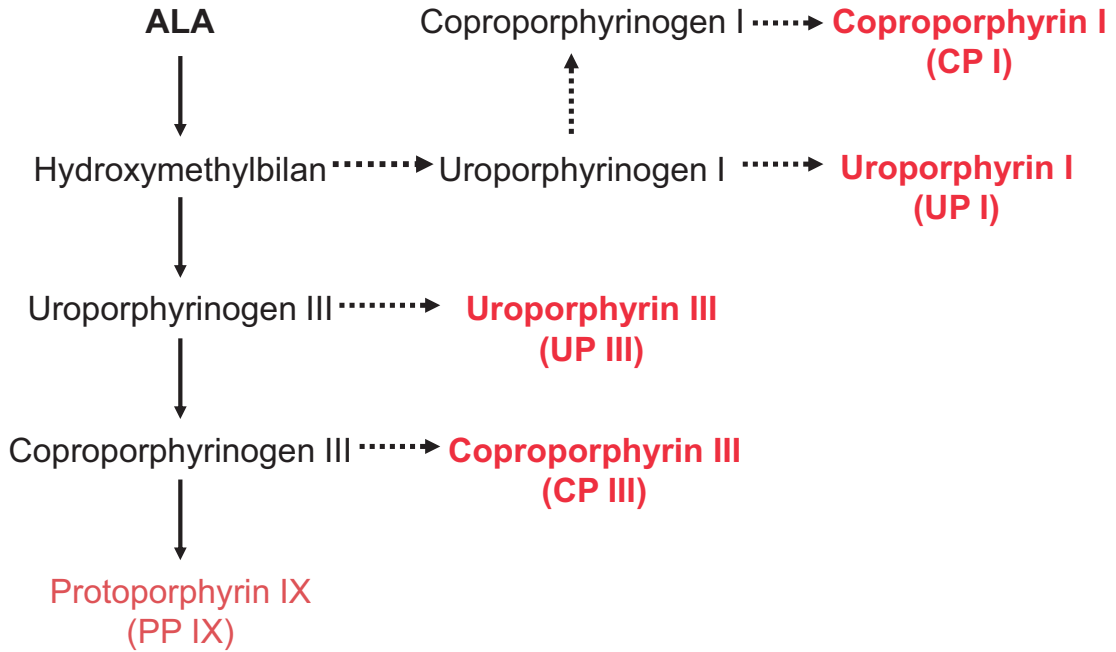


Fluorescence spectra of plasma

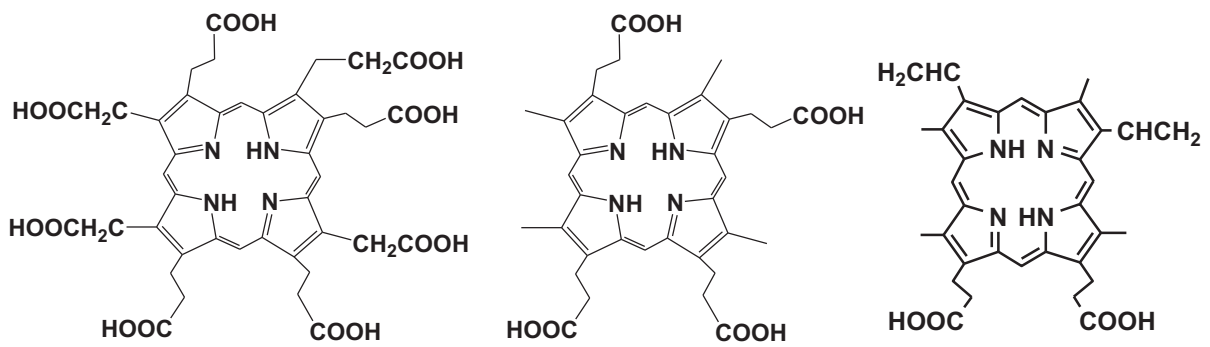
Mice (C3H/He strain, 5-weeks, female)



Formation of porphyrins



Formation of porphyrins



UP III

CP III

PP IX

Carboxyl group

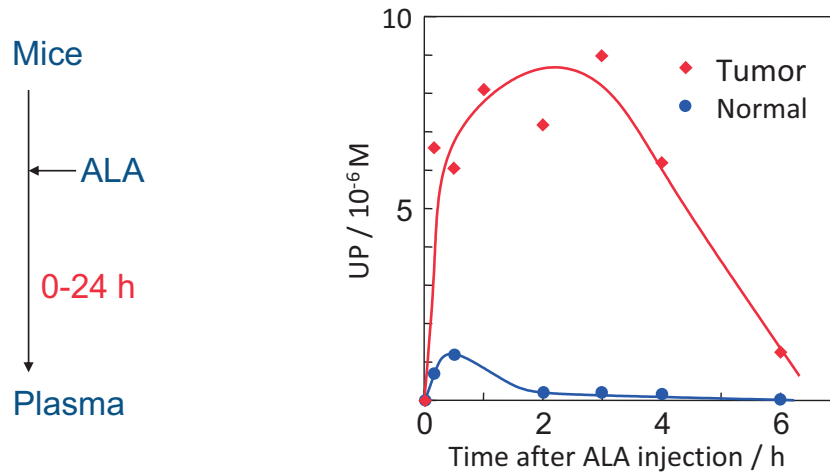
8

4

2

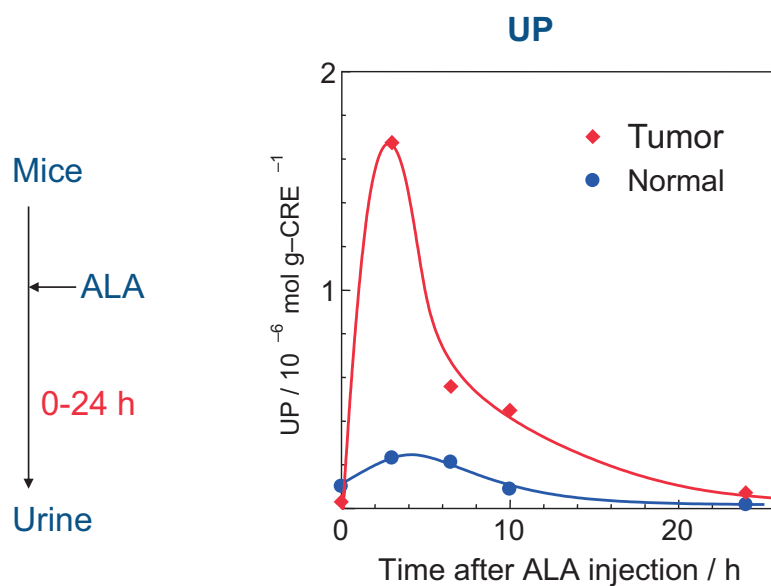
Hydrophobic

Time course of uroporphyrin in mouse plasma



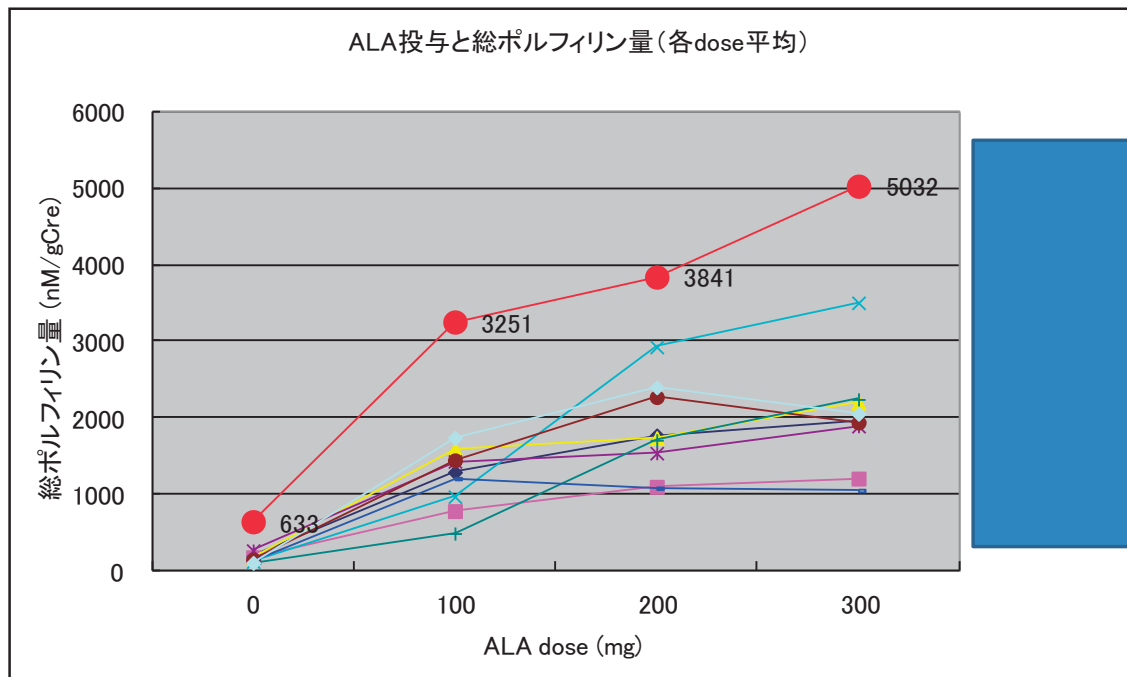
UP in plasma after administration of ALA have a possibility to be tumor marker.

Time course of uroporphyrin in mouse urine



(λ_{ex} : 395 nm, λ_{em} : 617 nm)

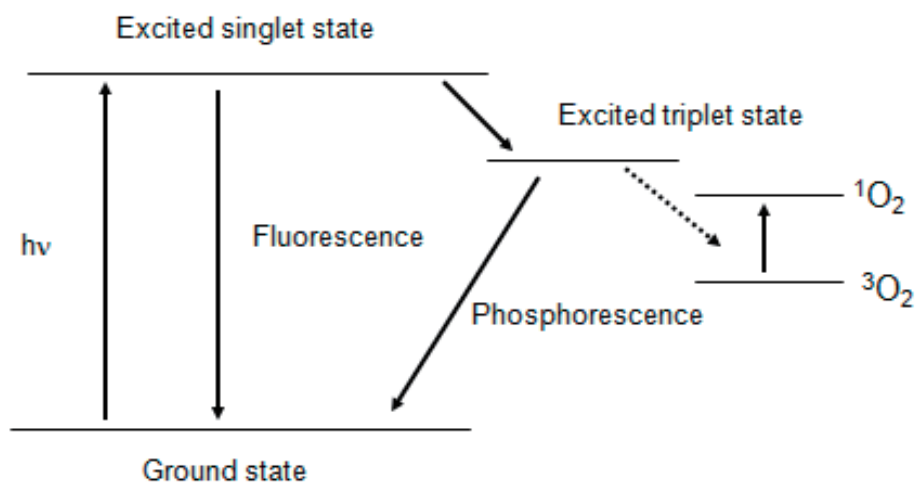
UP in urine after administration of ALA have a possibility to be tumor marker.



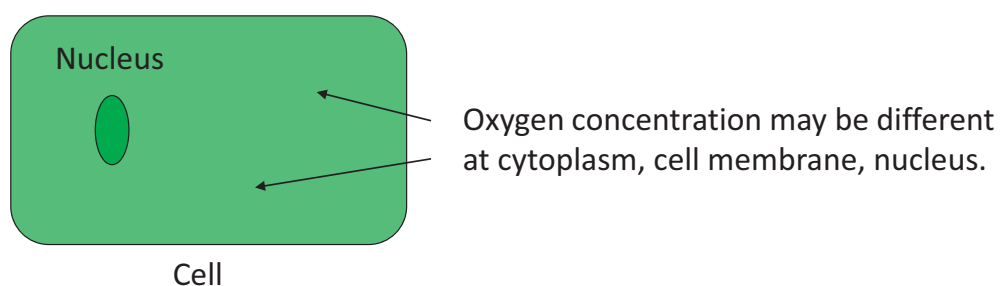
ポルフィリンの蛍光、りん光の利用
細胞内の情報を得るために

蛍光を利用するがんの検出
細胞内の酸素濃度測定

Energy diagram



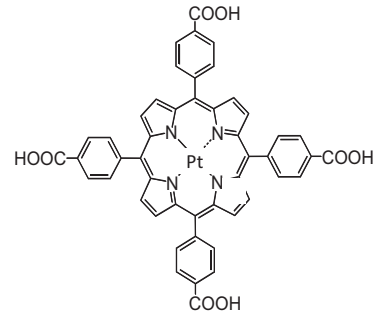
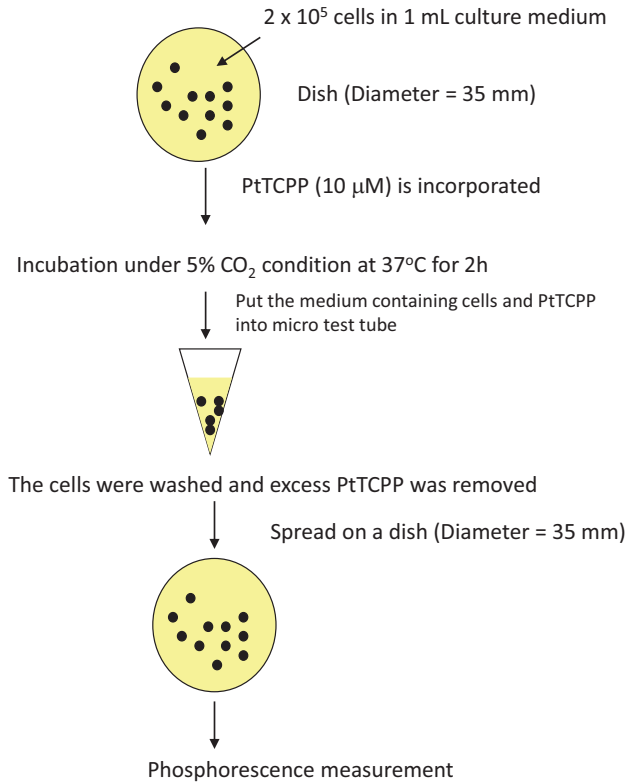
Measurement of oxygen concentration distribution in a living cell



Oxygen concentration imaging system for single cell is developed.

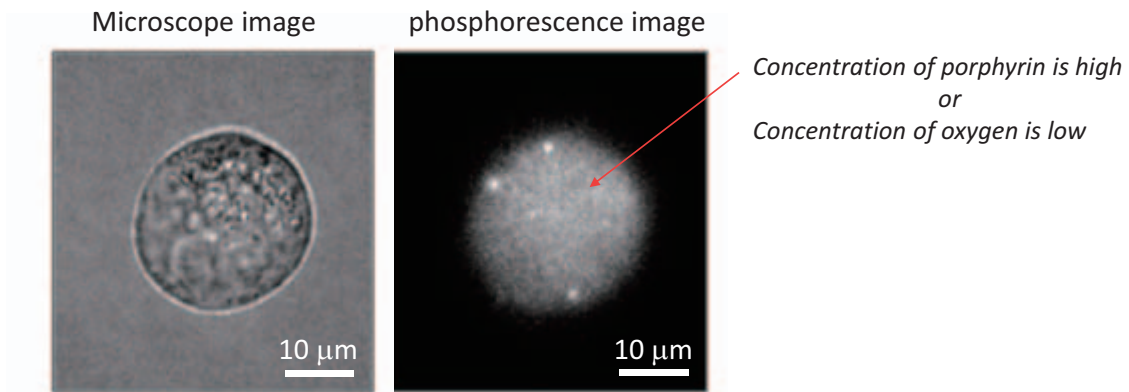
Pt-porphyrin is incorporated in living cell
→ optical oxygen sensing technique is developed

Uptake of Pt-porphyrin by MH134 cell



Pt(II)-tetra-(carboxyphenyl)-porphyrin (Pt-TCPP)

Application of oxygen sensing in a living cell



(MH134 cell in which Pt-porphyrin was taken)

Problems on phosphorescence Intensity measurement

Intensity depends on concentration of porphyrin as well as oxygen concentration

Lifetime is independent of concentration of porphyrin

Lifetime measurement is suitable for oxygen sensing inside cell

Comparison of phosphorescence intensity and lifetime measurement

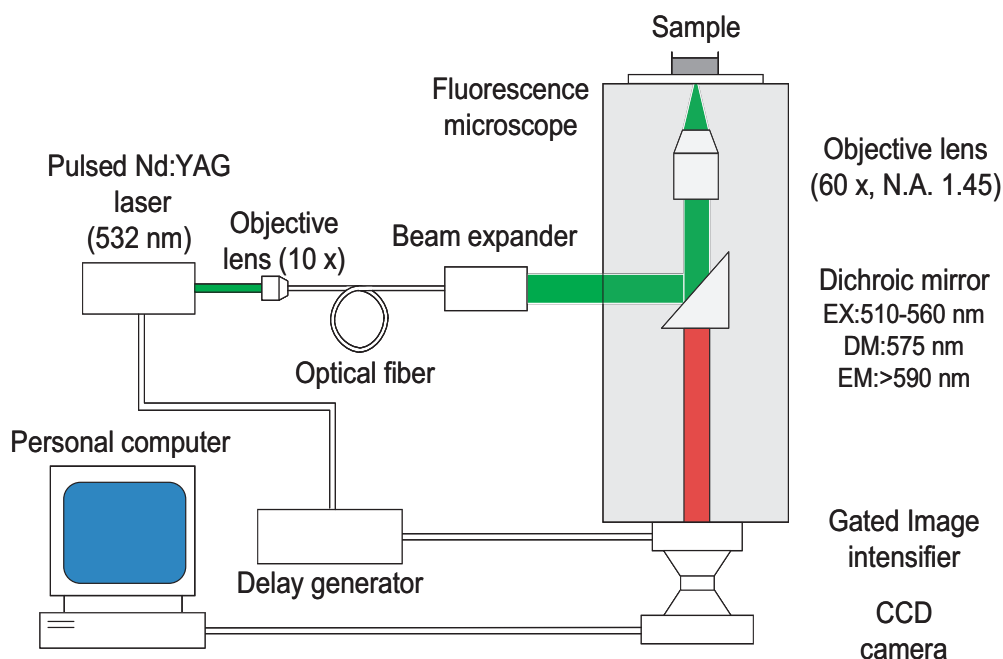
Intensity measurement

- Advantage
 - Easy to measure
- Disadvantage
 - Depend on the concentration of luminophore
 - Depend on the excitation source intensity
- Application
 - Homogeneous surface such as wind tunnel model

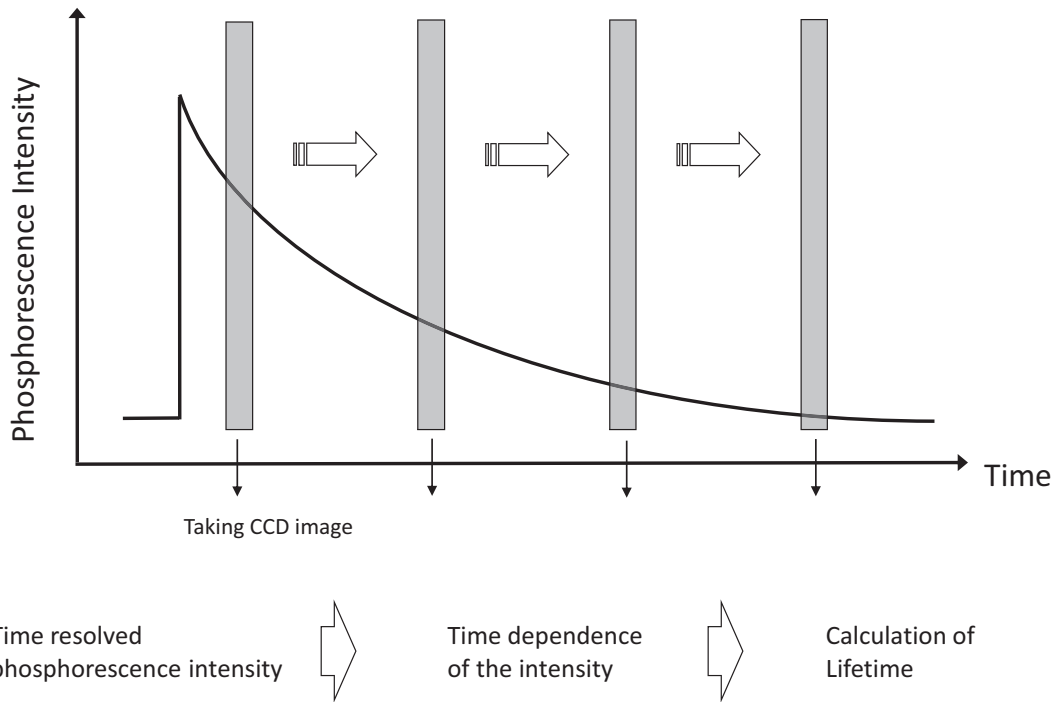
Lifetime measurement

- Advantage
 - Independent of the concentration of luminophore
 - Independent to the excitation source intensity
- Disadvantage
 - Rather complex measurement system
- Application
 - Suitable for intracellular oxygen imaging

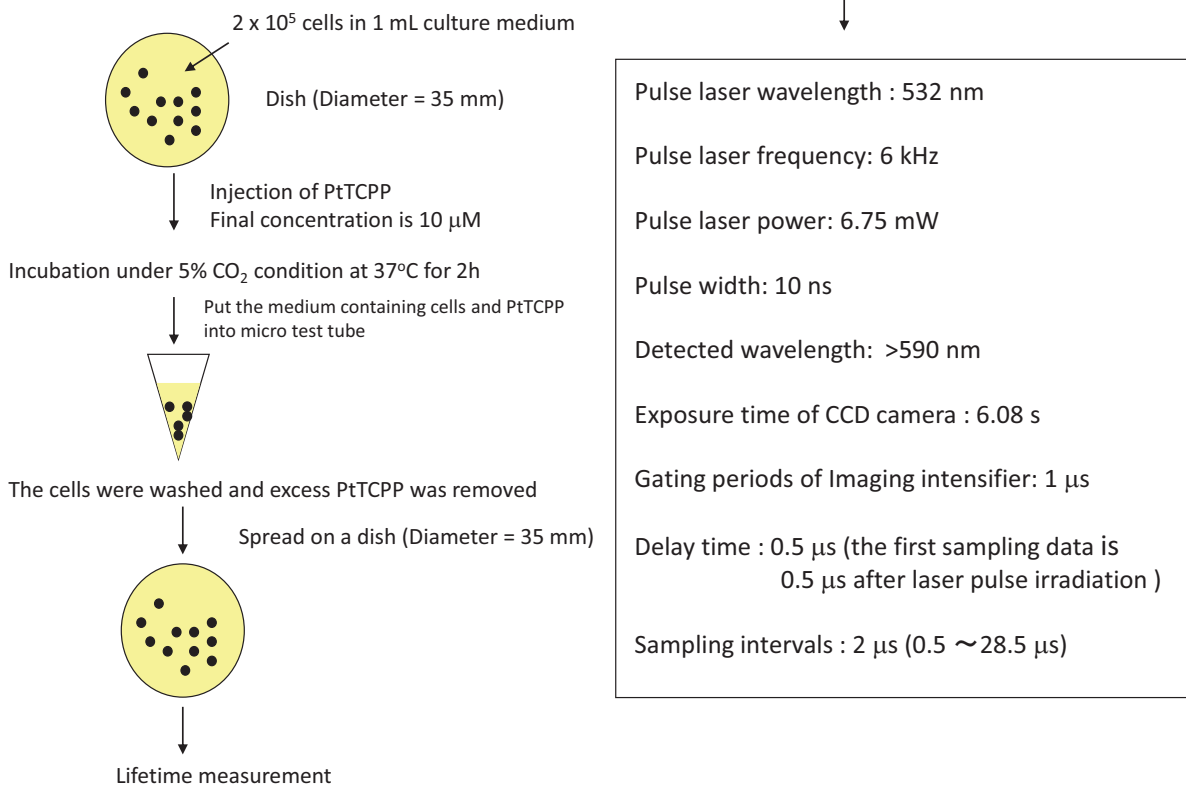
Lifetime measurement system combined with microscope and laser flash



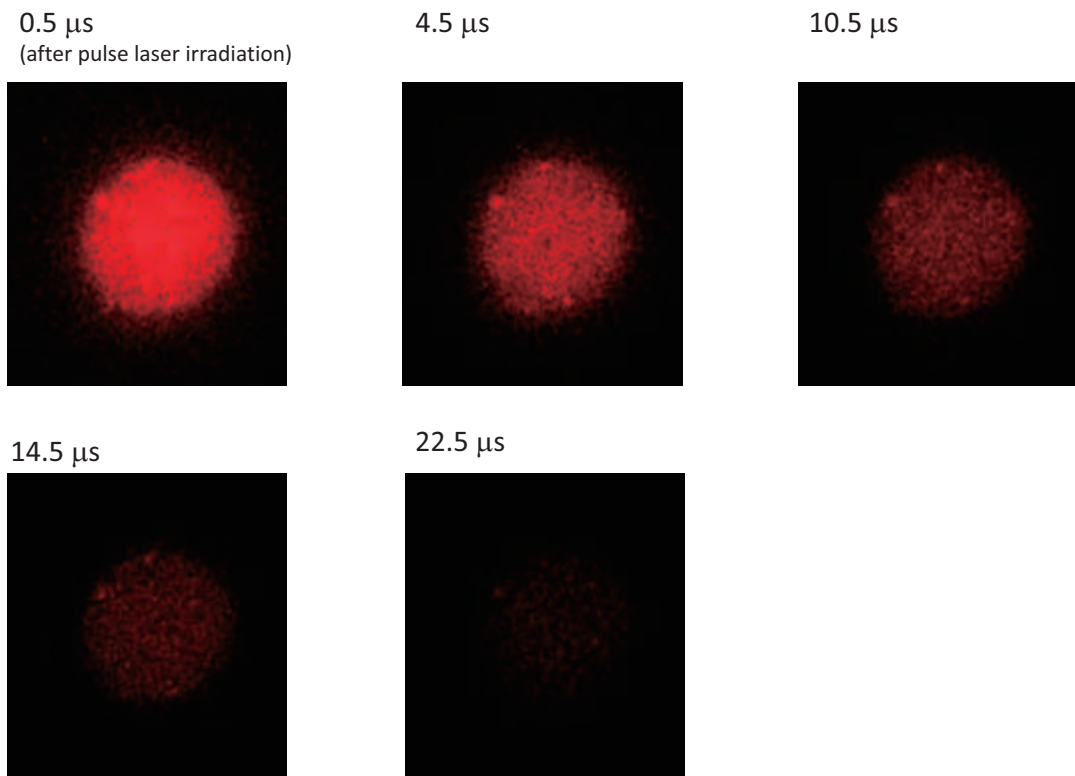
Measurement of phosphorescence lifetime



Lifetime measurement

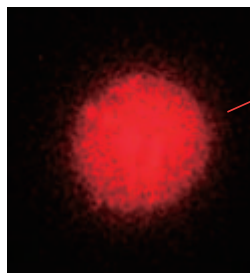


Time resolved phosphorescence image

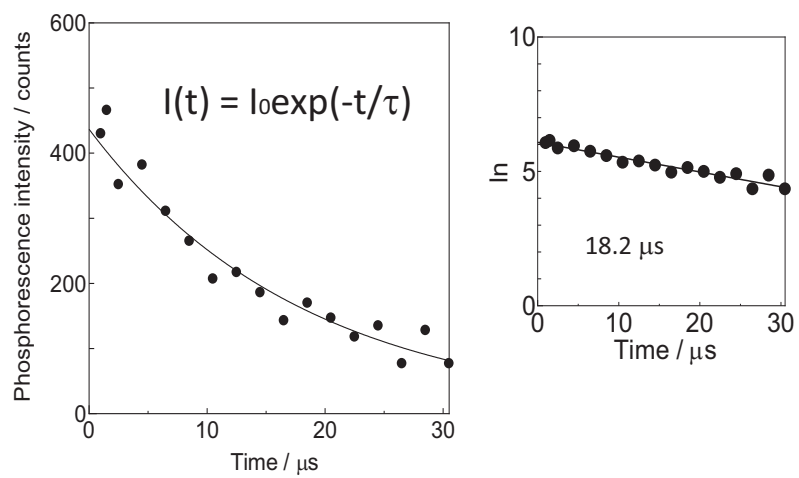


Calculation of phosphorescence lifetime

This picture consists of 1024 x 1024 pixels

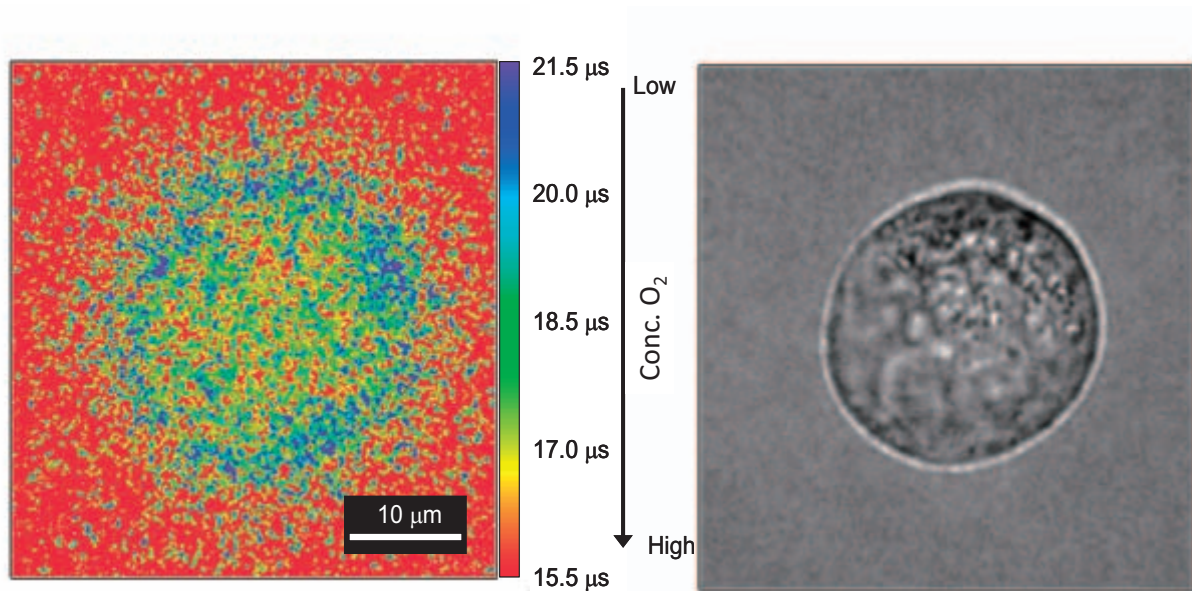


Time dependence of phosphorescence intensity at one pixel.



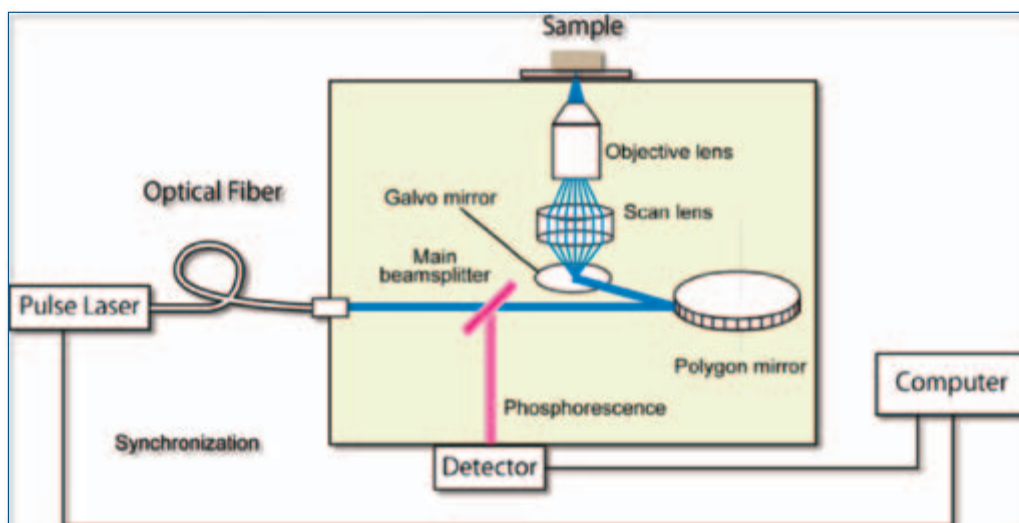
Lifetime imaging is obtained from the lifetime calculation at each pixel (1024 x 1024)

Oxygen concentration imaging in a single cell



Phosphorescence lifetime imaging microscope (PLIM)

- *Phosphorescence lifetime is measured under confocal microscope*



O₂ concentration response of the cancer cell

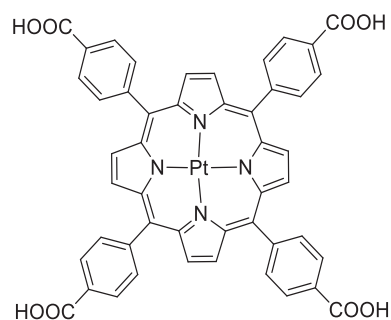
Colon-26 (Mouse rectal cancer)

- Incubated with 50 μM PtTCCP for 6 h.
- Wash with PBS(-) twice
- RPMI 1640 media

[O₂] imaging was obtained under different O₂ concentration



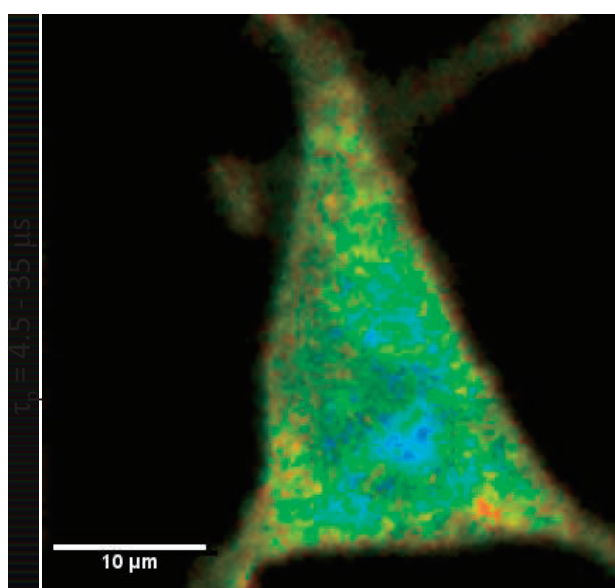
Microscope environmental chamber



PtTCCP

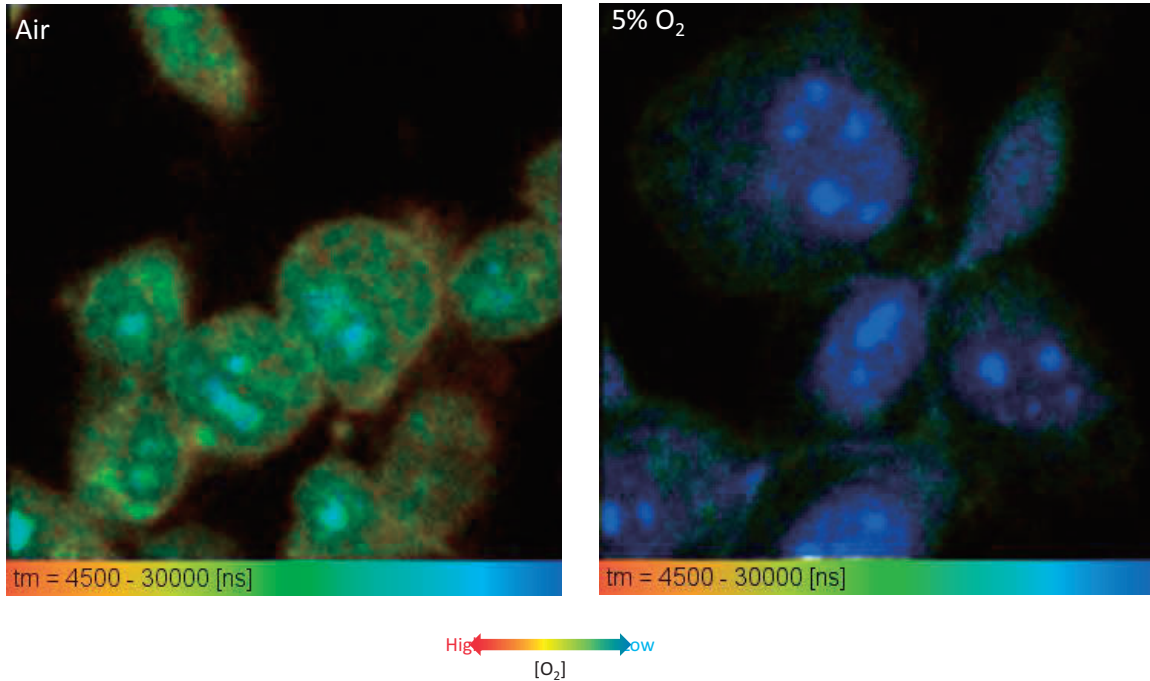
Phosphorescence lifetime imaging microscope (PLIM)

- Imaging of a single cell



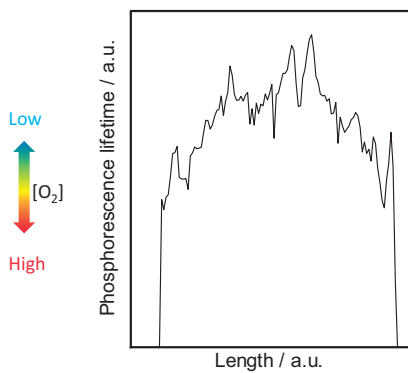
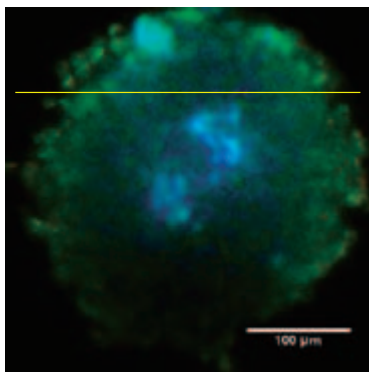
High \longleftrightarrow Low
O₂ concentration

O₂ concentration response of the cancer cell

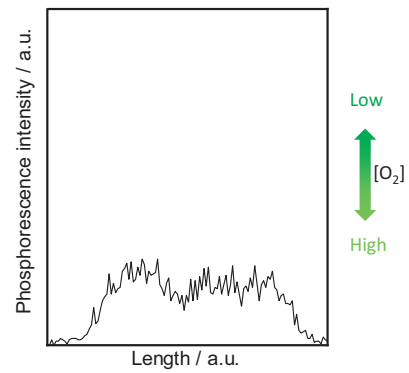
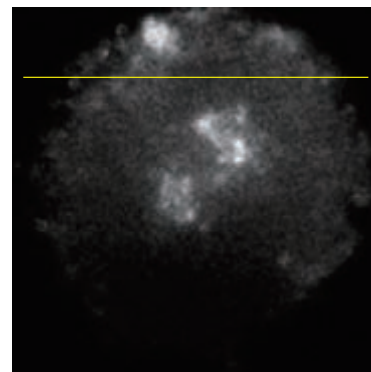


Comparison of phosphorescence intensity and lifetime measurement

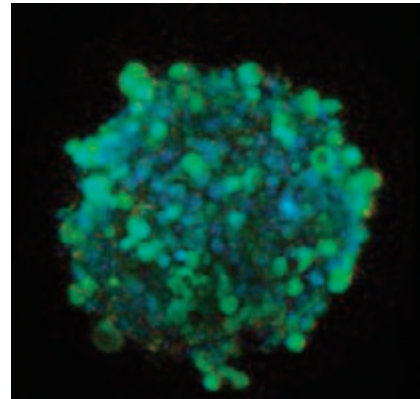
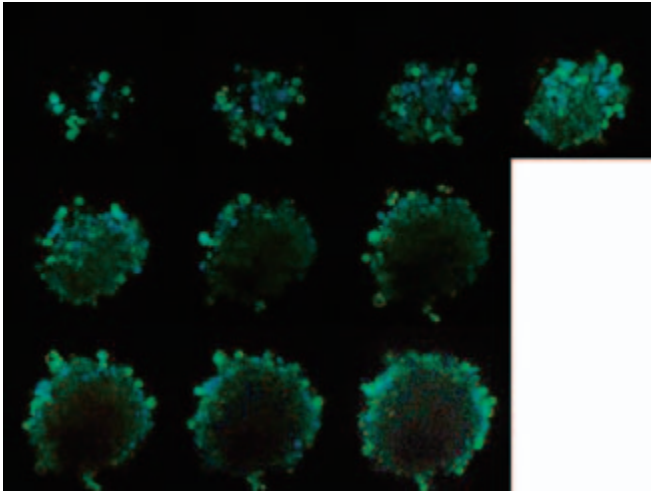
Phosphorescence Lifetime



Phosphorescence Intensity



Z stack images for spheroid of Colon-26



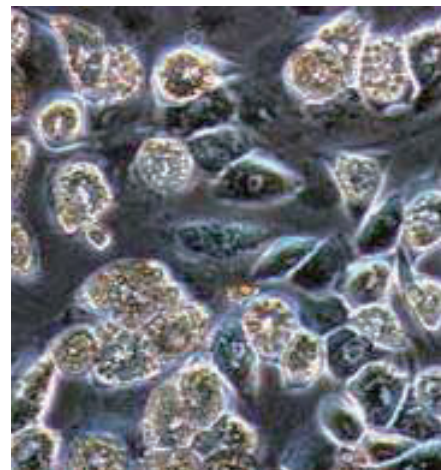
Z stack images were collected at 10 μm intervals from bottom to top of spheroid.

A merged z stack image of Colon-26 spheroid

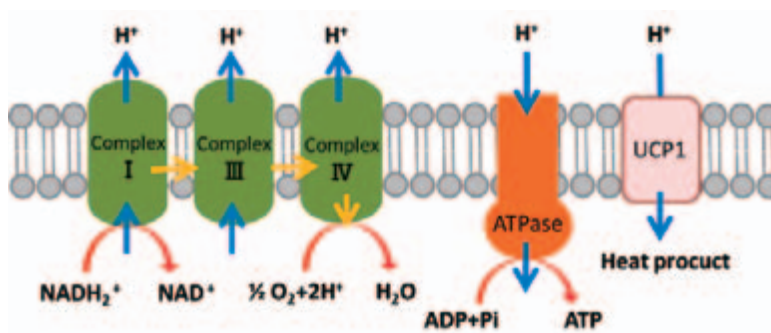
Colon-26 was incubated with RPMI1640 + 2% B27 supplement in a ultra low attachment plate (Corning Costar)

- **Brown adipose tissue (BAT)**

- one of two types of fat or adipose tissue
- primary function is to generate body heat
- contain numerous smaller lipid droplets and a much higher number mitochondria



Brown



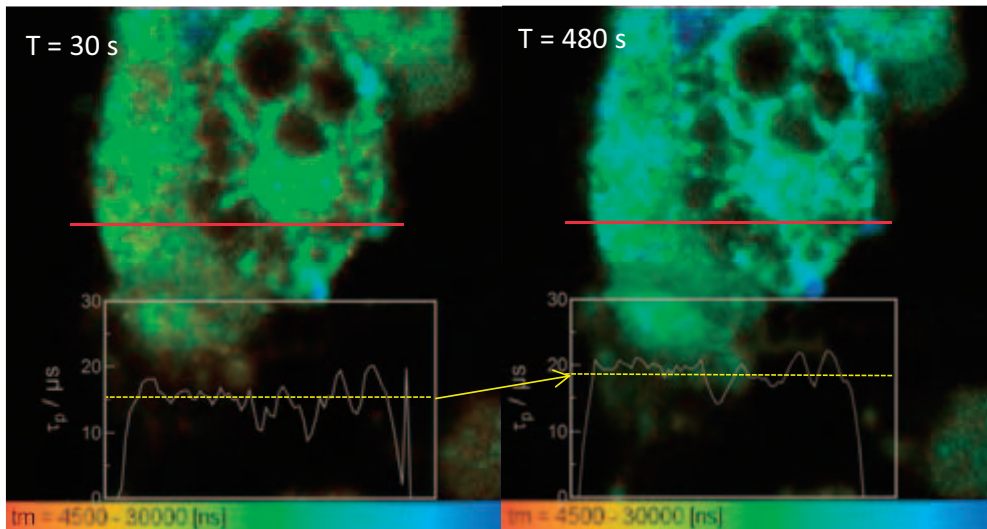
Mitochondrial inner membrane

- UCP1 plays a role in generation of heat

[O₂] consumption of using brown adipocytes

Differentiated adipocyte

- Incubate with 10 μM PtTCCP, 4h
 - Wash with PBS(-) twice
 - Wash with PBS(-), addition of 5 μM CCCP
- [O₂] imaging was obtained



51

Preparation of oxygen sensing beads

Solvent evaporation method

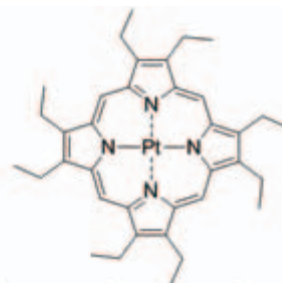
5 g/L PVA aq. 700 mL

CH₂Cl₂ 130 mL

← 6.5 μM PtOEP, PS in
CH₂Cl₂ 10 mL

Vigorous stirring for 20 h,
in dark

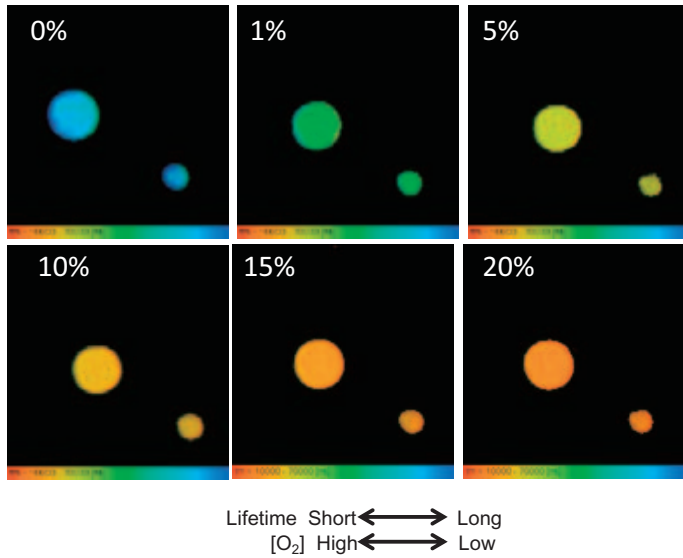
Washed by centrifugation x 3
(3500 x g, 5 min)



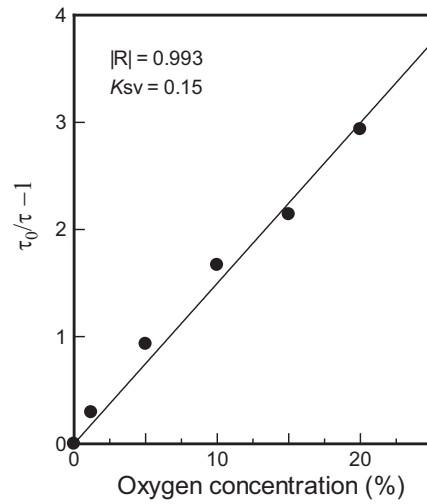
Pt(II)-octaethyl porphyrin(PtOEP)

Oxygen sensing beads

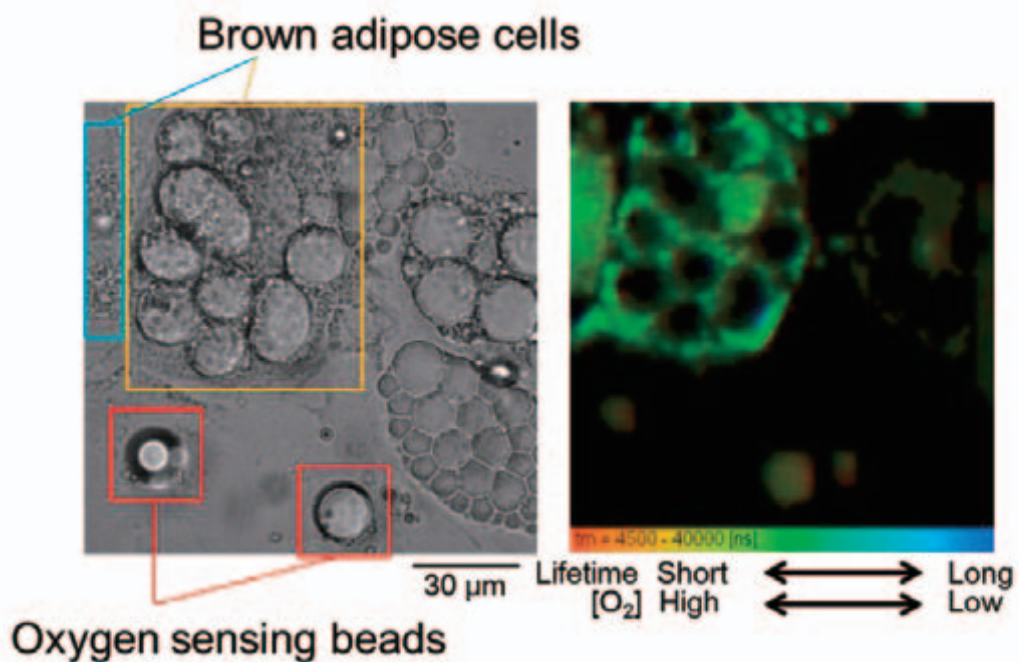
Oxygen response



Stern-Volmer Plot



Simultaneous measurement of intracellular and extracellular oxygen concentration





次世代イメージングを担う 科学計測用CMOSカメラの特徴と今後

浜松ホトニクス株式会社

システム事業部 杉下 財

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

目次

- 前置き
- 科学計測イメージング用カメラ
- sCMOSカメラの詳細特性
- 科学計測用カメラのS/N
- sCMOSカメラの今後
- まとめ

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

前置き

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

- CMOSカメラの性能向上が著しい。これは、CMOSプロセスの進化による。
- sCMOSカメラと呼ばれる科学計測分野向けのカメラの普及が始まっている。
- 科学計測用カメラとはどういったものか？必要とされる要素は？

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

科学計測イメージング用カメラ

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

科学計測イメージングに必要な要素

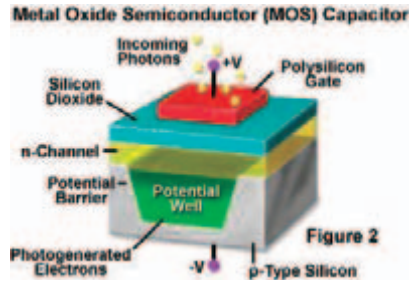
- 高性能
 - 低ノイズ
 - 高感度
 - 高速性
- 定量性
 - 線形性
 - 空間均一性(固定ノイズ、感度不均一性)
- 再現性
 - 温度安定性
 - 経時変化(劣化)がない



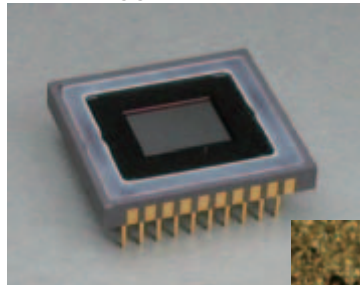
入射してくる光子の挙動をいかに正確に再現できるか

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

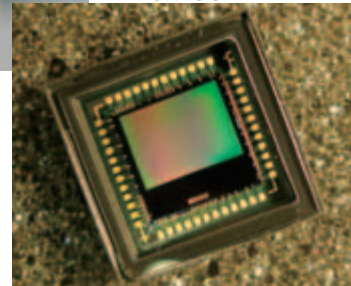
センサの基本



CCD



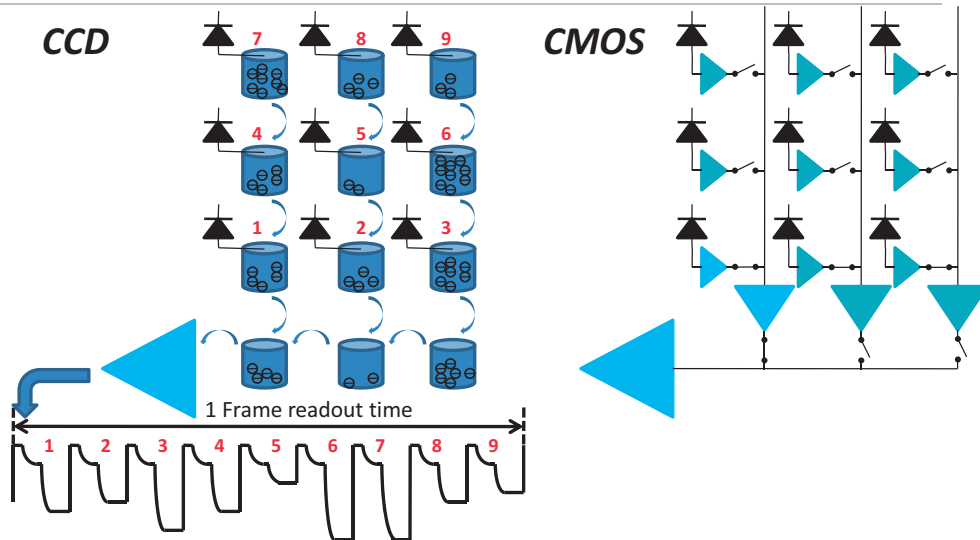
CMOS



- MOSキャパシターを基本構造とする画素が2次的に配列したもの
- 空乏層内で光子(フォトン)から電子(エレクトロン)に変換(光電変換)
- 蓄積した電荷を電圧として出力する為の変換部分を持つ

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

CCDセンサとCMOSセンサの違い

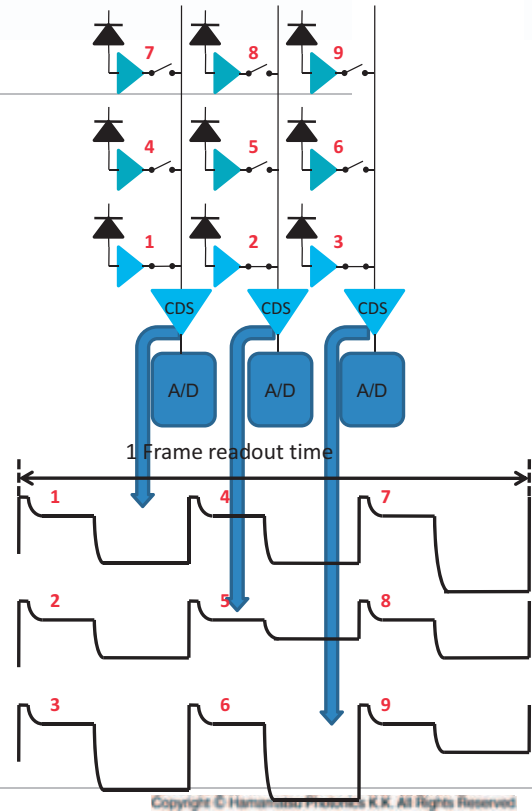


- 画素はフォトダイオードと電荷をためる容器(バケツ)から構成
- 電荷はバケツリレー方式で運ばれ、最後に電圧に変換されて時系列データとして出力される
- 画素はフォトダイオードと電荷を電圧に変換するアンプから構成
- 各画素の電圧はスイッチを順次切り替える事によって出力される

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

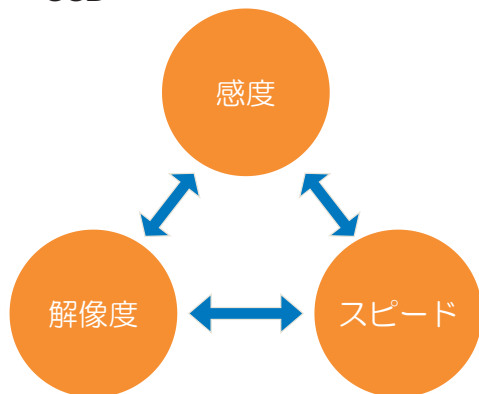
CMOSセンサの技術進歩

- 各列毎にCDSアンプ(ノイズキャンセル回路)、A/Dコンバータをセンサ内に実装
 - カラムアンプ、カラムADC
- 超並列処理によって高速化と低ノイズ化を同時に実現
 - 1K x 1Kのセンサを30フレーム/秒で読み出に必要な画素クロックは
 - ✓ CCDの場合でおよそ35MHz
 - ✓ カラムADC搭載のCMOSの場合で35KHz



sCMOSの登場

CCD



- CCDカメラの性能トライアングル
 - それぞれの性能はトレードオフの関係

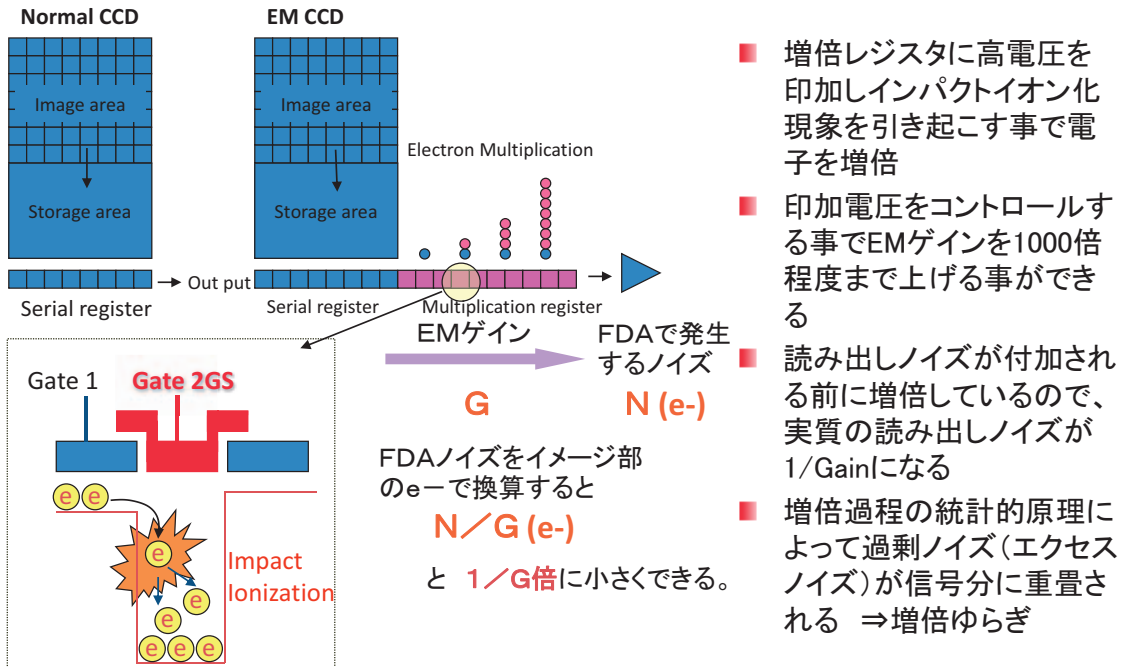
sCMOS



- 高感度、高解像度、高速性を同時に実現
- ノイズレベルは数電子(1~3e-)程度
- 400万画素クラスで100fpsを実現
- 科学計測分野でもCCDからも置き換えが進んでいる

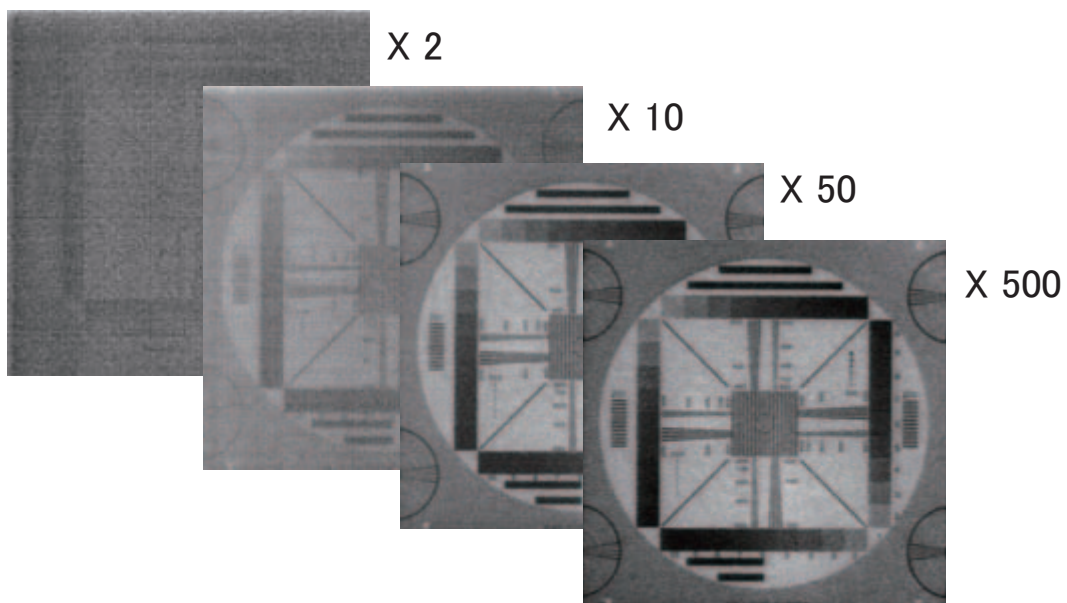
Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

EM-CCDの原理



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

EM-CCDによる増倍例

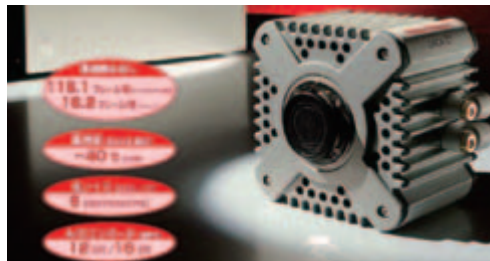
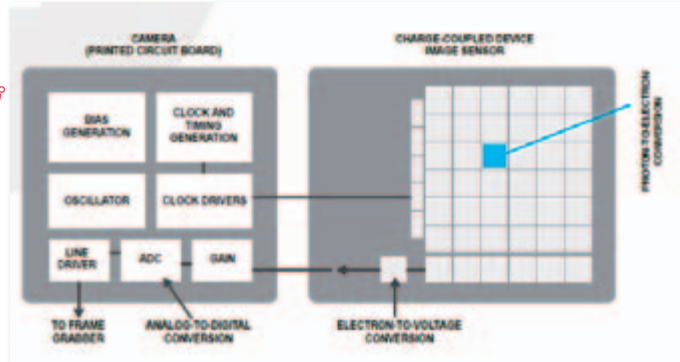


Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

それぞれのカメラの特性

CCD

- 確立された安定した技術
- 電荷電圧変換が単一のアンプで行われる
→高い空間均一性
- シリアル読み出し
→スピードに限界
(30~40Mpix/sec)
- 低い読み出しノイズ
→ $6\sim 10e^-$
- 高冷却が可能
→極めて低い暗電流
- 高い量子効率
→フロント照射で70%程度

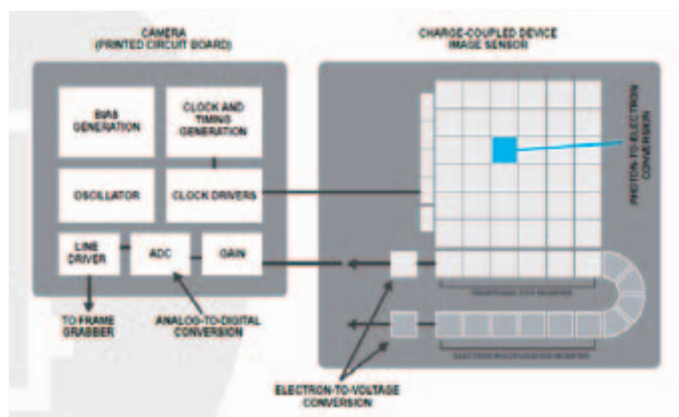


Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

それぞれのカメラの特性

EMCCD

- 背面照射化による高い量子効率→90%以上
- 電子増倍による高いゲイン→読み出しノイズが最も低い ($0.2e^-@500x$ EM gain)
- 特殊技術が必要(高冷却、高電圧駆動)
- 増倍過程の統計的原理による過剰ノイズ(エクセスノイズ)の重畳
- 背面化処理による感度不均一性(固定ノイズ)が存在

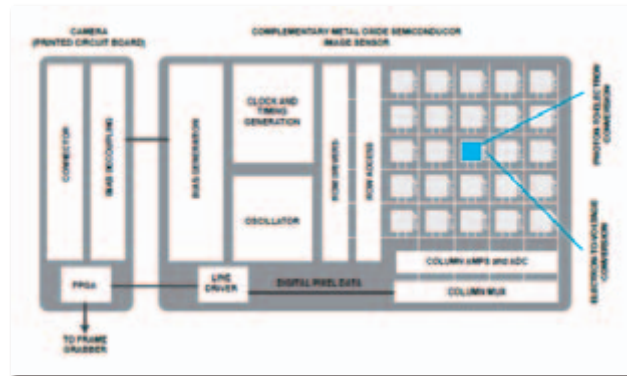


Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

それぞれのカメラの特性

CMOS

- 最新技術
- 列並列読み出し
 - 高速性と低ノイズを同時に実現(400M~500pix/sec)
- より低い読み出しノイズ
 - $1 \sim 2e^-$ rms
- 高い量子効率
 - フロント照射で70%程度
- 各画素、カラム毎にアンプ
 - 画素毎、カラム毎によるばらつき(空間不均一性)



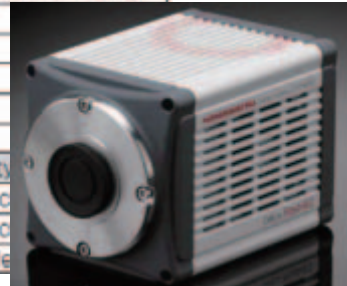
Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

sCMOSカメラの詳細特性

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

sCMOSカメラ仕様例

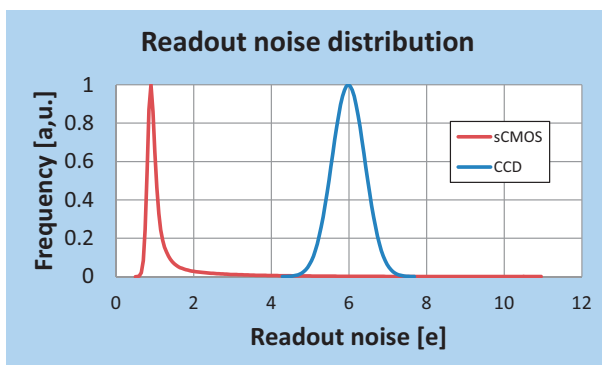
型名	C11440-22CU (ORCA-Flash4.0 V2)		
撮像素子	科学計測用CMOSイメージセンサ FL-400		
有効画素数	2048 (H) × 2048 (V)		
画素サイズ	6.5 μm (H) × 6.5 μm (V)		
有効素子サイズ	13.312 mm (H) × 13.312 mm (V)		
読み出しモード	スタンダードスキャンモード	スロースキャンモード	
読み出し時間	10 ms	33 ms	
読み出しノイズ (typ.)	1.0 electrons (median)	0.8 electrons (median)	
	1.8 electrons (rms)	1.4 electrons (rms)	
読み出し速度	Camera Link	USB 3.0	Camera Link/USB 3.0
全面連続読み出し	100 フレーム/秒	30 フレーム/秒	30 フレーム/秒
2048×1024 ^①	200 フレーム/秒	60 フレーム/秒	60 フレーム/秒
2048×8 ^①	25 655 フレーム/秒	7894 フレーム/秒	7896 フレーム/秒
ビニング ^②	2×2, 4×4		
サブアレイ	可能 ^③		
飽和電荷量 (typ.)	30 000 electrons		
ダイナミックレンジ ^④	37 000 : 1		
S/N	91 dB		
冷却方式 (ペルチェ冷却)	センサ温度	暗電流 (typ.)	
冷却温度/暗電流 (typ.)	空冷	-10 °C (室温: +20 °C)	0.06 elec
	水冷	-20 °C (室温: +20 °C)	0.02 elec
	最大水冷	-30 °C (室温: +15 °C)	0.006 elec



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

読出ノイズの特性

- CCDは、通常1素子に1アンプのため画素毎のバラツキは小さいが、sCMOSより大きな値。
- sCMOSでは、各画素毎にアンプが有り、バラツキがある。絶対値は小さい。



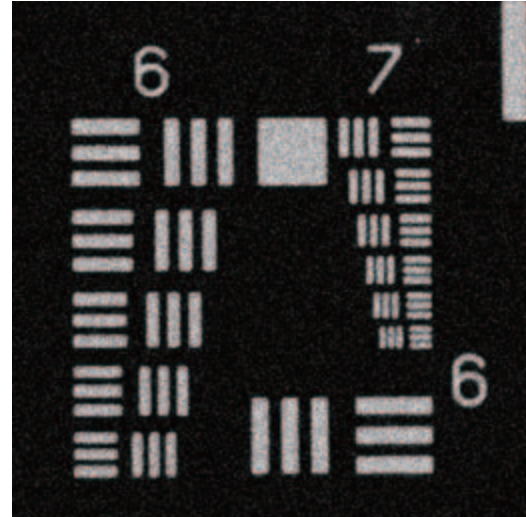
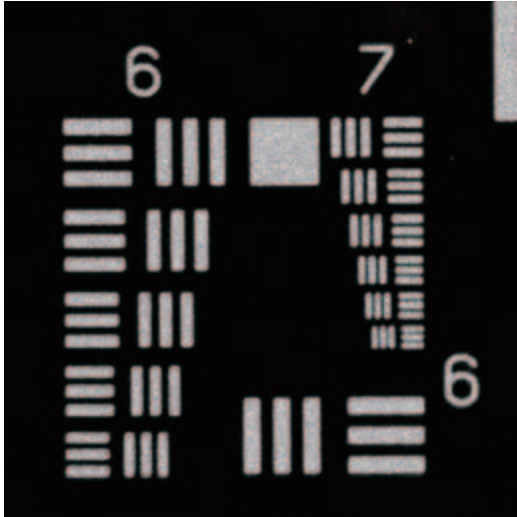
sCMOSとCCDのノイズ分布例

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

読出ノイズの特性

sCMOS

CCD



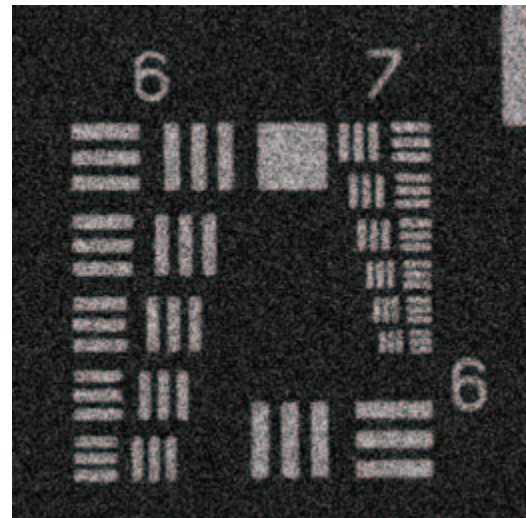
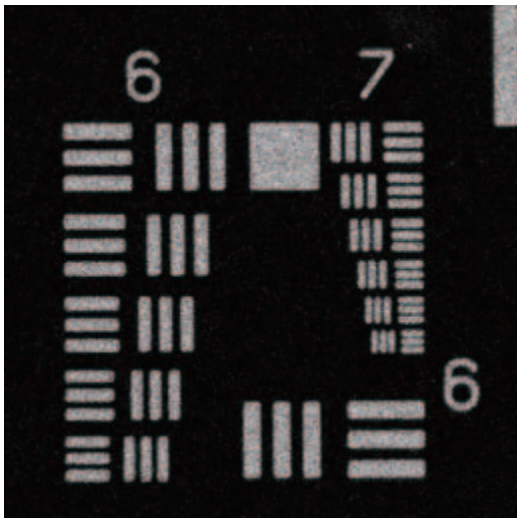
50 photons / pixel

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

読出ノイズの特性

sCMOS

CCD



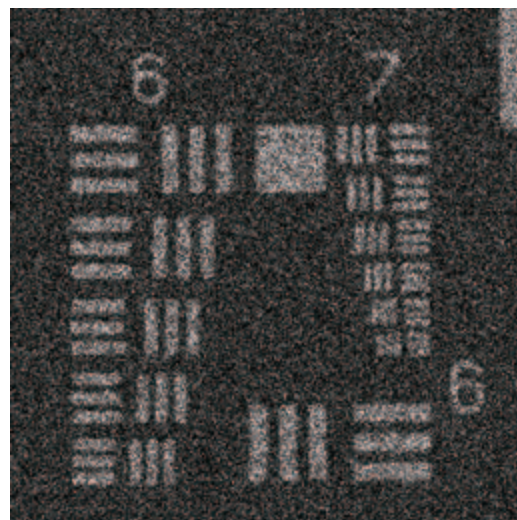
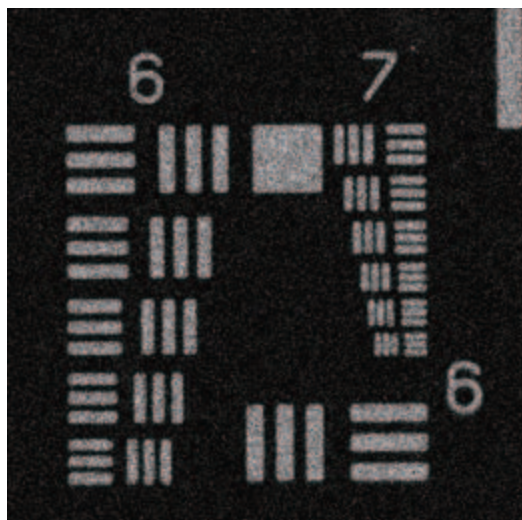
20 photons / pixel

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

読出ノイズの特性

sCMOS

CCD



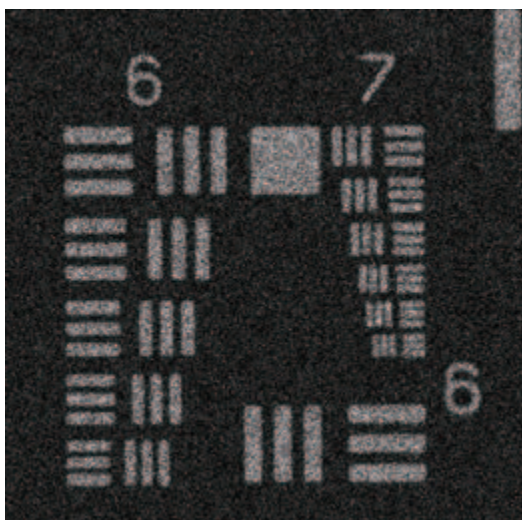
10 photons / pixel

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

読出ノイズの特性

sCMOS

CCD



5 photons / pixel

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

露光・読出方式 ～ローリングシャッタとグローバルシャッタ～

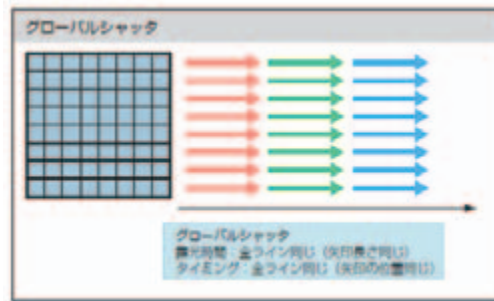
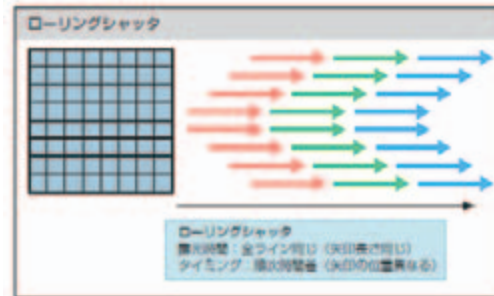
■ 素子の露光及び電荷読出方式

● ローリングシャッタ
順次露光

露光開始時間が1画面中で異なる。
sCMOSでは、水平1ラインは同時露光。

● グローバルシャッタ
同時露光

全画面同時露光を行う



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

露光・読出方式 ～ローリングシャッタとグローバルシャッタ～

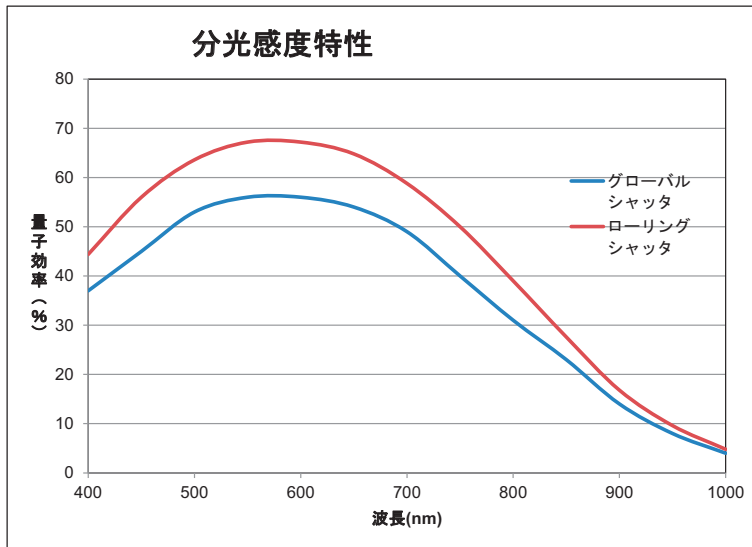
- CMOSは、ローリングシャッタが基本
- CMOSでは、機能追加は画素へTrを増やすことで実現
⇒グローバルシャッタは、Trを追加して実現しているため
開口率が下がり、量子効率も下がる。

	ローリングシャッタのみ	グローバルシャッタ搭載
読出ノイズ electrons (rms)	1. 4	2. 7
量子効率 (%) グラフ参照	7 2	6 0
フレームレート	1	0. 5
残像	なし	小有

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

露光・読出方式 ～ローリングシャッタとグローバルシャッタ～

ローリングシャッタ方式は、高量子効率、低ノイズにより、低照度での撮影に優れている

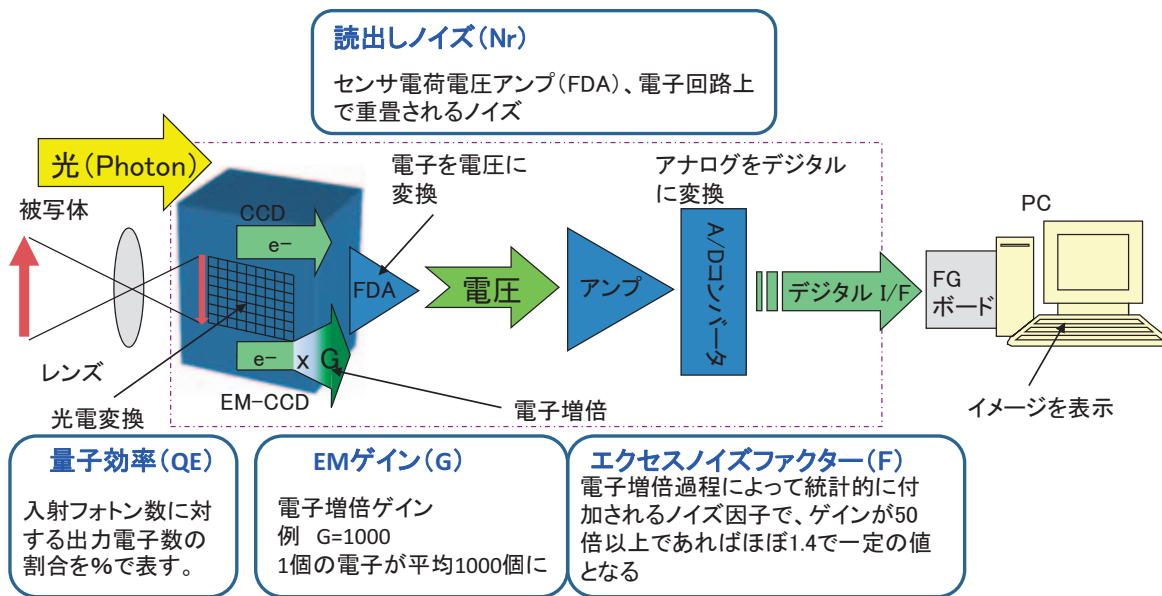


Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

科学計測用カメラのS/N

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

デジタルカメラの信号の流れ



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

S/N比 (SNR) とは

$$SNR = \frac{QE * S}{\sqrt{F_n^2 * QE * (S + I_b) + (N_r / M)^2}}$$

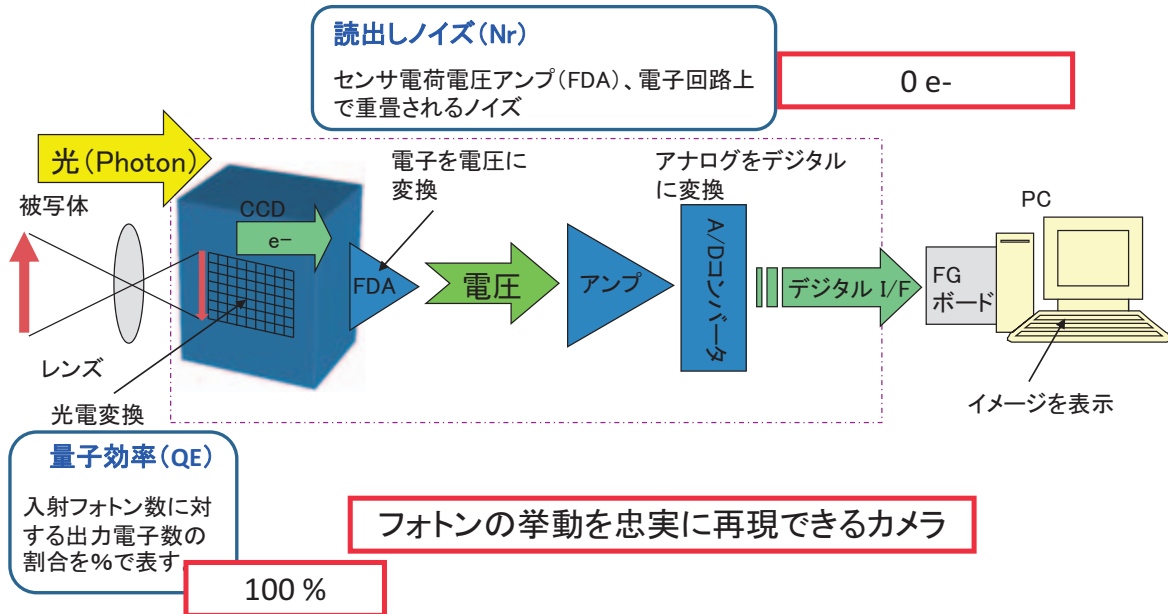
↑ ショットノイズ

↑ 読出しノイズ

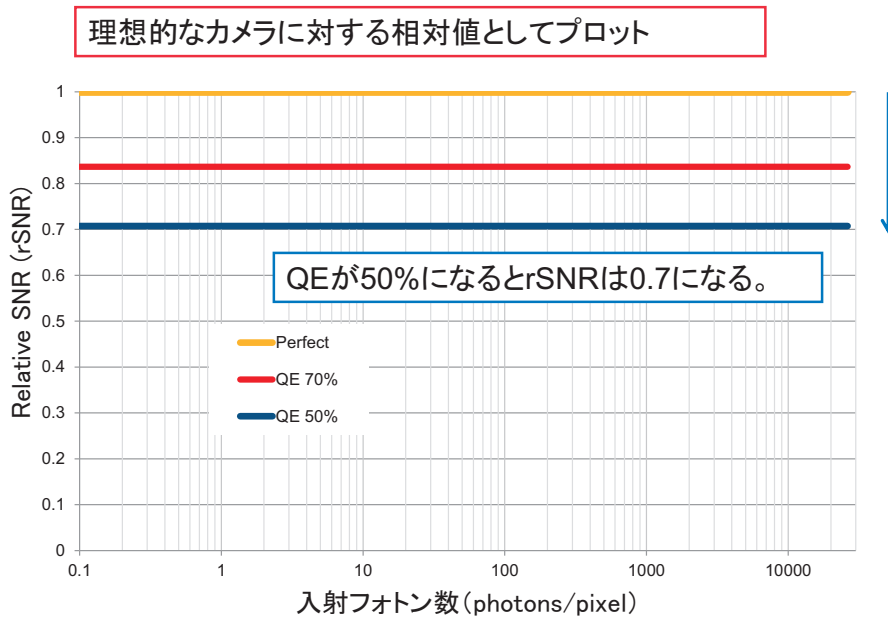
- QE: 量子効率
- S: 入射光子数 (photon/pixel)
- F: ノイズファクター (= 1 for CCD/sCMOS and $\sqrt{2}$ for EM-CCD)
- N_r : 読み出しノイズ (rms)
- M: EM Gain (=1 for CCD / CMOS)
- I_b : 背景光 (バックグラウンド)

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

計測用途に理想的なカメラとは



相対SNR (Relative SNR : rSNR)



実効的な量子効率 (Effective QE)

SNR for CCD/sCMOS

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{QE \times P}{\sqrt{QE \times P}} \\ &= \sqrt{QE \times P} \end{aligned}$$

SNR for EM-CCD

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{M \times QE \times P}{F \times M \times \sqrt{QE \times P}} = \sqrt{\frac{QE \times P}{F^2}} \\ &= \sqrt{QE_{\text{eff}} \times P} \end{aligned}$$

$$QE_{\text{eff}} = \frac{QE}{F^2} = \frac{QE}{2}$$

- 読み出しノイズは十分小さいと仮定

EM-CCDの実効的な量子効率はエクセスノイズによるノイズ増加によって半分(50%)になる

EM-CCDのrSNRは0.7以上にはならない

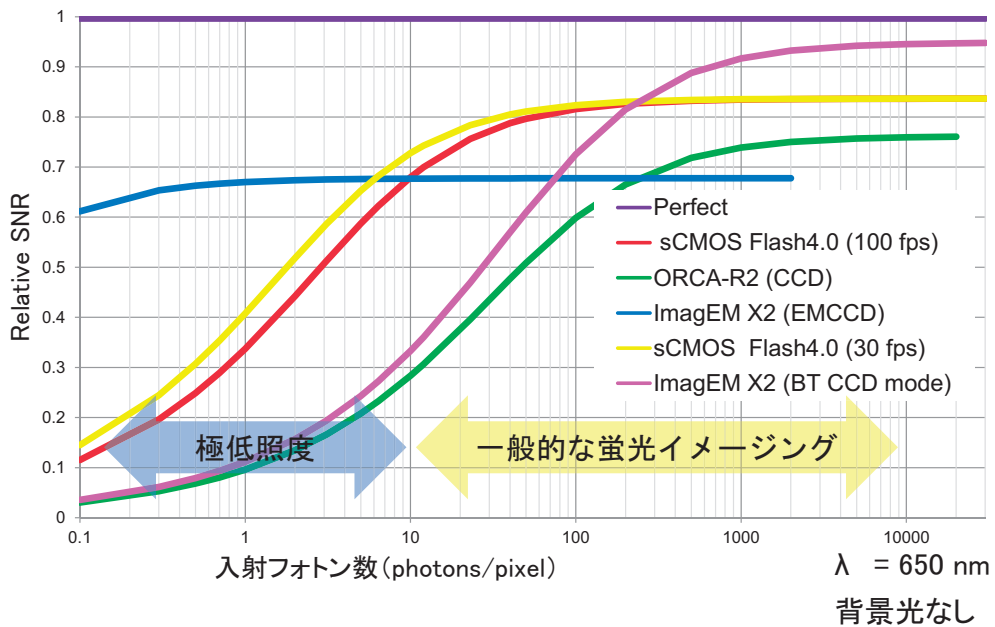
Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

カメラ仕様例

センサ	インターラインCCD	背面照射型EM-CCD	sCMOS
カメラ名	ORCA-R2	ImagEM x2	ORCA Flash4.0 V2
画素数	1024 x 1344	512 x 512	2048 x 2048
画素サイズ	6.45 μm x 6.45 μm	16 μm x 16 μm	6.5 μm x 6.5 μm
QE (@650 nm)	58 %	90 %	72 %
フレームレート	18 fps / 8 fps	70 fps	100 fps / 30 fps
読み出しノイズ (Nr : rms)	10 e ⁻ / 6 e ⁻	< 0.2 e ⁻ (M = 500)	1.9 e ⁻ / 1.3 e ⁻
エクセスノイズファクター (F _n)	1	√2	1

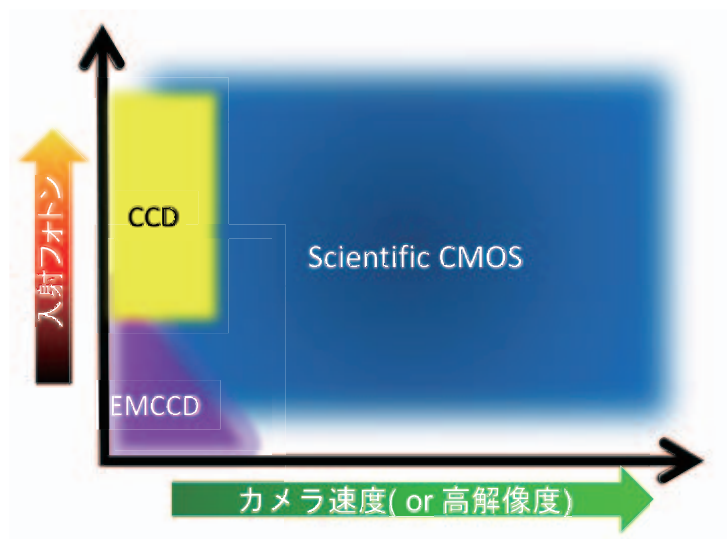
Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

相対SNR(Relative SNR : rSNR)



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

カメラのポジショニング



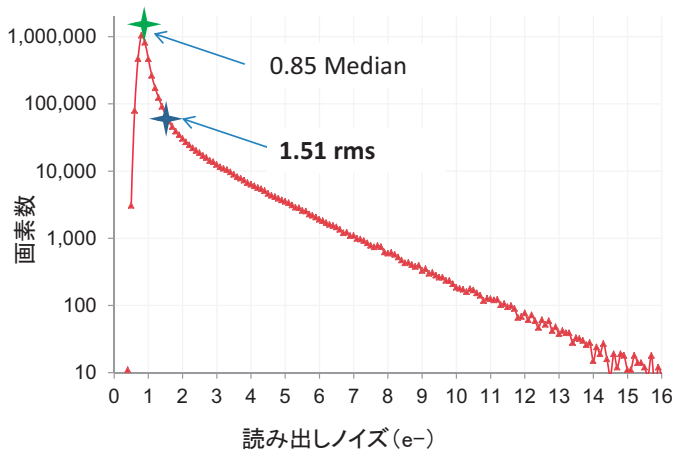
Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

sCMOSカメラの今後

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

CMOSの課題

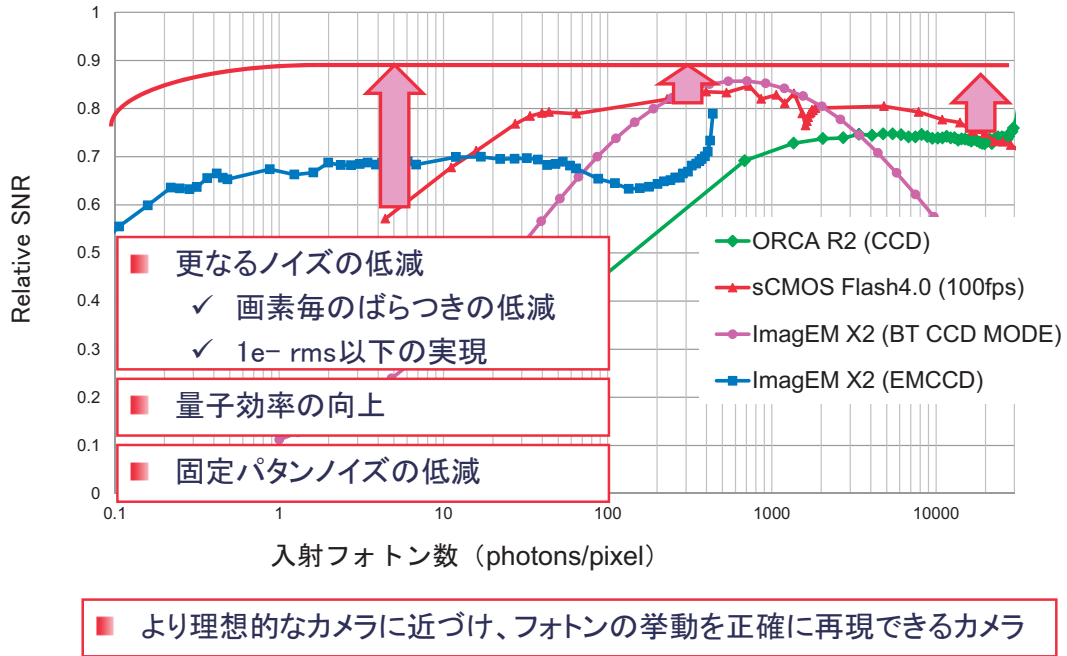
- 画素毎のばらつき
 - ✓ ノイズ
 - ✓ ゲイン(感度)



0.5%程度

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

今後のCMOSの方向性



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

まとめ

- CCDカメラに代わり、科学計測用にsCMOSカメラが普及し始めている。
- sCMOSカメラの特徴は、低ノイズ、高速読出。
- EM-CCDカメラは、非常に暗い領域(数光子/画素以下)では、メリットがあるが、その他の領域では、sCMOSカメラのS/Nが良い。
- 今後、より理想的なカメラを目指し開発を続けている。

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

最後に

・浜松ホトニクス株式会社では、これまで述べた sCMOSカメラ、EM-CCDカメラ、CCDカメラをラインナップしています。

・デモ機を準備しておりますので、ご要望があればご連絡願います。

・URL

www.hamamatsu.com

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

ご清聴ありがとうございました。

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

同位体イメージングの新展開

～ 宇宙から生命へ ～

坂本 直哉

Isotope Imaging Laboratory

産業利用拡大支援室

創成研究機構

北海道大学

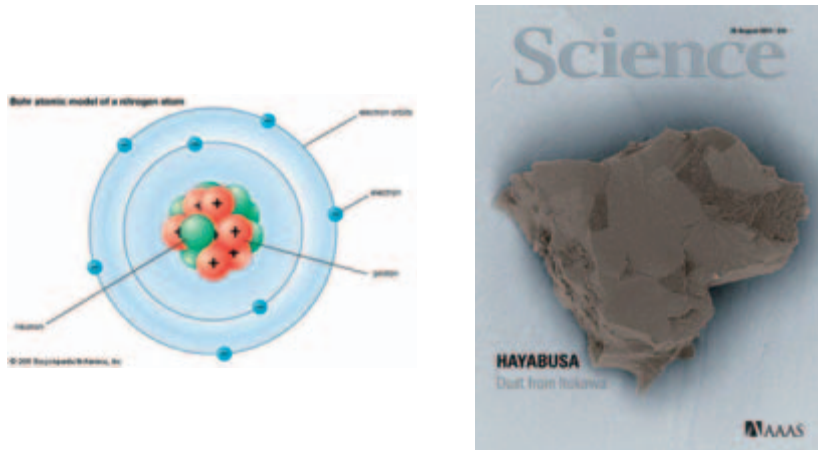


目次

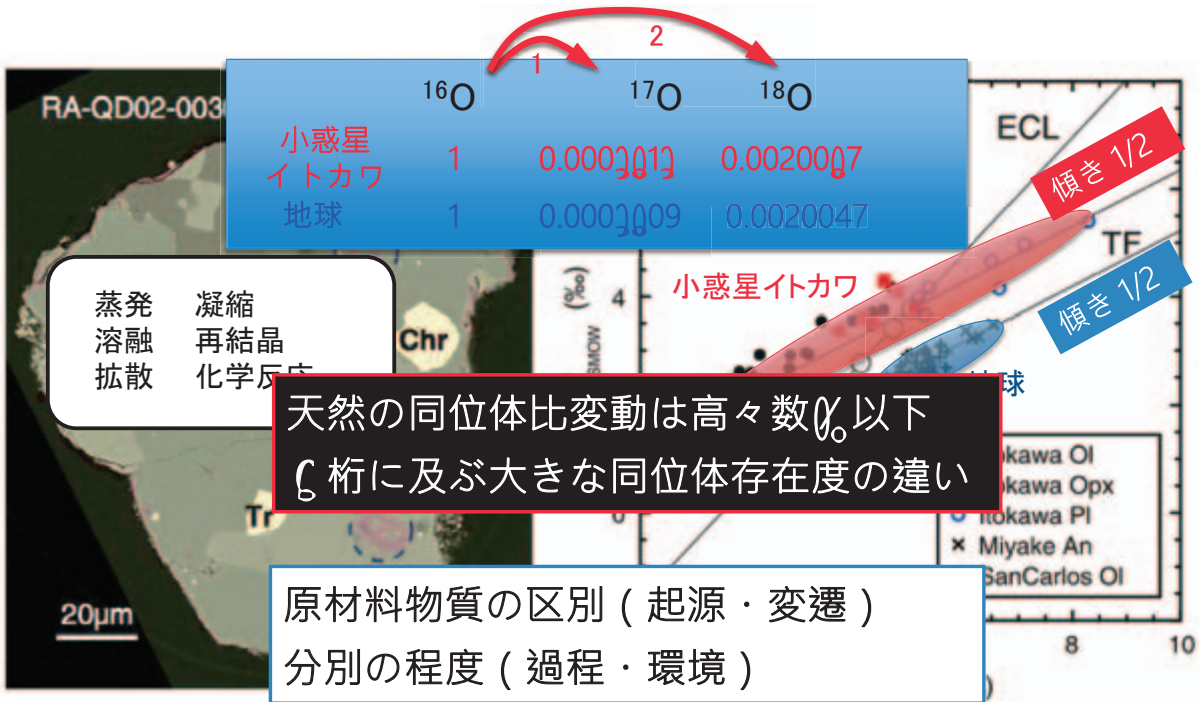
- 同位体の情報 ～ 小惑星イトカワの例 ～
- イメージングの必要性 ～ スターダストの探索 ～
- 原理 ～ 走査型 vs 投影型 ～
- 分析例 ～ 半導体の三次元イメージング ～
～ 培養細胞への η II IA導入～
～ 生体組織内の物質動態 ～
- 今後

同位体の情報

～ 小惑星イトカワの例 ～



同位体の情報



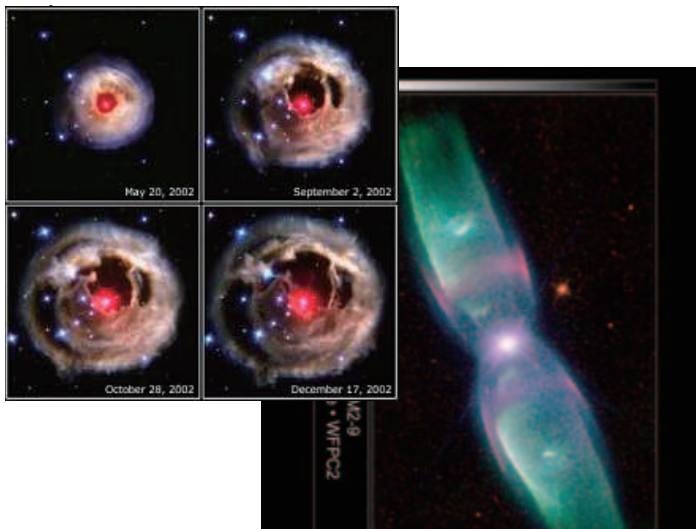
Yurimoto et al., 2011



イメージングの必要性

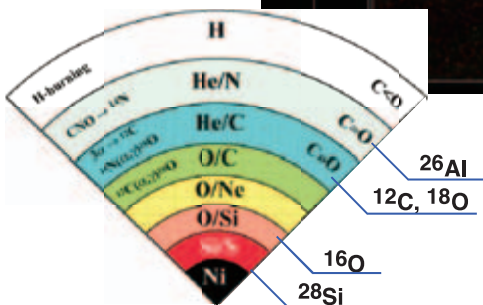
～ スターダストの探索～

なぜイメージングが必要か ー スターダストの探

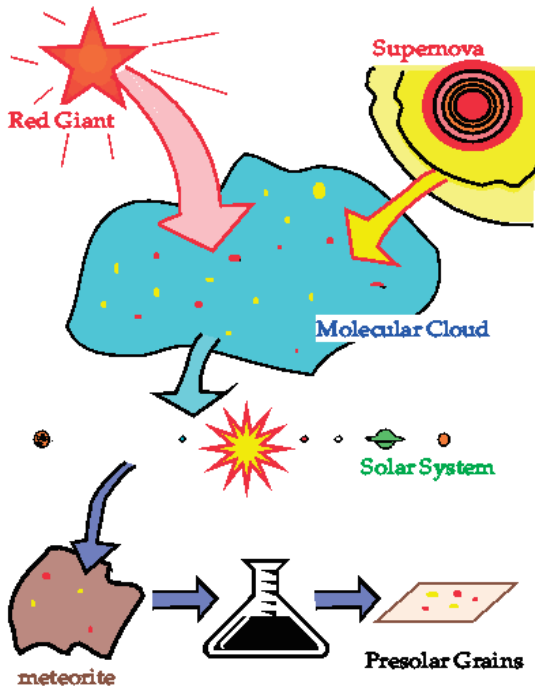


- 星の質量
 - 星の進化
- 核合成プロセスが異なる

スターダストの同位体
太陽系の物質とは
異なる同位体比



なぜイメージングが必要か ー従来の方法ー

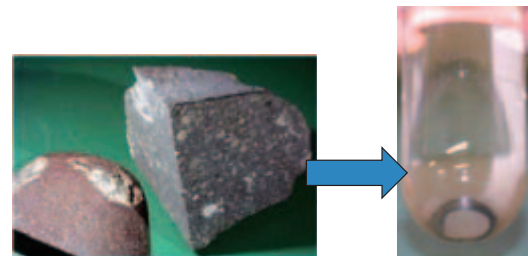


(Image from Nittler web site <http://www.ciw.edu/lrn>)

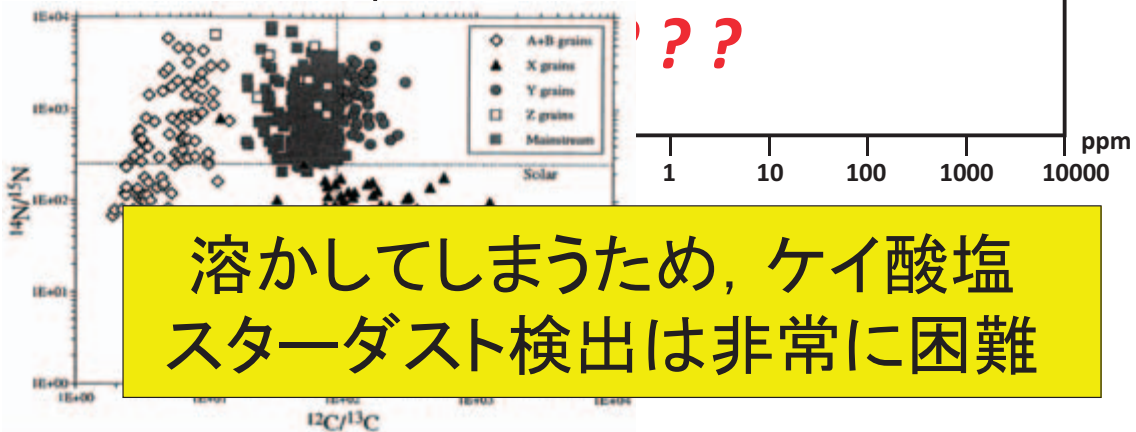
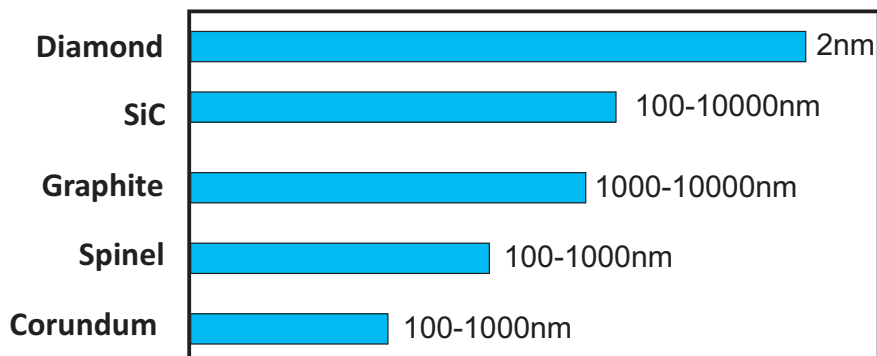
隕石を含め太陽系の物質の同位体比変動は高々数%, ほとんどの元素は1/10000以下。

隕石のケイ酸塩鉱物(99.99%)を溶かして取り除くと

その残りかすから...

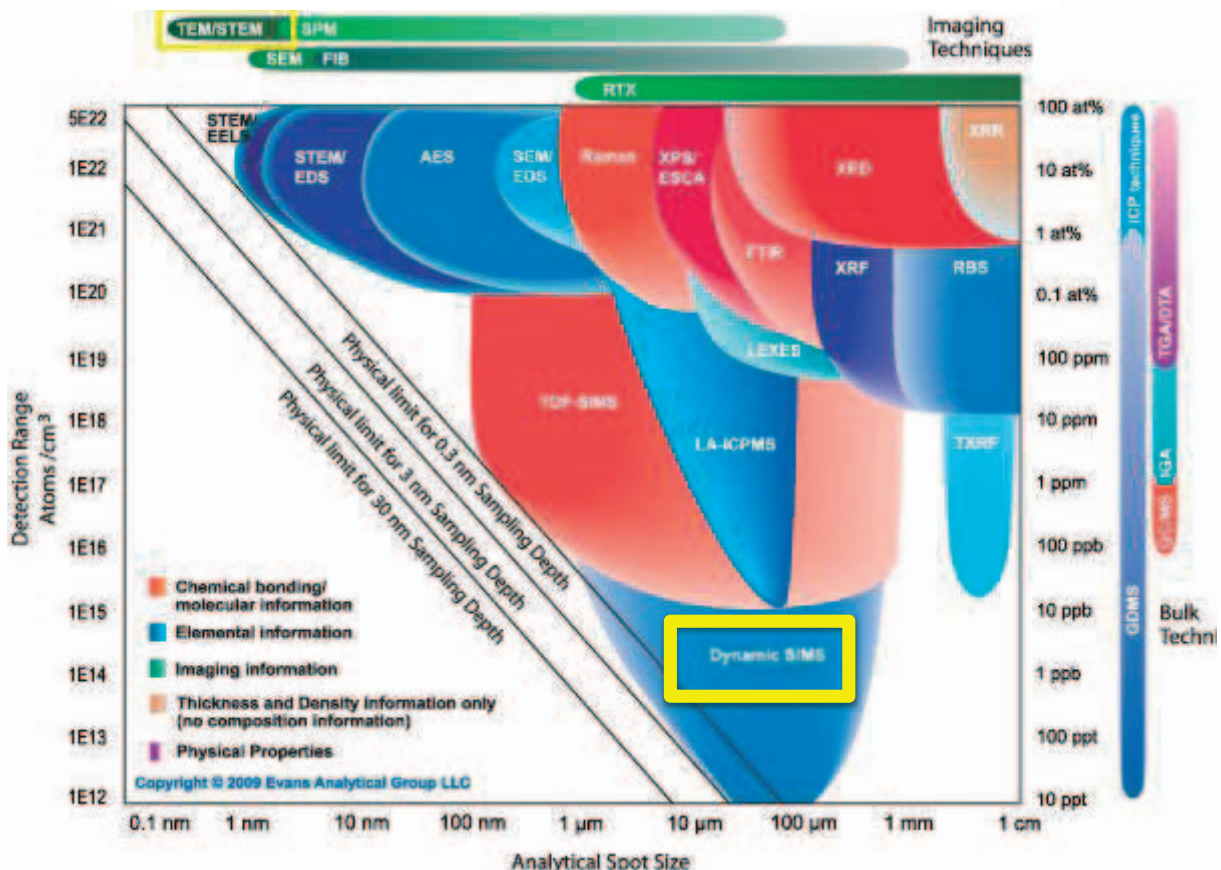


なぜイメージングが必要か ー従来の方法ー



どのような性能が必要か

- 隕石の99%以上はケイ酸塩
 - その場同位体イメージング
- 天然の同位体比変動は高々%オーダー以下
 - 高精度分析
- ㊦桁にも及ぶ同位体組成の分布
(i.e. ^{16}O : 99.767%, ^{17}O : 0.0206%)
 - 高ダイナミックレンジの確保
- 元素分析では判別不可能
 - 広領域を短時間に同位体イメージング

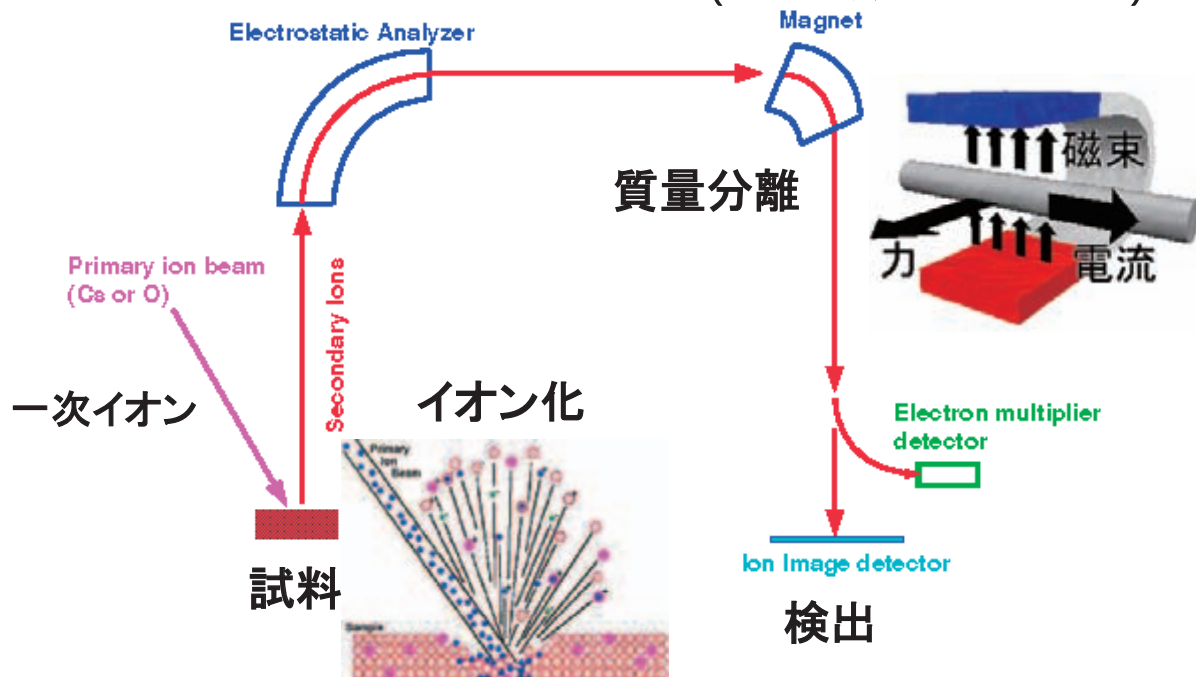


原理

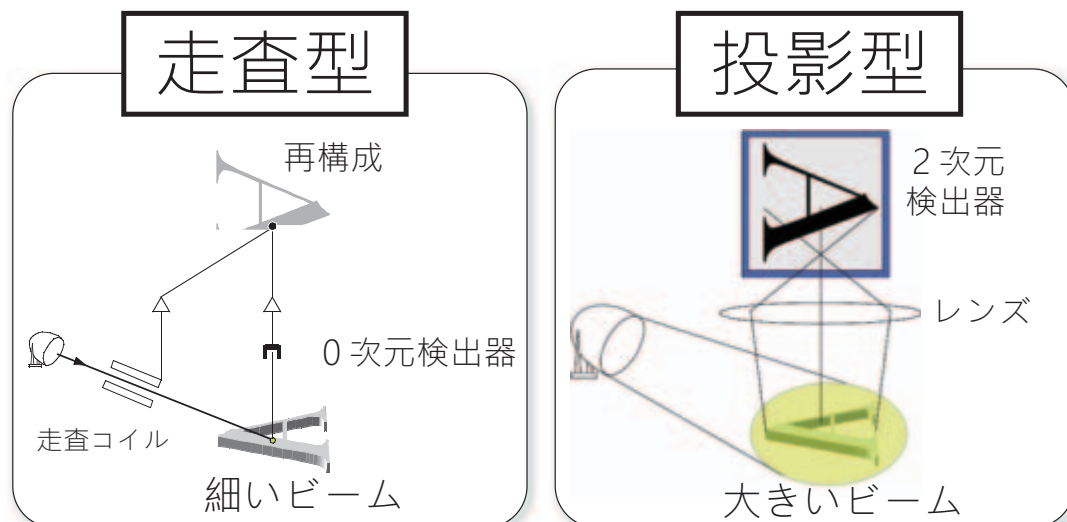
～ 走査型 vs 投影型 ～

二次イオン質量分析法 (SIMS)

(二重収束型の場合)



SIMSによるイメージング



SIMSによるイメージング

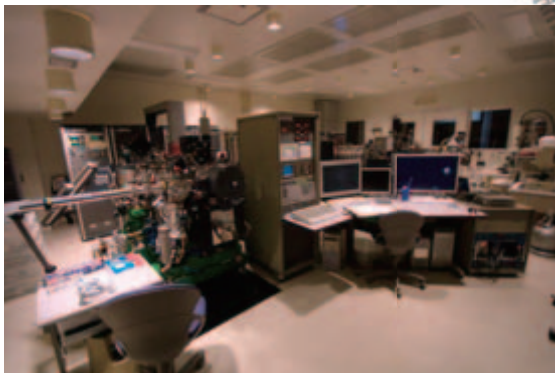
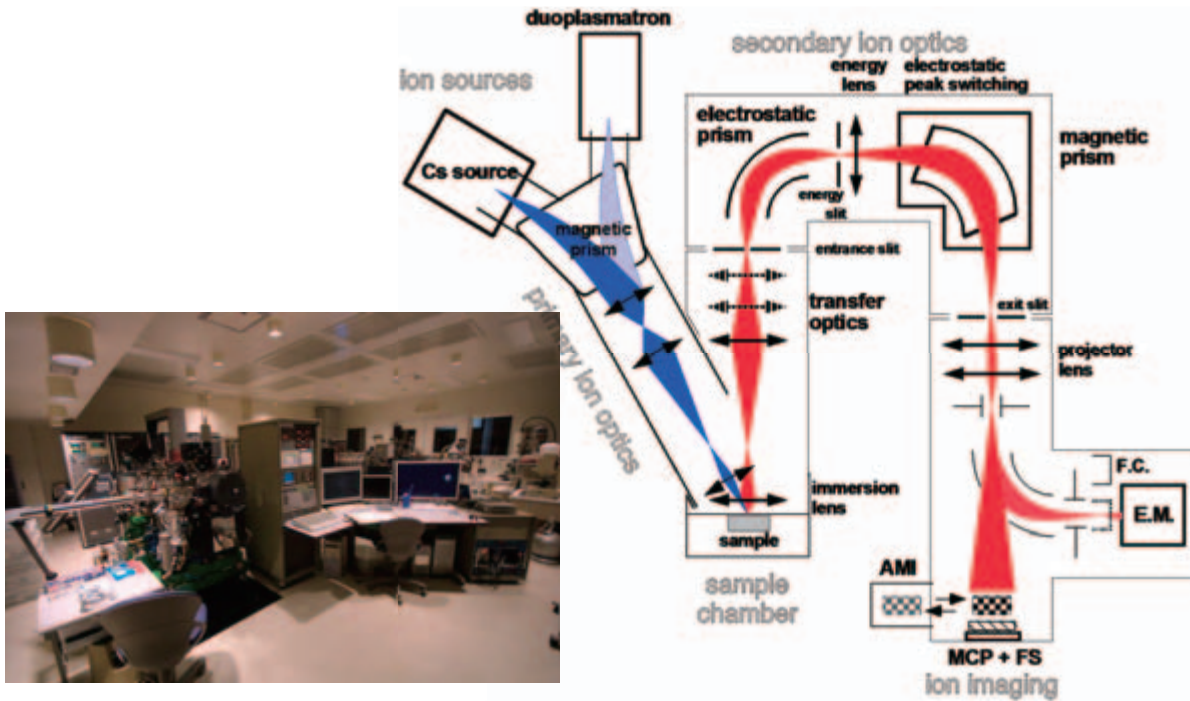
走査型

- 細く絞ったビームにより高空間分解能な分析
- 広領域の分析には長時間かかる
 - 広領域の高精度分析が困難

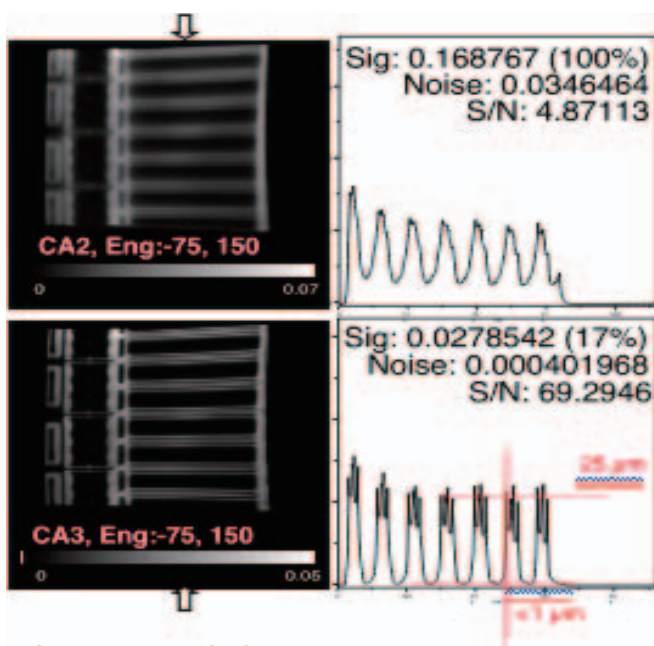
投影型

- 広領域を高強度ビームにより高精度な分析
- 空間分解能はイオン光学系に依存する
 - 空間分解能の向上が困難

投影型SIMSのイオン光学

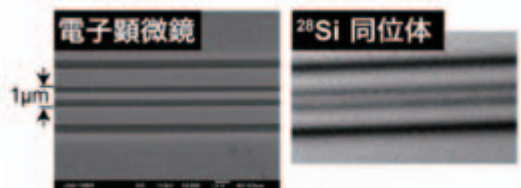


投影型SIMSの空間分解能



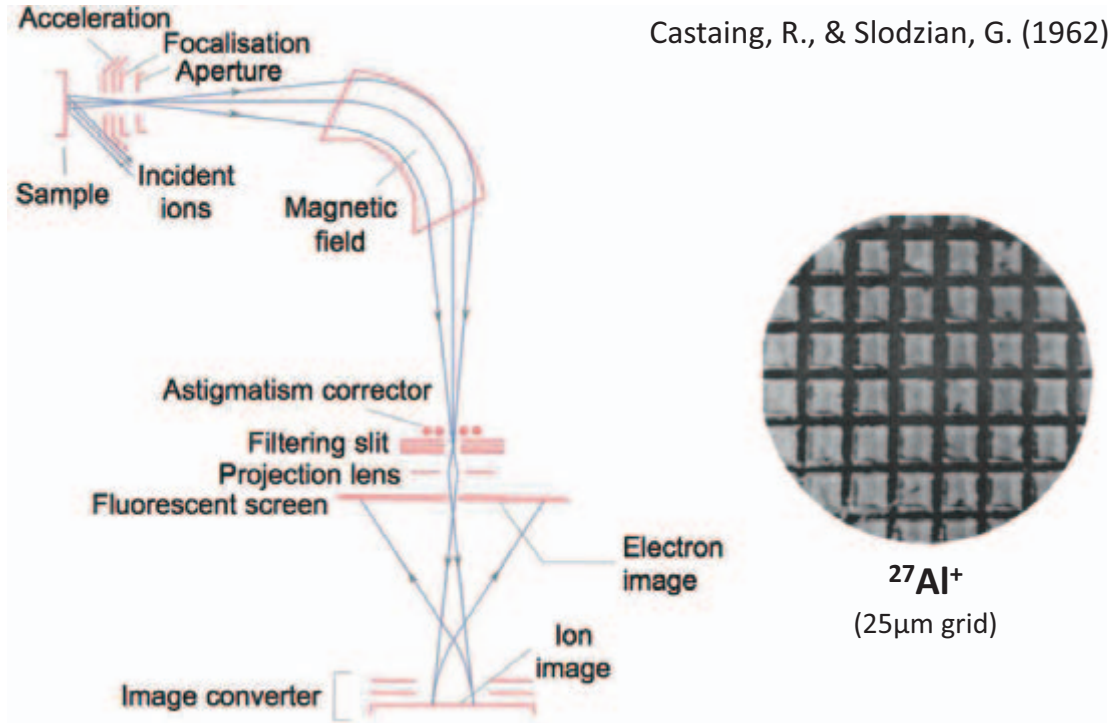
コントラスト絞り (1 μ m)
 2.3×10^7 cps

コントラスト絞り (5 μ m)
 2.3×10^6 cps



Cameca ims1270

1960'



1960'

Apollo Mission
(1969~1972)



~400 kg

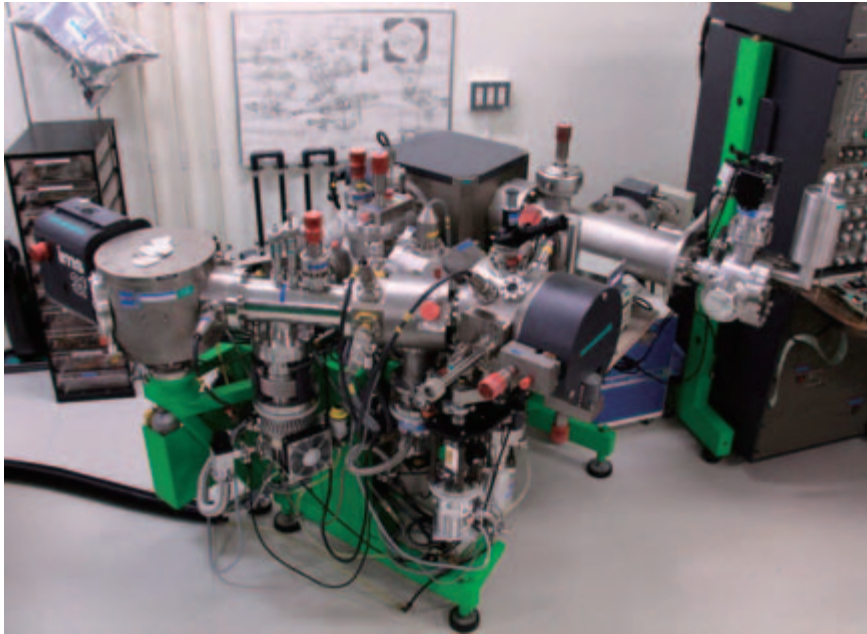
Allende Meteorite
(1969)



~5 tons

1970'~80'

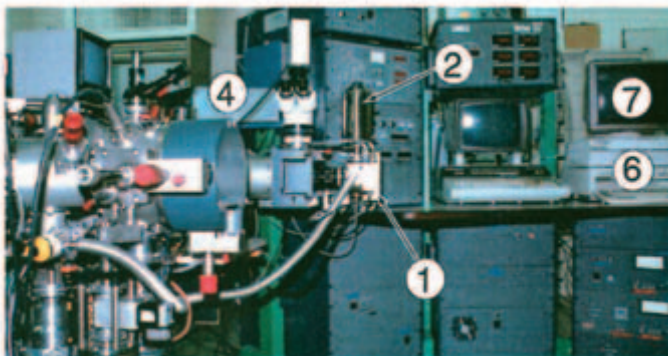
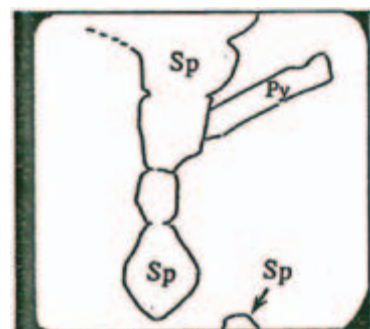
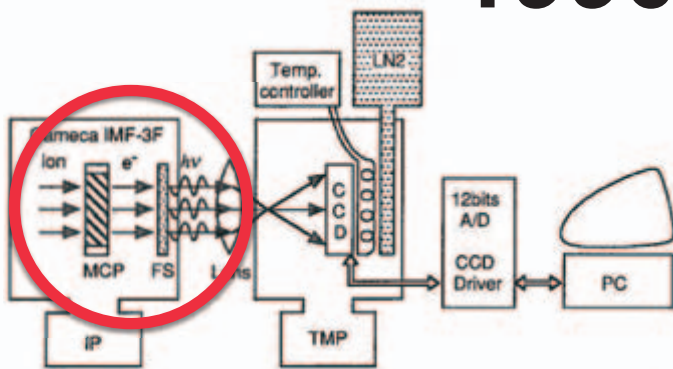
Rouberol et al., (1977)



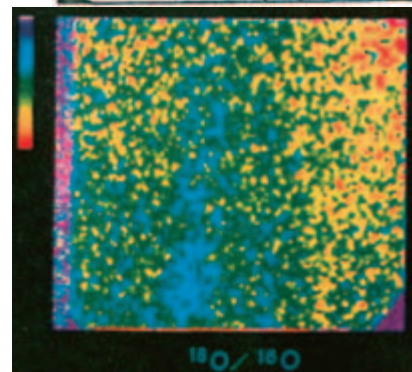
IMS 3F @ Hokudai

1990'

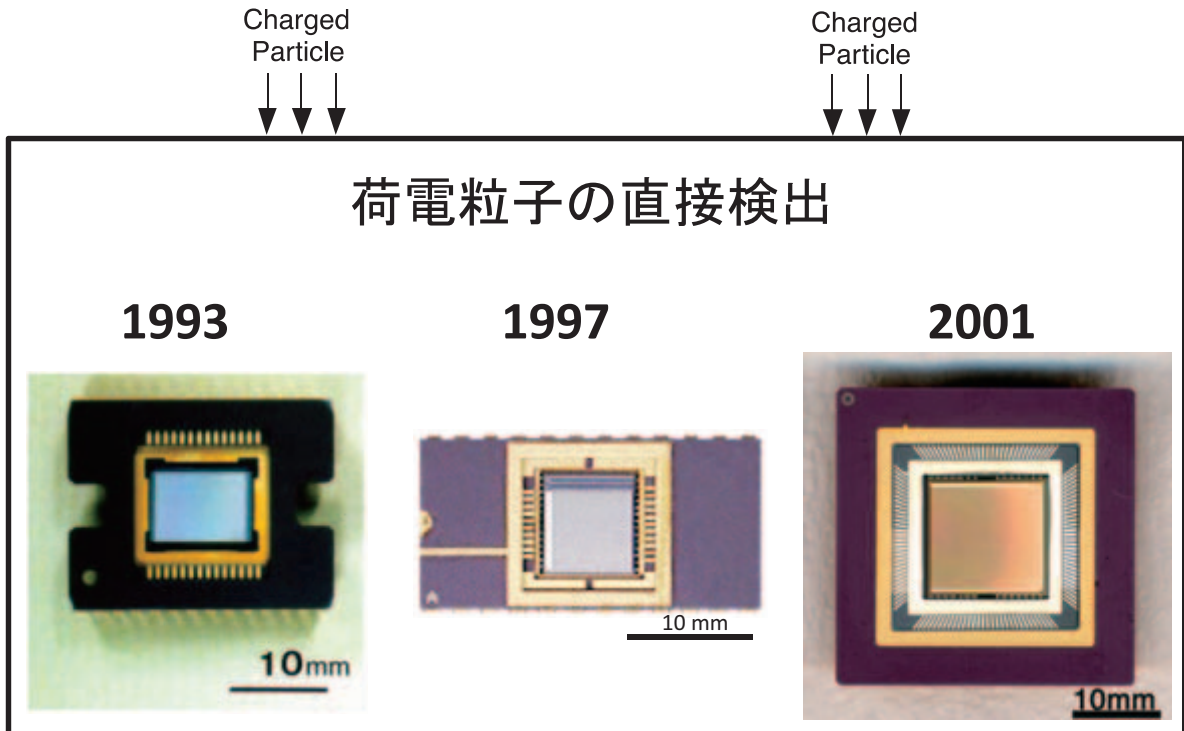
Ooishi, (Master thesis,1991)



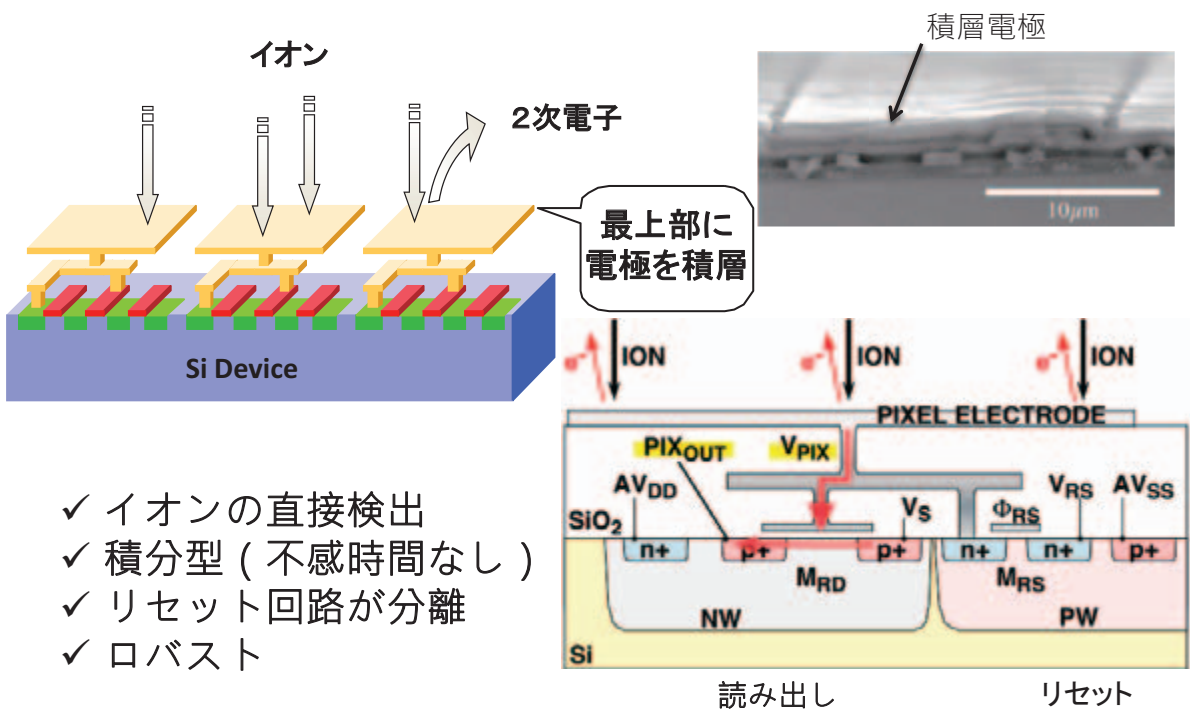
第4図 冷却型 CCD カメラシステム (AIM-88).



従来の2次元イオン検出器

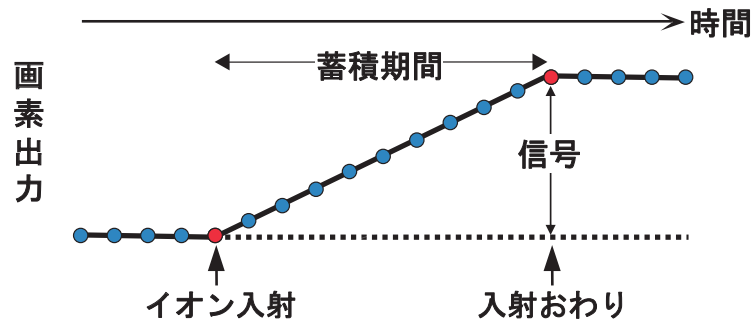


SCAPS (Stacked CMOS Active Pixel Sensor)

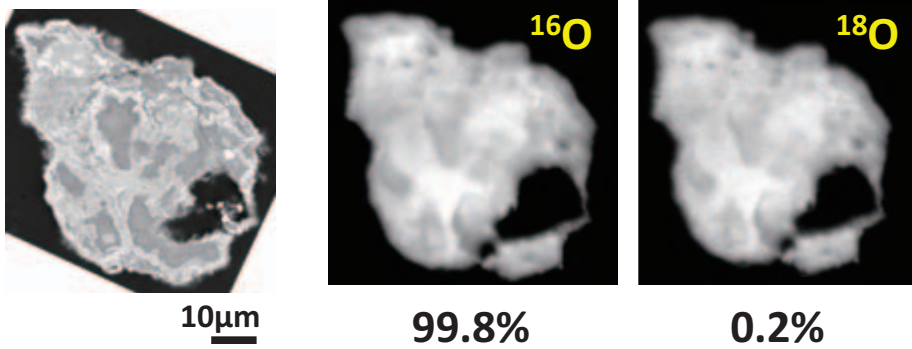


- ✓ イオンの直接検出
- ✓ 積分型 (不感時間なし)
- ✓ リセット回路が分離
- ✓ ロバスト

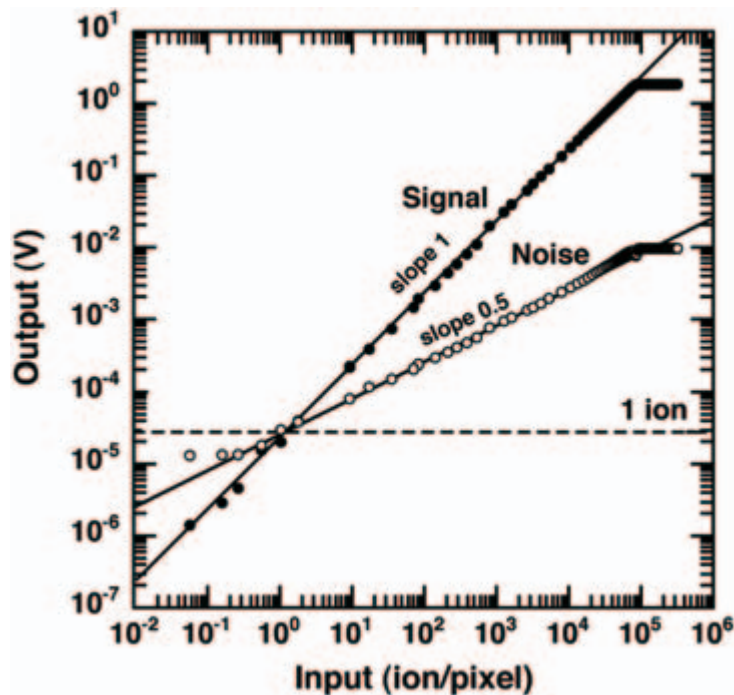
非破壊読み出し



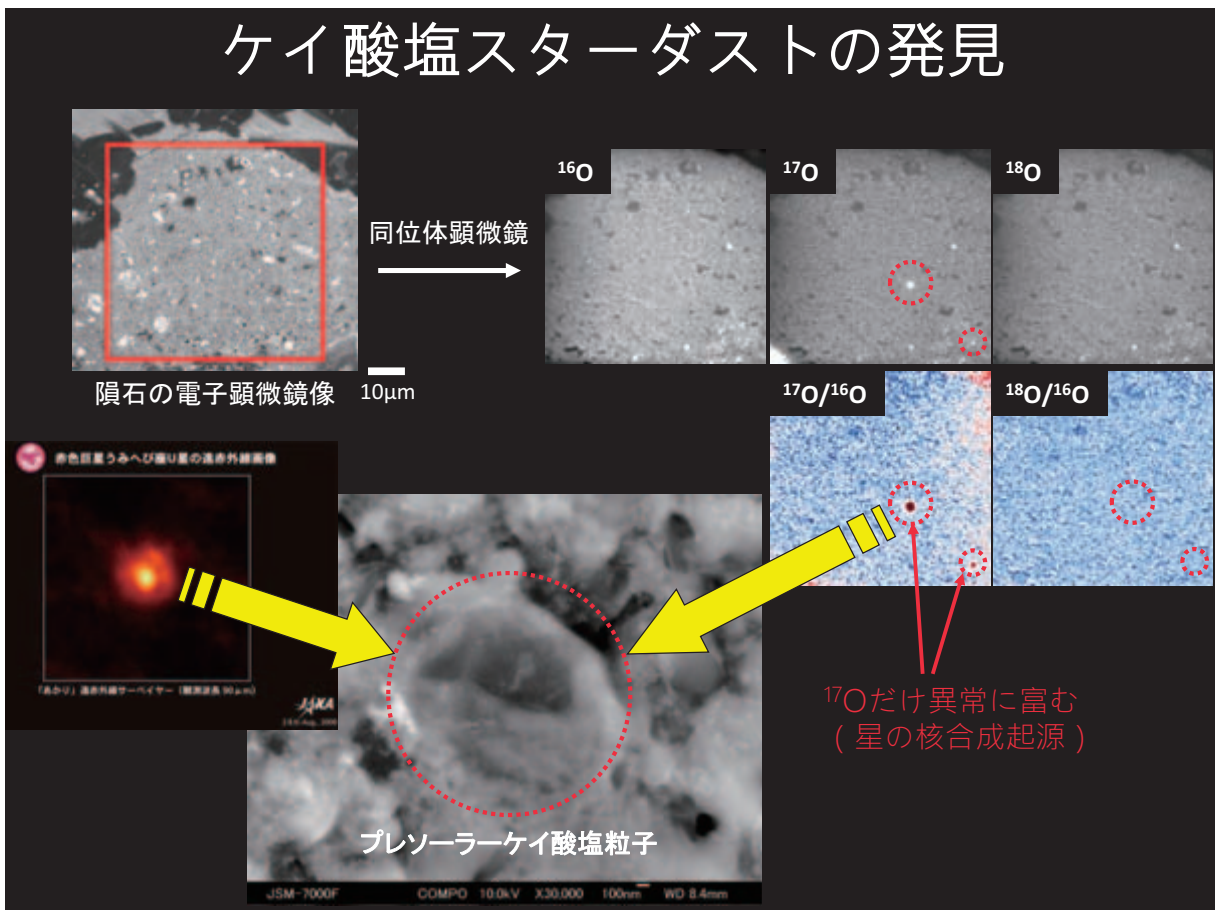
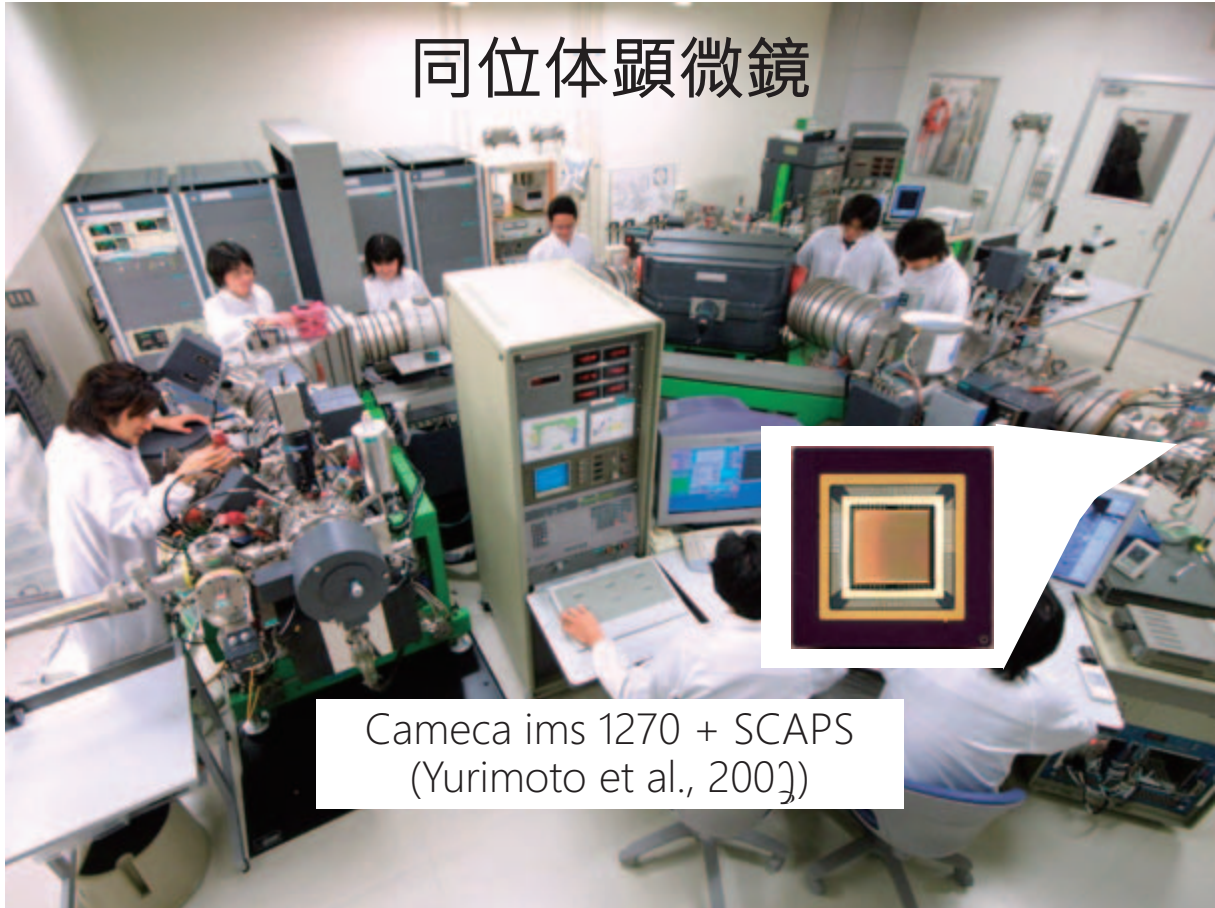
電子顕微鏡像



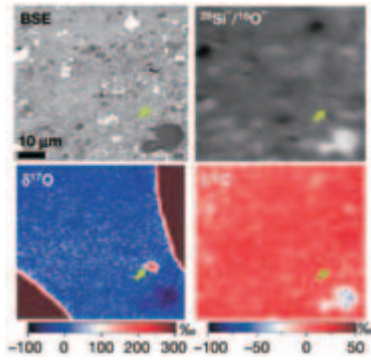
イオンに対する応答性



(Takayanagi et al., 2000); Yamamoto et al., 2010)



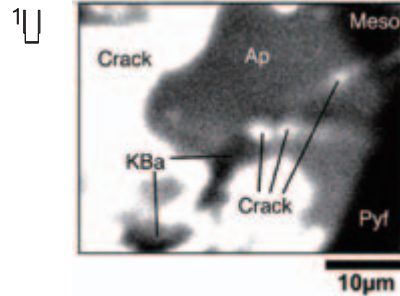
ケイ酸塩スターダストの発見



Nagashima et al., 2004, Nature

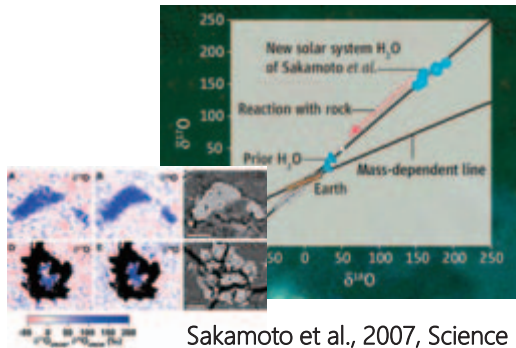
月の水

アポロ11号リターンサンプル

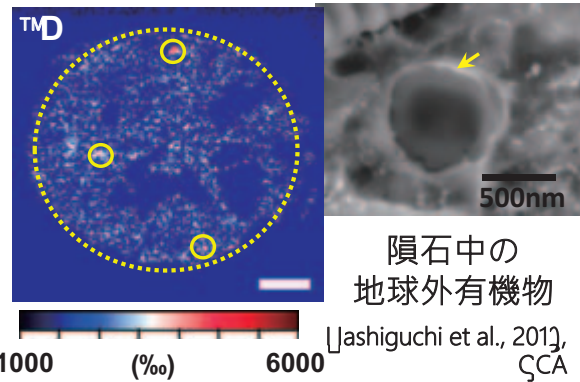


Greenwood et al., 2011, Nature Geoscience

太陽系の始原水



Sakamoto et al., 2007, Science



隕石中の地球外有機物

Jashiguchi et al., 2011, ζ CA

分析例

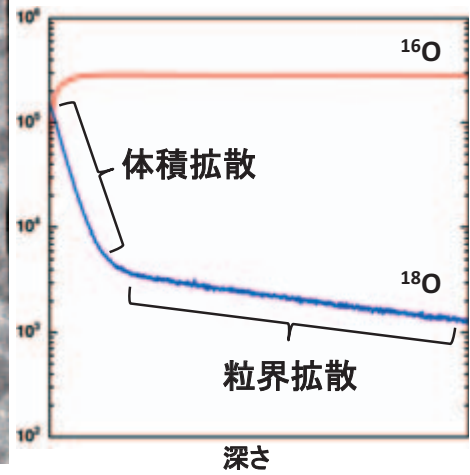
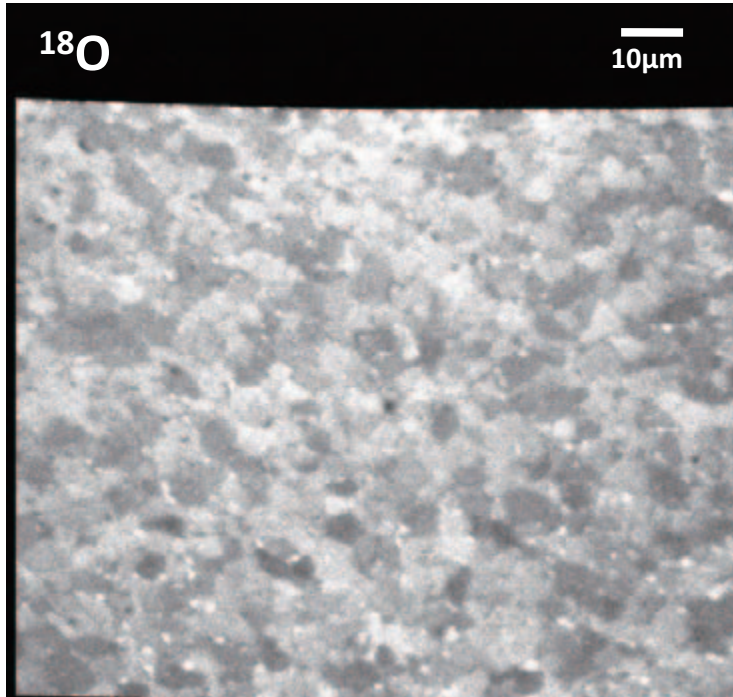
～ 半導体の三次元イメージング～

～ 培養細胞へのDNA導入～

～ 生体組織内の物質動態～

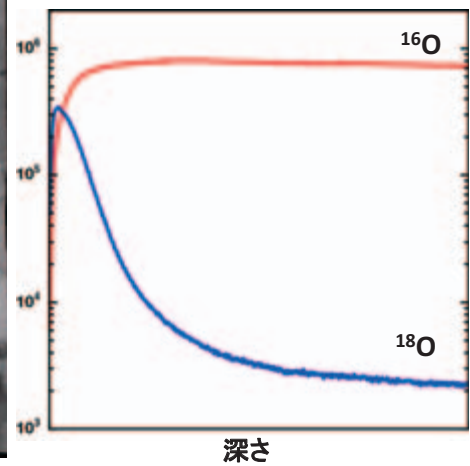
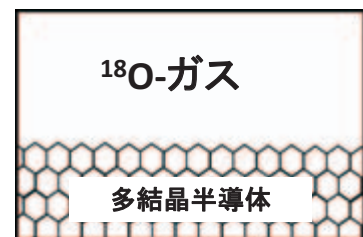
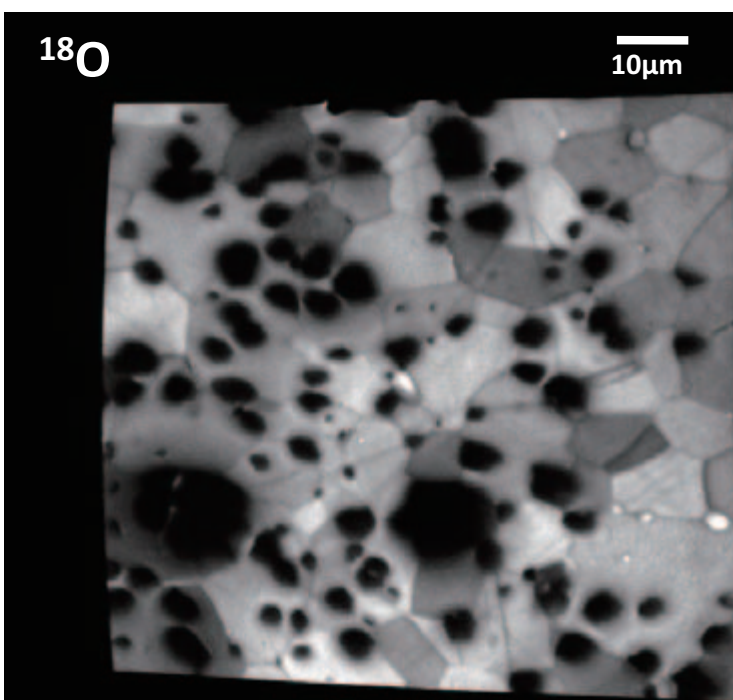
半導体の三次元イメージング

物質・材料研究機構 坂口先生



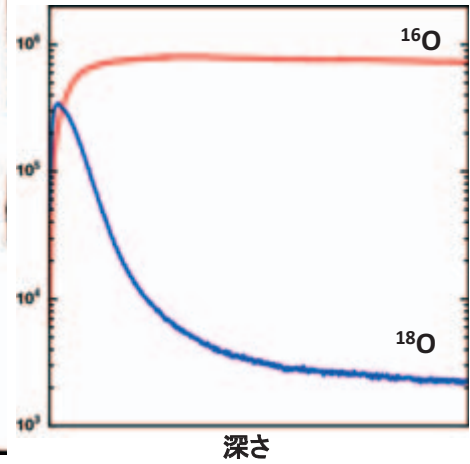
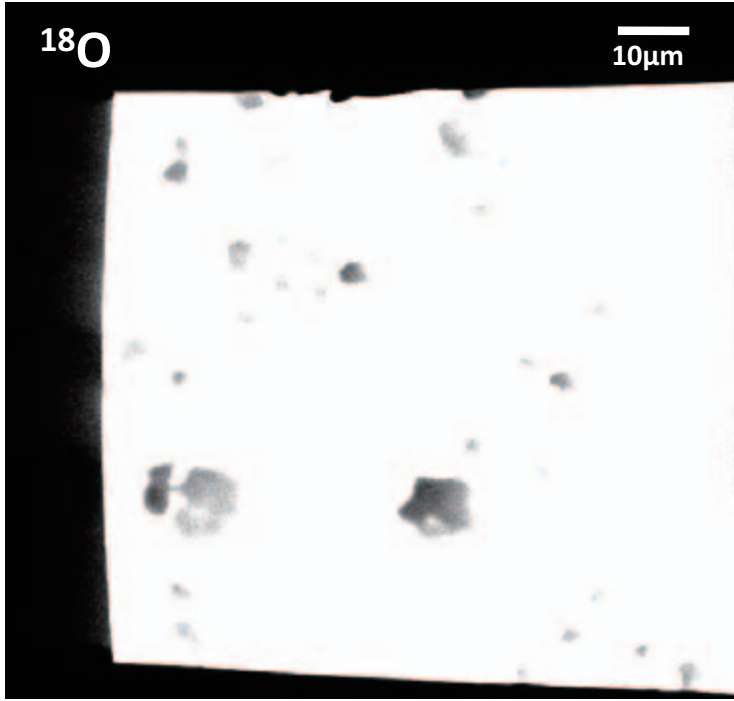
半導体の三次元イメージング

物質・材料研究機構 坂口先生

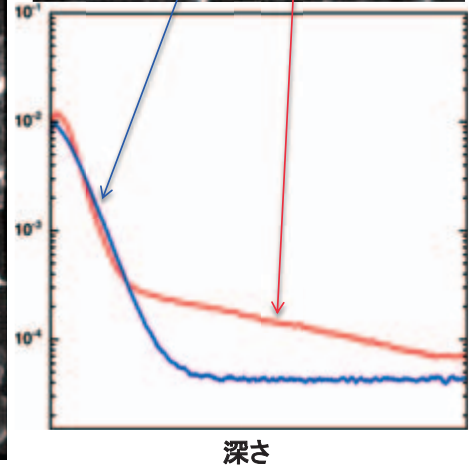
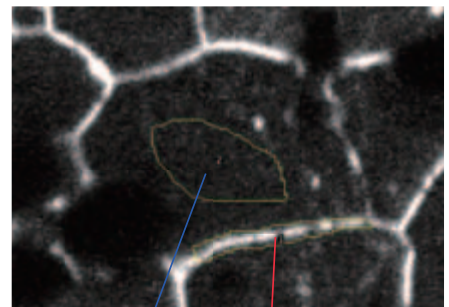
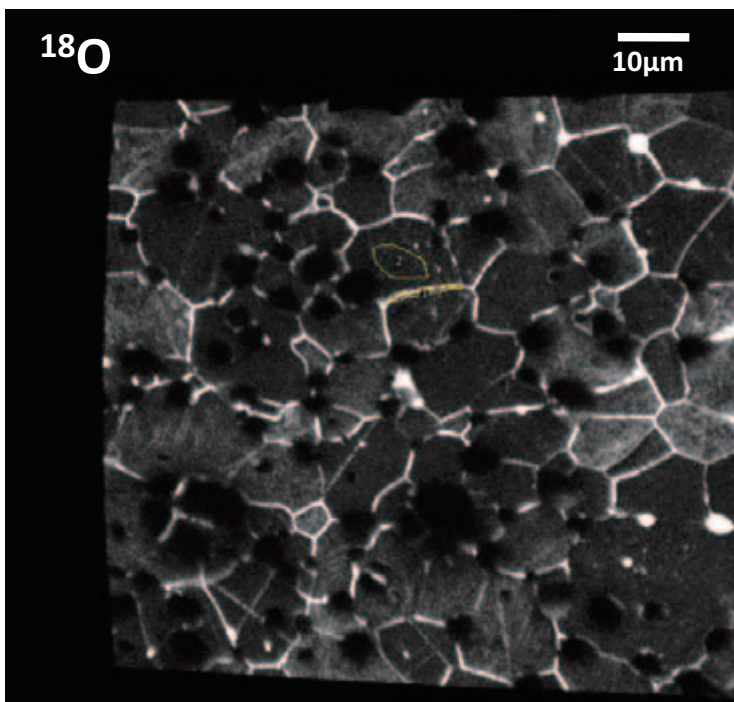


半導体の三次元イメージング

物質・材料研究機構 坂口先生

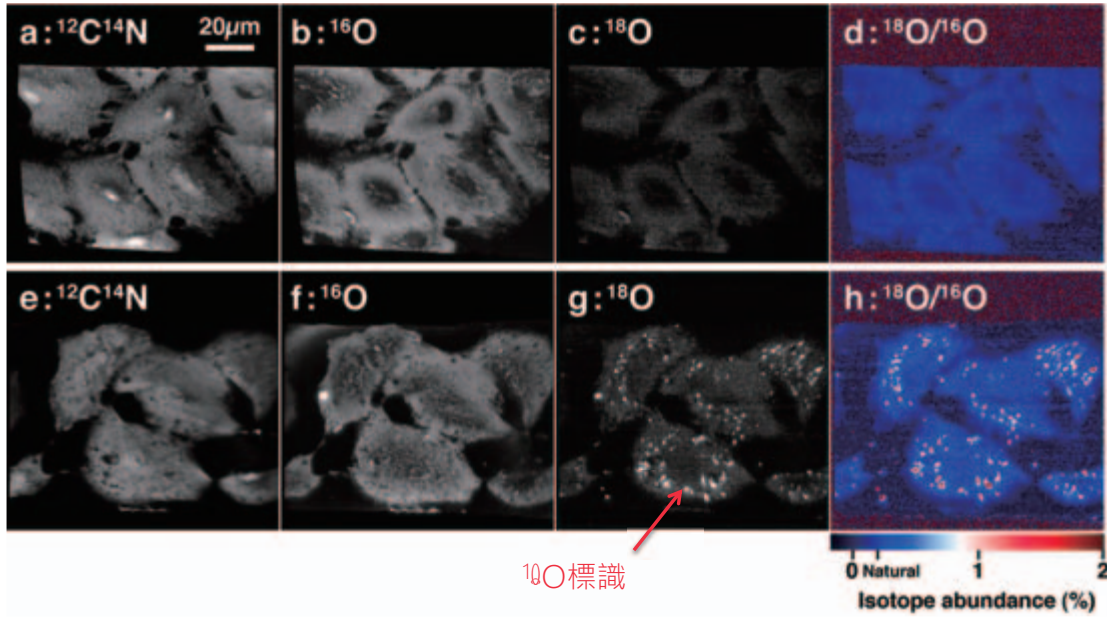
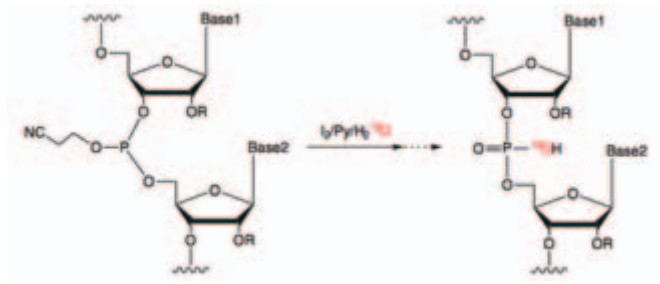


半導体の三次元イメージング



培養細胞への DNA導入

株式会社ボナック
[Jamasaki et al., 2011]

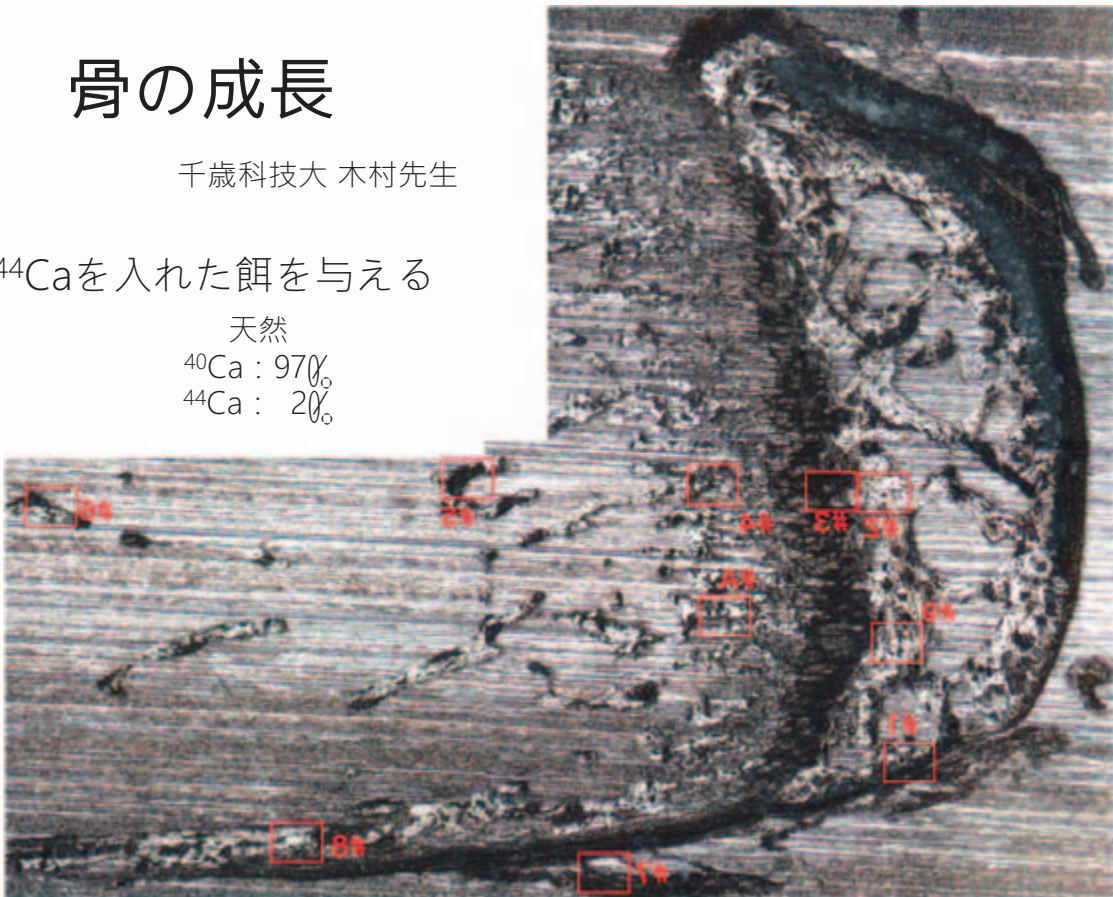


骨の成長

千歳科技大 木村先生

⁴⁴Caを入れた餌を与える

天然
⁴⁰Ca : 97%
⁴⁴Ca : 2%

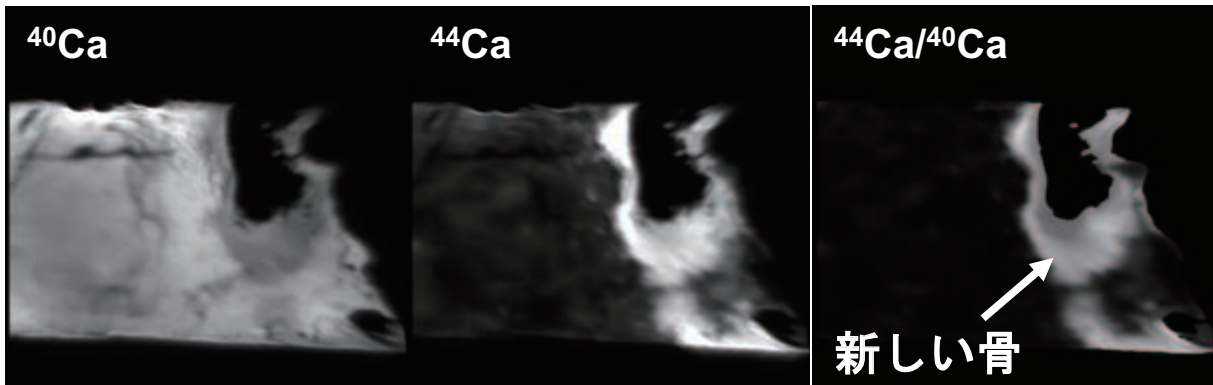
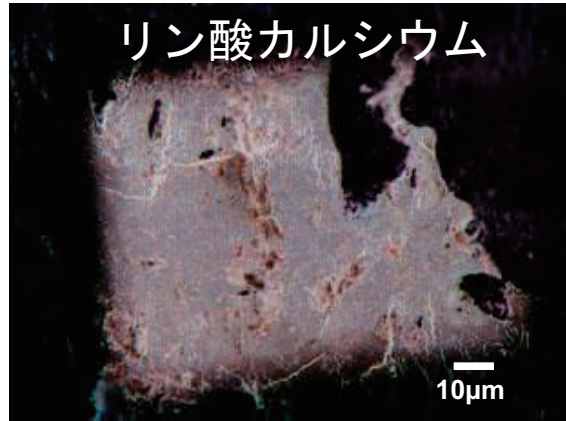


骨の成長

千歳科技大 木村先生

^{44}Ca を入れた餌を与える

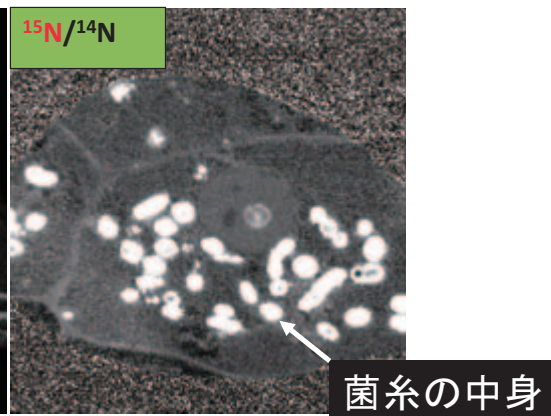
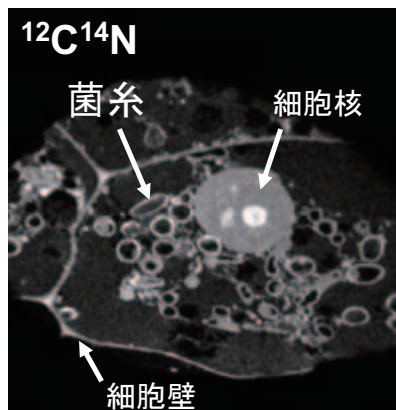
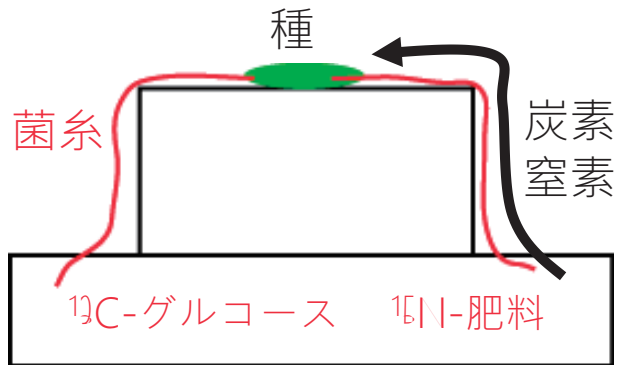
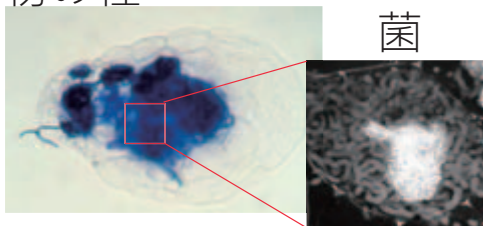
天然
 ^{40}Ca : 97%
 ^{44}Ca : 2%



植物と菌との共生

広島大学 久我先生
Kuga et al., 2014

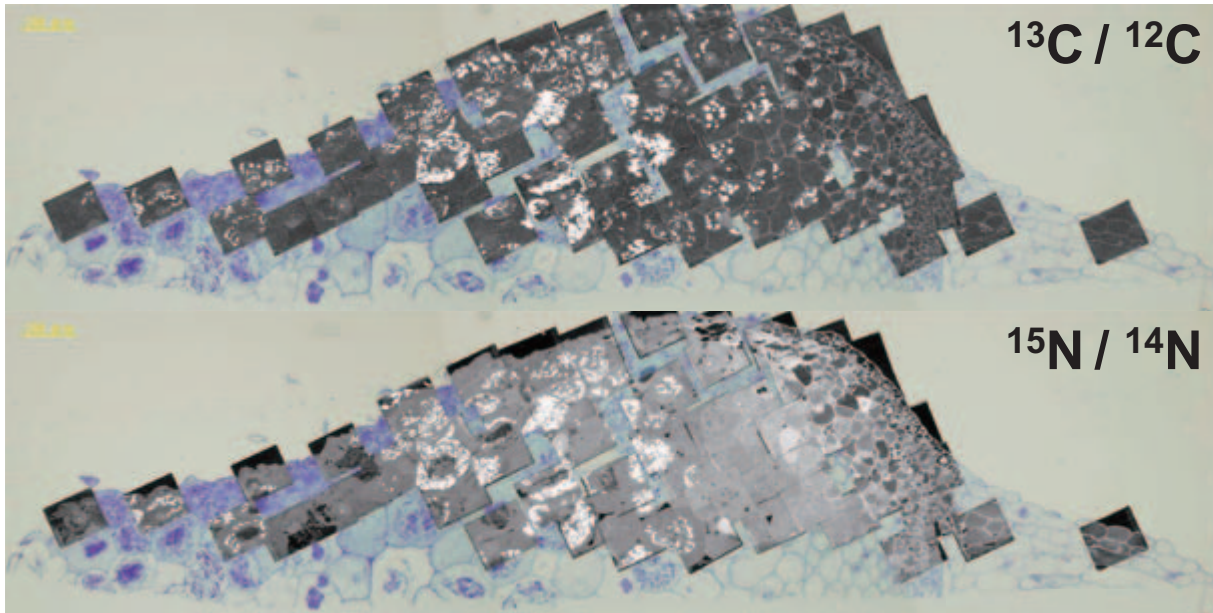
植物の種



植物と菌との共生

広島大学 久我先生

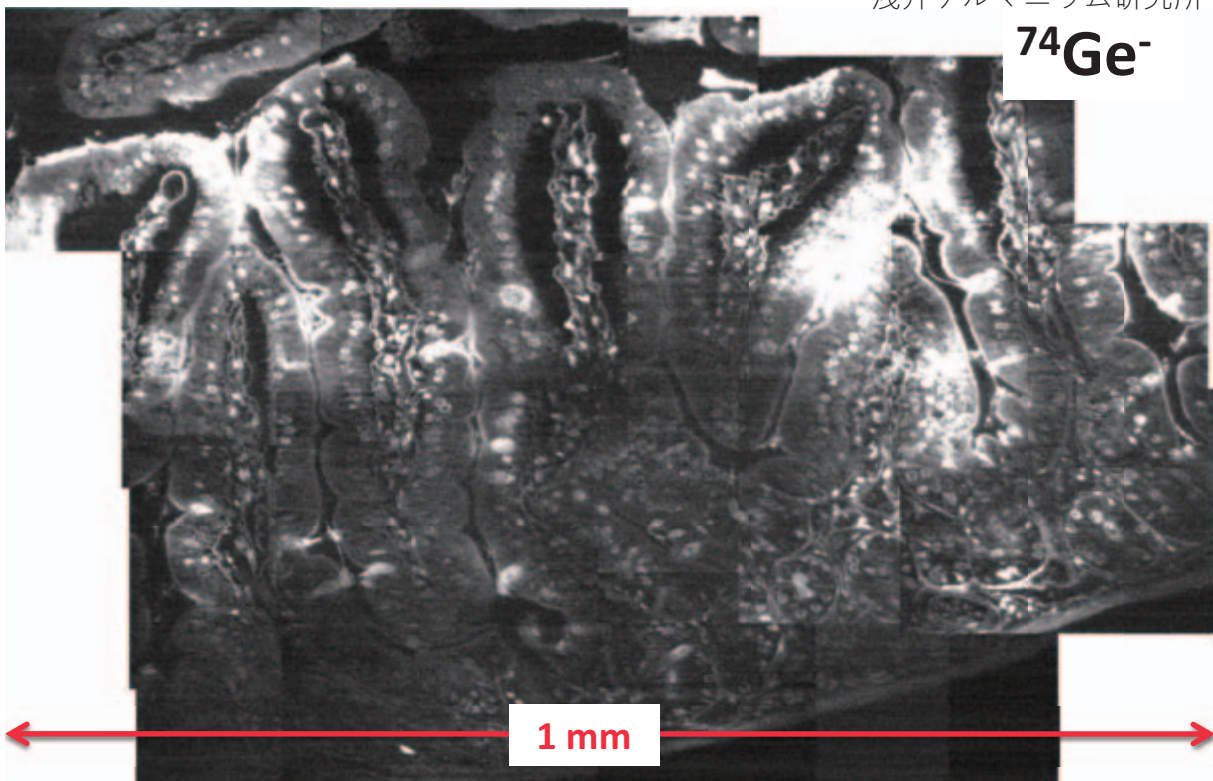
Kuga et al., 2014



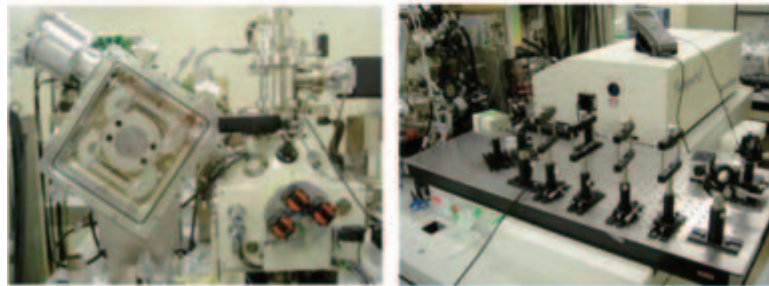
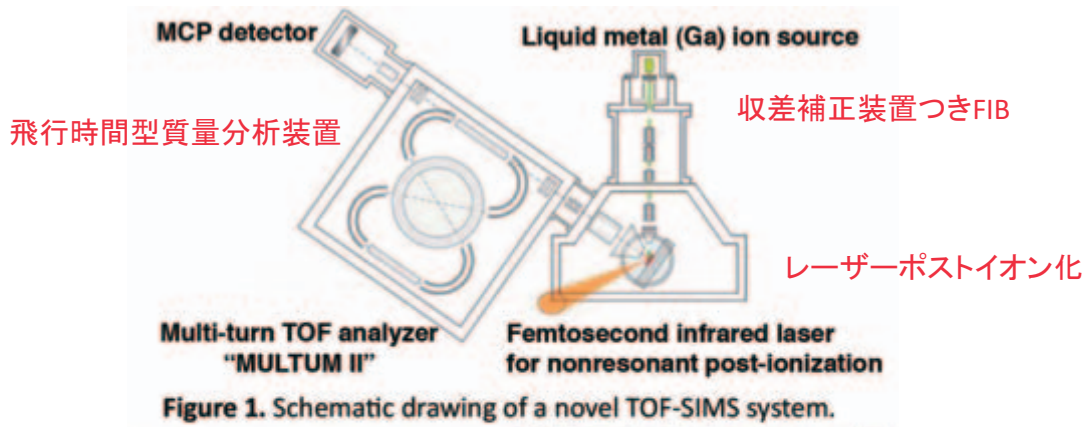
成長方向 

小腸での吸収

浅井ゲルマニウム研究所

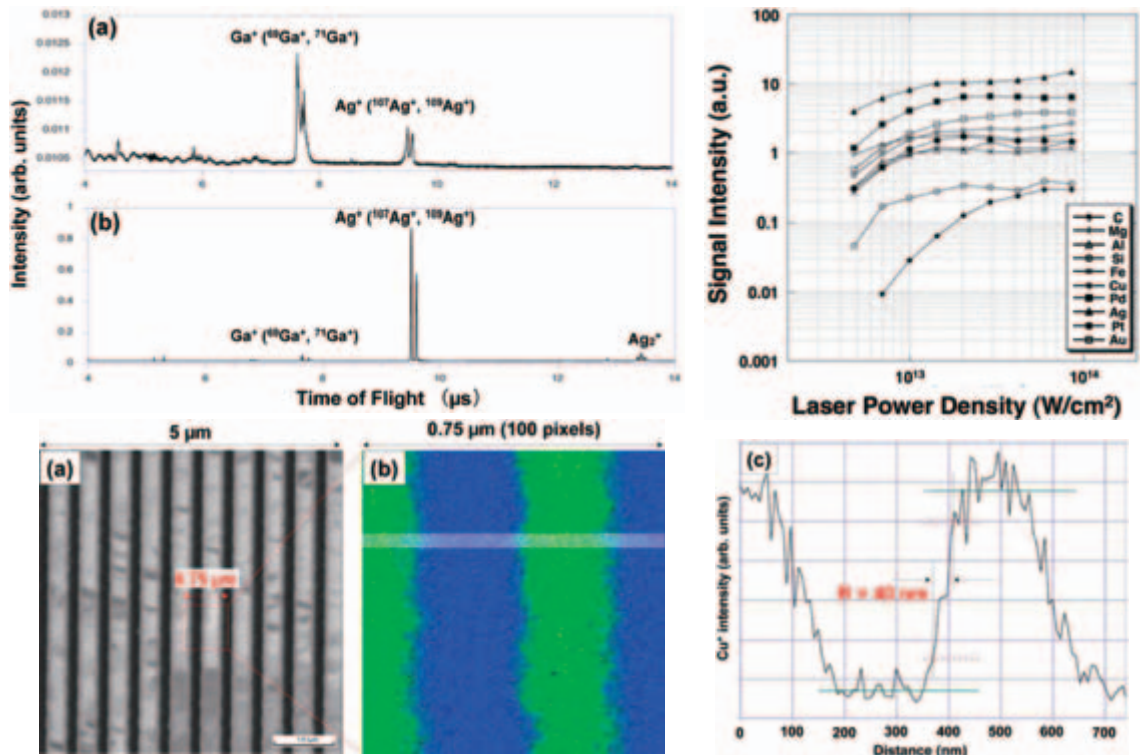


LIMAS



(Ebata *et al.*, ASMS2010)

LIMAS

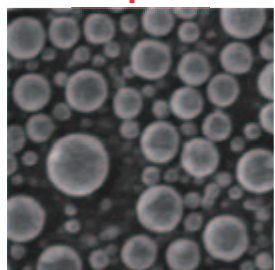


(Ebata *et al.*, ASMS2010)

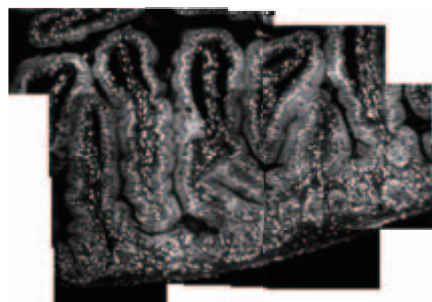
走査型 + 投影型



← 1 μ m →



← 1 mm →



2014.11.7 第10回学際領域における分子イメージングフォーラム]

赤外線計測による機械・構造物 の非破壊評価

神戸大学 阪上隆英



Dept. of Mechanical Engineering, Kobe University

構造健全性トライージの提唱

構造健全性トライージの提唱

医学用語のトライージとは

緊急度, 重症度により傷病者を選別し, 救命の可能性の高い傷病者を優先することにより, **限られた資源(医師, 看護師, 医療機器, 薬品)で最大多数に最善を尽くす行為**

<http://ops.umin.ac.jp/ops/tech/ops16toriage/yosida.html>



なぜ今, **インフラ設備や構造物に構造健全性トライージ**が必要なのか?

構造健全性トリアージ

救急医療現場でのトリアージ

⇒ 傷病者の緊急度を冷静かつ的確に判定できる
医師, 救命救急士, 看護師が必要



構造物の健全性トリアージ

⇒ 損傷のある構造物がどれ程危険な状態にあるかを
総合的かつ合理的に評価できる検査, 計測, 評価
法が必要



経年劣化構造物の構造健全性評価の重要性



Collapsed highway bridge in Minnesota
Accident report, National Transportation Safety Board,
<http://www.nts.gov>



Failure of Kisogawa river truss bridge
<http://www.tohokukk.jp/by Y. Takeuchi>

構造健全性評価に必要な3つの柱

- (1) 構造物に存在するき裂を見つけ, 寸法を測ること
- (2) 構造物にかかっている負荷の厳しさがわかること
- (3) 材料の破壊に対する抵抗力がわかること

経年劣化構造物の構造健全性評価の重要性



これまでの非破壊検査法

- ・足場や特殊な装置を使って検査者が構造物に近づく必要性
- ・時間と労力を必要とする
- ・**き裂が検出・測定されても、そのままでは危険性を評価できない**

これからの非破壊評価

- ・遠隔から効率的なき裂検出・測定
- ・安全性評価, 損傷発生・進展予測や寿命評価が可能
- ⇒ これらを可能にするため, 赤外線計測に基づく非破壊評価法を開発

赤外線応力測定技術を応用した橋梁のき裂検出



き裂検出・測定と安全性評価・寿命評価が可能な手法の開発

き裂を単に検出するだけでなく, 実際にかかっている荷重によるき裂の進展性(駆動力)を直接評価できる方法を開発

「伸び盛りの元気なき裂」なのか? 「成長しないき裂」なのか?

を判定し, 構造物管理者に有益な情報を提供する

本日の講演内容

- ① 赤外線映像装置の発展
赤外線映像装置の現状
- ② 赤外線計測に基づく機器の状態監視技術
電気設備, 機械設備, プラントの状態監視事例
- ③ 赤外線による応力計測
- ④ 赤外線計測に基づく機械・構造物の非破壊評価技術
手法の原理・特長, アクティブ法とパッシブ法,
波形解析サーモグラフィ
- ⑤ 赤外線計測に基づく機械・構造物の非破壊評価事例
複合材料・被膜材料の剥離検出, 金属材料のき裂評価
- ⑥ 赤外線による散逸エネルギー計測
散逸エネルギーに基づくき裂発生予測・疲労限度推定
- ⑦ 赤外線分光イメージング
分光イメージングによるガス検知
- ⑧ テラヘルツ電磁波計測による非破壊評価

① 赤外線映像装置の発展

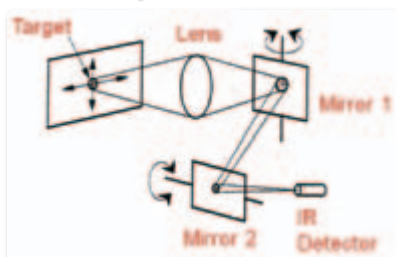
赤外線センシングの歴史

- 1800 W. Herschel による赤外線の見つけ
- 1821 Seebeck 効果の見つけ
- 1829 熱電対の発明 (Nobili)
- 1833 サーマピルの発明 (Meloni)
10メートルの距離で人体を識別
- 1901 ボロメータの発明 (Langley)
40メートルの距離で家畜の存在を識別
- 1960s 赤外線サーモグラフィの開発
Hg-Ge 検出器搭載の走査型
- 1980s後半 FPAセンサ搭載型赤外線カメラの開発
InSb検出器, PtSi検出器
- 1990s 非冷却赤外線カメラの開発
マイクロボロメータ赤外線センサの進歩
- 2000s 非冷却赤外線カメラの普及
- 2010s 赤外線カメラの小型低価格化

赤外線映像装置の歴史

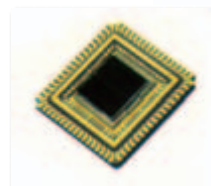
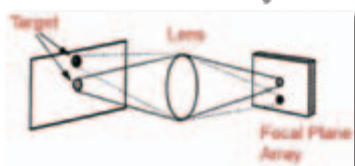
1960s サーマグラフィの第1世代の始まり

Hg-Ge 検出器による走査型



1980s サーマグラフィの第2世代 (FPA IR 検出器)

FPA: Focal Plane Array



1990s サーマグラフィの第3世代 (非冷却 IR 検出器)

赤外線カメラの最新開発動向

		赤外線 センサ	画素数	検出波長 (mm)	冷却	NETD(K)	計測速度 (Frames/s)	重量(g)	製造国
A		InSb	1280×1024	1.5~5.1	要	0.02	100	5050	アメリカ
		InSb	640×512	2.5~5.1	要	0.02	100	4950	フランス
		InSb	640×512	2~5	要	0.02	48	3000	日本
		InSb	320×256	2.5~5.1	要	0.02	380	4950	フランス
		MCT	320×256	7.7~9.3	要	0.02	250	4950	フランス
B		MB	640×480	8~13	不要	0.06	30	1500 *	日本
		MB	640×480	7.5~13	不要	0.045	30	1700 *	アメリカ
		MB	320×240	8~14	不要	0.05	60	1300 *	日本
		MB	320×240	8~14	不要	0.06	60	800 *	日本
		MB	320×240	8~14	不要	0.05	30	880 *	アメリカ
C		MB	320×240	8~14	不要	0.05	60	300	日本
		MB	324×256	7.5~13.5	不要	0.085	30	97	アメリカ
		MB	320×256	7.5~13.5	不要	0.05	30	72	アメリカ

画像は、日本アビオニクス(株) (<http://www.avio.co.jp/>), FLIR Systems Inc. (<http://flir.com/>) ホームページから転載

赤外線カメラの最新開発動向

		赤外線 センサ	画素数	検出波長 (mm)	冷却	NETD(K)	計測速度 (Frames/s)	重量(g)	製造国
A		InSb	1280×1024	1.5~5.1	要	0.02	100	5050	アメリカ
		InSb	640×512	2.5~5.1	要	0.02	100	4950	フランス
		InSb	640×512	2~5	要	0.02	48	3000	日本
		InSb	320×256	2.5~5.1	要	0.02	380	4950	フランス
		MCT	320×256	7.7~9.3	要	0.02	250	4950	フランス
B		MB	640×480	8~13	不要	0.06	30	1500 *	日本
		MB	640×480	7.5~13	不要	0.045	30	1700 *	アメリカ
		MB	320×240	8~14	不要	0.05	60	1300 *	日本
C		MB	320×240	8~14	不要	0.05	60	300	日本
		MB	324×256	7.5~13.5	不要	0.085	30	97	アメリカ
		MB	320×256	7.5~13.5	不要	0.05	30	72	アメリカ

高い温度分解能: 20mK
高速測定: 380frames/s
高解像度化: 340×256 ⇒ 640×512 ⇒ 1280×1024

高速計測を必要とする研究開発: 非定常現象, 移動体・回転体
波形データが必要な計測: 熱弾性応力計測, 散逸エネルギー計測

画像は、日本アビオニクス(株) (<http://www.avio.co.jp/>), FLIR Systems Inc. (<http://flir.com/>) ホームページから転載

赤外線カメラの最新開発動向

		赤外線 センサ	画素数	検出波長 (mm)	冷却	NETD(K)	計測速度 (Frames/s)	重量(g)	製造国
<p>温度分解能の向上: 50mK センサの高解像度化: 640×512 センサの素子ピッチの向上</p> <p>小型軽量化による現場適応性, 価格競争による低価格化</p>									
B		MB	640×480	8~13	不要	0.06	30	1500 *	日本
		MB	640×480	7.5~13	不要	0.045	30	1700 *	アメリカ
		MB	320×240	8~14	不要	0.05	60	1300 *	日本
		MB	320×240	8~14	不要	0.06	60	800 *	日本
		MB	320×240	8~14	不要	0.05	30	880 *	アメリカ
C		MB	320×240	8~14	不要	0.05	60	300	日本
		MB	324×256	7.5~13.5	不要	0.085	30	97	アメリカ
		MB	320×256	7.5~13.5	不要	0.05	30	72	アメリカ

画像は、日本アビオニクス(株) (<http://www.avio.co.jp/>), FLIR Systems Inc. (<http://flir.com/>) ホームページから転載

赤外線カメラの最新開発動向

		赤外線 センサ	画素数	検出波長 (mm)	冷却	NETD(K)	計測速度 (Frames/s)	重量(g)	製造国
A		InSb	1280×1024	1.5~5.1	要	0.02	100	5050	アメリカ
		InSb	640×512	2.5~5.1	要	0.02	100	4950	フランス
		InSb	640×512	2~5	要	0.02	48	3000	日本
		InSb	320×256	2.5~5.1	要	0.02	380	4950	フランス
		MCT	320×256	7.7~9.3	要	0.02	250	4950	フランス
<p>素子ピッチの改良によるセンサの小型化 上位機種に匹敵する高解像度, 温度分解能</p> <p>ヘルメットマウント, ゴーグルマウント赤外線カメラを可能に ⇒ 消防隊員の安全確保, プラントの日常巡回点検</p>									
C		MB	320×240	8~14	不要	0.05	60	300	日本
		MB	324×256	7.5~13.5	不要	0.085	30	97	アメリカ
		MB	320×256	7.5~13.5	不要	0.05	30	72	アメリカ

画像は、日本アビオニクス(株) (<http://www.avio.co.jp/>), FLIR Systems Inc. (<http://flir.com/>) ホームページから転載

赤外線映像装置の変遷

1989年



日本アビオニクス TVS-5000

機械走査型

InSb検出器(アルゴンガス冷却)

波長域 3~5.4 μ m

温度分解能 0.1K

計測速度 20 frames/s

データ 256 \times 200画素, 8ビット

総重量 39kg

1990年



日本アビオニクス TVS-2000

機械走査型

InSbリア検出器(アルゴンガス冷却)

波長域 3~5.4 μ m

温度分解能 0.1K

計測速度 20 frames/s

データ 256 \times 200画素, 8ビット

重量 13.2kg

赤外線映像装置の変遷

1994年



ニコン LAIRD 3

PtSi CCDアレイ検出器
(スターリングクーラー冷却)波長域 3~5 μ m

温度分解能 0.15K

計測速度 60 frames/s

データ 811 \times 508画素

総重量 9kg

1996年



Amber Galileo (Raytheon Radiance HS)

InSb FPA検出器(スターリングクーラー冷却)

波長域 3~5 μ m

温度分解能 0.025K

計測速度 150 frames/s

データ 256 \times 256画素, 12ビット

重量 4.3kg

赤外線映像装置の変遷

2000年



日本アビオニクス TVS-700
マイクロボロメータアレイ検出器
波長域 8~14 μ m
温度分解能 0.08K
計測速度 30 frames/s
データ 320×240画素
総重量 1.8kg

2007年



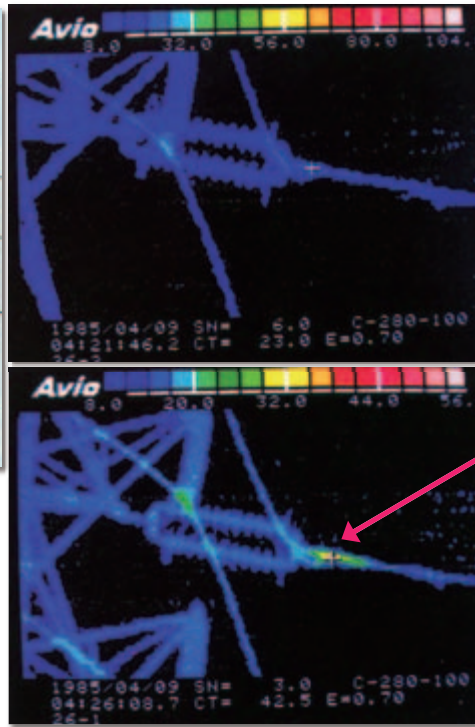
CEDIP Titanium (FLIR SC-7500)
MCT FPA検出器(スターリングクーラー冷却)
波長域 7.7~9.3 μ m
温度分解能 0.02K
計測速度 250 frames/s
データ 320×256画素, 12ビット
重量 4.9kg

② 赤外線計測に基づく機器 の状態監視技術

電気設備の状態監視への適用



サーモグラフィの古くからの適用事例

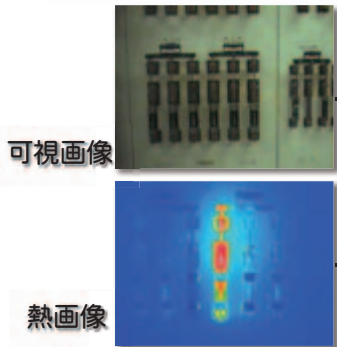


不良部分

電気設備の状態監視への適用

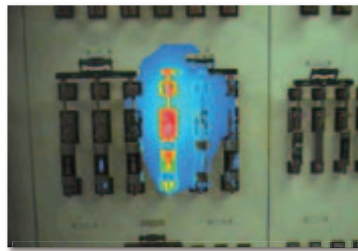
電気受配電設備の保守

ボルトのゆるみ・締めすぎ・腐食などによる端子の接触抵抗の増大

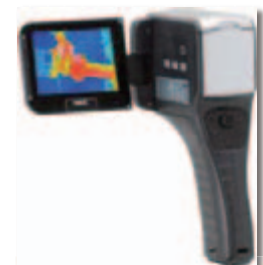


可視画像

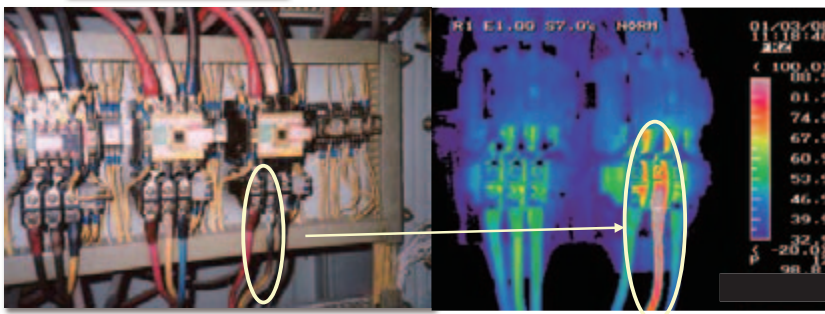
熱画像



可視画像・熱画像合成画像



設備点検用サーモグラフィ装置の一例
熱画像・可視画像合成機能が付いたサーモグラフィもある

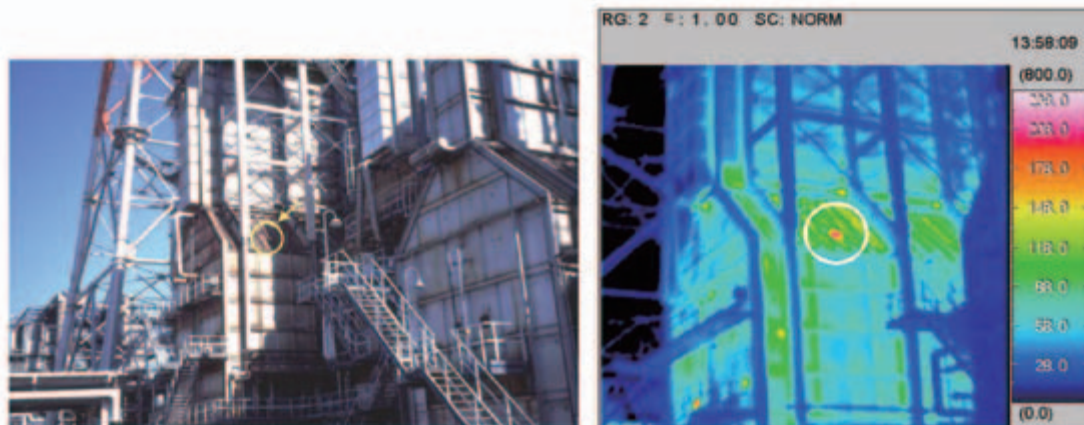


← 端子が腐食し高熱となっている事例

プラント設備の状態監視への適用

反応炉や化学プラントの保守管理

燃焼炉内壁の耐火物脱落による異常温度検出事例



燃焼炉内壁の耐火物の脱落により、鉄皮表面に局所的高温部が現れている。

資料提供：（一社）日本赤外線サーモグラフィ協会（<http://www.thermography.or.jp/>）

③ 赤外線による応力計測

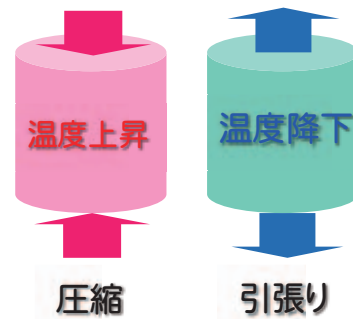
熱弾性応力計測の原理

気体を断熱膨張させれば温度が降下し、断熱圧縮すれば温度が上昇する。固体に応力が急激に作用し、変形が断熱的に行われる場合には、このような温度変化は固体にも同様に見られる。すなわち、固体に引張応力を作用させればその応力変動に比例した温度降下が、逆に圧縮応力を作用させれば応力変動に比例した温度上昇が生じる。この現象は、熱弾性効果 (Thermoelastic Effect) と呼ばれ、1853年に可逆的熱弾性効果の理論がKelvinによって定式化され、熱弾性効果に基づく応力測定技術の基礎となっている。



Lord Kelvin (1824-1907)

<http://conductor.cool.ne.jp/neturyutai/great/kelvin.html>



熱弾性効果の基礎式

固体に対する熱弾性効果の基礎式

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho C_p} T \Delta \sigma = -k T \Delta \sigma$$

α : 線膨張係数, ρ : 密度, C_p : 定圧比熱

k : 熱弾性係数

$\Delta \sigma$: 主応力和の変動振幅

熱弾性係数 k と ΔT

軟鋼

$$k = 3.5 \times 10^{-12} \text{ (m}^2\text{/N)}$$

$$\Delta \sigma = 10 \text{ (MPa) の時 } \Delta T = 0.01 \text{ (K)}$$

アルミニウム

$$k = 8.8 \times 10^{-12} \text{ (m}^2\text{/N)}$$

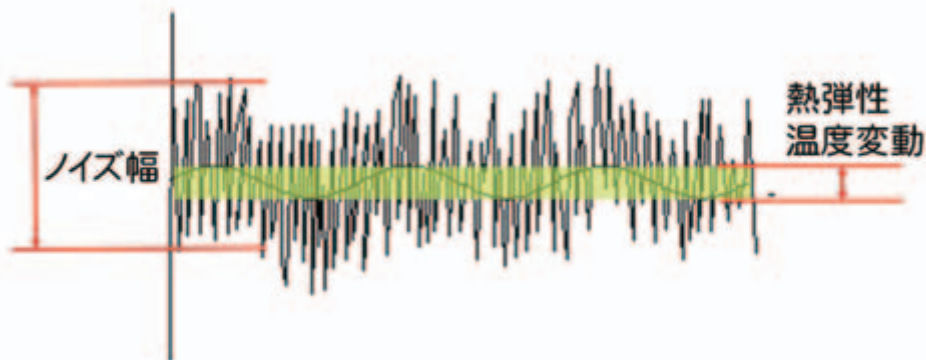
$$\Delta \sigma = 10 \text{ (MPa) の時 } \Delta T = 0.026 \text{ (K)}$$

赤外線応力測定におけるノイズ改善

熱弾性温度変動はmKオーダであり、高い分解能および精度での温度計測が要求される。

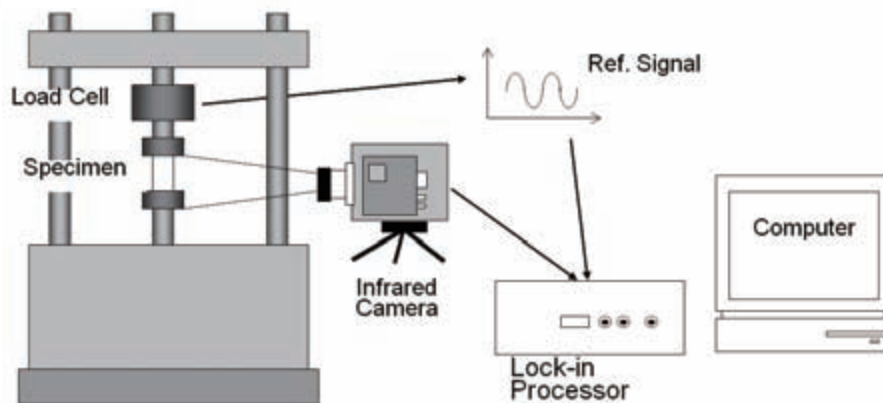
これに対して、赤外線サーモグラフィのNETD(ノイズ等価温度差)は、25mK程度の値であり、赤外線センサの計測信号をそのまま温度に換算しただけでは、熱弾性応力測定に十分な分解能・精度を得ることができない。

このため、何らかのノイズ改善処理が必要となる。



赤外線応力測定装置 (ロックインサーモグラフィ)

赤外線サーモグラフィによる応力測定では、下図に示すように、被測定物への負荷荷重として繰返し変動荷重を与え、荷重信号に同期して変動する温度変動だけを、ロックインアンプと同様の相互相関信号処理により赤外線センサの出力から抽出し、さらにこれを荷重サイクルごとに積算し平均化することにより、高分解能・高精度な温度計測を可能にしている。

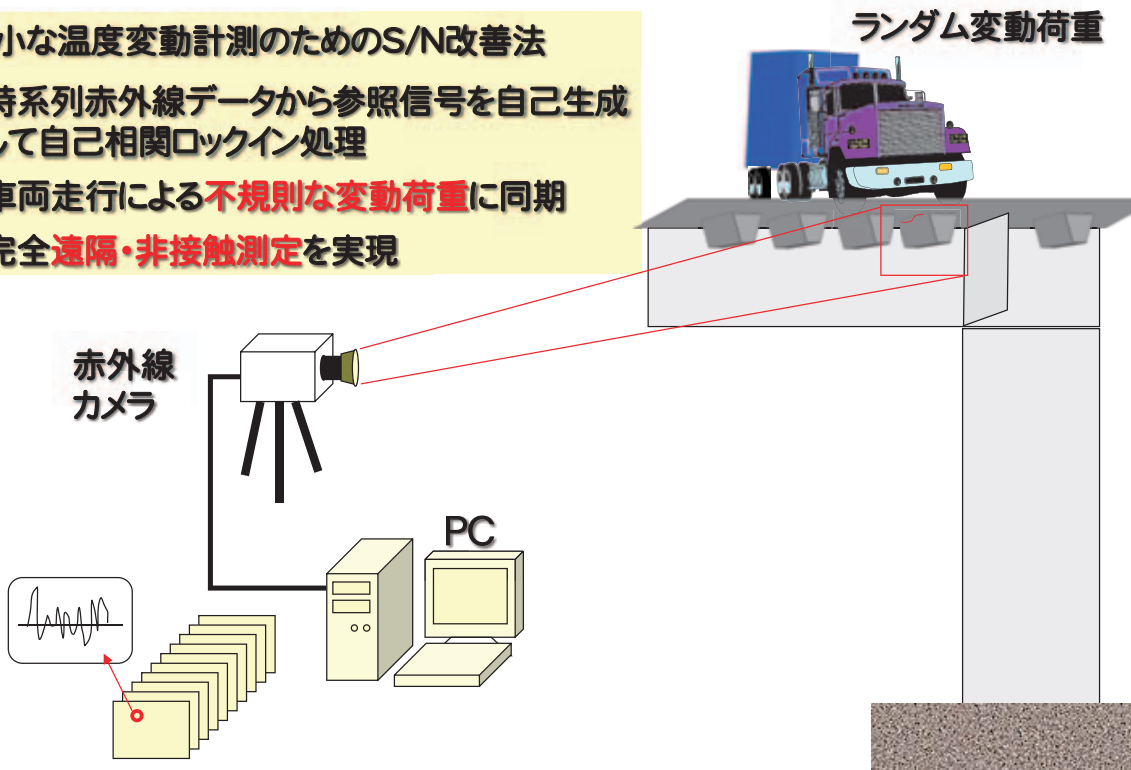


赤外線応力測定装置の概要

自己相関ロックイン法による疲労き裂検出・評価

微小な温度変動計測のためのS/N改善法

- ・ 時系列赤外線データから参照信号を自己生成して自己相関ロックイン処理
- ・ 車両走行による**不規則な変動荷重**に同期
- ・ 完全**遠隔・非接触測定**を実現



波形解析サーモグラフィ法

自己相関ロックインサーモグラフィ法 (2004年)

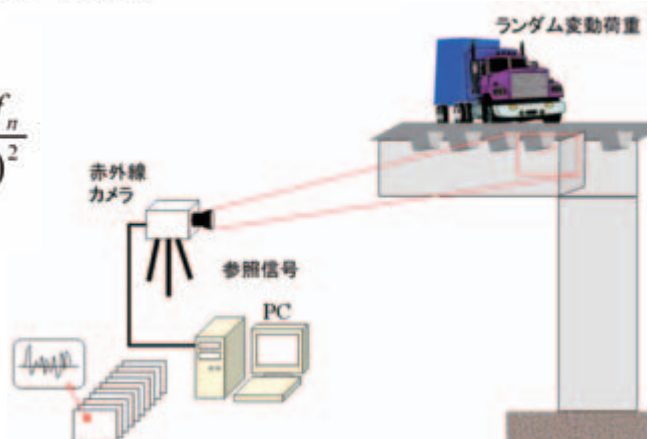
$$Y_n = A + Bf_n$$

$$\Delta^2 = \sum_{n=1}^N (y_n - Y_n)^2 \rightarrow \min$$

- Y_n : 近似値 (視野内の全ての箇所)
- y_n : 赤外線強度 (視野内の全ての箇所)
- f_n : 赤外線強度 (参照信号部)
- A, B : 近似係数
- N : 全フレーム数
- n : フレーム番号

$$B = \frac{\begin{vmatrix} N & \sum y_n \\ \sum f_n & \sum y_n f_n \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & \sum f_n \\ \sum f_n & \sum (f_n)^2 \end{vmatrix}} = \frac{N \sum y_n f_n - \sum y_n \sum f_n}{N \sum (f_n)^2 - (\sum f_n)^2}$$

係数Bの分布が相対変動値分布を表す

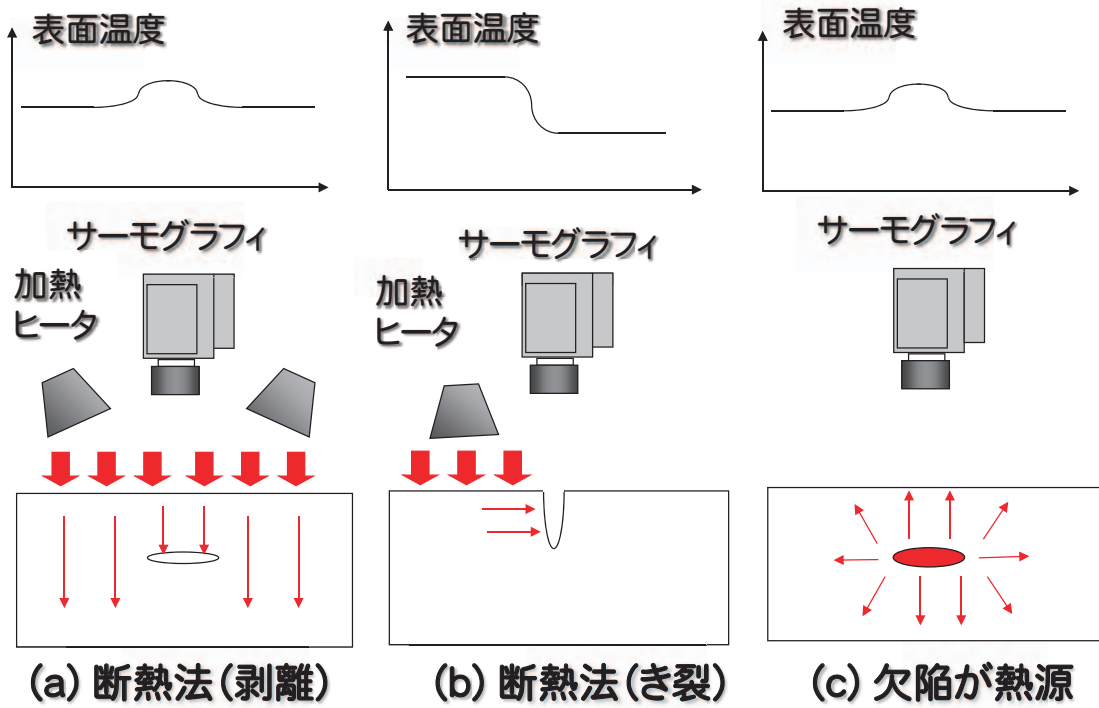


④ 赤外線計測に基づく機械・ 建造物の非破壊評価技術

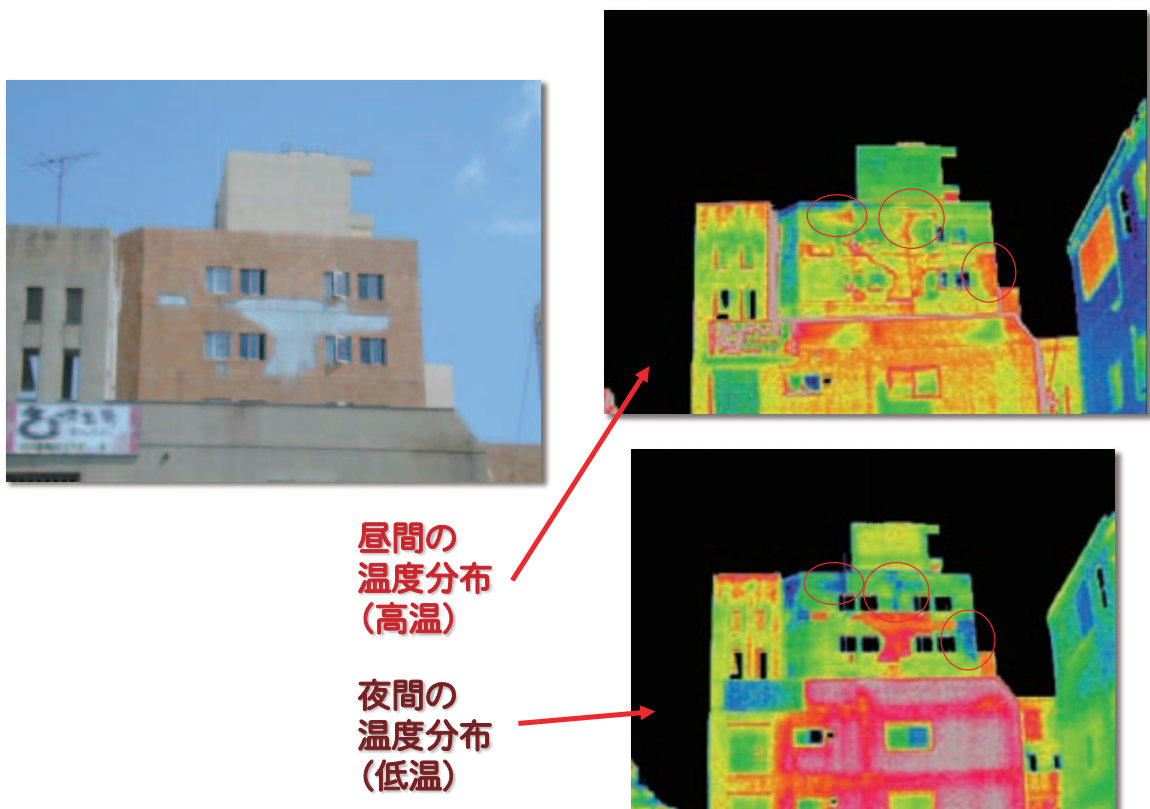
赤外線サーモグラフィ法の特長

- **非破壊**かつ**非接触**に欠陥検査が可能
- **遠隔から**検査ができるため、検査のための足場や特殊な装置を必要としない
- 対象物の2次元画像による検査なので、**短時間に広範囲**にわたる検査を行うことができる
- 欠陥の位置・形状が温度分布から**視覚的**に同定できる
- 場合により熱負荷装置を必要とするが、基本的には赤外線サーモグラフィ以外に、特別な設備を必要としない
- 光学的計測法であるため、適当な赤外光学系を選ぶことにより、検査対象の大きさによる制限を受けない
- 検査対象の材質による制限を受けにくい
- 超音波探傷が苦手とする、複合材料や被膜材料等の表面下のはく離欠陥に対して検出感度が高い
- 計測のために有害物質を使用しない人体と環境にやさしい試験法

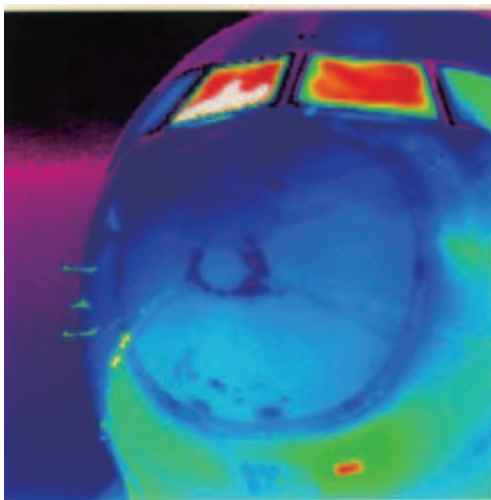
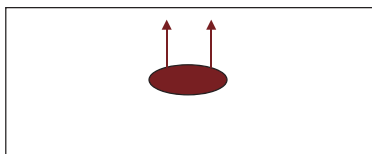
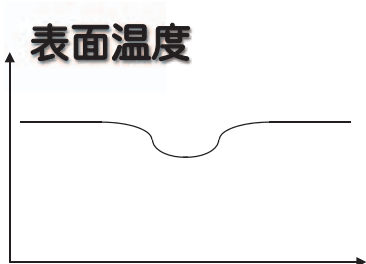
赤外線サーモグラフィ法



断熱温度場法の例



欠陥が熱源となる場合の例

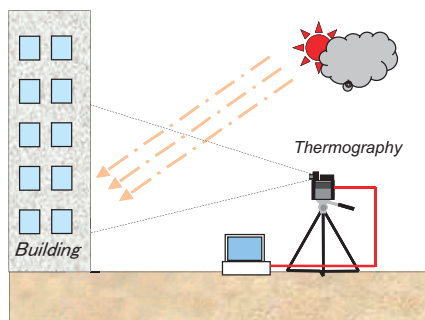


- ・ ハニカムサンドイッチパネルへの水浸入箇所の検出
- ・ 法面やトンネル覆工裏側の地下水

アクティブ法とパッシブ法

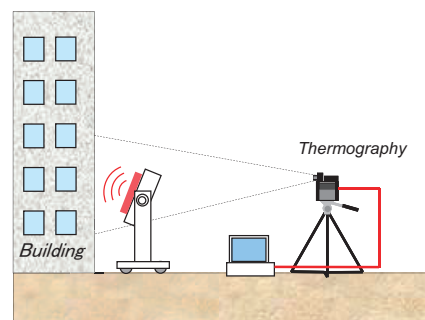
パッシブ赤外線サーモグラフィ法

太陽光や外気温変動などにより被測定物に自然に発生した温度変化を用いる方法



アクティブ赤外線サーモグラフィ法

何らかの手段により被測定物に強制的に熱負荷を与える方法



波形解析サーモグラフィ法

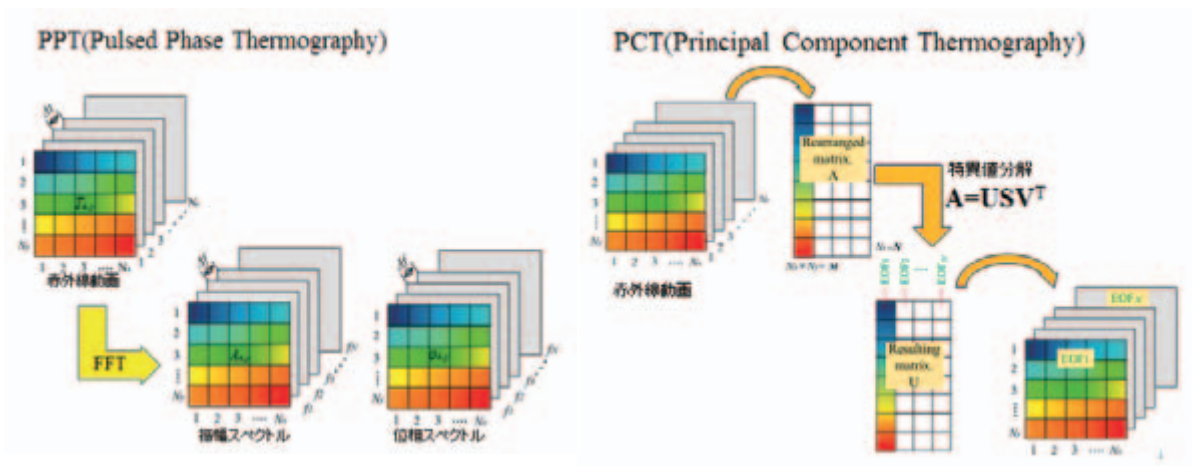
	加熱方法	従来型 サーモグラフィ法	波形解析サーモグラフィ法 (ロックイン法など)
アクティブ サーモグラフィ法	ステップ加熱	はく離欠陥, 減肉欠陥 金属, 複合材料, コンクリート	はく離欠陥, 減肉欠陥 金属, 複合材料, コンクリート
	パルス加熱	はく離欠陥, 減肉欠陥 複合材料, コーティング	はく離欠陥, 減肉欠陥 金属, 複合材料, コーティング
	周期加熱		き裂, はく離欠陥, 減肉欠陥 金属, 複合材料, コーティング
	ランダム加熱		き裂, はく離欠陥, 減肉欠陥 金属, 複合材料, コーティング
パッシブ サーモグラフィ法			き裂, はく離欠陥 金属, コンクリート
	自然条件	き裂, はく離欠陥 金属, 複合材料, コンクリート	

波形解析サーモグラフィ法

Prof. X. Maldague

PPT (Pulsed Phase Thermography)

PCT (Principal Component Thermography)



波形解析サーモグラフィ法

ロックインサーモグラフィ法

フーリエ級数係数に基づくサーモグラフィ法（1998年）

フーリエ級数展開

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n}{T} t + b_n \sin \frac{2\pi n}{T} t \right)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \frac{2\pi n}{T} x dt$$

T : 加熱周期

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \frac{2\pi n}{T} x dt$$

振幅

$$R = \sqrt{V_{\cos}^2 + V_{\sin}^2}$$

V_{\cos} : フーリエ係数 a_1 の1次項

位相

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{V_{\sin}}{V_{\cos}} \right)$$

V_{\sin} : フーリエ係数 b_1 の1次項

波形解析サーモグラフィ法

自己相関ロックインサーモグラフィ法（2004年）

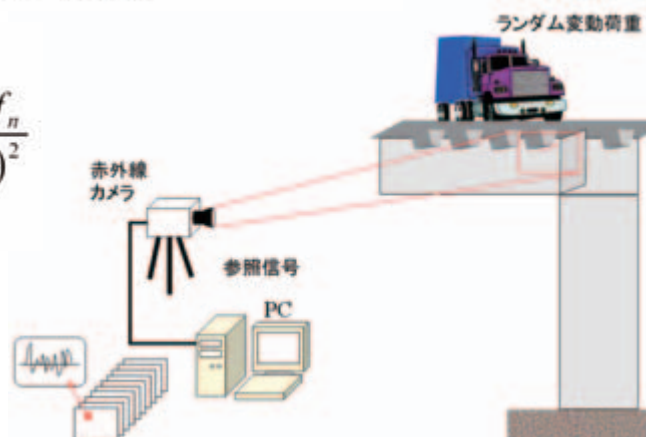
$$Y_n = A + B f_n$$

$$\Delta^2 = \sum_{n=1}^N (y_n - Y_n)^2 \rightarrow \min$$

- Y_n : 近似値 (視野内の全ての箇所)
- y_n : 赤外線強度 (視野内の全ての箇所)
- f_n : 赤外線強度 (参照信号部)
- A, B : 近似係数
- N : 全フレーム数
- n : フレーム番号

$$B = \frac{\begin{vmatrix} N & \sum y_n \\ \sum f_n & \sum y_n f_n \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & \sum f_n \\ \sum f_n & \sum (f_n)^2 \end{vmatrix}} = \frac{N \sum y_n f_n - \sum y_n \sum f_n}{N \sum (f_n)^2 - (\sum f_n)^2}$$

係数Bの分布が相対変動値分布を表す



⑤ 赤外線計測に基づく機械・ 構造物の非破壊評価事例

鋼橋梁の疲労き裂の非破壊評価

経年劣化鋼橋梁の維持管理のための非破壊評価



これまでの非破壊試験手法の問題点

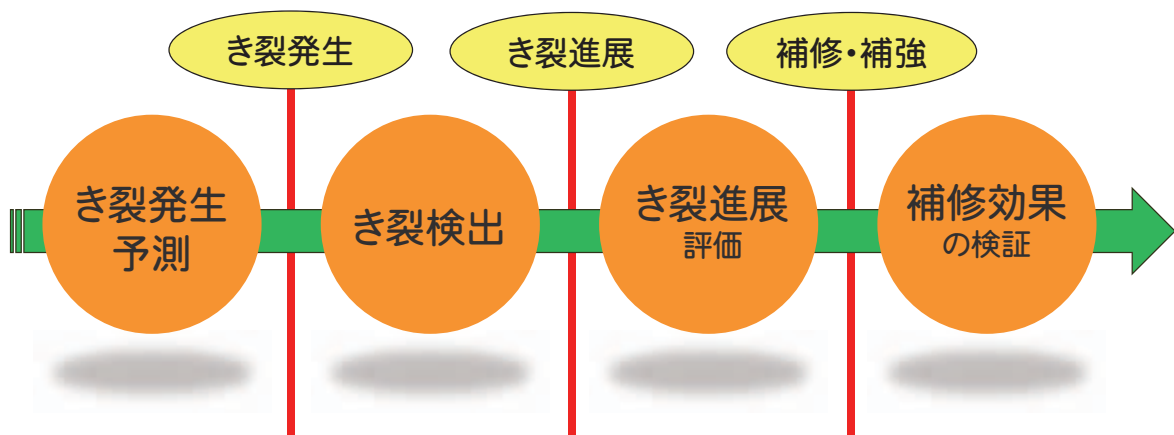
- ・足場や特殊な装置を使って検査者が構造物に近づく必要性
- ・時間と労力を必要とする
- ・き裂が検出・測定されても、そのままでは危険性を評価できない

これからの非破壊評価に求められること

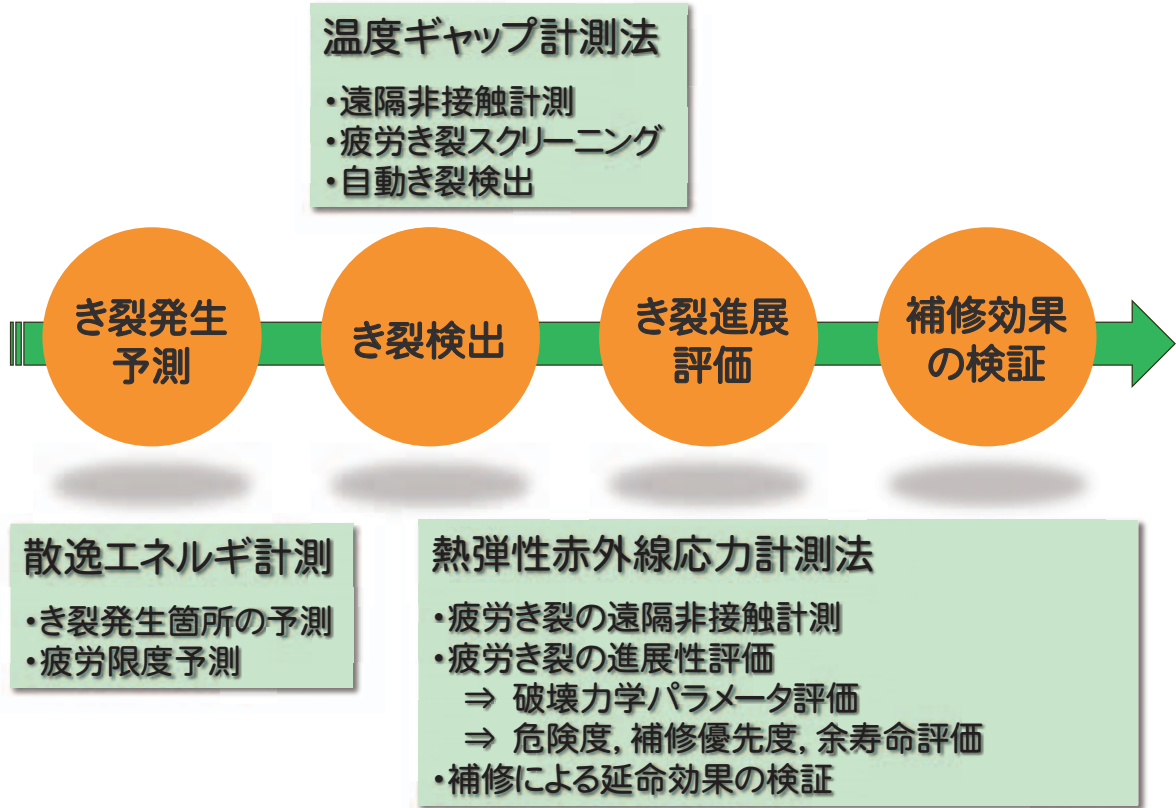
遠隔から非接触・非破壊的に、き裂検出・測定できる
構造物の健全性を評価できる

⇒ これを可能にするため、赤外線計測に基づく非破壊評価法を開発している

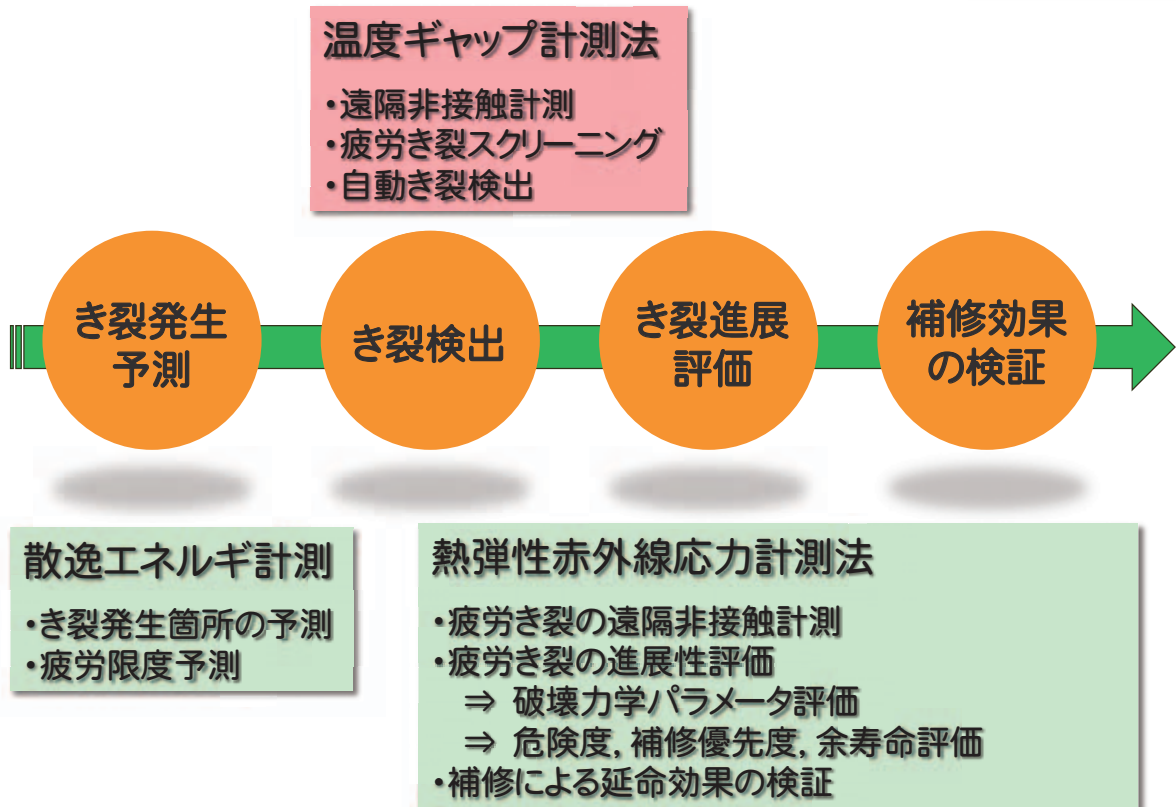
鋼橋梁のライフサイクルでの非破壊評価



鋼橋梁のライフサイクルでの非破壊評価



鋼橋梁のライフサイクルでの非破壊評価



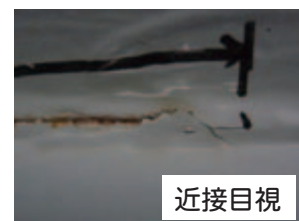
温度ギャップ法開発の背景

鋼床版のデッキプレート - Uリブ間の溶接ビード貫通き裂

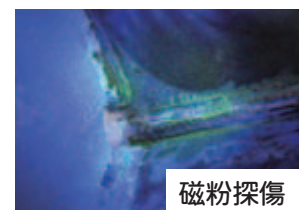
- 膨大な橋梁数と検査対象部位
 - 発生進展メカニズムの解明が十分でない
 - 現状で有効な予防手段がない
- ↓
- 維持管理上き裂の発生進展状況の経過観察が不可欠
- ↓
- 現状の非破壊検査法には多くの問題点がある
- ↓
- 赤外線カメラによる新しい非破壊検査法を開発する

現状の非破壊検査法の問題点

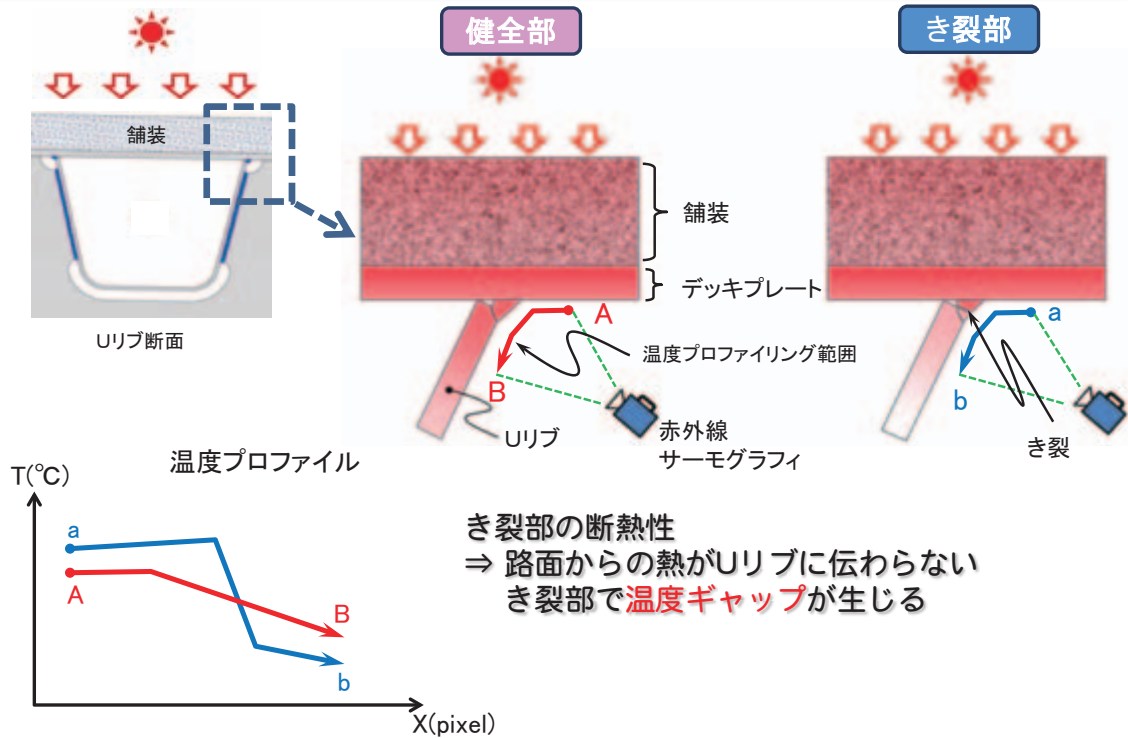
- ① 目視点検による塗装割れ, 錆汁の検出
- 遠望目視 → 精度面で信頼性に欠く
- 近接目視 → 接近のための足場が必要
非効率
- 塗装割れ = 疲労き裂？



- ② 磁粉探傷 → 接近のための足場が必要
塗装の除去が必要
非効率, 高コスト, 低頻度



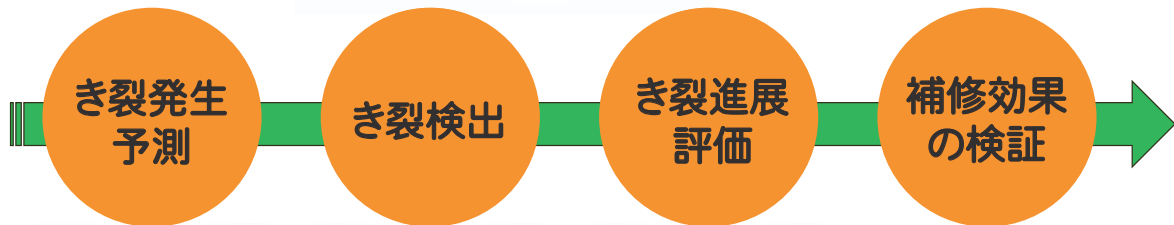
温度ギャップ法とは？



鋼橋梁のライフサイクルでの非破壊評価

温度ギャップ計測法

- 遠隔非接触計測
- 疲労き裂スクリーニング
- 自動き裂検出



散逸エネルギー計測

- き裂発生箇所の予測
- 疲労限度予測

熱弾性赤外線応力計測法

- 疲労き裂の遠隔非接触計測
- 疲労き裂の進展性評価
 - ⇒ 破壊力学パラメータ評価
 - ⇒ 危険度, 補修優先度, 余寿命評価
- 補修による延命効果の検証

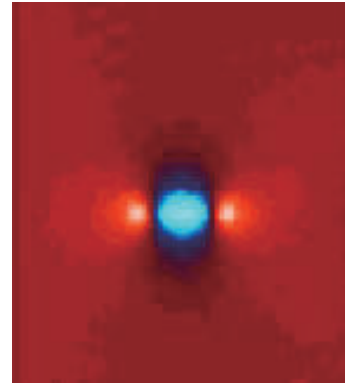
熱弾性応力計測に基づく疲労き裂検出・評価

き裂による特異応力場

き裂が存在すればき裂先端近傍に
顕著な応力集中



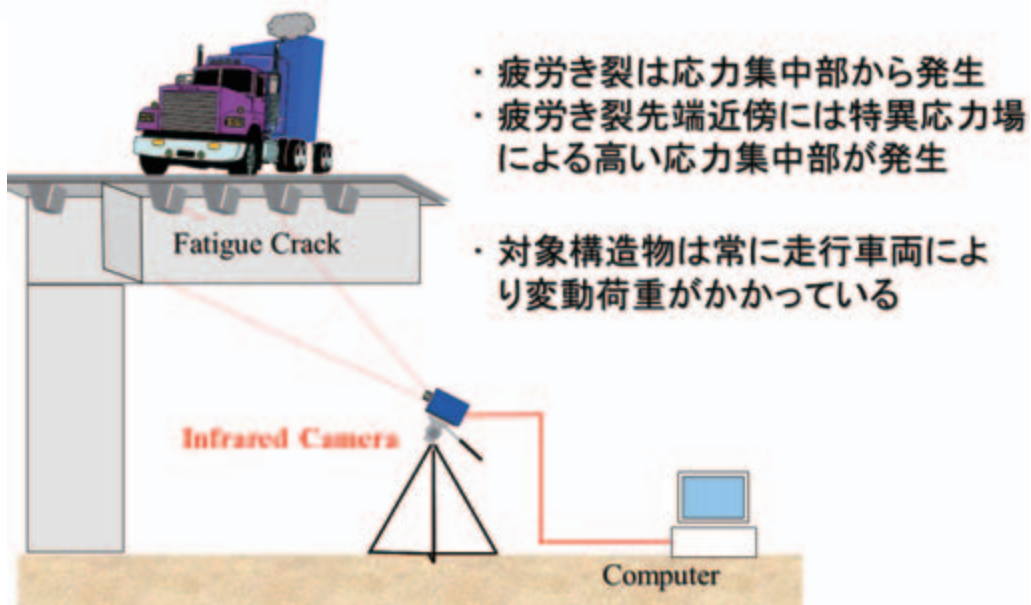
- 応力集中部をもとにき裂を検出できる
- き裂周りに作用する実働応力分布を計測できる
- き裂進展性評価が可能になる



鋼橋梁の疲労き裂検出と応力計測

き裂先端近傍の特異応力場に基づく疲労き裂検出

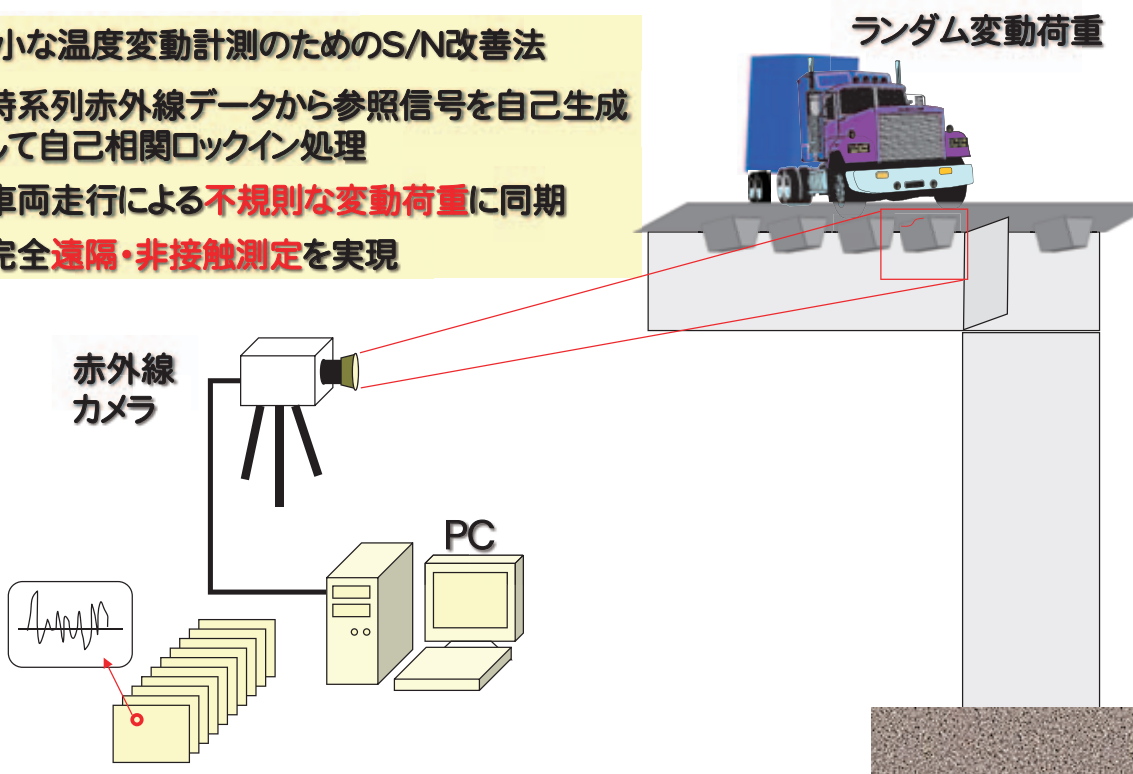
遠隔からの検査が可能で、広い範囲を効率的に検査できることから、
経年橋梁の非破壊検査法として注目されている。



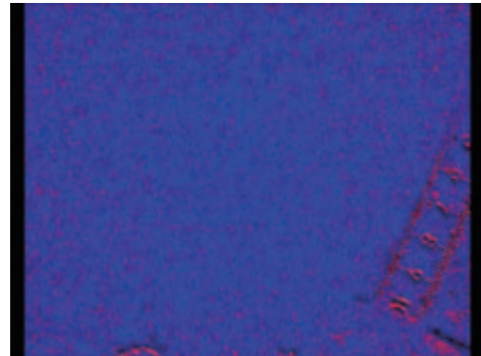
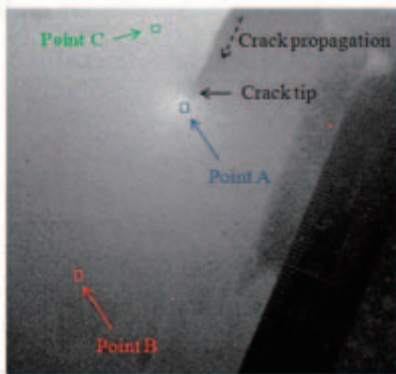
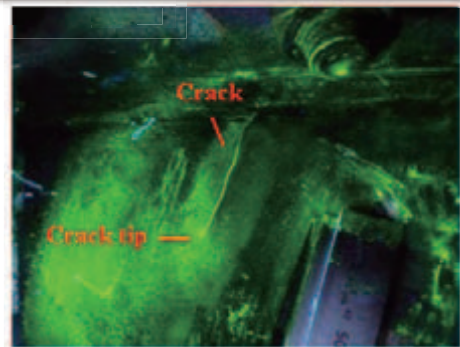
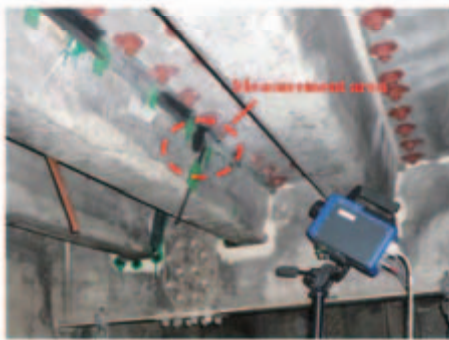
自己相関ロックイン法による疲労き裂検出・評価

微小な温度変動計測のためのS/N改善法

- ・ 時系列赤外線データから参照信号を自己生成して自己相関ロックイン処理
- ・ 車両走行による**不規則な変動荷重**に同期
- ・ 完全**速隔・非接触測定**を実現



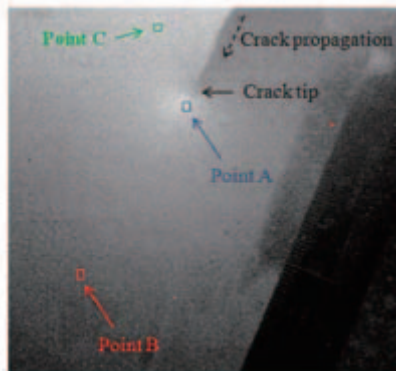
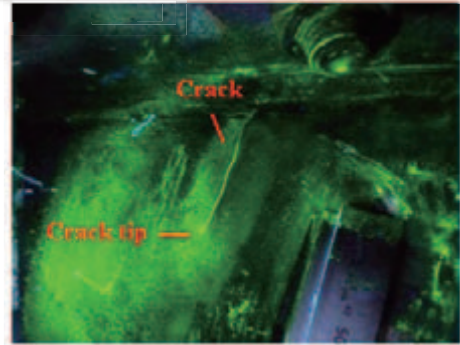
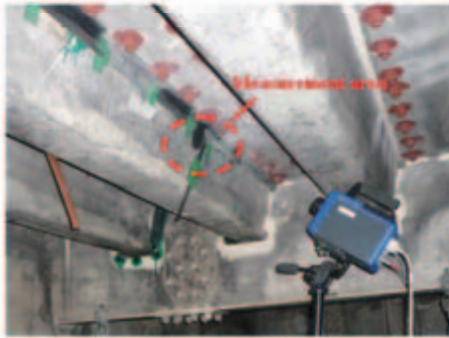
鋼橋梁の疲労き裂検出と応力計測



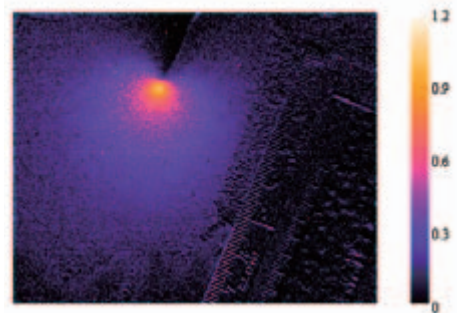
赤外線生画像

赤外線動画

鋼橋梁の疲労き裂検出と応力計測



赤外線生画像



自己相関ロックイン処理
によるき裂検出結果

パルスサーモグラフィによる CFRPのはく離検出

パルスサーモグラフィの実験装置

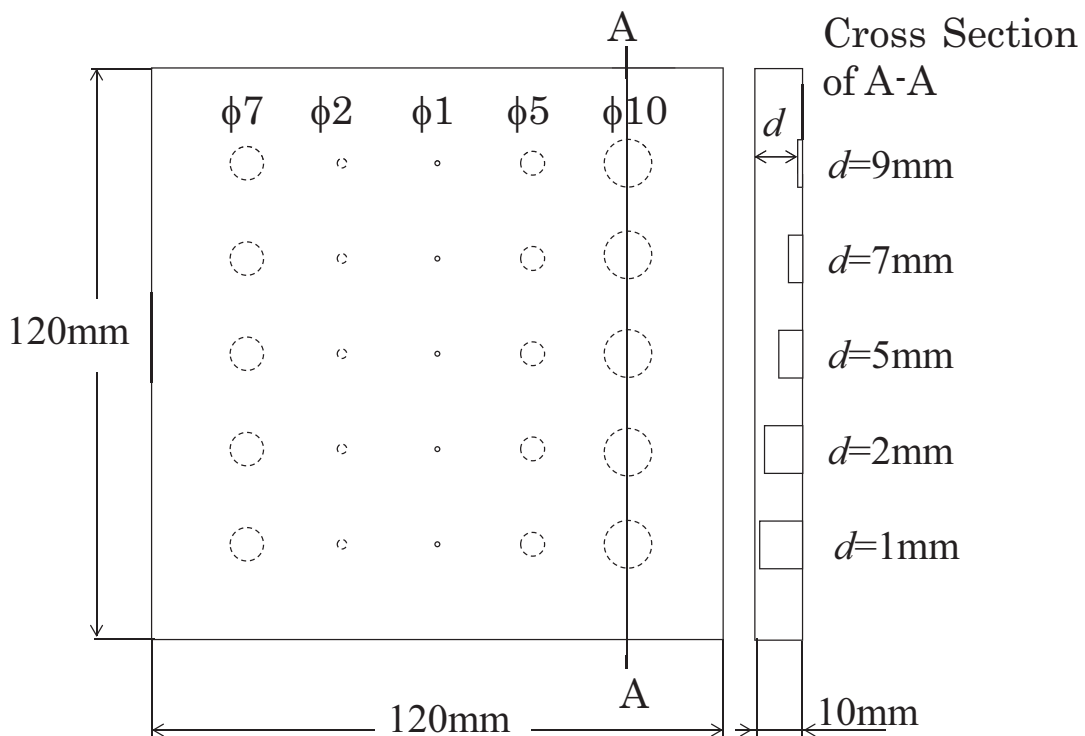


赤外線サーモグラフィ
測定対象物の熱伝導特性に
応じて適切な機種を選ぶ

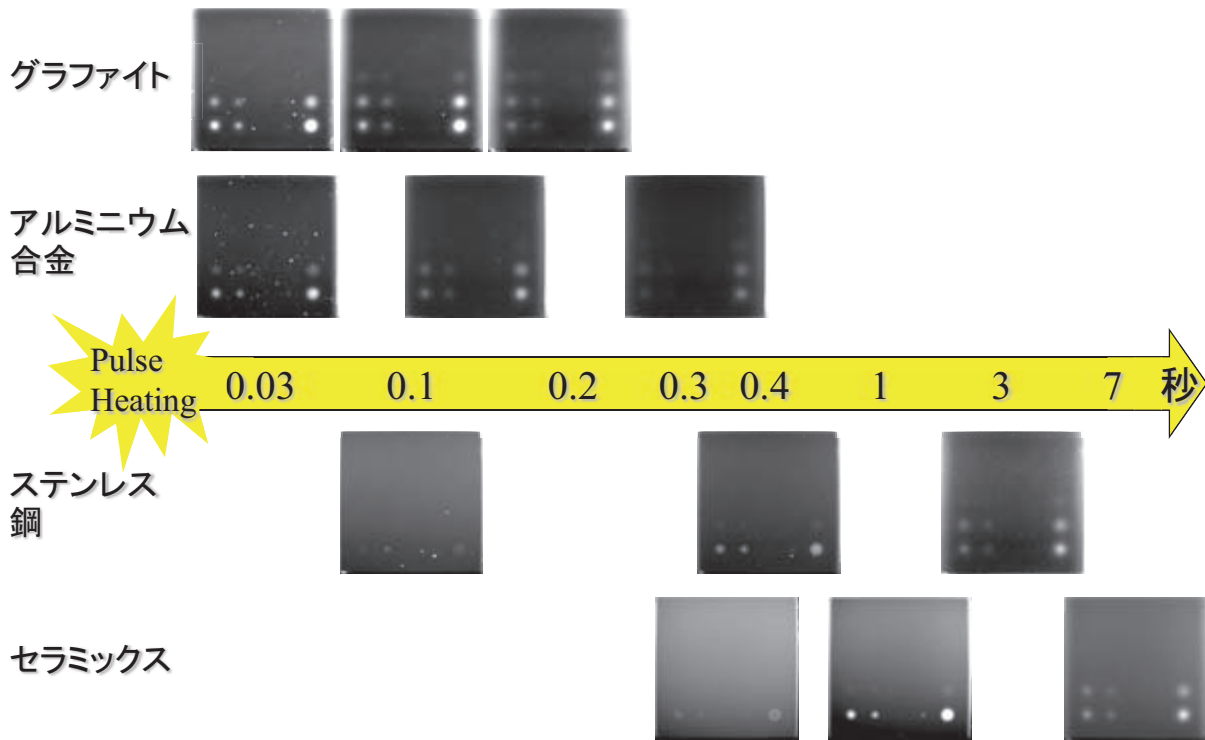
- 熱伝導性が高いもの
高速・高分解能型
- 熱伝導性が低いもの
低速でも試験可能

キセノンフラッシュランプ

測定対象物の熱拡散性の影響

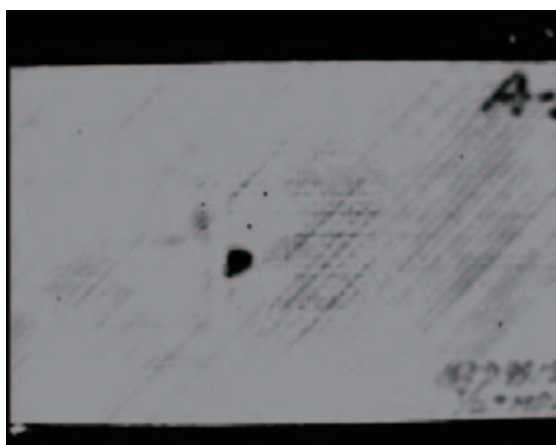


測定対象物の熱拡散性の影響

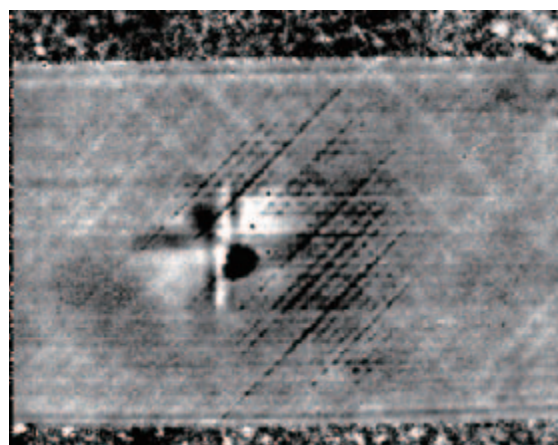


パルスサーモグラフィによるCFRPのはく離検出

CFRPの剥離損傷検出



赤外線データ

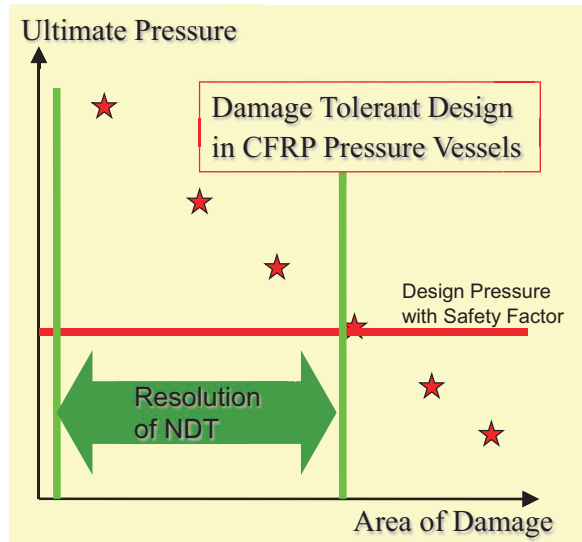
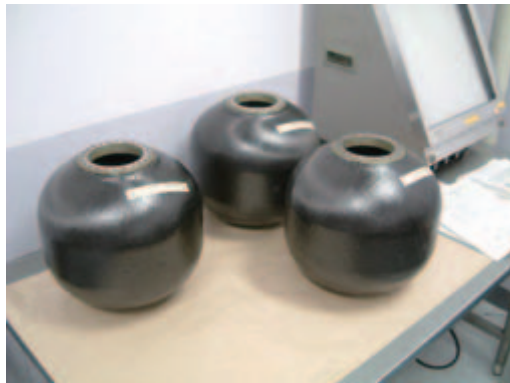


温度変化を微分

パルスサーモグラフィによるCFRPのはく離検出

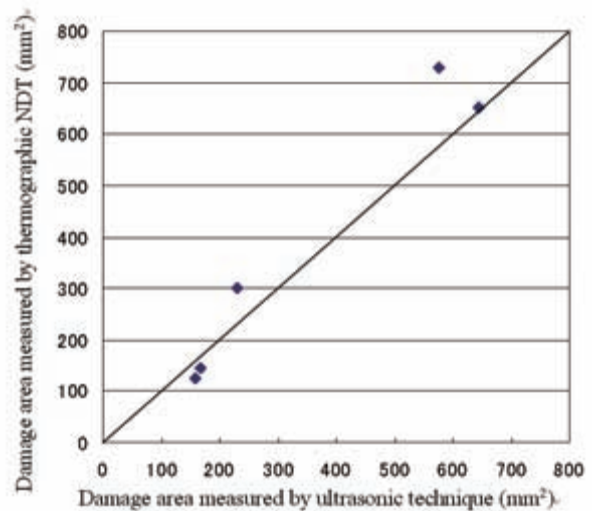
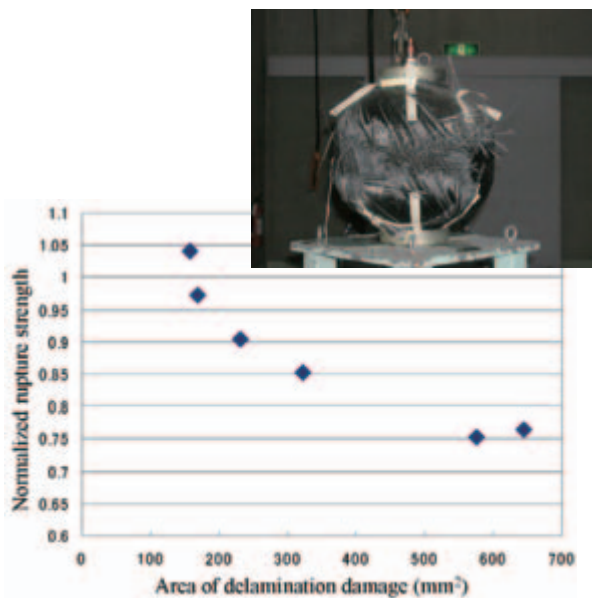


宇宙用複合材料圧力容器の 損傷許容管理



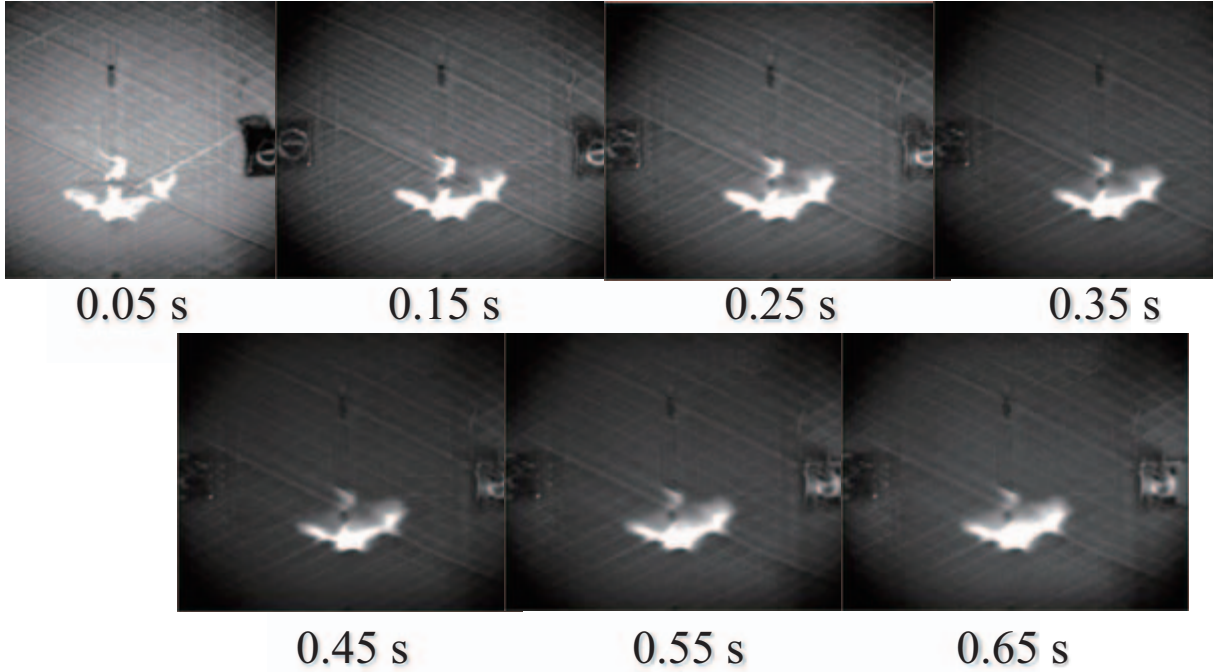
パルスサーモグラフィによるCFRPのはく離検出

宇宙用複合材料圧力容器の損傷許容管理



パルスサーモグラフィによるCFRPのはく離検出

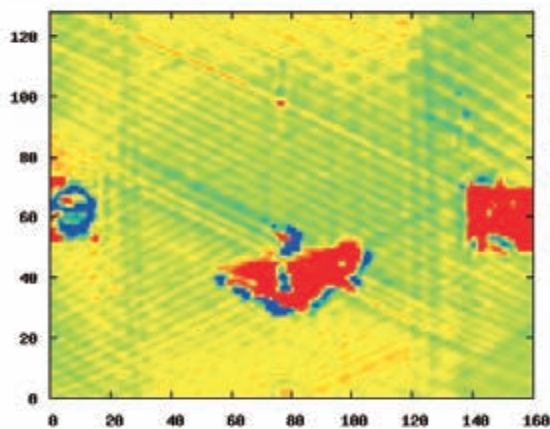
パルス加熱後の時系列赤外線画像



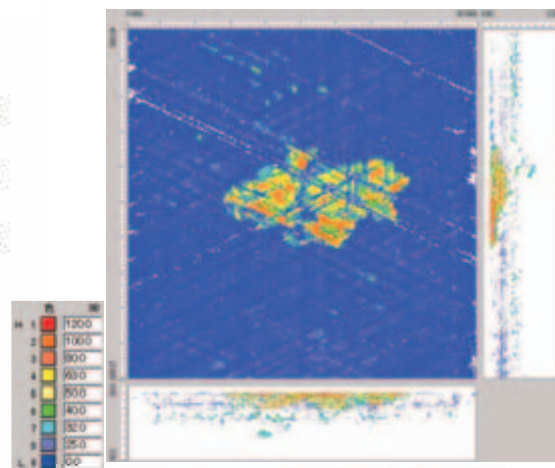
宇宙航空研究開発機構 委託研究成果

パルスサーモグラフィによるCFRPのはく離検出

波形解析サーモグラフィの結果



赤外線計測結果



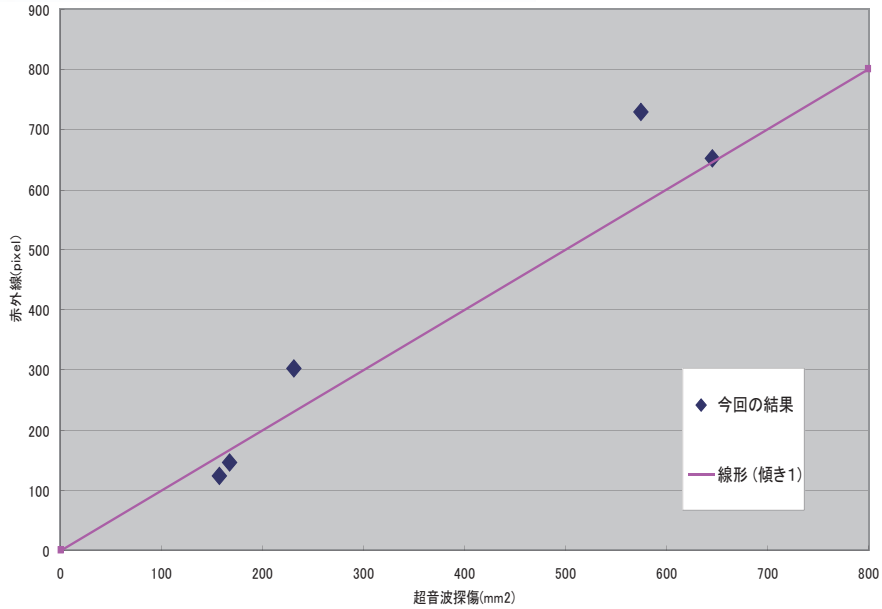
超音波による計測結果

安全性を保障できるレベルで損傷の検出が可能

宇宙航空研究開発機構 委託研究成果

パルスサーモグラフィによるCFRPのはく離検出

超音波探傷との損傷面積比較データ



62

パルスサーモグラフィによる コーティングのはく離検出

パルスサーモグラフィによる遮熱被膜の健全性評価

火力発電用タービンの遮熱コーティングの健全性評価

火力発電用タービンの高効率化

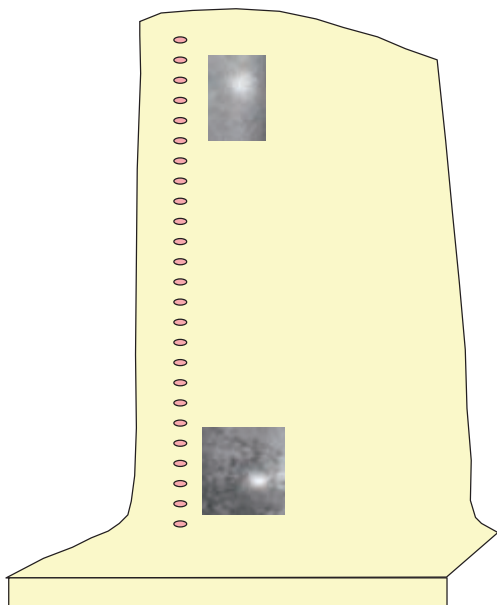
- ⇒ より高温な過酷環境下での使用
- ⇒ 1500°Cから1700°C級へ

耐熱性向上のために、ジルコニアなどのセラミックスで遮熱コーティングが施されている

コーティングの破壊はタービン翼の破壊に直結するので、高い信頼性での試験が不可欠

タービン翼の遮熱コーティングの欠陥検出

パルス加熱赤外線法による遮熱コーティング (TBC) の検査



TBCの剥離部は、パルス加熱後の温度分布において局所的高温部として検出できる

可視画像をもとに表面の汚れ等による誤検出を低減

⑥ 赤外線による散逸エネルギー計測

散逸エネルギーとは？

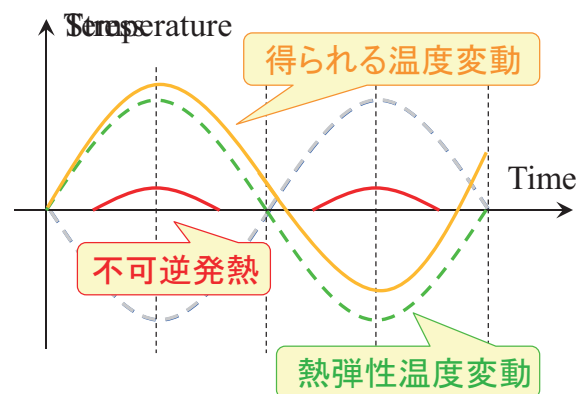
◆ 熱弾性効果

圧縮 温度上昇 引張 温度下降

$$\Delta\sigma = - \frac{\Delta T_E}{k T}$$

↓

得られる温度データより主応力 $\Delta\sigma$ が求められる

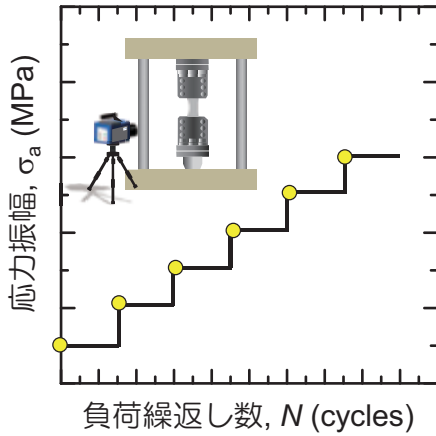


不可逆発熱 (散逸エネルギー)

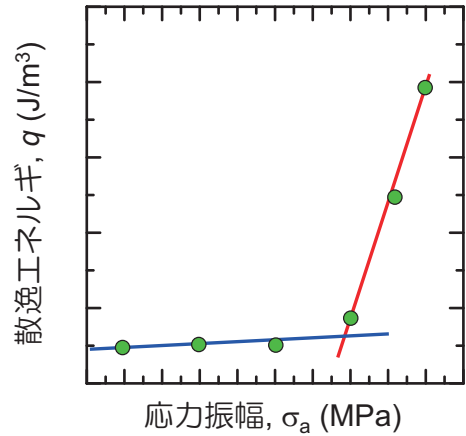
局所的な塑性すべりなどに起因する発熱
最大圧縮・最大引張時に発生

散逸エネルギー計測に基づく疲労限度迅速推定法

階段型応力振幅増加試験



疲労限度迅速推定法

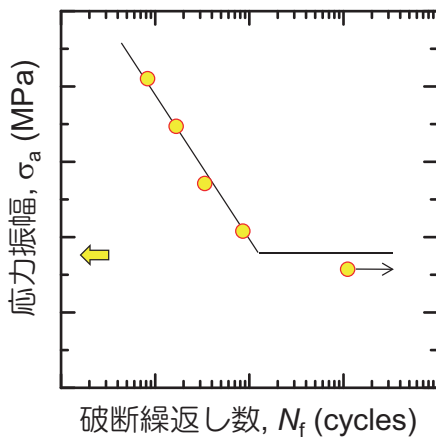


- ✓ 応力振幅を階段状に増加する試験を実施
- ✓ 各応力振幅において散逸エネルギーを計測

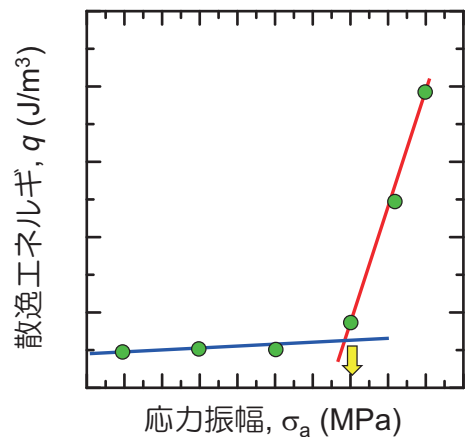
2/15

散逸エネルギー計測に基づく疲労限度迅速推定法

従来法での疲労限度評価



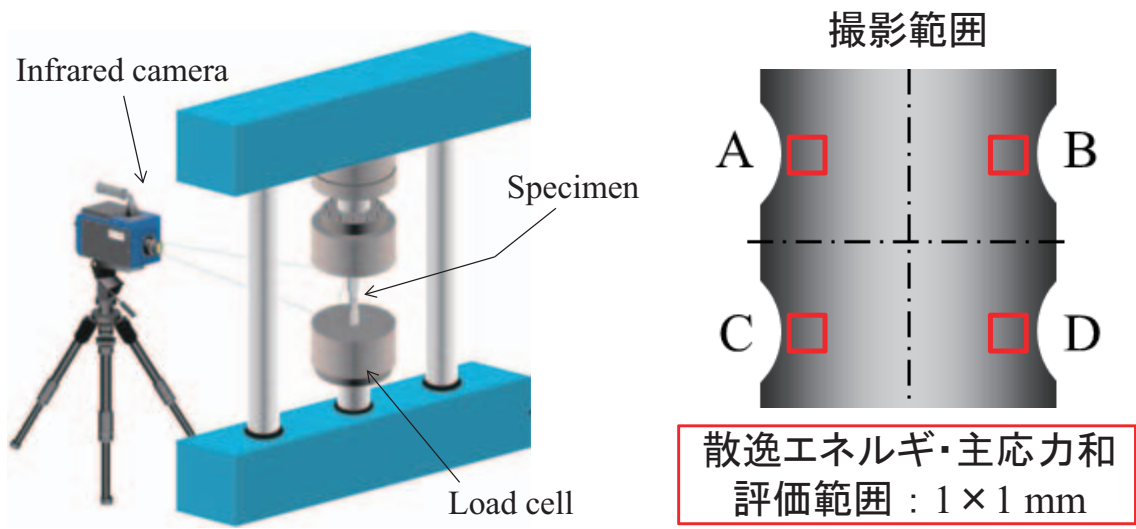
疲労限度迅速推定法



- ✓ 折曲がり点の応力振幅を経験的に疲労限度と予測
- ✓ 明確な予測根拠については不明な点が多い…

2/15

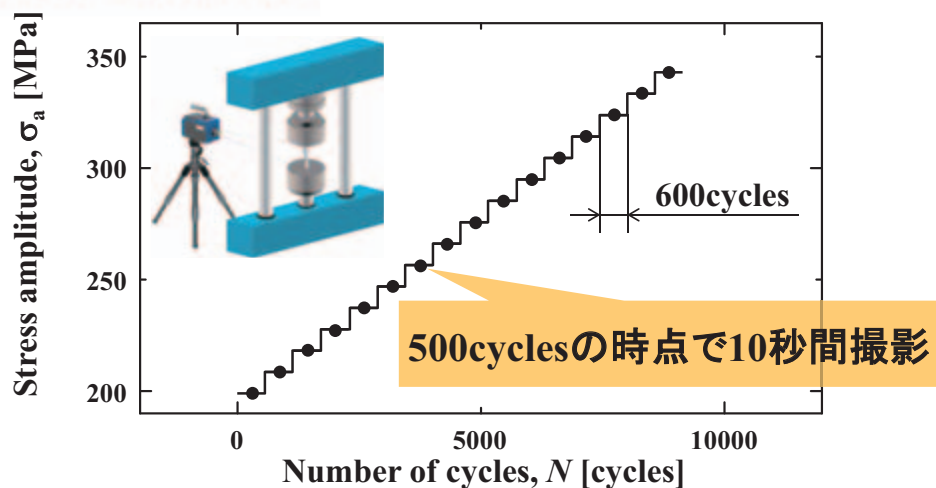
散逸エネルギー計測に基づく疲労き裂発生予測



Infrared detector	Number of pixels	Wavelength	Temperature resolution
MCT	256 × 200	7.7-9.3 μm	25 mK

散逸エネルギー計測に基づく疲労き裂発生予測

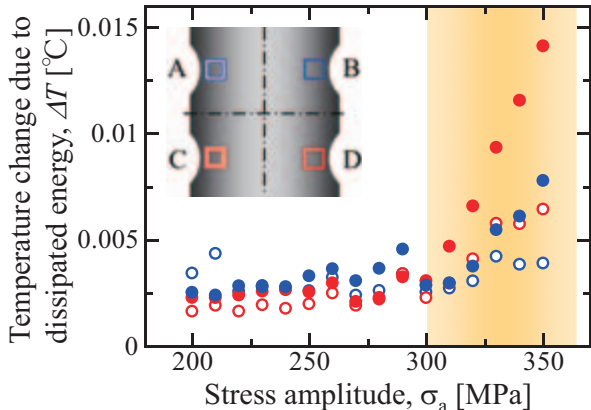
階段状応力振幅増加試験



Stress amplitude	Stress ratio	Load frequency	Waveform
200-350 MPa	-1	5 Hz	Sinusoidal

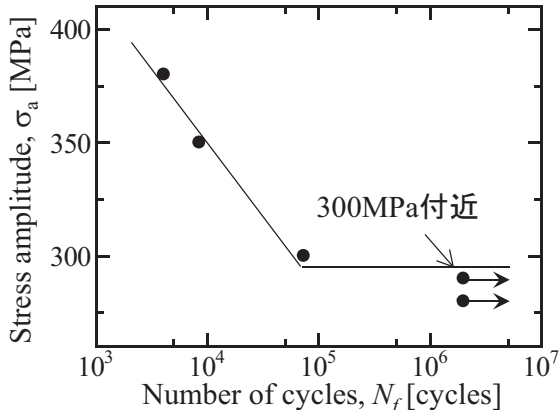
散逸エネルギー計測に基づく疲労き裂発生予測

散逸エネルギー



S-N曲線

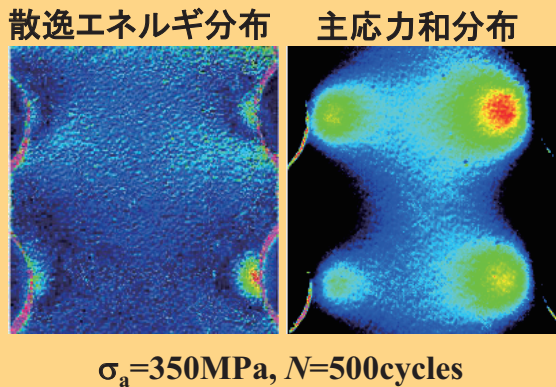
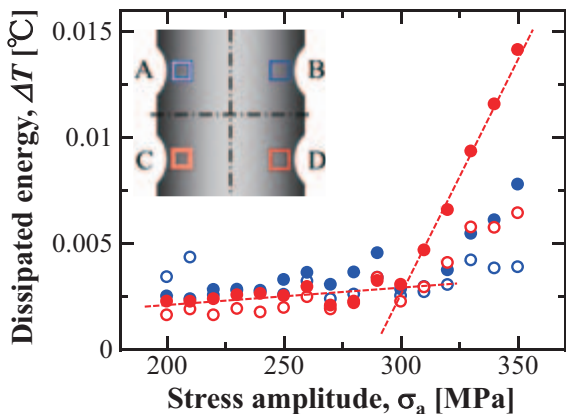
2.0 × 10⁶ cyclesで未破断



Notch	A	B	C	D
Estimated fatigue limit	none	323MPa	306MPa	303MPa

➔ いずれの切欠き底においても疲労限度と概ね一致

散逸エネルギー計測に基づく疲労き裂発生予測



- ① いずれの切欠きにおいても推定値が疲労限度と概ね一致
- ② 散逸エネルギー変化が顕著な切欠き箇所と破断箇所が一致

- 微小欠陥などが存在する危険箇所を検出することのできる可能性
- 散逸エネルギー変化の傾向から切欠き毎の危険度の度合いを評価できる可能性

⑦ 赤外線分光イメージング

赤外線カメラによるガス検知



市販のガス検知用
赤外線カメラ

背景を照明としてガスによる
赤外線吸収を「見える化」



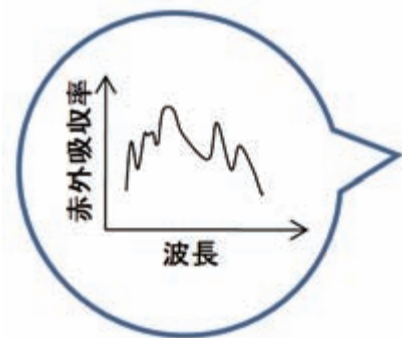
画像提供: FLIR Systems Inc. (<http://flir.com/>)

赤外線分光イメージングによるガス検知

出典: FLIR.
<http://www.flir.com/thermography/APAC/jp/content/?id=15642>



従来の赤外線法は、
・ガス種の識別が不可能
・特定のガスをバンドパスフィルタにより検出

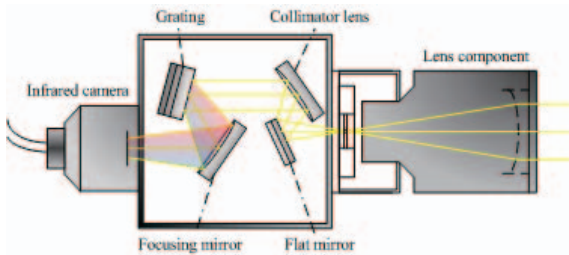


赤外線分光イメージング計測によるガス検知により、ガスの漏洩を検知するとともに種別を「見える化」

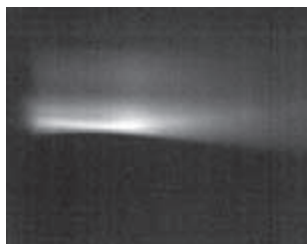
赤外線分光イメージングによるガス検知

マイクロボロメータを使った赤外線分光システム

・赤外カメラ(マイクロボロメータカメラ)



米FLIR Systems社製
Photon320
素子感度:0.033K
検出波長:7.5μm~13.5μm



空間軸
波長軸

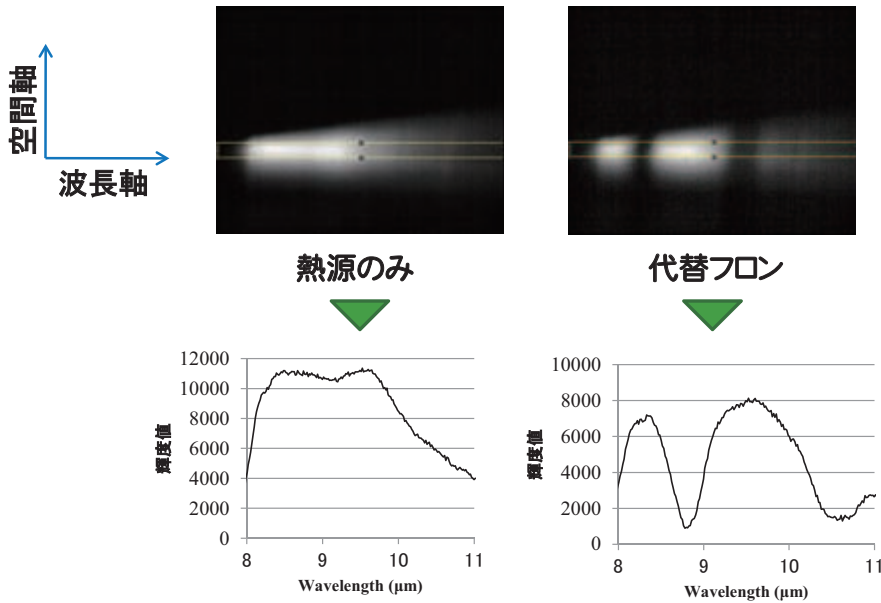
横方向画像センサを分光システムによって、波長軸として使用。

得られるデータは縦軸が空間、横軸が波長を表した画像として出力される。

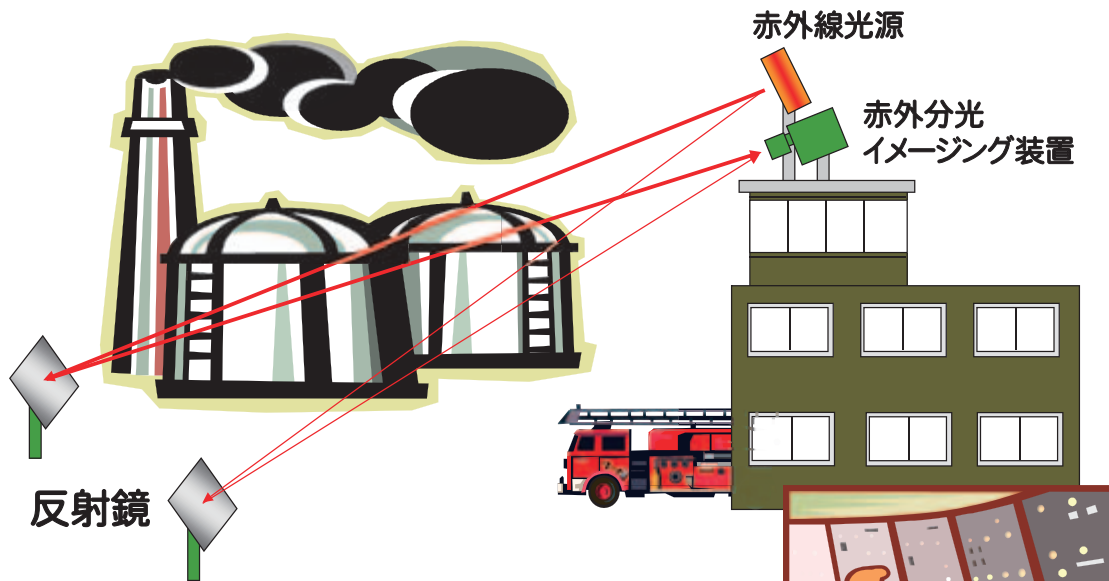
赤外線分光イメージングによるガス検知

代替フロンのスペクトル

8 μm ~11 μm の波長域で特徴的な吸収帯を有する
代替フロン(HFC-152a)



赤外線分光イメージングによるガス検知

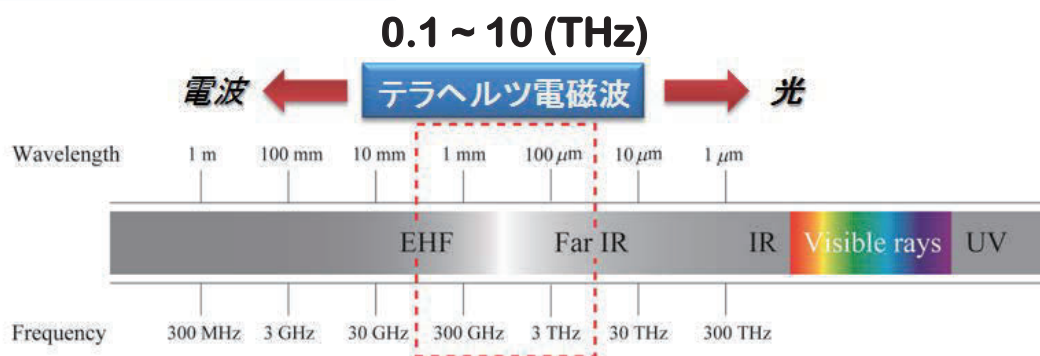


実用化する場合、高温物体を背景にするか、図のようなアクティブ計測法を使用

⑧ テラヘルツ電磁波計測による非破壊評価

テラヘルツ電磁波イメージングによる非破壊検査

テラヘルツ電磁波とは？



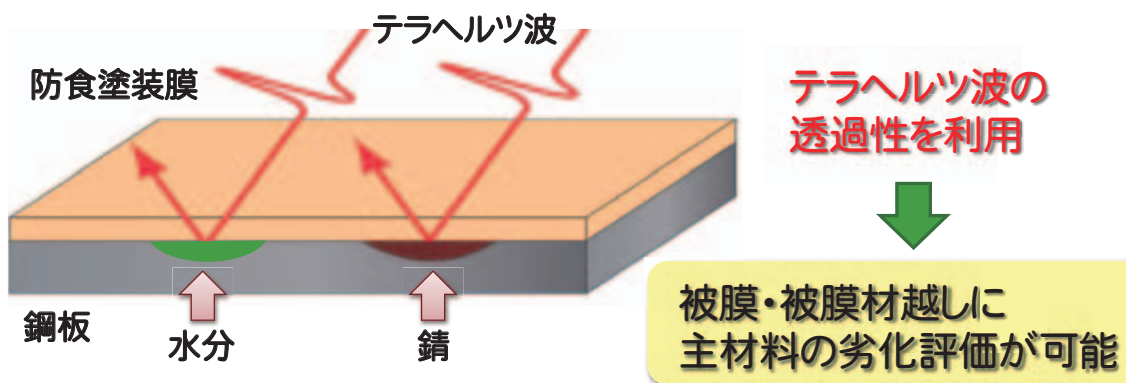
- 光と電波の境界領域(0.1~10 (THz))にある電磁波
- 水には吸収され, 金属には反射される
- 紙, 布, プラスチック, セラミック等を透過し, 人体に無害
- 様々な物質に固有の吸収スペクトル(指紋スペクトル)を示す

テラヘルツ電磁波イメージングによる非破壊検査

テラヘルツ領域の電磁波が有する高い物質透過能力，特徴的な吸収スペクトルに着目した新しい非破壊検査法の開発

テラヘルツ領域の電磁波は，断熱材や防食塗装膜に対しても極めて高い透過性を有すると考えられる

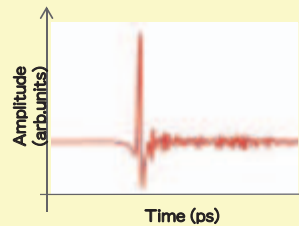
不可能であった断熱材や防食塗装膜下の材料評価を可能にする
 ⇒ **物体下の状態を「見える化」**



テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)

THz-TDS

THz波の**時間波形**を計測できる分光法



↙ 非破壊評価手法への応用 ↘

時間波形解析

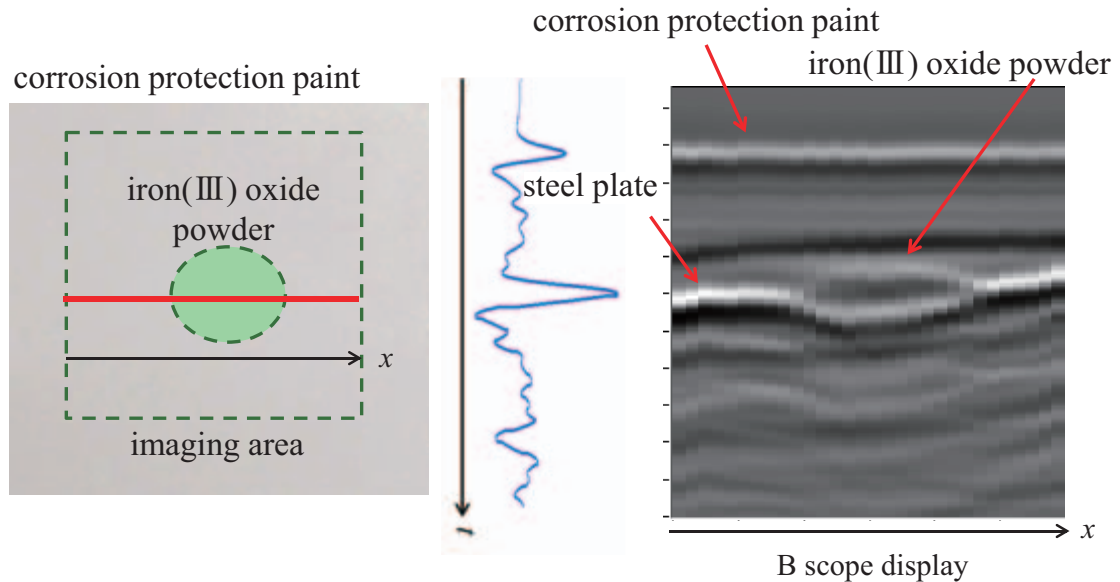
超音波と同じ原理で探傷検査へ応用
 欠陥からの反射波を検出

周波数解析

THz波の吸収・反射などの周波数領域における特性を利用

テラヘルツ電磁波イメージングによる非破壊検査

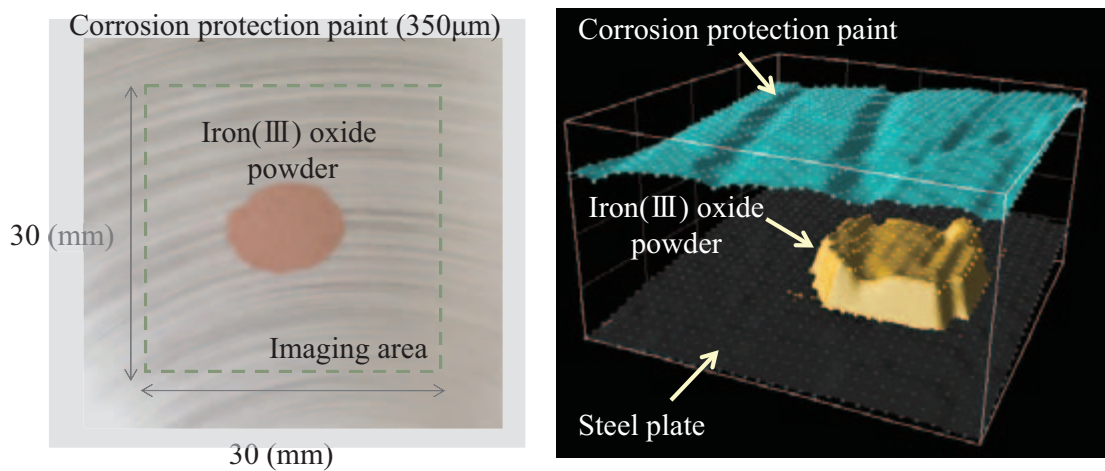
防食塗装膜下の赤錆のBスコープイメージング



TDSシステムを利用することで赤錆部の厚さの同定が可能

テラヘルツ電磁波イメージングによる非破壊検査

防食塗装膜下の赤錆の3次元イメージング



TDSにより塗装膜下の欠陥を3次元的に捉えることが可能



JAXA Proprietary

航空機の冬期運航

冬期の運航効率向上・安全性維持は大きな課題

- エアラインとの意見交換で要望の多かった分野
- 冬期運航に影響する気象要因は雪氷・雷

エアラインからの要望の例

機体への着氷

- 離陸時の着氷については、防氷液の有効時間との関係で、モニタリングが重要
- Ice Crystalは日本付近で発生確率が高いが、レーダーに反応しない
- Ice Crystalの気象状況を事前に検知できると良い
- Pitot TubeやCockpit Windowにも防氷技術を適用できると良い

滑走路の雪氷

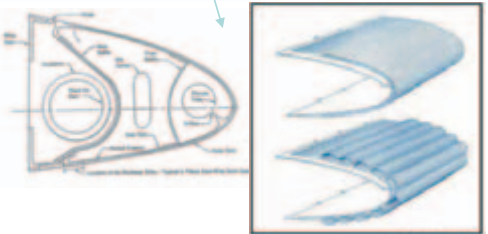
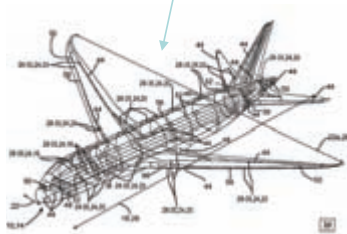
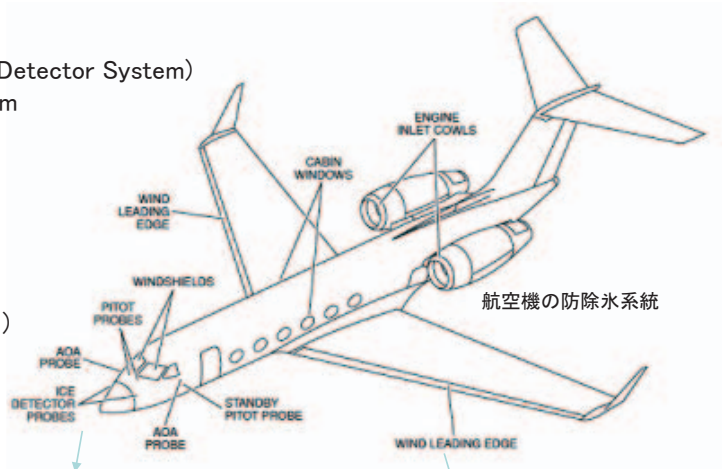
- 滑走路雪氷時のブレーキングアクション分布をリアルタイムで知りたい
- 航空機と路面の摩擦係数が高精度で分かることが重要

機体への被雷

- 雷の強度を事前に検知できると良い
- 日本固有の事象(落雷等)に対応するための技術が有益
- 雷を避けるか、機体損傷が少なければ、整備効率・運航効率が上がる

航空機の気象(雪氷・雷)対策

- 着氷対策
 - 着氷センサー(IIDS: Inflight Ice Detector System)
 - Pneumatic Boot De-icing System
 - Piccolo Tube
 - 電熱ヒーター
- 雷対策
 - 銅メッシュ(スキン)
 - ボンディングジャンパ
 - レドーム(ストリップダイバーター)
 - Static Discharger
 - NGS(燃料タンク)
 - Current Return Network



3

航空機への影響

- ① 機体への着雪氷の問題
 - 翼面着氷による空力性能の低下
 - 尾翼着氷による失速 ICTS(Ice Contaminated Tailplane Stall)
 - 着氷によるRoll Upset
 - SLD (Supercooled Large Droplets: 過冷却大水滴)
 - 防除氷液の環境問題



機体への着氷

2010/01/06 18:34:43 【共同通信】



防氷液の散布

<http://wine-montrachet.blog.so-net.ne.jp/archive/20120301>



ATR72型機の事故(1994年)

4

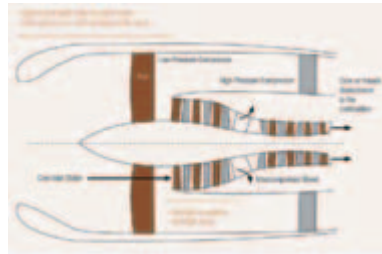
航空機への影響

② Ice Crystal Icingの問題

- 機体の着氷センサーでIce Crystalの状態を捉えることはできない
- エンジンに溶けながら入り込み、内部表面に水膜を形成することで、さらに入ってくるIce Crystalを補足して氷が蓄積され、それが圧縮機内部に入り込むことで内部を損傷、サージやストールを発生させる事象が発生
- TAT(Total Air Temperature: 全温)センサーやPitot管まわりの熱で溶けたIce Crystalにより計測エラーを発生させ、エンジンの推力喪失事象も発生
- 1990年以降だけでも100件以上の推力喪失事象が特定の地域に発生している
- 特に日本から東南アジアにかけての地域で多発しており、約60%がアジア地域で発生している



Ice Crystal Icingのイメージ
(出典: NASA)



Ice Crystalの着氷エリア
(出典: Boeing AERO QTR_4.07)



Ice Crystalによる航空機推力喪失事象
(出典: Boeing AERO QTR_4.07)

航空機への影響

③ 雪氷滑走路の問題

- 滑走路雪氷によるオーバーラン
- 滑走路雪氷による欠航・ダイバート
- 日本は滑走路が短い上に大型機の割合が多い
- 日本は滑りやすい雪質
- 滑走路の状況がリアルタイムではわからない
- 現在の運航規定では、かなりコンサバティブ



雪氷滑走路でのオーバーラン
(2012.12.8 庄内空港)



東京航空局管内の空港
(東京航空局HP)

機材区分	北米	中南米	欧州	CIS	アフリカ	アジア	豪州	日本	世界計
大型機	574 (8.6%)	72 (5.3%)	744 (17.1%)	86 (8.4%)	111 (14.2%)	1,542 (27.8%)	97 (19.0%)	114 (21.8%)	3,340 (16.1%)
中型機	1,143 (17.2%)	83 (6.1%)	262 (6.0%)	117 (11.5%)	63 (8.1%)	226 (4.1%)	28 (5.5%)	143 (27.4%)	2,065 (10.0%)
小型機	3,099 (46.5%)	943 (69.2%)	2,746 (63.1%)	561 (55.1%)	444 (56.9%)	3,482 (62.8%)	293 (57.5%)	226 (43.3%)	11,794 (56.8%)
RJ機	1,848 (27.7%)	265 (19.4%)	600 (13.8%)	254 (25.0%)	162 (20.8%)	291 (5.3%)	92 (18.0%)	39 (7.5%)	3,551 (17.1%)
合計	6,664 (100%)	1,363 (100%)	4,352 (100%)	1,018 (100%)	780 (100%)	5,541 (100%)	510 (100%)	522 (100%)	20,750 (100%)

航空機への影響

④ 機体への雷撃

- 航空機が運航中に被雷する確率は1000～20000FHに1回
- 複合材料構造の場合、導電率が低いために損傷する可能性が高い
- ベアリングなどの融解による可動部の固着
- リベット等からのスパークにより燃料が発火する危険性
- 強い電磁場の発生による装備品への影響



飛行中のA380への雷撃

<http://www.dailymail.co.uk/news/article-1386086/Jet-struck-lightning-lands-Heathrow.html>



航空機の雷撃損傷



リベットからのスパーク

L. Chemartin, et.al, "Direct Effects of Lightning on Aircraft Structure: Analysis of the Thermal, Electrical and Mechanical Constraints", Journal Aerospace Lab, AL05-09, 2012

7

航空機への影響

④ 機体への雷撃(冬季雷)

- 通常の雷は主に夏季に発生するが、冬季に発生する雷が冬季雷
- 世界の限られた地域(日本の日本海側、ノルウェーの西海岸、アメリカの五大湖東側)でのみ発生



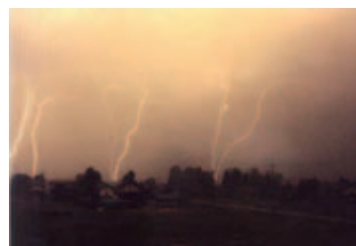
雷の発生地域

• 冬季雷の特徴

- 夕方だけでなく一日中発生する
- 上向きの放電
- 電荷量が大きく、夏季雷の数十倍
- 夏季雷は3,000～5,000mの上空で発生するが、冬季雷は300～500mという低空で発生



夏季雷



冬季雷

(北陸電力HPより)

8

JAXAの取り組み

JAXA航空本部のミッション

冬期運航における外的要因(雪氷・雷)に対して機体の安全性を高めるとともに、機体・滑走路の状態や気象状況を把握し、機体毎に安全性を管理できるシステムを開発する

研究事業「機体安全性マネジメント技術の研究開発」

研究事業の目的

ミッション達成に向けて

- ・ システム要件を定義
- ・ システムに必要な要素技術の技術レベルをTRL4へ向上

研究事業のスケジュール

- ・ 第I期:2013年度～2017年度の5年間の基礎研究
- ・ 第II期:2018年度～2022年度の5年間の実証研究
- ・ 第II期中にプロジェクト化・技術移転

体制: JAXA研究員8名

開発する要素技術

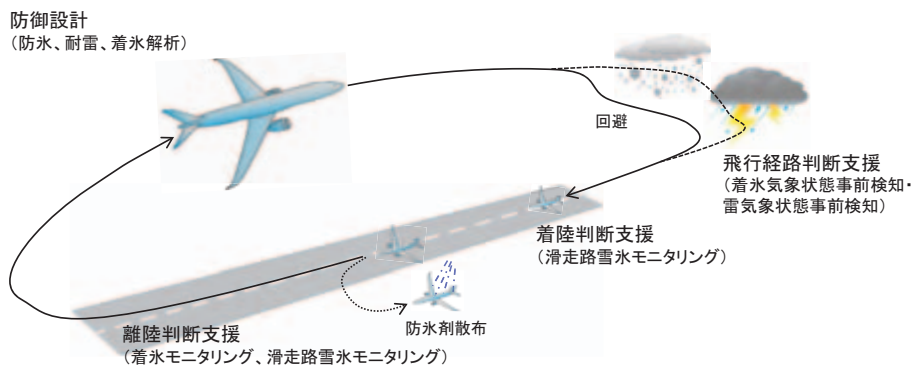
機体防着氷技術(機体着氷センサー、着氷防止)

雪氷滑走路技術(滑走路モニタリングセンサー、地上摩擦計測装置、機体摩擦係数推定、データベース)

気象状態検知技術(着氷気象状態事前検知、雷気象状態事前検知)

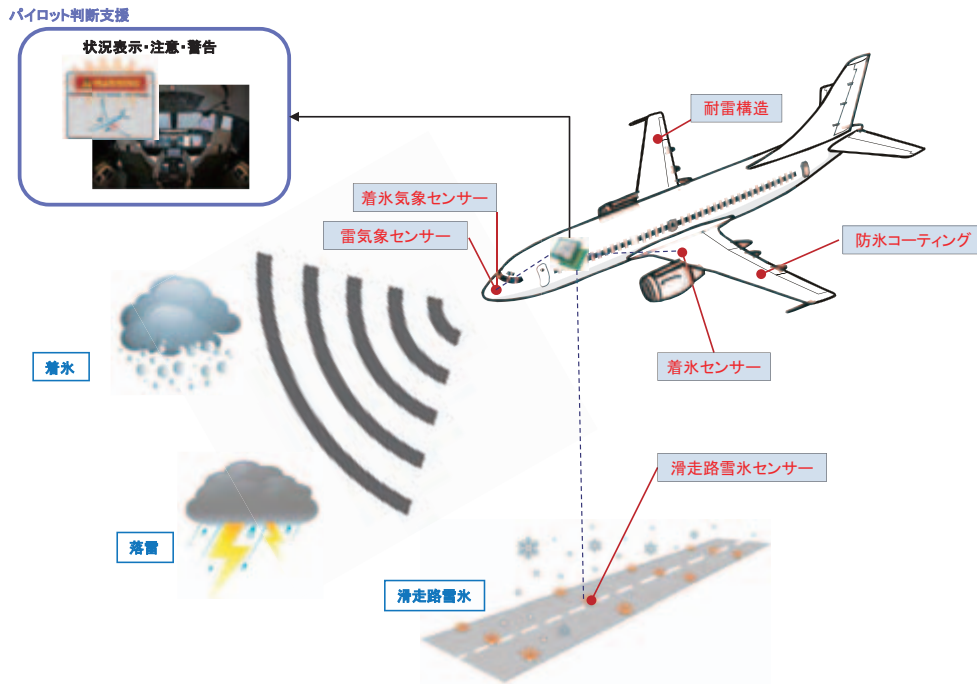
耐雷技術

システム運用イメージ



外的要因	飛行フェーズ	現状	システム運用後
機体着氷	離陸時	翼面の着氷は目視でしか確認できない上に、クリアアイスの着氷は目視しづらい。着氷は除氷剤で防いでいるが、目視が難しいために、除氷剤の効果を時間で規定している	防氷コーティングにより離陸前のある程度の着氷を防ぐことが出来る 翼面の着氷状況をリアルタイムで確認できるため、離陸の判断が可能となり、運航効率向上につながる
	航行時	防氷システムはパワーを必要とするとともに、全ての着氷を防げない Ice Crystalを事前に検知できない	防氷コーティングにより飛行中のある程度の着氷を防ぐことが出来る 予め着氷気象状態を検知できるため、飛行経路の判断が可能となる
落雷	航行時	機体への落雷を防ぐことができない。落雷後の機体損傷に対する修理が必要。	耐雷構造により、一定の強度レベルの落雷では機体に損傷を受けない 予め雷気象状態を検知できるため、高い強度レベルの雷に対し回避するなどの飛行経路の判断が可能となる
滑走路雪氷	離着陸時	短い滑走路長、大型の機体が多い、すべりやすい雪質と日本の冬期運航は世界的に見ても厳しいにも関わらず、滑走路の雪氷状況がリアルタイムで把握できなかった	リアルタイムで離着陸の判断が可能となり、これまで離着陸ができないとしていた条件でも離着陸可能となる。運航効率向上につながる。

システムの機体搭載イメージ



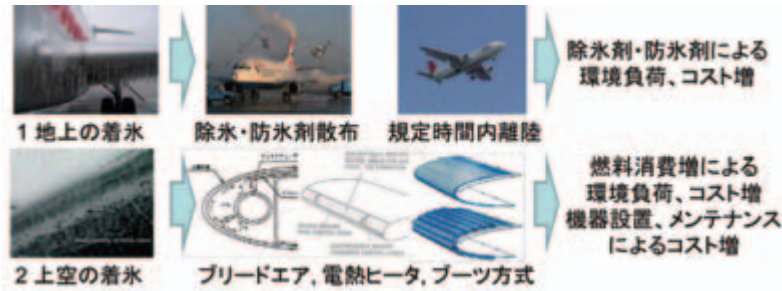
スケジュール

	第3期中期計画					第4期中期計画					第5期中期計画					第6期	第7期		
	FY23	FY24	FY25	FY26	FY27	FY28	FY29	FY30	FY31	FY32	FY33	FY34	FY35	FY36	FY37			FY38	FY39
国内外動向	MRJ																		
	国産機開発																		
海外での開発	787-9																		
	A350, CS-100																		
機体防着氷技術	737MAX																		
	A320neo																		
JAXA	777-300ER, 777-300LR, 777-300ER																		
	技術移転																		
JAXA	研究事業(第I期)																		
	研究事業(第II期)																		
	研究事業(第I期)																		
	研究事業(第II期)																		
	研究事業(第I期)																		
システム技術	調査研究																		
	研究事業(第I期)																		
	研究事業(第II期)																		

機体防着氷技術

現状の問題点

1. 従来の着氷センサーは振動数の変化で着氷を検知する接触式のセンサーで、胴体部に設置されており、機体全体、特に主翼の着氷状況を精度良く計測できない
2. エンジン抽気および電気ヒータ等による防氷システムが一般的で、SLDに対し熱量が不足する問題がある。また翼前縁で溶けた氷が翼後方で再着氷 (Runback) する問題もある



研究が目指す効果

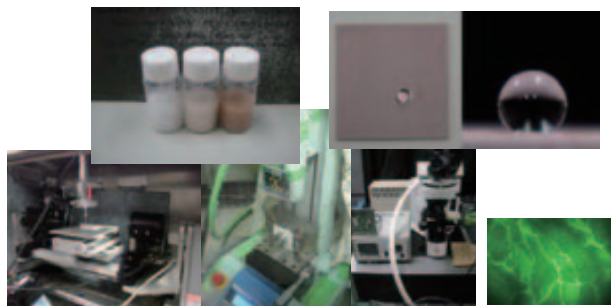
1. 機体の着氷状態をリアルタイムに同定できることで、適切な離陸判断が可能になり、運航効率が向上する
2. 化学的な着氷防止コーティングにより、防氷システムが不要もしくはコンパクトになる。また着氷を防止できることで、空力性能の低下を防ぐことができる。

機体防着氷技術

①着氷防止の為に界面化学、機能性化学等を用いた着氷防止コーティングの研究開発及び世界基準となる評価法の開発

- 超撥水性機能を有するコーティング (過冷却水滴付着防止)
- 氷成長抑制機能を有するコーティング
- 氷融解機能を有するコーティング

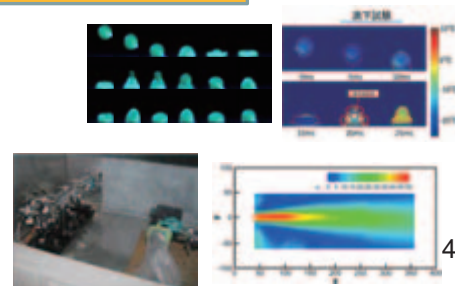
各コーティングの研究開発を実施し
評価法に基づき評価を実施中



②着氷防止システム技術開発の為に着氷現象の解明

- 静的過冷却水滴凍結現象の温度分布可視化
- 動的過冷却水滴、衝突凍結現象の温度分布可視化
- 着氷風洞におけるスプレーヤー噴霧時の温度分布可視化

過冷却水滴用衝突試験装置の開発中
温度分布可視化システムの開発中



雪氷滑走路技術

現状の問題点

- 1. 短い滑走路長、大型の機体が多い、すべりやすい雪質と日本の冬期運航は世界的に見ても厳しいにも関わらず、滑走路の雪氷状況がリアルタイムで把握できなかった

研究が目指す効果(仮)

- 1. 滑走路面状況を常時モニタし、リアルタイムで安全な離着陸判断ができるようにする (目標: 雪氷が原因のオーバーラン発生1~2件/年をゼロに)
- 2. その際、航空機の離着陸距離を高精度に把握し、過度な安全余裕を排除し冬季の運航効率を向上させる (目標: 欠航・ダイバートの便数を平均10%削減)



雪氷滑走路技術

①地上摩擦計測装置

高精度に摩擦係数を計測する装置の提案と設計を実施した。装置はスリップ比を任意に変更して、精度の高い摩擦係数を得ることが出来る。(従来はスリップ比固定)

特許出願済み



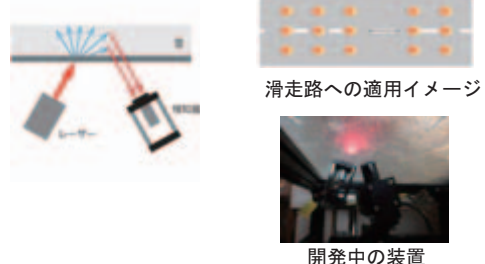
②モニタリングセンサーの開発

路面の雪氷状況をリアルタイムでモニタリングできる装置の開発を実施している。

(1) 光の透過量を計測することで雪氷状況を検知できる装置の提案と開発→特許出願済み



(2) 前方散乱光強度を2次元的な分布で、雪氷状況を効率よく検知できる小型の光学計測装置を提案し開発→特許出願手続き中



③数値シミュレーション技術の検討

雪の中を伝播する光の数値シミュレーションの検討を実施する。雪の異方性を考慮するとともに、雪のモデル化、実験との定量的な比較の方法についても検討を進める。

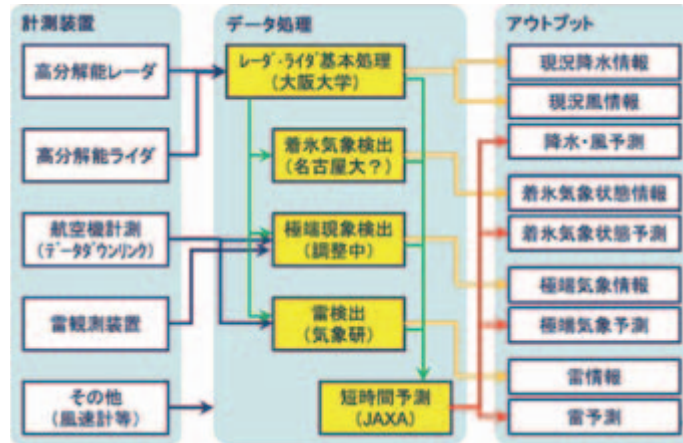
光散乱の差分法解析



気象状態検知技術

➤ 着氷気象状態検出装置

- ✓ 発生機構の調査(概要調査完了⇒詳細調査へ)
積乱雲内の着氷粒子については名古屋大で研究がスタートしている
- ✓ 着氷気象状態観測装置の調査(概要調査完了⇒詳細調査へ)
2重偏波レーダ(名古屋大), 2周波2重偏波レーダ(コロラド州立大)が有力
- ✓ 着氷過程の調査(文献ベースで調査中)

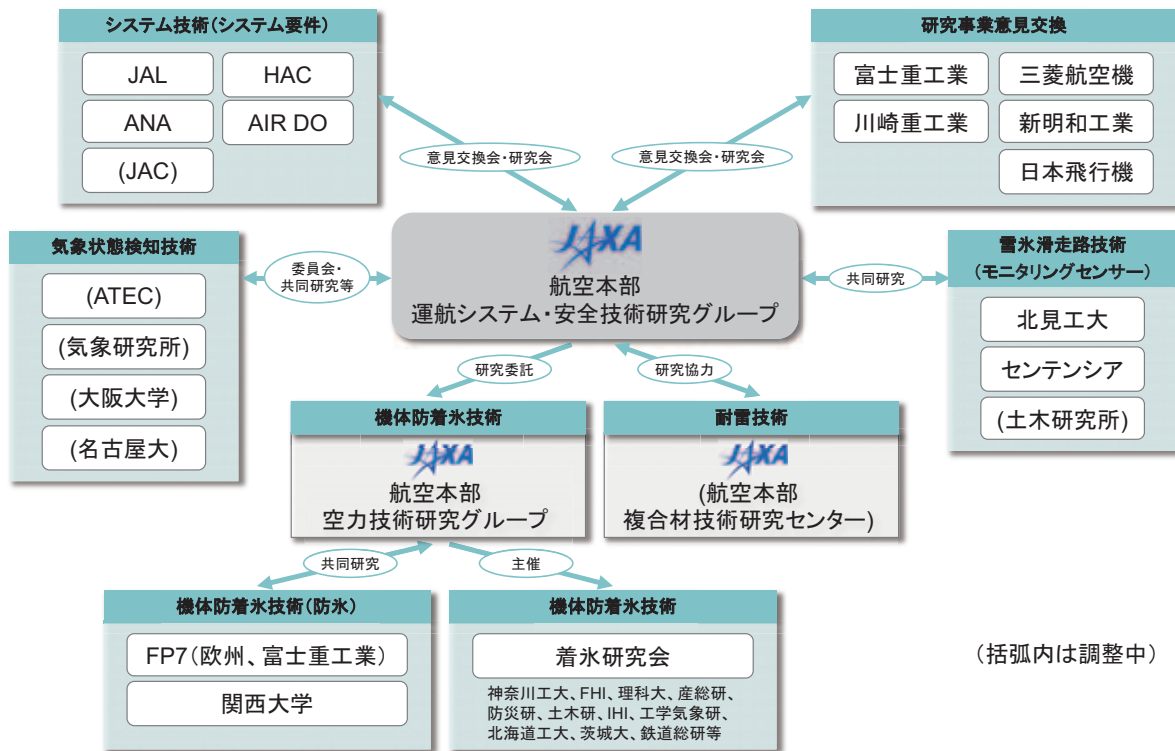


耐雷技術

耐雷技術については来年度以降の研究に向けて調査研究を実施中

方針	メリット	例
着雷位置の予測 コントロール	雷撃対策を施す部 位の集約、最適化 につながる	サブコンポーネント内レベルでの着雷位置の予測、コントロール ・着雷位置の予測技術(解析/試験) ・構造内の材料配置 ・誘雷技術の適用 ・構造配置による着雷位置への影響検討、コントロール
構造材料の耐雷性能向 上	雷撃損傷の減少	・複合材料の樹脂の導電性向上 ・複合材料の繊維の導電性向上 ・新規の金属材料の適用
耐雷保護技術の向上	同上	・導電物質による、箔、メッシュ、塗料 ・ダイバーター、スタティックディスチャージャー 性能向上、新規技術の開発
被雷後の修理の容易化	整備コストの低減 運用コストの低減	・部品交換の容易化(翼端等) ・構造部材を部分的に導電性材料に置換 ・損傷検知技術(暴露温度による損傷領域の判定など)
燃料タンク防爆技術	安全性向上 設計効率	・雷電流解析技術 ・ファスナからのスパーク防止技術 ・疲労亀裂、製作不良を考慮したスパーク防止技術

実施体制



PSP 用バインダー-poly(HFIPM)の分子構造改変と性能評価

小幡 誠*、安里 涼*

満尾 和徳**

*山梨大学 医学工学総合研究部

**JAXA 風洞技術開発センター

PSP による圧力計測において温度依存性が最大の誤差要因となっている。我々はこの温度依存性を低減するバインダーとして poly(HFIPM)を開発した。しかし poly(HFIPM)の温度感度はいまだ約 $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$ と、十分低いとは云えない。光物理化学的には PSP の温度依存性は色素の無輻射失活の温度依存性と酸素消光の温度依存性に由来する。これまでの研究により、色素の無輻射失活の温度依存性はポリマーのガラス転移温度と、酸素消光の温度依存性はポリマーのフッ素含有量と関係があることを見出した¹⁾。ポリマーのフッ素含有量の改変には新しいモノマーの合成が必要なため実用的ではない。そこでガラス転移温度の高いポリマーを与えるメタクリル酸エステルモノマーとの共重合によりガラス転移温度を向上させ、無輻射失活に由来する温度依存性の低減の可能性を検討した。

ガラス転移温度の高いポリマーを与えるモノマーとしてメタクリル酸 *tert*-ブチル (TBM)を選択した。HFIPM と TBM のラジカル共重合は開始剤に AIBN を用い、酢酸エチル中、 60°C で行った(図1)。得られた混合物からメタノールで再沈殿することにより白色固体として共重合体を得た。色素に PtTFPP、溶媒に酢酸エチルを用いて感圧塗料を調製し、エアブラシを用いてアルミ基板上に塗装した。この PSP の発光強度を自動較正装置により測定した。

典型例として poly(HFIPM)、poly(HFIPM-co-TBM) ($F_{\text{HFIPM}} = 0.34$)、poly(TBM)について図2に Stern-Volmer プロットを図3に温度依存性を示す。DSC で決定したガラス転移温度はそれぞれ、 82°C 、 107°C 、 121°C であり、予想通り TBM の導入によりガラス転移温度が高くなった。Stern-Volmer プロットはどのポリマーでも大きな変化はなかった。しかし、温度依存性は TBM の導入により劣化した。Stern-Volmer プロットの外挿値から推定される無酸素条件下における温度依存性 ($g(T, T_{\text{ref}})$ 値) を図4に示す。この無酸素条件下における温度依存性はポリマーによる差がほとんどないことから、TBM の導入により無輻射失活に由来する温度依存性は変化していない(劣化もしていない)ことが分かる。したがって、TBM の導入により酸素消光の温度依存性が大きくなり、全体として温度依存性が劣化したものと考えられる。

(1) M. Obata, R. Asato, K. Mitsuo, S. Hirohara, "Radical Polymerization of Trifluoromethyl-substituted Methyl Methacrylates and Their Application for Use in Pressure-Sensitive Paint", *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, **2014**, 52, 963-972.

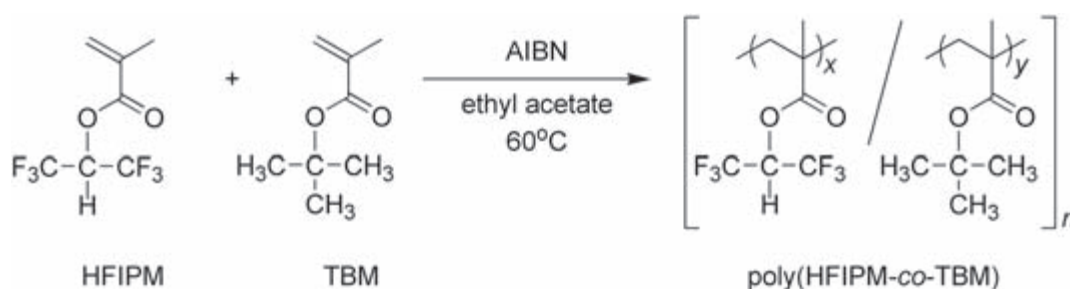


図1 HFIPM と TBM のラジカル共重合

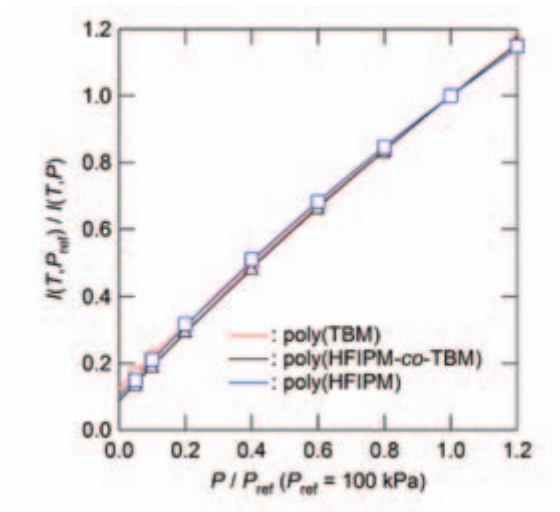


図2 Stern-Volmer プロット ($T = 20^\circ\text{C}$)

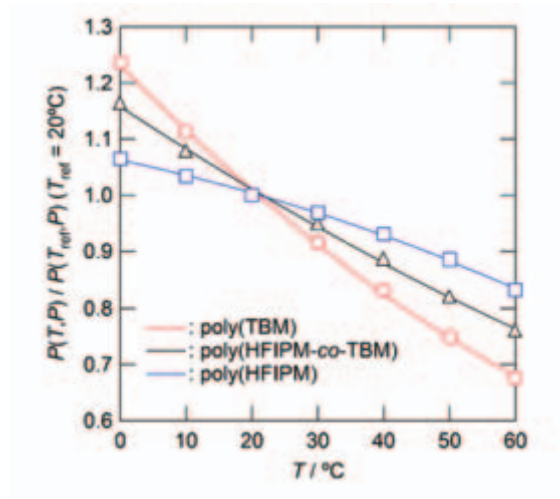


図3 温度依存性 ($P = 100 \text{ kPa}$)

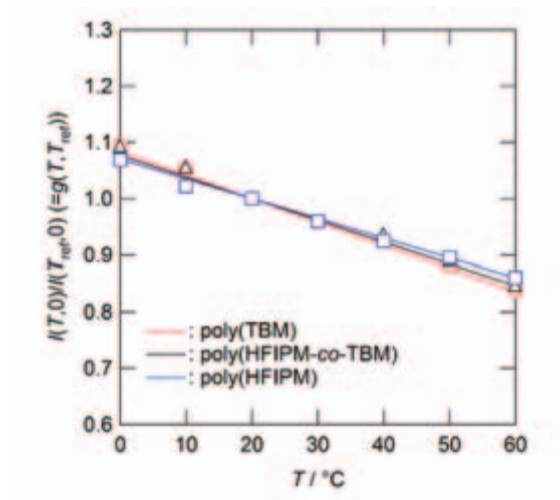


図4 無酸素条件下での温度依存性

発光性色素が均一分散した高分子光学センサーの開発

濱崎愛子*、百武壮**

坂上博隆***、道信剛志*

*東京工業大学大学院 理工学研究科

**土木研究所 材料資源研究グループ

***JAXA 航空本部

近年、色素の発光強度から酸素濃度や温度などのパラメーターを測定する高分子光学センサーが注目を集めている。高分子光学酸素センサーは、酸素分子に反応する色素と高分子マトリックスから構成されている。本研究では、酸素感度が高い Pd ポルフィリンを発光性色素として採用した。一方、高分子マトリックスは、大量生産された汎用プラスチックの有効利用という観点からポリ塩化ビニル(PVC)を選択した。従来型の高分子光学センサーでは、発光性色素と高分子マトリックスを混合する方法が主流であったが、色素が凝集しやすいという問題があった。そこで、高収率で進行するアルキンとアジドのクリック反応を用いて Pd ポルフィリンを PVC 側鎖に共有結合で導入することとした。まず、Pd ポルフィリンのアルキン体を合成し、アジド化した PVC とクリック反応条件下で反応させ、目的とする PVC-PdP を得た(図 1)。次に、PVC-PdP の THF 溶液を Al 板上にスプレーコートして薄膜試料を作製した。色素導入率 0.3~1.3wt% の薄膜試料を一定温度(10、20、40、60°C)に保った後、酸素圧を 1.05~21.0kPa の範囲で変化させながら発光スペクトルを測定した。PVC-PdP(1.3wt%)薄膜を 20°C、1.05kPa に保持した後、415nm で励起したところ、700nm に強い発光ピークが観測された(図 2)。このピーク位置は既報の Pt ポルフィリンの発光位置(約 680nm)よりも長波長シフトしており、二色目の発光性色素(例えば温度応答色素)を導入するのに都合が良い。また、発光ピーク強度は酸素圧が増加するにともない減少した。一連の酸素分圧下における発光スペクトル強度から Stern-Volmer プロットを作成した。得られたプロットは線形性良く急こう配を示し、PVC-PdP が高い酸素感度を有することを明らかにした(表 1)。比較試料として作製した PVC と PdP の混合薄膜試料(PVC+PdP)では非線形的な振る舞いを示したことより(図 3)、共有結合で連結することで Pd ポルフィリン色素の凝集が抑制されたことが分かった。

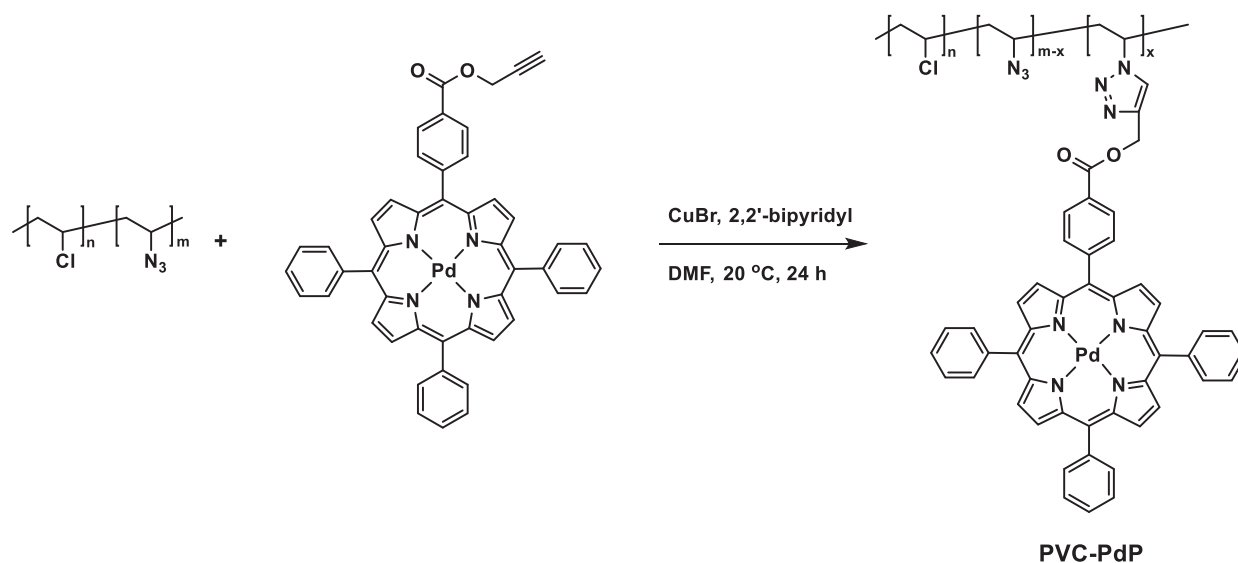


図 1: Pd ポルフィリンのアジド化 PVC へのクリック反応を用いた導入。

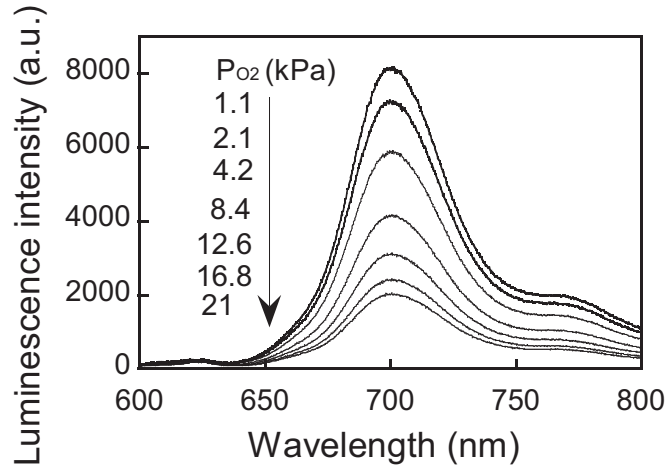


図 2: PVC-PdP(1.3wt%)の酸素分圧による発光強度の変化。

表 1: 色素濃度が異なる PVC-PdP の Stern-Volmer 定数 (kPa^{-1})

T (°C)	PdP amount (wt%)			
	0.30	0.46	0.91	1.3
10	0.0329	0.0325	0.0339	0.0357
20	0.0348	0.0336	0.0348	0.0377
40	0.0357	0.0348	0.0395	0.0410
60	0.0350	0.0344	0.0421	0.0429

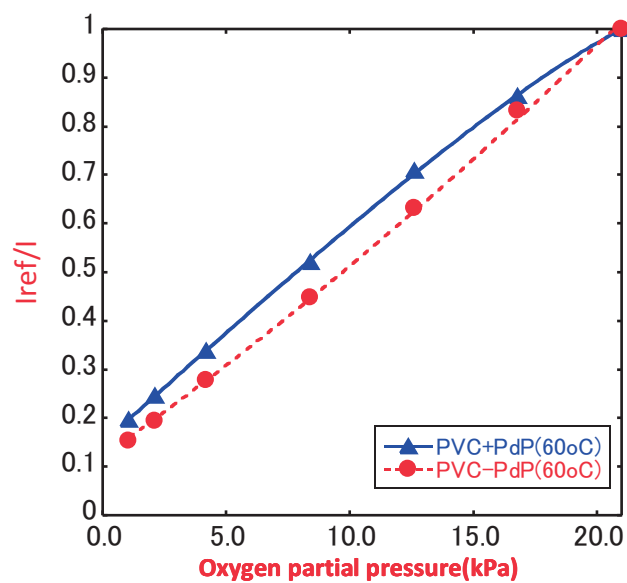


図 3: クリック反応によって PVC に共有結合で連結した PdP 試料 (PVC-PdP: 赤) と混合試料 (PVC+PdP: 青) の Stern-Volmer プロット。

超高速スプレー型 PSP の開発：溶媒の応答時間への影響

小西翔太, 江上泰広

愛知工業大学

感圧塗料(Pressure-Sensitive Paint: PSP)は発光強度の変化によって表面圧力を面情報で定量的に計測することができる分子イメージングセンサである。非定常現象の計測を行うためには PSP の高速応答性が求められる。一般的な高速応答 PSP に陽極酸化 PSP(Anodized Aluminum-PSP: AA-PSP)がある⁽¹⁾。しかし、陽極酸化処理は材質がアルミニウムに限定されてしまい、模型に多く使用されるステンレスや木材には適用することができない。また、複雑な形状の模型に一様な AA-PSP 層を形成することは困難である。そこで材質や形状を選ばずにスプレー塗装が可能な高速応答 PSP の開発が進められている。スプレー型の高速応答 PSP として、Polymer Ceramic-PSP (PC-PSP)⁽²⁾や超微粒子を使用した PSP⁽³⁾が開発されている。しかし、これまで開発されたスプレー型 PSP の応答時間は AA-PSP と比べると遅く、より高い応答性を示すスプレー型 PSP を開発する必要がある。

近年、まずポリマーに超微粒子を混合したバイндаを模型に塗装し、その上に感圧色素の溶液を塗装する方法で高速応答性を得る方法が開発されてきた⁽⁴⁾。本研究では、感圧色素溶液の溶媒に着目し、バイндаを溶解させずにバイнда表面のみに感圧色素を分散させることで、さらなる高速応答性を達成することを目指した。今回は、ポリマー poly(4-tert-butylstyrene) (PtBS)に Titanium silicon oxide (TiSiO₄) 粒子を添加したバイнда(ポリマー重量比 20 wt%)を模型に塗装後、その上から PtTFPP を 4 種類の溶媒(トルエン、メタノール、エタノール、ジクロロメタン)に溶解したものを塗装し、PSP の溶媒による応答時間、発光強度、圧力・温度感度の比較を行った。

図 1 に衝撃波試験装置の概略図を示す。PSP サンプルは衝撃波管のエンドウォールに設置した。発光強度変化は光電子増倍管(PMT)で測定し、同時に圧カトランスデューサ(PCB)で圧力の時間変化を測定した。図 2 にステップ圧力変動に対する応答時間を示す。ステップ圧力に対する PSP の発光強度が 90 % に達した時間を応答時間とした。その結果、色素溶媒にメタノール、エタノールを使用した PSP が 11.7, 17.6 μsec を示し、従来の色素溶媒として使用されるトルエン(239.4 μsec)よりも大幅に応答時間が高速化することを示した。これは色素溶媒のアルコール系がバイнда層のポリマーを溶解しないため、色素がバイнда内に入り込まず表面に分散した状態になるためであると考えられる。

図 3-a に圧力校正試験の溶媒による発光強度の変化を示す。その結果、アルコール系はトルエンと比べると約 1/10 の発光強度であることを示した。図 3-b は参照圧力 $p_{ref} = 100$ kPa における発光強度 I_{ref} で各圧力の発光強度 I を無次元化したグラフ(Stern-Volmer plot)である。発光強度の高いトルエンとジク

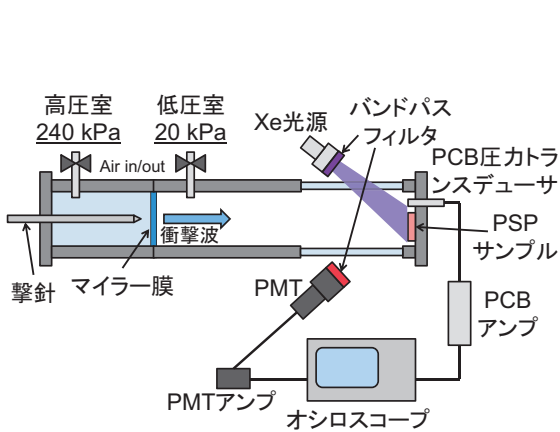


図 1 衝撃波管試験装置概略図

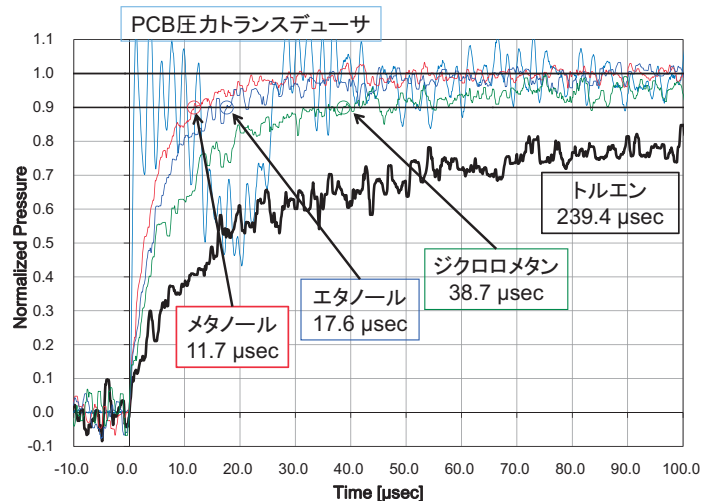


図 2 圧力変動に対する応答時間比較

ロロメタンがやや圧力感度が良くなる傾向が見られた。色素溶媒トルエンとジクロロメタンはバインダ層のポリマーに溶解するため、色素はポリマー内に沈殿する。色素がポリマー内に混在すると発光強度が高くなり、圧力感度も良くなると考えられる。図4は温度校正正試験の $T=20^{\circ}\text{C}$ における発光強度 I_{ref} で各温度の発光強度 I を無次元化したグラフである。温度感度は最大でトルエンの $1.78\ \%/^{\circ}\text{C}$ 、最小でエタノールの $1.11\ \%/^{\circ}\text{C}$ を示した。

以上のように色素溶媒にポリマーを溶解しないアルコール系を使用することで応答時間を大幅に高速化することができた。今後は、感圧色素のバインダ表面への分散状態を改善することで、さらなる高速応答性と高い発光強度の両立した超高速スプレー型PSPの開発を行っていく。

参考文献

- (1) Gregory, J.W. et al., "A review of pressure-sensitive paint for high-speed and unsteady aerodynamics", Journal of Aerospace Engineering, Vol. 222, (2008), pp. 249-290.
- (2) Sakaue, H. et al., "Characterization and Optimization of Polymer-Ceramic Pressure-Sensitive Paint by Controlling Content", Sensors 2011, 6967-6977. (2011).
- (3) Kameda, M. et al., "Unsteady measurement of a transonic delta wing flow using a novel PSP", AIAA Paper 2008-6418. (2008).
- (4) Sugimoto, T. et al., "Characterization of Frequency Response of Pressure-Sensitive Paints", AIAA Paper 2012-1185. (2012)

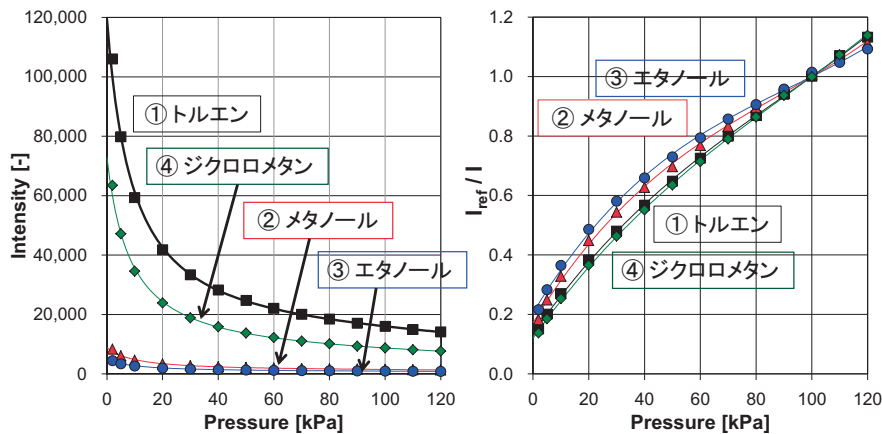


図 3-a : 発光強度比較, 図 3-b : 圧力感度比較

図 3 圧力校正試験結果

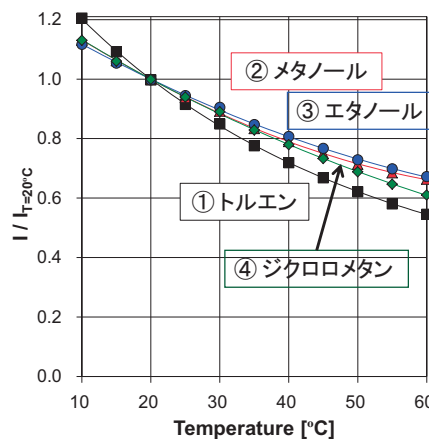


図 4 色素溶媒による温度感度比較

高い圧力感度を有する感圧発光ポルフィリン薄膜の開発

荒井義晴¹, 永野和也², 谷口政幸³, 大嶋元啓³, 坂村芳孝³, 川端繁樹³¹富山県立大学大学院工学研究科, ²佐藤鉄工株式会社, ³富山県立大学工学部

感圧塗料(Pressure-Sensitive Paint, PSP)は、色素の発光強度が周囲の酸素分圧に依存して変化する現象を利用し、空気中に置かれた物体表面の圧力分布をイメージング計測するために開発された発光分子センサである⁽¹⁾。PSPは発光色素をプローブとした分子センサであるため、マイクロチャネル等の微細流路への適用が期待されてきたが、ポリマをバインダとする従来のPSPでは膜厚や表面粗さの制御の難しさが技術的課題となっている。この課題を克服するため著者等は白金ポルフィリン誘導体(図1)を自己組織化単分子膜(Self-Assembled Monolayer, SAM)法⁽²⁾によって基板上に固定すること(図2)で感圧発光ポルフィリン薄膜を開発したが、圧力感度が色素単体のそれよりも小さく、改良が求められていた⁽³⁾。本研究では、SAMの作製プロセスにおける反応条件・操作の改善によって、圧力感度を向上させることを試みた。

図3は、作製したサンプルをHg-Xeランプ光源で光励起し、その放射光をCCDカメラで撮影したものである。さらに、大気圧($p_{ref}=102$ kPa)の場合の発光強度 I_{ref} を基準とした強度比(I_{ref}/I)を求め、擬似カラー表示した画像を図4に示す。図5は、このようにして得られた発光強度比と圧力(p)との関係を整理した結果である。以前作製されたサンプルの結果⁽³⁾と比較すると、本研究で作製されたサンプルの方が高い圧力感度を有することがわかる。

参考文献

- (1) Liu, T. and Sullivan, J. P.: *Pressure and Temperature Sensitive Paints*, Springer, N. Y., 2005.
- (2) Veselov, A., Thur, C., Efimov, A., Guina, M., Lemmetyinen, H. and Tkachenko, N.: Acidity sensor based on porphyrin self-assembled monolayers covalently attached to the surfaces of tapered fibres, *Meas. Sci. Tech.*, 21 (2010), 115205.
- (3) Sakamura, Y., Suzuki, T. and Kawabata, S.: Development and characterization of a pressure-sensitive luminescent thin coating based on Pt(II)-porphyrin self-assembled monolayers, *Proc. of the 16th Int. Symp. on Flow Visualization*, (2014) (on USB memory).

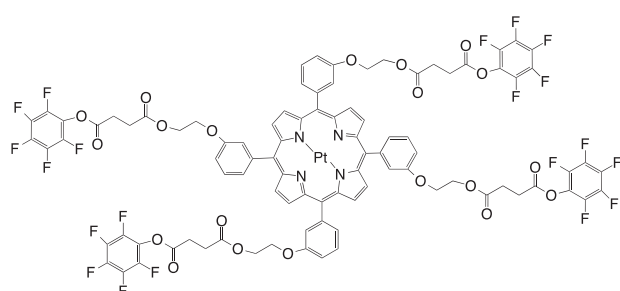


図1：本研究で使用した白金ポルフィリン誘導体の構造式

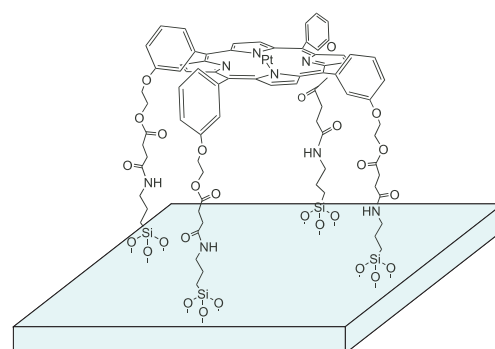


図2：基板に理想的な状態で化学吸着した白金ポルフィリン誘導体

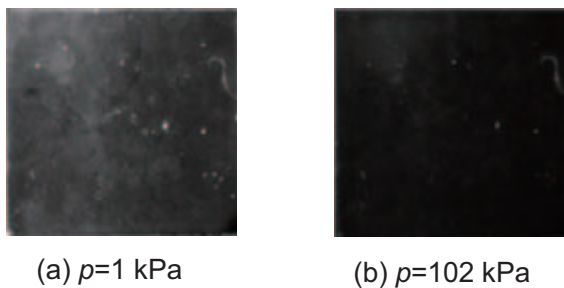


図 3: 発光強度分布

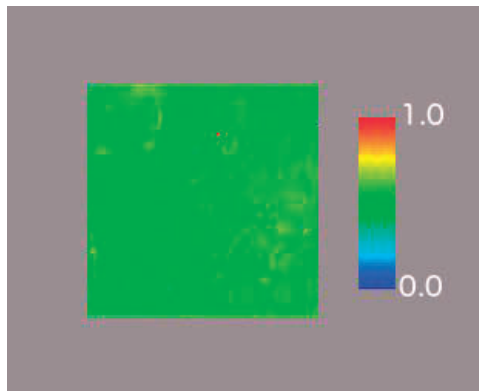


図 4: 発光強度比分布

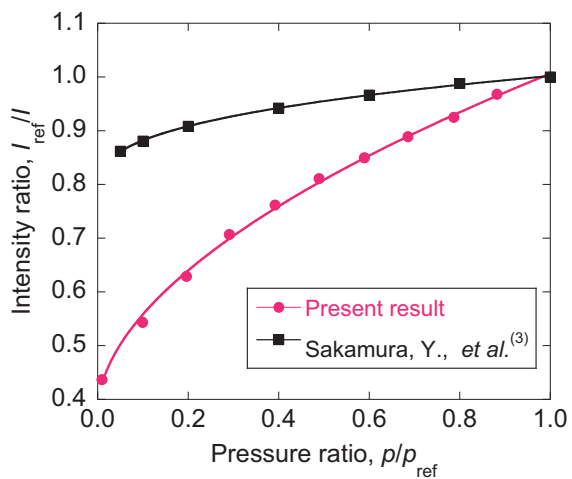


図 5: 発光強度比と圧力との関係

遷音速非定常現象計測のための粒子混合型感圧塗料の開発

杉岡洋介*、沼田大樹*、浅井圭介*、小池俊輔**、中北和之**、古賀星吾**

*東北大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻

**JAXA 航空本部 風洞技術開発センター

遷音速バフエット現象の解明には、衝撃波の振動や不安定な境界層剥離などが誘起する非定常圧力場の計測が必要とされている。そのための強力なツールとして高速応答型感圧塗料が挙げられる。昨年度は東北大学で開発した粒子混合型感圧塗料 (TU-PSP) を遷音速風洞試験に適用し、旅客機模型主翼上の非定常圧力場の可視化を行った。その結果、非定常圧力場の可視化において有効性は実証されたものの、感圧塗料の表面粗さの影響が、模型の空気力及び翼面上圧力場に現れることが明らかになった^{1,2}。以上より、遷音速バフエット現象計測のための非定常 PSP の開発には、感度特性や応答性の評価のみでなく、表面粗さの評価を同時に行うことが必要であると考えられる。

そこで本研究では、遷音速非定常現象を捉えるために応答性が十分かつ良好な感度特性を有し、流れ場に影響を及ぼさない表面粗さを持った新型粒子混合型感圧塗料の開発を目指し、ポリマー種類や粒子混合量、粒子径が感圧塗料の特性に及ぼす影響を調査した。その結果、粒子混合量、粒子径は表面粗さ (図 1, 表 1) 及び周波数応答性 (図 4) に影響を及ぼすことがわかった。しかしながら、圧力感度及び温度感度 (図 2, 図 3) に対する粒子混合量、粒子径の影響は比較的小さい。また、ポリマーの種類はすべての特性に影響を与えることがわかった。

参考文献

¹ 杉岡洋介, 沼田大樹, 浅井圭介, 中北和之, 小池俊輔, 古賀星吾, “非定常 PSP による遷音速バフエット現象の可視化,” 第 46 回流体力学講演会, 2A10, 2014

² 杉岡洋介, 沼田大樹, 浅井圭介, 中北和之, 小池俊輔, 古賀星吾, “スプレー塗装型非定常 PSP の遷音速風試への適用と評価,” 第 42 回可視化情報シンポジウム, C110, 2014

表 1 表面粗さ特性

Polymer	Particle content [wt%]	Particle diameter [nm]	Dye application method	Dispersant	Ra [μm]
IBM	0	-	Mixed	-	0.50
	85	500	Mixed	-	2.48
			Adsorbed	-	1.31
	90	500	Adsorbed	-	6.38
				SN λ [*] - λ 2190	5.89
			270	Adsorbed	SN λ [*] - λ 2190
	80	Adsorbed	SN λ [*] - λ 2190	13.7	
HFIPM	85	-	Mixed	-	1.02
		500	Adsorbed	-	5.37
				SN λ [*] - λ 2190	6.51
	80	Mixed	SN λ [*] - λ 2190	8.13	

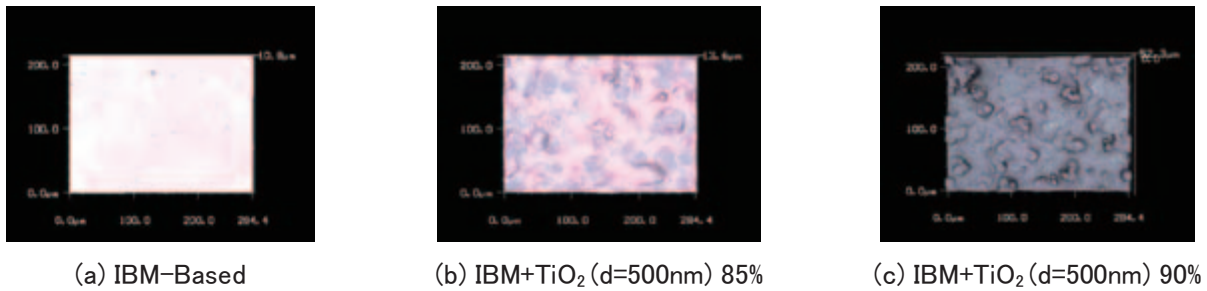
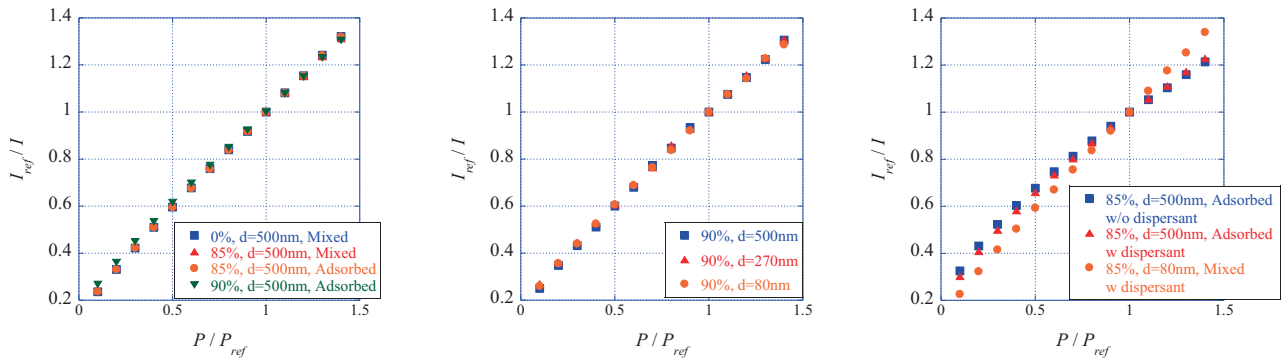
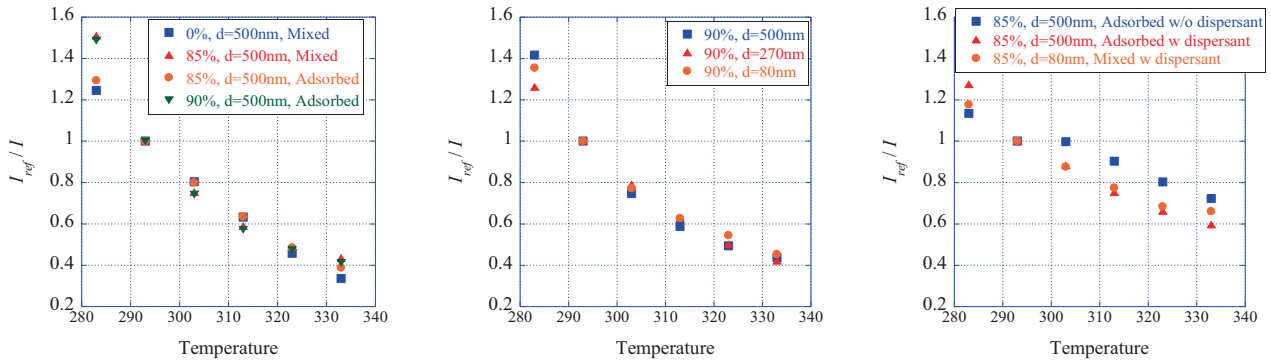


図1 レーザ顕微鏡による表面状態計測結果の例



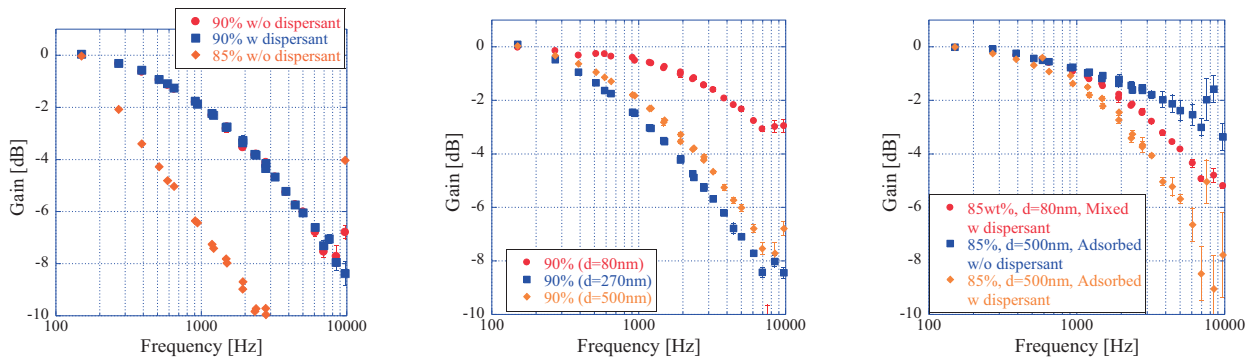
(a) ポリマーにIBMを使用した場合の粒子添加量の影響 (分散剤無) (b) ポリマーに IBM を使用した場合の粒子径の影響 (分散剤有) (c) ポリマーに HFIPM を使用した場合の粒子径・分散剤の影響

図2 圧力感度の比較



(a) ポリマーにIBMを使用した場合の粒子添加量の影響 (分散剤無) (b) ポリマーに IBM を使用した場合の粒子径の影響 (分散剤有) (c) ポリマーに HFIPM を使用した場合の粒子径・分散剤の影響

図3 温度感度の比較



(a) ポリマーにIBMを使用した場合の粒子添加量の影響 (分散剤無) (b) ポリマーに IBM を使用した場合の粒子径の影響 (分散剤有) (c) ポリマーに HFIPM を使用した場合の粒子径・分散剤の影響

図4 周波数応答性の比較

ベークライトを用いた2色発光感温センサーの開発

飯野 真¹ 石川 仁² 坂上 博隆³

1:東京理科大学大学院 (JAXA 研修生)

2:東京理科大学

3:JAXA 航空本部

航空宇宙分野において大気圏再突入を行う往還機 (HTV-R) や極超音速旅客機等の機体表面の圧力変化を知ることは形状決定や姿勢制御に不可欠である。しかし、極超音速流では空力加熱による温度上昇が著しい。

ベークライトは熱硬化性の樹脂であり、加工や色素の塗布が容易であったため、感温塗料(TSP)を塗布する基盤として使用されていた。さらに、このベークライトが先行研究によって発光を示し、その発光が温度によって変化することが示されている。このような性質から温度上昇が著しい極超音速流における温度の非接触面計測が可能である。

また、ベークライトに感圧塗料(PSP)を塗布することでPSPの温度依存性をキャンセルする圧力・温度の同時計測(温度キャンセリングPSP法)や他の発光色素を塗布し移動する物体の温度計測(モーションキャプチャーTSP法)を目指し2色発光するベークライトセンサーの開発を目標とした。このセンサーの実現にむけてベークライトの基材等による違いが発光に及ぼす影響について調べるため、4種類のベークライトについて波長や温度感度についてのサンプル調査を行った。



図1 ベークライト



図2 HTV-R(コウノトリ)

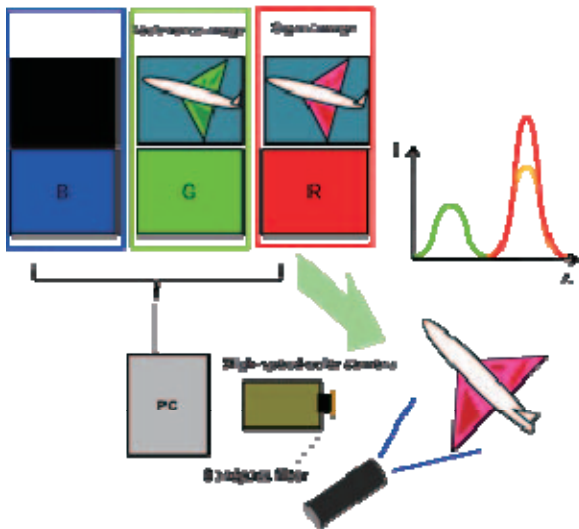


図3 2色発光を利用した計測例

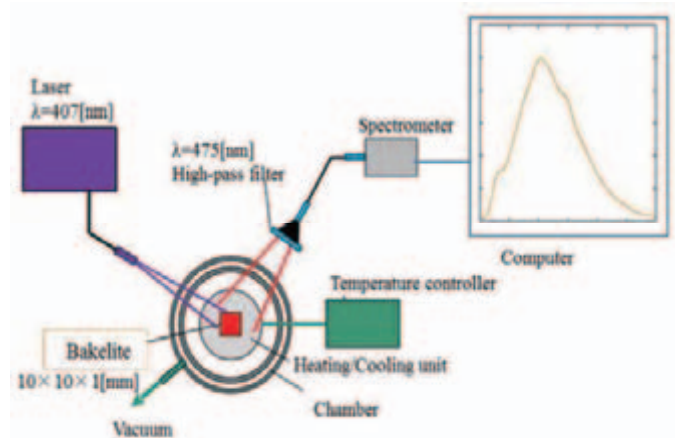
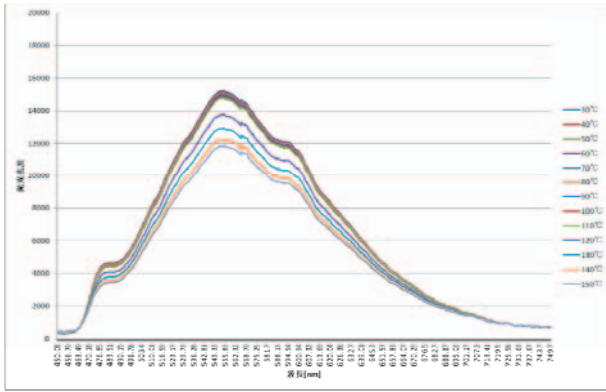
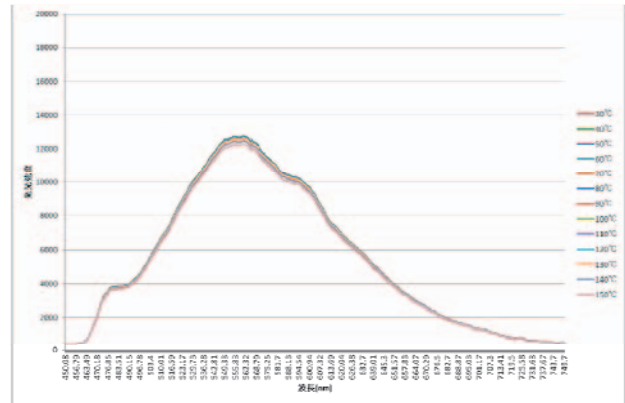


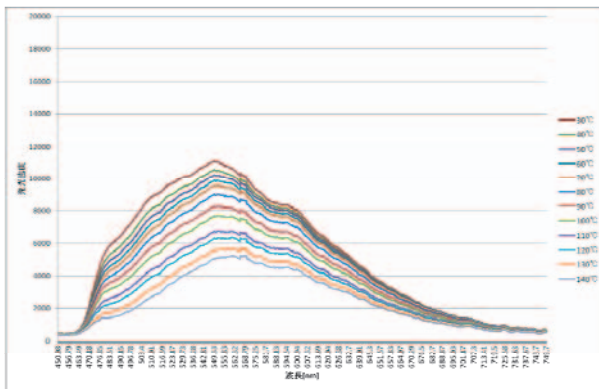
図4 サンプル試験装置模式図



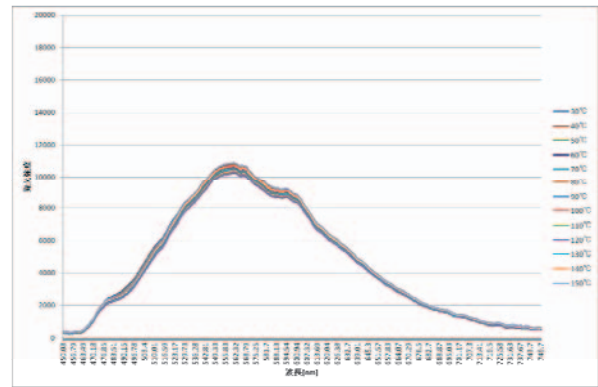
(a) サンプル A



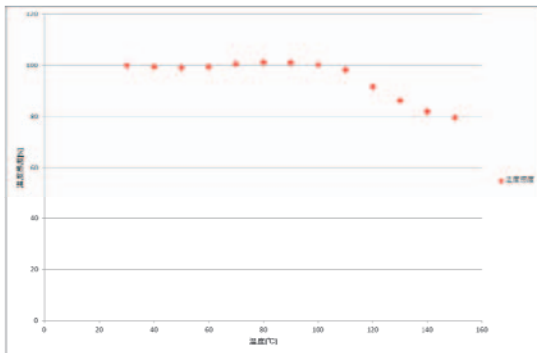
(b) サンプル B



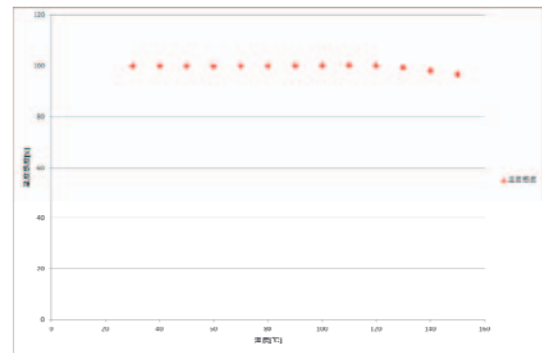
(c) サンプル C



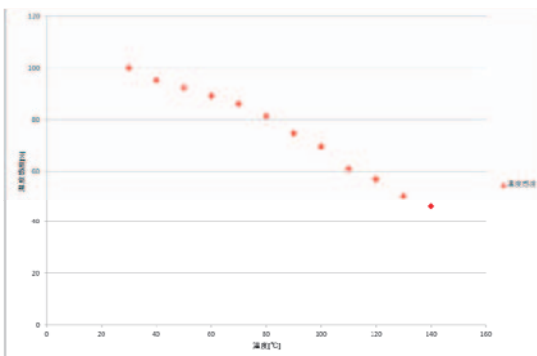
(d) サンプル D



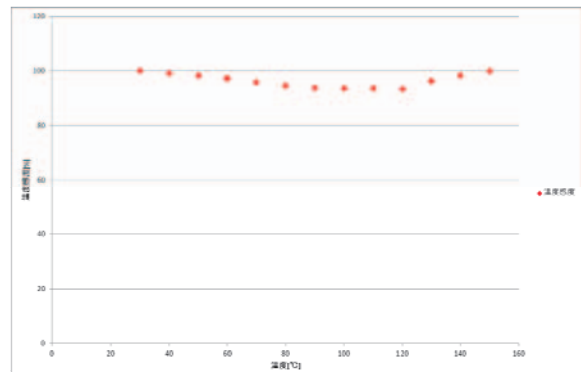
(a) サンプル A



(b) サンプル B



(c) サンプル C



(d) サンプル D

図 5 ベークライトの種類別(a)~(d)の発光波長・強度(上)と温度感度(下)

高温衝撃風洞 Hiest への適用を目指した感温塗料(TSP)の改良とその実証試験結果

長山剛大*, 洞桐健人*, 永井大樹*

丹野英幸**, 小室智幸**

*東北大学工学研究科

**宇宙航空研究開発機構

宇宙機が大気圏に再突入する際には宇宙機前面に強い衝撃波が発生し、空力加熱が加わる。熱流束を予測することは宇宙機の熱防御設計をする際に重要なパラメータとなる。この熱流束を計測する手段として感温塗料(TSP)がある。従来の熱電対等の熱センサとは異なり、面計測が可能である。本研究では従来の TSP を、微粒子を混合することで発光量が大きく応答性の高い TSP に改良し、これを JAXA 所有の高温衝撃風洞 Hiest に適応して熱流束計測を行うことを目的とし、試験を行った。まず、混合する微粒子の選択のために発光強度試験、温度感度試験および応答性評価試験を行い、これらの基礎試験の結果、ケイ酸カルシウムをポリマに対して混合比 50% で加えると発光量が従来の TSP の発光量の約 2 倍になり、応答性についても時定数が従来の 0.69 倍に改善され、これを混合粒子とした。次に実証試験としてこの改良 TSP を図 1 に示す HTV-R 模型表面に塗布し、Hiest において流れの層流-乱流遷移現象を調査した。図 1 中の A~E は熱電対であり、A と B の間にトリップが 7 点取り付けられており、TSP は黄色い領域に塗布した。図 2 は TSP より取得した TSP 塗布領域の温度分布画像である。気流は左から右向きに流れている。この結果、自発光の影響により熱流束を得ることはできなかったが、模型表面の温度分布を TSP により取得することに成功し、遷移の可視化を行うことができた。また、模型表面の計測領域に取り付けたトリップ前後における温度上昇率は TSP と熱電対でほとんど一致し、その差は 1.27% であり、トリップ下流における温度上昇率の差も 2.5% 以内であった(図 3)。温度分布画像から遷移領域の拡大角を取得した結果、下流に行くにつれて 0.9° から 5.76° の範囲で拡大していることがわかった(図 4)。本試験と同じ $M = 8$ の条件下では、Fischer らのデータより、拡大角およそ 4~6° であるため、過去の研究に見られる傾向ともほぼ一致している[1]。結論として、改良 TSP は短試験時間極超音速試験にも十分適応可能であると言える。

[1] M. C. Fischer, "Spreading of a Turbulent Disturbance," AIAA J., vol.10, 957-959 (1972)

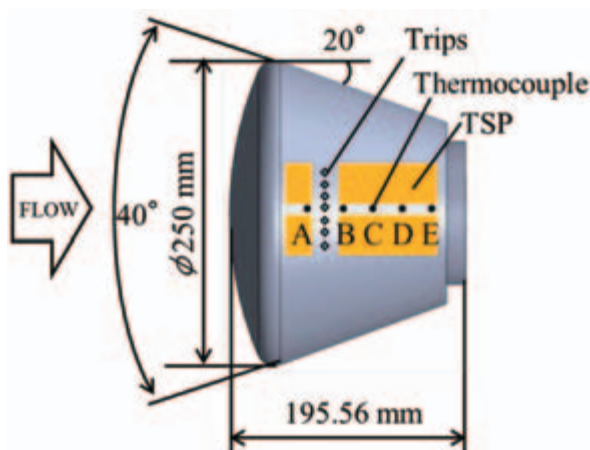


図 1 HTV-R 模型

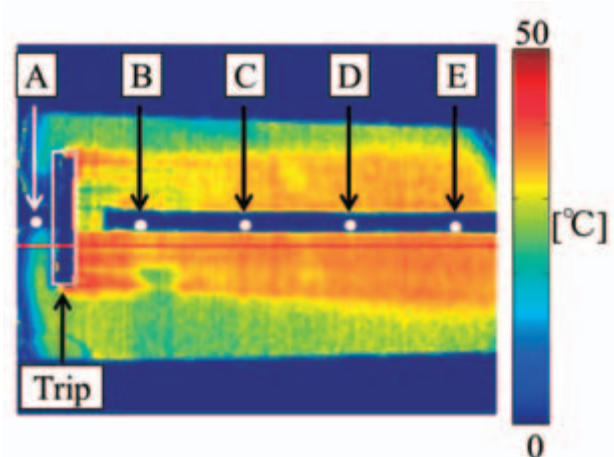


図 2 模型表面の温度分布

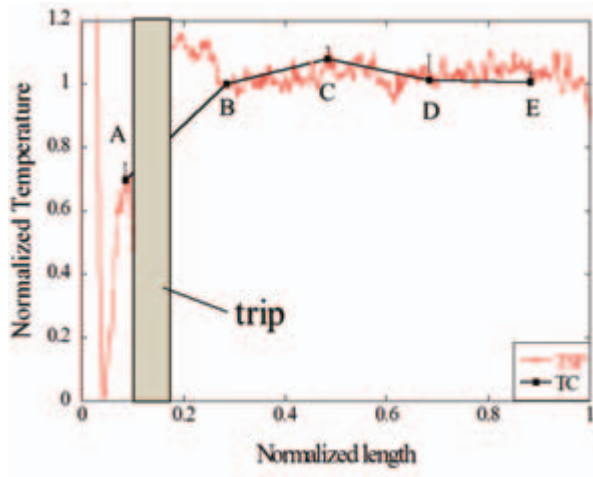


図3 TSP および熱電対(TC)の計測温度比較

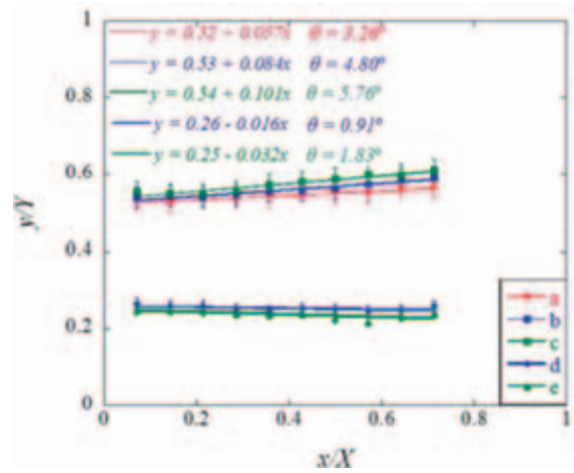


図4 遷移領域の拡大角

非定常感圧塗料の周波数応答性に対する周囲圧力の影響

佐々木 大介, 沼田大樹, 浅井圭介

東北大学大学院 工学研究科航空宇宙工学専攻

近年、飛行機が火星探査の手段として検討されている。その研究手段として東北大学が保有する火星大気風洞がある(図1)。火星大気風洞は、風洞が設置されたチャンバー内部を減圧することで、火星大気飛行環境である低レイノルズ数を実現している。これまで、力計測と感圧塗料(Pressure-Sensitive Paint; PSP)を用いた定常圧力場計測により、火星探査飛行機の開発に大きく寄与してきた。しかし、CFD や圧力センサによる点計測により、0 (kHz)の非定常な流れ場が支配的であることが知られており、その流れ場の解明手段として、火星大気風洞における非定常 PSP 計測が期待されている。そのための大きな課題として応答性が考えられる。理論的に、PSPの応答性は周囲圧力に依存するため、火星風洞における非定常計測に適用するためには、周囲圧力の影響を把握する必要がある。そこで本研究では、火星大気風洞における非定常圧力場計測へ PSP を適用するため、非定常 PSP の応答性に対する周囲圧力の影響を評価した。PC-PSP/PtTFPP の応答性は周囲圧力依存性が大きい(図 2)、TLC-PSP/PtTFPP の応答性はほとんど周囲圧力の影響を受けず(図 3)、AA-PSP/RuDPP は全く影響を受けないことを確認した(図 4)。また、いずれの PSP の応答も 1 次遅れ系の伝達関数に最もよく近似され、いずれの圧力条件においても発光寿命依存の応答であることが分かった^[1](図 5, 6, 7)。

参考文献

[1] Sugimoto, T., et. al., “Characterization of frequency response of pressure-sensitive paints” AIAA 2012-1185, In Proceedings of 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Nashville, TN, USA, January 2012, pp. 9-12



図1 火星大気風洞. 低レイノルズ数における高亜音速風洞試験が可能な装置.

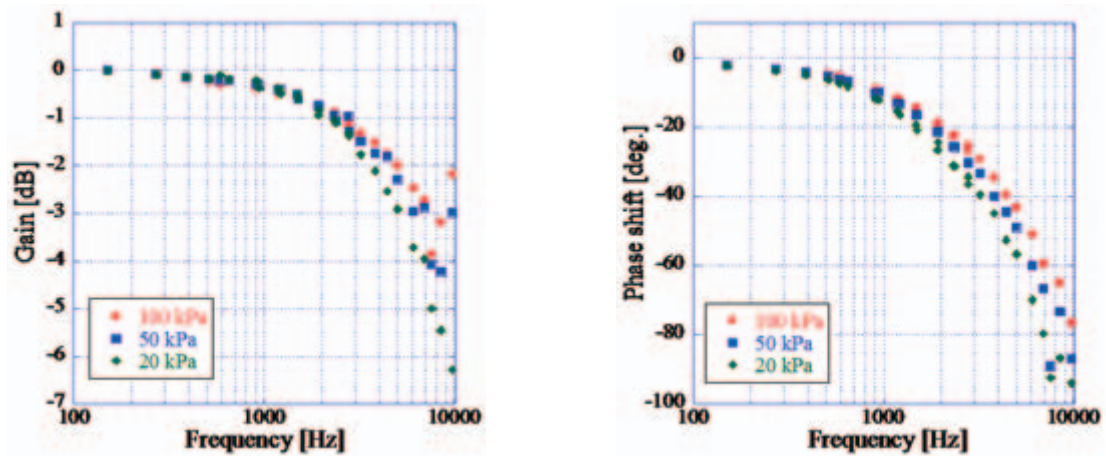


図 2 PC-PSP/PtTFPP のゲイン・位相特性. 低圧化による応答性の悪化が顕著に見られる.

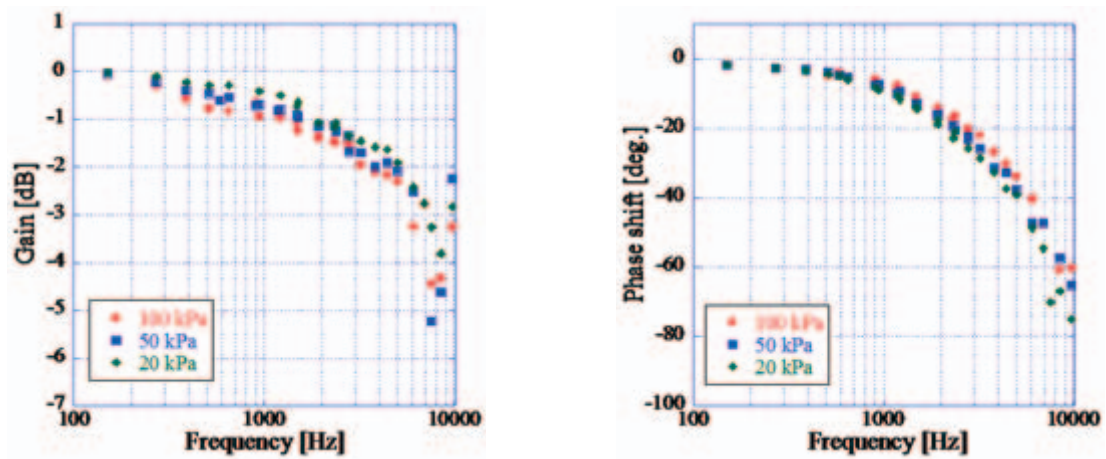


図 3 TLC-PSP/PtTFPP のゲイン・位相特性. 低圧化による応答性悪化の傾向は位相特性においてわずかに見られる.

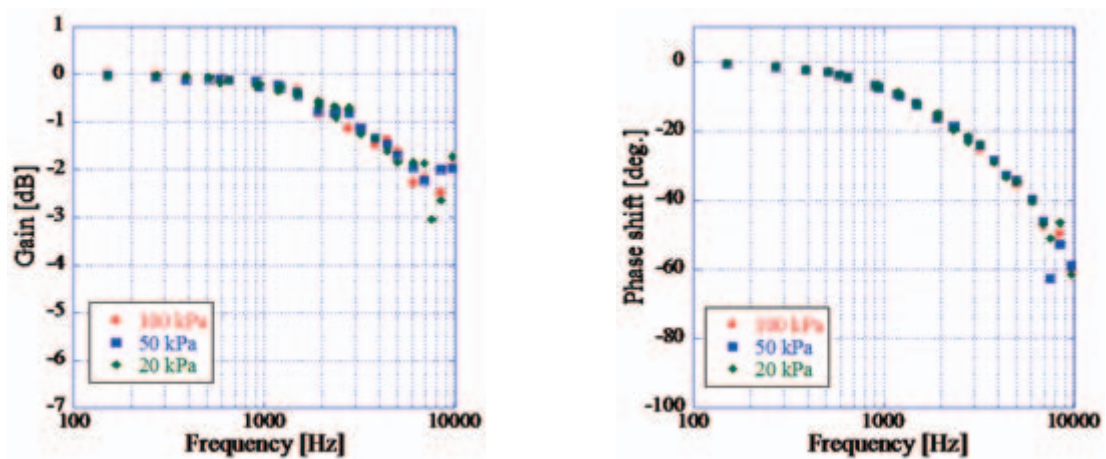
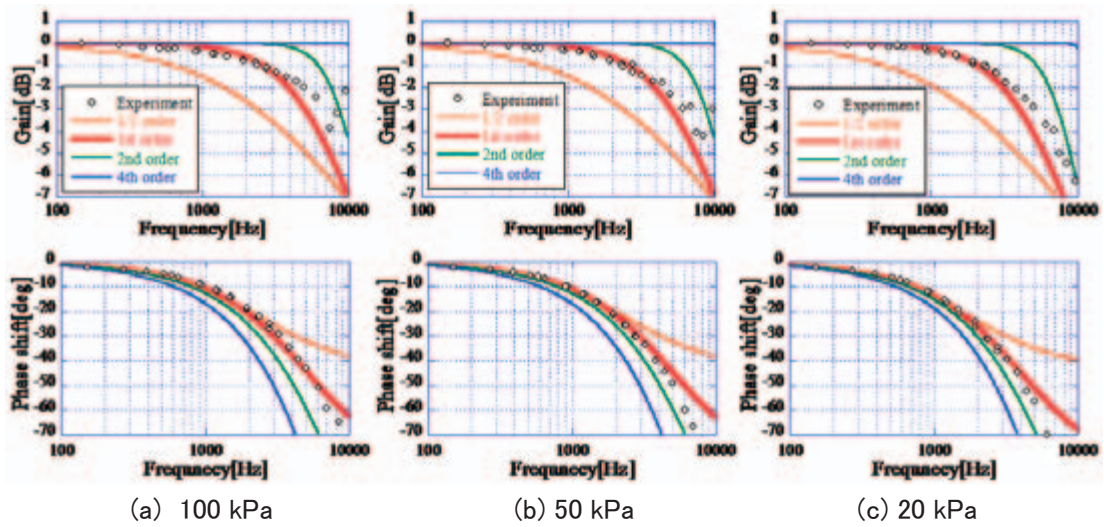


図 4 AA-PSP/RuDPP のゲイン・位相特性. 応答性が周囲圧力に依存していないことが分かる.

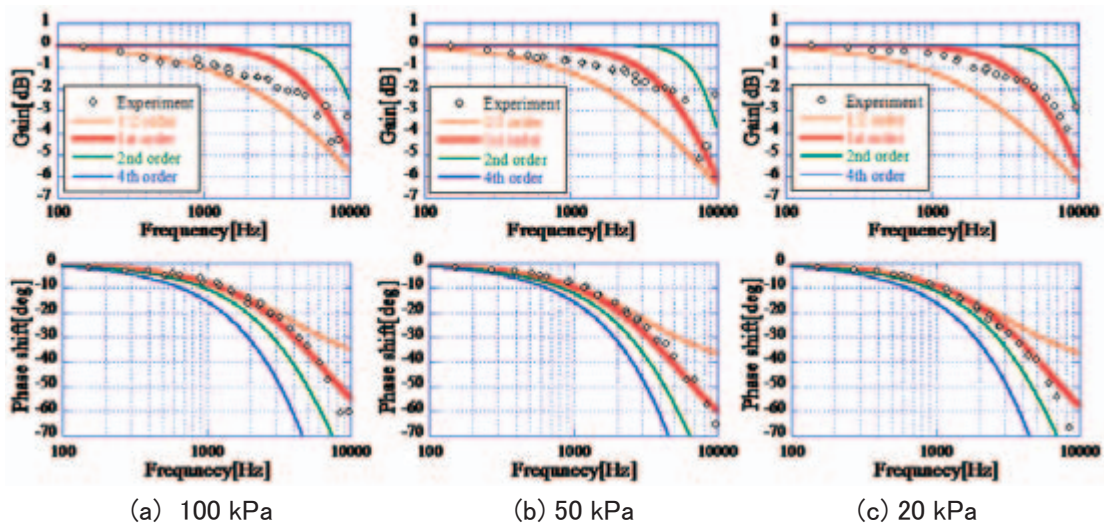


(a) 100 kPa

(b) 50 kPa

(c) 20 kPa

図5 PC-PSP/PtTFPPの伝達管巢近似結果. いずれの圧力条件下でも1次遅れ系に最もよく一致している.

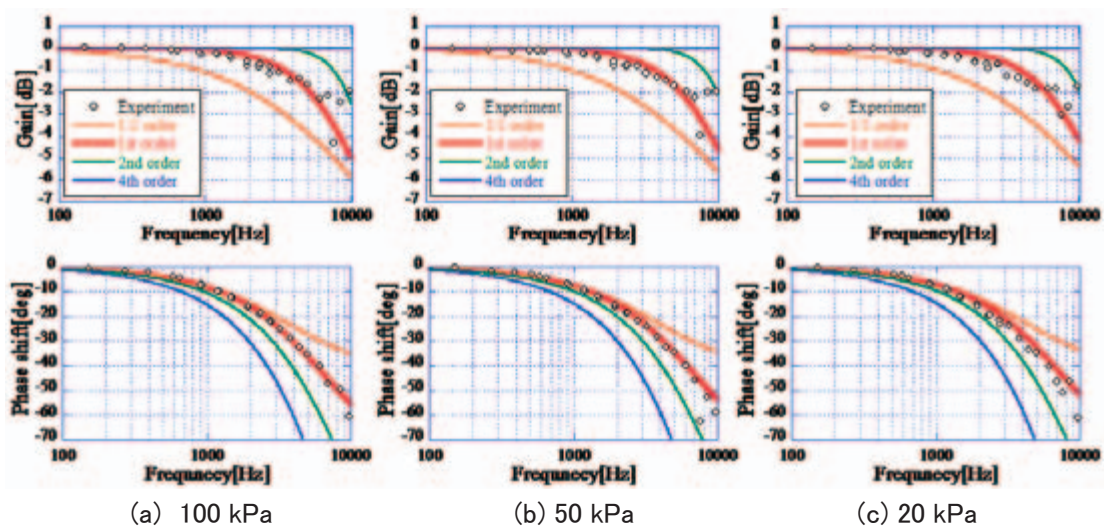


(a) 100 kPa

(b) 50 kPa

(c) 20 kPa

図6 TLC-PSP/PtTFPPの伝達管巢近似結果. いずれの圧力条件下でも1次遅れ系に最もよく一致している.



(a) 100 kPa

(b) 50 kPa

(c) 20 kPa

図7 AA-PSP/RuDPPの伝達管巢近似結果. いずれの圧力条件下でも1次遅れ系に最もよく一致している.

AA-PSP/TSP における二色発光スペクトル解析

平田祐樹*, 山田有希**, 呉屋英樹**, 坂上博隆***

*東京大学 大学院工学系研究科

**電気通信大学 大学院情報理工学研究科

***JAXA 航空本部

Anodized Aluminum – Pressure Sensitive Paint / Temperature Sensitive Paint (AA-PSP/TSP) は発光色素を用いた化学センサーである。従来まで、非定常試験ではカメラで取得する出力は圧力・温度に依存しない信号を同時に含んでしまうため計測が非常に困難であった。AA-PSP/TSP に発光波長帯の異なる二色素, 特に二色素のうち一色素を圧力・温度依存性を持たない色素を選択的に着色し, 当該色素の発光をリファレンスとして用いることで, これら非依存信号を打ち消すことが可能となり非定常試験への適用が期待できる。本研究では発光挙動が圧力・温度に依存しない色素として fluorescein を, 感圧色素として ruthenium を, 感温色素として rhodamine を用いた。さらに本研究では, 環境温度を変化させながら dipping を行い, 発光挙動を解析し特性を評価した。その結果, PSP に用いた fluorescein と ruthenium の発光では 10°C~30°C で dipping を行った場合が最も強いスペクトルが得られた。TSP に用いた fluorescein と rhodamine の発光では dipping 時の温度に比例し rhodamine スペクトルは大きくなり, かつ, fluorescein の温度感度を抑えることができた。

AA-PSP/TSP

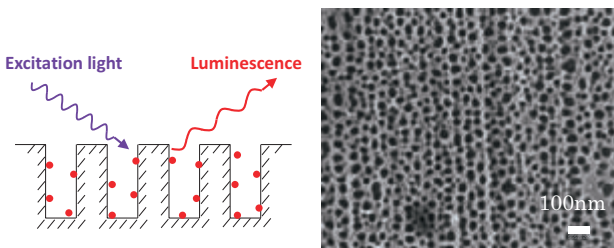


Fig.1 Schematic drawing of AA-PSP/TSP

Fig.2 SEM images of the nanoporous alumina film¹⁾

Dipping process; Adsorption or Collision?

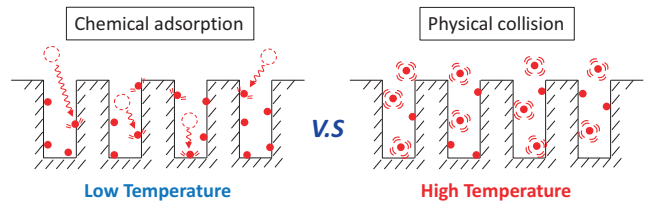


Fig.4 Schematic drawing of dipping process

Motion-Capturing PSP Method

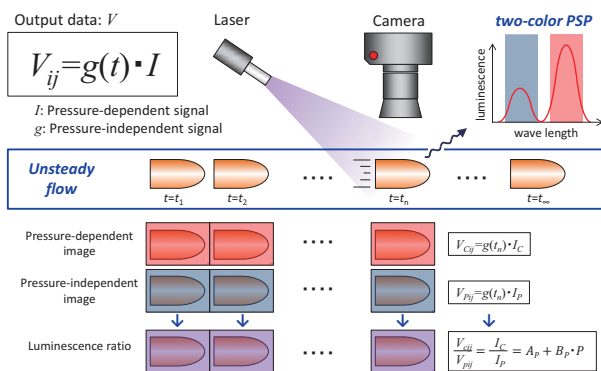


Fig.3 Schematic drawing of Motion-Capturing PSP Method

Experimental setup and dipping conditions

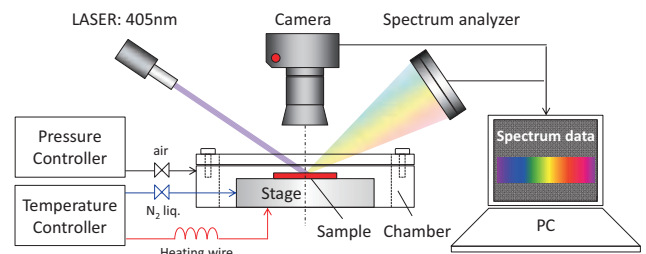


Fig.5 Schematic drawing of experimental setup

Table 1 Dipping conditions

	TSP	PSP
Dipping Liq.	fluorescein(0.3mM)+rhodamine(0.01mM)	Fluorescein(0.1mM)+ruthenium(0.1mM)
Time	5min.	5min.
Temperature	-30, -10, 10, 30°C	-30, -10, 10, 30°C
Pressure	100kPa	100kPa

Spectrum analysis of AA-PSP/TSP; fluorescein, ruthenium, rhodamine

PSP (fluorescein + ruthenium)

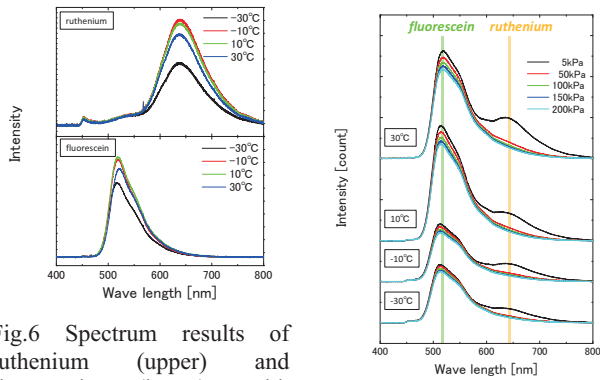


Fig.6 Spectrum results of ruthenium (upper) and fluorescein (lower) with respect to differences of dipping temperature

Fig.7 Spectrum results of ruthenium + fluorescein with respect to differences of pressure

TSP (fluorescein + rhodamine)

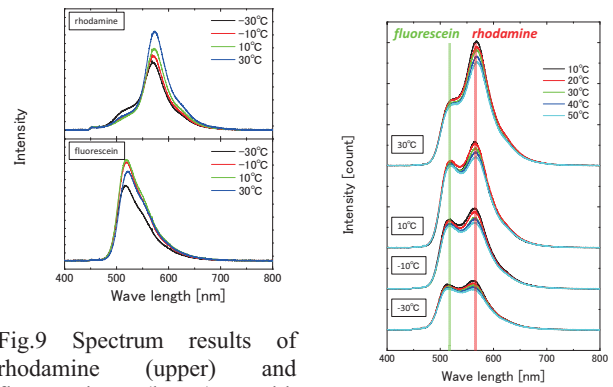


Fig.9 Spectrum results of rhodamine (upper) and fluorescein (lower) with respect to differences of dipping temperature

Fig.10 Spectrum results of rhodamine + fluorescein with respect to differences of pressure

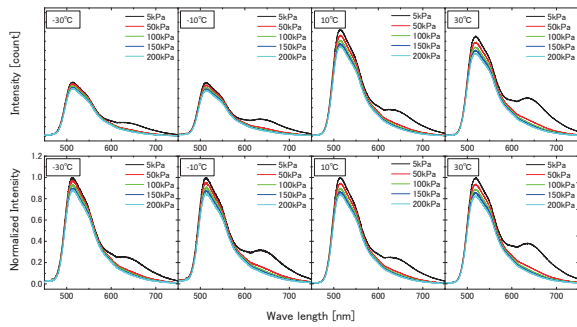


Fig.8 Spectrum results of ruthenium + fluorescein (upper) and normalized spectrum results (lower)

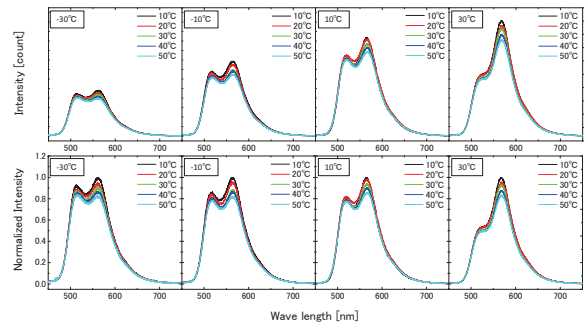


Fig.11 Spectrum results of rhodamine + fluorescein (upper) and normalized spectrum results (lower)

感温色素溶液の濃度による発光量変化

菊池 直樹¹、田中 滯¹、木村 茂雄¹、坂上 博隆²

1 神奈川工科大学

2 JAXA

着氷と呼ばれる自然現象がある。これは空気中に浮遊する微小水滴が冷却され、過冷却水（0℃以下の水）状態となり、それが物体に衝突、凍結し、氷になる現象である。これにより船、電柱、木々、道路標識等に氷が付着し、転覆、倒壊、それによる人身事故等を引き起こし、世界で問題になっている。この着氷問題を解決するにあたって、水滴内部の温度分布を知ること、過冷却状態から凍結状態の過程を解明し着氷対策を施す必要がある。液体の温度を計測する方法で感温色素を用いるものがある。これは溶解液に励起光を照射し、温度による発光量変化により温度を抽出する方法である。過去に2色素を用いて過冷却水温度を計測することに成功している。しかしその技術を噴霧に応用したところ飛翔している水滴直径が微小でありまた含まれる色素量が少ないため温度抽出に必要な発光量が得られていない。

そこで本研究では、現在用いられている感温色素の濃度、発光量、温度の関係を調査した。上方から照射した励起光と垂直に交わるように分光器を配置し Rhodamine-B, 7-Amino-4-methylcoumarin の色素濃度を 0.01、0.05、0.1、0.5、1.0mM、恒温槽で水温を 5、0、-5℃と変化させ分光器により発光量変化を計測した。

その結果、Rhodamine-B では低温になるにつれ発光量が増加しているが濃度が 0.1mM 以上から大幅に減少している(図 3)。これは濃度消光を起こしているためだと考えられ使用可能濃度は 0.1mM 以下である。7-Amino-4-methylcoumarin は濃度と発光量がともに増加していることが 0.5mM 以上の濃度では温度感度が 0.1mM 以下に比べ高くなり温度計測には適していない(図 4)、よって使用可能濃度は 0.1mM 前後だとわかった。今後、2色素溶液で各色素の性質がどのように変化するのか調査する予定である。

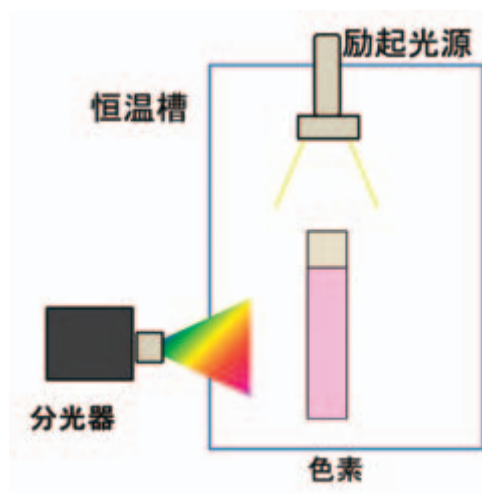


図 1 恒温槽内の装置配置

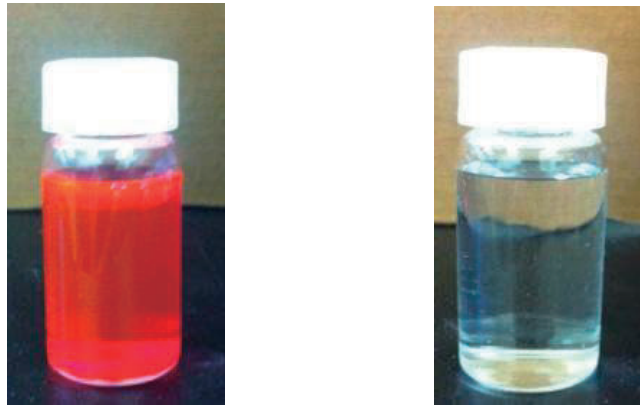


図 2 Rhodamine-B 溶液(左)と 7-Amino-4-methylcoumarin 溶液(右)

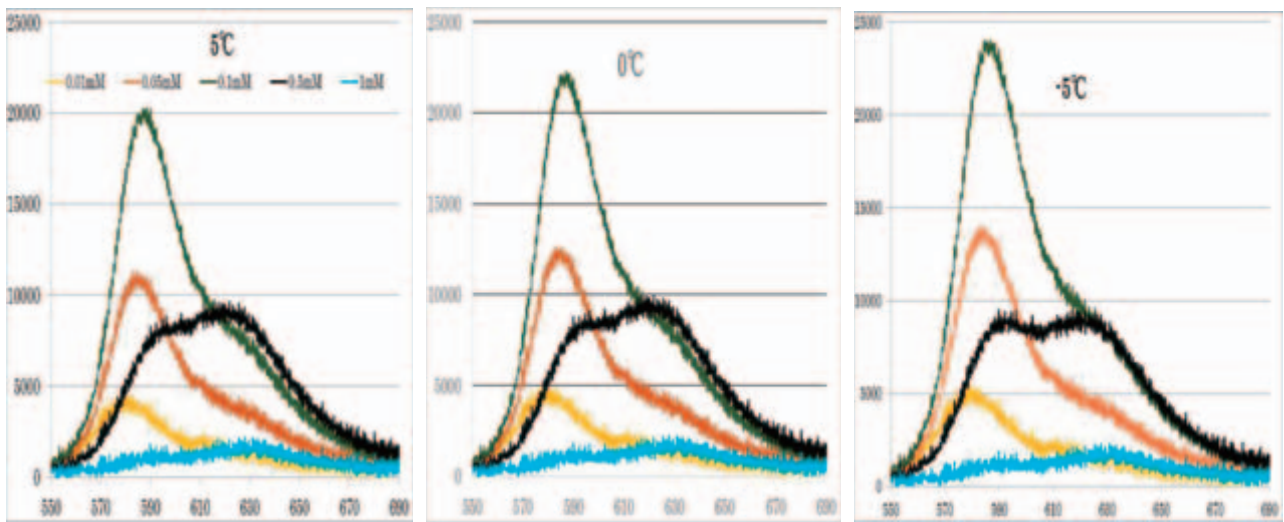


図 3 Rhodamine-B の発光量変化

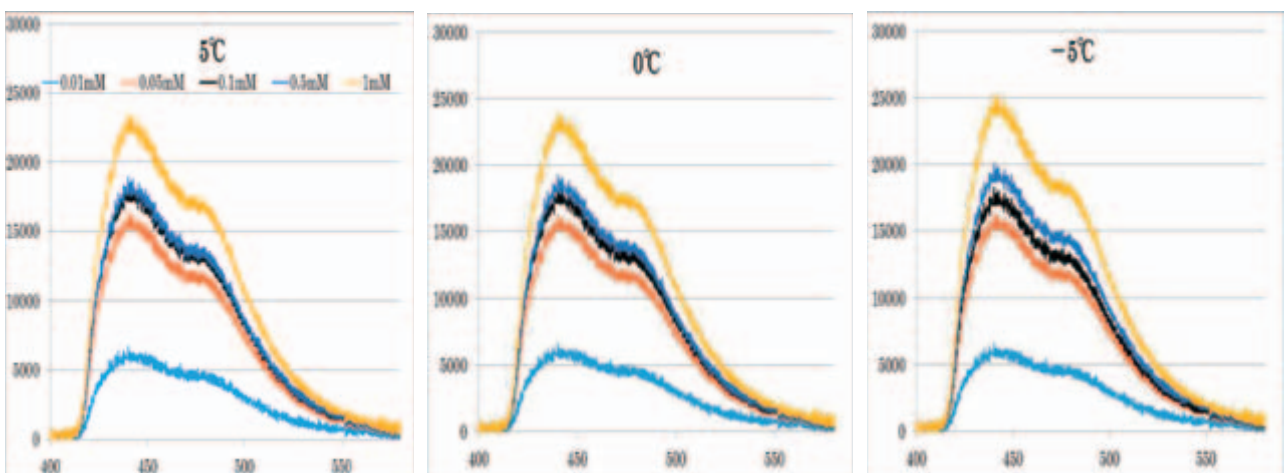


図 4 7-Amino-4-methylcoumarin の発光量変化

二色発光を用いた過冷却水滴の温度計測法

田中滯¹、守田克彰²

木村茂雄¹、坂上博隆²

1 神奈川工科大学

2 JAXA

着氷と呼ばれる自然現象があり、これは空気中に浮遊する微小水滴が冷却され、過冷却水(0°C以下の水)状態となり、それが物体に衝突、凍結し、氷になる現象である。これにより船、電柱、木々、道路標識等に氷が付着し、転覆、倒壊、それによる人身事故等を引き起こし、我々の生活を脅かし、世界でも問題になっている。この着氷の問題を解決するために、微小冷却水滴内の温度を計測し、過冷却状態から凍結状態の過程を解明する必要がある。微小水滴の温度計測をする上で、非接触で面計測が可能で、かつ微小領域が計測可能な方法が必要になる。熱電対などの接触型での温度計測は過冷却水滴の温度計測には適さないので、新たな計測法が必要になる。

そこで冷却水滴の温度計測にするために、二種類の色素(図 1)と高速カラーカメラ(図 2)用い、撮影した発光画像から過冷却水の温度分布計測を行なう Dual-Luminescent Imaging System(図 3)を開発した。

それを用いて発光画像から静的状態と動的状態の過冷却水滴の温度計測を行ってきた。だが、過冷却状態が解消され、凍結する際に色素が凝集する可能性がある。凝集が起きているのか調べるため、色素の発光量変化を予想し(図 4)、発光量計測を行った。

計測の結果、Rhodamine B と 7-Amino-4-methylcoumarin で発光量の増加が確認できなかったため、色素の凝集が起きていないことが分かった(図 5)。だが、色素の発光減少の原因がわかっていない。今後、より微小な領域での色素の発光状態を計測し、凍結時に色素がどのような状態になっているかを確認する。

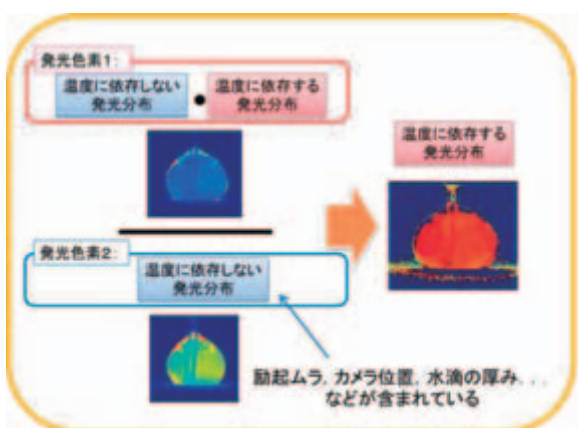


図 1 : 温度に依存する発光分布の抽出方法

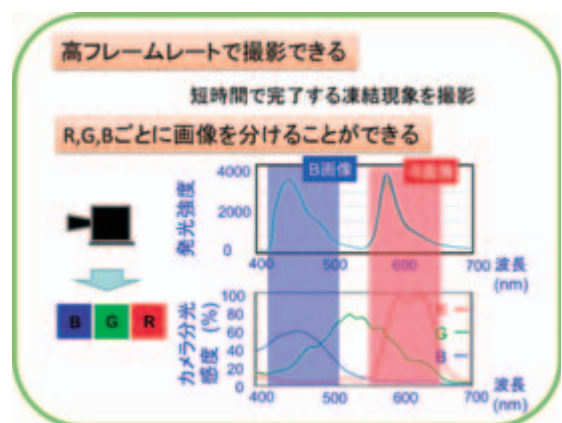


図 2 : 高速カラーカメラを使用する利点

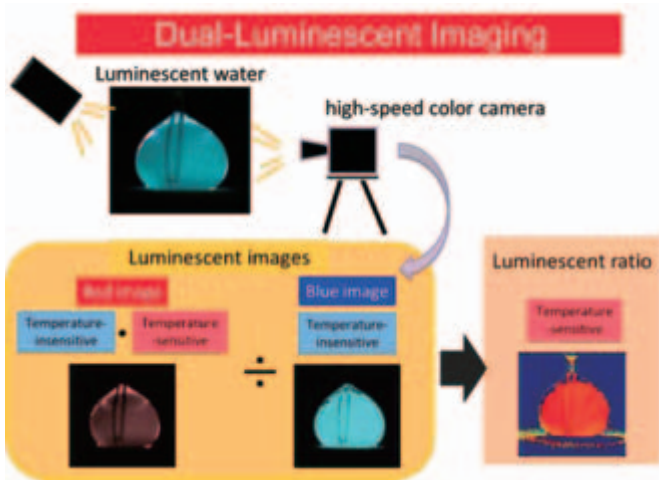


図 3 : Dual-Luminescent Imaging System

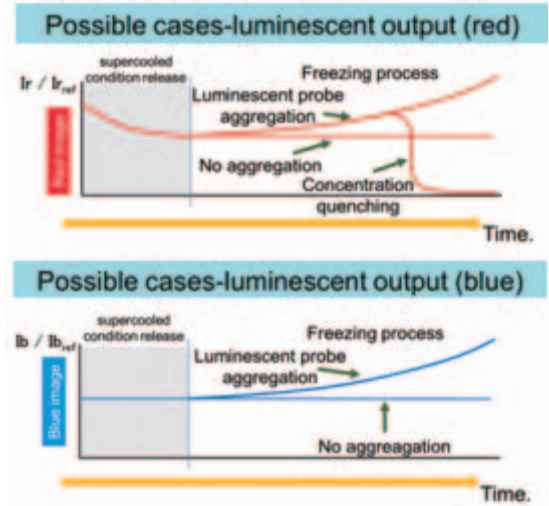


図 4 : Possible cases-luminescent output

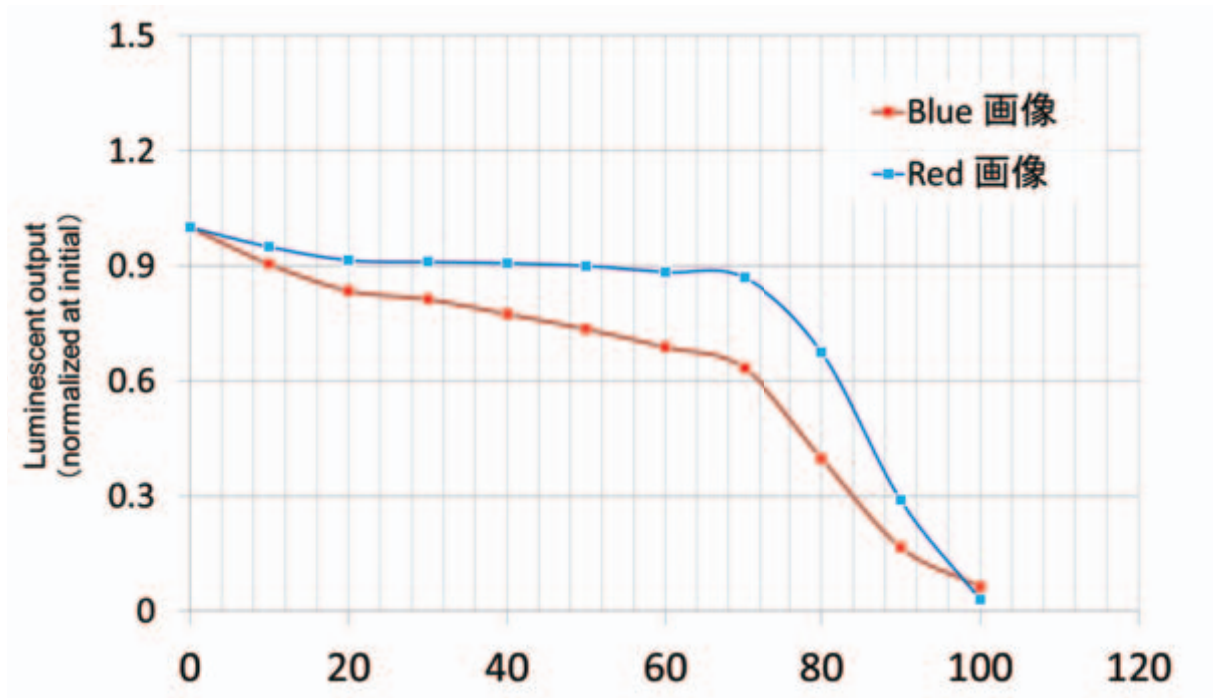


図 4 : Luminescent output result

レーザー誘起蛍光法によるマイクロ超音速ノズル内流れの数密度測定法に関する研究

田中晃平*, 神原秀仁**, 半田太郎***

*九州大学 大学院総合理工学府

**九州大学工学部

***九州大学 大学院総合理工学研究院

本研究では、スロート高さ286 μm 、出口高さ500 μm の二次元マイクロ超音速ノズル内における流れの数密度分布を、アセトンシードとしたレーザー誘起蛍光法で測定した。本研究グループの過去の研究⁽¹⁾により波長266nmのNd:YAGレーザーで励起したアセトンの蛍光強度は温度にほとんど依存せず、流れの数密度のみの関数となることが分かっている(図1)。特性曲線法で設計したマイクロノズルの中心軸上にレーザービームを照射し、ビーム上の蛍光強度をイメージインテンシファイア付きのCCDカメラで取得した(図2)。蛍光強度分布を図1に示す蛍光強度と数密度の関係をを用いると流れの数密度分布が求まる(図3)。本測定結果をナビエ-ストークス方程式に基づく数値解析と比較すると、測定結果は数値解析と良く一致し、本測定法がマイクロノズル内部の流れの状態量を測定するのに極めて有効な手法であることが実証された。

(1) Handa, T., et al., "Measurement of Number Densities in Supersonic Flows using a Method Based on Laser-Induced Acetone Fluorescence", Experiments in Fluids 2011, vol. 50, pp.1685-1694.

$$S_F = \eta_{\text{opt}} \frac{I}{hc/\lambda} dV_c n_{\text{ac}} \sigma(\lambda, T) \phi(\lambda, T, n) \quad (1)$$

S_F : 蛍光強度	η_{opt} : 集光効率
I : レーザー強度	h : プランク定数
c : 光速	λ : レーザー波長
dV_c : 検査体積	n_{ac} : アセトンの数密度
σ : 吸収断面積	ϕ : 蛍光放出率
n : 流れの数密度	T : 温度

$$S_F = C n_{\text{ac}} \phi_{\lambda=266\text{nm}}(n, T) \quad (2)$$

$\phi_{\lambda=266\text{nm}}$: レーザー波長266nmにおける蛍光放出率

C: 定数

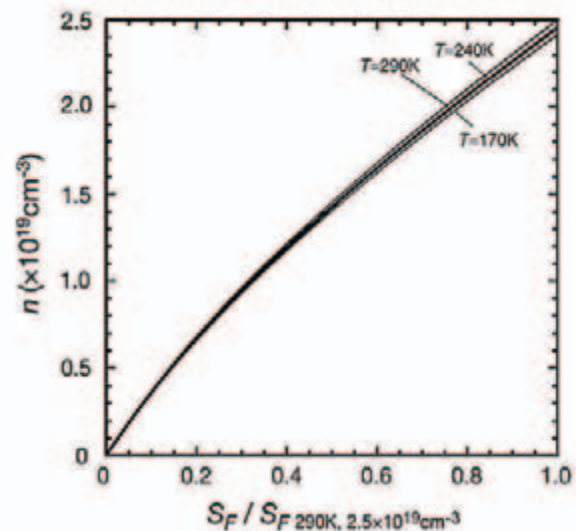
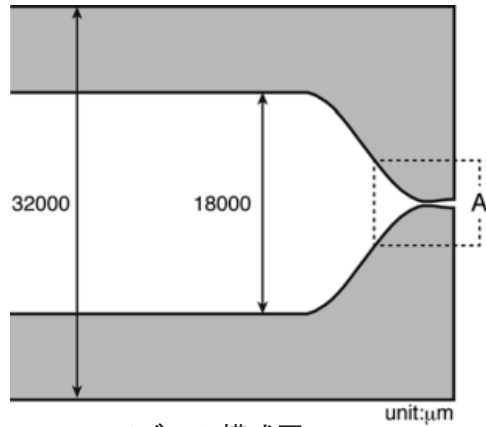


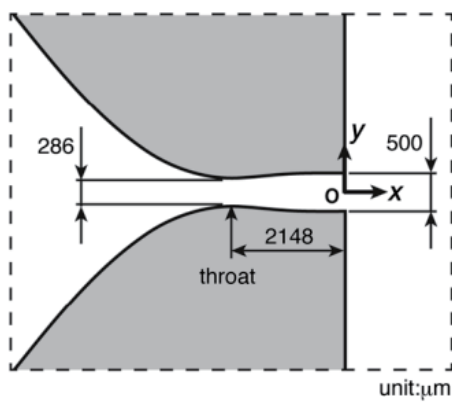
図1: アセトンの蛍光特性。式(1)はアセトンの蛍光強度を表す一般的な式。式(2)は波長266nmのレーザーで励起したときのアセトンの蛍光強度を表す式で、アセトンの蛍光強度は右図のように温度にほとんど依存せず、流れの数密度のみの関数とみなせる⁽¹⁾。



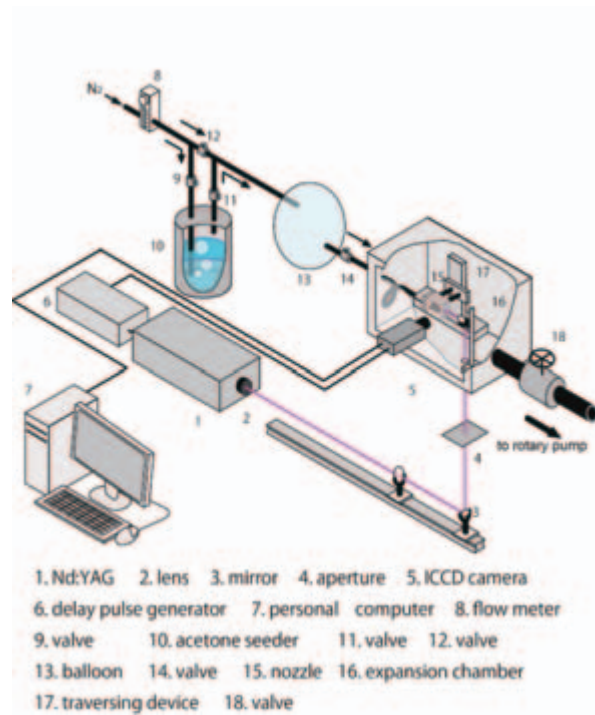
ノズルの模式図



マイクロノズルの写真



Aの拡大図



実験装置の模式図

図 2: マイクロノズルと実験装置の模式図. レーザーは流れの下流からノズル中心軸に沿って照射.

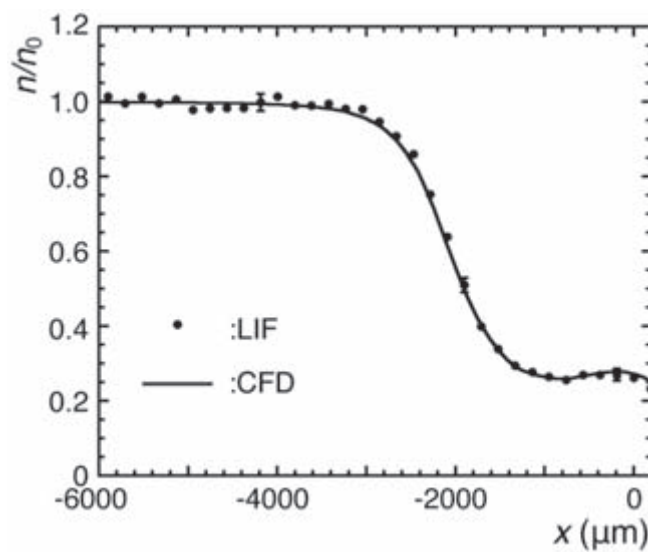


図 3: レーザー誘起蛍光法で測定したノズル中心軸上の数密度分布(測定結果と数値解析結果の比較).

感温2色発光溶液を用いた液体温度計測

呉屋英樹¹, 宮寄武², 坂上博隆³

1: 電気通信大学院 情報理工学研究科 (JAXA 研修生)

2: 電気通信大学院 情報理工学研究科

3: JAXA 航空本部

熱流体工学の分野において現象の解明で温度とは重要な指標である。現象の例を挙げるとすれば対流現象や沸騰現象などがある(図1)。これらの現象は非定常かつ微小な領域での現象であり、従来法では温度計測が難しい。そこで、新たな温度計測方法として、航空宇宙分野において研究開発されている感圧塗料(Pressure-Sensitive Paint: PSP)、感温塗料(Temperature-Sensitive Paint: TSP)を用いた光学的面圧力・温度分布計測に着目した。本研究では、坂上らにより報告されている Motion Capture TSP 法の計測システムを液体に適応し、温度分布計測を行った。

図2のような2色発光色素を作成し、図3で示すような特性を持つ高速カラーカメラを用いた計測システム(図4)を開発した。レーザーシートを用いて励起することで、溶液の任意の場所を計測することができる。

実際に温度計測を行った結果が図5、6、7である。図5は溶液を入れたセルの底面を連続的に過熱した時の温度変化である。セルの底壁面から温度が上昇している様子がわかる。図6は図5中の 70s~80s間の 0.5sごとの画像である。底壁面で温められた液体が上昇する様子が見て取れる。図7は 74°Cに温めた溶液に 24°Cの溶液を滴下した場合の温度変化である。図の画像は 6.7ms ごとの画像である。上から滴下したため、レーザーシートは横から照射している。その結果計測範囲が狭くなってしまった。また、滴下した溶液をブレなく捉えるためにカメラの露光時間を短くした結果、取得した発光画像が暗くなってしまい、定量的とは言い難い計測結果となった。しかしながら滴下した溶液の形状変化、温度変化といった定性的な面は計測することができた。

今後は図7の実験を定量的かつ更に広い範囲で計測するために、励起光の改善や発光色素の改善などを行う。また、沸騰現象などの液相から気相への相変化が起こる場合の液体側の温度計測を行う。

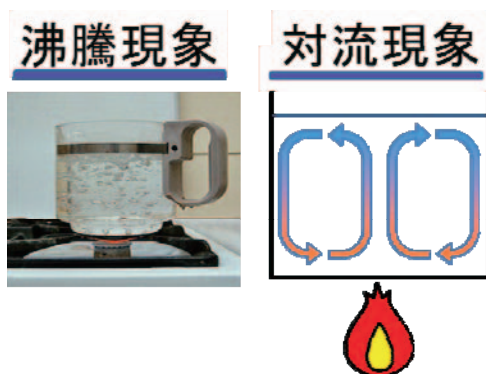


図1. 沸騰現象や対流現象

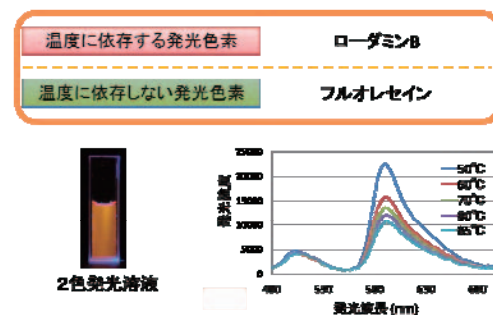


図2. 感温2色発光溶液

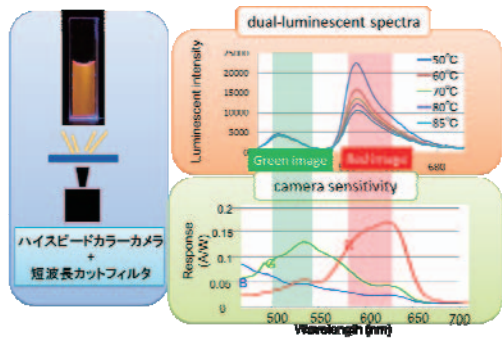


図3. 高速カラーカメラ

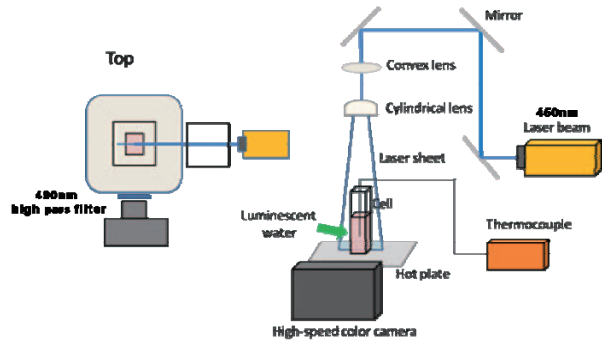


図4. 計測システム概要

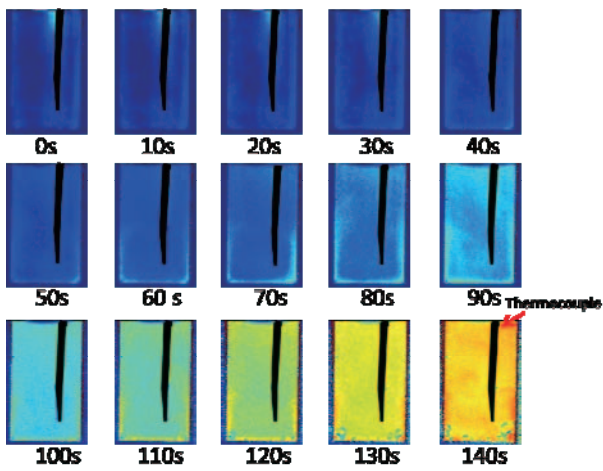


図5. 溶液加熱時の温度変化

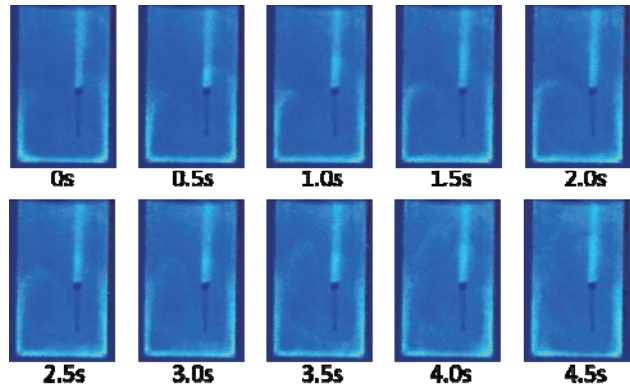


図6. 上昇流の様子

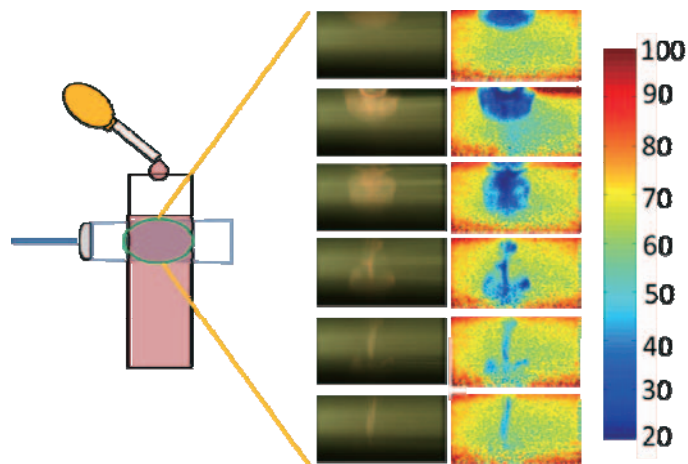


図7. 温度が違う液滴を滴下した場合の温度変化

AA-PSP による超音速流中での前向き凹状物体内部の圧力変動の可視化

末木未来*, 杉木康彦*, 山田和彦**, 安部隆士**, 水書捻治***

*東海大学大学院 工学研究科

**JAXA 宇宙科学研究所

***東海大学 工学部

超音速流中の前向き凹状物体(半球殻)前方に発生する離脱衝撃波では, 模型内部の周期的な圧力変動に起因する大変形が観測される場合がある¹⁾²⁾. この大変形は半球殻内部で離脱衝撃波から流入する渦層に起因する模型内部での圧力波の共鳴に起因することが著者らの研究から明らかになった. そこで, 本報では高速応答型感圧塗料(AA-PSP)(図1)を利用した半球殻内面の圧力場変動³⁾⁴⁾の計測結果と別途実施した円筒模型による超音速流中での気柱共鳴圧力場計測(図2)の結果から, 半球殻内部での圧力変動の共鳴について考察した. 半球殻模型と等価な L/D (空隙深さ/開口部直径)を有する円筒型模型内部の圧力場計測結果から内部で 1250 [Hz]前後の共鳴が発生していることがわかった(図3¹⁾). この結果は, AA-PSP 処理した半球殻模型を利用した可視化結果(図4, 5)の考察を補完するものとなった.

参考文献

- 1) 畠中和明, 斎藤務, 水書捻治, 超音速流中の半球殻周りの非定常流れ場に関する数値解析 衝撃波シンポジウム講演論文集 pp323-324 (2013)
- 2) 平木講儒, 超音速領域における半球殻の空力特性に関する研究, 東京大学大学院修士論文, (1992)
- 3) 亀田 正治, 浅井圭介, 中北和之 高速応答型感圧コーティング ながれ 22 299-307 (2003)
- 4) Kazuyuki Nakakita and Keisuke Asai, Pressure-sensitive paint application to a wing-body model in a hypersonic shock tunnel, AIAA-2002-2911

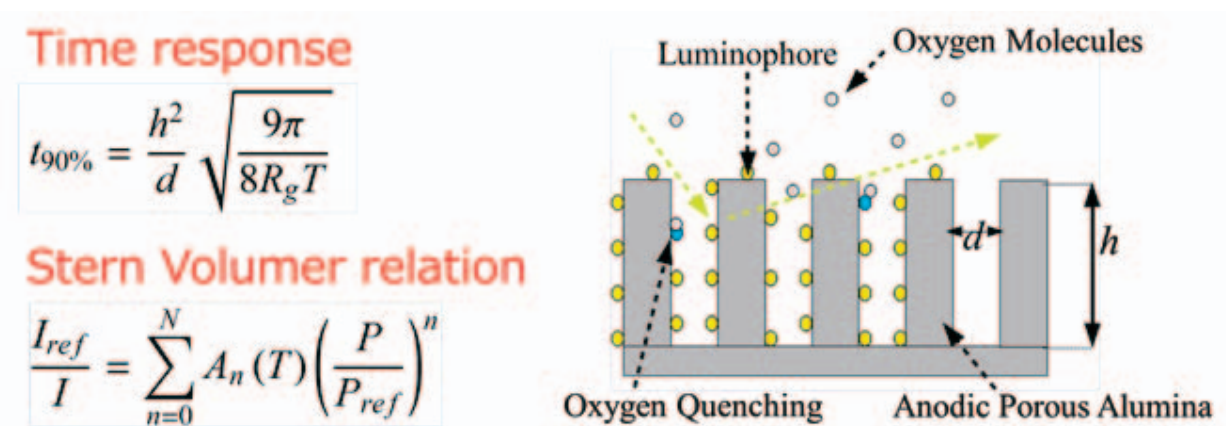


図1 AA-PSP の基礎式と概念図.

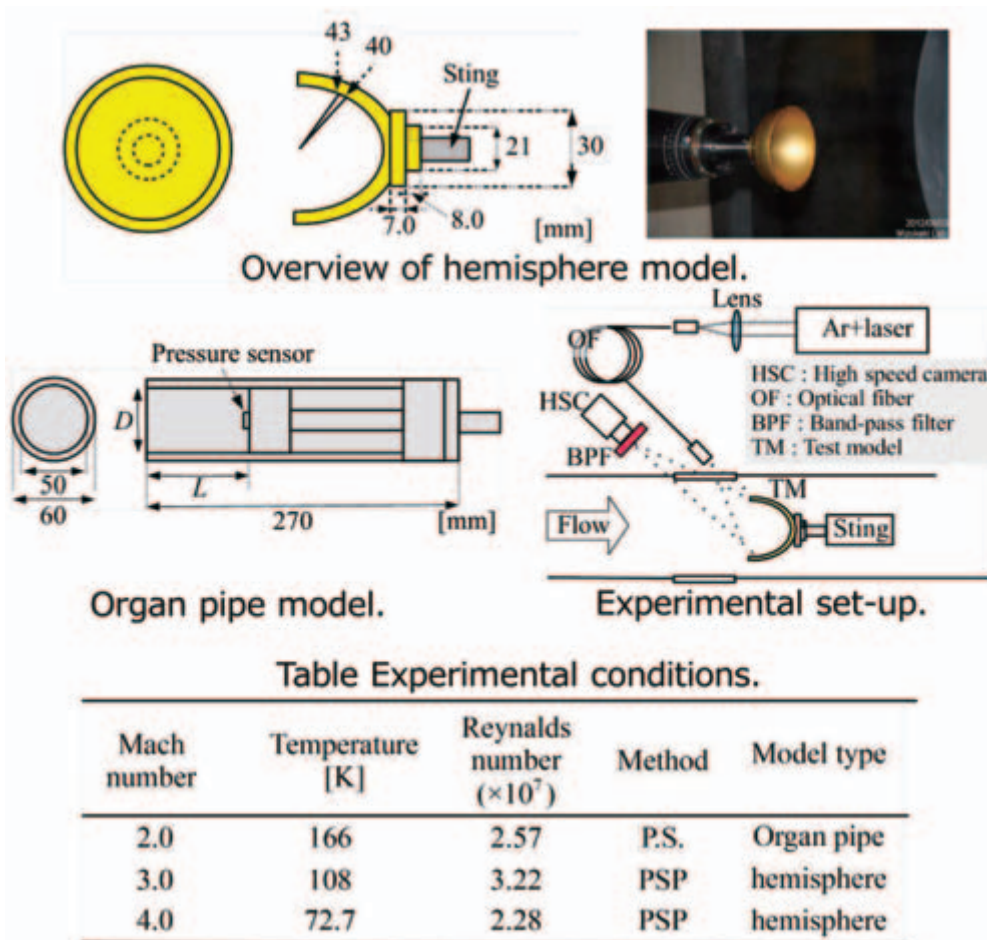


図2 半球殻模型実験と円筒模型実験の概要.

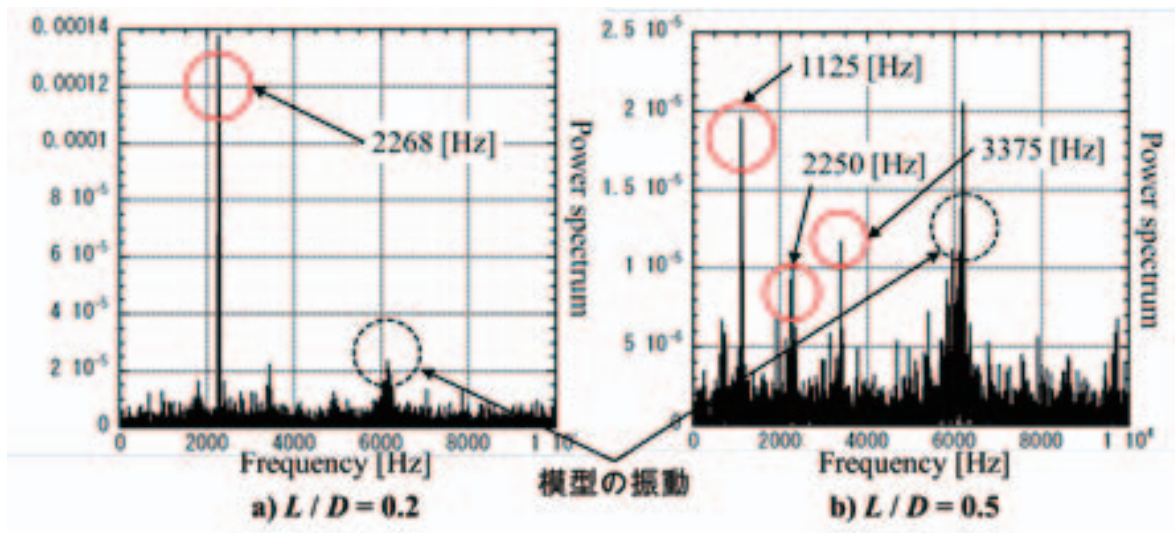


図3 気柱模型内部圧力 FFT 解析結果.

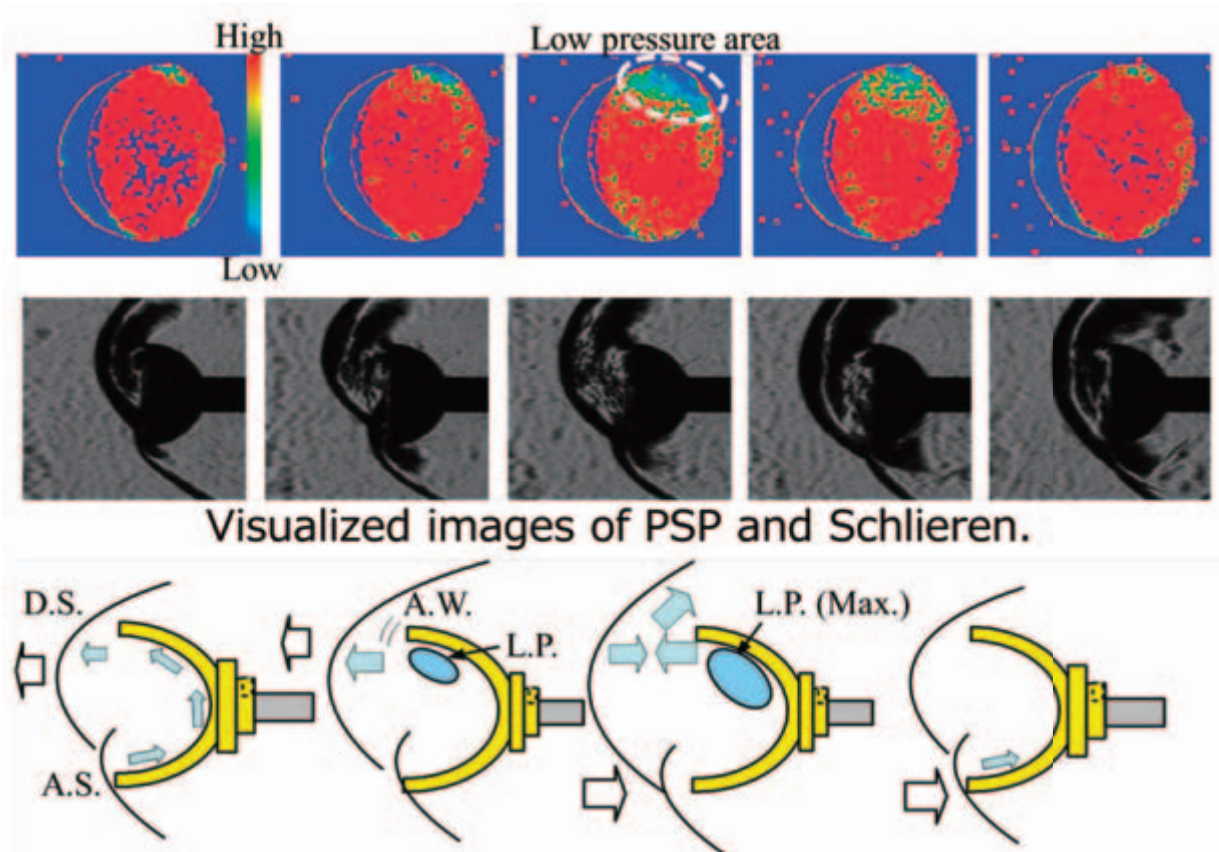


図4 AA-PSPによる半球内部圧力可視化画像(上), シュリーレン画像(中), 半球内部流れ場の推測(下).

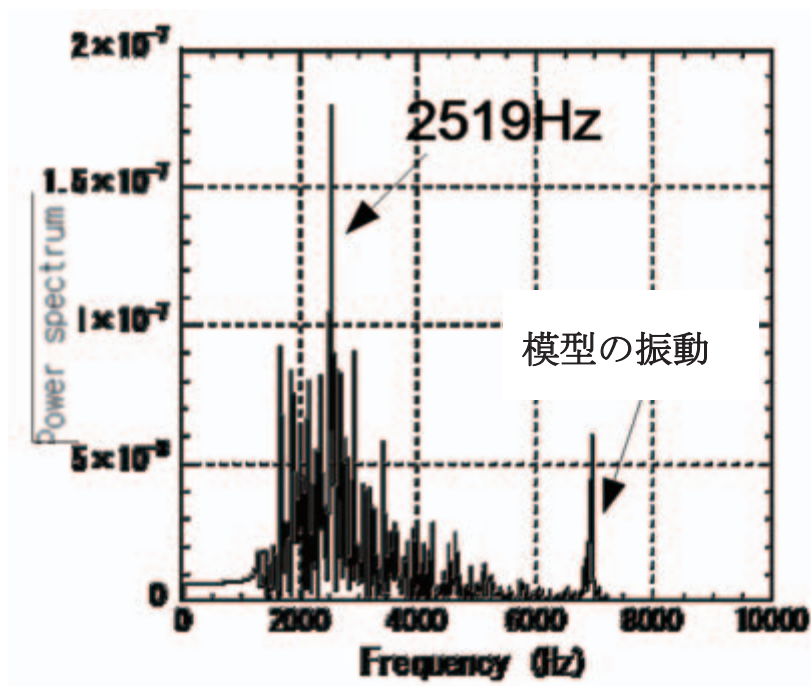


図5 半球模型内部圧力 FFT 解析結果.

低ゲージ圧領域への PSP の適用

森英男, 大村尚登, 前田恭平, 内田祐樹, 竹田敬士郎

九州大学大学院 工学研究院 機械工学部門 流体科学研究室

ゲージ圧の小さい低速流れ場への感圧塗料(PSP)の適用において, 計測精度の向上には誤差要因の特定および対策が非常に重要である. 例として, 絶対圧の変化割合の小ささによる測定限界の問題や, PSP の温度依存性による誤差が相対的に大きくなることが挙げられるが, プロペラファン翼面など大面積かつ曲率が高い対象物の場合, 塗りむらや照射光強度分布の不均一性が及ぼす誤差も無視できない. 本研究では, これらの誤差要因を補正する各手法について, ゲージ圧の小さい低速流れ場の計測へ適用した場合における補正効果および問題点について検証する. プロペラファン翼形状は翼の回転に伴う変形の影響を受けるため, 回転時(試験条件)と停止時(参照条件)における照射光強度分布が異なり, 計測精度に大きな誤差を及ぼす. またこのとき, 異なる翼間で翼形状の非対称性が現れるため, 異なる翼面へ PSP と TSP を塗り分ける手法では正しく温度補正を行うことができない. そのため本研究では, 照射光強度補正を目的として BBOT 色素を PSP と複合¹⁾させる手法および重ね塗り PSP/TSP²⁾による圧力と温度の同時計測手法をプロペラファン翼面上に適用する. BBOT 色素を PSP 中に混合させる場合, BBOT の混合割合が小さいと BBOT の発光に擬似的な圧力依存性が現れるため, BBOT の混合割合を十分大きく取る必要がある(図1). また重ね塗り PSP/TSP において, Ru-phen ベースの TSP および ZAIS³⁾ベースの TSP について比較を行った. BBOT を含まない PSP との重ね塗りでは両者とも良好な特性を示したものの, BBOT を含む PSP と ZAIS ベースの TSP との重ね塗りでは, PSP の劣化を促進される問題点が明らかとなった(図2). 以上の結果を踏まえ, BBOT を含む PSP と Ru-phen ベースの TSP を用いた重ね塗り PSP/TSP をプロペラファン翼面上へ適用した. その結果, BBOT を利用した照射光強度分布補正を適用することで, PSP の圧力計測精度向上効果がみられた(図3). なお, TSP を適用した温度補正においては, TSP の温度計測精度に問題があったため, 今回の実験では PSP の圧力計測精度向上の効果は確認できなかった. TSP の温度計測向上については今後の課題である.

参考文献

- 1) 原達矢, 中嶋亮太, 沼田大樹, 浅井圭介: 動的風洞試験への適用のための複合感圧塗料の開発, 可視化情報, Vol.33 Suppl. 1 (2013) pp. 487-492.
- 2) Moon, K.J., Mori, H., Ambe, Y., Kawabata, H.: Development of Dual-layer PSP/TSP System for Pressure and Temperature Measurements in Low-speed Flow Field, Proc. of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011 (2011) AJK2011-11020.
- 3) Matsuda Y, Torimoto T, Kameya T, Kameyama T, Kuwabata S, Yamaguchi H and Niimi T. ZnS-AgInS2 nanoparticles as a temperature sensor, Sensors and Actuators B, Vol. 176, pp 505-508, 2013.

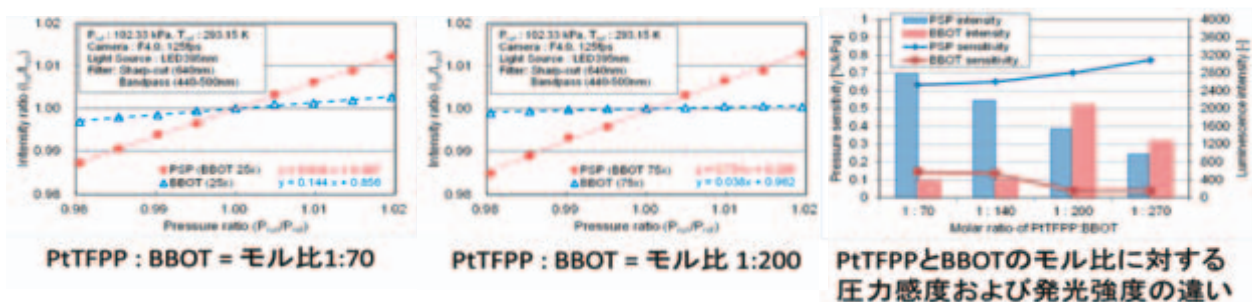


図1 BBOT を配合した PSP の圧力感度および発光強度特性

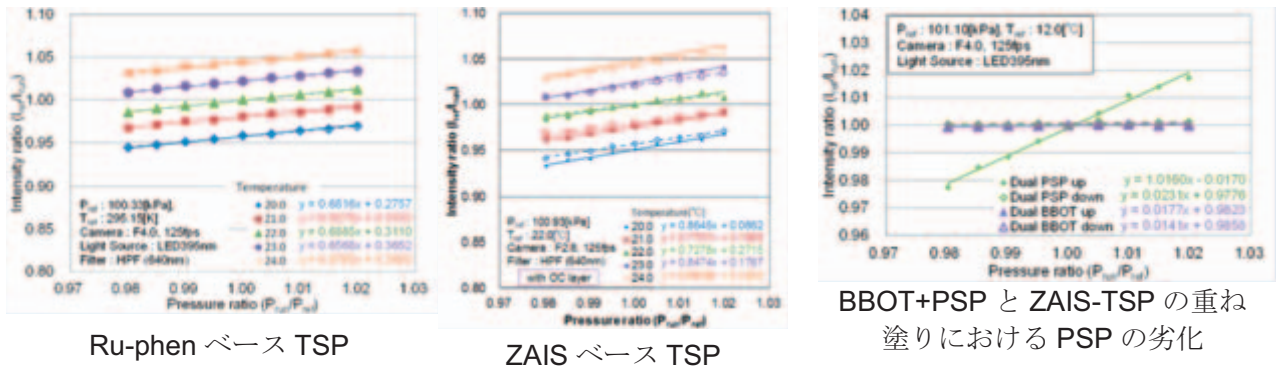
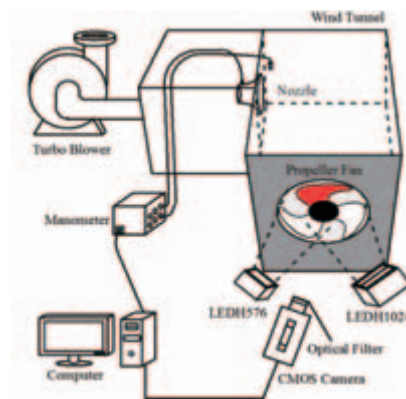
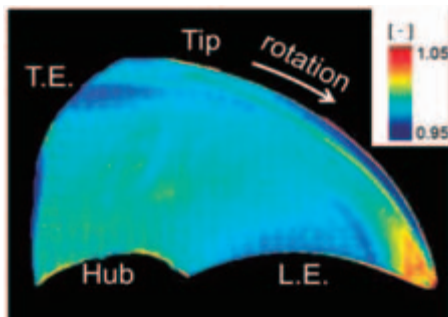


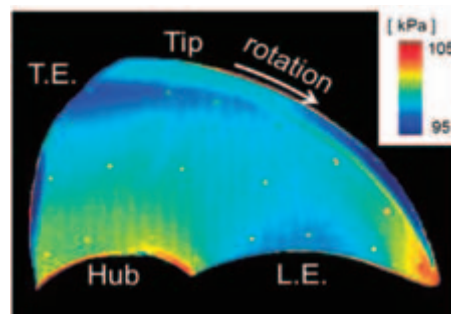
図2 重ね塗り PSP/TSP の圧力分布



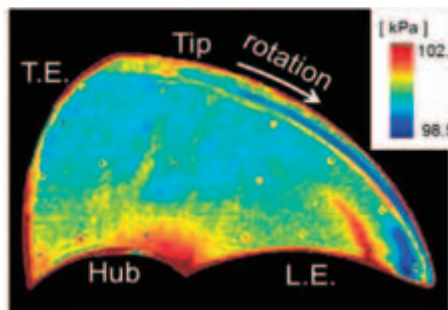
(a) 測定対象の翼面形状および実験装置の概略図



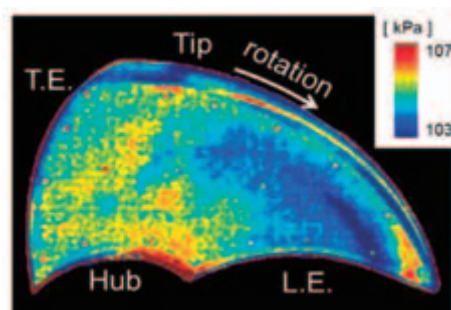
(b) 照射光強度分布の比



(c) 照射光強度補正なし



(d) 照射光強度補正あり



(e) 照射光強度+温度補正あり

図3 プロペラファン翼面上の圧力分布計測結果

感圧塗料 (PSP) を用いた回転体表面圧力分布計測

栗原 大輝¹, 石川 仁², 坂上 博隆³

1: 東京理科大学 (JAXA 研修生)

2: 東京理科大学

3: JAXA 航空本部

回転体表面における圧力分布および温度分布の計測は計測機器の配線や材料強度の問題により困難である。そこで非接触計測可能な PSP 計測に着目した。従来の PSP 計測(強度法)では、リファレンス画像と流体計測中の画像との間で光学設定の位置が変化しないことが前提となる。そのため、試験体に変形を伴う計測、試験体の位置が時間変化する計測、再現できない自由飛翔体の計測には適用することができない。しかしながら、Motion Capture PSP 法(図 1)を用いることでそれらの計測は可能となる。発光波長の異なる 2 色の発光色素を用いて PSP を作成し、高速度カラーカメラにてカラー画像を取得する。一方をリファレンス画像、もう一方をシグナル画像として用いる手法である。従来の PSP 計測(強度法)に比べ、動いている試験体の圧力分布計測が可能という点で優れる。この計測法を確立することで、Helicopter Blade や Jet Engine 内部の圧力分布計測が可能になる。

本研究では、上記の Motion Capture PSP 法を“Helicopter Blade を模擬した試験体”へ適応した。試験体に塗布する PSP と同一の PSP を塗布したアルミ板を用いて校正試験器(図 2)で試験を行った。画像計測ではブレードの回転数を 1,000 [rpm](16.7 [Hz])から 6,000 [rpm](100 [Hz])を 1,000 [rpm]ごとに計測した。負圧面において圧力分布を取得できた。しかし、1,000 [rpm]と 6,000 [rpm]において圧力分布が大きく変化していない。圧力差が小さく、発光量変化が小さいためであると考えられる。今後は発光量が大きく、圧力感度も高い 2 色発光の PSP を作成し計測することやより圧力差を生じる風洞内での実験を行う。

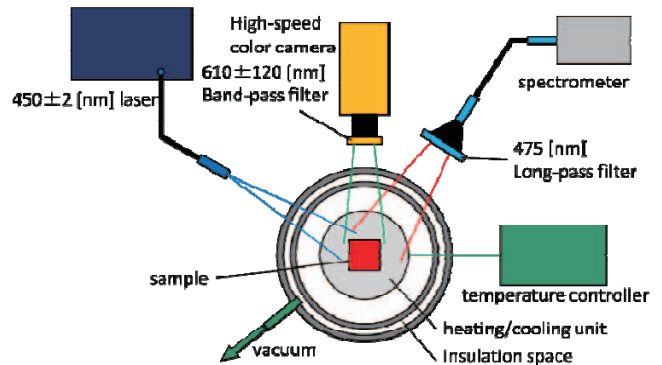
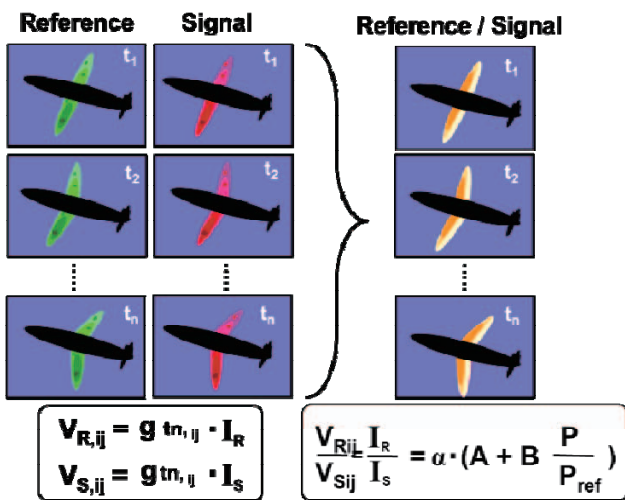


図1 モーションキャプチャーPSP法

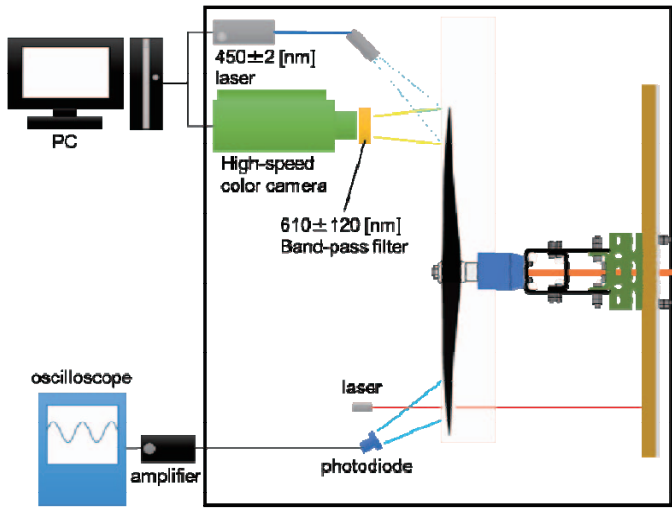


図3 実験装置

図2 校正試験器

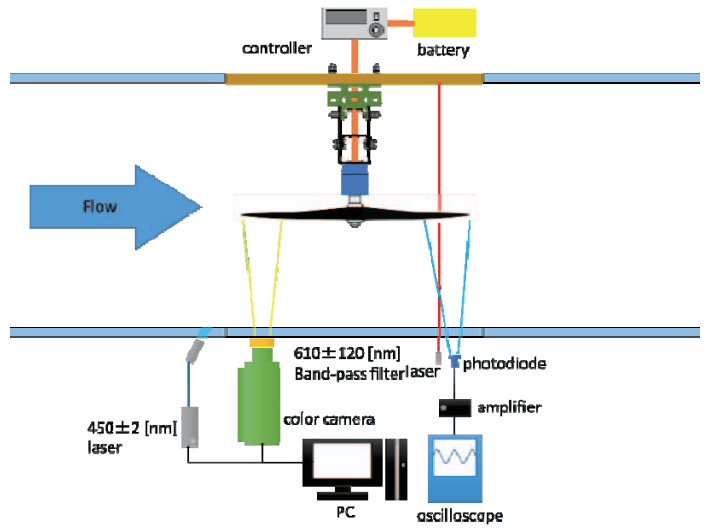


図4 実験装置改修予定図

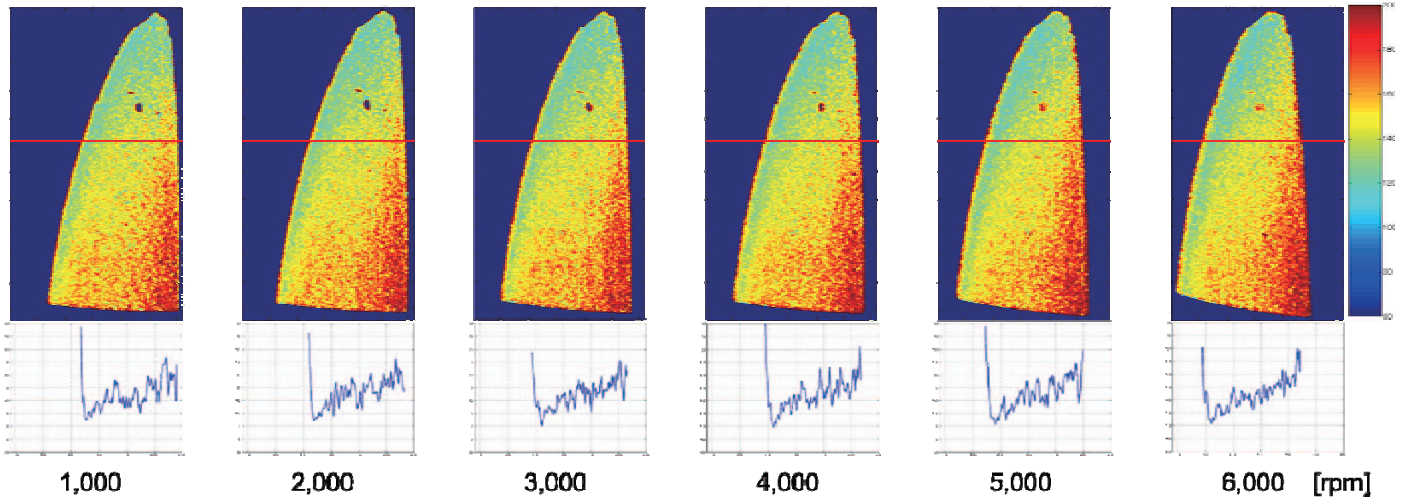


図5 実験結果

Motion Capture PSP 法を用いた 1.27 m 極超音速風洞試験

山田 有希¹, 宮崎 武², 坂上 博隆³

1, 電気通信大学 情報理工学研究所 (JAXA 研修生)

2, 電気通信大学 情報理工学研究所

3, JAXA 航空本部

PSP を用いた風洞計測技術として, 低速・極超音速領域への適用は PSP 自体の温度依存性により困難である. 特に極超音速領域では, 温度変化が大きく, 風洞特性によってよどみ点温度が 900K 近くになるためにポリマーが溶けて変性してしまう. それに対し, 陽極酸化皮膜 PSP (AA-PSP) を用いることで PSP の温度限界を拡張することができる^[1]. 図 1 に AA-PSP の概要図を示す. 陽極酸化皮膜は融点が 930K であり, その温度近くまで特性を維持できると考えられる. また, PSP 自体の温度依存性に関しては Motion Capture PSP 法が坂上らにより報告されている^[2]. Motion Capture PSP 法は, 2 色発光 PSP を作製することで模型の位置が時間と共に変化してもその表面圧力を計測できる方法である. 同時に温度依存性が等しい 2 つの発光色素を組み合わせることで, 発光強度比の値をどの温度であっても 1 とすることが出来る. そのため温度変化による PSP の発光量変化の影響をキャンセルすることが可能となる(図 2). 本研究では, Motion Capture PSP 法と陽極酸化被膜 PSP を組み合わせて世界最大級である JAXA1.27m 極超音速風洞試験を行い, 温度に独立な圧力分布画像の取得, さらには模型投入中の表面圧力画像の抽出を目指した. 図 3 に実験設定の模式図を示す. 模型投入時(トリガ入力時)を 0 秒としている. 図 4 に本試験で使用した発光色素の温度較正試験結果を示す. この結果から温度依存性の影響を 57%軽減することに成功した. 試験の初めに AA-TSP (Temperature Sensitive Paint) 模型^{[3][4]}を用いて, 投入中の表面温度分布と気流中で安定した状態における表面温度分布を計測した(図 5, 6). その後, AA-PSP 模型^{[3][4]}を用いて同様に投入中と気流中で安定した時の表面圧力分布を計測した(図 7, 8). 温度計測においては投入中の温度変化を捉えることは出来なかったが, 模型先端部における温度上昇の様子が見られた. 圧力計測においては衝撃波の衝突による圧力増加を計測することが出来た. 今後は模型表面に一様に色素を吸着させる方法を考え, より温度依存性の等しい色素の組み合わせの選定を行う.

[1] Sakaue, H., *Review of Scientific Instrument*, vol76, No.8, 2005.

[2] Sakaue, H., Miyamoto, K., Miyazaki, T., *Journal of Applied Physics*, vol13, No.8, 2013.

[3] Nakakita, K., et al, "Pressure Sensitive Paint Measurement in a Hypersonic Shock Tunnel," AIAA-2000-2523.

[4] Ishiguro, Y., et al, "Visualization of Hypersonic Compression Corner Flows using Temperature- and Pressure-Sensitive Paints," AIAA-2007-118.

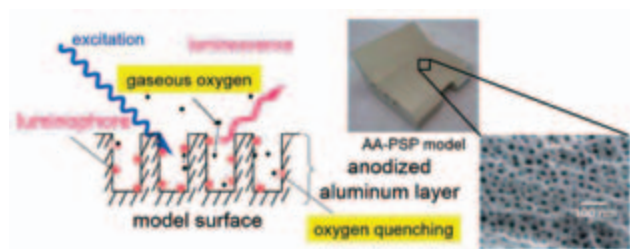


図 1 AA-PSP 概念図

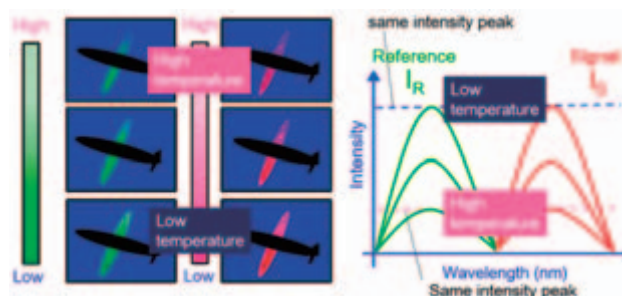


図 2 温度キャンセリング法

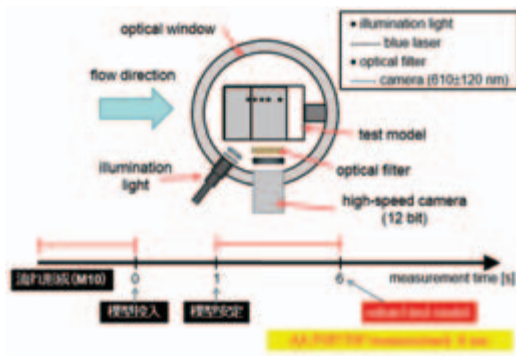


図3 実験設定模式図

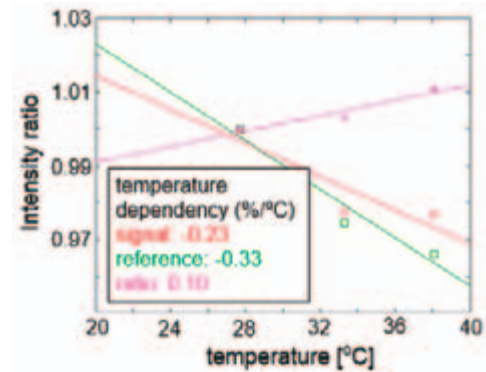


図4 温度較正試験結果

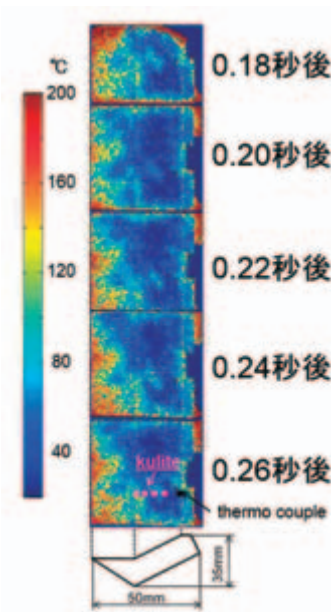


図5 模型投入中における表面温度分布画像

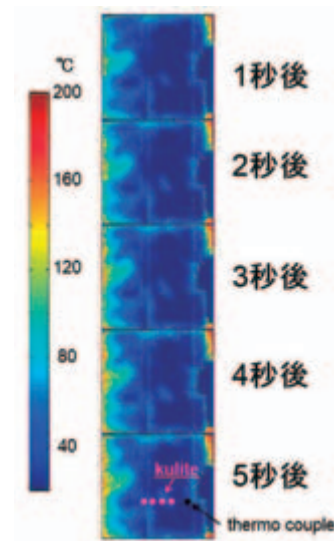


図6 模型投入中における表面温度分布画像

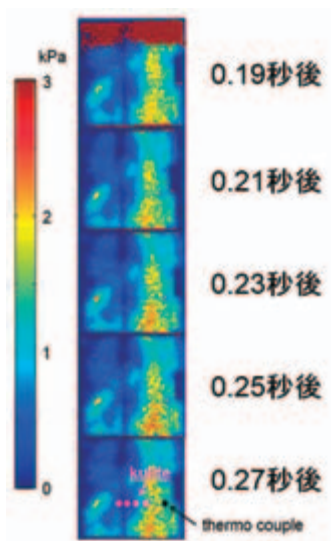


図7 模型投入中における表面圧力分布画像

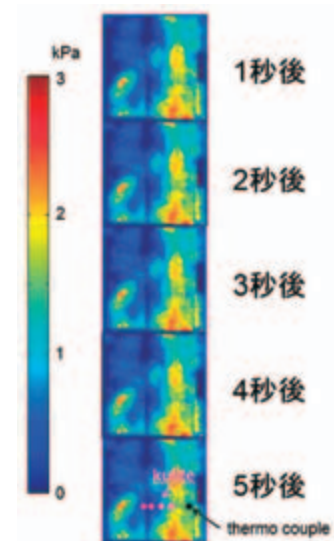


図8 模型投入中における表面圧力分布画像

