

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J

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

構造健全性トリアージの提唱

構造健全性トリアージの提唱

医学用語のトリアージとは

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リアージ**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用いた橋梁のき裂検出



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

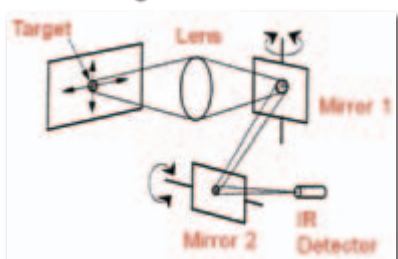
赤外線センシングの歴史

- 1800 W. Herschel による赤外線の見
- 1821 Seebeck 効果の見
- 1829 熱電対の発明 (Nobili)
- 1833 サーマパイルの発明 (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

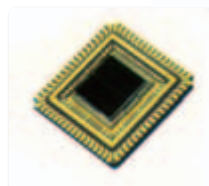
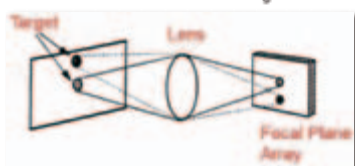
1960s サーマグラフィの第1世代の始まり

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
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 小型軽量化による現場適応性, 価格競争による低価格化									
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
<div>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 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</div>									
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 256×200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リニア検出器(アルゴンガス冷却)

波長域 3~5.4 μ m

温度分解能 0.1K

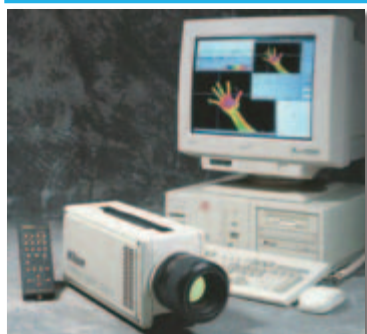
計測速度 20 frames/s

データ 256×200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 811×508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 256×256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



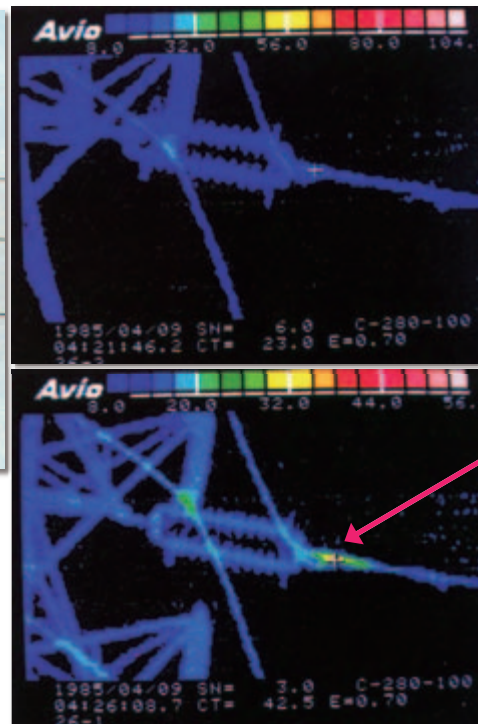
CEDIP Titanium (FLIR SC-7500)
MCT FPA検出器(スターリングクーラー冷却)
波長域 7.7~9.3 μ m
温度分解能 0.02K
計測速度 250 frames/s
データ 320×256画素, 12ビット
重量 4.9kg

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

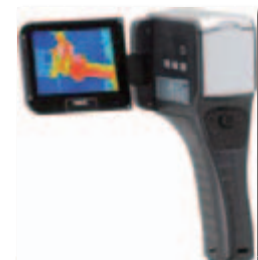
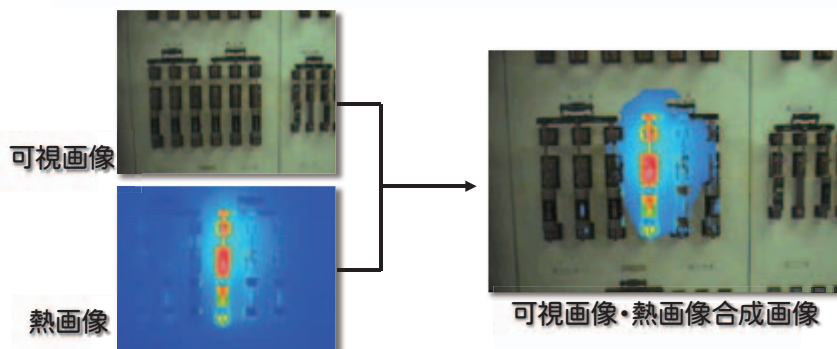


不良部分

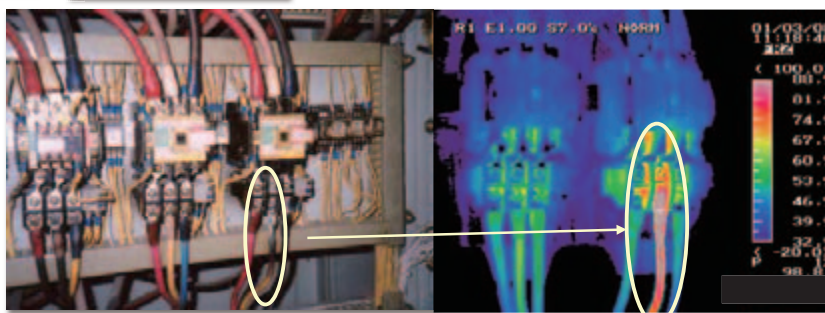
電気設備の状態監視への適用

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



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

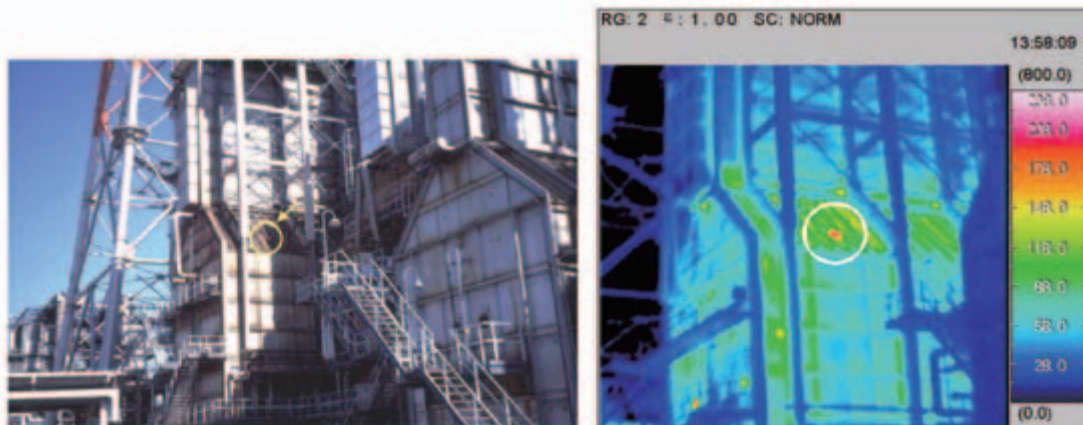


← 端子が腐食し高熱となっている事例

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

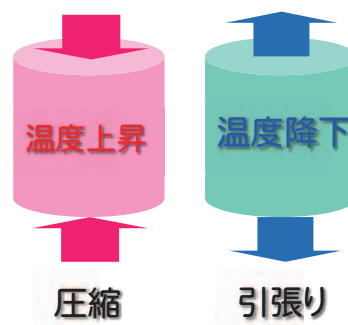
熱弾性応力計測の原理

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

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

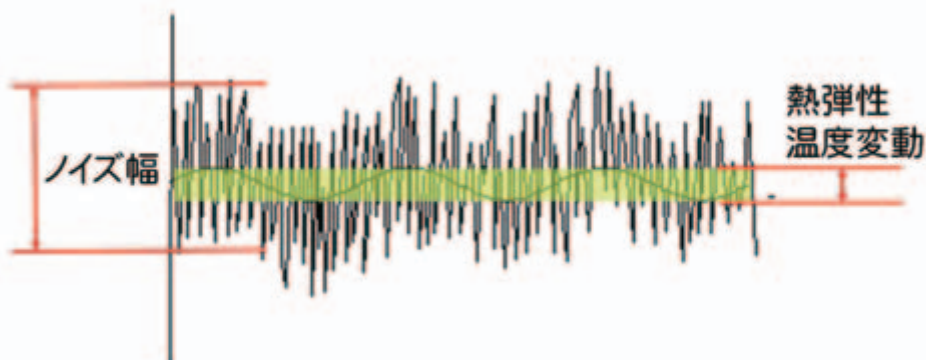
$$\Delta \sigma = 10 \text{ (MPa) の時 } \Delta T = 0.026 \text{ (K)}$$

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オーダーであり、高い分解能および精度での温度計測が要求される。

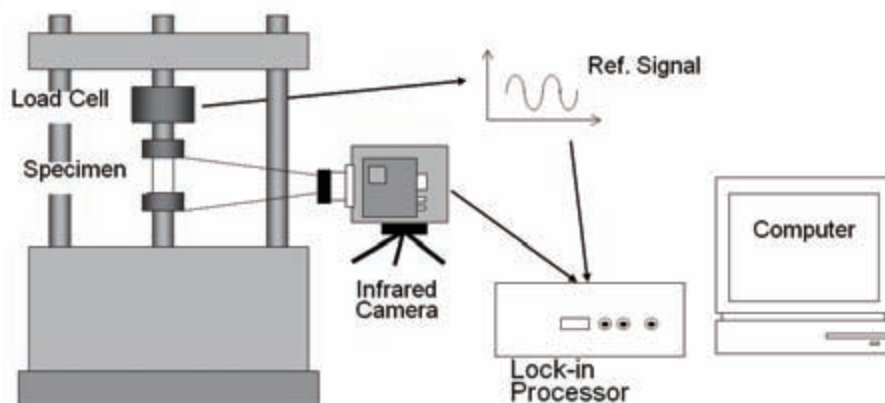
これに対して、赤外線サーモグラフィのNETD(ノイズ等価温度差)は、25mK 程度の値であり、赤外線センサの計測信号をそのまま温度に換算しただけでは、熱弾性応力測定に十分な分解能・精度を得ることができない。

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。

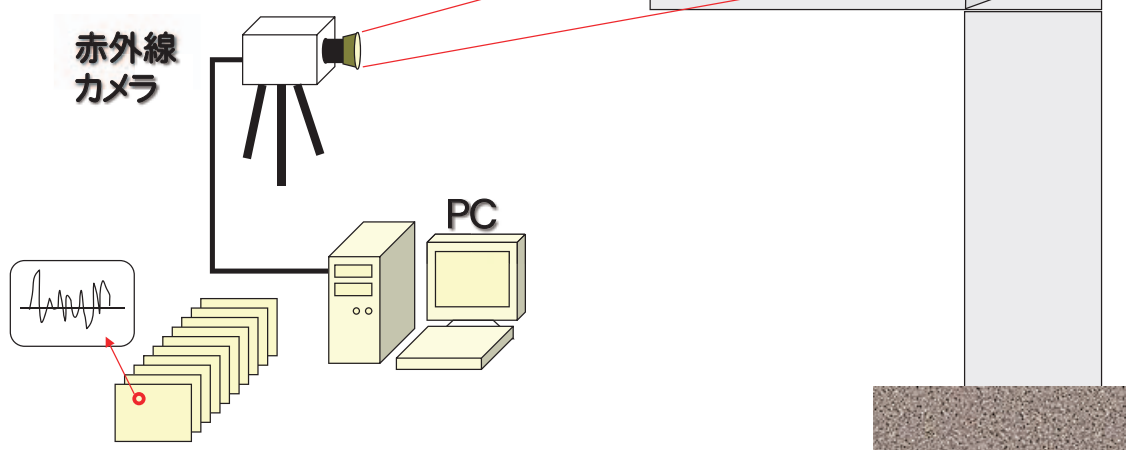


赤外線応力測定装置の概要

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）

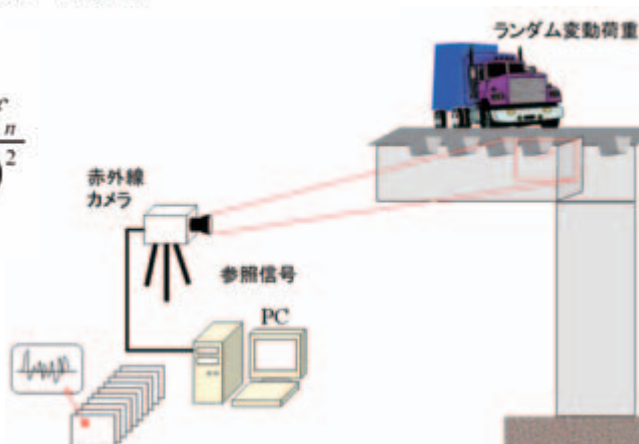
$$Y_n = A + Bf_n$$

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

$\left\{ \begin{array}{l} Y_n: \text{近似値 (視野内の全ての箇所)} \\ y_n: \text{赤外線強度 (視野内の全ての箇所)} \\ f_n: \text{赤外線強度 (参照信号部)} \\ A, B: \text{近似係数} \\ N: \text{全フレーム数} \\ n: \text{フレーム番号} \end{array} \right.$

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

係数Bの分布が相対変動値分布を表す

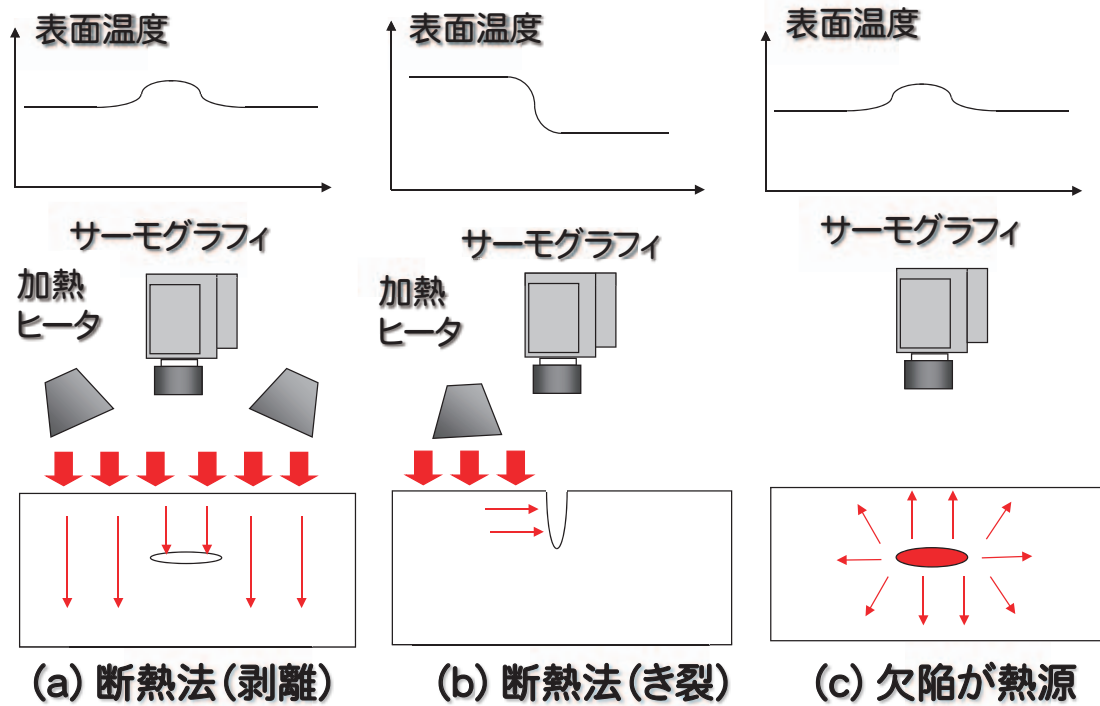


④ 赤外線計測に基づく機械・ 構造物の非破壊評価技術

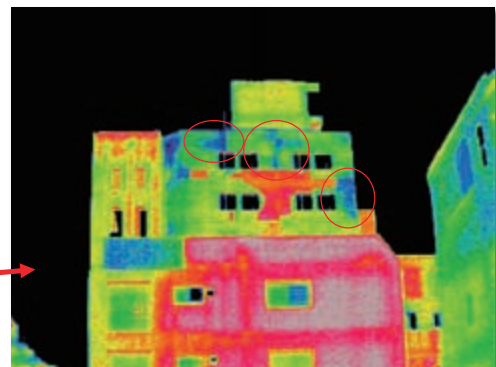
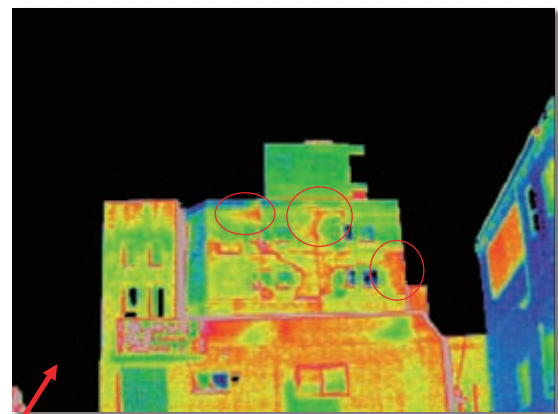
赤外線サーモグラフィ法の特長

- 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



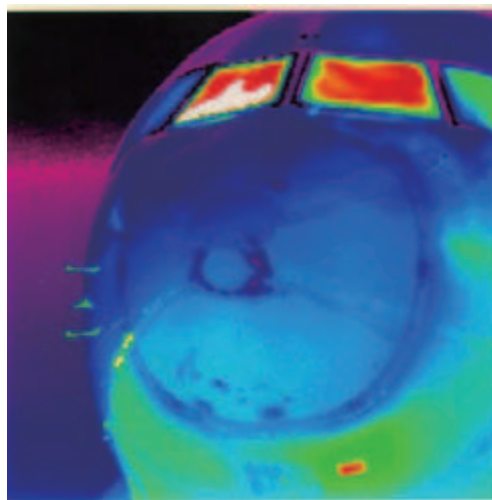
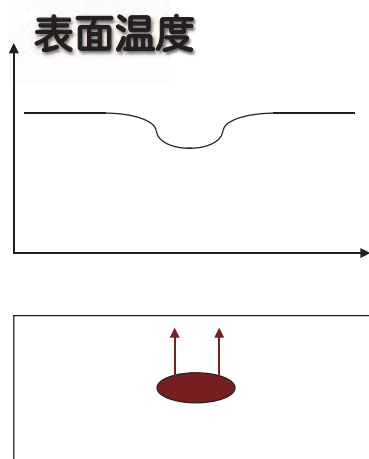
断熱温度場法の例



昼間の
温度分布
(高温)

夜間の
温度分布
(低温)

欠陥が熱源となる場合の例

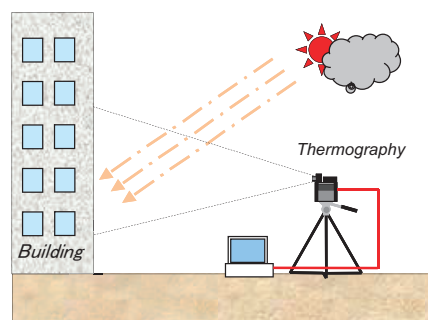


- ・ ハニカムサンドイッチパネルへの水浸入箇所の検出
- ・ 法面やトンネル覆工裏側の地下水

アクティブ法とパッシブ法

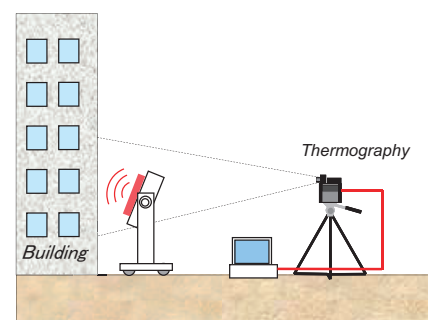
パッシブ赤外線サーモグラフィ法

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

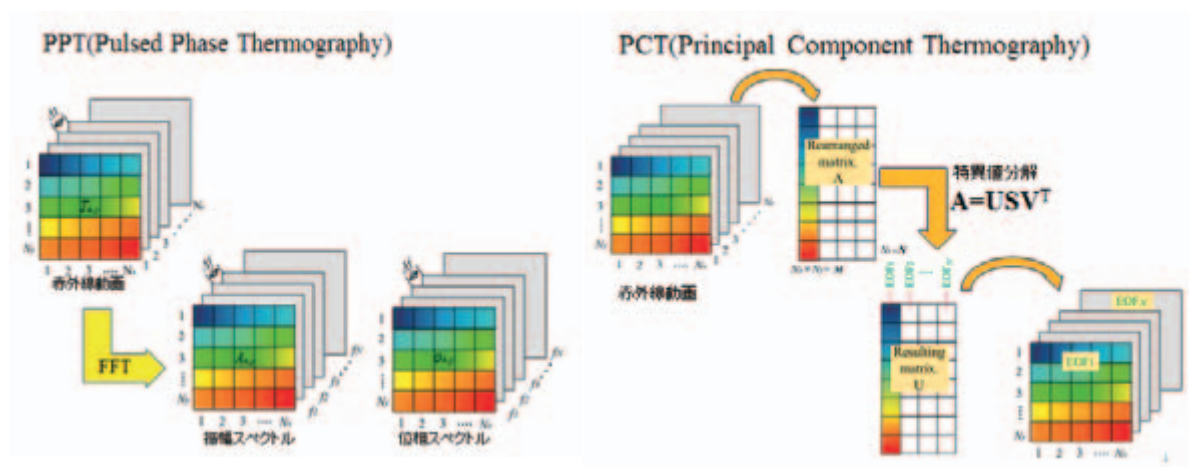
	加熱方法	従来型 サーモグラフィ法	波形解析サーモグラフィ法 (ロックイン法など)
アクティブ サーモグラフィ法	ステップ加熱	はく離欠陥, 減肉欠陥 金属, 複合材料, コンクリート	はく離欠陥, 減肉欠陥 金属, 複合材料, コンクリート
	パルス加熱	はく離欠陥, 減肉欠陥 複合材料, コーティング	はく離欠陥, 減肉欠陥 金属, 複合材料, コーティング
	周期加熱		き裂, はく離欠陥, 減肉欠陥 金属, 複合材料, コーティング
	ランダム加熱		き裂, はく離欠陥, 減肉欠陥 金属, 複合材料, コーティング
パッシブ サーモグラフィ法		き裂, はく離欠陥 金属, コンクリート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

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）

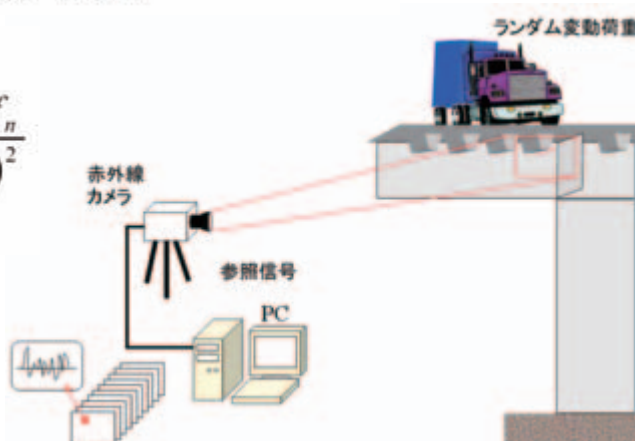
$$Y_n = A + B f_n$$

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

- 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

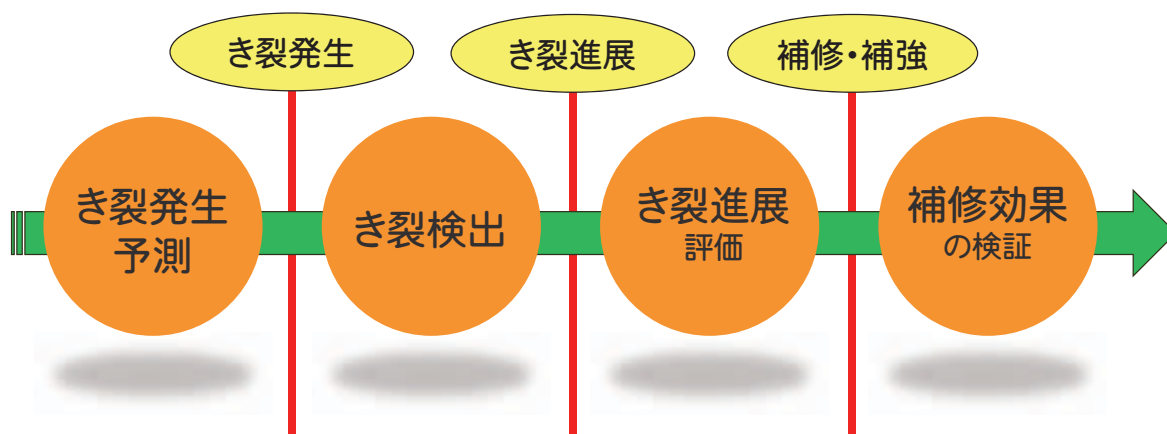
- ・足場や特殊な装置を使って検査者が構造物に近づく必要性
- ・時間と労力を必要とする
- ・き裂が検出・測定されても、そのままでは危険性を評価できない

これからの非破壊評価に求められること

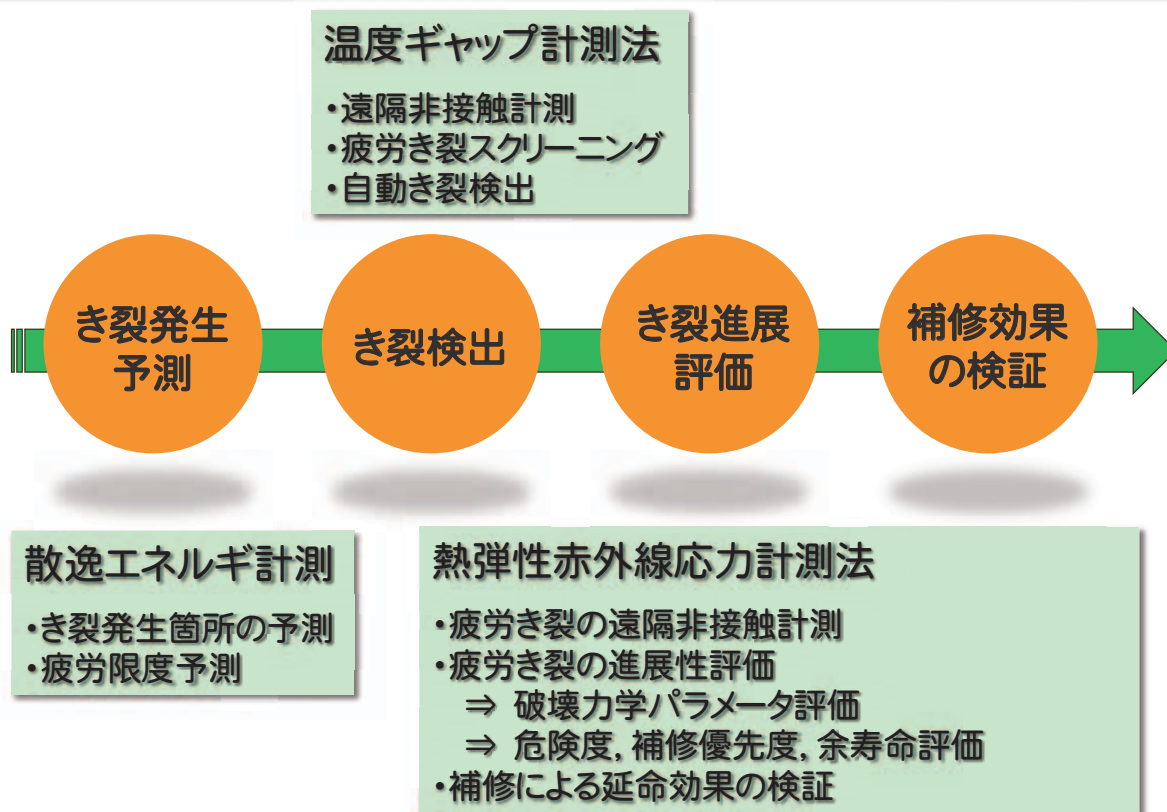
遠隔から非接触・非破壊的に、き裂検出・測定できる
構造物の健全性を評価できる

⇒ 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

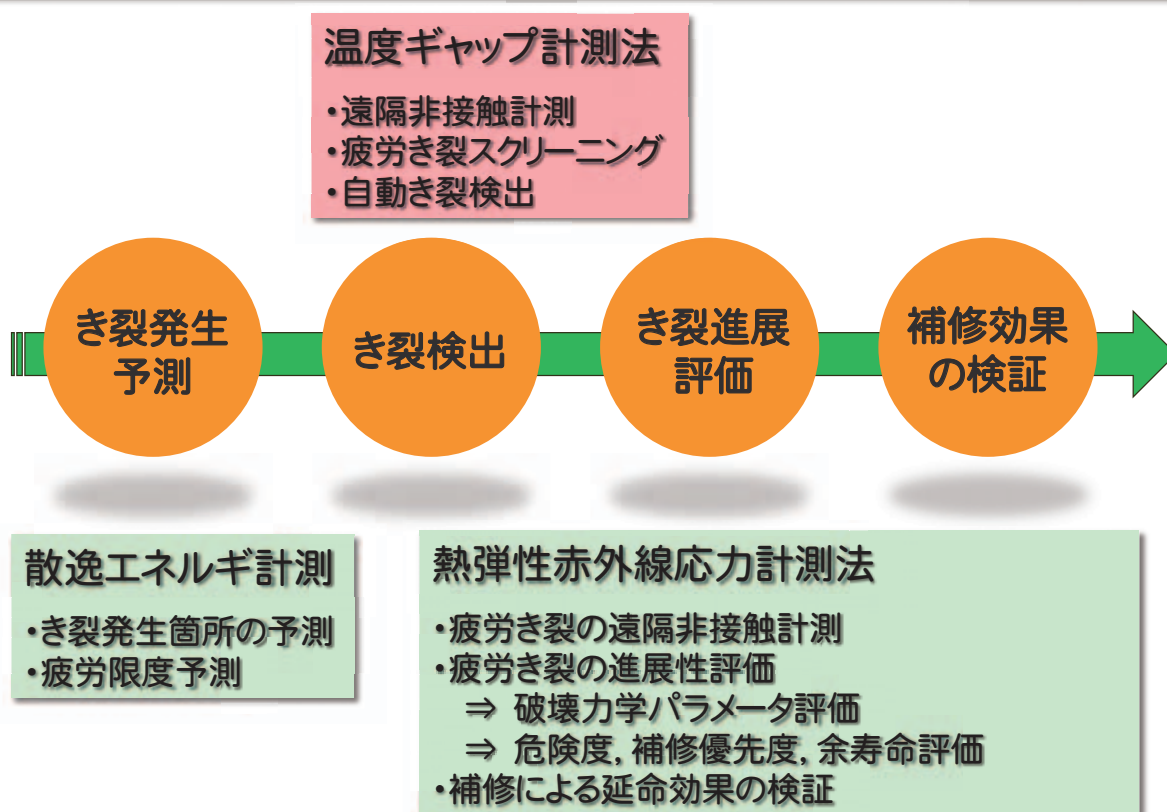
鋼橋梁のライフサイクルでの非破壊評価



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

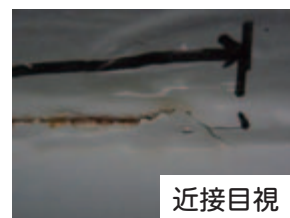
現状の非破壊検査法の問題点

① 目視点検による塗装割れ, 錆汁の検出

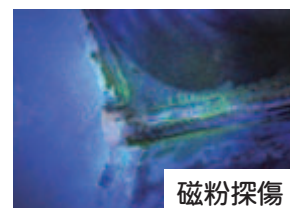
遠望目視 → 精度面で信頼性に欠く

近接目視 → 接近のための足場が必要
非効率

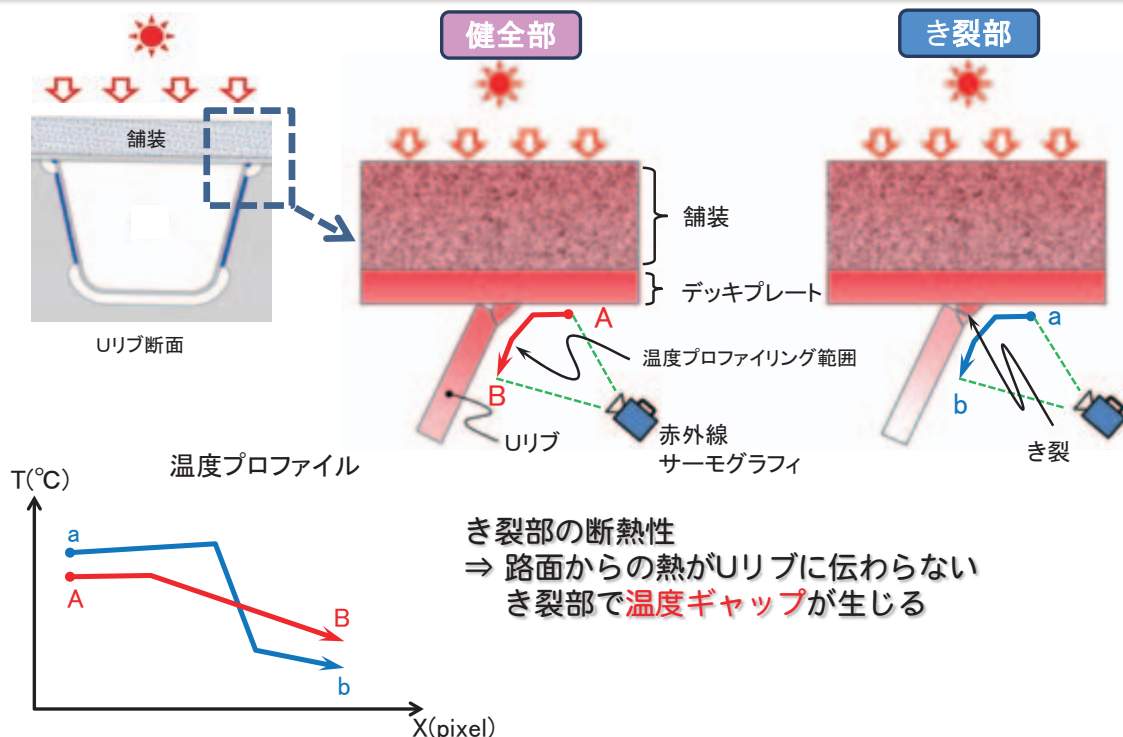
塗装割れ = 疲労き裂 ?



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

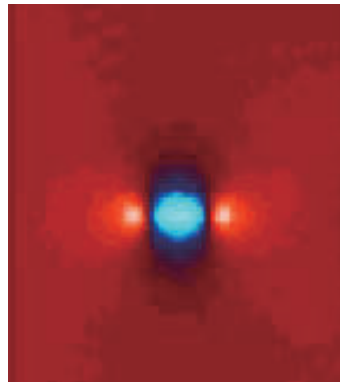
熱弾性応力計測に基づく疲労き裂検出・評価

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



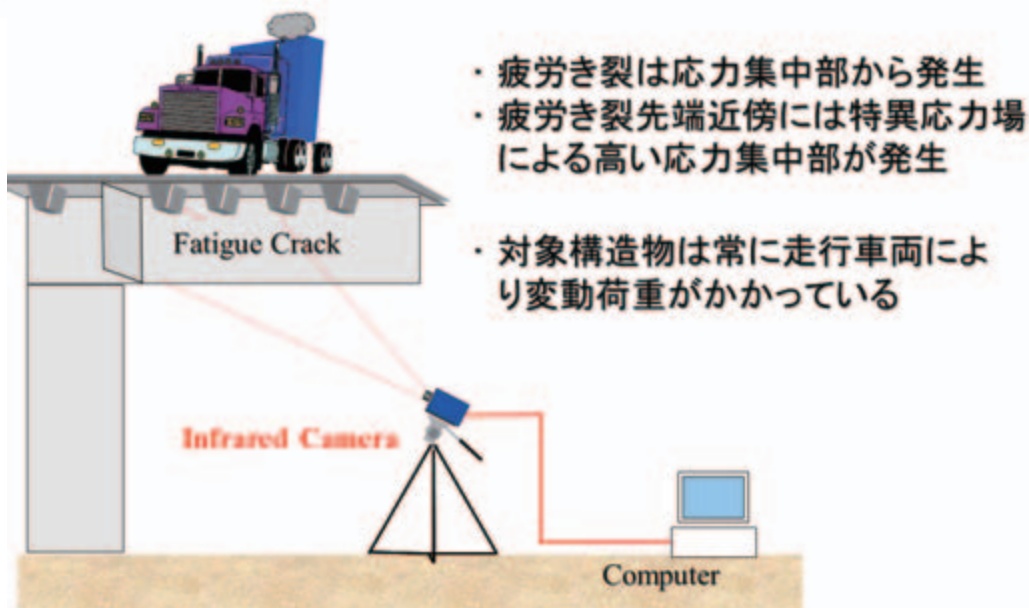
- ・ 応力集中部をもとにき裂を検出できる
- ・ き裂周りに作用する実働応力分布を計測できる
- ・ き裂進展性評価が可能になる



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

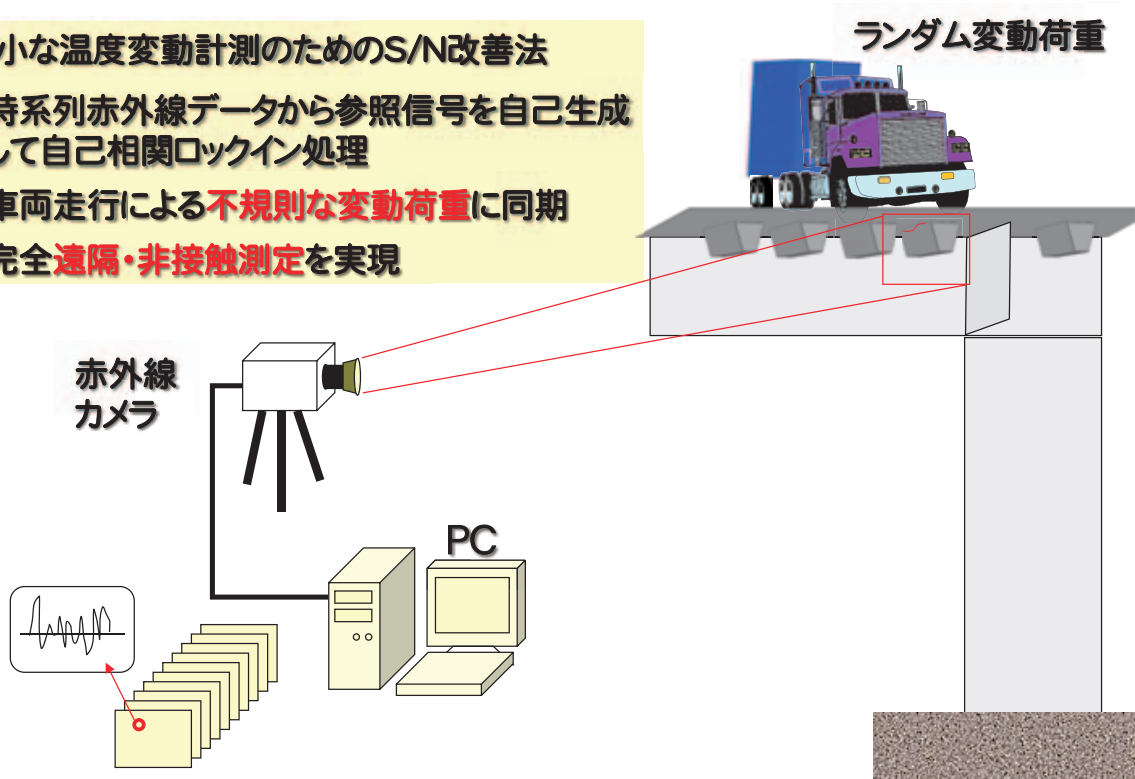
遠隔からの検査が可能で、広い範囲を効率的に検査できることから、
経年橋梁の非破壊検査法として注目されている。



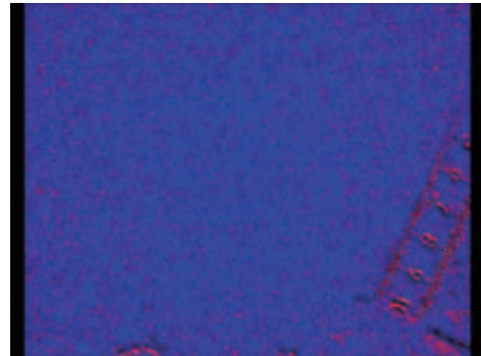
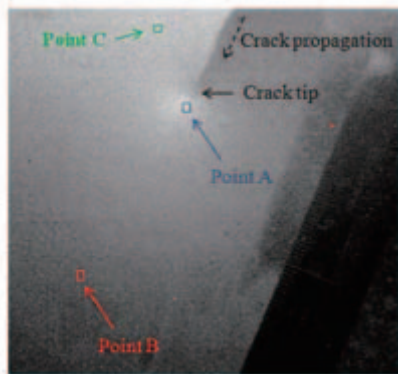
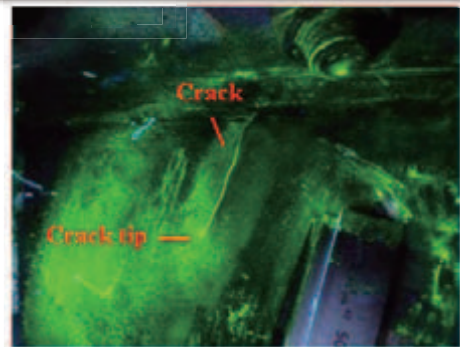
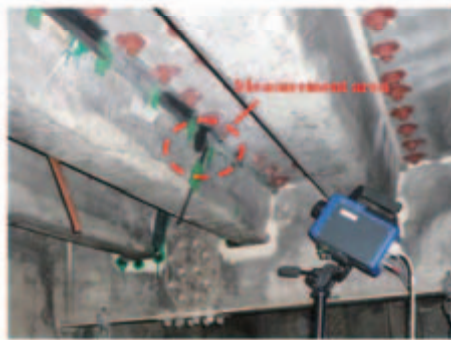
自己相関ロックイン法による疲労き裂検出・評価

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**遠隔・非接触測定**を実現



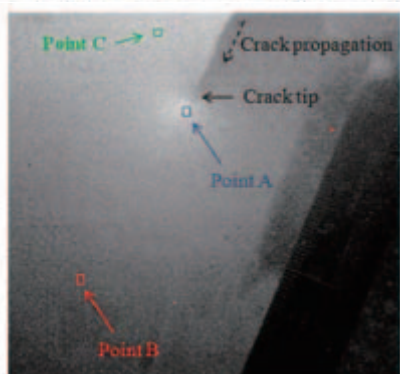
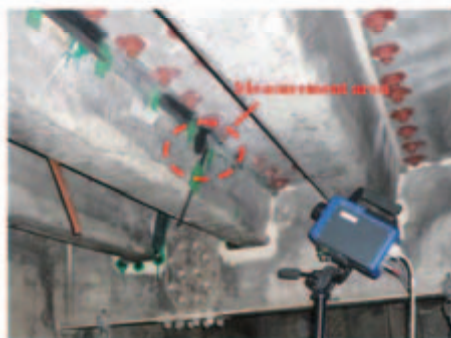
鋼橋梁の疲労き裂検出と応力計測



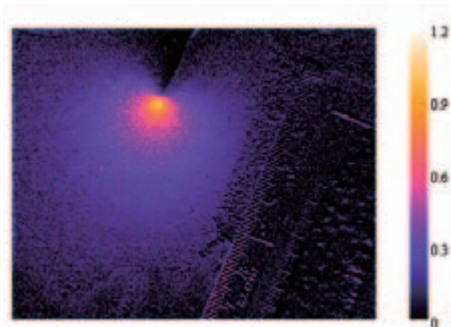
赤外線生画像

赤外線動画

鋼橋梁の疲労き裂検出と応力計測



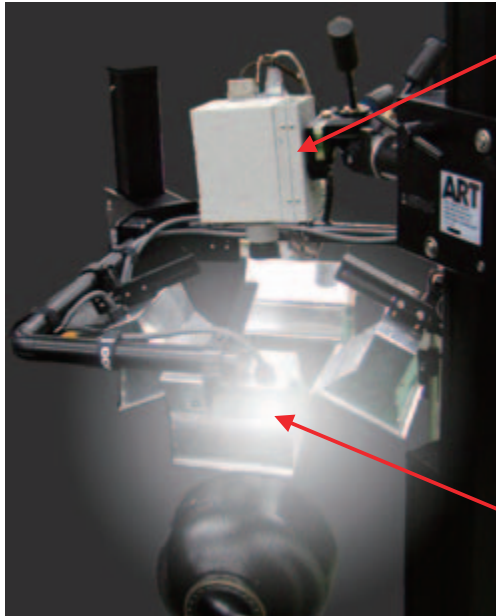
赤外線生画像



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

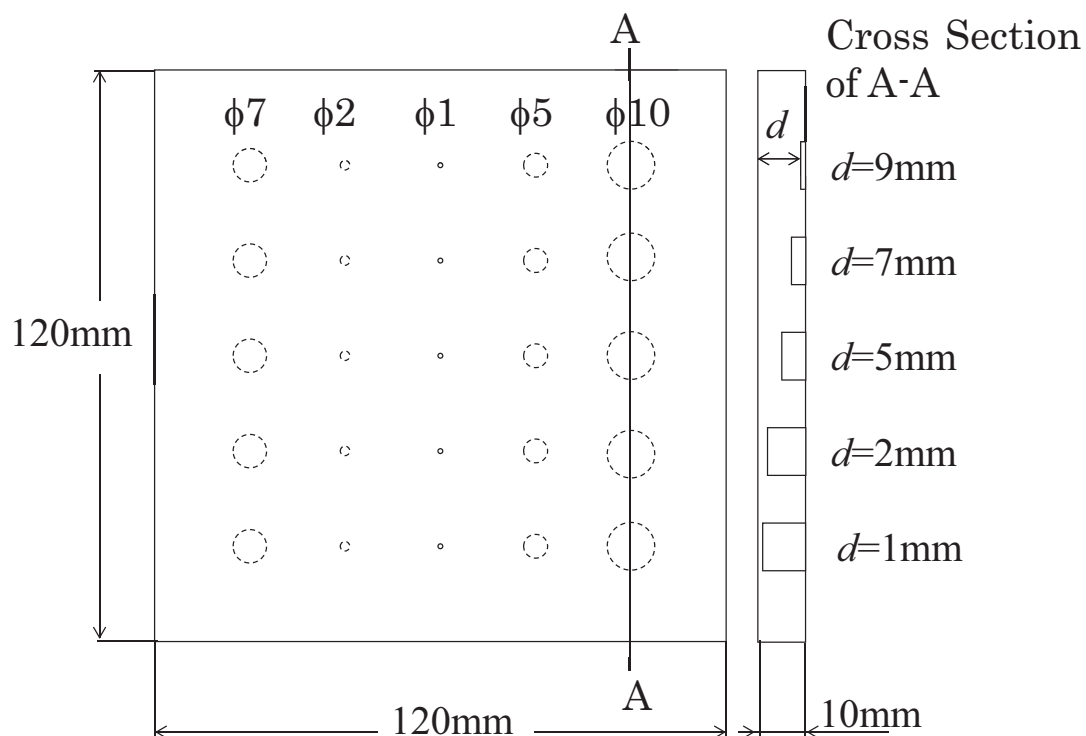


赤外線サーモグラフィ
測定対象物の熱伝導特性に
応じて適当な機種を選ぶ

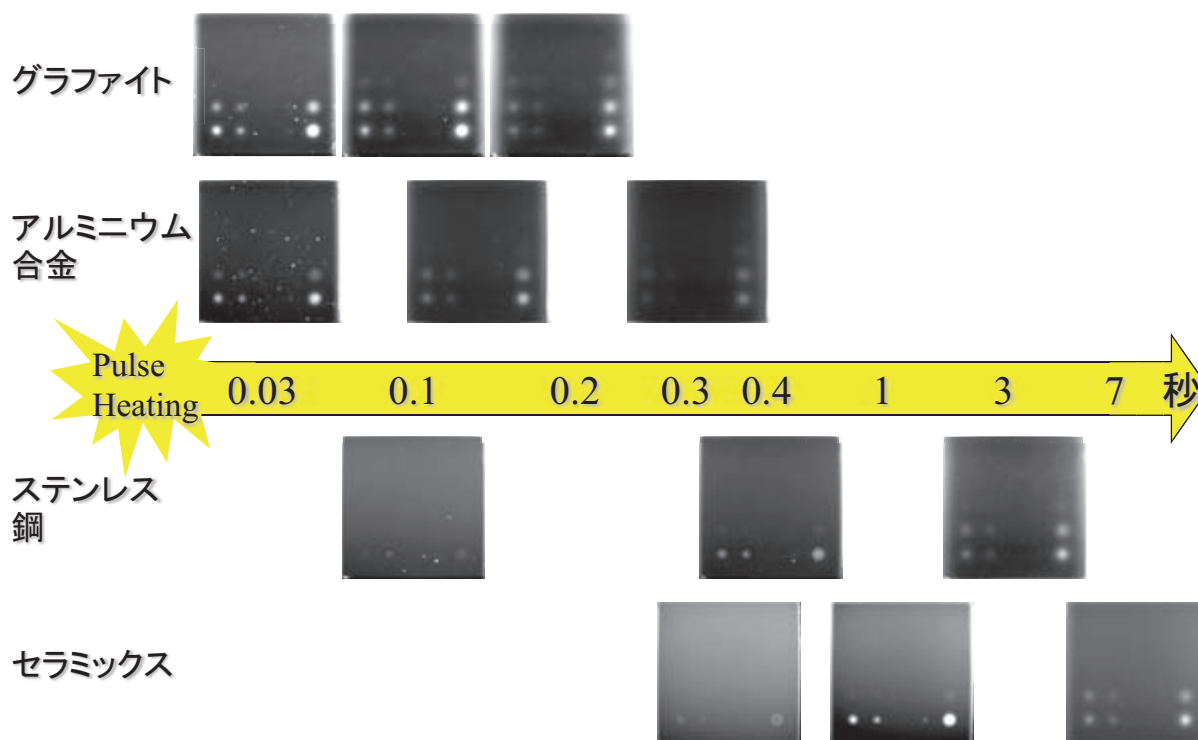
- 熱伝導性が高いもの
高速・高分解能型
- 熱伝導性が低いもの
低速でも試験可能

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

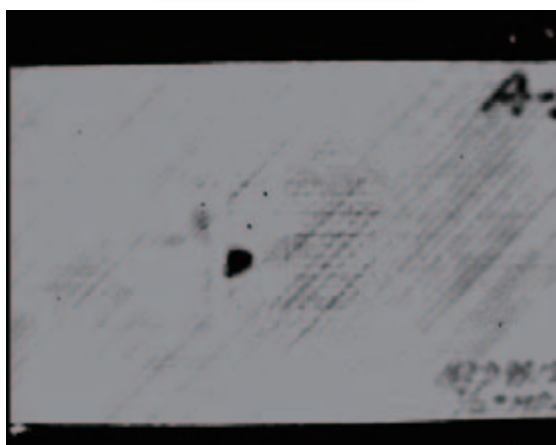


測定対象物の熱拡散性の影響

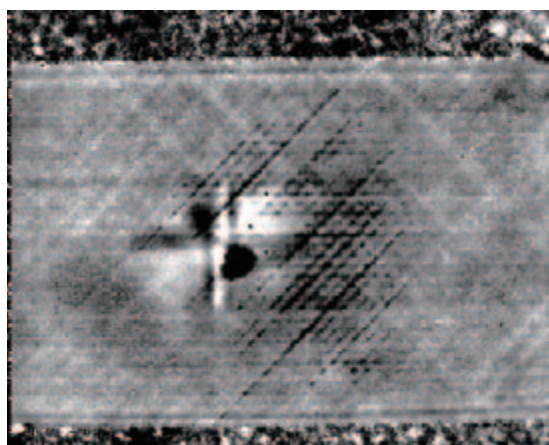


パルスサーモグラフィによるCFRPのはく離検出

CFRPの剥離損傷検出



赤外線データ

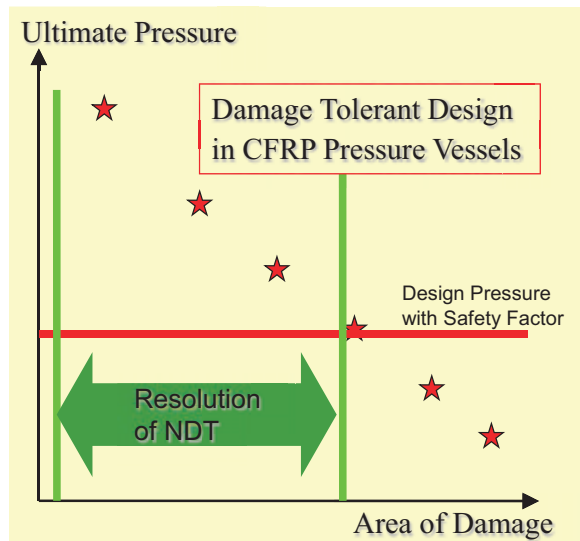


温度変化を微分

パルスサーモグラフィによるCFRPのはく離検出

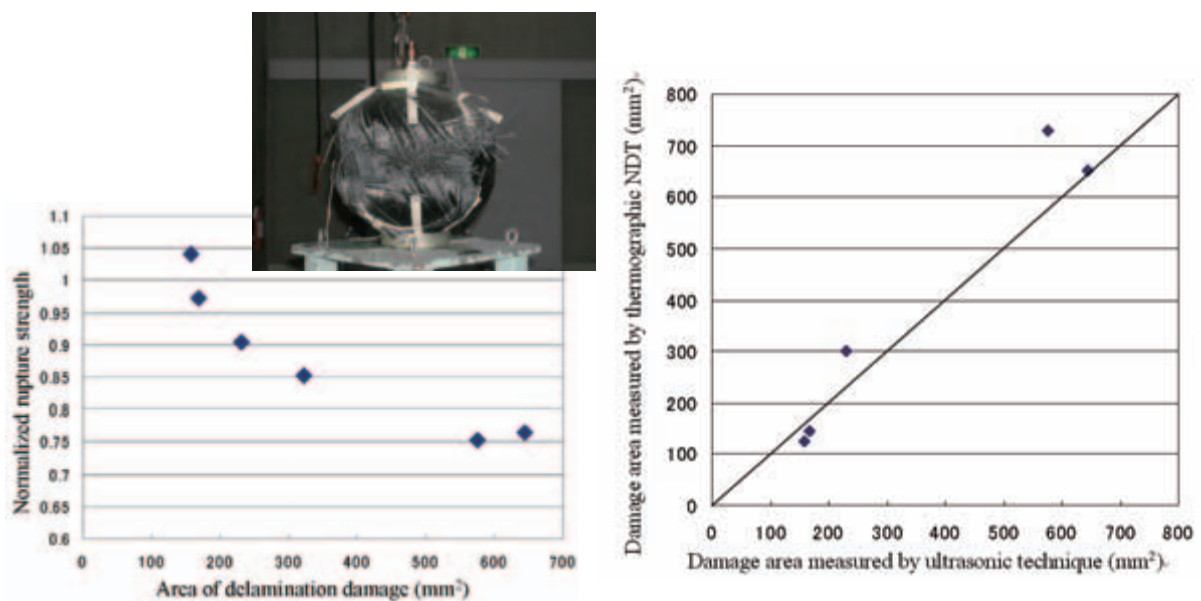


宇宙用複合材料圧力容器の 損傷許容管理



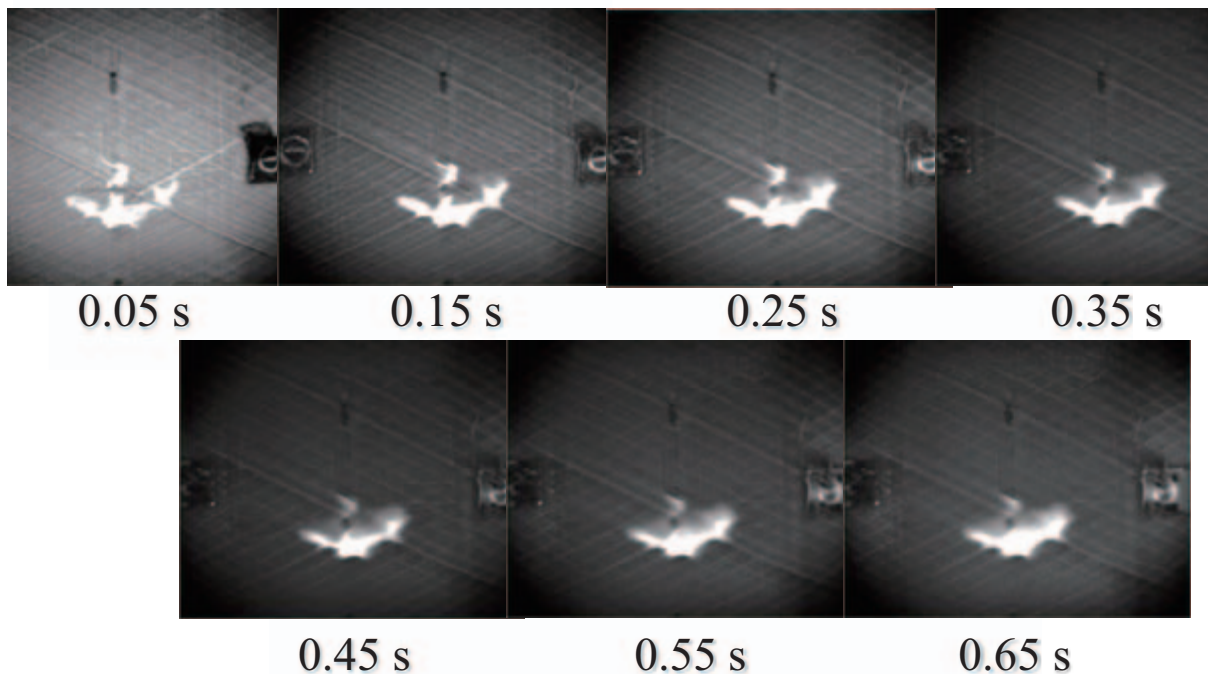
パルスサーモグラフィによるCFRPのはく離検出

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

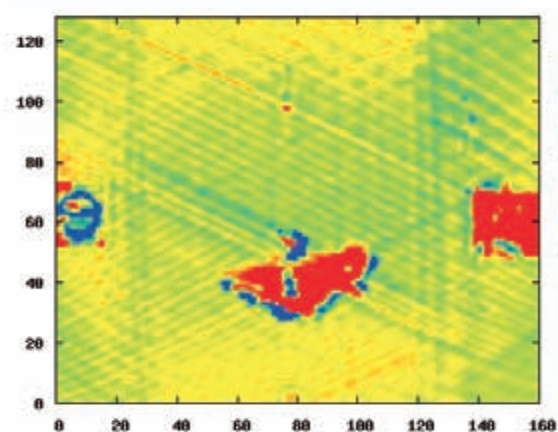
パルス加熱後の時系列赤外線画像



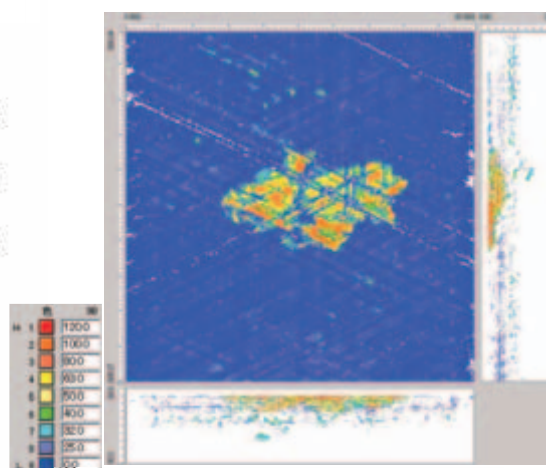
宇宙航空研究開発機構 委託研究成果

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



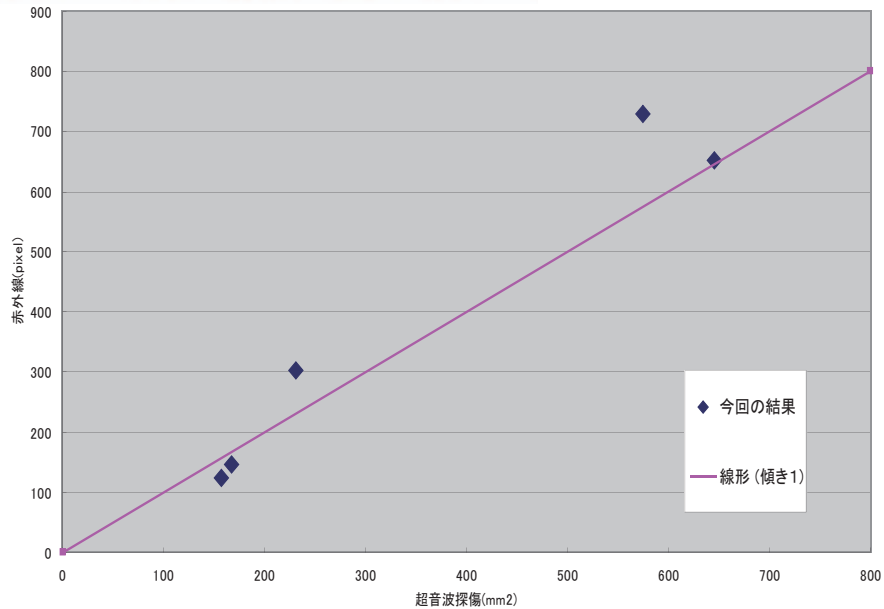
超音波による計測結果

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

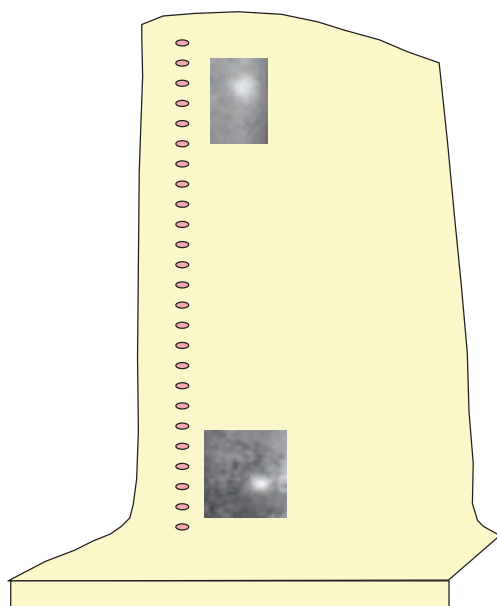
⇒ 1500℃から1700℃級へ

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



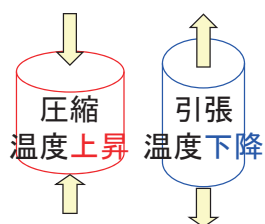
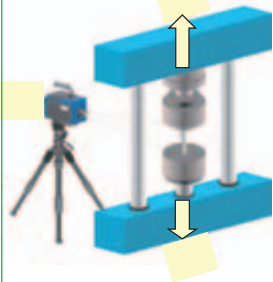
TBCの剥離部は、パルス加熱後の温度分布において局所的高温部として検出できる

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

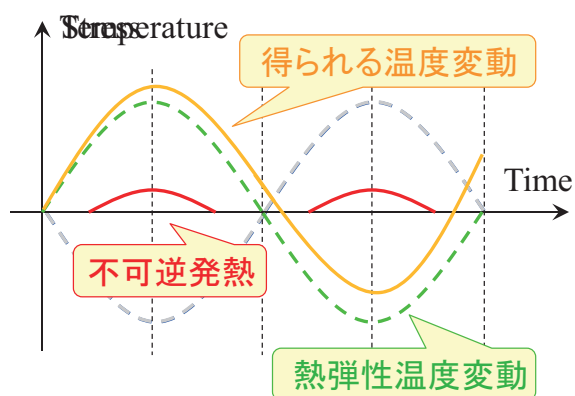
散逸エネルギーとは？

◆ 熱弾性効果



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

得られる温度データより
主応力 $\Delta\sigma$ が求められる

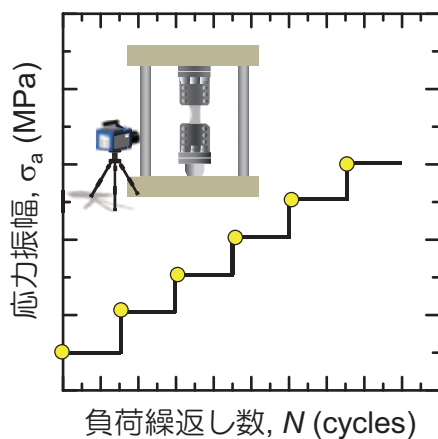


不可逆発熱(散逸エネルギー)

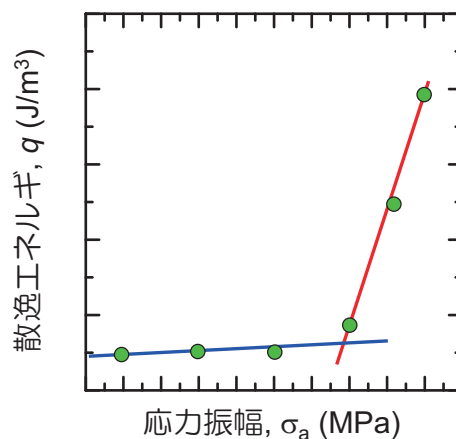
局所的な塑性すべりなどに起因する発熱
最大圧縮・最大引張時に発生

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

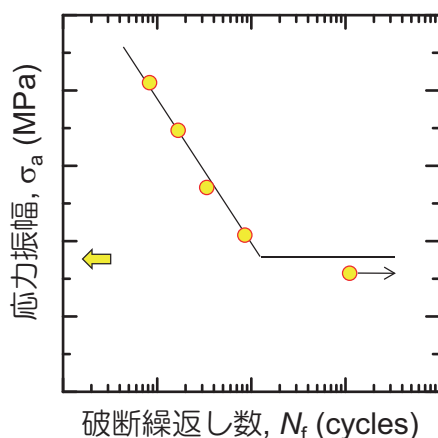


- ✓ 応力振幅を階段状に増加する試験を実施
- ✓ 各応力振幅において散逸エネルギーを計測

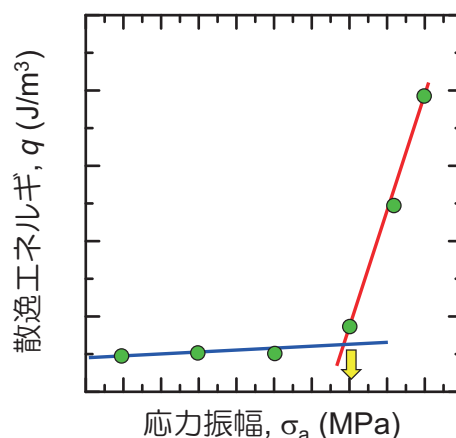
2/15

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



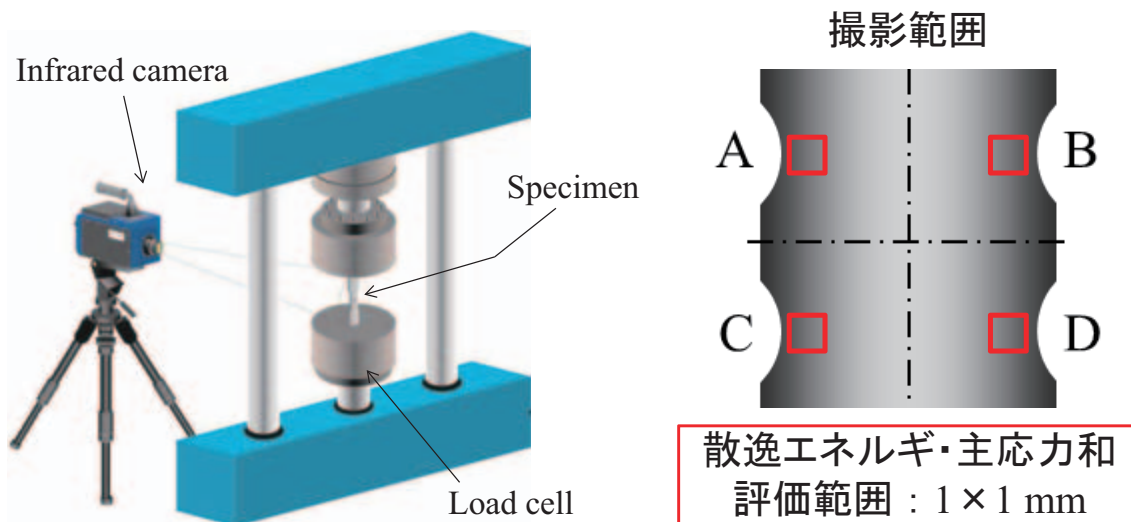
疲労限度迅速推定法



- ✓ 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

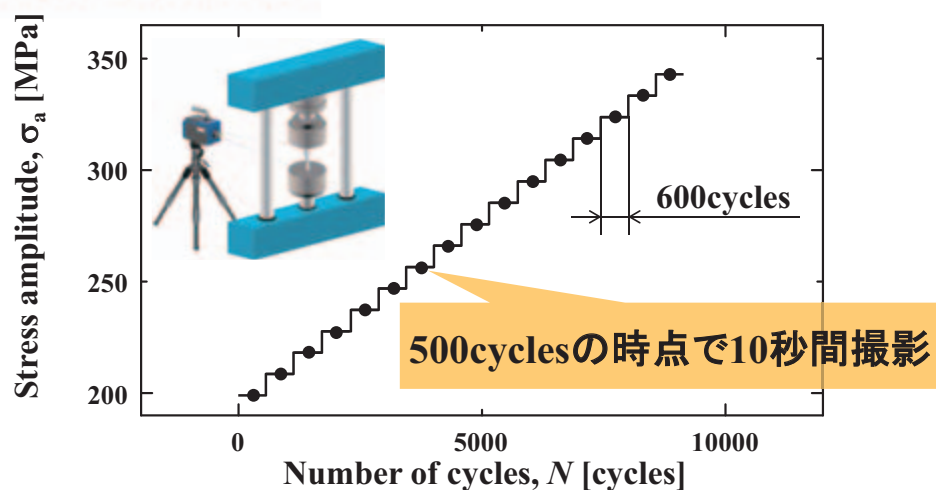
散逸エネルギー計測に基づく疲労き裂発生予測



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

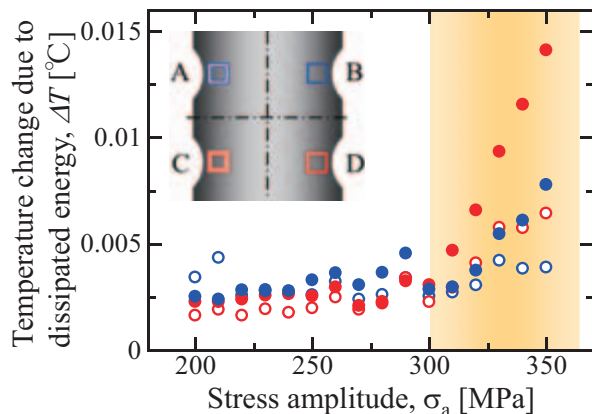
階段状応力振幅増加試験



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

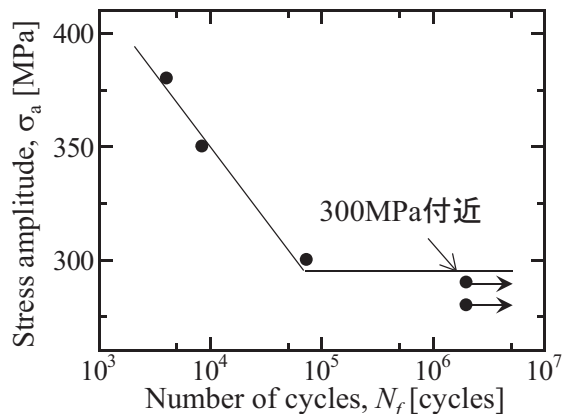
散逸エネルギー計測に基づく疲労き裂発生予測

散逸エネルギー



S-N曲線

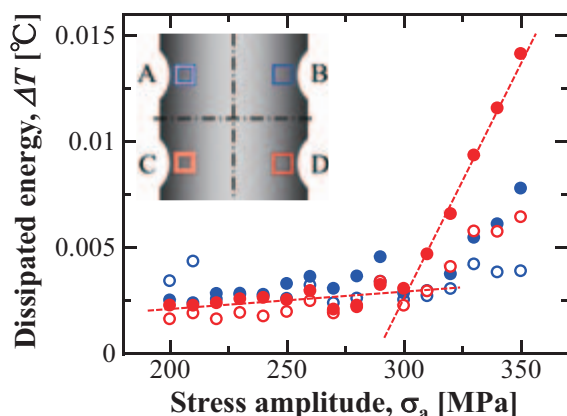
2.0 × 10⁶ cyclesで未破断



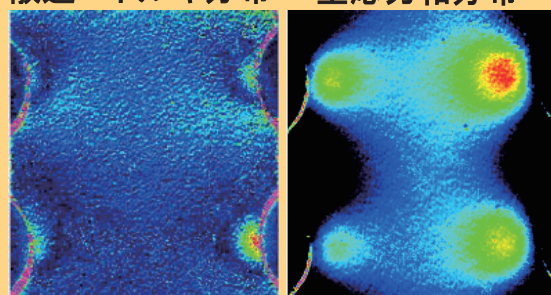
Notch	A	B	C	D
Estimated fatigue limit	none	323MPa	306MPa	303MPa

→ 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



散逸エネルギー分布 主応力和分布



$\sigma_a = 350 \text{ MPa}$, $N = 500 \text{ cycles}$

- 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



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

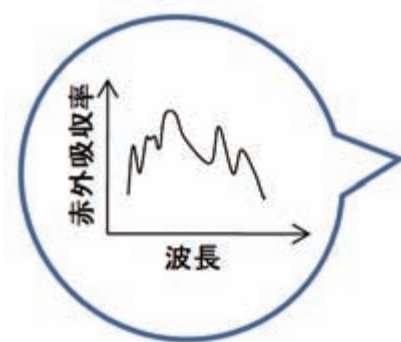
赤外線分光イメージングによるガス検知

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

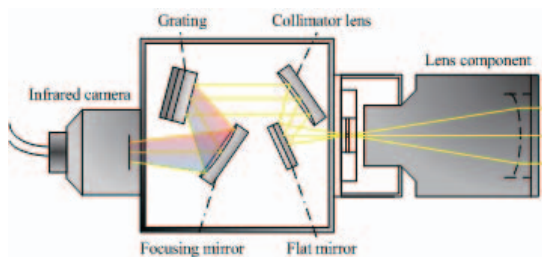


赤外線分光イメージング計測によるガス検知により、ガスの漏洩を検知するとともに種別を「見える化」

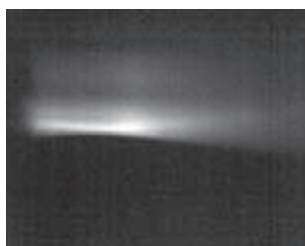
赤外線分光イメージングによるガス検知

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: $7.5\mu\text{m} \sim 13.5\mu\text{m}$



空間
 波長軸

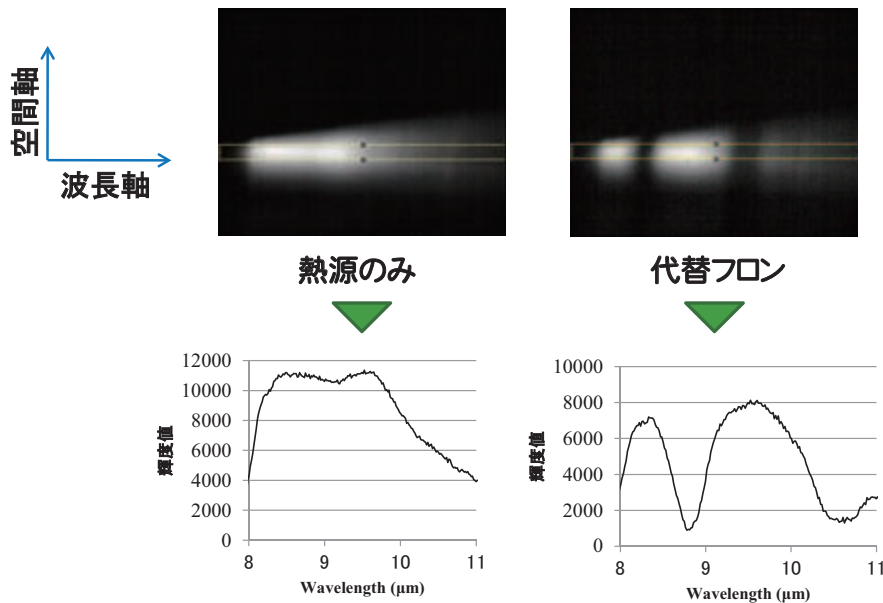
横方向画像センサを分光システムによって、波長軸として使用。

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。

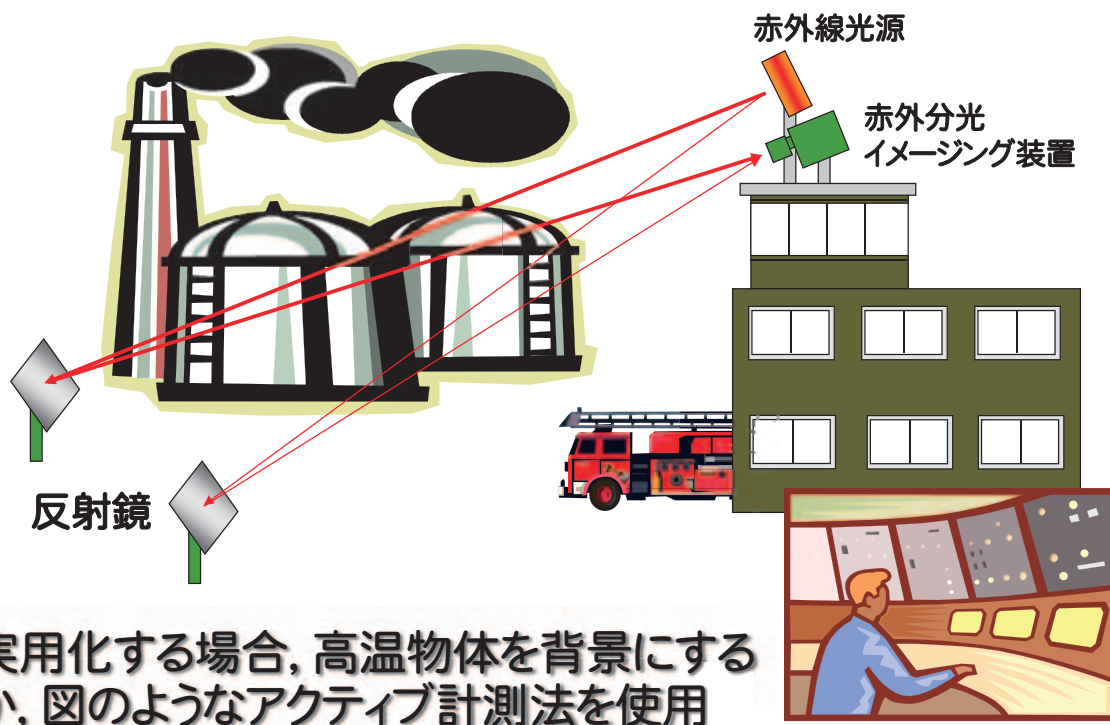
赤外線分光イメージングによるガス検知

代替フロン（HFC-152a）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）



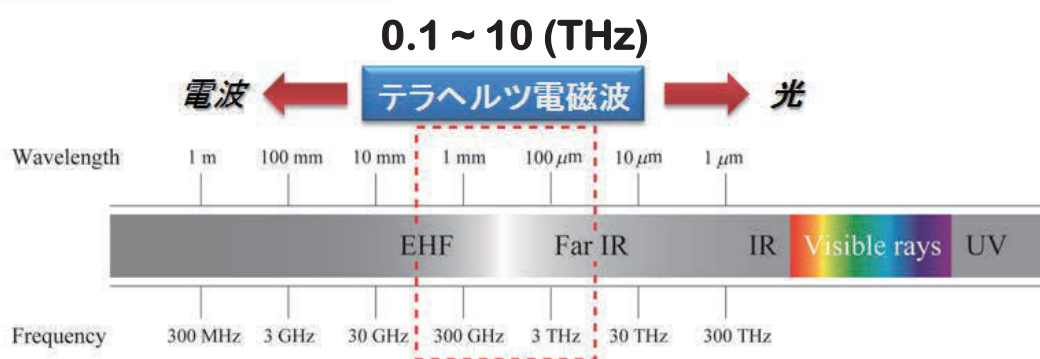
赤外線分光イメージングによるガス検知



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？



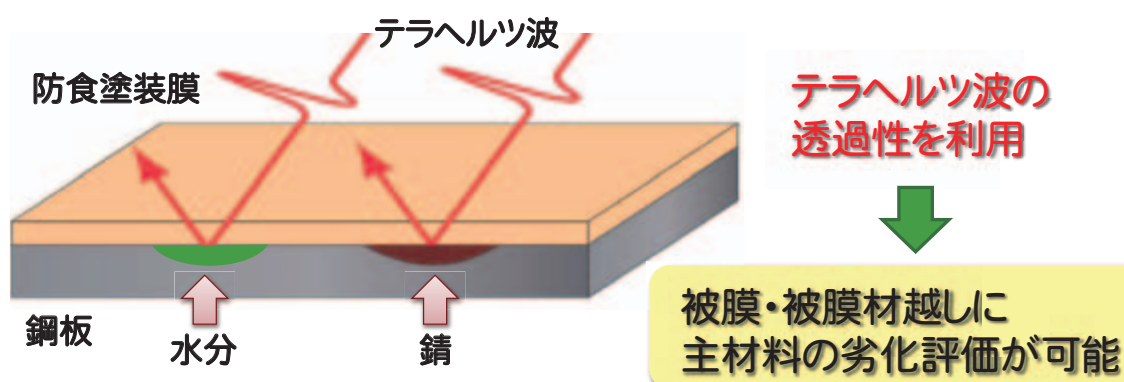
- 光と電波の境界領域(0.1~10 (THz))にある電磁波
- 水には吸収され, 金属には反射される
- 紙, 布, プラスチック, セラミック等を透過し, 人体に無害
- 様々な物質に固有の吸収スペクトル(指紋スペクトル)を示す

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

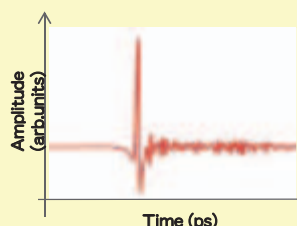
不可能であった断熱材や防食塗装膜下の材料評価を可能にする
⇒ **物体下の状態を「見える化」**



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

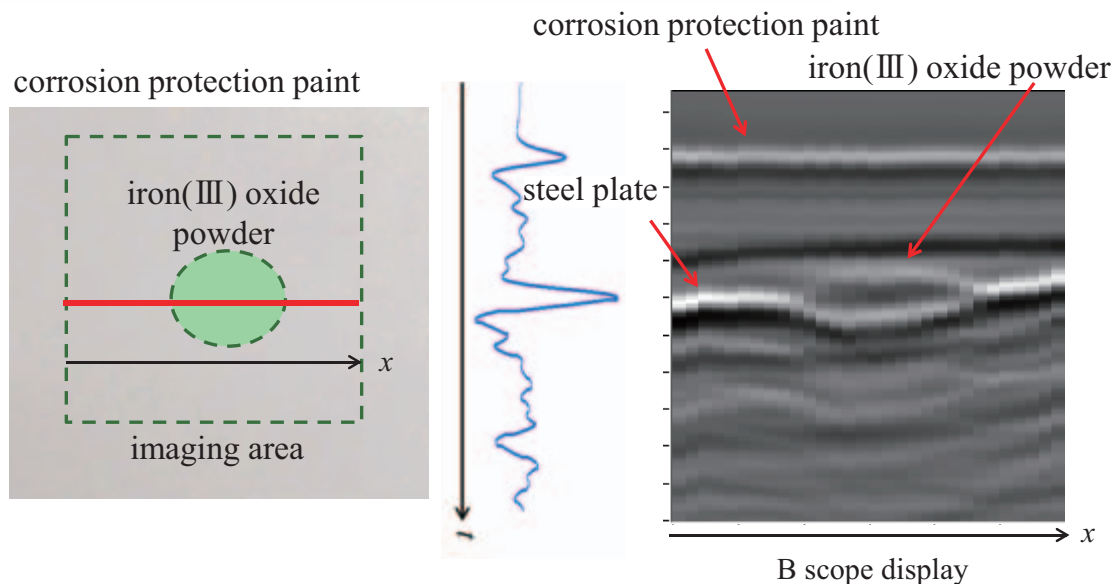
超音波と同じ原理で探傷検査へ応用
欠陥からの反射波を検出

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

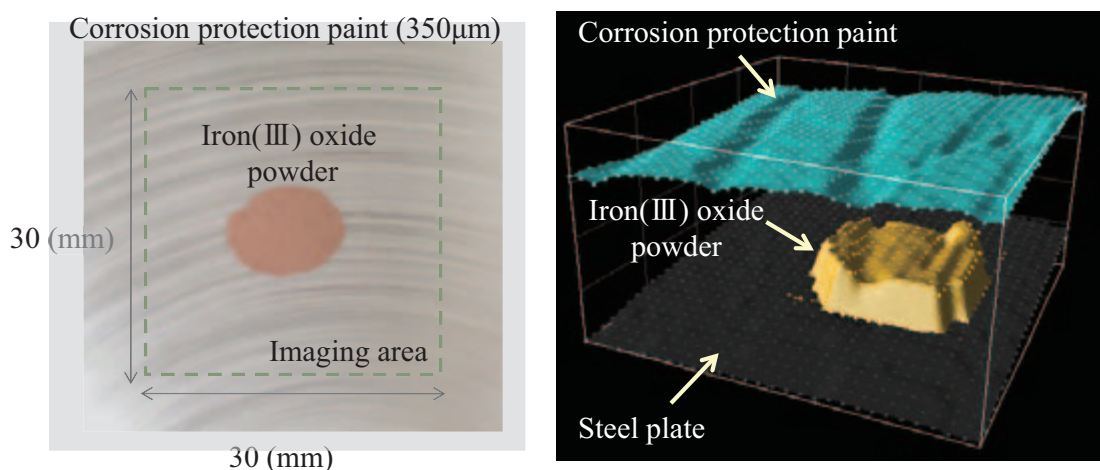
防食塗装膜下の赤錆のBスコープイメージング



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