構造物損傷診断のための RFIDセンサネットワークに関する研究

2015 年 6 月4 日（木）

東京大学大学院 工学系研究科 マテリアル工学専攻
白岩 隆行

発表の構成

1. 研究背景
2. 損傷記憶スマートパッチによる疲労評価
3. ACM型腐食センサによる大気環境のモニタリング
4. ワイヤレスセンサネットワークの構築
5. まとめ

構造物の劣化と対策技術

背景
- 機器の高速化、交通量の増大
- 橋梁や船舶の老朽化
- 点検作業員の減少

→ 材料の劣化（**疲労**や**腐食**）による損傷、破壊事故

劣化や損傷に対する点検・検査技術

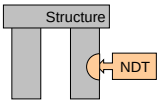
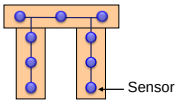
非破壊検査を用いた定期検査
（目視検査・超音波探傷など）
↓
構造物ヘルスモニタリング

首都高速道路の橋脚隅角部

ミネアポリス高速道路崩落事故(2007年)

首都高速道路株式会社　http://www.tech-shutoko.jp/save/guukaku.html
国土交通省　米国ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査報告　2007

定期検査とヘルスモニタリング（SHM）

	定期検査	構造物診断センサネットワーク（本研究）	ヘルスモニタリング
測定の時間間隔	• オフライン（手動計測） • 数ヶ月から数年ごと	• 低頻度のオンライン • 数分から数日程度	• オンライン（常時計測） • 数10Hz～数MHz
検査箇所	 ローカル, 点的計測	 グローバル, 面的計測	
課題	作業員の確保 効率化		長期間監視のコスト 膨大なデータ処理

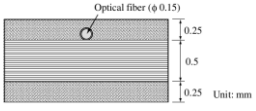
損傷劣化のセンシング技術(1)

ひずみや変位

無線ひずみゲージ

Wireless system of MicroStrain[1]

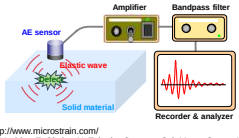
FBG(Fiber Bragg Grating)センサ



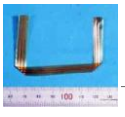
Optical fiber embedded in CFRP[2]

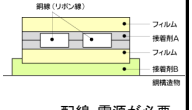
き裂・欠陥の検出

アコースティック・エミッション（AE）法



破断検知線





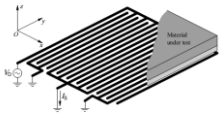
配線・電源が必要

[1] http://www.microstrain.com/
[2] S. Yashiro, T. Okabe, N. Takeda: Compos. Sci. Mater. Struct., Vol. 67, pp .286-295, 2005.
[3] 伊藤裕一, 松尾昌武, 碕立志: 土木学会第60回年次学術講演会概要集, pp. 101-102, 2005.

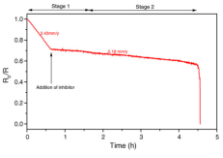
損傷劣化のセンシング技術(2)

腐食環境

電気化学ノイズ法（ECN）

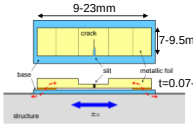


電気抵抗法（ER）



大気腐食の評価が困難

疲労



疲労センサ[6]

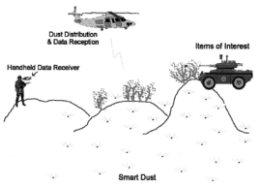
課題

- 長期間にわたる疲労を評価する手法が少ない
- 大気環境の腐食性評価
- 配線が必要な場合がある

[4] N. Goldfine, Proceedings of the 5th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), pp. 1-8, (2005)
[5] S. Y. Lia, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 120 (2), pp. 368-377, (2007)
[6] T. Kobayashi et al., Key Engineering Materials, 261-263 (2004) pp. 1313-18.

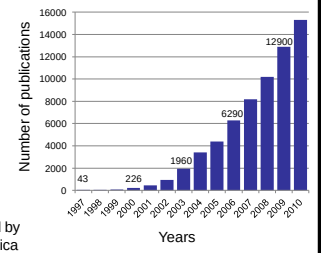
ワイヤレスセンサネットワーク（WSN）

Smart Dust (1998)



The Smart Dust concept was introduced by DARPA due to the potential military applications of the technology.

Publication about "Wireless sensor network"



(Analyzed by Google Scholar)

J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister. Next Century Challenges: Mobile Networking for "Smart Dust". In Proceedings of ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 99), 1999 など

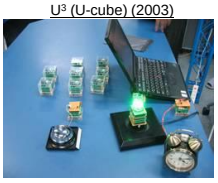
7

様々なワイヤレス通信デバイス

- UC Berkeley　Motes (Renee, Mica, Dot)
- Rockwell　WINS
- MIT　μAMPS, Cricket
- UCLA　iBadge, Medusa MK-2
- U. Washington　SpotON
- U. Tokyo　U^3
- USC　ROBOMOTE
- Berkeley　Cots Dust, Smart Dust

MICA Mote (2002)

U^3 (U-cube) (2003)



iBadge (2005)

J. Hill and D. Culler: "MICA: A Wireless Platform For Deeply Embedded Networks", IEEE Micro, Vol. 22, p. 12, 2002.
J. Takagi, et. al, Proceedings of Sixth International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2009), p. 244, 2009.

8

目的: 構造物診断のための統合型センサネットワーク

目的　従来のSHMよりも簡便に扱えて、定量的に評価可能な手法を提供する

- 長期間にわたって疲労と腐食環境を評価できる
- 無線により簡便にデータ採取できる

測定対象

橋梁、高速道路、発電プラント、船舶、鉄道車両、航空機、宇宙機器、産業機械等

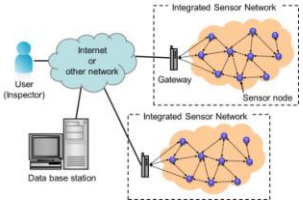
課題：新しいセンサの開発 + 無線センサネットワーク

- 疲労負荷（損傷記憶スマートパッチ）
- 大気環境の腐食性（ACMセンサ）

構成と使用方法

センサノード、基地局の設置
↓
数分から数日おきに計測・収集
↓

- 検査員が直接基地局でデータ採取
- インターネット等の利用



9

発表の構成

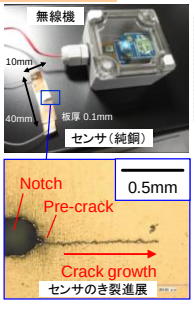
1. 研究背景
2. 損傷記憶スマートパッチによる疲労評価
3. ACM型腐食センサによる大気環境のモニタリング
4. ワイヤレスセンサネットワークの構築
5. まとめ

10

損傷記憶スマートパッチ

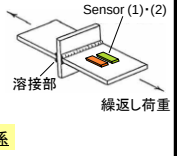
測定対象　長期間（数年間）にわたる応力振幅と繰返し負荷回数の計測

パッチの構成



使用方法

センサを構造物に貼付
一定期間放置
センサのき裂長さ計測
き裂長さから応力振幅と繰返し回数を推定する

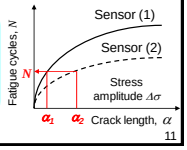


き裂長さと繰返し回数の関係

パリス則

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$
$$\Delta K = f(\alpha)\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$$

a: crack length, N: cyclic number, K: stress intensity factor, C, m: constant, $f(\alpha)$: shape factor, $\Delta\sigma$: stress amplitude



[1] S. Nambu and M. Enoki, Mater. Trans. 48, 6(2007), 1244-1248.

11

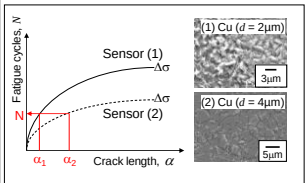
応力振幅と繰返し回数の推定原理

パリス則

$$\begin{cases} da/dN = C(\Delta K)^m \\ \Delta K = K_{max} - K_{min} = f(\alpha)\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \end{cases} \xrightarrow{\text{積分}} N = \frac{W}{C}\left(\Delta\sigma\sqrt{\pi W}\right)^{-m}\int_{\alpha_0}^{\alpha}\left\{\sqrt{\alpha}\,f(\alpha)\right\}^{-m} d\alpha$$

a: crack length, N: fatigue cycles, K: stress intensity factor, C, m: constant, $f(\alpha)$: shape factor, $\Delta\sigma$: stress amplitude

き裂進展特性の異なる2種類のセンサ



Two sensors with different characteristics

Fatigue cycles

$$N = \left\{\frac{C_2}{C_1}\cdot\frac{W_1^{m_2}}{W_2^{m_1}}\cdot\left(\frac{W_2}{W_1}\right)^{m_1 m_2/2}\cdot\frac{F_1(\alpha_1)^{m_1}}{F_2(\alpha_2)^{m_2}}\right\}^{\frac{1}{m_2-m_1}}$$

Stress amplitude

$$\Delta\sigma = \left\{\frac{C_2}{C_1}\cdot\frac{W_1}{W_2}\cdot\frac{(\pi W_2)^{m_2/2}}{(\pi W_1)^{m_1/2}}\cdot\frac{F_1(\alpha_1)}{F_2(\alpha_2)}\right\}^{\frac{1}{m_1-m_2}}$$

W: width, α: normalized crack length

S. Nambu and M. Enoki, Mater. Trans. 48, 6(2007), 1244-1248.

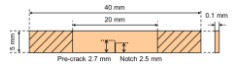
12

試験片形状の設計

材料：電着銅（結晶粒径約1.4μm）
板厚：0.1mm

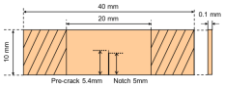
$$K = \sigma\sqrt{\pi a}\cdot f(\alpha,\beta),\quad \sigma = \frac{Eu}{L}$$

標準型センサ（W5-H20）



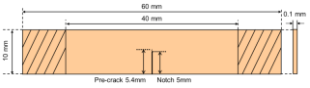
縦横比 $\beta = 4$

試験片幅が異なる場合（W10-H20）



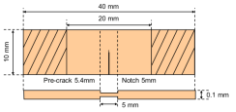
- 計測可能な負荷回数が増加すると予想
- 縦横比 $\beta = 2$　→「高サイクル型センサ」

試験片長さが異なる場合（W10-H40）



- 小さなひずみでもき裂進展すると考えられる
- 縦横比 $\beta = 4$　→「高感度型センサ」

切欠き部分が薄い場合

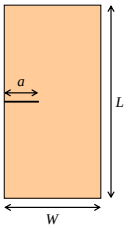


長さや幅を変えずに、板厚方向に加工

有限要素法による応力場解析

モデル

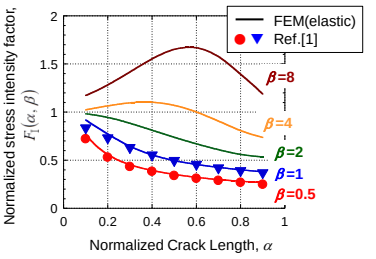
$$\alpha = \frac{a}{W},\ \beta = \frac{L}{W}$$



弾性体モデル

応力拡大係数

$$J = \mathcal{G}_1 = \frac{K_I^2}{E}\ \text{（平面応力）}\qquad K = \sigma\sqrt{\pi a}\cdot F_1(\alpha,\beta),\quad \sigma = \frac{Eu}{L}$$

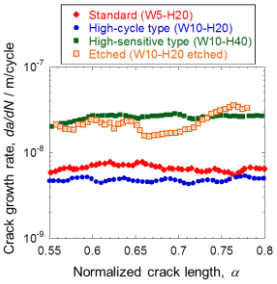


※「Ref.」は参考文献[1]の結果を、ポアソン比 ν=0.3として平面応力状態に換算したもの

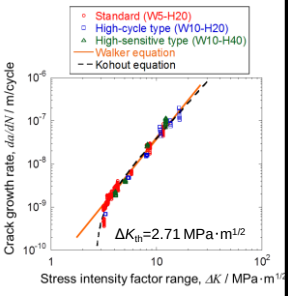
[1] P. J. Torvik: J. Appl. Mech. 46 (1979) 611-617.

形状が異なる電着銅試験片の結果

き裂進展速度

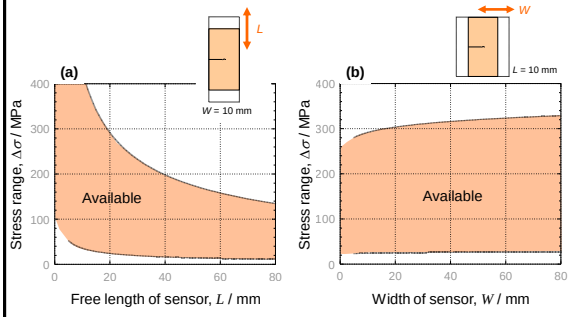


き裂進展特性



形状を変えることでき裂進展速度を制御できる

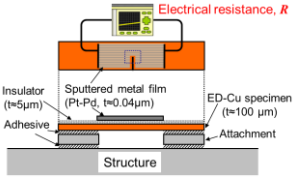
センサ形状と計測可能な応力振幅



センサ試験片の長さを大きくすることで、応力振幅検出限界が向上

無線き裂長さ計測（1）

電気抵抗膜（スパッタ膜）による
き裂長さ計測の原理

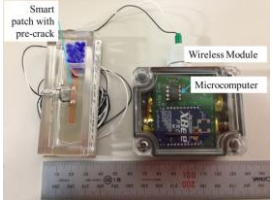


Calibration curve

$$\frac{R}{R_0} = d\alpha^b + 1$$

R: the electric resistance;
R_0: the electric resistance at $\alpha = 0$;
α: the normalized crack length;
b, d: crack gage geometrical function.

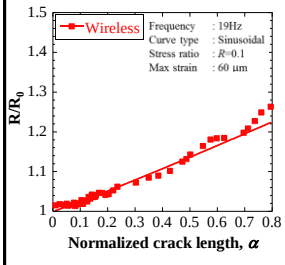
ZigBeeを利用した無線送信機



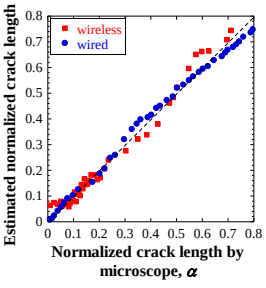
無線周波数：2.4GHz
送信間隔：　10秒
通信距離：　30m以上
連続稼働：　8ヶ月以上
電源：　単3乾電池×2（DC3V）

無線き裂長さ計測（2）

電気抵抗変化の結果



顕微鏡観察と
無線計測の比較



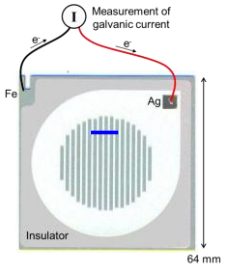
発表の構成

1. 研究背景
2. 損傷記憶スマートパッチによる疲労評価
3. ACM型腐食センサによる大気環境のモニタリング
4. ワイヤレスセンサネットワークの構築
5. まとめ

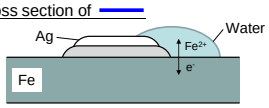
ACM(Atmospheric Corrosion Monitor)型腐食センサ

ACMセンサ：ガルバニック対を利用した大気腐食モニタリング型の腐食センサ

Overview

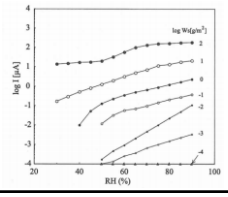


Cross section of



Anode: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$
Cathode: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

相対湿度・付着海塩量と出力電流の関係

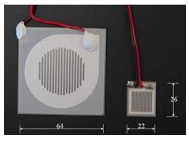


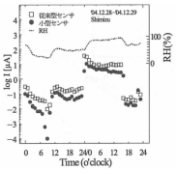
量産性および再現性が高く、ぬれ時間や付着海塩量、腐食速度といった大気環境の腐食性を長期間評価できる

篠原正: ふぇらむ, 11 (2006), 215.

ACM型腐食センサの開発現状

小型ACMセンサ

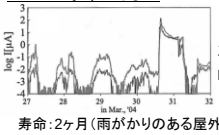




計測装置

重量 3.2 kg
寸法 350×262×140 mm

センサ寿命の向上



Zn/Ag（暴露1年後）
Fe/Ag（新品）

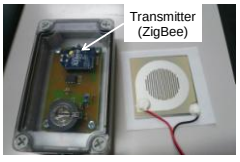
寿命：2ヶ月（雨がかりのある屋外）
↓
1年以上

課題
- 定期的なデータ採取
- バッテリー交換
- ネットワーク適用には小型計測装置が必要

山中将平, 元田慎一, 篠原正: "ACM型腐食センサの小型化について", 第52回材料と環境討論会, p. 49, 2005.
ACMデータロガー http://www.syrinx.co.jp/product/acm/acm16ch.htm

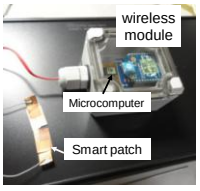
無線通信装置の開発

ACMセンサ（腐食環境）



Specification
Band frequency: 2.4 GH
Communication distance: 50 m

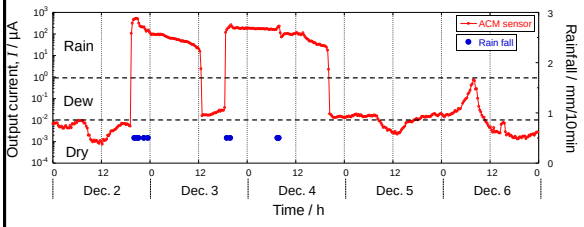
損傷記憶スマートパッチの無線計測装置



大気暴露試験の結果

場所：東京都文京区本郷
暴露方向：水平上向き

ACMセンサの出力電流と10分間降水量



ぬれ時間解析

Rain: 64h 38min
Dew: 77h 15min
Dry: 98h 7min

10 days (Nov. 29 - Dec. 8)

鋼の腐食速度推定　*CR*: 腐食速度, *L*: 腐食量, *Q*: 電気量

$$\log CR[\mathrm{mm/y}] = 0.682 \log Q_{\mathrm{eff}}[\mathrm{C/day}] - 0.256$$

$$Q_{\mathrm{eff}} = Q_{dew} + 0.2Q_{rain}$$ （海洋性環境の場合）

$$L = CR_{dew}T_{dew} + 0.0612T_{rain} - 6.00$$ （田園地帯の場合）

都心部での参考データがあれば推定できる可能性

発表の構成

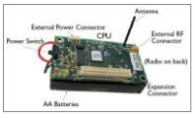
1. 研究背景
2. 損傷記憶スマートパッチによる疲労評価
3. ACM型腐食センサによる大気環境のモニタリング
4. ワイヤレスセンサネットワークの構築
5. まとめ

通信方式の選択

要求される特徴

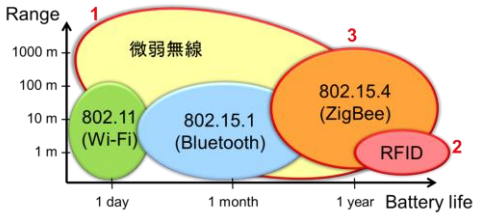
- 長期間使用したい→「低消費電力」
- 多数設置したい →「低コスト」
- 高速なデータ通信は必要ない

既存の無線センサ用プラットフォーム



MICA2

様々な通信規格



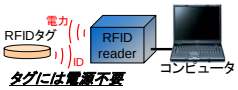
RFIDタグ（ICタグ、無線タグ）

背景

長期間のヘルスモニタリングが必要
→バッテリーレスが望ましい

RFID技術

（**R**adio **F**requency **ID**entification）



タグには電源不要

建築分野での利用例

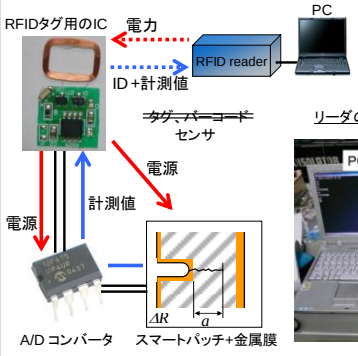
- RFタグによる生産情報管理への利用[9]
- 金属対応タグの研究開発[10]

→センシングへの応用研究は少ない

[9] 中島史郎, "IC タグを活用した生産情報管理による建築物の後期性の向上" BRI－H20講演会, (2008)
[10] ブッカーズ, "次世代ICタグ開発最前線", エヌ・ティー・エス(2006)

RFIDタグを用いたパッチのき裂長さ計測

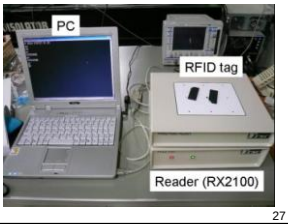
作製した計測装置の構成



特徴

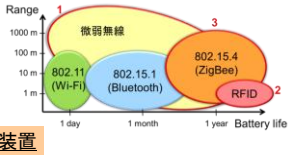
✓電源なし
✓無線

リーダの概観

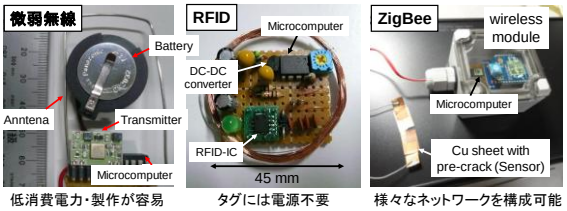


製作した無線通信装置の外観

様々な通信規格



製作した無線通信装置



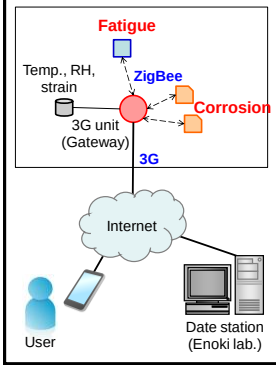
低消費電力・製作が容易　　タグには電源不要　　様々なネットワークを構成可能

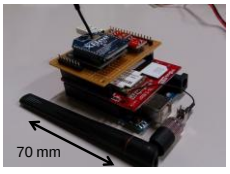
種々の無線通信規格の比較

	微弱無線	RFID	ZigBee
周波数帯域	315 kHz	135 kHz	2.4 GHz
通信速度	4 kbps	4 kbps	250 kbps
ネットワーク・トポロジー	1対1	1対N	N対N（メッシュ型）
通信距離	≈ 3 m	≈ 90 mm	＞10 m
平均消費電力（単3電池の寿命）	100 mW (約 2 日)	タグは電池不要	1.1 mW (約 200 日)
製作費用	センサ：2,000円 リーダ：2,000円+PC	センサ：数百円 リーダ：20万円+PC	センサ：2,000円 リーダ：2,000円+PC
特長と課題	ネットワーク化は困難	電源不要なので維持管理が容易、安価 ↕ 通信距離が短い	ネットワーク化しやすい 通信距離が比較的長い ↕ 省電力のための工夫が必要
適用先	-	電池交換が難しいところ 設置コストを抑えたい場合	長距離・メッシュ型センサネットワーク

センサネットワークの構成

Configuration





3G中継器（温・湿度センサ付き（P_{ave} = 83 mW）

モバイル端末による遠隔モニタリング

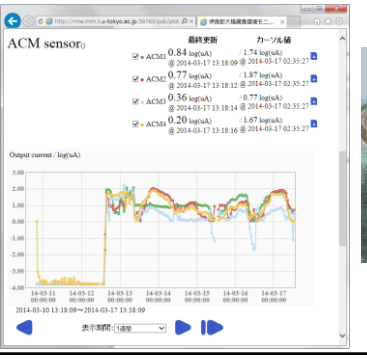
ワイヤレスネットワークの適用状況

下安勝橋（奄美大島）

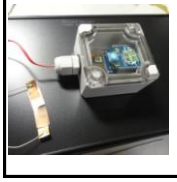
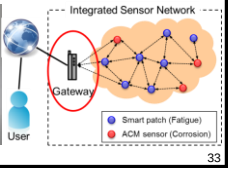
伊良部大橋（宮古島）

Web画面

http://rme.mm.t.u-tokyo.ac.jp:59760/pub/plot.php?uname=miyako



宮古島 伊良部大橋
全長6.5km

まとめ

- 疲労損傷スマートパッチの開発を進め、構造物の疲労損傷評価方法について検討を行った。
- ACMセンサ用の小型計測装置の作製を行い、センサネットワークシステムに接続することを可能にした。
- インターネット経由による疲労・腐食の遠隔モニタリングシステムの構築を行った。
- 実機への応用を目指すためには、(1)センシング情報の科学的な解析、(2)センシングに関する工学的な種々の技術的な課題の克服について検討を進める必要がある。