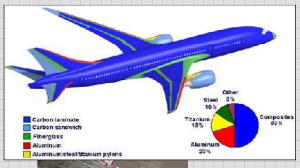
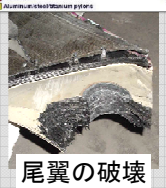
電気抵抗変化法の温度依存性を利用したCFRPの統計的損傷検知

高橋航圭（東工大，院），轟章（東工大），島村佳伸（静岡大），岩崎篤（群馬大），松崎亮介（東工大）

研究背景



航空宇宙分野における
CFRPの需要増大
損傷検知手法の要求



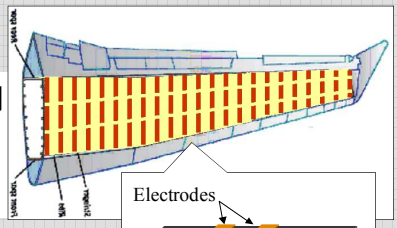
尾翼の破壊

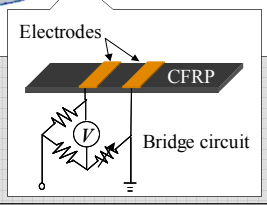
構造のスマート化
自己診断

電気抵抗変化法

炭素繊維をセンサとして利用
- 構造表面に電極作成
- ブリッジ回路で$\Delta R/R$測定

簡便，低コスト

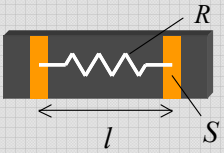




問題点
- ✓ 電極の損傷，劣化の影響
- ✓ 損傷同定の解析コスト高

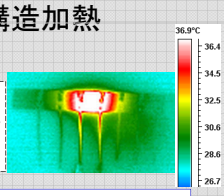
温度上昇に伴う電気抵抗変化測定

電極を利用したジュール発熱による構造加熱



温度変化

$$\frac{\Delta l}{l}=\alpha\Delta T,\ \frac{\Delta S}{S}=2\alpha\Delta T$$



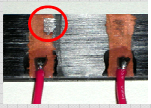
$$\frac{\Delta R}{R}=\frac{\Delta\rho}{\rho}+\frac{\Delta l}{l}-\frac{\Delta S}{S}$$

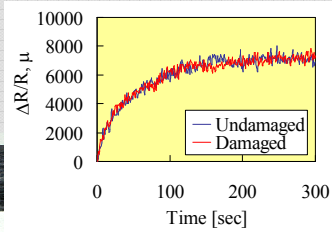
$$\frac{\Delta R}{R}=\frac{\Delta\rho}{\rho}-\alpha\Delta T$$

電極面積 S，電極間隔 l に依存しない．

損傷による熱ひずみの変化を検知

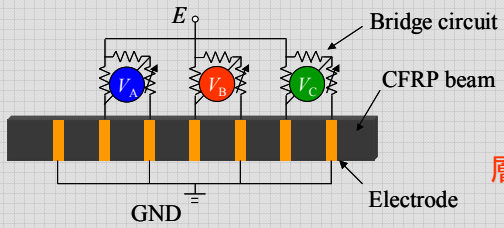
➢電極損傷前後の測定値比較
- 昇温後，冷却中に計測
- 測定周波数1.0Hz
- 電流2.0A

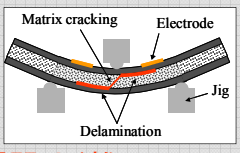




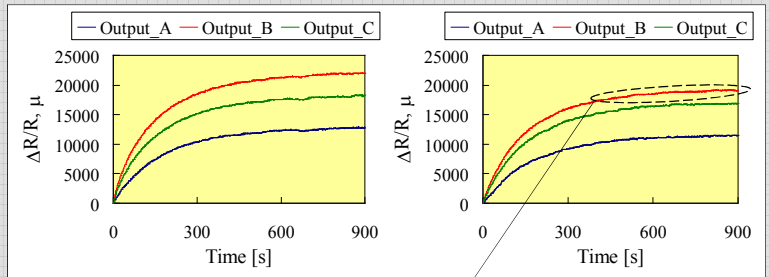
電極の損傷，劣化に影響されない．

➢電気抵抗変化の多点同時測定（センサ出力相関測定）
- 三つのブリッジ回路で測定．





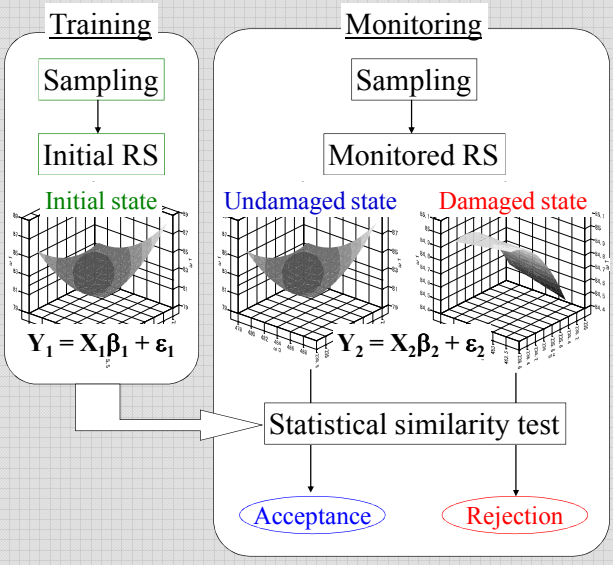
層間はく離
ブリッジB測定部に挿入



損傷により，相対的に出力が変化

統計的診断手法

➢センサ出力間の相関変化を統計的に検出



損傷時のデータ使わず，確率的に閾値決定

1. 同時刻のセンサ出力n組を任意に選択．
2. ΔR_Aを応答，ΔR_B，ΔR_Cを変数とする一次式作成．

$$\Delta R_A=\beta_0+\beta_1\Delta R_B+\beta_2\Delta R_C+\varepsilon$$

3. 最小二乗法により回帰係数を算出

$$\mathbf{b}=(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{y}$$

4. 応答曲面の残差二乗和から検定統計量F_0値算出．

$$F_0=\frac{SSE_0-(SSE_1+SSE_2)}{SSE_1+SSE_2}\times\frac{n-2p}{p}$$

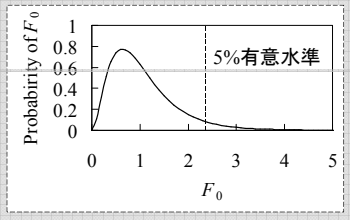
$$SSE=(\mathbf{y}-\mathbf{Xb})^T(\mathbf{y}-\mathbf{Xb})$$

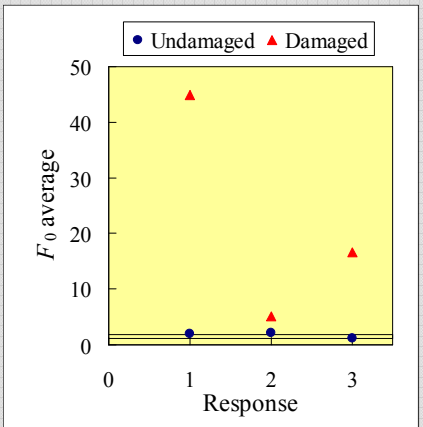
n:データ組数，p:自由度

5. 1~4を繰返し平均F_0値を算出．
6. 5%採択領域により，構造有無判別．

$$E(F_0)-z\frac{\sigma(F_0)}{\sqrt{r}}<\bar{F}_0<E(F_0)+z\frac{\sigma(F_0)}{\sqrt{r}}$$

7. ΔR_B，ΔR_Cを応答とし，1~6 を実施．





提案手法で損傷有無判別可能

結言

電極損傷に影響されず，CFRPの損傷のみを検知する電気抵抗変化法を提案し有効性を実証した．
統計的診断手法により，損傷時データを用いない閾値設定で相関はく離有無を判別した．