

## スマートボルトの開発

神奈川県立神奈川工業高等学校 機械科3年

加藤 凧・佐々木 柁・境 泰輝・遠藤 夏海

指導教諭 宮城 泰文

### 1. 緒言

日本を代表する人と物の流れを担う生命線「首都高速道路」。全長320km、一日の交通量100万台、全長の76%が空中にあるのが特徴で、まさに空中回廊である。このような建築構造物は世界でも類を見ない。1964年の東京オリンピック開催に合わせて造られた首都高速道路は、そのスケールと技術力に世界が驚いた。そんな首都高も建設から60年が経過し、1年に4万箇所以上の損傷が発生するまさに満身創痍の状態だ。首都高は高層ビルの間を縫う構造で、全区間を建て替えることは物流を止めてしまうため事実上不可能である。



図1 ビルの間を縫う首都高速道路

加えて日本は自然災害の多い国だ。高速道路の劣化が進む中、災害対策も取らなくてはならず、建替えできない首都高を修復し100年後に残す「インフラメンテナンス革命」が国土交通省によって進められている。あるものをどう守りどう残すかに注目が集まり、この困難な課題

への対応にさまざまな技術的アプローチが検討されている。



図2 阪神大震災で倒壊した高速道路

先述の解決策に機械科で学んだ知識・技術を活用できないか検討した結果、金属材料の特性を利用した構造物の破壊劣化予測技術を考案する。金属材料は荷重を加えていくと変形し、やがて破断に至る。しかし弾性範囲内であればフックの法則による復元力で荷重を取り除くと元の形状に戻る(図3)。この特性を利用しボルトにセンサを組み込み、構造物にボルトを締結するだけでストレスを検出できるシステムの開発を本研究のテーマとし、また新たなインフラメンテナンス技術として今回提案する。

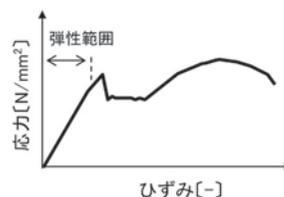


図3 金属材料の基本特性

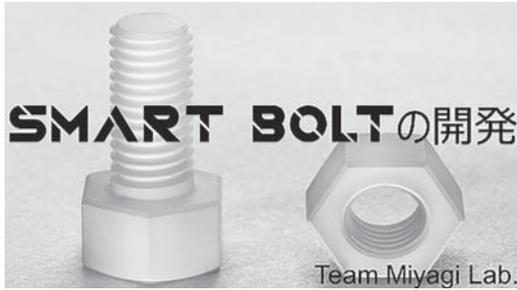


図4 課題研究のテーマ

## 2. センサの選定

汎用箔ひずみゲージは、金属表面に貼るだけで物体に生じるひずみを測定することができる。ひずみゲージの構造は、薄い絶縁体上にクランク形状でレイアウトされた金属の抵抗体を有し、抵抗体の変形に伴う電気抵抗を測定することでひずみ量を算出することができる。一般に金属の電気抵抗の大きさは長さに比例し、断面積に反比例する。ひずみゲージはこの性質を利用したセンサの一種であり、本研究ではひずみゲージをセンサとして使用する。

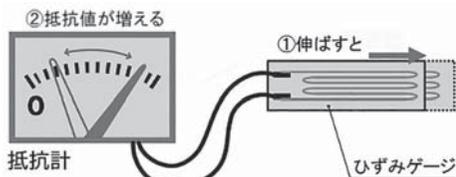


図5 ひずみゲージの原理

## 3. スマートボルトの製作

M 8 の六角ボルト（半ねじ）を使用し、ボルト首下にひずみゲージを貼り付ける。ケーブルを通すためにボルト頭中央から首下に貫通穴をあける（図6）。ボルトを弾性範囲内で使用する分にはひずみをどこで計測しても一定であるが、より正確に計測できるように対面2箇所にひずみゲージを貼り付けた。今回製作したこのボルトを「スマートボルト」と名付けた。

## 4. ボルト締結における力の相関

部材をボルトとナットで締結する際（図7）、ボルトが部材に与える圧縮と引き換えにボルト

自身が伸びる。このとき発生する力を軸力といい、締付トルク、圧縮、及び軸力は相関関係をもつ。すなわちひずみゲージで軸力を測定することによって部材内部のストレス（圧縮）を算出することができる。

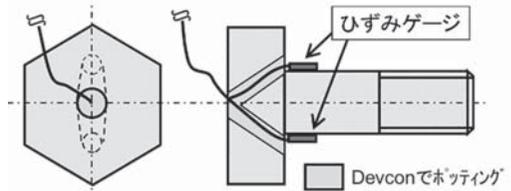


図6 スマートボルトの構造

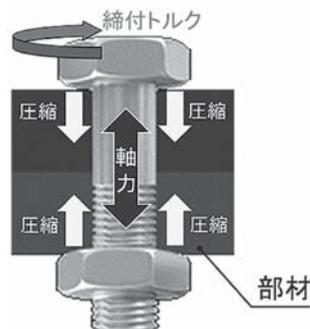


図7 軸力と圧縮の関係

## 5. 増幅装置

2枚のひずみゲージを用いた2ゲージ法（図8）でブリッジ回路を構築した。計測信号が微弱なため、ADコンバータモジュールを使用した信号増幅装置（図9）を開発した。これにより増幅したひずみゲージの信号をマイコンに取り込み抵抗値の変化を読み取ることができる。

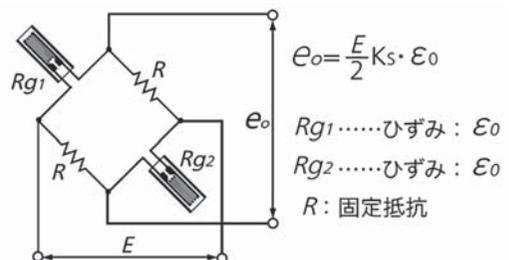


図8 2ゲージ用ブリッジ回路

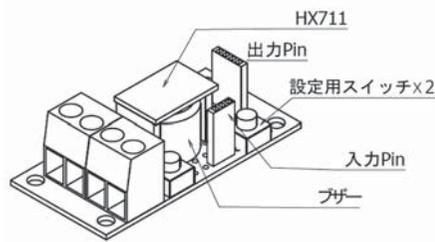


図9 増幅装置

## 6. システム概要

スマートボルトシステム（図10）は、増幅装置と小型マイコンを介し出力先としてPCに接続する。あらかじめ設定した負荷に達するとブザーが鳴り、観測者に知らせる画期的なシステムだ。本システムを制御するために専用プログラムも開発した（図11）。

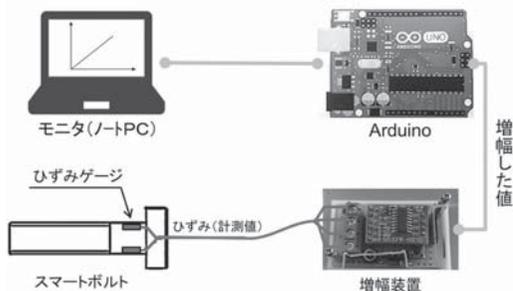


図10 スマートボルトシステム

```
#include<HX711.h>
HX711 channel1;
int sw=0;
float vol=0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  channel1.begin(A0, A1);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(3, INPUT);
}

void loop() {
  float val=channel1.read_average(10);
  sw=digitalRead(3);
  if (sw==HIGH){
    vol=val;
    tone(13,200,200);
  }

  val=val-vol;
  Serial.println(val);
  if (val>10000){
    tone(13,4000,200);
  }else{
    delay(10);
  }
}
}
```

図11 制御プログラム（抜粋）

## 7. 計測値信頼性

スマートボルトシステムは、測定した値が真値である保証はない。そこで校正された計測機にスマートボルトを接続して正確なひずみの値を測定する。締付トルクを3点設定し、トルクレンチを用い徐々に増し締めしていき、計測機と私たちの開発したスマートボルトシステムのひずみを比較した。相関曲線（図12）に示すように近似曲線の相関係数 $R^2$ が1に近いため相関ありと判断できる。ただし絶対値が大きく異なるため近似曲線 $y=0.0035x-1086.2$ を補正演算式としてプログラムに加えることで、スマートボルトシステムで測定した値を真値に置き換えることが可能となる。

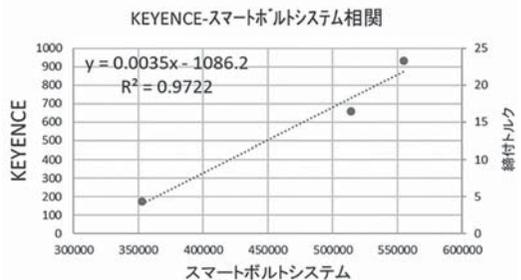


図12 相関曲線

## 8. 実験結果

補正演算式を加えたプログラムに、M8ボルトの締付トルクである22 [N・m]に到達したらブザーが鳴るように設定し実験を行った。実験結果は、見事に狙い通りの値でブザーを鳴らすことができた。

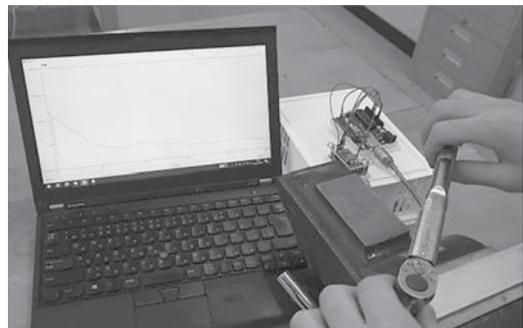


図13 トルクレンチを用い実験する様子

## 9. 技術開発と知的財産権

神奈川工業高等学校では、2年次から課題研究の授業がある。3年次の課題研究への接続を考慮し、知的財産権の重要性と科学技術と社会の繋がりについて学んだ。指導教員の後押しもあり、本研究データをもとに知的財産権の申請に必要な書類（特許請求の範囲、明細書、図面、要約書）を作成した。特許請求の範囲を指定するために、他に先願済の技術がないか特許情報サイトを徹底的に調べ上げた。私たちの名付けた「スマートボルト」は残念ながら商標権として既に登録済みであり、意匠権も酷似するものが存在した。しかし特許権としては類似する技術は見当たらず、今回開発した仕様、計測方法、プログラムを特許請求の範囲として特許庁に申請し無事に出願受理された。

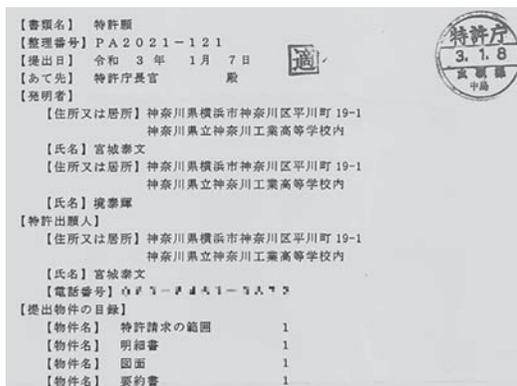


図14 出願受理された特許願

## 10. 結言

私たちの開発したスマートボルトは、建築・機械構造物に締結するだけで任意の負荷でブザーを鳴らすことができる。これにより定期点検の手間とコストを大幅に抑え、構造物の劣化を常時モニタリングすることが可能となる。構

造物にボルトを締結するのが困難な状況であれば、直接構造物にスマートボルトを埋没させても計測が可能な汎用性の高い破壊劣化予測技術である。



図15 使用イメージ

## 11. おわりに

課題研究の活動を通して、機械科で学んだ知識・技術をどう活用するのか、正しい計測の仕方、QC 7つ道具（相関）を用いたデータ解析の手法、新技術を開発した際にパテントを出願することの重要性、世の中に無い技術を創造する楽しさを学ぶことができた。また校内外の研究発表会に参加する機会を与えていただき高校生活で一番思い出に残る経験となった。



図16 課題研究発表会（校内）

（研究動画配信）

神奈川県立神奈川工業高等学校  
機械科（全日制）ホームページ



工業教育資料 通巻第398号  
(7月号)

2021年7月5日 印刷  
2021年7月10日 発行  
印刷所 株式会社インフォレスト

© 編集発行 実教出版株式会社  
代表者 小田良次  
〒102 東京都千代田区五番町5番地  
- 8377 電話 03-3238-7777  
<https://www.jikkyo.co.jp/>