

オゾンによるゴム劣化に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令 5～令 7

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：畠山 乃(R5-R6)、西村敦史(R7)、
佐藤 京、寺澤貴裕

【要旨】

一般に耐震性に優れるとされるゴム支承は、地震時においても上部構造を安定して支持する機能を発揮する必要がある。そのため、劣化による性能低下を防ぎ、供用期間を通じて要求性能を満足することが重要である。ゴム支承の主材料であるゴムは、化学的作用、特にオゾンの影響を受けることで亀裂を生じ、ゴムと鋼板の接着力の低下や力学的特性の変化を引き起こす可能性がある。設計上想定された供用期間にわたりゴム支承の機能を確実に保持するためには、架橋位置の環境条件に応じた耐久性評価条件を設定することが重要である。しかし、橋梁周辺、特に桁下環境におけるオゾン濃度の変動や気温などの環境条件に着目し、それらに対応したゴムの耐オゾン性を評価するための促進試験条件を検討した研究は十分に行われていない。

そこで本研究では、橋梁の桁下環境がゴムのオゾン劣化に及ぼす影響を調査し、架橋位置の環境条件に応じた耐オゾン性評価のための促進試験条件について検討した。

キーワード：積層ゴム支承、オゾン劣化、促進試験、計測システム

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、ゴム支承を採用する橋梁が増えた¹⁾。その一方で、特に北海道内の橋梁に設置されたゴム支承において、オゾンの影響を受けたゴム部にクラックが発生する事例が多いことが報告され²⁾、これまでに、天然ゴムについては、低温環境下の耐候性³⁾、オゾンに対する耐久性³⁾、クラックの補修方法⁴⁾などに関する研究が行われている。また平成30年に改訂された道路橋支承便覧⁵⁾においては、耐オゾン性を確認する試験として、標準温度(40℃)のほか低温下(-30℃)での促進試験の条件が示されている。しかしながら、橋梁用ゴム支承を対象に架橋環境に着目したオゾン濃度の変動や、気温などの環境条件を明らかにした事例はない。

そこで、橋梁桁下環境がオゾン劣化に与える影響を

調査し、架橋位置に最適な桁下環境に対する促進試験の条件に対する検討を実施した。

2. 桁下環境の計測について

オゾンは、日差しが強く、気温が高く、風が弱い日において高濃度になりやすいとされている。そこで、ゴム支承近傍におけるオゾン濃度と同時に、紫外線量、気温、湿度の変動について、可能な限り経済的に長期間にわたるモニタリングを行うため、文献調査を行い、そこから得られた情報を参考にワンボードマイコン、シングルボードコンピュータおよび各種環境計測用センサを組み合わせた計測システムを製作した^{6)~10)}。そして、製作した装置を周辺環境が異なる北海道内の4つの国道橋(本稿では、A橋～D橋と記す。)に設置し、環境データを取得した。図-1には、装置の設置状況の



図-1 装置の設置状況

表-1 機器構成および主な仕様

構成機器	名称または主な仕様
(a) 環境データ計測用センサ	
オゾンセンサ	MQ-131, 低濃度用, オゾン検出範囲: 10 - 1000ppb
温湿度センサ	DHT11, 温度: -20°C~60°C, 湿度: 5%~95%
紫外線センサ	GUVA-S12SD, 検出範囲: 240~370nm
(b) ワンボードマイコン	
ワンボードマイコン	Arduino Uno Rev3
(c) シングルボードコンピュータ	
シングルボードコンピュータ	Raspberry Pi 4 Model B 8GB
リアルタイムクロックモジュール	DS1307
(d) LTE 通信デバイス	
LTE 通信デバイス	USB ドングル型 (USB Type-A)
(e) 太陽光発電システム	
太陽光モジュール	システム電圧: 12V, 最大動作電力: 20W, 2枚 (並列)
シールドバッテリー	公称電圧: 12V, 20 時間率: 20Ah
充電コントローラ	低電圧保護: 停止電圧 11.5V, 復帰電圧 12.5V

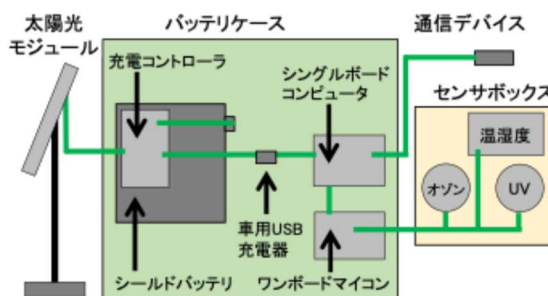


図-2 計測システムの構成図

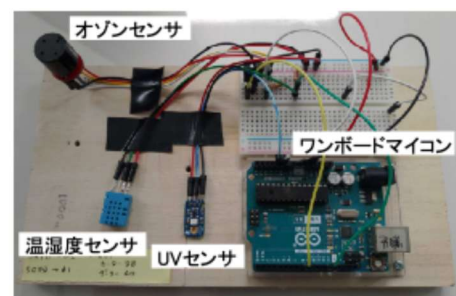


図-3 センサとワンボードマイコンの仮組

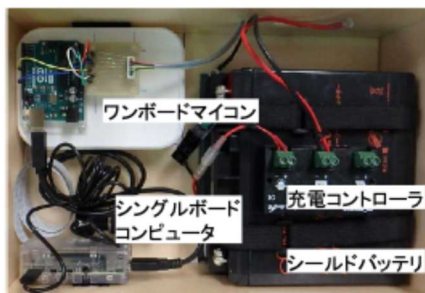


図-4 ケース内部の機器配置



図-5 センサボックス（左：外観、右：内部）

一例を示している。装置は、橋台天端のゴム支承1基の近傍に設置した。

2.1 計測システムの概要

表-1には、計測システムを構成する機器およびその主な仕様を示している。計測システムは、(a) オゾン濃度、温湿度等の環境図-2 計測システムの構成図
ンサと記す。)、(b) センサを制御し、データを取得するためのワンボードマイコン、(c) ワンボードマイコンから逐次データを受け取り、データファイルの作成や電子メールによりデータ送信を行うためのシングルボードコンピュータ、およびシステムの時刻を保持するためのリアルタイムクロックモジュール、(d) LTE 通信デバイス、(e) 各機器に電源を供給するための太陽

光発電システムで構成されている。図-2には、計測システムの構成図、図-3には、3種類のセンサとワンボードマイコンを仮組み立てした状態、図-4には、ワンボードマイコン、シングルボードコンピュータおよびその電源となるシールドバッテリーを格納したケース内部、図-5には、センサボックスの外観、各センサ位置図-3 センサとワンボードマイコンの仮組 計測システムは、太陽光と蓄電池を利用して稼働させている。

センサは、オゾン濃度、温湿度、紫外線強度計測用の電子部品を用いた。いずれのセンサも電子部品を扱うECサイトなどで一般に購入できるものである。

ワンボードマイコンでは、各センサへの電源供給のほか、計測制御およびバッテリー電圧のモニタリングを行っている。今回の試作では、センサ制御のためのブ

プログラムを作成し、オゾン濃度および紫外線強度については概ね 0.5 秒間隔で 1 分間サンプリングし、120 個の計測値から平均値、最大値および最小値を算出している。また温湿度およびバッテリー電圧については概ね 1 分間隔でサンプリングを行っている。取得したデータは、逐次、USB ケーブルによるシリアル通信にて、シングルボードコンピュータへ送信している。

シングルボードコンピュータでは、Python 言語を用いて作成したプログラム（以下、処理プログラム）にて、受信したデータに対し受信時刻を付記し、正時毎に 1 時間分のデータが保存されたテキストファイルとして作成、保存した後、LTE 回線を介して電子メールにより研究担当者にデータ送信させる仕様としている。なお、現地でのデータ取得試行の過程で、何らかの原因により LTE 通信が確立できないことがあることが分かった。この時に処理プログラムが停止してしまうことを回避するために、処理プログラム内には例外処理として、(1) 30 分後の再送信、(2) それでもなお通信が確立していない場合は、ファイル名に未送信データであることを付記する処理を追加した。なお、今回選定したシングルボードコンピュータではバッテリー電圧の低下により給電が途絶えている間の時刻は保持できない仕様である。そこで、GPIO ピンにリアルタイムクロックモジュールを接続し、本計測システムの時刻を保持させる仕様とした。また可能な限り電力消費を抑える目的で、Wi-Fi 機能 OFF や電源 LED 消灯などの設定を施している。

LTE 通信デバイスは USB ドングル型を選定している。デバイスは、バッテリーケース内に収めることを基本としたが、現地において LTE 回線の接続状態が不安定であった箇所については、USB 延長ケーブルを用いて通信モジュールを桁下外へ設置している。

装置は太陽光発電システムにて稼働させている。太陽光モジュールは、最大動作電力 20W のパネルを 2 枚並列に接続し、充電コントローラを介して 20Ah (20 時間率) のバッテリーに接続している。太陽光モジュールは、発電効率の良い傾斜角度で設置するのが一般的であるが、冬期間におけるパネル上の堆雪を可能な限り避けるため、図-2 に示しているように垂直に近い角度での設置または、床版張り出し部の下に設置した。システムへの電源供給は、シングルボードコンピュータの USB-C ポートに対して行っている。今回選定したシングルボードコンピュータの電源仕様は、5V-3A であるのに対し、太陽光発電システムのシステム電圧は 12V である。ここではできるだけ簡素にシステムを

構築する目的で、シガープラグタイプのスマートフォン充電器を用いて、バッテリーからの 12V 出力を 5V に降圧させた。

2.2 計測結果

2025 年 1 月から 2026 年 4 月までの計測結果として、オゾン濃度、外気温、紫外線強度を図-6、図-7、図-8 に示す。図に示した記録は、計測記録より月間の最頻頻値を算定したものである。これらの値を比較することに年間のオゾン濃度の変動と温度または紫外線強度との関係を示している。なお、オゾン濃度については、札幌市内における環境省が計測しているオゾン濃度を参考として示す。

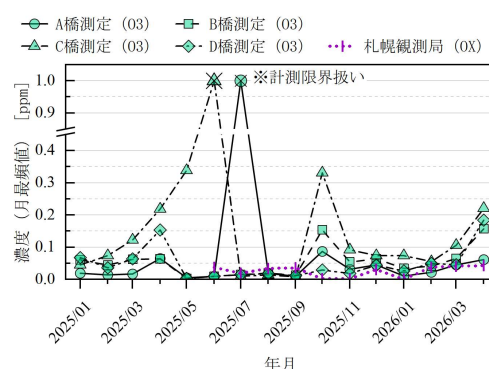


図-6 オゾン濃度（月間最頻値）

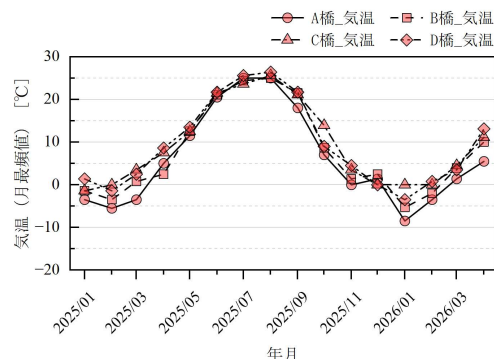


図-7 外気温（月間最頻値）

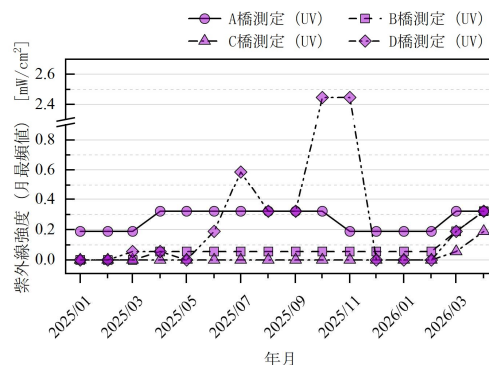


図-8 紫外線強度（月間最頻値）

2025 年 6 月から 2026 年 4 月まで環境省より出され

ている札幌市内のオゾン濃度は、10月および11月において濃度が低くなっているが、年間を通じて大きな変動はなく、濃度は高くても0.05ppmを上回らない。一方、桁下におけるオゾン濃度は、いずれの橋梁においても6月から9月において0.05ppmを下回るほど濃度が低く、それ以外の月では濃度が高くなる。特に4月および10月は顕著に高くなり、低い月と比べて3倍から6倍の濃度を示した。札幌市内の観測期間中のオゾン濃度と桁下のオゾン濃度を比べると、桁下の濃度が低い期間を除くと桁下の方が概ね高い傾向であり、都市部よりも桁下におけるオゾン濃度は高い傾向であることが示された。

桁下の外気温や紫外線強度とオゾン濃度との関係については、このデータからは相関性は確認出来なかった。

3. 促進試験の条件の検討

耐オゾン性試験（促進試験）は、実環境よりも高いオゾン濃度や一定の温度条件を与えることにより、短期間でゴム材料の耐オゾン性を評価する試験である。橋梁用ゴム支承の長期耐久性を評価するためには、促進試験で得られた劣化の程度を、実橋の供用環境における劣化進捗と対応付ける必要がある。そのためには、促進試験条件と実環境条件との関係を整理し、実環境に対する促進倍率を設定することが重要となる。

ここでいう促進倍率とは、実環境において一定の劣化状態に到達するまでの時間と、促進試験において同等の劣化状態に到達するまでの時間との比として定義される。例えば、実環境で10年間の曝露により発生する亀裂状態が、促進試験で100時間の曝露により再現される場合、時間比に基づく促進倍率を設定することができる。

そこで、桁下環境計測に合わせて、写真-1に示すようにダンベル試験片を現地に配置し、曝露試験を行った。しかし、表面に変状が確認されず、実環境曝露における劣化の発生および進展を十分に追跡し、促進試験結果との対応から促進試験の条件となる促進倍率を定量的に決定するには至らなかった。



写真-1 曝露試験の一例

4. まとめ

橋梁桁下環境がゴム支承のオゾン劣化に与える影響を調査し、架橋位置の桁下環境に対する促進試験の最適な条件について検討を実施した。その結果、以下の成果と知見が得られた。

- 1) 経済的に長期間にわたる桁下の環境モニタリングが可能なシステムを開発した。
- 2) 都市部と比べて桁下のオゾン濃度は高く、低濃度の期間と比べて6倍の濃度に至る時期があることが確認された。
- 3) 実環境において明確な亀裂発生時期を特定するためには、より長期間の曝露試験および継続的な環境計測を行う必要があることが分かった。

参考文献

- 1) ゴム支承協会：ゴム支承の歴史、https://www.j-rba.com/siryoku/2023_10011_01.html（2026年5月29日閲覧）
- 2) 杉本博之ほか：天然ゴム支承の低温耐候性に関する研究、土木学会論文集、No. 693/VI-53、pp.73-86、2001。
- 3) 余野智哉ほか：ゴム支承のオゾン劣化による耐久性に関する研究、令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会、I-247、2019。
- 4) 伊藤康晃ほか：免震ゴム支承のオゾン劣化特性とクラック補修法に関する研究、構造工学論文集、Vol.63A、2017。
- 5) 日本道路協会：道路橋支承便覧、2019。
- 6) 田中武ほか：オゾンセンサーを内蔵するIoTの作成とその応用、広島工業大学紀要研究編、第55巻、pp.31-39、2021。
- 7) Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd：Ozone Gas Sensor (Model：MQ131LowConcent) Manual Version:1.6、Valid from:2021、<https://www.winsen-sensor.com/sensors/o3-gas-sensor/mq131-l.html> 内の DATASHEET（2026年5月29日閲覧）
- 8) Olivier Staquet：Arduino-MQ131-driver、<https://github.com/ostaquet/Arduino-MQ131-driver>（2026年5月29日閲覧）
- 9) Adafruit Industries：DHT-sensor-library、<https://github.com/adafruit/dht-sensor-library>（2026年5月29日閲覧）
- 10) Kohei MATSUSHITA：Arduino library for GUVAS12SD (UV sensor)、<https://github.com/ma2shita/GUVA-S12SD>（2026年5月29日閲覧）

GUIDELINES FOR WRITING A “REPORT OF RESEARCH RESULTS, PWRI”

Research Period: FY2023-2025

Research Team: Structures Research Team,

Cold-Region Construction Engineering Research Group

Author: HATAKEYAMA Osamu(R5-R6),

NISHIMURA Atsushi(R7)

SATO Takashi

TERASAWA Takahiro

Abstract: Rubber bearings, which are generally regarded as having excellent seismic performance, are required to maintain their function of stably supporting the superstructure even during earthquakes. Therefore, it is important to prevent performance degradation due to deterioration and to ensure that the required performance is satisfied throughout the service life. Rubber, the primary material of rubber bearings, can develop cracks due to chemical actions, particularly the effects of ozone. Such cracking may lead to a reduction in the bonding strength between rubber and steel plates and may also affect the mechanical properties of the bearing. To ensure that rubber bearings reliably maintain their function over the design service life, it is important to establish durability evaluation conditions that reflect the environmental conditions at the bridge site. However, few studies have focused on environmental conditions around bridges, particularly the under-girder environment, such as variations in ozone concentration and temperature, or on the establishment of accelerated test conditions for evaluating the ozone resistance of rubber under such conditions.

In this study, the influence of the under-girder environment of bridges on the ozone deterioration of rubber was investigated, and accelerated test conditions for evaluating ozone resistance were examined with consideration of the environmental conditions at the bridge site.

Keywords: Rubber bearing, Ozone deterioration, Accelerated aging test, Measurement system

論文リスト

● 学術誌等による成果普及

学会発表等その他（計 2 本）

- e-1) 寺澤貴裕、佐藤京、田邊琢、西村敦史：ゴム製支承近傍のオゾン濃度について、土木学会全国大会第 82 回年次学術講演会、2026.9
- e-2) 寺澤貴裕、佐藤京、田邊琢、西村敦史：ゴム製支承近傍の環境データ計測の試行について、土木学会全国大会第 81 回年次学術講演会、CS9-33、2025.9

土研刊行物（計 1 本）

- f-1) 寺澤貴裕、佐藤 京、田邊 琢、西村敦史：ワンボードマイコンおよびシングルボードコンピュータを用いたゴム支承近傍の環境データ計測の試行について、寒地土木研究所月報、No.877、2026.1