

近畿建設協会研究助成発表会

2023 年 9 月 5 日



一般社団法人

近畿建設協会

論 文 集

目 次

1. 下水道整備率が低い地域での震災による管路の被害と津波による水源としての河川水の変化
和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 横田 恭平 . . . 1
2. 深層学習を用いた土の締固め管理手法の開発
立命館大学大学院 理工学研究科 教授 小林 泰三 . . . 9
3. 福井県の地盤データプラットフォームの整備
福井工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 吉田 雅穂 . . . 17
4. 明石市東播海岸におけるアカウミガメの産卵地保全活動のガバナンス構築に関する実践的研究
明石工業高等専門学校 都市システム工学科 准教授 石松 一仁 . . . 23
5. 現場技術者の潜在能力を引き出す建設インクルージョン・マネジメント研究
立命館大学 経営学部経営学科 教授 善本 哲夫 . . . 32
6. IoT センシングによる橋梁のインテリジェント化に関する研究
立命館大学 理工学部環境都市工学科 准教授 川崎 佑磨 . . . 40
7. 火災を受けた鋼橋部材の健全性評価手法の構築
大阪大学大学院 工学研究科 准教授 廣畑 幹人 . . . 46
8. 疲労き裂進展の簡易モニタリングの開発
関西大学 環境都市工学部 教授 石川 敏之 . . . 54

※所属等は 2023 年 4 月時点のもので、助成選定時とは異なる場合がございます。

下水道整備率が低い地域での震災による管路の被害と 津波による水源としての河川水の変化

和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 横田恭平

第1章 震災による管路の被害

1. 研究の目的, 方針, および経過

1.1 研究背景

上水道や下水道の事業について、人口減少による使用料収入の減少、人員削減、施設の老朽化などにより、これまでの規模での事業は難しくなっている。このことから農業集落排水施設や合併浄化槽などの小規模な施設や個別処理での処理の重要性が高まっている。

水道の配管は耐震化が進められている。その進み具合は「重要給水施設管路の耐震化に係る調査結果」を見ると、適合の割合が各都道府県で異なり、和歌山県は、比較的低い割合となっている。さらに和歌山県は他の県と比較して農業集落排水施設や合併浄化槽（単独浄化槽もあり）で下水を処理することが多い場所であるため、震度 7 でも耐える水道管の割合を市町村レベルよりさらに小さい地区レベルで把握する必要がある。

1.2 研究目的

下水道の処理方法が農業集落排水施設や合併浄化槽の場所において、震災による上下水道の破損状況の把握を以下に基づき地区レベルで明らかにする。

- ・地区ごとの小さい規模・下水道整備率が低い場所を対象とする。
- ・具体的な対象地として和歌山県の和歌山市（比較対象として下水道整備率が高い場所）、御坊市（下水道整備率が低い場所）とする。
- ・過去の地震の被害状況より、震度と管路の被害の割合の関係を把握する。過去の地震として、1995 年の阪神淡路大震災、2011 年の東日本大震災や 2016 年の熊本地震などを対象とする。
- ・地区ごとの災害時における下水道の破損状況を推定する。

1.3 方針及び経過

本章の方針として、和歌山県の和歌山市及び御坊市の下水道管の被害管路延長及び被害件数を算定していく。経過としては、和歌山市の一部及び御坊市の一部の地域において算定を行った。以下にこれらの結果及び結論を示す。

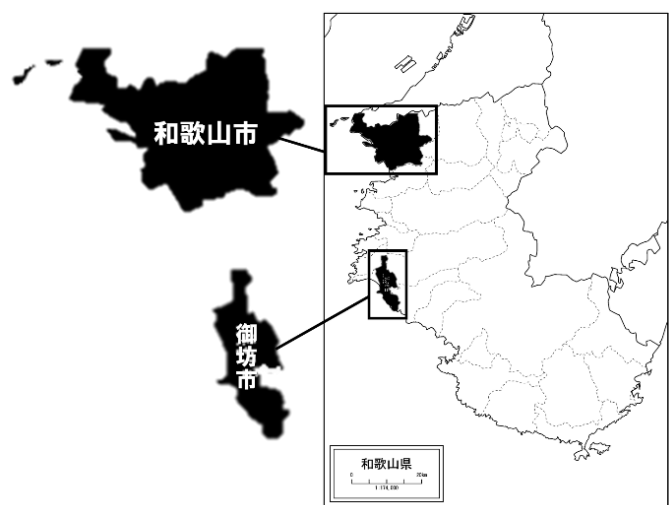


図1 研究対象地（和歌山県和歌山市及び御坊市）

2. 得られた結果と具体的な結論

2.1 調査地の概要

調査対象地を図 1 に示す。和歌山県内で下水道整備率が低い地域が御坊市、高い地域が和歌山市である。

御坊市を選定した理由として、①住宅地が点在しており、下水道整備率が低い地域である。②多くは農業集落排水施設や合併浄化槽で下水を処理している。③震災時に津波高が 10m を超える。④震度 7 を想定されている、などの理由から、震災時の被害は相当のものと思われるため選定した。図 2 に御坊市で対象とした菌地区、塩屋町北塩屋湊地区、塩屋町北塩屋北浜地区、塩屋町南塩屋地区を示す。

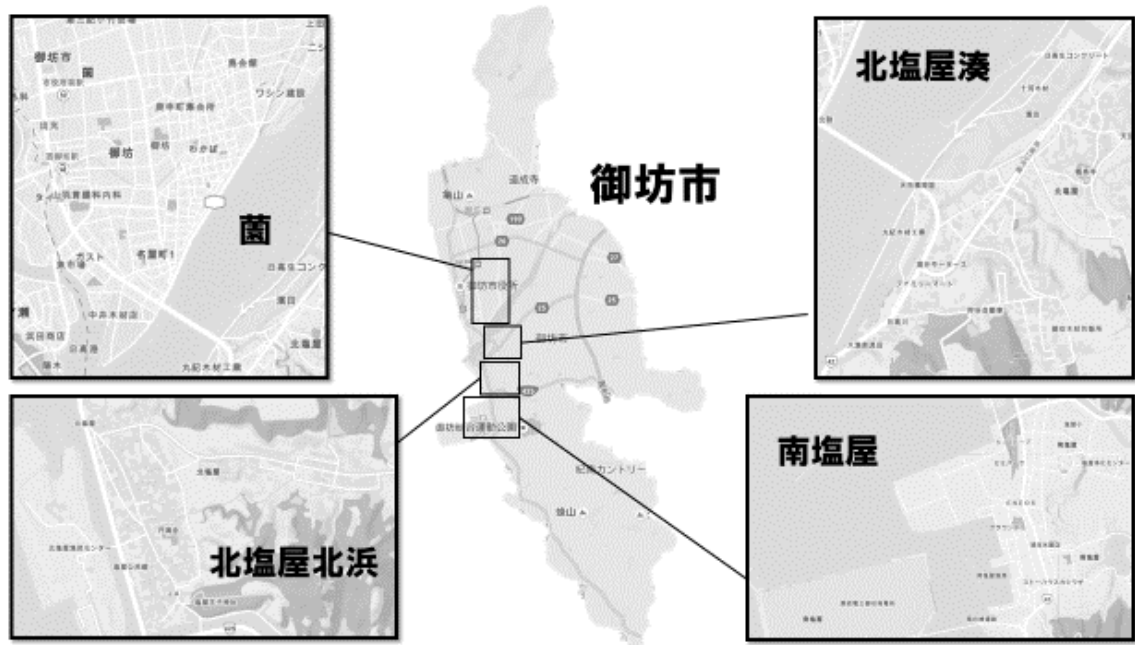


図 2 研究対象地の詳細（和歌山県 御坊市）

和歌山市を選定した理由として、①下水道整備率が高い地域である。②震災時に津波高が 10m を超える。③震度 7 を想定されている、などの理由から選定した。図 3 に和歌山市で対象とした加太地区、（松江・島橋・野崎）地区、（築港・湊御殿）地区、（布引・毛見）地区を示す。

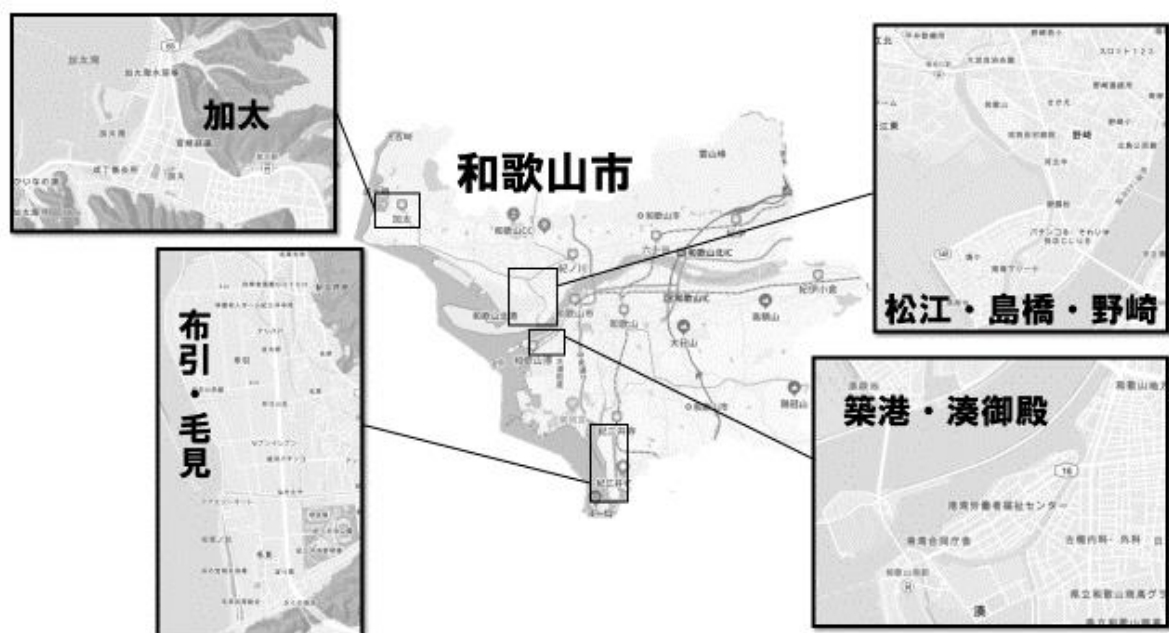


図 3 研究対象地の詳細（和歌山県 和歌山市）

ここでは本研究で比較対照とした地区を以下に示す（「御坊市一和歌山市」の順に示す）。①「塩屋町北塩屋湊地区」－「（築港・湊御殿）地区」、②「塩屋町北塩屋北浜地区」－「加太地区」、③「南塩屋地区」－「（布引・毛見）地区」、④「菌地区」－「（松江・島橋・野崎）地区」。これらの管路延長は、表 1（御坊市の選定地区）と表 2（和歌山市の選定地区）に示す。対照とした理由として、津波の影響を受ける場所、津波が河川の遡上によって影響を受ける場所などの特徴が似ているため選定した。

表 1 御坊市の対象地区における下水道の管路総延長

選定地区	北塩屋湊	北塩屋北浜	南塩屋	菌
管路総延長[km]	7.18	5.53	8.28	8.65

表 2 和歌山市の対象地区における下水道の管路総延長

選定地区	築港・湊御殿	加太	布引・毛見	松江・島橋・野崎
管路総延長[km]	59.03	4.80	22.47	13.19

2.2 計算方法

御坊市役所下水道課・和歌山市役所に下水管配管図の提供を依頼し、そのデータから配置している管路を全て把握する。その際に、耐震化が行われているかについても確認する。そしてどの地区で下水道の管路が破損するのかを推定するために過去の震災データや、参考文献から得た下記の算出式の式(1)(2)(3)、表 3 と表 4 を用いて震度と下水道の破損状況の関係性を確認した^{1)~3)}。それらを和歌山県内の想定震度と照らし合わせ破損状況を予測していった。今回、和歌山市・御坊市は共に PL 値は 15 以上であったため、 $\zeta=0.072$ 、 $\lambda=3.680$ 、 $C=0.216$ の条件を用いる。本研究では R' の値として「塩ビ管胸管」の値を用いる。震度 7 の地表最大速度は、震度と加速度に明確な基準はない。過去に起こった阪神淡路大震災(兵庫県)の記録を参考にし、震度 7 の地表最大速度は 140~160(cm/s)と仮定し、比較の指標に用いる。

$$D = \Sigma L \cdot R(v) \cdot \cdot \cdot (1)$$

$$R(v) = C\Phi\left(\frac{\ln v - \lambda}{\zeta}\right) \cdot \cdot \cdot (2)$$

$$D' = \Sigma L \cdot R' \cdot \cdot \cdot (3)$$

D ：総被害件数(件)， D' ：被害管路延長(km)， L ：管路延長(km)， $R(v)$ ：標準被害率評価式(件/km)， R' ：管種・管径別被害率(%)， $\Phi(x)$ ：標準正規分布の確率分布関数， v ：地表最大速度(cm/s)

表 4 震度階級による各種係数

管種	液状化危険度	PL 値 計測震度基準値	震度階級				
			5-	5+	6-	6+	7
塩ビ管 陶管	A~D	ALL	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75
			1.0%	2.3%	5.1%	11.3%	24.8%
その他の管	A	15 < PL	0.6%	1.3%	3.0%	6.5%	14.5%
	B	5 < PL ≤ 15	0.5%	1.0%	2.2%	4.8%	10.7%
	C	0 < PL ≤ 5	0.4%	0.9%	2.0%	4.5%	9.8%
	D	PL = 0	0.4%	0.9%	1.9%	4.2%	9.2%

表 3 液状化の有無による各種係数

液状化	ζ	λ	C
液状化あり (PL ≥ 15)	0.072	3.680	0.216
液状化あり (0 < PL < 15)	0.004	3.652	0.289

表5 各地区の被害管路延長の結果

単位	御坊市 選出地域	震度		震度		和歌山市 選出地域
		6強	7	6強	7	
[km]	北塩屋湊		1.78		14.64	築港・湊御殿
	北塩屋北浜		1.37	0.54		加太
	南塩屋		2.05		5.57	布引・毛見
	藺		2.15		3.27	松江・島橋・野崎

2.3 調査結果及び考察

2.3.1 被害管路延長について

和歌山市・御坊市における選出地区から、「2.2 計算方法」より南海トラフの想定震度に相当する平均被害率と管路延長から求めた被害管路延長を表5に示す。被害管路延長の比較について、下記の結果となった。

「北塩屋湊地区」 < 「築港・湊御殿地区」

「北塩屋北浜地区」 > 「加太地区」

「南塩屋地区」 < 「布引・毛見地区」

「藺地区」 < 「松江・島橋・野崎地区」

「北塩屋北浜地区」－「加太地区」についてのみ御坊市の方で被害管路延長が長くなる結果を示した。このように示した理由としては、総管路延長に差があった事が挙げられる。表3～表4から分かることは、計測震度によって被害率の値は決まっており、その計測震度に大きな差異がなければ、総管路延長の差が被害管路延長の差となる。では総管路延長に差が生じた要因として、御坊市北塩屋北浜地区では、海岸沿いに面した国道42号線を中心に、住宅地がある東に向かって下水管が埋設されている。しかし、和歌山市加太地区では、加太駅周辺の住宅地にしか下水管は埋設されておらず、西側にある海岸沿いの住宅地周辺に下水管は一つも埋設されていなかった。同じ海岸沿いにもかかわらず、北塩屋北浜地区と加太地区に違いが顕著に見られた。加太は観光名所としても有名で宿泊施設も点在し、人口的には北塩屋北浜地区より多い。よって人が集まる地域こそ、下水管の埋設工事又は耐震化を進めていくべきと考える。

2.3.2 総被害件数の比較について

和歌山市・御坊市における選出地域から、「2.2 計算方法」より震度7の地表最大速度140～160(cm/s)での中間値、150(cm/s)に焦点を当て、比較地区別の総被害件数を図4に示す。総被害件数も同様に、総管路延長によって差が生じる。

「北塩屋湊地区」－「築港・湊御殿地区」間では、「築港・湊御殿地区」が「北塩屋湊地区」に比べて住宅地が圧倒

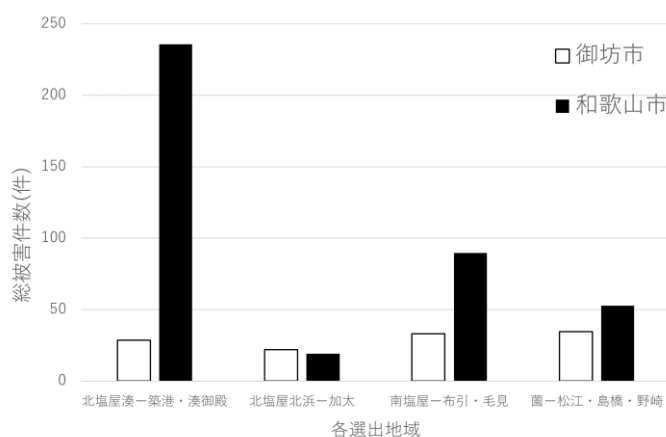


図4 各地区の総被害件数の結果

的に多く、総管路延長に差が生まれることは明白である。次に、「北塩屋北浜地区」－「加太地区」間では総管路延長に差が小さいため、そこまでの違いは見られなかったと考えられる。そして、「南塩屋地区」－「布引・毛見地区」間では、地形の大きさの関係もあり、和歌山市の方で総管路延長が大きくなり、差が生じるのは明らかである。しかし、「菌地区」－「松江・島橋・野崎地区」間では住宅地の多さや地形の大きさに関係なく、差があまり生まれなかった。つまり和歌山市のような都市部にもかかわらず、住宅地が密集している「松江・島橋・野崎地区」地区での総管路延長が少なかったのである。要因として二つ考えられる。一つ目に、地形の問題である。「松江・島橋・野崎地区」では土入川を挟んで地区が混合している。そのため、地区を繋ぐための橋が多数存在するということになる。つまり、地区同士を繋ぐ下水管が埋設された橋が地震の影響で破損してしまうと、その地区全域で汚水の排水機能が止まってしまうため、迂闊に下水管工事を進めないのではないかと考えられる。二つ目は、浄化槽での個別処理を行っている住宅が密集しているのではないかと考えられる。一つ目の要因が関係し、一部の管路崩壊で全域が機能しなくなった場合、個別処理を行う方が良いと決定したのではないかと考えられる。以上の要因によって総管路延長が少ないのではないかと考えた。菌地区では地区の概要にも記述した通り、管路の情報が少なく、正確な管路の位置が分からない特徴がある。しかし、菌地区は御坊市の中心地であり、また御坊市役所があり、多くの人口を抱えることから地震による管路の被害による影響が大きいため、早急に管路の耐震化を行うべきである。

第2章 津波による水源としての河川水の変化

1. 研究の目的、方針、および経過

震災によって上水道の管路に損害がない場合であっても、水道水源の河川水が津波によって塩分が上昇することにより、利用できなくなる。それは震災時に発生する津波が河川を遡上することによって、河川水の塩分濃度が上昇するためである⁴⁾。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震時に発生した津波によって、河川や地下水の塩分濃度の上昇が確認された⁵⁾。発生が予測されている南海トラフ巨大地震で、和歌山県は震度6弱-震度7の被害を受けるとされている。また、和歌山県が発表している南海トラフ巨大地震津波浸水想定図によると、御坊市や印南町は津波の被害も発生すると考えられているため、水道水源の河川水や井戸水の塩分濃度の上昇が懸念されている。

そこで本章では、和歌山県印南町の取水源である日高川内の地点Aを対象に、災害時に津波の影響により上昇した塩分を除去するまでに必要な水量及び期間の推定を目的とする。経過として日高川の土壌を用いて、津波の影響をどの程度の河川水量をもって除去することが可能かについて実験を用いて明らかにすることができた。

2. 得られた結果と具体的な結論

2-1 調査概要

図5に示すように和歌山県紀中に位置する日高川を対象に調査を行った。調査地点は地点Aでこの周辺及び上流では家屋が少なく、自然が多い環境となっている。調査期間は2023年1～2月である。

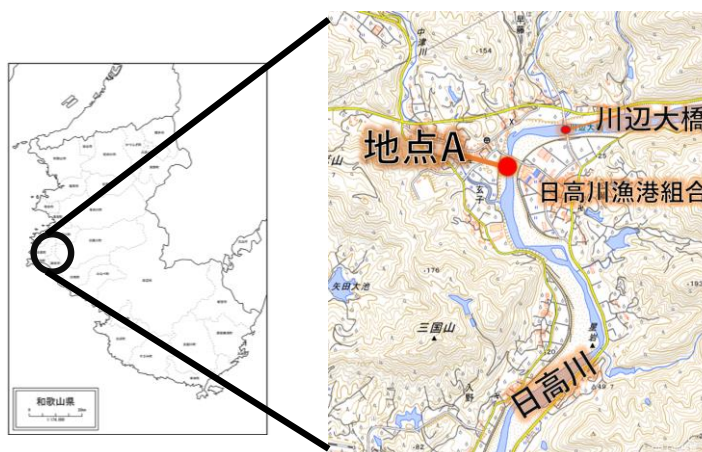


図5 研究対象地（地点A）

2-2 試料採取法及び測定方法

図6に示すように、縦 40 cm、横 53 cm、奥行 41 cm の透明の NF ボックスに電動ドリルにて短側面に4つずつ、底面に 16 個の排水用の穴を設けた。その容器に、日高川の A 地点の川底より採取した土を 10 cm 入れた。その土壤に海域より採水してきた海水を 10L 投入し、津波によって塩分が上昇した状態に近づけた。これを初期状態として、その状態から定量の水道水または河川水を複数回に分けて入水し浄化（塩分除去）を実施した。本実験では、水道水または河川水を 1 度に 5 L または 10 L 投入し、塩分除去が完了するまでの水量を比較した。次の入水は、前入水の透水が完了してから行った。短側面からの排水を排水 A、底面からの排水を排水 B とし、入水ごとにそれぞれの電気伝導度を測定した。排水 A と排水 B に分けた理由は、排水 A は土壤の表面の塩分を除去するのに利用され、排水 B は土壤全体の塩分を除去するのに利用されるため、除去対象が異なることからその違いを把握するために行った。入水量のうち、排水 A の水量の計測を行い、入水量から排水 A の水量を減じたものを排水 B とした。水道水または河川水の投入を完了する判断の方法として、排水の電気伝導度が水道水または河川水と同じかそれに近い数値に収束するまでとした。今回の実験で用いた水道水の電気伝導度は 5.70～6.40 mS/m、日高川の河川水の電気伝導度は 5.40～5.80 mS/m であり、排水 A と B とともにこの数値まで電気伝導度が低下することを目標とした。また、実験に用いた水道水は日高川由来のものであった。毎回透水が終了するまでの時間を計測し、透水にかかるまでに必要な時間の平均も求めた。

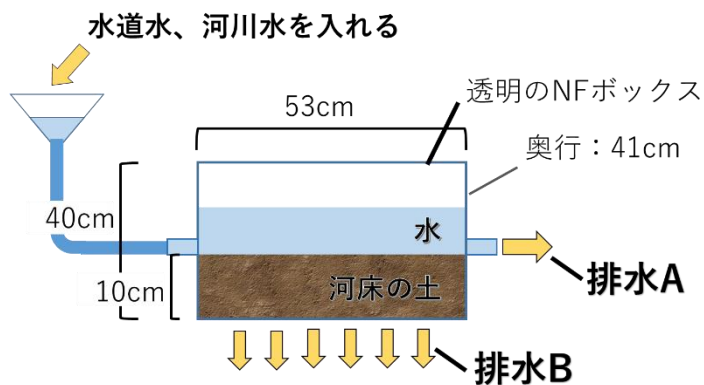


図6 実験方法について

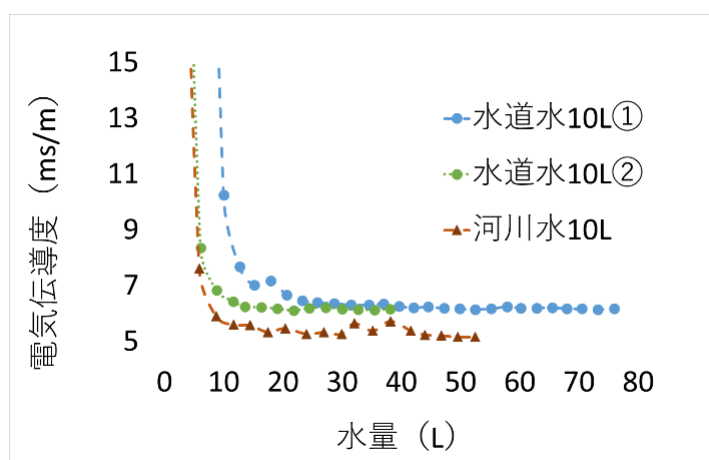


図7 排水Aの水量と電気伝導度の結果

2.3 結果

図7に排水Aの水量とその電気伝導度の結果を示す。凡例に示す10Lとは、水道水または河川水を10Lずつ投入したことを意味する。排水Aと排水Bを合わせた量が10Lとなるため、それぞれの最初のプロットは10Lより少ない量となっている。最初の水量によって電気伝導度は10 mS/m以下まで減少し、ある程度水量を加えると一定の値を示した。「水道水10L」は、排水Aが22 Lまたは23 Lになると一定の値となった。「河川水10L」については、さらに少なく排水Aが10L程度となると一定の値となり、河川水の方がより早く土壤の塩分除去を完了することができる結果となった。

次に図8に排水Bの水量と電気伝導度の結果を示す。凡例は上記と同様で10Lとは、水道水または河川水を10Lずつ投入したことを意味する。また排水Aと排水Bを合わせた量が10Lとなるため、同様に最初のプロットは10Lより少ない量となっている。「水道水10L」は73Lまたは89Lで一定の値となった。「河川水10L」については、排水Aと同様で水道水より少ない水量で土壌の塩分除去が完了する結果となった。

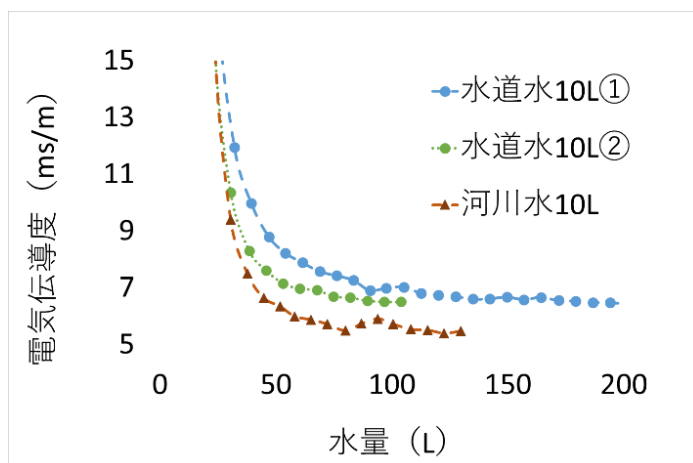


図8 排水Bの水量と電気伝導度の結果

以上のことから水道水を用いるより河川水を用いる方が土壌の塩分を除去する

ために必要な水量は少ないことが分かった。水道水も同じ日高川を起源とする河川水であるが、本研究室で採水してきた河川水の方が電気伝導度の値が低いことから、より多くの塩分を除去することができた可能性がある。本研究室では5Lについても実験を行ったため、その結果を表6に示す。「5L」とは、1度に土壌に加える水道水または河川水の量を意味する。またそれぞれの水量は、塩分の除去が完了するのに必要な値である。完了する値として水道水または河川水の電気伝導度と同様または近似的な値を示した時とした。前述の通り水道水の電気伝導度は5.70～6.40m s/m程度、日高川の河川水の電気伝導度は5.40～5.80m s/mであった。参考までに完了と判断したときの電気伝導度の値を示す。この表では、排水Aと排水Bに分けて示している。

2.4 考察

本研究では、NFボックスに対象地点の河床から採取した土壌を入れて実験を行った。NFボックスの面積は、410mm×530mmとなっている。排水Aは表面部分を浄化するために使われた水で、排水Bは表層及び土壌内を浄化するために使われた水となる。水道水5Lの2回(①と②)の実験でおよそ2倍程度の差異を示したが、2回行った結果については平均した値を用いて考察を行う。水道水または河川水による排水Aの水量は、5Lと10Lでおよそ7倍の大きな差異を示した。この差異を示した理由として、5Lの場合は多くが土壌に浸透し、排水Aが少なくなったと考えられる。排水Bについて

表6 塩分除去完了時に排水A及び排水Bの電気伝導度及び水量の結果

	排水A		排水B	
	電気伝導度 (ms/m)	水量 (L)	電気伝導度 (ms/m)	水量 (L)
水道水5L①	6.36	3.2	6.68	56.53
水道水5L②	6.99	6.99	6.95	69.26
水道水10L①	6.47	22.64	6.91	89.06
水道水10L②	6.2	23.86	6.7	73.33
河川水5L	5.5	3.38	5.7	85.4
河川水10L	5.48	19.79	5.72	70.65

は、河川水 5 L の方が 10 L と比較して必要な水量が多くなることがあり、逆に水道水のように 10 L の方で水量が多くなる場合があった。その差は、排水 A のような 7 倍の違いを示すことがなかった。よって 5 L と 10 L に大きな差異はなく、かつ排水 A のように加える水量の違いによる変化についても関係性を示さなかった。浄化が完了するために必要な水量は、塩分の除去のために加えた総水量が排水 A と排水 B を足したものとなることから、5 L の方で少なく、10 L の方で多い結果となった。よって津波の影響を受けた土壌を浄化する方法として、少ない水量で徐々に浄化する方がより浄化に必要な総水量を少なくすることができることが分かった。

本研究室で東北珪砂を用いた塩分除去の実験において、浄化に必要な水量は面積に比例することが分かっている。そのことから、河川の面積と実験で用いた容器の面積から必要な水量を推定し、津波の影響を受けた土壌を浄化するために必要な水量を推定する。仮定として津波の影響を受ける日高川下流の土壌はすべて本実験で行った土壌とする。河川の面積は 1,200,000 m²、容器の面積は 0.2173 m²であった。よって面積の差は 5,522,319 倍となる。必要な総水量は、排水 A と排水 B を合わせたものであるため、水道水及び河川水すべての値を平均して用いる。その結果、5 L ずつで浄化することを想定すると浄化に必要な総水量は、74.92 L となり、10 L ずつの場合は、99.77 L となる。よって必要な総水量は、必要な総水量及び面積差より 413,732 m³そして 550,961 m³となる。日高川の水量は、少ない時で 10 m³/s となっている。よって必要な総水量を確保するためには、11 時間及び 15 時間が必要となる。よって津波の影響を日高川が受けた場合、半日程度で元の状態に戻ることが予測される。

参考文献

- 1)高知県 HP (2013) : 「被害想定 の 計 算 方 法」 ,
https://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/010201/files/2013051500465/2013051500465_www_pref_kochi_lg_jp_uploaded_attachment_95462.pdf
- 2)神奈川県 HP—地震被害被害想定調査報告書手法編 : 第 5 章 ライフライン被害の想定手法,2015,
<https://www.pref.kanagawa.jp/documents/16375/768706.pdf>
- 3)国土交通省 : 管路施設の被害予測手法について,
https://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/info/seisaku_kenkyu/jishinhigai/04.pdf
- 4) 吉川泰弘, 阿部孝章, 中津川誠, 船木淳悟 : 河川津波による塩水遡上現象に関する研究, 海岸工学, 71 巻, 2 号, 2015.
- 5) 茅根康佑, 盧敏, 田中仁, 梅田信, 真野明, 佐々木幹夫ら : 東北三県における津波の河川遡上特性, 水工学, 70 巻, 4 号, 2014.

その他 本報告に関する外部発表

- 1) 影澤拓知・横田恭平・村尾琉翔 : 下水道整備率が低い地域での震災による管路の被害, 第 57 回日本水環境学会年会 (2022 年度)
- 2) 川島七聖, 横田恭平 : 津波による河川への海水の残存量及び海水成分の除去に必要な河川水量の推定, 第 57 回日本水環境学会年会 (2022 年度)

謝辞

本研究において、和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科の影澤拓知くん、川島七聖さん、村尾琉翔くんには実験の補助、データの収集及び整理、結果の考察を考える上で多大なご協力をいただいた。ここに謝意を示す。

深層学習を用いた土の締固め管理手法の開発

立命館大学理工学部 教授 小林泰三

1. はじめに

土の締固めは、地盤構造物の性能（剛性、遮水性、安定性など）を大きく左右する。近年、自然災害外力の増大、構造物の多様化、良質な地盤材料の不足等により、土の締固めには徹底した品質管理が求められるようになった。これまで、土の締固めは長年、砂置換法や RI 法などを用いた密度や含水比計測による品質管理（品質規定方式）が行われてきた。施工後の品質を直接評価できる手法ではあるが、計測には時間と労力を要し、点管理にならざるを得ない。近年では、品質を満足するまき出し厚と締固め回数を予め規定し、それが守られていることを確認する手法（工法規定方式¹⁾）が普及してきている。GNSS を搭載した締固め機械の導入によって施工と同時に面的な管理が可能となるため、施工不足や過転圧の防止、工期短縮などのメリットが見込まれる。

一方、海外では、1970 年代後半から振動ローラの振動輪挙動計測から地盤の品質を評価する手法（加速度応答法）の開発が始まり、1990 年代後半には我が国でも開発・実用化が進められた²⁾。適用できる土質条件が限られることや、この手法の管理基準がないことから、我が国では広く普及に至らなかったが、近年、ICT 活用促進の機運の高まりを受けて、加速度応答法に再び注目が集まってきている。加速度応答法は、転圧によって地盤の剛性が増大すると振動輪の振動挙動に乱れが発生することに着目し、振動ローラの加速度応答を計測し、その波形の特徴量から締固めた地盤の剛性をリアルタイムに評価するものである。著者らは、加速度応答法の新たな展開として、深層学習を活用した手法の提案に向けた検討を行っている。本報告書では、その実現可能性を探るために実施したフィージビリティ検討の結果を報告する。

2. 深層学習による地盤剛性の評価

2.1 振動輪の加速度応答シミュレーション

本研究では、転圧中の振動輪の加速度応答を入力して、地盤の剛性（最終目標は地盤反力係数 k_s ）を AI（深層学習）によって推定する手法を提案する。一般に、深層学習には大量の教師データが必要となるが、締固めの現場において加速度データと地盤剛性（正解ラベル）の両者を収集するのは困難である。そこで本研究では、図-1 に示すように、振動輪の加速度応答を再現できるシミュレータを

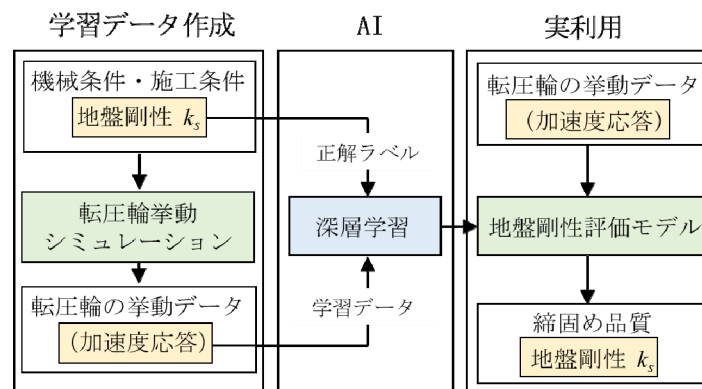


図-1 AI を用いた加速度応答法

構築し、正解ラベルである地盤剛性を変化させた場合の加速度応答データを大量に作成し、これを教師データとして学習させることにした。

本研究では、建山ら³⁾が提案した 2 自由度のマス・バネ・ダンパ系モデル (図-2) を用いて教師データの作成を行うことにした。本モデルは、フレームー振動輪系と振動輪ー地盤系の運動方程式をそれぞれ次式で表現する。

$$m_1\ddot{x} + k_r(x - y) + c_r(\dot{x} - \dot{y}) = m_1g \quad (1)$$

$$m_2\ddot{y} + k_s y + c_s \dot{y} - k_r(x - y) - c_r(\dot{x} - \dot{y}) = m_2g + F \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

ここに、 m_1 ：フレームの質量、 m_2 ：振動輪の質量、 x ：フレームの鉛直変位、 y ：振動輪の鉛直変位、 k_r ：フレームー振動輪間の防振ゴムのばね係数、 k_s ：地盤のばね係数、 c_r ：フレームー振動輪間の防振ゴムの粘性減衰係数、 c_s ：地盤の粘性減衰係数、 F ：振動輪の起振力、 f ：振動輪の基本振動数である。

地盤は圧縮力のみ抵抗して引張力には抵抗しない。よって振動輪には地盤からの引張力は作用しないはずである。建山らは、このことを反映するために、地盤反力が負の値を取るとき、すなわち、 $k_s x + c_s \dot{y} < 0$ となるときには地盤のばね係数 k_s と粘性減衰係数 c_r をともに 0 にする条件式を導入した。この条件のもと、式(1)と式(2)を連立して数値的に解くことで、各パラメータに応じたフレームや振動輪の鉛直変位の時系列変化や加速度応答（教師データ）を計算することができるようになる。

図-3 は、11t 級の振動ローラを想定して計算された加速度時刻歴波形（上段）とそれを高速フーリエ変換（FFT）した振幅スペクトル図（下段）の一例である。同図には、盛土造成現場で実測された実波形データも併せて示している。図-3(a)～(c)は、地盤ばね係数をそれぞれ $k_s = 38.6, 63.8,$

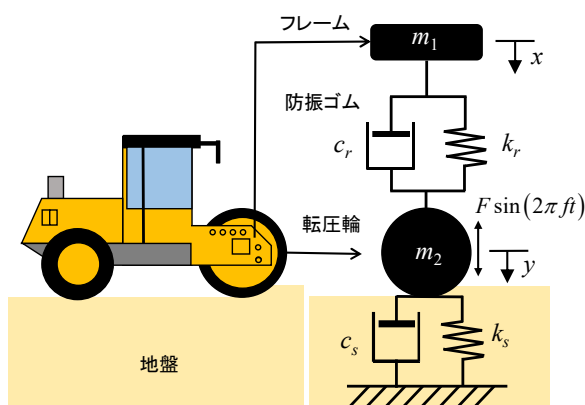


図-2 地盤ー締固め機械系相互作用モデル³⁾

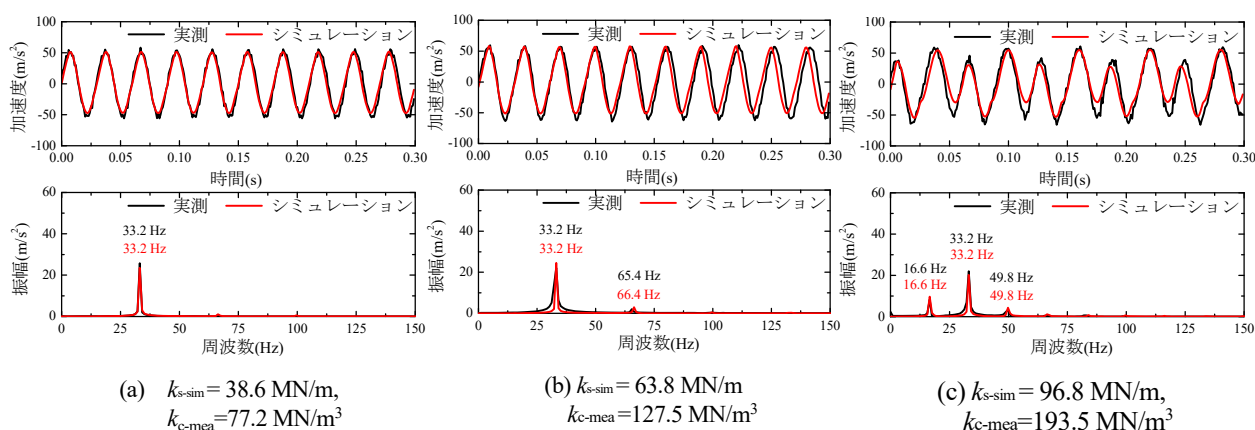


図-3 シミュレーションで得られた加速度波形と実測波形の比較

96.8MN/m に設定したときのシミュレーション結果である（他の諸パラメータの詳細については後述する）。同図における実測データは、それぞれ 2, 8, 16 回の転圧を行ったときの加速度応答である。図-3(a)の加速度応答波形は規則的な正弦波を示しており、卓越する振幅スペクトルは振動輪の偏心錘の周波数 33.3Hz（これを基本振動数と呼ぶ）と一致している。すなわち、締め固めが十分でない柔らかい地盤では振動輪の起振力が支配的であり、地盤の剛性は振動輪の挙動に影響を及ぼさない。やや剛性を大きくした図-3(b)では、加速度応答波形の概形は大きく変化していないものの、振幅スペクトルでは基本周波数（33.3Hz）の 2 倍にあたる 2 次高調波成分（66.4Hz）が現れており、振動輪の挙動に変化が表れていることが確認できる。同図(c)では、加速度応答波形に大きな乱れが確認でき、振幅スペクトルにも基本周波数に対する 1/2 次分調波成分（16.6Hz や 49.8Hz）が出現している。このように、上述したモデルによるシミュレーションによって、実際の振動ローラの振動輪の挙動をよく再現できることを確認することができる。

2.2 教師データと深層学習モデル

本研究では、図-4 に示す 7t 級の振動ローラ（起振力に High モードと Low モードがある）をモデル機として、提案する手法の概念検証（Proof-of-Concept）を行った。同振動ローラの諸元（カタログ値）を表-1 に示す。ここでは、表-1 に示したパラメータに基づいて High モードと Low モードに応じた加速度シミュレーション波形を生成し、それらを学習したモードごとの地盤剛性推定モデルを構築した。



図-4 検証に用いた 7t 級振動ローラ

表-1 振動ローラの諸元（計算パラメータ）

フレーム質量 m_1 [kg]	1,480
振動輪の質量 m_2 [kg]	2,340
振動輪の直径 D [m]	1.22
振動輪の幅 B [m]	1.7
起振力 F [kN]	118.0 (H), 93.0 (L)
振動輪の基本振動数 f [Hz]	30 (H), 38 (L)
防振ゴムのばね係数 k_r [N/m]	10,000
防振ゴムの粘性減衰係数 c_r [Ns/m]	769.41

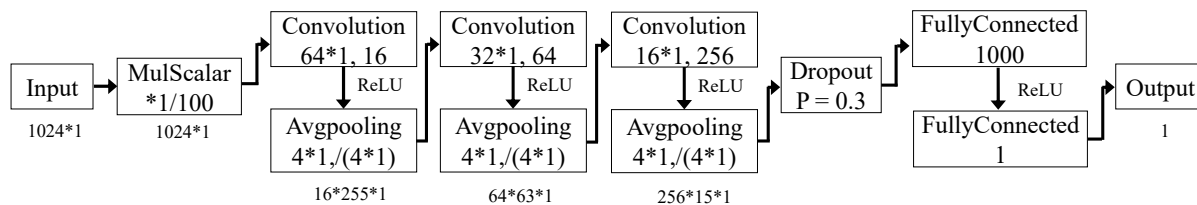


図-5 1D-CNN のネットワーク構造

本研究では、深層学習に 1 次元の畳み込みニューラルネットワーク（1D-CNN）を用いた。ここでは、図-5 に示すように、畳み込み層、活性化関数、Average pooling 層のセットを 3 回繰り返す、その下位に Dropout 層と全結合層 2 層を配置するネットワーク構造とした。活性化関数には ReLU 関数、損失関数には二乗誤差関数を用いて、地盤ばね定数 k_s を数値で予測する回帰モデルを構築した。

本報では、シミュレーションで生成した 1.024 秒間の加速度値を時系列に一次元配列した数値データ（1,000Hz, 1,024 点）を学習させることにした。加速度シミュレーション波形は、地盤ばね係数 k_s を 0.05～250MN/m の間で 0.05MN/m ピッチで変化させて、High/Low モードごとにそれぞれ合計 5,000 データ生成した。防振ゴムと地盤の粘性減衰係数 c_r , c_s は、振動輪—車体フレーム系および振動輪—地盤系の臨界減衰係数 $2\sqrt{m_1k_r}$, $2\sqrt{m_2k_2}$ に減衰比 D_r , D_s をそれぞれ乗じたものとした。ここでは、藤山・建山³⁾の先行事例を参考に、 $D_r = 0.1$, $D_s = 0.4$ と設定した。また、振動輪の基本周波数 f については、実現場においては多少変動することが分かっており、カタログ値 (f Hz) を中心に ± 2 Hz の範囲でランダム（一様分布）に与えることにした。

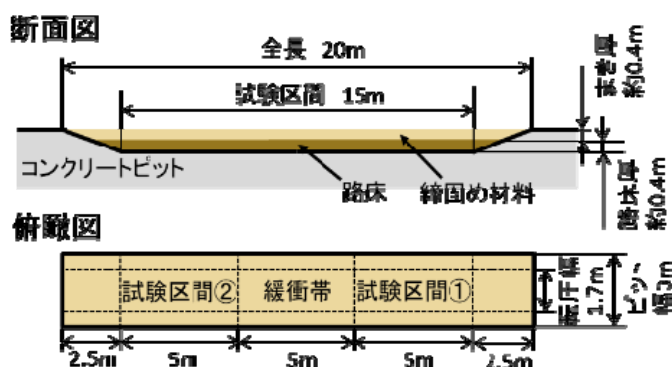
3. 実機を用いた実験検証

3.1 実験の条件と方法

本研究では、深さ 0.8m、幅 3m、全長 20m のコンクリート製ピット（図-6）において、前述した 7t 級振動ローラを用いた検証実験を行った。地盤材料には、礫分：6.1%、砂分：50.5%、細粒分 43.3% の礫交じり細粒分質砂（SF-G）を用いた。本実験では、最適含水比 $w_{opt} = 13.0\%$ （最大乾燥密度：1.940g/cm³）に対して、乾燥側 $w_1 = 9.45\%$ 、やや乾燥側 $w_2 = 11.35\%$ 、やや湿潤側 $w_3 = 13.59\%$ の 3 条件のモデル地盤（まき厚は約 0.4m）を作製し、それぞれで 2～16 回（8 往復）の転圧を行った。図-6(b) に示すように、全長 20m のピットを中央の 5m 区間を挟んで右側と左側の 2 区間（試験区間①と②）に分割し、試験区間①では High モード、試験区間②では Low モードの締固めを行った。



(a) 実験ピット



(b) 試験区間の設定

図-6 室内実験ヤード



図-7 小型 FWD 試験による地盤反力係数の計測

また、深層学習モデルによる推定値の妥当性を検証するために、本研究では、締固めた地盤に対して小型 FWD 試験⁴⁾ (図-7) を実施し、実測値として地盤反力係数 $K_{30\text{FWD}}$ を得た。小型 FWD 試験は、地表面に接地した載荷板上に重錘を自由落下させて衝撃荷重を加え、これによって生じた荷重と変位を測定して地盤の剛性を評価する可搬型の原位置試験装置である。ここでは各試験区間（各試験条件）につき 5 点の計測を行った。

3.2 実験結果と剛性評価の妥当性検証

図-8 は、転圧回数と小型 FWD で計測した実測地盤反力係数 $K_{30\text{FWD}}$ の関係を示したものである。図(a)の Low モード、図(b)の High モードともに、最適含水比よりも乾燥側の w_1 , w_2 の含水条件においては（図(b)の w_2 の 16 回転圧時を除いて）、転圧回数の増加とともに地盤反力係数が増大していることが分かる。また、より乾燥している w_1 の場合の方が、 w_2 の場合よりも剛性が大きくなっていることが分かる。一方、やや湿潤側の w_3 の条件では、Low モード、High モードのいずれにおいても転圧回数を増やしても剛性が大きくならなかった。最適含水比よりもやや乾燥側で最大の剛性を示すことや、含水比が高い場合は過転圧が生じやすいことは一般に良く知られていることであり、本実験で得られた傾向と定性的に一致する。

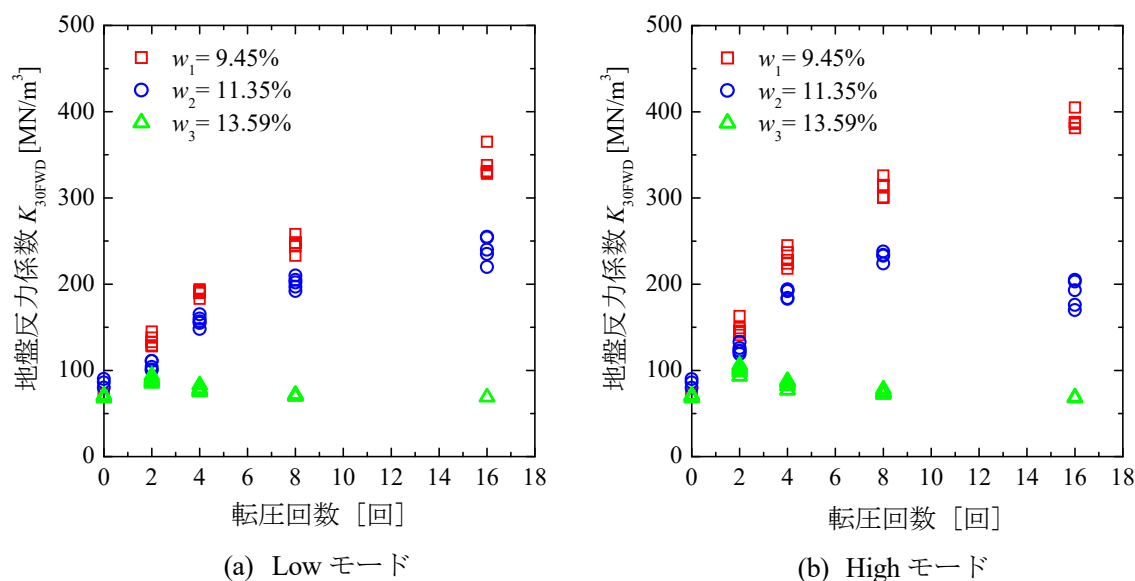


図-8 転圧回数と地盤反力係数の関係

提案する手法の妥当性を検証するために、ここでは、振動ローラが小型 FWD 試験の測定点を通過した際の 1.024 秒間（直線距離にして約 40cm）の加速度応答を切り出し、時系列に一次元配列した数値データを AI 剛性推定モデルに入力して地盤ばね係数 k_s の推定値を得た。剛性推定モデルによる推定値 k_s と小型 FWD 試験機による実測値 $K_{30\text{FWD}}$ の関係を図-9 に示す。ここで、実測値 $K_{30\text{FWD}}$ は地盤反力係数 (MN/m^3) であり、推定値 k_s は地盤ばね係数 (MN/m) であることに留意されたい。従って、ここでは両者の数値の一致ではなく、 $K_{30\text{FWD}}$ の k_s の相関性が重要となる。

ここでは、既存の加速度応答法との比較を目的に、同実測加速度波形に基づいて CCV⁹⁾ (Compaction Control Value) を算出し、 $K_{30\text{FWD}}$ と CCV の相関性についても調べた (図-10)。ここに、CCV は酒井重工業㈱が導入・実用化している地盤の締固め状態を表す指標値（無次元量）であり、次式で与えられる。

$$\text{CCV} = \frac{A_{0.5\Omega} + A_{1.0\Omega} + A_{1.5\Omega} + A_{2.0\Omega} + A_{2.5\Omega} + A_{3.0\Omega}}{A_{0.5\Omega} + A_{1.0\Omega}} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 $A_{1.0\Omega}$ は振動ローラの基本周波数における加速度振幅であり、 $A_{0.5\Omega}$, $A_{1.5\Omega}$, $A_{2.0\Omega}$, $A_{2.5\Omega}$, $A_{3.0\Omega}$

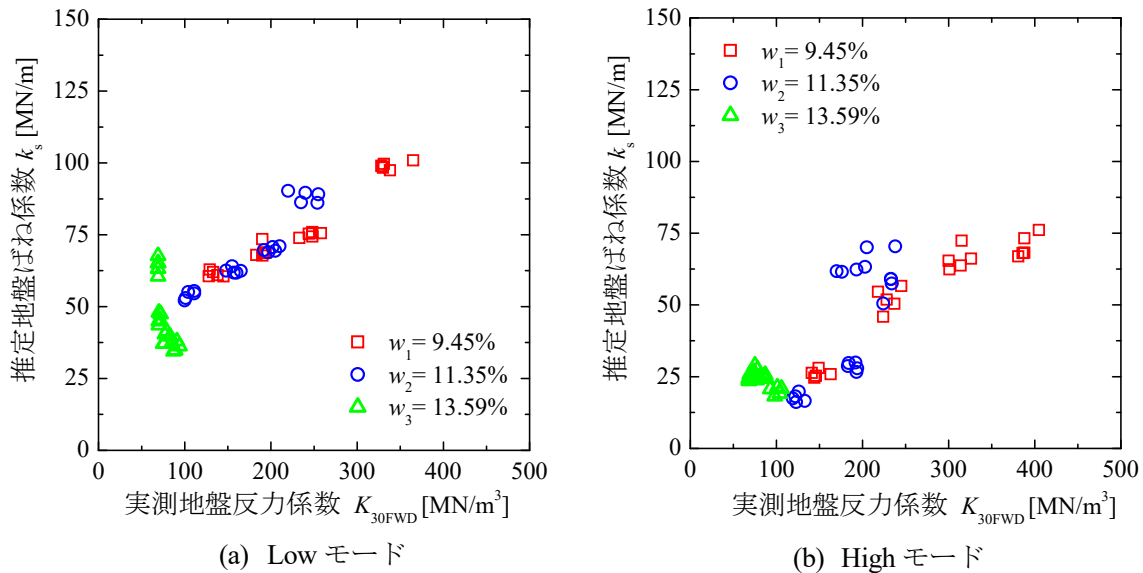


図-9 地盤ばね係数の推定結果

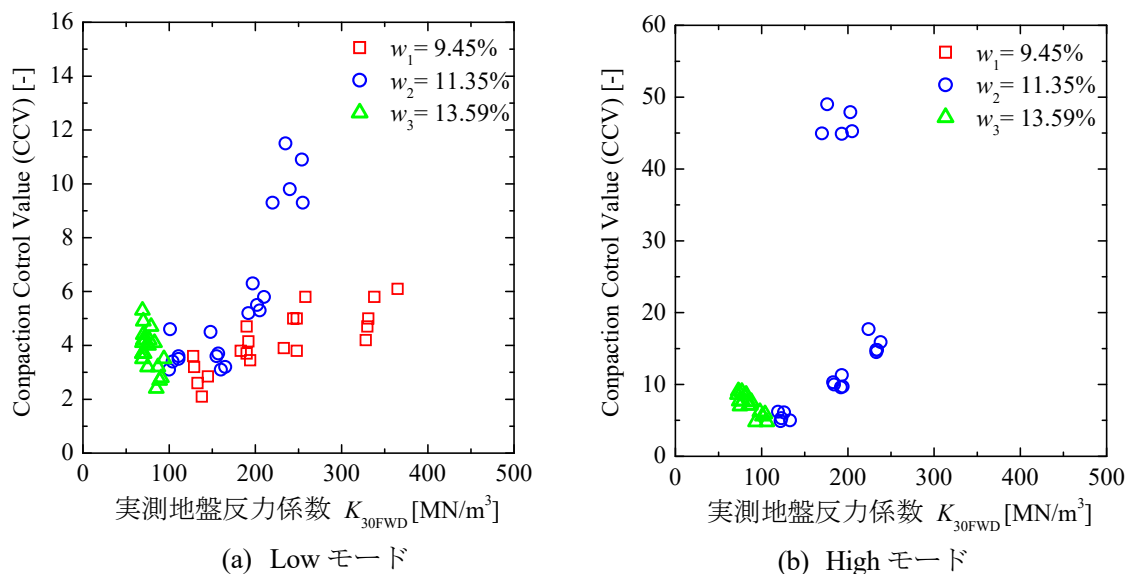


図-10 Compaction Control Value (CCV) の計測結果

はそれぞれ、基本周波数に対する 1/2, 3/2, 2, 5/2, 3 次調波成分の加速度振幅である。

図-9 に示す提案手法では、Low モード、High モードともに、多少のばらつきはあるものの、実測値と推定値には正の相関性が認められる。一方で、図-10 に示す従来法では、いずれのモードも含水比によってデータが大きくばらついており、従来から指摘されている加速度応答法の問題（含適用できる含水比範囲が狭いこと）が顕在化した。両者を比較すると、AI 剛性評価モデルの方が良好な相関性が得られており、提案手法は従来法に比べて含水比変化に対してロバストに評価できることを示唆する結果と言える。また、CCV が物理的な意味を持たない指標であるのに対して、提案手法は地盤の剛性を意味する物理パラメータである点でも有為性が高いと考えられる。

以上の通り、実測された地盤反力係数と剛性評価モデルによる推定値に相関性を確認することができたが、評価モデルの出力値（推定値）は、地盤ばね係数（MN/m）である。地盤構造物の設計等には、地盤の剛性として地盤反力係数（MN/m³）が用いられる。地盤反力係数は、通常、平板載荷試験⁹⁾によって求められるパラメータであり、平板載荷時の荷重強度（単位面積当たりの荷重 [MN/m²] ～沈下量 [m] 関係の勾配）として定義されるものである。載荷板には直径 30 cm の円盤が用いられることが多く、地盤反力係数は K_{30} と表記されるが、本研究では小型 FWD による推定換算値を用いており、 K_{30} と区別するために K_{30FWD} と表記している。地盤反力係数が荷重強度（応力）と沈下量の関係で定義されるのに対して、地盤ばね係数は、地盤を質点系のばねと見なして荷重（力）と沈下量の関係で定義される。したがって、推定される地盤ばね係数 k_s を地盤反力係数に換算するためには、 k_s を振動輪の接地面積で除す必要がある。そこで本報では、推定値である地盤ばね係数 k_s から地盤反力係数を換算する手段として次の方法を提案する。

まず、地盤剛性評価モデルで推定された地盤ばね係数 k_s （MN/m）を構築した加速度シミュレーションに入力し、その k_s に対する振動輪の加速度波形を再現する。その加速度波形を時間について 2 階積分して振動輪の変位の応答を求め、その振幅（地盤ばねの最大縮み量）を求める。それを転圧時の沈下量と仮定すると、振動輪の直径と幅の幾何学的関係から地盤と振動輪が接地している面積が算出できるようになる。本報では、地盤ばね係数 k_s （MN/m）を接地面積で除したものを推定地盤反力係数 K_{est} （MN/m³）とし、実測地盤反力係数 K_{30FWD} と比較した（図-11）。図(a)の Low モードでは実測値に対して推定値がやや上振れし、図(b)の High モードでは逆にやや下振れする傾向はあるも

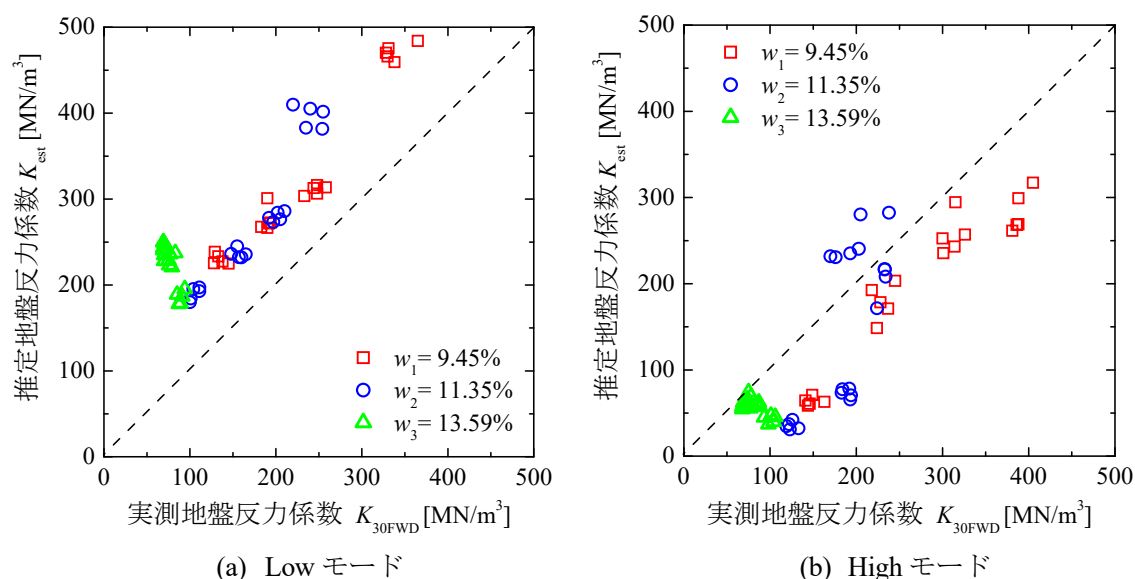


図-11 地盤反力係数への換算結果

の、縦軸と横軸の数値が概略一致していることが分かる。振動輪の沈下量を何らかの方法によって観測（実測）することができればより信頼性の高い換算が実現できる可能性もあるが、シミュレーション結果に基づく換算でも、地盤反力係数を推定することができることを実証することができた。

4. おわりに

本研究では、振動ローラ転圧輪の加速度応答を教師データとする深層学習（畳み込みニューラルネットワーク）によって、締固めた地盤の剛性評価が実現できる可能性（フィージビリティ）を確認することができた。盛土の締固めは、長年、密度（締固め度）によって管理されてきたが、本来、設計パラメータである剛性や強度といった力学特性によって品質評価されるべきである。近年では、路床・路体、舗装材料の弾性特性を考慮した舗装構造設計（多層弾性理論⁷⁾を用いた設計）が行われるようになり、道路土工と舗装の設計を一体化（合理化）を試みる研究⁸⁾も見られるようになった。本研究で提案する品質管理手法は、地盤剛性をリアルタイムで面的に評価する点で、土工のみならず、舗装工の設計・施工の合理化に応用できる方法のひとつになると考えている。今後、提案手法の実用化に向けて、学習モデルの汎化性能向上と実現場データによる検証を深化させていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省：TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領，2012.
- 2) 藤山哲雄，建山和由：振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法，土木学会論文集, No.652/III-51, pp. 115-123, 2000.
- 3) 古屋 弘（建山和由編）：土の締固め，第 5 章 情報化施工の導入，pp. 83-115，地盤工学会，2012.
- 4) 舗装工学委員会編：FWD および小型 FWD 運用の手引き，舗装工学ライブラリー2，土木学会，2003.
- 5) 北村佳則，西尾貴至，内山恵一：ローラ加速度応答を用いた盛土品質評価，第 25 回日本道路会議論文，CD-ROM，07P04，2003.
- 6) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説―二分冊の 2―，第 3 章 平板載荷試験，地盤工学会，pp.697~735，2013.
- 7) 土木学会舗装工学委員会・舗装構造小委員会編：多層弾性理論による舗装構造解析入門：GAMES（General Analysis of Multi-layered Elastic Systems）を利用して，土木学会，2005.
- 8) 土木研究所 平成 28 年度研究開発プログラム報告書：道路土工と舗装の一体型設計に関する研究，<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2016/pdf/pro-7-1.pdf>（2023/4/28 アクセス）

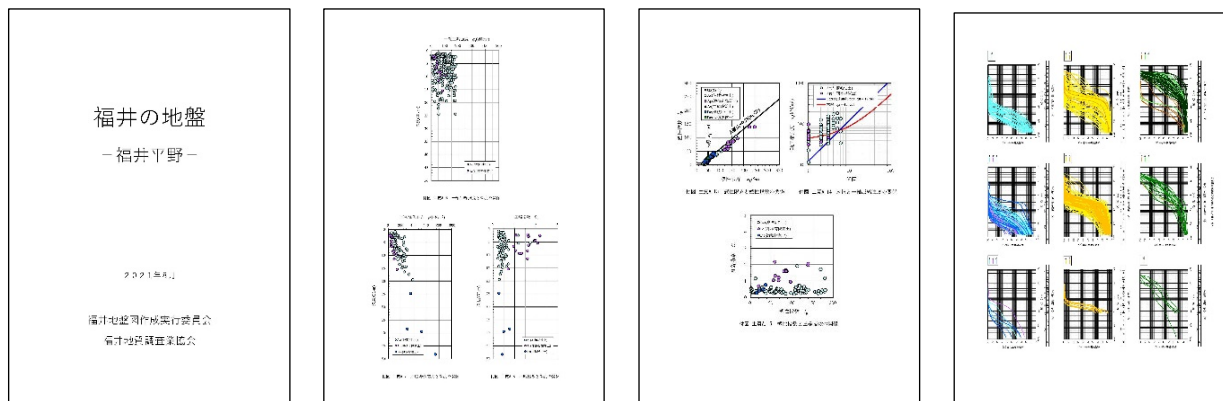
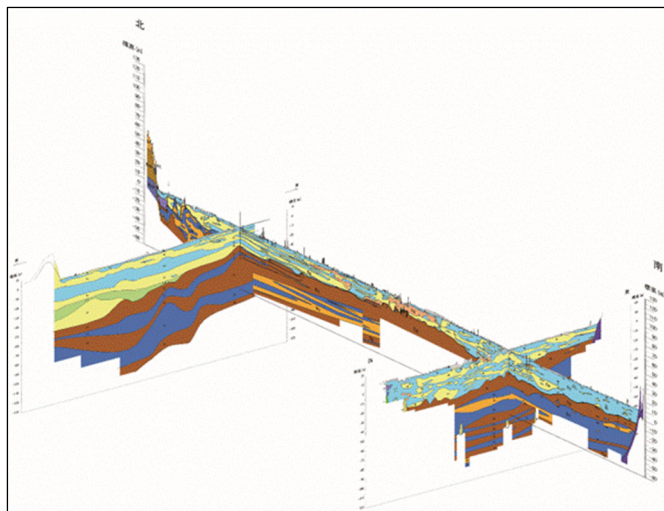
福井県の地盤データプラットフォームの整備

福井工業高等専門学校 教授 吉田雅徳

1. はじめに

2019 年度近畿建設協会研究助成事業において、著者が応募した「福井平野における土質試験データの集約と地盤図の作成」が採択され、県内の地盤や地質を専門とする産官学の技術者と研究者で、福井地盤図作成実行委員会を組織し、福井県土木部が管理している地盤データと、鉄道・運輸機構が所有する北陸新幹線の建設事業で調査された地盤データの中から福井平野の 3 測線を設定し、ボーリングデータ 656 本と土質試験データ 1,589 試料を収集整理し、3 年間かけて福井平野の地盤構成と土質特性を明らかにした。その成果は報告書「福井の地盤－福井平野－¹⁾」として出版し、(公財)福井県建設技術公社のホームページで PDF 版を公開している。図 2 に報告書の一部抜粋、図 3 に福井平野の南北方向 1 測線と東西方向 2 測線で推定した 3 つの地盤断面図より作成したパネルダイヤグラムを示す。

しかし、この活動で大量のデジタル地盤データを作成したが、それを自由に二次利用してもらうためのプラットフォームがないため有効活用には至っていない。そこで、その成果をオープンデータ化するためのプラットフォームを整備し、データを二次利用するためのアプリケーションソフトウェアを開発することを本研究の目的とした。上記の実行委員会に、システム開発を専門とする福井工業高等専門学校電子情報工学科の斉藤徹教授と、オープンデータの活用に詳しい福井県に拠点を持つソフ

図 1 福井の地盤の表紙と土質特性相関図の一例¹⁾図 2 福井平野地盤断面図のパネルダイヤグラム¹⁾

トウェア開発会社（株）jig.jp の福野泰介会長を加えることで、情報分野の専門性を強化した組織とし、本研究課題に取り組んだ。

2. プラットフォームとオープンデータの整備

（1）福井県の現状

福井県は2009年より「電子納品保管管理システム」による一般電子納品の運用を開始し、地質調査データはXML形式（地質・土質調査成果電子納品要領（案））²⁾に標準化され、2013年以降の地盤データは（公財）福井県建設技術公社によって（国研）防災科学研究所が管理するジオ・ステーション³⁾で公開されている。2023年4月現在の登録数は、他機関のデータも含めて計5,132本である¹⁾。図3に福井県周辺におけるボーリング柱状図の分布を示す。

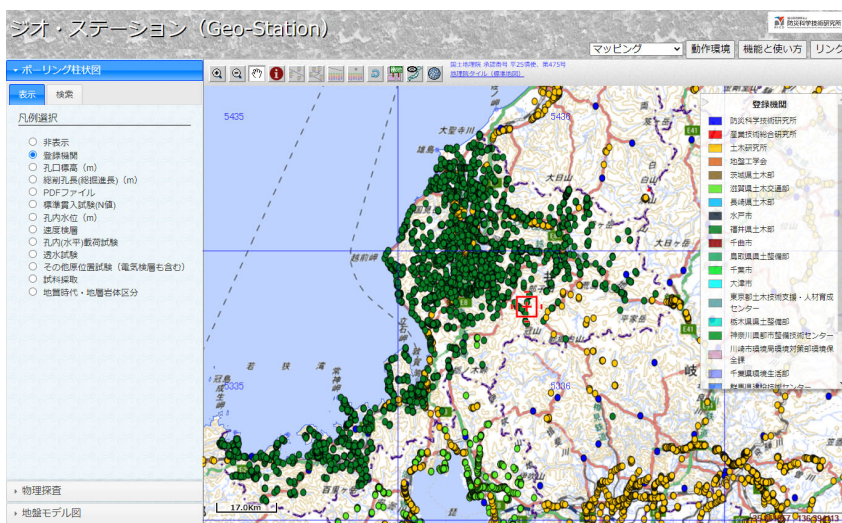


図3 ジオ・ステーションにおける福井県の表示画面³⁾

（2）ユーザーの要望

ジオ・ステーションを利用している、福井県内の建設コンサルタントの地盤・地質系技術者で構成するワーキンググループが、ユーザーとして求めるオープンデータの利用方法やプラットフォームの機能について意見交換した。まず、現在のジオ・ステーションの問題として、全国にある大量のデータが収納されているためデータを画面表示する速度が遅い、任意の範囲にあるデータを検索する機能がない、室内土質試験の結果がないなどが挙げられた。

開発するプラットフォームに求めるものとして、主な利用方法としては、地盤調査計画の立案、土質試験結果の妥当性評価、帯水層ごとの地下水位の確認、杭設計のための液状化判定結果や支持力の確認、岩盤の性状確認などが挙げられた。また、閲覧または取得したい具体的な情報としては、柱状図、室内土質試験結果、原位置試験結果、地下水位、簡略柱状図、地盤断面図、岩盤のボーリングコア写真が挙げられた。データの抽出方法としては、対象地点からの半径や矩形範囲を指定、地形区分を指定、掘削深度の範囲を指定、原位置試験の種別を指定、室内土質試験の試験項目、物性値の範囲、試料採取深度の指定などの、フィルタリング機能を組み合わせたデータ抽出の必要性が挙げられた。また、データ形式としては、柱状図はXMLやPDF、簡略柱状図はDXF、室内土質試験結果と原位置試験結果はCSVの各形式での取得を望む声が多かった。一方、プラットフォームの管理運営の体制、フィルタリング機能API等の開発の体制、一般市民が利用する仕組みの必要性が課題として挙げられた。

(3) プラットフォームの整備

ボーリングデータをオープンデータとして格納し、そのデータを活用するためのソフトウェアを開発するためのプラットフォームとして GitHub (https://github.com/) を利用することとした。運営会社はマイクロソフト傘下であり、全世界のユーザー数は 1 億人を超えている。ユーザーに無料のアカウントとサーバーを提供しており、複数人と協働してソフトウェアの開発や評価を行って、プラットフォームの管理と開発を行うことができる。この GitHub 内に GeoFUKUI (https://github.com/GeoFUKUI) というプロジェクトを作成し、福井県の地盤データを格納し、それを活用するソフトウェアを開発する環境を整えた。ユーザー登録すれば、プロジェクト内のデータやソフトウェアに対する要望をコメントとして書き込む、そのコメントに回答する、データを追加する、ソフトウェアを改良するなどの作業を、効率良く行うことができる。図 4 に GeoFUKUI のトップ画面を示す。

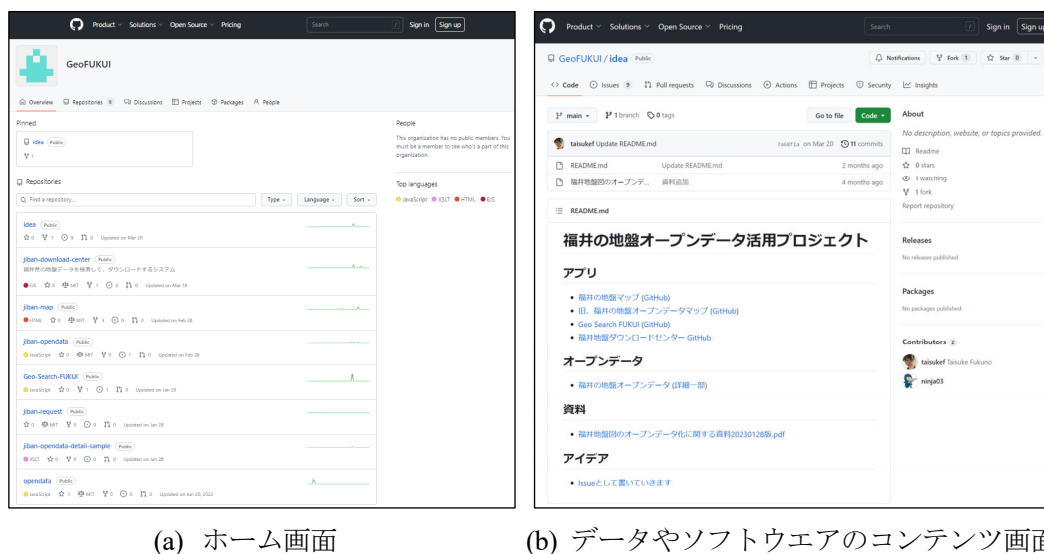


図 4 GeoFUKUI の表示画面

(3) オープンデータの整備

福井県土木部より提供を受けたボーリング柱状図 XML は、810 件の設計業務に含まれる計 2,397 本である。このうち、室内試験 XML が作成されている業務数は 207 件、室内試験を行っているが XML が作成されていない業務数は 73 件であった。原位置試験のほとんどが孔内水平載荷試験および現場透水試験であり、孔内水平載荷試験を実施した業務数は 53 件、現場透水試験は 49 件であった。これらのデータを GeoFUKUI に保存し、ユーザー登録しなくても誰もが自由にダウンロードできる環境を整えた。

3. ソフトウェアの開発

GitHub にある地盤のオープンデータを活用するソフトウェアを開発するために、(株) jig.jp 本店においてハッカソンを開催した。ハッカソンとは、プログラムを改良するハック (Hack) と長距離を走るマラソン (Marathon) を組み合わせた造語であり、設計者やプログラマーがユーザーの声を活かしながら、短期間に集中してソフトウェア開発するイベントである。まず、福野泰介氏よりオープンデータを使ったイノベーションやハッカソンの解説を受け、3 チームに分かれてハッカソン形式でソフトウェアのアイデア開発を行った。参加者は、一般人としての高専生と高校生、地盤を専門とする技術者と研究者、プログラミングを専門とする技術者、研究者、高専生であり、それらが混在する 3 チームを構成した。進行は、ソフトウェアのユーザー設定とアイデア出しから始まり、プログラミング

近畿建設協会研究助成報告書
 でソフトウェアのプロトタイプを作成し、最後に発表会と審査会を行った。結果として、設計技術者
 向けの任意条件によるデータ検索とダウンロード、データ管理者向けの緯度経度や町丁目の位置情報
 の誤り探索、マイホームの土地を探す一般の方向けの N 値を利用した軟弱地盤検索の各機能を持つ、3
 種類のソフトウェアを開発することができた。

図5にデータ検索ソフトウェアの条件入力画面と、3以下の N 値を含む2020年から2022年のボー
 リングデータの検索結果画面を示す。図6にハッカソンの様子を示す。

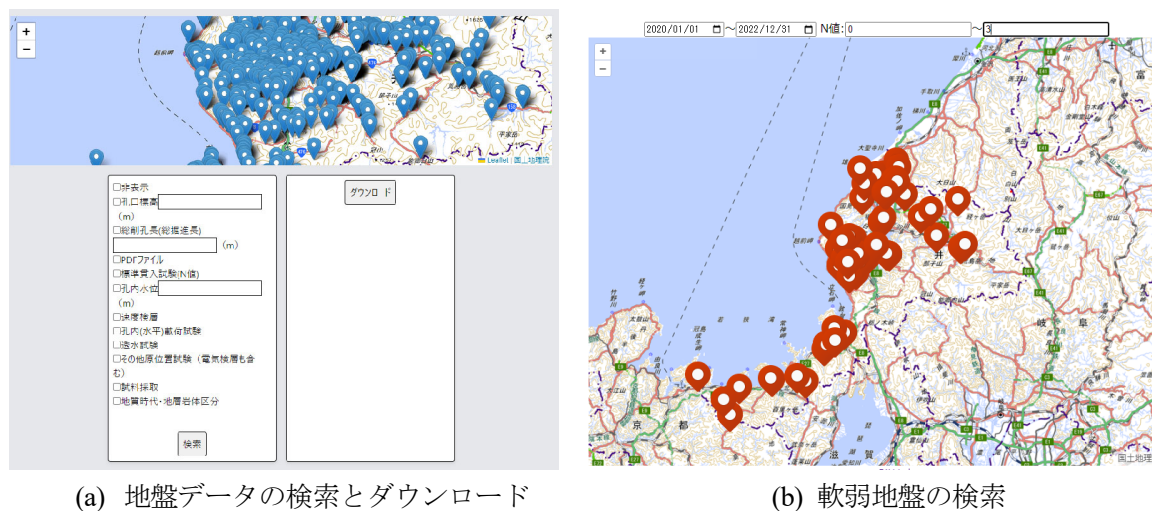
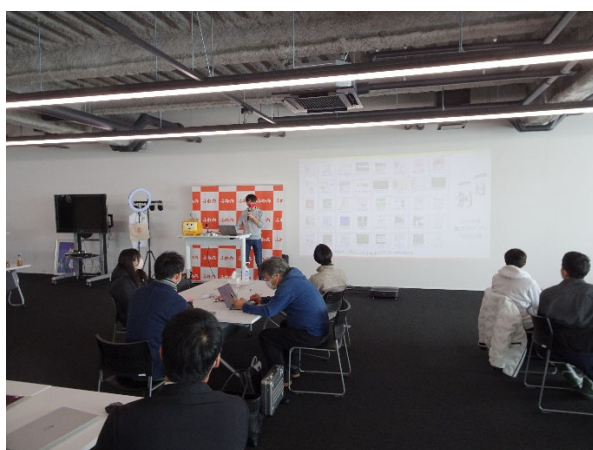


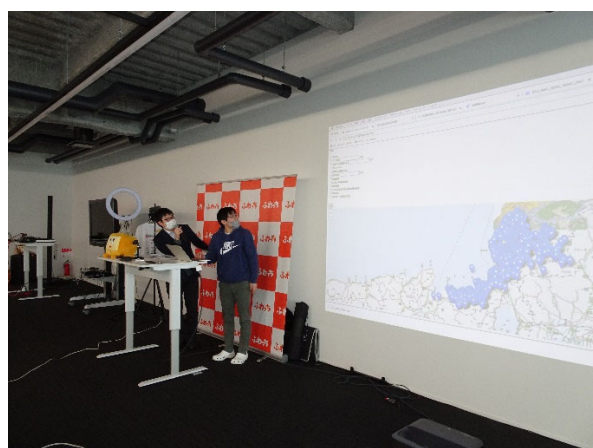
図5 ソフトウェア表示画面の一例



(a) ハッカソンに関する講義



(b) ブレインストーミングとプログラミング



(c) 発表会と審査会



(d) 参加者の集合写真

図6 ハッカソンの様子

4. 今後の展開

1948 年福井地震は軟弱な福井平野の直下が震源であったため、広い範囲で家屋倒壊や液状化の被害が発生し、翌年に気象庁震度階級表に震度 7 が導入されるきっかけとなった。図 7 は Google の My maps で作成した福井地震の被害分布⁴⁾を Google Earth の衛星写真上に表示したものであり、福井平野東縁断層帯主部と西部、福井地震による家屋の倒壊率分布、液状化による噴砂の分布、大規模火災の発生範囲が示されている⁵⁾。その後、被災地は不死鳥のごとく復興を遂げ、福井市の人口統計によると 1948 年と比較して 2022 年時点で人口は約 3.1 倍、世帯数は約 5.6 倍に増加している。この間、福井平野内には道路、鉄道、電気、通信、上下水道等のライフライン施設が広く張り巡らされ、その周りには新しい住宅が建設されてきた。特に近年、北陸新幹線の敦賀延進工事に伴う沿線地域の都市開発が目覚ましく、これまで農地として利用されてきた軟弱で地下水位の浅い氾濫平野での社会資本整備が進んでいる。近い将来の発生が危惧されている南海トラフ地震では、福井平野で表層地盤増幅率が高い地点において震度 5 強の揺れが予想されており、建設技術者のみならず、そこに住む人々が平野の下の地盤について強い関心を持つことが望まれる。

その一助として、AR（拡張現実）技術を用いて、一般の人々には馴染みの少ない地盤データを身近に感じてもらう可視化ツールを試作した。図 7 左は、頭に装着したゴーグル（Meta Quest2）で地面を見ると、AR 技術により現実世界の地面の下に、図 7 右に示す CG で作成した円柱モデルが見えるソフトウェアをデモ体験している様子である。体験者が指差した所には、ゴーグルを装着した人にしか見えない地下深くまで伸びる円柱モデルが存在している。例えばこの円柱モデルにボーリングコアの写真を貼り付けて、データの位置情報を与えてやれば、地上を歩きながら地中の地層構造を見る疑似体験が可能となる。

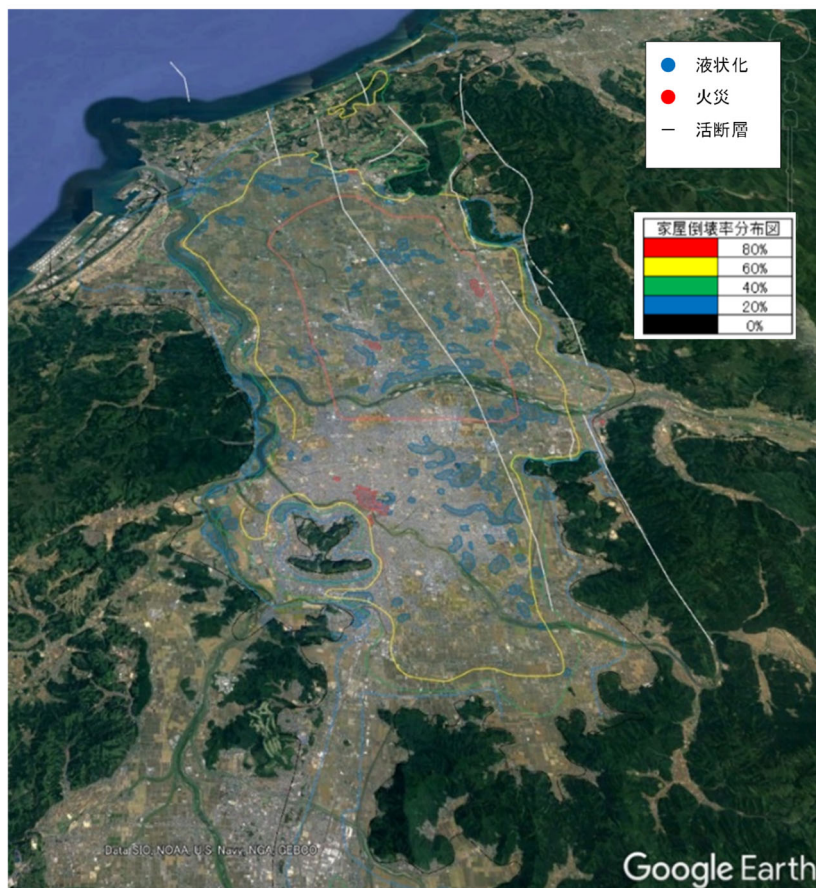
図 7 福井地震の被害分布の鳥瞰図⁴⁾



図8 AR技術を利用した地盤データの可視化



5. おわりに

本研究によって、従来からジオ・ステーションで公開されていた地盤データを、新たに整備した GitHub 上のプラットフォームで公開することができた。また、ユーザーの要望に応じたソフトウェアを開発できる体制を構築し、そのプロトタイプを開発した。今後は、福井県から継続的に地盤データの提供を受けて、オープンデータを更新・拡充していくとともに、ユーザーの要望を聞きながらソフトウェアの改良を行っていく予定である。

現在、国土交通省では Society 5.0 の実現に向けて、国土、経済活動、自然現象に関するデータを検索、表示、ダウンロードできる「国土交通データプラットフォーム」を 2020 年度より試験運用している。また、公共工事等で得られた地盤情報の収集・利活用を行うデータプラットフォーム「地盤情報データベース」の運営について（一財）国土地盤情報センターが主体となることが 2023 年 3 月に国土交通省より発表され、今後、官民が所有する地盤情報の共有化に向けた動きが加速すると考えられる。この様な国の動きに本研究成果が活かされるよう、引き続き福井の地盤プラットフォームの開発と運営を継続していきたい。

謝辞

本研究は令和 4 年度一般社団法人近畿建設協会研究助成の補助を受けて、福井地質調査業協会が組織した福井地盤図作成（第 2 期）実行委員会とワーキンググループとの協同作業により実施した。データを提供して頂いた機関各位、ならびに、委員会とワーキンググループのメンバーの皆様にご心より感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 福井地盤図作成実行委員会，福井地質調査業協会：福井の地盤－福井平野－，本文 40p.，付録 85p.，2021. <https://www.fk-kosha.or.jp/koueki/books>
- 2) 国土交通省：地質・土質調査成果電子納品要領（案）平成 16 年 6 月版，2004.
- 3) 国立研究開発法人防災科学研究所：ジオ・ステーション，<https://www.geo-stn.bosai.go.jp/>
- 4) 福井工業高等専門学校地震防災研究室：福井地震アーカイブ，http://toshichan.be.fukui-nct.ac.jp/yoshida/works/fukuieq_archive/index.html
- 5) 吉田雅穂，久保光，野村崇，沼田淳紀，村田拓海：福井地震を経験した木杭基礎構造物の調査，土木学会論文集 E2，Vol.77，No.5，pp.I_84-I_94，2022.

明石市東播海岸におけるアカウミガメの産卵地保全活動の ガバナンス構築に関する実践的研究

明石工業高等専門学校 都市システム工学科 准教授 ○石松一仁

1. はじめに

わが国で産卵するウミガメ 3 種のうち、圧倒的に産卵数が多いのはアカウミガメ (*Caretta caretta*) である。アカウミガメの産卵地は西日本の太平洋側、特に九州南部に偏在しているが、明石市では国土交通省が整備を進めてきた東播海岸において、1986 年以降に上陸が 19 回、そのうち 17 回は産卵が確認されている。この事象は、瀬戸内海に面した都市部の砂浜では稀有である。明石市と地元住民は産卵地保全の重要性を認識しており、清掃活動、夜間照明の消灯、花火の規制、産卵巣の保護などに取り組んでいる。近年の SDGs の認知の高まりに加え、「第 41 回全国豊かな海づくり大会」が令和 4 年 11 月に明石市で開催されたことにより、従来よりも一歩踏み込んだ保全活動が検討されており、検討のための根拠資料が必要とされている。

アカウミガメの産卵回数の回復を図ることは海洋生態系再生の指標だけでなく、海岸線の自然再生の指標にもなるため、アカウミガメに関する調査研究は数多く実施されている。外洋での生態については不明な点が残っているものの、産卵の際に訪れる砂浜での行動については多くのことが明らかになっており、産卵地保全に関する具体的な作業マニュアルも既に存在する。しかしながら、産卵地保全活動を継続的に展開していく上での人・組織のネットワーク、マネジメントに関する社会技術開発については、多くの課題がある。言い換えれば、その保全活動の成果は、関わる人・組織のビジョン、ネットワーク構造、マネジメントの仕組み、すなわちガバナンスの影響を強く受ける。

明石市の沿岸帯では、漁業や海水浴などの人間活動が活発であり、人間が利用しやすい形態に改変されている。加えて、河川からの砂の供給量及び漂砂の変化により砂浜環境は大きく変化している。そこで本研究は、明石市沿岸帯環境を定量的に把握し課題を特定することで、人間活動に対する過度な規制を避けつつアカウミガメの産卵地保全活動を展開するための実践的戦略の策定を目的とした。

2. 方法

2.1. 研究対象地

東播海岸とは、瀬戸内海に面し「神戸市の西端の神戸市垂水区塩屋の堺川から明石市を経て、加古郡播磨町本荘の喜瀬川」に至る延長約 26km の区間の海岸のことを指す。かつての東播海岸は、柿本人麻呂や松尾芭蕉により「白砂清松」と歌われた風光明媚な瀬戸内の景色が広がっていたが、度重なる台風被害や昭和 30 年頃には海岸侵食が顕著になり、昭和 36 年に旧建設省（現在の国土交通省）は延長約 19km の区間を直轄事業として、海岸の保全に取り掛かることとなった。その中でも特に明石市の中心市街地から北西に広がる海岸線では、養浜によって砂浜が回復し、海水浴場として多くの人々に利用されるほか、ウミガメの上陸・産卵も確認されている¹⁾。本研究は、アカウミガメの上陸・産卵が確認された直近の場所である望海浜公園南側の砂浜を中心に調査を行った。

2.2. 植生調査

ウミガメを保全する上で最も重要なことの一つは、産卵に適した砂浜を維持することである。卵の

安全が確保されるためには、他の動物に掘り返されたり潰されたりすることがなく、波にさらわれることもなく、それでいて、孵化した子ガメが容易に地表に脱出できる場所でなければならない。また、温度や湿度が適切に保たれ、呼吸に必要な酸素もある状態でなければならない。これらの条件を満たす場所は、砂浜と海浜植物が生えているところの境目あたりで、砂の深さが 30～60 cm くらいの場所に限られる²⁾。しかしながら、海浜植物の被覆状況は遷移により変化するため、産卵に適した砂浜が維持されるとは限らない。そのため、海浜植物の現状を把握するために、ベルトトランセクト法とコドラート法³⁾による植生調査を 2022 年 11 月 26 日、11 月 27 日、12 月 4 日に行った。

図 1 に望海浜公園南側の砂浜における調査側線を示す。東側、中央、西側の計 3 点にそれぞれ側線（A 線、B 線、C 線）を設定し、各側線は波打ち際から消波ブロックまでとした。そして、各側線の両側 1.5m を調査区とした。調査区は植物群落及び地形の変化点で区切り、調査区内の植物種ごとの被覆率を目視で記録し、それを用いて優先度を決定した。また、ベルトトランセクト法によって調査しきれなかったエリアについては、2m×2m のコドラートを各群落に設置し、植物種ごとの被覆率を目視で記録し、それを用いて優先度を決定した。



図 1 望海浜公園南側の砂浜における調査側線

2.3. NDVI（正規化植生指数）

前節で述べたとおり、海浜植物の被覆状況は遷移により変化する。しかしながら、望海浜公園南側の砂浜において、過去に植生調査は行われていないため、今回の植生調査結果と比較することができない。そこで 2005 年と 2016 年に撮影された高解像度衛星画像（図 2, 3, 4）を用いて、それぞれ NDVI (Normalized Difference Vegetation Index：正規化植生指標) を算出することで、海浜植物の被覆状況の経年変化の推定を試みた。植生指標は、植物による光の反射の特徴を生かし衛星データを使って簡易な計算式で植生の状況を把握することを目的として考案された指標で、植物の量や活力を把握することができ、NDVI は代表的な植生指標として用いられる。

一般に衛星画像の解析を行う際には、画像内の雲量や撮影時期、撮影衛星の種類を考慮する必要がある。

ある。しかしながら、2016 年については雲量の少ない画像が対象区域内において 1 枚で完結しなかったため、撮影衛星が異なる 2 枚の画像で構成されていた。緑被分布図作成では、異なる衛星間で撮影された画像について、ImageRegression という画像の重複範囲でサンプルを取り、単回帰式によって補正する方法を採用し、画像の相対的な補正を行った。次に、各衛星画像に、赤色のバンドにはバンド番号 3、緑色のバンドにはバンド番号 2、青色のバンドにはバンド番号 1 を割り当て、RGB 合成（人間の目に見える色の見え方の合成）を行い、QGIS のラスタ計算機を用いて NDVI を算出した。

算出した各 NDVI を比較するために、衛星画像範囲内のポリゴンに 5m メッシュを生成し、ポリゴン内全域の NDVI を 5m メッシュに格納した。最後に、QGIS で 2005 年と 2016 年の NDVI メッシュの属性テーブルを結合した。そして、フィールド計算機を用いて NDVI の差分を計算した。差分=0 の場合は植生の活性に変化なし、差分<0 の場合は植生の活性は低下、差分>0 の場合は植生の活性は増加、と判断した。

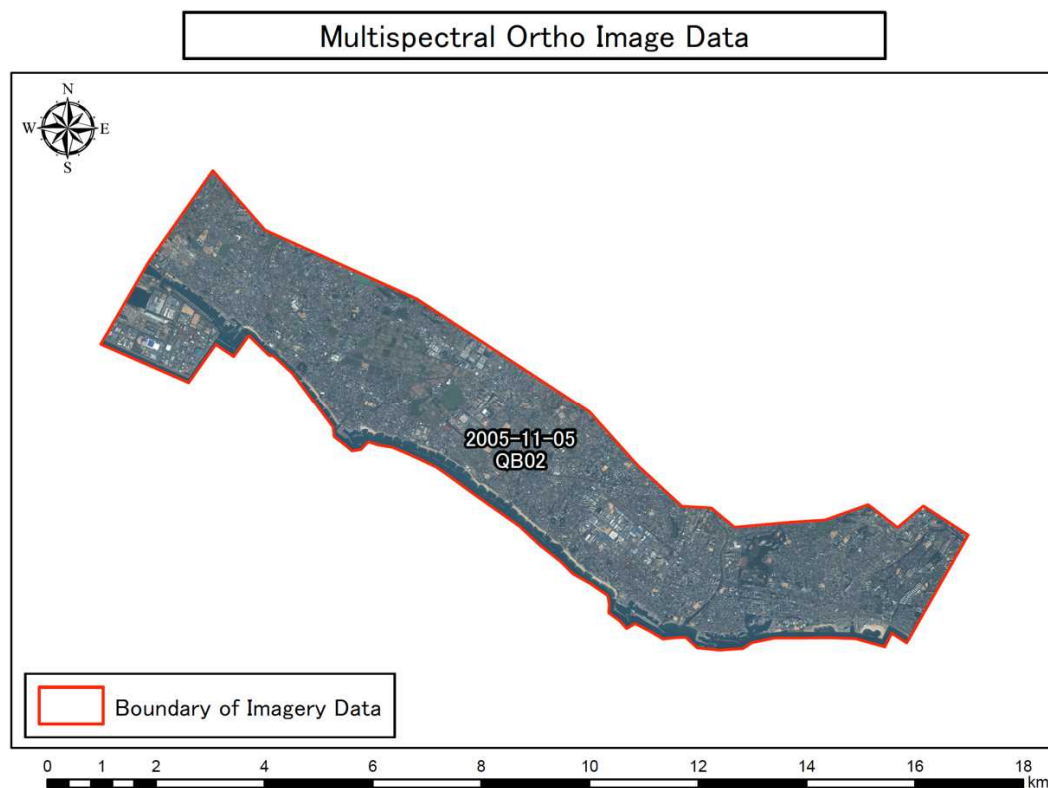


図 2 NDVI 算出に用いた 2005 年の高解像度衛星画像

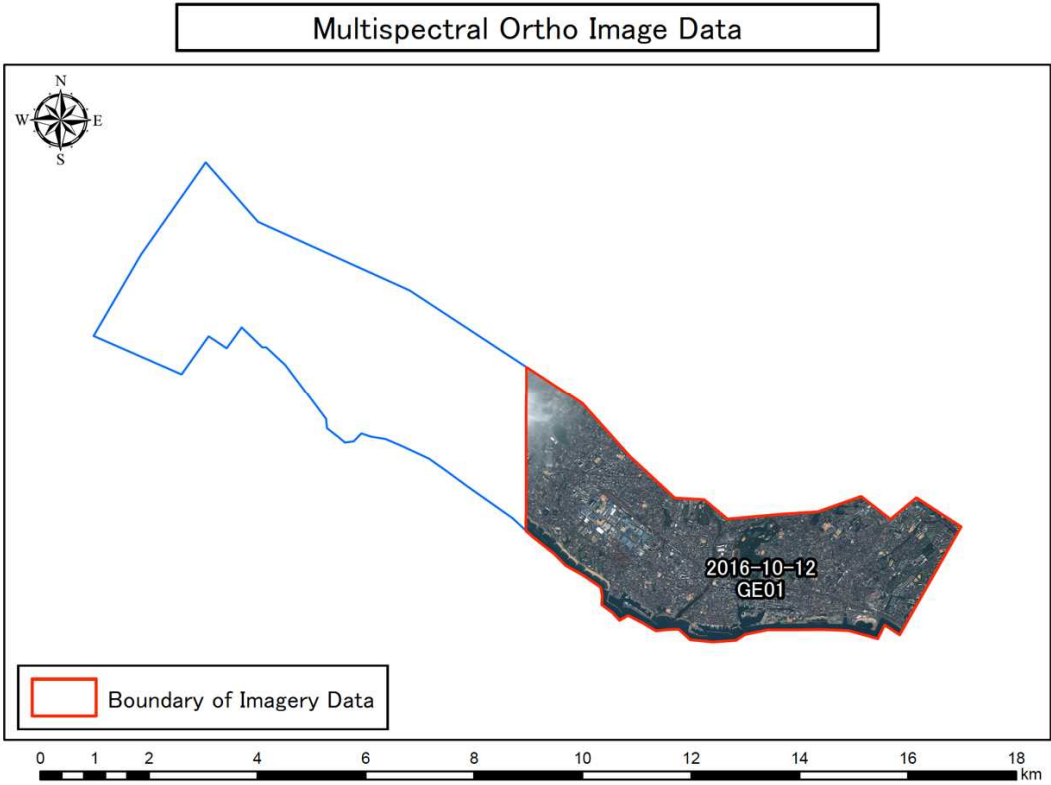


図 3 NDVI 算出に用いた 2016 年の高解像度衛星画像その 1

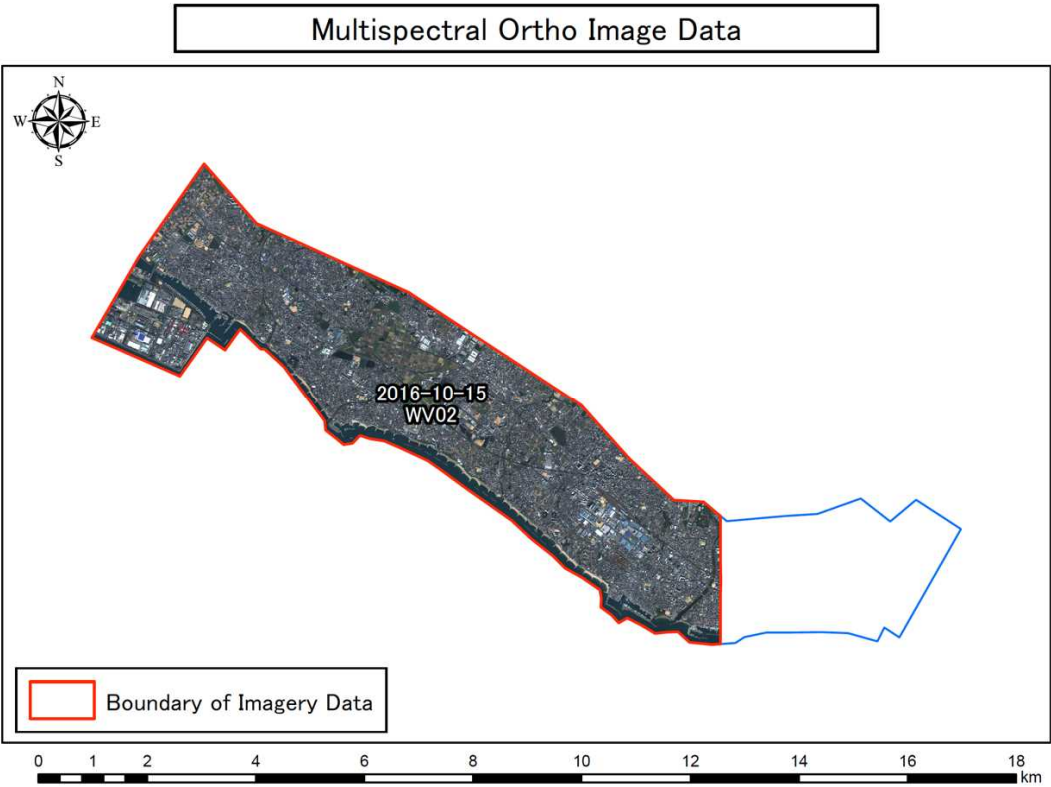


図 4 NDVI 算出に用いた 2016 年の高解像度衛星画像その 2

2.4. 砂の蛍光 X 線分析

望海浜公園南側の砂浜は、約 30 年前に隣接する林崎漁港に建設された堤防の影響で、沿岸流が変化し、砂が溜まるようになったため形成され、現在に至る。しかしながら、砂の流入元が不明であるため、望海浜公園南側の砂浜および沿岸域に加え、約 3km 東側に位置する大蔵海岸と西側に約 9km 西側に瀬戸川河口域から砂を採取した (図 5～8)。陸域ではスコップを用いて砂を採取し、海域では小型船舶上から採泥器を用いて採取した。その後、採取した砂を 5ml 容器に詰め、表 1 に示すサンプル番号を付け、蛍光 X 線分析 (測定機器：島津製作所製エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 EDX-8000, 測定雰囲気：大気, X 線照射面積：10mm φ, 定量分析：FP 法) を行った。



図 5 大蔵海岸における採取地点 (No. 2～4)



図 6 望海浜公園南側の砂浜および明石川における採取地点 (No. 1, 5～9, 16～21)



図 7 林崎漁港における採取地点 (No. 10～15)



図 8 瀬戸川における採取地点 (No. 22～25)

表 1 蛍光 X 線分析用の準備した砂のサンプル番号

採取地	サンプル番号			採取地	サンプル番号		
明石川	1-1	1-2	1-3	望海浜A(波打ち際)深層	16-3		
大蔵海岸(海側東)	2-1	2-2	2-3	望海浜A(内陸側40m地点)表層	17-1		
大蔵海岸(白砂)	3-1	3-2	3-3	望海浜A(内陸側40m地点)中層	17-2		
大蔵海岸(海側西)	4-1	4-2	4-3	望海浜B(波打ち際)表層	18-1		
望海浜 A	5-1	5-2		望海浜B(波打ち際)中層	18-2		
望海浜 B	6-1	6-2		望海浜B(波打ち際)深層	18-3		
望海浜 C	7-1	7-2		望海浜B(内陸側40m地点)表層	19-1		
望海浜 D	8-1	8-2		望海浜B(内陸側40m地点)中層	19-2		
望海浜 E	9-1	9-2		望海浜C(波打ち際)表層	20-1		
林崎漁港 A	10-1	10-2		望海浜C(波打ち際)中層	20-2		
林崎漁港 B	11-1			望海浜C(波打ち際)深層	20-3		
林崎漁港 C	12-1	12-2		望海浜C(内陸側40m地点)表層	21-1		
林崎漁港 D	13-1			望海浜C(内陸側40m地点)中層	21-2		
林崎漁港 E	14-1	14-2		瀬戸川河口	22-1	22-2	22-3
林崎漁港横砂浜	15-1	15-2		瀬戸川 砂浜A	23-1	23-2	23-3
望海浜A(波打ち際)表層	16-1			瀬戸川 砂浜B	24-1	24-2	24-3
望海浜A(波打ち際)中層	16-2			瀬戸川 砂浜C	25-1	25-2	25-3

3. 結果

3.1. 植生調査

図 9 に示す植物相関図のとおり、ハマヒルガオ群落、コウボウシバ (*Picris Carex pumila*) 群落、イネ科 (*Poaceae*) 群落、マメ科 (*Fabaceae*) 群落、ヨシ (*Phragmites australis*) 群落が形成されていることを確認した。

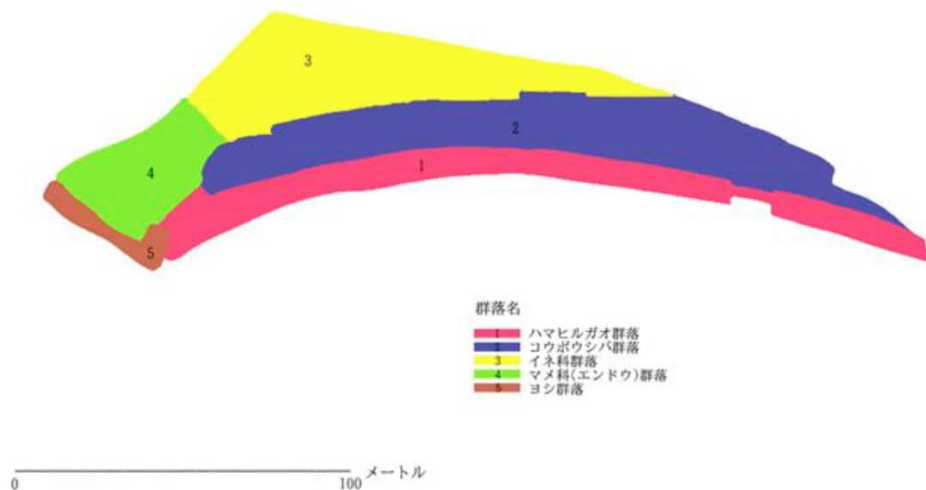


図 9 望海浜公園南側の砂浜における植物相関図

3.2. NDVI (正規化植生指数)

2006 年と 2016 年における NDVI の差分値格納 5m メッシュを図 10 に示す。望海浜公園南側の砂浜において、NDVI の差分は概ね正の値であったことから、2005 年から 2016 年にかけて植生の活性度が上がっていることが示唆された。

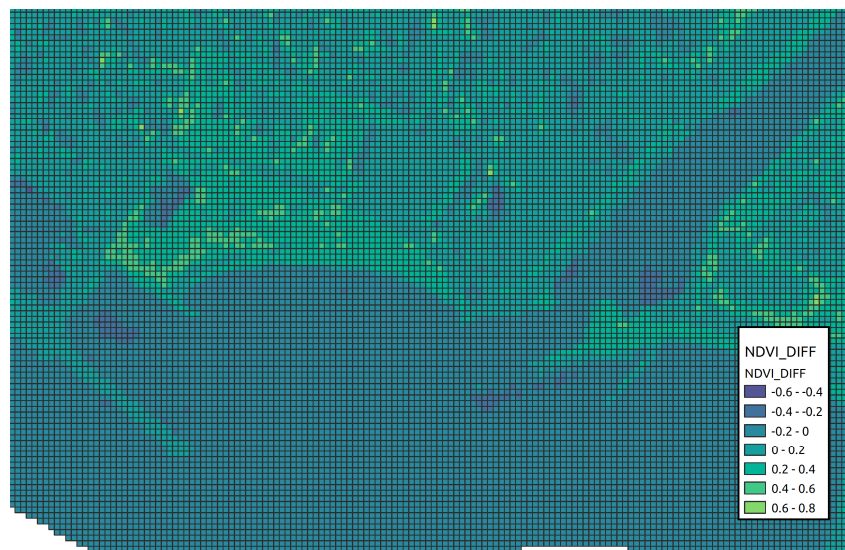


図 10 2006 年と 2016 年における NDVI の差分格納 5m メッシュ

3.3. 砂の蛍光 X 線分析

各サンプルの化学元素の組成割合をもとに、R version 4.2.2 で階層クラスター分析（ユークリッド距離，ウォード法）を行い，グループ分けを試みた（図 11）．階層クラスター分析の分類数に決まりはないため，研究目的に応じて分類しなければならない．そのため，今回は明らかに異なる 2 つのクラスターに分類した。

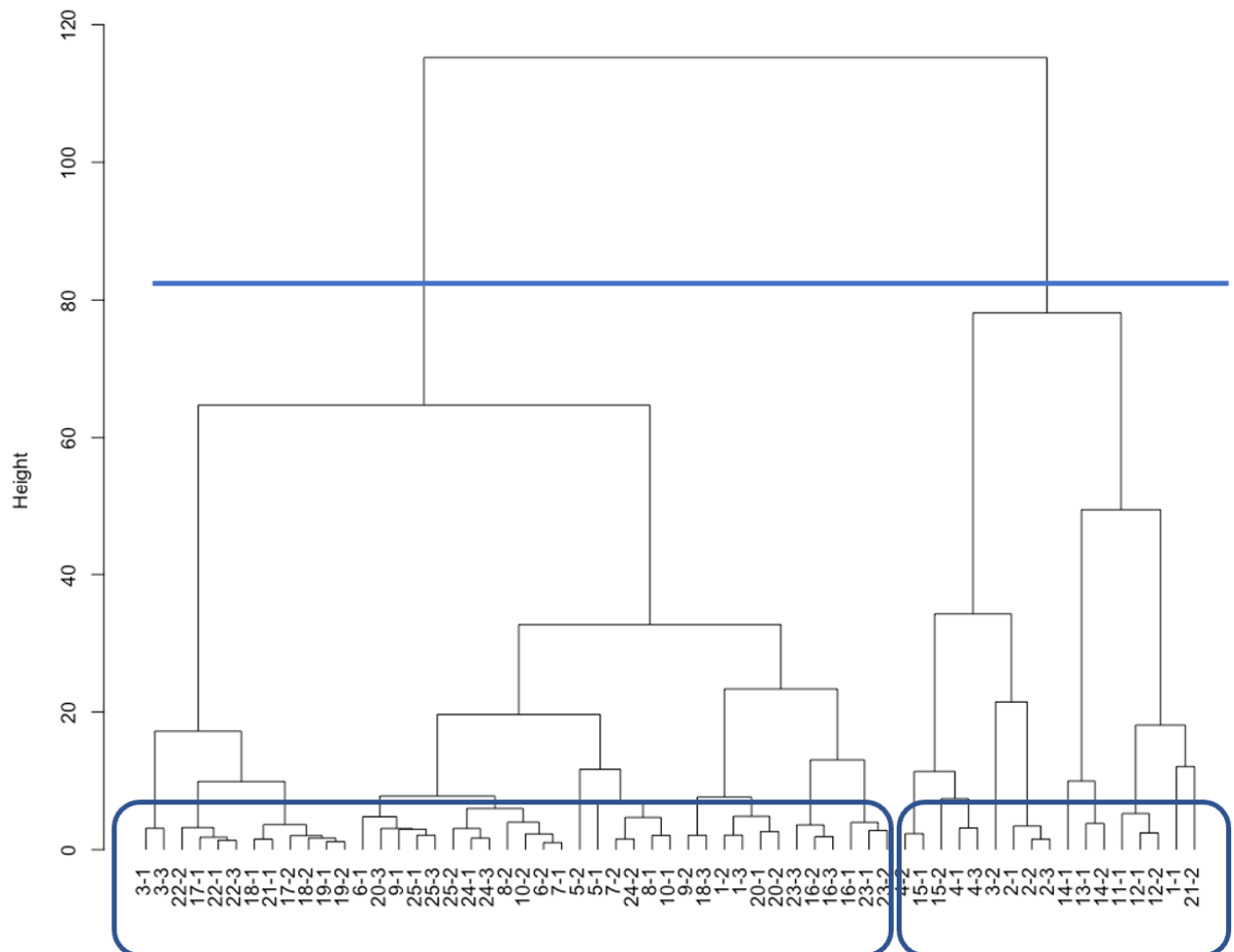


図 11 階層クラスター分析結果（ユークリッド距離，ウォード法）

4. 考察

望海浜公園南側の砂浜において、アカウミガメが産卵場所を選定する際の判断基準となるハマヒルガオが、砂浜と海浜植物群落の境界に幅広く分布していることが確認された。また、高解像度衛星画像を用いた NDVI 算出の結果、植生の活性度が高まっていることが示唆されたため、将来的には海浜植物の被覆エリアが波打ち際の方へ拡大していく可能性がある。この現象はアカウミガメの産卵場所保全の観点からは望ましいとは言えない。アカウミガメは、上陸してから砂地を一定距離徘徊しなければ産卵しないため、海浜植物で覆い尽くされた砂浜の場合、上陸しても産卵せずにそのまま引き返してしまう。そのため、今後も継続的に植生調査を実施し、海浜植物の遷移を正確に把握する必要がある。そして、望海浜公園南側の砂浜における海浜植物の管理マニュアルを策定し、地元のボランティア団体を含む地域住民と共有することで、持続可能なアカウミガメの産卵地保全活動を展開できると考えられる。

一方、砂の蛍光 X 線分析の結果、望海浜公園南側の砂浜に流入している砂の供給源は、明石川であることが示唆された。また、2.4 で述べたとおり、望海浜公園南側の砂浜は、直近の 30 年間で出来上がった砂浜であるが、これ以上砂が堆積できない状態になっている。そして、近年、これまで望海浜公園南側の砂浜に流入していた砂が、近隣の林崎漁港内へ大量流入しており、漁船の底が漁港内の海底と接触し、漁船が損傷する問題が発生している。現在、林崎漁港を管理している明石市が浚渫回数を増やすことで対応している。将来的には明石川の管理主体である兵庫県と明石市が連携して取り

組む必要が出てくるかもしれないが、今回の研究結果だけでは根拠として不十分であるため、継続的な調査研究を実施する必要があると考えられる。

5. まとめ

今回の研究によって、望海浜公園南側の砂浜に関する貴重な初期データを蓄積することができたが、それと同時に、2023 年度以降に取り組むべき調査も明らかとなった。

1 つ目は、望海浜公園南側の砂浜における定期的な植生調査を実施することにより、海浜植物の被覆状況の経年変化を把握することである。アカウミガメの産卵場所保全のために、従来の清掃活動に加え、植生管理も必要になってくると考えられるため、その根拠となるデータの蓄積が急務である。

2 つ目は、望海浜公園南側の砂浜を含む東播海岸沿岸域全体の海底形状を把握することである。2023 年 3 月に国土交通省姫路河川事務所から 2022 年度に実施したグリーンレーザ測量データを提供してもらった。今後、このデータを用いて 2022 年時点の海底形状を正確に把握することに取り組む。その後、望海浜公園南側の砂浜沿岸域と林崎漁港において水中ドローンによって定期的に測量を実施することで、砂の堆積状況を定量的に把握し、科学的根拠に基づいた砂の流入対策を講じることができると考えられる。

本研究の目的は、アカウミガメの産卵地保全活動の実践的戦略を策定することであったが、そのためには更なる調査データの蓄積が必要である。

引用文献

- 1) 国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所，東播海岸の未来を見つめる -直轄事業化から五十年を迎えて-，pp. 30 (2011)
- 2) 環境省自然環境局日本ウミガメ協議会，ウミガメ保護ハンドブック，pp38 (2006)
- 3) 独立行政法人土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム，新しい河川植生調査手法（案），pp29 (2011)

現場技術者の潜在能力を引き出す建設インクルージョン・マネジメント研究

立命館大学経営学部 教授 善本哲夫

立命館大学総合科学研究機構 教授 建山和由

1. 研究の目的・背景

本研究は地場ゼネコン・中小建設業の建設プロセスの革新を支援する論点を「監理技術者の負担軽減」と「女性・外国人の入職・活用」の興味深いケース調査から見出すものである。新たな職域や外国人技術者との作業・業務配分再編，そして遠隔臨場・映像情報システム活用を軸とする労働編成効率化の視点から，建設 DX 時代における「インクルージョン・マネジメント」の導入の方向性を検討することが本研究のターゲットである。i-Construction, 建設 DX, インフラ DX による生産性向上を働き方改革，時間外労働上限規制遵守に結びつけ，先端技術と新 3K（給与・休暇・希望）実現によって業界の魅力度を高める必要がある。そのためにも，現場技術者の潜在能力を引き出し，さらなるやりがい結実させることで建設業の魅力度と生産性の向上を同時実現する新たな建設マネジメントのありようが問われている。その論点を「女性・外国人の入職・活躍」の視点から，「建設インクルージョン・マネジメント」として整理を試みる。

国立社会保障・人口問題研究所による本邦の将来推計人口では本研究実施時点から今後 30 年間で生産年齢人口が 30%減少するとみられており，このデータをもとに年齢層別の人口がそのまま残るというラフな仮定をすると，建設従事者は 10 年後には 11.7%，20 年後には 34%，さらに 30 年後には 47%に減少すると本研究では推定している。建設業の現況がこのまま続けば，30 年後は 2020 年代前半の約半数の人員で建設プロセスを担うことになり，社会に対して高品質のインフラを安定的に提供するという役割を果たすことが極めて困難な状況になる。また，猶予されている建設業の時間外労働上限規制は 2024 年度から他産業と同様に 2078 時間となり，その対応は待ったなしの状況にある。

2016 年にスタートした i-Construction を中心とするデジタル技術実装推進による生産性向上とともに従事者減少の常態化が深刻な建設業にとって重要となるのは業界の魅力度を高め，入職者を増やすことである。そのためには，「建設業の旧態依然としたイメージ（きつい，汚い，危険の 3K）からの脱却」，「休暇・収入・安全性で明るい展望（新 3K）を持つことができる産業への体質改善」，「生産革命に則して情報分野，女性，外国人などこれまでとは違う人材雇用の推進」を進めていく必要がある。

こうした背景のもと，本研究はこれまで建設業に関わることがなかった，あるいは関わりが薄かった人達を含む多彩な人材が活躍できる場をつくり出し，多様性を建設プロセス革新の推進力に活かす現場革新思想へのトリガーを作り出すことにフォーカスしている。監理技術者を中心に多くのエンジニアが多様な業務を抱えており，また労働力不足・高齢化を背景にますます労働負荷が大きくなっている内実がある。監理技術者専任緩和などの措置が進むものの，他方でそれらによって個々のペーパーワークに忙殺される状況は変わっていない。付随的ルーティンワークに追われ，技術者の経験やノウハウを建設生産サービスとして十分に活用する時間を作り出すことができていない現況において，デジタル技術を活用することで，多彩な人材が建設業でそのスキ

ルや能力を発揮できる場づくりと意識改革が求められている。本研究では、外国人技術者の登用、デジタル技術に長けた建設ディレクターの導入、建設プロセスの再編成に目を向ける。

以上とともに、本研究では就業者・入職者不足に悩む建設業において、20 年程度の経験を積んだ現役技術者の知見・ノウハウを活かす方向性にも「加齢」のポジティブな視点のもとにインクルージョン・マネジメントに取り込む論点を提示する。

2. 研究の方向性

本研究の目的は現場技術者の潜在能力を地場ゼネコン・中小建設業の建設プロセス革新を活かすことにある。新 3K 職場（給与・休暇・希望）を実現するためには、建設・インフラ DX の潮流を建設工学的な生産革新とともに、建設マネジメントの革新に結びつけていくが肝要になる。デジタル技術実装をトリガーに建設プロセス各タスクの分業と協働のありようを見直し、現場技術者が経験・ノウハウ・考え方を十分に発揮でき、そして外国人技術者や女性など、これまで建設に関わることのなかった人達が活躍できる、また他業種からの転職が魅力的となる建設プロセス革新、働き方改革を実現する建設マネジメントのアップデートが不可欠である。それが多彩な人材が活躍できる場をつくり出し、多様性を建設プロセス革新の推進力に活かす現場革新思想の現れとなって生産性向上に結びつく。

労働力不足は2つの類型に区分し、考える必要がある。一つは施工現場における直接作業者のありようである。第二は、技術者不足である。本研究では特に技術者不足に目を向ける。大手ゼネコンや施工業者で活躍した OB 技術者が、中小建設業者でセカンドキャリアとして就業するケースがある。しかしながら、昨今では業界全体で技術者不足が慢性化しており、OB 人材を雇用延長する傾向もあり、中小建設業者がセカンドキャリアパスとしてシニア技術者を確保することも困難な状況を迎えている。若手技術者の新規就業が芳しくないことが、その背景にある。セカンドキャリア入職、新規就業がともに少ないため、20 年程度の経験を積んだ現役技術者への業務負担がますます高まり、そのことが心身の不調や転職・退職を誘発することになる。現状、本来の能力発揮業務以外のペーパーワーク等の繁忙さから、技術者のやりがいの喪失、体調不良、離職へと繋がりがかねない。建設業法改正により監理技術者専任緩和により 2 つの現場兼務が可能となったものの、その実現の制約条件としてペーパーワークや従来の建設プロセスが大きく影響している。こうした実態において、監理技術者の負荷軽減は大きな意義を持つ。

建設業技術者が、現在、そして将来的に能力を発揮し、かつ能力をさらに構築するためには多様な人材が活躍でき、同時に建設プロセス革新や働き方改革を実現する建設マネジメントのアップデートが待ったなしの踊り場の環境にある、これが本研究の直視する現実である。

本研究の問題意識から建設インクルージョン・マネジメントを検討するにあたって、3 つの興味深いケースを取り上げ、その洞察から今後のマネジメント実践の論点を抽出していく。

3. 研究成果

以下では、建設インクルージョン・マネジメントの論点を述べていく。第 1 に、トータルの建設プロセスの内実を見直すことである。監理技術者の業務を分解し、付帯作業の効率化・合理化、省力化できる作業の明確化と受発注両者によるコンセンサス形成、デジタル技術に長けた職種との分業・協業から、プロセスのありようを再編成する必要がある。第 2 に、デジタルスキルを持

つ女性スタッフの登用と職種デザインである。建設 DX 時代において従来の建設土木の業務とは違う領域から人的資源として迎え入れるマインドと、雇用環境の整備が重要になってくる。第 3 に外国人技術者への信頼と育成である。デジタル技術のオペレーションやハンドリングに長けた外国人技術者を育成し、心地よく就業できる環境整備とマネジメントがなければ、デジタルスキルは汎用スキルでもあるため、他業種への転職や離職を抑止することができなくなる。第 4 に、新 3K を実現する働き方改革に向けた健康管理への注力、である。繁忙な現役監理技術者が心身状態を適切に保つために、全社的に従業員の健康に現実介入することが必要な時期にある。

以上のもと、2020 年以降からシニア就業者である団塊世代の完全引退が始まり、今後さらに深刻化が推察される技術者不足の問題予備軍を迎え撃つ発想として、後述するケースから下記のように成果を整理した。

- * 論点① 全体最適を視野に入れたリーン・マネジメントのマインドセット
- * 論点② デジタルスキルを有する女性・外国人人材の雇用にみる多様性の醸成
- * 論点③ 現役の監理技術者の老成と壮健の両軸に関する持続的成熟へのサポート

これら論点を建設インクルージョンマネジメント実践へと適用していくために不可欠である視点は、監理技術者の「従来の付帯作業負担」をそのままタスクとして他職種に配分するだけでは、建設プロセス革新には結びつかず、タスクを分割しただけに過ぎなくなることへの注視である。論点①のリーンマネジメントの考え方から、付帯作業の効率化・合理化、ムダ・ムリ・ムラの洗い出しと削減が論点②を実践していくための鍵となる。そして、論点②では女性・外国人技術者が活躍できる職務分掌では、自らの裁量でタスクを遂行できるよう「まとめて任せる」ことが肝要になってくる。建設業、特に中小建設業者にとって監理技術者の高齢化・引退、OB 人材のセカンドキャリア新規就業者減少によって技術者不足がさらに顕著になる。同時に、そのことは特定の監理技術者への業務集中を引き起こすこととなる。論点①と論点②の成果を監理技術者の負荷軽減を持続的な生産性向上へと結実させるためには、負荷軽減と同時に能力構築や成熟に向けた心身状態の長期的な適切管理が重要になってくる。これが論点③である。

これら 3 つの論点を「建設インクルージョン・マネジメント」として結実されるためには、次の課題を克服する必要がある。

- * 課題① コミュニケーションの促進
- * 課題② デジタルスキルを持つ人材の就業経路の多角化

建設業の特徴の一つはコミュニケーション量の多さにある。段取りや問題共有など現場の変動対応において、情報交換・意思疎通の頻度を大切にする文化を持つのが優良現場であるといつてよい。監理技術者のマルチタスクを分解し、協業枠組みへと再配分する際に鍵を握るのは、優良現場要素であるコミュニケーション量の多さと、その配分をいかに結びつけるか、である。建設土木の直接作業者との接点を現地・現物の工事監理を通じて現場技術者は持つ。加えて、ペーパーワークにおいて現場の理解度や解釈を高めていく。付帯作業となるタスクをデジタルスキルに長けた他職種へと引き渡すことで職務分掌を実現するには、タスクを引き継いだ側が現場とのコミュニケーション頻度と質量を高めていく努力が欠かせないことになる。特に、女性・外国人技術者、またデジタルスキル人材の就業者・就業希望者が少なかった建設業では、施工現場がそうした人材とのコミュニケーションのとり方や接し方に不慣れである場合が当然ながら想定される。課題①を解決する手法が必要である。

課題②については、従来の建設業の固有技術・技能とは違うベクトルの人材募集の就業の間口を広げるため、デジタルスキルを活かせる部門等の整備が必要となってくる。例えば、デジタル推進部、DX推進部などのように、他職種・業種からの組織的受け皿を用意するなどの方策が考えられる。また、後述のケースで紹介する、外部のデジタル人材育成の建設ディレクター協会へ社員を研修派遣するなど、建設DX時代の新たな動向や取り組みに積極的にアンテナを立て、活用する姿勢が今後の戦略的方向性で寛容になってくる。

当該論点・課題は、本研究ではデジタル技術を軸として、リーンマネジメント発想、女性就業支援、外国人技術者育成に取り組む企業の実態調査をもとに整理したものである。これらから現場技術者の潜在能力を引き出す「建設インクルージョン・マネジメント」の方向性を次のようにまとめることができる。

***要件① デジタルスキル人材に職務をまとめて任せる**

***要件② 職種・役割に応じた適切な部門・受け皿の設置**

***要件③ コミュニケーション活性化の手段確保**

建設インクルージョン・マネジメントの発想は従来型の建設プロセスの見直しを求めることになる。デジタル技術実装を推進と同時に就業者の間口を広げるためにも、従来になかった職域を作り出すことで多様な人材が建設業に入職する環境づくりが今後の焦点になってくる。それぞれの人材が得意とする領域で自身のスキルを活かすことができる職場づくりは働き方改革でもあり、また、建設業の魅力度を高めることに結びつく。つまり、「建設業の魅力度を高めるにはどうすればよいか?」、「多くの人がこの業界で仕事をしたいと考えるようになるには、何をすれば良いか?」を考えるための原点は、現役の建設従事者が、やりがいを感じ、生き生きと仕事ができることにある。建設プロセス革新の大きなターゲットの一つは、自分の仕事に自負をもち、さらに日々の仕事の中に新たな工夫を見いだす創造性を建設従事者に喚起することである。それは、監理技術者のみならず、建設土木分野以外からの入職者を増やすことにも結実していく。そのチャンスは建設インクルージョン・マネジメントの発想が与えてくれるはずである。

建設インクルージョン・マネジメントによる多様性確保は同時に建設プロセス革新を促すことになり、結果として新たな生産性向上の切り口を見出すことにもつながってくる。監理技術者の負担軽減をトリガーに就業の間口を広げ、かつ多様な人材が活躍できる職務分掌によって技術者本来のさらなる能力発揮・構築の促進と同時に、新たな角度からデジタル技術実装の効果を引き出すことが、建設DX推進のエンジンとなる。以上が建設インクルージョン・マネジメントの検討、実践で想定される本研究の結論である。

以下では、本研究成果の論点整理で調査協力を得た会社・組織の3つのケースを紹介していく。

4. ケース

4.1. ケース1 阿部建設によるリーンマネジメントの取り組み

北海道小樽の阿部建設は 同社はリーンマネジメントとデジタル技術をマッチアップすることで生産性向上と働き方改革実践にチャレンジしており、監理技術者負担軽減に取り組んでいる。遠隔臨場などデジタル技術実装を推進する部門としてDX推進室を立ち上げた。同社では監理技術者が書類作成に追われ、超過勤務が多い状況を解消すべく、先述のマッチアップを働き方改革の文脈に紐付け、工事関係書類のペーパーワークの簡素化に取り組んでいる。

当該取り組みは受注者である阿部建設と発注者である北海道開発局小樽開発建設部の双方で、紙媒体の書類を音声ありの映像に置き換えるなど、従来の所定様式等作成の手法改革にチャレンジしている。つまり、既存のプロセスをデジタル技術による効率化・合理化を目指し、ムダ・ムリ・ムラ低減の文脈から監理技術者によるペーパーワークの開放を狙ったものである。写真1は現場に設置された遠隔臨場・映像データ記録の風景であり、国土交通省「令和3年度建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」として取り組み、受注者・発注者の合意のもとで書類の映像データへの代替が実施された。その成果からメリット・デメリットを検証し、同プロジェクト終了後のR5年度も継続して監理技術者のさらなる負担軽減に向けてコンクリート構造物を対象に映像データ活用に取り組んでいる。

他方で、課題もある。DXを推進する一方で、小樽管内・後志管内での新規就業者確保が厳しく、監理技術者、そしてデジタル技術に長けた人材を雇用に結びつけることが困難な状況下にある。

写真1) 阿部建設施工現場（一般国道5号仁木町銀山大橋 P5 橋脚工事）による試行



出所) 善本撮影, 2021 年 11 月 (撮影協力: 阿部建設)。

4.2. ケース 2 建設ディレクター協会

京都に本部をおく建設ディレクター協会は、建設業をデジタル技術実装・活用の支援人材である「建設ディレクター」の育成、普及に取り組んでいる。その事業フォーカスは、監理技術者をはじめ技術者の書類作成や ICT 業務の負担を軽減すること、また、建設業における女性活躍の場を創出、拡張することにある。同協会は建設ディレクターを新たな職域として位置づけ、デジタルスキルの長けた、あるいは興味関心を持つ女性人材を育成することによって、技術者の負担軽減と女性活躍の場創出の両輪を前進させようと積極的な活動を展開している。

以下、建設ディレクターを導入した2社を取り上げていく。A社は新潟県の地場施工業者であり、河川整備護岸工事、道路改良工事、砂防堰堤工事や除雪など幅広い建設土木事業を展開している。同社は建設ディレクター室を立ち上げ、令和4年段階で女性6名の建設ディレクターを雇用している。そのうち4名は建設ディレクターとして採用入社している。

建設ディレクター室の室長X氏は前職を測量会社にてCADオペレーター分野の業務を担っていた。A社入社後に社長より建設ディレクター講座の紹介があり、自身のキャリアを活かす職域として受講することになった。X氏はモデル現場で写真撮影やファイリング、データの取りまとめ業務を中心に活躍しながら、現場に頻繁に足を運ぶことで仕事を「受注」していくスタイルで職

務分掌を推進している。

当初、現場は ICT・デジタル技術の導入に二の足を踏む傾向にあったが、建設ディレクターとの分業によりデジタルツールを一度使い始めると、その後は監理技術者、現場がメリットを見出し、当該仕組みが浸透していくことになった。

他方で、監理技術者と建設ディレクターのスムーズなコミュニケーションにとってハードルも顕在化している。男性同士の対話型業務遂行に従来とは違うデジタル技術、女性スタッフが介在することで、同僚である建設ディレクターへの仕事の頼み方に戸惑う、頼みにくい、といった雰囲気も出てきている。

建設ディレクターを導入した別の会社である B 社は電気設備工事を中心とする事業を展開している。経済産業省の DX 認定制度に基づく「DX 認定事業者」であり、意欲的にデジタル技術実装に取り組んでいる。従来から女性 CAD オペレーターが活躍していたが、技術者不足が深刻化する情勢において男性ばかりの目線での業務から脱却し、女性が活躍でき、新たな視点からプロセス革新を導くことができる職場の意義を多様な形で外部発信していたところ、建設ディレクター協会との邂逅があった。

こうした経緯から技術者が得意な業務と技術者以外に任せられる業務を切り分け、技術者の負担を減らすべく建設ディレクターとして異なる業種の女性オペレーターを雇用した。技術者は書類等作成が苦手であり、建設ディレクター導入以前からペーパーワークのありようを問題とみて、その解決策を模索していた。2022 年度において 3 名の建設ディレクターが活躍している。

長年の慣習から安全等の観点で女性が現場に入ることに抵抗があった同社で、当初は建設ディレクターが活躍できる環境をスムーズに整えることができずにいたが、建設ディレクターからもっと技術者に近い業務を担いとの声が本研究調査時点で上がるようになっていく。

しかしながら、建設ディレクターの社内プレゼンスが高まるにつれ、その名称や役割が建設電気設備における特別な存在として社内では解釈、評価される等のネガティブな方向に独り歩きする傾向も懸念され、コミュニケーションを十分に取る諸施策の実施に取り組んでいる。同社では新規の建設ディレクターが業界に馴染むことができるよう、現場技術者と建設ディレクターが十分なコミュニケーションを取れる仕掛けを心がけている。

4.3. ケース 3 建設 IoT 研究所

建設 IoT 研究所は愛知県小牧の可児建設の子会社であり、建設 DX のツール開発、サービス、コンサルティングを得意とする会社である。同社は令和 4 年に「D・I（多様性）を活用した DX 化支援 遠隔臨場技術を活用した鉄筋検査に適用」により第 1 回中部 DX 大賞奨励賞を受賞している。同取り組みでは、高度外国技術者が中心となり DX 化促進の開発を進めてきた。建設 IoT 研究所の研究開発スタッフはすべて外国人技術者である。親会社の可児建設の DX 化、建設プロセス革新とともに、令和元年度から令和 4 年度にかけて国交省の官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」）の複数の採択コンソーシアムにおいて同社外国人エンジニアが活躍してきた。

同社女性外国人技術者 2 名の活動を以下紹介してみよう（写真 2）。マレーシア出身のヌルナジュワ氏は、例えば令和 3 年度 PRISM 採択事業で舗装工（修繕工）で切削機に MG 機能を後付するシステムを開発、実装するなど自身の専門分野である情報通信の知識とスキルを活かした活動を展

開している（写真 3）。インドネシア出身のジェヴィカ氏は建設土木を母国で学んだあと、多様なデジタルスキルを身につけ、例えば令和 3 年度 PRISM 採択事業で橋梁工事での遠隔臨場システム、令和 4 年度 PRISM 採択事業で映像データを活用した除雪作業の効率化などで活躍している。

建設 IoT 研究所では受注した DX 化の内容や共同研究に開発業務について、彼女らに自由度の高い裁量権を与えている。新しい角度から建設業のプロセス革新、生産性向上を検討する上で、彼女らを信頼し、まとめて任せるヌルナジュワ氏は建設土木分野出身ではなく、その知識も持っていない。後述するように、このことが課題の一つにもなってくるのだが、他方で技術者がデジタル技術実装の職域として自らのスキルを建設業の慣習に縛られずに活かすことができるにより、業務の充実感や従業員エンゲージメント向上につながっている。

他方で、現場、監理技術者、外国人技術者のコミュニケーションでは日本語や外国語にみる言語的な制約とともに、対話者同士の建設業界固有の知識や用語、またデジタル技術に関する情報の偏りがハードルとなる。そのため、対話能力を高めることで外国人技術者がさらに活躍できるよう、同社ではデジタルスキルと同時に建設土木固有の知識獲得や慣習の理解度を高めるための研修等も実施している。

写真 2) 建設 IoT で活躍する 2 名



*（両写真ともに、左：ジェヴィカさん、右：ヌルナジュワさん）

出所）善本撮影，左：2023 年 3 月（撮影協力：可児建設），右：2021 年 12 月（撮影協力：愛亀）。

5. 今後の試行

建設業への入職者を増やすためには、魅力度を高めていく必要がある。その原点は従事者がやりがいを感じ、自負をもてることにある。生産年齢人口減少が不可避な現状において、建設業が背負っている高品質インフラの安定的提供の社会的責務を果たすためには、現役も新規就業者も、そして潜在的な入職者も生き生きと仕事ができるマネジメントを実践することが従来以上に問われる時代になっている。ことにある。建設プロセス革新の大きなターゲットの一つは、自分の仕事に自負をもち、さらに日々の仕事の中に新たな工夫を見いだす創造性を建設従事者に喚起することである。それは監理技術者のみならず、建設土木分野以外からの入職者を増やすことにも結実していく。2020 年代の建設業界は変革への大きな曲がり角にきている。将来確実に訪れる危機的状況を打開するチャンスを手にするためには、建設プロセス革新への意欲的姿勢が不可欠であり、建設インクルージ

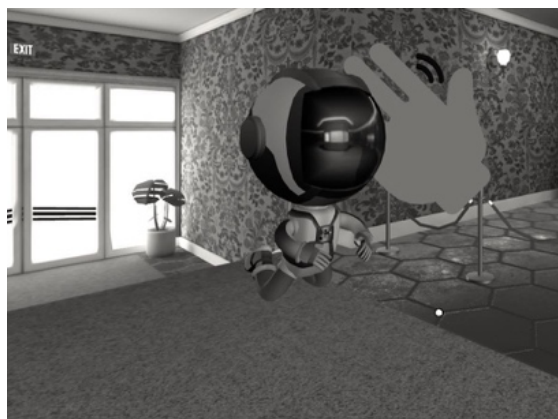
ョン・マネジメントの発想がそのヒントを与えてくれるはずである。

建設インクルージョン・マネジメントの発想を具体化していくためには、本研究で指摘した課題①コミュニケーションの促進、課題②デジタルスキルを持つ人材の就業経路の多角化、に対応する動きを展開する必要がある。課題①について、新型コロナ感染拡大防止とともにビデオ会議の活用が進んだ潮流を活かし、遠隔臨場や ICT など建設 DX 化への文脈と合わせてソーシャル VR コンテンツ等の導入を試みることも一つの方策であると考えている。3D のアバターを活用することでユーザーの性別・年齢等の差異はなくなり、バーチャル空間上では対話の心的距離が短くなる。また、言語制約、情報偏差を解消するコミュニケーション補助手段としてチャット機能等を使用することも考えられる。写真 4 は Mozilla Hubs を使い、バーチャル空間上に 2 名がアバターとして対話している PC 画面をキャプチャしたものである。こうしたソーシャル VR にみるコミュニケーションツールも建設現場・従事者のデジタル技術に対する抵抗感を減らし、慣れ親しむきっかけとなる。

課題②については各社個別による取り組みもあるが、例えば本研究期間中に先述ケースの阿部建設を中心に、小樽建設協会や複数会社の有志による協働で多様な人材に向けた就業希望者拡大のアイデア創出や仕組みづくり検討等の協議を実施し、R5 年度にワークショップ等開催の調整を進めている。このように地方圏の中小建設業による新規入職者確保への協働は、地域全体での業界活性化にも貢献することが期待される。

本研究成果を次のステージへとステップアップさせるべく、今後は上述の試行をはじめ、建設業の魅力度向上に向けた多軸的な模索を支援する研究を進めていく。

写真 4) ソーシャル VR の参考画面キャプチャ (Mozilla Hubs)



出所) <https://hubs.mozilla.com/>

(善本による利用風景の画面キャプチャ)

IoT センシングによる橋梁のインテリジェント化に関する研究

立命館大学理工学部 准教授 川崎佑磨

1. 背景と目的

日本では、高度経済成長期以降に整備されたインフラが今後一斉に老朽化する。その中でも、全国の 2 メートル以上の橋梁数は約 70 万橋以上存在し、そのうち約 68%を市区町村が管理している。しかし市区町村は、財政力不足、職員不足、専門的知見の不足であることが多く、町の約 5 割、村の約 7 割で橋梁保全業務に携わっている土木技術者が 0 人であることなどから、国の財政的・技術的支援がなされるまで、橋梁長寿命化修繕計画は策定されていなかった。また、経年劣化する橋梁は供用年数が長いものも多く、現行の道路橋示方書の基準とは異なる条件で設計・施工されていることがほとんどである。現存する橋梁の現在の健全性（すなわち健康診断）を把握することは、維持管理の適切な判断を早期に評価するために重要である。橋梁の初期状態を把握していることが望ましいが、初期状態を知るために必要な図面、計算書、維持管理記録が残っていない場合がある。既往研究では、橋長や幅員などの外観の情報と、設計当時の設計基準を用いて、RC 内部の配筋、応力状態などの初期値を算出し、ひび割れ進展やひずみの計測、加速度などを高精度で、高価な計測機器を用いてデータを取得する。そして、得られたデータと算出した初期値から劣化度を推定している。これらの測定技術で劣化度の診断を定期的に行い、維持管理に利用することが期待されている。しかし、市区町村の管理する橋梁数が多いことや、計測結果から劣化の診断に、専門知識が必要であるが市区町村では専門知識を有した技術者が不足していること、高価な計測機器を用いたモニタリング手法は、コストが高く財政力不足である市区町村では採用が困難であることなどの問題がある。

そこで本研究では、多くの橋梁に導入することが見込める簡潔で安価な IoT センシング技術の開発を行い、物理量として「ひずみ」の検出を試みた。これまで、既往研究でも IoT センシングでひずみを検出している事例は非常に少ない。ひずみは、材料の挙動を直接知ることができる重要な物理量であり、地震などの自然災害による損傷同定、維持管理に有効に活用できると考えている。橋梁のインテリジェント化を進めていく上で、IoT センシングによる「ひずみ」の検出可否とその精度について基礎的検討を行った。

2. IoT センサの概要

IoT センサには、写真-1 に示す Raspberry Pi を使用した。Raspberry Pi は、1 枚の基板の上に最小限の CPU や入出力インターフェース、コネクタが搭載されている数千円で購入可能なイギリスのラズベリーパイ財団によって教育用に開発されたシングルボードコンピュータである。RaspberryPi 用の OS である Raspbian を microSD カードにインストールし、RaspberryPi に microSD カードを挿入し、Wi-Fi に接続することで、普段使用しているコンピュータと同様に、ネットサーフィンや音楽鑑賞をすることができる。本研究では、Raspbian を使用し、Wi-Fi 環境でのネットワークの設定を行った。さらに、ひずみ検出のために、写真-2 に示す Raspberry Pi 用高精度 A/D 変換モジュールである ADpi Pro を使用した。ADpi Pro は、OS から容易に操作が可能な専用のソフトウェア



写真-1 Raspberry Pi

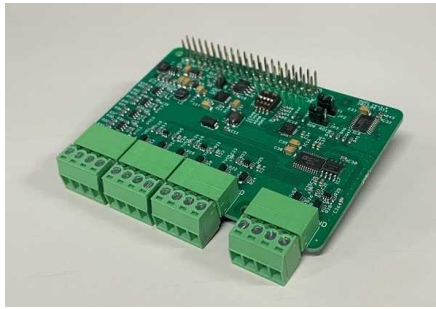


写真-2 ADPi Pro



写真-3 Raspberry Pi と ADPi Pro



写真-4 USB ドングル

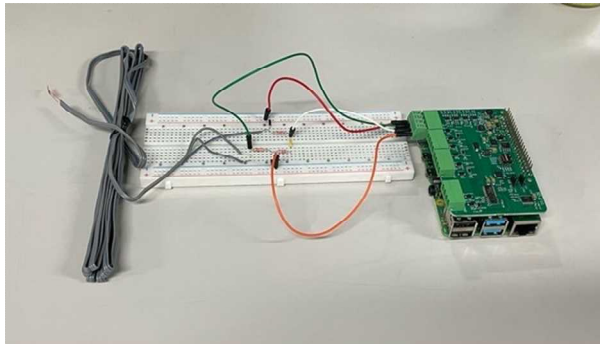


写真-5 鋼材用 I 型ひずみゲージの接続

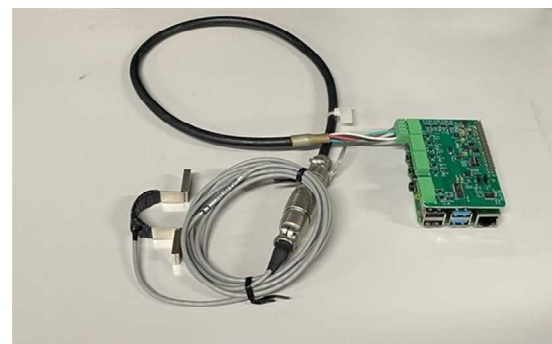


写真-6 π 型ひずみゲージの接続

ア環境が提供されており、高精度のアナログ電圧を Raspberry Pi で計測できる。また、OS 側から電源の ON と OFF が可能な外部出力端子を搭載しており、OS 側からセンサを測定時だけ ON にすることで、消費電力を削減することができる。Raspberry Pi と ADPi Pro を接続し、写真-3 に示すシステムを作製した。また、これらを Wi-Fi に接続することで、遠隔での操作やインターネットに接続することができる。写真-4 に示すデータ通信用端末の USB ドングルを Raspberry Pi の USB に接続することで、Wi-Fi に接続した。本研究では、非 Wi-Fi 環境で計測を行い、実験の後に得られたデータを Wi-Fi 環境で Windows のパソコンに送信し、データを取得した。

本研究では、鋼桁のひずみを計測するために鉄筋用ひずみゲージ、コンクリート表面のひび割れ幅の変動を計測するために π 型ひずみゲージを使用した。I 型ひずみゲージと Raspberry Pi の接続の様子を写真-5 に、π 型ひずみゲージと Raspberry Pi の接続の様子を写真-6 に示す。

3. 実験概要

本研究では、基礎的研究の対象として群馬県の O 橋をモデルに計測実験を行った。O 橋の設計条件を表-1 に示す。また、図-1 に O 橋の平面図、図-2 に O 橋の立面図を示す。測定項目を表-2 に示す。RC 床版の下面のひび割れ進展の計測に π 型ひずみゲージを取り付けて、鋼桁の温度収縮の計測に G4 の主桁に鋼板用のひずみゲージを取り付けて計測した。計測頻度は、1 時間当たり 1 データとした。鋼板用ひずみゲージ、π 型ひずみ、コンテナボックスの設置箇所を図-3 に示す。π 型ひずみゲージは歩道側と橋梁中央側の 2 箇所に橋軸直角方向のひび割れを対象に設置した。鋼材用ひずみゲージは G4 の主桁に橋軸方向に設置した。電力の供給には太陽光発電を利用した。太陽光パネルは図-1 の G6、G7 の欄干に落下防止対策を施して設置した。ここで、野外での計測を行うため、Raspberry Pi などの IoT センシングに必要な機器類は、全て防水のコンテナボックス内に収納した。写真-7 にコンテナボックスの内部の様子を示す。コンテナボックスには、IoT センサ、電源供給用のバッテリー、太陽光発電に使用するチャージコントローラーを収納し、盗難対策として、コンテナボックスと

表-1 O 橋の設計条件

設計条件	
橋長	55.500m
桁長	55.300m
支間長	27.40 + 27.40m
道路区分	第3種第5級
活荷重	A活荷重
形式	2径間連続桁橋
支承・支持条件	天然ゴム系横層ゴム支承 A1・A2：可動、P1：固定
有効幅員	6.50 ~ 23.50m
斜格	90° 00' 00"
使用鋼材	耐候性鋼材 SMA400、SMA490Y
適用示方書	平成8年12月 道路橋示方書同解説 平成8年7月 鋼道路橋設計 ガイドライン（案）

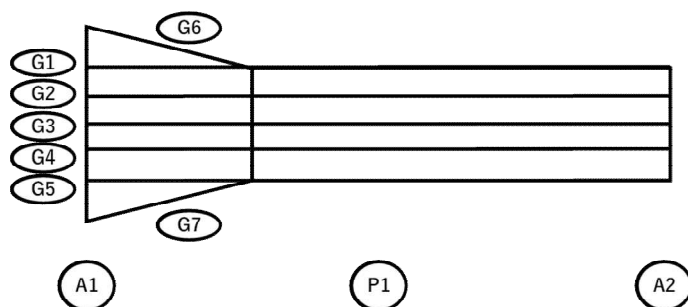


図-1 O 橋の平面図

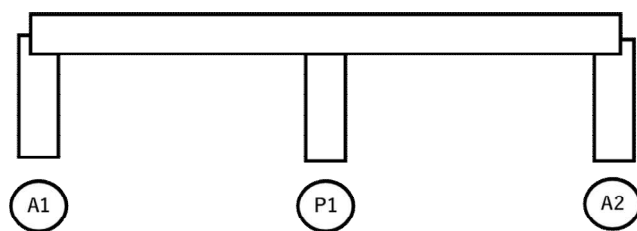


図-2 O 橋の立面図

表-2 計測項目

対象箇所	計測対象	データの取得方法	計測頻度	目的
RC床板	下面のひび割れ	π 型ひずみゲージ	1データ/1時間	劣化・損傷の進展などの確認
積層ゴム支承	せん断変位	ひずみゲージ	1データ/1時間	鋼板の伸縮量の推定

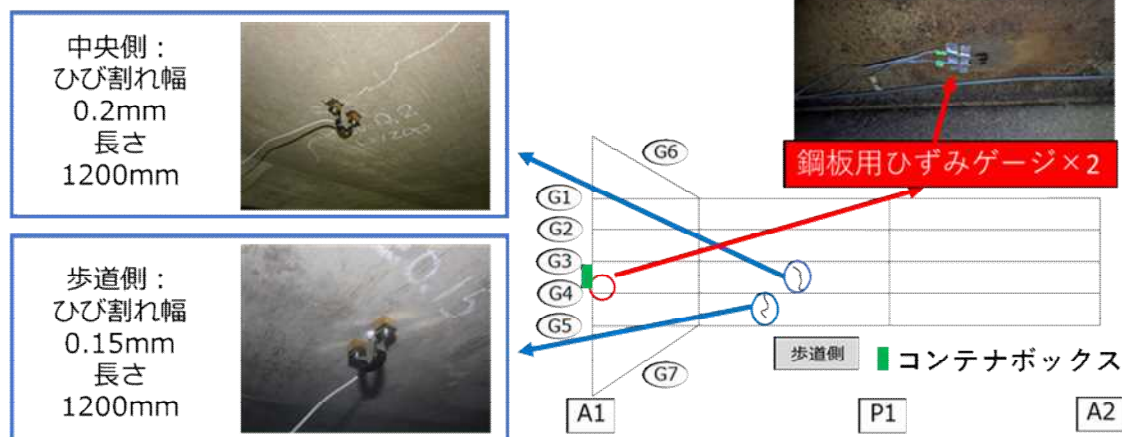


図-3 ゲージ類設置箇所とコンテナボックスの位置

蓋を南京錠で施錠した。コンテナボックスの設置の様子を写真-8に示す。IoT センサは、雨水や湿気から守るため、タッパーに入れて収納した。

4. 実験結果と考察

図-4、図-5に実橋梁で得られた鋼板ひずみのデータおよび π 型ひずみのデータを示す。なお、図-4、図-5の空白部分は、日射量が少なく太陽光パネルによる電力供給が少なくなり、電力が不安定のため



写真-7 コンテナボックス内部の様子

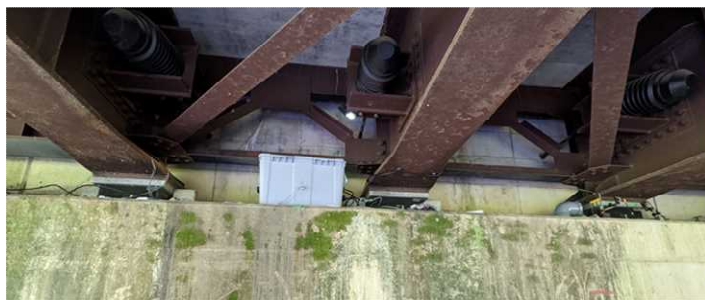


写真-8 コンテナボックス設置箇所の様子

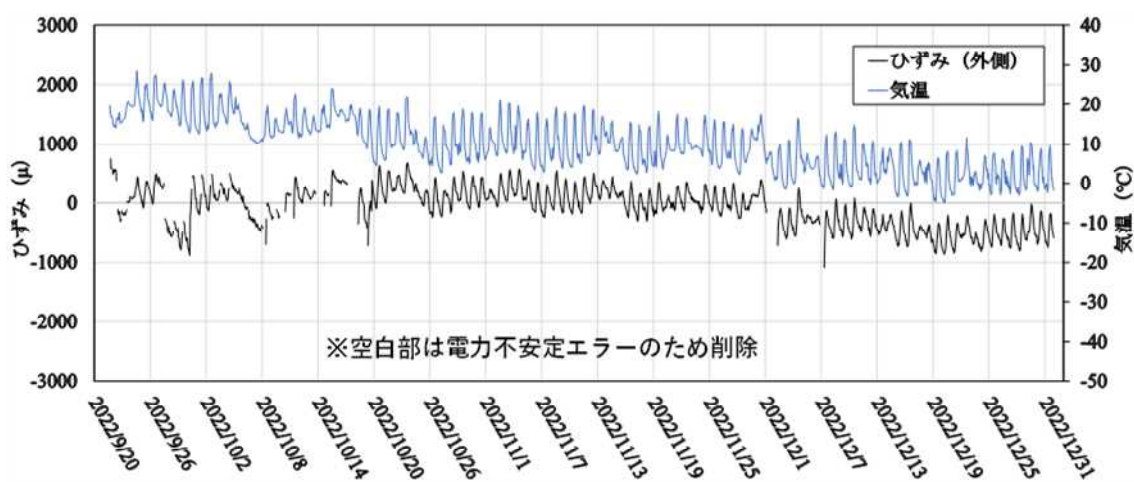


図-4 鋼桁ひずみの挙動

め計測できていない、あるいは計測値が明らかに異なっているなどのデータをエラー値として削除している。鋼板のひずみゲージは2箇所設置しているが、鋼板中央側のデータは接続不良によってデータの取得が不十分であり削除した。また、 π 型ひずみでは、IoT センサ内のプログラムに不備があり、図-5 のようにプログラム変更前と変更後を結果として表している。図-4 より、鋼桁のひずみ値は、気温に応じて変動していることがわかった。なお、この気温は対象橋梁の直近にある気象台のデータを気象庁から取得して表示した。このことから、鋼桁のひずみ変動をIoT センシングで長期間モニタリングすることができた。しかし、ひずみの変動はある程度確認できたが、ひずみ値の整合性についてはまだ課題を残している。この点については、今後、室内実験などで精査していきたい。なお、ひずみ値の誤差は、ひずみをIoT センシングで計測するためのブリッジ回路をブレッドボードに抵抗線を差し込む形式で作成していることが大きな要因と考えている。そのため、今後はブレッドボードではなく、ひずみゲージの導線と抵抗線などをハンダ付けすることで漏電対策を行う、あるいは既存製品のブリッジ回路は比較的安価（メーカーにもよるが約1万5千円程度）を使用するなどの対策を検討している。

π 型ひずみの歩道側と車道側の結果では、橋梁の拡幅部の影響によって振動が伝わりやすい歩道側のひび割れ幅の変動が大きくなることが予測された。図-5 より、ひび割れ幅の変動は、車道側に比べて歩道側が大きく、計測前に想定していた通りの結果が得られた。歩道側のひび割れ幅は車道側のひ

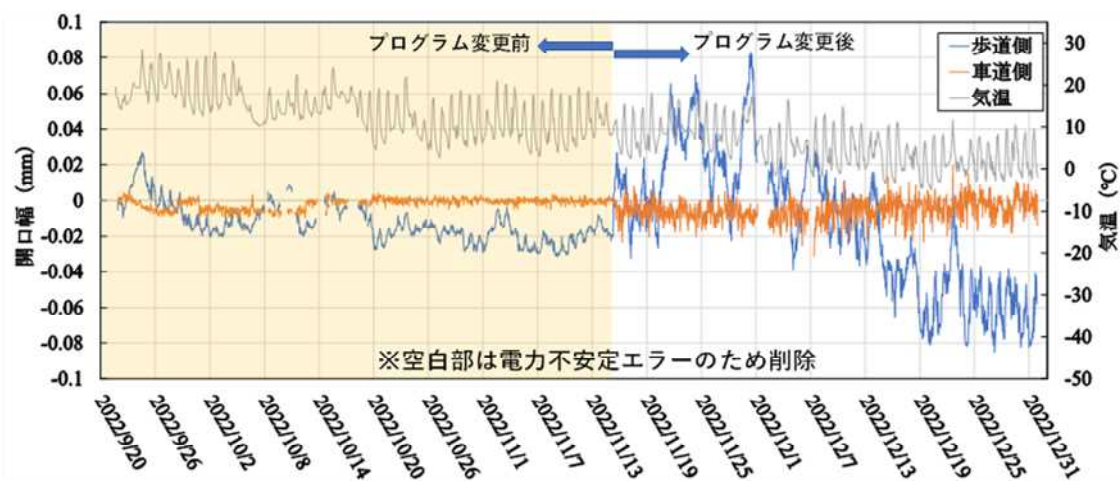


図-5 コンクリート床版のひび割れ開口幅の挙動

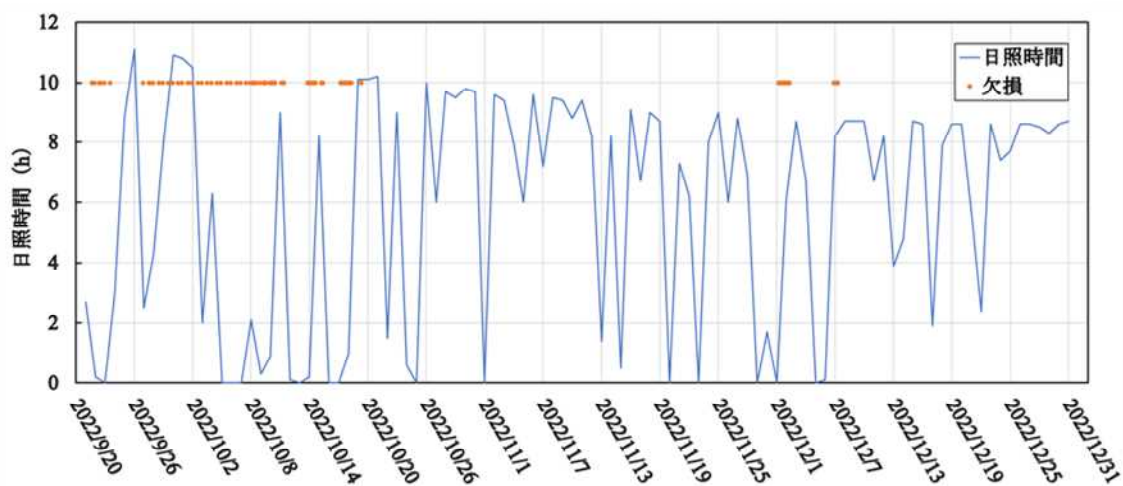


図-6 日照時間の挙動

ひび割れ幅よりも 0.05mm 小さいが、エフロレッセンスが多くのひび割れから析出しており、橋面上の水がコンクリート床版内を貫通していると推察される。これは、コンクリート床版内の鉄筋腐食などコンクリート部および鋼桁部の劣化に影響する。そのため、ひび割れ幅の変動をモニタリングすることで、ひび割れの進展を遠隔で確認することが可能である。なお、 π 型ひずみの値に関しては、実験室レベルの RC 梁載荷試験結果で計測値の整合性を検証し、誤差はほとんどなく検出可能であることを確認している。図-6 に対象橋梁付近の観照データにより、日照時間と IoT センサの電力不安定による計測欠損箇所の関係を示す。図-6 より、日照時間の少ない 10 月 12 日から 10 月 19 日の期間に電力不安定となることが多かった。日照時間の比較的多い期間である 10 月 20 日から 12 月 1 日では、電力不安定とならなかった。このことから、電力の不安定については、自然エネルギーを太陽光だけでなく風力発電やその他の発電を検討する必要があると考えている。特に、大雨などの洪水被害をモニタリングすることを検討する場合には、太陽光による発電は期待できない。したがって、様々な環境要因でも計測可能なシステムを今後も実橋を通じて検討していく。なお、今回の研究で利用した IoT センサを作成するために購入した物品の総額は約 18 万円程度であり、1 システム当たり 9 万円でデータ取得できた。しかし、使用した Raspberry Pi は、通常であれば約 8 千円であるが、半導体不足の影響から約 3 万 3 千円まで高騰していた。半導体不足の影響が緩和されれば、本研究における 1 システム当たりのコストも低下する。

5. まとめ

本研究では、IoT センシングによる橋梁のインテリジェント化を進める上で、重要となる IoT センシングによるひずみの検出を目的として、実橋を対象に約3か月間のモニタリングデータを検証した。その結果、鋼桁ひずみのデータが、気温に応じて変動する挙動が検出できた。このことから、実橋かつ自然エネルギーによる IoT センシングにおいても、ひずみを検出できる可能性がわかった。しかし、鋼桁ひずみの値に関しては、室内実験で使用されるデータロガーのひずみ値との対比から整合性の合わないケースを一部確認しており、実用化には信頼性が低いと考えられる。そのため、今後は IoT センシングのシステムも含めて、誤差を少なくすることができる方法を検討していく。 π 型ひずみゲージによるひび割れ幅は、コンクリート床版の観察状況に合致する計測データが得られた。また、IoT センシングによるひび割れ幅の変動は、室内実験でも整合性が合うことを別途確認しており、実橋のモニタリング対象として問題ないと思われる。

当初、ひずみ計測機器類の一部メーカーからも IoT センシングによるひずみの計測は困難であると指摘を受けていた。しかし、本研究の検討から、一部の計測値の信頼性には課題が残ったが、自然エネルギーのみで3か月超のモニタリングにより、ひずみ変動を計測することができた。今後は、ひずみ値の整合性を確認して計測システムのアップグレードを進める。また、自然エネルギーとして太陽光だけではなく、他の自然エネルギー（例えば、風力、水力など）の活用も検討する。IoT センシングで得られたデータの活用イメージについて図-7 に示す。橋梁のインテリジェント化に向けて、IoT センシングで計測された物理量を、維持管理や損傷評価にどのように活かすか、具体的な検討を進める予定である。2023 年 3 月末現在、既に立命館大学びわこくさつキャンパスの所在地である滋賀県から IoT センサ設置およびモニタリングが可能な対象橋梁のデータを取得している。上記に記載した課題は、今後は近畿圏内の橋梁を対象に検討を進めて、近畿圏内の市区町村の橋梁（特に財源が厳しい市区町村）の維持管理などに実用できるシステム開発に繋げていきたい。

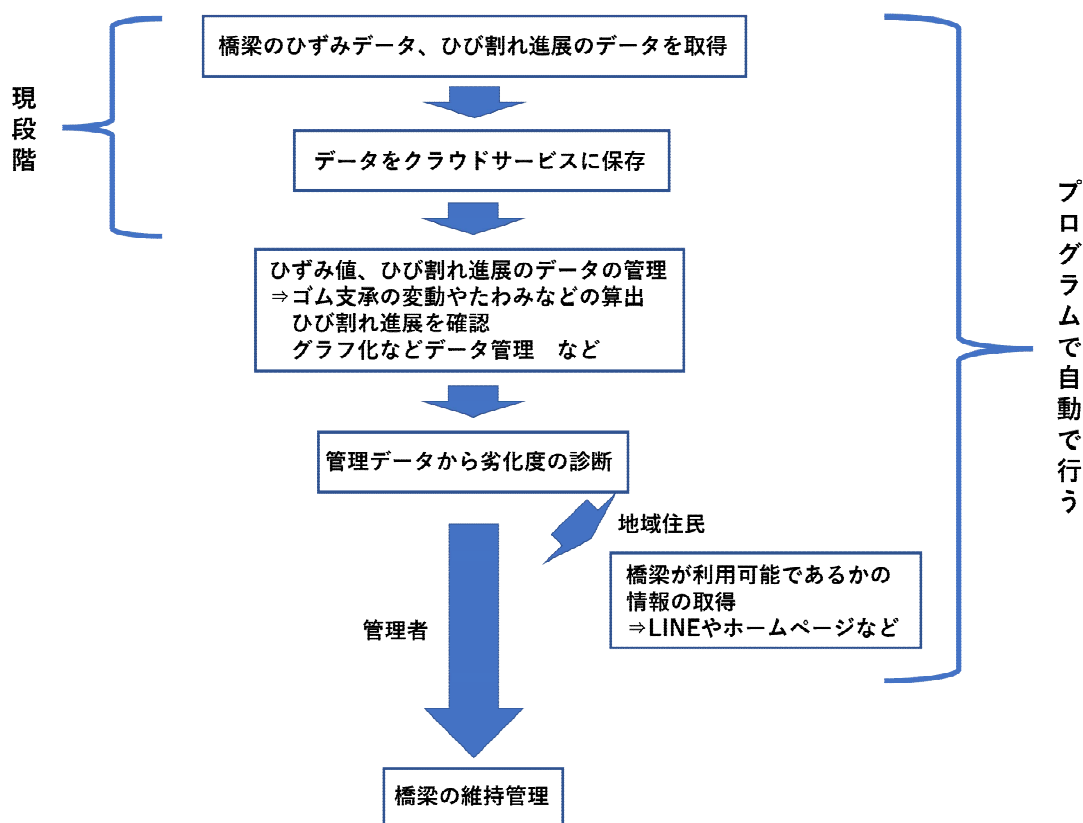


図-7 IoT センシングで得られたデータの活用イメージ

火災を受けた鋼橋部材の健全性評価手法の構築

大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 准教授 廣畑幹人

1. はじめに

近年、国内外において橋梁の火災事例が報告されている¹⁻³⁾。火災の原因によらず、損傷の程度によっては被災した橋梁の供用が長期的に停止されることになるため、橋梁が火災により損傷した場合、迅速に供用再開することが重要である。

火災による損傷を受けた橋梁の供用再開を迅速かつ安全に行うため、2015年に土木学会から「火災を受けた鋼橋の補修診断ガイドライン」⁴⁾が発行された。このガイドラインによると、鋼橋の場合、目視による被災度判定、塗膜の外観などから部材の受熱温度の推定を行い、詳細調査を必要とせず供用再開可能と判断する受熱温度の基準を400℃と定めている。受熱温度が400℃を超えている場合、あるいは400℃未満であっても、鋼材の板厚が薄い場合は部材の変形が生じる可能性があるため、供用を停止し詳細調査が必要となることがある。詳細調査において、被災した鋼部材の耐荷性能を評価するうえで、鋼材の機械的性質が評価指標の一つとなる。一方、機械的性質の他の因子として、熱変形、残留応力の変化が挙げられるが、これらの因子が部材の耐荷性能に及ぼす影響については不明な点が多いのが現状である。

本研究では、火災加熱による鋼材の機械的性質、熱変形および残留応力の変化が鋼橋部材の耐荷性能に及ぼす影響を明らかにするとともに、火災を受けた鋼橋部材の健全性評価手法を構築することを目的に、一連の検討を実施した。鋼橋の火災において、河川敷における出火や不法投棄物からの失火などの原因により桁端部が損傷する事例が多く報告されている。鋼桁（プレートガーダー）の端部はウェブと支点上補剛材2枚で構成される十字断面柱として鉛直圧縮荷重に抵抗するように設計されている⁵⁾。死活荷重に対して支点反力が作用する構造部位である桁端部を想定した十字断面柱を対象に、加熱実験および圧縮実験を実施した。

2. 加熱実験

2.1 実験供試体および実験方法

本研究で使用した供試体を図-1に示す。プレートガーダーの端部におけるフランジ、ウェブ、補剛材の交差部を想定したものであり、形状および寸法は道路橋示方書に規定される種々の項目を満足するように設定した⁵⁾。フランジ、ウェブおよび補剛材の鋼種は全てSM400Bであり、溶接材料（ワイヤ）はJIS YGW12を用いた。各部材に用いた材料の化学組成および機械的性質（ミルシート値）を表-1に示す。

加熱しないもの2体（健全供試体と称す）、後述の方法で600℃まで加熱するもの1体（600℃加熱供試体と称す）、900℃まで加熱するもの1体（900℃加熱供試体と称す）を作製した。

鋼桁端部の支点近傍が加熱を受ける状態の火災を模擬するため、電気抵抗ヒーター⁶⁾を用いて供試体の高さ1/4程度の領域を無拘束状態で加熱した。その後、消火活動を想定し、供試体下部を常温の水を満たした容器に浸漬させることで冷却した。ヒーターの設置方法および実験状況を図-2に示す。加熱温度は、鋼橋の各種火災事例において鋼部材の受熱温度の上限として報告が多い600℃と、大規模火災の場合の鋼部材の受熱温度を想定した900℃とした¹⁻³⁾。これらはそれぞれ、鋼材の組織変化が生じるA₁変態温度（約727℃）よりも低い温度および高い温度という意味も有している。加熱領域が目標温度に達していることを確認するため、供試体に熱電対を取り付け、モニタリングしながら温度管理を行った。

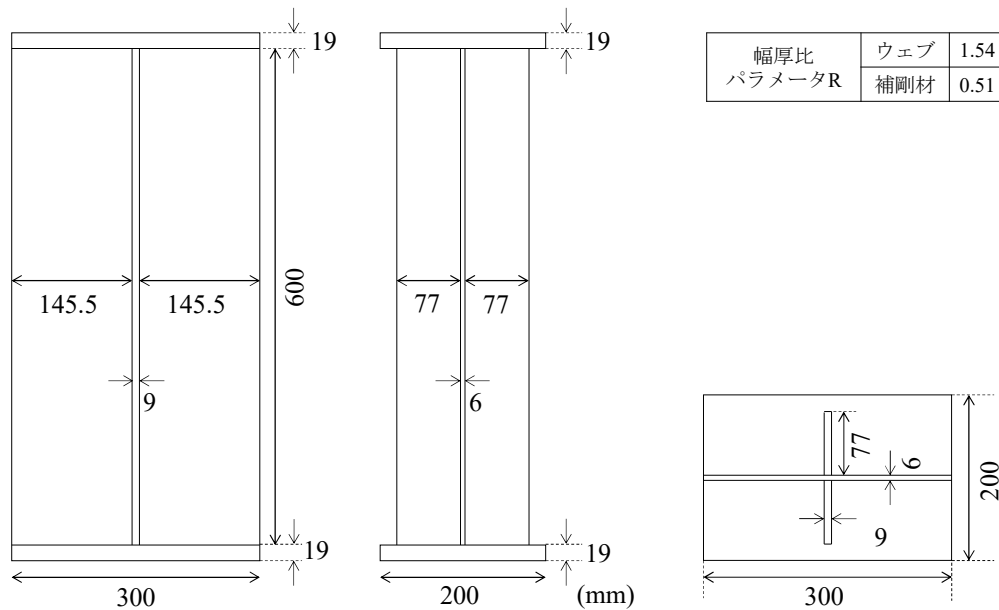


図-1 供試体の形状および寸法

表-1 鋼板および溶接ワイヤの化学組成と機械的性質

	鋼種	化学組成(質量%)					機械的性質		
		C	Si	Mn	P	S	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び(%)
フランジ	SM400B	0.13	0.20	1.00	0.018	0.005	315	442	34
ウェブ		0.10	0.21	0.95	0.014	0.004	353	446	33
補剛材		0.14	0.20	0.82	0.018	0.004	280	446	32
溶接ワイヤ	JIS YGW12	0.09	0.44	0.96	0.012	0.012	460	540	28

2.3 温度履歴

熱電対配置および加熱領域を網掛け部分で図-3 に示す。ウェブ 1 に熱電対 TC1~TC5, ウェブ 2 に TC6~TC10, 補剛材 1 に TC11~TC15, 補剛材 2 に TC16~TC20 を取り付けた。なお, 加熱後は各熱電対における温度が約 60 °C となるまで冷却した。加熱冷却実験時の温度履歴を図-4 に示す。加熱領域の TC5, TC10, TC15, TC20 の温度が, それぞれ 600 °C あるいは 900 °C に到達した。

2.4 リーブ硬さ

加熱による鋼材の機械的性質の変状を推定する方法として, 本研究ではリーブ硬さ試験⁷⁾を実施した。鋼材の硬さと降伏応力あるいは引張強度の間には相関関係があることが実験的に知られており, 専用の小型装置でハンマーを鋼材表面に打ち出し, ハンマー衝突前後の速度比によってリーブ硬さを算出した。

既往の研究では, 同一部材に対して実施したリーブ硬さ試験の結果には 10 % 程度のばらつきが生じることが報告



(a) ヒーター設置



(b) 断熱・加熱



(c) 断熱除去



(d) 冷却

図-2 加熱実験の状況

されている⁸⁾。リーブ硬さの計測位置を図-5 に示す。600℃加熱供試体および900℃加熱供試体における加熱領域外の箇所では、加熱前後のリーブ硬さの変化率は10%未満であった。したがって、これらの領域を材料強度の変化がない健全部とし、そこで得られたリーブ硬さの平均値を基準として加熱領域のリーブ硬さと比較した。600℃加熱供試体において、加熱領域の硬さの上昇率は健全部に対し平均1.8%であり、機械的性質の変化は小さいと推定できる。900℃加熱供試体のリーブ硬さ計測結果を図-6 に示す。において、加熱領域の硬さの上昇率は健全部に対しウェブで平均21.5%であった。

2.5 面外変形

ダイヤルゲージを用いて、加熱前後の供試体のウェブおよび補剛材の自由端における面外変形を測定した。測定結果を図-7 に示す。加熱による補剛材の面外変形の変化はほとんどなかったため、ここではウェブの面外変形のみを示す。健全供試体および加熱前の供試体におけるウェブ、補剛材の面外変形の最大値はそれぞれ1.29 mm、0.84 mmであった。600℃加熱供試体のウェブ、補剛材各パネルの最大面外変形量の平均値は0.65 mm、0.18 mm、最大値は0.80 mm、0.26 mmであった。900℃加熱供試体のウェブ、補剛材各パネルの最大面外変形量の平均値は0.56 mm、0.16 mm、最大値は0.6 mm、0.18 mmであった。

2.6 残留応力

X線回折法を用いて残留応力の測定を実施した。各供試体のウェブにおける残留応力の測定結果を図-8 に示す。健全供試体では溶接により自由端側に圧縮残留応力が分布していた。また、高さ方向の溶接の始末端に近い供試体下部分で、より大きな圧縮残留応力が生じていた。加熱供試体では、加熱領域で引張残留応力が生じた。健全供試体の Y=0~150

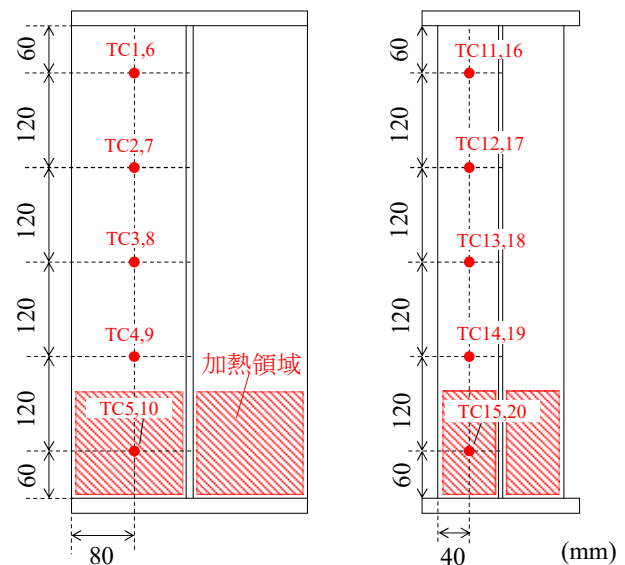
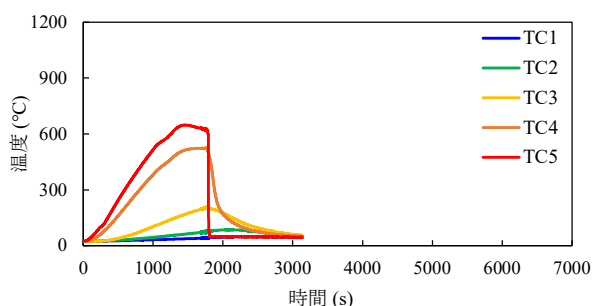
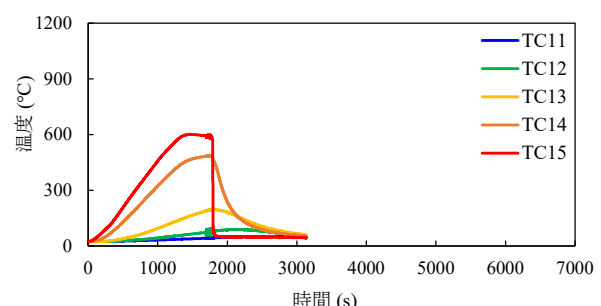


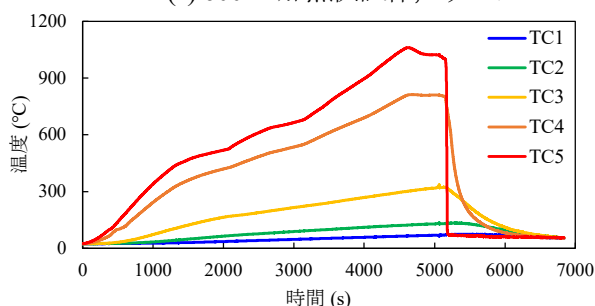
図-3 熱電対配置および加熱領域



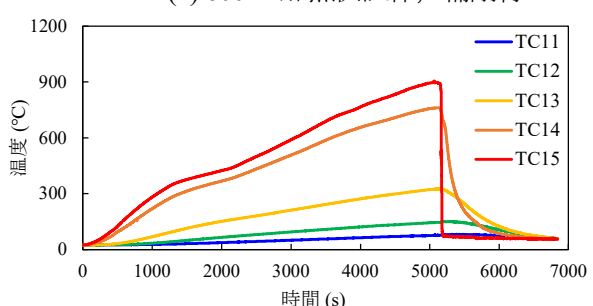
(a) 600℃加熱供試体、ウェブ



(b) 600℃加熱供試体、補剛材



(c) 900℃加熱供試体、ウェブ



(d) 900℃加熱供試体、補剛材

図-4 温度履歴

mm の箇所では 100~180 MPa の圧縮残留応力が生じたのに対し、600 °C加熱供試体では 50~200 MPa、900 °C加熱供試体では 200~400 MPa の引張残留応力が生じた。これは、加熱後の冷却過程で加熱領域が収縮し、非加熱領域により拘束されたことによるものと考えられる。非加熱領域である Y=150~300 mm の箇所では圧縮残留応力が増加する傾向が確認された。この領域では、加熱領域の急冷後において温度が高い状態が続き、残留する熱による膨張が既に冷却された加熱領域により拘束されたものと考えられる。また、この膨張によって供試体中央部付近の残留応力がやや引張方向に生じたと考えられる。

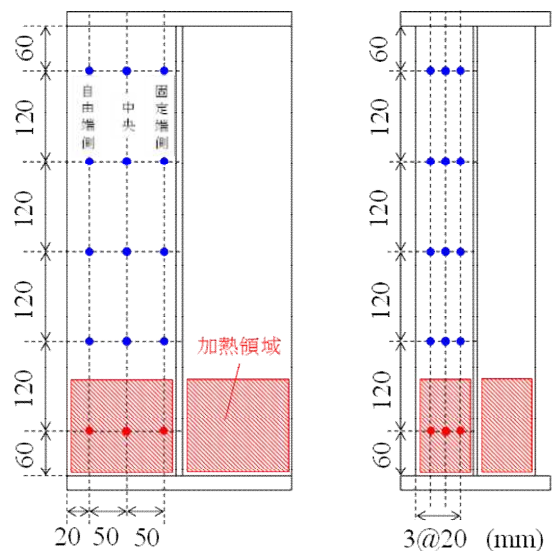
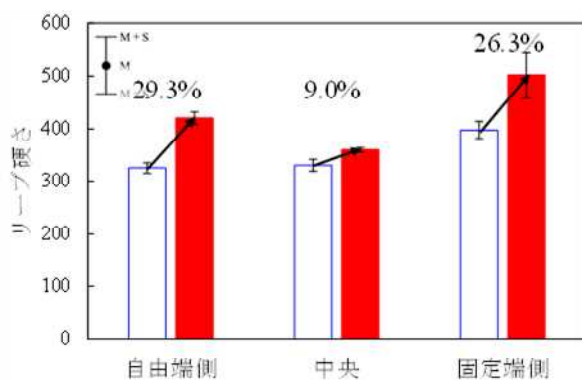
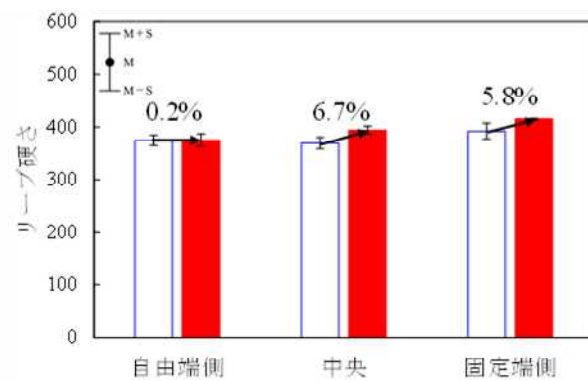


図-5 リーブ硬さの計測位置

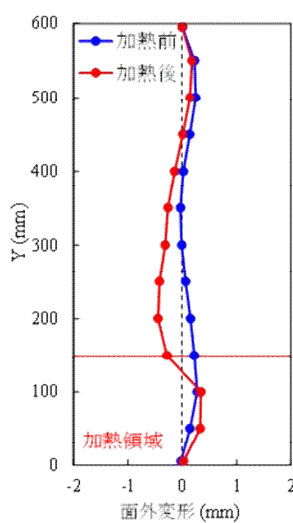


(a) ウェブ

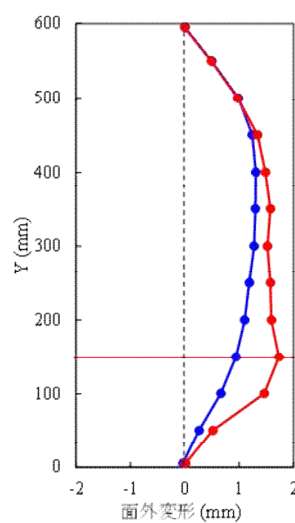


(b) 補剛材

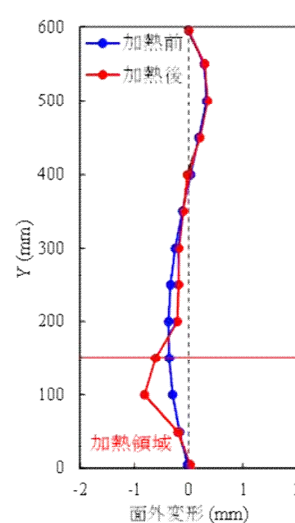
図-6 リーブ硬さの計測結果 (900 °C加熱供試体)



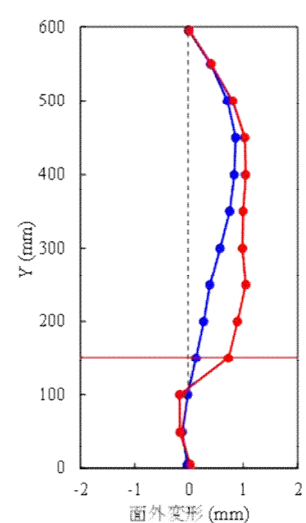
(a) 600 °C, ウェブ 1



(b) 600 °C, ウェブ 2



(c) 900 °C, ウェブ 1



(d) 900 °C, ウェブ 2

図-7 面外変形

3. 圧縮実験

3.1 実験方法

健全供試体, 600 °C加熱供試体および 900 °C加熱供試体の圧縮挙動を明らかにするため, 単調載荷静的圧縮実験を実施した. 圧縮実験の状況を図-9 に示す. 2000 kN 万能試験機を用いて, 供試体鉛直方向に単調圧縮荷重を静的に負荷した. 上フランジの下面に 2 つの鉛直変位計を対角線上に設置し, 鉛直変位の平均値を求めた.

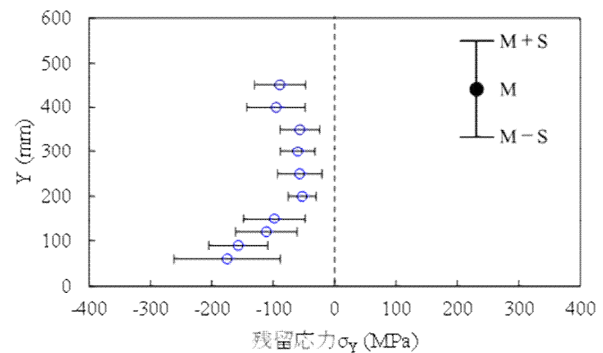
3.2 実験結果

健全供試体 2 体, 600 °C加熱供試体および 900 °C加熱供試体それぞれの圧縮荷重-鉛直変位関係を図-10 に示す. 最大荷重時の面外変形を図-11 に示す. 健全供試体, 加熱供試体ともに柱高さ方向中央である $Y=300$ mm で面外変形が最大となった. 弾性挙動を呈する荷重 200 ~ 400 kN の範囲で圧縮荷重-鉛直変位関係の傾きとして弾性剛性を求めた. 健全供試体 2 体の挙動はほぼ同じであったため, 弾性剛性および最大荷重の結果は 2 体の平均値としている. 健全供試体における弾性剛性は 1181 kN/mm, 最大荷重は 809.5 kN であった. 600 °C加熱供試体および 900 °C加熱供試体における弾性剛性はそれぞれ 1188 kN/mm, 1085 kN/mm であり, 健全供試体と比べてそれぞれ 0.6 % 増加, 8.1 % 減少した. これは, 加熱領域を中心とした加熱後の変形量の増加が理由として考えられる.

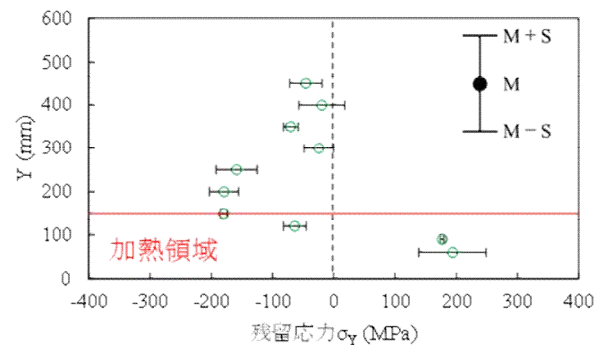
加熱供試体の最大荷重はそれぞれ 830.6 kN, 844.5 kN であり, 健全供試体と比べてそれぞれ

2.6 %, 4.3 % 増加した. 圧縮荷重を受ける自由突出板では, 面外変形が最も大きくなるパネル中央部 (柱高さ方向の中央部) が早期に降伏し, 部材の強度を決定する. 本実験においては, 加熱後のパネル中央部におけるリーブ硬さは加熱前と比較してほとんど変化がなかった. パネル中央部では加熱による降伏応力の上昇がなかったため, 加熱供試体の最大圧縮荷重は健全供試体の最大圧縮荷重と比べて大きく変わらなかったと考えられる. 最大圧縮荷重がやや上昇した理由については, 加熱領域の降伏応力の上昇が挙げられる. 900 °C加熱供試体が 600 °C加熱供試体より最大圧縮荷重が大きくなったことも, 硬さの上昇度合いの違いが理由として挙げられる.

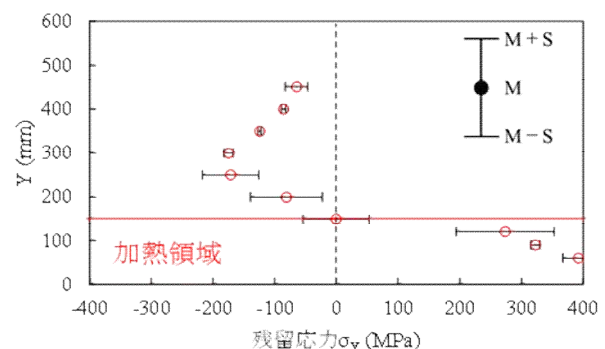
また, 加熱領域付近における残留応力の変化が最大圧縮荷重に及ぼす影響は小さいと考えられる. パネル中央部における圧縮残留応力が大きいほど最大荷重は減少するが, 本実験においては, 主に残留応力が大きく変化したのは供試体下部の加熱領域であり, 供試体中央部の残留応力は大きく変化していないことが理由として挙げられる. 健全供試体ではパネル中央部に圧縮残留応力が分布しており, 加熱供試体ではパネル中央部で残留応力がやや引張方向に変化したため, 加熱供試体の最大圧縮荷重が健全供試体の最大圧縮荷重よりわずかに増加したと考えられる.



(a) 健全供試体, ウェブ



(b) 600 °C加熱供試体, ウェブ



(c) 900 °C加熱供試体, ウェブ

図-8 残留応力

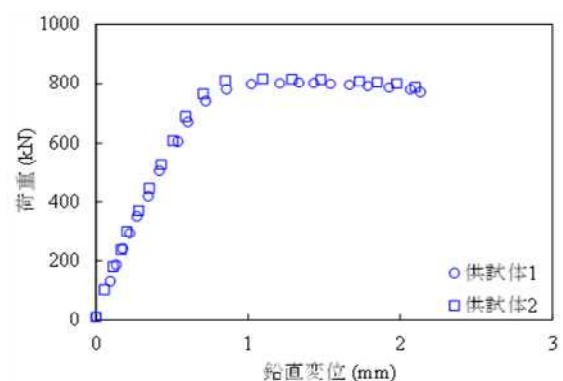
4. まとめ

本研究では、火災を受けた鋼橋部材の健全性評価手法を構築することを目的に、鋼桁端部を想定した十字断面柱を対象に一連の検討を実施した。死活荷重に対して支点反力が作用する構造部位である桁端部を想定した十字断面柱を対象に、加熱実験および圧縮実験を実施した。得られた主な知見を以下に示す。

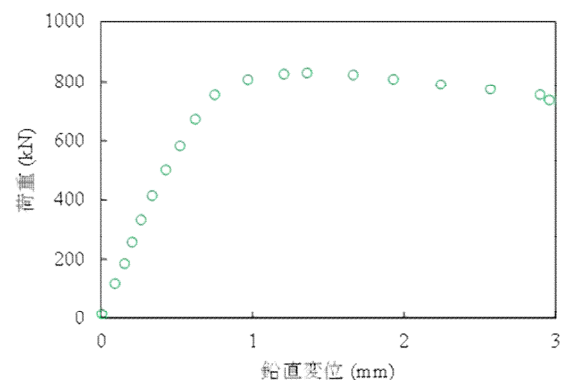
- (1) 高さ 600 mm の鋼十字断面柱に対し、高さの 1/4 程度の領域を 600 °Cあるいは 900 °Cまで加熱し、水冷した。600 °C加熱の場合、加熱領域における硬さの上昇は約 1.8 %程度であり、機械的性質の変化は小さいと推定した。900 °C加熱の場合、ウェブでは健全部に比べ加熱領域の硬さの上昇が 10 %以上であり、焼入れによる降伏応力および引張強度の上昇が示唆された。
- (2) 加熱過程におけるパネルの熱膨張がフランジに拘束されたことで生じた圧縮応力の作用により、加熱領域周辺でウェブの変形量が大きくなった。加熱領域で最大 0.8 mm の面外変形量が確認された。
- (3) 健全供試体では、溶接により自由端側に圧縮残留応力が分布していた。加熱供試体では、加熱からの急冷により収縮し、非加熱領域により拘束されたことから、加熱領域で引張残留応力が生じた。また、非加熱領域では、加熱領域の急冷後において高温温の状態が続き、残留する熱による膨張が既に冷却された加熱領域により拘束されたことにより、圧縮残留応力が増加する傾向が確認された。
- (4) 静的単調圧縮載荷実験において、健全供試体に比べて 600 °C加熱供試体の弾性剛性は 0.6 %増加し、900 °C加熱供試体の弾性剛性は 8.1 %減少した。900 °C加熱供試体は健全供試体と比較して加熱により生じた変形が大きかったことから、900 °C加熱供試体の弾性剛性が大きく低下したと考えられる。
- (5) 各パネルの柱高さ方向中央部において、加熱供試体は健全供試体と比較して硬さ、残留応力に大きな差がなかった。鋼十字断面柱の最大圧縮荷重は柱高さ方向中央部の機械的性質および残留応力の影響を強く受けることから、加熱領域における機械的性質および残留応力の変化が最大圧縮荷重に及ぼす影響は小さいと推察した。



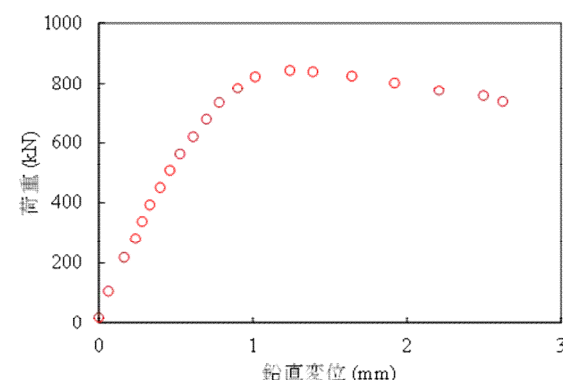
図-9 圧縮実験の状況



(a) 健全供試体



(b) 600 °C加熱供試体



(c) 900 °C加熱供試体

図-10 圧縮荷重－鉛直変位関係

火災を受けた鋼橋部材の健全性を評価するためには、まず、部材内の受熱温度を推定することが不可欠である。受熱温度に応じて鋼材の機械的性質の変化の度合いは異なるが、一般の構造用鋼材の場合、降伏応力および引張強度が低下する可能性は低いと言える。また、残留応力の分布が変化しても、圧縮荷重下における耐荷力に及ぼす残留応力の影響は小さい。加熱により生じる変形を計測し、有限要素解析などを利用して変形が部材の剛性に及ぼす影響を確認する必要がある。

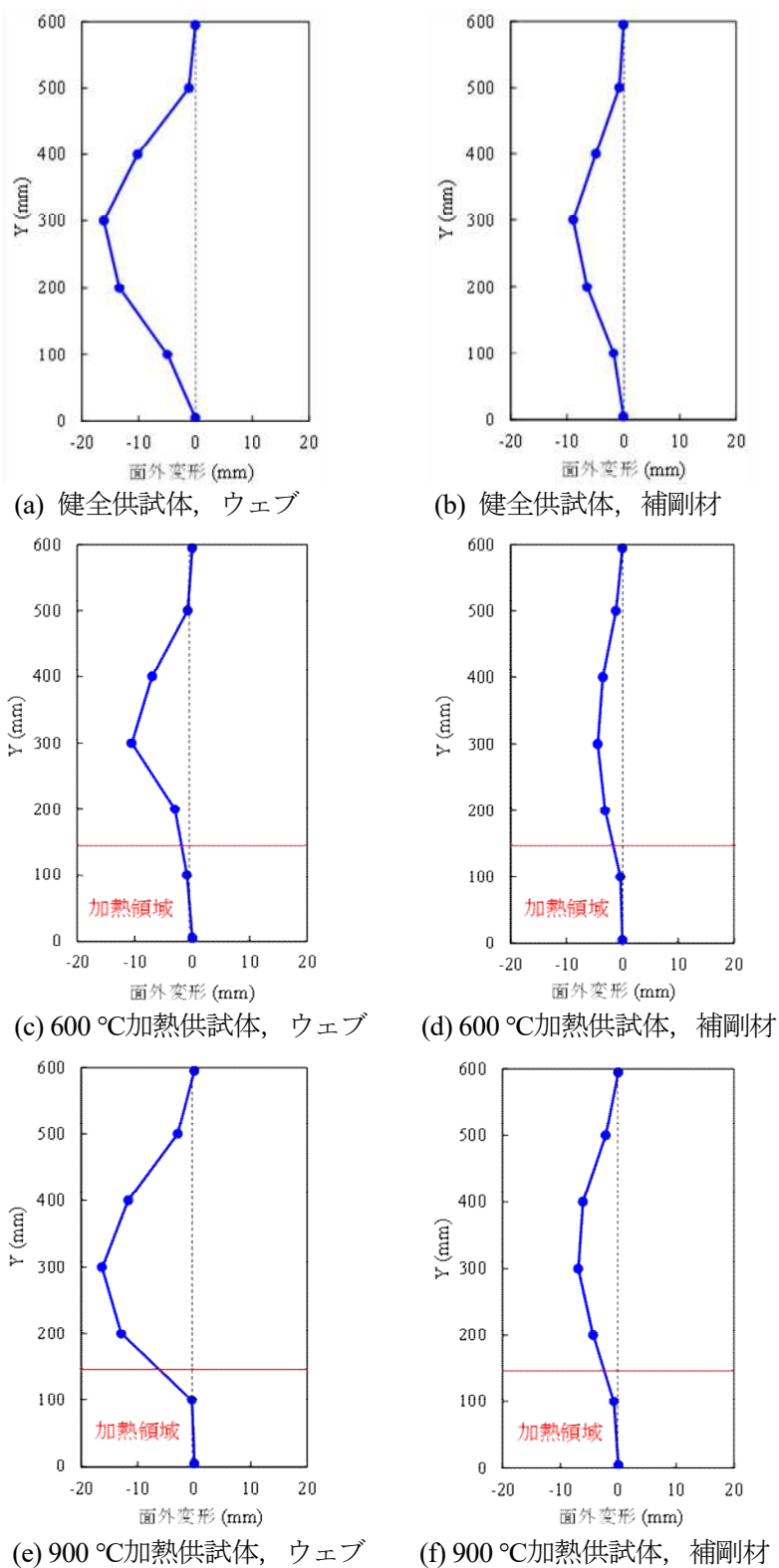


図-11 面外変形モード

参考文献

- 1) 桑野忠生, 増井隆, 鈴木寛久, 依田勝雄: 首都高速 5 号池袋線タンクローリー火災事故の復旧工事, 土木学会誌, Vol. 93, No. 12, pp. 30-33, 2008.
- 2) 是松晃男, 池田武志, 山口栄輝, 牧角龍憲, 亀尾順一郎, 林裕也: 火災を受けた鋼鈑桁橋の損傷調査と強度評価, 橋梁と基礎, Vol. 10, pp. 50-55, 2011.
- 3) Bruno F. Godart, Jacques Berthelley, Jean Pierre Lucas: Diagnosis, Assessment and Repair of the Mathilda Bridge Close to Collapse during a Fire, Structural Engineering International, pp. 331-338, 2015.
- 4) 土木学会鋼構造委員会 火災を受けた鋼橋の診断補修技術に関する研究委員会: 火災を受けた鋼橋の診断補修ガイドライン, 土木学会鋼構造シリーズ 24, 2015.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 2012.
- 6) 廣畑幹人, 伊藤義人: 簡易熱源を用いた熱処理によるすみ肉まわし溶接継手の残留応力緩和に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 第 71 巻 2 号, pp. 208-220, 2015.
- 7) 伊藤隼, 廣畑幹人: 反発硬度による火災を想定した熱履歴付与鋼材の機械的性質推定, 鋼構造論文集, 第 27 巻 107 号, pp. 77-86, 2020.
- 8) 北原敏希, 中込忠男, 藤田哲也, 笠原基弘, 服部和徳, 市川祐一, 井上朋子: 反発式高度計による建築鉄骨溶接部の引張強さ推定に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 999-1000, 2006.

疲労き裂進展の簡易モニタリングの開発

関西大学環境都市工学部 教授 石川敏之

1. はじめに

近年、都市内高速道路などの鋼橋を中心に、多くの疲労き裂が発見されている¹⁾。一般に、微小な疲労き裂の場合は、グラインダー処理によってき裂を除去するが、ある程度進展したき裂の場合は、応急処置として、ストップホール工法やICR処理²⁾が施され、その後、恒久的な補修を行うことが一般的である。

筆者は、面外ガセット溶接継手の溶接止端近傍の無荷重時のひずみの計測によって、疲労き裂の発生・進展を評価する方法を提案している³⁾。この方法は、疲労き裂の発生によって、溶接時に導入された残留応力が解放されることで内部のつり合いが変化し、その変化をひずみで計測する方法である。また、無荷重時のひずみ計測は、作用荷重による、ひずみ範囲を計測する必要がなく、大量の計測データを必要としないため、実橋で計測しやすく、低電力で長距離通信が可能なLPWA (Low Power Wide Area) を用いたモニタリングに適した指標であると考ええる。

既往研究³⁾では、疲労き裂の発生・進展を評価することを目的としていたため、疲労き裂が発生する位置である溶接止端近傍に着目していた。しかし、すでに発生している疲労き裂の進展を監視する場合、溶接止端近傍は疲労き裂により応力を伝達しないため、き裂先端近傍のひずみに着目すると考えられる。しかし、疲労き裂が発生・進展した場合、残留応力が解放されているため、き裂先端では、内部応力のつり合いの変化をひずみの値で評価するのではなく、疲労き裂先端の局所的な降伏による塑性ひずみを用いた評価になると考える。

そこで、本研究では、疲労き裂先端周辺部の無荷重時のひずみ変化に着目した疲労き裂の進展のモニタリングを実施する。疲労試験を実施し、き裂先端周辺部の無荷重時のひずみ計測を行い、無荷重時のひずみの変化によって、疲労き裂の進展の評価ができるかどうかを明らかにする。また、用いるひずみゲージのゲージ長が、疲労き裂進展モニタリングに与える影響を確認する。

2. 疲労試験

(1) 試験体

本研究では、面外ガセット溶接継手試験体を用いて、板曲げ疲労試験を行い、試験体に発生する疲労き裂の先端周辺部の無荷重時のひずみを動ひずみ計および無線ひずみ計測機器によって計測する。本研究では、応力比 $R = -1$ としたため、平均ひずみが無荷重時のひずみとなる。本研究で実施した疲労試験の応力範囲を表-1に示す。

本研究で用いる面外ガセット溶接継手試験体は、厚さ 12mm、幅 200mm の主板に、厚さ 12mm、高さ 100mm のガセットプレートが、半自動 CO₂ ガスシールドアーク溶接(電流 320A、電圧 37V、速度 24.0 cm/min、下向き)されている。面外ガセット先端のまわし溶接部では、溶接の継ぎを設けていない。すみ肉溶接は等脚長の 6mm とした。本研究で用いた鋼板の機械的性質を表-2に示す。疲労試験には、板曲げ振動疲労試験機^{7) 8)}を用いた。

(2) 疲労寿命の定義

本研究では、図-1に示すように、まわし溶接部の止端に貼付した $\phi 0.05\text{mm}$ の銅線が疲労き裂の発生で切れた段階を N_{toe} 、まわし溶接部の止端から発生した疲労き裂が溶接部から離れて主板に進展し始める段階を N_b 、まわし溶接部の止端から発生した疲労き裂が溶接部から離れて主板部に進展し、5mm 進展した

表-1 試験体と疲労試験結果

試験体	応力範囲 (N/mm ²)	疲労寿命(×10 ⁴ 回)								
		N_{toe}	N_b	N_5	N_{10}	N_{15}	N_{20}	N_{25}	N_{30}	N_f
AW120	122.1	10.2	21.4	28.7	34.8	38.7	45.6	51.3	54.9	45.6
AW110	111.3	7.2	27.9	38.5	49.5	56.7	64.0	70.4	74.7	69.7
AW100	101.0	10.5	27.8	—	49.6	—	—	—	—	—
AW90	90.8	—	63.9	78.4	96.9	105.0	119.3	131.8	142.1	—

表-2 鋼材の機械的性質と化学成分

鋼種	板厚	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	化学成分(%)				
					C	Si	Mn	P	S
SM490Y	12	431	549	25	0.16	0.28	1.32	0.009	0.004

き裂を N_5 、以降 5mm ごとに、 N_{10} 、 N_{15} 、 N_{20} 、 N_{25} 、 N_{30} としき裂長さを定義した。 N_b 以降のき裂も $\phi 0.05\text{mm}$ の銅線の切断で検知した。さらに、主板裏面から疲労き裂が発生した段階のき裂を N_f と定義した。本研究では、き裂長さが N_{30} の時点で疲労試験を終了した。

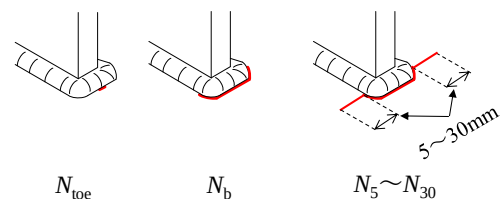


図-1 疲労寿命の定義

(3) 計測位置

図-2 に、試験体の主板部に貼付したひずみゲージ位置を示す。ゲージ D は、溶接止端近傍のガセット軸方向に対して直角方向のひずみを計測している。疲労き裂が発生すると、試験体の固有振動数が低下し、疲労試験の振動数に近づくと、一定の応力範囲の疲労試験とならなくなるので、疲労き裂が発生しても影響を受けないゲージ E、F の値から一定の応力範囲で疲労試験を実施できているか判断している。

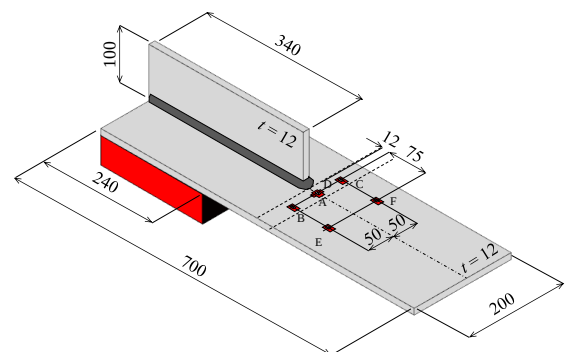
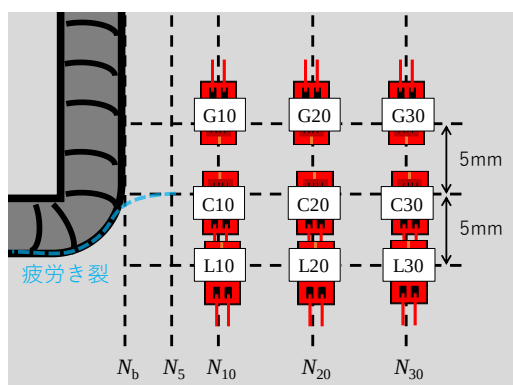
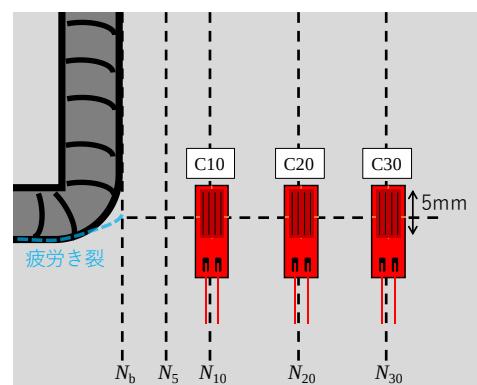


図-2 試験体寸法と主板部のひずみゲージ貼付位置

図-3(a)に、AW110、AW90 に貼付した、き裂先端周辺部のひずみゲージ位置を示す。き裂先端を中心にガセット軸方向に $\pm 5\text{mm}$ 、き裂進展方向に N_{10} 、 N_{20} 、 N_{30} にゲージ長 1mm のひずみゲージを貼り付けた。



(a) AW110, AW90



(b) AW120

図-3 き裂先端周辺部のひずみゲージ貼付位置

本研究では、すでに発生している疲労き裂の進展の評価を目的としているため、AW110 では N_5 、AW90 では N_b まで疲労き裂を発生・進展させてから疲労き裂先端近傍のひずみゲージを貼付している。図-3(b)には、AW120 で貼付した、き裂先端部のひずみゲージ位置を示す。AW120 では、ゲージ長 5mm のひずみゲージをき裂先端部のき裂進展方向に N_{10} 、 N_{20} 、 N_{30} の位置に貼り付けた。面外ガセット溶接継手の溶接止端部に発生する疲労き裂が主板に進展する位置は、試験体ごとに若干異なるため、き裂先端を基準としてひずみゲージを貼付している。

3. 疲労試験結果

(1) 溶接止端近傍の無荷重時のひずみ変化

図-4 に、AW110 の疲労試験から得られた溶接止端近傍の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係、ひずみ範囲と繰返し回数の関係を示す。図には、各疲労寿命も併記している。図-4(a)より、疲労き裂の発生・進展によって、引張残留応力が解放されるため、ゲージ A の無荷重時のひずみが減少し、残留応力の再分配によってゲージ B、C の無荷重時のひずみが増加する。ゲージ D はガセット軸直角方向の圧縮残留応力の解放によって無荷重時のひずみが増加している。ゲージ E、F は溶接止端部から離れているため、残留応力の解放によるひずみの変化がなかった。したがって、疲労き裂が N_{30} まで進展した場合でも、文献 3)と同様に、溶接止端近傍の無荷重時のひずみの変化によって、疲労き裂の発生・進展の評価が可能であることがわかる。

図-4(b)より、ひずみ範囲も疲労き裂の発生・進展によって、変化しているが、無荷重時のひずみよりも変化量が小さい。AW110 の疲労試験では、 N_f からゲージ E、F のひずみ範囲が増加している。ゲージ E、F は、疲労き裂が発生してもその影響を受けない位置であるが、疲労き裂進展によって試験体の固有振動数が低下したため、公称応力範囲が大きくなったと考える。したがって、 N_f 以降の公称応力範囲が急激に大きくなっているため、 N_f 以降は一定応力範囲の疲労試験になっていないことに注意が必要である。

(2) き裂先端周辺部の無荷重時のひずみ変化

図-5 に、AW110 の疲労試験から得られた、き裂先端周辺部および溶接止端近傍の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係を示す。繰返し回数は、き裂先端周辺部にひずみゲージを貼付した時点(N_5)を基準として示している。

図-5(a)より、疲労き裂が計測位置に近づくにつれて、無荷重時のひずみが増加していることがわかる。これは、疲労き裂先端の微小範囲が局部的に降伏したためと考える。しかし、C30 では、疲労き裂が計測位置に近づくとも無荷重時のひずみが減少している。ここで、AW110 の疲労試験終了後の磁気探傷試験結果を図-

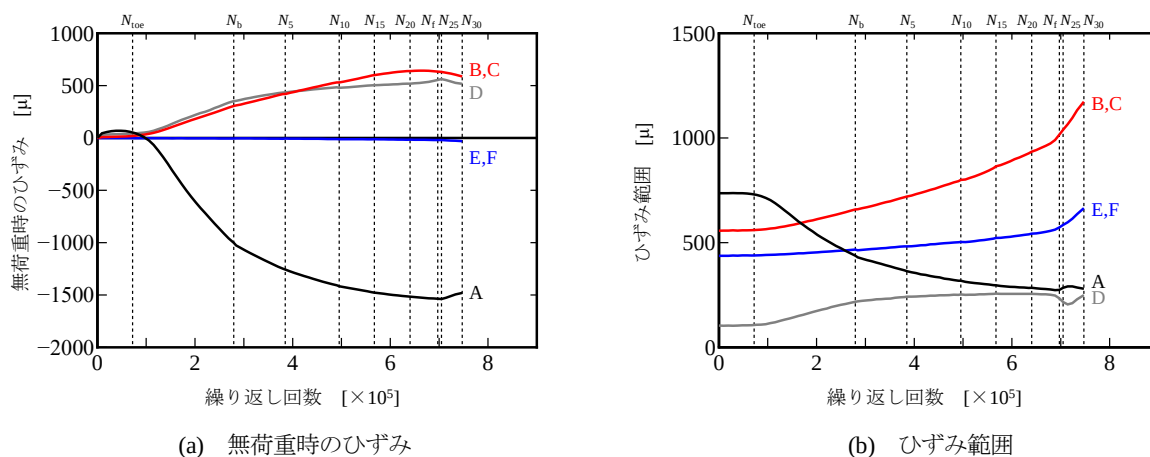


図-4 主板部の無荷重時のひずみ、ひずみ範囲の変化と繰返し回数の関係(AW110)

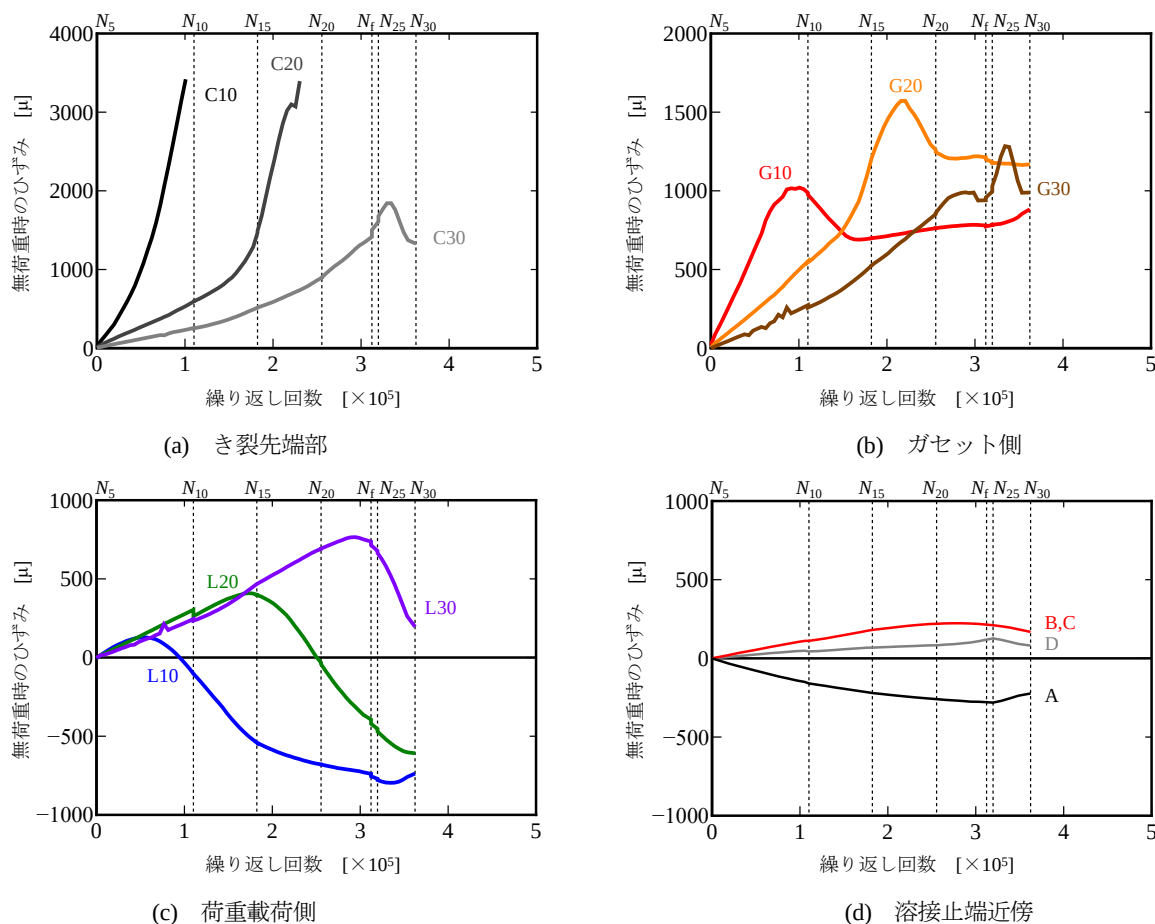


図-5 き裂先端周辺部および溶接止端近傍の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係(AW110)

6に示す。図より、疲労き裂は、C30のひずみゲージからずれた位置を進展していることがわかる。したがって、図-5(a)のC30の位置の無荷重時のひずみの値がC10, C20より小さく、き裂が近づいた際にひずみが低下している要因は、C30の計測位置が、き裂先端の塑性域から離れていたためと考える。また、本研究では、 N_{10} , N_{20} , N_{30} の位置とひずみゲージの中心が一致するように貼り付けているため、C10, C20では、疲労き裂が、ひずみゲージの金属抵抗体を切断し、疲労き裂が各き裂長さに達する前に計測不能となった。

図-5(b), (c)より、き裂周辺部は、き裂先端部C30と同様に、疲労き裂が進展することで、無荷重時のひずみが増加するが、ある程度進展し、計測位置に近づくと低下した。ガセット側では、疲労き裂が計測位置を過ぎると変化がほぼ一定になる傾向が見られた。荷重載荷側も同様に、疲労き裂の進展によって、無荷重時のひずみが増加し、計測位置に近づくと減少するが、疲労き裂の先端が計測位置を過ぎると、圧縮側まで変化した。無荷重時のひずみが圧縮側まで変化した理由は、L10は溶接の近傍であるため、引張残留応力の影響があったと考える。

無荷重時のひずみの変化量を比較すると、き裂先端部は、約3,000 μ 以上、き裂周辺部は、ガセット側と荷重載荷側ともに、約1,000 μ 変化している。一方、既往の研究で着目した溶接止端近傍は N_5 からの変化のため、約250 μ (図-5(d))しか変化しなかった。

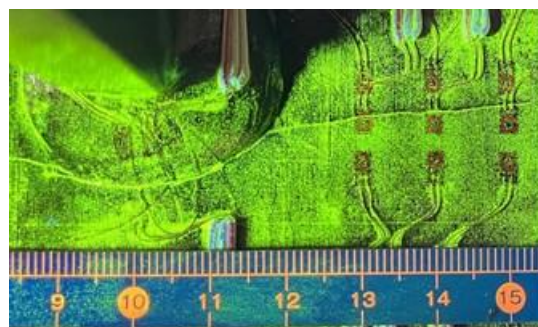


図-6 疲労試験終了後の磁気探傷検査結果(AW110)

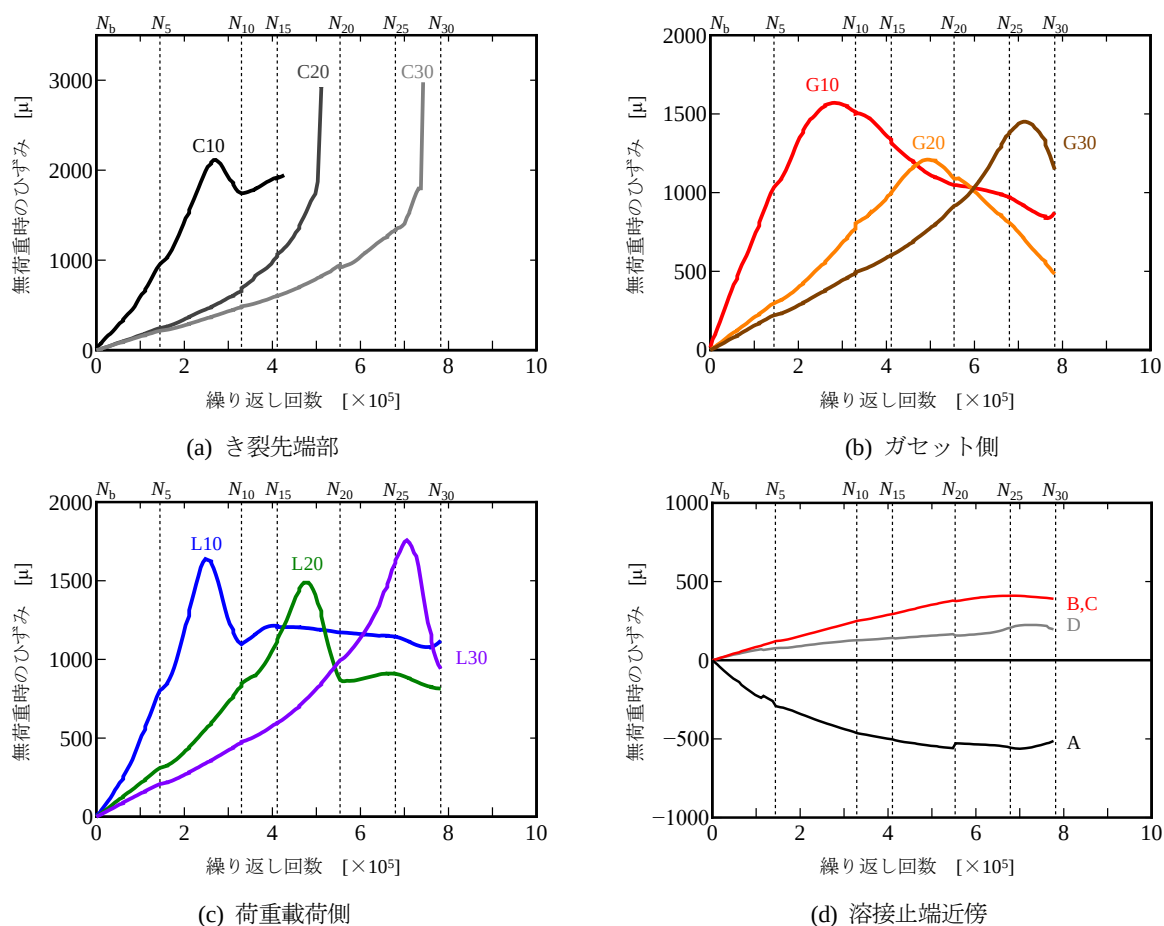


図-7 き裂先端周辺部および溶接止端近傍の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係(AW90)

次に、図-7に、AW90の疲労試験から得られた、き裂先端周辺部および溶接止端近傍の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係を示す。繰返し回数は、き裂先端周辺部にひずみゲージを貼付した時点(N_b)を基準として示している。図より、AW110と同様に、溶接止端近傍とき裂先端周辺部の無荷重時のひずみが、疲労き裂の進展によって、変化していることがわかる。

図-7(a)より、AW90では、C10の無荷重時のひずみが、疲労き裂が計測位置に近づくとき減少していることがわかる。図-8にAW90の疲労試験終了後の磁気探傷試験結果を示す。図より、計測位置と疲労き裂先端が一致していない。したがって、AW110とAW90の結果より、き裂先端部の計測は、ひずみゲージと疲労き裂先端が一致しない場合、疲労き裂が計測位置に近づくとき、無荷重時のひずみが減少する傾向があることがわかった。

図-7(b), (c)より、き裂周辺部でも、AW110と同様に、疲労き裂の進展によって、無荷重時のひずみが増加した。AW90では、ガセット側の無荷重時のひずみは、疲労き裂が計測位置を過ぎると、試験終了まで減少した。荷重載荷側の無荷重時のひずみは、疲労き裂が計測位置に近づくとき減少し、計測位置を過ぎると変化がほぼ一定となった。AW110とAW90のき裂周辺部の無荷重時のひずみ変化の違いは、 N_b と N_5 を基準として貼付したひずみゲージ位置の違いや残留応力の解放の違い、試験体ごとの残留応力の違いが含まれると考えられる。しかし、疲労き裂の進展によって、き裂周辺部の無荷重時のひずみが、約1,000 μ 以上変化するため、疲労き裂の進展を評価できると考える。

図-7(d)より、AW90でも、溶接止端近傍の無荷重時のひずみは、 N_b 以降は約500 μ しか変化しなかった。AW110と同様の範囲の N_5 から N_{30} の変化量は、約300 μ であった。したがって、溶接止端近傍よりも、き裂先端周辺部の無荷重時のひずみの方が大きく変化することがわかる。

図-9 に、AW120 の疲労試験から得られた、き裂先端部の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係を示す。繰返し回数は、き裂先端部にひずみゲージを貼付した時点(N_b)を基準として示している。図-10 に AW90 の疲労試験終了後の磁気探傷試験結果を示す。図-9 より、AW110, AW90 と同様に、き裂先端部の無荷重時のひずみが、疲労き裂の進展によって、変化していることがわかる。AW120 では、ゲージ長 5mm のひずみゲージを用いたため、貼付したすべてのひずみゲージ位置と、き裂先端部の塑性域が一致したことから、無荷重時のひずみが増加し続けたと考える。したがって、溶接止端部に発生する疲労き裂の進展に対しては、き裂先端の塑性域の計測および、ひずみゲージの金属抵抗体の切断によるモニタリングが適しているため、ゲージ長が長いひずみゲージを用いるのが良いと考える。

4. LPWA を用いた疲労き裂進展モニタリング

AW120, AW100 の疲労試験では、無線ひずみ計測機器を製作し、き裂先端周辺部の無荷重時のひずみの計測を行った。

無線ひずみ計測機器は、図-11 に示すような、シングルボードコンピュータ (Arduino Uno R3) と LPWA 通信装置 (Sigfox Shield for Arduino : UnaShield V2S), 2 チャンネルひずみアンプシールド (計装アンプ AD8426 : Robotshop 社) を組み合わせた小型の IoT 機器である。このひずみアンプシールドは、ひずみゲージから得られた電圧を増幅し、0~5V の電圧を 0~1,023 の整数に変換したデータを計測する。動作電圧は 3.3V であるため、ゲージ率を 2.00 とした際に計測できるひずみ範囲が、-2,000~2,000 μ になり、計測値が 1 変化すると、ひずみは約 6 μ 変化する。また、疲労試験で利用しているひずみゲージ (ゲージ長 1mm, ベース幅 2.4mm またはゲージ長さ 5mm, ベース幅 2.8mm) を 3 線式結線法で接続するために、許容誤差 +0.1% の 120 Ω 金属皮膜抵抗器 (VISHAY 社製) でひずみゲージ用のブリッジを組んでいる。ひずみの計測は、21 データに対して median フィルターを適用してノイズを除去し、それを 50 回繰り返して最大・最小ひずみを計測し、その平均値を出力するシステムとしている。

この IoT 機器は、計測したデータを低電力で長距離通信が可能な LPWA (Low Power Wide Area) によって、データが転送でき、図-12 のように、インターネット上のプラットフォーム SORACOM Air for Sigfox (ソラコム IoT プラットフォーム) でデータの確認ができる簡易的なモニタリングシステムである。本研究では、PC の USB ポートから無線ひずみ計測機器への電源供給を行ったが、バッテリーを搭載することで、電源確保が困難な箇所でもひずみモニタリングができる。

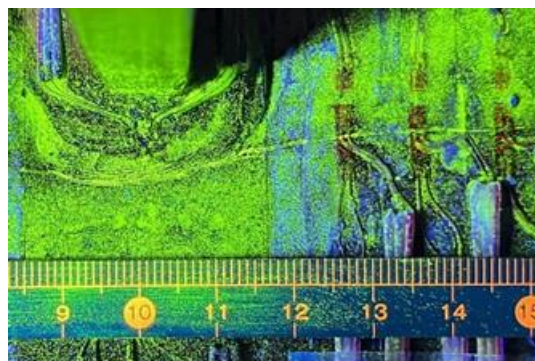


図-8 疲労試験終了後の磁気探傷検査結果(AW90)

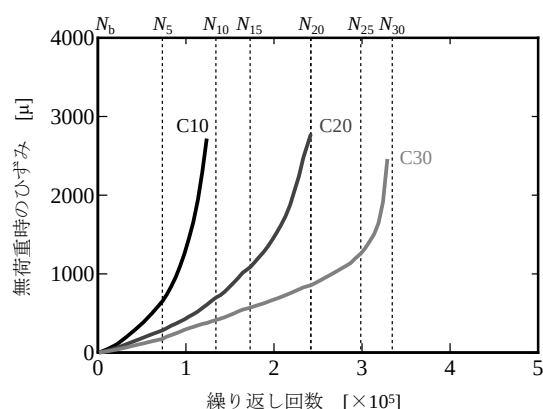


図-9 き裂先端部の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係(AW120)

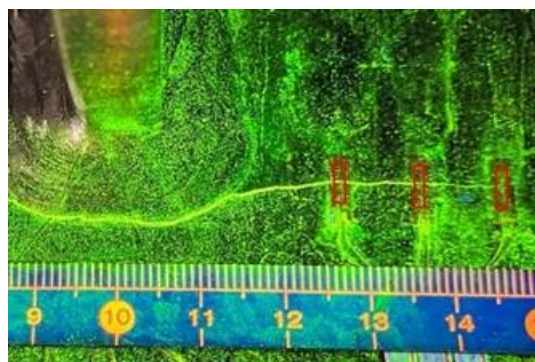


図-10 疲労試験終了後の磁気探傷検査結果(AW120)

図-13 にき裂先端周辺部のひずみゲージ位置を示す。AW100 は、き裂先端部とき裂周辺部にゲージ長 1mm のひずみゲージを N_{10} とひずみゲージの中心が一致するように貼り付けている。AW120 はゲージ長 5mm のひずみゲージを 3 章と同様に、 N_{10} 、 N_{20} 、 N_{30} 、とひずみゲージの中心が一致するように貼付している。本章の疲労試験は AW100 では N_{10} 、AW120 は N_{30} に疲労き裂が達した段階で終了とした。

AW100、AW120 の疲労試験から得られた、き裂先端部の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係を図-14 に示す。図より、3.2 節の動ひずみ計を用いた計測と同様に、疲労き裂の進展によって、無荷重時のひずみが増加していることがわかる。無線ひずみ計測でも疲労き裂によって、ひずみゲージの金属抵抗体が切断されたので、き裂長さに達する前に計測不能となっている。また、ゲージ長の違いによる影響も見られなかった。ただし、図-14 からわかるように、ひずみの計測範囲が動ひずみ

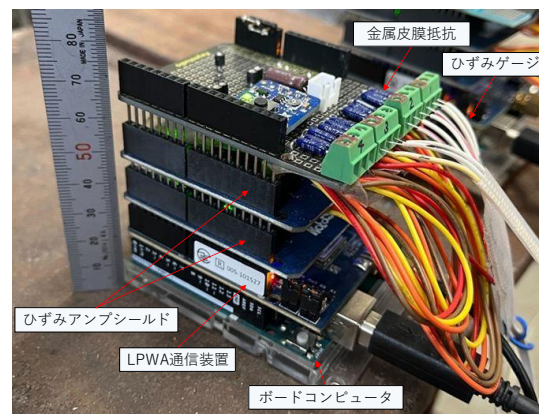


図-11 無線ひずみ計測機器構成の一例

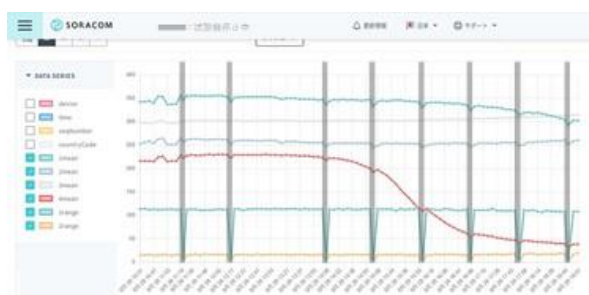
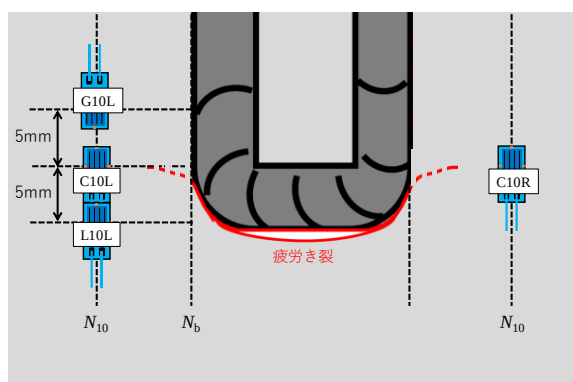
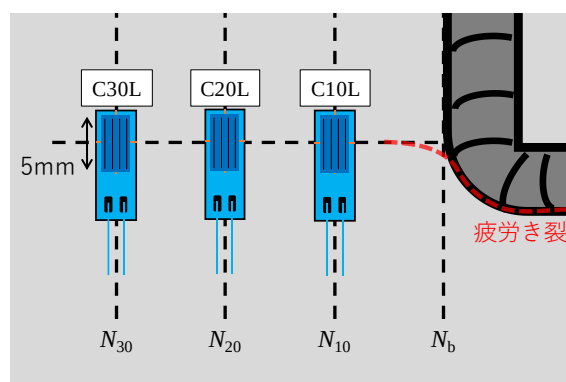


図-12 SORACOM Air for Sigfox の画面の一例

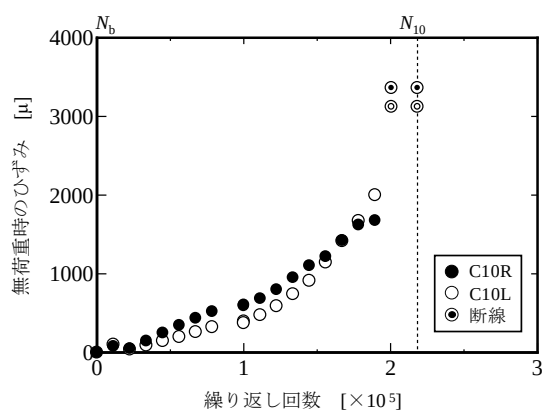


(a) AW100 (ゲージ長 1 mm)

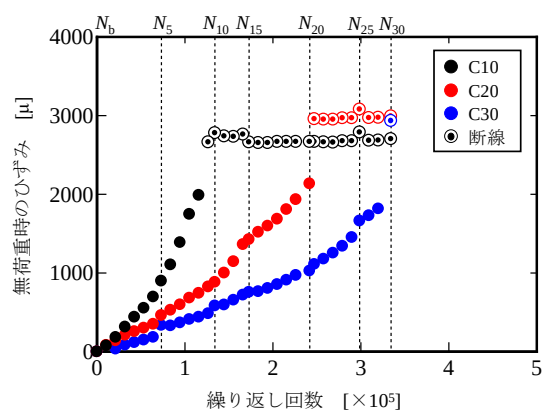


(b) AW120 (ゲージ長 5 mm)

図-13 無線ひずみ計測のき裂先端周辺部の計測位置



(a) AW100 (ゲージ長 1 mm)



(b) AW120 (ゲージ長 5 mm)

図-14 き裂先端部の無荷重時のひずみの変化

計と比べて狭いため、 $2000 \sim 3000 \mu$ が上限となっている。ひずみの上限値は、初期のひずみの値に依存して変化する。

次に、AW100 の疲労試験から得られた、き裂周辺部の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係を図-15 に示す。き裂周辺部も同様に、疲労き裂の進展によって変化する、無荷重時のひずみが計測できている。L10L は G10L と比較すると、変化量が小さいが、AW110 の L10 の無荷重時のひずみの変化(図-5(c))と同様の傾向を示していることから、 N_{10} 以降も疲労試験を続けた場合、明確に変化すると考えられる。

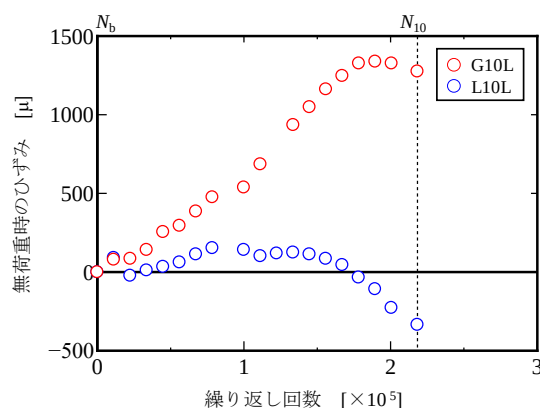


図-15 き裂周辺部の無荷重時のひずみの変化

したがって、LPWA と無線ひずみ計測機器を用いて、き裂先端部と周辺部の無荷重時のひずみの変化を計測することによって、疲労き裂の進展をモニタリングできた。

5. まとめ

本研究では、疲労試験において、き裂先端周辺部の計測を行い、無荷重時のひずみの変化によって、疲労き裂の進展が評価できるかどうかを明らかにした。本研究の範囲内で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) き裂先端部やその近傍の無荷重時のひずみが、疲労き裂先端の局所的な降伏の影響によって変化することが明らかとなった。
- 2) 疲労き裂がゲージの金属抵抗体を切断する場合は、計測不能になるまで、き裂進展に伴って無荷重時のひずみが増加し続けた。しかし、ひずみゲージの位置がき裂の進展位置からずれていた場合は、き裂進展に伴って一旦、無荷重時のひずみが増加するが、その後減少に転じた。き裂が小さい段階で、き裂進展近傍にひずみゲージを貼付した場合、残留応力の解放による影響も無荷重時のひずみに含まれる。
- 3) LPWA を用いた無線ひずみ計測機器を製作し、き裂先端周辺部の無荷重時のひずみの変化を動ひずみ計と同様に計測できた。

参考文献

- 1) 土木学会 鋼構造委員会：鋼橋の疲労対策技術，鋼構造レポート 22，2013.
- 2) 石川 敏之，山田 健太郎，柿市 拓巳，李 蒼：ICR 処理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂の寿命向上効果，土木学会論文集 A，Vol.66，No.2，pp.264-272，2010.
- 3) 石川 敏之，松本 直樹：疲労き裂の発生・進展による無荷重時のひずみ変化の評価，構造工学論文集 Vol. 68A，pp.554-563，2022.
- 4) 山田 健太郎，小藺江 朋亮，小塩 達也：垂直補剛材と鋼床版デッキプレートすみ肉溶接の曲げ疲労試験，鋼構造論文集，Vol.14，No.55，pp.1-8，2007.