

# 道路インフラのマネジメント

## — 維持管理・更新に関する技術開発 —

藤野 陽三\*

本稿では、私が道路インフラのマネジメントに関わることになった経緯と SIP インフラを中心にその維持管理・更新に関する技術開発について記します。ただ、本誌からは2017年にも同じような題目での原稿を依頼され、寄稿しており<sup>1)</sup>、文献<sup>1)</sup>と重なるところが多少あることと、そしてとても「論説」といえるようなものではなく、「随筆」に近いものになってしまったことを最初にお詫びします。

キーワード：道路インフラマネジメント，社会的共通資本，SIP インフラ，社会実装

### 1. はじめに

私が、橋や構造物の研究に関わって40年余りが経過しました。つねに充実した時間を過ごしてきたのですが、振り返ってみると、前半の15年あまりは橋を中心とした長大橋インフラの建設に関わる研究、途中、悩み、迷いがあった数年、そしてその後の15年あまりはインフラのマネジメントに関わる技術を中心に研究してきたといえるかと思えます。

1980年代はじめ、30歳過ぎに東京大学橋梁研究室に加入し、40歳代半ばまでは、長大橋、とくに風などによる振動と振動制御に関わる研究にまっしぐらでした。現場で問題になるテーマを研究として手掛け、それが実務に生かされる醍醐味を味わうことができた。レインボーブリッジ、多々羅大橋、明石海峡大橋ほか数多くの新設大型橋梁の計画、設計、製作・施工に関与することで、「門前の小僧」として橋を習うことができたのは幸運なことで、私の財産になっている。

1990年代に入りしばらくすると、旺盛であったわが国の長大橋建設の終焉が見えはじめ、次の研究対象を何にするかに思いを馳せるようになった。文献<sup>1)</sup>でも触れたが、そのとき、出会ったのが1994年に「技術と経済」に発表された「建設の時代から保守の時代へ」という論説<sup>2)</sup>であった。当時、自分の進むべき分野を模索していたこともあって、さまざまな分野の文献を読み漁っていたなかで見つけたのがこの論説であった。著者は私の10年先輩で、ライフライン地震工学の世界的リーダー片山恒雄先生であ

る。橋とかのインフラの専門家でない方までもが、このように視ているのか、と強烈な印象をもったことを今でも覚えている。

若い頃、東大地震研究所で過ごし、地震工学を生涯のテーマとしようと思っていた時期もあり、地震工学にはつねに関心をもっていた。1978年宮城県沖地震や、サンフランシスコでの1989年 Loma Prieta 地震などでは橋の被害を目のあたりに見る機会をもち<sup>3)</sup>、私自身のなかで既存構造物の性能に関心が高まるのを感じていた。そのようなときに決定的な影響を与えたのが1995年の兵庫県南部地震であった。あの地震による橋梁を中心とした大規模な被害は、とても強烈であった。自分の研究としても、この地震による既存高架橋の被害分析に全力で取り組むことになった(例えば4))。

地震応答スペクトルによる耐震設計を提唱した、地震工学の父ともいわれている、カリフォルニア工大名誉教授 G. W. Housner 先生は1989年 Loma Prieta 地震の被害調査委員会委員長として報告書<sup>5)</sup>のタイトルを、普通なら「Loma Prieta 地震被害調査報告書」とするところを、あえて「Competing against time (時間との闘い)」としたのは、既存構造物の耐震補強の重要性を社会に訴えるためと先生ご自身から後日うかがい、衝撃を受けた。学者の存在意義を感じさせるものであった。アメリカはこれを契機に耐震補強が進んだと聞いている。このようななかで、私の関心が橋を中心に既存構造物を対象とした挙動、性能把握へと移って行くのであった。

当時、私の研究の一つの中心であったアクティブ振動制御では構造物の動きのセンシングが欠かせない。そのセンシングを利用して既存構造物の状態把握、すなわち構造モニタリング、今でいう構造ヘルスマニタリングの研究に徐々に移行していくことになる。レーザードップラーを使った振動モニタリングの研究を始めたのが1990年代最後の頃で、21世紀2000年を迎えることになる。

### 2. 社会的共通資本

そのような時期に巡り合ったのが宇沢弘文先生の「社会的共通資本」という概念であった。宇沢氏は、この概念を



\*1 Yozo FUJINO

城西大学学長  
東京大学名誉教授  
横浜国立大学名誉教授

1970年代の後半から提唱されていたようであるが、私を知るようになったのは2000年に岩波新書から出された「社会的共通資本」という本<sup>6)</sup>からであった。

宇沢氏は、「みんなが使う、みんなのもの」である社会的共通資本を3つに分類している。

1つ目は自然資本で、それは自然界の水や空気、森林、川、海などを指している。これらはみんなが使い、利用し、汚染されればみんなが困るわけで、正しく「みんなが使う、みんなのもの」である。

2つ目が社会的インフラストラクチャであり、いわゆるわれわれの生活や経済活動を支える道路、橋、トンネル、鉄道、ダム、港、上下水道などを指す。宇沢氏は本を読むかぎり、土木というのがあまり好きでないようで、あえて土木とはいわれていないが、正しく土木的インフラストラクチャのことである。

3つ目は国民の皆さんに適用されるさまざまなルール。たとえば教育制度や公共システム、医療、警察、さらには外交なども含む制度資本である。

自然資本は自然科学、社会的インフラストラクチャは正しく工学、制度資本は社会科学とも深く関係するので、われわれ土木系の人間は自然科学も社会科学も視野に入れて活動することが欠かせないと、土木系の学生に言い続けてきた。

ところで、この社会的共通資本は英語でいえば **Social Capital**、これをインフラストラクチャと私は読み替えている。インフラストラクチャの対象とするところがきわめて広く、重要で社会への貢献が大きいということを知ったのは、当時、土木叩きが激しかっただけに、嬉しかった。

自分の関わってきた長大橋の建設は、2番目の社会的共通資本のごく一部であり、出来上がった土木的インフラを皆さんに安心して使っていただき、国の活力とさせることの社会的意義を感じ、既存インフラのマネジメント関連の研究の次の研究課題が大きく私のなかに浮かび上がってきたのである。

1995年頃からのもやもやしたものが消え、インフラマネジメントの技術が私のこれからの研究対象と自然に思えるようになったのが、2005年ごろでなかったかと思う。以来15年、社会の変化のなかで、さまざまなインフラマネジメント関係のプロジェクトに関与する機会に恵まれ、今に至っている。

なお、宇沢氏の社会的共通資本という概念は、国連大学が提唱している包括的「富」、すなわち、自然資本、人工資本、人的資本に繋がっている<sup>7)</sup>。

### 3. インフラのマネジメント

インフラのマネジメントは、図-1に示すように3つの要素からなると私は考えている<sup>8)</sup>。道路や橋などの新規投資や、更新計画などのアセットマネジメントとすでにあるインフラの災害や洪水に対するリスクマネジメント、さらに徐々にではあるが劣化し、衰えるのを防止するストックマネジメントである。災害大国であるわが国では、リスクマネジメントが重要なのはいうまでもない<sup>9)</sup>。この3つの要素をバランスよく展開することがインフラマネジメン

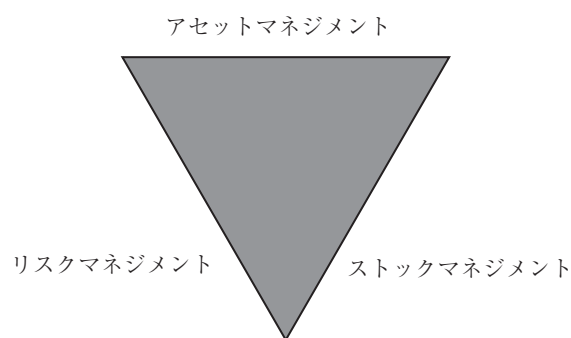


図-1 インフラのマネジメントの3つの要素

トのポイントである。

以下、ストックマネジメントについて述べていくこととする。

ストックマネジメントの重要さは、歴史的にはインフラの事故が認識させてきたように思われる。北米では46名の命を失うことになった1967年のシルバー橋のアイバーの破断による落橋事故が1970年代前半での目視点検の義務化につながり、点検データをベースにしたインフラマネジメントが確立することになる<sup>10)</sup>。ヨーロッパでもほぼ10年後に起きた1976年のウィーンのImperial Bridgeの落橋事故が目覚まし時計の役割を果たし、インフラの定期点検がヨーロッパでも導入された。

点検が義務化されても、事故は今でも時折起きている。2006年のカナダ・ケベック州のPC桁のゲルバー部損傷による落下<sup>11,12)</sup>や、2007年のミネソタ州I-35Wにかかるトラス橋の落橋<sup>13)</sup>があり、ごく最近では、2018年のイタリアのモランディ橋のテンドン破断による落橋があげられる<sup>14)</sup>。この事故は43名の命を失っており、21世紀最大の橋梁事故と呼ばれることになるかもしれない。わが国でも似たような事故は起きている。ずっと以前の1990年にPCテンドンの破断による島田橋が落橋しているのである。

事故、橋梁などのインフラの事故は、初期欠陥があったにもかかわらず目視点検では分からず放置されたケースや、劣化は進んだが目視点検では見えない所なので放置されていたケースなどさまざまである。いえることは、目視では見つからない、分からない所の損傷が原因となっている場合が多いということである。

アメリカ連邦道路局では目視点検の信頼性に対する懸念が以前からあり、系統的な調査が行われた<sup>15)</sup>。目視に頼ることのリスクを取り除くために、アメリカでは2007年から連邦道路局によりLong term bridge performance programが20年の計画でスタートした<sup>16)</sup>。このプロジェクトの狙いは目視に変わる定量的な検査法、診断法を確立することであった。日経コンストラクションの記事<sup>17)</sup>によると、わが国でも橋梁点検の結果には大きなばらつきがあることがわかっている。目視の良さは分かりつつも、目視にも限界があるということである。

インフラメンテナンスの本格化のきっかけを作ったのが2012年12月の笹子トンネルの天井板落下事故であるが、これも目視がきわめてしにくい、目視ではわからないこと

が原因の事故であった。

#### 4. SIP インフラ

内閣府総合科学技術会議ではインフラに関する「ストックマネジメントの勉強会」を2010年から始めるなど関心を高めるなか、笹子トンネルの事故もあって、2014年度から始める戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の中の10課題の1つにインフラ維持管理・更新・マネジメント技術が採用された。私は2013年秋にプログラムディレクターに任命され、2019年3月までの5年余り携わることができたのは、きわめて幸運なことであった。

SIP インフラには60課題以上が採択され、約1500人の研究者や実務者が参画したが、そのうち半数は非土木分野のロボットや通信情報計測などの方であった。このような横断的で大型の研究体制はインフラの維持管理では初めてのことである。

研究開発分野を図-2に示す。ロボット、モニタリング、情報、材料などは非土木系の研究者も多く参加し、そこで開発された技術を土木系の関係者、とくに国研などの应用到に慣れた土木系技術者が多数を占める、中心にあるアセットマネジメント技術のグループに取り込んで土木インフラに適用するイメージを醸し出したつもりの構図である。図-3はSIPインフラが先端技術を横断的に取り込んで、インフラメンテナンスのニーズに応え、使いたくなる技術・システムを開発し、イノベーションを興して欲しい、そのなかで繋ぎ役を演ずるのはニーズである土木のことが分かっている土木エンジニアであるということを伝えるために作成した図である。ここでいうイノベーションはどちらかといえば、今はやりのオープンイノベーションのつもりで

あった<sup>18)</sup>。SIPインフラではこの2つの図を繰り返し繰り返し、参加者に示してきた。

これらの2つの図は、土木学会初代会長古市公威（写真-1）が1914年の土木学会創立記念会長就任演説でいわれた、『土木技術者は「指揮者を指揮する人」、「将に將たる人」たらねばならぬ』ことを力強く述べ、演説の最後のところで『土木学会会員に「研究の範囲を縦横に拡張せられんこと」を、そしてそれと同時に「その中心に土木あることを忘れられざらんこと」を』といわれたことを私なりに解釈して作成した構図なのである<sup>19)</sup>。

このSIPインフラの活動についてはいろいろなところで紹介していただいているので詳しいことは<sup>20~24)</sup>を見ていただきたい。

いくつもの研究プロジェクトが成功し、実用化の域に達したことをとてもうれしく思っている。成功のカギはわれわれの分野には無い他分野の新しい先端技術を土木インフラの点検維持管理に導入できたことである。点検に関して

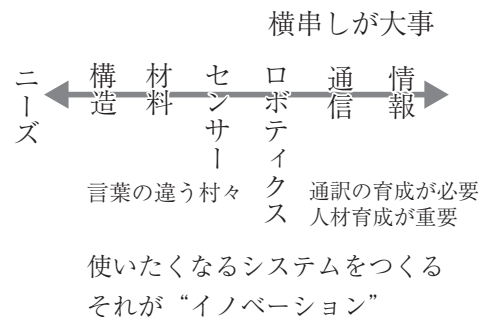


図-3 SIPインフラでのモットー「使いたくなる技術・システムを」

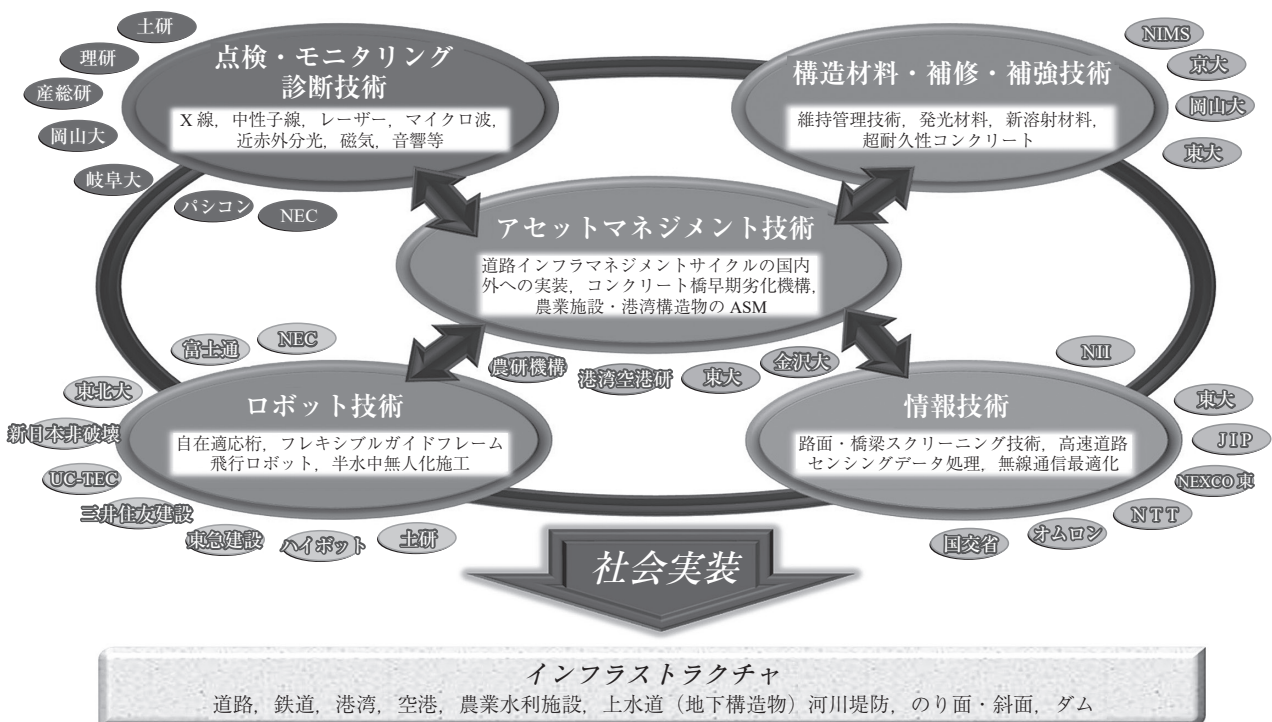


図-2 SIPインフラの構成



写真 - 1 古市公威帝国工科大学教授  
初代土木学会会長 貴族院議員

いば目に見えない部分のセンサーによる可視化、人間が行きにくいところの飛行ロボットによる点検による省力化、大量の情報の収集とその処理による効率化などにおいて多大な成果を出すことができた。地中レーダーによるRC床版の内部損傷の検出、車両を通行しながらのトンネル点検（図 - 4）、地中水中の鋼構造物の板厚計測小型プローブなどさまざまな新しい技術が開発された。

他分野との連携で新しい技術が生まれたことは事実であるが、純土木的な分野でも革新的な技術が生まれた。コンクリート関係では、岡山大の綾野教授らは、耐久性にきわめて優れる、高炉スラグ細骨材を用いた、高密なPCa部材の製造を実現し（図 - 5）<sup>25)</sup>、実際の橋梁に適用された。

東大の前川教授（現横国大）や田中准教授（現金沢工大）は、自らが開発してきたコンクリートのマルチスケール解析を使って、RC床版の輪荷重による疲労損傷（たわみ）を予測する手法を開発した。RC床版の裏の既出ひび割れを入力情報とすることで余寿命が予測できることも示した<sup>26)</sup>。ひび割れ状態図から、機械学習を使えば、余寿命が予測できるという画期的な技術に繋がりが期待されている。

SIP インフラは2019年3月をもって終了したが、その後、内閣府 PRISM プログラムに一部継承され、またさまざまな形で継続され技術が磨かれているのはとてもうれしいこ

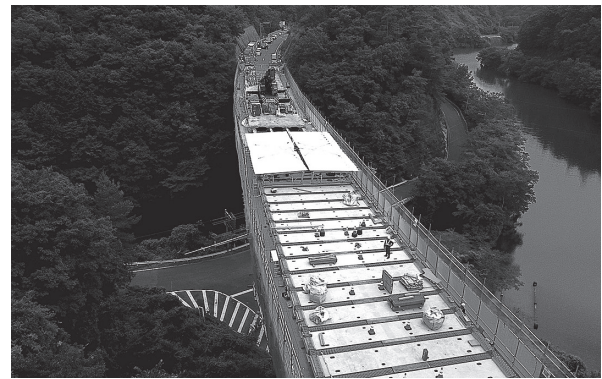


図 - 5 高炉スラグ細骨材を用いたPC床版の施工例  
（上阿口橋（中国自動車道北房））

とである。ただ、インフラの点検診断やデータベースなどの研究開発が主で、補修のための材料や工事などには手が回らなかった。道路などでの補修工事は事故リスクも高く、ロボットによる無人化への期待は大きい。

点検などを含めた維持管理や更新には今後とも、新しい技術はどんどん入ってくると思われる。点検要領など基準類の更新が追い付かないところがある。新しい技術が取り入れられ易い形で基準類の記述を工夫することなども考えていく必要がある<sup>27)</sup>。

## 5. インフラメンテナンス関連技術の実装化

SIP インフラでは社会実装が重要視された。高速道路会社や国関係であれば、新しい技術の実装も比較的行われやすいが、エンジニアも少ない地方自治体への実装化は困難が予想された。その促進のために、地方実装チームを各地域ブロックごとに置き、県、市、町村への技術展開を図ったのも新しい試みであった。インフラメンテナンス国民会議が2016年からスタートしたのも、お互いにより影響を与えた。

地方にとりインフラがいかに大事か、そのインフラを健全に保つということがその地域の安全安心度を高め、評判（リピュテーション、reputation）を上げることにもつながる<sup>24)</sup>、というキャッチをさまざまなところで展開浸透してきたのもよかったと思っている。インフラは機能して当然という意識がまだまだ強いなかで、意識改革が重要である

## 6. おわりに

インフラの点検や維持管理には、ますます新しい技術の適用が必要であり、技術開発が進むことを望んでいる。ただメンテナンスにかかるプロジェクトは、点検であったり補修であったり、その規模は概してきわめて小さい。確かに数は多いが市場メカニズムで動いていない面が多々ある。したがって使いたくなるような新しい技術を開発したところで市場がすぐについてくるわけではない。ここは公的な機関の発注による難しさである。優れた技術をもったグループがより採用されるような契約入札のやり方が強く望まれる。インフラのメンテナンスに関わる技術には開発コストがかさむもの。たとえば中性子やエックス線を使



図 - 4 交通を通しながら行える移動型（可変構造）  
トンネル全断面点検システム

った検査技術、レーダーなどを使う電磁波技術などがその例といえる。このような技術は民間会社が開発を手掛けることは期待できないので公的な機関である国立研究所や大学がかなりのレベルまで行い、それを民間が譲り受けるような形が必要となろう。そういう意味でも SIP のような省庁連携、官学民を優先する公的な研究開発を今後とも進めていくことが望まれる。

SIP インフラをやってつくづくと感じたことは異分野連携の重要性である。情報通信、センサー、ロボットなどのセンシング技術をインフラの点検診断等に適用し使いたくなる技術システムにするためには開発する他分野の方々にインフラの特性状況を十分理解していただく必要がある。そのためには土木技術者が間に入って作り込むことが欠かせない。土木技術者は新しい技術とインフラのニーズの間に立って、横しをさせるようにならなくてはならない<sup>28)</sup>。宇沢弘文氏は「人間と経済」という本<sup>29)</sup>のなかで、『もともと工学は英語でいうと Civil Engineering, 日本では土木工学と理解されがちですが、実はそれより広い意味を含んでいて、社会が一つの社会として機能し、そこに住むすべての人たちが人間らしい生活ができるための工学的なストラクチャーを指しています。土木工学 Civil Engineering = 工学なのである。』と書いている。技術の社会実装が重要な局面での土木技術者への期待は大きい。

個人的なことであるが、私自身、地球物理学を志し、事情があって地球物理学に一番近い工学と思った土木工学を専攻することとなった。若いころは理学に近い地震研究所で過ごし、この 40 年は土木的インフラストラクチャーのなかで建設にそしてモニタリングにさらにストックマネジメントを中心としたインフラマネジメントをたどってきた。宇沢先生がいわれる、社会的共通資本の一番目にも少し絡み、二番目の土木的インフラに深く関与した。SIP インフラでは新技術の社会実装という 3 番目の制度に近いテーマに関係したことになる。

実はこの 4 月から大学の学長という慣れない仕事を務めている。「教育」という正しく、宇沢氏のいう三番目に属する、重要な社会的共通資本に深くかかわることになった。三つのタイプの社会的共通資本すべてに参画できた自分を大変嬉しく思っている。

### 参考文献

- 1) 藤野陽三：論説「インフラの維持管理更新 - 道路系、橋梁を中心に -」プレストコンクリート, Vol.59, No.2, pp.23-27, 2017.
- 2) 片山恒雄：建設の時代から保守の時代へ、技術と経済, pp.6-10, 1994 年 9 月.
- 3) 後藤洋三, 家村浩和, 川島一彦, 藤野陽三：ロマブリータ地震によるサイプレス高架橋の被災特性の検討 (耐震工学委員会報告); 土木学会論文集, [422/I-14], 33-43, 1990.
- 4) 阿部哲子, 藤野陽三, 阿部雅人：1995 年兵庫県南部地震による阪神高速高架橋の被害と 2, 3 の分析, 土木学会論文集, No.612, pp.181-199, 1999.
- 5) ロマブリータ地震被害報告書 (委員長 G.W. Housner): Competing against time, カリフォルニア州運輸局, 1990 年 5 月
- 6) 宇沢弘文：社会的共通資本, 岩波新書, 696, pp.1-250, 2000.

- 7) 植田和弘(ほか訳)：国連大学 包括的「富」報告書 (2012), 明石書店, pp.1-358, 2014.
- 8) 藤野陽三：論説「安全に向けての高速道路インフラストラクチャーのマネジメント」, 高速道路と自動車, Vol.56, No.3, pp.7-10, 2013.
- 9) 大石久和：国土と日本人 - 災害大国の生き方 - 中公新書 2151, 2012 年 2 月
- 10) B. Yanev (藤野陽三監訳)：橋梁マネジメント - 技術・経済・政策・現場の統合 -, 技報堂出版, 696 ページ, 2009 年 9 月
- 11) D. Mitchell 他：Concorde overpass collapse - Structural aspects -, Journal of Constructed Facilities, ASCE, Vol.25, No.6, pp.545-553, 2011
- 12) 藤野陽三, 阿部雅人：[報告] カナダ・ケベック州跨道橋崩壊事故の調査報告, 橋梁と基礎, pp.59-62, 2009.1
- 13) Joachim Scheer: Failed Bridges -Case Studies, Causes and Consequences-, Earnst & Sohn, 2010.
- 14) Gian Michele Calvi, 他：Once upon a Time in Italy: The Tale of the Morandi Bridge" SEI, IABSE, Vol.29, May 2019
- 15) アメリカ連邦道路局：Reliability of Visual Inspection for Highway Bridges FHWA-RD-01-020, 2001
- 16) Federal Highway Administration : <https://highways.dot.gov/research/long-term-infrastructure-performance/ltbp/long-term-bridge-performance> (閲覧日：2020.11.4)
- 17) 「これはまずい橋の診断・補修」日経コンストラクション, 2019 年 11 月 25 日号
- 18) 阿部雅人：オープンイノベーションから持続的市場創造へ - 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の経験に学ぶ -, 土木学会誌 Vol.105, No.10, 2020 特集 インフラ維持管理の現場が求める本当の技術革新とは -インフラ DX-
- 19) 藤野陽三：論説提言 課題山積 ~だからこそ古市公威先生の教えに学ぶ~ Civil engineering Consultant, 建設コンサルタンツ協会, Vol.283, 2019.4, pp.2-5
- 20) 内閣府総合科学技術イノベーション会議：SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術, <https://www.jst.go.jp/sip/k07.html> (閲覧日：2020.11.4)
- 21) 土木学会誌特集号 分野横断インフラ維持管理技術の開発とその社会実装 - 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) -, 2017 年 10 月号
- 22) 藤野陽三：安全なインフラに向けての維持管理と SIP での取り組み 別冊 計測と制御, Vol.55, No.2, 2016.
- 23) 若原敏裕, 信田佳延：技術展望「社会インフラの維持管理・更新・マネジメントに関わる新技術の開発成果」, 土木構造・材料論文集, 35 号, pp.19-28, 2019.
- 24) 岡田有策：戦略的イノベーション創造プログラム SIP の運営と管理. 応用物理, 88 巻, 8 号, pp.1-3, 2019.
- 25) 河野広隆, 上野 敦, 綾野克紀：土木学会「高炉スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の設計・製造・施工指針 (案)」の概要 コンクリート工学, Vol.57, No.12, pp.909-914, 2019.12.
- 26) Eissa Fathalla, Yasushi Tanaka, Koichi Maekawa: Remaining fatigue life assessment of in-service road bridge decks based upon artificial neural networks, Engineering Structures, Vol.171, No.15, Pages 602-616, September 2018
- 27) 藤野陽三：巻頭寄稿「老朽化が進む日本のインフラの課題を最新 ICT の活用で解決する」インフォコム, vol.37, pp.3-6, 2020
- 28) 藤野陽三：巻頭言「タテとヨコ」舗装, 2020 年 1 月号
- 29) 宇沢弘文：人間の経済, 新潮選書, 189p, 2017.

【2020 年 10 月 15 日受付】