

Recent Progress in Drive-by Bridge Inspection Methods

Department of Civil and Earth Resources Engineering ·
International Management of Civil Infrastructure

Jr. Associate Professor CHANG, Kai-Chun (張 凱 淳)

Introduction

Bridge health monitoring (BHM) has become an important practice in modern bridge management and maintenance. Current BHM tasks heavily rely on visual inspections and conventional vibration-based methods that involve deployments of vibration sensors on target bridges. Besides the conventional methods, *drive-by inspection methods* that treat a moving vehicle as moving sensor are also attracting great attention.

The core idea of the drive-by methods is that, when a vehicle moves on a bridge, it excites the bridge into vibration and simultaneously is excited by the vibrating bridge. In other words, the moving vehicle on a bridge can serve as a dual role of bridge vibration exciter and receiver. The vehicle's responses during its passage over a target bridge may carry the bridge's vibration information. Unlike conventional vibration-based methods that involve large numbers of sensors being installed, operated, and maintained on the target bridge, the drive-by methods suggest only a couple of sensors installed on the test vehicle, and therefore have the advantage of *low cost* and *high mobility* and especially suit fast condition scanning. Also, the test vehicle passes all points along the path where it travels, and therefore is expected to collect bridge information of *high spatial resolution*.

Since 2004 when the drive-by concept was proposed, it has drawn great attention worldwide and has been suggested to many applications, e.g., bridge dynamic-property extraction, damage detection, roadway roughness identification, and more. Our research group is one of the leading groups in this field. We would like to outline our recent progress in this introductory article.

Progress in an appropriate vehicle model

We worked out an appropriate tractor-trailer model among several candidates based on their transmission performance in free vibration tests. It was found that the appropriate tractor-trailer system was characterized by a tractor having the heaviest weight and a trailer having the highest bouncing frequency. The heavy tractor was for easily exciting the bridge. The trailer of high frequency was shown to better transmit bridge's vibration energy, and therefore made the bridge dynamic properties more identifiable; moreover, it

identified the bridge frequency as accurately as the other trailer did of lower and closer frequency band to the target bridge's.

Selecting a trailer of high bouncing frequency can be justified by the following empirical considerations: 1) to reduce the negative impact of roadway surface roughness; 2) to avoid the close resonance between vehicle frequency (usually of the bouncing mode) and the target bridge frequencies; 3) to avoid the frequency variation caused by the vehicle-bridge interaction.

Progress in a prototype full-scale sensing system

We proposed and assembled a prototype full-scale sensing system and tested it in field. Following our findings from laboratory experiments, the sensing system herein was again of tractor-trailer type: the tractor served to excite the target bridge and the trailer served to capture the target bridge's vibrations. The focus herein is that the trailer was homemade, whose frequencies could be tuned by changing the body mass and the suspension stiffness, while the tractor was a commercial passenger car.

The trailer was a simple uni-axle two-wheeled structure (see Figure 1). It firmly connected to the tractor in order to suppress the pitching mode vibrations. The trailer was made of aluminum, and its mass was 14 kg. Its nominal dimensions are length = 860 mm, width = 600 mm, and height = 305 mm. Its body was supported by two tires made of natural rubber and weighing 2.2 kg. The wheel diameter was 285 mm and the width of rim was 90 mm. The trailer's bouncing frequency was empirically tuned to a frequency band higher than general bridge frequencies (usually 2~4 Hz for the first bending mode), for the purpose of avoiding resonances with target bridge frequencies and of reducing the road surface roughness' negative effects. This could be beneficial to the extraction of a bridge's dynamic properties. In our pre-tests, free vibration tests and moving vehicle tests were conducted on general roads (off bridges). From these tests, the trailer's bouncing frequencies were observed around 8 Hz when it is stationary and around 9 Hz when moving.



Figure 1. Assembled trailer

The practicability and accuracy of the drive-by method using the homemade trailer were preliminarily verified in a field test on a steel girder bridge. In the field test, the fundamental bridge frequencies were successfully identified from the trailer's responses in most runs and the identified bridge frequencies were very close to the ones identified by conventional methods. Figure 2 shows a typical acceleration power spectral density of the assembled trailer moving on the test bridge with a speed of 10 km/h. A clear peak presented around 3 Hz, which was identified as bridge bending frequency with acceptable accuracy.

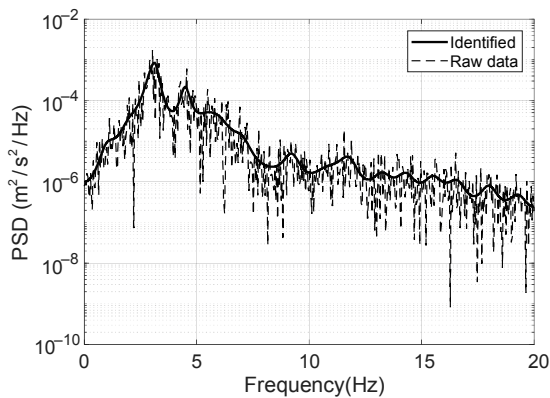


Figure 2. Power spectral density of the trailer moving on the test bridge with speed 10 km/h.

Progress in road profile identification accuracy

To improve the accuracy of road profile identification from the test vehicle responses, we proposed an a priori, self-adaptive and straightforward method using a complementary pair of vehicle models, one with and the other without un-sprung mass. The present method was rooted from a numerical study on how the following four numerical vehicle models affected the accuracy of road profile identification using drive-by inspection methods: 1DOF and 2DOF quarter-car (the former without and the latter with un-sprung mass) and 2DOF and 4DOF half-car models (the former without and the latter with un-sprung mass). It was shown that the vehicle models without un-sprung mass were more capable of identifying profiles in lower frequency bands while those with

un-sprung mass were more capable of identifying profiles in higher frequency bands.

The present method works as follows.

- 1) Select a complementary pair of vehicle models, which could be 1DOF and 2DOF quarter-car models or 2DOF and 4DOF half-car models.
- 2) Quantitatively find out in which frequency band each vehicle model is capable of identifying the road profile more accurate than the other using a series of sinusoidal profiles.
- 3) Identify road profiles using two models respectively, and then extract road profile components in the corresponding frequency bands from the respective road profile identified by both vehicle models.
- 4) Assemble the two extracted profile components into one. The resultant profile was taken as the final outcome of the roadway profile.

For one typical example, when a 1DOF quarter-car model (without un-sprung mass) was used to identify a target road profile, it could identify low frequency components well but high frequency components fairly (Figure 3(a)). On the other hand, when a 2DOF quarter-car model (with un-sprung mass) was used, it could identify high frequency components well but low frequency components fairly (Figure 3(b)). When the present method was used that taking the advantage of the complementary pair 1DOF and 2DOF models, it could identify the road profile better than the respective 1DOF and 2DOF model could (Figure 3(c)).

Vision

Many drive-by method-relevant studies are ongoing, focusing on improving the accuracy and sensitivity of bridge modal-parameter extractions and damage detections, on removing the negative effect of road surface roughness, and on upgrading the full-scale sensing system. It is believed that the fast development of drive-by methods and their applications aiding the conventional visual inspection methods and vibration-based BHM methods may greatly save time, cost, and lives in our modern society.

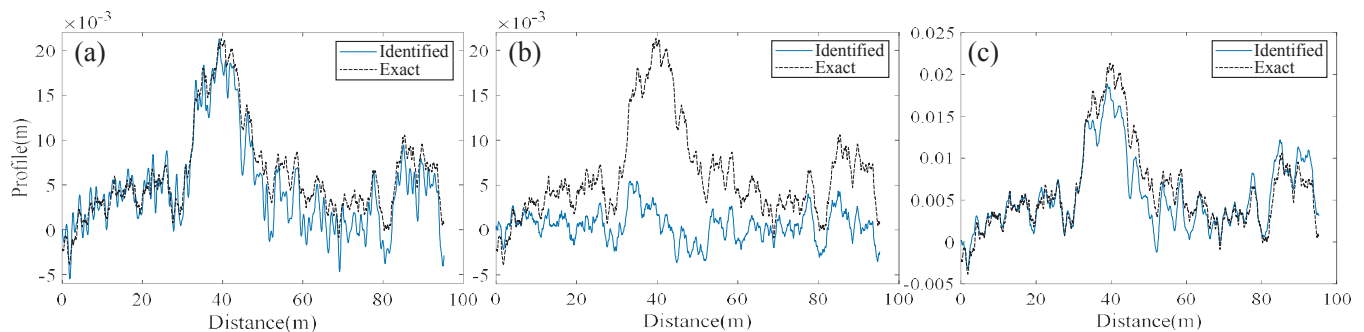


Figure 3. Road profiles identified by (a) 1DOF quarter-car model; (b) 2DOF quarter-car model; (c) the present method

「量」を知るために「質」を測る

社会基盤工学・水文水資源学分野・准教授 市川 温

はじめに

雨が降ると、川の水が増える一子供でも知っている当たり前のことですが、降雨流出現象は水文学における中心的な研究課題の一つです。降雨流出現象は私たちの生活に大きな影響を与えています。豪雨あるいは少雨に伴う河川流量・河川水位の変化を予測する研究は、非常に重要なものとして位置付けられています。

長い歴史を持つ降雨流出の研究ですが、実は現象そのものについては、まだよくわかっていないところがあります。雨が降ったら水が流れ出てくるのは至極当然で、何がわからないのかわからないと思われるかもしれません。ですが、雨が降って流れ出てきた水が、いましがた降った雨の水なのか、それとも何か月あるいは何年も前に降った雨なのかは、よくわからないのです。流域に降った雨が、どのような経路をたどって、どれくらいの時間をかけて流れ出てくるのか。多くの研究者がこの問題に取り組んでいます。

工学的な見地からすると、流出水の量が最も重要であることがほとんどです。流出の経路や流域での滞留時間のことが多少不確かでも、量をうまく推定することが求められます。これを一歩進めて、流域内の水の挙動を理解し、工学的な目的も達成できれば理想的です。そのような理想形に少しでも近づくために、昨年から新しい取り組みを始めました。本稿ではそのことについて紹介したいと思います。

河川水溶存シリカ濃度の計測による雨水流出経路の推定

新しい取り組みとは、河川水を採取し、そこに含まれるシリカの濃度を計測する、というものです。何のためかという、雨水がどのような経路を経て河川に流出してきたか推定するためであり、またその情報を利用して、降雨流出現象をより確からしくモデリングするためです。

シリカ、すなわち二酸化ケイ素は、非常にありふれた物質で、岩石や土壌に豊富に含まれています。地上に降った雨水が岩石・土壌に接触すると、シリカが水に溶出します。地下水や土壌水のように長時間地中にとどまっていると、溶存シリカ濃度は高くなります。その一方で、雨水にはシリカはほとんど含まれていません。このことから、河川水の溶存シリカ濃度が高ければ、長く地中にあった水の割合が高く、逆に濃度が低ければ、降ってすぐに流出してきた水の割合が高い、と推定されます。平常時の河川水は、ほとんど地下水・土壌水由来です。一方、出水時の河川水には、そのときに降った雨水も一定程度含まれるため、平常時に比べてシリカ濃度が低下すると予想されます。このように、河川水のシリカ濃度を調べることで、とくに出水時の河川水の由来を推定することができます。

たとえば、あとで詳しく述べますが、昨年2019年8月の台風10号に伴う出水時に、賀茂川・高野川のシリカ濃度を調べたところ、平常時には10mg/l程度であるのに対し、出

水時の一番低いときでは3mg/l程度まで濃度が下がりました。平常時の河川水シリカ濃度が地下水・土壌水のシリカ濃度と同じであると仮定すると、シリカ濃度が最低の3mg/lを記録した時点では、当該降雨による雨水が河川水の約7割を占め、残りの3割は当該降雨以前から流域に存在していた地下水・土壌水が流出してきたもの、と推定されます。

このように、河川水の質を調べることで、流域内部で起きていることを推定し、降雨流出現象のより確からしいモデリングにつなげたいと考えています。

賀茂川・高野川を対象とした計測とモデリング

昨年2019年8月から、賀茂川・高野川を対象として、河川水の採取、シリカ濃度の計測、降雨流出モデリングに取り組んでいます。平常時は、基本的に週に一回、出町柳のデルタで、賀茂川・高野川それぞれの水を採取しています(図1)。出水時(図2)には、車で出かけていき、近くの駐車場で待機して、1~2時間程度の間隔で採水しています。増水時に河原に下りることは危険なので(とくに夜間)、直上流の出町橋と河合橋の上からバケツで採水しています。

図3と図4は、2019年8月15日から17日にかけての出水に対するものです。図3には、荒神橋地点での観測流量と計算流量、図4には賀茂川・高野川でのシリカ濃度の観測値と計算値が示されています。流量の計算には、山地表土層における地中流を考慮したキネマティックウェーブモデルを用いました。賀茂川・高野川それぞれの流量を計算し、それらを合算して直下流の荒神橋地点での流量としています。シリカ濃度の計算には、上記のキネマティックウェーブモ



図1 平常時の採水の様子



図2 出水時の高野川

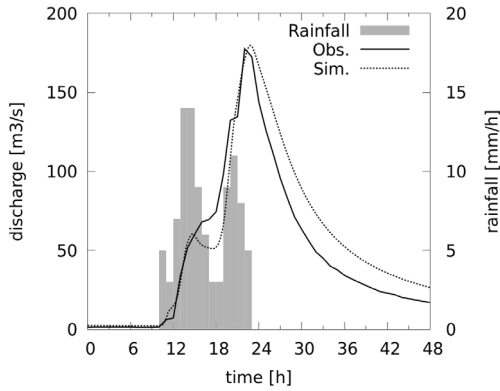


図3 荒神橋地点での流量

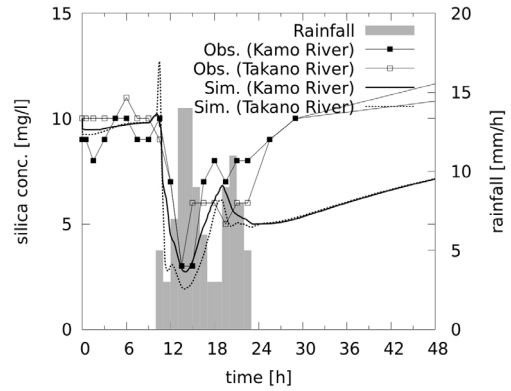


図4 賀茂川・高野川のシリカ濃度

デルに表土層におけるシリカの溶出機構を組み込んだものを用いました。これらのモデリングでは流域内の土地利用を考慮しています。流域上流の山地部では雨水は表土層に浸透し、その過程でシリカが溶出するとしています。流域下流の都市域では、雨水は浸透せず地表流で流下するとしていますので、シリカの溶出は生じません。

まず流量についてですが、ピーク後の計算値が過大ですが、出水の全体的な様子は再現されています。一方、河川水シリカ濃度については、イベント前半の濃度低下は再現されているものの、イベント後半では計算値が過小です。イベント後半の計算流量が過大であることを考慮しても、観測値と計算値の乖離は説明できません。つまり、ここで用いた降雨流出モデルは、流量時系列を概ね再現できるものの、流域内部で生じている雨水流動を適切にモデリングできていない可能性がある、ということを示唆しています。

シリカ濃度の計算値が過小だったことからすると、実際には流域に貯留されていたシリカ濃度の高い水がもっと多く流出してきていると考えられます。表土層の下の基岩に存在する地下水をいまのモデルで考慮していないことがシリカ濃度の過小評価の原因と推察されます。表土層や地表などいまのモデルで想定している流出経路だけでなく、より深い経路からの流出を考慮することで、降雨流出をより確からしくモデリングできるようになると考えています。

都市域からの流出

上では降雨イベント後半について述べましたが、イベント前半を見ると、河川水シリカ濃度の観測値と計算値はよく一致しています。いずれも、降雨前の約10mg/lから、降雨ピーク時の約3mg/lまで低下しています。この濃度低下は、都市域からの表面流出による希釈と考えました。流域下流の都市域からシリカ濃度の低い水が速やかに河川に流れ込み、河川水のシリカ濃度が低下した、という予想です。

この仮説を検証するために、今年2020年の梅雨期に出水観測を行いました。具体的には、これまでの出町柳での観測に加えて、高野川が山地部から都市域に出てくる叡山電鉄三宅八幡駅付近でも採水し、河川水のシリカ濃度を計測しました。出水時に上流の三宅八幡駅付近で採取した高野

川の水のシリカ濃度が高いにもかかわらず、下流の出町柳で採取した水のシリカ濃度が低ければ、その間に流入した水によって希釈された、という解釈が成り立ちます。

観測は6月30日に行いました。この日、午前9時から12時にかけて25mmほどの雨が降りました。まず、午前11時に高野川で採水を行いました。その足で三宅八幡駅近くの三宅橋に向かい、12時に採水を行いました。その後すぐに高野川に戻り、13時に再び採水しました。その結果、11時と13時に高野川で採取した高野川の水のシリカ濃度は5～6mg/lだったのに対し、12時に上流の三宅橋で採取した水のシリカ濃度は10mg/lでした。出町柳での観測はほぼ一年間継続しており、平常時のシリカ濃度は10mg/l程度であること、5～6mg/lまで濃度が低下するのは降雨時以外にはないことがわかっています。つまり、三宅橋～出町柳間のシリカ濃度低下は、途中で流入してくる都市域からの流出水によるものと考えられます。ちなみにこのとき、三宅橋、出町柳とは別に、高野川右岸の雨水吐口から排出されている水も採取し、この水のシリカ濃度を測ったところ、2mg/lでした。このことも、都市域からの流出水がシリカ濃度低下の原因となっていることを裏付けていると考えています。

おわりに

本稿では、シリカ濃度の計測による雨水流出経路の推定と降雨流出モデリングに関する取り組みを紹介しました。河川水のシリカ濃度を使って雨水の流出経路を推定すること自体は学術的に新しいことではありません。ですが、このような情報を降雨流出モデリングに活用するという事例はあまり多くないように思います。平常時の採水では、観光客、水遊びに来た親子、大学のサークルと思しき若者の集まり、二人連れ、などからちょっと好奇の目で見られ、出水時の採水では、パトロール中の警察官に質問されることもあります。街なかでの観測ですので、難しいことはほとんどありません。今後も、さらに新しい取り組みを交えつつ、継続していきたいと考えています。

謝辞 本研究は、公益財団法人河川財団河川基金助成事業の助成を得て実施しております。ここに謝意を表します。

気候変動に伴う地盤環境問題

都市社会工学・社会基盤親和技術論分野（地球環境学堂）・准教授
高井 敦史

はじめに

地球工学に携わる研究者・実務者にとって、気候変動は先進国や開発途上国を問わず、国境を超えて人々の安全保障を脅かすものであり、避けては通れない課題である。当研究室では、土・水・化学物質の特性や相互作用に関する研究を通して、地盤環境の保全・活用のための検討を継続的に行っているが、近年では気候変動に伴う新たな地盤環境課題の解決が求められており、研究内容も多角化している。本稿では、著者が取り組んでいる研究内容のうち、気候変動に関連した研究事例を取り上げ、概説する。

地盤材料の溶出特性に及ぼす温度の影響

自然由来の重金属等を含む掘削土砂や岩石等の発生土への対応は、地盤環境工学分野における重要課題の一つである。日本列島は大陸プレートと海洋プレートが押し合う境界にあり、特定の金属が融点等の関係で集まりやすいこと等に起因して、相対的に高い濃度で地盤中に重金属等が含まれている。そのため、このような自然的原因で重金属等が基準を超える濃度で土や岩石中に存在している場合があり、掘削に伴い空気や水に触れ酸化されることで重金属等が溶出するケースがある。しかし、基準値をわずかに超える濃度レベルであることが多いことが報告されており、発生土を周辺環境に配慮しながら地盤材料として盛土等に有効活用することが望ましいと言える。自然由来の重金属等を含む掘削土を地盤材料として利用する上では、汚染物質の溶出特性を把握することが重要になるが、地盤材料中の有害物質の溶出は、溶質と溶媒の単純な溶解反応だけでは表現できず、土粒子表面の吸脱着や内部拡散、コロイド担体輸送等の複雑な現象によって決定される。また、間隙構造や飽和状態などの地盤の状態も影響し、反応機構は複雑で、未だに十分な知見が蓄積されていない。そのため、様々な条件下で地盤材料の溶出挙動を評価する必要があるが、近年は地盤温度の変化に着目した研究も行っている。

地盤内における温度変化は、対象物質の溶解度や揮発性だけでなく、図1に示すような種々の特性に影響を及ぼす。例えば、温度変化によって地盤構造が変化することが知られており、間隙比が減少すれば透水性も低下する。透水性の低下は、すなわち流速の減少と同意であるが、流速が減少すれば土の層を通過するまでに要する時間（トラベルタイム）は長くなるため、固相との接触時間が長くなり、溶出濃度は高くなる可能性が考えられる。一方で、例えば発生土に含まれる代表的な物質であるヒ素の主要な溶出メカニズムは、黄鉄鉱の酸化分解であるが、高温条件では酸化分解を引き起こす鉄酸化細菌の活性が低下することが指摘されており、この観点からは酸化分解によるヒ素の溶出が抑制されることになる。

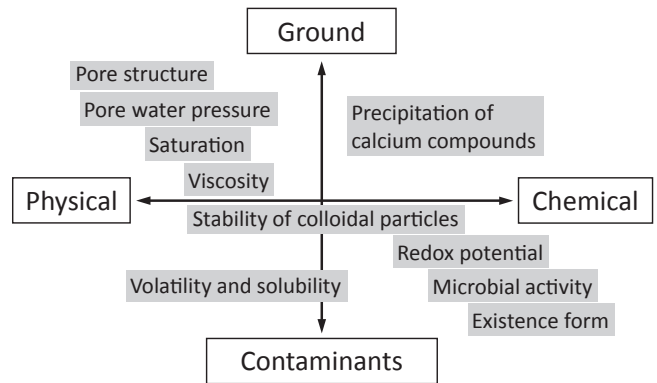


図1 温度の影響を受ける地盤環境の諸特性

では、温度は材料学として極めて一般的なパラメータであるにも関わらず、なぜ今頃議論が必要なのか。それは、一般的には地表面から数m以深では地盤温度の季節変動や日変動が小さいため、ほとんどの地盤工学的な現象は室温条件で検討すれば十分であることが要因の一つであると言える。一方で、発生土の利用用途としては、盛土や嵩上げ等の浅層地盤での適用が想定されるため、地盤温度の変動が無視できない。また、実測データは多くないものの、地表面付近の地盤温度が年々上昇する地下温暖化が国内外の様々な地点で確認されていることや、帯水層蓄熱のように地盤温度の変化を伴う技術が進展していることなど、温度変化が地盤環境に及ぼす影響は待ったなしで議論すべきテーマであると著者は考えている。

地盤材料に含まれる化学物質の溶出挙動を評価する手法には様々なものがあるが、溶媒と材料を一定の質量比で混合して振とうする公定法のバッチ溶出試験に加え、円筒型カラムに材料を充填して通水を行い、排出水中に含まれる物質濃度を分析するカラム通水試験が広く採用されている。図2は、山岳トンネル工事現場から採取した頁岩を用いてカ

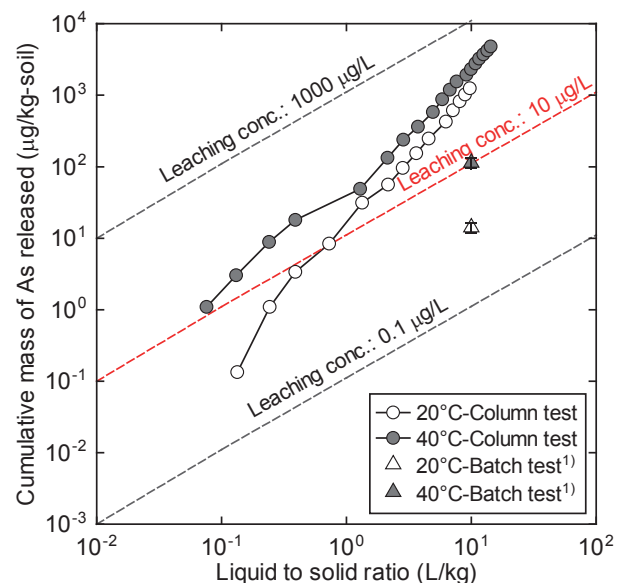


図2 20°Cと40°Cでのヒ素の累積溶出量

ラム通水試験とバッチ溶出試験で溶出挙動を評価した例で、対象岩石の単位質量あたりの累積ヒ素溶出量と、岩石に対する通水量（＝液固比）の関係を表している。20℃条件では環境基準（10 μg/L）未満のヒ素溶出濃度で推移したものの、40℃条件では環境基準を超える濃度でヒ素溶出濃度が推移し、結果的に20℃の場合に比べて40℃では約2倍程度の溶出量を示した。アルミニウムの溶出濃度が高くなるとヒ素溶出濃度が高くなったことから、アルミニウム質のコロイド粒子の溶脱が温度が高いほど進行した可能性があるが、化学種の存在形態の変化や各パラメータの温度依存性については依然として検討中である。今後さらなる検討を行い、将来的には簡便な方法で長期挙動を評価しうる数理モデルの開発に展開したいと考えている。

災害廃棄物の適切な処理と再資源化

近年、世界各地で自然災害が毎年のように発生している。日本での最近の主な自然災害としては、2011年東日本大震災以降では、広島土砂災害、熊本地震、令和元年東日本台風（台風第19号）や令和2年7月豪雨等が記憶に新しい。地球温暖化に起因して今後も更なる大雨リスクの増加が懸念されており、さらに首都直下地震や南海トラフ巨大地震の発生が予想されるなど、日本における災害対策はソフト・ハード面で更に強化を図る必要がある。

巨大自然災害では多くの問題を解決する必要が生じるが、その一つが災害廃棄物の処理である。東日本大震災では、津波堆積物を含めた災害廃棄物が約3100万トン発生したが、首都直下地震では約11000万トンの、南海トラフ巨大地震では約35000万トンの災害廃棄物がそれぞれに発生すると試算されており、綿密な事前の検討が求められる。処理の停滞により復旧・復興が大幅に遅れる事態は避けなければならないが、膨大な量の災害廃棄物を円滑に処理することが求められるが、一方で、日本は国土が狭隘で廃棄物処分のための用地が平時から十分には多くはないため、極力資源として再生し処分量を縮減する必要がある。つまり、迅速な処理と再資源化を両立しなければならないのが円滑な災害廃棄物処理を進める上で重要なポイントと言える。

著者らは、災害廃棄物の迅速な処理と再資源化を実現するため、東日本大震災における知見を活用し地盤工学的な観点から検討を行っている。先述の東日本大震災で発生した災害廃棄物のうち約1/3は土砂分であり、沿岸部の防潮堤や幹線道路の整備などの復旧事業で不可欠な地盤材料としての再資源化に取り組んだ。東日本大震災だけでなくどの

ような自然災害であっても、主には破碎工程と分級（ふるい）工程で災害廃棄物が処理され、分別されることになる。土砂分は粒径が小さいため、分級によってうまく分別でき土のみを抽出できるように思うが、実際には夾雑物が土とともにふるいを通過してしまい、純度の高い土砂を取得することは極めて難しい。図3は、東日本大震災において災害廃棄物処理を経て排出された土砂分（実際には、「ふるい下くず」と呼ばれた）の一例であるが、このように長尺な木くずも多く混在していることが分かる。無論、木片一つ一つを丁寧に取り除けば、左下の写真のように土としての純度を高めることはできるものの、労力とコストの点から全く非現実的であり、今後発生が予想される巨大自然災害においても、既存の破碎処理と分級処理を適切に組み合わせ、効率的に処理を進める他ないであろう。現在は、模擬的に作製した混合廃棄物を用いて、適切な分別を実現しうる処理条件を、室内試験と実機試験によって検討している。

得られる知見は、災害廃棄物の処理方法の具体化に資するものであり、発災後に各自治体が処理実行計画を立案するためにも重要な知見となり得る。さらに、適切な分別の実現により再資源化の推進にもつながることから、災害に対するレジリエンスの向上に向けて引き続き研究を進めていきたい。

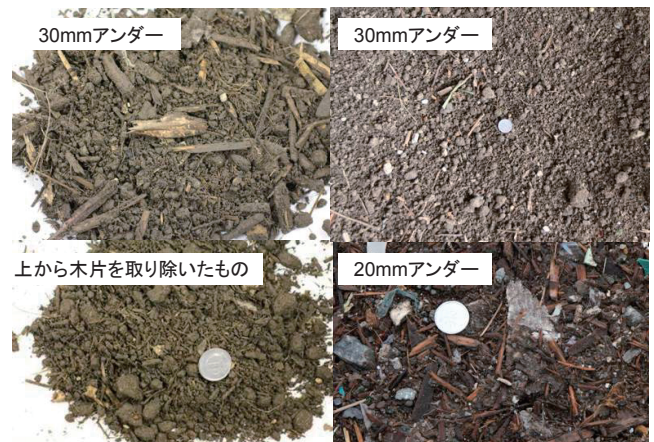


図3 災害廃棄物から分級した土砂分の例

参考文献：

- 1) 岩田ら（2019）：掘削岩石に含まれる自然由来ヒ素の溶出特性の温度・時間依存性，第13回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.23-28.

Vehicle Routing in City Logistics: Managing last Mile with respect to Land Use

都市社会学・国際都市開発分野・准教授 Qureshi, Ali Gul

Introduction

Urban planning systems divide a city in various land use areas and set certain restrictions on types of developments in these areas to create a sustainable urban environment. Industrial and commercial land uses often lead to increase in freight shipments, impacting the neighboring transportation network. Land use planning has been integrated with passenger transportation planning, however, its role in the design of urban logistics systems has only been restricted to the location of warehouses and distribution centers. The size, location and density of such freight facilities along with the land use pattern will affect the freight systems such as central vs. satellite distribution. So would be the types of vehicle used for transportation (i.e. large and/or small trucks). Usually the last-mile deliveries are carried out using trucks and vans, which contribute their share in the typical traffic-related problems such as congestion, idling and environmental emissions. Furthermore, increase in freight-related traffic also increases the probability and severity of crashes in urban areas. City logistics aims at the mitigation of these ill-effects considering both public and private costs by suggesting various policies and schemes such as cooperative delivery systems, ideal location of logistics terminals, and entry restrictions for large trucks. Efficient routing of delivery vehicles can also address the above-mentioned problems.

The Vehicle Routing and scheduling Problem with Soft Time Windows (VRPSTW) can be used for optimized and efficient logistics operations. It finds minimum cost routes for delivery vehicles to cover demands of all customers within their specified time windows. In modelling of city logistics, the behavior of freight carriers is often modelled by the VRPSTW with the main objective of minimization of total operation cost. In earlier studies, it has been found that even a simple VRPSTW may result in better overall cost and less environmental impacts (obtained as by-product) as compared to the actual operations of the urban freight vehicles. On the other hand, other stakeholders of city logistics (such as administrators and residents) strive for a better living environment (less traffic, less emissions, better road safety). The aim of this research is integrate the objectives of freight carriers and other stakeholders to improve the delivery operations under the existing land use patterns, especially within the residential zones.

The Vehicle Routing and scheduling Problem with Soft Time Windows and Land Use considerations (VRPSTW-LU)

This research aims at reducing the environmental footprint of the freight deliveries in residential areas by adding it as an exclusive objective in the VRPSTW, resulting in the formation of a rich VRPSTW with land use considerations (i.e. VRPSTW-LU). The objective of this new variant is to reduce unnecessary truck travel (distance or time) in the residential areas by shifting it to commercial and/or industrial land use areas while reducing the overall cost as well.

The VRPSTW-LU includes all the constraints of a typical VRPSTW, i.e. all customers must be serviced within their time windows while obeying vehicle capacity constraints. However, it considers a modified cost c''_{ij} as shown below:

$$c''_{ij} = c'_{ij} \left(1 + \frac{\sum_{u \in U} p_u d_{iju}}{\sum_{u \in U} d_{iju}} \right)$$

where, d_{iju} is the portion of the distance traveled along the path connecting customer i with j , in a particular land use category $u \in U$ (a set of all land use categories). A penalty factor p_u is separately defined for each land use category $u \in U$ based on the priority of the land use. For the purpose of analysis, the twelve typical land use zones in Japanese cities were partitioned in three main categories in this research, viz. category A: exclusively residential (comprising of land use 1 to 4), category B: other residential (comprising of land use 5 to 7), category C: commercial and industrial (combing commercial (land use 8 and 9) and industrial (10 to 12)).

As VRPSTW-LU can be reduced to VRPSTW (by setting p_u equal to zero for all land uses), it is also a NP-hard problem. Therefore, a heuristics-based approach was developed to solve it. A combination of the Dijkstra's algorithm and a genetic algorithm (GA) is used to get optimized solutions for the VRPSTW-LU. The Dijkstra's algorithm was used at the pre-processing stage to find the shortest paths connecting customer i with j on the real road network considering the land use penalties, and then a Genetic Algorithm (GA) was used to find optimal route (sequence and time of service) of the customers.

Experimental setup

To create a test instance and a set of scenarios, probe data of four 3-tonne trucks of a well-known freight company was used. These trucks were involved in typical delivery operations passing through parts of Osaka City, Kadoma City and Moriguchi City in Osaka Prefecture. In the test instance, the time windows of the customers' demand are based on the ac-

tual arrival times in the probe data with a range of 20 minutes before and after the arrival time and further 15 minutes are added as soft time windows limit. While the algorithms were coded using MATLAB, the analysis was also supported by ArcGIS 10.2 software by ESRI with the basic geoprocessing tools. The land use and road network data of Osaka City used in this research, is based on the ArcGIS data collection standard pack of 2011. The travel cost in our analysis is the travel time between each node in congested (day time) conditions, which is based on the traffic census data of Osaka City surveyed in 2010. In total 21 different cases were tested based on the different combinations of the penalty factor p_u defined for each land use category $u \in U$. For the sake of brevity and limitation on the length of paper, next section reports on the detailed analysis of only two cases, viz. case 1 (VRPSTW) (p_u equal to zero for all land uses) and case 8 (VRPSTW-LU) (setting p_u equal to 1 for the target class i.e. category A (exclusively residential) and zero for the other land uses, i.e. category B (other residential) and category C (commercial and industrial)).

Results and Discussions

In total data from 8 different truck routes were analyzed under each case. Figure 1 gives a comparison of the travel times of delivery trucks in each land use category. As compared to the probe data, even a typical VRPSTW shows considerable reduction in the total travel time, and therefore the travel time in the target category A is reduced as well. It must be noted that both VRPSTW and VRPSTW-LU were solved using optimization algorithms based on the same assumptions, underlying road network, customers, etc., and therefore, only they merit a direct comparison. On the other hand, the actual probe data may represent a dispatcher based operation and might have taken into account various real life perceptions, and therefore, a direct comparison with VRPSTW or VRPSTW-LU can only be used to extract general trends and comparisons.

While comparing the VRPSTW-LU with VRPSTW, Figure 1 shows that it was able to achieve its objective, which was to reduce the footprint of the logistics activity in the residential area (Category A). A clear difference between the routes suggested by VRPSTW-LU and VRPSTW can be seen in Figure 2. In order to get overall minimum cost (minimum total travel time), routes generated in VRPSTW are passing through the residential areas. In this case, the trucks use residential areas even more than the probe data. On the other

hand, VRPSTW-LU was able to divert the truck traffic away from the residential areas at slightly additional overall cost.

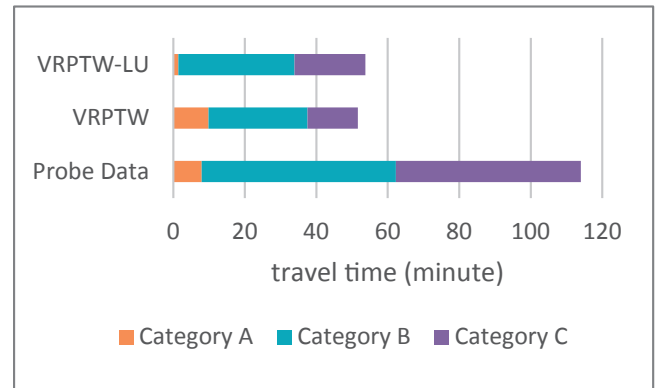


Figure 1. Comparison of travel times in different land-use categories in various optimizations and real data.

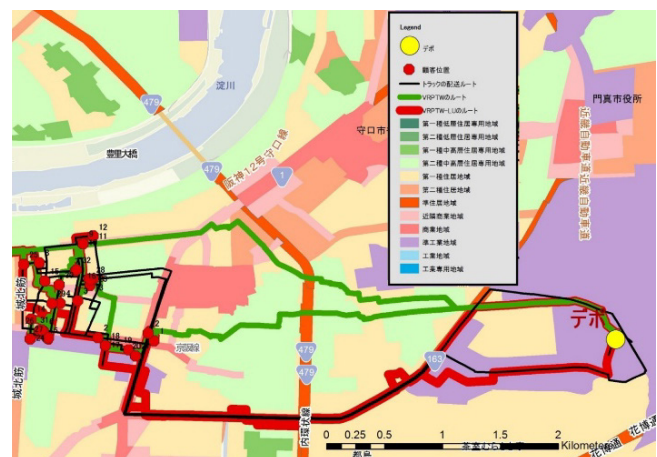


Figure 2. Land use footprints of routes in various optimizations and real data.

Conclusion

The paper presented the issue of footprint of the urban logistics activities in the residential areas and offered a novel vehicle routing variant to address it. The VRPSTW-LU was able to optimize the cost for the delivery operations simultaneously reducing the footprint of the delivery trucks in the residential areas thereby improving the living environment in the target land use class. While compared to the classical VRPSTW, this added benefit was obtained at a very small cost increase. Therefore it can be used to demonstrate a win-win situation for all city logistics stakeholders. Although a variety of cases have been tested as far as the penalty factor for each land use category is concerned; their appropriate values can only be obtained on a basis of an efficient stakeholder dialogue and/or survey.

変換過程を考慮した水道水質の安全確保

都市環境工学・都市衛生工学分野・准教授 越後 信哉

はじめに

水道水の安全性を考える上で、化学物質によるリスクは微生物感染リスクと並んで重要なものである。水道水に有害化学物質が混入する主な構図としては、(1) それ自体に毒性がある化学物質が流出する場合、(2) 天然由来、人為由来を問わず有害性にはそれほど問題ない物質が流出しそれが水環境や水処理プロセス中で既知の有害物質に変換される場合、(3) 有害性にはそれほど問題ない物質が流出しそれが水環境や水処理プロセス中で未知の有害物質に変換される場合、が考えられる。これまでは、(1) のそれ自体が有害な化学物質の流出や、(2) のうち天然由来の有機物が水道の塩素消毒で有害物質（トリハロメタン等の塩素処理副生成物）に変換されるケースが主に水質管理の対象とされてきた。しかしながら、人為由来化学物質も有害な化学物質に変換されうるし、(3) のように元の物質もできた物質もよくわからないケースも存在しうる。

2012年（平成24年）に利根川水系においてヘキサメチレンテトラミンが浄水塩素処理過程でホルムアルデヒドに変換された水質事故はケース（2）のうち人為由来化学物質が問題となった典型例といえる。この事故を契機に、浄水処理対応困難物質として10数種類の化学物質が指定されることになったが、この事故への環境政策上の対応（浄水処理対応困難物質の指定等）は、ホルムアルデヒド等ごく一部の物質に限定されており、より多く有害物質への対応が求められている。

現在のところ、このような変換のパターンについて私達はあまりにも無知である。環境中での有機物の分解反応は、有機化学で用いられる合成反応とは趣が異なり、分岐しながら多段階の反応として進行する。このような状況を踏まえ、筆者らは多様な化学物質について複数の変換過程を想定し、対象とする有害物質の生成能（最大どのくらい生成するか推定した値）のデータベースとして体系化し、あわせて変換経路を推定しその類型化を図り、これらの知見を総合して化学物質の変換過程を考慮した新たな管理体系を提示することを最終目的に、有害物質として代表的な塩素処理生成物であるハロ酢酸を例として取り上げ、浄水塩素処理過程、さらには複数の変換過程を組み合わせた場合の人為由来化合物（主としてPRTR対象物質）からの有害物質生成能の評価を行い、重要な化学構造の抽出を行ってきた。本稿では、このハロ酢酸に関する一連の研究成果の一部について紹介する。

人為由来化合物からハロ酢酸への変換に関する研究

ハロ酢酸とは、酢酸のメチル基の水素原子がハロゲンで置換された化合物のことである。ハロ酢酸は、塩素処理副生成物のうち、検出頻度・濃度ともにトリハロメタンに次いで高く、水質管理上その制御が特に重要な物質群である。

現在我が国では塩素のみが置換した3種のクロロ酢酸類（クロロ酢酸、ジクロロ酢酸、トリクロロ酢酸）に水道水質基準値が設定されている。また、塩素と臭素で置換されたブロモクロロ酢酸類および臭素で置換されたブロモ酢酸類に関しても要検討項目に挙げられている。さらに、ヨウ素化酢酸の一部は、クロロ酢酸類やブロモ酢酸類よりもほ乳類細胞に対する毒性が高く、低濃度であっても十分な注意が必要である。しかしながらハロ酢酸とならび主要な塩素処理副生成物であるトリハロメタンと比べても生成機構の解明は遅れており、トリハロメタン生成反応のハロホルム反応に対応するような代表的な反応様式すら知られておらず、人為由来化合物の塩素処理による生成メカニズムについても断片的な情報しか存在しない。

このような状況を踏まえ、筆者らは2点の検討を行ってきた。まず、多数の化学物質を塩素と反応（浄水処理における消毒剤との反応を模擬している）させた際のハロ酢酸の生成量を評価し、その結果からハロ酢酸の生成に重要な化学構造の抽出を試みた。対象物質は、PRTR制度対象物質（462物質）のうち、比較的分子量（炭素数10以下）かつ水溶解度が一定程度あるもの155物質等、約200物質とした。これらの物質を、大過剰の塩素と反応させた。大過剰で反応させるのは生成しうる最大濃度（生成能）を評価するためである。次に、塩素との反応の前に対象物質を下水処理施設より採取した活性汚泥（下水処理での生物処理を担う微生物群）と接触させた。これは、下水処理を経てその後浄水処理により塩素と反応することを模擬したものである。対象物質として、PRTR対象物質のうち1つ目の検討で対象とした155物質のうちから51物質を選択した。その内訳はフェノール類16種、芳香族アミン12種（主に一級アミン）、その他の芳香族化合物8種、脂肪族カルボニル化合物11種、それ以外の脂肪族化合物5種である。実験に用いた活性汚泥は、実際の下水処理施設のものである。以下にこれら2点の検討結果の概要を述べる。

多様な人為由来化合物の塩素処理によるハロ酢酸生成能の評価に基づく重要な化学構造の抽出

まず、対象としたPRTR対象物質155物質のハロ酢酸生成能の結果をまとめる。全体的な傾向としては、モル変換率が極端に高い物質は存在せず最大で30%程度であった。また、10%以上のモル変換率を示す物質は全体の1割未満で、かつ主にフェノール性の化合物であり、限定的であった（図1）。この結果は、今回の対象物質群にはモル変換率の観点から直ちに浄水処理対応困難物質等の指定が必要となる化学物質が存在しなかったことを意味するが、ハロ酢酸については基準値が比較的低いため、変換率が低くても考慮が必要となることも考えられる。

上記155化合物に加えて、炭素数11以上で使用量の多い（155物質と合わせて全体排出量の98.5%をカバー）PRTR物質のハロ酢酸生成能および塩素消費量について検討を行った。炭素数10以上であってもフェノール類芳香環を持つノ

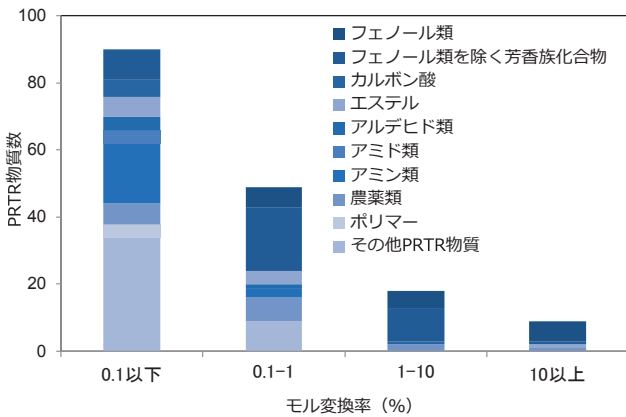


図1 対象としたPRTR対象物質 (155物質) の塩素処理におけるハロ酢酸へのモル変換率の分布

ニルフェノールは高いハロ酢酸生成能を示したが、他の排出量が高いPRTR物質のハロ酢酸生成能が少なかった。

以上の結果を用いて、水質基準で定められているハロ酢酸基準値との比較を行った。基準値はクロロ酢酸が0.02 mg/L、ジクロロ酢酸およびトリクロロ酢酸が0.03 mg/Lである。対象有機物の濃度は平成24年の利根川流域でのヘキサメチレンテトラミン流出事故時の最大濃度 (2 μM) と同程度のTOC (全有機炭素) の0.144 mgC/Lとした。この仮定で基準値を超える可能性のある物質が7物質 (2, 4, 6-トリクロロフェノール, 2-クロロフェノール, 4-クロロフェノール, フェノール, ノニルフェノール, 3, 4-ジクロロアニリン) 存在し、フェノールやクロロフェノール類についてはフェノール類としての基準項目に含まれるがそれ以外の物質もあるため、注意が必要であることがわかった。今回の評価では、比較的多数の化学物質について実験的に評価を行い問題となりうる化学物質の抽出を行ったが、現実には比較にならない数の人為由来化学物質が存在する。これらを全て実験的に評価することは難しく、反応機構の本質的理解が必要であろう。また、創薬分野等で利用が進みつつある機械学習などの計算化学による予測にも積極的に取り組む必要がある。

生物処理が人為由来の化学物質の塩素処理によるハロ酢酸生成能におよぼす影響

対象とした51種類の化合物の活性汚泥との接触前後のHAAFPの変化 (注: 厳密には1時間以内の短時間接触と24時間接触感の比較) をまとめた結果を図2に示す。多くの物質について、ジクロロ酢酸については変化なし、トリクロ

ロ酢酸については変化なしまたは減少傾向にあることが見て取れる。減少傾向の物質については、生物処理が人為由来有機物からの消毒副生成物の低減に寄与していることを意味する。

また、限られた物質ではあるが、ヒドロキノンのようにトリクロロ酢酸生成能が生物処理後に増加する物質、アクリル酸およびアセトアミノフェンのようにジクロロ酢酸生成能が生物処理後に増加する物質も存在することもわかった。この結果は、下水処理によりハロ酢酸により変換されやすい物質が生成することを意味している。つまり、複数の変換過程の組み合わせにより、副生成物が生成しやすい場合があることを示唆する。今後は、このような特徴的な物質について生物処理過程でどのような変換がなされているか理解を深めるとともに、他の変換過程 (環境中での光分解等) も考慮したより体系的な理解が必要となる。

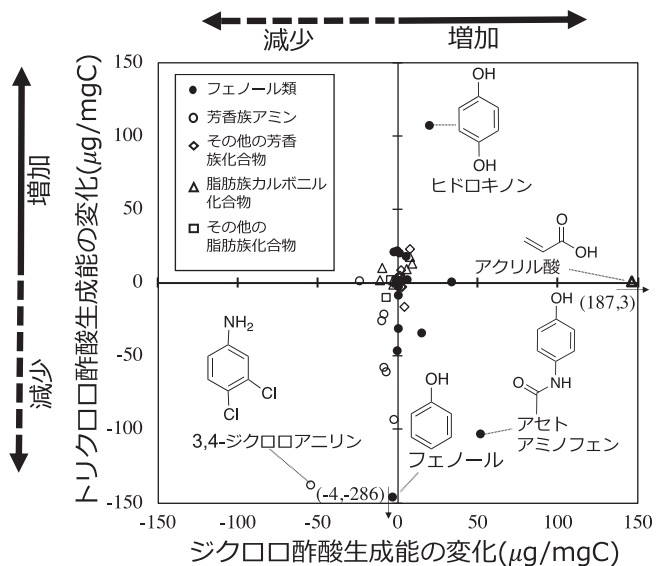


図2 生物処理 (活性汚泥との接触) が塩素処理によるハロ酢酸生成能におよぼす影響 (変化量で比較で表示)

まとめ

有害物質は直接排出されるだけでなく、人為由来化学物質が水環境中や水処理プロセス中で変換を受けて生成する可能性がある。本稿で紹介したように、この変換過程に関わる研究は進みつつあるが、膨大な数の化学物質について体系的な評価を可能とするためには、個別の実験だけでなく、得られた情報を体系化・一般化する試みも重要となる。