

# 構造物への着雪に関する研究

社会基盤工学・構造工学分野・准教授 松宮 央登

## はじめに

我が国は、周辺が海に囲まれている影響などにより、世界的に見ても雪が降りやすい地域であり、北海道・東北や日本海側など国土の50%以上が豪雪地帯に区分され、それ以外の広い地域でも大雪・暴風雪が発生することがあります。冬季の雪による被害を「雪害」と呼び、雪崩・除雪中の事故などによる人的被害、過大な積雪による住宅・各種設備などの損傷、積雪や地吹雪・暴風雪による視界不良などに伴う交通・物流障害、電線や鉄道設備への着雪による停電・列車運休、各種構造物などからの落雪被害、などが挙げられます。地球温暖化に伴い、豪雪地帯ではさらに雪が増え、それ以外の地域では降雪の回数や量は減るが、一度降れば大雪になる可能性が増えるとも言われており、都市圏も含めて雪害への備えが必要です。雪の影響を受けやすい社会インフラとして、道路・鉄道・電力・通信などが考えられますが、これらを担う事業者は、それぞれのシステム・設備で発生しうる被害を減らし、可能な限り機能を維持するための対策に苦心してきました。

## 着雪・落雪とは

雪害の原因の一つに、構造物への雪の付着・堆積・脱落を伴うものがあります。氷点下の気温で降る雪は、一般的に雪の中に液体の水分があまり含まれていないため「乾雪」と呼ばれます。乾雪はある程度の風がある場合には構造物への付着は起こりにくく、弱風下でのみ構造物の上に密度が小さい雪が積もる「冠雪」が生じます。一方、気温が0℃を上回る条件下で降る雪を「湿雪」と呼び、一定量の液体の水分が含まれるため、構造物への付着が発生し易いです。風が弱い場合には構造物上部への冠雪が生じますが、風がある場合には飛散した降雪粒子が構造部の側面などに衝突して付着する「着雪」が生じます。風が強い場合には、着雪体が圧密されて高密度の雪塊となり重量が大きくなるので、構造物に過大な着雪荷重を作用させる場合があります。電力・通信分野においては、電線・通信線への着雪が、設備損傷、停電・通信遮断の原因となります。また、着雪体は日射や周辺の空気から供給される熱により融解が進み、着雪体内に含まれる水分量が一定以上になると、構造物との付着力が小さくなって脱落する「落雪」が生じます。道路・鉄道分野においては、案内標識・信号・照明柱や交差する道路の主桁・橋脚からの落雪が、通行車両や周辺構造物の破損、通行人の人的被害につながる場合があります。

## 送電設備の雪害に関する研究

私は、2008年～2022年まで電力中央研究所にて、主に着雪が原因となって引き起こす送電設備の雪害に関する研究[1]に取り組んできました。国内では8.8万kmにおよぶ(架空)送電線があり、様々な地形および自然環境下を經由しています。電力を安定的に供給するためには、厳しい自然環境の中でもその機能と健全性を維持することが必要であり、冬季の雪害を低減・防止することは極めて重要な課題です。送電線において、雪害につながる要因として、主に「重着雪」、「ギャロッピング」、「塩雪害」と呼ばれる3つの現象が挙げられます。

重着雪は、電線への過大に着雪によって、電線の断線や鉄塔の損壊を引き起こすものです。設備損壊に至らずとも、電線が雪の重みで大きく垂下した際、もしくは電線に付着した氷雪が一斉に脱落して電線が跳ね上がった際(スリートジャンプと呼びます)に、他の電線と接近して電気事故(ショート)が生じることもあります。電線への着雪量が過大になる場合には、図1に示すように、電線を筒状に着雪体が覆う「筒雪」が形成されることが多いです。長い径間を有する送電線はねじれ易く、付着した雪に作用する重力(偏心荷重)や空気力により電線がねじられながら、筒雪が形成されます。一方、素線の凹凸がある送電線においては、素線の撚りに沿って着雪体が滑ることで筒雪に至ることもあります。そのため、送電線では、電線のねじれを抑制するための偏心錐(カウンタウェイト)や、電線の撚りに沿った着雪体の滑りを防ぐための黒い樹脂製リングが取り付けられています。皆様も一度、上空の送電線をじっくりと眺めてみてください。



図1 筒雪化した過大な着雪[1]

一連の研究では、実送電線や実規模試験線を用いた長期の屋外観測を実施して、各種対策品の有効性を示すとともに、簡易な着雪量評価手法の開発を実施してきました。また、湿雪による着雪は強風下でも発生するため、鉄塔倒壊などを引き起こす際には、電線への過大な着雪による重量増加に加えて、着雪に伴い受風面積が広がった電線に強風が作用することによる風荷重の増大も原因となります。そこで、ある再現期間内で発生する最大着雪量を地域別に評価するとともに、着雪時に発生し得る風速の推定や、着雪荷重・風荷重算定法の体系化を行い、最新の送電用鉄塔設計標準（JEC-5101-2022）に反映しました[2]。

ギャロッピングは、電線に雪が付着することによって断面形状が変化し、その形状と作用する風の条件が揃ったときに発生する大振幅に至る電線振動です。図2に示すように、主に上下に大きく揺れる振動現象で、その動きが馬の跳ねている様子に似ていることから、ギャロッピングと呼ばれるようになりました。異なる相の電線が接近することによる電気事故や、電線の張力変動により支持金物や鉄塔の疲労損傷などにつながる可能性があります。研究の詳細は割愛させていただきますが、私が最も専門とするテーマであり、観測・風洞実験・数値解析に基づき、その発生メカニズムや応答振幅推定手法について多くの研究を実施してきました。評価の難しさは、時々刻々着雪形状が変わり、少しの着雪形状の変化により応答が大きく変化する点にあります。どのような形に着雪が発達するのかを明らかにすることが、最大の難関となっています。

塩雪害は、塩分を含む雪が、電線と鉄塔の間の絶縁性を担保する「がいし」に付着することにより、がいしの絶縁抵抗が下がって電気事故へ至るものです。電気的な特性や部分放電による着雪体の融解状況などとの関係も影響しますが、複雑な形状（ヒダ状）のがいしに、どのように着雪が発達するのかを明らかにすることが、塩雪害の発生予測・対策立案のために重要となります。

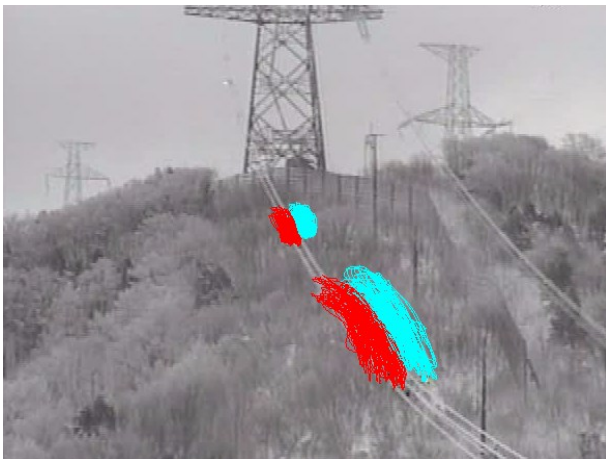


図2 4 導体送電線のギャロッピングによる電線軌跡[1]

### 構造物への着雪・落雪推定に関する最新の取り組み

現在は、送電線の雪害に関する研究を通じた経験を活かして、様々な構造物を対象にした着雪・落雪被害を防ぐための研究に着手しています。構造物への着雪・落雪を扱う難しさは、気温・湿度・風速・日射などのわずかな気象条件に応じて、全く様相が異なることにあります。さらに、構造物の特徴（形状・サイズ・剛性など）に応じて、着雪・落雪の発生し易い気象条件やその進捗が異なります。しかし、これらを引き起こす物理現象には普遍性があると考えられ、様々な構造物で発生し得る着雪・落雪に起因する雪害を防ぐためには、着雪から落雪までに生じる一連の物理プロセスを明確にした上で、各プロセスにおいて起きている現象を解明・モデル化し、それぞれに気象条件・構造形態がどのように影響するかを明らかにすることが必要です。そこで、着雪から落雪までに生じる現象を、雪の①飛散、②衝突、③付着、④成長、⑤融解、⑥脱落に分けて、一つずつ現象を解明して、それぞれのプロセスを力学的に評価できる手法の構築を進めています。例えば、③のプロセスにおいては、風に乗って雪粒子が構造物に衝突したとしても、着雪に至るのは衝突した雪粒子の一部であり、粒子の性状（湿り具合、密度、結晶構造）や衝突速度・角度に応じて着雪率が異なります。そこで、自然雪を模擬した人工雪が生成できる低温実験設備を用いて、風洞内に設置した板状試験体に雪粒子を衝突させて、衝突速度・角度に応じた着雪率を測定する方法を開発しています（図3）。

様々な要因が影響しあう複雑な現象であるため、その全容解明は挑戦的なテーマですが、道路・鉄道・電力・通信などの広い分野にわたる着雪・落雪被害への有効な対策技術、予測手法の確立のためにも、研究を進めていきます。

### 参考文献

- [1] 松宮ら，雪氷，vol. 80，Issue 5，pp. 461-474，2018.
- [2] 松宮ら，電力中央研究所報告，SS21006，2022.

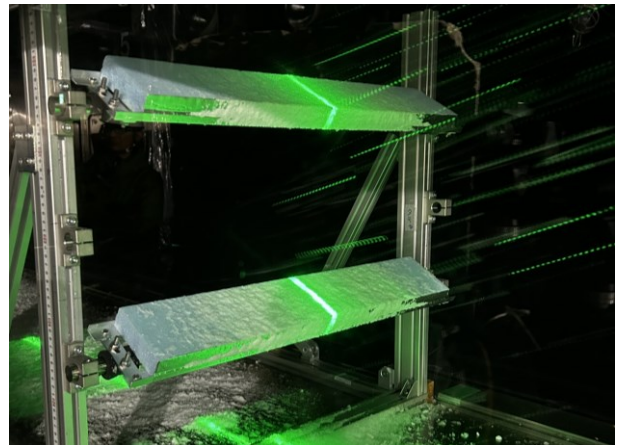


図3 低温風洞内での着雪実験による傾斜平板への着雪量の計測と雪粒子のパルスレーザーによる可視化

# 豪雨を鎮める気象制御

社会基盤工学・水文気象工学分野・准教授 山口 弘誠

## はじめに

豪雨をもたらす洪水・氾濫に対して、これまで人類は水を治める（＝治水）技術を培ってきて人類の生命と財産を守ってきました。とりわけ、明治時代以降、堤防などの西洋からの土木技術を導入し生命と財産を守ると同時に、ある意味で人と自然を規定する（切り分ける）という解釈をしてきたように思います。昨今、全国各地で毎年のように激甚な豪雨災害が発生していますが、地球温暖化や都市のヒートアイランド化によって豪雨が強まっていることが指摘されていて、今後もその傾向が強まると推測されています。地球温暖化も都市のヒートアイランド化もそこには人間活動が大きく影響しており、人類が自然に対してやり過ぎてきた結果のしっぺ返しではないかと考えます。これを解決すべき責務は人類にあり、“自然の懐”の中で生きているという意味を深く考究する必要があると考えます。

内閣府が主導するムーンショット型研究開発・目標 8 のもと、2050 年までに激甚化しつつある豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現するために、ゲリラ豪雨と線状対流系豪雨を対象として、それらの豪雨の発生・発達過程に介入することによって豪雨の強度や発生頻度を抑制するための研究開発に取り組んでいます。人工降雨に代表されるように渇水地域において雨を増やす研究開発が世界中で行われてきましたが、本研究では豪雨を抑制するための研究という点が目新しい観点です。

現状では豪雨の発生過程を陽に表現する数値気象モデルは限られていて豪雨の発生・発達過程への人為的介入による豪雨の抑制効果を評価することが困難です。そのため、まずはそれらのモデル開発に注力し、さらに数値気象モデルと模型実験・現地観測による豪雨制御手法を数値的に構

築するとともに、豪雨の発生・発達に効果的にインパクトを与える工学的手法を開発していきます。その際、複数種類の工学的手法を考案し、それらを多時点・多段階的にリアルタイムで最適に実施するための制御システムを構築します。加えて、豪雨制御による自然への短期的・長期的影響評価と ELSI (Ethical, Legal and Social Issues ; 倫理的・法的・社会的課題) と RRI (Responsible Research and Innovation ; 責任ある研究とイノベーション) の視座から、人が自然を改変することを許容される範囲（すなわち、“自然の懐”）を明らかにし、自然と人を繋ぐキーファクターとして豪雨制御技術を位置づけることによって、豪雨と人が共に生きる未来社会を形成していきます。図 1 に本研究の全体構想を示します。

## “制御”の意味するところ；豪雨を鎮める

我々が目指している制御は、豪雨を自由自在に操るような制御ではありません。日本には森羅万象に神を感じる古来の考え方があり、雨に対しても雨乞いや晴れ乞いといった祈りの風習や神話が伝えられてきています。自然や豪雨に対して畏敬の念を抱きつつも、将来強まる豪雨から大災害の発生を抑えるため、どうしても必要なときの切り札として発動する制御だと考えています。すなわち、“自然の懐”の範囲で豪雨を治めることを目指すことが重要であり、「豪雨を鎮める」ための技術として豪雨制御を位置づけたいと考えています。一方で、自然の懐の範囲内においては、言葉通り制御していく手法を開発していきます。そのため、多段階・多時点・多手法の操作を適切に行い、例え想定外のブレが起こったときにでもすぐに修正できるような制御手法を開発していきます。

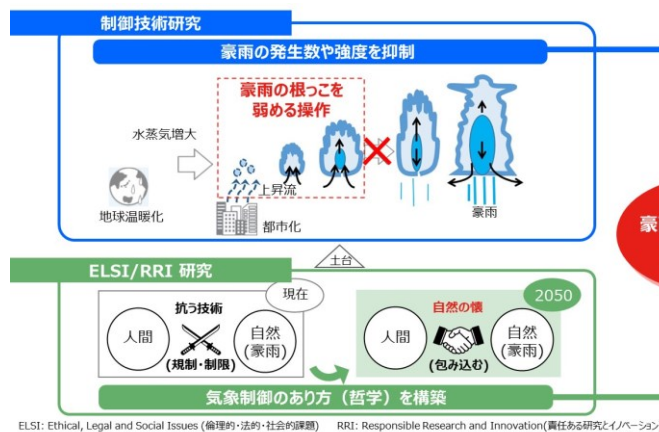


図 1 研究の全体構想

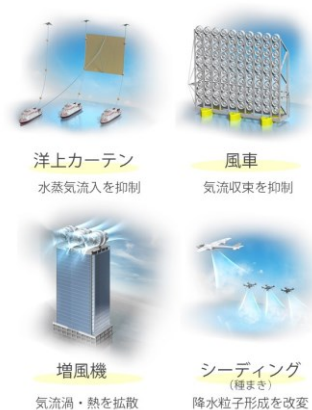


図 2 想定する操作手法

### 豪雨制御の難しさとこれまでにできてきたこと

端的に2つの課題あり、豪雨というスケールの大きな対象に対して人間が介入できる小さな操作をもって制御できるのかという技術的な課題、および、豪雨というこれまで受容してきた存在に対して人が制御して良いのかという倫理的かつ社会的な課題と考えています。

前者については、まず、制御効果をしっかりと評価できるかどうかという手法構築が必要であり、図2に示すように現時点で想定している介入操作のモデル化、事例再現のためのデータ同化技術等があり、熱や気流渦・収束やクラウドシーディングと豪雨の関係についてモデル化や制御効果の評価シミュレーションによって、豪雨のピーク強度を数割ほど抑制できるという結果も出始めています。例えば、図3に示すように、2008年神戸都賀川のゲリラ豪雨を対象として、地表面において風の抵抗体となる風車を設置して、乱流を解くことのできる気象のLarge Eddy Simulationモデルを用いて評価したところ、ゲリラ豪雨のピーク降雨強度が190mm/hから140mm/hへと約27%の抑制効果があることを示すことができました。

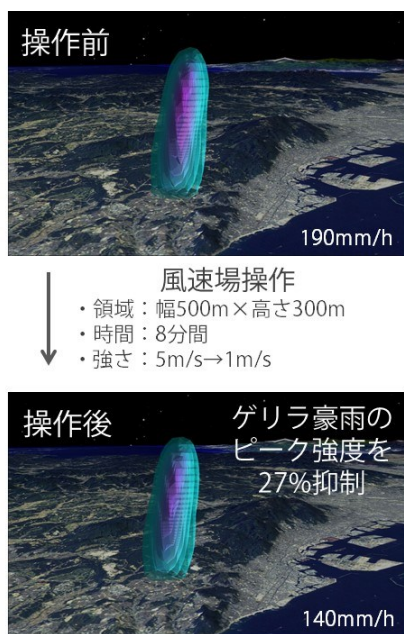


図3 2008年神戸都賀川のゲリラ豪雨に対する豪雨制御シミュレーション

また、狙いとしてカオス性を利用した非線形的な制御と、根本現象を削減する線形的な制御の2種類があげられ、両方とも解析対象に含めて進めています。さらに、制御用デバイスの製作という条件のもとで制御シミュレーションを行うというアプローチが求められていますが、ものづくりの観点からは必要性が第一であり、製作ができそうにないデバイスであってもまずはその要件を提示することから始まるという意見もあります。このように気象学的アプロー

チと工学的アプローチの双方向から自立的連携を通して検討しているところです。

その他に、制御シミュレーションを通してわかってきたこととして、豪雨のメカニズム解明にも大きく寄与できることが見えてきました。既往研究の多くの感度実験は例えば、地形を取り除いてみたり、水蒸気を領域一様に増やしてみたりという手法によってそれらの効果を評価するものが多いのですが、本研究では基本的にピンポイント的な物理量を変化させる感度実験を設計することになるため、局所的なメカニズム解明に寄与することがわかってきました。

後者の課題については、ELSIではなくRRIの重要性を掲げています。すなわち、技術中心的な考え方ではなく、社会像中心の考え方です。技術開発がありきで社会問題を解決するのではなく、目指すべき社会像ありきでそれを効果的に推進するための技術開発と社会問題解決であることを目指しています(図4)。そのために、豪雨を含む気象と人間社会と技術の3つの関係を位置づけるための概念的な考え方として“気象コモンズ”(羽鳥,2022)という概念を打ち出しています。地域住民が新しい制御技術を通して気象資源を主体的に活用・保全しながら、豪雨と共に暮らしていくための協働のしくみをとって捉える概念です。

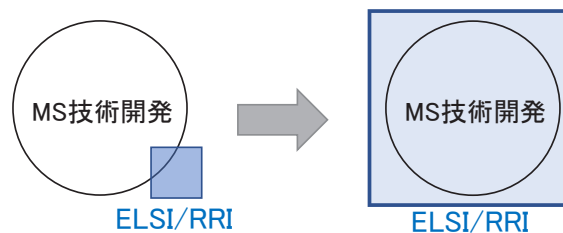


図4 全体を包含するELSI/RRI研究

### さいごに

社会の考え方の転換が重要であると考えており、コミュニティを広げつつ、研究成果を社会にうまく浸透させていきたいと考えています。まず、制御技術に関して、操作手法はもっと多くのアイデアが必要です。土木や気象の分野以外の未知の技術が豪雨制御に使える可能性を大いに秘めています。それから、豪雨制御を実施するためには“共”に資するという目的関数のもと受益者・受苦者の合意形成が必要であり、これこそ土木研究者だからこそ解決できる可能性があると思っています。2050年に向けて、夢の技術開発と防災の責務を両立していきたいと思えます。

Web サイト <https://rain-c.dpri.kyoto-u.ac.jp/>  
Instagram @futocoron2050

# Particle-based Modeling of Fracturing in Solids

都市社会工学・ジオマネジメント工学分野・准教授 ZHU Fan

## Introduction

Over the recent decades, a variety of novel computational methods have emerged for simulating complex multi-physics processes. The particle-based, meshfree methods have received increasing attention as alternatives to the classical, mesh-based methods. These particle-based methods represent materials by interacting points, which greatly ease the requirements on the connectivity of elements in the mesh-based methods. They are generally considered to be advantageous in modeling large deformation and fracturing in solids, as well as fluids. The peridynamics (PD) theory, as a non-local, meshfree, particle-based method, was introduced approximately 20 years ago. The method is considered a promising approach for simulating complex fracturing processes in solid and has been applied in modeling both brittle and ductile fractures in rock, ceramics, glass, metals, and composite materials. The prefix *peri* means “nearby” or “around” which describes the way the method works – a material point interacts with others around it – not only in the immediate vicinity but also further away (i.e., non-locally). In the PD theory, a domain is discretized into material points which interact through bonds. Each point possesses a zone of influence named *family* as illustrated in Fig. 1. Material behaviors are modeled by establishing proper constitutive laws at the bonds. Fracture is simulated by breaking the bonds continuously. The PD governing equation is formulated in an integral form rather than spatial partial differentiation, eliminating the need for the continuity of the material. This feature makes the PD theory particularly advantageous in modeling evolving discontinuities such as fracturing. In our research, we endeavor to further develop the PD theory with an aim to provide novel numerical tools for simulating and predicting material behaviors where significant fracture is involved. Recent work is introduced in this article.

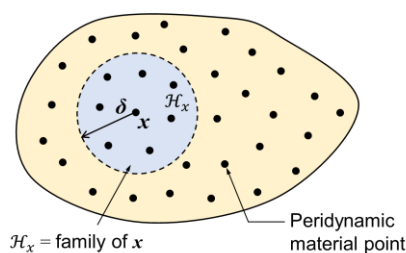


Fig. 1 Peridynamic domain and point interaction zone.

## Blasting-induced Fracturing

Blasting is commonly applied for excavation in rock mass. Numerical modeling of blasting-induced fracturing in rock has long been challenging owing to the complex physics involved in blasting. The extreme pressure and strain rate near blasting hole, the viscoplastic behavior of rock, together with the evolving fractures all need to be considered.

We apply a special formulation of the PD theory, namely the *non-ordinary state-based* PD, for modeling blasting-induced fracturing of rock. This formulation allows implementation of classical constitutive models in the PD framework. That is, the bond level deformation is first used to construct a deformation gradient tensor at each point. A constitutive model is then applied to obtain the Cauchy stress tensor which is further utilized to calculate bond level forces. To quantify material behaviors under blasting, the JH-2 model, together with a tension failure model, have been employed in the simulation. The former is often used to describe brittle materials under impact and can consider strain hardening, softening, and viscoplastic response of rock under extreme impact. The latter is used to model tensile radial cracks in rock. The tensile strength of rock is set to be a function of the strain rate, where higher strain rate is associated with higher tensile strength. To be rigorous, the blasting load is applied by modeling the detonation process of explosives with a JWL equation of state. Fig. 2 illustrates the simulated wave propagation in a rock specimen where blasting starts at the middle drillhole. The simulated fracture pattern is illustrated in Fig. 3. The simulation is able to capture both the fragmentation of rock near the blasting hole, the radial cracking, as well as some small local cracks. Both the peak stresses and fracture pattern compare reasonably well with relevant lab experiment. The work will be

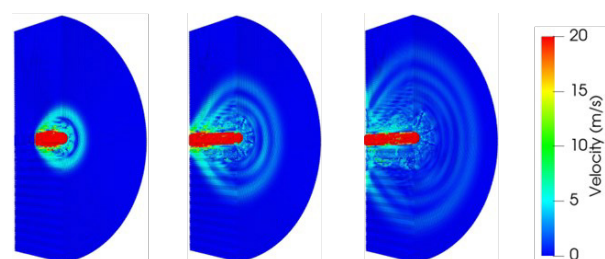


Fig. 2 Propagation of blasting induced wave in rock.

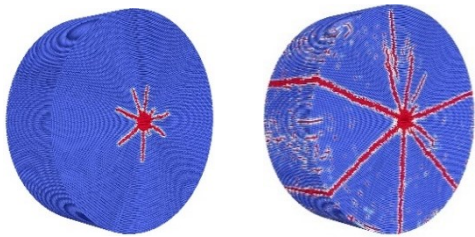


Fig. 3 Simulated rock fractures due to blasting.

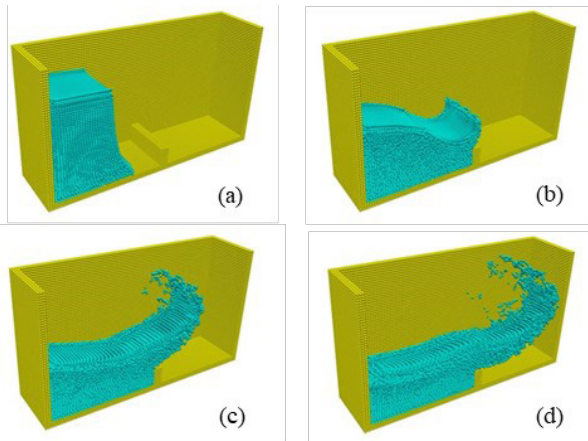


Fig. 4 Peridynamic simulation of water column collapsing.

further extended to study engineering blasting operations where detonation is set at multiple holes with time lag in a large scale, 3D, heterogeneous rock mass.

### Hydraulic Fracturing

Fluid-driven fracturing is a typical physical process in many engineering operations, such as hydraulic fracking technique used in the petroleum industry. Rigorous simulation of such process requires the assessment of solid deformation, fracturing, fluid flow, and interplays between fluid and solid. The diffusion of fluid in porous solid further complicates the problem.

It is worth noting that the PD theory also offers a potential way to simulate fluid flow. In contrast to the traditional, total-Lagrangian theory which is usually applied to solids with small deformation, a semi-Lagrangian formulation of the PD (SLPD) theory was recently developed. The feature of the SLPD is that the next-step stress in the material is decided by the current-step deformation of the material. The theory adapts to large deformation of solid materials (for example, soft matter) as well as fluid. Fig. 4 illustrates a simulation of a water column collapsing problem which compares reasonably well with relevant experiment. The SLPD is similar to the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method that they both simulate fluid with interacting points and an integral-type governing equation is employed. Nonetheless, the SLPD, when coupled

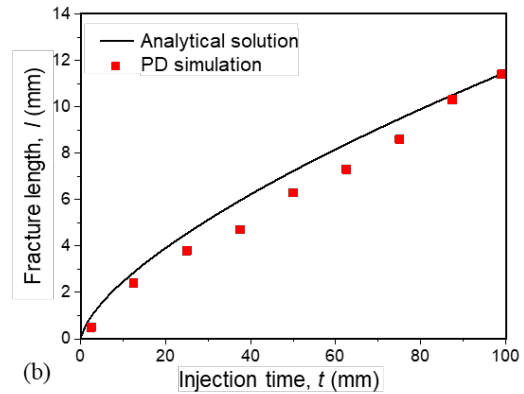
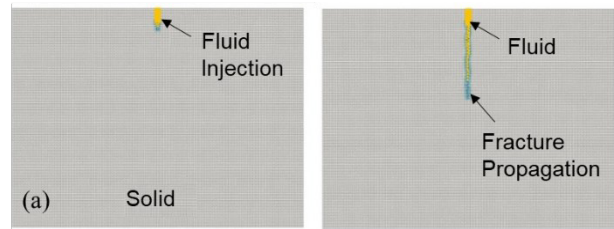


Fig. 5 Simulation of hydraulic fracturing. (a): fluid injection and fracture propagation; (b): Comparison with analytical solution.

with the traditional PD theory, offers a promising way to model fluid-driven fractures. This is however more complex and requires a proper fluid-solid interaction (FSI) model. Here a “fictitious point” model is applied for the FSI. The model assumes that some solid material points close to the fluid-solid interface to be fictitious fluid points, so that interactions are established between the real fluid points and those solid points near the interface. Illustrated in Fig. 5 is a simulation of a typical hydraulic fracturing problem where water is continuously injected into an existing crack in an impermeable solid domain (the KGD model). The simulated fracture propagation is found to match with the analytical solution.

### Remarks

The PD theory, as one of the particle-based methods, serves as an important alternative to the traditional mesh-based methods in handling problems with discontinuities. It eliminates the need of remeshing in mesh-based methods. The theory, nonetheless, remains at its infancy that significant future development can be expected. Implementing multi-physics modeling in the PD framework will greatly enhance the capacity of the tool in simulating many natural and industrial processes that involve fracturing under coupled mechanical, hydro, thermal, chemical, electric loads and more. Moreover, coupling the PD theory with other meshfree or mesh-based methods may offer solutions to simulating more sophisticated problems with multiscale material behaviors.

# 定住型社会（引っ越さなくていい社会）を目指して

都市社会学・交通行動システム分野・准教授 川端 祐一郎

## 続く東京一極集中

東京・千葉・神奈川・埼玉の一都三県には、日本の人口の約3割が居住していますが、日本以外のG7諸国をみると最大都市圏への人口集中は数%から十数%に留まっており、我が国における「東京一極集中」はかなり甚だしいものと言えます。戦前にはこれほど集中していなかったのですが、まず1950年代から60年代に急速な工業化に伴って、地方から東京・名古屋・大阪の三大都市圏への大きな人口移動が生まれました。そして1970年代になると、農村・漁村から大都市への人口移動が一段落し、田中角栄などが主導した地方への投資の活発化もあって速度は鈍化しましたが、集中化そのものは緩やかに続き、特にバブル期以降は三大都市圏の中でも東京の「一人勝ち」が進んできました。

ちなみに、転居するのは今も昔も、20代から30代にかけての若者が多い点は変わりありません。転居人口は高校を卒業する18歳で大きく増え22歳でピークになることから、進学と就職に伴う移動が中心であることが分かります。

## 望まない引っ越しの多発

東京へ出ることが本人の希望に合致しているならいいのですが、地方の高校でのインタビュー調査の結果などを見ていくと、個々の若者のニーズと現実のミスマッチの事例が目立ちます。「本当は関東の学校へ進学したいが、家庭の経済事情によって叶わない」という人がいたり、逆に「関東の大学へ進学し、卒業後は地元に戻りたいと思ったが、有望な就職先がない」というケースがあるわけです。

2011年に福井県の子供・若者2千名強を対象に行われたアンケートの結果をみると、高校生の時点で地元に残りたいと答える人が6割存在するのに対し、実際には6割が地元外に進学・就職していました。特に、進学する学力や意欲がある人の場合、田舎には相応しい選択肢が少なく、ほぼ全員が地元を離れざるを得ないのが現状です。

また最近では東京在住者の間で、地方移住を希望する人が増えているとも言われます。民間シンクタンク等の調査結果を総合すると、だいたい東京在住者の3~4割は地方移住に関心があり、1~2割の人は具体的な計画を持っているようです。地方移住は必ずしも「出身地へ帰る」ことを意味しませんが、地元を出て進学や就業に有利な東京へ引っ越してみたものの、本心では暮らし辛いと感じている人が多数存在することは推察されます。

## 引っ越しが多いと幸福感が下がる

アメリカでの例になりますが、1990年代から2000年代にかけて7千名強の市民を対象として行われたパネル調査によって、子供の頃に転居している回数が多いほど、主観的幸福感が低下することが明らかになりました。ちなみにこれは内向的な性格を持つ人の場合で、外向的な人は転居回数が多くても新たな人間関係を構築するのが比較的容易なため、悪影響が出にくいようです。また、内向的な人は、転居回数が多ければ多いほど、調査期間の10年のあいだに死亡する確率が高くなる傾向がありました。報告データから大雑把に推測すると、最も内向的な人から数えて3割~4割程度の人は、子供の頃の転居回数が増えるほど幸福感が低下し、そればかりか寿命すら短くなる可能性があります。また中国での研究例を見ると、転居回数の増加によって学業成績が下がるとか、反社会的行動が増えるといった報告もあります。

ただ、日本ではこれまでこうした調査が行われておらず、転居がもたらす心理的（及び身体的）な弊害については実証的な知見がありません。日本はアメリカや中国に比べると国土面積も狭く、都市間での文化、階層、人種構成の違いなどは比較的小さいと思われるので、さほど大きな弊害はないという可能性もあります。

## 日本人を対象とした調査

そこで私の所属研究室では、日本人において頻繁な転居が何らかの心理的弊害をもたらすのか否かについて調査を進めています。2023年1月に、20歳以上の男女1400名を対象に行なった調査の結果を分析すると、5歳から12歳のあいだの転居回数が多い人ほど、隣人との関係が希薄化し、それに伴って感情的幸福感、認知的幸福感ともに低下する傾向が見られました（図1・2）。感情的幸福は日々の生活の中でポジティブな気分をどれだけ持てるかという感覚的な幸福、認知的幸福は「私の人生はうまく行っている」というように頭で理解する幸福を意味し、両者を合わせて主観的幸福感と呼びます。なお、アメリカにおける先行研究と異なり、性格が内向的であるか外向的であるかに拘らず、幸福感を低下させる効果が見られました。

統計的に有意とは言えそれほど大きな効果ではないのですが、少なくとも頻繁な引っ越しが幸福感を低下させるという効果が日本においても生じ得ることは確認できました。今後、調査デザインを改善しつつ、さらに大規模なサンプルを取得するなどして、分析を深化させる必要があります。

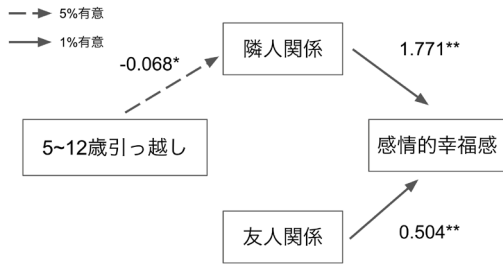


図1

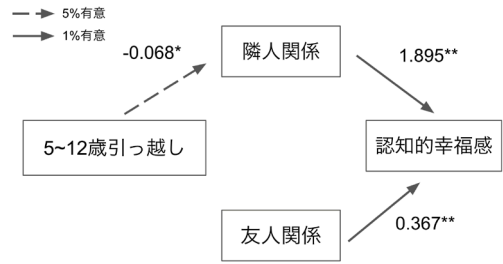


図2

### 引っ越し観と政策支持意識の関係についての分析

昭和の時代には、地方から東京への引っ越しが、しがらみだらけの田舎から抜け出す「解放」の意味を持つことがありました。しかし、流動性の高さは今も「自由」な社会の象徴であると言えます。しかし、人が頻りに居住地を変えることには上述のようなデメリットが存在することを忘れてはいけません。かつての若者は「地元の束縛」と戦ったが、現代の若者はむしろ「地元の喪失」に悩まされていると指摘する社会学者もいます。

また、「居住の流動性を好ましいと思うかどうか」は、現代の市民の政策選択を理解する上でも重要な指標である可能性があります。2016年にイギリスの国民投票でBrexit (EU脱退) 支持が多数派となったことや、アメリカでトランプ氏が大統領選に勝利したことは、多くのジャーナリストや研究者の予想を裏切るものでした。そして、「なぜ一般市民はこれほどBrexit やトランプ氏に惹かれるのか」について論争が生じたのですが、そこで注目を集めた主張の一つに、「グローバルな流動性の中で活躍する人」を重視した近年の政策への反発ではないかというものがあります。

この説は、現代の先進国の市民が「エニウェアズ」(Anywheres: 自分の活躍できる機会があるならどこへでも飛び回って仕事をしたい人) と「サムウェアズ」(Somewheres: どこか特定のコミュニティに長く定住して顔見知りにならなければならない人) に二分されていると考えます。1990年代以降の先進国は、財・資本のグローバルな取引や移民の流入を促進してきましたが、これはエニウェアズの価値観に沿った政策だったと言えます。そして伝統的で安定した地域社会を好むサムウェアズの人たちの鬱積した不満が、国民

投票や大統領選で爆発したのではないかというわけです。

かつては市民の政治的な価値観を、「左派 ⇄ 右派」「進歩派 ⇄ 保守派」といった対立軸で整理するのが普通でしたが、ひょっとすると現代においては、「流動性が高い社会を好むかどうか」(さらに単純化して言い換えれば「引っ越しが好きかどうか」)で整理したほうが、人々の考えを上手く掴むことができるのかも知れません。しかし、エニウェアズ/サムウェアズという枠組みは理論として提唱されているだけで、実証的な裏付けは乏しいものです。

そこで当研究室では、市民がエニウェアズとサムウェアズのどちらに寄っているかを評価するための心理尺度を開発し、それを用いて計測したエニウェア度・サムウェア度が政策に対する支持意識の決定要因として有効であるか否かを調べています。2021年1月に1200人の日本人を対象に行った調査の結果を分析すると、民営化やグローバル化の促進、同性婚や夫婦別姓の導入といった政策について、いずれもエニウェアズの人たちほど強く好むという傾向が見られました。また、サムウェア度の高い人は他人に対する思いやりが強いという結果も得られており、安定した地域コミュニティを築く上ではやはり「定住」を好む価値観が大きな役割を果たすと推測できます。

### 定住型社会へ向けて

これらはいずれも最近になって着手した研究なので、現段階でそれほど決定的な知見が得られているわけではありませんが、

- 意に反した引っ越しをせずにすむ社会を作ることによって、人々ももっと幸せになる可能性がある
  - 政策担当者は、引っ越しを好まない定住志向の人々の価値観をしっかりとすくい取る必要がある
- とは言えるのではないかと思います。

交通や物流の分野では、ヒトやモノをどれだけ効率的に移動させるかに関心を払うことが多いですが、考えようによっては、「移動しなくていい」ことこそが最も効率的だとも言えます。その意味で、定住型社会(引っ越しがなくていい社会)を実現することは、これからの都市政策の重要な目標となるべきではないかと私は考えています。若い夫婦が「実家」の手助けを得られるだけで子育てが随分楽になることを考えると、少子化対策としても有効かも知れません。

もちろん、極力引っ越しをせずにすむ社会を作るというのは簡単なことではありません。特に、地方への定住は十分な雇用があることが前提となるので、産業立地や交通ネットワークの再編、テレワークを始めとする情報通信技術の活用など、検討すべき課題が山のようにあります。引き続き、こうした研究に取り組んでいきたいと思っています。



# 廃水・廃棄物のメタン発酵と資源エネルギー循環

都市環境工学・水環境工学分野・准教授 日高 平

## はじめに

脱炭素社会形成に向けて、廃水・廃棄物処理分野から貢献しうる技術として、メタン発酵が挙げられる。メタン発酵は、廃水・廃棄物に含まれる有機物成分が持つ化学エネルギーを、微生物反応によりメタンガスとして水中から分離回収する技術である。含水率の高い廃棄物に対応するエネルギー回収技術になるとともに、発酵汚泥に含まれる栄養塩類は肥料などとして活用できる。本稿では、廃水・廃棄物のメタン発酵に関連する研究状況を紹介する(図1)。

## メタン発酵による発電

太陽光や風力発電により再生可能エネルギーとして得られる電力は、気候条件などの影響を受けやすく、発電量の変動が大きな点が課題として挙げられる。余剰電力の貯蔵方法として、蓄電池の活用が考えられるものの、現状では費用やレアメタルの確保などが課題である。その対応として、電気分解により水素ガスとして貯蔵・利用することも考えられている。水素はエネルギー源として有用であるものの、使用に際しては機器を新たに整備する必要がある点が課題である。そこで、メタン発酵槽にて水素および二酸化炭素からメタンを生成するバイオメタネーションが検討されている<sup>1)</sup>。メタンは、既設の都市ガス管で利用できる点

が利点である。電力が他の再生可能エネルギーでまかなわれれば、メタンガスを発電ではなく直接熱利用することで、メタンガスが有するエネルギーをより効率的に利用できる。ただし、メタン発酵槽への水素投入により pH が影響を受けるなどの課題があり、適切な運転管理が求められる<sup>2)</sup>。

再生可能エネルギーの負荷変動を吸収するために、農村地域では、メタン発酵槽の運転およびガス発電を調整することも考えられている。メタン発酵槽は通常一定の運転条件での設計が基本となるのに対して、発酵原料投入を柔軟に運用することが可能である。ガス発電を調整するには、ガス貯留槽の容量を大きくすることで対応できるものの、可燃性ガスを多量に保管することには制約がある。再生エネルギーを地産地消する農山漁村エネルギーマネジメントシステム(VEMS)の中で、農村地域での電力消費特性をふまえながら発電量を調整するために、メタン発酵槽への発酵原料投入でメタンガス生成を制御する手法が検討されている<sup>3)</sup>。

## 混合メタン発酵

従来下水汚泥、生ごみなどについて個別にメタン発酵施設が整備されてきたのに対して、近年規模の小さな下水処理場に生ごみやし尿なども含めた地域バイオマスを集約す

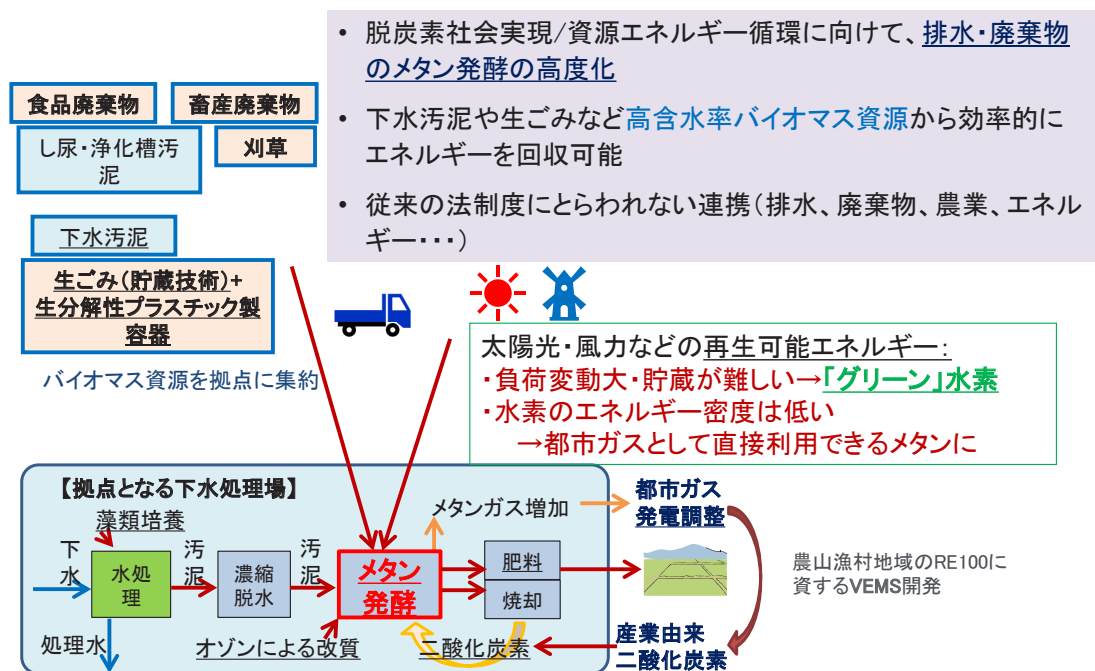


図1 メタン発酵関連研究の概要

る混合メタン発酵が導入されつつある。下水汚泥のみなど単一原料のメタン発酵に対して、種々の原料を混合することで、処理の安定性や相乗効果など様々な利点が報告されている。混合メタン発酵汚泥の肥料利用などと組み合わせると、効率的なエネルギー・資源利用が可能になるとともに、地域の資源循環を生み出し、電力・農業などの分野へも貢献が期待される<sup>4)</sup>。ただし、廃棄物としての法律上の扱いなどについて、導入に際しては調整作業が煩雑になることが課題である。

### 藻類培養とメタン発酵

下水処理で広く用いられている活性汚泥法では、酸素供給や攪拌のための曝気に要するエネルギー消費量の多いことが課題である。反応槽内で微細藻類を培養し、光合成により供給される酸素を活用することで、下水処理の省エネルギー化が期待される。更に生産される藻類バイオマスは、混合メタン発酵により新たなエネルギー源として活用される。

下水処理への微細藻類培養の組み込みに向けての課題の一つに、微細藻類の固液分離が挙げられる。沈殿しにくい藻類に対して検討されている膜分離技術は、夾雑物の多い下水処理での適用に際しての課題がある。活性汚泥と混合することで微細藻類を同時に沈殿させる方法では、活性汚泥性状の変動による沈殿回収効率の不安定性が課題である。優れた沈降性を有するフォトグラニュールを用いる下水処理技術が開発されており、メタン発酵と組み合わせたエネルギー回収の可能性が期待される<sup>5)</sup>。

### メタン発酵と肥料利用

下水汚泥の年間発生量約 230 万トン（固形物）中に、リンは約 5 万トン含まれているのに対して、現状で肥料利用されている割合は約 1 割である（国土交通省資料）。日本では、主な化学肥料の原料である尿素、りん酸アンモニウム、塩化カリウムを、ほぼ輸入に依存しており、近年価格が高騰している。下水汚泥の肥料利用の方法としては、コンポスト化およびリン回収などが挙げられる。リン回収はメタン発酵汚泥や焼却灰から回収する方法が導入されている。令和 4 年 9 月に新たな「バイオマス活用推進基本計画」が閣議決定され、下水汚泥の肥料化は講ずべき施策のひとつとして挙げられている。下水汚泥の肥料化を推進することは、未利用資源の活用による循環型社会の形成だけでなく、肥料の国産化・安定化した供給にも繋がる重要な課題である。

農林水産省では、食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現する「みどりの食料システム戦略」を令和 3 年 5 月に策定している。その中では、「バ

イオ液肥（バイオガス発電の副産物である消化液）の活用による地域資源循環の取組の推進」が取り上げられている。メタン発酵汚泥に含まれる栄養塩を周辺農地で肥料として活用し、農業系の廃棄物が再びメタン発酵槽に戻ることで、地域内での資源循環が実現する<sup>6)</sup>。

メタン発酵汚泥の肥料価値を高める方法として光合成細菌の活用が考えられる。光合成細菌とは、通性嫌気性の光合成機能をもつ細菌の総称であり、紅色非硫黄細菌などが含まれる。窒素固定を行うことを含めて増殖した光合成細菌の菌体は高い栄養素を有しており、肥料や飼料などの有価物としての適用性が報告されている。光合成細菌を肥料として活用する際には培養材料が高価であることが課題となり、個人農家での利用にとどまっている。光合成細菌は、有機酸などを利用して増殖する。有機酸は、下水汚泥や生ごみなどのメタン発酵過程で生成されるので、ここから得られる有機酸を活用し、窒素やリンなどの肥効成分を含むメタン発酵汚泥中で培養することで、既存施設および集約される廃水・廃棄物を活用しながら、メタン発酵汚泥の肥料価値を向上できる<sup>7)</sup>。

### おわりに

廃水・廃棄物のメタン発酵は、古くから導入されてきた技術であり、近年資源エネルギー循環の観点で改めて注目されている。多様な関係者と連携しながら、メタン発酵技術の高度化を目指したいと考えている。

### 参考文献

- 1) 日高：下水汚泥の嫌気性消化槽に水素を投入するバイオメタネーション、水環境学会誌, **46(A)(4)**, 134-137, 2023.
- 2) 足立ら：バイオメタネーションにおける水素供給速度と有機酸蓄積の関係、土木学会論文集 G (環境), **77(7)**, III\_347-III\_357, 2021.
- 3) 友成ら：廃棄物系バイオマスのメタン発酵に及ぼす有機酸濃度および pH の影響、土木学会論文集 G(環境), **78(7)**, III\_213-III\_222, 2022.
- 4) 日高：多分野連携・嫌気性消化による排水からの資源・エネルギー循環、環境浄化技術, **19(3)**, 40-43, 2020.
- 5) 日高ら：自己造粒藻類による排水からのエネルギーおよび放射性物質の回収、第 22 回環境技術学会年次大会予稿集, 109-110, 2022.
- 6) 中村ら：みどりの食料システム戦略におけるメタン発酵の貢献、農業農村工学会誌, **90(9)**, 11-15, 2022.
- 7) 鈴木ら：肥料価値向上を目的とした下水汚泥の嫌気性消化脱水分離液の光照射培養、水環境学会誌, **44(1)**, 27-33, 2021.