

地震時によく揺れる地盤はどんな地盤？

防災研究所・耐震基礎研究分野・教授 澤田 純男

一般の常識は非常識？

熊本地震や阪神大震災での地震被害分布からわかるように、地震被害は特定の狭い地域に集中し、ほんの数10mしか離れていない場所でも被害の程度が大きく異なることは、よく見られる現象です。その大きな原因の一つとして考えられているのは、地盤による地震動の増幅の違いです。

ここで皆さんにひとつ質問したい。「地震時によく揺れる地盤はどんな地盤でしょうか？」一般によく得られる回答は、「軟弱な柔らかい地盤では地震時によく揺れるだろう」です。我々地震工学者は地盤の固さ柔らかさを、S波の伝播速度（ここでは β で表す）で表現するので、この回答をもう少し学術的に言い直すと、「S波速度 β が小さい地盤では、 β が大きい地盤に比べて地震時によく揺れる」となります。この考え方は一般の方々の間では「常識」と考えられているようです。昭和23年福井地震調査研究速報で高橋龍太郎・東大教授が「(地震動の大きさを示す指標は) 大凡其の地層に於ける地震波の速度(β のこと)の平方根に逆比例する様に見えるのは面白いことである」と述べています¹⁾。

ところが、現在の地震工学の専門家は、そのように考えていないのです。例えば道路橋示方書の耐震設計編では、設計地震動の大きさを決めるための地盤種別は、地盤の固有周期で定義されています。表層1層+基盤からなる地盤では、地盤の固有周期 T_g は表層厚を H とすると $4H/\beta$ で求められます。つまり厚くて固い地盤と、薄くて柔らかい地盤は、固有周期が同じとなり、地震動の揺れも同じ。先ほどの「常識」とは異なっていることがわかります。また、最近では、地盤の揺れやすさの係数を求めるために、深さ30mまでの平均S波速度 V_{s30} がよく使われます。S波速度を使うのでこれは地盤の固さを表しているように思えますが、実際に計算してみると V_{s30} は地盤固有周期と大きな相関を持っており、どちらかと言えば地盤の固有周期を表す指標であると言えます。一般の方々の「常識」と耐震設計法等とが、どうして違うのでしょうか？

地震動増幅の基礎

上述した疑問は、実は私が学生の頃から持っていたものですが、一般の「常識」を説明できる理論がなかなか見つかりませんでした。きっかけは2002年に地震工学シンポジウムに発表された国生剛治・中央大教授の論文でした。この論文では表層地盤における上昇波の波動エネルギーと基盤入射波の波動エネルギーの比を議論していました²⁾。

まず図1を用いて、減衰の無い表層1層+基盤からなる地

盤で地震動が増幅される基礎的な理論を説明します。基盤に上向きに入射された地震波 u_B の大部分は、地層境界を透過して①のように表層上向きに伝播します。地表面で全反射して②のように下向きになり、地層境界で基盤に抜ける波と反射して上向きになる波③に分かれます。このように表層内で地表面と地層境界で反射を繰り返します。

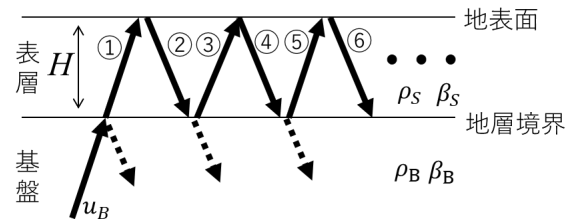


図1 表層1層+基盤における地震動の増幅

ここで入射波 u_B が正弦波の場合を考えます。このとき上昇波①と③と⑤…の位相(山と谷)がぴったり一致する周期があります。このうち最も長い周期が地盤固有周期 T_g です。固有周期と同じ周期を持つ波が入射した場合には、①と③と⑤…の波はどんどん重なり合って大きな波となります。これが「増幅」の正体です。固有周期以外の周期の波は、うまく重ね合わされずに小さな波になります。表層における上昇波①, ③, ⑤…を全て足し合わせた波 $u_s(t)$ の増幅特性 $A_s(f)$ を、慣例に従い横軸に周波数(周期の逆数)をとり両対数軸で描いたのが図2の実線です。矢印は地盤固有周期の値を示していますが、増幅率のピークの位置を与えているだけで、本質的に増幅率の値そのものを決められるパラメータではないことが分かります。なお、地表面で観測される波の増幅倍率は、上昇波と下降波①, ②, ③, ④, ⑤…がすべて重ね合わされた波となりますので、 $A_s(f)$ の2倍となります。

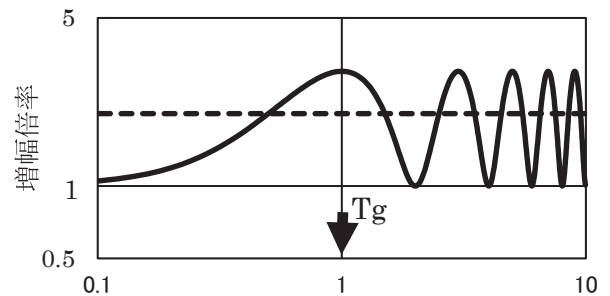


図2 基盤入射波に対する表層上昇波の増幅倍率

さて、波動エネルギーは、地震動の速度の二乗 $\dot{u}(t)^2$ の全時間積分 $\int \dot{u}(t)^2 dt$ に地盤の波動インピーダンス（密度 ρ と β の積）を掛けた $\rho\beta\int \dot{u}(t)^2 dt$ です。国生教授の論文²⁾では表層地盤における上昇波の波動エネルギーと基盤入射波の波動エネルギーの比は、1より大きな値が求められていました。これにふと疑問が生じたのです。「エネルギー保存則はどうなっているのだろうか？」と。そこで u_B にインパルスが入射したときの表層地盤の上昇波①③⑤…の和の波動エネルギーを手計算してみました。その結果は、なんと入射波の波動エネルギーと表層地盤の上昇波の波動エネルギーが一致していたのです。これは望外の「発見」でした。その後ホワイトノイズが入射した場合でも波動エネルギーは保存されることが分かりました。インパルスもホワイトノイズも、全ての周波数成分が均等に含まれています（フーリエ振幅スペクトルが一定）。なお、通常地震波は周波数成分に偏りがあるので、一般にはエネルギー保存則は満たされません（国生教授の論文²⁾通り）。

NED 保存則

一般にはエネルギー保存則は満たされることが分かったので、そのままではこの理論は使えません。そこで先ほど示した地盤の増幅倍率に注目します。これは振幅1のインパルスやホワイトノイズが入射したときの表層上昇波のスペクトルと同一です。したがって上述の保存則が満たされます。

パーセヴァルの等式から、表層における上昇波速度の二乗全時間積分 $\int \dot{u}_s(t)^2 dt$ は、 $A_s(f)^2$ の全周波数平均 $\langle A_s(f)^2 \rangle$ と等しいので、表層の $\rho_s\beta_s\langle A_s(f)^2 \rangle$ と基盤 $\langle A_B(f)^2 \rangle \equiv 1$ の $\rho_B\beta_B$ が、上述の保存則から一致することがわかります。我々はこれをNormalized Energy Density (NED, 正規化エネルギー密度)と名付けました。

以上は表層1層+基盤の単純な地盤モデルでの議論ですが、驚いたことに、表層が多層であっても各層でNEDが保存されることが数値解析からわかりました。つまり $\rho_i\beta_i\langle A_i(f)^2 \rangle$ の値が基盤を含めて各層 i ですべて同じ値となります。この結果を2011年にWave Motionという雑誌に発表しました。実はこの論文、あまりに基礎的な理論を扱ってしまったらしく、地震学関係や地震・地盤工学関係の雑誌からスコープに合致しないという理由で散々門前払いされ、ようやく物理学系のこの雑誌に拾ってもらいました³⁾。

新しい揺れやすさ指標

図1の破線は $\langle A_s(f)^2 \rangle$ の平方根をとった値を示しています。つまり地盤の増幅倍率 $A_s(f)$ のRMS（二乗平均平方根）なので、「地盤の揺れやすさ」の指標となり得ます。この値が大きい地盤は増幅率が大きい、すなわち「地震時によく揺れる地盤」ということになります。前節の理論から $\sqrt{\rho_s\beta_s}\sqrt{\langle A_s(f)^2 \rangle} = \sqrt{\rho_B\beta_B}$ なので、この新しい揺れやすさ指標は $\text{RMS}[A_s(f)] =$

$\sqrt{\rho_B\beta_B}/\sqrt{\rho_s\beta_s}$ と、基盤と表層の波動インピーダンスから求められます。基盤と表層の密度 ρ_B 、 ρ_s の違いはあまり大きくありませんから、新しい揺れやすさ指標は表層のS波速度 β_s の平方根にほぼ逆比例し、高橋教授の指摘¹⁾通りとなります。つまり、「表層のS波速度 β_s が小さい地盤では、 β_s が大きい地盤に比べて地震時によく揺れる」という一般の常識と一致します。修士課程を修了して25年、ようやく学生時代の疑問を説明できる理論を構築することができました。

この新しい指標の不思議なところは、最表層と基盤の間に何層入っていても、この関係が成り立つことです。つまり、中間層の情報は必要なく、基盤と最表層の波動インピーダンスだけで、その地盤の揺れやすさがわかります。あまり広くない地域内の相対的な揺れやすさだけなら、基盤のインピーダンスは地域内一定と仮定できますから、最表層のインピーダンスの分布さえ分れば良いこととなりますので、ボーリング調査も不要です。

今後の展開

地震被害を考える上では、地盤固有周期も重要な指標の一つです。したがって、ここで紹介したNED保存則に基づく指標と、地盤固有周期の両方を組み合わせ、精度の良い地盤の揺れやすさの指標を開発する必要があると考え、現在も模索を続けています。さらに、地盤の減衰の影響も検討しています⁴⁾。

また、表層地盤の波動インピーダンスを、地表面に置くだけで簡単に測定することができる計測装置を開発しています。既に理論的な検討⁵⁾は済み、実験や現地測定を実施して本当に精度よく測定できるかどうか検証している段階です。

なお、私の素朴な疑問から始まったこの研究ですが、理論の構築等は、同分野の後藤浩之准教授の貢献によるものです。

参考文献

- 1) 高橋龍太郎：鉄道の被害二三について、昭和23年福井地震調査研究速報、日本学術会議、1949.
- 2) 国生剛治、万谷昌吾、本山寛：表層地盤における地震波のエネルギーの流れ、第11回日本地震工学シンポジウム、2002.
- 3) Goto, H. et al. : Conserved quantity of elastic waves in multi-layered media: 2D SH case - Normalized Energy Density, Wave Motion, Vol. 48, pp. 602-612, 2011.
- 4) Goto, H. et al. : Direct estimation of near-surface damping based on normalized energy density, Geophys. J. Int., Vol. 194, pp. 488-498, 2013.
- 5) Goto, H. et al. : S-wave impedance measurements of the uppermost material in surface ground layers: Vertical load excitation on a circular disk, Soils and Foundations, Vol. 55, pp. 1282-1292, 2015.

ロボット技術を用いた河川流量の自動観測システムの開発

社会基盤工学・水理環境ダイナミクス分野・准教授 山上路生

はじめに

河川流量は洪水時のみならず低水時においても適切な河川計画や管理にとって必要不可欠なファクターである。今日最も普及している流量観測法は浮子法である。この伝統的手法は原理がシンプルな長所をもつがデータの信頼性や計測作業の機動性においては課題がある。これを打破するため様々な新手法が提案されている。特にビデオカメラや赤外線カメラを用いる画像解析法や水中超音波を用いるADCP法は正確な流量算定に必要な主流速の横断プロファイルを得ることができ大変魅力的である。ただしいずれも長所と短所を併せ持つため、依然として鋭意研究が続けられている。

そこで著者は既存の方法とは全く異なる切り口から次世代の観測システムの開拓・開発を進めてきた。このシステムでは自律航行が可能なマイコン搭載のロボットボートを用いる。ロボットは目標計測点まで移動して、そこで静止するようにメインスクリューを制御する。対向流速によってスクリュー回転数が変化することを利用して流速を評価することが本ロボットの真髄である。サイドスラスタにより平面2次元運動も可能である。3年前に開発した1号機は、対応流速が15cm/s程度しかない弱点があったが、その後高速化や制御技術の向上を狙って、試作機のバージョンアップを続けている。

1号機では位置計測に超音波を用いたが、フィールドでの使用を念頭に最新型ではカメラ画像によるトラッキング技術を導入している。ロボット投入地点と計測地点を含めた画像の中でロボット位置をリアルタイム追跡し、位置情報をロボットに無線送信して自動航行を実現させる。この方法はGPS信号が届きにくい屋内水路でも使用可能である。複数のセンサやモータを一括制御し、さらにPCとの情報通信を行うために、ロボットの処理装置としてarduinoマイコンを採用している。

以下この新しい流量観測の試みを紹介する。

システムの概要

画像情報を援用する運用イメージを図1に示す。計測サイトにUSBカメラをセットしロボットのスタート位置と目標計測位置を一画面に収まるように調整する。カラートラッキングするため、背景とコントラストが大きくなる色の目印を船体上部に取り付ける。暗室環境の室内ではLEDのペン型ライトを用いた。野外の場合は日照条件によってマーク色に変化する問題があるが、これを最小限に抑えるために赤色布を用いた。またヨー角検出のため、マークはロボットの中心軸に沿って細長い形状にする。

単一カメラを河岸から使用する際、斜め上方から見下ろす形で撮影することになる。矩形領域四隅の基準点をもと

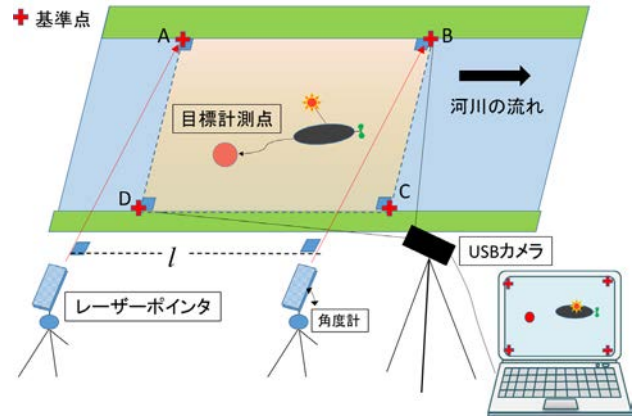


図1 システム運用の概要

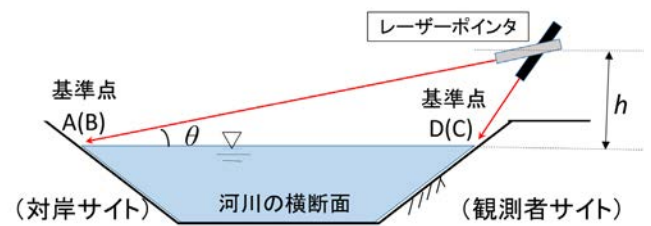


図2 基準点決定のイメージ

に射影変換し、変換画像上でポジショニングおよびヨー角検出を行う。

野外使用では、必ずしも人工的な基準点があるわけではないため図2のような工夫が必要である。主流に平行に距離 l だけ離れた2か所のレーザーポインタの設置場所を決定する。また両者のレーザー設置高さは等しくする。レーザー光は透過するため水面上を直接マークできないので水際を狙う。図のようにそれぞれ流向に対して直角方向に照射し、頭を上下に振って対岸側(AおよびB点)および観測者側の水際位置(DおよびC点)をマーキングする。レーザー設置高さ h と水面間の距離 l とレーザーの頭振り角度 θ を実測すれば基準点の2次元座標が計算できる。

基準点区間の川幅が変化せず水面がフラットであれば、ABCDが長方形となり画像上のマーク点より射影変換が可能となる。一般にレーザーポインタは屋外では視認性が低下するが、1000mWクラスのグリーンレーザーであれば、30m程度先でもレーザーマークが確認できた。

以上のトラッキング法により得た自位置とヨー角情報を制御PCからロボットにリアルタイムで無線送信することでロボットは計測点近傍まで自動航行する。計測点に近づくとPIDとよばれる制御法によって静止する。このときのスクリュー回転数を記録して、あらかじめ水路試験で得た校正曲線より実流速を算定する。

運動性能と流量評価の試み

最新の試作機の外観を図3に示す。全長は30cm、重さは

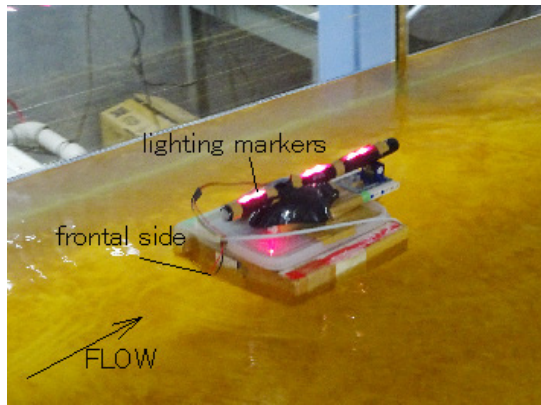


図3 実験水路を航行するボート型ロボットの外観

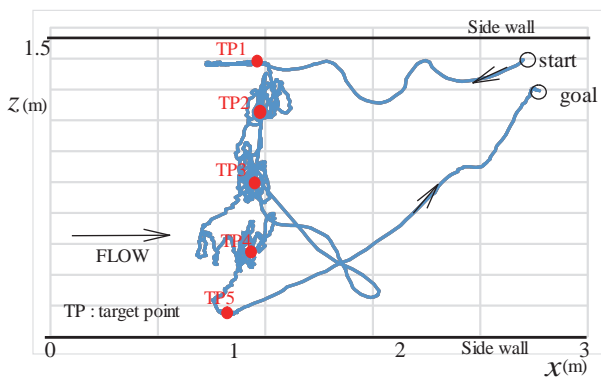


図4 実験水路における航行軌跡の一例
(水は左から右に流れる)

1kg程度で持ち運びに便利なサイズである。

図4は150cm幅水路(流量32ℓ/s, 水深12.5cm)を用いた室内試験におけるロボットの軌跡を示す。TP1～TP5は目標計測点位置で、ロボットがスタートしてから各計測点で静止後に帰還する様子が理解できる。

図5は京都市内の中小河川である天神川における野外試験の様子である。川幅4m程度の直線部を観測サイトとした。平均流速は20cm/s程度と非常に穏やかな流況の下で実施した。ある計測断面において横断方向に複数の計測点を設定し、ロボットを静止させた。比較のため電磁流速計(EMV)

による計測も実施した。

図6に結果を示す。ロボット、EMVの主流速の計測誤差はおおよそ10～20%であった。定性的な分布傾向は捉えている。現状では水面流速しか計測できないが、本システムは水深も計測できるため、ベキ乗則を適用すれば流量が概算できる。

今後は、ロボット位置を自動追尾するPTZカメラの導入によって、さらに大きなスケールの野外条件(10m幅オーダーの中小河川)に適用を目指して研究開発を継続する。

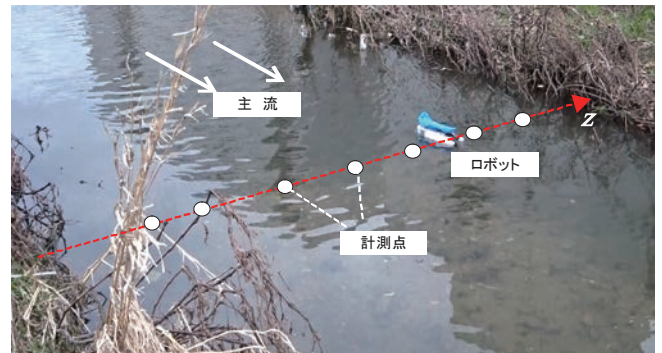


図5 天神川における流速計測の様子

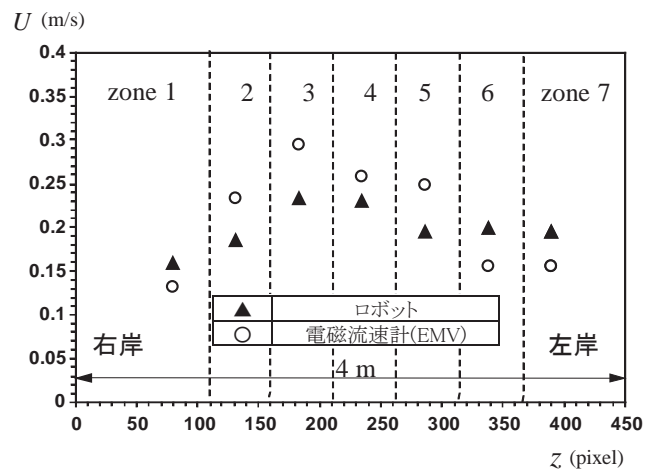


図6 天神川における主流速の横断方向分布

Effects of dynamic water table fluctuations on the behavior of NAPL contaminants in subsoil

Department of Urban Management • International Urban Development • Associate Professor Giancarlo Flores

Introduction

NAPL, short for Non-Aqueous Phase Liquids, is the name given to an important group of liquid contaminants characterized because they do not dissolve in water but do travel with it forming a physical interface. These NAPL contaminants are further classified into LNAPLs—Light NAPLs—when their densities are lighter than that of water, and DNAPLs—Dense NAPLs—when they are heavier.

Gasolines, motor oils, benzenes, and most other hydrocarbons, are examples of LNAPLs, while chlorinated solvents, coal tars, and polychlorinated biphenyls, PCBs, are examples of DNAPLs. All of these materials are widely used in civil and industrial applications and a huge amount of them has been spilled into the ground, all over the world.

The behavior of NAPLs in subsurface is usually described by means of the basic transport equations which are based on either static or single-cycle dynamic tests in laboratory conditions. These tests, due to the difficulty in the measurement of contaminant saturation under these conditions, are usually run in two-phase systems (either only water and NAPL, or water and air) and their results are then extrapolated to three-phase systems (water, NAPL, and air). It has been shown, however, that the behavior of these fluids when subjected to repeated cycles of drainage and imbibition (such as is usual in nature) changes over time, and may not be fully described by said equations when they are derived from static conditions. This further complicates cleanup processes as the predicted distribution of NAPLs differs from the real one.

There is a need, therefore, to better measure and predict the behavior of NAPLs in three-phase systems when subject to repeated dynamic water table cycles, and this has been one of the most important focus of my work in Japan.

Simplified Image Analysis Method—SIAM

To better study the migrating behavior of NAPLs in subsurface, in water-NAPL-air three-phase systems subject to repeated dynamic water table conditions, we developed the Simplified Image Analysis Method—SIAM—a laboratory technique designed to calculate the saturation of both water and

NAPLs in three-phase systems, by comparing digital photographs of said system with ones taken under a very specific set of initial conditions.

Figure 1, an image taken at an average beach, shows the basic principle of SIAM: that soil changes color according to the degree of saturation. As anybody who has played with sand at a beach knows well, the lighter-color, dry sand can be darkened by adding water, and the darker-color, wet sand, can be lightened by letting it dry. There is an obvious correlation between the degree of saturation, and the color of the soil



Figure 1. Changes in sand color due to saturation degree

In effect, when we prepare in the laboratory different samples of the same soil under different saturation degree values, we can see a progression in the degree of “darkness” of the soil (Figure 2).



Figure 2. Changes in sand color of sand samples prepared in a laboratory, under varying degrees of NAPL saturation

When comparing soil saturation (Equation 1) with average optical density (Equation 2), we find a linear correlation between them that can be expanded (Equation 3) when

analyzing pictures taken simultaneously with cameras fitted with two different band-pass filters, giving us a set of two equations with two unknowns (S_w , and S_o) that can be easily solved using a computer, to calculate the value of both water (S_w) and NAPL saturation (S_o) in three-phase systems, by analyzing digital pictures taken to the running system:

$$S = \frac{V_w}{V_w + V_a} \times 100\% \quad (1)$$

$$D_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_{ji} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(-\log_{10} \frac{I_{ji}^r}{I_{ji}^o} \right) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} D_i \\ D_j \end{bmatrix}_{mn} = \begin{bmatrix} (D_i^{10} - D_i^{00})S_w + (D_i^{01} - D_i^{00})S_o + D_i^{00} \\ (D_j^{10} - D_j^{00})S_w + (D_j^{01} - D_j^{00})S_o + D_j^{00} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Here, S is saturation, V_w is the volume of the fluid, V_a is the volume of air, D_i is the average optical density for a specific wavelength i , N is the number of pixels of the studied area, j is the number of the specific pixel, I_{ji}^r is the intensity of the individual pixel, I_{ji}^o is the intensity of a white pixel, and 00, 01, and 10 represent the three initial conditions of *fully dry soil*, *fully saturated by NAPL*, and *fully saturated by water*, respectively.

Solving the Equation set (3) for a specific area, gives us both its water and NAPL saturation values (S_w and S_o). This is the principle of the Simplified Image Analysis Method.

Current Studies

Some of the results we have obtained using the Simplified Image Analysis Method—SIAM—have been:

1. There is, effectively, a linear correlation between average optical density and saturation for NAPLs of different density and viscosity values ($0.73 \leq \rho \leq 1.20 \text{ g/cm}^3$; $1.4 \leq \nu \leq 1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) (Figure 3)

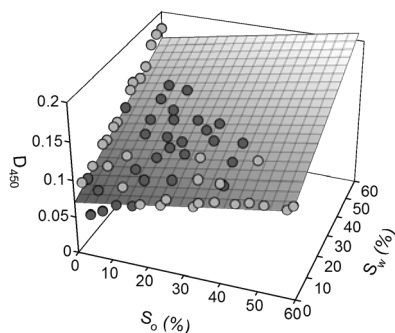


Figure 3. Water and NAPL saturation vs. optical density relationship for N-decane ($\rho = 0.730 \text{ g/cm}^3$, $\nu = 1.4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)

2. There is a logarithmic relationship between viscosity and residual saturation ratios for different NAPLs (Figure 4)

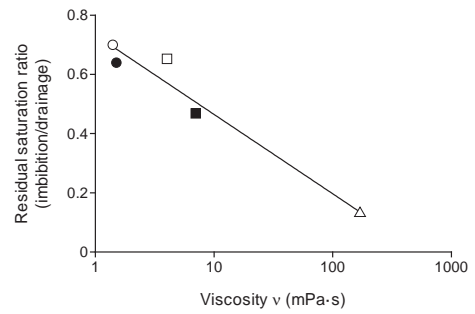


Figure 4. Relationship between viscosity and residual saturation ratio for different NAPLs

3. Saturation during repeated dynamic water table cycles strongly varies from cycle to cycle in regions where the water table fluctuates the most (Figure 5).

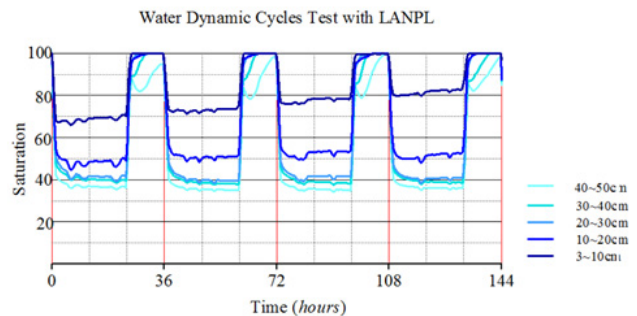


Figure 5. Water saturation at different heights, after four repeated dynamic water table cycles

The Future

While we have now a better understanding of the behavior of NAPLs under certain dynamic water table conditions in three-phase systems, more work needs to be done to improve the prediction of NAPL migration in subsoil in more general cases, and our current and future work focuses on these points:

1. The implications of *time* in the saturation-pore pressure (S - p) relationship
2. The understanding of the effects of repeated water table fluctuation cycles on said S - p relationship
3. The understating of the combined effects of having two or more different NAPLs contaminating the subsoil
4. The implications of water table fluctuations on the mitigation techniques applied against NAPL contamination

Our final goal is to improve the current mathematical models so that they can better predict the real distribution of NAPL contaminants in subsoil affected by fluctuating water table conditions, which will help us better remediate NAPL-contaminated soils.

システム思考とデザイン思考による景観まちづくりの実践

社会基盤工学・景観設計学分野・准教授 山口 敬太

はじめに

日本の土木工学分野において景観研究がさかんとなるのは、経済成長一辺倒の反省から生活の質の向上が求められた1970年代以降のことです。その後、太田川基町護岸の意匠設計に代表される公共施設のデザイン実践や、大学におけるデザイン教育が並行して進められてきました。とりわけ近年、公共調達においてデザインの質を問うコンペやプロポーザルの導入が進むなど、創造的人材のニーズはますます高まっています。ところが、欧米では環境デザイン系の専門職大学院による公共デザイン教育が確立しているのに対して、日本では公共デザインの教育や人材育成は未だ不十分で、その穴を埋めるように、土木工学教育の一環で景観・デザイン教育が行われています。

筆者自身もこれまで、主として景観や都市の形成に関する歴史研究に取り組んできましたが、その一方で、デザイン教育および地域づくりの実践に尽力してきました。本稿ではこれらの実践の中で得た、景観まちづくりの考え方を紹介致します。

公共施設のデザインからトータルな地域づくりへ

2000年代まで景観デザイン分野の実践は、公共施設のデザインが主題でした。しかし、景観法（2004年～）や歴史まちづくり法（2008年～）の制定を契機として、多くの都市が景観まちづくりの取り組みを開始し、地方創生や日本遺産選定がこの動きを加速させています。これにともない研究室の実践領域も、従来の景観調査や公共事業の景観検討にとどまらず、総合的な地域づくりの戦略立案や、まちづくり主体の育成などへと拡大しています。また、景観計画の方法も、従来の景観規制・誘導型ではなく、総合的な地域づくりとその結果として景観の持続・再生を目指すものに変化しつつあります（図1）。

地域づくりにおいては、「持続可能な地域づくり」を目標としつつ、その地域固有の資源や価値を把握した上で、それらの最大限の活用と、複雑な地域課題の解決を図るのが常です。その課題のテーマも、時代を経てますます拡張しています。これまでの景観デザインの課題は、自然環境や生活環境などの「環境」に関わる領域が目立っていましたが、近年では地域の活力やにぎわい、住民の交流や相互扶助、アイデンティティや愛着などの、多様かつ複雑な課題の一体的解決が求められています（図2）。こうした、多様かつ複雑な構造をもつ課題を解決するためには、デザイン思考によるアプローチが有効であると考えています。

システム思考による動的な景観形成メカニズムの把握

景観の評価は従来、視覚・知覚に基づく環境心理学的アプローチが主でありましたが、世界遺産の一カテゴリーであ

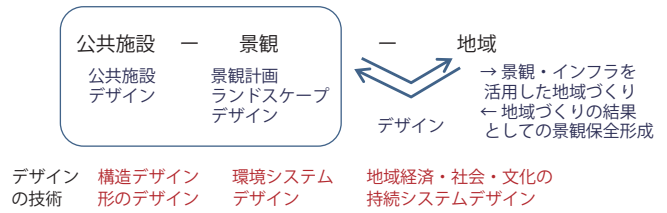


図1 デザインの領域の拡大

		地域づくりのテーマ（例）			
		環境	経済	社会	文化
価値創造	基盤	景観、生態系	規模、立地、集積、波及	社会関係(共助/協働)、多様性	歴史、個性、有形・無形遺産、シンボル
	観念/価値	環境観・自然観/持続可能性、美、生活の質	経済観念/地域振興、貧困解消、にぎわい	社会観念/関わり合い、安心、帰属、自治	文化的価値観/アイデンティティ、地域意識、愛着
	戦略(手段)	環境保全再生、景観整備	拠点整備、波及効果、差別化	共創、協働の場づくり	資源の保護・活用、価値付け、交流

図2 地域づくり戦略マトリックス（ある地域での作成事例）

るカルチュラル・ランドスケープ（Cultural Landscape）の学術調査や、欧州景観条約（2000年制定）以後の景観管理に関する議論を経て、自然と人間の相互作用から景観を理解するアプローチが広がりを見せています。日本においても国の文化財である「重要文化的景観」（2006年選定開始）の学術調査を契機として景観評価の方法論が変化し、議論が深められていますが、筆者らも「宇治茶の世界文化遺産登録」に係る文化的景観調査や東近江や近江八幡などの景観調査や景観計画の策定への参画を通じて、景観をシステムとして捉えるアプローチの有効性を検討してきました。その考え方は、端的にいうと次のようなものです。

景観は地域の人々の活動が目に見える形で現れた結果ですが、その背後には、それが形成される行動パターン、構造、関係する主体の意識・無意識の前提が隠れています。たとえば、茶畑景観の評価においては、その美しさのみならず、その背景にある茶業の情勢、茶農家の経営形態や技術的進化の過程、土地条件と周辺の開発圧力、土地利用規制、生業・生活を支えるインフラ、生業に対する農家の意識、生産の社会・組織体制など、景観形成に直接関わるさまざまな要素が相互に関わりあっています。この相互作用の歴史の変遷の分析を通じて現状を理解する、というアプローチをとります。

このアプローチをとる目的は2つです。一つは価値評価のためです。景観の価値評価においては、外観上の問題を扱うのみならず、景観形成のシステムがどう成り立ち、機能してきたか、現在までどのように質的に変容したかを明らかにすることこそが、景観の価値評価ならびに保全計画の論拠となります。もう一つは景観のマネジメント方策の立案のためです。その景観が将来にわたって持続し得るかどうかが、問題があるならその構造のどこに課題があるかを理解するためです。とりわけ歴史的景観は時代変化の影響を

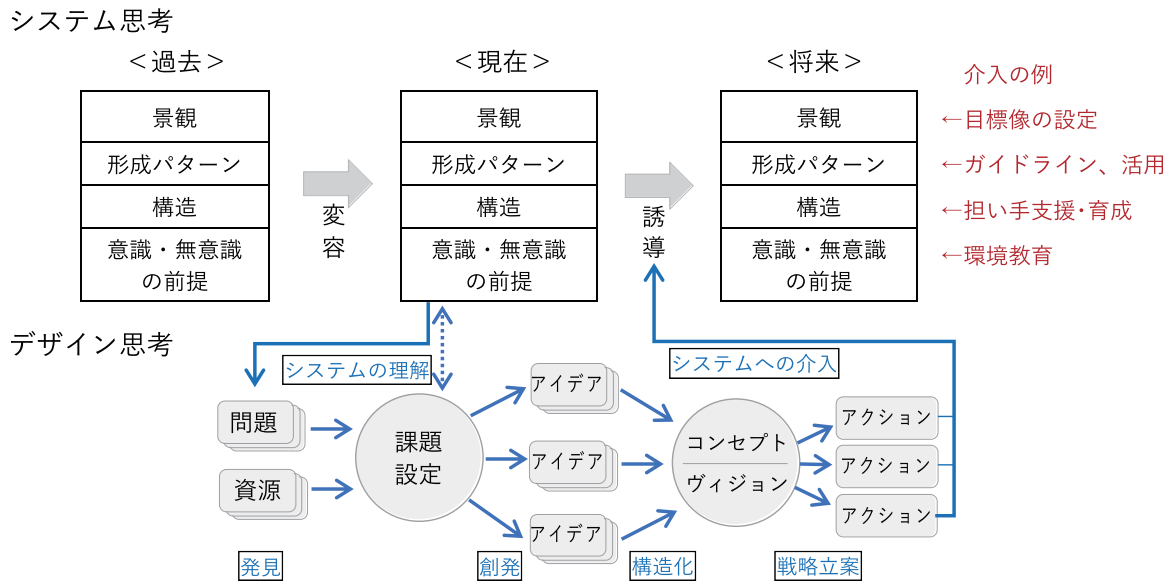


図3 デザイン思考による景観まちづくりの流れ

受けやすく、歴史的な地域資源を後世に継承するためには、現在の景観形成をシステムとして理解し、将来の変化や課題を予測することではじめて、どのポイントに介入すべきかが客観化できます。たとえば、景観の各要素とそれに関わる個人・社会集団、その背景となる社会状況や住民意識など、複雑な相互の関係の読み解きを行い、景観形成のパターンや構造の可視化（図示）を行うことが有効です。それをふまえて、時代変化に対応した地域と景観が持続する新たなシナリオ、システムのあり方を検討します。こうした検討は、さまざまな専門領域を必要とするため、多くの分野の専門家が参画して議論を深めます。

デザイン思考による景観形成システムへの介入と再構築

既存の景観形成システムの脆弱性を評価し、今後の時代変化に対応した地域・景観の持続システムを構築するためには、対処すべき問題を発見し、定義し、これらの複雑な課題に対する創造的解決策の探究を行う必要があります。その際にデザイン思考が有効であると考え、実践しています。たとえば以下のような手順で解決策を探ります（図3）。

- 1) 景観形成の動的システムの歴史的变化過程と現在の状態の理解を深め、問題と資源を把握する。
- 2) 因果関係－景観形成システムを可視化し、課題群を整理し、重要な課題を設定する。
- 3) 多数のアイデアを出し、そのなかから質の高い複数のアイデアを検討し、それらを構造化して課題を解決するためのシナリオを探る。また、関係主体間のコミュニケーションを経て、将来の目標像・ビジョン（もしくはコンセプト）を定める。
- 4) 将来ビジョンの実現を目標とし、システムの段階的変

化を想定した上で、既存のシステムに介入できるポイントを見定める。将来的にシステムが成り立つことを想定した上で、戦略を定めて有効なアクションを探り、できるものから実施する。

このプロセスは、既往の知見をふまえ、景観・まちづくりの実践や、学生のデザイン演習教育を重ねて見出しました。具体的な景観まちづくりの現場では、資源の保全・活用のあり方を探り、それを担う主体を育成して、持続可能なマネジメントの仕組みをつくるのが重要な課題となっています。たとえば、資源活用のあり方には、文化教育・交流のプログラム化、観光事業化、資源の高付加価値化などにより、資源に対する意識を高めると同時に、次世代に継承することのインセンティブを高めることを試みています。また、担い手育成においては、住民による資源価値の発見や理解の深化を促し、価値観や主体性、自治能力を育てることを意識した取り組みを進めています。一方、これらの検証は今後の研究課題です。

以上に述べた通り、景観・まちづくりの実践においては、現象をシステムとして俯瞰するシステム思考と、アイデアを構造化し課題解決と価値創造のための戦略を立てるデザイン思考とを組み合わせることが非常に有効であると考えています。また、将来の地域づくりを担う学生たちが、実践やデザイン演習を通じて、このような思考方法を身につけることは、教育上も非常に有効であることを実感しています。

参考

景観設計学（川崎研）WEB <http://lepl.uee.kyoto-u.ac.jp/activity/>

窒素化合物と消毒副生成物

都市環境工学・都市衛生工学分野・准教授 小坂 浩 司

はじめに

日本の水道では、衛生上必要な措置として塩素による消毒が義務付けられ、蛇口水中の残留塩素の保持が定められています。一方で、消毒剤と水中の無機物、有機物との反応によって生成する有害物質（消毒副生成物）の存在が懸念されています。2017年4月時点、水道水質基準体系において、水質基準項目に51項目、それに準ずる水質管理設定項目に26項目、情報・知見の収集が求められる要検討項目に47項目が指定されています。各項目に占める消毒副生成物の割合は約20%、15%、25%であり、消毒副生成物は主要な物質群の一つであると言えます。

窒素化合物は消毒副生成物を考える上で重要な物質群の一つです。窒素を含む消毒副生成物（窒素系消毒副生成物）は、水質基準項目には指定されていませんが、幾つかの物質は水質管理目標設定項目や要検討項目に指定されています。窒素系消毒副生成物は、トリハロメタン類やハロ酢酸類等の従来の消毒副生成物より毒性が高かったことが報告されています¹⁾。また、窒素化合物は消毒副生成物の元物質（前駆物質）としても重要で、このとき窒素系消毒副生成物および窒素を含まない消毒副生成物の前駆物質となります。

本稿では、窒素化合物に関連した消毒副生成物の研究についての最近の成果を紹介します。消毒副生成物に関する研究は当研究室の主要テーマの一つですが、筆者は異動してきたばかりのため、本稿では以前の所属機関（国立保健医療科学院）で携わった研究を採り上げています。ただし、この中には当研究室との共同研究も含まれています。なお、日本の水道では塩素による消毒がほとんどですが、他の消毒剤や酸化剤による副生成物も対象としています。

水道における新規消毒副生成物の実態

これまでの研究で、消毒副生成物として600～700種類程度の物質が同定されています²⁾。しかし、水道水中の存在状況について明らかとなっている物質は限られています。このような新規の消毒副生成物について、測定方法を確立し、水道水中の存在状況の把握を行ってきました。

図1に、全国12浄水場（A～L）系統の水道水を対象としたハロアセトアミド類の実態調査結果を示します。ハロアセトアミド類は窒素系消毒副生成物の一つで、海外では幾つか国で実態調査は行われていますが、他の窒素系消毒副生成物と比較すると調査事例は少なく、国内での検出事例はありませんでした。6種類のハロアセトアミド類の総濃度は9月では0.3～3.8 μg/L、継続調査で行った2月では0.3～1.8 μg/Lの範囲で、日本の水道水中に広く存在していることがわかりました。この濃度範囲は海外の場合と比べて若干低いものの、同程度のオーダーでした。現在は、浄水

処理でのハロアセトアミド類やその前駆物質が処理性について研究を進めています。

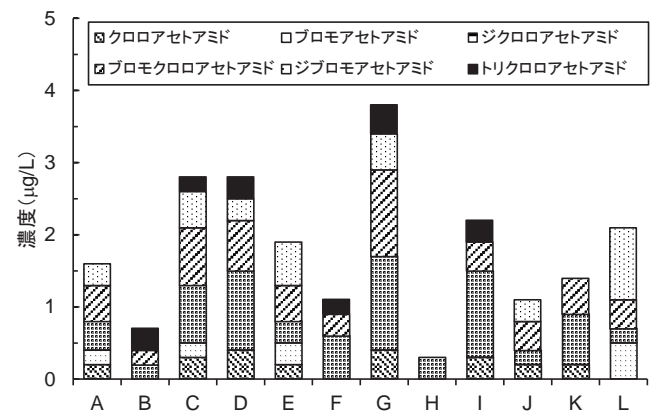


図1 全国12浄水場系統の水道水中のハロアセトアミド類の実態調査（2015年9月）

水質汚染の原因物質の特定

N-ニトロソジメチルアミン（NDMA）は、発がん性の物質で、クロラミン処理やオゾン処理によって生成する窒素系消毒副生成物です。水道水質基準体系では、要検討項目に指定されています。日本では、2007年に、淀川下流域の浄水場でオゾン処理によって生成していることが報告されました。浄水場では、オゾン処理の後に粒状活性炭処理が行われ、そこに生息する微生物によってNDMAは除去されるため、概して処理水中のNDMA濃度は低い状況でした。しかし、微生物の活性が低下する冬季にはしばしば濃度が上昇することがありました。

原因物質となるNDMA前駆物質の発生源を明らかにするため、上流域の調査を行ったところ、上流のX下水処理場の放流水の寄与が高いことがわかりました。下水処理場の流入水中にもNDMA前駆物質が存在していたため、下水管中の下水について同様の調査を行ったところ、Y事業所からの排水が主な発生源であることがわかりました。この排水を含む下水を濃縮、分画し、LC-MS/MS、LC-TOF/MS、NMRを用いて検討した結果、1,1,5,5-テトラメチルカルボヒドラジド（TMCH）を同定しました（図2）。そしてTMCHがオゾン処理によるNDMA前駆物質であること、淀川流域における主な原因物質であることを明らかにしました。その後の調査で、2012年ぐらいからTMCHの排出量は低下し、現在は排出されていないことがわかりました。このため、現在、淀川下流域の浄水場におけるオゾン処理後のNDMA濃度は低い状況となっています。

浄水処理対応困難物質の選定

2012年5月、利根川流域の浄水場で水質基準項目であるホルムアルデヒドが高濃度で検出され、36万世帯が減断水の影響を受けるという水質事故がありました³⁾。その後の調

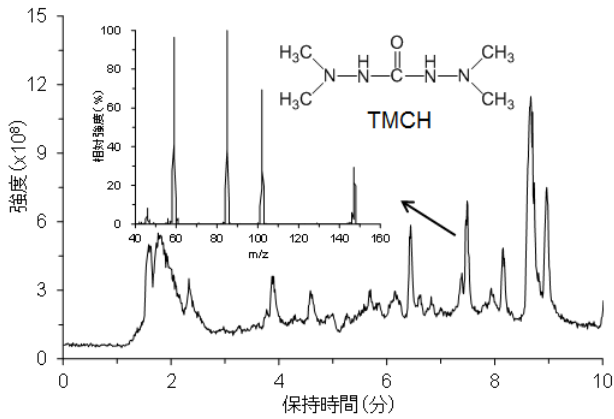


図2 Y事業所排水を含む下水の濃縮水の分画試料中のLC-MS/MSのトータルイオンクロマトグラムと対象ピークのプロダクトイオンスペクトル

査で、原因物質はヘキサメチレンテトラミン (HMT) であり、事故原因はHMTを高濃度を含む廃水が適切な処理が行われないまま利根川に放流され、浄水場の塩素処理によってHMTからホルムアルデヒドが生成したためとわかりました³⁾。

塩素処理によってホルムアルデヒドを生成しやすい物質の特徴としてN-メチルアミノ基を持つ3級アミン類が知られています(図3)¹⁾。HMTは窒素がメチレンに囲まれた3級アミン類です。PRTR物質の中からHMTとN-メチルアミノ基を持つ物質を選定し、構造からグループ分けを行いました。PRTR物質以外からも同様の構造を持つ物質を選定し、グループ分けを行いました。これらの物質について塩素処理を行ったところ、ホルムアルデヒドを生成するグループは複数あること、HMT、N-メチルアミノ基を持つ3級アミン類、ヒドラジン類からの生成が高いことがわかりました。図4に、ホルムアルデヒドを生成した物質のホルムアルデヒド重量生成率を示します。このうち、重量生成率が20%以上の物質として7物質が挙げられました(特別に合成した3種のヒドラジン類を除外)。この7物質は、上記の水質事故を受けて新たなカテゴリーとして設定された浄水

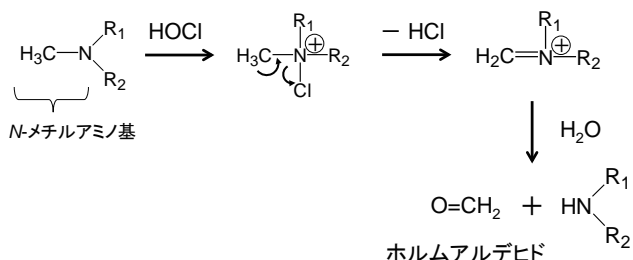


図3 3級アミン類の塩素処理によるホルムアルデヒドの生成機構¹⁾

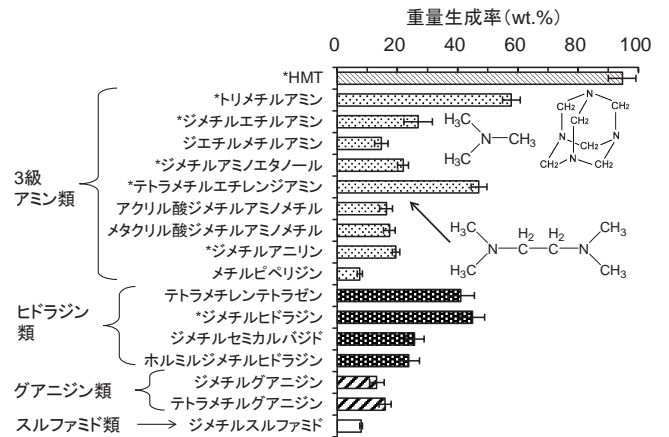


図4 対象物質のホルムアルデヒド重量生成率 (*浄水処理対応困難物質)

処理対応困難物質(通常の浄水処理により水質基準項目等を高い比率で生成する物質)に指定されました。

まとめ

窒素化合物は、消毒副生成物およびその前駆物質として重要な物質群の一つです。新規の消毒副生成物は数多くありますが、特に窒素系消毒副生成物に注目して、水道水中の存在実態や浄水処理性等に関する知見の収集を行っています。

水質汚染や水質事故における原因物質の特定は問題解決と予防の観点から重要ですが、環境水中から未知物質を特定するのは難しい検討課題となります。特に、前駆物質の場合、消毒副生成物そのものではなく、消毒剤・酸化剤との反応を推定しながら進めるため、より大変であると考えられます。このため、消毒剤・酸化剤と化学物質との反応において、どのような構造(反応部位)からどのような物質が生成するか把握しておくが必要であると考えられます。

参考文献

- 1) Shah A.D. and Mitch W.A. Environ. Sci. Technol. 2012, 46, 119-131.
- 2) 伊藤彦彦, 越後信哉. 水の消毒副生成物. 技報堂出版, 東京, 2008.
- 3) 水道水源における消毒副生成物前駆物質汚染対応方策検討会. 水道水源における消毒副生成物前駆物質 汚染対応方策について とりまとめ. 2013.