

# 解析雑誌

Vol.51 2024.01

Journal of Analytical Engineering

## Topics

- 洪水予測システム RiverCast による BCP 対策
- 道路段差とジョイントの異常検知／低周波騒音対策
- カーボンニュートラルと SimScale による室内空調解析
- 建築物の設計における 風環境ランク評価とその応用
- 電磁界解析による 構造物への落雷時検討
- 高速道路の 地震被害想定・地震リスク評価



## 1923 年関東地震から 100 年

(株)構造計画研究所  
防災ソリューション部部长  
高浜 勉

2023年は、1923年9月1日の関東大震災を引き起こした関東地震から100年に当たります。首都圏で地震防災を考える上では重要な被害地震の一つですが、地震に伴う火災や、その後の戦禍などにより、当時を知ることができる資料は散逸してしまっているものも多いのが実態と思われます。

私は20年ほど前の学生時代から当社入社後数年間にかけて、現在の横浜市域を対象に1923年関東地震の被害と地盤条件との関係性を調べることを目的として、当時の自治体の資料や郡役所の公文書、体験者への聞き取り調査記録などを収集・整理し、当時の大字単位で住宅の被害状況を集計することを試みておりました。その結果、当時の市町村単位での集計結果は見つかりましたが、もう一段細かい大字単位までとなると、資料・記録は大変少ない状況でした。

地震当時、各市町村で被害調査が行われ、郡や県に報告されたと思われます。調査自体は大字単位程度で行われた可能性が高く、一部市町村ではその結果が公文書や自治体発刊の資料に記載されていましたが、多くは市町村単位の集計結果のみが記載されていました。これは当時の調査目的からすれば当然であり、混乱の中大変であったことと思います。ですが、現在利用しようと思うと市町村単位での集計前のデータもあれば、となると思います。そのため、引き続き新たな資料がないか、見つからないかなどを時折調べてみております。

関東地震から100年後の現在では、技術やコンピュータの進化、各種データの充実により、詳細に過去の災害の再現や将来の災害予測を行えるようになりました。しかし、どんなに高度化・詳細化しても、結果の妥当性確認などでは、過去の実態から得られる情報は大変貴重な資料となります。そのため、技術の発展と共に、今後、災害に関する情報を残していくことも重要と思います。では、何を残すべきか、となりますと、今は不要と考えられるデータも将来は大変重要となる可能性も否定できません。現在はインターネットの普及や資料のデジタル化が進み、100年前と比較すれば、はるかに情報が残しやすく、得やすい時代になっています。そのため、費用面等課題もありますが、情報を残す際には整理したものだけでなく、できるだけありのままのものも残し、加工は将来の利用者に委ねる、という意識を持つことも重要なのではないかと思います。

当社がお客様からご依頼いただいている業務に置き換えて考えますと、様々な情報を収集・分析し、得られた関係性を用いて評価を行う、というような業務も多くあります。このような業務をお客様へご報告する際には、どのような情報を利用し、どのように関係性を得たのか、などの検討過程につきましても可能な限りご説明やレポートへの記述を行い、後日振り返っての確認もできるような成果のご提供に努めておりますが、今後もさらに意識を高め、取り組んで参りたいと思います。

今後ともお客様の自然災害への対策や各種問題解決に繋がるような技術開発やソリューションのご提供を目指し努力して参りますので、お引き立てを賜りますようお願い申し上げます。

## 解析雑誌 Vol. 51 2024. 01

---

巻頭言 1923 年関東地震から 100 年	02
防災ソリューション部部长 高浜 勉	

---

<b>Topic 1</b>	
● 洪水予測システム RiverCast による BCP 対策	04
<b>Topic 2</b>	
● 道路段差とジョイントの異常検知／低周波騒音対策	12
<b>Topic 3</b>	
● カーボンニュートラルと SimScale による室内空調解析	19
<b>Topic 4</b>	
● 建築物の設計における風環境ランク評価とその応用	26
<b>Topic 5</b>	
● 電磁界解析による構造物への落雷時検討	30
<b>Topic 6</b>	
● 高速道路の地震被害想定と地震リスク評価	35

---

<b>Kaiseki Portal / From Editors</b>	39
--------------------------------------	----

本誌内では私共「構造計画研究所」のことを「KKE」と称しています。

## 洪水予測システム RiverCast による BCP 対策

近年、全国各地で豪雨災害が発生しており、気候変動を背景に今後も被害は激甚化・頻発化していくと考えられます。工場やプラントを持つ民間企業においても、浸水にともなる復旧費用や操業停止期間の機会損失、場合によっては従業員に危険が及ぶ可能性もあり、水害に備えた事業継続計画（BCP）の策定は急務です。

豪雨に関する公共情報は充実してきており、災害発生前にはハザードマップを通じ当該地域の被害想定を確認できるほか、昨今では水害リスクマップや多段階の浸水想定図の作成も進んでおり、発生頻度を含む災害リスクを事前に把握することが可能です。また豪雨は進行性災害であり、災害の発生が予見される場合は公共情報を通じリアルタイムに状況を把握できます。例えば国土交通省が提供する川の防災情報で河川水位を確認できるほか、気象庁のキキクルからは大雨による災害発生危険度の高まりを地図上で閲覧可能です。ハードで防ぎきれない水害に対しては、これらの河川水位や危険度分布を参考に、人的あるいは経済的リスクを最小限に抑えるための適時適切な意思決定が要求されます。

一方で、公共情報は住民に広く周知し自助共助を促す上では非常に有益ですが、工場・プラントのほか重要インフラ設備を抱える企業に対しては必ずしも十分な情報ではありません（図 1）。例えば、業界によっては製造ラインを停止するまでに長い時間を要する場合があります。観測水位やリスクラインの短時間での危険度情報では十分なリードタイムを得ることができません。またキキクルでは危険度を段階的に示すのみで、現場付近の河川水位がどの程度上昇するかを定量的に把握できません。加えて降雨はわずかな条件の違いによって予報結果が変わる非常に複雑な事象であり、3～6 時間先の予報でも非常に不確実性が高く（図 2）、重要な意思決定を行う際には必ずしも十分な情報とは言えません。公共情報は広く分かりやすい情報を提供しますが、シビアな判断を要求される民間企業にとっては、各拠点に特化した詳細な予測情報が必要とされます。

本稿では特に外水氾濫をターゲットとし、公共情報でカバーしきれない情報を補うリアルタイム洪水予測システム RiverCast®を紹介し、RiverCast の概要と特長を述べた後、BCP における効果や、実際の予測事例を紹介します。

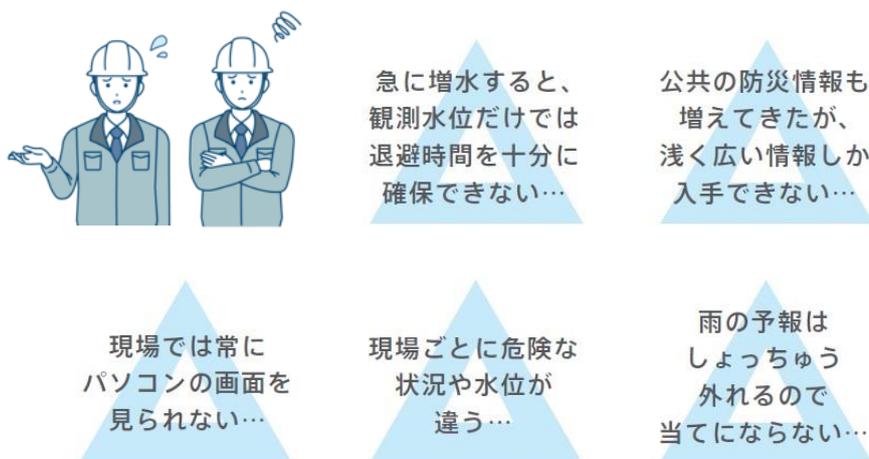


図 1 公共情報を活用する際の現場での課題を示した図です。公共情報は広域で分かりやすい情報を提供しますが、シビアな意思決定が要求される現場では必ずしも十分ではありません。

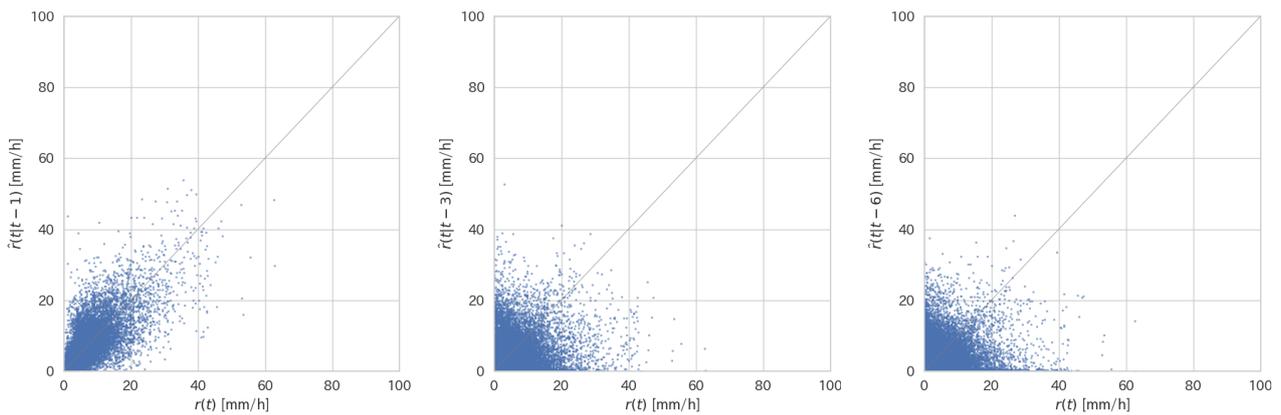


図2 関東地方における解析雨量と1時間先（左）、3時間先（中）、6時間先（右）の降水短時間予報との比較図です。横軸が解析雨量、縦軸が予報雨量で、灰線上のプロットで解析値と予報値が一致します。

### ● RiverCast の概要と特長

RiverCast は、(株) 構造計画研究所が提供する洪水予測クラウドシステムです。本システムは特定の水位計から得られる河川水位を対象に、15時間先まで河川水位を精緻に予測します。予測結果はユーザー名・パスワードの認証情報さえあれば任意の通信端末の Web ブラウザから予測結果を閲覧でき（図3）、ブラウザ上でのアラート通知や関係者へのメール通知が可能です。また天気予報の誤差を考慮し、予測の上ぶれ・下ぶれの可能性を定量的に示すほか、ユーザーが設定した特定の水位を超過する確率を計算できます。



図3 RiverCast の利用イメージです。PC やスマートフォンなど任意の通信端末の Web ブラウザから利用できます。

RiverCast は河川全体でなく、特定の水位計を対象に予測モデルを構築します（図4）。公共情報のように広範な情報を把握できない反面、特定地点に特化した予測モデルを構築するため、高精度な予測モデルを短時間で提供できます。予測にあたっては対象拠点の河川水位だけでなく、対象とする水位に影響を及ぼしうる広域の雨量やダム、潮位等の情報を利用して、30分ごとに予測を更新します。従来は各種情報から危険度を定性的に判断せざるを得ませんでしたが、RiverCast による水位予測の活用を通じ、経験や勘に頼らない定量的な判断が可能になります。

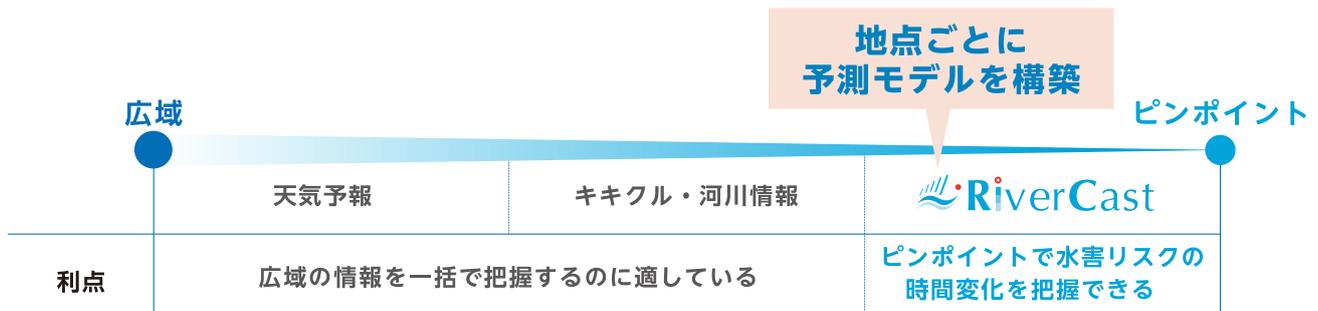


図4 公共情報と RiverCast それぞれの利点を示した図です。RiverCast は対象拠点ピンポイントに影響を及ぼしうる天気予報・河川情報を、過去データを利用して物理現象に整合させ、精緻な予測結果を与えます。

## ● 予測手法

RiverCast では力学系理論と呼ばれる数理工学の考え方を応用しており、過去の観測データから物理現象を再現するよう予測モデルを構築します。本手法は東京大学との共同研究成果であり、国内外の河川で有効性を確認<sup>1</sup>しています。代表的な物理モデル・AI モデルよりも高精度で、少数データから未経験の出水規模の洪水も予測できることが示されています。また国内外の学术界でも高く評価されており、Nature 社の Scientific Reports で Top 100 in Physics に選出<sup>2</sup>されたほか、四国地方整備局技術発表優秀論文賞等も受賞しており、また国土交通省の新技术情報提供システム NETIS にも登録 (KT-220028-A) されています。

一方で力学系理論による予測手法のデメリットとして、最低 3 年程度の過去データが必要な点が挙げられます。そこで RiverCast では新規に設置した水位計でも対応できるよう、物理モデルでの予測機能も取り入れています。物理モデルによる予測手法もリアルタイムに取得する水位に観測するよう、逐次補正をかけ精度向上を図っています。

いずれの予測手法に対しても、RiverCast では年に一度、水位・雨量等の蓄積データを予測モデルに反映させます。力学系理論による手法では蓄積データがモデルに直接取り込まれるほか、物理モデルにおいては観測データに整合するようパラメータをチューニングし、いずれの手法においても年々予測精度が向上していく仕組みとなっています。また予報雨量の誤差の傾向は毎年異なるため、蓄積された予報雨量から当該拠点に影響を及ぼす誤差モデルを毎年更新し、常に最新の情報に基づき予測を提供しております。

## ● 令和 2 年 7 月豪雨における予測事例

RiverCast による予測事例として、令和 2 年 7 月豪雨における球磨川の水位予測結果を示します。本事例では戦後最大の洪水被害を受け、人吉ほか複数の地点で観測開始以来最高水位を記録しました。図 6 (上) に当時の予報雨量を用いて、人吉観測所で精度検証を行った事例を示します。15 時間先までの予測でも、過去データ最高水位以上の水位である計画高水位の超過を早期に予測できています。また基準水位の超過確率を計算すると、警戒レベル 4 の情報を発令する 11 時間前からは氾濫危険水位の超過確率が 70%以上であると予測しています。また図 6 (下) に、当時の予報雨量を解析雨量で置き換え計算した結果を示します。予報雨量誤差がない場合、非常に精緻に予測出来ていることが分かります。

<sup>1</sup> S. Okuno, K. Ikeuchi, and K. Aihara, "Practical data-driven flood forecasting based on dynamical systems theory," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, p. 664, 2020, doi: 10.1038/s41598-019-57255-4.

<sup>2</sup> S. Okuno, K. Aihara, and Y. Hirata, "Forecasting high-dimensional dynamics exploiting suboptimal embeddings," *Water Resour. Res.*, vol. 57, no. 3, p. e2020WR028427, Mar. 2021, doi: 10.1029/2020WR028427.

- 1 気候変動により激甚化する**未経験規模の洪水も高精度に予測**
- 2 天気予報の誤差を考慮し、**予測の上ぶれ下ぶれを表示**
- 3 降水確率のように、**設定水位を超える確率を提供**

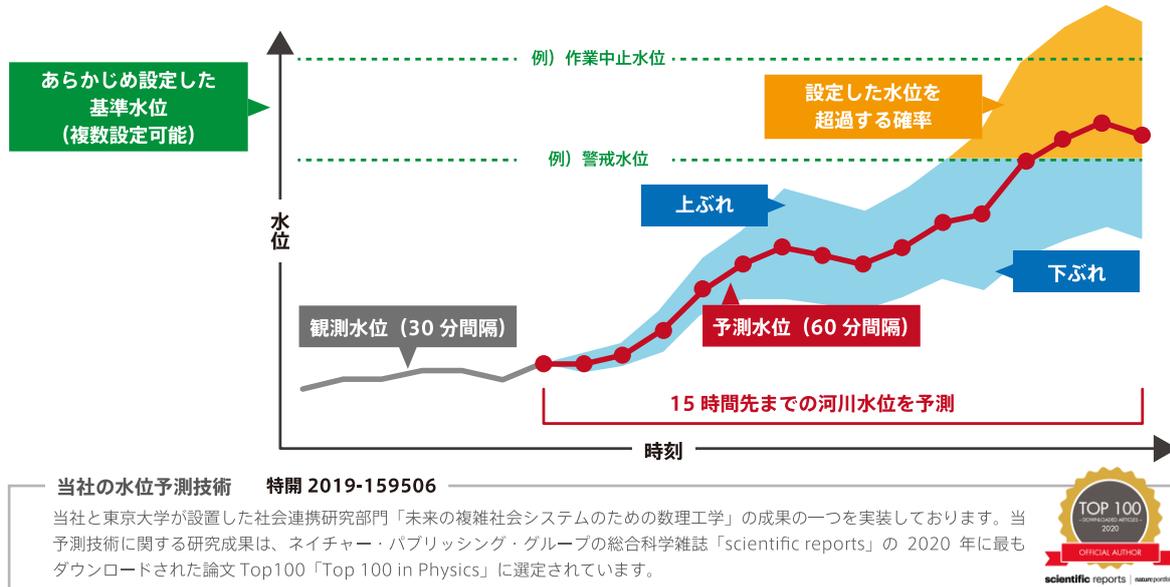


図5 RiverCastによる予測の特長をまとめた図です。従来の予測手法（物理モデル・AI）の利点を組み合わせた精緻な予測を提供するほか、天気予報の誤差を考慮し、不確実性を定量化できます。

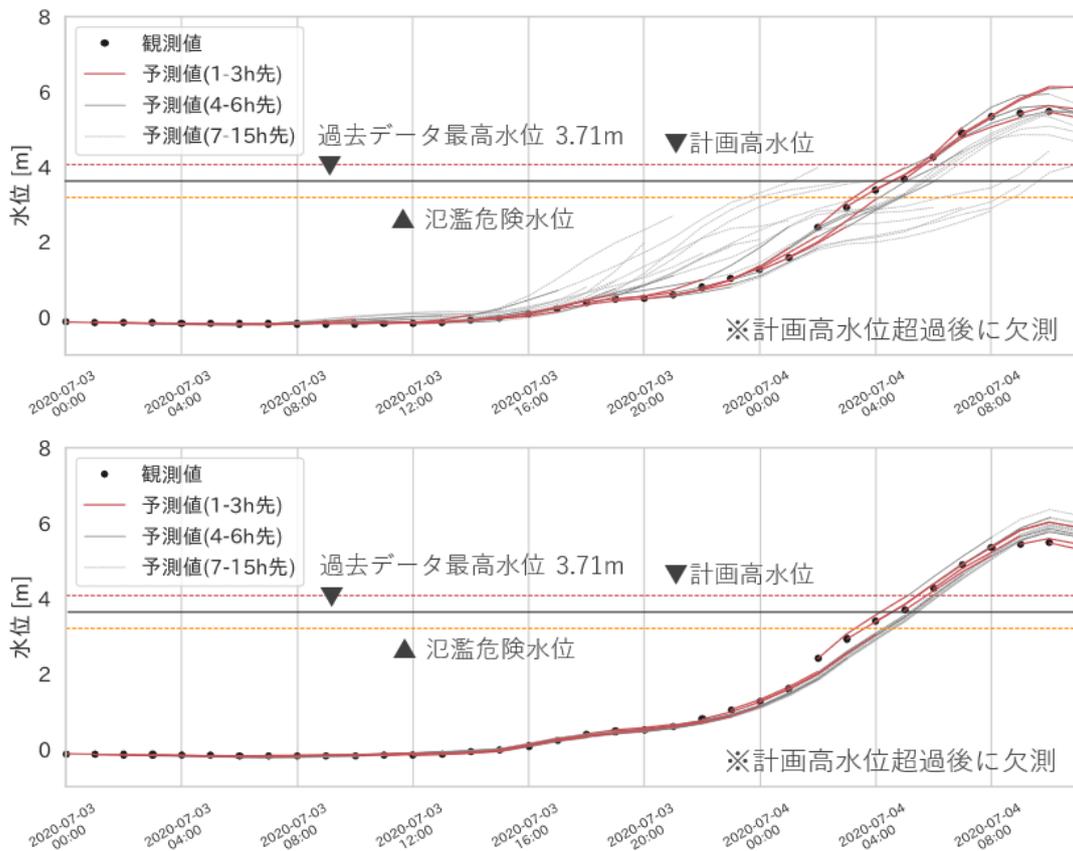


図6 「人吉」観測点における水位予測結果です。黒点が観測値で、各点を初期値とした15時間先までの予測結果を重ねて示しています。上図は当時の実際の予報雨量で計算した結果、下図は参考までに予報雨量を解析雨量で置き換え計算した予測結果で、モデルそのものの誤差を示します。

## ● 利用イメージと導入メリット

RiverCast の利用イメージを図 7 に示します。豪雨災害に備えた意思決定を行う上では、発災が想定される時間に応じて公共情報を併用し、お互いの情報を補完し合うことが有効です。具体的には、発災が予想される数日前から公共情報を通じて広域の動向を把握しつつ、15 時間前からは RiverCast を活用して重要な意思決定の判断の決め手とする使い方が想定されます。

前提として、RiverCast は現時点では最大で 15 時間先までの予測を実施しており、数日前の動向は把握できません。また数日前の情報に基づいて対象拠点ピンポイントの水位予測を実施しても不確実性が高いため、むしろ気象情報に基づく広域の結果が参考になります。一日前からはキキクルによる広域の危険情報や、河川水位情報が有用です。そして 15 時間前からは、RiverCast が当該拠点に影響を及ぼしうる範囲の降雨・河川水位情報を加味し、当該拠点における精緻な水位予測を提供します。予測の不確実性も定量化されるため、空振りによる機会損失と見逃しによる被害を総合した合理的な意思決定が可能となり、判断の決め手として活用できます。



図 7 公共情報と RiverCast の併用イメージです。数日前~1 日前は不確実性が非常に高いため、拠点ピンポイントよりも広域な公共情報による把握が適切です。15 時間前からは確度が高まっていくため、公共情報で動向を把握しつつも、RiverCast による予測が判断の決め手になります。

図 8 では、工事現場での実際の活用例を示しています。従来の雨量や観測水位に基づく判断では十分なリードタイムを確保できず、対応が遅れた場合には浸水被害が発生する危険性があります。また退避後の作業開始タイミングも公共情報だけでは判断が難しく、工程の遅延にもつながります。一方、RiverCast の活用により、退避のための十分なリードタイムを確保でき、夜間の水位上昇の危険も事前に察知し対応が可能になります。また、作業開始のタイミングも予測に基づき適切に判断でき、適切なリスク管理により本来トレードオフの関係である安全性と生産性を両立させることができます。

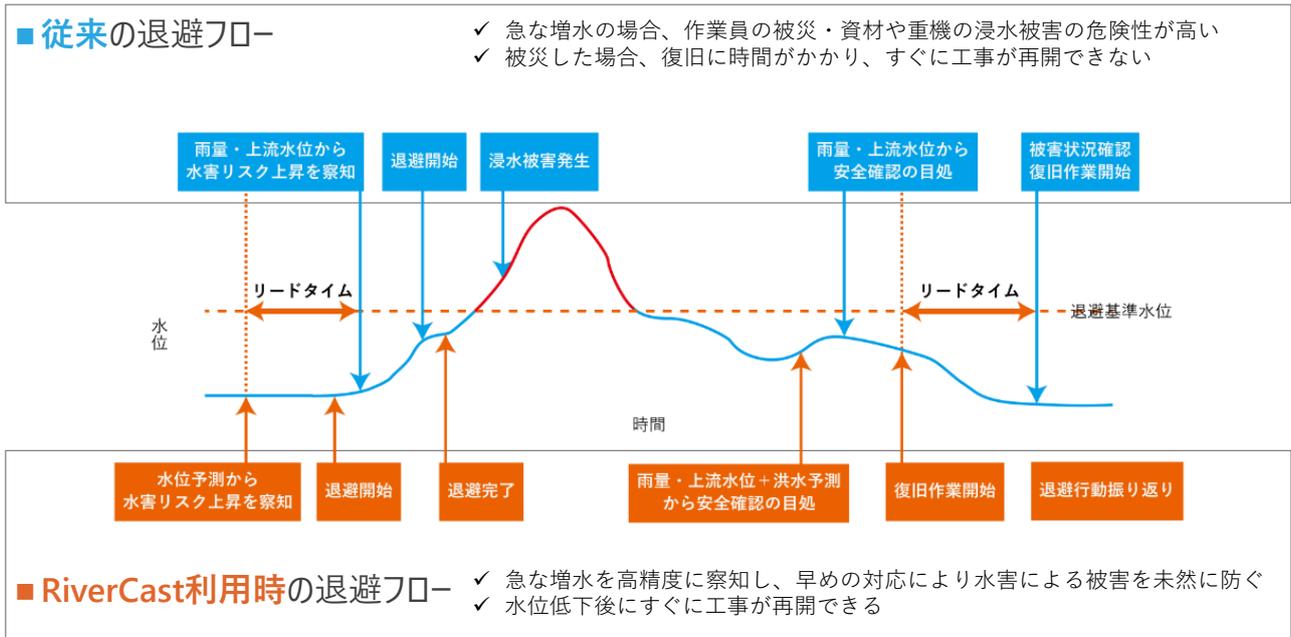


図8 工事現場における RiverCast 利用例です。事前準備のリードタイムを確保し安全性を向上させるだけでなく、より早期の作業開始が可能になるほか、不要な見逃しを減らし生産性も向上させることができます。

図9に、RiverCast 導入による業界別のメリットを示します。RiverCast は多くの自治体に導入されているほか、治水施設における重要な意思決定にも用いられています。民間では特に河川付近の建設現場で導入する事例が多く、予測を活用した適切なリスク管理により、安全性とともに生産性を向上させています。

**ゼネコン**

堤外地の現場で、退避基準を明確にして安全を確保しつつ生産性も向上

**BCP**

豪雨時の水害対応と従業員の安全確保を両立し、スムーズに事業を再開

**自治体**

早期の水防対応を実施し、適切なタイミングで避難情報を確実に発令

**治水施設**

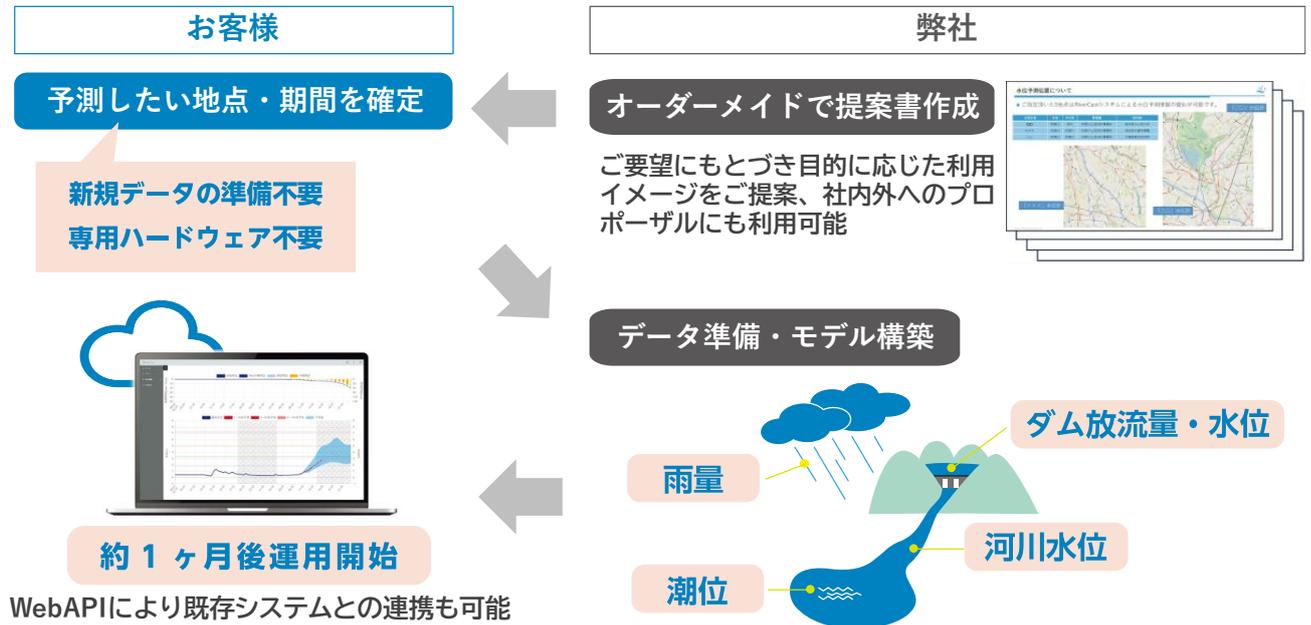
ダム放流や水門開閉・排水ポンプの効果的な操作により治水効果を最大限発揮

**止水板の設置にも**

工場・プラント、不動産管理、商業施設、地下鉄などで、浸水対策の要である止水板設置のリードタイムを確保・見逃しを防止

図9 業界別の導入メリットです。自治体や治水施設だけでなく、民間企業での導入も増えています。

## 導入の流れ



## 運用の流れ



図 10 RiverCast の導入および運用フローです。予測地点をご指定いただいた後、弊社内で必要データを手配・分析し予測モデルを構築、地点指定から 1 ヶ月程度で運用できます。別途、WebAPI を通じたシステム連携も可能です。

図 10 に RiverCast の導入フローを示します。予測地点を指定いただいた後、技術者が予測モデル構築に必要な各種データ（雨量、河川水位、場合によっては潮位・ダム放流量等）を収集し、予測モデルを構築します。構築に際しては、直近の顕著な水位上昇事例に対して予測精度を確認し、モデル詳細を含めレポートとして提出します。予測地点指定後、およそ 1 ヶ月程度で運用を開始できます。

運用開始時にシステム URL とアカウント情報（ID・パスワード）をご案内します。アカウント情報を入力することでお手持ちのパソコンやタブレットからログインいただけます。毎日任意の時刻に観測

水位と予測水位情報をお知らせする定期通知メールのほか、予め設定した任意の判定水位の超過を予測した場合に、メールにてお知らせするアラート通知機能もご利用可能です。出水後には振り返りレポートの作成も承ります。関係者間で対応の振り返りにご活用いただけます。

### ● おわりに

昨今、気候変動を背景に水害対策への重要性が高まっています。これまで我が国では、官民間問わず多くの組織が地震に対する BCP には積極的に取り組んできましたが、水害に関しては未だ十分な対策がなされていない組織も多いかと存じます。ハードで防ぎ切れない規模の水害にはソフトを組み合わせた緩和策が有効で、本稿で紹介した RiverCast が少しでも人的・経済的の両面から事業継続に役立てば幸いです。

### ● 参考：RiverCast ご利用実績（敬称略）

公的機関：国土交通省 徳島河川国道事務所、山形県鶴岡市、神奈川県川崎市、熊本県大津町、福島県福島市、静岡県藤枝市、また実証試験として大阪府、神奈川県横浜市、神奈川県川崎市、ほか全国 13 自治体 45 地点以上でご利用。

民間企業：鹿島建設、清水建設、大林組、西松建設、西武建設、前田建設工業、大本組、横河 NS エンジニアリング、ほか建設業、遊水池管理施設、インフラ事業者など多数。

HP: <https://www.weather.kke.co.jp/estimates>

御見積はこちら



## 道路段差とジョイントの異常検知／低周波騒音対策

本誌 47 号のトピック「簡易な車載型センシングシステムを利用した道路の見守り技術」の中でご紹介した J-DAnswer が、高速道路の巡回点検車を利用して計測し、取得したデータの分析によって検知しているのは、道路面の段差と鋼製フィンガージョイントの損傷です。これらの路面異常はドライバーや同乗者の乗り心地を損ない、振動や騒音の原因となって周辺地域の環境を損ないます。長期的には構造物の疲労損傷の進行を早める恐れもあります。

ここでは J-DAnswer が路面異常を検知する仕組みと、路面異常が原因となって発生する振動および低周波騒音の数値解析による評価や対策の検討事例をご紹介します。

### ● 高速道路の段差計測システム J-DAnswer

J-DAnswer は、東日本高速道路（株）、中日本高速道路（株）、西日本高速道路（株）および（株）高速道路総合技術研究所と KKE が共同開発した、道路巡回車にレーザー変位計を取り付けて、日常点検中に通行規制を行うことなく 80km/h で走行しながら高速道路上の路面の段差量計測を行うことができるシステムです（特許第 6666207 号）。図-1 に J-DAnswer 計測システムの構成を示します。また、図-2 に車両に設置した J-DAnswer 各機器の設置と配線の一例を示します。

路面の凹凸を捉えるレーザー変位計は車種ごとに専用の治具を用いて、左右後輪の前方に 3 つずつ設置します。伸縮装置直上を通過した際の振動を捉えるための加速度センサは左右の後輪車軸位置に設置します。GPS センサは後方側面の窓側に設置します。サンプリングレート異なるレーザー変位計（3kHz）6 台、加速度センサ（10kHz）2 台、GPS（1kHz）1 台から送られてくる路面凹凸、車軸振動（加速度）、緯度経度の計測データは、タブレット上の計測システムで制御された J-DAnswer 本体で 10kHz のデータで同期、集約されてタブレット上の USB-SSD メモリ上にバイナリで 1 秒毎に保存されます。

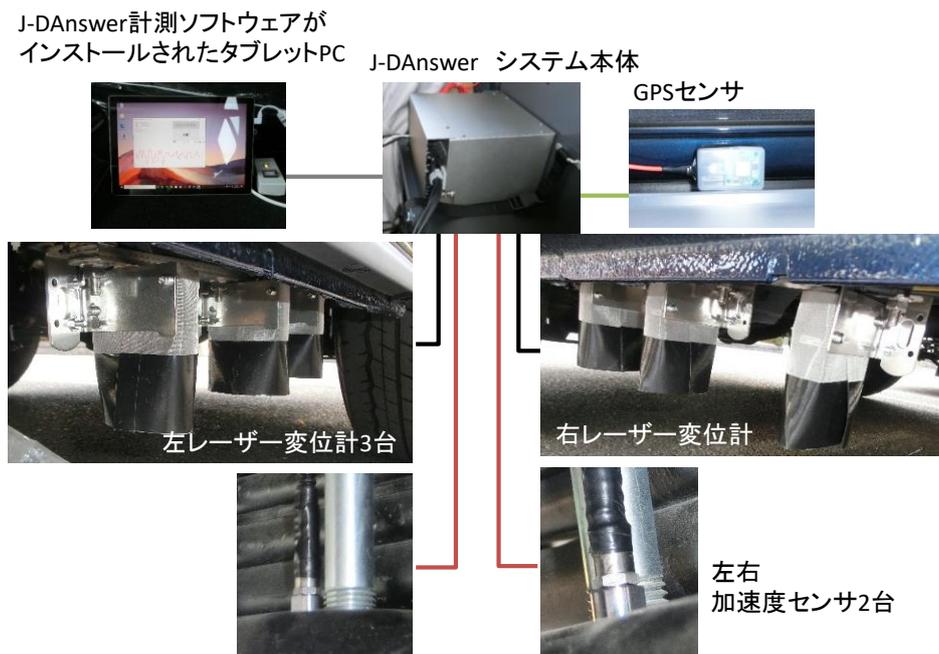


図 1 J-DAnswer 計測システムの構成

計測データの位置の特定には、同期された位置情報（緯度・経度）とレーザー変位計を用います。現在使用している GPS の精度は数mとなっていて、かつ、GPS のサンプリングレートは 1Hz 毎の更新なので、80km/h 走行では約 20m 程度の誤差が生じます。対象とする伸縮装置は幅数 10 cm～大きいものでも数 m 程度なので、GPS だけでは対象とする伸縮装置の位置を特定することができません。また、80km/h 走行時、車両が伸縮装置や段差を通過する時間は 1/100 秒オーダーなので、10kHz という高サンプリングレートでの計測が必要になり、その中から伸縮装置直上を通過する瞬間のデータを抽出する必要があります。抽出手順を図 3 に示します。また路面の凹凸の情報から後輪が伸縮装置直上を通過する瞬間の時刻を特定するイメージを図 4 に示します。

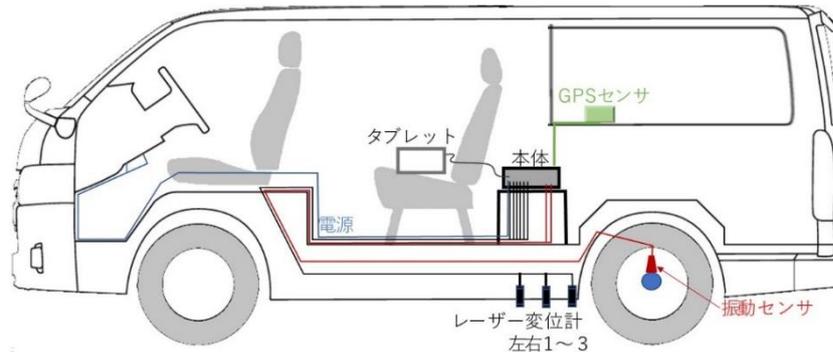


図2 J-DAnswer 計測システムの設置と配線の一例

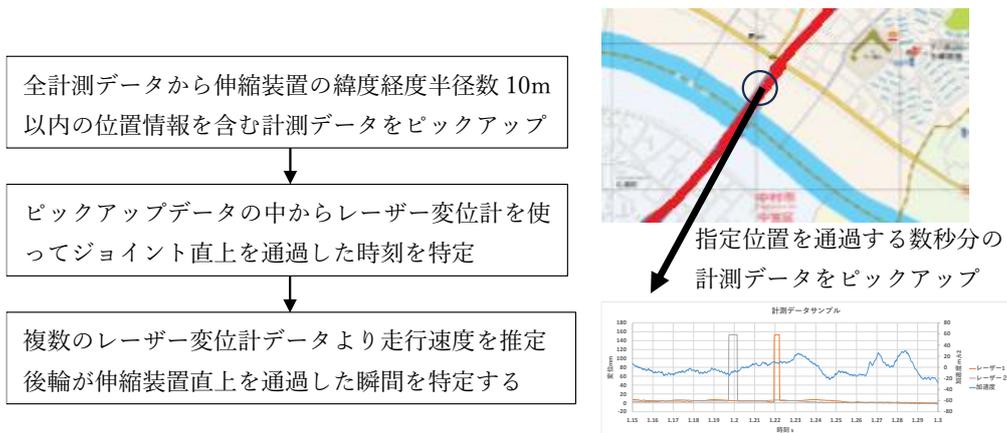


図3 伸縮装置直上を通過する瞬間のデータを抽出する流れ

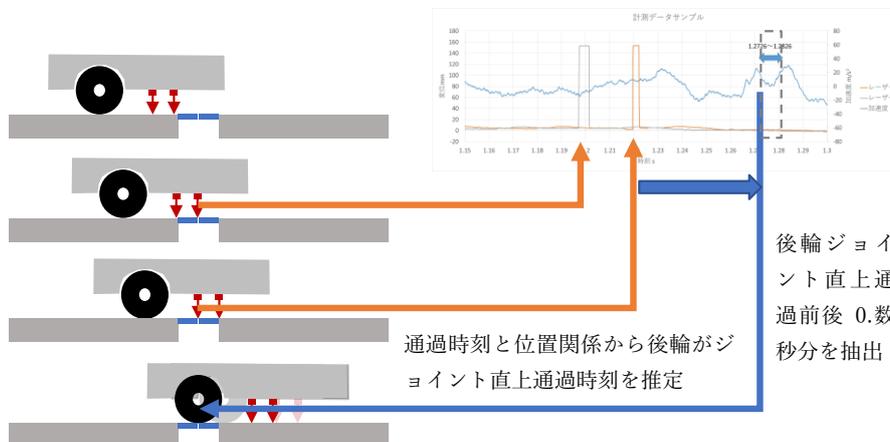


図4 伸縮装置直上を通過する瞬間の時刻を特定するイメージ

ジョイント直上を通過した際の車軸の振動データは FFT を使って振動数成分に置き換えられ、多数回の計測データを使って統計的な処理を行い損傷に起因する振動数帯域の変化（図 5）を捉えて、伸縮装置の大きな変状の有無を検知します。

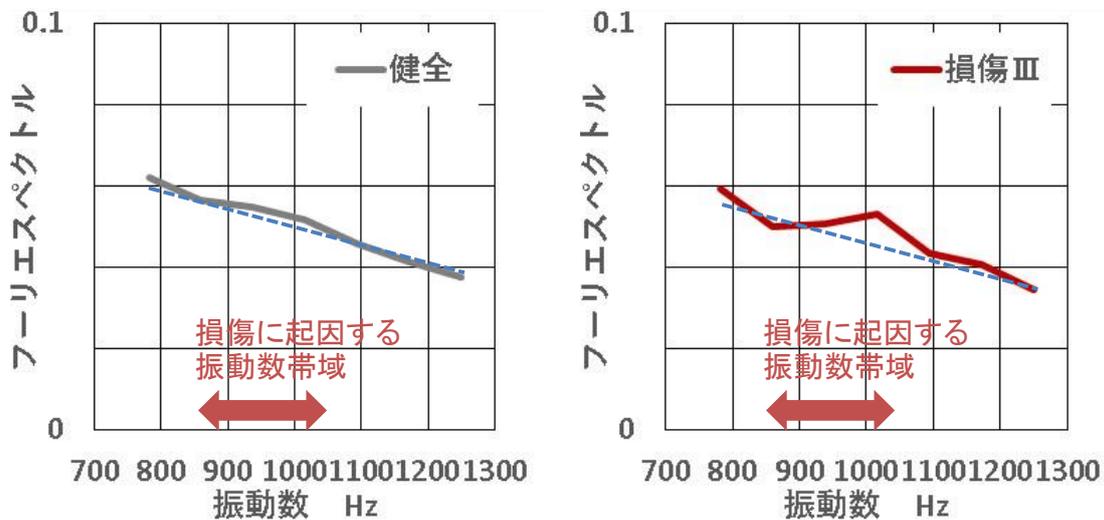


図 5 損傷に起因する振動数帯域の例

凹凸のデータは速度の情報を使って時間軸から距離軸に変換され、特許技術（特許第 6885995 号）によりデータクレンジングを施し、2m 水系法段差計測と同じ方法（図 6）で段差量を測定し、管理基準を超える段差や進展の早い段差の位置を特定します。

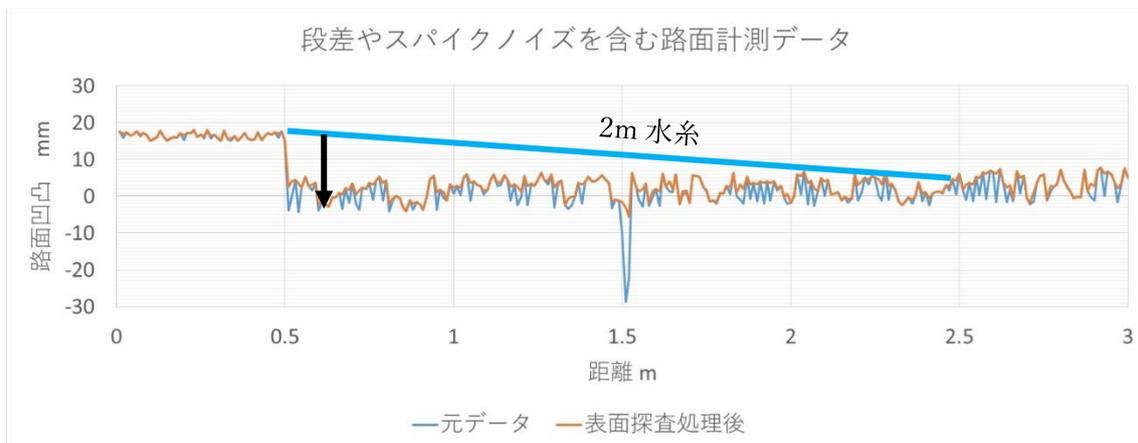


図 6 データクレンジングと 2m 水系法段差計測の例

J-DAnswer の使用条件を以下に示します。

- ・ 走行速度 60km/h～80km/h
- ・ GPS 電波が受信できる路線
- ・ 車両のシガーソケットから電源が取得できること
- ・ J-DAnswer が配置できるスペースが確保できること
- ・ 降雪、荒天時は測定不可

- ・早朝、夕刻で車体下に直射日光が差し込む場合
- ・走行レーンの特定はできません（現在開発中）
- ・2023年現在、実績対応車種はハイエース（トヨタ）、エクストレイル（日産）、デリカ D5、アウトランダー（三菱）、フォレスター（富士重工）です。

ここからはJ-DAnswer が検知する路面異常も原因となる交通振動の解析手法をご紹介します。

### ● 車両走行時の橋梁振動解析（DALIA）

DALIA は”Dynamic interaction Analysis program for Live load and Any structure”の略称で、サブストラクチャー法を適用し、図7のように路面の凹凸の影響を考慮しつつ、橋梁構造物等とその上を走行する車両の動的相互作用を効率よく計算することができる「車両走行時の車両と橋梁等構造物の振動シミュレーションプログラム」です。

図8はDALIAが再現できる物理現象と計算結果の用途・目的を表した図です。

それぞれの用途・目的に合わせて構造や車両の違いによる影響はもちろんのこと、路面や段差の違い、走行速度による違いを定量的に比較検討することが可能です。

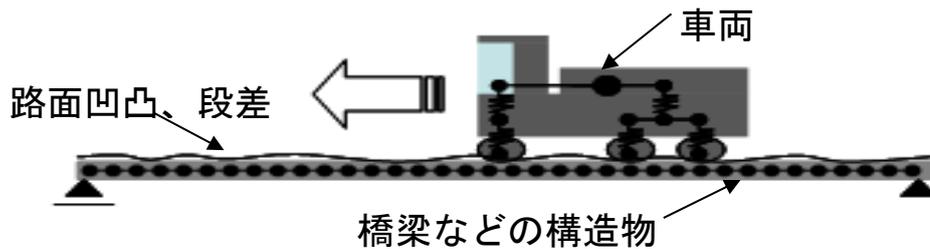


図7 橋梁上を走行する重車両の概略モデル



図8 DALIAの用途・目的

図9は「列車走行安全性評価」および「乗り心地の評価」の事例です。

この検討で用いた高架橋は、スパン 10m の 5 径間連続開腹型アーチ橋です。走行速度を、60km/h, 80km/h, 100km/h, 120km/h, 140km/h, 160km/h と変えて橋梁通過時の台車や車軸の計算結果から、輪重減少率を算出し、列車走行安全性を、車体の加速度から乗り心地の評価を行い、いずれも問題が生じないことを確認しました。道路を対象とした場合では、車両の加速度を用いて 1/3 オクターブバンド分析を行い、構造物のたわみや路面の凹凸の違いや速度の違いによる乗り心地評価を行うことが可能です。

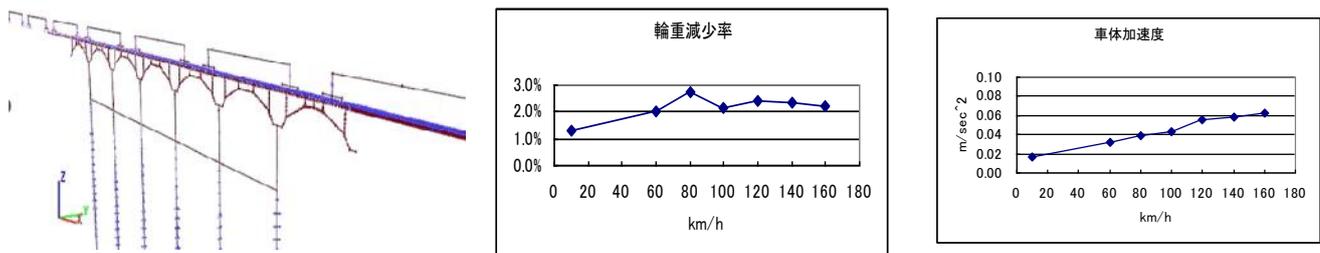


図9 DALIA を使った鉄道構造物の「列車走行安全性評価」および「乗り心地の評価」

図10は「疲労損傷箇所推定」の事例です。

長大で使用する部材数の多い構造物では、経験的に疲労損傷箇所の予測が難しく、疲労が集中しやすい箇所を網羅的に把握することが困難な場合があります。

DALIA の計算結果とレインフロー法による等価応力・等価繰返し回数評価およびマイナー則による疲労強度の考え方を組み合わせることにより、工学的見地から疲労損傷箇所を推定し、点検計画などに活用することができます。

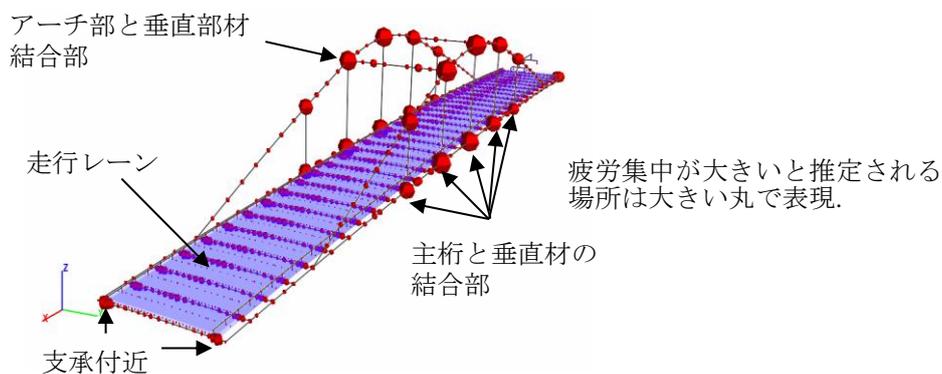


図10 DALIA を使った「疲労損傷箇所推定」

### ● 橋梁振動の周辺地域への伝搬

車両走行により発生した橋梁振動は、空気を介しては低周波騒音として、下部工・基礎から地盤を介しては地盤振動として周辺地域に伝搬し、環境的な課題となることがあります。

このような現象をシミュレートするには、DALIA で計算した橋梁の応答データ、あるいは現場で計測した振動データを、ALFA、SuperFLUSH/3D などの別の解析プログラムへの入力データとして利用しています。

## 空気を介して伝わる低周波騒音（ALFA）

騒音問題として近年注目されている現象に「低周波騒音」があります。一般的には 100Hz 以下の周波数の騒音を低周波騒音と定義していますが、さらに 20Hz 以下の音は（人が聴き取る事ができない音域です）超低周波音と呼ばれています。騒音は人の感覚的な問題であり、評価が難しい現象ですが、低周波騒音による建具の振動や健康障害などの苦情が報告されて、発生源の特定や騒音対策が求められることがあります。低周波騒音解析ツール ALFA は、橋梁の速度変化を荷重として、空気圧力の振動・伝播を計算します。図 1 1 に示すように、橋梁の振動速度は DALIA の計算結果を利用する事も可能です。

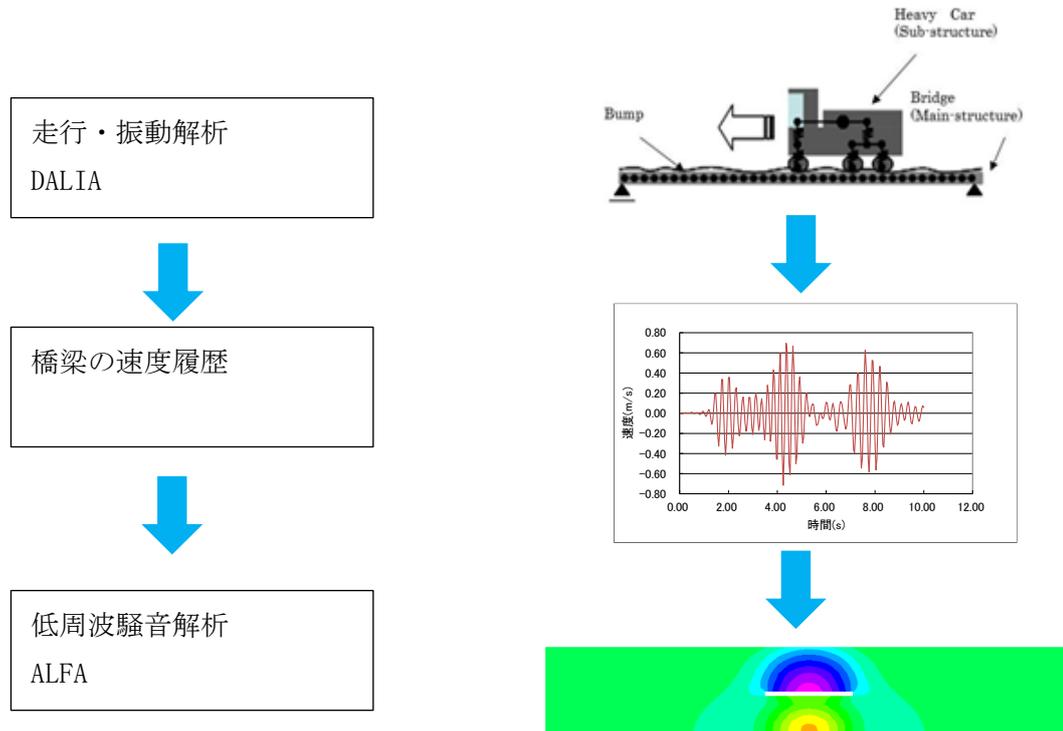


図 1 1 騒音の解析手順

ALFA による道路橋の振動による騒音評価事例を示します。図 1 2 の橋梁部に速度変化を想定して周辺の騒音分布を計算したものです。

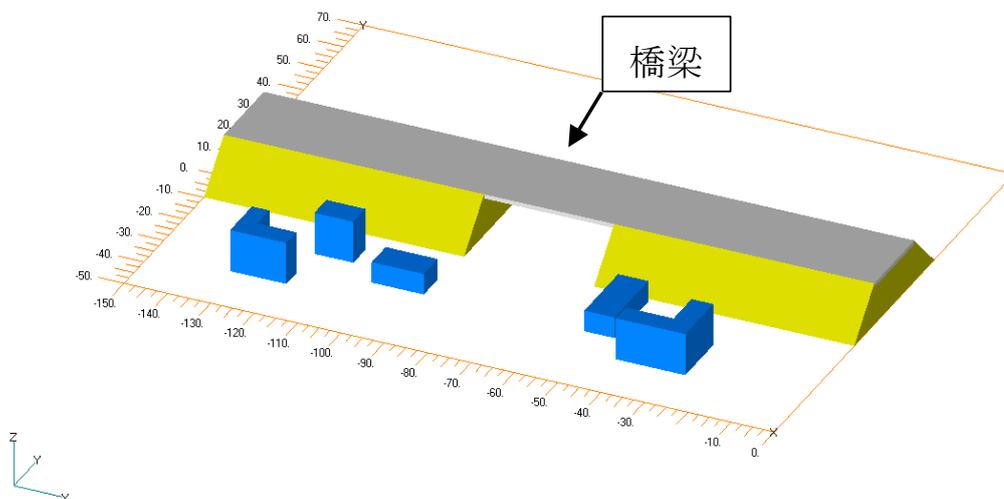


図 1 2 計算モデル図

低周波騒音の計算結果を図13に示します。橋梁の直下で大きな騒音が発生し周辺に伝播している状況が分かります。また、周辺の建物配置や形状の影響により局所的に騒音レベルが大きくなる箇所や、建物の後背部で騒音レベルが小さくなる箇所が発生している事も分かります。

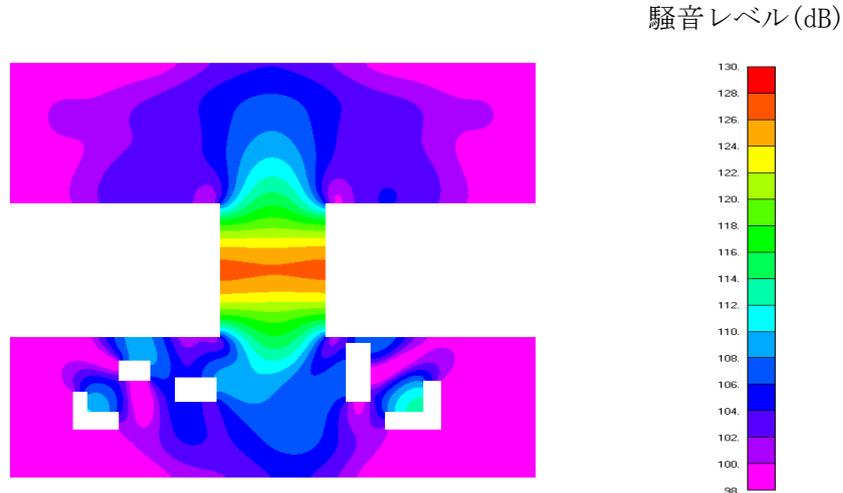


図13 地上1mの騒音レベル

#### 地盤を介して伝わる振動 (SuperFLUSH/3D)

本誌46号でご紹介した通り、地盤を介して伝搬する交通振動問題にKKEではSuperFLUSH/3Dによる有限要素法と薄層要素法をハイブリッドで用いる解析手法をご提案しています。与条件である加振力にはDALIA他、別プログラムの計算結果や、現地計測データなどを用いることができます。

広範囲の地盤モデルを用いた振動解析を、すべて有限要素法で実施した場合と同程度の精度を確保しつつ、スピードアップし作業を効率化することができます。詳細は本誌46号をご参照ください。

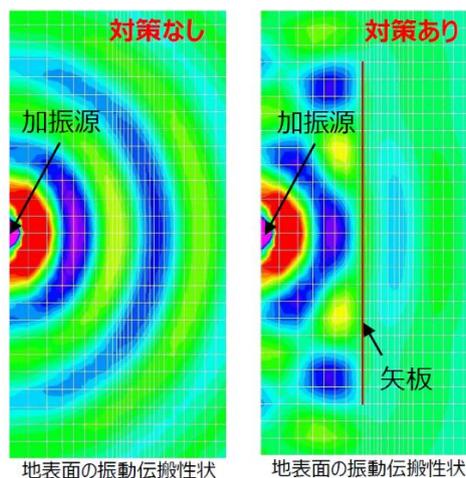


図14 鋼矢板による地盤振動の遮断効果をSuperFLUSH/3Dで検証した事例

以上、原因と結果の関係にある「路面の段差・ジョイント異常」と「交通振動・騒音」に関する取り組みをご紹介します。

## カーボンニュートラルと SimScale の屋内空調解析

気候変動問題に対する枠組みであるパリ協定に基づき、日本は 2050 年カーボンニュートラルの実現を表明しています。日本の二酸化炭素排出量の内訳では、建築分野(図 1 のオフィス・商業施設等および住まい)が 32%と全体の 1/3 を占めています。これは産業部門に次ぐ 2 番目であり、電動化でカーボンニュートラルを目指す過渡期となっている自動車などの輸送部門よりも多いです。したがって、日本でのカーボンニュートラルの実現に向けて、建築分野の果たすべき役割は重要であるといえるでしょう。

カーボンニュートラル実現のために建築分野では

- ・ZEB (ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)
- ・ZEH (ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス)

の普及が進められています。

これは、省エネ (建築物で消費するエネルギーを減らす) と創エネ (太陽光発電などにより建築物で生産するエネルギーを増やす) を組み合わせて、実質的に消費エネルギーをゼロにする建築物を指します。

図 2 に建築物内の二酸化炭素排出量の内訳を示します。これより、空調設備に関する熱源・熱搬送が 1/3 から半数近くを占めていることが分かります。

この結果から、建築物内の省エネ実現のために、空調効率の改善が重要であることが示唆されます。そのための施策として外皮性能、日射遮蔽、換気効率の向上などがあげられます。

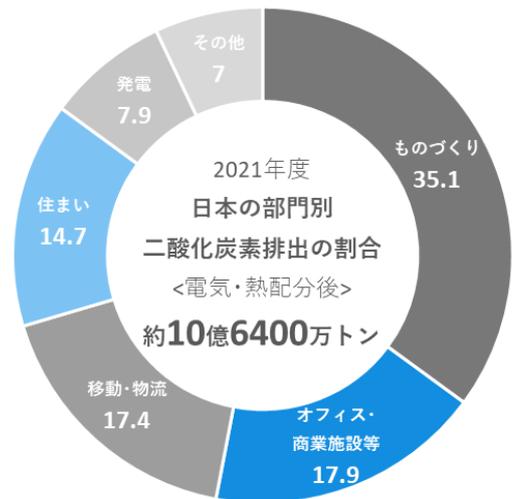


図 1: 国立環境研究所「温室効果ガスインベントリ」より作成



図 2: 関東経済産業局「中小企業の支援担当者向け省エネ導入ガイドブック」より作成

### ● 建築で求められる熱流体シミュレーション

シミュレーションは目に見えない現象を捉え、現象をコントロールする設計に役立てることができません。そのため、建築分野では ZEB・ZEH ひいてはカーボンニュートラルの実現に向けて、シミュレーションを取り入れる動きが進んでいます。

そんな建築分野におけるシミュレーションですが、これまであまり用いられていませんでした。その理由として以下のことがあげられます。

- ・ 解析対象領域が広く、計算が大規模になりやすい
- ・ ハードウェアおよびソフトウェアが非常に高価なため、イニシャルコストの高さから導入に踏み出せない
- ・ 従来のソフトウェアはインターフェースが扱いにくい

当社は SimScale がこれらを解決し、建築業界におけるシミュレーションのゲームチェンジャーになると考えています。次章より SimScale の特徴および計算事例について詳しく紹介します。

### ● SimScale による屋内空調解析

当社では SimScale を「完全クラウド CAE」と標榜しています。SimScale は Google Chrome などの Web ブラウザで使用できる CAE の Web アプリで、CAD モデルをアップロードすれば、シミュレーションを Web ブラウザ上で完結することができます。シミュレーションの計算部分のみをクラウドで実行する他製品との違いを明確にするために「完全」と付けています。

SimScale では建築分野で便利な機能を数多く提供しています。以下にその例を示します。

- ・ 熱的快適性指標(PMV, PPD)の計算
- ・ 緯度・経度、日時を指定した日射の計算
- ・ 空気齢の計算（換気効率の評価に用います）
- ・ Revit や Rhinoceros を含む幅広い CAD モデルの読み込み

これらの機能、ハードウェア不要である点からのイニシャルコストが低いことに加え、ユーザーフレンドリーに設計された UI によって、世界では建築分野でも広くご活用いただいております。

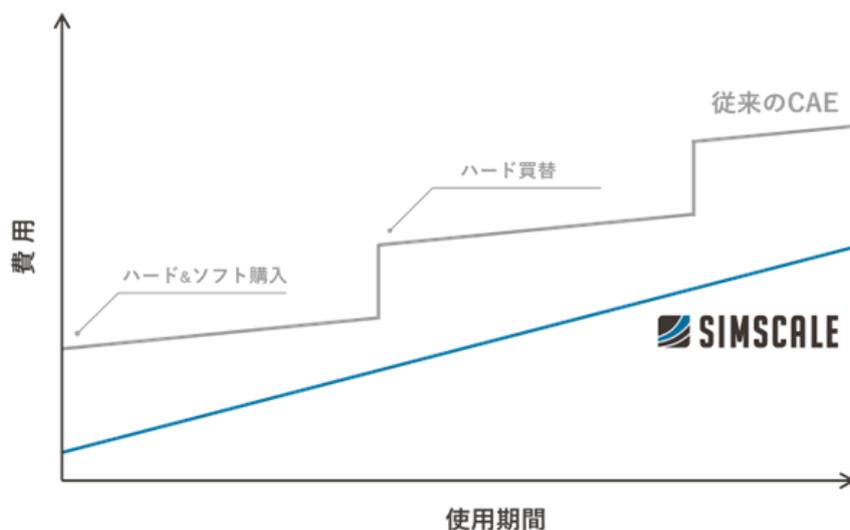


図 3: SimScale と従来の CAE の費用の比較

## ●解析事例のご紹介① 4階建ての病院

### 気流の解析

図4は、4階建ての病院内の空調機能の効果を検証した計算結果です。この事例では対流によって建物の1階から4階にかけて段階的に温度が高くなっている様子が分かります。また白い矢印は気流の流れを表しています。

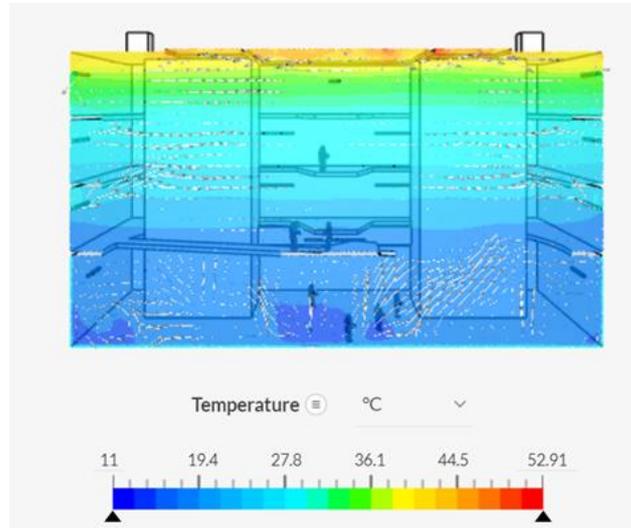


図4: 温度のコンターと気流のベクトルの図

### 快適性の解析

人が熱環境において感じる快適性の指標として、ISO規格である Predicted Mean Vote (PMV)、Predicted Percentage of Dissatisfaction (PPD)による評価が可能です。図5aはこれら2つの指標の関係を示したものです。PMVは熱的快適性の要素となる、気温、平均放射温度、相対湿度、平均風速、着衣量、作業量の6つを考慮して計算される指標です。0が最も快適であり、-3が寒すぎる、+3が暑すぎることを示します。図5bから1階では寒すぎると感じやすく、4階では快適に感じやすいことが分かります。また白い矢印で示されている気流の周りのコンターが周囲より低い値を示していることから、気流が寒さを感じさせる作用をしていることが分かります。

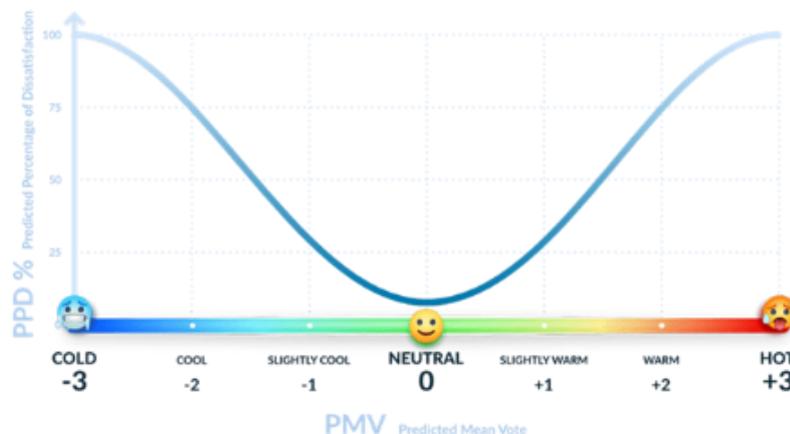


図5a: PMVとPPDの関係

PMVが0の時快適に感じる人が多く、+3になると暑すぎる、-3になると寒すぎると感じます。

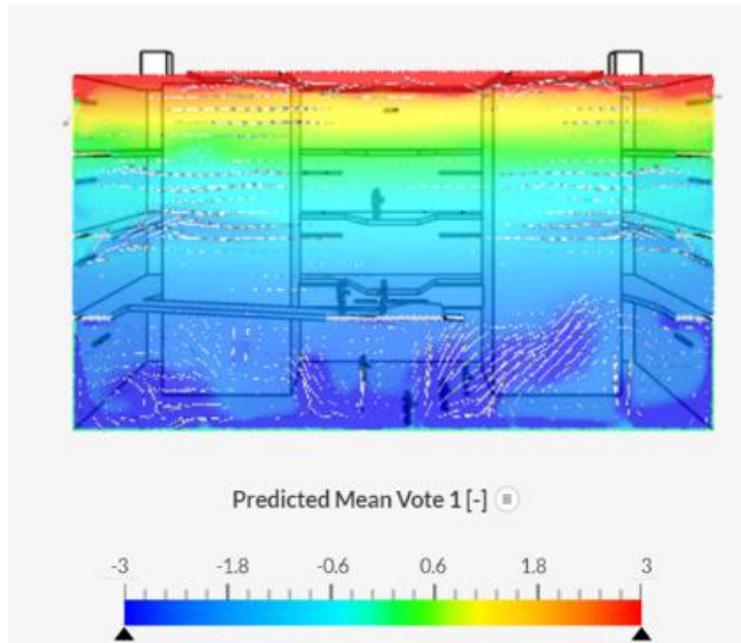


図 5b: PMV のコンター図 白い矢印は気流の流れを表しています。

## ●解析事例のご紹介② 会議室

### 換気効率の解析

この事例では天井に換気扇のある建物内の空気齢を計算しています。空気齢は小さいほど換気が効率的に行われていることを示し、カビの発生や感染症・シックハウスの抑制につながるため好ましいとされています。図 6a は空気例の解析結果を示しています。この結果では一部空気例の大きな箇所があることが分かります。図 6b は図 6a に流跡線(空気の流れる軌跡)を追加しています。これより、壁沿いにまとまった流れができる一方、空気の流れにくい箇所があると考えられます。効果的な換気のためには換気扇の位置の変更や換気扇の風量を調整することなどが上げられます。

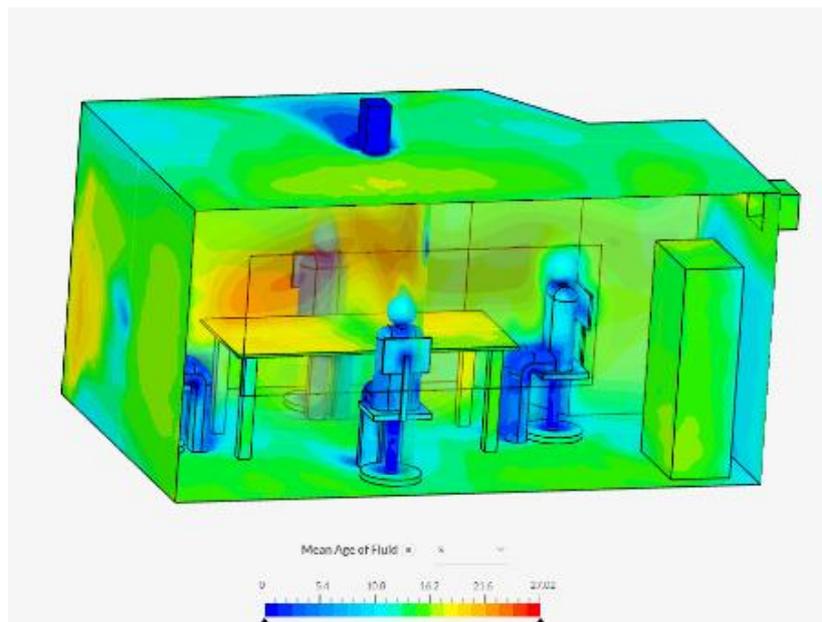


図 6a: 天井に換気扇のある会議室の空気齢のコンター図

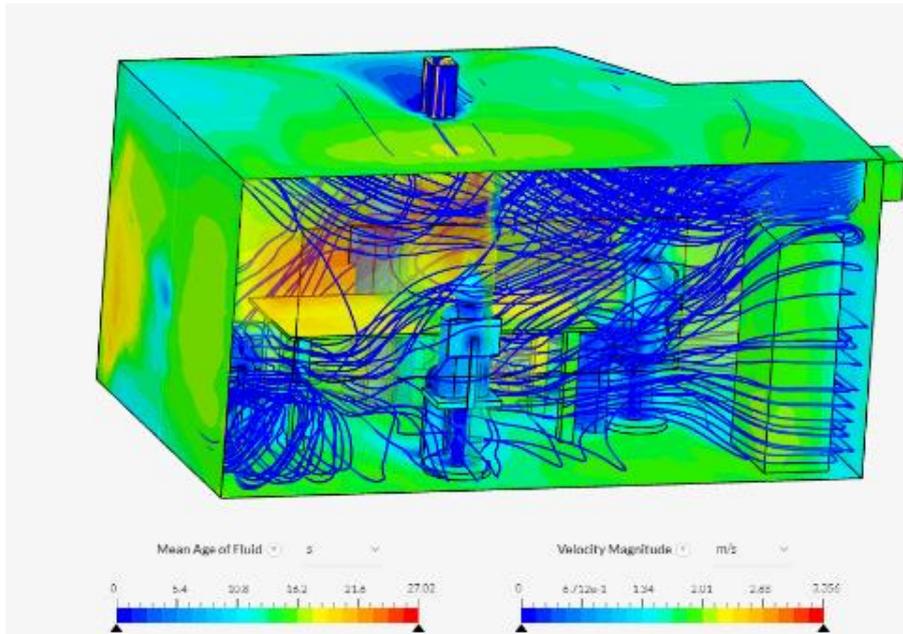


図 6b: 図 6a に流跡線を追加した図

### ●解析事例のご紹介③ 日射の解析

SimScale では日射を計算する機能があり、地図上から場所と日時を選択すると自動的に太陽の位置を計算します。図 7 はその操作画面を示したものです。これにより日射の指向性を考慮した検討が可能になります。

図 8 および図 9 に解析結果を示します。図 8a は建物の外側での日射の影響を示したもので、日射方向と壁の成す角の違い、壁面での熱抵抗の違いなどから、屋根や側壁で入熱量が顕著に異なっている様子がわかります。また、屋根では煙突部の影になっている部分で、日射による入熱が小さくなっている様子もわかります。図 8b は窓を通して室内に作用する日射の影響を示したものです。このように数値解析を用いることで、どの位置で日射の影響を強く受けるのかをわかりやすく可視化できます。

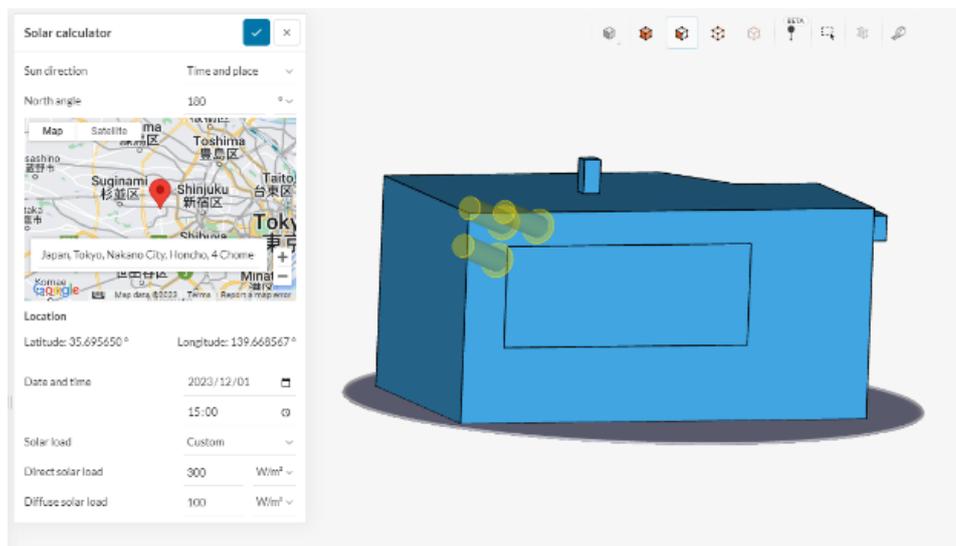


図 7: 日射の条件設定

地図上で希望の場所と希望の日時を指定すると、自動的に日射の方向を計算します。

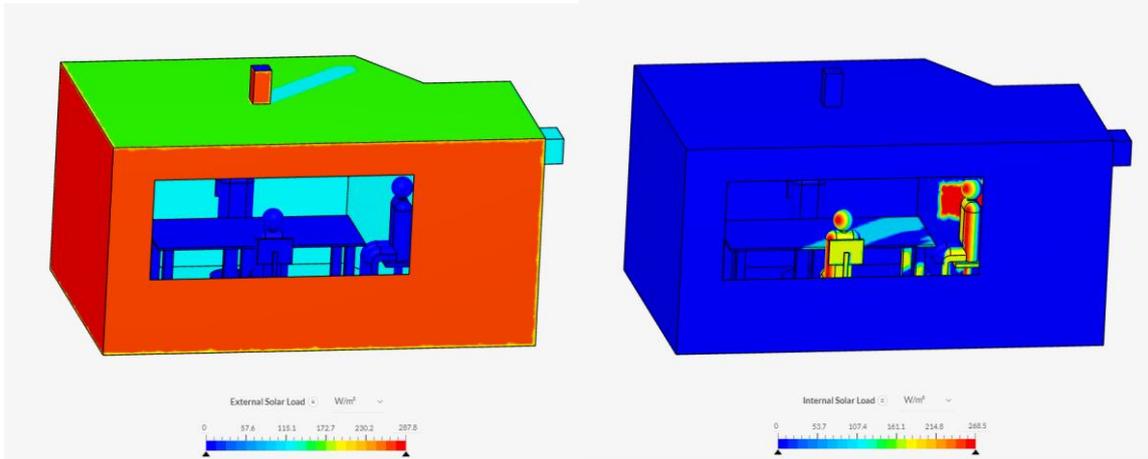


図 8a: 建物外壁に直接当たる日射量  
上部の排気口に注目すると、日射の入る方向を考慮して、陰になる部分の日射量が小さくなっていることが分かります。

図 8b: 窓から建物内部に入る日射量  
太陽が入射する方向に対して、局所的に多く日射に暴露する部分があることが分かります。

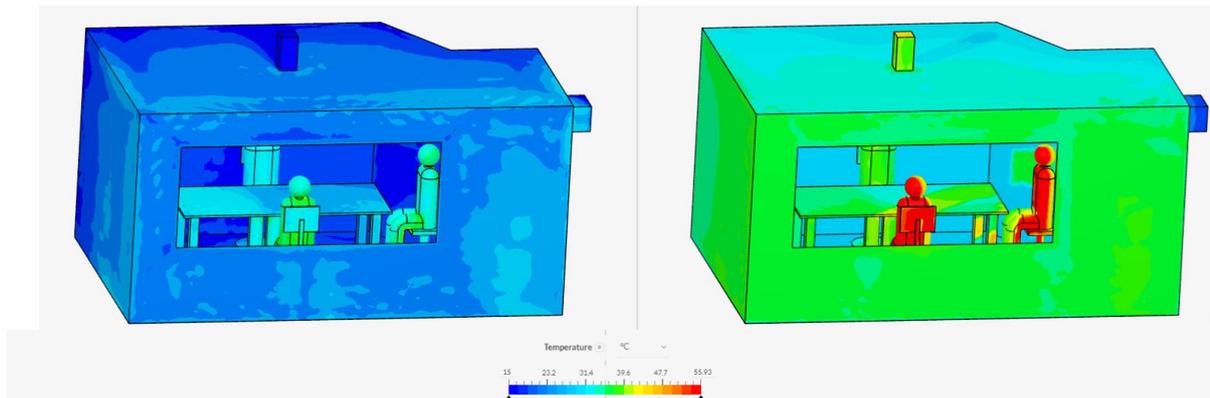


図 9: 日射がない場合(左)と日射がある場合(右)の温度比較

日射があることで全体的に温度が上がり、日射が直接当たる方向は温度が高く、影になっている部分など日射が当たらない部分は温度が低くなっていることが分かります。

### ● おわりに

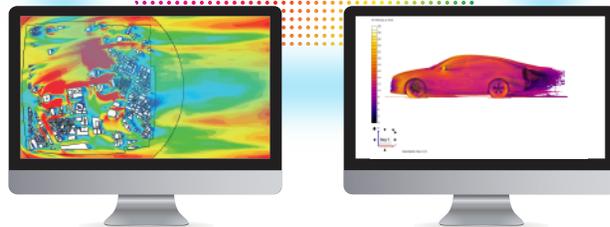
本稿では建築物における屋内空調に関する解析事例を紹介しました。カーボンニュートラル実現のために、温暖化による厳しい気象条件の中、省エネを実現するという高い要求を達成する必要があります。熱流体シミュレーションを活用し設計案を比較検討することで、エネルギー効率がよく快適な空間を設計できます。

### 【参考文献】

1. 環境省 ZEB・PORTAL <https://www.env.go.jp/earth/zeb/>
2. 「光・熱・気流 環境シミュレーションを活かした建築デザイン手法」編著 脇坂圭一
3. 「最新 建築環境工学 改訂 4 版」共著 田中俊六 土屋喬雄 秋元孝之 寺尾道仁 武田仁
4. ASHRAE-55 <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
5. ISO 7730 <https://www.iso.org/standard/39155.html>

# 業界初！ 完全クラウド CAEプラットフォーム

## SIMSCALE



### 無料プラン

#### COMMUNITY

QRコード（下部に掲載）よりサインアップし、無料でご利用できます。



- 一部の解析機能
- 3,000 コア時間
- 最大 10 回まで解析可
- 公開プロジェクトのみ

### 有料プラン

#### PROFESSIONAL

1人で使う場合に  
適したプランです。



- 全ての基本的な解析タイプ
- 10,000 コア時間+追加可能
- 解析回数に制限無し
- プロジェクトの非公開設定機能
- チャットサポート

#### TEAMS

3人以上で使う場合に  
適したプランです。



- 全ての基本的な解析タイプ
- 1人 5,000 コア時間+追加可能
- 解析回数に制限無し
- プロジェクトの非公開設定機能
- チャットサポート
- チームダッシュボード機能

### 動作環境

ウェブブラウザ | Google Chrome (バージョン 60 以上)、Mozilla Firefox (バージョン 55 以上)

画面解像度 | 1366×768 以上 (拡大率 100%、デフォルトのフォントサイズを推奨)

\*ブロードバンドインターネット接続を推奨

### 対応 CAD フォーマット

Parasolid (.x\_t, .x\_b)、SOLIDWORKS (.sldprt, .sldasm)、Autodesk Inventor (.iam, \*.ipt)、Rhino 4, 5, 6, and 7 (.3dm)、CATIA (.CATPart, .CATProduct)、PTC Creo (.prt, .asm)、Siemens NX (.prt)、Solid Edge (.par, .asm, .psm)、ACIS (.sat, .sab)、STEP (.stp, .step)、IGES (.igs, .iges)、REVIT (.rvt)、STL (.stl)

### ソルバー

構造解析 | 線形解析・非線形解析、静解析・動解析、固有振動解析・周波数応答解析、熱伝導解析・熱応力解析

流体解析 | 非圧縮性流れ・圧縮性流れ解析、亜音速流れ解析、熱流体解析（対流・伝導・輻射）、混相流解析  
風環境解析、格子ボルツマン法による非圧縮性流れ解析

#### すぐに試して見たい方 無料プラン



QRコードよりお申し込み頂くだけで、すぐに SimScale をお試しいただくことができます。(一部機能に制限があります)

#### 詳しい操作を知りたい方 体験セミナー



講師の説明を聞きながら一緒に操作をすることで、初めてお使いいただく方でもその操作性を体感していただけるセミナーです。

#### 商品情報を知りたい方 SimScaleWEB



詳しい商品情報に加え、業界・産業別の適用例も掲載しております。お気軽に Web ページにお越しください。

## 建築物の設計における風環境ランク評価とその応用

近年の都市計画や設計では、まちづくりやビル建設の構想時に、新たな建築物が周辺に与える環境を検討することが増えています。例えば、ヒートアイランド現象の抑制を含めた環境への取り組みなど、周辺の自然環境や住民に配慮した計画を作成することが重要です。

KKE では流体解析の技術を用いて、風解析コンサルティングサービスを実施しており、都市計画の構想や建築物の設計に対する支援を行っております。ここではこのコンサルティングサービスについてご紹介します。

### ● 風環境ランク評価

環境アセスメントにおいては、対象事業の開発区域の規模によって、風害の検討が発生することがあり、予測・評価においてシミュレーションや風洞実験の実施を求められることがあります。また、事業の中で自治体特有の制度を利用する場合に、風害に関する調査結果を要求されることがあります。

例えば、東京都の総合設計制度では、用途地域が商業施設の場合は高さ 60m 以上、商業施設以外の用途地域は高さ 45m 以上の場合は、風害に関する調査結果の提出が求められています。

このように風環境に関する定量的な評価が必要な場合は、風の確率的評価を実施します。確率的評価の手法として一般的に用いられているものには「村上方式」と「風工学方式」の 2 種類がありますが、どちらも風の発生頻度によりその地点の風環境ランクを 4 種類に分類する方法です。

村上方式とは、村上周三らによって提案され、風の観測結果と都内住民(東京都中央区月島等)のアンケート調査結果に基づき、日最大瞬間風速と生活環境への影響を分析して作成された風環境評価尺度を利用した方式です。現在最も一般的に用いられている評価方法になり、評価尺度は風の実測と住民の意識調査結果を分析して作成されたものになります。

表1 村上方式による風環境の評価尺度

ラ ン ク	強風による影響の程度	対応する空間用途の例		評価する強風のレベルと 許容される超過頻度		
				日最大瞬間風速(m/s)		
				10	15	20
				日最大平均風速(m/s)		
				10/G. F	15/G.F.	20/G.F.
1	最も影響を受けやすい用途の場所	住宅地の商店街	野外レストラン	10% (37 日)	0.9% (3 日)	0.08% (0.3 日)
2	影響を受けやすい用途の場所	住宅街	公園	22% (80 日)	3.6% (13 日)	0.6% (2 日)
3	比較的影響を受けにくい場所	事務所街		35% (128 日)	7% (26 日)	1.5% (5 日)

出展：村上周三ら（1983）

地上 1.5m の高さにおける日最大瞬間風速の発生頻度を 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s の 3 風速段階において求め、その結果に対して許容される風速の超過確率から風環境を表 1 に示す 3 つのランクに分けて評価するものですが、実際にはランク 3 以上の風環境が発生する事があります。この場合は、ランク 4 と表現します。

一方の風工学方式は、風工学研究所によって提案され、都内約 100 地点の風の観測結果と都内住民のアンケート調査結果に基づき、平均風速と対応する街並みを分析して作成された風環境評価指標を利用する方式です。村上方式との違いは、地上 5m での平均風速の発生確率に基づいた評価指標を用いている点になります。累積頻度 55%および 95%での風速を求め、その結果から表 2 に示す領域 A～領域 D の 4 つのランクに分けて評価を行う方法です。

表 2 風工学研究所による風環境の評価尺度

風環境評価区分	累積頻度 55%風速	累積頻度 95%風速
領域 A：住宅地相当	$\leq 1.2$	$\leq 2.9$
領域 B：低中層市街地相当	$\leq 1.8$	$\leq 4.3$
領域 C：中高層市街地相当	$\leq 2.3$	$\leq 5.6$
領域 D：強風地域相当	$> 2.3$	$> 5.6$

これらの評価方法を用いる事により、その地点が住宅地などの用途として適しているか、また用途として許容できるのかなどの判断が可能となります。

図 1, 図 2 に KKE の社屋が建築される前後の状況における風環境ランク評価（村上方式）の例を示します。

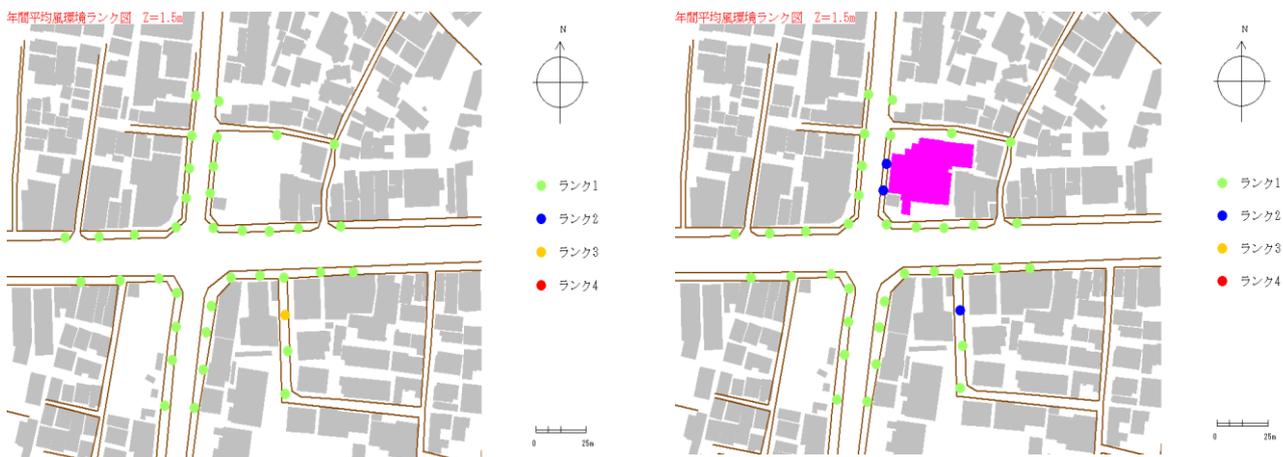


図 1 社屋の建設前の風環境ランク

図 2 社屋の建設後の風環境ランク

建築前と建築後を比較すると、ランク 2 の評価が KKE 社屋（赤い建物）の西側で増えていることが分かり、周辺の風環境に変化をもたらしていることが分かります。

### ● 風速比による評価

前述した風の評価方法の他に、建築前後での風速比を比較する手法があります。平均風速や最大風速

などの代表風速を用いた計算を行い、風速比を算出することで、風速の変化を視覚的に検討することが可能です。

図3、図4に、KKE社屋付近の建築前後の風速比の比較例を示します。

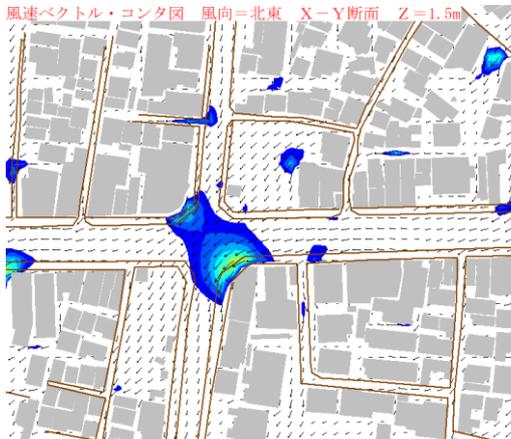


図3 社屋の建築前の風速比

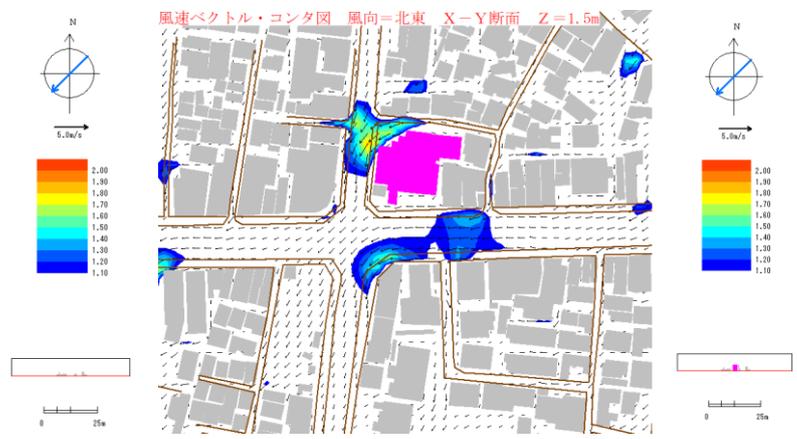


図4 社屋の建築後の風速比

風速比の評価を実施することで、新たに建築される建物によって生じる風が、住宅や周辺の環境に大きな影響を与えないかを事前に評価することができます。高層ビル、スタジアム・公共施設などの屋外施設が建築されることによる風の影響を評価し、影響を軽減するための設計変更・植栽案などを検討するために活用されます。

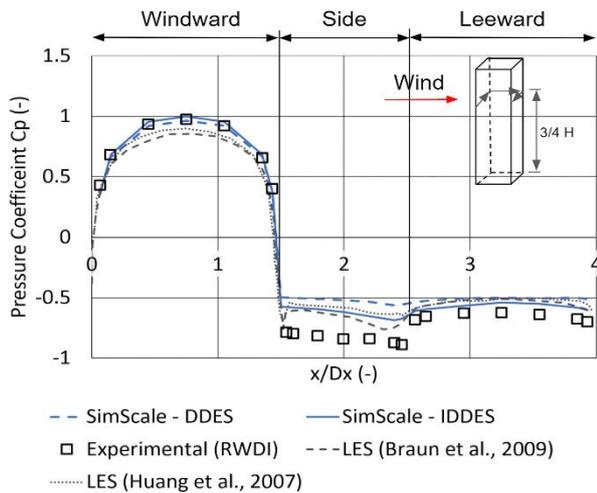
### ● 風荷重の評価

建物、特に高層や超高層の建築物では、周辺街区の影響も合わせ、設計対象がどのような風荷重を受けるかを評価することが求められます。これまでは風洞実験により、実験的に風荷重を算出することが一般的でした。しかし、2020年11月、一般財団法人日本建築センター（BCJ）より時刻歴応答解析建築物・工作物性能評価業務方法書において、耐風設計に関する規定が追加され、CFD（Computational Fluid Dynamics：数値流体力学）を活用した評価も是とされました。今後は、設計の上流段階（例えば設計対象の形状違いでの比較検討）ではCFDを、最終段階での性能評価には風洞実験を、といったハイブリッドでの設計検討が主流になっていくと考えています。

図5は、KKEが日本国内向けに販売サポートを開始した解析ソフト（SimScale）を用い、CAARC（Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council）のベンチマークテストにおいて圧力係数を計算した例です。

観測点を建物表面に設置し、圧力係数を風洞実験結果や他文献の解析結果と比較しました。図5に示すように、計算結果はこれらと一致することが確認され、CFDの妥当性が示されました。

KKEでは、このようなCFDを活用した風荷重を評価するコンサルティングサービスを提供しております。KKEの扱うソリューションを用いることで、実スケールの建物モデル、数千万～数億メッシュの解析規模、実時間で数十分の非定常解析、形状違いなどの複数シナリオの比較検討に関する数値解析を数時間から1日程度で行うことが可能です。



Pressure Coefficient : 圧力係数、 $x/dx$  : 無次元化した座標  
 DDES : Delayed Detached Eddy Simulation  
 IDDES : Improved Delayed Detached Eddy Simulation  
 LES : Large Eddy Simulation

図5 風洞実験、SimScale、文献値との圧力係数の結果比較

出展 : A. K. Dagnev and Bitsuamlak, “Computational evaluation of wind loads on buildings: a review,” Wind and Structures, 16, 2013, p629-660.

● おわりに

今後、国内各地の再開発がますます進んでいくと予想されており、建築物がもたらす風の影響を評価する局面が増えていくと考えています。KKE は風解析コンサルティングとして、風環境のランク評価を長年実施しておりますが、最近では風環境のランク評価に加えて、風荷重の評価についても多くの相談をいただいております。CFD を用いたコンサルティングサービスを提供しています。今後も時代の流れに沿ったサービスの提供を続けて、都市計画や建築物の設計に貢献していきます。お困りごとがございましたら、お気軽にご相談ください。

【引用文献】

- ・村上周三、岩佐義輝他、居住者の日誌による風環境調査と評価尺度に関する研究、日本建築学会論文報告集 第 325 号、pp.74-84、1983
- ・A. K. Dagnev and Bitsuamlak, “Computational evaluation of wind loads on buildings: a review,” Wind and Structures, 16, 2013, p629-660.



解析ポータルから様々なソリューションをご覧いただけます。

【解析ポータル】

<https://kaiseki-kke.jp/>

【ビル風・風環境解析】

<https://kaiseki-kke.jp/consulting/flood/page09.html>

## 電磁界解析による構造物への落雷時検討

これまで本誌でご紹介する機会がありませんでしたが、KKEはXFdtdというソフトウェアを用いた電磁界解析サービスをご提供しています。アンテナの設計や、電磁波の人体への影響、レーダー波による物体検知などの問題への適用機会が多いツールですが、ここでは橋梁他の構造物への落雷時検討に活用した事例をご紹介します。

落雷により構造物内に急激に発生した大電流（サージ電流）が、避雷装置によってねらい通りに接地電極へ流れるか、アース後の地表面に危険な電位差が生じないかを確認する目的で利用しています。

### ● XFdtd とは？

時間領域差分法（FDTD 法）を使用した世界初の商用ソルバーとして 1994 年に米 Remcom 社からリリースされて以来、世界の電磁界解析に関わる研究者、技術者に提供され続けています。進化し続ける計算アルゴリズムに加え、研究者が要求する精度・速度・安定性に対応できる豊富な機能と柔軟なカスタマイズ性により、その歴史と実績に支えられた信頼は、多くのユーザに支持されています。

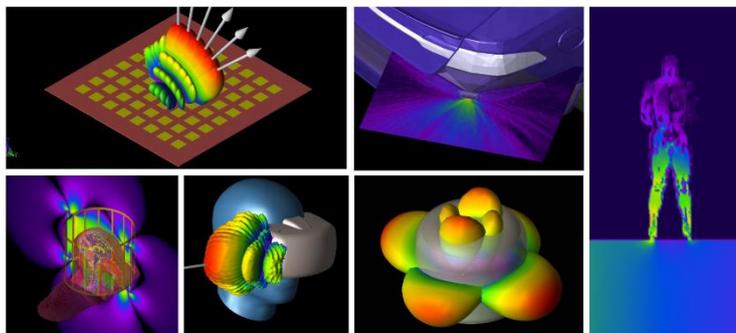
KKE は Remcom 社と長きに渡り技術的な交流を行い、協力体制を築いています。

FDTD 法とは、空間・時間的に差分化したマクスウェル方程式を時間ステップ毎に解き、電磁場を求める手法です。時間領域の解法であるため広帯域の結果を一度の解析で得ることができます。

この他、XFdtd は下記のような特徴を有しています。

### 豊富な適用分野

フルウェーブ電磁界解析、静電気、生体熱、最適化、および回路ソルバーを備えているため、アンテナ設計や配置、生物医学や SAR、EMI/EMC、マイクロ波/ミリ波デバイス、レーダーや散乱、雷サージなど、様々な分野に適用可能です。



### GPU による解析高速化

XFdtd のアルゴリズムは並列計算が得意な GPU と非常に相性が良く、計算速度を飛躍的に向上させることができます。複数の GPU を使用することで、大規模な解析をさらに高速に計算することができます。CPU のみの使用に比べて、超高速な計算が可能になります。

### 高精度な解析

XFdtd の XACT 機能により、複雑な湾曲や微細な間隙など、結果に極めて大きな影響を与える形状を正確に捉え、かつ解析時間や必要なリソースを削減したうえで、解析精度の向上を実現しています。

ここからは、この XFdtd を構造物への落雷時検討に適用した事例をご紹介します。

## ● 橋梁への落雷解析事例

図1の橋梁モデル（鋼3径間連続斜張橋、橋長680m）の主塔頂部に波高値100kAの雷電流を与えたときの、構造内の電流の発生とグラウンディング（アース）の状況を解析しました。

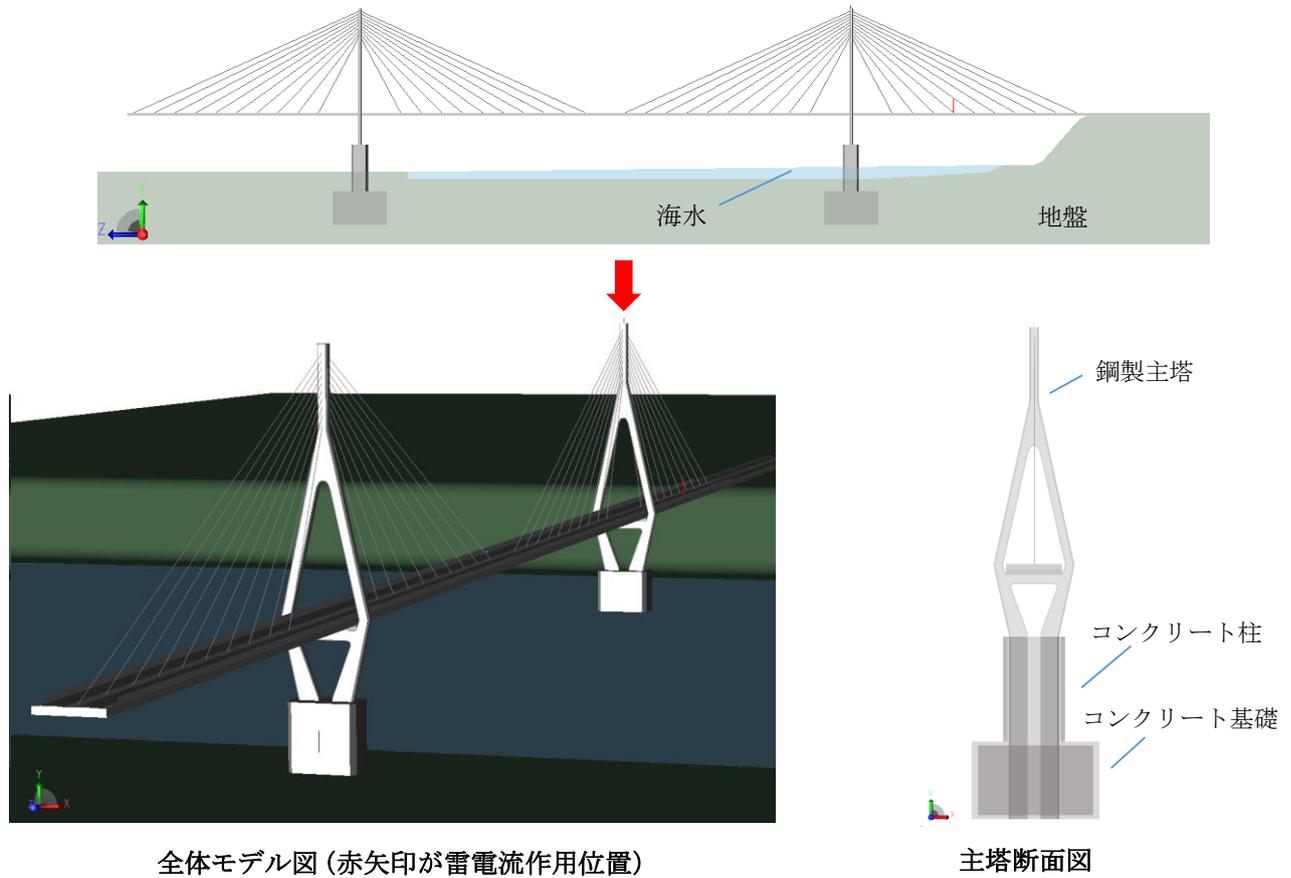


図1 解析モデル

図2～図5に落雷後からの構造内の電界分布と電流分布の解析結果（可視化した350 $\mu$ 秒間の変化）を示します。

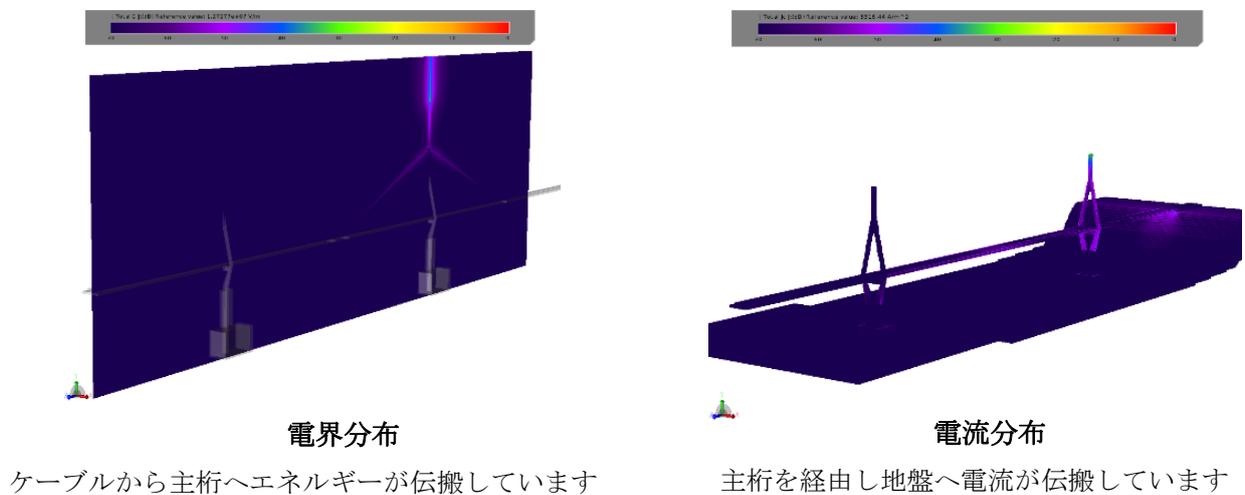
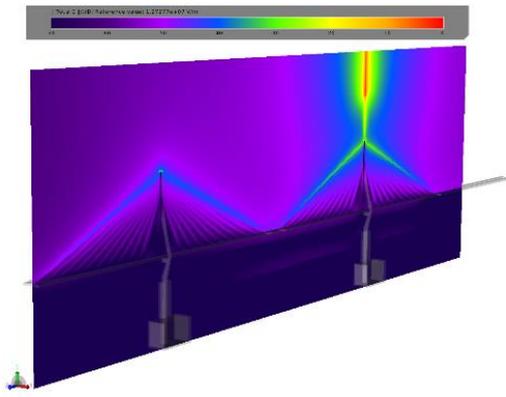
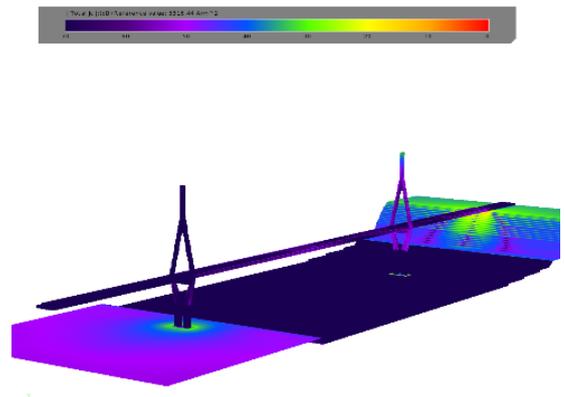


図2 落雷17 $\mu$ 秒後



電界分布

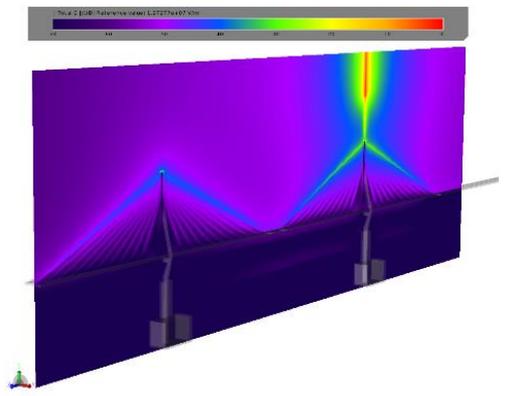
橋梁全体にエネルギー伝搬しており、最頂部ケーブル周囲の電界強度が際立って強くなっています



電流分布

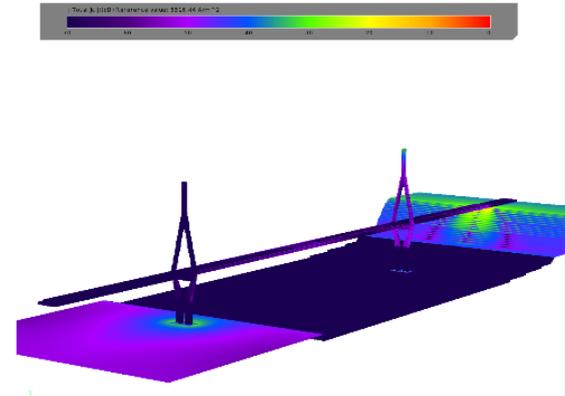
主塔基礎部分への電流の伝搬が観られます

図3 落雷 40  $\mu$  秒後



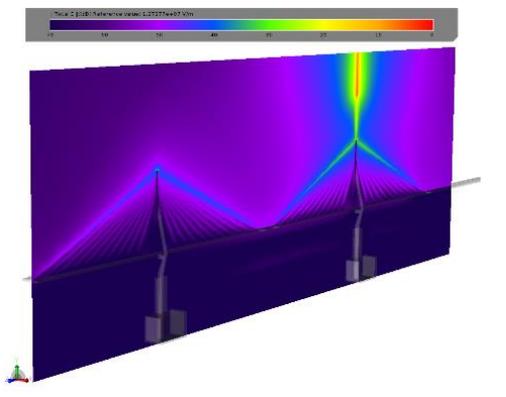
電界分布

供給され続けるエネルギーが引き続き最頂部ケーブルに強く伝搬しています

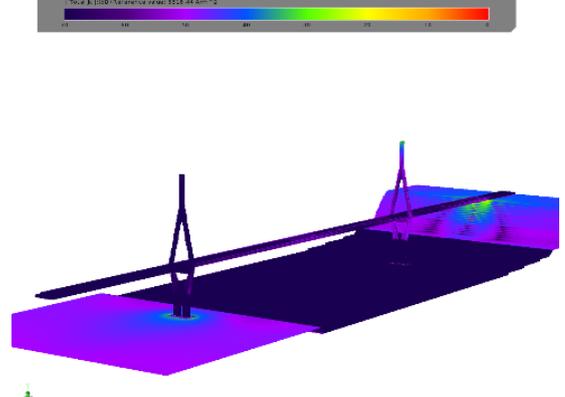


電流分布

図4 落雷 100  $\mu$  秒後



電界分布



電流分布

図5 落雷 350  $\mu$  秒後

## ● 接地電極の等電位化検討事例

落雷後に地盤に逃がした電流により、周辺地表面に危険な電位差が発生しないよう、複数の接地電極を導線で接続する「等電位ボンディング」の効果を検証した事例です。

3つの接地電極が独立しているモデルと等電位ボンディングされているモデルを、その内一つの電極に雷電流を与えて比較しました。解析モデルを図6に示します。

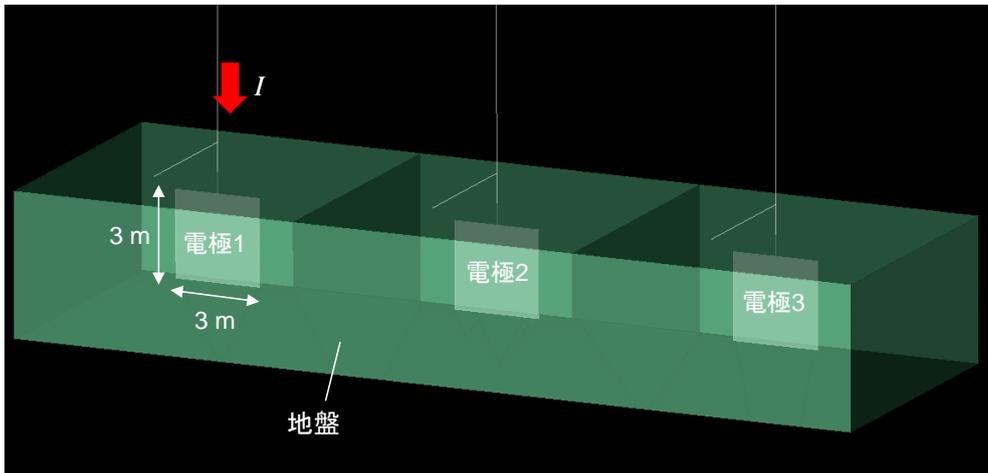


図6 接地電極モデル図

- ・ 接地電極は垂直平板電極とし、接地電極、電流注入線は完全導体で模擬しました。
- ・ 雷電流は左側の接地電極に与えました (図6 赤矢印)。
- ・ このモデルに、ボンディング線 (完全導体で模擬) で接地電極間を接続したものを「等電位ボンディングモデル」、接続していないものを「独立電極モデル」とします。

両モデルの解析結果として、まず電極1～3の電位上昇波形を図7に示します。

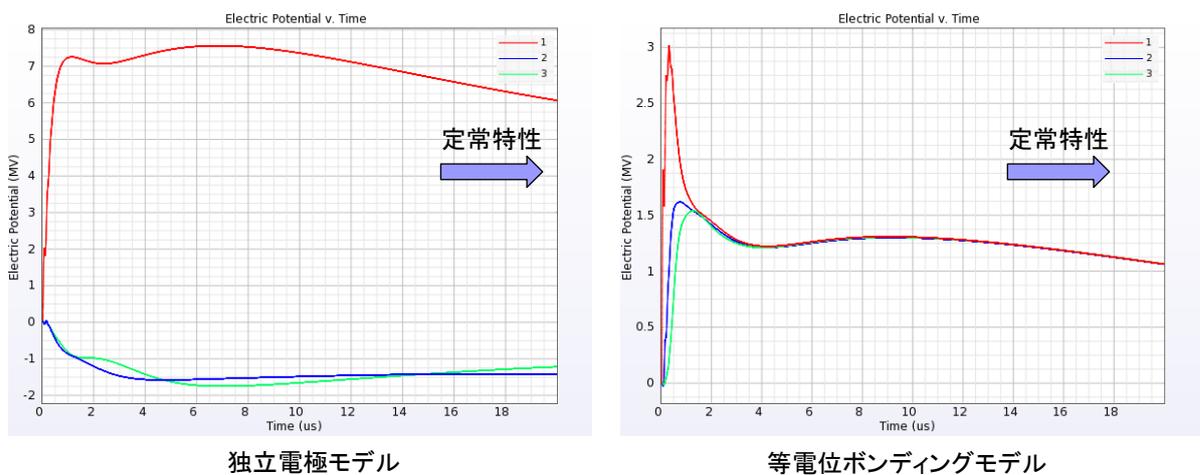


図7 電位上昇値比較

等電位ボンディングモデルでは、2  $\mu$  秒以降で3つの電極の電位上昇値が等しくなっており、等電位化されていることがわかります。

次に、各モデルの電界分布（20  $\mu$  秒経過時点）を図8に示します。

電界分布は、接地電極と平行な面（面1）と大地と平行な面（面2）の2面を求めました。等電位ボンディングモデルは、独立電極モデルに比べて3つの電極付近の電界強度の差が小さいことが分かります。

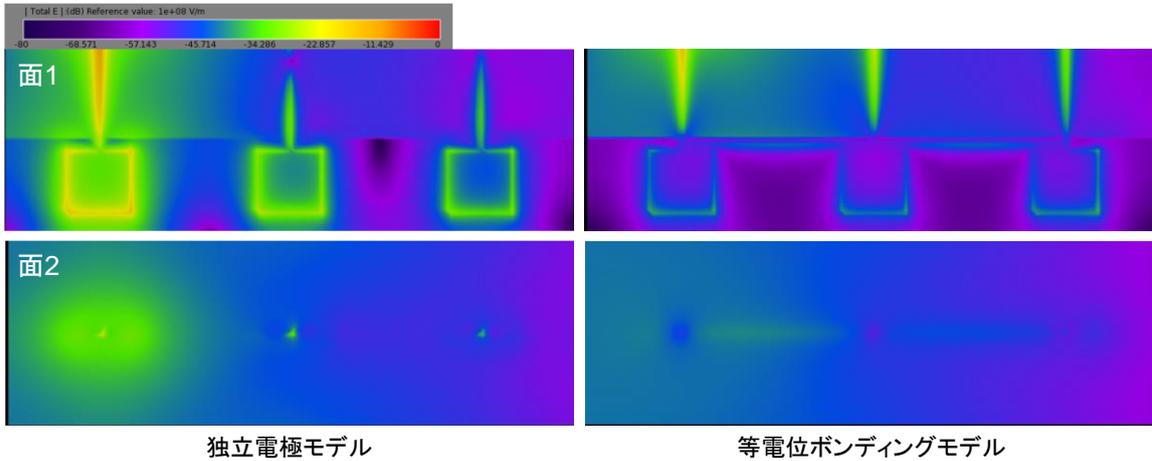
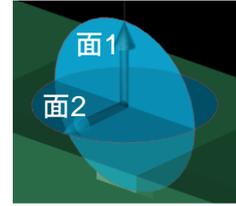


図8 電界強度分布比較

最後に、各電極モデルの地表面に人体モデルを配したときの20  $\mu$  秒時点の電流分布を図9に示します。独立電極モデルでは電極間で電位差があるため、人が立った状態の足幅程度の距離にも電圧が発生し、人体に電流が流れてしまうことが分かります。

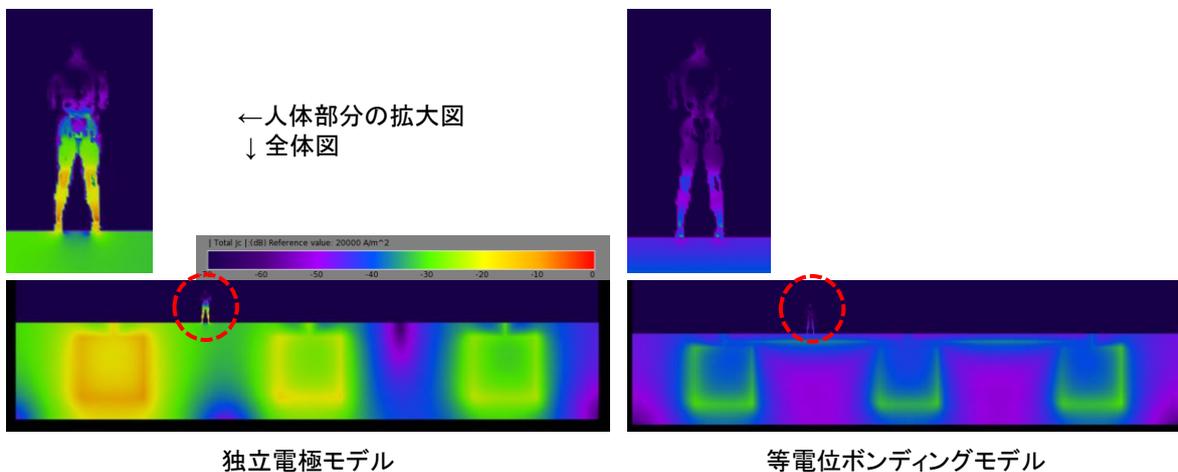


図9 人体への影響

以上、3次元電磁界解析ソフトウェア XFDTD を利用した構造物への落雷解析事例をご紹介しました。XFDTD は時間軸のエネルギー波形入力による応答を逐次求めてゆくタイムドメイン手法を使用しており、落雷による構造物への影響を検証するために適したツールであると考えます。解析結果は時間軸でのアニメーション表示も可能で、落雷後の連続的な変化を視覚的にすることで、問題の原因や潜在的なリスクを発見する有用な手掛かりとなることと思います。

解析コンサルティングサービスを是非ご活用ください。

## 高速道路の地震リスク評価

KKE は、道路や線路のような社会基盤ネットワーク構造物の地震リスク評価に取り組んでいます。社会基盤ネットワークの機能が発揮できなくなるような被害は、社会・経済活動の損失に波及することから災害時における社会基盤ネットワークの機能性に関する評価は重要です。都市部の直下で発生した兵庫県南部地震(1995年1月17日)は、高速道路網をはじめ、社会基盤ネットワークに甚大な被害をもたらしました。

阪神高速道路の被害は、神戸の港湾・物流機能の生命線である3号神戸線(延長39.6km)で橋脚1,175基のうち637基、橋桁1,304径間のうち551径間が損傷(東灘区深江地区で635mにわたり17基の橋脚が倒壊)、5号湾岸線では、西宮市甲子園浜で落橋、六甲アイランド大橋は1万トン以上の主構が3mも横にずれる被害が生じました。

(阪神高速道路ウェブサイト<sup>1)</sup>を参考に一部編集)

本稿では高速道路網を対象とした地震リスク評価方法を紹介します。

### ● 高速道路の耐震化の状況 <sup>2)</sup>を参考に編集

高速道路の橋脚の耐震化は、1995年兵庫県南部地震以降、優先して「落橋・倒壊を防止するために必要な対策」を行い、その後「橋としての機能を速やかに回復させるために必要な耐震対策」を行う、2段階の施策のもと実施されてきました。

「落橋・崩壊を防ぐ対策」は高速道路4社が管理するすべての橋梁で完了しています。一方で、「早期復旧に必要な対策」は、2022年度末の時点で全体の8割弱の実施に留まっています。2016年熊本地震を受けて、高速道路各社が策定した実施計画では、2026年度の完了を目標として掲げられていましたが、資材の高騰や施工上の制約のある箇所が多いことなどから、進捗の遅れが明らかとなっています。2016年以降に耐震化が完了したのは全体の2%程度です(図1)。2026年度の完了は現実的ではないと考えられることから、新たな計画策定が求められています。

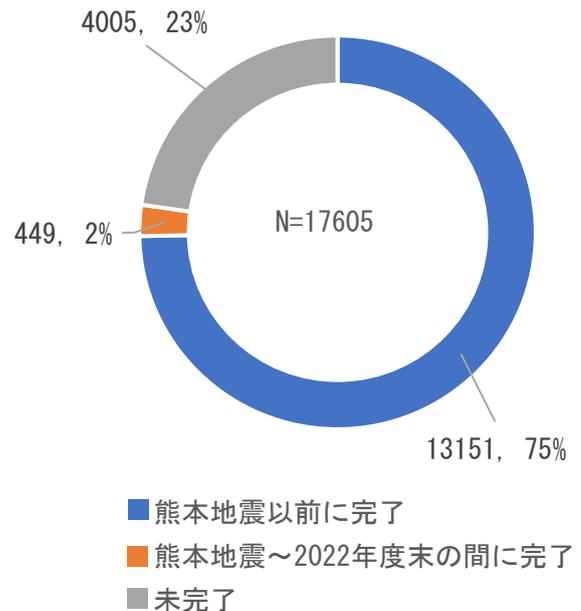


図1 高速道路の橋脚の耐震化(早期復旧に必要な対策)の状況 <sup>2)</sup>より作成

### ● 耐震化の優先度を評価するには

人手や予算が限られ、耐震化の対策期間が長期化する場合には、優先度の高い場所から取り組む計画を策定することが重要です。優先度を評価する方法として、以下が挙げられます。(図2参照)

- (1) 橋脚や路線区間の情報をそのまま活用する方法
- (2) 地震リスク評価を活用する方法

(1)は橋脚の建築年や路線区間の交通量から評価する方法で、分かりやすい利点があります。(2)は損傷する可能性、復旧期間、損失額(補修費用や営業損失)等から評価する方法で、(1)に比べて優先度の段階がより細かくでき、対策の計画が立案しやすくなります。

また、近年着目されている ESG の観点から、社会的影響度や環境負荷を指標化して、耐震化の優先度評価の項目に加えることも考えられます。

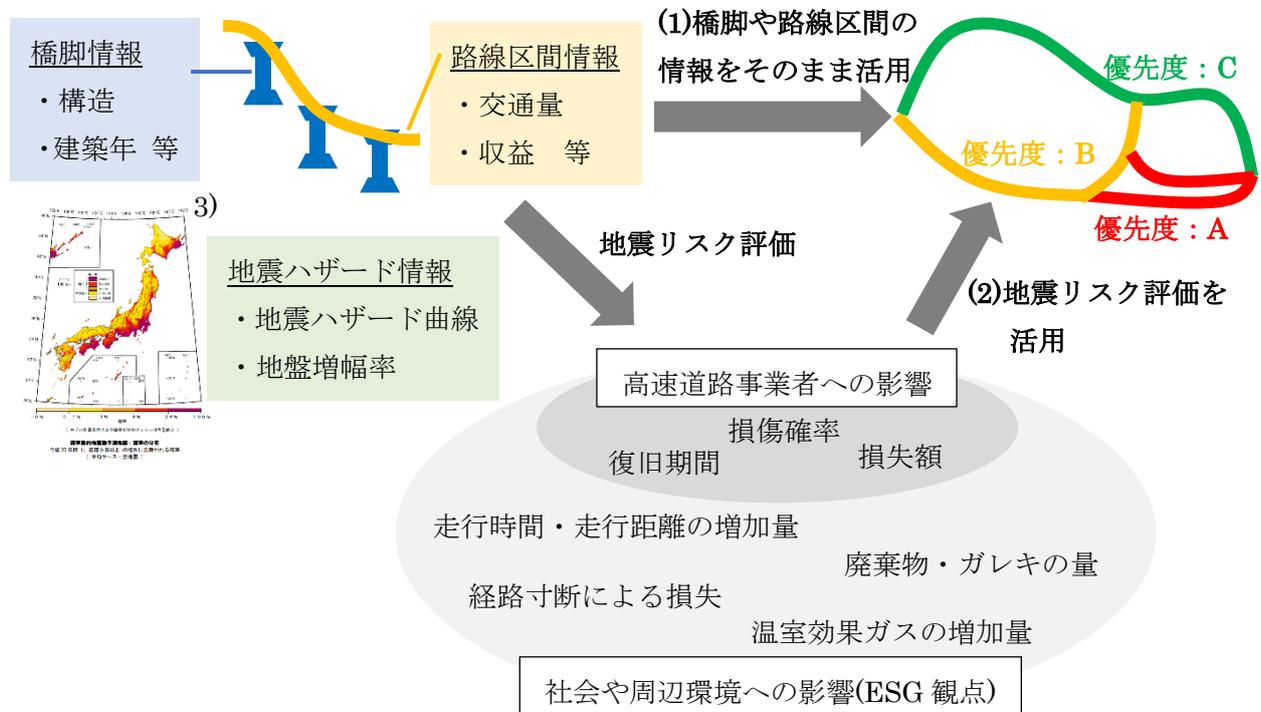


図2 耐震化の優先度評価方法

ここでは、「(2)地震リスク評価を活用する方法」について、評価の流れを紹介します。

● 地震リスク評価の方法：直接損失

地震の揺れによって直接的に損傷したことで被る損失を直接損失と呼びます。直接損失の評価フローを図3に示します。各橋脚でフローの①から⑤の段階を経て、路線区間の優先度を評価します。

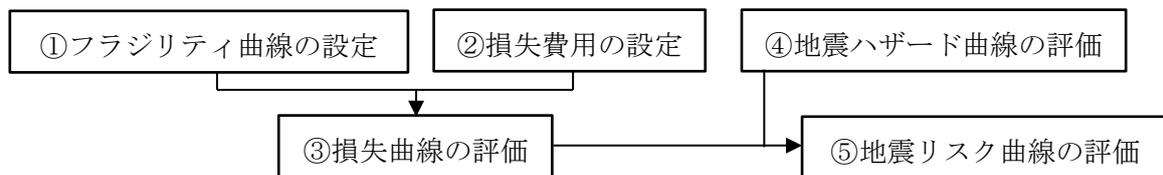


図3 直接損失の評価フロー

① フラジリティ曲線の設定

はじめにフラジリティ曲線を設定します。フラジリティ曲線とは、地震動強さ（例えば、地表最大速度PGV）と、被災度（倒壊～被害なしの度合いを示したもの）以上となる確率の関係を表した曲線です。フラジリティ曲線は構造の種類や建設年等ごとに設定することが一般的です。

一例として、笛木・庄司（2009）<sup>4)</sup>のフラジリティ曲線を図4に示します。この曲線は、兵庫県南部地震における高速道路の橋脚の被害実績を基に構築されています。被害実績データのほかに、応答解析結果から作成する方法<sup>例えば5,6)</sup>もあります。

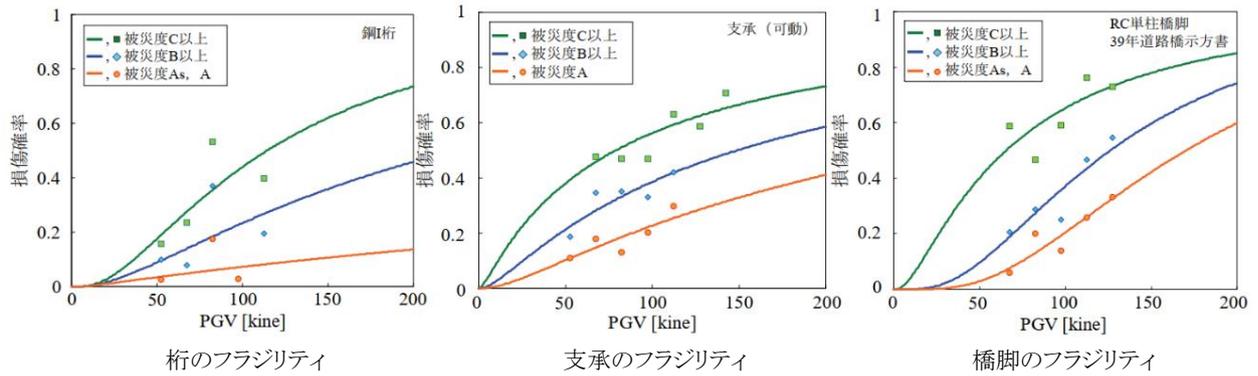


図4 フラジリティ曲線の例：笹木・庄司(2009)<sup>4)</sup>

## ② 損失費用の設定

被災度に対する損失費用を設定します。損失費用の設定方法は過去の被害実績データに基づく設定(例えば<sup>4)</sup>)や、新築時の工事費用から類推する方法などがあります。

## ③ 損失曲線の評価 (図5)

損失曲線とは、地震動強さと期待損失の関係を表したもので、前述のフラジリティ曲線に補修費用を組み合わせることで評価します。

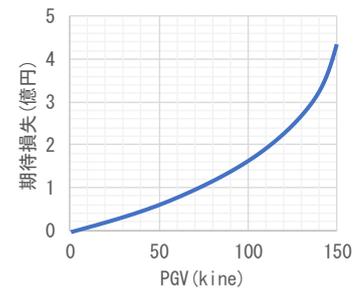


図5 損失曲線の例

## ④ 地震ハザード曲線の評価 (図6)

地震ハザードとは、地震動強さとその超過確率の関係を表したものです。公開情報<sup>7)</sup>から得ることができます。なお、KKEで独自に評価することも可能です。

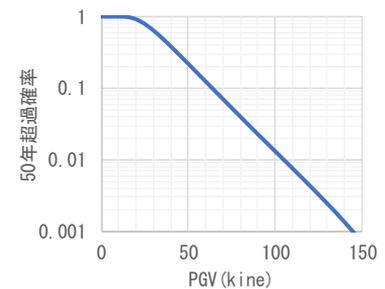


図6 地震ハザード曲線の例

## ⑤ 地震リスク曲線の評価 (図7)

地震リスク曲線とは、超過確率と期待損失の関係を表したものです。前述の損失曲線と地震ハザード曲線を組み合わせて評価します。地震リスク曲線を地点間で比較することで、地震の発生頻度と対象構造物の脆弱性とを俯瞰して見ることができ、優先度評価の参考となります。

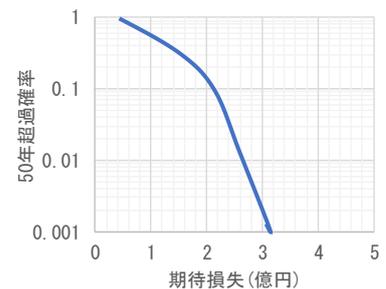


図7 地震リスク曲線の例

## ● 地震リスク評価の方法：営業損失・交通不便益

直接損失による優先度と直接損失以外も含めた優先度では違いが出てくることもあるため、必要に応じて多面的に評価する必要があります。直接損失以外の優先度評価の指標として、営業損失と交通不便益<sup>8)</sup>を紹介します。評価フローの概要を図8に示します。

ここでは営業損失は寸断された路線区間で得られたはずの通行料金と定義し、被災した路線区間の1台当たりの通行料金、交通量、路線区間の被災度から推定される復旧期間を乗じて算出します。

交通不利益は、迂回や渋滞に伴う走行距離・走行時間の増加分を貨幣換算した値です。走行距離の増加分は寸断された路線区間とその迂回路との走行距離の差分です。この差分に、ガソリン代、対象となる路線区間の交通量、復旧期間を乗じることで貨幣換算します。また、走行時間の増加分は、渋滞の影響を考慮した迂回路の走行時間と、平時の走行時間の差分です。この差分に、単位時間当たりの損失金額、交通量、復旧期間を乗じることで貨幣換算します。ここで、迂回路の渋滞の影響は、寸断された路線区間の交通量を迂回路に分配し、交通量、交通容量、平時の走行時間の関係式から、混雑時の走行時間を推定します。

表1に優先度評価結果の例を示します。直接損失に基づく優先度と交通不利益に基づく優先度では結果に差異が生じることが確認できます。従って、耐震化を進める上で、どの指標に基づく優先度で対策を立案するのかについても議論が必要となります。

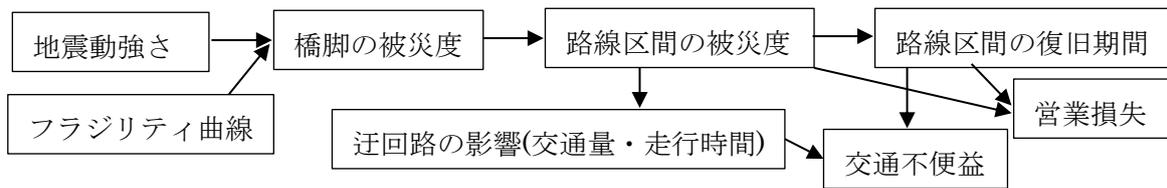


図8 営業損失・交通不利益の評価フローの概要

表1 優先度評価結果の例

(※損失、不利益の数值は、路線区間名アの直接損失額を1.0に規準化した数值です)

路線区間名	直接損失	営業損失	交通不利益	直接損失に基づく優先度	交通不利益に基づく優先度
ア	1.0	5.2	10.6	B	A
イ	1.2	4.8	9.3	A	C
ウ	0.7	5.0	10.4	C	B

● おわりに

ここまで高速道路網の橋脚耐震化の優先度を評価するため方法として、地震リスク評価手法を紹介しました。地震リスク評価は、本稿で示したような耐震化の優先度評価以外にも活用方法があります。例えば、保険の補償額の妥当性を考えるための判断材料、観測データを加味した他システムとの連携による即時点検優先度の評価、即時情報発信サービス等への活用機会が挙げられます。

KKEでは本稿で紹介したような地震リスク評価について調査研究や、コンサルティング、システム受託開発を請け負っております。ご入用の際は、是非お声がけください。

- 1) 阪神高速道路：「阪神高速 ショートストーリー 第13話 623日間の闘い - 阪神大震災からの早期復旧へ -」  
<https://www.hanshin-exp.co.jp/50th/short-story/past/story13.html> (2023/12/7 確認)
- 2) 国土交通省：「大臣会見要旨 2023年10月17日」  
<https://www.mlit.go.jp/report/interview/daijin231017.html> (2023/12/7 確認)
- 3) 地震調査研究推進本部：「確率論的地震動予測地図 2020年版」
- 4) 笛木孝哲, 庄司学(2009)：「高架道路橋の地震時機能損失評価」
- 5) 佐藤忠信, 吉田郁政, 増本みどり, 金治英貞(2005)：「ライフサイクルコストを考慮した道路橋の補強戦略」
- 6) 藤井久矢, 田中信也, 古田均, 堂垣正博(2012)：「地震リスクを加味した劣化損傷下にある道路橋梁群の維持管理」
- 7) (国研)防災科学技術研究所：「地震ハザードステーション J-SHIS」  
<https://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 8) 長江剛志, 藤原友, 朝倉康夫(2007)：「GISと需要変動型利用者均衡配分を用いた道路ネットワーク耐震化の便益評価」

## Kaiseki Portal

「解析ポータル」サイトでは、災害、環境、維持管理、建築、土木の各分野での解析に関する様々な情報やコンサルティングサービス、構造解析、設計用入力地震動作成システム、地震リスク評価、災害時対策、地盤と構造物の動的相互作用、熱・流体解析に関するソフトウェアについてご紹介しています。

本誌のバックナンバー(PDF形式)をダウンロードいただけます。ぜひお立ち寄りください。

<https://kaiseki-kke.jp/activity/>



## From Editors

インフルエンザに続いて、新型コロナウイルスの何回目かのワクチン接種も済ませました。

しかし、それでも無敵というわけではないですし、接種するかどうか人もによって事情や考えが違うでしょう。近年身に付けた感染予防習慣が、まだ役に立ちそうです。

急激に冷え込んだこの冬、それぞれの対策でご自愛ください。

# 構造計画研究所

KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

本誌掲載記事ならびに弊社の商品・サービスに関するお問い合わせは下記までお願いいたします。

[kaiseki@kke.co.jp](mailto:kaiseki@kke.co.jp)

(株)構造計画研究所 エンジニアリング営業 1, 2 部

〒164-0011 東京都中野区中央 1-38-1 住友中野坂上ビル 10F

TEL (03) 5342-1136

(株)構造計画研究所 西日本営業部

〒541-0047 大阪市中央区淡路町 3-6-3 御堂筋 MTRビル 5F

TEL (06) 6226-1231

## 解析雑誌 *Journal of Analytical Engineering Vol.51 2024.01*

発行日 2024年1月1日

編集・発行 株式会社構造計画研究所 エンジニアリング営業 2 部  
164-0011 東京都中野区中央 1-38-1 住友中野坂上ビル 10F

お問い合わせ 電話 (03)5342-1136 FAX (03) 3367-1011  
[kaiseki@kke.co.jp](mailto:kaiseki@kke.co.jp)