

アジアメガシティにおける鉄鋼材料の腐食および防食対策

社会基盤工学・構造力学分野・教授 杉浦 邦 征

はじめに

土木構造物の建設の需要が日本国内では減少する一方、東南アジア地域に代表される途上国では、国内幹線道路や大都市内の道路ネットワークの開発、また港湾施設やそれに付随する橋梁などの開発が急速に進んでおり、その需要は増すばかりであります。特に、東南アジア各国は高温多湿な地域にあり、また、環境対策の無いままに工業化が進み、大気中には多くの硫黄酸化物が排出されている状況にあります。したがって、建設材料の中でも、特に鋼材の腐食劣化が進行しやすい環境下であるため、インフラ施設の建設後も適切な維持管理を行わなければ、劣化が急速に進行する可能性があります。当分野では、これまで、ミャンマー、マレーシア、インドネシアなど東南アジア諸国のメガシティにおいて今後急速な発展が予想される地域におけるインフラ施設の戦略的維持管理手法を検討するために、それらの地域で鉄鋼材料の腐食劣化環境の調査、防食対策の立案を目指してきました。ここでは、これら諸国でのインフラ施設の維持管理手法の構築支援活動を紹介します。

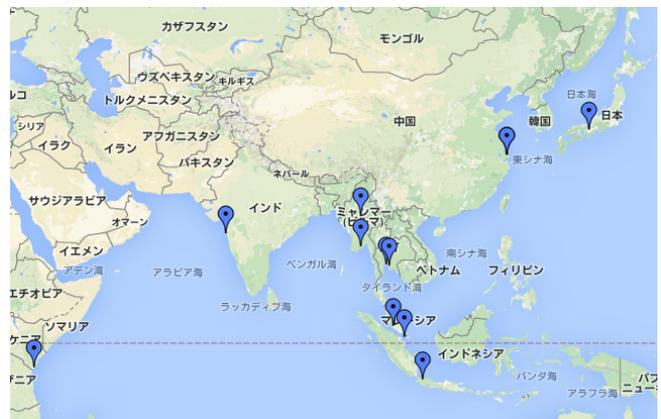
現地曝露試験の概要

本調査研究での曝露地点は、高温多湿もしくは、大気中の飛来塩分や二酸化硫黄が多く、鋼材の腐食環境に厳しいと考えられる亜熱帯・熱帯地域の都市部を中心に選定しています。選定した地域をまとめて表1に示します。これらの都市は地図上に示すように、東アジアでは、中国の上海、東南アジアでは、シンガポール、タイのバンコクとチョンブリ、マレーシアのクアラルンプール、インドネシアのジャカルタおよびミャンマーのヤンゴンとマンダレーで、南アジアでは、インドのムンバイ、また、アフリカ東海岸部ではケニアのモンバサです。なお、比較のため、日本の京都（桂キャンパス）でも曝露試験を実施しています。各都市の年平均気温、相対湿度、年間降水量、都市人口および人口密度などを参考にしていますが、東南アジアやインドは、日本に比べ、高温多湿な熱帯地域であり、また、大都市であるムンバイ、ジャカルタ、上海では、人口が多く、また人口密度も高く、自動車の交通量も多く、大気中の二酸化硫黄濃度が高いため対象としています。人口密度という点から見ると、都市面積が小さいシンガポールも興味ある対象です。

本調査研究では、我が国での多くの曝露試験結果との比較が容易であることを踏まえ、耐候性鋼材の現地曝露試験方法（ワッペン試験法）を採用しています。通常のJIS規格の曝露試験に比べ、架台の設置などが不要で安価かつ簡易にできるワッペン試験法では、鋼材試験片を、既設構造物に貼付し、大気曝露を行い、曝露期間終了後、試験片を回収したのち、その腐食量を測定することで腐食環境の評

表1 ワッペン試験片等の曝露地点と基本データ

国名	都市名	年平均気温 (°C)	年平均湿度 (%)	年間降水量 (mm)	都市人口 (人)	人口密度 (人/km ²)
シンガポール	シンガポールシティ	27	84	2087	5,075,000	10,900
中国	上海	16	80	1155	18,400,000	6,400
タイ	チョンブリ	29	78	1530	6,980,000	3,200
	バンコク					
マレーシア	クアラルンプール	27	82	2390	5,100,000	2,600
日本	京都	16	67	1548	1,387,000	1,700
インド	ムンバイ	28	75	2165	20,900,000	27,100
インドネシア	ジャカルタ	27	77	1903	21,700,000	7,900
ケニア	モンバサ	26	78	1073	1,200,000	5,200
ミャンマー	ヤンゴン	28	74	2681	4,107,000	4,000
	マンダレー					
		27	68	839	92,700	820



価を行います。必要に応じて、鋼材の腐食に影響を及ぼす主な腐食環境因子として、①温度、②相対湿度、③飛来塩分量もしくは付着塩分量、および④二酸化硫黄を測定しています。温湿度の測定には、小型温湿度ロガー（Lascar Electronics社製：EL-USB-2およびT&D社製：TR72nw）を使用し、飛来塩分量の測定は、JIS規格（JIS Z 2382）に準拠し、ガーゼ法（垂直曝露）で行い、大気中の二酸化硫黄の測定は、JIS規格（JIS Z 2382）に準拠し、二酸化鉛円筒を用いた方法で行っています。なお、付着塩分量は、回収時のワッペン試験片の曝露面に対して、市販の表面塩分計を使用し、電気伝導率法により簡易に測定しています。

ミャンマーの2都市においては、ワッペン試験に加えて、雨かがりのあるJIS規格の曝露試験、異なる塗装仕様による塗装鋼板の耐候性試験を実施するとともに、気象観測ステーションを設置し、雨量・日射量・紫外線量・風向・風速も含めて、詳細に環境因子を評価しています。これらの実施状況の一例を図1に示します。

環境因子との関係

環境因子として、付着塩分量と濡れ時間を取り上げ、腐食摩耗量の関係を図2に示します。この図から、濡れ時間が長くなると腐食減耗量が大きいう傾向があることが



(a) ワッペン試験を実施した上海B橋



(b) ミヤンマーにおける気象観測・曝露試験状況

図1 現地調査状況の一例

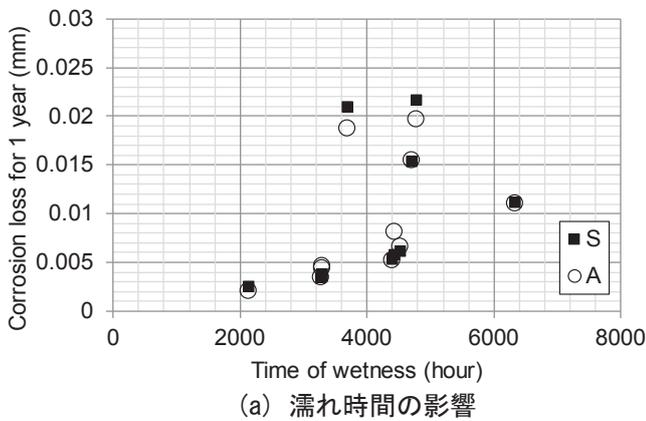
分かります。さらに、腐食減耗量と付着塩分量との関係には、強い相関関係が見られることが分かります。なお、飛来塩分が同じでも、橋梁周辺環境により付着塩分量が大きく影響されるため、腐食摩耗量との相関は低下する結果となっています。特に、東南アジアでは、日常的なスコールが、空气中に浮遊する塩分量を低下させ、腐食環境がそれほど厳しくない場合もあることが分かってきました。

腐食摩耗量の将来予測

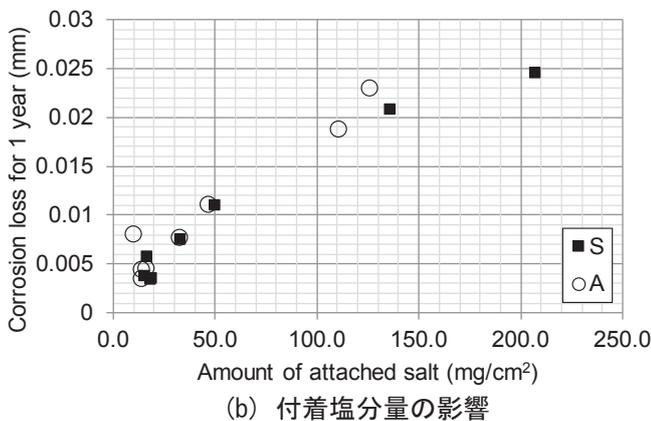
腐食減耗予測の基本式には、以下の式 (1) がよく用いられています。

$$Y = A_{SMA} \cdot X^{B_{SMA}} \quad (1)$$

ここでは、①ワッペン試験の1年目の結果を基本として、②腐食環境因子の計測結果を考慮して、*A*と*B*のパラメータを定め、将来予測することとなります。10年腐食摩耗予測の結果の一例を図3に示します (*B*:①, *E*:②による上限PU, 下限PL)。本調査研究での100年後の腐食減耗量の予測値は、1年目のワッペン試験結果を用いた上限曲線 (BPU) でも、腐食摩耗量0.5mmを超える地域はなく、熱帯地域においても耐候性鋼の適用は可能であると考えられます。一方で、塗膜の耐候性能低下は、紫外線量が高いと著しいが、沖縄での曝露結果と比較して、高温であるにもかかわらずそれほど厳しくない地域があることも分かってきました。今後は、これらの結果に基づき、塗装仕様・耐候性鋼の適用可能地域を詳細に検討して行きます。



(a) 濡れ時間の影響



(b) 付着塩分量の影響

図2 環境因子 vs. 腐食減耗量 (S: 普通鋼, A: 耐候性鋼)

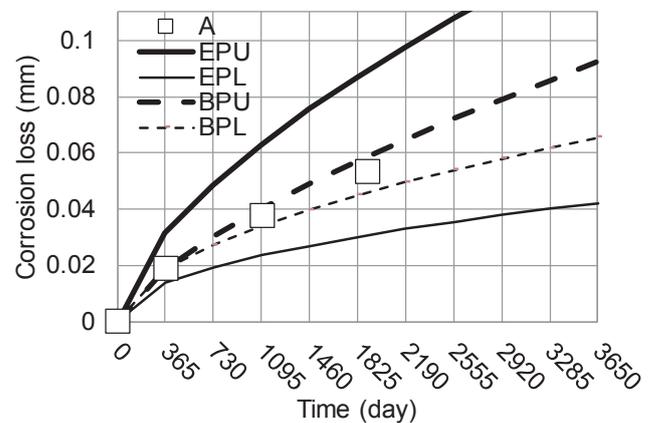


図3 10年腐食摩耗予測結果の一例 (上海B橋)

謝辞：本研究は、構造力学研究室の元助教である神戸大学・橋本国太郎准教授および富山大学・鈴木康夫准教授と継続中です。また、日本鉄鋼連盟の平成24年度学助成、平成25年・26年度KUSPIRITS、科学研究費補助金・海外学術調査B (平成26年～28年)の補助、JFEスチールとの共同研究を通して行われています。ここに謝意を表します。

中央アジアの水資源と氷河研究

都市社会学・地域水環境システム分野・准教授 田中賢治

はじめに

中央アジアはユーラシア大陸の中央部に位置し、内陸性の乾燥・半乾燥地帯が広がります。20世紀後半よりアラル海の集水域（図1）でソ連が進めた“自然改造計画”と呼ばれる大規模な灌漑地開発計画により、広大な綿花農場が次々と建設されました。無謀とも言える自然改造計画が推し進められた背景には東西冷戦があります。東側陣営の盟主たるソ連は、中央アジアの砂漠地帯を灌漑農地に変え、東側陣営の需要に応えようとしてきました。水源となったアムダリア川、シルダリア川では急激に流量が低下し、1980年以降では断流する年も増えました。元来アラル海は水源として価値の低い塩湖であり、貴重な水をアラル海の湖面から蒸発させるよりもアラル海に達する前に淡水として使う方が合理的であるという考え方（あくまで水資源利用という視点での考え方）もあり、アラル海の縮小・消滅は織り込み済みで自然改造計画は進められました。

アラル海の縮小に伴う乾燥化や湖中の塩分濃度の上昇によって、周辺地域の生態系は壊滅的な打撃を受け、かつて栄えた漁業も衰退しました。加えて、干上がった湖底は「アラル砂漠」を形成し、農薬、塩分、重金属等を含む砂が舞い上がり、周辺住民には深刻な健康被害が出ています。以上のようなアラル海の縮小に象徴される水資源問題が環境に及ぼす影響のスケールは世界に類を見ないものなので、「アラルの悲劇」は20世紀で最も深刻な環境問題とも言われています。

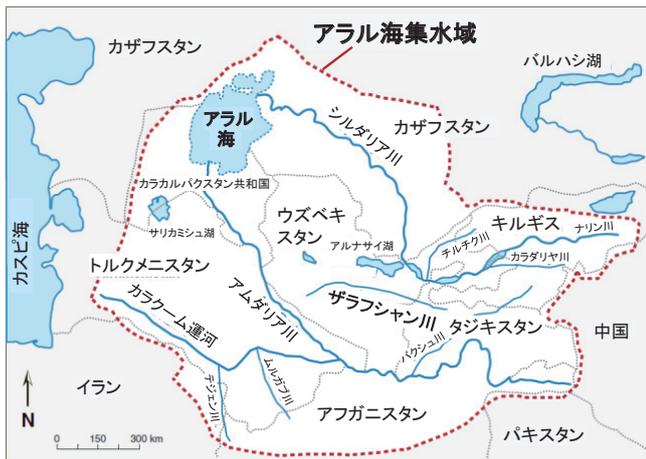


図1 アラル海集水域

氷河研究の重要性

当研究グループでは、10年以上前から現地でのフィールド調査や気象観測を含め、中央アジアの水資源問題に取り組んできました。陸面過程モデルを用いたアラル海集水域

全域を対象とした水循環解析により、20世紀後半の灌漑地の増加を考慮した長期的な水収支の変遷やそれに伴うアラル海縮小の再現に成功しました。ところが、観測結果との比較から、河川流量の季節変化の再現性はまだ不十分で、特に春期の雪解け水量が過大に算定されていることが判明しています。IPCC第5次評価報告書（AR5）によると、アラル海集水域の国々は気候変動影響を最も受けている地域の1つで、水源の氷河が消失しつつあります。気温上昇で氷河融解が進むことにより、短期的には河川流量の増加を享受できますが、これは過去に山の上で涵養され水として貯えられた水資源（氷河ストック）が目減りしていることを意味します。氷河面積が減少していくと、融け出す水量が減少に転じる日がいつか来ます。氷河がいつまでもつのか、水量の減少がいつ頃になるのかは、特に夏季に氷河融解水に依存している中央アジアの人々にとっては死活問題です。

アラル海流域は旧ソ連の崩壊による主要な流域国（カザフスタン、キルギス、タジキスタン、トルクメニスタン、ウズベキスタン）の独立以降、国際流域としての性格がより鮮明になり、水資源問題の解決がより困難になっています。国際河川の水量・水質監視・保全、気候変動に適応した持続的な農業生産のあり方など、同地域の水資源の利用、保全を総合的に議論する上で、水循環システムの正しい理解に基づく科学的根拠が必要とされていますが、今後の氷河質量収支の推計結果は、将来気候データのばらつきや氷河モデル間のばらつきが大きいのが現状です。

キルギスの氷河における気象観測

キルギス東部の KaraBatkak 氷河と Bordu 氷河に積雪融雪過程や氷河融解過程を把握するための総合的な気象観測システム（図2）を設置しました（それぞれ2017年7月、2018年8月から観測開始）。また本年8月には節電型のヒーター付き雨量計を導入し、降雪量観測を可能にしました。ここでは、雨量、気温、湿度、風速、気圧といった一般気象要素に加え、放射4成分、氷温度、熱流量、積雪深、積雪水量など多項目を観測しており、キルギスはもとより世界的に

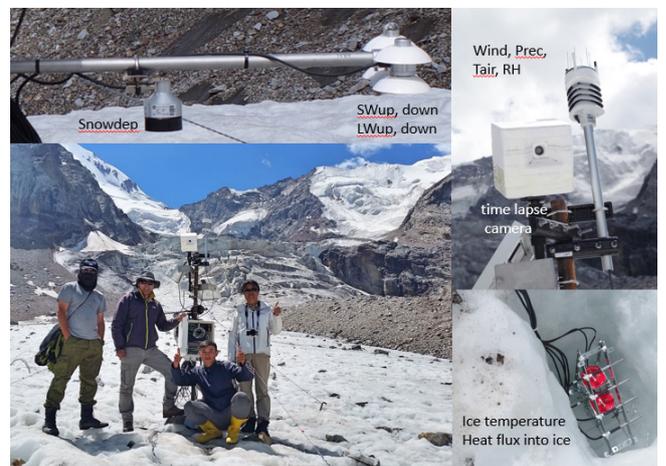


図2 KaraBatkak 氷河の観測システム

もほとんど例がない構成となっています。京都から観測サイトにたどり着くまでに丸3日かかるような場所で、時間的にも予算的にも頻繁に現地を訪れることはできません。氷河の脇の岩場ではなく氷河直上での観測のため、観測ポールの土台である地面(氷河面)が夏季に日々変化します。ポール倒壊を防ぐための支線の張り直しや、氷中のセンサーの埋め戻しなど、現地研究者の協力を得て、何とか観測を継続しているところです。

観測データの一例として、Karabatkak氷河の2017/2018冬期の積雪深の時系列を図3に示します。この地域で初めて得られた冬期の積雪深の連続データということになります。冬期に何回雪が降るのか、日射がどれだけ見込めるのかという情報がない中でソーラーパネルやバッテリーの大きさを決めため少々不安がありました。幸いにも冬季を通じて安定してデータを取得することができました。

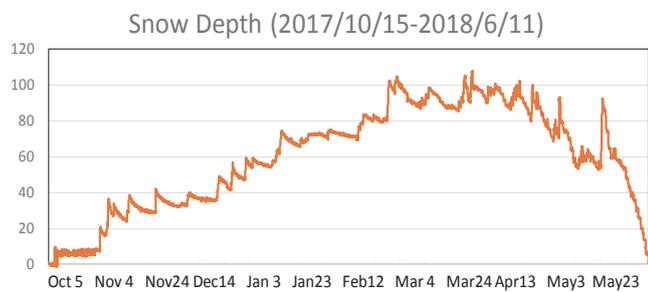


図3 KaraBatkak氷河観測点の積雪深変化

氷河融解量の計算

現地観測で得られた気象データを入力として陸面過程モデルで氷河融解量を計算したところ、積雪深計(夏季には氷河面高度変化を捉えています)とほぼ整合する結果が得られました。アラル海集水域全体に適用した際に雪氷融解量が過大になった原因を探るため、広域に適用する際と同

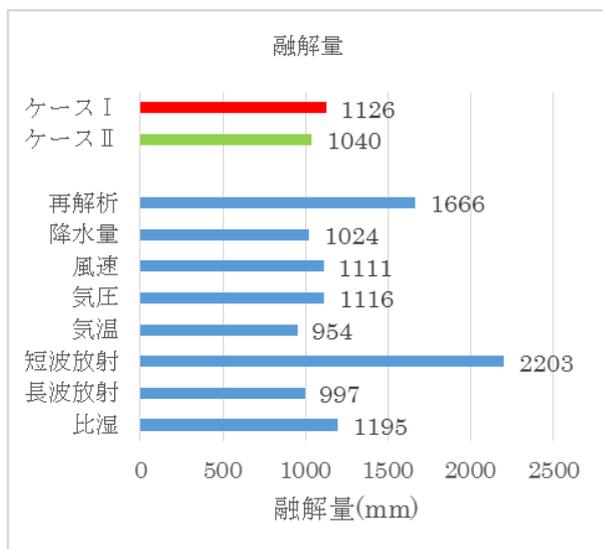


図4 入力気象データによる氷河融解量の違い

じ手法(解像度の粗い再解析データから空間内挿, 標高補正を施す)で作成した気象データに1要素ずつ差し替える感度実験をした計算(図4), 少なくともこのサイトにおいては再解析から求めた短波放射の誤差が融解量の過大評価の主要因であることが判明しました。時系列を確認したところ、現地では毎日のように午後に雲が立って短波放射が減少しますが、再解析では雲の影響がほとんどありませんでした。

山岳域の気象場の再現

粗い解像度の再解析では、広域的には晴れているけど山の上には雲が立つというような条件を反映することができません。現地の気象観測データを集めるとしても、そもそも中央アジア山岳域の気象観測データはごくわずかな場所にしか存在しません。そこで、現地の詳細な地形を考慮することができるメソスケール数値気象モデルを用いて山岳域の詳細な気象場を再現することに挑戦しています。2017年8月の短波放射量の月平均値の空間分布(図5)を見ると、平地に比べて山岳域の値が小さくなっており、山の上だけ雲が立ちやすいという条件を上手く再現できています。

ソ連崩壊後、中央アジアでは水文・気象観測のための予算が大幅に削減されました。資金不足により、多くの観測所が閉鎖されていた期間の存在が水循環変動や氷河質量収支の長期解析を困難にしています。今から過去に遡って観測をやり直すことはできませんので、再解析データ、衛星観測データ、近隣の観測データ、前後の期間の観測データ、メソスケール数値気象モデル等を組み合わせて、そのようなデータのギャップを埋めるための研究を現在進めています。

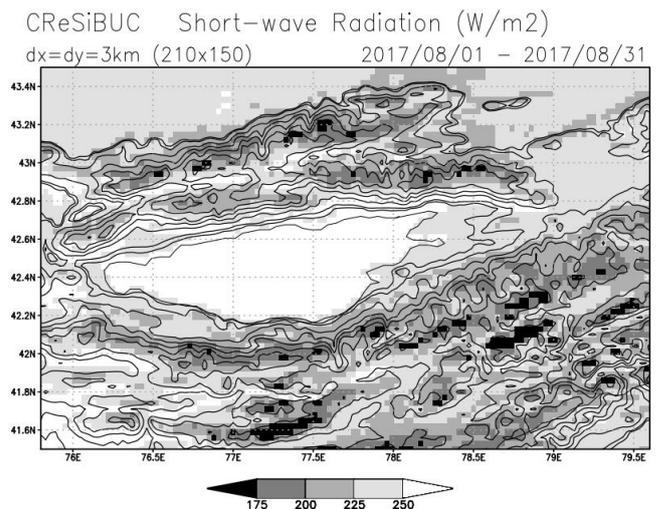


図5 メソスケール数値気象モデルによる短波放射量分布

液状化地盤の地震時挙動予測解析の妥当性確認

防災研究所・地盤防災解析研究分野・教授 渦岡良介

はじめに

地盤・構造物系の地震時の挙動は非線形であり、これらの挙動を研究する手段の一つとして、遠心模型実験及び有効応力解析がある。従来の研究での地盤挙動予測では、一つの実験結果と一つの解析結果の比較により、実験者や解析者の主観的な判断によって、その結果の妥当性の確認がなされることがほとんどであった。つまり地盤挙動予測の精度は実験者と計算者に強く依存しており、挙動予測の客観的な妥当性が保証されていないことが多いのが現状である。この問題を克服し、実験及び解析による挙動予測の客観的な信頼性・信用性を向上させるために、V&V (Verification & Validation) という考え方が注目されている。V&Vではシミュレーションと実験の双方の不確かさの定量化が要求されるのが特徴である。データの客観的な信頼性を向上するためには、各種モデル化の不確かさの定量化に基づいて、その結果の妥当性を確認する方法論を提案する必要がある。その第一歩として本研究では、地盤挙動予測の客観的な妥当性を高めることを目的に、液状化する傾斜地盤の地震時挙動を対象として、同一条件で複数の遠心模型実験及び有効応力解析を行い、実験及び解析結果に対してより定量的な評価を試みた。

遠心力载荷装置を用いた模型実験

本実験では、京都大学防災研究所の遠心力载荷装置を使用した。遠心場の相似則を用い、実物の1/40の模型に対し40G場で実験を行った。模型断面図を図1に示す。地盤試料はオタワ砂F65を用い、空中落下法により間隙比0.6で地盤を作成した。間隙流体にはメトローズ(粘性40cSt)を使用し、模型地盤を飽和させた。本実験では同一条件を目標として計4ケースの実験を行った。入力波にはテーパー付きの正弦波(振動数:1Hz, 継続時間:40s)を用い、最大振幅330 Galを目標に設定した。振動台で観測された入力波の加速度時刻歴を図2に示す。実際に得られた振幅はCase 2では目標値よりやや大きく、Case 4ではやや小さくなっている。また、各ケース間で間隙比や飽和度、間隙流体の粘性に関しても若干のばらつきがあり、実験において目標値を厳密に満足するのは困難であると考えられる。

有効応力解析とその妥当性の確認

前述の遠心模型実験を対象に、二相系の有効応力解析法による再現解析を実施した。図1や図2の境界条件、室内土質試験などから設定した材料パラメータを用いて4ケースの解析を実施した。なお、図2の入力地震動や地盤の透水係数は各ケースの条件に合ったものを用いた。一例として、Case 1における過剰間隙水圧の時刻歴の実験結果と解析結果を図3に示す。解析では過剰間隙水圧の上昇および消散

の過程が適切に再現されている。しかし、加振中における水圧の動的振幅が実験よりもやや大きめに評価されており、これに伴う実験と解析の差異がどの程度かを定量的に評価することは、時刻歴の単純な比較からは困難であると考えられる。

実験結果および解析結果にはケース間で少なからず差異が存在している。このケース間の差のある瞬間の値(例えば、最大値)でもって比較するのも一つの方法であるが、時刻歴としての包括的な評価にはつながらない。本研究では、時間の経過とともに応答特性(振幅, 振動数等)が大きく変化する時系列データに適用可能な指標を用いる必要があるため、EARTH (Error Assessment of Response Time Histories) という方法を採用する。EARTHでは、二つの時系列データの差を位相誤差(Phase error), 振幅誤差

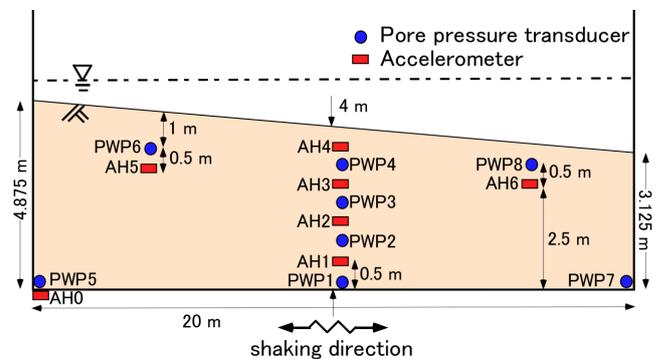


図1 飽和傾斜砂地盤の模型断面図

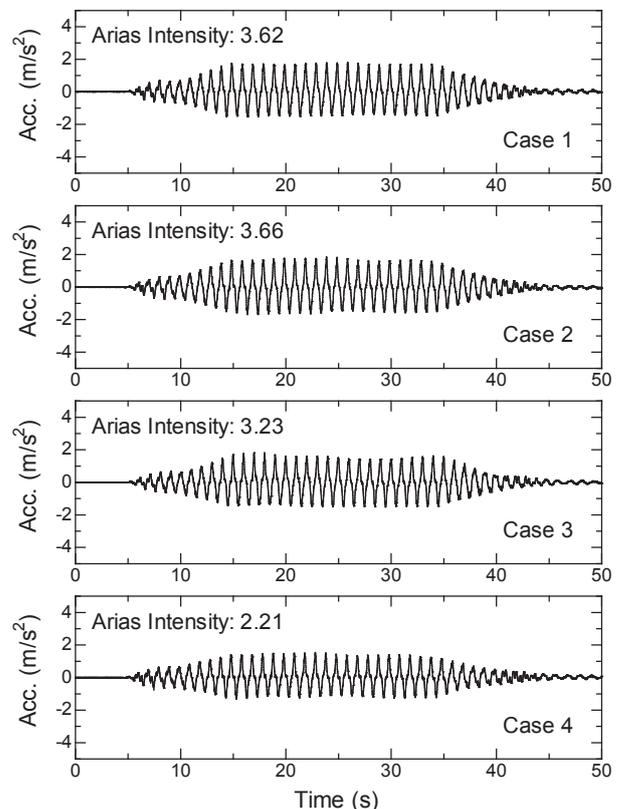


図2 入力加速度の時刻歴

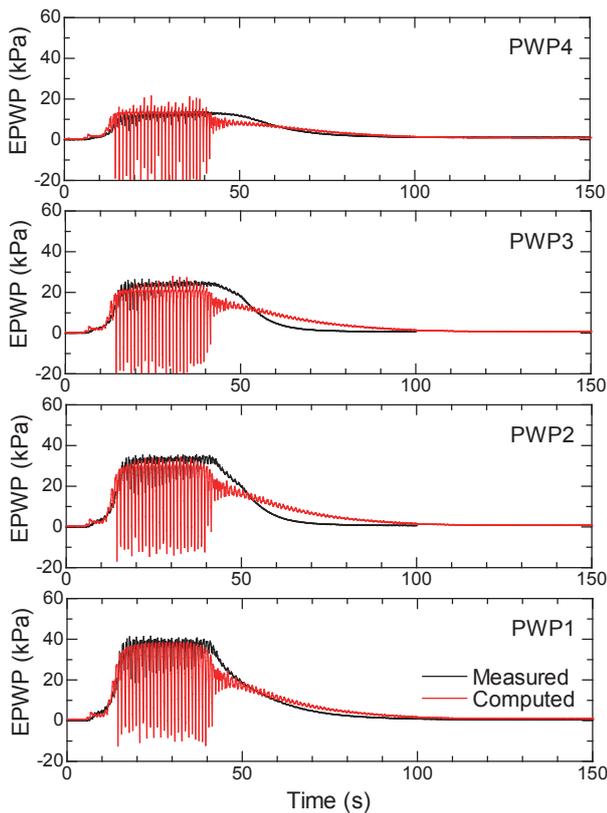


図3 過剰間隙水圧の時刻歴 (Case 1)

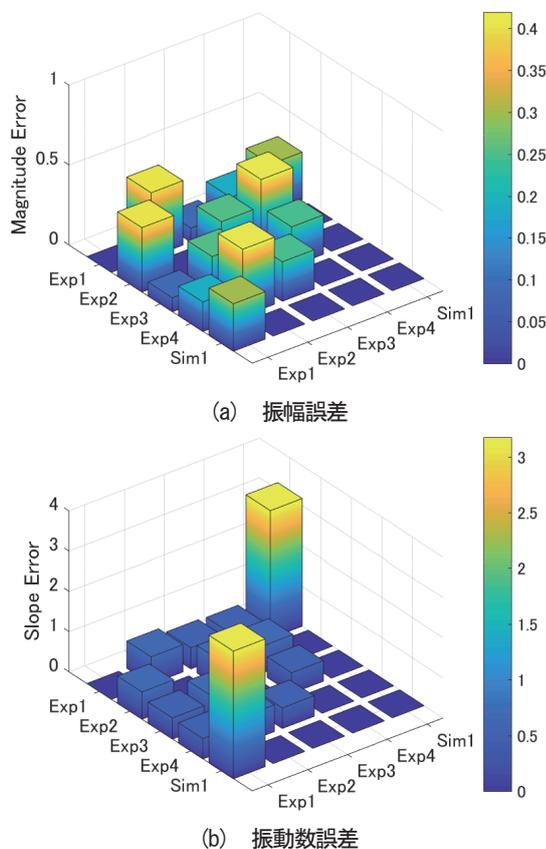


図4 過剰間隙水圧 (PWP4) の誤差評価

(Magnitude error), および振動数誤差 (Slope error) の三つに分けて考える。

過剰間隙水圧の時刻歴 (PWP4) に対する誤差評価の結果を図4に示す。(a)の振幅誤差に関しては、ケース間毎の誤差の大きさに若干の変動はあるものの、(b)の振動数誤差と比べて誤差レベルは小さな値に収まっている。また、解析 (Sim 1) と実験 (Exp 1) の間の振幅誤差も0.3程度とそれほど大きくなく、実験ケース間における誤差のばらつきの範囲内に収まっている。これより、実験の不確かさを考慮しても、振幅誤差に関して解析は妥当であるといえる。一方、振動数誤差に関しては、Sim 1とExp 1の間の誤差が約3.2と非常に大きく、実験ケース間におけるばらつきを上回っている。これより、実験の不確かさを考慮しても、振動数誤差に関して解析は妥当ではないといえる。なお、この誤差の大部分は加振中の誤差に起因しており、消散過程における再現性は良いことから、消散過程における誤差は加振中と比べて顕著ではないと考えられる。

おわりに

地盤挙動予測の客観的な妥当性を高めることを目的に、液状化傾斜地盤の地震時挙動を対象として複数の遠心模型実験とその有効応力解析を行った。妥当性評価の際には、時系列データの瞬間値ではなく時刻歴そのものを比較する手法を採用した。その結果、同一条件を想定した実験データ同士を比較することで、実験が本質的に有するばらつきを振幅誤差および振動数誤差に分けて定量的に評価することができた。また、ある実験結果とその再現シミュレーションの結果に対して本評価法を適用することで、両者の定量的な誤差評価を行うことができた。このようにして得られた実験と解析間の誤差の大きさを、複数の実験ケース間での誤差のばらつきと比較することで、解析結果の妥当性について、実験者や解析者の主観的判断に依存した従来の方法と比べて定量的かつ客観的に評価できることを示した。

本報告は、以下の論文の抜粋であり、第一著者の上田恭平氏が2019年地震工学論文奨励賞(土木学会)を受賞した。上田恭平・和田冬馬・渦岡良介：液状化傾斜地盤の地震時挙動予測の高精度化に向けた遠心模型実験及び有効応力解析, 土木学会論文集A1(地震工学論文集), 2019。

無電柱化の推進に向けた 低コスト化技術開発・事業可視化・効果計測

都市社会工学・都市地域計画分野・准教授 大庭 哲 治

はじめに

先日の台風15号による千葉県での大規模停電や昨年9月の台風21号による近畿地方での大規模停電など、停電が長期化する原因の1つとして、電柱の相次ぐ倒壊や損傷が指摘されています。約3,500万本もの電柱が林立しているわが国では、毎年約7万本のペースで電柱が増加しています。このことから分かる通り、わが国の無電柱化進捗率は、欧米諸国や近隣のアジア各国と比較しても大きく遅れています。

しかしながら、近年、災害に対するレジリエンスの向上、安全・快適かつ円滑な交通確保、そして、良好な景観形成や観光振興といった観点から、無電柱化の取り組みが逐次進められるようになってきています。2016年に無電柱化の推進に関する法律が施行され、2018年には無電柱化推進計画が初めて策定されるなど、地方自治体が取り組む無電柱化事業に対して、国による後押しが着実に図られつつありますが、当の地方自治体が無電柱化事業を推進していくにあたっては、限りある予算の中で、低コスト化を図りつつ、より高い整備効果が期待できるように、具体的な整備戦略を検討していく必要があります。

そこで、本稿では、わが国の動向を踏まえつつ、筆者が京都市や関連団体と連携して取り組む、低コスト化技術手法の研究開発、ならびに、無電柱化事業の可視化と効果計測に関する研究について、その一部をご紹介します。

低コスト化技術手法の研究開発

無電柱化事業の費用は、国土交通省の資料によると、従来方式による電線共同溝と電気設備（地上設置）の場合で約5億円/km、また、京都市の実績では約7～9億円/kmともいわれており、無電柱化の推進にあたっては、大幅なコスト削減と工期短縮が大きな課題です。そのような中、近年、より一層の低コスト化を実現するため、従来の「電線共同溝」の大幅な小型化、浅層埋設方式や直接埋設方式といった従来とは異なる整備方式、地上構造物であるトランスの小型化・省力化をはじめとする研究・技術開発や実用化に向けた取り組みが進んでいます。例えば、京都市の先斗町通では、幅員が1.6～4.4mと非常に狭く、従来の方法では無電柱化は不可能とされていましたが、「電線共同溝」を大幅に小型化した小型ボックス活用埋設の手法を開発・採用することで、無電柱化を可能にしています。また、筆者が会長を務めました、京都市「直接埋設方式による電線地中化」検討協議会では、京都大学の吉田キャンパスに面した東一条通で、直接埋設方式による無電柱化（常設作業帯コンパクト化等）実証実験（図1）を実施しました。将来的な実用化に向けての技術的・経済的検討を行い、その有効性と課題を明らかにしています（詳細は、京都市のホームページ

などをご参照下さい。なお、わが国で初めて、公道において、連続溝掘削機トレンチャーの施行性に関する検証も実施しています）。直接埋設方式は、海外では一般的で古くから取り入れられており、わが国でも、ケーブル品質の強化やメンテナンス、沿道への引込みなどの課題が克服できるかどうか、実用化に向けた課題となっていますが、今回の実証実験の成果が、低コスト化を図る直接埋設方式の実用化に向けた一助となればと考えています。



図1 「直接埋設方式」による無電柱化実証実験の風景

無電柱化実績データの整備による事業可視化

低コスト化技術手法の研究開発が進む一方で、無電柱化事業の効果については、データによる客観的根拠に基づいて、科学的な検証が行われていないのが実情です。地方自治体が長年にわたり実施してきたこれまでの無電柱化事業を顧みると、事後検証を実施した事例はほぼ皆無で、これは、整備戦略を検討する上で必要となる具体的な基礎情報が極めて乏しいことによります。特に、効果・影響の特定化・計量化において最も重要な基盤となる、利活用可能な無電柱化事業の実績データ自体が、不十分、不完全、あるいは、未整備である場合が少なくありません。

図2は、京都市の担当部局と連携して、筆者が京都市全域を対象に整備した無電柱化実績データのうち、中心市街地エリアに限定して図示したものです。これまでの京都市の無電柱化事業を可視化するため、1986年度から2017年度までの京都市電線類地中化実績（直轄国道を除く）に関する情報を、整備区間ごとに収集・整理の上、これらのデータ

を地理情報システムに実装することで、独自の空間データを構築しました。このデータには、路線名、区間、整備延長、道路延長、事業方式、事業の着手年度、完了年度（電線地中溝に係る本体工事の完了）、抜柱年度（不要になった架空線や電柱の撤去）をはじめ、様々な属性情報と、各実施箇所的位置情報が含まれています。

これにより、例えば、各整備区間の事業完了から抜柱までの期間を可視化することで、2000年以降の整備区間の一部に、最大で11年を要していることが明らかになりました。これは、近年、各宅地への引込管の地中化工事や架空線及び電柱の撤去に加えて、地上機器の設置スペースを確保できない区間での民有地への設置などに、合意形成期間も含めて、長い期間を要していることが要因と考えられます。このように、これまでの無電柱化事業を多面的に可視化できるようになったことで、課題の発見と把握が可能になるとともに、問題点の効率的・効果的な改善や整備戦略への具体的反映が期待されます。



図2 京都市無電柱化事業の実施箇所（中心市街地）

無電柱化事業の効果計測

最後に、先述の無電柱化実績データを、無電柱化事業の効果計測に適用した研究をご紹介します。具体的には、2000年度から2018年度までの地価公示データと組み合わせ、独自の空間パネルデータを構築した上で、無電柱化事業の着手・完了・抜柱時のタイミングの違いを考慮した、無電柱化事業が周辺地価に及ぼす因果的影響を、差分の差分（Difference-in-Differences: DID）推定法で推計しました。政策とその実施効果の因果関係を科学的に解明する

ことを試みた統計的因果推論による分析アプローチの1つであるDID推定法を適用するにあたり、本研究では、無電柱化事業の実施箇所から50mと200mの2つの空間的範囲を効果・影響が及ぶ処置群として、それ以外の空間的範囲を対処置群として設定の上、分析期間を2000～2009年度と2010～2018年度の2期間に分割して推計しています。

図3に示す分析結果より、2000～2009年度までの期間では、無電柱化事業の実施箇所から50mの空間的範囲と200mの空間的範囲の間には、地価上昇率に大きな差異は見られず、一定して約10～12%の上昇率であることが分かります。次に、2010～2018年度までの期間では、50mの空間的範囲という、無電柱化事業の実施箇所に近接したエリアで、3つのタイミングともに大きく増加していることが分かります。特に、抜柱後では20%を超える地価上昇率を示しています。その一方で、200mの空間的範囲では、50mの地価上昇率には及ばないことも分かります。以上より、近年の無電柱化事業による周辺地価への影響は、実施箇所に近いほど強く、距離とタイミングによっては20%近く地価が上昇すること、さらには、抜柱に長い年月を要したり、抜柱年度が未定な区間も少なくない中で、無電柱化事業は抜柱まで終わらないと、最大の効果を発揮しないことが明らかになりました。このように、これまで欠如していた無電柱化事業の整備戦略に資する科学的知見を、今後も継続して蓄積していくとともに、エビデンスに基づいた無電柱化の更なる推進が必要であると筆者は考えています。

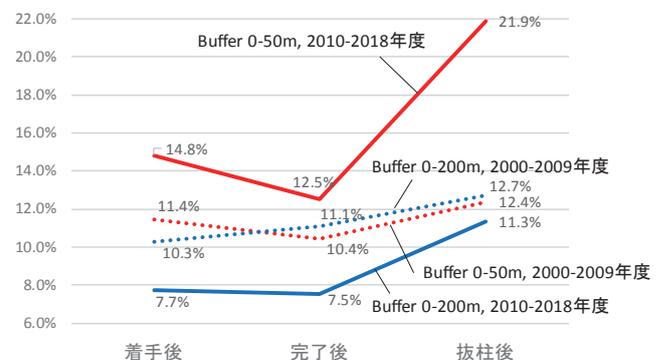


図3 着手・完了・抜柱時点を考慮した2期間・2処置群での地価上昇率の比較

参考文献

- 1) 京都市建設局道路建設部道路環境整備課（2018）東一条通における「直接埋設方式による無電柱化（常設作業帯コンパクト化等）」実証実験について。
<https://www.city.kyoto.lg.jp/kensetu/page/0000243543.html>
（最終閲覧2019年9月9日）
- 2) 大庭哲治（2019）着手・完了・抜柱時点を考慮した無電柱化事業が周辺地価に及ぼす因果的影響，土木計画学研究・講演集 Vol.59.

ナノ材料含有製品に対する曝露評価手法の開発

都市環境工学・安全衛生工学分野・准教授 松井 康人

ナノ材料のリスク評価

ナノ材料のリスク評価を行う際には、材料そのものの、コンポジット、製品の3つのステージに分けて、影響、曝露評価の両面を加味する必要がある。過去の研究では、材料そのものの影響評価に関する報告が大半と言っても過言では無く、CNT（カーボンナノチューブ）では発がん性が認められたとの報告もある¹⁾。一方で曝露評価は、材料を製造する労働環境における若干の報告があるものの、市場に出回っているこれらの材料を使用した製品は、トナーのようなコンポジットから、樹脂で包埋されたような製品ステージのものまで様々であり、研究の余地が大きい。そこで本報では、著者が開発を進めている、ナノ材料を含有する製品に対する曝露評価手法について紹介する。

既存の曝露評価手法の課題

気相中に存在するナノ材料の計測には、エアロゾル計測器によるモニタリングや、フィルターやインパクターなどで粒子を捕集する方法が主に採用されている。ISO（国際標準化機構）やNIOSH（米国立労働安全衛生研究所）、OECD（経済協力開発機構）では、ナノ材料の作業環境評価の予備的な調査に、凝縮式粒子計数器（CPC）と光散乱式粒子計数器（OPC）を用いることを提案している^{2,3)}。しかしこれらの計測器では、連続的に発生するナノ材料のサイズや組成は検出できず、したがって、発生したナノ材料が、原材料として使用されたものに起因しているかどうかの選別はできない（図1）。

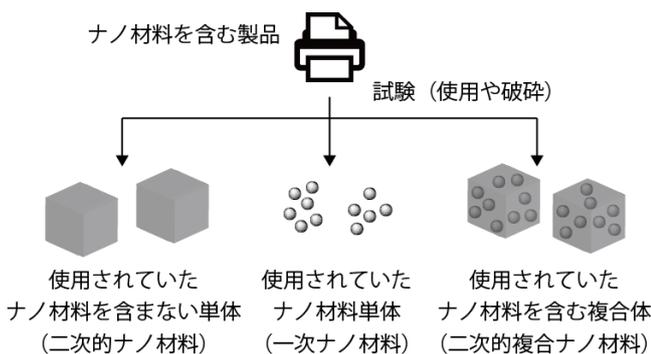


図1 ナノ材料含有製品から発生するものの分類

わが国では、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が「カーボンナノチューブの作業環境計測の手引き」を取りまとめてきており、上記課題を解決するために、リアルタイム計測器による計測と、フィルター捕集後の電子顕微鏡観察と定性分析を組み合わせた方法を提案している。この方法では、粒径や濃度の時間的変化は把握するこ

とはできず、また顕微鏡観察では形態的特徴が無い限り、図1のように発生したものの判別は難しい。したがって、ナノ材料含有製品に対する定量的な曝露評価には、課題が残っている現状がある。

モニタリング装置と分析機器の併用

FMPS（Fast Mobility Particle Sizer；高速応答型モビリティパーティクルサイザー、TSI）をモニタリング装置として用い、粒径と単位体積当たりの個数濃度分布を求めると同時に、気相中にある一定の粒径粒子のみをICPに直接導入できる装置（DMA-GED-ICP/MS）を用いることで、1ミリ秒毎の粒径変化と個数濃度変化、含有元素量の変化をモニタリングできる装置を開発した（図2）。

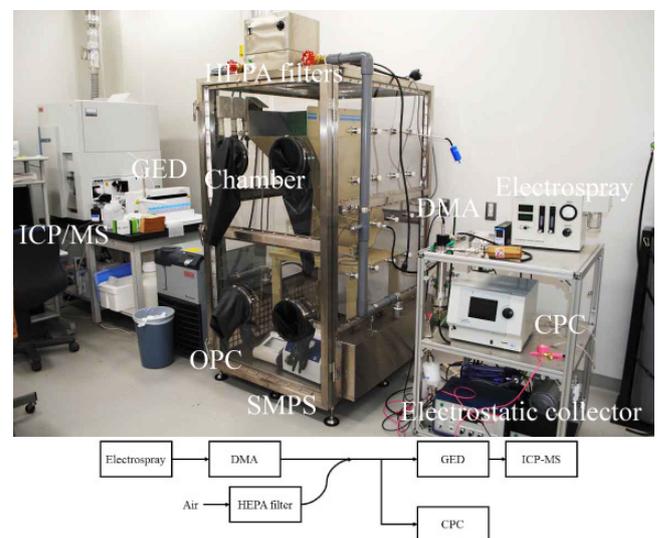


図2 ナノ材料含有製品の試験チャンバー写真（上）と接続装置類の概念図（下）

GED（Gas Exchange Device；気体試料導入装置、J-science lab）を用いることで、気相中のナノ材料を直接ICPに導入し、またその前段にDMA（Differential Mobility Analyzer；微分型電気移動度分析器、sokken）を接続することで、導入する物質のサイズを限定できるシステムを構築し、発生したナノ材料の同定と定量を試みた。FMPSによるモニタリングを平行させることで、粒径毎の個数濃度に対する元素濃度や、個数濃度の経時変化に対する元素濃度変化についても定量評価できるシステムとなっている。

製品に対する加速試験

ナノ材料の適切なリスク管理のためには、そのライフサイクル（製造、加工、使用、廃棄など）における排出および作業者などへの曝露量を把握する必要がある。そのためには、どのようなプロセスで、どのような排出が起きうるのか、その事例の集積も重要になる。まずは市場で

ナノ材料として最も普及している酸化チタン含有製品（光触媒コーティングタイル、フィルター）やCNTを含む樹脂製品などを耐候性試験し、その試験体をテーバー摩耗試験機にて摩耗し、その時のナノ材料の発生量を、バックグラウンド値の制御が可能なチャンバー内で定量評価することとした（図3）。

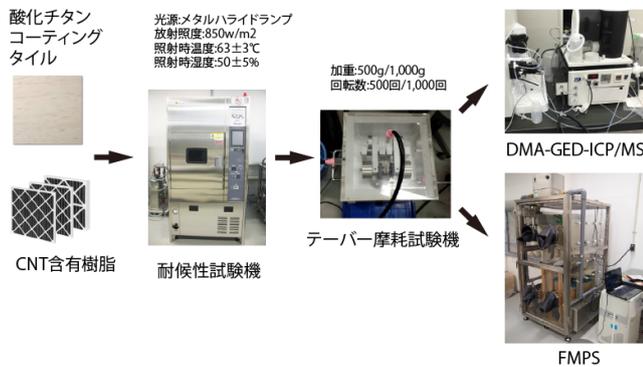


図3 ナノ材料含有製品に対する加速試験と曝露評価の流れ

テーバー摩耗試験機を、荷重9.8 N、回転速度170 rpm、回転回数を5,100回転に設定し、CNT/CFRP（CNT含有炭素繊維強化樹脂）を摩耗試験した。なお摩耗輪は、接触部分に粒度# 200/230の人造ダイヤモンドをニッケルメッキで埋め込んだもの（旭ダイヤモンド）を特別に注文した。その結果を図4に示す。横軸は試験開始からの経過時間（秒）を示しており、摩耗は0～1,800秒まで行った。その後は摩耗を停止し、計測は3,000秒まで継続した。図4左から、摩耗開始から900秒付近にて個数濃度が急激に増加していることが分かる。試験体は、炭素繊維層と樹脂層が複数重なる構造であり、樹脂層からCNTを含む炭素繊維層に到達したことが認められた。図4右は、GEDを通じてICPに導入された際のCoのカウント数を示している。個数濃度の上昇と同じタイミングでCoが検出され、かつ、その強度が個数濃度と類似していることが分かる。

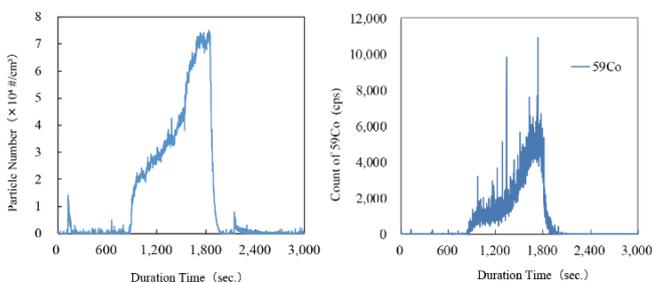


図4 摩耗試験時の個数濃度（左）とCoの検出量（右）

炭素繊維強化樹脂に用いられていたCNTには、Fe、Al、Coの順で元素が含まれていたことから、摩耗によりこのCNTを含むナノ材料が発生していた可能性が考えられた。

GEDを用いた曝露評価の今後

現在、気相中に分散させた銀ナノ粒子をDMA-GED-ICP/MSを用いて分析することで、粒子の体積と信号強度、個数濃度と元素濃度との関係を明らかにしている。GEDを用いることで、これまでは難しいとされていたICP/MSによる気相中の元素濃度が得られるようになった。一方で、微小粒子を微小時間中にプラズマでイオン化することで信号を得ていることから、完全にイオン化することができない大きさ、もしくは組成（特に酸化物など）の物質に対しては、正確な定量値が得られない課題がある。元素各種のイオン化率や、直径が10～100 nmの粒子のイオン化率は取得しつつあり、これらライブラリの整備を急いでいる。また、CNTに含まれる元素などについては、原材料そのものを検量線として用いることも検討しており、気相に均一濃度で噴霧する標準法の開発も進めている。

参考文献

- 1) A. Takagi, A. Hirose, T. Nishimura, N. Fukumori, A. Ogata, N. Ohashi, S. Kitajima and J. Kanno: Induction of mesothelioma in p53+/- mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube, J. Toxicol. Sci., (2008) Vol.33, No.1, 105-116.
- 2) ISO. Nanotechnologies – Health and safety practices in occupational settings relevant to nanotechnologies, (2008) ISO TR 12885.
- 3) NIOSH. Approaches to safe nanotechnology – Managing the health and safety concerns associated with engineered nanomaterials, DHHS (2009) NIOSH Publication No.2009-125.