

地震災害リスクを把握するための予測技術

Prediction Technologies for Earthquake Risk Assessment

引田 智樹 安達 直人 岩前 伸幸 飯山かほり
Tomoki Hikita, Naohito Adachi, Nobuyuki Iwamae and Kahori Iiyama

I. はじめに

複数のプレートの境界付近に位置している日本では、世界で発生するマグニチュード 6 以上の地震の約 2 割が発生していると言われ、大きな地震に見舞われる危険度が高いことが知られている。地震災害は我が国において無視できない主要な自然災害であり、その低減は重要な課題である。

地震によってどのような災害が発生するのかを予測し、それらに対して有効な対策を考えることが、地震災害低減の基本的な流れである。本稿では、地震災害を引き起こす、強震動、液状化、津波に注目し、これらの事象の予測技術と、開発中の統合エンジニアリングシステムによる広域の地震災害リスク評価について概説する。

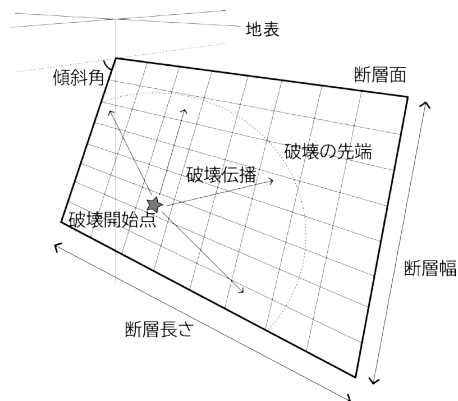


Fig.1 断層モデルのイメージ図
(Diagram of the Fault Model)

II. 強震動

地震に対して安全な構造物を造るために、耐震設計や地震対策の技術とともに、地震による揺れを予測する技術が進歩してきた。ある条件で地震が発生した時に、その地震によって生じる大きな揺れ（強震動）を予測することを強震動予測と呼び、設計用入力地震動評価や地震リスク評価など多くの場面で利用されている。

1. 強震動予測技術

敷地の近くに活断層がある場合など、その地震による影響が懸念される場合は、想定する地震が発生した時に敷地に生じる強震動を予測することで、構造物の安全性を事前に検討することができる。

被害を生じさせる強震動は、大規模な地震の震源に近い場所で生じることが多い。このような強震動は、断層の破壊過程（拡がりのある断層面がどのように破壊するか）の影響を強く受けるため、現実的な強震動を予測するためには、断層破壊過程を表現できる断層モデル (Fig.1) を用いた強震動予測が有効である。通常は、断層を矩形平面で近似し、複数の小断層に分割した上で、各小断層の破壊の条件を変えることで、実際の複雑な断層破壊を表現する。将来発生する地震の断層破壊シナリオは無数に考えられるが、過去の大地震による知見に基づいて、ある程度は標準的な条件設定が可能であるので、起こり得る断層破壊のシナリオを仮定して、現実的な強震動を予測することができる。

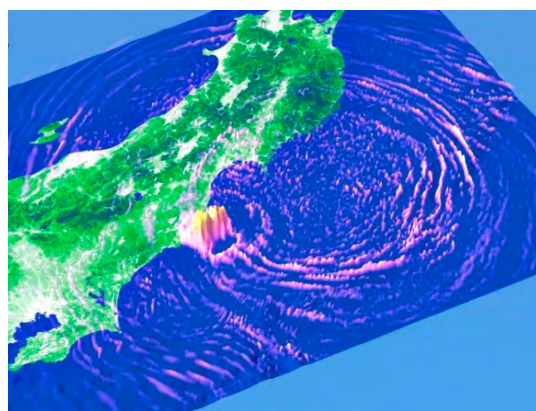


Fig.2 有限差分法による強震動予測
(Ground Motion Simulation by Finite Difference Method)

強震動波形の計算には様々な手法があり、その一つに、断層モデルと対象地域の地下構造を考慮した数値計算に基づく方法がある。断層から評価点を含む領域の地下構造の情報が十分にあれば、有限差分法などによる数値計算によって、断層から放出された強震動が評価点まで伝播する過程を計算することができる (Fig. 2)。しかし、我々が知ることができる地下構造の情報が限られていることや、現状の計算機能力の問題から、モデル化できる地下構造の精緻さには限界がある。そのため、このような方法では、微細な地下構造の情報が必要になる短周期地震動の予測は難しく、予測対象は周

期2秒程度以上の長周期地震動に限られる。短周期地震動の予測には、ある小断層から評価点までの応答を観測地震波や模擬地震波で代用し、断層破壊過程に従って波形を重ね合わせることで、大地震の強震動を予測する波形合成法が適用される。また、両者の方法による予測結果を合成して、長周期成分と短周期成分を含む広帯域の強震動を評価することもできる。これらの強震動予測技術の詳細と、耐震設計での利用については、参考文献²⁾に詳しくまとめられている。

2. まとめ

地震に対して安全な構造物を造るために、強震動予測技術が進歩してきた。しかし、複雑な自然現象である強震動を正確に予測するには、断層破壊性状や地下構造のより精緻なモデル化、短周期地震波の数値計算精度向上など多くの課題が残されている。構造物の耐震安全性をより高めるために、強震動予測技術の向上を継続していくことが重要である。

Ⅲ. 液状化

地震が多発する我が国では、大きな河川流域や埋立地の緩く堆積した砂地盤で液状化の可能性が高くなっている。過去の大地震では、地盤の液状化により構造物の沈下・傾斜、杭基礎の破壊、盛土の沈下、ライフラインの浮上り・破損などの甚大な被害が生じている。そのため、様々な予測や対策技術が提案・適用されている。

1. 地盤の液状化予測方法

(1) 液状化ハザードマップ

各自治体から公開されている液状化ハザードマップは、各地域の地形データなどの地盤情報と、想定地震の震度分布などの揺れの大きさに基づいて評価する方法である。この方法は、広域の液状化危険度を評価するもので、リスクの可視化により情報共有がしやすく、構造物所有者のリスク認識や対策喚起などのリスクコミュニケーションの促進に有効である。

(2) サイトの詳細情報に基づいた液状化予測

a. 簡易法

簡易法は、地盤調査による標準貫入試験の N 値から求める地盤の抵抗力と、想定する地表面最大加速度による地盤への外力の比較から、液状化に対する安全率 (F_L 値) を求める方法³⁾である。この方法では、液状化発生の有無のほか、液状化の程度や沈下量の目安を予測可能であるが、ボーリングデータに基づく特定深度毎の評価であるため、敷地地盤全体の評価はできない。

b. 詳細法

詳細法は、液状化に関する地盤調査データにより地盤内の水の影響を考慮した3次元FEM解析により求める方法である。この方法では、Fig.3に示すように直接的に敷地地盤全体の液状化発生の有無や程度、更には構造物に対する沈下・傾斜などの影響を詳細に予測が可能である。

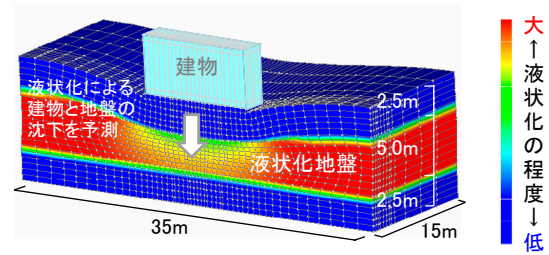


Fig.3 3次元FEM解析
(3D Effective Stress Analysis)

2. 液状化対策

(1) 対策概念

液状化対策工法の考え方をTable 1に示す。構造物で対応する方法は、杭や連続壁等の基礎構造で安全性を確保するものであるが、高度な設計・解析技術と判断力が必要である。地盤の特性を改善する場合は、液状化を許容しない方法と部分的に許容する方法があるが、前者は多大なコストを要する。後者の方法は、安全性とコストを考慮した合理的な設計が可能である。

(2) 格子状地盤改良による液状化対策の簡易評価法

Fig.4に示す格子状地盤改良は、軟弱地盤にセメント系固化材を混合した改良体を格子状に囲って、格子内地盤のせん断変形を抑止する方法で、合理的な液状化対策方法の一つである。格子状地盤改良の設計では、Fig.3のような詳細法の検討が必要であるが、解析モデル作成や計算に多大な時間を要する。そこで、格子で囲われた効果を液状化に対する安全率 (F_L 値) に取り込んで改良体仕様 (Fig.4中青字) を検討可能な評価法⁴⁾を開発し、今後の実適用を目指している。

3. まとめ

地盤の液状化による構造物被害の軽減のために様々な液状化予測や対策技術の開発が進められてきたが、同時に技術の有効性の検証が重要である。開発した格子状地盤改良の簡易評価法では、模型実験や原位置試験による実証、地盤や改良体の基礎データの蓄積を進める予定である。

Table 1 液状化対策の考え方
(Approach to Liquefaction Countermeasures)

概念	構造的対策	地盤の特性を改善	
方法	杭・連続壁などの基礎構造採用	1) 全面固結 2) 全面置換	3) 密度増大 (締固め) 4) 地下水低下 (遮水壁+排水) 5) 飽和度低下 (空気注入) 6) 部分固結 (柱状改良) 7) せん断変形抑止 (格子状改良) 8) 間隙水圧遮断 (シートパイル) 9) 排水 (ドレーン)
		1), 2) 共通 液状化しないがコスト大	3) 騒音・振動 4) 地盤沈下 5) 効果の確認 6) ~ 9) 共通 部分的な液状化効果の確認
課題	高度な設計・解析技術、判断力		

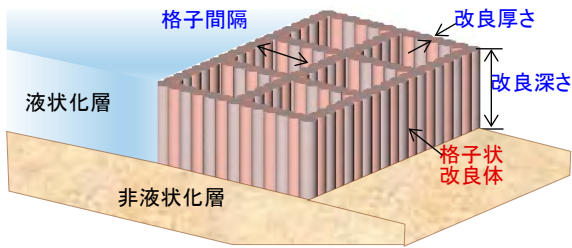


Fig.4 格子状地盤改良
(Grid-Form Deep Cement Mixing Walls)

IV. 津波

1. 近年の災害状況

我が国はユーラシアプレート、北米プレート、太平洋プレート、フィリピン海プレートという4つのプレートが重なり合う場所に位置しており、近海で大規模な海底地震が発生しやすい。また、入り組んだ海岸地形が多く見られ、そのような場所では沖合から襲来した津波が増幅しやすいことが知られている。このような地理的・地形的特徴から、古くより大規模な津波に見舞われてきた。近年で最も大きな被害をもたらした事例は平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）である。この地震では、東北地方の太平洋沿岸部をはじめとした広い地域に津波が襲来し、各地に甚大な被害をもたらした。より記憶に新しい事例としては、令和6年能登半島地震がある。これらのように大規模な浸水被害が発生した事例のほかにも、ほぼ毎年のように津波警報・注意報が発令されている。さらに、日本近海における地震以外にも、2010年のチリ中部地震、2022年のフンガ・トンガフンガ・ハアパイ火山噴火、本年のカムチャツカ半島地震など日本から遠く離れた場所で発生した事象が日本沿岸に数10cmの高さの津波をもたらした事例も多い。

2. 開発技術

我が国に甚大な被害をもたらす津波への対策として、当社では1990年代より水理模型実験と数値解析の両面から津波に関する研究、技術開発に取り組んできた。

水理模型実験においては、ポンプ式津波造波装置を備えた水槽・水路を用いて、主に津波荷重に関する研究を進めてきた。ポンプ式津波造波装置は、軸流ポンプにより水槽・水路内の実験部に流量を発生させるものであり、他の造波方式では再現が難しい長周期の津波や引き波初動、また、東北地方太平洋沖地震津波で観測された二段波形などの複雑な波形の津波を発生させることが可能な設備である。

数値解析については、平面2次元モデルによる津波の伝播・遡上解析（例えばFig.5）に加え、CFD解析による断面2次元・3次元の津波解析により構造物に作用する荷重評価を行ってきた。また、本年報の「予測技術（気象災害）」IV章で紹介した「都市型水害予測解析システム」を臨海部の施設構内における詳細な津波氾濫解析に適用するための開発も行っており、実務に適用してきた。

3. 適用事例

本節では、津波に関する水理模型実験・数値解析技術の適用事例について、東日本大震災以降の例を紹介する。

東日本大震災の防災当時、当社では（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO、当時は独立行政法人）が推進する洋上風力発電実証研究の一環として、千葉県銚子市沖への洋上風力発電施設の建設を進めているところであった。この中で実施していた海象観測から、東北地方太平洋沖地震津波にともなう水位・流速時系列を取得、直ちに水理模型実験や現象把握のための数値解析を実施し、洋上風車基礎の設計上、当該規模の津波荷重が問題とならないことを確認した。

また、工場やプラントなど臨海部に立地する陸上施設に対しても、防潮堤や防潮堤背後の敷地・建物に作用する津波荷重に関する水理模型実験、施設構内に流入した海水の挙動を詳細に評価するための氾濫解析も多数実施しており、その結果は設計の妥当性確認等に活用されている。

陸上の建築物に対しては、建築基準整備促進事業の中で、ピロティのような開口を有する建築物を対象とした水理模型実験や数値解析、理論的な研究を実施してきた（Photo 1）^{5), 6), 7)}。また、防潮堤背後の建築物に作用する津波荷重についても水理模型実験を実施してきた⁸⁾。これらの成果は、国の技術基準や技術資料（津波避難ビル等の構造上の要件の解説）における、津波荷重評価式を構築する際の基礎情報として活用された。

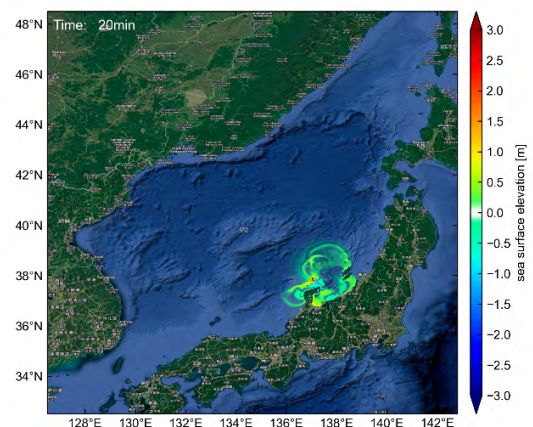


Fig.5 令和6年能登半島地震津波の伝播解析
(Numerical Simulation of the 2024 Noto Peninsula Earthquake Tsunami)

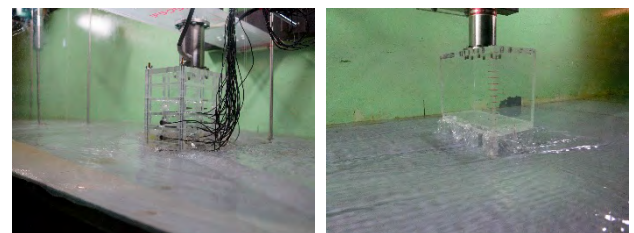


Photo 1 開口を有する建築物の津波波力計測実験
(Physical Model Experiments of Tsunami Wave Force Acting on a Building with Openings)

4. 今後の展望

東日本大震災以降、津波に関する数多くの研究により知見が蓄積されてきており、具体的な対策も進められては来ているが、大規模な地震津波による被害を完全に防ぐことは難しく、南海トラフ巨大地震など発生が想定される巨大津波への備えは今後も重要となる。また、令和6年能登半島地震のように、地震・津波災害から復旧する前に後発災害が生じる、いわゆる複合災害に対するリスク評価や対応策の検討も重要な課題であり、今後研究・開発を進めていく予定である。

V. 統合エンジニアリングシステムによる評価

1. 広域を対象とした地震災害リスク評価

地震動は、その規模によって建物倒壊被害のみならず津波や液状化を引き起こすなど、影響は広範囲に及び、時に甚大な被害と経済損失を伴う。社会的な災害レジリエンスを向上するには地域固有の災害リスクの把握が重要となることを鑑み、技術研究所では広域を対象とした地震災害リスク評価にも取り組んでいる。

一般的な地震災害リスク評価では経験則に基づく所謂“被害曲線”から被害を推定するが、災害が激甚化・複合化する中、経験的な手法による将来予測が困難となっている。そこで、技術研究所ではより科学的なアプローチとして「統合エンジニアリングシステム (Integrated Engineering System, IES)」の開発を進めている。明確な定義はないが、IESは、多様な災害に対して地域で何が起こり得るかをシミュレーションする要素技術を統合したシステムを指す。IESが社会実装できれば、様々なステークホルダーが所有する各種施設の抱える災害リスクの広域的な視点からの洗い出しや、合理的な対策立案が可能となると期待される (Fig.6)。なお、現状対応可能な災害としては地震災害のほか風水害がある。具体的な要素技術としては、対地震災害ではIVで述べた津波の伝播・遡上解析と後述する地盤・建物応答解析が、対風水害では高潮・高波解析、河川氾濫、内水氾濫の評価が可能となっている。

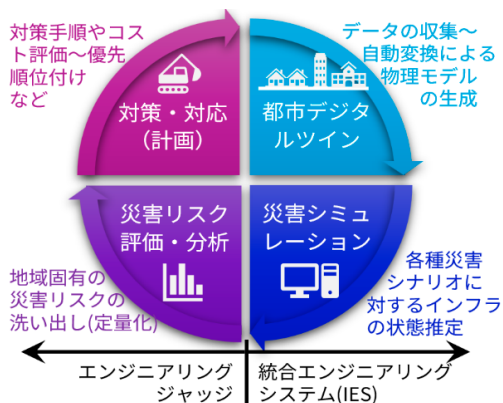


Fig.6 統合エンジニアリングシステム(IES)とその活用
(Integrated Engineering System and Its Utilization)

2. 関連技術と適用事例

対地震災害の地盤・建物応答解析技術として、技術研究所では東京大学地震研究所で開発された「統合地震シミュレータ⁹⁾」を導入しており、都市スケールでの地盤・構造物群の時空間的な揺れのシミュレーションが可能となっている。現在、つくば地域における総合的な防災計画支援活動の一環として、避難ルート沿いの地震時通行性評価への技術適用とサービス化を試行している (Fig.7)。IESによる地震被害評価については、過去にも静岡県下田地域を対象に既存の地震被害推定結果との整合性を確認するとともに、地域の相対的な対災害性を可視化するためのプラットフォーム試作も行っている (Fig.8)。

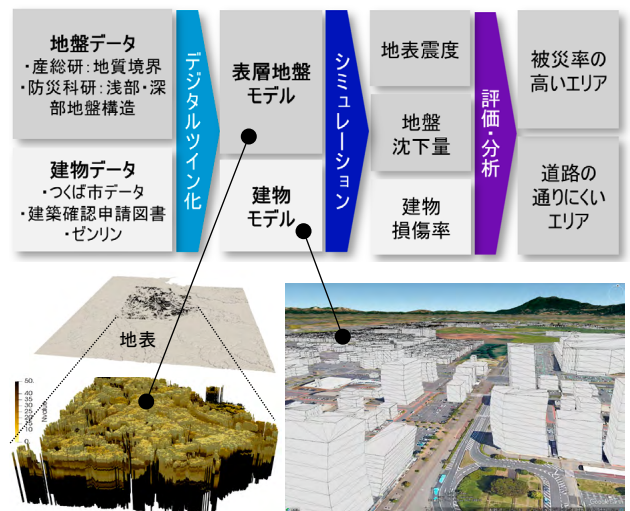


Fig.7 つくば地域の地震災害リスク評価へのIES適用
(IES-Based Seismic Risk Assessment in the Tsukuba Region)

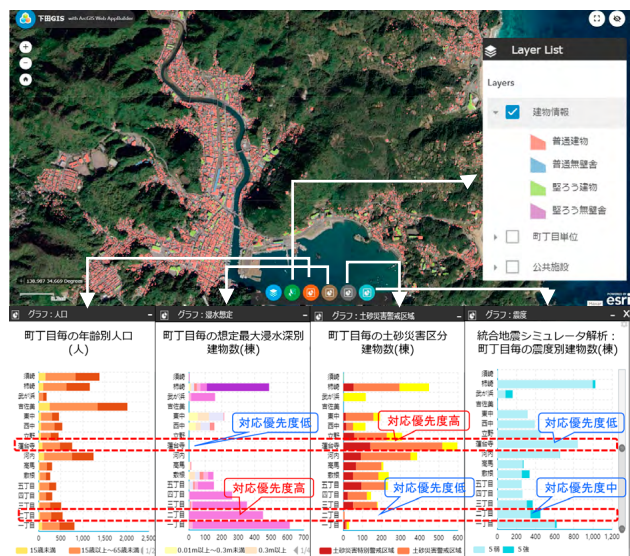


Fig.8 IESを活用した可視化プラットフォームの試作例
(Prototype Example of a Disaster Risk Visualization Platform)

こうした広域の災害リスク評価のプロセスにはインフラデジタルツインの構築が含まれる。ここでいうデジタルツインは、適切な解像度を有するシミュレーション用モデル、と同義である。近年、PLATEAU¹⁰⁾をはじめオープン化されたインフラデータが充足化してきているものの、情報が不十分な場合が多く、複数のデータソースの統合や合理的なモデル推定が必要になるなど、都市スケールのデジタルツイン生成には相応の労力を要する。このため、モデル自動生成技術の開発も進めており、表層地盤や建物に関しては代表的なデータベースからのデジタルツイン自動生成が可能となっている。

3. 今後の展望

IESの各要素技術を連携・統合していくことで、複合災害や経験のない災害への評価・対策検討に活用できるようにすることが目標である。そのためには、小規模自治体や民間企業所有インフラのデジタルツイン化と災害シミュレーションを行い、顧客からのフィードバックに応じて機能の充足化とインタフェースの改良のサイクルを回していく必要があると考えている。現在、内閣府第3期SIP¹¹⁾における課題「スマート防災ネットワークの構築」においてもIES関連技術の開発が進められている。全体のプロトタイプが見えるところまで開発が進めば、国策としての社会実装も期待される。センシングデータとの連携によるモデルの信頼性向上と、AI技術を活用したモデルの自動更新まで実装できれば、他社との差別化を図ることができる。

VI. おわりに

地震動予測技術、液状化の予測と対策、津波対策技術の開発と適用事例、統合エンジニアリングシステムによる広域を対象とした地震災害リスク評価について紹介した。これらの技術を、地震災害の予測に役立てることができる一方で、都市化が進み、より複雑化した現代社会で発生しうる地震災害を正しく予測するためには、未だ多くの課題が残されている。その他の自然災害との連鎖、同時発生についても懸念が残っており、更なる予測技術の向上が望まれる。今後、異なる自然災害を対象とする分野間の連携や、デジタル・AI技術によるイノベーションなどにより、自然災害の低減に繋がる技術開発を進めていく。

参考文献

- 1) 内閣府；平成26年版防災白書，附属資料，
https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/pdf/H26_fuzokushiryoku.pdf
- 2) 鈴木紀雄，池浦友則，引田智樹，笠松健太郎，友澤裕介；耐震設計と地震動，鹿島技術研究所年報，Vol. 71，2023.
- 3) 日本建築学会；基礎構造設計指針，2019.
- 4) 渡邊公美，安達直人ほか；液状化対策に用いる格子状地盤改良工法における改良仕様の評価方法（その1～2），第60回地盤工学研究発表会，2025.
- 5) 末長清也，岩前伸幸，池谷毅，秋山義信，舘野公一，鈴木紀雄；多柱構造物に作用する津波波力に関する実験的研究，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 70，No. 2，2014，pp. I_390-I_395.
- 6) 岩前伸幸，池谷毅，秋山義信，末長清也，鈴木紀雄，舘野公一；開口を有する建築物のポーラスメディアによるモデル化，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 70，No. 2，2014，pp. I_376-I_380.
- 7) 池谷毅，岩前伸幸，秋山義信，福山貴子，末長清也，鈴木紀雄，舘野公一；開口影響を考慮した陸上構造物に作用する津波持続荷重の評価方法，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 70，No. 2，2014，pp. I_386-I_390.
- 8) Ikeya, T., Suzuki, K., Iwamae, N., Okinaga, T., Suenaga, S., Akiyama, Y., Tateno, T. ; Experimental Study on Reduction of Tsunami Wave Force Acting on Land Structures Due to Protective Barriers, The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2017.
- 9) 市村強，堀宗朗，寺田賢二郎，山川貴弘；統合地震シミュレータにおける高分解能強震動シミュレータと都市域の電子情報の利用についてー地盤構造の推定手法が強震動分布に及ぼす影響の基礎検討と GIS を中心とした統合地震シミュレータの雛形の構築ー，応用力学論文集，Vol.6，pp.615-622，2003.
- 10) 国土交通省；” PLATEAU”，
<https://www.mlit.go.jp/plateau/>
- 11) 内閣府；戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第3期，
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip3rd_list.html