

腐食した鋼部材の変形性能評価

社会基盤工学・構造力学分野・准教授 北根 安雄

はじめに

鋼は、剛性および強度が高く、加工性もよく、大量生産も可能であることから、非常に優秀な構造材料です。土木構造物では、橋梁をはじめ、栈橋や護岸などの港湾構造物、送電鉄塔やダムゲートなどの電力施設など、重要な構造物に使用され、社会インフラに欠かせない材料となっています。鋼は、水と酸素の存在下で腐食するという性質をもつため、鋼構造物を長期間腐食から守るためには、通常、塗装などの防食技術が重要となります。塗装などの防食性能が劣化しても、腐食が進行する前に、塗り替えなどにより防食性能を回復してやれば、鋼部材は健全なままですが、防食性能の劣化が見逃され、腐食が進行してしまうと、鋼部材の耐荷力性能は低下してしまいます。

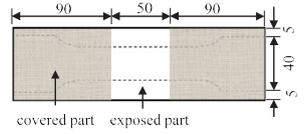
例えば、港湾鋼構造物の鋼管杭では、点検で腐食減肉量を特定し、残存耐荷力が要求性能を満足していない場合は、当て板補修が検討され、減肉量を補うように必要当て板厚が決定されます。これまで、腐食した鋼部材の残存耐荷力については、精力的に研究が行われてきており、引張、圧縮、曲げ、せん断など異なる作用荷重に対する腐食部材の残存耐荷力について、残存板厚などの腐食量の統計量をもとにして、ある程度の精度を持って予測できるようになってきています。しかし、腐食部材の変形性能については、未だ十分に明らかにはされておらず、例えば、地震時のように、腐食した鋼部材が塑性化する場合の変形性能が、健全な部材と比べてどの程度になるかについては、明らかにしていく必要があります。

そこで、腐食凹凸が鋼部材の変形性能に与える影響を明らかにするため、腐食程度の異なる鋼材の引張試験を実施することにより、引張荷重下における腐食鋼部材の伸び性能について検討しましたので、その一部を紹介いたします。

腐食鋼材の引張試験

腐食鋼材として、表1に示す4種類の実環境で腐食した鋼材と、バブリング腐食促進試験装置により、最長336日間腐食させたSS400材の5種類を用いました。材料1から材料4の腐食鋼材から短冊状に試験部を切り出し、つかみ部を溶接により接合することで、JIS 5号試験片の形状の引張試験体を製作しました。バブリング腐食促進試験では、初期板厚9.05mmの鋼材を、50℃、3%塩水の環境に浸漬し、つかみ部は防食テープによりカバーすることにより、試験体中央部の50mmの区間のみ腐食させました。促進試験期間は、28日、56日、112日、168日、224日、280日、336日とし、促進試験後は、JIS 5号試験片を切り出しました。各材料に

表1 使用した腐食鋼材

材料1：約100年前に建設された鉄道桁	材料2：約35年使用された鋼矢板
	
材料3：約5年間海洋環境下に置かれた形鋼	材料4：約18年間暴露された耐候性鋼材
	
材料5：バブリング腐食促進試験装置により、最長336日間腐食させたSS400材	
	

つき、腐食凹凸のない試験体も準備し、材料1から材料4の腐食鋼材については、腐食鋼材を切削することにより、表面凹凸を除去した平滑試験体を製作しました。合計で126体の引張試験体に対し、各試験体の詳細な腐食凹凸をレーザー深度計により計測して、板厚を同定し、粗さパラメータを計算しました。

引張試験は、MTS材料試験機を用いて行い、腐食試験体のひずみは、デジタルカメラにより撮影した画像をもとに、画像相関法（DIC）を用いて計測しました。

腐食凹凸と伸び性能の関係

引張試験により得られた破断伸びを図1に示します。図1の縦軸は、腐食試験体の破断伸びを平滑試験体の破断伸びで無次元化した値であり、横軸は、粗さパラメータの1つである算術平均高さ Sa を平均板厚 t_{ave} で除した ζ_{Sa} です。図から明らかなように、粗さパラメータが大きくなるに従い、伸び性能が減少する傾向が見取れます。

塑性ひずみの局所化

図2に異なる腐食粗さをもつ試験体の破断直前のひずみ

のコンター図を示します。(a)は腐食なし、(b)と(c)は腐食試験体ですが、(c)の方が腐食凹凸が大きな試験体です。この図から、腐食凹凸が大きくなるとともに、塑性ひずみの発生領域が局所化していることが明らかであり、引張荷重下の伸び性能が腐食凹凸により減少する原因は、この塑性ひずみの局所化であると推察されます。

この塑性ひずみが局所化する領域と腐食粗さパラメータとの関係を明らかにするため、引張試験中に撮影した画像をもとに、DICを用いて試験体表面のひずみ解析を行うことで、ひずみが局所化する領域を同定しました。

ひずみ局所化領域の大きさを定義するため、ひずみ閾値を設定し、このひずみ閾値より大きな値をもつ領域(軸方向長さ)を同定し、幅方向の長さの平均値としてひずみ局所化領域平均長さを求めました。得られた腐食試験体のひずみ局所化領域平均長さを、腐食なし試験体におけるひずみ局所化領域平均長さで除し無次元化することで、ひずみ局所化領域平均長さの腐食による変化量を表しました。

図3に、横軸に無次元化破断伸び性能を取って、無次元化ひずみ局所化領域平均長さ(ひずみ閾値0.35)をまとめた

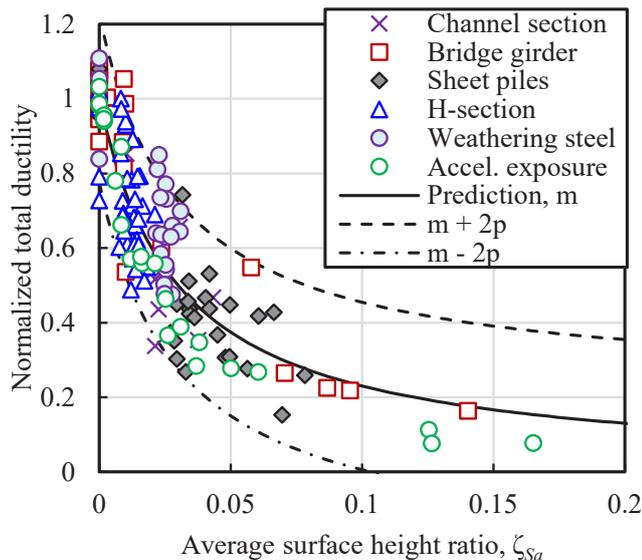


図1 無次元化破断伸びと無次元化粗さパラメータ ζ_{Sa} との関係

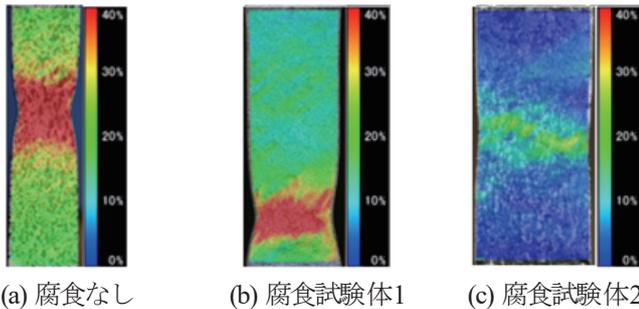


図2 異なる腐食粗さをもつ引張試験片の破断直前のひずみの局所化の様子

結果を示します。無次元化破断伸び性能と無次元化ひずみ局所化領域平均長さには、ほぼ線形の関係が見られ、非常に強い相関関係が明らかとなりました。そこで、各試験体の破断時の無次元化ひずみ局所化領域平均長さ $\bar{L}_{ave,f}$ と無次元化算術平均高さ ζ_{Sa} の関係をプロットしたものを、ひずみ閾値0.35について図4に示します。この図から明らかのように、腐食粗さが大きくなるにつれ、無次元化ひずみ局所化領域平均長さが減少しており、腐食凹凸により、ひずみの局所化が進むことで、腐食試験体の伸び性能が小さくなるということが明らかとなりました。

腐食部材の変形性能

これまでの検討は、引張荷重下のみでの検討であり、最初に例で示した港湾構造物の鋼管杭の場合では、地震時の水平荷重により曲げ荷重が载荷されます。今後、有限要素解析を用いて、曲げを受ける腐食した鋼管の変形性能について評価し、腐食凹凸が鋼部材の変形性能に与える影響について、定量的に明らかにする予定です。

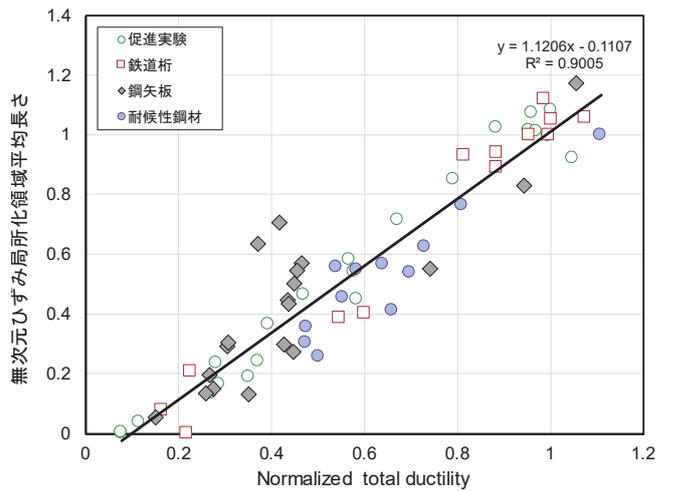


図3 無次元化ひずみ局所化領域平均長さ と無次元化破断伸び性能との関係

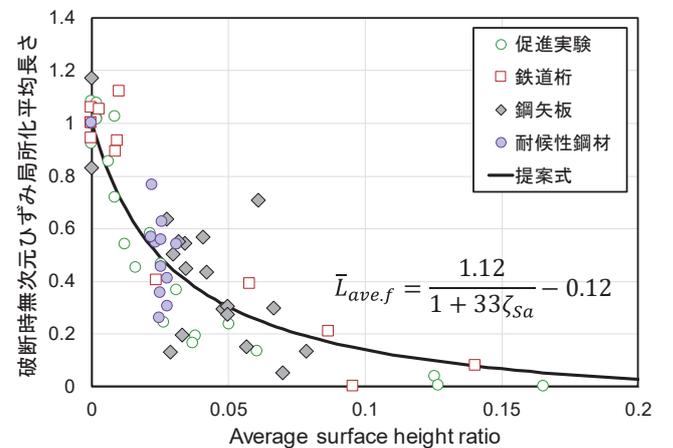


図4 無次元化ひずみ局所化領域平均長さ と無次元化粗さパラメータ ζ_{Sa} との関係

流出量に対するバイアス補正手法

社会基盤工学・水文・水資源学分野・講師 萬 和 明

はじめに

気候変動により、水循環や水資源に大きな影響が生じることが指摘されている。水災害の頻発化・激甚化はすでに顕在化しつつあり、気候変動に対する適応・緩和策は人類社会が直面する喫緊の課題である。

水災害や水資源に対する気候変動への適応策を考える際の基礎情報となるのが、河川流量である。将来気候推計情報としては、一般的に大循環モデル（GCM, General Circulation Model）の出力値が広く利用されており、河川流量については、GCMが出力する流出量などを用いてその将来予測が行われる。しかしながら、流出量に限らず降水量、気温などのGCMが出力する変数には、様々な要因からバイアスと呼ばれる誤差が生じる。そのため、将来気候条件下での河川流量を精度よく予測するためには、GCM出力値のバイアスを補正することが必要である。

これまでにGCM出力値に対するバイアス補正研究は数多くなされてきたが、降水量や気温を対象とした研究が主である。河川流量は重要な基礎情報となるが、流出量を対象としたバイアス補正の研究事例はほとんど存在しない。そこで本稿では、筆者らが開発した、流出量に対するバイアス補正手法について紹介する。

流出量に対するバイアス補正手法

本稿で述べる流出量とは、表面流出量と基底流出量の合計値のことで、降水過程を経て陸面に到達する水分量のうち、流出に寄与する水分量に相当する。ゆえに河川流量とは異なり、流出量は実質的に観測が不可能であり、バイアス補正の参照となる観測値を得ることができない。そこで、地表面付近の水文過程を表現する陸面過程モデルを用いて、観測値に準ずる流出量を作成することが提案されている。ここで、作成された流出量を河道流追跡モデルによって河川流量へ変換した場合に、観測の河川流量を精度よく再現できるようであれば、作成した流出量が擬似的に観測値とみなし得ると考えた。

以上の考えに基づけば、流出量に対するバイアス補正手法は以下のような手順となる。

- 観測ベースの気象データを陸面過程モデルに入力して流出量を作成する。
- 作成された流出量を擬似的な観測値とみなしGCMが出力する流出量に対してQuantile-Quantile Mapping法によるバイアス補正を行う。
- バイアス補正した流出量を河道流追跡モデルによって河川流量へ変換する。

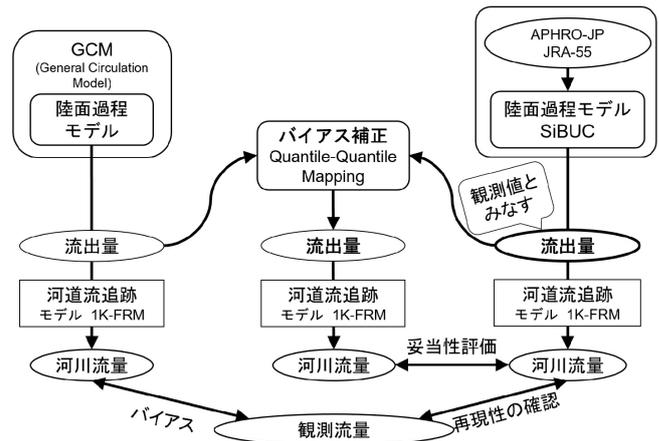


図1 流出量に対するバイアス補正手法の概念図

本手法で重要な点は、作成された流出量が擬似的な観測値とみなすことができるかどうか、という点と、本手法の妥当性を補正対象の流出量ではなく変換した河川流量で評価する、という点である。バイアス補正の対象が流出量であるため、河川流量の観測地点かどうかに関わらず、任意の地点でバイアスが補正された河川流量を得ることができるとが本手法の利点のひとつである。本手法の概念図を図1に示す。

流出量を補正する際に本手法で用いるQuantile-Quantile Mapping法とは、補正対象のデータの順序統計量を参照とするデータの順序統計量に置き換える方法である。実装が極めて容易な手法であり、広く利用されている。ただし、補正対象のデータと参照とするデータのデータ数が異なる場合には、内外挿が必要となるため、注意が必要である。

適用事例

筆者らは、筑後川流域を対象として、本手法の妥当性を検証している。まず、観測ベースの気象データとして、JRA55再解析データとAPHRO-JP雨量観測データを利用し、それらを陸面過程モデルSiBUCに入力し流出量を作成した。作成された流出量は、河道流追跡モデル1K-FRMにより河川流量へと変換した。この際、貯水池操作を考慮しない設定で1K-FRMを使用した。筑後川流域には複数のダムが存在するため、筑後川流域の計画基準点である瀬ノ下地点で観測された河川流量に、ダム群による流入量と放流量の差分を加えた差し戻し流量を求め、変換した河川流量と比較した。その結果、渇水年を除いて良好な再現性が確認された。以後、変換した河川流量を参照河川流量と呼ぶ。

次に、作成された流出量を擬似的な観測値とみなしGCMが出力する流出量に対してQuantile-Quantile Mapping法によるバイアス補正を行った。ここでは、気象庁気象研究所

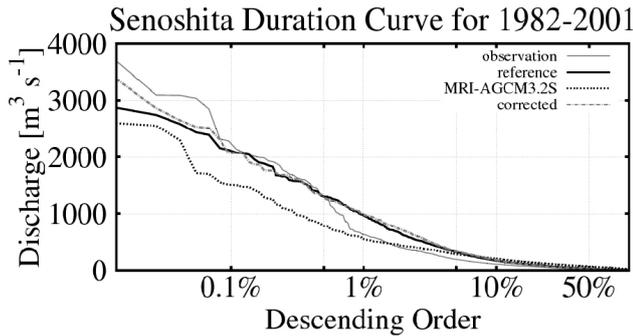


図2 瀬ノ下地点における20年分の流況曲線

灰色実線が観測の河川流量，黒色実線が参照河川流量，黒色点線がMRI-AGCM3.2Sの流出量を用いて得た河川流量，灰色一点鎖線がバイアス補正後の河川流量である。

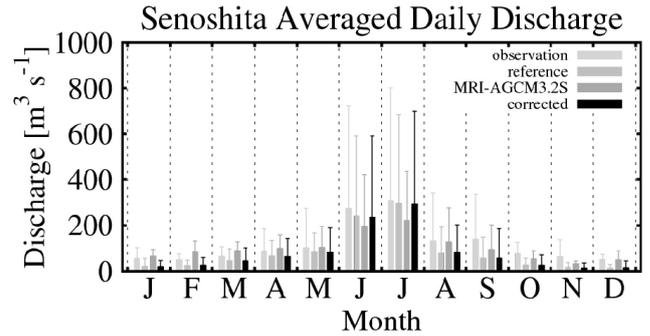


図3 瀬ノ下地点における20年平均した月別の日流量

棒グラフが平均値，誤差棒が標準偏差を表す。同一月中，左から観測の河川流量，参照河川流量，MRI-AGCM3.2Sの流出量を用いて得た河川流量，バイアス補正後の河川流量である。

が開発しているMRI-AGCM3.2Sが出力する流出量を用いた。MRI-AGCM3.2Sは空間解像度が約20km格子であり，世界最高水準の高解像度GCMである。本稿では20年分の日単位の流出量を対象としてバイアス補正を行った。

図2に瀬ノ下地点における20年分の流況曲線の比較を示す。まず同図から，参照河川流量と観測の河川流量を比較すると，高水部にやや多少の乖離がみられるものの，両者が近い値であることが確認できる。次に，MRI-AGCM3.2Sの流出量を用いて得た河川流量は過小評価であるが，バイアス補正によって参照河川流量や観測の河川流量と近い値に補正されていることがわかる。よって，本稿で紹介する手法が妥当であることが確認できる。

ところで，MRI-AGCM3.2が出力する流出量は3時間間隔で提供される。そこで，3時間単位の流出量を対象にバイアス補正を試みた。図は省略するが，この場合は上位1%程度の高水部についてバイアス補正後の河川流量が過大補正となる。これは，バイアス補正後の流出量時系列では，洪水ピーク後の逡減期間が過大な流出量となっているためである。この原因は，擬似的な観測値とみなした流出量とMRI-AGCM3.2Sが出力する流出量の累積分布が大きく異なるためである。

最後に，図3に瀬ノ下地点における20年分の河川流量について，月別に平均した結果を示す。同図から，特に夏季においてMRI-AGCM3.2Sの流出量を用いて得た河川流量が平均値と標準偏差について過小評価であることがわかる。また，どの月でもバイアス補正の結果は参照河川流量と近い値となっている。よって，本稿で紹介する手法が妥当であることが確認できる。ただし，特に冬季において参照河川流量が，観測の河川流量よりも過小評価となっているこ

とから，参照河川流量のさらなる精度向上が今後の課題点として挙げられる。

おわりに

本稿では流出量に対するバイアス補正手法について紹介した。まず，流出量の観測値が得られないため，再解析・観測気象データを陸面過程モデルに入力し流出量を作成した。次に，作成された流出量を擬似的な観測値とみなしGCMが出力する流出量に対してQuantile-Quantile Mapping法によるバイアス補正を行った。そして，バイアス補正した流出量は河道流追跡モデルによって河川流量へ変換し，河川流量に基づいてバイアス補正手法の妥当性を確認した。紙面の都合で割愛したが，本手法はMRI-AGCM3.2Sの異なる実験結果にも適用し，妥当な結果が得られることを確認している。詳細は参考文献を参照いただきたい。

今後は，擬似的な観測値とみなす流出量について，特に低水を対象としたさらなる精度向上に取り組みつつ，本手法を将来気候推計情報に適用する計画である。

謝辞

本稿で紹介した研究の遂行に際し，日本学術振興会科学研究費助成事業 JP19K21992と，文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマ D「統合的ハザード予測」JPMXD0717935498の助成を受けた。

参考文献

萬 和明，市川 温，立川 康人：流出量に対するバイアス補正手法の開発，土木学会論文集B1（水工学），Vol.76，No.2，I_79-I_84，2020。

なぜ補強土壁は地震に強いのか？

都市社会工学・都市基盤システム工学講座・准教授
澤村 康生

はじめに

地球系三専攻が桂キャンパスに移転して15年が経過しようとしているが、我々が研究室を構えるCクラスターが補強土壁に囲まれている（図1）ことを認識している人は少ないのではないかと。補強土壁とは、地盤中に別の部材（補強材）を敷設し、土と補強材との相互作用によって土塊全体の安定性や強度を高める工法である。補強土壁を用いることで垂直盛土を構築することが可能となるため、宅地造成や高速道路等、幅広い用途で活用されている。1960年代にフランスで開発された本工法は、今や世界中で社会インフラを構築する重要な構造物となっている。

我が国のような地震の多い地域で使用されるようになったのを契機に、補強土壁の地震時挙動に関する検討が進められ、補強土壁が耐震性に優れた構造物であることが明らかになってきた。例えば2011年の東北地方太平洋沖地震では、地震後に調査された約1,600基の補強土壁の内、95%以上が無被害または軽微な損傷にとどまっていたことが報告されている¹⁾。しかし、補強土壁の有する“粘り強い変形性能”について十分に解明されているとは言えず、現在でも研究が進められている。そこで本稿では、補強土壁の地震時挙動の解明に向けた研究の一例を紹介する。

補強土壁の設計法と課題

補強土壁の設計は、内的安定照査と外的安定照査により行われる。内的安定照査とは、壁面に作用する土圧に対して、補強土壁全体が安定するために必要な補強材の数、大きさ、強度、配置間隔、長さなどの諸元について検討するものである。現行の設計では、実大規模の実験により得られた補強材張力の分布を用いて、補強材張力が最大となる位置よりも壁面側を主働領域（図2）と仮定し、十分な引抜抵抗力が得られるように補強材の長さを決定している。しかし、安全側の設計となることを見越して主働領域内に敷設された補強材の引抜抵抗力は考慮せず、抵抗領域に敷設された補強材のみが抵抗力を発揮すると考えられている。このため、主働領域内に敷設された補強材が地震時の安定性に与える影響は明らかになっていない。

一方、外的安定照査では、地震時に周辺地盤や基礎地盤の変形に追従して、補強領域全体が一体となって挙動すると考えられている。このため、補強土壁全体を剛体として扱い、剛体に作用する荷重に対して、滑動・転倒・支持に対する安定を照査する。しかしながら、本照査法は重力式擁壁の設計に用いられる照査法と同様であり、補強土壁



図1 Cクラスター建設時の様子（提供：ヒロセ補強土(株)）

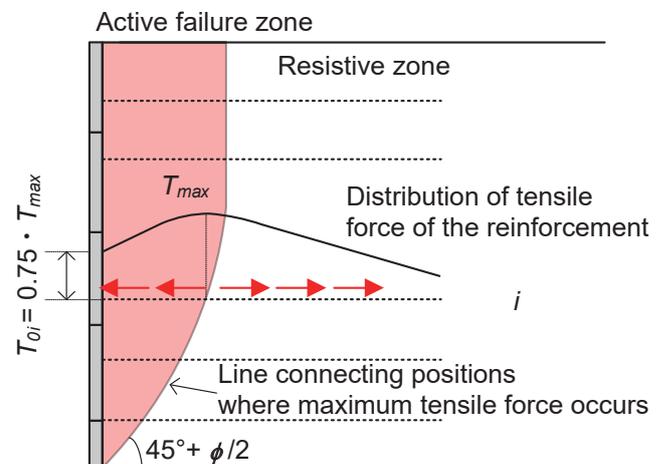


図2 補強材の張力分布と主働領域

特有の補強材の力学的役割を十分に考慮できていない。また、補強土壁は壁面・盛土・補強材が地震時に相互に作用するため複雑な地震時挙動となるため、補強土壁の詳細な地震時挙動の把握が必要不可欠である。

そこで筆者らは、1. 補強土壁の基本的な地震時挙動、2. 主働領域内に敷設された補強材の力学的役割、3. 補強土壁の一体性に対する補強材の力学的役割、を明らかにすることを目的に、動的遠心模型実験を実施した。

補強土壁に対する動的遠心模型実験²⁾

本研究では、防災研究所の遠心力载荷装置を用いて遠心力20 G場において振動実験を実施した。上記の目的を達成するため、6ケース（標準的な補強土壁を対象とした基本ケースと内的安定および外的安定に着目した5ケース）の実験を実施した（図3）。それぞれのケースは以下の考えに基づいて設定した。

- Case-1：現行の設計法に基づく基本ケース
- Case-2：地震時における主働領域内に敷設された補強

材の力学的役割を把握することを目的に、抵抗領域のみに補強材を敷設し、設計上の主働領域内には、摩擦抵抗を發揮せず張力のみを伝達するように、ステンレスワイヤーを用いて壁面と補強材を結び付けたケース

- Case-3：設計上の主働領域のみに補強材を敷設したケース
- Case-4：地震時における帯鋼補強土壁の一体性に対する補強材の力学的役割を把握することを目的に、Case-1の壁面および補強領域全体を剛体擁壁で置換したケース
- Case-5：Case-2の壁面および補強領域全体（設計上の主働領域）を剛体擁壁で置換したケース
- Case-6：主働領域が発生しない条件下での挙動を検討することを目的に、設計上の主働領域を剛体擁壁に置換し、抵抗領域のみに補強材を敷設したケース

入力波形には、2.0 Hz、20波のテーパ付き正弦波を用いた。遠心力20 Gに到達した時点 Step 0とし、その後1ステップごとに振動台の最大加速度を1.0 m/s²ずつ増加させ、最大入力加速度を1.0 ~ 8.0 m/s²とする計8ステップにより加振した。

図3に入力地震動の最大値と最大壁面変位の関係を示す。遠心模型実験の結果、補強土壁の基本的な地震時挙動として、地震時における補強材張力の発現状態は壁面の振動特性に大きく影響を受け、補強材張力と壁面に作用する土圧の位相は一致することを確認した。また、主働領域内に敷設された補強材は、抵抗領域内の補強材に張力を伝達するという設計で期待されている役割だけでなく、壁面近傍の

盛土を拘束することで壁面の変位や転倒を抑制していることが明らかになった。さらに、補強土壁の一体性については、補強材が補強領域と背面盛土との剛性差を低減させることで、強地震時においても補強土壁と背面盛土が連続的に挙動し靱性を發揮することを確認した。これらの結果より、補強土壁に対する現行の耐震設計手法は、補強土壁特有の靱性に富む挙動を表現できていないため、特に地震動のレベルが大きくなった場合において、大幅に安全側の設計となることが明らかとなった。

おわりに

本稿では、補強土壁の内的安定照査、外的安定照査に着目した遠心模型実験について紹介した。その他にも筆者らは、有限要素法による数値解析やマイクロX線CT装置を用いた微視的な検討を通じて、補強土壁の耐震性能について検討を行っている。今後も、メカニズムの解明を通じて、高度な社会インフラの構築に貢献していきたい。

参考文献

- 1) Kuwano, J., Miyata, Y. and Koseki, J. (2014) Performance of reinforced soil walls during the 2011 Tohoku earthquake, *Geosynthetics International*, 21(3), 1–18.
- 2) Sawamura, Y., Shibata, T. and Kimura, M. (2019) Mechanical role of reinforcement in seismic behavior of steel-strip reinforced earth wall, *Soils and Foundations*, 59(3), 710–725.

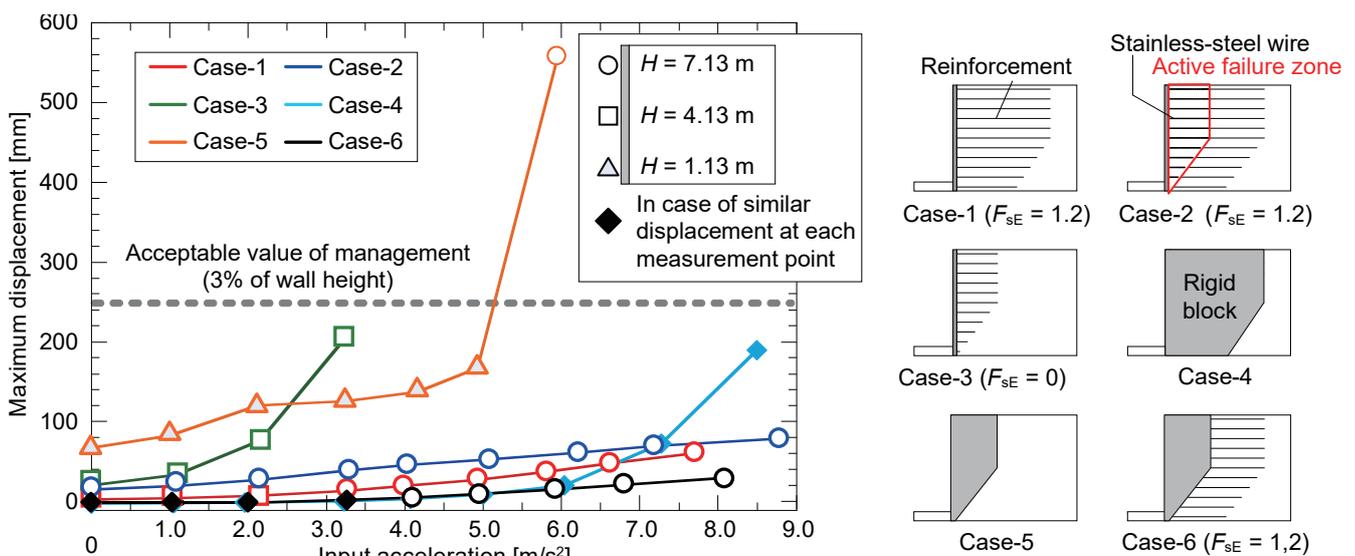


図3 実験ケースの一覧と入力地震動の最大値に対する最大壁面変位の関係

災害情報システムの連携協調によるテストベッドの研究開発

防災研究所・巨大災害研究センター・准教授 廣井 慧

はじめに

私は、情報科学、特にユビキタスコンピューティングと呼ばれる研究分野を根幹として、災害情報に関するシステムや通信の研究を行っています。ユビキタスコンピューティングとは、あらゆるものにコンピュータが内蔵され、いつでもどこでもコンピュータの支援が得られることを指す概念です。1980年代に提唱され、コンピュータの小型化や、膨大な処理性能のネットワーク、多量のデータを解析する手法の研究開発など、多くの研究者たちがこのような世界を実現するために尽力してきました。提唱から40年近くたった現在では、私たちの生活のあらゆる面でこうした技術が浸透し、日常的に使われています。

連携協調の重要性

災害時に利用されるユビキタスコンピューティング技術の中で最も私たちの身近に浸透した技術のひとつが、IoT (Internet of Things) という概念です。これはコンピュータに限らず、人や環境や社会に存在する多種多様なモノがインターネットに接続され、相互に情報をやり取りすることをいい、センシング技術の一種として発展、普及しました。災害の検知や人々の行動の把握など、災害分野においてもこの技術は様々な場面で使われています。

情報技術は日進月歩の世界なので、今は難しくとも数年足らずで私たちの求める技術が生み出され、実用化される可能性は大いにあります。逆に、今は主流であっても数年後には廃れた技術になってしまう可能性もあります。IoTによって、より多様なデータがより容易に収集できるようになったことは大きな成果ですが、災害時においては、まだまだ十分なデータを揃えられるとは言い難く、センシングしたデータをどのように役立てるかにも課題があります。災害情報に関するシステムや通信の研究の難しさのひとつは、情報技術で解決したい課題そのものに対するアプローチはもちろんですが、利用者や社会の情報環境を考慮しなければならない点にあります。

そこで重要となるのが、連携協調の概念を取り入れることだと考えています。これまでの災害情報システムは、ひとつのシステムの中にすべての機能を作り込むことが一般的なシステム設計でした。連携協調の概念は、連携基盤を用意し、その連携基盤を介してコンポーネントを協調実装させるという考え方です(図1)。コンポーネントとは、システムを構成するのに必要な部品、つまり通信やデータ処理に関する機能や解析などの処理自体を指します。この構成を採用することで、それぞれのコンポーネントで一番良

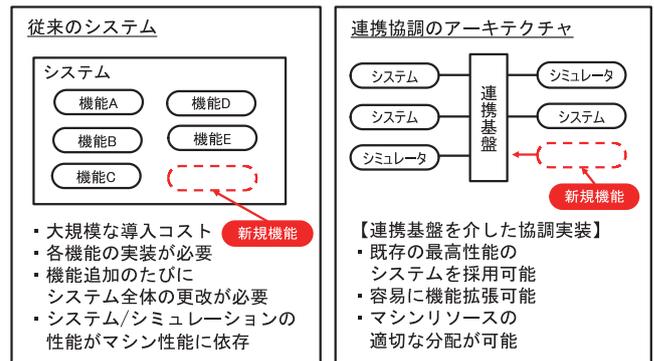


図1 連携協調のアーキテクチャ

い機能を採用することが可能となりますし、新たな技術が生み出された際には容易に差し替え可能になります。さらに、このような分散形態をとることで、処理にかかる機能、汎用的なコンピュータで処理可能な機能、と処理に合わせてマシンリソースを適切に分配できるようになるという利点があります。

連携協調は、インターネット工学の世界では一般的なアーキテクチャで、これを災害情報のシステムに取り入れることで多くの利点が見込めます。そのひとつが、拡張可能性・柔軟性です。連携基盤に過去の災害のデータや関連システムなど必要システムをつなぐことで目的に応じたITテストベッドを構成することができるようになります。災害研究ではデータが収集しにくいいため、解析技術やシミュレータの性能評価は、大変な手間とコストがかかります。テストベッドとして動作させることによって、評価環境を提供し、防災に関わるシステムやアプリケーションの開発の促進を見込んでいます。もうひとつが、プラットフォーム性です。このようなアーキテクチャの構成は、共通して利用するデータや機能など、共通リソースの提供が可能になります。これは、防災に関する情報技術の研究者たちにとっても開発コストを下げるだけでなく、自動運転など将来我々の社会への浸透が見込まれる新しい分野に対しても、データや機能の容易な相互交換を実現でき、新たな防災技術の可能性を社会に提供していくことができます。

センサシステムのテストベッドとしての適用例

現在は、ここまで述べた連携協調の概念を、様々な災害情報に関するシステムで設計、実装しています。そのひとつが、センサシステムに関してのテストベッドです。IoTの社会への浸透も相まって、今後、観測はより重要性を増し、これまでより多くの台数の観測機器が設置、活用されていきます。IoTによる導入・運用コストの大幅な削減は、これまで監視の行き届かなかった地点まで、より密で大規模な観測体制が容易に適用できるという大きな利点があるもの

の、大量のデバイスが必要であるために、必要数の実機を用意した事前の機能検証が難しく、開発自体や再設置などの改修のコストが高くなるといった欠点があります。

そのため、先ほどの連携協調の概念を活かして、設置前にセンサネットワーク全体の動作を検証し、ボトルネックを見つけ、その機能設計に基づいて解決策を検討する事前検証が可能なセンサシステムのテストベッドを研究開発しています。必要な数の実機を用意して事前に機能を検証しなくても、テストベッドの中で仮想のセンサシステムやそのネットワーク、電力消費を再現し、センサ機器の固有の特性や複数のセンサ機器からのデータの関係性、地形や通信インフラによるデータの伝送特性を明らかにすることが目的です。

センサシステムのテストベッドの構成を図2に示します。事前検証が可能なテストベッドを実現するために、実機と仮想機のセンサを入替可能な設計としました。図2中の、Sensorは計測デバイスを指しており、Nodeは計測データの処理や通信を行うコンピュータを示しています。Sensor、Nodeともに実機、仮想機を接続可能としたことで、両者について性能試験を行うテストベッドとして設計しています。実機、仮想機を入替可能とすることで、開発中のセンサシステムやそのシミュレーションを接続し、テストベッドとして利用することができます。

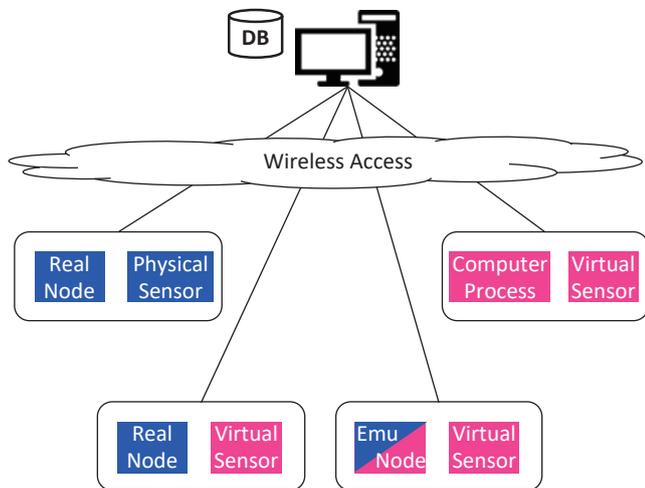


図2 センサシステムの連携協調の構成

このセンサシステムのテストベッドは、連携協調技術を使って情報通信のシミュレータ、災害現象のシミュレータなど他のシミュレータと連携することでその効果を発揮し

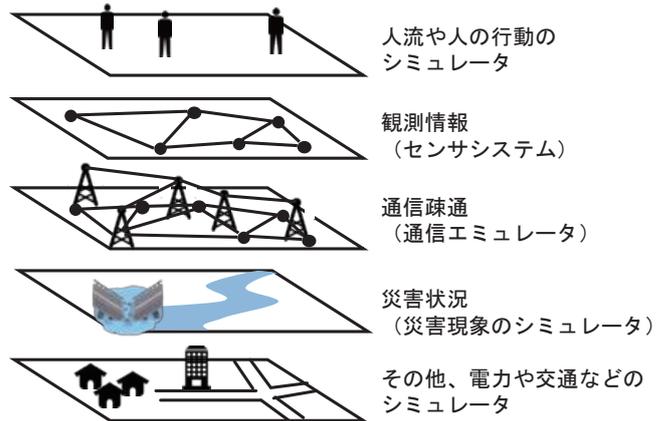


図3 テストベッドとしての活用

ます。例えば図3に示すように、センサシステムとは別にシミュレータレイヤを複数作り連携することで、過去の災害のデータをもとに停電やデバイスの故障、ネットワークの断絶など実際の災害時に発生しうる状況を再現し、事前検証を行います。様々なシミュレータを連携するほど、より実際の災害に近い状況を再現し、その状況下での検証を可能にします。

おわりに

このセンサシステムのテストベッドについて、現在までに実機と仮想機のセンサを入れ替えや他シミュレータとの連携協調技術を開発しています。しかし、センサひとつとっても動作させるためには、ハードウェア、アルゴリズム、ネットワーク、データといった多くのコンポーネントが必要です。さらには、センサが設置される地理的特性もセンサ自体の動作やネットワーク環境に大きく影響します。そのため、このコンポーネントや設置環境の特性を仮想上でも作り込み、各コンポーネントにおいて、実機/仮想機の選択的利用を可能とするシステムへの拡張を目指しています。また、このセンサシステムのテストベッドは、センサシステムの開発者、設置・運用者の利用を想定して研究開発しています。こうした方々のニーズに見合う検証機能や検証結果のアウトプットについても同時に検討していく必要があります。そうすることで、データ欠損のようなより実態に沿った検証をはじめとして、機能、活用の両面からIoTを利用したシステムの事前検証を可能にし、センサシステムの開発、更新、デバック、運用を支援することが見込まれます。

気候変動緩和策評価のための統合評価モデル

都市環境工学専攻・大気・熱環境工学分野・准教授 藤森 真一郎

はじめに

温室効果ガス（GHG）排出削減をはじめとする気候変動を抑制しようとする対策、所謂気候変動緩和策を取り巻く環境はここ数年で大きく様変わりしてきた。気候変動影響がより顕著に表れ、実社会への影響が大きくなり、それと呼応するように多くの主要国が今世紀中盤でのカーボンニュートラル目標を実現すると言った野心的な政策目標を掲げており、現状社会は急速に脱炭素化へ舵を切っているように見て取れる。こういった政策目標の裏付けとなる長期的なGHG排出経路やエネルギー・土地利用の将来シナリオは、これまで気候科学と人間システムを統合的に扱ういわゆる統合評価モデルによって提示及び評価がされてきた。統合評価モデルは、世界全体あるいは国全体を対象として気候、エネルギー、土地利用、経済などをモデル化し、GHG排出量、エネルギー消費量、全球平均気温などを推計するものであり、比較的長期（20-100年程度）の将来に対してシナリオ分析を行う。

統合評価モデルは1980年頃から現れ、1990年に公表されたIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第一次評価報告書から現在に至るまで、継続的に気候変動緩和策の評価を実施し、学術的及び社会的な貢献を果たしてきた。1980年、1990年代はエネルギーシステムの取り扱いも簡易的なものが多くシンプルなモデルばかりであったが、2000年代に入り、気候モデルがその解像度を上げ、対象を拡大してきたのと似たように、統合評価モデルも着実に進化を遂げてきた。非CO₂温室効果ガスの表現、明示的なCCSの導入、より厳しい削減目標である2℃あるいは1.5℃という政策目標を満たすシナリオの提示、再生可能エネルギーの大規模普及に伴う電力市場の表現、国連の持続可能な開発目標（SDGs）に代表されるような他の社会・環境目標と気候変動の関わりを明らかにするといった取り組みが代表的な進化である。また並行して、モデル自体の進化だけでなくシナリオの他分野への提供、IPCCにおける主要なシナリオの提供、国内外の政策策定に対する情報提供など、学術・社会へ幅広く影響を及ぼしてきた。そんな中、筆者である藤森は2010年以降、統合評価モデルに関する研究活動に従事してきた。そこで、本稿では藤森らの本研究グループの取り組みを中心に振り返り、今後に向けて指針について見解を述べたい。

当グループAIMでの取り組み

藤森らの研究グループは、1980年代から始まったAIM（Asian Pacific Integrated Modelling）と呼ばれる研究グルー

プの系譜の中にいる。森田常幸（故）、松岡譲（京都大学名誉教授）、甲斐沼美紀子（IGES研究顧問）ら立ち上げを行った世代を第1世代とすると、その弟子に当たる増井利彦、高橋潔、脇岡靖明（いずれも国立環境研究所）らが第2世代、藤森らはさしずめ第3世代である。先人たち同様に藤森自身もこれらの研究グループで継続的に開発されてきた統合評価モデルに新しいモデルの開発、既存のモデルの改良を行ってきたが、過去約10年間の当該研究グループの取り組みを振り返るにあたって、前半5年間と後半5年間を分けてみる（図1）。

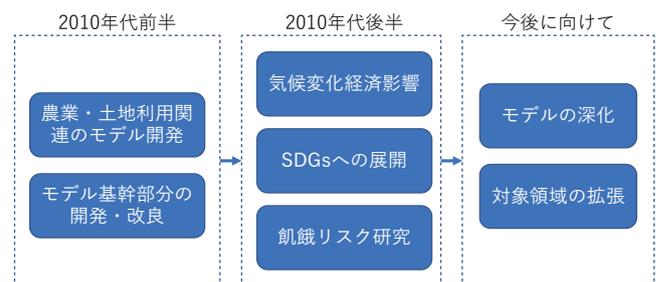


図1 過去10年間と今後の研究活動の分類

前半5年間は主として2つの作業を行い、土地利用関連モデルの開発と世界の研究トレンドに追いつくためのモデル基幹部分の開発が中心であった。当時は、2℃目標を達成するために相当量の負の排出が今世紀後半で必要になることが指摘されて、それを実現する技術バイオエネルギーとCCSを組み合わせたいわゆるBECCSに対する様々な検討が必要となっていた⁽¹⁾。その代表的なものはバイオ作物生産のための大規模な土地利用改変である。このために土地利用モデルを一定程度のレベルまで改良する必要があった。これはFujimori et al. Hasegawa et al.^(2, 3)等で報告されており、同時に飢餓リスクを突破口として研究チームの独自色を出すために様々な角度から研究を実施した。もう一つの基幹部分の開発は、2017年に公表された気候研究で分野横断的に使われる社会経済シナリオ（通称SSPs）に向けた準備となった。本質的なモデルメカニズムは前バージョンから変わっていないが、コーディング方式を一新し、拡張性の高い混合相補性問題を直接記述する形になった。また、発電のエネルギー源の選択方法や家計消費関数等細かい点でのアップデートが行われた。後半5年間は主として以下の3点、すなわち、1) 持続可能な開発目標の評価に対応する領域拡大、2) 飢餓リスク研究の大規模展開、3) 気候変動の経済影響研究を実施した。1)については従来のエネルギー経済を中心としたモデルの対象を超えて、様々なグローバルスケールの社会・環境問題を表現できるようなモデル拡張・改良作業及び協力機関との連携の強化を行った。例えば、生物多様性評価はAIMグループとして長年手つかずとなっ

ていた領域であるが、森林総研と協力することでモデル化を実現し、気候緩和策や気候影響による生物多様性への影響を評価した(4)。貧困、健康等の領域拡大も順次行った(5)。この流れは概ね国際的な同分野の潮流にも沿った流れとなっている。2)の飢餓リスク研究は前述のモデル開発の流れを継続し国際的にも同グループの大きな強みとなった(Hasegawa et al., Fujimori et al.等)(6, 7)。3)の気候影響の経済評価は日本の代表的な気候影響研究グループが総力を結集して、実施されたもので、最終的にTakakura et al.(2019)(8)という形で大きく同分野の知見を前進させた。

今後に向けて

既存の統合評価モデルの役割は気候変動と将来の人間活動の可能性の理解の促進とともに、強い削減目標の策定や社会の温室効果ガス排出削減のアクションへ貢献することが主であった。しかし、今や世界はゼロ排出を公言することが半ば当たり前となり、さらに野心的な政策目標が必要であると訴えることは今後多くないかもしれない。そのうえで今後の取り組みの可能性について述べる。

第一にモデリングをさらに深化させていくことである。現実社会が脱炭素化に動く中で長期シナリオはその具体性、現実性をより強く求められていくはずである。例えば、この1年程度、「水素」という単語を脱炭素の切り札技術として一般メディアで耳にするようになったが、水素の有望性・有効性の評価も当該グループの果たすべき役割の一つと考える。第二にこれまでのモデリングに新しい領域を加えていくことである。気候緩和策を実施していくにあたって懸念される波及効果やそれらに対する対応策等も明らかにしていく必要があるであろう。また、これまで相互作用を考慮してこなかった他分野との融合も考えられる。その一つの大きなテーマは「貧困・格差」である。気候変動とは独立してこの10年程度社会的にも所得格差は大きな注目を集めており、その社会的ニーズを勘案すれば、チャレンジングではあるが取り組む価値の高い分野であろう。その最初の取り組みは炭素税と貧困ギャップの比較というところがスタートしすでに報告した(9)。少し技術的な話ではあるが、異なるモデル間でその相互作用を考慮した時に出てくる新しい知見を見出すというのも重要な方向性の一つかもしれない(10)。これは新しい分野のモデルとの統合や、まだ完全未開発分野を新しく開拓するといったことが考えられ、未知の領域を進み、新しい発見に繋げていく野心的な

研究テーマとなるであろう。

統合評価モデルは物理学、経済学等様々な分野の知識を束ねて作られた学際的かつ社会に役立つことが第一義的な工学的産物そのものである。その使命と成り立ちに向き合いながら、something newを求めて研究活動を続けていきたい。

参考文献

1. S. Fuss *et al.*, Betting on negative emissions. *Nature Clim. Change* **4**, 850-853 (2014).
2. S. Fujimori, T. Hasegawa, T. Masui, K. Takahashi, Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions. *Food Sec.* **6**, 685-699 (2014).
3. T. Hasegawa, S. Fujimori, A. Ito, K. Takahashi, T. Masui, Global land-use allocation model linked to an integrated assessment model. *Science of the Total Environment* **580**, 787-796 (2017).
4. H. Ohashi *et al.*, Biodiversity can benefit from climate stabilization despite adverse side effects of land-based mitigation. *Nature Communications* **10**, 5240 (2019).
5. S. Fujimori *et al.*, Measuring the sustainable development implications of climate change mitigation. *Environmental Research Letters* **15**, 085004 (2020).
6. S. Fujimori *et al.*, A multi-model assessment of food security implications of climate change mitigation. *Nature Sustainability* **2**, 386-396 (2019).
7. T. Hasegawa *et al.*, Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. *Nature Climate Change* **8**, 699-703 (2018).
8. J. y. Takakura *et al.*, Dependence of economic impacts of climate change on anthropogenically directed pathways. *Nature Climate Change* **9**, 737-741 (2019).
9. S. Fujimori, T. Hasegawa, K. Oshiro, An assessment of the potential of using carbon tax revenue to tackle poverty. *Environmental Research Letters* **15**, 114063 (2020).
10. S. Fujimori, K. Oshiro, H. Shiraki, T. Hasegawa, Energy transformation cost for the Japanese mid-century strategy. *Nature Communications* **10**, 4737 (2019).