



経済社会データおよび環境データを用いた 空間評価指標の大規模計算： 地域メッシュ統計の利活用

佐藤 彰洋^{*1} · 榎峠 弘樹^{*2} · Tae-Seok Jang^{*3} · 澤井 秀文^{*4}

Large-Scale Computation of Geographical Evaluation Indicators using Socio-Economic-Environmental Databases: A Use Case of Grid Square Statistics

Aki-Hiro SATO^{*1}, Hiroki ENOKITOHGE^{*2}, Tae-Seok JANG^{*3}, Hidefumi SAWAI^{*4}

Abstract— The risk is evaluated as multiplication among socioeconomic value exposed to risk events, a frequency of risk events and vulnerability (socioeconomic-technological responses), which depends on time and place. We calculate 1-km grid square statistics of physical exposures in about 380,000 grids over Japan for four cases: population in 2010, firms and workers in 2012, and travelers in 2013. The exposed values and the frequencies of risky events are estimated from government statistics data and NOAA Tsunami catalog data by using a statistical inference method. We assumed a generalized Pareto distribution to infer the frequency of tsunami run-up events and estimated its parameters in each 1-km grid square from run-up events close to the grid square. Assuming that the vulnerability is set as 1 (no responses to tsunami run-up events), we estimated physical exposures defined as multiplication between an exposed value and a frequency in each 1-km grid square. We further applied our proposed method to evaluating tsunami risks of 3,916 airports used in international air transportation in 2014.

Keywords— grid square statistics data, a generalized Pareto distribution, Japanese population census, Japanese economic census, Japanese travel survey, tsunami run-up events, physical exposure

1. はじめに

都市の自然災害に対する複合的なリスクがどのようになっているかについて近年注目が集まっている [1, 2]. 特に我が国では、2011年の東日本大震災で沿岸部において津波の甚大な被害が発生したことを受け、過去に発生した国内の津波被害の規模に関する調査や各地方自治体に

おける津波ハザードマップの整備が急速に進められてきた。更に、被害規模などについても古文書や遺構の調査を通じて津波災害について多くの知見が集められているだけでなく、近年観測網が世界的に整備され詳細な津波の波高に関するデータが集められるようになってきている。

アメリカ海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA) は Tsunami Data and Information [3] から紀元前 2100 年から現在に至るまでの津波被害に関するカタログデータを構築し、公開している。

津波は大きく 3 種類の原因から発生している [4]. 1 つ目は海底での地震、2 つ目は火山噴火や地震に伴う大規模な地滑りや山体崩壊、3 つ目は隕石の衝突に伴うもので地球外の要因によるものである。特に、巨大津波の主流な原因は 1 つ目の海底での地震であり、プレート境界付近で発生するプレート型の地震により、大きな被害を発生させる津波が起こる。しかしながら、実際に被害に至る規模の津波発生確率は極めて小さく実際に歴史に残る津波被害の記録は少数である。そのため、歴史に残る

*1 京都大学大学院情報学研究所 京都市左京区吉田本町

*2 Triton Re, 29 Front Street, Hamilton, Bermuda HM11

*3 School of Economics and Trades, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 702-701, Republic of Korea

*4 情報通信研究機構ユニバーサルコミュニケーション研究所

*1 Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshida Honmachi Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

*2 Triton Re, 29 Front Street, Hamilton, Bermuda HM11

*3 School of Economics and Trades, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 702-701, Republic of Korea

*4 National Institute of Information and Communications Technology, Japan

Received: 27 June 2016, Accepted: 29 July 2016.

津波被害から我々の社会システムの構造を決定するにはデータが少ないために現実的ではないという問題が存在する。

近年のコンピュータシミュレーション技術の進歩により、津波を物理モデルから数値シミュレーションにより計算することができるようになってきている [5]。この技術を用いることにより、過去の歴史に残る津波を想定震源上の地震より発生させ、被害の規模を見積もる方法が開発されている。その結果、様々な規模の津波をコンピュータ上でシミュレーションし、巨大地震の被害想定や避難計画に利用できるようになってきた [6]。市町村など地方自治体は各自の津波被害想定マップを作成して防災計画に利用するようになってきている。

しかしながら、どのような場所で津波を発生させる地震がどのような規模で起こるかについては確率的な要素が強いため、震源と地震の規模をどのように設定すれば適切であるかについては議論の余地が依然残っている。

一方、津波災害のみだけでなく、一般に自然災害においては自然災害が発生する規模と頻度のみが重要ではなく、経済社会システムがどのように自然災害の被害を受けるかが重要である。そのため、リスクの推計には自然災害の発生頻度（ハザード）と社会経済システムに蓄積されている社会経済的価値（暴露値）および対策の程度（脆弱性）の積により見積もる方法が一般的である [7]。当然、自然災害の発生頻度と、蓄積されている経済社会的価値、および対策の程度は場所に依存しているため、場所ごとに自然災害のリスクは異なっている。

本研究では、過去に観測された被害に至らない規模での津波波高に対して、適切な確率密度関数を仮定することにより、パラメトリックな方法によりハザードを推計する方法を地域メッシュ上で適用し、津波ハザードの地域メッシュ統計データを作成した。そして、この津波ハザードの地域メッシュ統計データに、経済社会システムに蓄積されている経済社会的価値として4種類の地域メッシュ統計を掛け合わせることで、物理的エクスポージャーの地域メッシュ統計を作成し、日本国内の経済社会的活動に対する津波災害の物理的エクスポージャーを推計した結果について報告する。

2. リスクとは

危険にさらされる社会経済的価値（暴露値） Pop 、災害が発生する頻度（ハザード） Haz 、災害に対する対応状況（脆弱性） Vul ($0 \leq Vul \leq 1$) とすると、リスク R は

$$R = Pop \times Haz \times Vul, \quad (1)$$

として見積もることができる。この時、リスク R の単位は [経済的価値の次元]/[時間] となる。例えば、 Pop を人

口、 Haz の単位を [1/年] とするとリスク R の単位は [人/年] となる。特に、最悪状況 ($Vul = 1$) におけるリスク R のことを物理的エクスポージャーと呼び、以下で定義される [7]:

$$PhExp = Pop \times Haz. \quad (2)$$

このリスクは空間により異なるため、場所の関数としてリスクを拡張してみる。位置 c における危険に晒される経済的価値（暴露値） $Pop(c)$ 、災害が発生する頻度（ハザード） $Haz(c)$ 、災害に対する対応状況（脆弱性） $Vul(c)$ とすると、位置 c におけるリスク $R(c)$ は

$$R(c) = Pop(c) \times Haz(c) \times Vul(c), \quad (3)$$

と書くことができる。同様に位置 c における未対応状況 ($Vul = 1$) におけるリスク（物理的エクスポージャーと呼ぶ）は

$$PhExp(c) = Pop(c) \times Haz(c), \quad (4)$$

と定義される。

3. 地域メッシュ統計 (JIS X0410)

上述の位置 c の表現方法として、緯度と経度を用いた方法が一般的である。緯度と経度は、地球上の空間を一意に表現する方法として大変便利であり、多用されている。しかしながら、位置情報を用いて社会経済システムを表現することは、正確性が高まる半面、一般にプライバシーの問題が顕在化する。そのため、社会経済システムに関するデータを位置情報を用いて表現するよりはむしろ、空間上で定義される格子上で集計して、統計処理を行う秘匿化操作が一般的である。

このような方法を地域メッシュ統計と呼び、我が国では1976年にJIS X0410という形で、日本を正方格子により分割する方法が日本工業規格として標準化され、現在広く利用されるに至っている [8]。このJIS X0410では、緯度と経度から計算される数列により格子を一意に表現する方法を与えている。1辺約1 kmの格子を基準メッシュ（3次メッシュ）と呼び、8桁の数列を用いてこれを表現する。この3次メッシュコードの上位6桁により定義されるコードを2次メッシュコードと呼び、緯度方向と経度方向に、それぞれ10区画の100個の3次メッシュから構成される、1辺約10 kmの正方格子を表現する。更に、上位4桁により定義されるコードを1次メッシュコードと呼び、緯度方向と経度方向に、それぞれ8区画の64個の2次メッシュから構成される、1辺約80 kmの正方格子に対応する。

位置情報（緯度、経度）= (latitude, longitude) が与えら

れている時の3次メッシュコード8桁の計算方法は、

$$\text{grid square code} = puqvrw, \quad (5)$$

と定義される。ここで、整数値 p, u, q, v, r, w は以下で与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} p = \lfloor \text{latitude} \times 60 \div 40 \rfloor \quad (p \text{ is two digits.}) \\ a = (\text{latitude} \times 60 \div 40 - p) \times 40 \\ q = \lfloor a \div 5 \rfloor \quad (q \text{ is one digit.}) \\ b = (a \div 5 - q) \times 5 \\ r = \lfloor b \times 60 \div 30 \rfloor \quad (r \text{ is one digit.}) \\ c = (b \times 60 \div 30 - r) \times 30 \\ u = \lfloor \text{longitude} - 100 \rfloor \quad (u \text{ is two digits.}) \\ f = \text{longitude} - 100 - u \\ v = \lfloor f \times 60 \div 7.5 \rfloor \quad (v \text{ is one digit.}) \\ g = (f \times 60 \div 7.5 - v) \times 7.5 \\ w = \lfloor g \times 60 \div 45 \rfloor \quad (w \text{ is one digit.}) \\ h = (g \times 60 \div 45 - w) \times 45 \end{array} \right.$$

逆に、8桁の3次メッシュコードが与えられている場合、この3次メッシュの南西角の位置情報(緯度, 経度)=(latitude, longitude)は、

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{latitude} = p \times 40 \div 60 + q \times 5 \div 60 + r \times 30 \div 3600 \\ \text{longitude} = 100 + u + v \times 7.5 \div 60 + w \times 45 \div 3600 \end{array} \right.$$

により計算できる。

4. データ

本研究で使用したデータを Table 1 にまとめる。今回の分析には、社会経済的価値として、人口、事業所数、労働者数、旅行者数の4種類を取り上げ、自然災害として津波に着目した。

地形統計データとして、国土地理院の国土数値データから計算された標高傾斜角3次メッシュデータを用いた。このデータには3次メッシュ中の最大標高、最小標高、平均標高、傾斜角が収録された3次メッシュ統計データである。このデータは、国土交通省国土政策局国土情報課ホームページより、オープンデータとして提供されている [9]。

2010年国勢調査3次メッシュデータには、各メッシュ中の人口、男性・女性別の人口および、世帯数が収録されている。2012年経済センサス事業所数3次メッシュデータには、各メッシュ中の事業所数が収録されており、経済センサス労働者数3次メッシュデータには、経済センサス活動調査で得られた従業員数の各メッシュ中の合計が収録されている。これら3次メッシュデータは、総務省統計局が提供するポータルサイト e-Stat からオープンデータとして提供されている [10]。

宿泊旅行統計調査3次メッシュデータは、宿泊旅行統

計調査(国土交通省観光庁 [11]) [12] の個票情報を統計法(総務省)33条の規程に基づき取得し、著者のひとり(佐藤)が独自に作成したものを利用した [13]。この3次メッシュ統計データ中には、1 km 平方中の実宿泊者数、延べ宿泊者数、実外国人宿泊者数、延べ外国人宿泊者数および居住地別宿泊者数(国内は都道府県、海外は国籍)が含まれる [14]。

これらのデータを危険に晒される社会経済的価値として使用し、物理的エクスポージャーの算出に用いた。

過去の津波上陸からハザードの推定を行うために、NOAA Tsunami Data and Information からダウンロードした、過去1000年間分の津波上陸カタログデータ [3] を用いた。

予備的知見を得る目的で、津波上陸のデータを時間と空間でプロットし、津波上陸時点での波高データのデータバリデーションを行った。その結果、NOAA Tsunami Data and Information のカタログデータに誤りであると考えられるデータレコードを発見した。

具体的には1897年8月5日0時10分 HYOGO HIROTA (34.75, 135.35) 波高3.60mと1933年3月2日17時31分 HYOGO HIROTA (34.75, 135.35) 波高19.5mの2レコードである。これらのレコードは、三陸地震に伴う三陸沖での津波の記録と思われるため、兵庫県広田村でこのような津波が観測されたとは考え難い。状況証拠から考えると、これらのレコードは正確には岩手県陸前高田市広田町で観測された津波であると考えられる。これら2レコードについて、著者のひとり(佐藤)がNOAAの担当者に確認を行ったところ、地名認識を誤ってカタログデータ中に記録され、NOAA ホームページより公開されていたことが判明した。これら2レコードは、2015年11月5日に修正され、2016年の本原稿執筆時点でのNOAA津波カタログデータ [3] では、位置情報が訂正されて公開されている。

5. 一般化パレート分布によるハザードの推定

メッシュ c における津波の上陸により、災害が発生するハザード $Haz(c)$ を求める必要があるが、津波の上陸事象は稀頻度事象であるため、そのままでは上陸事象の標本が極めて少ないため、相対頻度により確率を見積もると、ハザード $Haz(c)$ 過小評価してしまうという問題がある。そこで、統計的な推定方法を用いて、ハザードは推定される必要がある [15]。

ここでは、一般化パレート分布を仮定し、被害に至らないような規模の小さな波高の津波上陸事象のデータを用いて、被害に至る規模の波高の津波上陸確率の推計を行う。観測期間 T において、メッシュ c の周辺 D_{th} [km] 近傍に存在する津波上陸カタログデータから、 $M(c)$ 個の

Table 1: 分析に使用したデータ

データ名	データ種類	データソース	収集年
国土数値データ (標高傾斜角)	3次メッシュデータ	国土交通省国土地理院	2010
国勢調査	3次メッシュデータ	総務省統計局	2010
経済センサス事業所数	3次メッシュデータ	総務省統計局	2012
経済センサス労働者数	3次メッシュデータ	総務省統計局	2012
宿泊旅行統計	3次メッシュデータ	国土交通省観光庁	2013年1月から 2014年6月
津波上陸カタログデータ	ポイントデータ	NOAA Tsunami Information Center	過去1000年分

津波イベントを抜き出す。このカタログデータのうち、 $m(c)(M(c) \geq m(c))$ 個のデータに波高の記録が存在しており、この波高を $x_1, \dots, x_{m(c)}$ とする。

このとき、波高 x 以上の津波が観測される確率を一般化パレート分布 (generalized Pareto Distribution) [16]

$$\Pr(X \geq x; \xi, \mu, \beta) = \left(1 + \frac{\xi(x - \mu)}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\xi}}, \quad (6)$$

を用いてモデル化する。ここで、 ξ を形状パラメータ、 β をスケールパラメータ、 μ を位置パラメータと呼ぶ。一般化パレート分布は片側分布であり、 $\xi \rightarrow 0$ において指数分布

$$\Pr(X \geq x; \mu, \beta) = \exp\left(-\frac{x - \mu}{\beta}\right), \quad (7)$$

と一致する。

そして、位置 c における津波被害の発生頻度を

$$Haz(c) = \frac{M(c)}{T} \Pr(X \geq H(c); \hat{\xi}, \hat{\mu}, \hat{\beta}), \quad (8)$$

により近似する。ここで、一般化パレート分布のパラメータの推定値 $(\hat{\xi}, \hat{\mu}, \hat{\beta})$ は、対数尤度を

$$l(\xi, \mu, \beta) = -m(c) \log \beta - \left(\frac{1}{\xi} + 1\right) \sum_{j=1}^{m(c)} \log \left(1 + \frac{\xi(x_j - \mu)}{\beta}\right),$$

とする最尤法または確率重みモーメント法 (PWM) により推定される [16]。また、 $H(c)$ はメッシュ c における最低標高、平均標高、最高標高のいずれかである。これらの標高値は、国土交通省国土政策局国土情報課提供国土数値情報 標高・傾斜角細分 3次メッシュデータから得られる。更に、メッシュ c の近傍 D_{th} [km] における波高 $x_1, \dots, x_{m(c)}$ は、NOAA Tsunami Information センターが公開している過去 1000 年間分の津波カタログデータから抽出した ($T = 1000$ [year])。

以下に計算アルゴリズムを示す。

(1) 津波カタログデータからメッシュ c の近傍 D_{th} [km] の津波上陸データ $M(c)$ 個を抽出し、このうち波高データが存在しているものの波高 $x_1, \dots, x_{m(c)}$ と定義する。

(2) 最尤法と確率重みモーメント法を併用して、メッシュ c での一般化パレート分布のパラメータを $x_1, \dots, x_{m(c)}$ から推定する。一般にデータ数が少ない場合、最尤法によるパラメータ推定がうまく働かないことがある。そのような場合、確率重みモーメント法によるパラメータ推定が有効である。¹

(3) メッシュ c における最低、平均、最高標高のいずれかを、(8) 式の $H(c)$ とし、ハザード $Haz(c)$ を計算する。更に、危険にさらされる経済的価値 $Pop(c)$ と $Haz(c)$ との積をとることにより、メッシュ c における物理的エクスポージャー $PhExp(c)$ を計算する。

(4) (1)-(3) の操作を全てのメッシュ c について行う。

上述の推定では異なるメッシュ c_1 と c_2 における計算に相互依存性は存在していない。そのため、Fig. 1 に示すように、計算対象とする N 個のメッシュを K 個の計算コアにほぼ均等になるように割付け、並列的に計算することにより計算の高速化をはかる。

初期化に関するデータの読み込みなどを除くと、計算プログラムの並列化率はほぼ 100% であるため、計算のスケラビリティも確保できる。本研究では HPCI システム利用研究課題 (統計数理研究所提供) の並列計算資源を用いて、3次メッシュ上でのハザードの推計を、2010 年国土数値データ (国土交通省国土地理院) の標高傾斜角 3次メッシュデータに収録されている、388,254 メッシュに対して行った (このうち、実際にパラメータ

1. R 言語の `evir` パッケージに一般化パレート分布のパラメータ推定関数が含まれている。

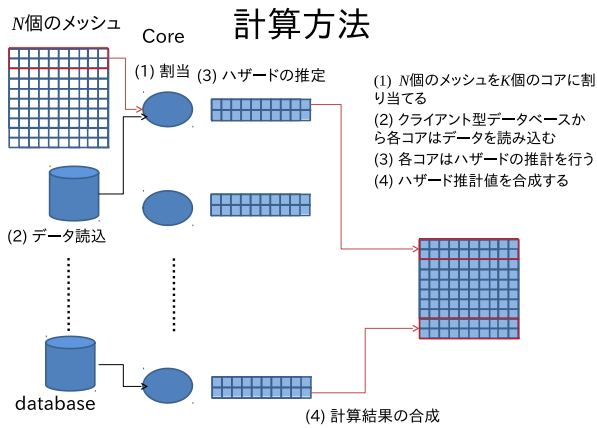


Fig. 1: 並列計算の方法

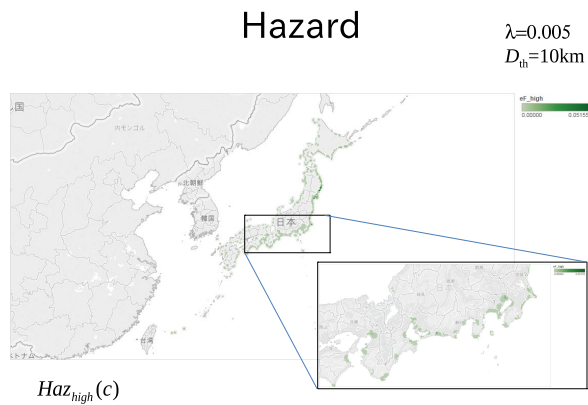


Fig. 2: 一般化パレート分布を用いて推定された、津波ハザードの空間分布. 色の濃さがハザードの大きさに対応している.

推定の計算を行ったのは、最低標高 100m 以下の 134,065 メッシュである).

Fig. 2 は、過去 1000 年間分の津波波高データから計算された津波上陸イベントの頻度である. 太平洋沿岸で津波上陸イベントの頻度が高いことが確認される. 特に、東北地方における津波のハザードは、中部地方や西日本の太平洋沿岸のそれより大きい傾向にある.

6. 物理的エクスポージャーの推計

(4) 式で定義した物理的エクスポージャー $PhExp(c)$ の定義に基づき、津波に対する物理的エクスポージャーを前節で示した津波ハザード $Haz(c)$ と、各種政府統計から計算される地域メッシュ統計データを危険にさらされる社会経済的価値 $Pop(c)$ として、メッシュ c ごとに掛け合わせるにより、各社会経済ディメンジョンに対する物理的エクスポージャーのメッシュ統計を計算する.

ここでは、4 節で述べた以下 4 種類の地域メッシュ統計を $Pop(c)$ とし、それぞれの物理的エクスポージャー $PhExp(c)$ の推計をおこなった.

- 2010 年国勢調査 3 次メッシュデータ (総務省統計局)
- 2012 年経済センサス事業所数 3 次メッシュデータ (総務省統計局)
- 2012 年経済センサス労働者数 3 次メッシュデータ (総務省統計局)
- 2013 年宿泊旅行統計調査 3 次メッシュデータ (国土交通省観光庁)

Fig. 3 から Fig. 6 に、 $H(c)$ として国土数値情報標高傾斜角メッシュ統計の平均標高を用いた場合の、津波ハザード $Haz(c)$ と社会経済的価値 $Pop(c)$ のバブルプロットを示す. ここで、バブルの大きさは物理的エクスポージャーである.

Fig. 3 は、2010 年国勢調査人口を危険にさらされる経済社会的価値として得た、物理的エクスポージャーに対するバブルプロットである. 各メッシュにおける津波ハザードと人口の関係に対して、物理的エクスポージャーをバブルの大きさとして示している. この図から、ハザードが大きな場所の人口は総じて少なく、基本メッシュ中に 5,000 人程度までであることが読み取られる. 一方、ハザードが 0.02 以下の基本メッシュの場所には極端に人口が多いことがわかる. これは、経験的に津波ハザードの大きい地域は、居住目的として利用が避けられる傾向にあることの反映であると考えられる. ハザードが比較的大きく、人口が多い地域では、すでに津波被害の経験が忘却されているため、このような場所で一旦津波被害が発生した場合、大きな経済社会的損失が発生することが危惧される. このような地域においては、脆弱性 (Vul) をできる限り小さくするためのインフラ整備や構造規制が必要である.

Fig. 4 と Fig. 5 は、2012 年経済センサス (総務省統計局) から集計された、従業員数と労働者数を危険に晒される経済社会的価値として得た物理的エクスポージャーのバブルプロットである. Fig. 3 の人口の場合よりも顕著に、ハザードの大きい場所は、商業目的で利用される傾向は少ないことがわかる. しかしながら、若干ではあるが、ハザードが 0.02 から 0.018 の地域に、従業員数と事業所数が多い地域が確認される. このような地域では、居住目的同様に、一旦津波災害が発生すると、大きな経済社会的損失を生ずる可能性がある.

Fig. 6 は、2013 年宿泊旅行統計調査 (国土交通省観光庁) 個票データから作成した 2013 年 1 年間の延べ宿泊者数の 3 次メッシュ統計を、危険に晒される経済的価値としたときの物理的エクスポージャーに関するバブルプロットである. ハザード 0.02 以上で宿泊目的として利用されている場所はほとんどない一方で、0.02 以下のいく

つかの場所について、大きな物理的エクスポージャーが確認される。このような場所では、津波災害が発生する可能性を念頭に入れて、脆弱性の低減対策がとられるべきである。

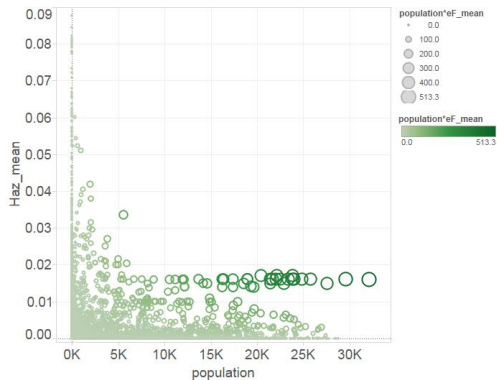


Fig. 3: 2010年国勢調査(総務省統計局)人口3次メッシュ統計を、危険にさらされる経済的価値として計算した場合の津波ハザード(平均標高)と人口との関係。丸の大きさが、物理的エクスポージャーの大きさに対応している。

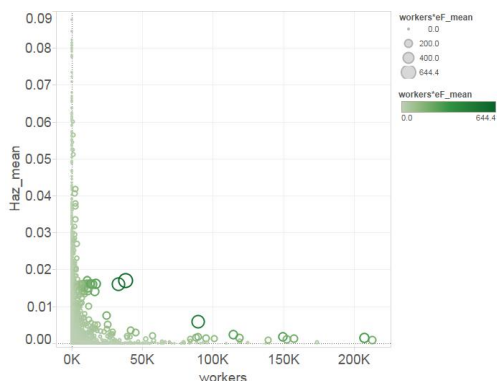


Fig. 4: 2012年経済センサス(総務省統計局)労働者数3次メッシュ統計を、危険にさらされる経済的価値として計算した場合の津波ハザード(平均標高)と労働者数との関係。丸の大きさが、物理的エクスポージャーの大きさに対応している。

7. 世界の空港に対する津波リスクの推計

地球の表面積は、約 510,065,600 平方キロメートルであり、そのうち、約 147,244,000 平方キロメートル(約 28.9%)が陸地である。そのため、本手法をそのまま世界全体に拡張しようとする、約 1 億 5 千万平方キロメートル分のリスク評価を必要とする。これを本研究で取り扱った3次メッシュの解像度で実施しようとする、パラメータ推計を約 1 億 5 千万回行うこととなる。このような計算は日本で行ったハザード推計に対して、約 379 倍の規模となる。このような研究を行うためには、世界全体にわたるデータの整備を、社会経済分野と災害分野に対して同様に進めていく必要がある。

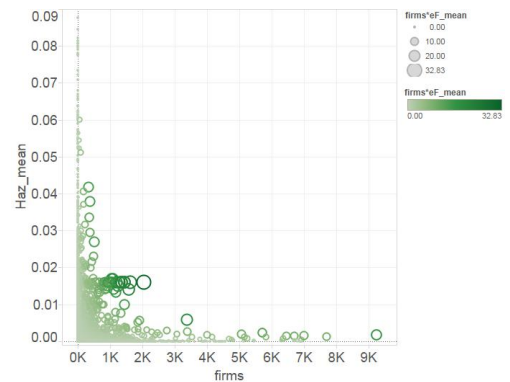


Fig. 5: 2012年経済センサス(総務省統計局)事業所数3次メッシュ統計を、危険にさらされる経済的価値として計算した場合の津波ハザード(平均標高)と事業所数との関係。丸の大きさが、物理的エクスポージャーの大きさに対応している。

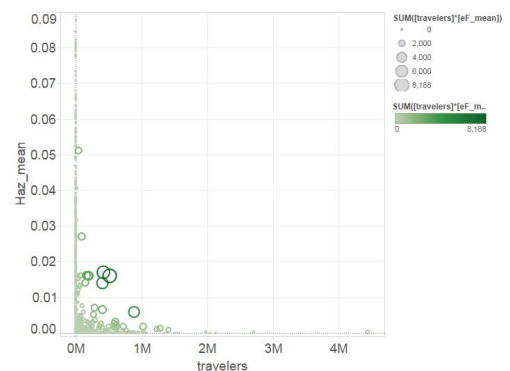


Fig. 6: 2013年宿泊旅行統計調査(国土交通省観光庁)延べ宿泊者数3次メッシュ統計を、危険にさらされる経済的価値として計算した場合の津波ハザード(平均標高)と延べ宿泊者数の関係。丸の大きさが、物理的エクスポージャーの大きさに対応している。

このような世界規模での研究を進める前に、世界の重要施設やインフラストラクチャーに対する個別評価について研究をすすめることは有意義である。ここでは、特に、世界の空港の津波リスク推計に、本提案方法を適用した結果について報告する。

本分析のために、以下 NOAA が提供する津波カタログデータに加え、OAG 社が提供する世界の航空輸送ボリュームデータ [17]、NOAA が提供する世界の1分角標高メッシュデータ (ETOP01) [18]、世界の空港位置のオープンデータ (Ourairports [19] を元に著者らが独自に調査を加え、修正追加を行っている) を用いた。

2014年1年間に OAG 社ボリュームデータで確認された、世界 3,916 箇所の商用定期便で利用されている空港箇所の標高について、津波上陸のハザードの推計を5節で示した方法で行った。各空港の標高は、世界の1分各標高グリッドデータ [18] を用いた。危険に晒される社会経済的価値は各空港の年間離発着座席総数を用いた。

この値は、OAG 社が提供する世界の航空輸送ボリュームデータ [17] から計算した。

空港の津波に対する物理的エクスポージャーの算出結果を、Table 2 に示す。世界的に見て、沿岸部に位置する大型空港において、航空旅客輸送の高い物理的エクスポージャーが確認される。空港によっては、推定分布が経験分布とあまり一致していない場合があることが、 p 値からわかる。ここで、 p 値は、以下 Kolmogrov-Smirnov 検定から得られる：メッシュ c における D_{th} [km] 近傍での波高 $(x_1, \dots, x_{m(c)})$ から、 k を x_i の降順順位とすると、実証累積確率は $P_{m(c)}(x_i) = \frac{k}{m(c)}$ となり、KS 統計量を

$$K_{m(c)} = \sup_{1 \leq i \leq m(c)} \left| \sqrt{m(c)} \left(P_{m(c)}(x_i) - P(x_i) \right) \right|,$$

と定義する。 $P(x)$ は、一般化パレート分布 (6) 式に推定パラメータ $(\xi, \hat{\mu}, \hat{\beta})$ を代入した $P(x) = \Pr(X \geq x; \xi, \hat{\mu}, \hat{\beta})$ である。 p 値は $z = K_{m(c)}$ として、

$$p = \Pr(K \geq z) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} e^{-2n^2 z^2}, \quad (9)$$

により計算される。 p 値が小さいことは、2 分布が一致していないことに対応する。

8. まとめと今後の課題

本研究では、日本国内約 38 万メッシュを対象とした、3 次メッシュレベル (約 1 km 四方) での、津波災害に関する物理的エクスポージャーの算出を行った。NOAA Tsunami Information Center が公開する過去 1000 年間の津波上陸に関するカタログデータと、国土交通省国土政策局国土情報課が提供する国土数値情報標高傾斜角 3 次メッシュデータを用いて、確率分布のパラメータ推計の並列計算を行うことにより、日本国内の津波上陸頻度 (ハザード) に対する 3 次メッシュデータを算出した。そして、この津波ハザードと、総務省統計局国勢調査 2010 年人口 3 次メッシュ統計、総務省統計局経済センサス 2012 年労働者事業所数 3 次メッシュ統計、国土交通省観光庁 2013 年 Q1-Q4、2014 年 Q1-Q2 の宿泊旅行 3 次メッシュ統計を掛け合わせるにより、日本国内の人口、観光活動、経済活動が晒されている津波による物理的エクスポージャーを推計した。

更に、2014 年 1 年間で商業目的に利用された、世界の 3,916 空港の代表的な箇所におけるハザードの推計を同じ方法で行い、空港の年間離発着座席数を危険に晒される経済社会的価値とした場合の、世界の航空輸送に存在する空港の津波被害に対する物理的エクスポージャーの算出を行った。

今後の課題として、大きく次の 4 つの方向性が挙げられる。

(1) 社会経済データの多様化: 社会経済データを充当することにより、今回取り扱った、社会経済的価値以外のインフラストラクチャーや、資産のリスク評価へと拡張する。

(2) 災害リスク事象の多様化: 災害データを充当することにより、津波以外の様々な災害リスク事象の物理的エクスポージャー計算へと拡張する。

(3) 空間的拡大: 世界各国で蓄積されているグリッド統計を用いることにより、世界規模での津波に対する物理的エクスポージャーの算出へと拡張する。

(4) 社会実装: 計算されたリスクマップを現実のフィールドで活用することにより、局所的な津波対策および災害に対する避難想定などの準備を促し、脆弱性を改善することでリスクの低減化に貢献する。

謝辞: 本研究は、日本学術振興会科研費基盤研究 (C) (#25390152) の財政的支援を受けて行われた。また、本研究は HPCI システム利用研究課題 (統計数理研究所提供) の成果によるものです (課題番号:hp140076, hp150106)。

参考文献

- [1] Swiss Re, Mind the risk: A global ranking of cities under threat from natural disasters. http://www.swissre.com/rethinking/climate_and_natural_disaster_risk/Mind_the_risk.html
- [2] Munich Re, Statistics and natural hazard risk for 50 selected megacities. http://www.munichre.com/app_pages/www/@res/pdf/media_relations/press_releases/legacy/pm_2005_01_11_01_en.pdf
- [3] National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS): Global Historical Tsunami Database. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5PN93H7 [18 August 2015]; NOAA Tsunami Data and Information. <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml>
- [4] 首藤伸夫, 今村文彦, 佐竹健治, 越村俊一, 松富英夫 編, 津波の事典, 朝倉書店, 2011.
- [5] N. Pophet, N. Kaewbanjak, J. Asavanant, M. Ioualalen, "High grid resolution and parallelized tsunami simulation with fully nonlinear Boussinesq equations," *Computers & Fluids*, Vol. 40, pp.258–268, 2011. DOI: 10.1016/j.compfluid.2010.09.030.
- [6] Ministry of Land Infrastructure and Transportation and Tourism (MLIT): Guideline for tsunami hazard maps. [Online]. Available: https://www.google.com/url?q=http://www.mlit.go.jp/kowan/hazard_map/3/siryou_1.pdf&sa=U&ved=0ahUKEwiN2-ztyfbLAhUGY6YKhc7YCxMQFggGMAE&client=internal-uds-cse&usg=AFQjCNHWK5thqaCHWGOt rugN75-NLHR8nA

Table 2: 2014 年航空輸送ボリュームデータから計算される津波上陸に対する物理的エクスポージャー（上位 10 位の空港）。

空港名	IATA	経度 (°)	緯度 (°)	標高 (m)	Haz (events/year)	PhExp (seats/year)	p-val
ホノルル国際空港	HNL	-157.921997	21.318701	3.96	0.004988	116,157.39	0.99984
サンフランシスコ国際空港	SFO	-122.375000	37.618999	3.96	0.000401	22,356.06	0.03817
仙台空港	SDJ	140.917007	38.139702	4.57	0.004075	21,147.73	1.00000
ニノイ・アキノ国際空港	MNL	121.019997	14.508600	22.86	0.000382	17,593.35	0.06064
大阪国際空港 (伊丹)	ITM	135.438004	34.785500	15.24	0.000826	16,543.52	0.00008
ホルノ・チャバス国際空港	LIM	-77.114304	-12.021900	34.44	0.000737	14,979.37	0.03881
ヒロ国際空港	ITO	-155.048004	19.721399	11.58	0.007973	12,307.02	0.99999
イブラヒム・ナシル国際空港	MLE	73.529099	4.191830	1.82	0.002178	12,095.98	0.71895
東京国際空港 (羽田)	HND	139.779999	35.552299	10.66	0.000104	10,641.65	0.36715
那覇空港	OKA	127.646004	26.195801	3.65	0.000421	9,802.01	1.00000

[7] P. Peduzzi, H. Dao, C. Herold, and F. Mouton, "Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 9, pp. 1149–1159, 2009.

[8] 総務省統計局 地域メッシュ統計の概要 [10 August 2015]. <http://www.stat.go.jp/data/mesh/gaiyou.htm>

[9] 国土交通省国土政策局国土情報課. <http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudojoho.html>

[10] 地図で見る統計 (統計 GIS). <https://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/toukeiChiri.do?method=init>

[11] 国土交通省観光庁. <http://www.mlit.go.jp/kankocho/>

[12] 宿泊旅行統計調査. <http://www.mlit.go.jp/kankocho/siryou/toukei/shukuhakutoukei.html>

[13] 佐藤彰洋, "政府統計を用いた国内観光状況の網羅的分析", 2015 年度統計関連学会連合大会, 岡山大学, 2015 年 9 月 7 日. <http://www.jfssa.jp/taikai/2015/table/pdf/07pm/10011-02.pdf> [10 July 2016] <http://www.jfssa.jp/taikai/2015/table/pdf/07pm/10011-01.pdf> [10 July 2016].

[14] Aki-Hiro Sato, "Microdata analysis of the accommodation survey in Japanese tourism statistics", *Big Data (Big Data)*, 2015 IEEE International Conference on, Oct. 29 2015-Nov. 1, pp. 2700-2708, 2015.

[15] Aki-Hiro Sato, Hidefumi Sawai, "Geographical Risk Assessment from Tsunami Run-up Events based on Socioeconomic-environmental Data and its Application to Japanese Air Transportation," *Procedia CIRP*, Vol. 19, pp. 27-32, 2014.

[16] Embrechts, P, Klüppelberg, C, Mikosch, T. *Modelling Extremal Events for insurance and finance*. Springer, Berlin, 1997.

[17] OAG. <http://www.oag.com/>

[18] Amante, C. and B.W. Eakins, 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5C8276M. [25 July 2014].

[19] Ourairports. <http://ourairports.com>

佐藤 彰洋



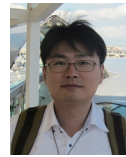
1975 年 1 月 24 日生。2001 年東北大学大学院情報科学研究科修士。2000 年-2001 年 日本学術振興会特別研究員 (DC)。2007 年京都大学大学院情報学研究科助教。2011 年 3 月-9 月ドイツ・キール大学客員研究員 (日本学術新鋭会優秀若手研究者海外派遣に基づく)。2015 年キャノングローバル戦略研究所研究員。2015 年科学技術新興機構さきがけ研究員。現在に至る。博士 (情報科学)。日本統計学会, 情報処理学会, IEEE Computer Society などの正会員。第 4 回横幹連合木村賞 (2015 年) 受賞。

榎 弘樹



1976 年 10 月 12 日生。Triton Re Ltd. Director, CEO and CUO。2000-2006 年三菱商事株式会社。2008-2009 年 あすかアセットマネジメント。京都大学大学院経済学研究科博士後期課程在籍中。2000 年, 京都大学経済学部卒業。2004-2006 年, 東京大学大学院工学系研究科科目等履修生 (MOT コース)。2008 年, 京都大学大学院経営管理教育修了, 経営学修士 (専門職)。日本ファイナンス学会, 日本保険学会, 日本オペレーションズ・リサーチ学会各会員。日本証券アナリスト協会検定会員。

Tae-Seok Jang



1979 年 1 月 29 日生。2012 Ph.D. in Economics, Christian-Albrecht-Universität zu Kiel (CAU), Germany. 2013 Postdoctoral Researcher, Seoul National University. 2014-2015 Lecturer, Korea University, Kyonggi University. 2015-present Assistant Professor of Economics, Kyungpook National University, Daegu, South Korea.

澤井 秀文



1954 年 8 月 23 日生。1982 年 慶応義塾大学大学院工学研究科博士課程単位取得。1983-1995 年 (株) リコーで音声認識等の研究開発。1988-1991 年 ATR 自動翻訳電話研究所出向, 主任研究員。1989-1990 年 米国カーネギーメロン大学客員研究員。1995 年郵政省通信総合研究所入所。1999-2010 年 神戸大学大学院連携教授。現在, 情報通信研究機構ユニバーサルコミュニケーション研究所所属。工学博士。人工知能学会・情報処理学会正会員。IEEE Senior Member。