

日本国内における津波リスクの空間計量と 国内空港の物理的エクスポージャー

佐藤 彰洋 *

京都大学 大学院情報学研究科 数理工学専攻

澤井 秀文

情報通信研究機構

概要

本研究では社会経済環境データベースに基づく空間リスクの計量方法を提案する。津波被害に関する日本の物理的エクスポージャーを総務省統計局が提供する 1km 人口メッシュデータ、国土交通省国土政策局が提供する国土数値情報、およびアメリカ海洋大気庁 (NOAA) が公開している過去 1000 年分の津波データから算出した。実データから抽出した日本国内線旅客航空ネットワークとこの空間リスク計量結果とを結合することにより、国内航空機ネットワークの物理的エクスポージャーを日本国内 58 の空港について算出した。

キーワード：1km 人口メッシュデータ, 1km 国土数値情報標高・傾斜度メッシュデータ, 津波カタログデータ, 物理的エクスポージャー, 空港, 日本国内線旅客航空機ネットワーク

This study proposes a method to measure geographical risk based on socio-economic-environmental data. The physical exposure of Japan in terms of tsunami run-up events is computed based 1km grid square statistics on population census of Japanese Statistics Bureau, 1km grid square on national land numerical information downloaded from Japanese National and Regional Policy Bureau, and tsunami run-up catalog data downloaded from NOAA Tsunami Data and Information. The Japanese domestic air transportation is further extracted as a network consisting of airports and flights. Using an exposed value as a sum of passenger seats of flights landing at and taking off from each airport, we compute physical exposures of Japanese 58 airports in terms of tsunami run-up events by using the proposed procedure.

keyword: 1km grid square statistics of Japanese population census, 1km grid square statistics of Japanese landscape, tsunami run-up catalog data, physical exposure, airports, Japanese domestic flights

1 背景

物理的観点から社会や経済の様々な分野に対してデータに基づき研究を行える環境が整いつつある [1, 2].

本研究ではデータに基づき空間リスクを定量的に計測する方法として物理的エクスポージャーに着目し、自然災害データおよび日本国内の 1km 人口メッシュデータと標高傾斜角 3 次メッシュデータ (1km) とを結合することにより物理的エクスポージャーの空間分布の推計をおこなった。更に、実際の日本国内旅客機ネットワークに基づく国内 58 空港の物理的エクスポージャーの推計に同じ

* 〒 606-8501, 京都市左京区吉田本町, TEL:075-753-5515, FAX:075-753-4919, E-mail:aki@i.kyoto-u.ac.jp

方法を適用した。図 1 は旅客機運行に支障を来す出来事とその影響期間についてまとめたものである。この中で津波によるものは長期間の空港閉鎖を伴う自然災害である。2011 年 3 月 11 日の東日本大震災で仙台空港が被災したときには、その後最初の旅客機の離発着がおこなえるまで約 1ヶ月の期間を要した。

表 1: 旅客機運行に支障を来す出来事とその影響期間

原因	出来事	閉鎖期間
自然災害	津波	長期間の空港閉鎖
自然災害	地震	中期間の空港閉鎖
自然災害	火山噴火	中期間の空港閉鎖
自然災害	洪水	中長期間の空港閉鎖
自然災害	台風	短期間の空港閉鎖
自然災害	大雪	短期間の空港閉鎖
人災	ストライキ	短期間の空港閉鎖
事故	停電	短期間の空港閉鎖

本報告では自然災害として特に空港閉鎖期間が長期化する津波被害に着目し、過去 1000 年分の記録に関するカタログデータを用いて津波の被害に関係する物理的エクスポージャーについて調べる。本研究では、データリンケージと呼ばれる異なる目的で収集されたデータを相互に結合する方法を積極的に用いる。データリンケージを用いると単独でデータを利用するよりもより多くの情報を得ることができると知られている [3]。本研究では、位置情報を用いることにより異なるデータの結合をおこなう。

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の直後に起った津波の被害は戦後では最大の被害規模であり、自然災害による被害の大きさを思い知らされる結果となった。日本国内においてどの場所において災害リスクが高いかを理解することができるとすると、その箇所において減災にむけた努力がどの程度必要であるかを定量化して把握することが可能と思われる。また、東日本大震災では仙台空港が大きな被害を受けたが、国内の他空港についても同様の自然災害リスクについて見積もりをしておく必要がある。ここでは、日本国内空港の物理的エクスポージャーについて調べる。

2 リスク指標

2.1 災害リスク指標

ミュンヘン再保険会社 (Munich Re) は都市災害リスク指標として Hazard(危険性の可能性), Vulnerability(脆弱性), Exposed values(危険に晒される経済価値) の積としてリスク指標を提案した [4]。

Hazard とは地震、台風、水害、その他の自然災害が発生する危険性をあらわし、Vulnerability は住宅構造特性、住宅密度、都市の安全性対策の水準を、Exposed values は経済的社会的影響規模に関連する指標であり各都市の家計、経済水準等に基づいて計算される。ミュンヘン再保険会社は地震、火山噴火、台風、竜巻、落雷、洪水、津波、高潮を考慮し世界の 50 の巨大都市 (人口 100 万人以上) についてリスク指標を計算している。その値の幾つかを Table 2 に示す。リスク指標の値の中で東京は特出して大きな値を示している。

表 2: ミュンヘン再保険会社による巨大都市の災害リスク指標の一部抜粋.

都市	国	人口 (2003)	リスク指標
Tokyo	Japan	36.2M	710.0
New York	USA	22.8M	42.0
Seoul, Incheon	South Korea	24.7M	15.0
Mexico City	Mexico	20.6M	19.0
São Paulo	Brazil	20.0M	2.5
Mumbai	India	22.6M	5.1
Los Angeles	USA	17.6M	100.0

2.2 物理的エクスポージャー

ミュンヘン再保険会社の災害リスク指標同様に一般に災害リスクには乗算性の仮定が存在している。例えば災害における人的被害を考えるとリスク R は

$$R = F \times Vul \times Pop \quad (1)$$

として計算される。ここで、 R は人的被害の期待値 [killed person/year] でありミュンヘン再保険会社のリスク指標に対応する。 F は災害頻度 [event/year] であり危険の可能性 (Hazard) を表現している。 Vul は脆弱性 (Vulnerability) に対応し 0 から 1 の間の値を取る因子である。 Pop は考察する災害に影響を受ける人口 [person/event] であり、危険に晒される経済価値 (Exposed values) に対応する。特に、災害頻度 F と考慮する災害イベントに影響を受ける人口 Pop の積

$$PhExp = F \times Pop \quad (2)$$

は物理的エクスポージャー (Physical Exposure) と呼ばれ最悪状況 ($Vul = 1$) における損害の期待値を表現する [5]。一般には、 n 種類の災害イベント種別に対して、1 年間当りの災害イベント i の発生頻度 [event/year] を F_i 、その災害イベントに影響を受ける人口を Pop_i [person/event] として、物理的エクスポージャー $PhExp$ は

$$PhExp = \sum_{i=1}^n F_i \times Pop_i \quad (3)$$

と定義される。人的被害 Pop_i を経済価値や社会価値などに置き換えてリスクを計ることに用いることも可能である。

物理的エクスポージャーが高くても構造に工夫を加えたり事前に対策を行うことで脆弱性 Vul を 0 に近づけ、リスク R を減じることが可能である。しかしながら、潜在的リスクは場所に依存してそれぞれ異なるため、どの場所に対して重点的に対策を講じればよいかを事前に特定する必要がある。これは潜在的な被害の可能性を定量化できる物理的エクスポージャー $PhExp$ を空間的に求めることにより可能である。以下物理的エクスポージャーに注目して分析を行なう。

3 日本国内の人口メッシュデータの特徴

2011 年 (平成 23 年度) 国土地理院基盤地図情報数値標高モデル 10m メッシュをもとに計算された 1km メッシュ国土数値情報 (標高・傾斜度 3 次メッシュデータ) [6] と 2010 年 (平成 22 年度) 国政

表 3: 日本における標高 5m 以下と標高 1m 以下のメッシュに住む人口およびその面積.

最大標高 5m 以下に住む人口	11,773,732 人	9.19%
平均標高 5m 以下に住む人口	19,079,531 人	14.89%
最小標高 5m 以下に住む人口	38,325,305 人	29.9%
最大標高 1m 以下に住む人口	1,377,835 人	1.07%
平均標高 1m 以下に住む人口	3,448,267 人	2.69%
最小標高 1m 以下に住む人口	14,024,601 人	10.95%
最大標高 5m 以下の面積	4,240 km ²	1.12%
平均標高 5m 以下の面積	8,287 km ²	2.19%
最小標高 5m 以下の面積	29,313 km ²	7.75%
最大標高 1m 以下の面積	204 km ²	0.053%
平均標高 1m 以下の面積	999 km ²	0.26%
最小標高 1m 以下の面積	17,452 km ²	4.61%

調査男女別人口総数及び世帯総数 (1km メッシュ) [7] とを連結した標高と人口に関する 1km メッシュデータを構築した. 1km メッシュデータとは日本列島を 1km 四方の正方形メッシュに区切りメッシュの代表緯度経度とそのメッシュの属性データをまとめたデータである.

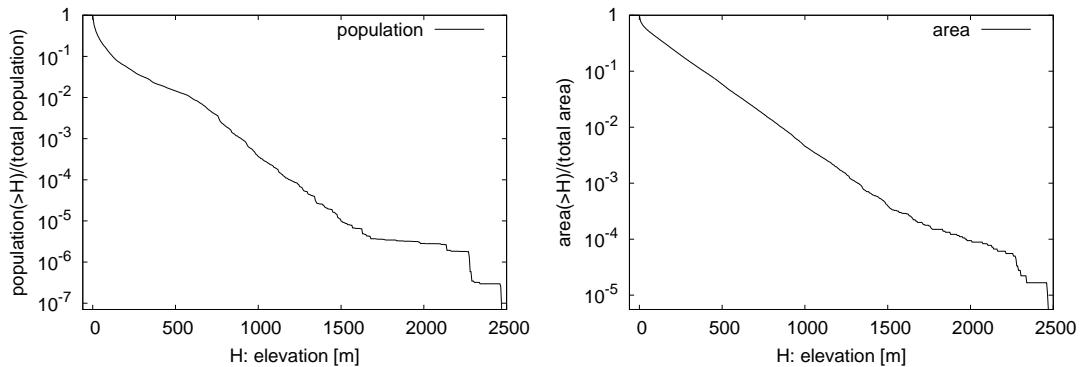


図 1: (上) 最低標高 H [m] 以上のメッシュに暮す人口の全人口に対する割合, (下) 最低標高 H [m] 以上の面積の全可住地面積に対する割合.

この国政調査メッシュデータからの計算値によると, 2010 年時点における日本国民総人口は 128,057,346 人である. 1 人以上が居住している面積は 180,218km² であるので日本の国土面積の約 47.6%(日本の国土面積は 378,000km² とする) に人が居住している計算となる. Fig. 1 に最低標高 H [m] 以上のメッシュ人口割合と面積割合を示す. 人口は標高 100m 上昇するごとに約 0.525 倍, 可住地面積は標高 100m 上昇するごとに約 0.631 倍となる.

1km メッシュ国土数値情報内の最大標高, 平均標高, 最小標高と人口を用いて標高 1m, 5m 以下に住む人口とその面積を計算した結果を Table 3 に示す. 津波の被害を受ける恐れがある標高の低い平均標高 5m 以下のメッシュに住む人口はおおよそ 1900 万人であり, 8,287 km²(2.19%) の面積が該当する. 特に津波の被害をうけやすい平均標高 1m 以下のメッシュに住む人口はおおよそ 344 万人であり 999 km² (0.26%) が該当する. この数値は名古屋大学減災研究センター脇田久美子技術補佐員と福和伸夫教授の分析結果とほぼ一致する [8].

しかしながら, この推計は被害を被る可能性のある標高に住む人口のみを見積っており, 現時点ではメッシュ r における危険に晒される経済価値 $Pop(r)$ を推計したにとどまっている. 実際の被害はメッシュ r における津波の発生頻度 $F(r)$ を考慮した物理的エクスポージャー $PhExp(r)$ により見積もられるべきである. これを得るためには, 津波の被害がどの地点において起りやすいかを津波上陸に関するカタログデータを用いて推計する必要がある.

4 津波カタログデータ

津波カタログデータとしてアメリカ海洋大気局 (NOAA) が提供する Tsunami Data Information より過去 1000 年間分の津波上陸データをダウンロードして用いた [9]. Fig. 2 はデータ内に記録が存在する津波上陸記録の位置と規模を図示したものである. 津波の発生は地震の多い環太平洋地域およびインド洋東海岸に集中していることが理解できる. さらに, 地中海や北米においても津波被害の記録が存在している.

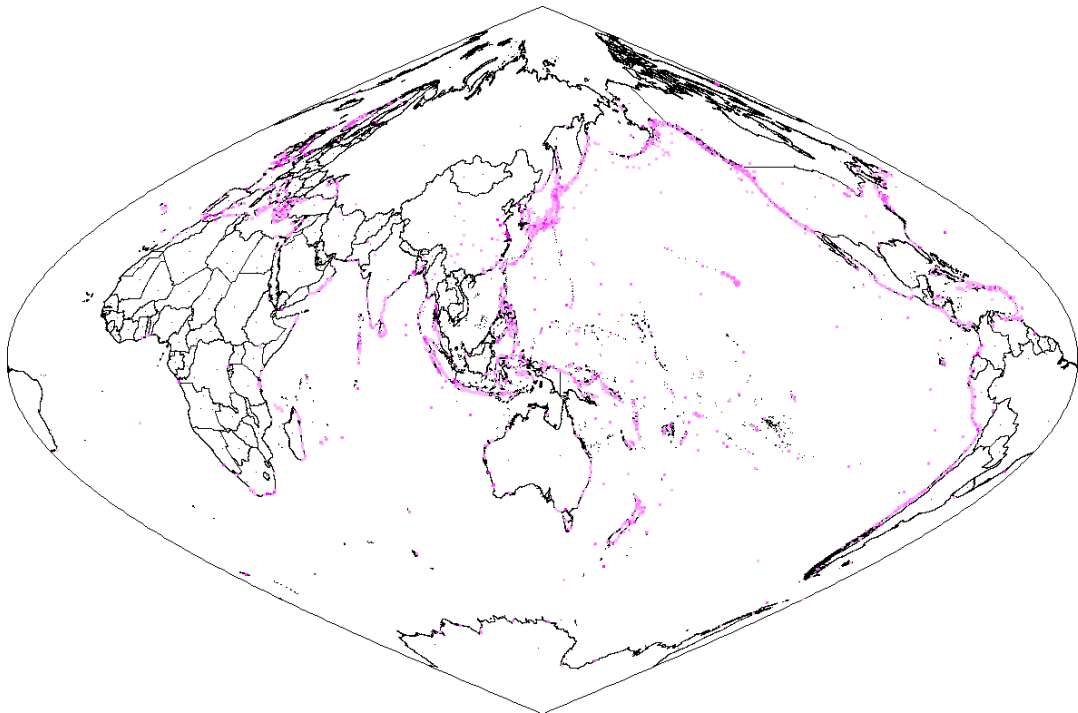


図 2: 過去 1000 年間の津波上陸記録の存在する位置と規模. 色の濃いほうが津波の規模 (高さ) が大きいことを意味する.

5 空間リスクの計算

ある着目メッシュ r とカタログデータ上に記録されているイベント e との大圏距離は世界測地系 (WGS-84) を用いて緯度経度から計算を行った. WGS-84 は地球を赤道半径 ($a=6378.137\text{km}$), 極半径 ($b=6356.752314245\text{km}$) の楕円球体とみなして 2 点間の最短距離を求める計算方式である. 津波上陸頻度 $F(r)$ は注目メッシュ r の D_{th} 近傍にメッシュ平均標高以上の高さの津波上陸記録 e が

存在する場合あるいは標高 5m 以下でかつ 10 名以上の死者が記録されている場合にイベントの発生があるとみなし計算した。

津波被害に関するデータは稀少頻度事象であるため、長期間のデータを用いたとしてもこれまで観測されたことのない事象に対して相対頻度では確率 0 となる問題がある。このことを回避するためには、データに当てはまりのよい適当な確率分布を仮定し、この外挿をおこなうことができれば、データに含まれない規模の事象についてもその発生確率を推計することが可能である。

津波被害の推計には一般化パレート分布 (Generalized Pareto Distribution)

$$\Pr(X \geq x; \xi, \mu, \beta) = \left(1 + \frac{\xi(x - \mu)}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\xi}} \quad (4)$$

仮定した。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 $\xi = 0$ において指数分布

$$\Pr(X \geq x; \mu, \beta) = \exp\left(-\frac{x - \mu}{\beta}\right) \quad (5)$$

と一致する。

津波高さ x と発生頻度に対して注目点近傍における津波の観測データを用いて一般化パレート分布の母数推定を行った。ある閾値 λ 以上の標本データ $x_i (i = 1, \dots, n)$ に対して一般化パレート分布のパラメータ (ξ, β, μ) を確率重みモーメント法 (PWM) により推定し、標本データの分布の推定をおこなう超過法 (Exceedance method) と呼ばれる方法を用いる。

注目点 c の D_{th} [km] 圏内の津波規模 (水位) に関するデータ $x_i (i = 1, \dots, n)$ とする。このデータからパラメータ推定値 $\hat{\xi}, \hat{\mu}, \hat{\beta}$ が得られたとすると、標高 H において津波の被害が発生する確率は

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

として与えられる。これより、位置 c において D_{th} 圏内で確認される津波被害の総データ数を N 、観測期間を T とし、標高を $H(c)$ とすると津波が発生する頻度 (Hazard) $F(c)$ は

$$F(c) = \frac{N}{T} \Pr(X \geq H(c); \hat{\xi}, \hat{\mu}, \hat{\beta}) \quad (7)$$

により計算される。

この方法により各メッシュごとに物理的エクスポージャーの計算を行った。Fig. 3 は物理的エクスポージャーの累積確率を示している。人が暮す国土面積の 85.99%(154,985 km²) において物理的エクスポージャーは 0.001 人/km²/年以下と見積もられる。日本国内において 1 人/km²/年以上の物理的エクスポージャーを有する地域は人が暮す国土面積の 6.52%(11,759.95km²)、10 人/km²/年以上の物理的エクスポージャーを有する地域は 1.98%(3,582.013 km²)、100 人/km²/年以上の地域は 0.12%(216.08km²) である (Table 4 参照)。Fig. 4 に物理的エクスポージャーが 10 人/km²/年以上の地点を示す。2011 年 3 月 11 日の東日本大震災において津波の大きな被害を受けた地域と重なりが大きい他、東海南海地震の被害想定地域との重なりが多い。

6 日本国内空港の物理的エクスポージャー

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災において仙台空港が津波の大きな被害を受け復旧に長期間を要したことは記憶に新しいが、実際日本国内空港の物理的エクスポージャーはそれぞれどのよう

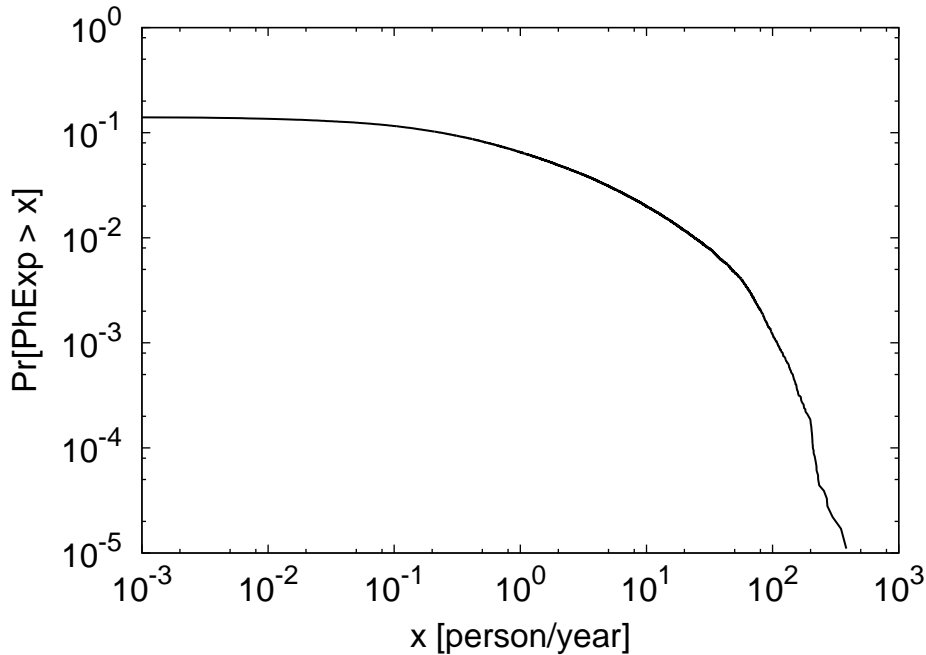


図 3: 西暦 1000 年 1 月から 2010 年 12 月までの津波上陸記録と 2010 年国政調査に基づく人口メッシュデータおよび国土地理院基盤地図情報数値標高モデルをもとに計算された日本国内の物理的エクスポージャーの値の相補累積確率。

表 4: 日本国内における物理的エクスポージャー階級ごとの可住地域面積

階級	割合	面積
1 人/年以上	6.52%	11,759.95km ²
10 人/年以上	1.98%	3,582.013 km ²
100 人/年以上	0.12%	216.08km ²

な値となっているのであろうか？ これら商用空港の物理的エクスポージャーを上記で導入した方法を適用し推計する。まず、空港 a の津波被害により影響を受ける経済的価値は、年間離着陸座席総数と仮定する。ここで空港 a における 1 日間での着陸座席総数 $d_{in}(a)$ [seats/day], 1 日間での離陸座席総数 d_{out} [seats/day] とする。このとき空港 a の 1 年間における離着陸座席総数は $Pop(a) = (d_{in}(a) + d_{out}(a)) \times 365$ [seats/year] により見積もられる。

Fig. 5 は日本国内線が離着陸する 58 空港と経路を示している (2013 年 10 月 14 日 1 日間のフライト情報に基づく)。羽田 (60), 新千歳 (8), 伊丹 (42), 福岡 (20), 中部 (28) などのハブ空港がはっきりと見てとれる。離着陸座席数の多い上位 10 位までの主要空港の 1 日間の離陸数 (離陸座席数) と着陸数 (着陸座席数) とを Table 5 に示す。羽田空港の離発着座席数が国内で最大であり 1 日約 7 万 1 千座席がそれぞれ離陸と着陸している。次いで伊丹空港の約 1 万 7 千座席 2 番目の規模である。

この $Pop(a)$ の値を危険に晒される経済価値とみなし、国内の商用 58 空港の物理的エクスポージャーを計算した。物理的エクスポージャーが 0 でない空港上位 8 位 ($D_{th} = 15$ km) を Table 6 に示す。羽田空港の物理的エクスポージャーが最大であり 9164.38 [seats/year] の値を示す。次に伊丹空港が 4584.37 [seats/year] となり 2 番目に大きな値である。仙台空港は 4362.64 [seats/year] と 3 番目に大きな値を示している。

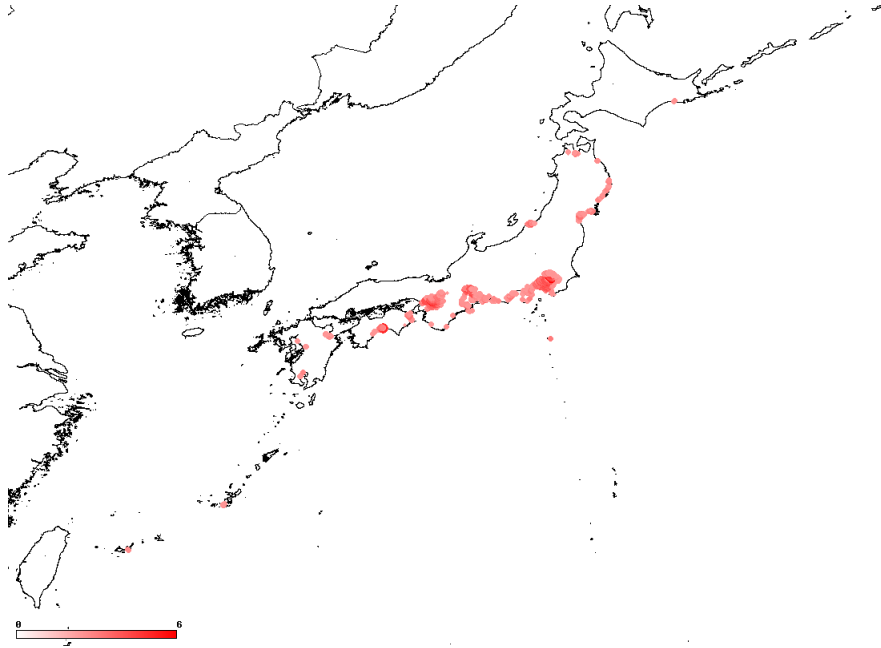


図 4: 物理的エクスポージャーが 10 人/km²/年以上の地点.

表 5: 2013 年 10 月 14 日に主要空港を離着陸した旅客機の総数と離着陸乗客座席数 (コードシェア便を同一フライトとして算出).

空港	離陸便数	着陸便数	離陸座席数	着陸座席数
羽田	338	341	70,806	71,119
伊丹	137	136	16,817	16,952
福岡	111	99	13,586	15,626
新千歳	107	97	12,808	14,211
那覇	97	92	16,449	17,561
中部	57	62	7,924	7,348
仙台	52	53	5,398	5,420
成田	31	50	7,115	4,456
関空	44	43	7,511	7,092
長崎	34	34	4,905	4,620

表 6: 物理的エクスポージャーが 0 でない空港とその値 ($D_{th} = 15\text{km}$).

空港名	IATA	緯度	経度	標高 [m]	$Pop(a)$	$F(a)$ [events/year]	$PhExp(a)$
羽田	HND	139.779999	35.552299	10.668000	57,883,890	0.0001583236	9164.38
伊丹	ITM	135.438004	34.785500	15.240000	13,645,160	0.0003359707	4584.37
仙台	SDJ	140.917007	38.139702	4.572000	4,787,340	0.0009112885	4362.64
那覇	OKA	127.646004	26.195801	3.657600	14,017,095	0.0003048544	4273.17
中部	NGO	136.804993	34.858398	4.572000	8,081,465	0.0003543369	2863.56
高知	KCZ	133.669006	33.546101	12.801600	2,290,010	0.0003247618	743.70
佐賀	HSG	130.302002	33.149700	1.828800	451,870	0.0010000000	451.87
石垣	ISG	124.186996	24.344500	28.346400	2,295,485	0.0001341381	307.91

表 7: 物理的エクスポージャーが 0 でない空港とその値 ($D_{th} = 30\text{km}$).

空港名	IATA	緯度	経度	標高 [m]	$Pop(a)$	$F(a)$ [events/year]	$PhExp(a)$
羽田	HND	139.779999	35.552299	10.668000	57,883,890	0.0002987614	17293.47
仙台	SDJ	140.917007	38.139702	4.572000	4,787,340	0.0016413346	7857.62
那覇	OKA	127.646004	26.195801	3.657600	14,017,095	0.0003760572	5271.22
伊丹	ITM	135.438004	34.785500	15.240000	13,645,160	0.0002441710	3331.75
中部	NGO	136.804993	34.858398	4.572000	8,081,465	0.0003727465	3012.33
神戸	UKB	135.223999	34.632801	6.705600	3,101,770	0.0007039043	2183.34
高知	KCZ	133.669006	33.546101	12.801600	2,290,010	0.0007434572	1702.52
佐賀	HSG	130.302002	33.149700	1.828800	451,870	0.0019866044	897.68

$D_{th} = 30\text{km}$ の場合を Table 7 に示す. 物理的エクスポージャーの値はパラメータの値 D_{th} に依存している. この場合も羽田空港の物理的エクスポージャーが最大であり 17293.47 となる. 次に仙台空港 7857.62 である. D_{th} により頻度 $F(a)$ が変化することにより物理的エクスポージャーに若干の変化が見られる.

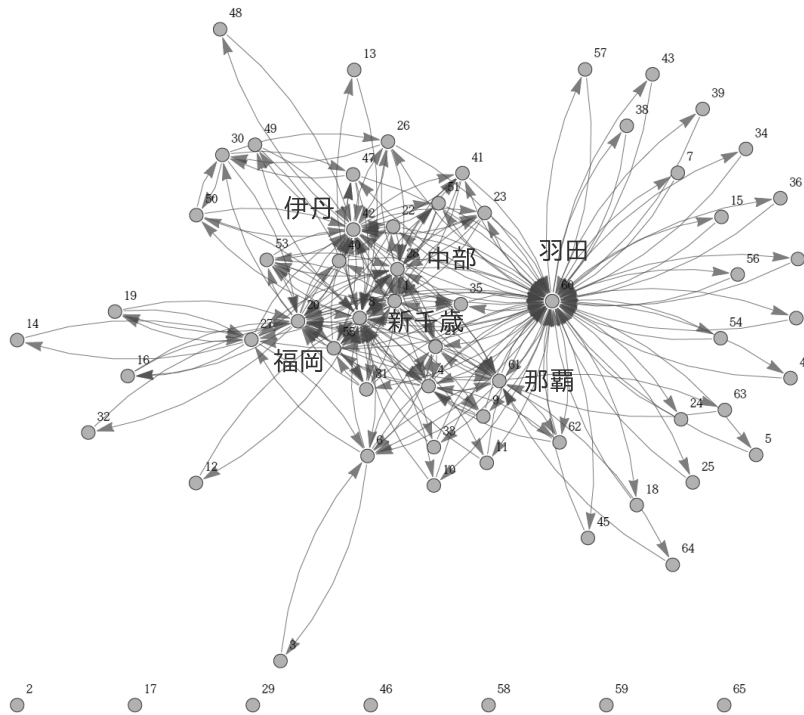


図 5: (上)2013 年 10 月 14 日 1 日間での国内線の離発着のネットワーク構造. 58 空港発着の 2025 フライトに基づく.

7 まとめと今後の課題

津波カタログデータと 1km メッシュ国土数値情報, 1km 国政調査人口メッシュデータを用いることにより日本国内の津波による空間リスクの推計を行う方法を提案した. 提案手法により 1km メッシュ上の物理的エクスポージャーの推計を行った. 計算結果は西暦 1000 年 1 月 1 日から 2010 年 12 月 31 日までのデータを用いたところ図らずも東日本大震災で甚大被害を受けた地域と重なっ

ていた。更に、日本国内線のネットワークの抽出を行い国内航空機網に対する各空港の物理的エクスポージャーの推計を行う方法を提案した。提案手法により航空機ネットワークにおける空港の物理的エクスポージャーを算出した。今後の課題として各種空港の経済価値を空港周辺人口から割り出す方法の確立および世界規模での空港リスクの評価への展開が挙げられる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究 (C) 「経済社会データおよび環境データを用いた次世代航空機ネットワーク構造の最適化」 (#25390152) の財政的支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] システム/制御/情報, Vol. 56, No. 10 「経済・社会物理学の展開-経済・社会システムのネットワーク構造と機能」特集号
- [2] システム/制御/情報, Vol. 57, No.3 「データ中心科学の発展」特集号
- [3] 椿広計, 討論:統計的データリンケージの可能性と方法, <http://www.nii.ac.jp/userimg/workshop/h21/4-5.pdf>
- [4] 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
- [5] 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., 9, 1149-1159 (2009)
- [6] 国土交通省国土政策局国土情報課 国土数値情報標高・傾斜度 3次メッシュデータ <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G04-a.html>
- [7] 総務省統計局政府統計の総合窓口 (e-Stat) 地図で見る統計 (統計 GIS) <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/toukeiChiri.do?method=init>
- [8] 2200万人、津波リスク大 標高もとに名古屋大学調査 2013年3月2日 朝日新聞 DIGITAL <http://www.asahi.com/national/update/0302/TKY201303020197.html>
- [9] NOAA Tsunami Data and Information <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml>