

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1301

January 2025

港湾地域強震観測網から得られる速度PSI値を用いた 港湾単位での係留施設の被害有無の概略判定手法

宮田正史・菅原法城・野津 厚・長坂陽介・小濱英司
大矢陽介・福永勇介・竹信正寛・秋山吉寛

A Method for Estimating the Presence or Absence of Seismic Damage
of Mooring Facilities in Ports by Using Velocity-PSI Values
Obtained from Strong-Motion Seismic Observations

MIYATA Masafumi, SUGAHARA Noriki, NOZU Atsushi
NAGASAKA Yosuke, KOHAMA Eiji, OHYA Yousuke
FUKUNAGA Yusuke, TAKENOBU Masahiro, AKIYAMA Yoshihiro B

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

港湾地域強震観測網から得られる速度PSI値を用いた 港湾単位での係留施設の被害有無の概略判定手法

宮田正史¹⁾・菅原法城²⁾・野津 厚³⁾・長坂陽介⁴⁾
小濱英司⁵⁾・大矢陽介⁶⁾・福永勇介⁷⁾・竹信正寛⁸⁾・秋山吉寛⁹⁾

要 旨

本研究では、港湾地域強震観測網で得られる各港湾での地震波形（地表面）から計算される速度PSI値により、当該港湾での係留施設の被害有無を概略判定する方法を提案した。「被害有り」の定義は観測点の位置する港湾内で一箇所でも被害がある場合とし、1962年～2024年1月1日（令和6年能登半島地震）までの観測データによる速度PSI値と当該港湾での被害の有無をデータ化し、概略判定手法を検討した。

概略判定手法として、1)速度PSI値を段階的に区分し、区分毎に想定される係留施設の被害有無や被害程度の説明を付した現場技術者向けの判定表と、2)速度PSI値を指標とした、港湾単位での係留施設の被害有無の可能性を表現する地震フラジリティ曲線である。本手法を、能登半島地震における港湾の被害有無の判定に適用した結果、一定の適用性が確認された。

キーワード：強震観測網，速度PSI値，係留施設，地震被害推定，地震フラジリティ曲線

-
- 1) 研究総務官
 - 2) 港湾空港技術研究所 インフラDX研究領域 ビッグデータ研究グループ 主任研究官
 - 3) 港湾空港技術研究所 特別研究主幹（地盤・構造研究担当）
 - 4) 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震動研究グループ 主任研究官
 - 5) 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震防災研究領域 領域長
 - 6) 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 耐震構造研究グループ グループ長
 - 7) 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震動研究グループ グループ長
 - 8) 港湾・沿岸海洋研究部 港湾施設研究室 室長
 - 9) 港湾・沿岸海洋研究部 主任研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail: ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

A Method for Estimating the Presence or Absence of Seismic Damage of Mooring Facilities in Ports by Using Velocity-PSI Values Obtained from Strong-Motion Seismic Observations

**MIYATA Masafumi¹⁾, SUGAHARA Noriki²⁾, NOZU Atsushi³⁾
NAGASAKA Yosuke⁴⁾, KOHAMA Eiji⁵⁾, OHYA Yousuke⁶⁾
FUKUNAGA Yusuke⁷⁾, TAKENOBU Masahiro⁸⁾ and AKIYAMA Yoshihiro B.⁹⁾**

Synopsis

In this study, we propose a method for estimating the presence or absence of damage to mooring facilities in a port area by using velocity-PSI values calculated from seismic waveforms (on the ground surface) at each port, which are obtained from Strong Motion Earthquake Observation in Japanese Ports. "Damaged" is defined as the case where at least one facility was damaged in the port where the observation point is located. The estimation method consists of 1) a table for on-site engineers that classifies the velocity-PSI values in stages and explains the presence or absence of damage to mooring facilities and the degree of damage assumed for each classification, and 2) an earthquake fragility curve that expresses the possibility of damage to mooring facilities in each port by using the velocity-PSI values as an indicator. This method was applied to an evaluation of damage in the 2024 Noto Peninsula Earthquake, and a certain degree of applicability was confirmed.

Key Words: Strong-motion earthquake observation, Velocity-PSI value, Mooring facility, Earthquake-damage estimation, Seismic fragility curve

-
- 1) Executive Director for Research Affairs,
National Institute for Land, Infrastructure and Management (NILIM)
 - 2) Senior Researcher, Big Data Technology Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering
Department, Port and Airport Research Institute (PARI)
 - 3) Senior Director for Research, PARI
 - 4) Senior Researcher, Engineering Seismology Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering
Department, PARI
 - 5) Principal Researcher, Earthquake Disaster Prevention Engineering Department, PARI
 - 6) Head of Earthquake and Structural Dynamics Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering
Department, PARI
 - 7) Head of Engineering Seismology Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Department,
PARI
 - 8) Head of Port Facilities Division, Port, Coastal and Marine Department, NILIM
 - 9) Senior Researcher, Port, Coastal and Marine Department, NILIM

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265

e-mail: ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. データ整理方法	1
2.1 速度PSI値	1
2.2 データ整理方法の概要	1
2.3 港湾単位での被害有無及び被害程度の整理方法	2
3. 速度PSI値に基づく港湾単位での係留施設の被害有無の推定手法	3
3.1 データ整理の結果概要	3
3.2 港湾単位での被害有無の簡易推定手法	4
3.3 港湾単位での被害発生確率を評価する地震 fragility 曲線	7
3.4 令和6年能登半島地震での事例検証	9
4. おわりに	10
謝辞	10
参考文献	10
付録A 速度PSI値に関する補足説明	13
付録B 「対象データの抽出方法」と「速度PSI値の算出で利用する速度波形の計算方法」	15
付録C 解析対象の全データ（一覧表）	17
付録D ハミルトニアン・モンテカルロ法の概要とパラメータのサンプリング結果	19
付録E 最尤法およびランダムウォークメトロポリス・ヘイスティングス法（モンテカルロ法） によるパラメータ推定の計算方法・計算結果	23
付録F ROC曲線およびAUCによる地震 fragility 曲線 (FC) の性能評価，およびカットオフ値 の設定による予測の正確さの向上に関する基礎的情報と計算方法	32

1. はじめに

南海トラフ地震など、多数の港湾で同時に甚大な被害をもたらすような大規模地震が発生した場合、港湾防災部局は現地からの被害報告がほとんどない中で、被害調査の優先順位、航路啓開・緊急物資輸送ルート、利用可能な係留施設群を想定しつつ、初動体制や対応方針を短時間で判断する必要がある。しかしながら、地震が夜間に発生した場合や、余震や津波により港湾に近づけない場合、地震直後の現地被害情報の入手は困難である。

本研究では、上述した判断の材料の一つとして、港湾地域強震観測網¹⁾で得られる各港湾での地震波形(地表面)から計算される速度のPSI値²⁾(以下、速度PSI値と呼称。)に着目し、この数値の大小を目安として当該港湾での係留施設の被害有無を概略判定する方法の提案を目的とした。概略判定の方法として、1)速度PSI値を段階的に区分し、区分毎に想定される係留施設の被害有無や被害程度の説明を付した現場技術者向けの判定表と、2)速度PSI値を指標とした、港湾単位での係留施設の被害有無の可能性を表現する地震フラジリティ曲線(以下、FCと呼称。)を対象とした。なお、各観測点の速度PSI値は地震発生後に自動計算され、その結果は国土交通省や地方整備局等の港湾防災部局の職員あてメールにて配信されている³⁾。

なお、本資料は、著者らによる既発表論文⁴⁾の内容に若干の加筆・補足をしてまとめたものである。既発表論文では紙面の都合上のために掲載できなかった詳細情報等について、主に付録として添付した。

2. データ整理方法

2.1 速度 PSI 値

本研究で地震動指標として用いる速度PSI値(単位: $\text{cm/s}^{0.5}$)は、式(1)で表される量であり、地震波形の速度を二乗し、時間で積分した値の平方根として定義される²⁾。

$$\text{PSI}[v(t)] := \sqrt{\int_0^{\infty} (v(t))^2 dt} \quad (1)$$

ここで、 $v(t)$ は地震による地表面や観測位置における速度(cm/s)、 t は時間(s)である。本指標は、有限要素法による非線形地震応答解析を行った既往研究²⁾において、重力式岸壁の天端残留水平変位とPSI値の相関が良好であることが確認されている。また、その他既往研究(例えば、文献5)～9))においても、港湾施設の被害程度を説明する際の地震動指標として利用されている。

なお、速度PSI値の物理的解釈について、付録Aに補足説明を付したので、参考にされたい。

2.2 データ整理方法の概要

(1) 港湾地域強震観測網

港湾地域強震観測網(以下、強震観測網と称す。)は、1962年から始まる港湾地域を中心とした地震観測網である¹⁾。図-1に観測を実施している港湾の位置図を示す。2024年1月現在、166台の強震計が69港に設置されている。設置位置の内訳は、86台が地表に、60台が地中に、20台が構造物上に設置されている。これら強震計の主な設置位置は、港湾内に位置する国土交通省等の港湾空港整備事務所の敷地内であり、観測点と被害推定の対象である係留施設との距離が比較的近い(数km程度であることが多い)ことが特徴である。なお、防災科学技術研究所が運営する観測網¹⁰⁾であるK-NET(全国強震観測網:1000箇所程度)・KiK-net(基盤強震観測網:700箇所程度)では、地盤条件が相対的に良好な内陸部にほとんどの観測点が位置している。

強震観測網で観測された全ての地震記録は、Web上に掲載されるとともに、年報としても定期的に整理され、刊行されている(例えば、文献11))。次に、データ整理の方法を示す。

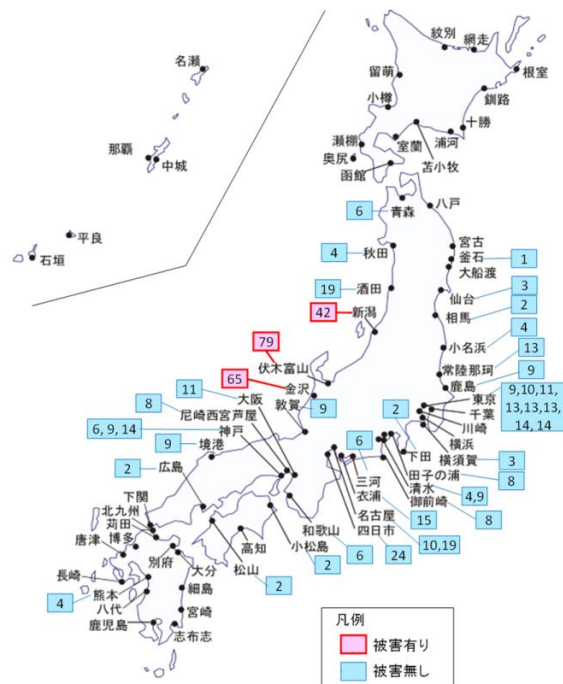


図-1 港湾地域強震観測網と令和6年能登半島地震で得られた地表面における速度PSI値($\text{cm/s}^{0.5}$)

(2) データ整理方法の概要

データ整理方法の概要を図-2に示す。以下、本図に示す手順に沿ってデータ整理の方法を説明する。なお、「対象データの抽出方法」と「速度PSI値の算出で利用する速度波形の計算方法」の詳細については、付録Bにまとめている。

始めに、1962年～2024年1月1日（令和6年能登半島地震）までに強震観測網の各港湾の地表面で観測された地震波形（南北、東西方向のいずれかの水平加速度が100Gal以上）を抽出（全264データ）し、それらの地震波形を用いて算出した速度PSI値（南北、東西方向で大きい方の値）を各港湾の速度PSI値とした。なお、速度PSI値とともに気象庁により発表される震度階級¹²⁾の設定根拠となる計測震度（相当値）も算出した（表-1）。ここで、計測震度（相当値）とは、港湾地域強震観測網のデータを用いて算出した計測震度のことを指すが、以下本資料では、単に計測震度と呼称する。

次に、当該港湾での係留施設（小規模な係留施設である物揚場を含む。また、類似する構造として、護岸を含む。以下、係留施設と称す。）の地震被害の有無を既存文献から読み取るなど（詳細は後述）、港湾単位での無被害・被害有りの記録を二値化（0, 1）したデータセット（無被害：222データ、被害：42データ）を作成した。港湾内で一施設でも被害を受けている場合、「被害有り」と判定した。

2.3 港湾単位での被害有無及び被害程度の整理方法

港湾単位での被害有無の判定は、2.(2)b)で抽出した全データに対して、観測した港湾内で、先述した係留施設に分類する施設が一箇所でも被災している場合を「被害有り」と判定した。判定は、過去の地震による港湾施設全体の災害復旧事業費の経年データ^{13),14)}と、港湾施設の地震被害に関する過去の文献を用いて、該当港湾内で地震によって係留施設に何らかの被害が発生している場合を、「被害有り」と判定した。なお、地震後に津波が来襲した港湾もあるが、上述した文献の文章から地震による被害であるか、津波のみによる被害であるかを判別した。ただし、過去の文献で明瞭ではない場合については、実際に現地被害調査を行った一部著者からの情報に基づき判定した。

表-2には、「被害有り」の要因となった地震の名称、当該地震による港湾施設の災害復旧事業費（複数の港湾における合計値）及び根拠文献を示す。この表より、「被害有り」の港湾における被害程度の大きさは、復旧事業費の大小を一つの目安にすることができる。ただし、こ

こに示す復旧事業費は、外郭施設（防波堤、護岸等）、係留施設、臨港道路など、港湾の様々な施設を含んでおり、係留施設のみの事業費ではないことには注意が必要である。

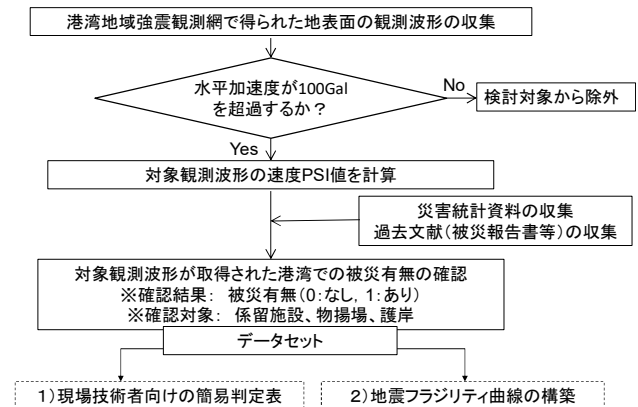


図-2 データ整理方法の概要

表-1 震度階級と計測震度の対応表（気象庁）¹²⁾

震度階級	計測震度	震度階級	計測震度
0	0.5未満	5弱	4.5以上5.0未満
1	0.5以上1.5未満	5強	5.0以上5.5未満
2	1.5以上2.5未満	6弱	5.5以上6.0未満
3	2.5以上3.5未満	6強	6.0以上6.5未満
4	3.5以上4.5未満	7	6.5以上

表-2 「被害有り」に対応する地震名・災害復旧事業費

地震名	マグニ チュード	港湾施設の (億円)根拠文献		被害内容の 根拠文献
1968年十勝沖地震	7.9	23	(13)	(15)
1973年根室沖地震	7.4	1	(13)	(16)
1978年宮城県沖地震	7.4	2	(13)	(17)
1982年浦河沖地震	7.1	0	(13)	(18)
1983年日本海中部地震	7.7	14	(13)	(19)
1993年釧路沖地震	7.5	113	(14)	(20)
1994年北海道南西沖地震	7.8	134	(14)	(21)
1994年北海道東方沖地震	8.2	140	(14)	(22)
1994年三陸はるか沖地震	7.6	18	(14)	(23)
1995年兵庫県南部地震	7.3	4001	(14)	(24)
2000年鳥取県西部地震	7.3	41	(14)	(25)
2001年茨予地震	6.7	11	(14)	(26)
2003年十勝沖地震	8.0	75	(14)	(27)
2011年東北地方太平洋沖地震	9.0	2585	(14)	(28), (29), (30)
2016年熊本地震	7.3	11	(14)	(31)
2018年北海道胆振東部地震	6.7	33	(14)	(32)
2021年福島県沖地震	7.3	11	(14)	(33), (34)
2022年福島県沖地震	7.4	79	(14)	(33), (34)
2024年能登半島地震	7.6	761*	(37)	(35), (36)

* 2024.10.31現在(新潟県、富山県、石川県の合計)

3 速度 PSI 値に基づく港湾単位での係留施設の被害有無の推定手法

3.1 データ整理の結果概要

(1) 速度 PSI 値の有用性および震度との比較

速度 PSI 値が 10 以上のデータを一覧表として表-3 に示す（付録 C には、全データの一覧表を示す）。また、図-3 に、各データの速度 PSI 値と計測震度との関係性を、被害有無の結果を明示しつつ散布図として示す。

これらの結果より、無被害となる条件を俯瞰すると、速度 PSI 値が 10 程度未満では被害は発生していないことが分かる。震度階級の場合は、震度 3 以下では被害事例は一切存在せず、震度 4（計測震度：3.5 以上 4.5 未満）において 1 事例が認められる。国土交通省が管理するインフラ施

設では震度 4 以上の場合に緊急点検を実施する機会が多いが、係留施設に限っては速度 PSI 値 10 以上での点検実施が合理的な対応となると考えられる（震度 4 以上での機械的な臨時点検の実施は、空振りとなる可能性が高い）。

図-4 に、速度 PSI 値及び計測震度を指標とした無被害及び被害の発生数の累積相対度数分布を示す。速度 PSI 値を指標とした場合、10～80 程度にかけて被害事例が増加し、50 以上では災害復旧事業費（表-2）及び表-3 と照らし合わせると、多くの事例で甚大な被害が発生していることが分かる。一方、速度 PSI 値 50 以上で 3 事例が無被害となっているが、いずれも 2011 年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）時の、震源から比較的距離が離れた港湾（東京港 2 箇所、千葉港）での事例となっている。これは、同地震はマグニチュード 9.0 の巨大地震であり、

表-3 データセットの事例（速度 PSI 値が 10 以上の事例。桃色：被災あり、水色：被災なし）

（速度 PSI 値が 25 以上のデータ）

（速度 PSI 値が 10 以上、25 未満のデータ）

地震名	観測地点	追加データ			
		水平最大 加速度 (Gal)	水平最大 速度 PSI 値 (cm・s ⁻¹ /2)	計測震度 相当値	港湾単位での被災有無。 1:あり 2:対象外
1968年十勝沖地震	青森-S	207.7	110.7	5.4	1
2000年鳥取県西部地震	境港-G	299.7	108.0	5.6	1
1995年兵庫県南部地震	尼崎-G	472.0	101.5	5.7	1
1995年兵庫県南部地震	神戸事-S	502.0	98.8	5.8	1
1995年兵庫県南部地震	神戸港島-D	341.2	97.3	5.9	1
1993年釧路沖地震	釧路-G	469.3	82.9	5.7	1
2011年東北地方太平洋沖地震	小名浜事-G	1430.0	79.0	5.7	1
2024年能登半島地震	富山-O	147.2	78.2	5.0	1
1983年日本海中部地震	青森-S	115.8	75.5	0.0	1
1993年北海道南西沖地震	函館-F	119.4	75.1	4.9	1
1993年北海道南西沖地震	函館-M	149.3	74.2	5.1	1
2011年東北地方太平洋沖地震	大井-U	113.0	72.0	4.9	0
1995年兵庫県南部地震	大阪事-S	191.2	68.6	5.3	1
2003年十勝沖地震	釧路-G	574.8	68.6	5.6	1
	鹿島造園-U	287.2	64.7	5.3	1
2024年能登半島地震	金沢-C	251.3	64.5	5.0	1
1983年日本海中部地震	秋田-S	205.4	60.7	5.2	1
2011年東北地方太平洋沖地震	千葉-G	125.1	58.6	4.8	0
1994年三陸はるか沖地震	八戸事-S	517.8	55.4	5.8	1
2003年十勝沖地震	浦河-G	209.2	55.3	5.2	1
1978年宮城県沖地震	塩釜工場-S	272.8	54.6	5.6	1
2011年東北地方太平洋沖地震	品川-U	207.9	54.5	5.0	0
	相馬-O	683.3	53.8	5.8	1
1968年十勝沖地震	八戸-S	232.7	52.2	5.3	1
1994年三陸はるか沖地震	青森-G	142.2	50.3	5.2	1
2016年熊本地震	別府-U	290.2	45.7	5.4	1
2011年東北地方太平洋沖地震	八戸-G	185.4	42.1	4.8	0
	仙台-O	249.4	41.9	5.4	1
2024年能登半島地震	新潟-U	144.4	41.3	4.8	1
1994年北海道東方沖地震	花咲-F	380.3	41.1	5.4	1
2001年雲予地震	松山-G	261.5	39.7	5.3	0
1994年北海道東方沖地震	釧路-G	268.5	39.3	5.2	1
2003年十勝沖地震	十勝-G	461.3	39.1	5.3	1
	細島-S	242.3	37.5	5.3	0
	釧路-S	166.0	36.5	5.2	1
2011年東北地方太平洋沖地震	仙台-G	623.7	33.2	5.3	1
	相馬-O	486.7	31.7	5.4	1
	仙台-O	328.7	30.5	5.4	1
2001年雲予地震	広島-G	235.7	30.0	4.9	1
2018年北海道胆振東部地震	苫小牧-U	349.6	28.4	4.8	1
1968年十勝沖地震	室蘭-S	204.6	26.4	4.9	1
1984年日向灘地震	細島-S	267.7	26.1	5.2	0
	苫小牧-S	161.2	25.8	4.7	0
1993年北海道南西沖地震	室蘭-G	217.3	25.5	4.8	0

地震名	観測地点	追加データ			
		水平最大 加速度 (Gal)	水平最大 速度 PSI 値 (cm・s ⁻¹ /2)	計測震度 相当値	港湾単位での被災有無。 1:あり 2:対象外
2011年東北地方太平洋沖地震	大船渡防地-G	244.8	24.4	4.7	1
2011年東北地方太平洋沖地震	釜石-G	357.5	23.9	4.8	1
	別府-U	108.8	23.3	4.7	0
1995年兵庫県南部地震	和歌山-G	157.0	23.2	4.6	0
	清水日の出-U	186.7	22.4	4.8	0
1993年釧路沖地震	浦河-S	173.5	21.8	4.8	1
2007年能登半島地震	金沢-G	158.8	20.6	4.2	0
	御前崎-G	501.5	20.6	5.3	0
1993年釧路沖地震	十勝-M	410.6	20.4	5.2	1
	小名浜事-O	153.5	19.9	4.8	0
1987年千葉県東方沖地震	千葉-S	170.9	19.0	4.8	0
	塩釜工場-S	126.4	16.8	4.7	0
	常陸那珂-U	126.2	16.7	4.1	0
	八戸-G	399.9	16.3	5.0	0
	清水工場-S	106.8	16.1	4.5	0
1982年浦河沖地震	室蘭-S	163.7	16.0	4.8	1
	清水-G	107.4	16.0	4.4	0
	相馬-G	321.0	15.8	4.8	0
	川崎-F	164.2	15.1	4.9	0
1994年北海道東方沖地震	十勝-M	169.4	14.9	4.6	0
	西宮-G	121.4	14.6	4.7	0
	浦河-U	117.3	14.5	4.5	0
	八戸-G	116.9	14.2	4.4	0
	大阪事-G	180.7	14.1	4.6	0
	小名浜事-O	152.7	14.0	4.4	0
	八戸事-S	189.0	13.7	4.8	0
2018年北海道胆振東部地震	室蘭-U	197.3	13.7	4.8	0
1987年千葉県東方沖地震	山下-F	130.7	13.3	4.4	0
1978年宮城県沖地震	大船渡防地-S	161.2	13.1	4.6	1
1968年十勝沖地震	宮古-S	112.3	13.0	4.2	1
	宮古-G	414.2	12.9	5.0	0
	釧路-G	112.8	12.9	4.4	0
	細島-S	121.6	12.8	4.5	0
	釜石-G	340.6	12.6	4.6	0
	釧路-G	334.4	12.6	4.6	0
	鹿島造園-U	145.8	12.5	4.6	0
	常陸那珂-U	111.6	12.4	4.0	0
1993年釧路沖地震	室蘭-G	139.5	12.2	4.5	0
1987年千葉県東方沖地震	山下家-M	140.2	12.1	4.4	0
	大阪南-G	143.1	12.1	4.4	0
1987年千葉県東方沖地震	品川-S	114.3	12.0	4.6	0
	仙台-O	145.7	11.9	4.7	0
	細島-C	171.2	11.8	4.8	0
	鹿島造園-U	115.4	11.6	4.2	0
	室蘭-S	155.3	11.3	4.5	0
	三河-G	177.2	10.8	4.7	0
	宮古-G	303.5	10.8	4.8	0
	仙台-O	129.3	10.8	4.6	0
	田子の浦-S	113.9	10.6	0.0	0
	宮崎-G	104.5	10.5	4.3	0
	宮崎-G	140.3	10.4	4.4	0
1993年釧路沖地震	花咲-F	163.3	10.3	4.3	0
	大船渡防地-G	342.3	10.3	4.7	0
	松山-C	122.5	10.3	4.4	0
	小名浜事-O	159.4	10.3	4.4	0
2001年雲予地震	大分-G	104.7	10.3	4.1	0

遠方の港湾でも長周期・長継続時間の地震動が観測されており、速度 PSI 値の定義（式(1)）上、係留施設に被害を及ぼさないものの、大きな数値が計算されるためであると考えられる。この点については今後の検討課題である。ただし、表-2 に示すとおり、今回の対象地震のマグニチュードは 2011 年東北地方太平洋沖地震以外では、6.7～8.2 であり、その範囲では速度 PSI 値による被害有無の推定精度は高いものと考えられる。

以上のことから、速度 PSI 値 50 以上では「被害有り」となる可能性が極めて高いと考えられる。さらに、速度 PSI 値が 10 から 50 の範囲を見ると、25 未満までは無被害の事例が多く、被害事例は限定的であることがわかる。25 以上では、無被害の事例は減り、被害事例が支配的になることが分かる。

同様に、震度階級および計測震度を指標とした場合についてみると、震度 4 では計測震度 4.2 の一例のみで被害があり、それ以降の震度 5 弱・震度 5 強・震度 6 弱（計測震度としては 4.5 以上 6.0 未満）の範囲で被害が増加し、震度 6 強・震度 7 となった事例は皆無であることがわかる。ここで、1995 年兵庫県南部地震で港湾施設に甚大な被害をもたらした神戸港の計測震度を見ると、高々 5.8（震度 6 弱）にとどまっており、計測震度または震度階級は港湾施設の被害の大きさに対応しておらず、港湾施設の被害の大きさを表現しづらい指標である可能性がある。このことは、文献 38) で指摘されているとおり、「計測震度は加速度の対数表示なので、非常に小さい地震動から大きい地震動までを感覚的に捕まえやすい数値に表現するという意味では良い指標である。しかし、例えば加速度が 2 倍になっても計測震度の変化はわずかに 0.6 であり、精度評価に用いる指標としては感度が低いし、・・・（以下省略）」という計測震度の特徴とも関係していると考えられる。

以上のことから、今回のデータ整理の結果からは、速度 PSI 値の方が計測震度または震度階級に比して、係留施設の被害有無をより良く表現しているまでとは言えないものの、速度 PSI 値は係留施設の水平残留変位に大きく影響する継続時間の長短を直接考慮できるなどの特徴があり、被害程度が大きい場合には、被害の甚大さを表現するには優位である可能性が高い。なお、本研究は速度 PSI 値による被害有無を概略判定する方法の提案が主題であるため、計測震度などのその他の地震動指標による判定方法についてはこれ以上踏み込まないが、今後検討すべき課題である。

3.2 港湾単位での被害有無の簡易推定手法

(1) 判定表

3.1 の結果より、定性的な検討に基づく結果ではあるが、気象庁の震度階級の説明を模して、速度 PSI 値を指標とした港湾単位での係留施設の被害有無・被害程度に関する現場技術者向けの判定表を作成した（表-4）。以下、本判定表のユーザー向けに、速度 PSI 値区分ごとに説明を加える。

速度 PSI 値が 10 未満の場合、過去データから係留施設に被害を与えるような事例は皆無であるため、「無被災である可能性が極めて高い」との表現とした。最終的には、施設所有者の判断によるが、この区分の場合は地震後の緊急臨時点検は不要であると考えられる。

速度 PSI 値が 10 以上～25 未満の場合、ほとんどの事例で無被害である可能性が高いものの、軽微な被害が発生している事例も認められるため、「軽微な被害又は無被災

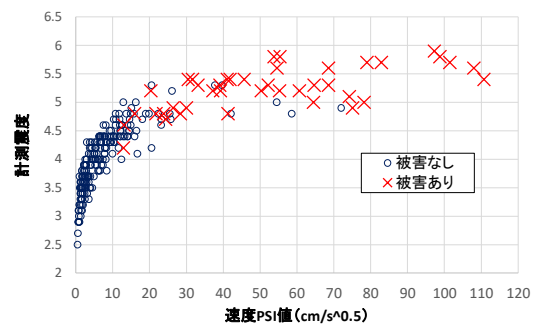
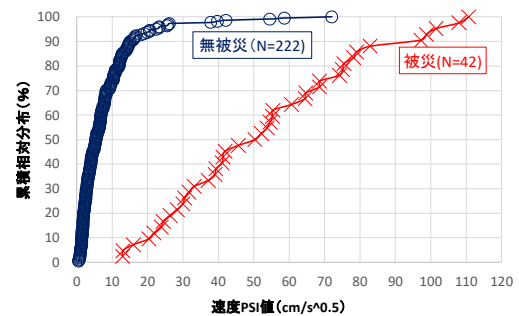
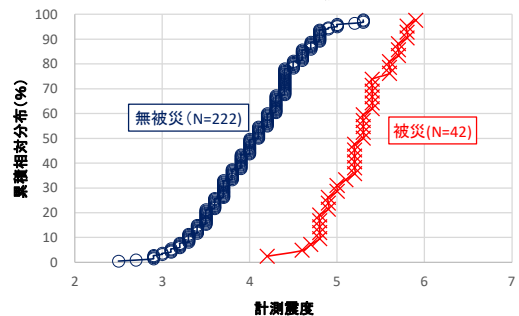


図-3 被害有無と計測震度・PSI 値との関係



(a) 速度 PSI 値



(b) 計測震度

図-4 「無被災港湾」と「被災港湾」の累積相対度数分布

災である可能性が高い」との表現とした。この区分の場合、地震発生が夜間であれば翌朝まで待ってから臨時点検を開始したり、速度 PSI 値が大きい他の港湾の臨時点検を優先するなど、周辺の状況を見極めた上での対応が適切であると考えられる。

速度 PSI 値が 25 以上～50 未満の場合、何らかの被害が発生している可能性が高い。ただし、被害程度は相当な被害が発生している事例から無被害の事例まで様々である。このため、判定表では安全側の対応がなされるように「相当な被害が発生している可能性が高い。」としつつも「ただし、被害が軽微である場合もある。」と付記することとした。この区分の場合、速やかに緊急臨時点検を実施することが適切であると考えられる。

速度 PSI 値が 50 以上の場合、一部事例（(1)で示した 3 事例）では無被害の場合も見受けられるものの、係留施設に甚大な被害が発生している可能性が高い。このため、判定表では「甚大な被害が発生している可能性が高い。」と表現した。この区分の場合も、速やかに緊急臨時点検を実施することが適切であると考えられる。

(2) 被害が発生する地表面PSI値と耐震設計との関係性

本項では、今回の研究で対象とした地表面での速度PSI値（地表面で観測された地震波形から算出）と耐震設計との関係性について若干の考察を加える。具体的には、係留施設の被害発生が始まる地表面PSI値の範囲（10～40程度）と耐震設計のレベル1地震動で想定される地表面PSI値の範囲を、簡単な仮定に基づき比較した。

まず、文献(39)より引用した、全国港湾のレベル1地震動（工学的基盤で与えられる）の速度PSI値の度数分布を図-5に示す。また、それらのレベル1地震動から標準的な重力式岸壁の設計条件のもと、耐震設計に利用する照査用震度を算定した結果を図-6に示す。

図-5より、レベル1地震動の速度PSI値の全国平均は24程度であり、10～30程度であることが多い。ここで、工学的基盤より上方の地盤の増幅によって工学的基盤での速度PSI値が地表面で1～1.5倍程度（この数値の設定理由は後述する。）になると仮定した場合、現行の耐震設計に基づく係留施設（液状化対策が実施されることを前提）であれば、地表面PSI値が10～45程度までは設計上は被災しないことになる。このことは、観測記録から算定した地表面PSI値が10～40程度で係留施設の被害が発生し始めることと整合している。さらに、図-6からは、工学的基盤における速度PSI値が10～30程度の場合、耐震設計上必要となるレベル1地震動に対する照査用震度は0.1から0.25程度であり、実際の耐震設計で設定される震度の範囲

表-4 速度 PSI 値を利用した港湾単位での係留施設を対象とした被害有無・被害程度の判定表

地表面の速度 PSI値(cm/s ^{0.5})	係留施設の 被害有無・被害程度	過去の代表的な被害事例
50 以上	甚大な被害が発生している可能性が高い。	●1995年兵庫県南部地震 【神戸港 (PSI=99)】 ●1983年日本海中部地震 【秋田港 (PSI=61)】
25 以上 ～50 未満	相当程度の被害が発生している可能性が高い。 ただし、被害が軽微である場合もある。	●2016年熊本地震 【別府港 (PSI値=46)】 ●2021年福島県沖地震 【相馬港 (PSI値=32)】
10 以上 ～25 未満	軽微な被害又は無被災である可能性が高い。	●2011年東日本大震災 【釜石港 (PSI値=24)】 ●1993年釧路沖地震 【十勝港 (PSI値=21)】
10 未満	無被災である可能性が極めて高い。	

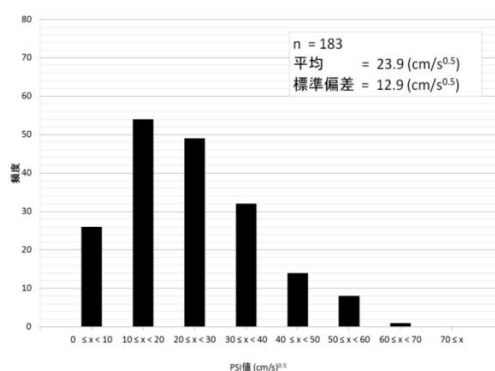
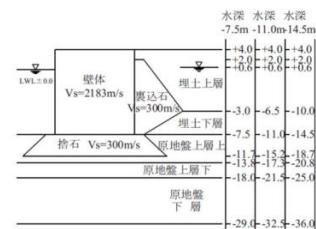


図-5 全国港湾のレベル1地震動（工学的基盤 2E 波）の速度 PSI 値の度数分布³⁹⁾



（解析対象とした重力式岸壁）

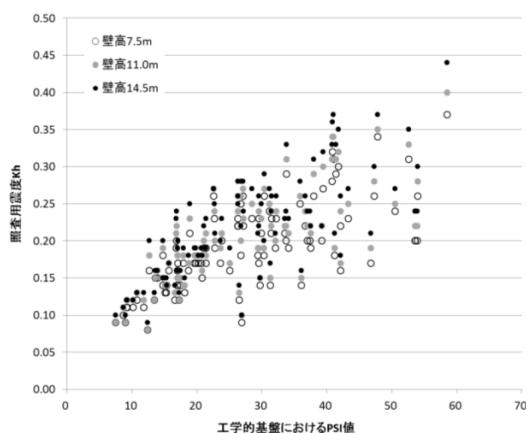


図-6 工学的基盤における速度 PSI 値と重力式岸壁の照査用震度との関係(背後地盤の固有周期 0.8s)³⁹⁾

とも対応している。以上のことから、係留施設の被害発生が始まる地表面PSI値の範囲（10～40程度）は、耐震設計のレベル1地震動に相当する範囲から大きく外れるものではないと言える。

(3) 速度PSI値の増幅倍率（地表面と工学的基盤）

説明の順序が前後したが、地表面と工学的基盤での速度PSI値の増幅倍率を1～1.5倍程度とした理由を述べる。

速度PSI値の増幅倍率は、入力地震動や地盤条件（各層のせん断剛性や層厚等）の特性により様々な数値を取るが、文献40)では重要港湾（159港湾）における工学的基盤でのレベル1地震動を線形の重複反射理論で地表に引き上げ、地表面と工学的基盤における速度PSI値の比（増幅倍率）を計算している。この結果によると（図-7）、応答倍率の平均値は約1.2であり、その範囲は1～最大2.68倍であった。ただし、増幅倍率の累積相対度数分布（図-8）より、大半のデータ（約87%のデータ）は1～1.5倍の範囲に収まっていることがわかる。

しかしながら、文献40)の計算では土のひずみ依存性（せん断ひずみの増加に伴うせん断剛性や減衰定数の変化）を考慮していない。このため、ひずみ依存性を考慮できる等価線形解析（FDEL⁴¹⁾）により、実測された地表面の時刻歴波形から工学的基盤への波形の引き戻しを行っている計算結果（文献42)）の事例を示し、地盤の非線形化が増幅倍率に及ぼす影響について若干の考察を行う。

表-5は、文献42)の結果から速度PSI値の増幅倍率をまとめた一覧表であり、表中の相馬港と金沢港のみが等価線形解析を利用した結果である。両港での増幅倍率は1.02～1.14であり、データ数が少ないものの線形の重複反射理論による増幅倍率（1～1.5倍程度）と同程度の値であった。ここで、地震時の地盤の非線形化の影響としては主にせん断剛性の低下と減衰定数の増加が考えられるが、このうち、せん断剛性の低下は固有周波数の低下を招くので、地盤が線形応答する場合に比べ、より低周波側で増幅が大きくなることが考えられる。このことは、速度PSI値の増幅倍率を大きくする効果がある。一方、減衰定数の増加は、速度PSI値の増幅倍率を小さくする効果がある。このように、地盤の非線形化には、PSI値の増幅倍率を大きくする効果と小さくする効果の両者が含まれているため、非線形時のPSI値の増幅倍率が線形時に比べ大きく変化する可能性は小さいのではないかと考えられる。

以上の考察の結果から、地表面と工学的基盤との間における速度PSI値の増幅倍率の代表的な値として、上述の1～1.5倍程度を仮定した。ただし、ここに示した検討

は仮定も多く、概略的な評価であり、今後さらなる検討が必要である。

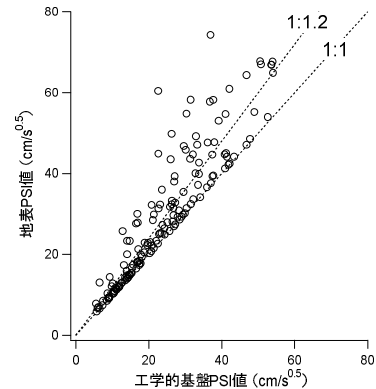


図-7 工学的基盤と地表での速度PSI値の関係⁴⁰⁾

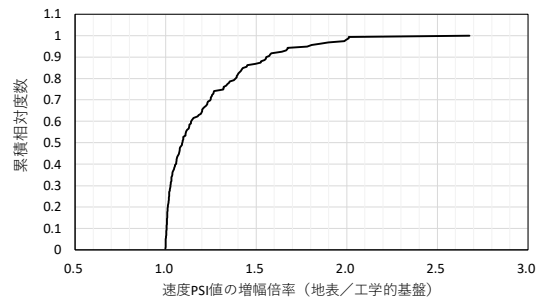


図-8 速度PSI値の増幅倍率（地表面／工学的基盤）の累積相対度数分布⁴⁰⁾より作成

表-5 速度PSI値の増幅倍率（地表面／工学的基盤）

地震名	港湾名	ゾーン	地震動方向	速度PSI値(cm/s ^{0.5})		速度PSI値の増幅倍率 (地表面/工学的基盤)
				地表	工学的基盤	
2011年東北地方太平洋沖地震	仙台臨海港	高砂埠頭	EW	133.26	76.02	1.75
			NS	170.30	80.07	2.13
2021年2月13日福島県沖の地震	相馬港	相馬-O	NS	26.49	23.19	1.14
			EW	31.72	28.95	1.10
2011年東北地方太平洋沖地震	千葉港	葛南地区	EW	75.13	65.66	1.14
			NS	71.59	63.01	1.14
2011年東北地方太平洋沖地震	千葉港	千葉中央地区	EW	56.34	50.37	1.12
			NS	58.63	51.95	1.13
2011年東北地方太平洋沖地震	東京港	ゾーン①	South	53.83	47.02	1.14
			West	53.46	47.10	1.14
2011年東北地方太平洋沖地震	東京港	ゾーン②	NS	61.88	56.13	1.10
			EW	62.06	56.23	1.10
2011年東北地方太平洋沖地震	東京港	ゾーン③	EW	85.11	70.19	1.21
			NS	86.19	69.63	1.24
2011年東北地方太平洋沖地震	川崎港	—	E16N	73.17	45.22	1.62
			N16W	79.03	46.49	1.70
2011年東北地方太平洋沖地震	横浜賀港	—	EW	25.34	25.27	1.00
			NS	24.21	24.13	1.00
2011年東北地方太平洋沖地震	木更津港	—	EW	70.29	59.56	1.18
			NS	60.29	53.19	1.13
2024年能登半島地震	金沢港	—	NS	64.39	63.20	1.02
			EW	58.61	56.81	1.03
1995年兵庫県南部地震	大阪港	—	E24N	49.25	42.03	1.17
			S24E	68.74	56.50	1.22
平均（増幅倍率）						1.24

※相馬港と金沢港は、ひずみ依存性を考慮できる等価線形解析（FDEL⁴¹⁾）を利用した計算結果を示す。それ以外の港湾は、線形の重複反射理論を利用した計算結果を示す。

(4) 判定表の適用にあたっての留意点

本判定表（表-4）は、速度 PSI 値と係留施設の被害程度に関係があるとの仮定のもと作成されたものであるが、あくまでも地震発生直後の被害状況を概略的に即時推定することを目的としており、その迅速性のために各施設の立地条件や設計条件等については詳細にモデル化しているものではない。具体的には、以下に示す事項については考慮していない。

- ・港湾内の強震観測点と各係留施設とは距離が離れている場合もあり、同じ港湾でも場所によっては速度 PSI 値が大きく異なる場合があるが（サイト増幅特性等の相違等のため）、その影響は考慮していない。
- ・対象としている係留施設（護岸・物揚場を含む）の耐震性は、設計震度（または照査用震度）の大小、液状化対策の有無、老朽化の進展程度などによって変化すると考えられるが、それらの影響も考慮していない。

これらの影響を考慮するためには、係留施設ごとに実際に来襲したであろう地表面の地震動波形を推定し、波形から得られた速度 PSI 値と各施設が保有する耐震性能とを直接比較する必要があるが、本研究ではそのようなアプローチは採用していない。すなわち、本判定表は個別施設の被害有無を判定するものではなく、あくまでも港湾内で係留施設に類する施設が一箇所でも被災しているか否かを概略的に判定するためのものである。このため、個別施設の被災有無については、点検や踏査を実施しなければ確認できないことに、留意が必要である。

3.3 港湾単位での被害発生確率を評価する地震 fragility 曲線

(1) ベイズ・モデルとしての FC 定式化

a) 概要

本研究では、速度 PSI 値を独立変数 [説明変数]、被害発生確率（以下、被害率と称す。）を従属変数として、ベイズ・モデルにより定式化した FC に基づき、被害の有無の判定（識別）を確率的に行う。識別関数を用いて確率的に被害の有無の判定を行う決定的識別モデルとは異なり、モデルのパラメータの事後分布を用いて確率的に被害の有無の判定を行う確率的識別を行える点が、ベイズ・モデルの利点であると言える。

FC を用いた既往研究は、港湾分野では一井ら (2002) の研究^{43), 44)}があるが、FC は他分野でも多くの既往研究 (例

えば、文献 45) ～48) で用いられている。既往研究^{40)~44)}の多くは、FC の関数として対数正規分布の累積分布関数を用い、パラメータの推定に最尤法を適用している。本稿では、将来的に説明変数を多次元化することを想定して、能島ら (2003)⁴⁸⁾に倣い、FC の関数としてロジスティック関数を使用することとした。

FC の関数としてロジスティック関数を採用した上で、本研究では、それをベイズ・モデルとして定式化し、マルコフ連鎖モンテカルロ法 [MCMC] を用いて、パラメータの事後分布からサンプリングを行い、その算術平均を取って、パラメータの事後期待値 [EAP] を算出した。なお、FC 自体はパラメータの EAP を用いて描けるが、MCMC によりサンプリングを行っているため、パラメータのベイズ信頼区間を容易に算出することができる。

b) FC のモデルのベイズ推定

続いて、ロジスティック関数を用いた FC のモデルのベイズ推定について述べる。まず、本モデルの被説明変数である、港湾の被害の有無（被害と判定する基準については 2.(3) を参照）を表す変数 y_n （ここに、 n はサンプルのインデックスであり、1 からサンプル・サイズ N までの自然数を取る。）は確率変数であると仮定した。 y_n はその実現値として、被害時に 1、無被害時に 0 の値を取るとし、ベルヌーイ分布に従うと仮定した。ここまでの仮定は、既往研究^{37)~42)}の FC での仮定と同じである。その上で、ベルヌーイ分布の母数 q は、本モデルの説明変数である、個々のデータの速度 PSI 値 (x_n) に依存する確率変数であると仮定した。 n 番目のサンプルに対応する q であることを明確化するためにこれを q_n で表すと、ベイズの定理より、 q_n は式(2)で表される。

$$q_n = p(y_n = 1 | \theta) = \sigma \left(\ln \frac{p(y_n = 1) f(\theta | y_n = 1)}{p(y_n = 0) f(\theta | y_n = 0)} \right) \quad (2)$$

ここに、 p は確率関数、 q はパラメータ（後述する β_0 , β_1 に対応する）、 f は密度、 $\sigma(a)$ はロジスティック関数 $\left(:= \frac{1}{1 + e^{-a}} \right)$ である。式(2)のロジスティック関数の引数の対数オッズは、式(3)のように、速度 PSI 値の 1 次関数で表されると仮定した。

$$\ln \frac{p(y_n = 1) f(\theta | y_n = 1)}{p(y_n = 0) f(\theta | y_n = 0)} = \beta_0 + x_n \beta_1 \quad (3)$$

ここに、 β_0 , β_1 は線形予測子のパラメータである。
 β_0 , β_1 には特に事前情報がないため、事前分布を無情報分布として、台が十分に広い正則な連続一様分布を仮定した。以上の仮定に基づき、ベイズ・モデリングした FC は式(4)で表される。

$$\left. \begin{aligned} y_n &\sim \text{Bernoulli}(q_n) \quad (n \in \{1, \dots, N\}) \\ q_n &= \sigma(\beta_0 + x_n \beta_1) \quad (n \in \{1, \dots, N\}) \\ \pi(\beta_i) &= C \quad (i \in \{0, 1\}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 $\text{Bernoulli}(q)$ は母数 q のベルヌーイ分布、 C は正の実数、 p は線形予測子におけるパラメータの事前分布の密度である。

(2) MCMC による FC のパラメータの推定

a) 概要

本項では、a) でベイズ・モデリングした FC のパラメータ (β_0, β_1) の推定方法について述べる。本研究では、MCMC のアルゴリズムの 1 つであるハミルトニアンモンテカルロ法を実装した Stan⁴⁹⁾ による自作のプログラムにてパラメータをサンプリングした。

なお、本研究で採用したハミルトニアンモンテカルロ法によるパラメータ推定の具体的な計算方法や計算結果については、付録 D に詳細を示す。また、その他の方法として、最尤法およびランダムウォークメトロポリス・ヘイスティングス法（モンテカルロ法）によるパラメータ推定についても、参考として計算方法と計算結果を付録 E に示す。

b) 計算条件

FC のパラメータの推定値には、a) に述べた EAP を採用した。MCMC では、サンプリングしたパラメータが定常分布に収束しているかを確認する必要がある。本研究では、収束判定指標 R_{hat} ⁵⁰⁾⁻⁵²⁾ の数値が、収束の目安として用いられる 1.1 を下回っていることをもって、定常分布に収束したことを確認した。なお、MCMC でのサンプリングの条件として、イタレーション数: 20,000/1 chain, Warm-up: 14,000, Chain 数: 4, サンプリング間隔: 3 を採用した。具体的には、MCMC により、各パラメータ (β_0, β_1) について合計 8000 データ (= (20000-14000)/3×4) をサンプリングし、これを各パラメータの事後分布に従う点列として用いた。

c) ベイズ信頼区間の算出方法

次に、ベイズ信頼区間の算出方法を説明する。菅原ら⁵³⁾の方法に倣い、まず、ベイズ信頼区間の算出を行いたい速度 PSI 値の長さ N' の配列 $\{x_n\}_{n=1}^{N'}$ を用意する。次に、 β_0, β_1 の MCMC サンプルを用いて、 $\{x_n\}_{n=1}^{N'}$ の各要素に対する被害率の乱数を生成した。その上で、 $\{x_n\}_{n=1}^{N'}$ の各要素について、被害率の乱数を小さい方から順に並べて、2.5 パーセンタイル、97.5 パーセンタイルを求め、それらを端点とする区間を被害率の 95% ベイズ信頼区間とした。

FC および、被害率のベイズ信頼区間の結果は、(3) に示す。

(3) 計算結果

a) FC の結果

地震動指標として速度 PSI 値を利用した場合の地震 FC の結果を図-9 に示す。図中には、線形予測子のパラメータ (β_0, β_1) それぞれの事後期待値[EAP] ($\beta_0=-4.5212$, $\beta_1=0.13223$) を用いたロジスティック曲線 (FC) と、95% ベイズ信頼区間を示す。

FC の結果を俯瞰すると、速度 PSI 値 10 未満では被害率は極めて小さく、10 以降は被害率が急増し、35 程度で被害率は 50 % (95 % ベイズ信頼区間による被害率は約 35 ~ 70 % 程度) を超過し、速度 PSI 値 50 程度で被害率 90 % (95 % ベイズ信頼区間では 70 ~ 95 % 程度) に至ることがわかる。この結果は、判定表における各 PSI 区分の説明内容と整合的であると言える。具体的には、例えば、速度 PSI 値 10~25 未満の「軽微な被害又は無被災である可能性が高い」とは、安全側に評価しても被害発生の可能性は 35 % 程度（速度 PSI 値 25 付近での信頼区間が 15 ~ 35 % 程度）であることに対応している。また、速度 PSI 値 50 以上における「甚大な被害が発生している可能性が高い」は、被害発生の可能性は低めに見積もっても 70% 以上

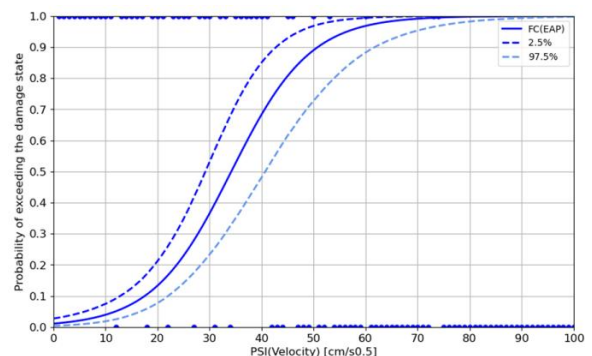


図-9 地震 fragility 曲線(係留施設を対象とした速度 PSI 値を指標とした港湾単位での被害発生確率)

上であり、平均的には 90 %程度以上であることと対応している。

このように、先に示した判定表に加えて FC の図を援用することにより、速度 PSI 値の大小に対応した被害発生確率のオーダーやその幅（信頼区間）も情報として得られるため、多数の港湾において地震後に実施する緊急点検の優先度の判断などの精度が向上するものと考えられる。

b) FC による被災／無被災の分類の識別性能の評価

最後に、今回得られた FC による被災／無被災の分類の識別性能を試行的に評価する。対象とする FC は、パラメータ (β_0 , β_1) それぞれの事後期待値 ($\beta_0=-4.5212$, $\beta_1=0.13223$) を用いたロジスティック曲線 (FC) とする。

識別性能の評価には、ROC 曲線 (Receiver operating characteristic curve) と AUC (Area under the curve) を適用した。ROC 曲線と AUC による予測モデルの評価に関する基礎的情報と今回の FC を対象とした計算方法の詳細については、付録 F にまとめたので、参考にされたい。

今回得られた FC に対して ROC 曲線を描いた結果を図-10 に示す。ROC 曲線の縦軸は再現率、横軸は偽陽性率である。再現率は、被災／無被災の分類の閾値をある値に定めた際に、「実際に被災有りのもののうち、正しく被災と予測できたものの割合」で定義される。同様に、偽陽性率は「実際に無被災のもののうち、間違って被災と予測してしまったものの割合」で定義される。そして、ROC 曲線は、被災／無被災の閾値（速度 PSI 値）を、0 から実測 PSI 値の最大値まで連続的に変化させた際の再現率と偽陽性率を連続的にプロットすることにより得られる。識別性能が良好であればあるほど、ROC 曲線は左上に近づくことになる。本図より、ROC 曲線は左上に近く、識別性能は良好であることがわかる。

また、ROC 曲線の下側の面積（AUC）は数値が大きいほど良いモデルとされ、例えば文献(54)によると、以下の評価がなされている。今回得られた AUC は 0.9769 であり、以下の評価では「極めて優れている」に分類された。

- #0.9～1.0：極めて優れている（outstanding）
- #0.8～0.9：優れている（excellent）
- #0.7～0.8：良い（acceptable）
- #0.5～0.7：良くない（poor）

通常のロジスティック回帰式を用いた予測では、閾値を 0.5 として被災／無被災を予測するが、Youden's index method 等で決定された閾値である 0.139 を適用することに

より（この時、速度 PSI 値の境界値は 20.4）、再現率は 0.690 から 0.929、正しい予測の割合を示す正確度は 0.928 から 0.936 へと向上して、被災／無被災をより正確に予測できるようになった。

以上のことから、今回構築した FC は、無被災／被災の分類の識別性能としては、極めて良好であると評価でき、さらに境界値の調整によって、識別性能を一層向上させることができた。

3.4 令和 6 年能登半島地震での事例検証

(1) 事前検討の状況

本論文の検討に先立ち、1962 年～2021 年 10 月までの地震波形を用いて同様の検討を行っていた（2021 年 12 月頃）。当時、表-4 に示す判別表と図-11(a)(b) に示す FC（試行版）を、内部向け資料として作成していた。

その後、2022 年福島県沖地震の際、相馬港の速度 PSI 値として 54、仙台港では 42 が記録され、両港とも判別表との対応が良いことが確認されていた。このことから、国土交通省港湾局の防災担当部局では、地震後の初動体制の検討の際に速度 PSI 値を参考とするようになった。

(2) 能登半島地震での事例検証

令和 6 年能登半島地震の発災（2024 年 1 月 1 日 16 時過ぎ）の際には、強震観測網では図-1 に示す多くの港湾で観測記録が得られ、地震発生の約 10 分後には防災担当部局職員あて、各港湾の速度 PSI 値がメール送信された。図-1 に示すとおり、伏木富山港で速度 PSI 値 79、金沢港で 65、新潟港で 42 と、これら 3 港湾での係留施設の被害発生が即座に懸念され、後日の調査にて地震被害が発生していることが確認された。なお、3 港以外で強震観測網にて記録が得られた港湾では、被害は確認されていない。

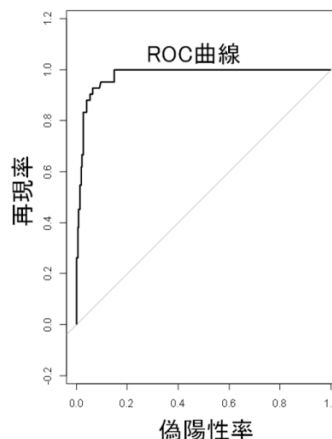


図-10 対象 FC の ROC 曲線

さらに、地震発生当日の深夜には、著者らの一部によって、先述した防災科学技術研究所の観測網（K-NET・KiK-net）で得られた観測記録より速度 PSI 値が算出された（図-12）。この結果、輪島（輪島港周辺）では速度 PSI 値が 137、正院（飯田港周辺）では 244 を記録するなど、能登半島内の各港湾での甚大な被害が予想された。このため、地震発生の翌々日から現地入りした TEC-FORCE（国土交通省緊急災害対策派遣隊）の第 1 弾メンバーの選定にあたっては、港湾施設の被害が甚大であることを前提に、地震で損傷した係留施設の暫定利用可否（緊急物資船等の係留施設の利用可否）をその場で判断できる専門知識を有する研究所職員も加えることとなった。

提案した手法の妥当性を確認するために、能登半島地震で取得された速度 PSI 値と港湾単位での被害有無の結果を図-11（能登半島地震前に作成）に追加した。まず、無被害であった全 29 港湾に着目すると、速度 PSI 値は 1 ～ 24 の範囲であり、過去の無被害データの範囲とも合致し、FC との対比でも被害発生確率は 30 %程度以下の範囲であり、判定表では「無被災である可能性が極めて高い」または「軽微な被害又は無被災である可能性が高い」の範囲であり、全般的に整合的であった。一方、新潟港・金沢港・伏木富山港では被害が発生（被害の詳細や災害復旧事業費など、今後確認する必要がある）しており、同様に整合的な結果であった。これらの結果より、当該地震による港湾単位での係留施設の被害有無については、提案手法により概ね判定可能であることが確認できた。

4. おわりに

本研究では、港湾地域強震観測網で得られる各港湾での地震波波形（地表面）から計算される速度PSI値により、当該港湾での係留施設の被害有無を概略判定する方法を提案した。概略判定の方法として、1) 速度 PSI値を段階的に区分し、区分毎に想定される係留施設の被害有無や被害程度の説明を付した現場技術者向けの判定表（本文中の表-4）と、2) 速度PSI値を指標とした、港湾単位での係留施設の被害有無の可能性を表現する地震脆弱性曲線（本文中の図-9）である。本提案手法を、令和6年能登半島地震における港湾での被害有無の判定に適用した結果、一定の適用性が確認された。

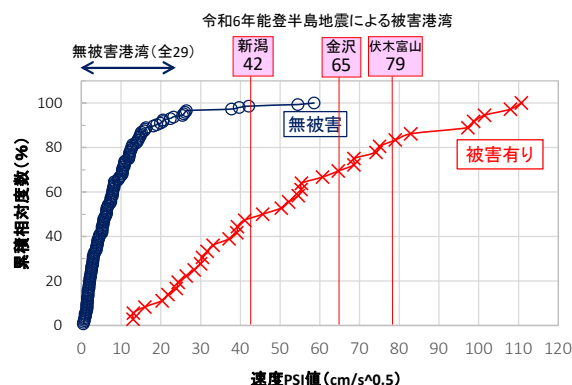
(2024 年 11 月 14 日受付)

謝辭

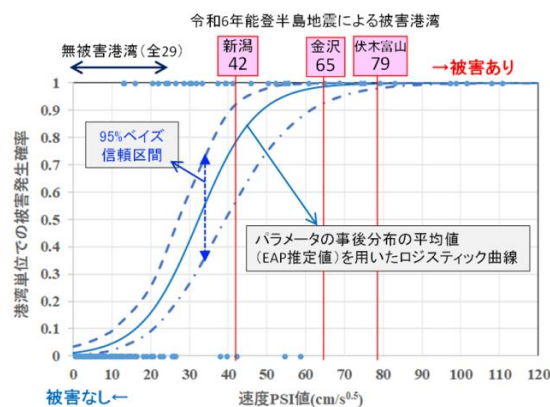
防災科学技術研究所の強震記録を利用しました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局港湾地域強震観測網
(<https://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>)，最終閲覧日 2024.4.1.
- 2) 野津厚，井合進：岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に



(a)「無被害港湾」と「被害港湾」の累積相対度数分布



(b) 地震フラジリティ曲線

図-11 事前検討の結果
(データ期間：1962～2021年10月)



図-12 令和6年能登半島地震時の各観測点のPSI値
(港湾地域強震観測網，防災科学研究所強震観測網)

- 関する一考察, 第 28 回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, pp.18-19, 2001.
- 3) 若井淳, 野津厚, 菅野高弘, 長坂陽介: 港湾地域地震観測におけるデータ伝送方法の改良—地震動情報即時伝達システムの開発—, 港湾空港技術研究所資料 No. 1310, 2015.
 - 4) 宮田正史, 菅原法城, 野津厚, 長坂陽介, 小濱英司, 大矢陽介, 福永勇介, 竹信正寛: 港湾地域強震観測から得られる速度 PSI 値を用いた港湾単位での被害有無の概略判定手法, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 80(18), 24-18144, 2024.
 - 5) 海老名正裕, 恩田充, 村上裕幸, 高須貴子, 曾根照人: 強震計観測情報を活用した港湾施設診断システムの簡易判定評価について, 沿岸技術研究センター論文集, No.20, pp.49-53, 2020.
 - 6) 佐伯公康, 佐藤秀政, 藤井照久, 朝倉邦友, 不動雅之, 清宮理: 漁港の矢板式係船岸の耐震性能照査手法の検証, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 74(2), I_240-I_245, 2018.
 - 7) 曾根照人, 栗原直範, 山本修司, 水谷雅裕, 近藤武司, 森本徹, 井合進, 一井康二: 防波堤のチャート式耐震診断手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 68(2), I_528-I_533, 2012.
 - 8) 長澤浩平, 曾根照人, 山本龍, 井合進, 澁谷啓: 神戸市における海岸保全施設の南海トラフ地震に対する対策検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 72(4), I_659-I_675, 2016.
 - 9) 大矢陽介, 小濱英司, 野津厚, 菅野高弘: 地震動評価指標として PSI 値に着目した防波堤の模型振動実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 69(2), I_167-I_172, 2013.
 - 10) 防災科学技術研究所強震観測網(K-NET, KiK-net) (<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>), 最終閲覧日 2024.4.1.
 - 11) 長坂陽介, 野津厚: 港湾地域強震観測年報(2020), 港湾空港技術研究所資料, No. 1409, 2023.
 - 12) 計測震度の算出方法 (気象庁) (https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.html), 最終閲覧日 2024.4.15.
 - 13) 日本港湾協会: 数字でみる港湾 2012, p.200, 2012.
 - 14) 日本港湾協会: 数字でみる港湾 2023, p.233, 2023.
 - 15) 片山猛雄, 中野拓治, 蓮見隆, 山口孝市: 1968 年十勝沖地震などの被災例による現行設計法の検討, 港湾技術研究所資料 No.93, 1969.
 - 16) 三橋郁雄, 中山種清: 1973 年根室半島沖地震などの被災例による現行設計法の検討, 港湾空港技術研究所資料 No.184, 1974.
 - 17) 土田肇, 稲富隆昌, 野田節男, 柳生忠彦, 田端千穂, 徳永省三, 大槻有吾, 平野忠告: 1978 年宮城県沖地震港湾被害報告, 港湾技術研究所資料 No. 325, 1979.
 - 18) 土田肇, 稲富隆昌, 上田寛: 1982 年浦河沖地震港湾被害報告, 港湾技術研究所資料 No. 472, 1983.
 - 19) 土田肇, 野田節男, 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 大根田秀明, 外山進一: 1983 年日本海中部地震港湾被害報告, 港湾技術研究所資料 No. 511, 1985.
 - 20) 上田茂, 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 風間基樹, 松永康男, 藤本健幸, 菊池喜昭, 宮井真一郎, 関口信一郎, 藤本義則: 1993 年釧路沖地震港湾施設被害報告, 港湾技術研究所資料 No. 766, 1993.
 - 21) 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 風間基樹, 山崎浩之, 松永康男, 関口信一郎, 水野雄三, 藤本義則: 1993 年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告, 港湾技術研究所資料 No. 791, 1994.
 - 22) 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 田中祐人, 山崎浩之, 宮井真一郎, 野津厚, 宮田正史, 藤本義則: 1994 年北海道東方沖地震による港湾施設の被害報告, 港湾技術研究所資料 No.856, 1997.
 - 23) 風間基樹, 田中祐人, 奥石逸樹: 三陸はるか沖地震における港湾・鉄道施設の被害, 土と基礎 (地盤工学会誌), 43(11), pp.21-26, 1995.
 - 24) 稲富隆昌, 善功企, 外山真一, 上部達生, 井合進, 菅野高弘, 寺内潔, 横田弘, 藤本健幸, 田中祐人, 山崎浩之, 小泉哲也, 長尾毅, 野津厚, 宮田正史, 一井康二, 森田年一, 南兼一郎, 及川研, 永松康男, 石井正樹, 杉山盛行, 高崎伸彦, 小林延行, 岡下勝彦: 1995 年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告, 港湾技術研究所資料 No.857, 1997.
 - 25) 井合進, 菅野高弘, 山崎浩之, 長尾毅, 野津厚, 一井康二, 森川嘉之, 小濱英司, 西守男雄, 佐藤陽子, 田中剛, 海老原健介, 大村武史, 大槇正紀: 平成 12 年 (2000 年) 鳥取県西部地震による港湾施設等の被害報告, 港湾技術研究所資料 No.1015, 2001.
 - 26) 公益社団法人 土木学会 (<https://www.jsce.or.jp/library/eq10/proc/00034/86-07-0075.pdf>), 最終閲覧日 2024.4.1.
 - 27) 国土交通省北海道開発局 (<https://www.hkd.mlit.go.jp/ob/saigai/ctll1r0000002634-att/ctll1r0000002870.pdf>), 最終閲覧日 2024.4.15.
 - 28) 宮島正悟, 小泉哲也, 宮田正史, 竹信正寛, 坂田憲治, 浅井茂樹, 福田功, 栗山善昭, 下迫健一郎, 山崎浩之, 菅野高弘, 富田孝史, 野津厚, 山路徹, 鈴木高二朗, 有川太郎, 中川康之, 佐々真志, 森川嘉之, 水谷崇亮, 小濱英司, 加島寛章, 高橋英紀, 大矢陽介, 遠藤仁彦, 原田卓三, 青木伸之, 佐瀬浩市, 山本貴弘, 早川哲也, 林誉命, 西谷和人, 白井正興: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による港湾施設等被害報告, 港湾空港技術研究所資料 No.1291, 2015.
 - 29) 高橋重雄, 戸田和彦, 菊池喜昭, 菅野高弘, 栗山善昭, 山崎浩之, 長尾毅, 下迫健一郎, 根木貴史, 菅野甚活, 富田孝史, 河合弘泰, 中川康之, 野津厚, 岡本修, 鈴木高二朗, 森川嘉之, 有川太郎, 岩波光保, 水谷崇亮, 小濱英司, 山路徹, 熊谷兼太郎, 辰巳大介, 鷲崎誠, 泉山拓也, 関克己, 廉慶善, 竹信正寛, 加島寛章, 伴野雅之, 福永勇介, 作中淳一郎, 渡邊祐二: 2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾空港技術研究所資料 No.1231, 2011.
 - 30) 野津厚, 若井淳: 東日本大震災で被災した港湾における地震動特性, 港湾空港技術研究所資料 No.1244, 2011.
 - 31) 野津厚, 伊豆太, 佐々真志, 小濱英司, 大矢陽介, 寺田竜士, 小林孝彰, 近藤明彦, 長坂陽介, 鈴木健之, 坪川将丈, 内藤了二, 竹信正寛, 福永勇介, 鬼童孝: 平成 28 年(2016 年)熊本地震による港湾施設等被害報告, 港湾空港技術研究所資料 No.1348, 2018.
 - 32) 平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団最終報告書, 地盤工学会, 2019, (https://www.jiban.or.jp/file/saigai/H30_Hokkaido_EQ_FinalReport.pdf), 最終閲覧日 2024.4.15.
 - 33) 国土交通省東北地方整備局 (<https://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/happyoukai>

- /R4/list1/1-11.pdf), 最終閲覧日 2024.4.1.
- 34) 竹信正寛, 野津厚, 小濱英司, 大矢陽介, 長坂陽介, 朝比翔太, 呉双蘭, 工代健太, 近藤明彦, 佐々真志, 菅原法城, 高野大樹, 百海郁弥, 宮田正史, 森川嘉之, 佐々木誠: 令和3年(2021年)および令和4年(2022年)福島県沖の地震による港湾施設被害報告, 国土技術政策総合研究所資料 No.1258 (港湾空港技術研究所資料 No.1414, 2024).
- 35) 国土交通省北陸地方整備局 (<https://www.hrr.mlit.go.jp/press/2023/3/240325kouwanbu.pdf>), 最終閲覧日 2024.4.1.
- 36) 竹信正寛, 宮田正史, 野津厚, 大矢陽介, 小濱英司, 石野芳夫, 蒔苗嘉人: 令和6年能登半島地震の発災直後における係留施設の利用可否判断事例とその課題, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 80(18), 24-18116, 2024.
- 37) 令和6年発生災害 国土交通省所管公共土木施設被害報告概要 (令和6年10月31日現在), 国土交通省 HP (https://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/bousai/saigai/kiroku/pdf/r6_houkoku_241031.pdf), 最終閲覧日 2024.11.6.
- 38) 大矢陽介, 野津厚, 吉田望, 小濱英司, 菅野高弘: 地盤の地震応答解析の精度評価ツールとしてのレーダーチャートの提案と各種解析手法の適用限界の検証, 日本地震工学会論文集 第14巻, 第1号, pp.97-116, 2014.
- 39) 竹信正寛, 野津厚, 宮田正史, 佐藤裕司, 浅井茂樹: 確率的時刻歴波形として規定される港湾におけるレベル1地震動の設定に関する包括的整理, 国土技術政策総合研究所資料 No.812, 2024.
- 40) 工学的基盤と地表での PSI 値の違いについて, 港湾空港技術研究所地震防災領域 HP (https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bai/taisai/research_jpn/research_jpn_2024/jr_62.pdf), 最終閲覧日 2024.12.23.
- 41) 周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析プログラム FDEL, 岐阜大学 地震工学研究室 HP (<https://www1.gifu-u.ac.jp/~cerl/fdel.html>), 最終閲覧日 2024.12.23.
- 42) 既往の大地震による地震動と照査用地震動の比較, 港湾空港技術研究所地震防災研究領域 HP (https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bai/taisai/research_jpn/research_jpn_2018/jr_52.html), 最終閲覧日 2024.12.23.
- 43) 一井康二: モンテカルロ法による重力式岸壁の fragility カーブの合成, 土木学会第57回年次学術講演会, 57巻, 2002.
- 44) Ichii, K.: Seismic Risk Assessment Procedure for Gravity Type Quay Walls, Structural Eng. / Earthquake Eng., *Journal of JSCE*, Vol.19, No.2, 2002.
- 45) Shinozuka, M., Feng, M., Lee, J. and Naganuma, T.: Statistical Analysis of Fragility Curves, *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12), pp.1224-1231, 2000.
- 46) 吉川弘道, 大滝健, 前田欣昌, 中村孝明: 地震リスク解析における fragility 曲線と地震損失関数, コンクリート工学, 45巻, 10号, 2007.
- 47) 中野一慶, 梶谷義雄, 多々納裕一: 地震災害による産業部門の操業能力の低下を対象とした機能的 fragility 曲線の推計, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学, 69巻, 1号, 2013).
- 48) 能島暢呂, 杉戸真太, 鈴木康夫, 石川裕, 奥村俊彦: 震度情報に基づく供給系ライフラインの地震時機能リスクの二段階評価モデル, 土木学会論文集, 2003巻, 724号, 2003.
- 49) Stan, (<https://mc-stan.org/>).
- 50) 豊田秀樹: マルコフ連鎖モンテカルロ法, 朝倉書籍, 2008.
- 51) 豊田秀樹: 基礎からのベイズ統計学 ハミルトニアンモンテカルロ法による実践的入門, 朝倉書籍, 2015.
- 52) Andrew, G., Donald, R.: Inference from Iterative Simulation Using Multiple Sequences, *Statistical Science*, Vol.7, No.4, 1992.
- 53) 菅原法城, 福永勇介, 宮田正史, 竹信正寛, 住岡直樹: 過去の被災記録を活用した階層ベイズモデルによる係留施設の地震時 fragility 曲線の構築, 土木学会論文集 A1 (地震工学) (印刷準備中)
- 54) Hosmer, DW, Lemeshow, S, and Sturdivant, RX: Applied Logistic Regression Third Edition, p.177, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.

付録A 速度PSI値に関する補足説明

1. はじめに

本付録では、本研究で地震動指標として用いる速度PSI値¹⁾の物理的な解釈について、補足説明を行う。

2. 補足説明

本文中で示したとおり、速度PSI値は、式(A1)で表される量であり、地震波形の速度¹⁾を二乗し、継続時間で積分した値の平方根として定義される¹⁾。

$$\text{PSI}[v(t)] := \sqrt{\int_0^{\infty} (v(t))^2 dt} \quad (\text{A1}) \text{ (再掲)}$$

ここで、 $v(t)$ は地震による地表面や観測位置における地動速度 (m/s) 、 t は時間 (s) である (説明の都合上、地動速度の単位は本文と異なるものとしている)。一方、弾性波 (上昇波) が地盤を下方から上方へ伝わる時、単位面積あたり単位時間あたり、弾性波によって下方から上方に運ばれるエネルギー E (J・m⁻²・s⁻¹) は、式(A2)で表される^{例えら2)} (図-A. 1)。従って、地震動継続時間中に上方へ運ばれる単位面積あたりエネルギーの総量 E_{total} (J・m⁻²) は、式(A3)で表される。

$$E = \rho c (v(t))^2 \quad (\text{A2})$$

$$E_{\text{total}} = \rho c \int (v(t))^2 dt \quad (\text{A3})$$

ここで、 ρ は密度 (kg/m³) 、 c は弾性波の速度 (m/s) である。以上のことから、速度PSI値は地震動継続時間中に下方から上方に運ばれるエネルギーの総量と関係する量である。

一方、偏土圧を受ける港湾構造物 (岸壁や護岸) に大きな変形をもたらすには大きなエネルギー (総エネルギー) が必要である。地震動継続時間中に下方から上方に運ばれるエネルギーがすべて岸壁等の変形に使われるとは限らないが、少なくとも、岸壁等に大きな変形をもたらす地震動は、大きなエネルギーを下方から上方に運ぶ地震動、すなわち速度PSI値の大きい地震動でなければならない。このことから、岸壁等に速度PSI値の大きい地震動が作用した場合に被災程度が大きい可能性があると考えることには合理性がある。

ただし、速度PSI値は平方根をとっているため、岸壁等の被災程度と速度PSIとの間に相関があると考えことは、岸壁等の変形が総エネルギーそのものでなく総エネルギーの平方根に比例すると考えていることになる。そこで、以下においては、岸壁等の地震時変形量と速度PSI値との関係性について考察する。まず、式(A3)の両辺の平方根をとると、式(A4)となる。

$$\sqrt{E_{\text{total}}} = \sqrt{\rho c} \sqrt{\int v^2(t) dt} \quad (\text{A4})$$

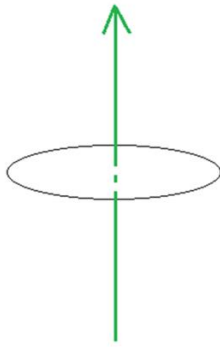


図-A.1 弾性波により運ばれるエネルギー（イメージ）

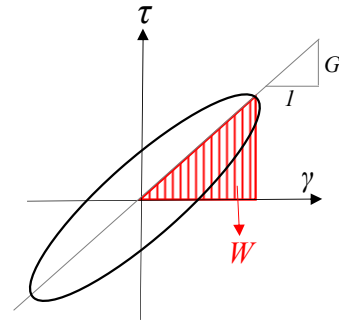


図-A.2 土要素のせん断応力とせん断ひずみの関係

ここで、土要素がせん断変形を受けた際のせん断応力 τ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)とせん断ひずみ γ のひずみエネルギーの関係に着目する。図-A.2 は一般的な土要素におけるせん断応力とせん断ひずみとの関係を示しているが、土要素を弾性体と仮定した場合に土要素（単位体積あたり）が最大蓄えることができるエネルギー W ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)は、図中の斜線部分の三角形の面積となり、土のせん断剛性（せん断弾性係数） G ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)を利用し、式(A5)となる。さらに、式(A5)を式(A4)と対比するために、式(A5)の両辺の平方根をとると、式(A6)が得られる。

$$W = \frac{1}{2} G \gamma^2 \quad (\text{A5})$$

$$\sqrt{W} = \sqrt{\frac{1}{2} G} |\gamma| \quad (\text{A6})$$

式(A4)と式(A6)は両者ともエネルギーの平方根をとったものであり、地震動継続時間中に上方へ運ばれたエネルギーの総量 E_{total} と上方の地盤のせん断変形に使われたエネルギーとの間に関係があるとすれば、両式の比較より、せん断ひずみの絶対値 $|\gamma|$ は速度 PSI 値（式(A4)における最右端の平方根部分）と比例的な関係にあると言える。そして、せん断ひずみが大きいと、上方の地盤の水平変位量もせん断ひずみの大きさに比例して増加することになる。

以上のことから、ある岸壁が異なる速度 PSI 値の地震動を受けた場合に、速度 PSI 値の増加にともない岸壁の地震時残留変形量が比例的に増加し被災程度が甚大化すると考えることには一定の合理性がある。

参考文献

- 1) 野津厚, 井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第28回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, pp.18-19, 2001.
- 2) 平井俊之, 澤田純男: 地震動のエネルギー指標の構造物被害推定への適用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 68.4: I_1036-I_1043, 2012.

付録B 「対象データの抽出方法」と「速度PSI値の算出で利用する速度波形の計算方法」

1. はじめに

本付録では、本文2.2にて説明したデータ整理方法に関して、対象データの抽出方法と速度PSI値の計算方法について、本文に記載していない詳細内容について説明を行う。

2. 補足説明対象データの抽出手順

(1) 港湾地域強震観測網Webサイトからのデータ抽出方法

港湾地域強震観測網で取得された地震波形および関連する地震情報は、港湾空港技術研究所のWebサイト¹⁾で順次公開されている。同Webサイトで記録検索を行うことにより、図-B.1に示すとおり、検索条件に合致した過去データの一覧表が表示され、一覧表をデジタルデータとしてダウンロードすることができる²⁾。なお、一覧表には、気象庁発表による地震情報（発震日時、経度、緯度、深さ、マグニチュード、震源地名、地震名）、港湾地域観測網における観測地点の名称と震央距離、当該観測地点の記録から算出した最大加速度（南北、東西、上下）及び速度PSI値（南北、東西、上下）等の情報が記載されている。

本論文で利用したデータは、観測開始から2024年2月3日までの記録のうち、最大加速度100Gal以上(3方向の成分のうち、1方向でも100Galを超過したもの)の記録を抽出した。

港湾地域強震観測

メイン画面 | 記録検索 | 地点情報 | 計器特性 | 数字と単位 | ニュース | 参考文献 | 観測情報 | お問い合わせ

記録検索

観測記録データを検索します。

港 湾

観測地点

検索期間

震源経度

震源緯度

震源深さ

マグニチュード

最大加速度

PSI値

震央距離

地震名

選択

クリア

選択

選択

クリア

選択

クリア

選択

クリア

選択

クリア

選択

クリア

選択

クリア

選択

クリア

検索開始

一覧出力

↓ 該当データ 389件中の1～10件までを表示しました。 ↓

発震日時	経度	緯度	深さ (00)	マグニ チュード	震源地名	地震名	観測地点	震央距離 (00)	最大加速度(Gal)			PSI値($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1/2}$)			記録番号	記録(波形) データのダウンロード
									南北	東西	上下	南北	東西	上下		
2024/01/01 16:10	137° 29.7'	137° 16.2'	16.0	7.6	石川崎能登地方	2024年能登半島地震	新島-U	165.0	144.4	107.5	39.5	36.5	41.5	15.2	U-13439	オリジナル 補正 SMAC相当
2024/01/01 16:10	137° 29.7'	137° 16.2'	16.0	7.6	石川崎能登地方	2024年能登半島地震	富山-O	91.2	147.2	144.3	111.9	76.2	89.0	25.9	O-16391	オリジナル 補正 SMAC相当
2024/01/01 16:10	137° 29.7'	137° 16.2'	16.0	7.6	石川崎能登地方	2024年能登半島地震	金沢-C	113.0	251.3	216.6	199.0	84.5	59.6	85.0	C-60306	オリジナル 補正 SMAC相当
2023/05/28 18:03	95° 38.4'	140° 40.5'	50.0	6.2	千葉県東方沖		鹿島造面-U	32.7	55.0	145.9	21.2	9.2	12.5	3.7	U-13130	オリジナル 補正 SMAC相当
2023/02/25 22:27	42° 45.3'	145° 04.5'	69.0	6.0	伊豆沖		新島-U	64.8	63.6	123.7	72.0	4.9	5.0	1.8	U-12315	オリジナル 補正 SMAC相当
2023/01/25 10:00	97° 35.4'	141° 34.6'	55.0	5.1	福島県沖		相馬-O	60.7	108.1	55.6	28.5	0.9	0.7	0.4	O-15783	オリジナル 補正 SMAC相当
2022/06/10 14:40	97° 38.1'	141° 35.1'	55.5	5.2	福島県東方沖		相馬-O	60.5	150.4	109.1	40.5	1.5	1.5	0.6	O-15293	オリジナル 補正 SMAC相当
2022/06/04 08:40	97° 38.7'	141° 37.2'	57.4	5.3	福島県東方沖		相馬-O	62.9	105.3	73.7	33.5	1.5	1.7	1.1	O-15206	オリジナル 補正 SMAC相当
2022/05/29 15:55	98° 14.9'	140° 59.5'	49.7	5.3	茨城県東方沖		鹿島造面-U	43.1	86.1	100.5	32.9	1.6	2.1	0.8	U-12421	オリジナル 補正 SMAC相当
2022/05/22 12:24	98° 46.5'	141° 34.2'	5.2	6.0	茨城県東方沖		小名浜沖-O	47.7	187.5	137.7	69.2	7.9	5.5	2.4	O-14949	オリジナル 補正 SMAC相当
2022/05/22 12:24	98° 46.5'	141° 34.2'	5.2	6.0	茨城県東方沖		小名浜沖-O	47.7	109.5	62.1	39.4	6.1	4.0	2.1	O-14949	オリジナル 補正 SMAC相当
2022/04/19 08:16	98° 52.6'	140° 20.9'	32.0	5.4	茨城県北部		常陸那珂-U	56.9	134.1	32.0	36.1	2.4	1.7	0.8	U-12339	オリジナル 補正 SMAC相当
2022/03/19 08:40	34° 12.6'	136° 08.6'	7.0	3.6	和歌山県北西部		和歌山-E	3.0	52.7	115.0	69.1	0.8	1.2	0.5	K-00015	オリジナル 補正 SMAC相当
2019/03/18 09:28	97° 41' 8"	121° 37' 2"	16.6	7.4	福島県東方沖		新島-U	917.9	111.0	85.7	8.0	4.4	4.4	O-14053	オリジナル 補正 SMAC相当	

図-B.1 港湾地域強震観測網 Web サイト¹⁾における記録検索の事例
(検索条件：2024年2月までに得られた最大加速度100Gal以上の記録)

第2段目は、同じ港湾で、本震と余震が来襲した場合は、本震にて被害があった場合、余震と判断した観測データをデータセットから除外した。これは、港湾での施設被害は本震時に発生することが多いが、その後の余震によるさらなる被害施設の増加や被害進展の有無については過去の被害記録からは読み取ることができないためである。すなわち、各地震記録に対応して、地震被害の有無の情報を突き合わせるができず、今回の検討目的に照らすと利用できないデータとなるためである。以上の考え方にに基づき、今回の研究では、実際のデータを確

- 15 -

認した上で、原則、本震の1週間後までは余震として取扱い、その間のデータを除外した。さらに、以下に示す地震については余震の期間が長く、余震データが数多く記録されていたため、以下に示す期間のデータを除外した。

- ・1995年兵庫県南部地震： 本震発生以降、約3か月の期間のデータを除外
- ・2003年十勝沖地震： 本震発生以降、約1か月の期間のデータを除外
- ・2011年東日本大震災： 本震発生以降、約4か月の期間のデータを除外
- ・2024年能登半島沖地震： 本震発生以降、約1か月の期間のデータを除外

以上の絞り込みの結果、対象データ数は本文中に示した全264件となった。全データのリストを付録Cに示す。

(2) 速度PSI値の算出

次に、図-B.1 に掲載されている速度 PSI 値の算出方法の概略を示す。速度 PSI 値は、基線補正を行った加速度時刻歴をフーリエ変換した上で速度へ変換し、さらに固定フィルタ³⁾を適用したものを速度時刻歴に戻した結果を用いることにより、算出されている。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局港湾地域強震観測網 (<https://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>)，最終閲覧日 2024.4.1.
- 2) 野津厚：港湾地域強震観測の経緯と現状，日本地震工学会大会・2003 梗概集，pp.特 54・特 55，2003.
- 3) 井合進，倉田栄一，土田肇：強震記録のデジタル化と補正，港湾技研資料 No.286、1978.

付録C 解析対象の全データ (一覧表)

表-C. 1(a) 解析対象の全データ一覧 (速度PSI値が大きい順、データ番号No.1~No.129)

通し 番号	発震日時	緯度	経度	深さ (km)	震源地名	震害地名	地震名	観測地点	震元距離 (km)	最大加速度(Gal)			PSI値(cm・s ^{-1/2})			記録番号	追加データ			港湾単位で の被災有無 1:あり 2:対象外
										南北	東西	上下	南北	東西	上下		水平最大 加速度 (Gal)	水平方向 PSI最大値 (cm・s ^{-1/2})	計測震度 相当値	
1	1988/5/16 9:48	40° 44'0"	143° 35'0"	0.0	7.9	E OFF AOMORI PREF	1988年十勝沖地震	青森-S	238.6	207.7	179.9	137.1	110.7	103.1	33.0	S-00235	207.7	110.7	5.4	1
2	2000/10/6 13:30	35° 16'5"	133° 20'9"	9.0	7.3	WESTERN TOTTORI PREF	2000年鳥取県西部地震	境港-G	31.5	210.7	299.7	103.0	56.1	108.0	9.1	F-01493	299.7	108.0	5.6	1
3	1993/1/17 5:48	34° 35'9"	135° 02'1"	16.1	7.3	AWAISHIMA ISLAND REGION	1993年兵庫県南部地震	淡路-G	35.9	321.2	472.0	310.8	92.0	101.5	38.9	F-00745	472.0	101.5	5.7	1
4	1995/1/17 5:46	34° 35'9"	135° 02'1"	16.1	7.3	AWAISHIMA ISLAND REGION	1995年兵庫県南部地震	神戸港-S	18.7	302.0	204.8	282.8	98.9	41.5	38.1	S-02015	302.0	98.9	5.8	1
5	1995/1/17 5:46	34° 35'9"	135° 02'1"	16.1	7.3	AWAISHIMA ISLAND REGION	1995年兵庫県南部地震	神戸港島-D	17.6	341.2	284.3	555.9	97.3	70.9	78.7	D-00004	341.2	87.3	5.9	1
6	1993/1/15 20:06	42° 55'2"	144° 21'2"	100.6	7.5	SE OFF TOKACHI	1993年釧路沖地震	釧路-G	8.8	469.3	344.2	381.5	82.9	36.3	9.2	F-00076	469.3	82.9	5.7	1
7	2011/3/11 14:46	38° 06'2"	142° 51'7"	23.7	9	宮城県東方はるか沖	2011年東北地方太平洋沖地震	小名浜東-O	214.6	1082.6	1430.0	383.5	65.0	79.0	28.7	F-03026	1430.0	79.0	5.7	1
8	2024/1/1 18:10	37° 28'7"	137° 18'2"	16.0	7.6	石川県能登半島	2024年能登半島地震	富山-O	91.2	147.2	144.9	111.9	78.2	69.0	25.8	O-16891	147.2	78.2	5.0	1
9	1983/5/26 11:59	40° 21'6"	139° 04'4"	14.0	7.7	W OFF AKITA PREF	1983年日本海中部地震	青森-S	150.7	94.9	115.8	58.8	58.3	75.5	5.0	S-01573	115.8	75.5	5.0	1
10	1993/7/12 22:17	42° 46'9"	139° 10'8"	35.1	7.8	SW OFF HOKKAIDO	1993年北海道西南沖地震	前橋-F	168.8	119.4	115.9	63.8	75.1	65.0	29.7	F-00545	119.4	75.1	4.9	1
11	1993/7/12 22:17	42° 46'9"	139° 10'8"	35.1	7.8	SW OFF HOKKAIDO	1993年北海道西南沖地震	前橋-M	168.8	143.5	149.3	91.7	65.1	74.2	39.7	M-01472	149.3	74.2	5.1	1
12	2011/3/11 14:46	38° 06'2"	142° 51'7"	23.7	9	宮城県東方はるか沖	2011年東北地方太平洋沖地震	大井-U	390.9	113.0	99.1	44.3	72.0	69.7	22.8	U-02467	113.0	72.0	4.9	0
13	1995/1/17 5:46	34° 35'9"	135° 02'1"	16.1	7.3	AWAISHIMA ISLAND REGION	1995年兵庫県南部地震	大阪東-S	37.7	173.3	191.2	108.0	68.6	49.9	21.8	S-02618	191.2	68.6	5.3	1
14	2003/9/26 4:50	41° 46'7"	144° 04'7"	45.1	8	十勝半島東沖	2003年十勝沖地震	釧路-G	137.5	337.9	574.8	142.5	49.9	68.6	11.6	F-01978	574.8	68.6	5.6	1
15	2011/3/11 15:15	38° 07'3"	141° 15'2"	42.7	7.8	宮城県東方はるか沖	2011年東北地方太平洋沖地震	鹿島田南-U	54.4	242.2	287.2	182.9	45.1	84.7	24.0	U-02517	287.2	84.7	5.3	1
16	2024/1/1 18:10	37° 28'7"	137° 18'2"	16.0	7.6	石川県能登半島	2024年能登半島地震	金沢-U	113.8	251.3	216.6	138.0	64.5	58.6	35.0	C-00306	251.3	64.5	5.0	1
17	1983/5/26 11:59	40° 21'6"	139° 04'4"	14.0	7.7	W OFF AKITA PREF	1983年日本海中部地震	秋田-S	108.5	190.1	205.4	40.9	60.7	57.8	25.8	S-01567	205.4	60.7	5.2	1
18	2011/3/11 14:46	38° 06'2"	142° 51'7"	23.7	9	宮城県東方はるか沖	2011年東北地方太平洋沖地震	千歳-G	370.4	125.1	109.9	81.8	58.6	56.3	26.3	F-02942	125.1	58.6	4.8	0
19	1984/12/28 19:40	40° 25'8"	143° 44'7"	0.0	7.6	FAR E OFF SANRIKU	1984年三陸はるか沖地震	八戸東-S	191.4	378.8	517.8	108.6	41.3	55.4	16.9	S-02597	517.8	55.4	5.8	1
20	2003/9/26 4:50	41° 46'7"	144° 04'7"	45.1	8	十勝半島東沖	2003年十勝沖地震	花火-F	111.7	209.2	202.3	88.7	55.1	44.4	36.1	F-01948	209.2	55.1	5.3	1
21	1978/6/12 17:14	38° 09'0"	142° 10'0"	40.0	7.4	E OFF MIYAGI PREF	1978年宮城県沖地震	塩釜工場-S	99.9	264.9	272.8	166.1	39.7	54.6	15.8	S-01201	272.8	54.6	5.6	1
22	2011/3/11 14:46	38° 06'2"	142° 51'7"	23.7	9	宮城県東方はるか沖	2011年東北地方太平洋沖地震	品川-U	389.4	207.9	204.5	51.7	54.5	54.5	24.1	U-02476	207.9	54.5	5.0	0
23	2023/1/16 23:38	37° 41'8"	141° 37'4"	56.6	7.4	福島県東方沖	2023年福島県東方沖地震	福島-S	60.1	683.3	554.1	550.4	38.7	53.8	36.0	G-14074	683.3	53.8	5.8	1
24	1983/5/16 9:48	40° 44'0"	143° 35'0"	0.0	7.9	E OFF AOMORI PREF	1983年三陸はるか沖地震	大井-U	390.9	113.0	99.1	44.3	72.0	69.7	22.8	U-02467	113.0	72.0	4.9	0
25	1994/12/28 19:40	40° 25'8"	143° 44'7"	0.0	7.6	FAR E OFF SANRIKU	1994年三陸はるか沖地震	青森-G	256.4	142.2	141.6	68.3	50.3	49.5	25.3	F-00692	142.2	50.3	5.2	1
26	2018/4/16 12:51	32° 45'3"	140° 45'8"	124.7	7.3	熊本県熊本地方	2018年熊本地震	前橋-U	91.7	283.2	280.2	278.1	45.7	42.7	14.1	U-08523	280.2	45.7	5.4	1
27	2011/3/11 14:46	38° 06'2"	142° 51'7"	23.7	9	宮城県東方はるか沖	2011年東北地方太平洋沖地震	前橋-U	168.8	119.4	115.9	63.8	75.1	65.0	29.7	F-00545	119.4	75.1	4.9	1
28	2022/3/16 23:38	37° 41'8"	141° 37'4"	56.6	7.4	福島県東方沖	2022年福島県東方沖地震	仙台-O	83.9	320.4	249.4	206.8	39.8	41.9	13.3	O-14076	249.4	41.9	5.4	1
29	2024/1/1 18:10	37° 28'7"	137° 18'2"	16.0	7.6	石川県能登半島	2024年能登半島地震	新羽-U	195.4	144.4	107.5	33.8	36.6	41.3	15.2	U-13498	144.4	41.3	4.8	1
30	1994/10/4 22:22	43° 22'5"	147° 40'4"	28.0	8.2	E OFF HOKKAIDO	1994年北海道東方沖地震	花火-F	168.8	380.3	346.2	255.6	41.1	38.2	20.6	F-00681	380.3	41.1	5.4	1
31	2001/3/24 15:27	34° 07'8"	140° 41'7"	45.1	8	AKINADA SETONAIKAI	2001年千島列島沖地震	大井-U	390.9	113.0	99.1	44.3	72.0	69.7	22.8	U-02467	113.0	72.0	4.9	0
32	1984/10/4 22:22	43° 22'5"	147° 40'4"	28.0	8.2	E OFF HOKKAIDO	1994年北海道東方沖地震	仙北-G	271.9	196.6	265.5	111.9	37.8	39.3	12.0	F-00671	265.5	39.3	5.2	1
33	2003/9/26 4:50	41° 46'7"	144° 04'7"	45.1	8	十勝半島東沖	2003年十勝沖地震	釧路-G	84.7	328.8	461.3	354.3	32.6	39.1	17.1	F-01976	461.3	39.1	5.3	1
34	1988/4/1 9:42	32° 17'0"	132° 32'0"	30.0	7.5	HYUGANADA REGION	1988年日向灘地震	福島-S	84.7	182.2	242.3	47.6	28.3	37.5	7.0	S-00513	242.3	37.5	5.3	1
35	1973/6/17 13:58	42° 58'0"	145° 16'5"	0.0	7.4	OFF NEMURO PENINSULA	1973年十勝半島地震	大井-U	390.9	113.0	99.1	44.3	72.0	69.7	22.8	S-00733	113.0	72.0	4.9	0
36	2011/3/11 14:46	38° 06'2"	142° 51'7"	23.7	9	宮城県東方はるか沖	2011年東北地方太平洋沖地震	仙北-G	169.7	62.7	392.9	225.9	33.2	28.7	17.4	F-01959	62.7	33.2	5.3	1
37	2021/2/13 23:07	37° 43'7"	141° 41'9"	55.3	7.3	福島県東方沖	2021年福島県東方沖地震	相模-S	65.9	480.5	486.7	357.3	26.5	31.7	16.2	O-12137	486.7	31.7	5.4	1
38	2021/2/13 23:07	37° 43'7"	141° 41'9"	55.3	7.3	福島県東方沖	2021年福島県東方沖地震	仙北-O	85.8	328.7	249.4	185.8	30.5	22.5	10.7	O-12139	328.7	30.5	5.4	1
39	2001/3/24 15:27	34° 07'8"	140° 41'7"	45.1	8	AKINADA SETONAIKAI	2001年千島列島沖地震	大井-U	390.9	113.0	99.1	44.3	72.0	69.7	22.8	F-01937	113.0	72.0	4.9	0
40	2018/9/6 3:07	42° 41'5"	142° 00'4"	37.0	6.7	熊本地方中部東部	2018年北海道胆振東部地震	宮古東-U	32.8	251.8	349.6	185.3	21.3	28.4	12.3	U-09021	349.6	28.4	4.8	1
41	1988/5/16 9:48	40° 44'0"	143° 35'0"	0.0	7.9	E OFF AOMORI PREF	1988年十勝沖地震	室蘭-S	282.5	204.6	135.1	70.4	26.4	26.4	10.4	S-00234	204.6	26.4	4.9	1
42	1984/8/7 4:08	32° 23'0"	132° 09'2"	33.0	7.1	HYUGANADA REGION	1984年日向灘地震	福島-S	47.7	190.3	267.7	102.2	17.7	26.1	8.6	S-00729	267.7	26.1	5.2	0
43	1981/1/25 13:58	42° 58'0"	145° 16'5"	0.0	7.4	OFF NEMURO PENINSULA	1981年十勝半島地震	仙北-S	128.3	166.0	120.0	50.6	38.5	42.9	11.3	S-01118	166.0	42.9	5.1	1
44	1993/7/12 22:17	42° 46'9"	139° 10'8"	35.1	7.8	SW OFF HOKKAIDO	1993年北海道西南沖地震	宮古-S	152.9	217.3	215.2	100.2	22.3	25.5	10.3	F-00154	217.3	25.5	4.8	1
45	2011/3/11 14:46	38° 06'2"	142° 51'7"	23.7	9	宮城県東方はるか沖	2011年東北地方太平洋沖地震	大船渡防地-G	140.8	244.8	135.5	88.2	24.4	13.9	17.3	F-03024	244.8	24.4	4.7	1
46	2011/3/11 14:46	38° 06'2"	142° 51'7"	23.7	9	宮城県東方はるか沖	2011年東北地方太平洋沖地震	東松-G	154.2	288.4	357.5	163.2	17.5	23.9	17.7	F-02881	357.5	23.9	4.8	1
47	2022/1/22 10:58	32° 45'3"	1																	

港湾地域強震観測網から得られる速度PSI値を用いた港湾単位での係留施設の被害有無の概略判定手法
宮田正史・菅原法城・野津 厚・長坂陽介・小濱英司・大矢陽介・福永勇介・竹信正寛・秋山吉寛

表-C.1(b) 解析対象の全データ一覧 (速度PSI値が大きい順、データ番号No.130~No.264)

通し 番号	発震日時	緯度	経度	深さ (Km)	マグニチュード	震源地名	地震名	観測地点	震央距離 (Km)	最大加速度(Ga)			PSI値(cm/s ² -1/2)			記録番号	追加データ			港湾単位で の被災有無 1:あり 2:対象外
										南北	東西	上下	南北	東西	上下		水平最大 加速度 (PSI値) (cm/s ² -1/2)	水平方向 PSI最大値 (cm/s ² -1/2)	計測震度 相当値	
130	2012/8/25 23:18	42° 19.7'	143° 06.6'	49.1	6.1	十勝地方南部		十勝-G	17.7	182.3	188.9	28.2	6.8	4.7	F-03197	188.9	6.8	0.0	0	
131	2021/10/9 2:46	40° 00.4'	142° 15.3'	58.2	5.9	道庁東部		八戸-G	89.5	103.8	114.2	28.2	6.8	6.2	O-13449	114.2	6.8	4.3	0	
132	1988/3/30 4:04	34° 10.0'	135° 10.0'	0.0	5	NW WAKAYAMA PREF		和歌山東部-S	8.4	172.5	252.6	28.2	5.2	6.8	S-00265	252.6	6.8	0.0	0	
133	2021/10/7 22:41	35° 35.5'	140° 06.2'	74.9	5.9	千葉県中部		品川-U	31.4	103.7	95.0	23.4	6.7	6.7	U-11634	103.7	6.7	4.4	0	
134	2000/1/28 23:21	43° 00.5'	146° 44.7'	58.5	7	OFF NEMURO PENINSULA		OFF NEMURO	98.7	83.3	151.3	43.2	6.7	6.6	F-01437	151.3	6.6	4.4	0	
135	2018/8/18 7:58	34° 50.7'	135° 37.3'	12.9	6.1	大宮東部		神戸東部-U	42.5	72.1	105.1	51.9	6.6	6.4	O-08865	105.1	6.6	3.8	0	
136	1981/1/23 13:58	42° 25.0'	142° 12.0'	130.0	6.9	HIDAKA REGION		十勝-M	9.3	95.6	127.4	53.5	6.4	6.5	M-00439	127.4	6.5	4.2	0	
137	2007/6/6 23:42	33° 20.0'	131° 29.7'	11.2	4.9	大分県北部		別府-U	38	90.6	113.3	58.5	5.8	6.5	U-01168	113.3	6.5	4.3	0	
138	2013/2/2 23:17	42° 42.1'	143° 13.6'	101.9	6.5	十勝地方南部		十勝-G	45.3	153.2	205.5	58.5	6.5	6.5	F-03220	205.5	6.5	0.0	0	
139	2002/11/4 13:36	30° 24.6'	131° 52.2'	35.2	5.9	山形県		山形-U	209	112.2	210.5	89.0	3.8	6.4	U-01838	210.5	6.4	4.4	0	
140	2008/7/24 0:26	39° 43.9'	141° 38.1'	108.1	6.8	岩手県沿岸北部		東北-G	55.9	248.2	239.2	129.3	5.3	6.4	F-02889	248.2	6.4	4.4	0	
141	2017/7/11 11:56	31° 23.0'	130° 37.2'	10.2	5.3	鹿野島		鹿野島-U	22.7	145.9	177.9	82.5	5.8	6.4	U-08070	177.9	6.4	4.4	0	
142	2016/11/22 5:59	37° 21.2'	141° 36.3'	24.5	7.4	福島県東部		福島-U	77.5	104.3	77.7	39.5	6.3	6.2	O-06846	104.3	6.3	3.8	0	
143	1989/11/29 3:25	39° 51.5'	143° 03.2'	0.0	7.1	FAIR OFF SANRIKU		宮古-S	95.4	105.5	93.8	37.5	6.2	5.9	S-02235	105.5	6.2	4.1	0	
144	2022/3/16 23:36	37° 41.8'	141° 37.4'	56.6	7.4	福島県東部		大船渡防地-U	146.6	102.5	94.7	48.9	6.2	6.2	U-01480	102.5	6.2	4.0	0	
145	2005/10/19 20:44	36° 22.9'	141° 02.6'	48.3	6.3	茨城県東部		常陸那珂-U	39.1	105.3	72.2	39.7	5.1	6.1	U-00756	105.3	6.1	3.8	0	
146	2019/8/18 23:23	37° 42.4'	141° 36.0'	45.2	6.4	福島県東部		福島-U	69.7	159.6	128.7	64.9	5.3	6.0	O-10271	159.6	6.0	4.0	0	
147	2004/11/29 3:52	41° 45.6'	145° 16.5'	48.2	7.1	栃木県東部		十勝-G	175.6	103.2	82.7	32.3	5.7	6.4	F-02261	103.2	5.7	4.1	0	
148	2011/11/24 19:25	41° 46.0'	142° 53.2'	43.2	6.2	清河川		清河-U	47.5	127.5	101.7	20.3	4.3	5.7	U-04272	101.7	5.7	4.3	0	
149	2015/5/18 1:12	38° 51.8'	142° 09.0'	46.2	6.8	茨城県東部		大船渡防地-U	39.8	92.2	112.1	40.5	2.2	5.7	U-04479	112.1	5.7	3.9	0	
150	2007/8/1 20:26	35° 20.1'	131° 30.7'	7.8	4.7	大分県北部		別府-U	3.8	185.1	124.8	65.3	5.5	6.2	U-01222	185.1	5.5	4.2	0	
151	2008/6/14 8:43	39° 01.8'	140° 52.8'	7.8	7.2	大分県中部	2008年岩手・宮城両県地震	大船渡-U	5.6	116	122.9	111.2	66.9	5.5	5.4	O-02658	122.9	5.5	4.0	0
152	2005/6/16 11:46	38° 09.0'	140° 16.7'	42.0	7.2	茨城県東部		宮古-U	168.4	127.5	98.1	47.9	5.3	4.6	F-02405	127.5	5.3	4.0	0	
153	2007/6/7 12:22	33° 19.0'	131° 26.5'	9.0	4.7	大分県北部		別府-U	21	188.5	177.1	59.9	5.2	5.3	U-01188	188.5	5.3	4.2	0	
154	2009/8/11 5:07	34° 47.2'	138° 30.0'	23.3	6.5	和歌山東部		和歌山-U	43.1	114.7	158.6	47.7	5.2	6.2	U-02021	158.6	5.2	4.3	0	
155	1985/7/30 3:24	35° 54.2'	140° 35.1'	42.6	5.3	SOUTHERN IBARAKI PREF		鹿島南-U	10.2	114.5	44.3	13.0	5.0	3.8	O-02639	114.5	5.0	3.9	0	
156	2022/3/16 23:34	37° 40.9'	141° 36.4'	57.2	6.1	福島県東部		福島-U	59.1	238.1	161.7	86.2	4.2	5.0	S-01461	238.1	5.0	4.1	0	
157	2023/2/25 22:27	42° 45.3'	145° 04.5'	63.0	6	前橋市		前橋-U	64.6	63.6	123.7	72.0	4.8	5.0	U-12915	123.7	5.0	4.1	0	
158	1989/5/13 2:58	42° 58.0'	142° 52.7'	108.6	6.2	KUSHIRO REGION		前橋-U	39.5	99.9	144.6	38.9	4.9	3.9	U-01446	144.6	4.9	4.1	0	
159	2011/8/1 23:58	34° 42.5'	138° 32.9'	22.8	6.2	駿河湾南部		御前崎-G	62.2	96.3	108.3	19.2	4.9	4.1	U-03138	108.3	4.9	4.0	0	
160	2022/3/16 23:36	37° 41.8'	141° 37.4'	56.6	7.4	福島県東部		東北-G	176.7	90.4	137.5	56.2	3.8	4.9	S-01481	137.5	4.9	3.7	0	
161	2004/12/6 23:15	42° 50.9'	145° 20.6'	45.8	6.9	福島県東部		福島-U	58.5	108.9	124.6	62.7	4.3	4.7	F-02281	124.6	4.7	4.0	0	
162	2017/2/28 16:48	37° 30.9'	141° 22.0'	52.4	5.7	大船渡防地		大船渡-U	22	120.1	121.5	42.2	4.2	4.2	O-07393	120.1	4.2	4.1	0	
163	2003/7/28 7:13	38° 24.3'	141° 10.3'	11.9	6.4	茨城県北部		仙台-G	19.1	220.9	184.2	120.4	4.4	4.2	S-F-01933	220.9	4.4	4.2	0	
164	1983/7/2 7:03	36° 54.5'	141° 11.3'	54.0	5.8	E OFF FUKUSHIMA PREF		小名浜東-U	24.9	75.1	123.0	40.8	3.2	4.3	U-01602	123.0	4.3	4.2	0	
165	2001/12/2 22:01	39° 23.9'	141° 15.8'	121.5	6.4	SOUTHERN IWATE PREF		宮古-G	68.6	144.9	189.6	79.8	4.3	4.1	F-01741	189.6	4.3	4.3	0	
166	2013/4/13 5:20	34° 25.1'	134° 49.7'	48.2	5.8	福島県東部		神津島南-D	44.5	87.1	107.4	47.2	4.1	4.2	U-01488	107.4	4.2	4.0	0	
167	1971/10/11 19:16	35° 54.0'	140° 33.0'	40.0	5.2	SOUTHERN IBARAKI PREF		鹿島-S	13.2	34.3	127.4	14.1	2.4	4.1	U-00847	127.4	4.1	3.5	0	
168	2010/3/13 12:32	37° 23.6'	141° 47.7'	40.3	6.2	福島県東部		福島-U	88	202.0	189.6	84.2	4.1	4.0	F-02852	202.0	4.1	4.2	0	
169	2013/5/18 14:47	37° 42.8'	141° 37.7'	48.3	6	福島県東部		福島-U	60.3	158.5	86.9	46.5	3.7	4.1	U-03447	158.5	4.1	3.9	0	
170	2001/4/2 2:45	35° 51.8'	142° 09.0'	46.2	6.8	CENTRAL SHIZUKA PREF		東北-U	92.1	104.3	102.2	41.8	3.7	4.2	F-01651	102.2	4.2	3.7	0	
171	2008/7/24 0:26	39° 43.9'	141° 38.1'	108.1	6.8	岩手県沿岸北部		大船渡防地-G	80.2	145.7	67.3	40.3	4.0	2.9	F-02890	145.7	4.0	3.9	0	
172	2010/3/14 17:08	37° 43.5'	141° 49.1'	39.8	6.7	福島県東部		福島-U	76.3	152.7	75.2	48.9	3.8	4.0	U-02832	152.7	4.0	3.7	0	
173	2021/10/28 4:46	40° 00.4'	142° 15.3'	56.2	5.9	福島県東部		宮古-U	48.3	84.7	157.4	96.1	4.0	4.8	O-13445	157.4	4.0	4.1	0	
174	2001/4/2 2:45	35° 51.8'	142° 09.0'	46.2	6.8	OFF NEMURO PENINSULA		東北-U	92.1	104.3	102.2	41.8	3.7	4.2	F-01651	102.2	4.2	3.7	0	
175	2005/9/21 11:25	43° 42.6'	146° 23.9'	102.9	6	福島県東部		福島-U	78.1	189.5	205.8	97.7	3.1	3.8	U-02422	205.8	3.8	4.2	0	
176	2016/10/20 11:49	35° 51.8'	140° 31.5'	37.0	5.3	茨城県北部		東北-U	17.1	113.9	85.1	36.7	3.8	2.9	U-07498	113.9	3.8	3.5	0	
177	1989/11/28 14:47	37° 42.8'	141° 37.7'	48.3	5.5	WESTERN TOTTOHI PREF		福島南-S	34	75.3	104.7	15.7	3.4	3.7	U-02251	104.7	3.7	3.9	0	
178	2015/5/18 1:12	38° 51.8'	142° 09.0'	46.2	6.8	茨城県東部		東北-U	56	98.5	109.2	41.8	2.0	3.6	O-04480	109.2	3.6	3.5	0	
179	2019/3/13 13:48	33° 48.1'	134° 54.8'	43.0	5.3	松野川		和歌山-G	50.9	56.9	111.3	25.2	2.8	3.6	U-00103	111.3	3.6	3.7	0	
180	2017/10/6 23:56	37° 05.3'	141° 09.3'	52.7	5.9	福島県東部		東北-U	26.8	184.7	119.2	57.8	3.5	3.0	O-08155	184.7	3.5	4.1	0	
181	2019/3/13 13:48	33° 48.1'	134° 54.8'	43.0	5.3	松野川		和歌山-G	50.9	70.6	125.3	35.4	3.1	3.5	U-03447	125.3	3.5	3.7	0	
182	1970/4/2 2:45	35° 45.0'	142° 03.0'	80.0	5.8	E OFF IWATE PREF		宮古-S	13.3	114.7	88.7	39.6	3.4	3.1						

付録D ハミルトニアン・モンテカルロ法の概要とパラメータのサンプリング結果

1. はじめに

本編では、ハミルトニアン・モンテカルロ法¹⁾²⁾（MCMC法の一つ）を用いてパラメータの事後分布からのサンプリングを行い、その結果に基づくFCのパラメータ推定を行った。本付録では、ハミルトニアン・モンテカルロ法の概要を説明するとともに、そのサンプリング結果について示す。

2. ハミルトニアン・モンテカルロ法(ハイブリッド・モンテカルロ法)の概要

ここでは、ベイズ統計学とハミルトニアン・モンテカルロ法の概要について述べる。ベイズ統計学では、確率の乗法定理から簡単な式変形を通して得られるベイズの定理（式（D1））を考える。

$$f(\theta|\mathbf{D}) = \frac{f(\mathbf{D}|\theta)f(\theta)}{f(\mathbf{D})} \quad (\text{D1})$$

ここに、 $\mathbf{D}$ はデータを表すベクトル、 θ はパラメータベクトルである。なお、式中の関数は便宜上全て $f(\cdot)$ として表記しているが、実際にはそれらは異なる関数である。 $f(\theta|\mathbf{D})$ はデータ $\mathbf{D}$ が与えられた時にパラメータ θ が得られる条件付き確率分布であり、ベイズ統計学では事後分布と呼ばれる。 $f(\mathbf{D}|\theta)$ はパラメータ θ が与えられた時にデータ $\mathbf{D}$ が得られる条件付き確率分布であり、尤度と呼ばれる。これは、付録Eで示す、これは最尤法における尤度関数に対応するものである。 $f(\theta)$ はパラメータ θ が従う確率分布であり、ベイズ統計学では事前分布と呼ばれる。 $f(\mathbf{D})$ はデータが得られる確率であるが、事後分布の積分値が1になるように調整する定数とも見ることができ、正規化定数とも呼ばれる。 $f(\mathbf{D})$ は、分母の $f(\mathbf{D}|\theta)f(\theta)$ を θ について周辺化にしたものとも捉えることができる。

伝統的統計学では、パラメータ θ を確率変数と捉えはしないが、パラメータ θ を確率変数と捉えてその確率分布を考えるところがベイズ統計学の大きな特徴である。これは、伝統的統計学に基づく最尤法との比較という面では、その尤度関数に、パラメータ θ の事前分布 $f(\theta)$ を更に乗じた関数（事後分布）をベイズ統計学では考えているとの捉え方もできる。更に、ベイズ統計学では、パラメータ θ の更にその事前分布（階層事前分布）を考えることもある。そのため、ベイズ統計学に基づく事後分布では、その平均値、最頻値、任意のパーセンタイル等を解析的に求めることが難しい場合も多い。特にそのような場合にMCMC法は有用であり、事後分布に応じてパラメータ θ を直接サンプリングして、そのサンプルから、平均値、最頻値、任意のパーセンタイル等を求めることができる。本稿では、その平均値をFCのパラメータの推定値として採用することとしたが、平均値の算出には積分操作が必要になるため、MCMC法を用いればその積分操作をモンテカルロ積分として計算することができる。本稿では、MCMCでサンプリングしたパラメータからモンテカルロ積分で計算した平均値として推定したパラメータの値をEAP推定値と呼んでいる。

MCMC法には、ギブスサンプリング、メトロポリス・ヘイスティングス法、ハミルトニアン・モンテカルロ法等がある。ギブスサンプリングはサンプリングが容易であるものの、事後分布は、直接乱数が生成できる良く知られた確率分布である必要があることから、用途が限定される。メトロポリス・ヘイスティングス法については付録Eでその詳細を示すが、次のステップでのサンプリング候補を選定するための提案分布の設定に任意性が大きく、試行錯誤が必要な場合も少なくない。事後分布からのサンプリングでは、高次元空間で平均移動距離が長くとれ、同時にサンプリング候補の受容率を高く保てる方法が有効であるが、ハミルトニアン・モンテカルロ法はその要請を満たす方法である²⁾。

ハミルトニアン・モンテカルロ法では、式（D2-1）、式（付D2-2）に示すハミルトンの正準方程式（運動方程式）に従う運動を考えることによりサンプリングを行う。

$$\frac{d\mathbf{q}}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{p}} \quad (\text{D2-1})$$

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{q}} \quad (\text{D2-2})$$

ここに、 H はハミルトニアン（運動エネルギー K とポテンシャルエネルギー U の和）、 $\mathbf{q}$ は一般化座標ベクトル、 $\mathbf{p}$ は一般化運動量ベクトル、 t は時間である。ハミルトニアン・モンテカルロ法では、事後分布 $f(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D})$ と独立な標準正規乱数を並べたベクトル $\mathbf{p}'$ の同時分布 $(f(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{p}'|\mathbf{D}))$ を考える。 $\mathbf{p}'$ は、 $\boldsymbol{\theta}$ と $\mathbf{D}$ とは独立としたので、式（D3）のように変形できる。

$$f(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{p}'|\mathbf{D}) = f(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D})f(\mathbf{p}') \quad (\text{D3})$$

次に、 $f(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{p}'|\mathbf{D})$ について、 $f = \exp(\log(f))$ という指数と対数の関係を適用して変形すると式（D4）のようになる。

$$f(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{p}'|\mathbf{D}) = \exp\left(\log(f(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D})) + \log(f(\mathbf{p}'))\right) \quad (\text{D4})$$

$\mathbf{p}'$ は独立な標準正規乱数であり、共分散成分ももたないことから、式（D5）のように変形できる。

$$f(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{p}'|\mathbf{D}) = \exp\left(\log(f(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D})) + \sum_i \log\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}p_i^2\right)\right)\right) \quad (\text{D5})$$

サンプリングにおいて、確率分布の定数倍の違いは考慮する必要がないことから、式（D6）のように変形できる。

$$f(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{p}'|\mathbf{D}) = \exp\left(\log(f(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D})) - \frac{1}{2} \sum_i p_i^2\right) \quad (\text{D6})$$

ここで、 $-U(\boldsymbol{\theta}) = \log(f(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D}))$ と文字の置き換えを行うと、式（付D7）が得られる。

$$f(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{p}'|\mathbf{D}) = \exp\left(-U(\boldsymbol{\theta}) - \frac{1}{2} \sum_i p_i^2\right) \quad (\text{D7})$$

式（付D-7）の指数の部分に符号を付けたものは、運動エネルギー K とポテンシャルエネルギー U の和で表される H はハミルトニアン H の形をしていると捉えることができる。つまり、式（付D8-1）、式（付D8-2）のように扱うことができる。

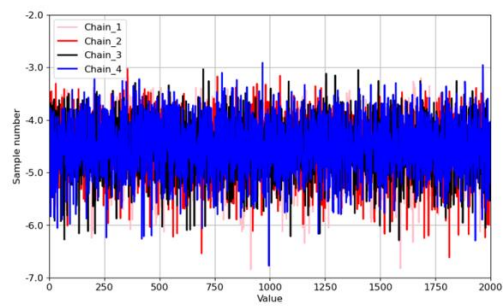
$$f(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{p}'|\mathbf{D}) = \exp(-H(\boldsymbol{\theta})) \quad (\text{D8-1})$$

$$H(\boldsymbol{\theta}) = -U(\boldsymbol{\theta}) - \frac{1}{2} \sum_i p_i^2 \quad (\text{D8-2})$$

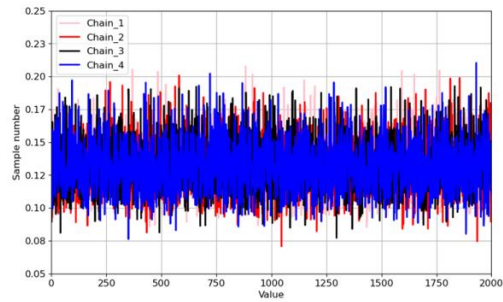
ハミルトニアン・モンテカルロ法では、この関係を使って、ハミルトンの正準方程式（運動方程式）に従う運動を考えることで、事後分布 $f(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D})$ に従うパラメータ $\boldsymbol{\theta}$ のサンプリングを行う。ハミルトンの正準方程式は、リープフロッグ法による数値積分で計算されることが多い。その上で、ハミルトンの正準方程式に従う運動を止めた位置をサンプリングこの候補点として、詳細釣り合い条件を使用してその候補を受容するか否かを決定する。この方法は、メトロポリス・ヘイスティングス法と同様であるため、付録Eにて説明する。また、実際にリープフロッグ法による数値積分を行うには、運動時間とステップサイズを設定する必要があり任意性がある。この運動時間とステップサイズを設定法としてはNUTS法³⁾があるが、本研究では、このリープフロッグ法による数値積分についてNUTS法を実装したstan⁴⁾で計算を実施した。

3. ハミルトニアン・モンテカルロ法によるパラメータのサンプリング結果

本稿で実施したハミルトニアン・モンテカルロ法によるパラメータのサンプリング結果のトレースプロットとヒストグラムをそれぞれ図E-1、図E-2に示す。トレースプロットを確認すると、ある一定の値の周りに上下するようなサンプリング結果が得られているため、定常分布に収束していると考えられる。また、ヒストグラムからは、分布の多峰性は確認されなかったが、分布の左右の裾野は非対称な結果となった。事後分布に、多峰性や非対称性がある場合であっても、MCMC法を用いれば、それに応じたパラメータをサンプリングすることができ、パーセンタイル値等の計算が容易に行えるのが利点である。

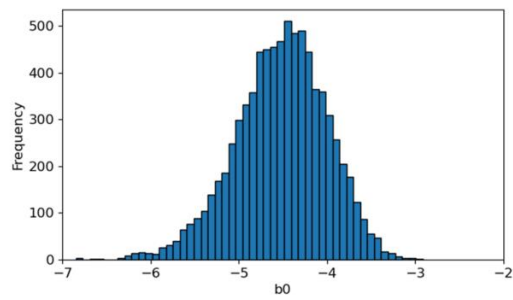


(a)パラメータ β_0 の結果

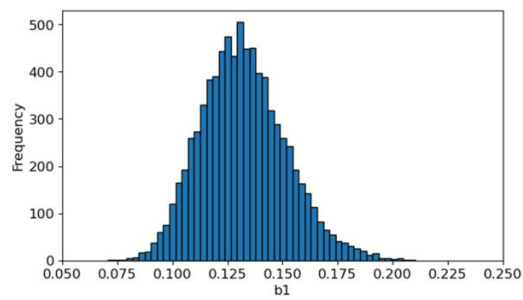


(b)パラメータ β_1 の結果

図-E-1 サンプルしたパラメータのトレースプロット



(a)パラメータ β_0 の結果



(b)パラメータ β_1 の結果

図-E-2 サンプルしたパラメータのヒストグラム

(パラメータ β_0 , β_1 は本編中に記載のものに対応)

本稿では、このサンプリング結果に基づく、モンテカルロ積分（サンプリング結果の算術平均）により、平均値（EAP推定値）を計算している。

参考文献

- 1) Duane, S., Kennedy, D., Pendreton, B. and Roweth, D.: Hybrid Monte Carlo, Physics letters, 1987.
- 2) 豊田秀樹: 基礎からのベイズ統計学 ハミルトニアンモンテカルロ法による実践的入門, 朝倉書籍, 2015.
- 3) Hoffman, f. and Gelman, A.: The No-U-turn sampler, Adaptively setting path lengths in Hamiltonian Monte Carlo, Journal of Machine Learning Research 15, 2014.
- 4) Stan, (<https://mc-stan.org/>).

付録E 最尤法およびランダムウォークメトロポリス・ヘイスティングス法（モンテカルロ法） によるパラメータ推定の計算方法・計算結果

1. はじめに

本文中では、地震フラジリティ曲線（FC）をハミルトニアン・モンテカルロ法により構築したが、本付録ではその他の計算が容易な方法として、最尤法およびランダムウォークメトロポリス・ヘイスティングス法（モンテカルロ法）によるパラメータ推定についても、参考として計算方法の概要と計算結果を示す。

2. 最尤法

(1) 適用したロジスティック関数

本研究でFCに適用した関数は、下式(E1)のとおりである。

$$\sigma(\beta_0 + \beta_1 x) = \frac{1}{1 + \exp(-(\beta_0 + \beta_1 x))} \quad (E1)$$

ここに、 x ：説明変数（速度PSI値）， β_0, β_1 ：ロジスティック関数のパラメータ， σ ：ロジスティック関数である。ロジスティック関数を用いた回帰モデルは、「被災=1，無被災=0」など二値で表現できる結果の確率（0～1の範囲）を予測するモデルとして利用されることが多い。

(2) 最尤法の適用

最尤法は、与えられたデータから、それが従うと仮定した確率分布の母数（パラメータ）を点推定する方法である。具体的には、尤度が最大になるようなパラメータを推定し、推定されたパラメータは最尤推定量(Maximum likelihood estimator)と呼ばれる。

本文中の再掲となるが、本研究における諸条件を説明する。まず、本モデルの被説明変数である、港湾の被害の有無を表す変数 y_n （ここに、 n はサンプルのインデックスであり、1からサンプル・サイズ N までの自然数を取る。）は確率変数であると仮定した。そして、 y_n はその実現値として、被害時に1，無被害時に0の値を取るとし、ベルヌーイ分布に従うと仮定した。その上で、ベルヌーイ分布の母数 q は、本モデルの説明変数である、個々のデータの速度PSI値 x_n に依存する確率変数であると仮定した。 n 番目のサンプルに対応する q であることを明確化するためにこれを q_n で表すと、尤度関数 L は下式のとおりとなる。

$$L(\beta_0, \beta_1) = \prod_{n=1}^N q_n^{y_n} (1 - q_n)^{1-y_n} \quad (E2)$$

$$q_n = \sigma(\beta_0 + \beta_1 x_n) \quad (E3)$$

式(E2)が尤度関数であり、パラメータ (β_0, β_1) の関数であり、全サンプル($N=264$)の尤度を全て乗じたものである。式(E3)は、各サンプルの速度PSI値 x_n をロジスティック関数に入力して得られた数値が、式(E2)におけるベルヌーイ分布の母数 q_n として用いることを示している。なお、 N 個のデータは互いに独立であることを仮定している。

本研究では、式(E2)に示される尤度関数の値を最大化するパラメータ (β_0, β_1) が、尤もらしいパラメータ（最尤推定値）となる。なお、本問題はロジスティック関数を利用した回帰であり、ロジスティック回帰とも呼ばれる。

(3) 計算方法・計算結果

上述した最尤推定は、統計解析用のプログラミング言語「R」(<https://cran.ism.ac.jp/>)のパッケージを利用して計算した。以下、「R」による計算内容と計算結果を示す。

まず、「R」による、最尤法に基づくロジスティック回帰の計算コードを図-E.1に示す。概要を説明すると、2行目で解析対象データ(read.csv)を読み込み、6行目でロジスティック回帰(最尤法による)によるパラメータ推定を行っている。7～9行目で図化し、10行目で結果を表示している。図-E.2に解析対象データの先頭部分を示す。

以上の計算より、最尤推定されたパラメータとして、 $(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) = (-4.4128, 0.1275)$ が得られた。これらのパラメータを式(E3)に入力することにより、地震動指標として速度PSI値を利用した地震 fragility 曲線が得られる(図-E.3)。

```
1 #データ入力等
2 data <- read.csv("C:/r_home/FC_PSI/akiyama/PSI_Data.csv",heade=T)
3 attach(data)
4 par(mfrow=c(1,2),mar=c(3,3,1, 1))
5 #ロジスティック回帰分析
6 cal <- glm(damage~PSI,family=binomial)
7 plot(PSI,damage)
8 lines(PSI,cal$fit)
9 abline(h=0.5,lty=2)
10 summary(cal)
```

図-E.1 「R」による計算コード

id	damage	PSI
1	1	110.7
2	1	108.0
3	1	101.5
4	1	98.8
5	1	97.3
6	1	82.9
7	1	79.0
8	1	78.2
9	1	75.5
10	1	75.1
11	1	74.2

図-E.2 解析対象データ(先頭部分)

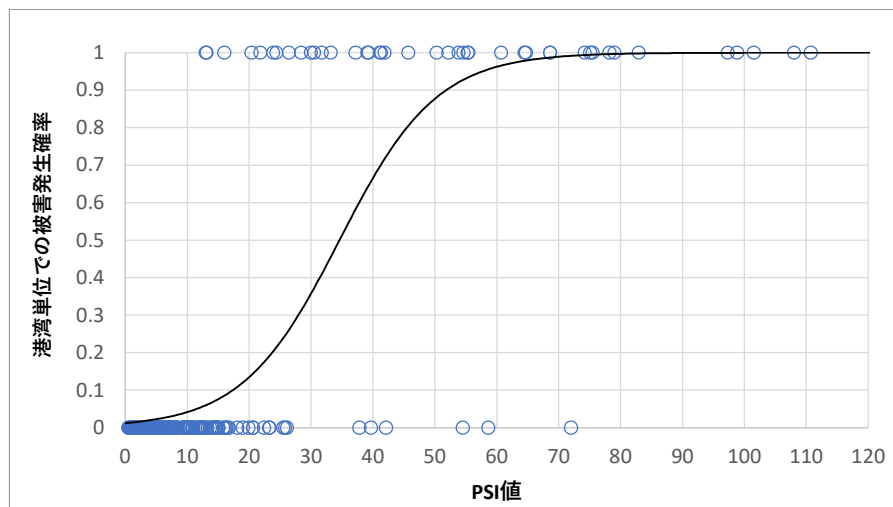


図-E.3 最尤法による地震 fragility 曲線
(係留施設を対象とした港湾単位での速度 PSI 値を指標とした被害発生確率)

3. ランダムウォークメトロポリス・ヘイスティングス法（モンテカルロ法）

(1) 概要

本文中で述べたとおり，本研究では，速度 PSI 値を説明変数，被害発生確率（被害率）を従属変数として，ベイズ・モデルにより定式化した FC（被害有無の確率を表現）を構築した．FC の関数としてはロジスティック関数を採用し，マルコフ連鎖モンテカルロ法 [MCMC] を用いて，ロジスティック関数のパラメータ (β_0, β_1) の事後分布からサンプリングを行い，パラメータの事後期待値 [EAP] や被害率のベイズ信頼区間など評価した．また，パラメータの事後分布は MCMC のアルゴリズムの1つであるハミルトニアンモンテカルロ法を実装した Stan¹⁾ による自作のプログラムにてパラメータをサンプリングした（本手法による計算方法・計算結果については付録 D に示す．）．

以上に示す方法では，Stan の部分がある意味ブラックボックスになってしまう．このため，本付録では，計算過程がトレースできる手法として，MCMC アルゴリズムの一つであるメトロポリス・ヘイスティングス法 (MH 法と以下呼称する．) を取り上げ，その中でさらにランダムウォーク MH 法（以下，RWMH 法と称す．）と呼ばれる手法を適用した計算結果を紹介する．なお，(2) に示す RWMH 法のアルゴリズムの内容は，文献 2) の該当箇所を要約したものであり，RWMH 法の詳細については同文献を参考にされたい．

(2) RWMH 法の概要

マルコフ連鎖によるサンプル（パラメータ θ ）が定常分布に収束するための十分条件は「詳細釣り合い条件」である．この条件を満たすようにサンプルを発生させるアルゴリズムが MH 法であり，文献 2) を参考にアルゴリズムを整理すると以下のとおりとなる．なお，パラメータ θ は複数のパラメータにより構成されるベクトルであり，今回の場合は式 (E3) に示すロジスティック関数の 2 つのパラメータ (β_0, β_1) によるベクトルである．

- 1) 提案分布 $q(\cdot | \theta^{(t)})$ を利用し，乱数を発生させ， $\theta^{(t)}$ （現時点 t におけるパラメータの値）の次の候補点 $\theta^{(a)}$ を定める．
- 2) 以下の命題を判定する．

$$q(\theta^{(a)} | \theta^{(t)}) f(\theta^{(t)}) > q(\theta^{(t)} | \theta^{(a)}) f(\theta^{(a)}) \quad (\text{E4})$$

〔真の場合〕： 下式の係数 r を使って確率的補正を行う．

すなわち，確率 r で $\theta^{(a)}$ を受容し， $\theta^{(t+1)} = \theta^{(a)}$ とする（次の候補点へ移動）．

そして，確率 $1-r$ で $\theta^{(a)}$ を破棄し， $\theta^{(t+1)} = \theta^{(t)}$ とする（現在の点に留まる）．

$$r = \frac{q(\theta^{(t)} | \theta^{(a)}) f(\theta^{(a)})}{q(\theta^{(a)} | \theta^{(t)}) f(\theta^{(t)})} \quad (\text{E5})$$

〔偽の場合〕： 確率 1 で必ず $\theta^{(a)}$ を受容し， $\theta^{(t+1)} = \theta^{(a)}$ とする（現在の点に留まる）．

- 3) $t = t + 1$ とし，1) へ戻る．

RWMH 法は，マルコフ連鎖によるサンプルの次の提案候補を，下式 (E6) とする方法である．

$$\theta^{(a)} = \theta^{(t)} + \varepsilon \quad (\text{E6})$$

ここで， ε はベクトルであり，その各要素は相互に独立な 1 次元正規分布（平均 0）など対称な確率分布からの実現値である．

そして、対称な分布を選ぶため、提案分布には式(E7)の関係が成立するため、RWMH 法における補正係数 r は下式(E8)となる。

$$q(\theta^{(a)} | \theta^{(i)}) = q(\theta^{(i)} | \theta^{(a)}) \quad (E7)$$

$$r = \frac{f(\theta^{(a)})}{f(\theta^{(i)})} \quad (E8)$$

さらに、式(E8)中の $f(\cdot)$ はそもそも事後分布であり、式(E9)に示す分布に関するベイズの定理（実測データ $\mathbf{D}$ が得られた条件下でのパラメータの事後分布）により表現されるため、下式(E9)を式(E8)に代入すると、補正係数 r は式(E10)のように表すことができる。

$$f(\theta | \mathbf{D}) = \frac{p(\mathbf{D} | \theta) f(\theta)}{p(\mathbf{D})} \quad (E9)$$

$$r = \frac{f(\theta^{(a)} | \mathbf{D})}{f(\theta^{(i)} | \mathbf{D})} = \frac{\frac{p(\mathbf{D} | \theta^{(a)}) f(\theta^{(a)})}{p(\mathbf{D})}}{\frac{p(\mathbf{D} | \theta^{(i)}) f(\theta^{(i)})}{p(\mathbf{D})}} = \frac{p(\mathbf{D} | \theta^{(a)}) f(\theta^{(a)})}{p(\mathbf{D} | \theta^{(i)}) f(\theta^{(i)})} \quad (E10)$$

ここで、式(E10)における $p(\mathbf{D} | \theta^{(a)})$ および $p(\mathbf{D} | \theta^{(i)})$ は、パラメータが所与の場合の実測データ $\mathbf{D}$ が得られる条件付き確率であり、尤度である。また、式(E10)中の $f(\theta)$ は、パラメータ θ の事前分布である。

(3) RWMH法の本課題への適用

本研究の対象とする問題における尤度を具体的に書き下すと、パラメータ θ はロジスティック関数の 2 つのパラメータ (β_0, β_1) であることを考慮すると、式(E2)および式(E3)を用いると下式(E11)のとおりとなる。

$$p(\mathbf{D} | \beta_0, \beta_1) = \prod_{n=1}^N q_n^{y_n} (1 - q_n)^{1-y_n} \quad (E11)$$

そして、補正係数 r の分子と分母はともにカーネル (Kernel) と呼ばれるが、パラメータ θ の事前分布 $f(\theta)$ は台の広い範囲 $[-U, +U]$ (U : は正の実数) の連続一様分布で与えられるため、ロジスティック関数のパラメータ (β_0, β_1) の事前分布は式(E12)のとおりとなる。また、カーネル K は式(E13)となる。

$$f(\beta_0) = \frac{1}{2U}, \quad f(\beta_1) = \frac{1}{2U} \quad (E12)$$

$$K(\beta_0, \beta_1) = \left[\prod_{n=1}^N q_n^{y_n} (1 - q_n)^{1-y_n} \right] f(\beta_0) f(\beta_1) \quad (E13)$$

以上により、候補点となるパラメータ $\theta^{(a)} = (\beta_0^{(a)}, \beta_1^{(a)})$ と、現時点 (ステップ t) におけるパラメータ $\theta^{(i)} = (\beta_0^{(i)}, \beta_1^{(i)})$ を式(E11)に代入すると、式(E10)により補正係数 r を求めることができる。

最後に，今回の RWMH 法による計算手順を整理したもの図-E. 4 に示す．

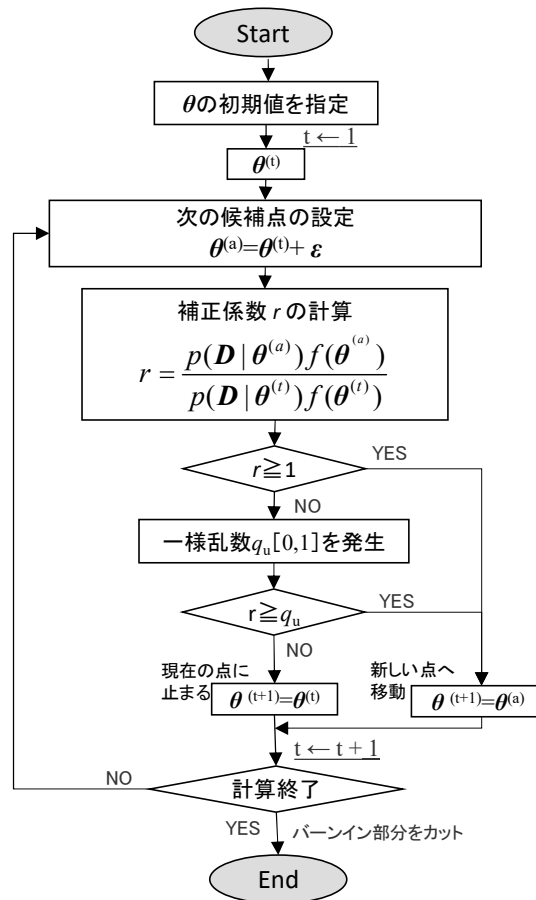


図-E.4 RWMH 法による計算手順

(4) RWMH法による計算方法・計算結果

以上に示したRWMH法を用いて、ロジスティック関数のパラメータ (β_0, β_1) の事後分布からサンプリングを行う計算方法と計算結果を示す。なお、計算は統計解析用のプログラミング言語「R」 (<https://cran.ism.ac.jp/>) を利用した。また、計算プログラムは、文献3)にて解説されている独立MH法 (MH法に分類される手法) を用いたロジスティック回帰モデルの計算コード (Webサイト4) で提供されている) を、本研究に合わせてRWMH法へと修正したものを利用した。以下、「R」による計算内容と計算結果を示す。

RWMH法に基づくロジスティック回帰の計算コードを図-E. 5に示す。概要を説明すると、まず「1:データの読み込み」にて、図-E. 2に示す解析対象データを読み込む (ただし、読み込んだ速度PSI値を100で除している。)。 「2:事前の指定データの読み込み」では、パラメータの初期値等を設定する。 「3:MCMCの計算条件の設定」では、繰り返し計算回数やランダムウォークで発生させる乱数の確率分布の情報を与える。そして、 「4:ランダムウォーク型のMCMCの開始」にて、MCMCの計算を行う。これまでに説明したとおり、MCMCでは現在のパラメータから次の候補点を設定し、候補点と現地点のカーネルから補正係数を算定し、(2)および(3)のアルゴリズムに従い、次のパラメータ (サンプル) が決定される。これを所定の回数繰り返すことにより、題意に沿ったパラメータ (β_0, β_1) の事後分布からのサンプルが得られる。なお、 「3:MCMCの計算条件の設定」の中で、式(E12)に示すカーネルの計算にあたっては多数の掛け算が必要となるが、数値計算上の桁落ちを回避するためにプログラム上の計算は分子および分母のそれぞれのカーネルの対数を取り、足し算のみで一旦計算を行い (式(E14))、最後に式(E15)に示すとおりネイピア数で戻すことにより補正係数 r を計算している。

$$\log(K(\beta_0, \beta_1)) = \sum_{n=1}^N [y_n \times \log q_n + (1 - y_n) \times \log(1 - q_n)] + \log(f(\beta_0)) + \log(f(\beta_1)) \quad (\text{E14})$$

$$r = \exp\left(\log(K(\beta_0^{(a)}, \beta_1^{(a)})) - \log(K(\beta_0^{(t)}, \beta_1^{(t)}))\right) \quad (\text{E15})$$

```

setwd("C:/r_home/FC_PSI")

###1:データの読み込み###
Data <- read.csv("PSI_Data.csv")#作業フォルダにデータがあるとする
y <- Data[,2] #基準変数 (被災あり=1, 被災なし=0)
X <- cbind(1,Data[,3]/100) #説明変数行列 (切片含む) → PSI 値を 100 で割る。

###2:事前の指定###
#推定パラメータの数 (切片含む)
J <- ncol(X) # 今回は  $\beta_0$  と  $\beta_1$  の 2 パラメータ
#初期値の設定
theta_max <- 300 # 一様分布の幅の 1/2 → U
theta0_init <- runif(1,-theta_max,theta_max) #  $\beta_0$  は、-U～+U までの範囲の一様分布とする
theta1_init <- runif(1, -theta_max,theta_max) #  $\beta_1$  は、-U～+U までの範囲の一様分布とする
theta <- c(theta0_init,theta1_init) # MCMC における初期値 ( $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ) のを代入する
theta

###3:MCMC の計算条件の設定###
#繰り返し回数の指定
R <- 52000
#ランダムウォークの  $\varepsilon$  (正規分布) の設定
myu0 <- 0.0 #  $\beta_0$  に対対する  $\varepsilon$  の平均値
sig0 <- 1.0 #  $\beta_0$  に対対する  $\varepsilon$  の標準偏差
myu1 <- 0.0 #  $\beta_1$  に対対する  $\varepsilon$  の平均値
sig1 <- 1.0 #  $\beta_1$  に対対する  $\varepsilon$  の標準偏差
#乱数列を記録するオブジェクト
theta_trace <- matrix(0,R,J)
#移動した回数初期値
nm <- 0

###4:ランダムウォーク型の MCMC の開始###
#現在のパラメータの値を平均値とし、任意の標準偏差に従う正規分布にて次のパラメータ候補を計算
for(r in 1:R) {
  #現在のパラメータの値 theta +  $\varepsilon$ (平均 0,標準偏差  $\sigma$  の正規分布)
  theta1_c <- theta[[1]] + rnorm(1, myu0, sig0) # $\beta_0$  の次ステップの候補 →標準偏差は受容率を見ながら試行的に設定した
  theta2_c <- theta[[2]] + rnorm(1, myu1, sig1) # $\beta_1$  の次ステップの候補 →標準偏差は受容率を見ながら試行的に設定した
  theta_c <- c(theta1_c,theta2_c) # theta_c=( $\beta_0$  の次ステップの候補, $\beta_1$  の次ステップの候補)
  #
  #候補の事後確率密度のカーネル計算 (対数)
  v_c <- X%*%theta_c #線形モデルの部分 (今回は全 264 データの  $\beta_0$ (候補) +  $\beta_1$  (候補) ×PSI[i]を計算)
  LL_c <- sum(y*log(1/(1+exp(-v_c)))+(1-y)*log(exp(-v_c)/(1+exp(-v_c)))) #対数尤度の計算 (二項分布の対数尤度)
  LP_c <- log(1/(2*theta_max))+log(1/(2*theta_max)) #log(( $\beta_0$  の次ステップの候補の確率密度) × #( $\beta_1$  の次ステップの候補の確率密度) )
  K_c <- LL_c+LP_c #候補の事後分布のカーネル
  #
  #現在の事後確率密度のカーネル計算 (対数)
  v <- X%*%theta #線形モデルの部分 (今回は全 264 データの  $\beta_0$ (現在) +  $\beta_1$  (現在) ×PSI[i]を計算)
  LL <- sum(y*log(1/(1+exp(-v)))+(1-y)*log(exp(-v)/(1+exp(-v)))) #対数尤度の計算 (二項分布の対数尤度)
  LP <- log(1/(2*theta_max))+log(1/(2*theta_max)) #log(( $\beta_0$  の現ステップの確率密度) × #( $\beta_1$  の現ステップの確率密度) )
  K <- LL+LP #現在の事後分布のカーネル
  #
  #提案分布の計算
  alpha <- min(1,exp(K_c - K)) #補正係数 r (対数をネイピア数で戻して算出)
  #移動するか決定するプロセス
  if(alpha<1) { # $r(\theta)q(\theta_c|\theta)>r(\theta_c)q(\theta|\theta_c)$  のケース → 実際は、 $r(\theta)>r(\theta_c)$  のケース
    if(runif(1)<alpha) { # 確率的に移動する場合 →  $\text{rni}(\theta)$  は、0～1 の範囲の一様分布に従う乱数を発生
      theta <- theta_c #状態を移動
      nm <- nm+1#移動した回数を記録
    } else {#移動しない場合
      theta <- theta
    }
  } else { # $r(\theta)q(\theta_c|\theta)<r(\theta_c)q(\theta|\theta_c)$  のケース → 実際は、 $r(\theta)<r(\theta_c)$  のケース
    theta <- theta_c #状態を移動
    nm <- nm+1#移動した回数を記録
  }
  #状態の記録
  theta_trace[r,] <- theta # これまでのパラメータの推移が保管される
}
#
#移動率
nm/R
#PSI 値用に係数 ( $\beta_1$ ) を割り戻す###
theta_trace[,2] <- theta_trace[,2]/100

```

図-E.5 「R」による計算コード

次に、主要な計算条件を示す。まず、パラメータの事前分布は、「2:事前の指定データの読み込み」の計算コードに示すとおり、範囲 $[-300, 300]$ の一様分布を仮定した。繰り返し計算回数は、「3:MCMC の計算条件の設定」に示すとおり、52,000 回とし、ランダムウォークで発生させる乱数は平均 0、標準偏差 1 の正規分布とした。標準偏差は、試行錯誤的に設定した。

以上により計算された結果を、図-E. 6に示す。本計算では52,000回の計算を行ったが、左側の図(a)は全てのデータをプロットしたもの、右側の図(b)はバーンイン期間として冒頭の12,000データを除外したデータのプロットである。各図には、上段にパラメータ β_0 のトレースプロット(縦軸はパラメータのMCMCサンプルの値、横軸は計算ステップ数とした図面)、中段にパラメータ β_1 のトレースプロット、下段に両パラメータ (β_0, β_1) の相関図を示している。

図(a)より、計算開始時点ではパラメータは大きく外れている (β_0 の初期値は150程度、 β_1 の初期値は-170程度(速度PSI値を100で除しているため、グラフの数値の100倍の数値)) が、千回程度以降は両パラメータのサンプルともある程度の幅の中に収まっていることがわかる。図(b)は、バーンイン期間(冒頭の12,000回の計算結果)を除外した40,000回のMCMCサンプルを同様に図化したものである。本図より、両パラメータとも一定の範囲に収束していることがわかる。また、図(b)下段の相関図より、両パラメータのMCMCサンプルは一定の相関を有することがわかる。これは、パラメータ β_0 が正(負)の方向に増加するとロジスティック関数は左側(右側)に平行移動するが、その条件下では同関数の立ち上がりは緩やかに(急峻に)ならないと観測データから外れるため、結果としてパラメータ β_1 は小さな(大きな)値をとるためである。

最後、右側の図(b)のサンプルから得られた事後分布(近似した確率密度関数)を図-E. 7に示す。この結果より、パラメータ (β_0, β_1) の分布特性等を把握することができる。サンプルの結果からパラメータの事後平均は、 $(\bar{\beta}_0, \bar{\beta}_1) = (-4.5569, 0.1331)$ であった。また、 β_0 の95%信用区間は $[-5.654, -3.628]$ 、 β_1 の95%信用区間は $[0.0987, 0.174]$ であった。

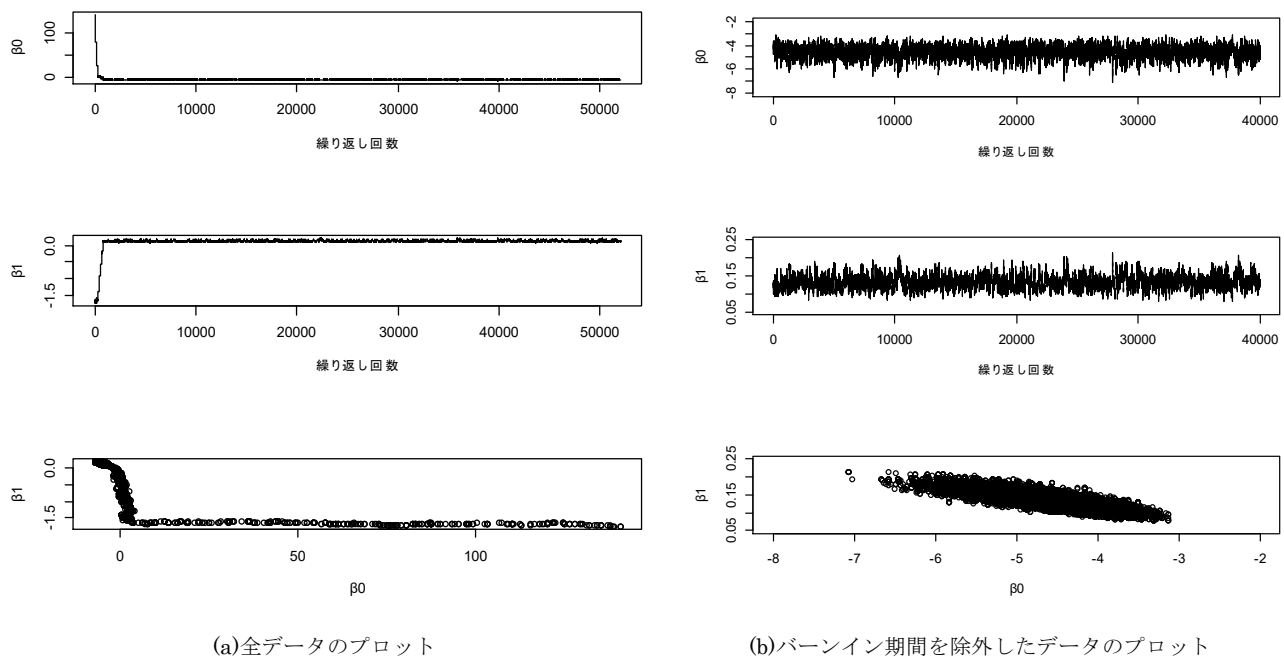


図-E. 6 RWHM 法による計算結果

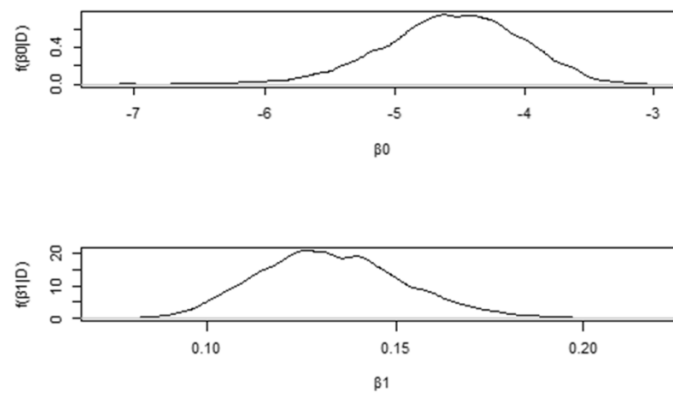


図-E.7 パラメータの事後分布

参考文献

- 1) Stan, (<https://mc-stan.org/>).
- 2) 豊田秀樹: 基礎からのベイズ統計学 ハミルトニアンモンテカルロ法による実践的入門, 朝倉書籍, 2015.
- 3) 朝野熙彦 [編著], 土田尚弘・小野 滋 [著] : ビジネスマンがはじめて学ぶ ベイズ統計学, 朝倉書店, 2017.
- 4) 新倉書店 (https://www.asakura.co.jp/detail.php?book_code=12212), 最終閲覧日 2024.4.1.
- 5) 新倉書店 (https://www.asakura.co.jp/detail.php?book_code=12212), 最終閲覧日 2024.4.1.

付録F ROC曲線およびAUCによる地震フラジリティ曲線（FC）の性能評価， およびカットオフ値の設定による予測の正確さの向上に関する基礎的情報と計算方法

1. はじめに

本付録では、地震フラジリティ曲線（FC）を用いた速度PSI値に基づく被災／無被災の分類の識別性能の評価に役立つROC曲線（Receiver operating characteristic curve），および識別力の指標であるAUC（The area under the ROC curve）と、被災／無被災の予測の正確さを向上させる速度PSI値におけるカットオフ値を求めるための詳細な計算方法を説明する。

2. ROC曲線，AUC，カットオフ値に関する基礎的事項（概説）

1) ROC曲線

ROC曲線は二値応答モデルの性能評価に用いられ、再現率と偽陽性率との関係を表す座標平面上の曲線である。再現率は真陽性率や感度とも呼ばれ、実際に被災有りであったケースのうち、被災有りと予測したケースの割合のことである。また、偽陽性率とは、実際には無被災であったケースのうち、被災有りと予測したケースの割合のことである。ROC曲線を扱う座標平面において、縦軸は再現率、横軸は偽陽性率である。

2) AUC

AUCはROC曲線の下側の面積のことである。再現率と偽陽性率の範囲はそれぞれ[0,1]であり、モデルが完璧な識別力を有する場合、AUCは1.0となる。一方、モデルの識別力が完全なランダムに従う場合（言い換えると、モデルの識別力が表裏の出る確率0.5のコイン投げと同水準の場合）、AUCは0.5となる。

3) カットオフ値

FCに速度PSI値を代入すると、被災／無被災の予測値が[0,1]の範囲で出力される。通常であれば0.5を閾値として、速度PSI値を求めるようにFCを変換した式に0.5を代入した時の、速度PSI値をカットオフ値として設定する。速度PSI値がカットオフ値よりも高い場合に「被災有り」、低い場合に「無被災」と判定する。しかし、この判定の正確さは、カットオフ値をどこに設定するかによって変化する。もし、カットオフ値を適切に設定することができれば、被災／無被災の予測の正確さは向上して、FCの有用性を高めることができる。

4) 今回データによる具体的な計算方法

本検討では、全ての計算にデータ解析環境R version 4.2.2¹⁾を用いた。

ROC曲線とAUCの算出には、RのパッケージROCR²⁾を用いた。得られたAUCの値の評価基準は、文献³⁾に従った。適切なカットオフ値の探索には、RのパッケージOptimalCutpoints⁴⁾の関数optimal.cutpointsを用いた。予測の正確さを向上させるカットオフ値の決定基準は数多く存在するが⁴⁾、本付録では最も一般的な次の3種類の方法を用いた⁵⁾。1つ目は、Youden's index method⁶⁾である。この方法で扱うYouden's indexの値は、再現率から偽陽性率を差し引いて求められ、完璧な識別力を有するROC曲線の場合、1となる。ROC曲線上の各点について、Youden's indexを算出して比較し、1に最も近くなる（最大値となる）点と対応する閾値から、カットオフ値を導く。2つ目は、再現率の値が1-偽陽性率（＝特異度）の値と一致するROC曲線上の点と対応する閾値から、カットオフ値を導く方法（Sensitivity equal to specificity method）である⁷⁾。この方法は、ROC曲線の再現率の値と、1-偽陽性率の値の差の絶対値が最も0に近い（最低値となる）点と対応する閾値から、カットオフ値を導く。3つ目は、ROC曲線を扱う座標平面上の点(0,1)に最も近いROC曲線上の点と対応する閾値から、カットオフ値を導く方法（ROC01 method）である⁸⁾。この方法は、ROC曲線と座標(0,1)との距離が最も0に近い（最低値となる）点と対応する閾値から、カットオフ値を導く。これらの方法で得られたカットオフ値における被災／無被災の予測の正確さを確認するため、正しい予測の割合を表す正確度（（真陽性+真陰性）/（真陽性+偽陽性+偽陰性+真陰性））、および再現率を用いた。

これらの計算のため、以下のRコードを用いた。

```
data <- read.csv("C:/PSI_DataV2.csv",header=T)#基本データ読み込み
b0 <- -4.5212
b1 <- 0.13223
disc <- 1/(1+exp(-b0-b1*data$PSI))#速度PSI値から被害率を推定するFC式
head(data)

#ROC曲線とAUC
#install.packages("ROCR")
library(ROCR)
pred <- prediction(data$PSI,data$Damage)
perf <- performance(pred,measure="rec",x.measure="fpr")
rec0 <- perf@y.values[[1]][2:162]#再現率
fpr0 <- perf@x.values[[1]][2:162]#偽陽性率
cut0 <- perf@alpha.values[[1]][2:162]#カットオフ値
thre0 <- 1/(1+exp(-b0-b1*cut0))
plot(perf,lwd=2,cex.lab=1.5,xaxis.cex.axis=1.3,yaxis.cex.axis=1.3,colorize=T)#ROC曲線の作図
abline(a=0,b=1,lwd=0.5)
auc <- performance(pred,measure="auc")
auc@y.values[[1]]#AUC=0.9768876
yo <- rec0-fpr0#Youden's index
eq <- abs(rec0-(1-fpr0))#Se=Sp
di <- sqrt((0-fpr0)^2+(1-rec0)^2)#Minimum distance
dset <- data.frame(rec0,fpr0,cut0,thre0,yo,eq,di)#データセット
yoo <- dset[dset$yo==max(dset$yo),]
yoo#Youden's index最大のケース
matplot(yoo[,2],yoo[,1],pch=0,col=2,cex=2,add=T)#ROC曲線上にプロットする
eqo <- dset[dset$eq==min(dset$eq),]
eqo#abs(Se-Sp)最小のケース
matplot(eqo[,2],eqo[,1],pch=2,col=2,cex=2,add=T)#ROC曲線上にプロットする
dio <- dset[dset$di==min(dset$di),]
dio#座標(0,1)までの距離が最小のケース
matplot(dio[,2],dio[,1],pch=4,col=2,cex=2,add=T)#ROC曲線上にプロットする
legend(x=0.7,y=0.2,legend=c("Youden","Se=Sp","Min_dist"),pch=c(0,2,4),pt.cex=1.5,col=2,cex=1.2)

#再現率，偽陽性率，閾値の関係の3次元プロット
#install.packages("rgl")
library(rgl)
plot3d(fpr0,rec0,thre0,xlab="False positive rate",ylab="Recall",zlab="Threshold")

#計算結果の出力
path_out <- 'C:/ '#データの保存場所を指定
write.csv(dset,paste(path_out,'dset.csv',sep=""),quote=F)#データ書き出し

#特定のカットオフ値における混合行列と正確度
cut1 <- yoo[,3]#Sensitivity equal to specificity methodのカットオフ値を扱う場合は「eqo[,3]」と入力する
upper1 <- data$Damage[data$PSI>=cut1]#被災有りと予測されたデータ
tp1 <- length(upper1[upper1==1])#真陽性
fp1 <- length(upper1[upper1==0])#偽陽性
lower1 <- data$Damage[data$PSI<cut1]#無被災と予測されたデータ
fn1 <- length(lower1[lower1==1])#偽陰性
tn1 <- length(lower1[lower1==0])#真陰性
matrix(c(tp1,fn1,fp1,tn1),nrow=2,ncol=2)#混同行列
(tp1+tn1)/(tp1+fp1+fn1+tn1)*100#正確度

#閾値が0.5の場合の混合行列と正確度
threshold <- 0.5
cut2 <- (log(threshold/(1-threshold),exp(1))-b0)/b1#回帰の逆推定
cut2#閾値が0.5の時にカットオフ値となる速度PSI値
upper2 <- data$Damage[data$PSI>=cut2]#被災有りと予測されたデータ
```

```
tp2 <- length(upper2[upper2==1])#真陽性
fp2 <- length(upper2[upper2==0])#偽陽性
lower2 <- data$Damage[data$PSI<cut2]#無被災と予測されたデータ
fn2 <- length(lower2[lower2==1])#偽陰性
tn2 <- length(lower2[lower2==0])#真陰性
matrix(c(tp2,fn2,fp2,tn2),nrow=2,ncol=2)#混同行列
(tp2+tn2)/(tp2+fp2+fn2+tn2)*100#正確度
```

計算に用いたデータは、データの識別番号”ID”，被災／無被災をまとめた”Damage”，速度PSI値をまとめた”PSI”から成る．”Damage”は、被災有りを表す1と、無被災を表す0で構成される．”ID”，”PSI”，”Damage”のデータ数はそれぞれ264であり、以下のようにPSI_DataV2.csvに格納した．

```
> head(data)
  id Damage  PSI
1  1      1 110.7
2  2      1 108.0
3  3      1 101.5
4  4      1  98.8
5  5      1  97.3
6  6      1  82.9
```

3. ROC曲線およびAUCによるFCの性能評価，およびカットオフ値の設定による予測の正確さの向上に関する計算結果

AUCの値は0.98であり、最も高い評価である極めて優れた識別力（Outstanding discrimination）と判定された．この傾向は、ROC曲線で視覚的に確認できた（図-F.1）．Youden’s indexの最大値は0.866であり、カットオフ値となった速度PSI値は20.4であった．このとき、再現率は0.929、偽陽性率は0.063、閾値は0.139であった（表-F.1，図-F.2）．ROC01 methodにおける座標(0,1)までの距離の最小値は0.095であり、カットオフ値となった速度PSI値はYouden’s index methodと同じ20.4であった．Sensitivity equal to specificity methodにおいて、再現率の値と1-偽陽性率の値の差の絶対値の最小値は0.00064であり、カットオフ値となった速度PSI値は19.0であった．このとき、再現率は0.929、偽陽性率は0.072、閾値は0.118であった（表-F.1，図-F.2）．カットオフ値の速度PSI値が20.4の時、正確度は0.936 $((39+208)/(39+14+3+208))$ （表-F.2(a)）であり、19.0の時の正確度は0.928 $((39+206)/(39+16+3+206)*100)$ であった（表-F.2(b)）．一方、閾値が0.5の時にカットオフ値となる速度PSI値（34.2）の時、再現率は0.690 $(29/(29+13))$ ，正確度は0.928であった（表-F.2(c)）．

これらの結果から、カットオフ値の調整によって再現率が大幅に向上（0.929 vs. 0.690）し、加えて僅かではあるものの、正確度も向上（0.936 vs. 0.928）した速度PSI値である20.4をカットオフ値とすることで、被災／無被災をより正確に予測できると考えられる．

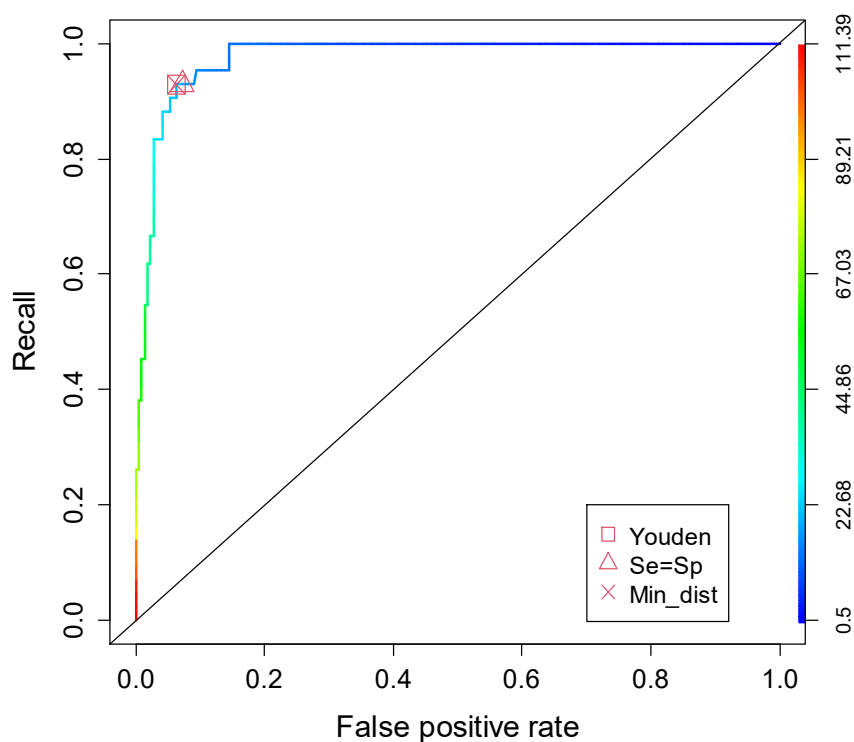


図-F.1 ROC曲線. ROC曲線の色は対応するカットオフ値（速度PSI値）を表す. 赤色のシンボルは3種類の方法（Youden's index method, Sensitivity equal to specificity methodおよびROC01 method）で決定されたカットオフ値の位置を表す.

表-F.1 Rで出力されたdsetのデータフレーム. rec0は再現率, fpr0は偽陽性率, cut0はカットオフ値, thre0は閾値, yoはYouden's index, eqは再現率の値と特異度（1-偽陽性率）の値の差の絶対値, diはROC曲線上の点から座標(0,1)までの距離をそれぞれ表す. Youden's indexが最大（51行目）, Sensitivity equal to Specificity Methodの値が最大（53行目）, または, ROC01 methodにおける値が最小（51行目）となるケースを赤字で表示した.

	rec0	fpr0	cut0	thre0	yo	eq	di
1	0.02381	0	110.7	0.99996	0.02381	0.97619	0.97619
2	0.047619	0	108	0.999942	0.047619	0.952381	0.952381
3	0.071429	0	101.5	0.999864	0.071429	0.928571	0.928571
4	0.095238	0	98.8	0.999805	0.095238	0.904762	0.904762
5	0.119048	0	97.3	0.999762	0.119048	0.880952	0.880952
6	0.142857	0	82.9	0.998407	0.142857	0.857143	0.857143
7	0.166667	0	79	0.997335	0.166667	0.833333	0.833333
8	0.190476	0	78.2	0.997039	0.190476	0.809524	0.809524
9	0.214286	0	75.5	0.995774	0.214286	0.785714	0.785714
10	0.238095	0	75.1	0.995545	0.238095	0.761905	0.761905
11	0.261905	0	74.2	0.994985	0.261905	0.738095	0.738095
12	0.261905	0.004505	72	0.993303	0.2574	0.733591	0.738109
13	0.309524	0.004505	68.6	0.989541	0.305019	0.685972	0.690491
14	0.333333	0.004505	64.7	0.982606	0.328829	0.662162	0.666682
15	0.357143	0.004505	64.5	0.982148	0.352638	0.638353	0.642873
16	0.380952	0.004505	60.7	0.970834	0.376448	0.614543	0.619064

港湾地域強震観測網から得られる速度PSI値を用いた港湾単位での係留施設の被害有無の概略判定手法
宮田正史・菅原法城・野津 厚・長坂陽介・小濱英司・大矢陽介・福永勇介・竹信正寛・秋山吉寛

17	0.380952	0.009009	58.6	0.961855	0.371943	0.610039	0.619113
18	0.404762	0.009009	55.4	0.94291	0.395753	0.586229	0.595306
19	0.428571	0.009009	55.3	0.942194	0.419562	0.56242	0.5715
20	0.452381	0.009009	54.6	0.936942	0.443372	0.53861	0.547693
21	0.452381	0.013514	54.5	0.936156	0.438867	0.534106	0.547786
22	0.47619	0.013514	53.8	0.930395	0.462677	0.510296	0.523984
23	0.5	0.013514	52.2	0.915383	0.486486	0.486486	0.500183
24	0.52381	0.013514	50.3	0.893782	0.510296	0.462677	0.476382
25	0.547619	0.013514	45.7	0.82079	0.534106	0.438867	0.452583
26	0.547619	0.018018	42.1	0.739945	0.529601	0.434363	0.45274
27	0.571429	0.018018	41.9	0.734824	0.553411	0.410553	0.42895
28	0.595238	0.018018	41.3	0.719079	0.57722	0.386744	0.405163
29	0.619048	0.018018	41.1	0.713706	0.60103	0.362934	0.381378
30	0.619048	0.022523	39.7	0.674439	0.596525	0.35843	0.381618
31	0.642857	0.022523	39.3	0.66272	0.620335	0.33462	0.357852
32	0.666667	0.022523	39.1	0.656784	0.644144	0.310811	0.334093
33	0.666667	0.027027	37.5	0.607645	0.63964	0.306306	0.334427
34	0.690476	0.027027	36.5	0.575712	0.663449	0.282497	0.310702
35	0.714286	0.027027	33.2	0.467256	0.687259	0.258687	0.28699
36	0.738095	0.027027	31.7	0.41836	0.711068	0.234878	0.263296
37	0.761905	0.027027	30.5	0.380321	0.734878	0.211068	0.239624
38	0.785714	0.027027	30	0.364867	0.758687	0.187259	0.215983
39	0.809524	0.027027	28.4	0.317374	0.782497	0.163449	0.192384
40	0.833333	0.027027	26.4	0.263021	0.806306	0.13964	0.168844
41	0.833333	0.031532	26.1	0.255404	0.801802	0.135135	0.169623
42	0.833333	0.036036	25.8	0.247933	0.797297	0.130631	0.170518
43	0.833333	0.040541	25.5	0.240611	0.792793	0.126126	0.171526
44	0.857143	0.040541	24.4	0.215043	0.816602	0.102317	0.148498
45	0.880952	0.040541	23.9	0.204094	0.840412	0.078507	0.125761
46	0.880952	0.045045	23.3	0.191508	0.835907	0.074003	0.127285
47	0.880952	0.04955	23.2	0.189469	0.831403	0.069498	0.128948
48	0.880952	0.054054	22.4	0.173755	0.826898	0.064994	0.130745
49	0.904762	0.054054	21.8	0.162658	0.850708	0.041184	0.109509
50	0.904762	0.063063	20.6	0.142185	0.841699	0.032175	0.114225
51	0.928571	0.063063	20.4	0.13899	0.865508	0.008366	0.095284
52	0.928571	0.067568	19.9	0.131265	0.861004	0.003861	0.098323
53	0.928571	0.072072	19	0.118279	0.856499	0.000644	0.101471
54	0.928571	0.076577	16.8	0.091145	0.851995	0.005148	0.104719
55	0.928571	0.081081	16.7	0.090055	0.84749	0.009653	0.108056
56	0.928571	0.085586	16.3	0.085814	0.842986	0.014157	0.111476
57	0.928571	0.09009	16.1	0.083762	0.838481	0.018662	0.114971
58	0.952381	0.094595	16	0.082753	0.857786	0.046976	0.105904
59	0.952381	0.099099	15.8	0.080767	0.853282	0.05148	0.109946
60	0.952381	0.103604	15.1	0.074157	0.848777	0.055985	0.114023
61	0.952381	0.108108	14.9	0.072361	0.844273	0.060489	0.118131
62	0.952381	0.112613	14.6	0.069743	0.839768	0.064994	0.122267
63	0.952381	0.117117	14.5	0.06889	0.835264	0.069498	0.126428
64	0.952381	0.121622	14.2	0.066389	0.830759	0.074003	0.130612
65	0.952381	0.126126	14.1	0.065574	0.826255	0.078507	0.134816

66	0.952381	0.130631	14	0.064768	0.82175	0.083012	0.139039
67	0.952381	0.13964	13.7	0.062406	0.812741	0.092021	0.147536
68	0.952381	0.144144	13.3	0.059382	0.808237	0.096525	0.151806
69	0.97619	0.144144	13.1	0.057922	0.832046	0.120335	0.146097
70	1	0.144144	13	0.057205	0.855856	0.144144	0.144144
71	1	0.153153	12.9	0.056496	0.846847	0.153153	0.153153
72	1	0.157658	12.8	0.055795	0.842342	0.157658	0.157658
73	1	0.166667	12.6	0.054418	0.833333	0.166667	0.166667
74	1	0.171171	12.5	0.053742	0.828829	0.171171	0.171171
75	1	0.175676	12.4	0.053073	0.824324	0.175676	0.175676
76	1	0.18018	12.2	0.05176	0.81982	0.18018	0.18018
77	1	0.189189	12.1	0.051115	0.810811	0.189189	0.189189
78	1	0.193694	12	0.050477	0.806306	0.193694	0.193694
79	1	0.198198	11.9	0.049847	0.801802	0.198198	0.198198
80	1	0.202703	11.8	0.049225	0.797297	0.202703	0.202703
81	1	0.207207	11.6	0.048001	0.792793	0.207207	0.207207
82	1	0.211712	11.3	0.046221	0.788288	0.211712	0.211712
83	1	0.225225	10.8	0.043392	0.774775	0.225225	0.225225
84	1	0.22973	10.6	0.042308	0.77027	0.22973	0.22973
85	1	0.234234	10.5	0.041775	0.765766	0.234234	0.234234
86	1	0.238739	10.4	0.041249	0.761261	0.238739	0.238739
87	1	0.261261	10.3	0.040729	0.738739	0.261261	0.261261
88	1	0.265766	9.8	0.038223	0.734234	0.265766	0.265766
89	1	0.274775	9.6	0.037263	0.725225	0.274775	0.274775
90	1	0.279279	9.3	0.035865	0.720721	0.279279	0.279279
91	1	0.283784	9.2	0.035411	0.716216	0.283784	0.283784
92	1	0.288288	8.9	0.034081	0.711712	0.288288	0.288288
93	1	0.292793	8.8	0.033648	0.707207	0.292793	0.292793
94	1	0.297297	8.6	0.032799	0.702703	0.297297	0.297297
95	1	0.315315	8.3	0.031563	0.684685	0.315315	0.315315
96	1	0.31982	8.2	0.031162	0.68018	0.31982	0.31982
97	1	0.324324	8.1	0.030765	0.675676	0.324324	0.324324
98	1	0.333333	8	0.030373	0.666667	0.333333	0.333333
99	1	0.337838	7.9	0.029986	0.662162	0.337838	0.337838
100	1	0.351351	7.8	0.029604	0.648649	0.351351	0.351351
101	1	0.355856	7.5	0.028485	0.644144	0.355856	0.355856
102	1	0.364865	7.4	0.028121	0.635135	0.364865	0.364865
103	1	0.369369	7.3	0.027762	0.630631	0.369369	0.369369
104	1	0.378378	7.2	0.027408	0.621622	0.378378	0.378378
105	1	0.382883	7	0.026711	0.617117	0.382883	0.382883
106	1	0.387387	6.9	0.02637	0.612613	0.387387	0.387387
107	1	0.405405	6.8	0.026032	0.594595	0.405405	0.405405
108	1	0.40991	6.7	0.025699	0.59009	0.40991	0.40991
109	1	0.418919	6.6	0.02537	0.581081	0.418919	0.418919
110	1	0.432432	6.5	0.025045	0.567568	0.432432	0.432432
111	1	0.445946	6.4	0.024724	0.554054	0.445946	0.445946
112	1	0.45045	6.3	0.024408	0.54955	0.45045	0.45045
113	1	0.459459	6.2	0.024095	0.540541	0.459459	0.459459
114	1	0.463964	6.1	0.023786	0.536036	0.463964	0.463964

港湾地域強震観測網から得られる速度PSI値を用いた港湾単位での係留施設の被害有無の概略判定手法
宮田正史・菅原法城・野津 厚・長坂陽介・小濱英司・大矢陽介・福永勇介・竹信正寛・秋山吉寛

115	1	0.468468	6	0.023481	0.531532	0.468468	0.468468
116	1	0.481982	5.7	0.022588	0.518018	0.481982	0.481982
117	1	0.490991	5.5	0.022011	0.509009	0.490991	0.490991
118	1	0.5	5.3	0.021449	0.5	0.5	0.5
119	1	0.504505	5.2	0.021174	0.495495	0.504505	0.504505
120	1	0.518018	5	0.020632	0.481982	0.518018	0.518018
121	1	0.531532	4.9	0.020367	0.468468	0.531532	0.531532
122	1	0.536036	4.7	0.019846	0.463964	0.536036	0.536036
123	1	0.540541	4.5	0.019338	0.459459	0.540541	0.540541
124	1	0.545045	4.4	0.019089	0.454955	0.545045	0.545045
125	1	0.554054	4.3	0.018843	0.445946	0.554054	0.554054
126	1	0.558559	4.2	0.0186	0.441441	0.558559	0.558559
127	1	0.572072	4.1	0.01836	0.427928	0.572072	0.572072
128	1	0.59009	4	0.018123	0.40991	0.59009	0.59009
129	1	0.603604	3.8	0.017658	0.396396	0.603604	0.603604
130	1	0.608108	3.7	0.017431	0.391892	0.608108	0.608108
131	1	0.617117	3.6	0.017205	0.382883	0.617117	0.617117
132	1	0.626126	3.5	0.016983	0.373874	0.626126	0.626126
133	1	0.635135	3.4	0.016764	0.364865	0.635135	0.635135
134	1	0.63964	3.3	0.016547	0.36036	0.63964	0.63964
135	1	0.653153	3.2	0.016334	0.346847	0.653153	0.653153
136	1	0.657658	3.1	0.016122	0.342342	0.657658	0.657658
137	1	0.666667	3	0.015914	0.333333	0.666667	0.666667
138	1	0.68018	2.9	0.015708	0.31982	0.68018	0.68018
139	1	0.693694	2.8	0.015505	0.306306	0.693694	0.693694
140	1	0.698198	2.7	0.015305	0.301802	0.698198	0.698198
141	1	0.720721	2.6	0.015107	0.279279	0.720721	0.720721
142	1	0.743243	2.5	0.014911	0.256757	0.743243	0.743243
143	1	0.752252	2.4	0.014718	0.247748	0.752252	0.752252
144	1	0.756757	2.3	0.014528	0.243243	0.756757	0.756757
145	1	0.765766	2.2	0.01434	0.234234	0.765766	0.765766
146	1	0.783784	2.1	0.014154	0.216216	0.783784	0.783784
147	1	0.792793	2	0.01397	0.207207	0.792793	0.792793
148	1	0.810811	1.9	0.013789	0.189189	0.810811	0.810811
149	1	0.81982	1.8	0.013611	0.18018	0.81982	0.81982
150	1	0.851351	1.7	0.013434	0.148649	0.851351	0.851351
151	1	0.86036	1.6	0.01326	0.13964	0.86036	0.86036
152	1	0.878378	1.5	0.013088	0.121622	0.878378	0.878378
153	1	0.918919	1.4	0.012919	0.081081	0.918919	0.918919
154	1	0.932432	1.3	0.012751	0.067568	0.932432	0.932432
155	1	0.936937	1.1	0.012422	0.063063	0.936937	0.936937
156	1	0.959459	1	0.012261	0.040541	0.959459	0.959459
157	1	0.977477	0.9	0.012102	0.022523	0.977477	0.977477
158	1	0.986486	0.8	0.011945	0.013514	0.986486	0.986486
159	1	0.990991	0.7	0.01179	0.009009	0.990991	0.990991
160	1	0.995495	0.6	0.011637	0.004505	0.995495	0.995495
161	1	1	0.5	0.011486	0	1	1

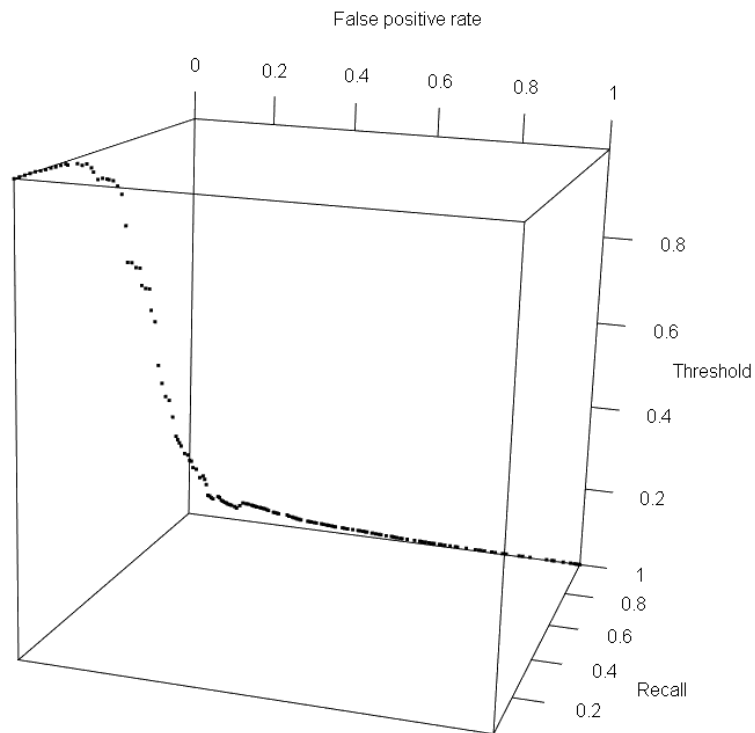


図-F.2 再現率 (Recall) , 偽陽性率 (False positive rate) , 閾値 (Threshold) の関係を表す3次元プロット図. キューブ上面から見ると, ROC曲線が確認できる.

表-F.2 3種類のカットオフ値における被災有り／無被災と予測結果. a カットオフ値=20.4 ; b カットオフ値=19.0 ; c カットオフ値=34.2.

(a)		実際	
		被災有り	無被災
予測	被災有り	39	14
	無被災	3	208

(b)		実際	
		被災有り	無被災
予測	被災有り	39	16
	無被災	3	206

(c)		実際	
		被災有り	無被災
予測	被災有り	29	6
	無被災	13	216

参考文献

- 1) R Core Team: *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>, 2022
- 2) Sing, T., Sander, O., Beerenwinkel, N. and Lengauer, T.: ROCR: visualizing classifier performance in R. *Bioinformatics*, Vol. 21, No. 20, pp. 7881, 2005.
- 3) Hosmer, D. W. Jr., Lemeshow, S. and Sturdivant, R. X.: *Applied logistic regression, third edition*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
- 4) Lopez-Raton, M., Rodriguez-Alvarez, M. X., Suarez, C. C. and Sampedro, F. G.: OptimalCutpoints: An R Package for Selecting Optimal Cutpoints in Diagnostic Tests. *Journal of Statistical Software*, Vol. 61, No. 8, pp. 1-36. DOI 10.18637/jss.v061.i08, 2014.
- 5) Habibzadeh, F., Habibzadeh, P. and Yadollahie, M.: On determining the most appropriate test cut-off value: the case of tests with continuous result. *Biochemia Medica*, Vol. 26, No. 3, pp. 297-307, 2016.
- 6) Youden, W. J.: Index for Rating Diagnostic Tests. *Cancer*, Vol. 3, pp. 32-35, 1950.
- 7) Amaro, A., Gude, F., Gonzalez-Juanatey, R., Iglesias, F., Fernandez-Vazquez, F., Garcia-Acuna, J. and Gil, M.: Plasma Leukocyte Elastase Concentration in Angiographically Diagnosed Coronary Artery Disease. *European Heart Journal*, Vol. 16, pp. 615-622, 1995.
- 8) Metz, C. E.: Basic Principles of ROC Analysis. *Seminars in Nuclear Medicine*, Vol. 8, pp. 183-298, 1978.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1301 January 2025

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

港湾地域強震観測網から得られる速度S₁値を用いた
港湾単位での係留施設の被害有無の概略判定手法