

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 19 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究（C）一般

研究期間：2009～2011

課題番号：21560538

研究課題名（和文）

経験度による推定可否判断を付した水域メガリスク解析

研究課題名（英文）

Degree of Experience proposed for Flood Frequency Analysis in Coastal Area

研究代表者

北野 利一（KITANO TOSHIKAZU）

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00284307

研究成果の概要（和文）：

設計外力の算定に用いられる極値統計解析は、50年に平均的に1回生起することが、1年に0.02回の割合に等しいとする比例関係を用いて、過去に生起した観測記録を外挿することにより、将来に来襲するであろう巨大外力を合理的に算定できる唯一の方法である。ただし、従来法では、再現レベルに対する信頼区間を付せば、原理的には、いくらでも外挿が可能であると扱われてきたことに問題がある。本研究では、研究代表者が提案する経験度という新たな概念を用いて、外挿による推定の限界を示し、さらに、地球温暖化に伴う外力変化の可能性があるモデルにおいても、経験度を拡張した耐久性により、実時間軸上にある未来への外挿の限界も示した。

研究成果の概要（英文）：

Extrapolation plays an essential role for evaluating sea extremes frequencies, which is why the concept of return period has been introduced. But we use the return period (or the extrapolation) without being aware of the hidden double meanings. The return period employed in handling the past record is substituted for the period of the coming successive event in the future. We can obtain the design force (the return level) by extrapolation of the observed data in the past years, while we should apply it for the future by the extension over the real time, which is another extrapolation. We should notice the limitations for extending the return level's estimation, by introducing the important indices: the degree of experience and the durability.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
平成 22 年度	700,000	210,000	910,000
平成 23 年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：海岸工学, 極値統計学

1. 研究開始当初の背景

沿岸域の水害リスクを検討する上で、再現期間の概念は重要である。また、構造物の背後の重要度に応じて、構造物の設計レベルを定めなければならない。所与の再現期間に対する再現レベルを、観測記録にもとづいて、

推定する際に行われる極値統計解析は、主として、年最大値データに対して、年最大値分布の母数を推定するものである。それゆえ、従来法では、再現レベルに対する信頼区間を付せば、原理的には、いくらでも外挿が可能であると放任してきたことに問題がある。本

研究では、研究代表者が提案する経験度という概念を用いれば、外挿による推定が無意味となる限界を示すことである。また、推定可能な範囲で必要となる信頼区間も再考を要する。なぜなら、多くの従来法でみられるような「推定値±誤差」で与えられる信頼区間は問題がある。既往最大値を更新する外力が、想定を上回る外力となることも、その問題に起因する。超過確率が非常に小さい再現レベルに対して、観測期間内に、たまたま大きな外力に遭遇しなかっただけで、「上には上がある」というような極値の特性を配慮した信頼区間が作成できるような手法が望まれる。

さらに、気象変化に伴う外力の非正常性を検討する際も、経験度による推定の可否判断が必要とされる。特に、過去のデータに基づいて、未来を予測するという事は、時間軸に沿った外挿を行っているからである。これは、再現期間を長くとる外挿とは区別する必要がある。

2. 研究の目的

まず第一に、研究代表者が提案する経験度という概念を、水域災害をもたらす自然外力の代表的な事例に適用し、経験度により付される推定可否判断というものが、どのようなものを具体的に示す。さらに、経験度を用いれば、比較的容易に、上下に歪んだ信頼区間を作成することができることを提示する。

次に、トレンドを有する非定常モデルにも経験度を適用し、外挿の限界を検討する。なお、非定常モデルに対する経験度の算出式を熟考すれば、定常モデルにおける経過時間に伴う外挿の限界を与えることが可能となることを示す。このような設計外力の算定に係る極値統計解析において、経験度の有用性を示すことが本研究の目的である

3. 研究の方法

潮位や降雨量などの外力の規模 y と、それが従うべき極値分布のパラメータ θ ($=\{\mu, \sigma, \xi\}$) を結びつける陰リンク関数

$$\lambda(y, \theta) = \exp \left\{ -\frac{1}{\xi} \log \left(1 + \xi \frac{y - \mu}{\sigma} \right) \right\} \quad (1)$$

として、生起強度を用いる。一般化極値分布 (GEV)、一般化パレート分布 (GP) および上位複数個の区間最大値の従う分布などの分布族に従う外力レベルは、式(1)を生起率とするポアソン分布を用いた点過程モデルで扱うことができる。この時、外力規模 y を越えるイベントが、年平均 λ_1 ($= \lambda(y, \theta_1)$) 回生起するという事は、 n 年間には、そのようなイベントが平均 λ_n ($= \lambda(y, \theta_n)$) 回生起することに等しい、すなわち、

$$1 : \lambda_1 = n : \lambda_n \quad (2)$$

という比例関係が、生起率に成立している。

この比例関係の成立が、極値の外挿を検討するうえで重要と考える。なぜなら、式(2)に示す比例関係は、土木技術者のみならず、人類が常識的に理解している根源的な事項であり、確率を用いて合意形成を考える上で不可欠な基本的事項であると考えられるからである。そこで、陰リンク関数 $\lambda(y, \theta)$ として表される生起率に対して、北野らは、母数推定に伴う誤差の検討を行った。その際に、一般化線形モデルにおける作業残差に類似したものとして、式(1)の陰リンク関数から派生する残差を、経験度と名付けて、次式のように定義した。

$$K = 1 / V \left\{ \log \lambda(y, \hat{\theta}) \right\} \quad (3)$$

経験度 K を用いれば、外挿についての2つの限界を、具体的に解釈可能な問題として扱うことができる等、次節に示すとおり幅広い問題を扱うことが期待される。なお、経験度は、尤度 $L(\theta, y_k)$ による情報

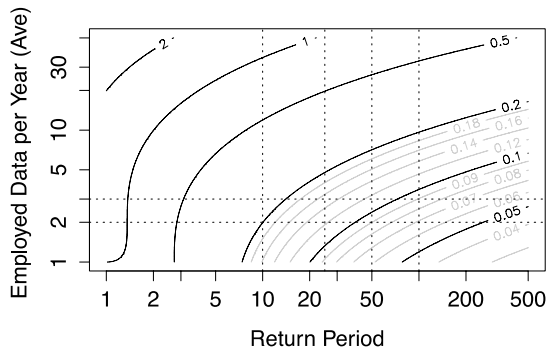
$$I = \frac{\partial^2}{\partial \theta \partial \theta'} \sum_i \log f(y_i; \hat{\theta}) \quad (4)$$

と類似する概念であるかもしれない。しかし、両者の決定的な違いがある。複数の母数を用いる場合、情報 I は多成分の行列で表される量であり、母数は一般に物理的な次元を有するため、情報の各成分の値は、各々の母数の単位に依存し、情報を逆行列により分散共分散として表した時に、単位をつける必要が生じる。これに対し、経験度 K は無名数のスカラー量であり、データの個数として数えることができる。それは、外力規模 y の生起率 $\lambda(y, \theta)$ を推定するのに用いたと考えられる実質のデータ数である (このような「推定に用いた実質のデータ数」という概念は、線形回帰モデルにおけるロバスト推定を論じる際に、Huber (1981) が既に導入している)。経験度は情報を内包した概念であり、経験度 K を具体的に算出する際には、情報 I を用いて、次式で与えられる。

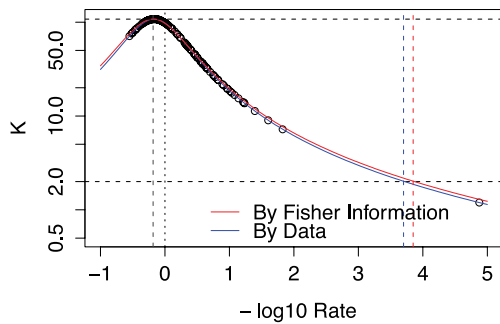
$$\frac{1}{K} = \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta'} \log \lambda(y_R, \theta) \right\} I^{-1} \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \log \lambda(y_R, \theta) \right\} \quad (5)$$

情報と経験度の違いを利用すれば、情報だけでは議論が難しいことを、経験度で解決できると考える。その1つが、推定可否判断であり、推定に用いた実質のデータ数という解釈をすれば、Rule of Thumb として、 $K \leq 2$ で、推定された結果を保留する。このように、比例関係に基づく外挿の限界 ($K=2$) を与え、外挿の延伸をひとまず打ち切るのである。

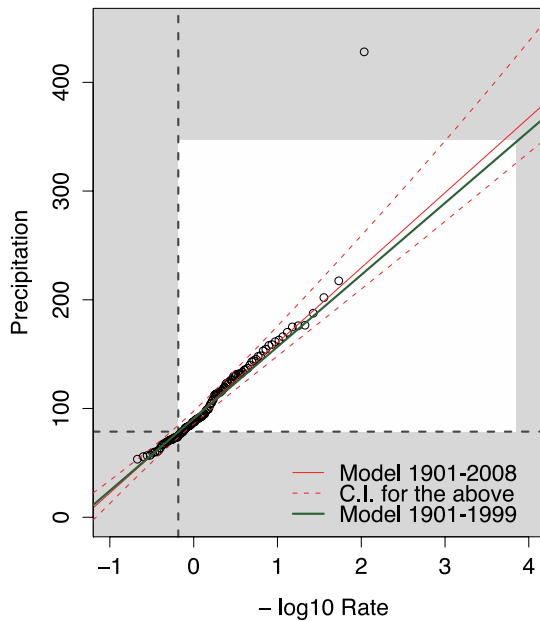
その限界値を $K=2$ とする理由に対しては、幾つかの説明が可能である。その1つは、「2度あることは3度ある」という諺による。むしろ、「2度あることは3回ある」と言い



(a) 1年間あたりの経験度



(b) 再現期間に対する経験度の変化



(c) クォンタイルプロットにおける窓枠

図-1 名古屋の日最大降水量の極値

表したいのである。度と回は似ているが、回には「繰り返し」という概念が含まれる点が、度とは異なる。「仏の顔も3回」とは言えないのは、そのような理由がある。あえて、「2度あることは3回ある」と言いたいのは、「あるイベントが2度も観測されれば、そのイベントは繰り返すことを前提に推測しよう。2

度なければ、繰り返して生じるイベントであるかどうかの判断は保留しよう」という主張である。なお、極値理論を用いた推定として注意しないといけないのは、実質には2度どころか、1度も観測されていないような外挿の領域に対して、情報から得られる経験度を用いて、その度数を数えるのである。イメージとしては、観測データをもとに、比例関係により外挿する際に、本来的には情報の無い外挿の領域に、情報も移しているのである。もう1つの説明は、「繰り返し」の量を表す周波数による。スペクトル解析では、観測できる高周波数の限界として、ナイキスト周波数を設けている。信号を三角関数の波成分に分解する際に、波を識別するには、最低限、山点と谷点の2つが必要であることが、その理由である。同様に、再現期間に対しては、起点と終点の2つが必要である。

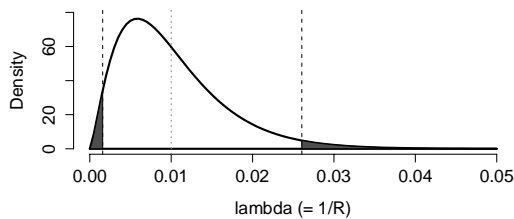
4. 研究成果

図-1(a)は、経験度を算出し、再現期間 R を横軸に、年間に用いることのできるデータの平均数を縦軸に、1年あたりの経験度 K/N を等高線で表したものである。Gumbel-type モデルは、年間あたりの使用データ数を増やせば、経験度が急増することが特徴的である。実際の観測期間は短くても、極値統計解析により、不足する情報を補って、確信の度合いが得られることを具体的に示そう。年間あたりに3個のデータを使用することができる場合、再現期間 $R = 100$ 年(の確率降雨量)に対して、図-1(a)から、年間あたりの経験度 $K/N = 0.089$ を得る。たとえば、実際の観測期間 N は短く、例えば、 $N=25$ 年としても、経験度 $K=2.23$ となるので、その推定における確信の度合いは、223年の観測期間で得られる確信の度合いと等しい(期間 RK 年に平均的に K 回観測することになる)。

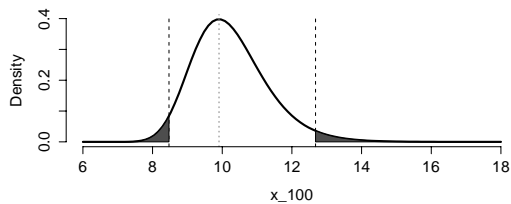
米国では、再現期間 $R = 10, 25, 50, 100$ 年を検討するために必要な最低限の観測期間として、 $N = 10, 15, 20, 25$ 年と推奨している。年間あたりに使用できるデータ数を3.0とすれば、それぞれの経験度は、 $K = 2.4, 2.3, 2.3, 2.2 (> 2)$ となり、推奨値を裏付けている。年間あたりの使用データ数を2.0とすれば、経験度は、 $K = 2.0, 1.8, 1.8, 1.7$ となり、わずかに不足する。なお、これらは、母分布をガンベル分布と確信し、 $\xi=0$ と固定できる場合である。確信できない場合には、たとえば、年間あたりの使用データ数が10であっても、 $K = 1.7, 1.1, 0.79, 0.59$ となるので、残念ながら、推奨される観測期間では十分とはいえない。その点では、気象学的な特性から、形状母数 ξ が特定できることが望まれる。

図-1(b)は、名古屋の降雨量資料に対して、ガンベル分布に年最大日降雨量が従うとし

た場合に、発生率に対する経験度の変化を示したものである。経験度の最大値は、用いたデータ総数に一致している。経験度が最大値をとる年最大日降雨量は、閾値モデルの閾値の役割をしていると考える。経験度が最大値となる発生率から経験度が2となるまで、発生率が減少するようにとった範囲が、データとモデルの適合性が検討できる範囲と考える。発生率の範囲に対応して、外力の範囲を定めることができる。まず、ガンベル確率紙の横軸に、超過確率に代えて、発生率をとる。次に、理論値 (Fisher 情報量) に基づいて得られる経験度から、発生率の範囲を横軸に定め、データに基づいて得られる経験度から、外力の範囲を縦軸に定めて、図-1(c) に示すような窓を設けることができる。経験度が最大となる点線 (灰色) より左側と下側に、年最大値データは存在するが、あえて覆い隠している。年最大値のような期間最大値において、相対的に小さな値も推定には利用するが、推定結果として、過度に注目する必要がないと考えているからである。



(a) 発生率の信頼区間



(b) 再現レベルの信頼区間

図-2 上下に歪んだ2つの信頼区間

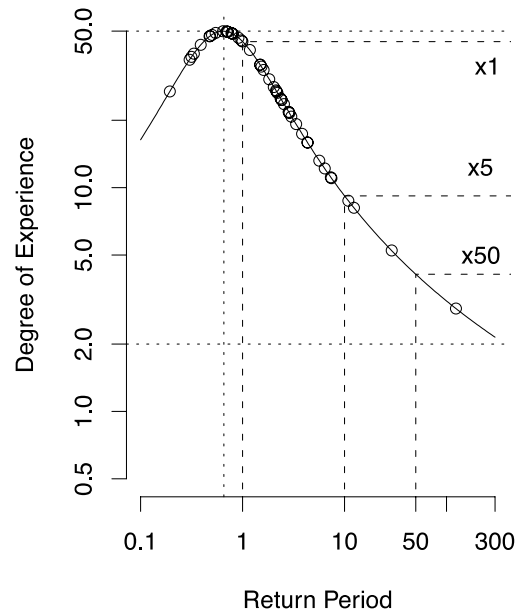
経験度の導入の際に、ポアソン分布の母数の誤差分布をガンマ分布に選んでいる。これを利用した信頼区間の算出法が提案できる。まず、算出された経験度を形状母数とするガンマ分布から、生起率 λ の値の範囲を求める。そして、次式の範囲を満足する再現レベル y_R の範囲を信頼区間とする方法である。

$$\lambda_L \leq \lambda(y_R, \hat{\theta}) \leq \lambda_U \quad (6)$$

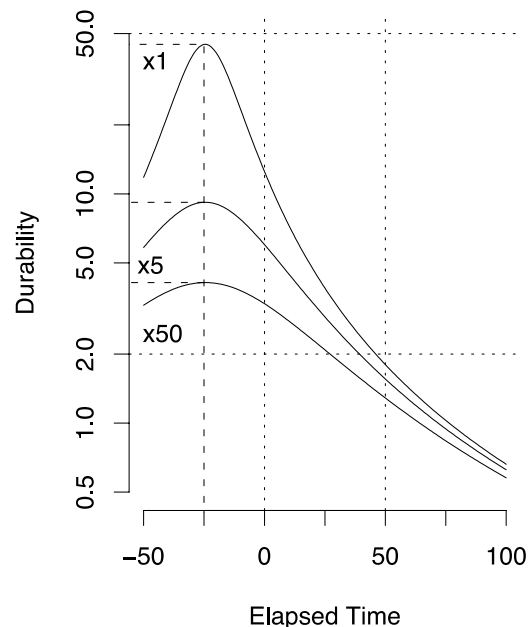
この場合、予測子が推定量 $\hat{\theta}$ であるので、一種の plug-in 推定となっている。それゆえ、解析的に容易に計算が可能であることが、

この方法の利点である。図-2に例示するとおり、生起率および再現レベルの推定範囲に歪むことが表現できていることがわかる。

呉の日降水量に対して、定常モデルを用いて、再現期間に対する経験度 K_0 を求めたものが、図-3 (a) である。300年程度の再現期間まで外挿可能である。しかし、それは観測期間内での可能性を述べているに過ぎず、図-3 (b) の耐久性を示すとおり、実際に300年経過できる再現期間を意味するものではないことに要注意である。



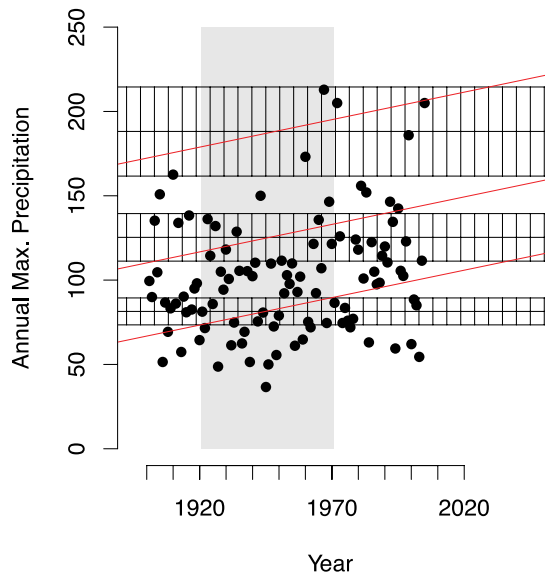
(a) 再現期間に対する経験度の変化



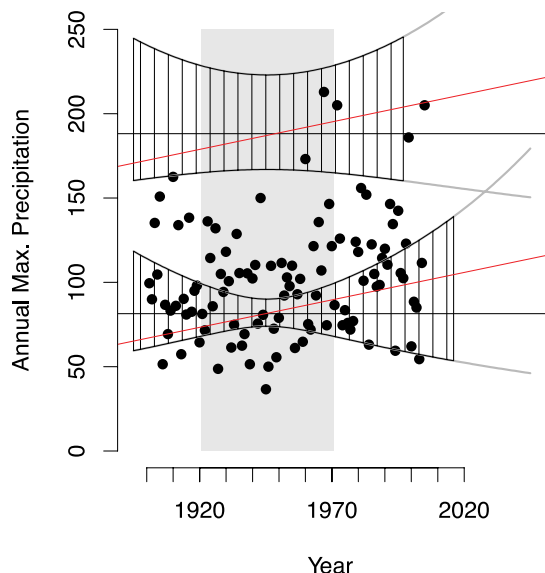
(b) 経過時間に対する耐久性の変化

図-3 経験度と耐久性

図-4 (a) は、定常モデルを単純に適用して得られる従来の信頼区間である。対象期間（網掛部）のデータから算出された再現レベルは、未来永劫に延伸できると過信している。また、従来法による信頼区間は上下対称である。これに対し、図-4 (b) では、式(6)による信頼区間（線面の重複を避けるため、x5は省略）が、経過時間の増加とともに信頼区間は広がり、非定常モデルにより得られるトレンド（赤線）が信頼区間内に含まれている。また、耐久性 $K = 2$ を限界に、それ未満は信頼区間を求めても意味がないと判断して、延伸を打ち切ることが、提案法の最大の特徴である。



(a)従来法（変化なし）



(b)経験度を拡張した耐久性による方法

図-4 再現レベルの信頼区間の経年変化

単純に定常モデルを適用した場合、信頼区間の上下端は、時間軸に沿って、直進して延伸する（図-4 a）。これに対し、直進方向に対して幾何学的影となる遮蔽域の上下端が広がる（図-4 b）。定常モデルに対して、時間変数という隠れた変数を介して伝播する誤差を扱うため、それを特別に、誤差の回折効果と名付ける。防災施設の設計が将来に対する備えと考えるならば、このような経年による信頼区間の増加を考える必要がある。

より精度の高い推定を行うために、サンプル数を増やすことを目的に、歴史データを取り入れることも検討される。そのような歴史データには測定誤差がつきものである。すなわち、観測記録に伴う曖昧さの度合いを考慮した耐久性を導入することにより、詳しい検討が可能である。近年データとして、単一の観測期間で与えられるなら、図-3(b)に示されたとおり、観測期間の中央で耐久性の最大値が生じるのに対し、例えば、350 年間に上位 10 個の歴史データが付与される場合（オランダの潮位）には、耐久性の最大値をとる時点が変わることがわかった。歴史データの活用をする上でも、経験度は重要な役割を果たしている。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 17 件）

1) Kitano, T., W. Kioka and R. Takahashi (2012): Degree of Experience & Durability — Indices for Two Types of Extrapolating Sea Extremes, Proc. of the 22nd International Ocean and Polar Engineering Conference, (in press). 査読有

2) 北野利一・高橋倫也・田中茂信(2012): 水文頻度解析における推定誤差の回折効果 ～ 50 年確率は 50 年間有効であり続けるか?, 水工学論文集, Vol. 56, pp. 230-1~6. 査読有

3) 高橋倫也(2012): ブロック・サイズの推定, 統計数理研究所共同研究レポート, Vol. 274, pp. 28-38. 査読無

4) 北野利一(2012): 津波・高潮堆積物などによる歴史データを含む潮位資料の極値統計解析における取扱い, 統計数理研究所共同研究レポート, Vol. 274, pp. 51-58. 査読無

5) 渋谷政昭・高橋倫也(2012): 津波マグニチュードのデータ解析, 統計数理研究所共同研究レポート, Vol. 274, pp. 59-60. 査読無

6) Kitano, T., W. Kioka & R. Takahashi (2011): Diffractive uncertainty toward the future estimation of return wave height, Coastal Structures, ASCE, C7-098-01~11. 査読有

7) 高橋倫也(2011): 分布の上限点の推定, 統計数理研究所共同研究レポート, Vol. 261,

pp. 23-37. 査読無

8) 高橋倫也(2011): 基準化係数, 統計数理研究所共同研究レポート, Vol. 261, pp. 38-49. 査読無

9) 北野利一(2011): 極値統計解析における陰リンク関数の導入と推定誤差における回折効果, 統計数理研究所共同研究レポート, Vol. 261, pp. 50-64. 査読無

10) Kitano, T., W. Kioka, R. Takahashi (2011): Trend Model of Sea Extremes, Proc. on Coastal Engineering, pp.(manag.1)-1~13. 査読有

11) 北野利一, 高橋倫也, 田中茂信 (2010): 確率降雨量の統計解析におけるモデル適合性の限界, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.S-27-1~6. 査読有

12) 北野利一, 喜岡渉, 高橋倫也(2010): 気象指数を共変量とする水域外力の極値モデルに対する外れ値の感度分析, 海岸工学論文集, 第 57 巻, pp. 141-145. 査読有

13) 北野利一(2010): 伊勢湾台風来襲から 50 年目の節目に, ほど沖, 第 42 巻, pp. 4-9. 査読無

14) 北野利一(2010): トレンドを有する極大外力に対する経験度について, 統計数理研究所共同研究レポート, Vol. 246, pp. 9-12. 査読無

15) 高橋倫也(2010): 極値の線型トレンド, 統計数理研究所共同研究レポート, Vol. 246, pp. 51-61. 査読無

16) Kitano, T., W. Kioka, R. Takahashi (2009): Degree of experience for extreme wave statistics, Coastal Dynamics, pp.126-1~10. 査読無

17) 北野利一・喜岡 渉・高橋倫也(2009): トレンドを有する極大外力に対して定義できる 2 種の再現期間とその不確定性, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp. 166-170. 査読有

〔学会発表〕(計 12 件)

1) 北野利一: 歴史データを含む高潮潮位の極値解析, 平成 23 年度自然災害科学中部地区研究集会, 自然災害研究協議会中部地区部会, 2012 年 2 月 29 日, 静岡大学防災科学総合センター.

2) 北野利一: 極値解析は, どうして極値分布を用いるのか? (あるいは, 他の分布も用いるべきなのか), 第 18 回信頼性設計技術 WS & 第 31 回最適設計研究会, 2011 年 9 月 14 日, 六甲山ホテル.

3) Toshikazu Kitano, Rinya Takahashi and Wataru Kioka: Degree of Experience as an Index for Practical Use of Extremes, Environmental Risk and Extreme Events, Workshop, July, 10-15, 2011, Ascona, Switzerland.

4) Rinya Takahashi: Inference of block size, Environmental Risk and Extreme Events, Workshop, July, 10-15, 2011, Ascona, Switzerland.

5) 北野利一: 来襲高波の確率波高に対する推定誤差の経年的な変化, 土木学会中部支部 (リサーチグループ成果報告会), 2011 年 3 月 4 日, 中部大学.

6) 北野利一: Implicit link 関数と plug-in 推定, 統計数理研究所研究集会 極値工学への応用, 2010 年 12 月 4 日, 統計数理研究所.

7) 北野利一: 水の環境史とグローバルヒストリー, 海岸水理学の技術者の視点から, 日本女子大学 文学部文学研究科, 2010 年 10 月 9 日, 日本女子大学 新泉山館.

8) 北野利一: 経験度を用いた再現レベルの信頼区間の算出法, 第 17 回信頼性設計技術 WS + 第 30 回最適設計研究会, 2010 年 8 月 6 日, つくば研究支援センター.

9) 北野利一: メガリスクの生起確率に対する鍵は?, 関西 C E 会, 2010 年 7 月 10 日, 大阪電気倶楽部.

10) 北野利一: 極値解析におけるレバレッジ ~経験度の意味, 統計数理研究所研究集会 極値理論の工学への応用, 2009 年 12 月 11 日, 統計数理研究所.

11) 畔柳陽介・北野利一: 確率波高の極値統計解析において考慮する信頼区間と経験度, 情報学ワークショップ (WiNF 2009), 2009 年 11 月 28 日, 名古屋工業大学.

12) 北野利一: 水域災害外力に対する経験度の提案 (招待講演), 第 16 回信頼性設計技術ワークショップ + 第 29 回最適設計研究会, 2009 年 8 月 1 日, 愛知県常滑市, J-Hotel Rinku.

〔図書〕(計 1 件)

高橋倫也 (2011): 極値統計学, 2010 年度公開講座テキスト, 統計数理研究所, 71p.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北野利一 (KITANO TOSHI KAZU)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00284307

(2) 研究分担者

高橋倫也 (TAKAHASHI RINYA)

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授
研究者番号: 80030047