日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部会 第13回セミナー
太陽光発電システムの発電出力把握・予測技術(2)
2015.3.27 東京

日射量の確率的予測手法の開発
Probabilistic Forecast of Solar Irradiation

志賀孝広（名古屋大学、豊田中央研究所）
Takahiro SHIGA (Nagoya Univ., Toyota Central R&D Labs., Inc.)

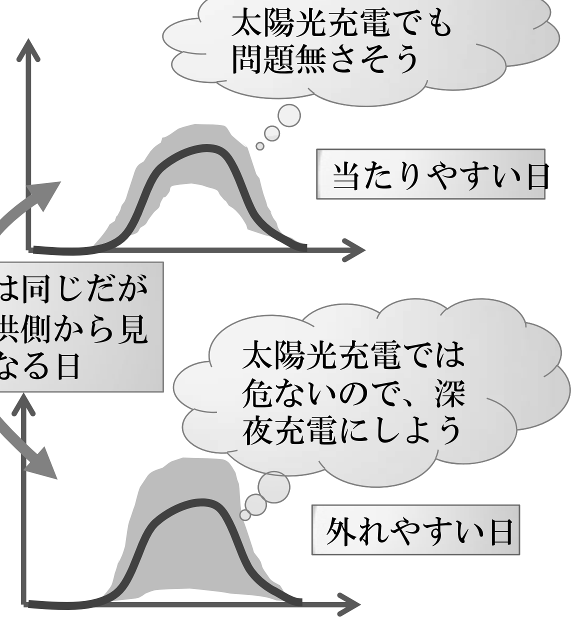
t-shiga@mosk.tytlabs.co.jp

イメージ「太陽光で車を充電しよう」

予測「値」だけではサービスできるかどうか分からない

予測「精度（信頼区間）」が分かれば、安心してサービスできる、が、精度は日々異なる

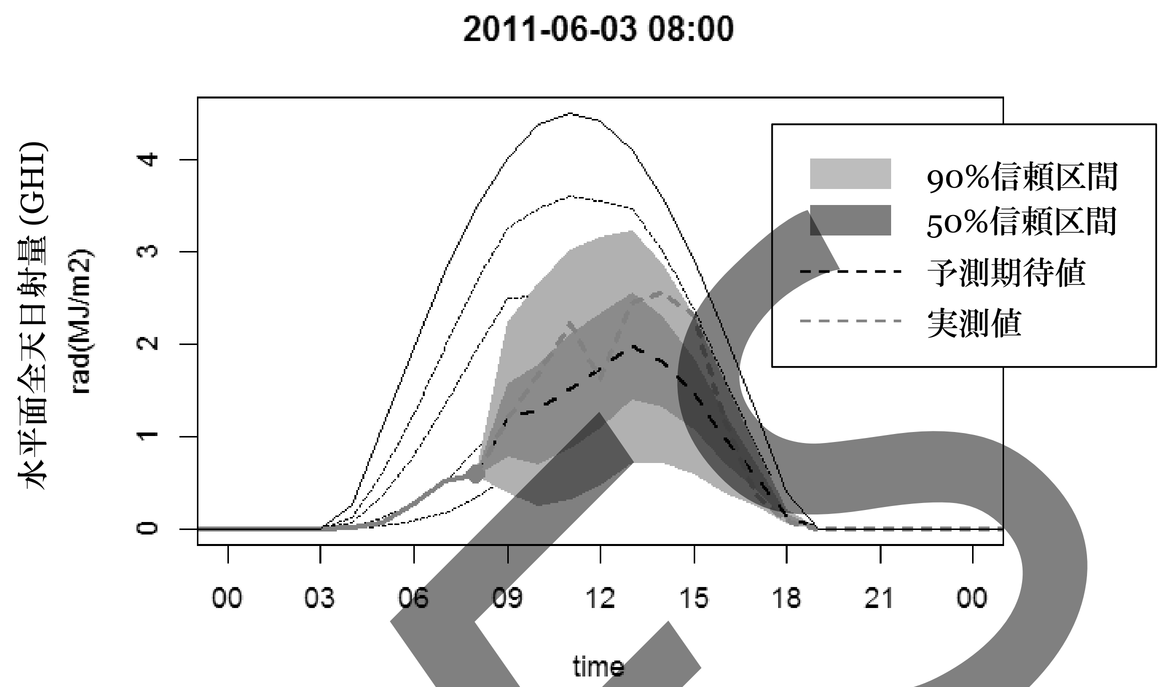
翌日の日射量予測



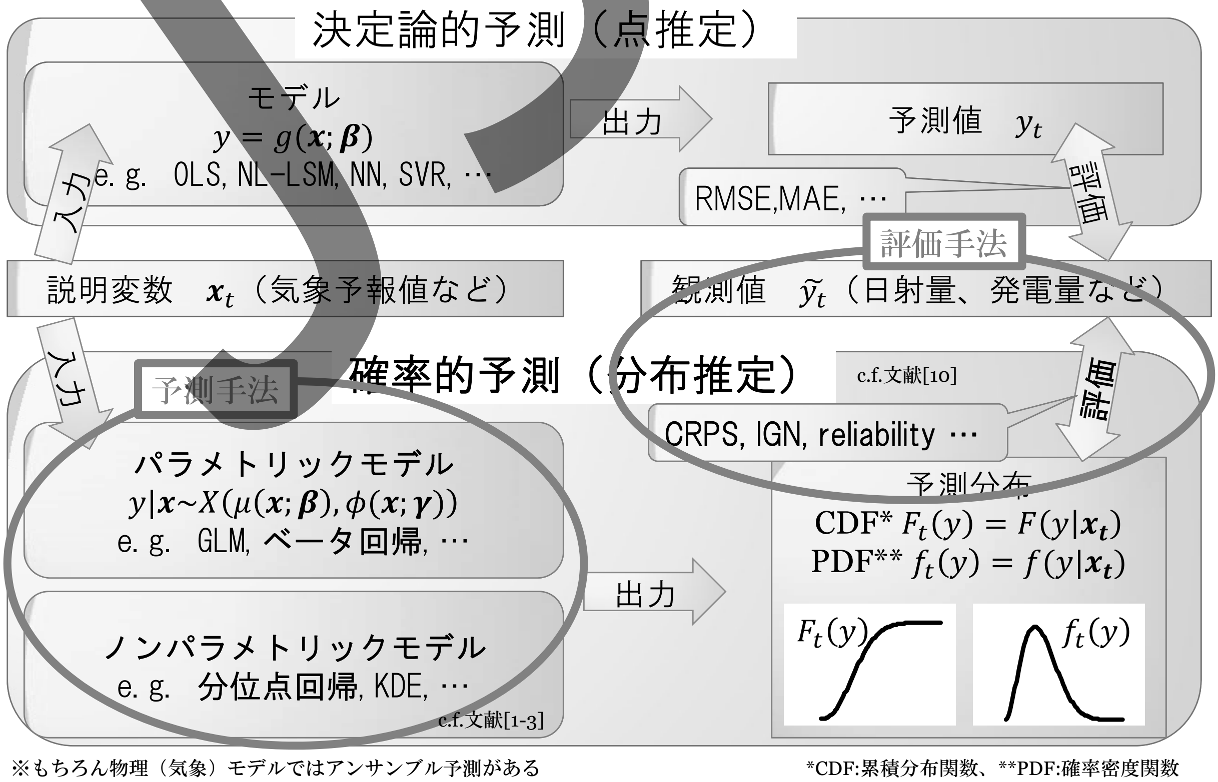
予測「値」は同じだがサービス提供側から見ると全く異なる日

日々、時々変化する動的な予測精度（信頼区間）を気象条件から推定する
⇒日射量の確率的予測

まずは結果から）確率的日射量予測の例



数理モデル※における「確率的予測」



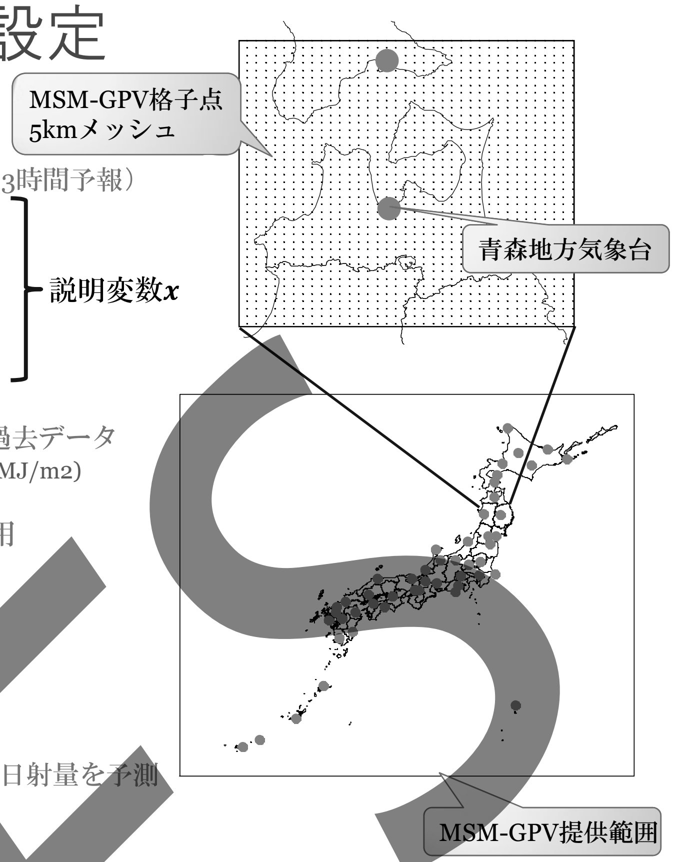
※もちろん物理（気象）モデルではアンサンブル予測がある

*CDF:累積分布関数、**PDF:確率密度関数

利用データと問題設定

- 説明変数 $\boldsymbol{x}$
  - 気象庁発表MSM-GPV数値予報（気象庁、5km格子、前日18時発表33時間予報）
    - 下/中/上層雲量　c_L, c_M, c_H (0〜1)
    - 相対湿度　h (0〜1)
    - 降水量時間積算値　r (mm)
  - 計算式に従い計算
    - エアマス時間平均値　m
    - 大気外日射量 時間積算値 I_0(MJ/m2)

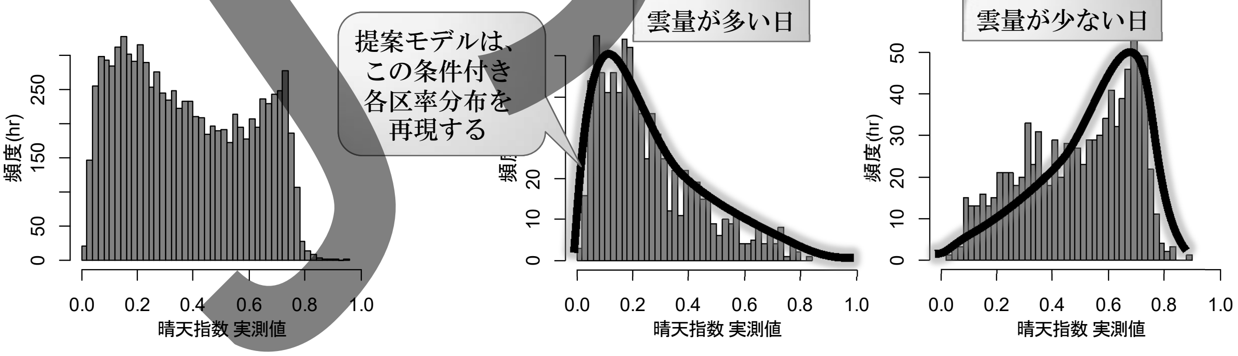
  説明変数$\boldsymbol{x}$
- 応答変数（被説明変数）$\boldsymbol{y}$
  - 気象庁、全国49地方気象台(右図●)の過去データ
    - 水平面全天日射量 (GHI)時間積算値 I (MJ/m2)
    - 規格化日射量（晴天指数）$y = I/I_0$
  - 特に青森地方気象台のデータを使用
- 期間
  - 学習データ：2008〜09の2年間
    - ($I_0 > 0.4$MJ/m2) 8000hr
  - 検証データ：2010〜11の2年間
    - ($I_0 > 0$) 9000hr
- 問題設定
  - 車の充電を想定し、翌日の1時間積算日射量を予測 (Day-ahead forecast)



規格化日射量（晴天指数）の分布の様子

青森の2年分の晴天指数の頻度

⇒説明変数で場合分けすると



どのような分布を用いてこれを表せばよいか？

⇒　日射量は上限と下限がある、正規分布では×

⇒　ベータ分布※が良いのでは？

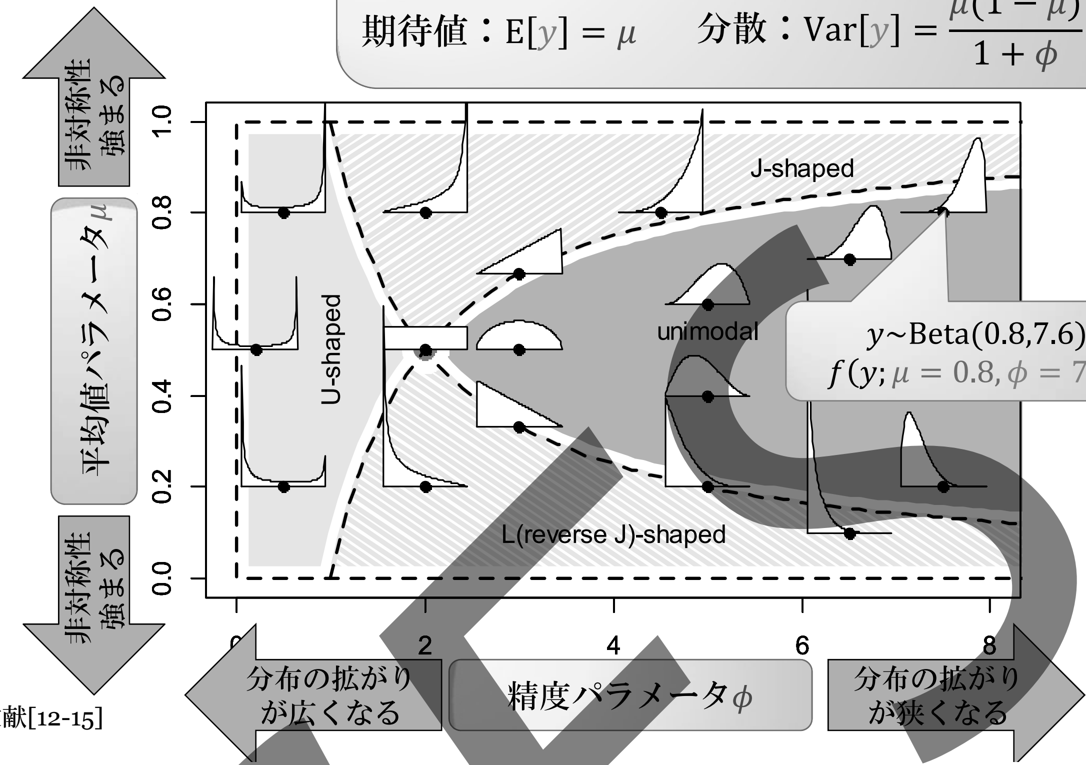
※ベータ分布のようなパラメトリックな分布を使わない方法として、分位点回帰がノンパラメトリックな方法の代表例である 文献[1,3,10]

ベータ分布

$y \sim \mathrm{Beta}(\mu, \phi)$　　$0 < y < 1$・・・晴天指数

確率密度関数: $f(y) \propto y^{\phi\mu - 1}(1 - y)^{\phi(1-\mu)-1}$

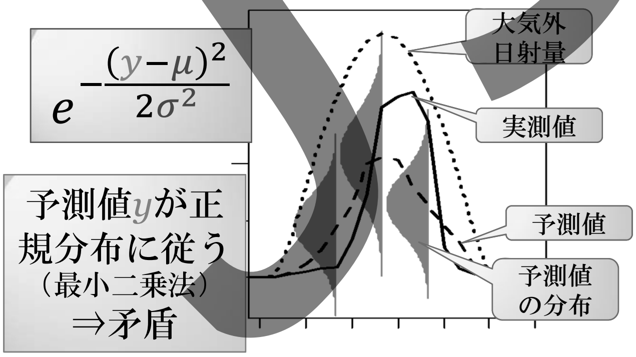
期待値：$\mathrm{E}[y] = \mu$　　分散：$\mathrm{Var}[y] = \dfrac{\mu(1-\mu)}{1+\phi}$

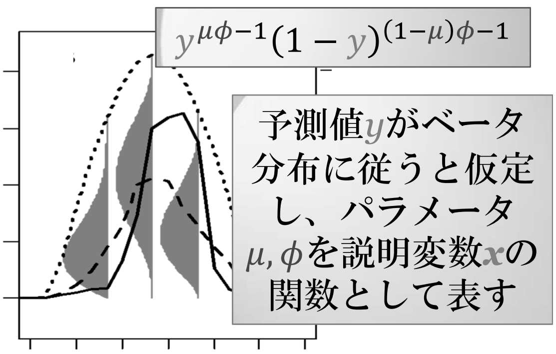


cf. 文献[12-15]

日射量の予測分布(条件付き確率)をベータ分布で表す

- 0≦日射量≦大気外日射量 ⇒ ベータ分布が適切





- **ベータ回帰：ベータ分布のパラメータが説明変数の関数**

期待値

切片　中層雲量　高層雲量　相対湿度　降水量　エアマス*

$$\mu(x) = \exp(-\beta_0 - \beta_M c_M{}^{\alpha_M} - \beta_H c_H{}^{\alpha_H} - \beta_{RH} h^{\alpha_{RH}} - \beta_{PR} r^{\alpha_{PR}} - \beta_{AM} \log m)$$

分布の鋭さ

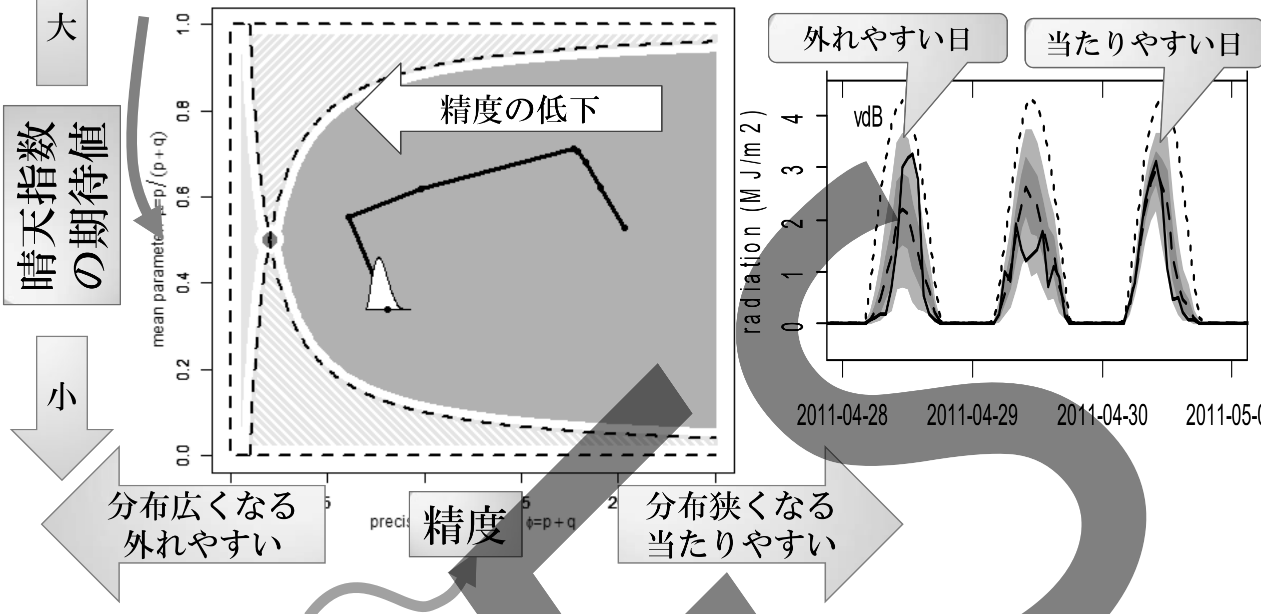
切片　下層雲量　中層雲量　降水量　エアマス*

$$\phi(x) = \exp(+\beta_0 - \beta_M c_L{}^{\alpha_L} - \beta_M c_M{}^{\alpha_M} + \beta_{PR} r^{\alpha_{PR}} + \beta_{AM} \log m)$$

モデル化結果

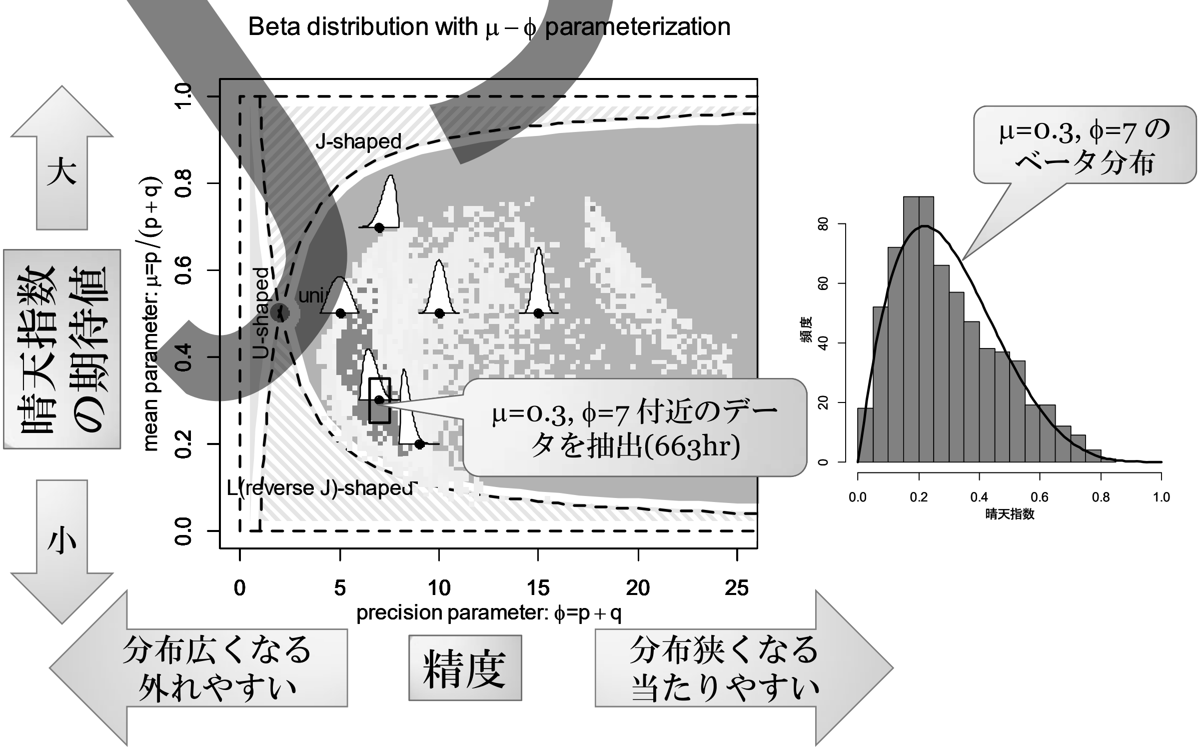
$y|\boldsymbol{x} \sim \mathrm{Beta}(\mu(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{\beta}), \phi(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{\beta}))$

$$\mu(x) = \exp(-\beta_0 - \beta_M {c_M}^{\alpha_M} - \beta_H {c_H}^{\alpha_H} - \beta_{RH} h^{\alpha_{RH}} - \beta_{PR} r^{\alpha_{PR}} - \beta_{AM} \log m)$$



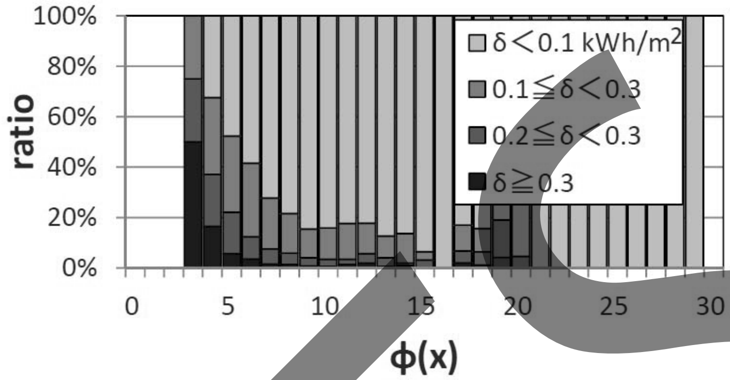
$$\phi(x) = \exp(+\beta_0 - \beta_M {c_L}^{\alpha_L} - \beta_M {c_M}^{\alpha_M} + \beta_{PR} r^{\alpha_{PR}} + \beta_{AM} \log m)$$

予測分布の現れる頻度と分布の検証



関数Φ(x)の持つ情報

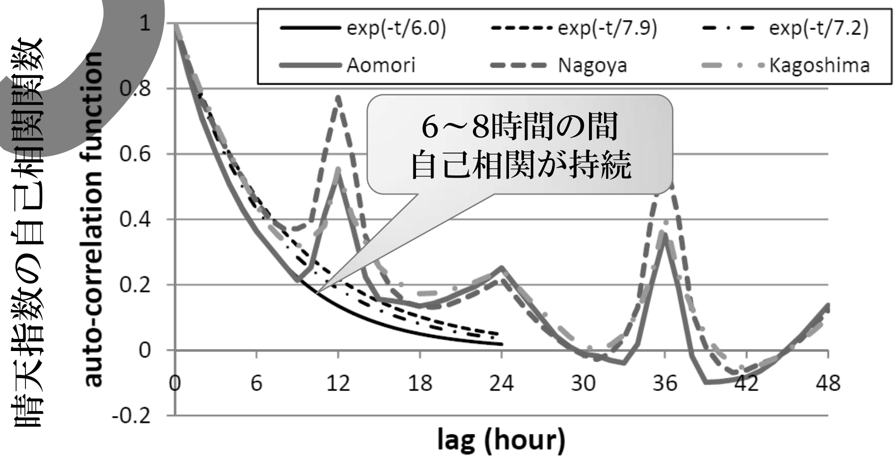
- 予測分布の狭さ（精度の高さ）を表すΦ(x)は、大外れの起こりやすさを良く反映している cf.文献[5]



予測分布の期待値と実測値の絶対値誤差δの発生頻度を、Φ(x)に対してプロットしたグラフ

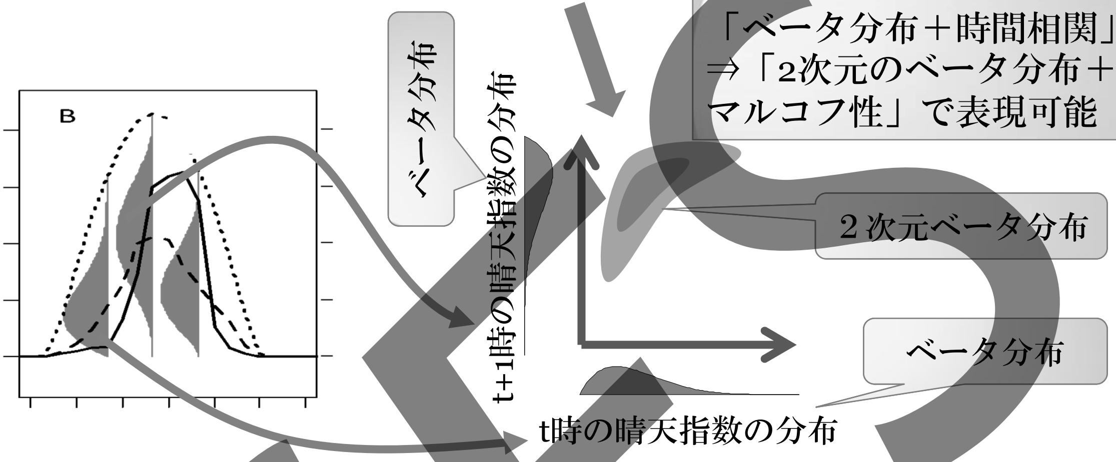
時間相関を考慮する

- 時間相関を考慮する必要性
  - 日射量(晴天指数)は6～8時間で減衰する自己相関を持つ
  - 時間相関を考慮することで「実測値による予測の更新」や、「日積算日射量の分布の推定」が可能になる



マルコフ性を仮定する

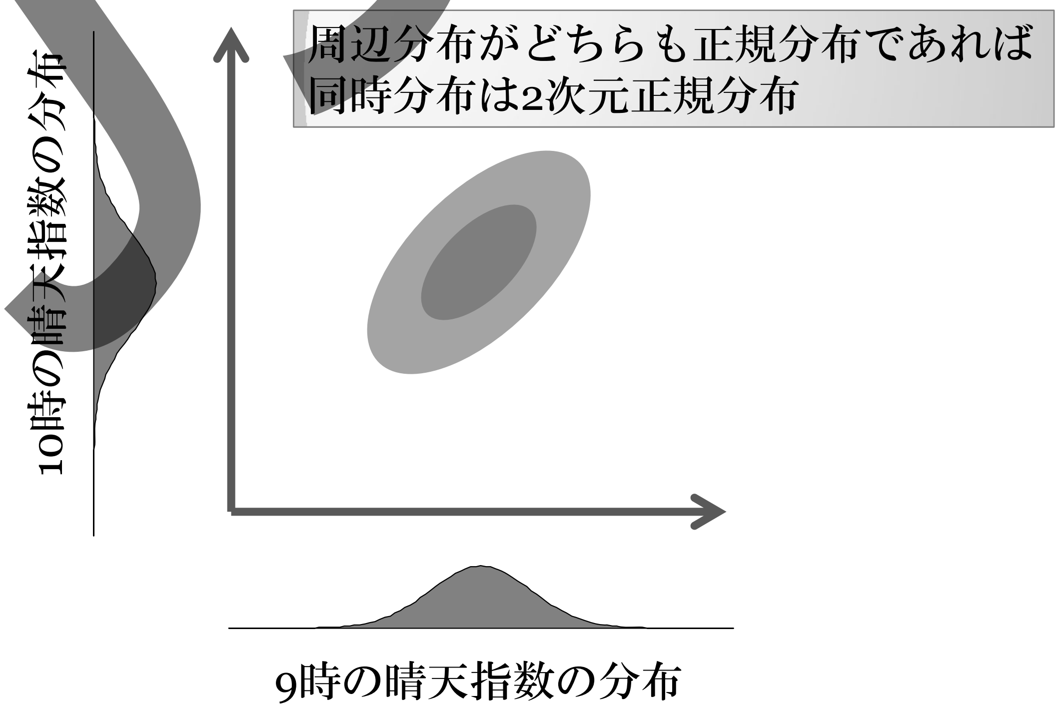
- 時系列の確率分布（多次元確率分布）を求めたい
  - $f_{1,\ldots,T}(y_1,\ldots,y_T)$ ⇒正規分布なら可能、でもベータ分布は？
- マルコフ性を仮定する
  - $f_{1,\ldots,T}(y_1,\ldots,y_T) = f_1(y_1)f_{2|1}(y_2|y_1)\cdots f_{T|T-1}(y_T|y_{T-1})$
  - $f_{t+1|t}(y_{t+1}|y_t) = \boxed{f_{t,t+1}(y_t,y_{t+1})}/f_t(y_t)$



コピュラ（接合関数）

cf.文献 [16-18]

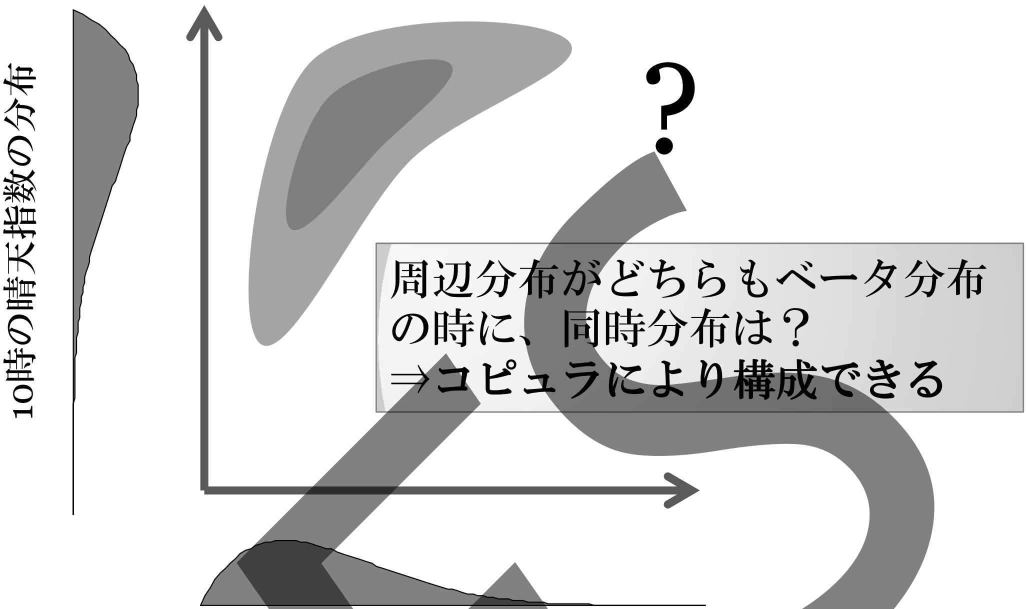
- 任意の周辺分布から同時分布を構成する方法



コピュラ（接合関数）

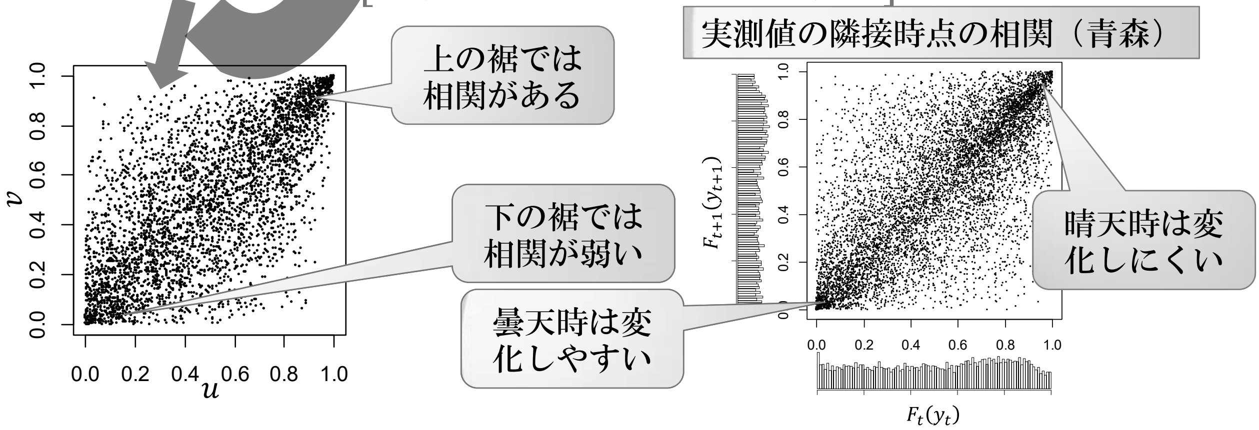
cf.文献 [16-18]

- 任意の周辺分布から同時分布を構成する方法

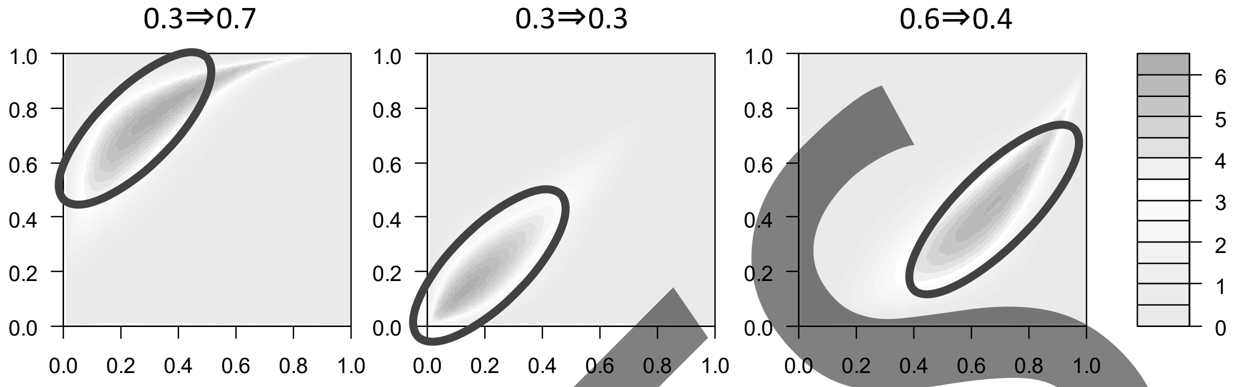


コピュラ（接合関数）

- コピュラ：特定の条件を満たす2変数関数 $C(u,v)$
  - ２つの周辺分布の累積分布関数$F(x), F(y)$ から、同時分布の累積分布関数を $F(x,y) = C\big(F(x), F(y)\big)$ と書ける(Sklarの定理）
- 今回用いた Gumbelコピュラ　(裾依存性が非対称)
  - $C(u,v) = \exp\left[-\left((-\log u)^{\theta} + (-\log v)^{\theta}\right)^{1/\theta}\right]$　　$(\theta = 2.12)$

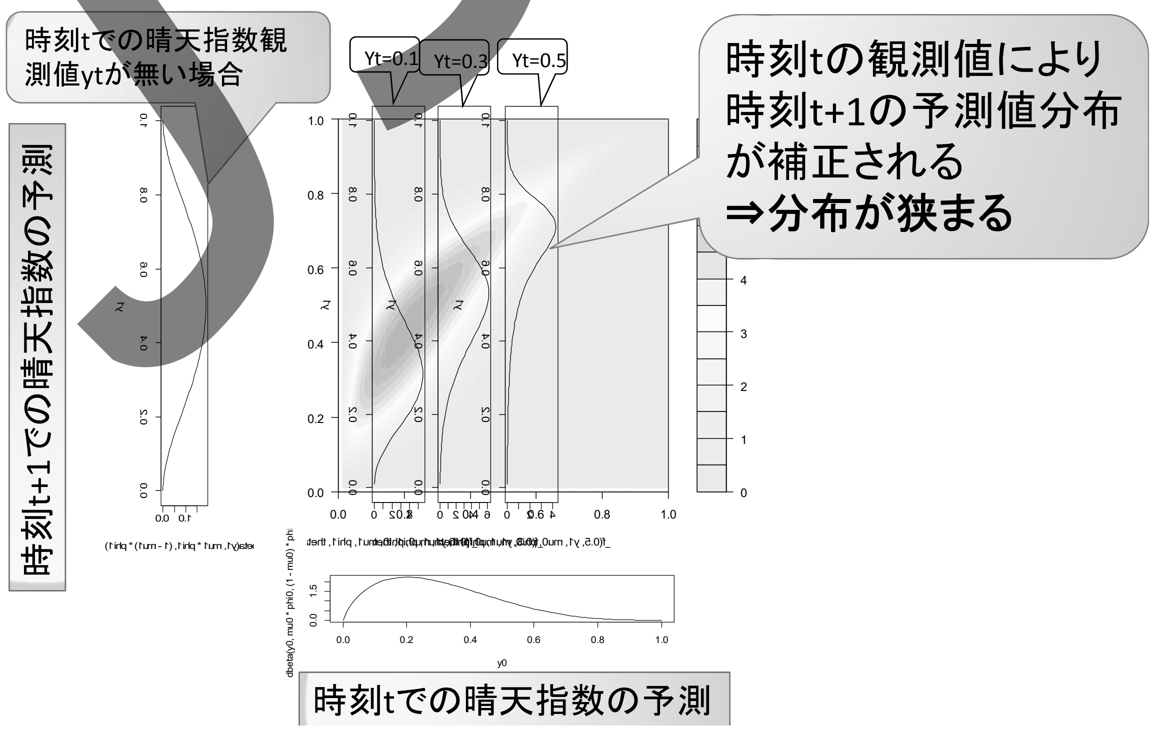


2次元ベータ分布の例

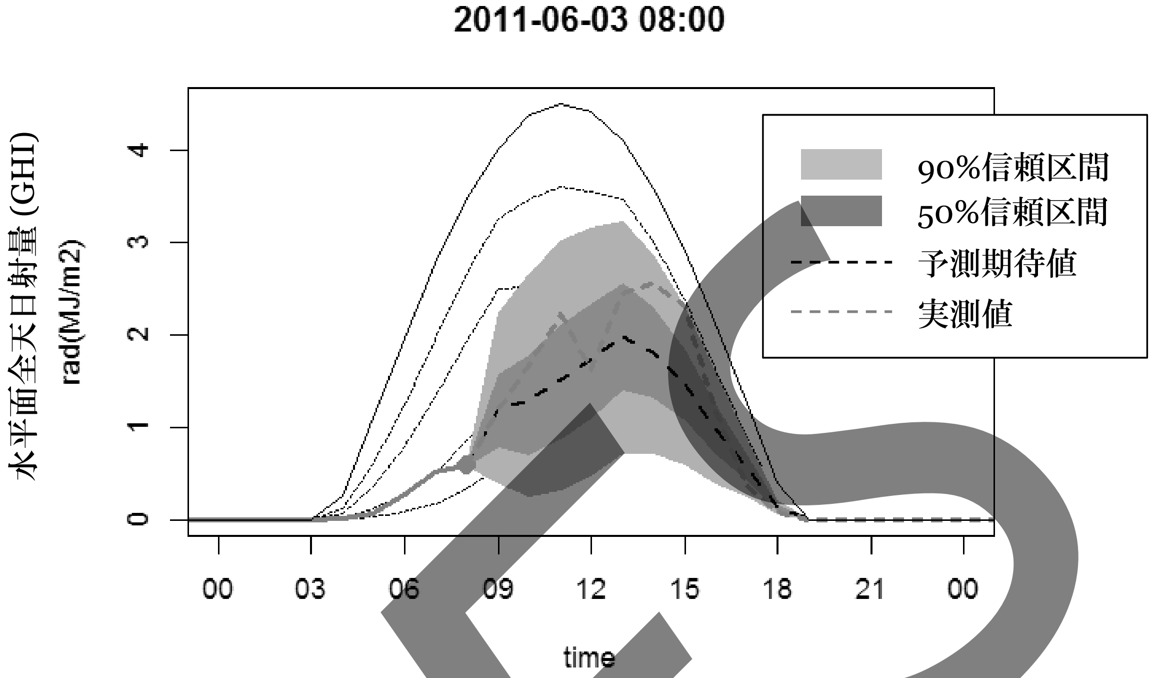


多次元正規分布による近似は、晴天指数が0か1に近い場合に矛盾を起こす
（それ以外では、良い近似になることもある）

時刻tでの晴天指数観測値が得られた場合のt+1での条件付き確率分布の例

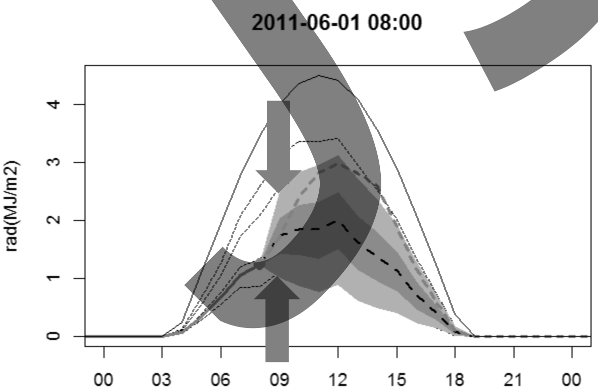


日射量実測値による予測の更新例

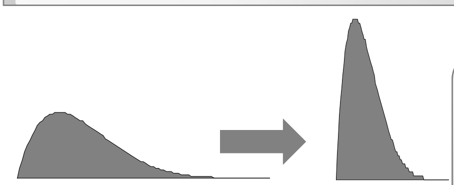


日射量実測値を反映する効果

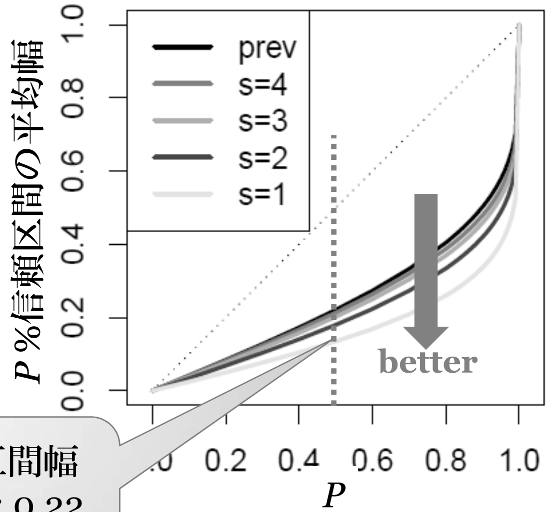
- 直近の予測について信頼区間を狭めることが可能



実測値を反映することで分布が狭まる



前日,4,3,2,1時間先予測の
信頼区間幅の変化

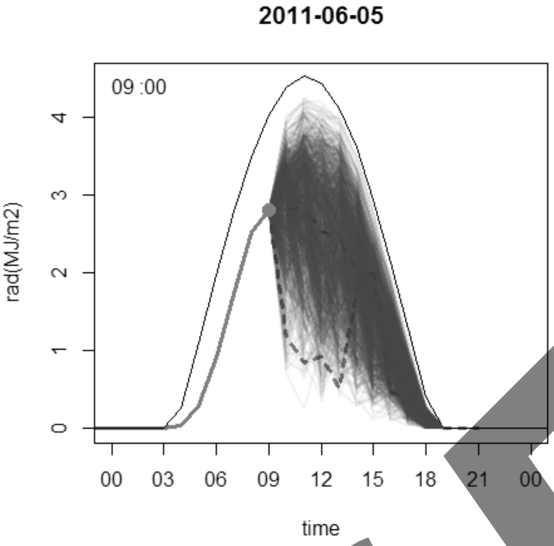


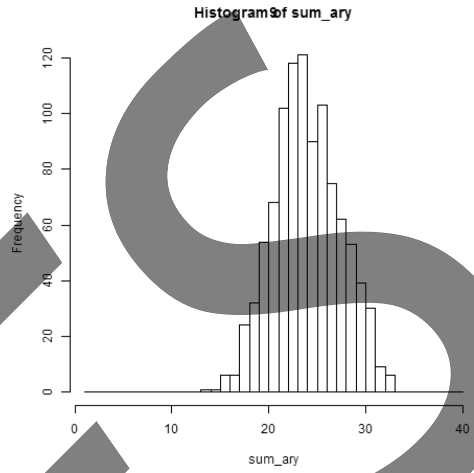
50%信頼区間幅
前日(prev): 0.22
1時間先: 0.13

Resolution diagram

乱数による確率的なシナリオ生成

- 時間相関を考慮した乱数で時系列を生成
  - 応用例）確率的制御への応用
  - 応用例）「日積算日射量の予測分布」を逐次更新





日積算日射量 (MJ/m2)

まとめ

- サービスの品質を保証するためには、予測「値」だけでなく日々変化する動的な予測「精度」が重要であり、確率的予測が必要となる
- 日射量は上下限を持つが、ベータ分布はそのような値の表現に適しており、ベータ分布の２つの母数を説明変数***x***の関数とする（ベータ回帰）ことで、動的に変動する予測分布をモデル化した
- コピュラを用いて2次元ベータ分布を構成した上で、マルコフ過程を構成し、日射量の時間相関をモデル化した
- 日射量の実測値を反映して予測を更新することにより、直近の予測について信頼区間を狭めることができた
- 予測確率分布の正しさを reliability, resolution プロットで確認した
- 確率的日射量シナリオを多数生成することで、ロバストな制御への活用が期待できる

参考文献１

- 風力発電の確率的予測　（分位点回帰が広く用いられている）
  - [1] デンマーク工科大の P.Pinson (http://pierrepinson.com/) 及び H. Madsen (http://www.imm.dtu.dk/~hmad/) らを始めとして、多数の研究例及び実用化例あり、例えば P. Pinson et al.: "From Probabilistic Forecasts to Statistical Scenarios of Short-term Wind Power Production", Wind Energy, Vol.12, No.1, pp.51-62, 2008.
  - [2] M. Lange and U. Focken:「風力発電出力の短期予測」, オーム社, 2012.
  - [3] P. Pinson and H. Madsen: "Forecasting Wind Power Generation: From Statistical Framework to Practical Aspects", 出版予定.
- 太陽光発電（日射量）の確率的予測
  - [4] T. Shiga, T. Kato, and Y. Suzuoki: "Stochastic Solar Radiation Forecast using Beta Regression and Copula-Based Markov Process", Proc. of SICE Annual Conference 2013, pp.1111-1116.
  - [5] 志賀孝広, 加藤丈佳, 鈴置保雄: 「ベータ回帰を用いた確率的日射量予測 ―大外れの予見可能性の検討―」, 電学論Ｂ, Vol.134, No.6, pp.527-536, 2014.
  - [6] T. Shiga, T. Kato, and Y. Suzuoki: "Probabilistic Solar Irradiation Forecast with Capability of Predicting Changing Uncertainty and Temporal Correlation", Proc. of EU PVSEC 2014, No. 5BV.1.4.
- 確率的予測における予測手法及び評価方法のレビュー
  - [7] 立平良三: 「気象予報における意思決定」, 東京堂出版, 1999.
  - [8] D. S. Wilks: "Statistical Methods in the Atmospheric Sciences", 3rd ed., Elsevier, 2011.
  - [9] I. T. Jolliffe and D. B. Stephenson: "Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science", 2nd ed., Wiley, 2012.
  - [10] 志賀孝広, 加藤丈佳, 鈴置保雄: 「再生可能エネルギーの確率的出力予測とその評価」, 電気学会 新エネルギー・環境／メタボリズム社会・環境システム 合同研究会, FTE-13-065/MES-13-021, 2013.11.

参考文献２

- 一般化線型モデル (GLM)
  - [11] A. J. Dobson:「一般化線形モデル入門」, 第2版, 共立出版, 2008.
- ベータ回帰 (Beta regression)
  - [12] S. L. P. Ferrari and F. Cribari-Neto: "Beta Regression for Modelling Rates and Proportions", Journal of Applied Statistics, Vol.31, No.7, pp.799–815, 2004.
  - [13] A. B. Simas, W. Barreto-Souza, and A.V. Rochab: "Improved estimators for a general class of beta regression models", Computational Statistics & Data Analysis, Vol.54, No.2, pp.348–366, 2010.
  - [14] 粕谷英一, 金明哲:「一般化線形モデル」, 共立出版, 2012.
  - [15] M. Smithson and E. C. Merkle: "Generalized Linear Models for Categorical and Continuous Limited Dependent Variables", Chapman & Hall/CRC, 2013.
- コピュラ及びコピュラマルコフ過程
  - [16] W. F. Darsow: "Copulas and Markov Process", Illinois Journal of Mathematics, Vol.36, No.4, pp.600–642, 1992.
  - [17] R. B. Nelsen: "An Introduction to Copulas", 2nd ed., Springer, 2006.
  - [18] 国友直人ら:「21世紀の統計科学III－数理計算の統計科学－」, 第5章 接合分布関数（コピュラ）の理論と応用（塚原英敦）, 東京大学出版会, 2008.