

付録C 数値予報研修テキストで用いた表記と統計的検証に用いる代表的な指標¹

本テキストで使用した表記と統計的検証に用いる代表的な指標などについて以下に説明する。

C.1 研修テキストで用いた表記について

C.1.1 時刻の表記について

本テキストでは、時刻を表記する際に、通常国内で用いられている日本標準時(Japan Standard Time, JST)の他に、協定世界時(Universal Time Coordinated, UTC)を用いている。

数値予報では国際的な観測データの交換やプロダクトの利用等の利便を考慮して、時刻はUTCで表記されることが多い。JSTはUTCに対して9時間進んでいる。

C.1.2 解像度の表記について

全球モデルの解像度について、xxを水平方向の切断波数、yyを鉛直層数として、“TxxLyy”と表記することがある。また、セミラグランジアンモデルでリニア格子(北川 2005)を用いる場合は“TLxxLyy”と表記する。北緯30度において、TL959は約20km格子、TL319は約55km格子、TL159は約110km格子に相当する。

C.1.3 予報時間について

数値予報では、統計的な検証や事例検証の結果を示す際に、予報対象時刻の他に、初期時刻からの経過時間を予報時間(Forecast Time, FT)として表記している。

本テキストでは、予報時間を

「予報時間」=「予報対象時刻」-「初期時刻」で定義し、例えば、6時間予報の場合、FT=6と表記しており、時間の単位(h)を省略している。

C.1.4 アンサンブル予報の表記について

アンサンブル予報では、複数の数値予報の集合(アンサンブル)を統計的に処理し、確率予報等の資料を作成する。本テキストでは、数値予報の集合の平均を「アンサンブル平均」、個々の予報を「メンバー」と呼ぶ。また、摂動を加えているメンバーを「摂動ラン」、摂動を加えていないメンバーを「コントロールラン」と呼ぶ。

C.1.5 緯度、経度の表記について

本テキストでは、緯度、経度について、アルファ

ベットを用いて例えば「北緯40度、東経130度」を「40°N、130°E」、「南緯40度、西経130度」を「40°S、130°W」などと略記する。

C.2 統計的検証に用いる代表的な指標

C.2.1 平均誤差、平方根平均二乗誤差、誤差の標準偏差

予報誤差を表す基本的な指標として、平均誤差(Mean Error, ME、バイアスと表記する場合もある)と平方根平均二乗誤差(Root Mean Square Error, RMSE)がある。これらは次式で定義される。

$$ME \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i)$$

$$RMSE \equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i)^2}$$

ここで、 N は標本数、 x_i は予報値、 a_i は実況値である(実況値は客観解析値、初期値や観測値が利用されることが多い)。MEは予報値の実況値からの偏りの平均であり、0に近いほど平均的な状態の実況からのずれが小さいことを示す。RMSEは最小値の0に近いほど予報が実況に近いことを示す。また、北半球平均等、広い領域に対して格子点値による平均をとる場合は、格子点が代表する面積重みをかけて算出する場合がある。

RMSEはMEの寄与とそれ以外を分離して、

$$RMSE^2 = ME^2 + \sigma_e^2$$

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i - ME)^2$$

と表すことができる。 σ_e は誤差の標準偏差である。

本テキストでは、数値予報に改良を加えた際の評価指標として、RMSEの改善率を用いる場合がある。RMSEの改善率は次式で定義される。

$$RMSE \text{改善率} \equiv \frac{RMSE_{ctrl} - RMSE_{test}}{RMSE_{ctrl}} \times 100$$

ここで、 $RMSE_{ctrl}$ は基準となる予報の、 $RMSE_{test}$ は改良を加えた予報のRMSEである。

C.2.2 アノマリー相関係数

アノマリー相関係数(Anomaly Correlation Coefficient, ACC)とは、予報値の基準値からの偏差(アノマリー)と実況値の基準値からの偏差との相関係数であり、次式で定義される。

$$ACC \equiv \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(A_i - \bar{A})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2}}$$

¹ 太田 洋一郎

$$(-1 \leq ACC \leq 1)$$

ただし、

$$X_i = x_i - c_i, \quad \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

$$A_i = a_i - c_i, \quad \bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i$$

である。ここで、 N は標本数、 x_i は予報値、 a_i は実況値、 c_i は基準値である。基準値としては気候値を用いることが多い。アノマリー相関係数は予報と実況の基準値からの偏差の相関を示し、基準値からの偏差の増減のパターンが完全に一致している場合には最大値の1をとり、相関が全くない場合には0をとり、逆に全くパターンが反転している場合には最小値の-1をとる。なお、アノマリー相関係数や第C.2.1項の平均誤差、平方根平均二乗誤差の関係は梅津ほか(2013)に詳しい。

C.2.2 スプレッド

スプレッドは、アンサンブル予報のメンバーの広がり示す指標であり、次式で定義される。

$$\text{スプレッド} \equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (x_{mi} - \bar{x}_i)^2 \right)}$$

ここで、 M はアンサンブル予報のメンバー数、 N は標本数、 x_{mi} は m 番目のメンバーの予報値、 \bar{x}_i は

$$\bar{x}_i \equiv \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M x_{mi}$$

で定義されるアンサンブル平均である。

C.3 カテゴリー検証で用いる指標など

カテゴリー検証では、まず、対象となる現象の有無を予報と実況それぞれについて判定し、その結果により標本を分類する。そして、それぞれのカテゴリーに分類された事例数をもとに、予報の特性を検証するという手順を踏む。

C.3.1 分割表

分割表は、カテゴリー検証においてそれぞれのカテゴリーに分類された事例数を示す表である(表C.3.1)。各スコアは、表C.3.1に示される各区分の事例数を用いて定義される。

また、以下では全事例数を $N = FO + FX + XO + XX$ 、

表C.3.1 分割表。FO、FX、XO、XXはそれぞれの事例数を表す。

		実況		計
		あり	なし	
予報	あり	FO	FX	FO+FX
	なし	XO	XX	XO+XX
計		M	X	N

実況「現象あり」の事例数を $M = FO + XO$ 、実況「現象なし」の事例数を $X = FX + XX$ と表す。

C.3.2 適中率

適中率は、予報が適中した割合である。

$$\text{適中率} \equiv \frac{FO + XX}{N} \quad (0 \leq \text{適中率} \leq 1)$$

最大値の1に近いほど予報の精度が高いことを示す。

C.3.3 空振り率

空振り率は、予報「現象あり」の事例数に対する空振り(予報「現象あり」かつ実況「現象なし」)の割合である。

$$\text{空振り率} \equiv \frac{FX}{FO + FX} \quad (0 \leq \text{空振り率} \leq 1)$$

最小値の0に近いほど空振りが少ないことを示す。本テキストでは分母を $FO + FX$ としているが、代わりに N として定義する場合もある。

C.3.4 見逃し率

見逃し率は、実況「現象あり」の事例数($M = FO + XO$)に対する見逃し(実況「現象あり」かつ予報「現象なし」)の割合である。

$$\text{見逃し率} \equiv \frac{XO}{M} \quad (0 \leq \text{見逃し率} \leq 1)$$

最小値の0に近いほど見逃しが少ないことを示す。本テキストでは分母を M としているが、代わりに N として定義する場合もある。

C.3.5 捕捉率

捕捉率(Hit Rate, Hr)は、実況「現象あり」のときに予報が適中した割合である。

$$\text{Hr} \equiv \frac{FO}{M} \quad (0 \leq \text{Hr} \leq 1)$$

最大値の1に近いほど、見逃しが少ないことを示す。捕捉率はROC曲線(第C.4.5項)のプロットに用いられる。

C.3.6 誤検出率

誤検出率(False Alarm Rate, Fr)は、実況「現象なし」のときに予報が外れた割合であり、第C.3.3項の空振り率とは分母が異なる。

$$\text{Fr} \equiv \frac{FX}{X} \quad (0 \leq \text{Fr} \leq 1)$$

最小値の0に近いほど、空振りの予報が少なく予報の精度が高いことを示す。誤検出率は捕捉率(第C.3.5項)とともにROC曲線(第C.4.5項)のプロットに用いられる。

C.3.7 バイアスコア

バイアスコア(Bias Score, BI)は、実況「現象あり」の事例数に対する予報「現象あり」の事例数の比であり、次式で定義される。

$$BI \equiv \frac{FO+FX}{M} \quad (0 \leq BI)$$

予報と実況で「現象あり」の事例数が一致する場合に1となる。1より大きいほど予報の「現象あり」の頻度が過大、1より小さいほど予報の「現象あり」の頻度が過小であることを示す。

C.3.8 気候学的出現率

現象の気候学的出現率 P_c は、標本から見積もられる現象の平均的な出現確率であり、次式で定義される。

$$P_c \equiv \frac{M}{N}$$

この量は実況のみから決まり、予報の精度にはよらない。予報の精度を評価する際の基準値の設定にしばしば用いられる。

C.3.9 スレットスコア

スレットスコア(Threat Score, TS)は、予報または実況で「現象あり」の場合の予報適中事例数に着目して予報精度を評価する指標であり、次式で定義される。

$$TS \equiv \frac{FO}{FO+FX+XO} \quad (0 \leq TS \leq 1)$$

出現頻度の低い現象 ($N \gg M$ 、従って、 $XX \gg FO, FX, XO$ となって、予報「現象なし」による寄与だけで適中率が1に近い現象) について XX の影響を除いて検証するのに有効である。本スコアは最大値の1に近いほど予報の精度が高いことを示す。なお、スレットスコアは現象の気候学的出現率の影響を受けやすく、異なる標本や出現率の異なる現象に対する予報の精度を比較するには適さない。この問題を緩和するため、次項のエクイタブルスレットスコアなどが考案されている。

C.3.10 エクイタブルスレットスコア

エクイタブルスレットスコア(Equitable Threat Score, ETS)は、気候学的な確率で「現象あり」が適中した頻度を除いて求めたスレットスコアであり、次式で定義される(Schaefer 1990)。

$$ETS \equiv \frac{FO - S_f}{FO+FX+XO - S_f} \quad \left(-\frac{1}{3} \leq ETS \leq 1\right)$$

ただし、

$$S_f = P_c(FO+FX), \quad P_c = \frac{M}{N}$$

である。ここで、 P_c は現象の気候学的出現率 (第

C.3.8項)、 S_f は「現象あり」をランダムに $FO+FX$ 回予報した場合 (ランダム予報) の「現象あり」の適中事例数である。本スコアは、最大値の1に近いほど予報の精度が高いことを示す。また、ランダム予報で0となり、 $FO = XX = 0$ 、 $FX = XO = N/2$ の場合に最小値 $-1/3$ をとる。

C.3.11 スキルスコア

スキルスコア(Skill Score, Heidke Skill Score)は、気候学的な確率で「現象あり」および「現象なし」が適中した頻度を除いて求める適中率であり、次式で定義される。

$$Skill \equiv \frac{FO+XX-S}{N-S} \quad (-1 \leq Skill \leq 1)$$

ただし、

$$S = Pm_c(FO+FX) + Px_c(XO+XX),$$

$$Pm_c = \frac{M}{N}, \quad Px_c = \frac{X}{N}$$

である。ここで、 Pm_c は「現象あり」、 Px_c は「現象なし」の気候学的出現率 (第C.3.8項)、 S は現象の「あり」を $FO+FX$ 回 (すなわち、「なし」を残りの $XO+XX$ 回) ランダムに予報した場合 (ランダム予報) の適中事例数である。本スコアは、最大値の1に近いほど予報の精度が高いことを示す。また、ランダム予報で0となり、 $FO = XX = 0$ 、 $FX = XO = N/2$ の場合に最小値 -1 をとる。

C.4 確率予報に関する指標など

C.4.1 ブライアスコア

ブライアスコア(Brier Score, BS)は、確率予報の統計検証の基本的指標である。ある現象の出現確率を対象とする予報について、次式で定義される。

$$BS \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - a_i)^2 \quad (0 \leq BS \leq 1)$$

ここで、 p_i は確率予報値 (0から1)、 a_i は実況値 (現象ありで1、なしで0)、 N は標本数である。 BS は完全に適中する決定論的な ($p_i=0$ または 1) 予報 (完全予報と呼ばれる) で最小値0をとり、0に近いほど予報の精度が高いことを示す。また、現象の気候学的出現率 $P_c = M/N$ (第C.3.8項) を常に確率予報値とする予報 (気候値予報と呼ばれる) のブライアスコア BS_c は

$$BS_c \equiv P_c(1 - P_c)$$

となる。ブライアスコアは、現象の気候学的出現率の影響を受けるため、異なる標本や出現率の異なる現象に対する予報の精度を比較するには適さない。例えば上の BS_c は P_c 依存性を持ち、同じ予報手

法（ここでは気候値予報）に対しても P_c の値に応じて異なる値をとる(Stanski et al. 1989)。この問題を緩和するため、次項のブライアスキルスコアが考案されている。

C.4.2 ブライアスキルスコア

ブライアスキルスコア(Brier Skill Score, BSS)は、ブライアスコアに基づくスキルスコアであり、通常気候値予報を基準とした予報の改善の度合いを示す。本スコアは、ブライアスコア BS 、気候値予報によるブライアスコア BS_c を用いて

$$BSS = \frac{BS_c - BS}{BS_c} \quad (BSS \leq 1)$$

で定義され、完全予報で1、気候値予報で0、気候値予報より誤差が大きいと負となる。

C.4.3 Murphyの分解

Murphy(1973)は、ブライアスコアと予報の特性との関連を理解しやすくするため、ブライアスコアを信頼度(reliability)、分離度(resolution)、不確実性(uncertainty)の3つの項に分解した。これをMurphyの分解と呼ぶ(高野(2002)などに詳しい)。

確率予報において、確率予報値を L 個の区間に分け、標本を確率予報値の属する区間に応じて分類することを考える。確率予報値が l 番目の区間に属する標本数を N_l ($N = \sum_{l=1}^L N_l$)、このうち実況が「現象あり」であった事例数を M_l ($M = \sum_{l=1}^L M_l$) とすると、Murphyの分解により、ブライアスコアは以下のように表される(確率予報値の l 番目の区間の区間代表値を p_l とする)。

$$BS = \text{信頼度} - \text{分離度} + \text{不確実性}$$

$$\text{信頼度} = \sum_{l=1}^L \left(p_l - \frac{M_l}{N_l} \right)^2 \frac{N_l}{N}$$

$$\text{分離度} = \sum_{l=1}^L \left(\frac{M}{N} - \frac{M_l}{N_l} \right)^2 \frac{N_l}{N}$$

$$\text{不確実性} = \frac{M}{N} \left(1 - \frac{M}{N} \right)$$

信頼度は、確率予報値(p_l)と実況での現象の出現相対頻度(M_l/N_l)が一致すれば最小値の0となる。分離度は、確率予報値に対応する実況での現象の出現相対頻度(M_l/N_l)が気候学的出現率($P_c = M/N$)から離れているほど大きい値をとる。不確実性は、現象の気候学的出現率のみによって決まり、予報の手法によらない。例えば、 $P_c=0.5$ の場合に不確実性は最大値の0.25をとる。また、不確実性= BS_c が成り立つ。これらを用いて、ブライアスキルスコアを次のように書くことができる。

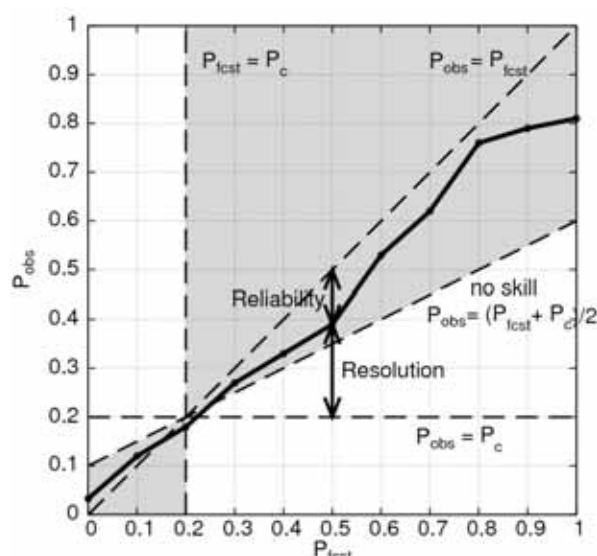
$$BSS = \frac{\text{分離度} - \text{信頼度}}{\text{不確実性}}$$

C.4.4 確率値別出現率図

確率値別出現率図 (Reliability Diagram, Attributes Diagram と呼ばれる) は、予報された現象出現確率 P_{fcst} を横軸に、実況で現象が出現した相対頻度 P_{obs} を縦軸にとり、確率予報の特性を示した図である(図C.4.1参照、Wilks(2011)などに詳しい)。一般に、確率予報の特性は、確率値別出現率図上で曲線として表される。この曲線を信頼度曲線(Reliability curve)と呼ぶ。

信頼度曲線の特性は、Murphyの分解(第C.4.3項)の信頼度、分離度と関連付けることができる。横軸 P_{fcst} の各値について、信頼度(あるいは分離度)への寄与は、信頼度曲線上の点から対角線 $P_{obs} = P_{fcst}$ 上の点(あるいは直線 $P_{obs} = P_c$ 上の点)までの距離の二乗として表現される。 P_{fcst} の各値でのこれらの寄与を、標本数に比例する重みで平均して信頼度(あるいは分離度)が得られる。例えば、no-skill line(直線 $P_{obs} = (P_{fcst} + P_c)/2$) 上の点では、信頼度と分離度への寄与は等しい大きさを持ち、ブライアスキルスコアへの寄与が0となる。またno-skill lineと直線 $P_{fcst} = P_c$ との間の領域(分離度への寄与>信頼度への寄与、図C.4.1 灰色の領域)内に位置する点は、ブライアスキルスコアに正の寄与を持つ。

特別な場合として、気候値予報(第C.4.1項参照)では、1点(P_{fcst}, P_{obs})= (P_c, P_c) が信頼度曲線に対応する。また、次の2つの特性を示す確率予報は精度が



図C.4.1 確率値別出現率図の模式図。横軸は予報現象出現確率、縦軸は実況現象出現相対頻度、実線が信頼度曲線である。対角線、直線 $P_{obs} = P_c$ との差の二乗がそれぞれ信頼度(Reliability)、分離度(Resolution)への寄与に対応している。灰色の領域内の点は、ブライアスキルスコアに正の寄与を持つ。

高い。

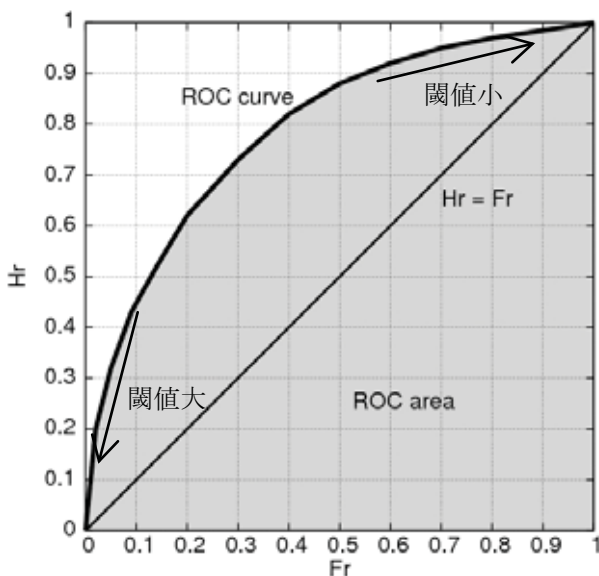
- ・信頼度曲線が対角線に（信頼度への寄与が最小値の0に）近い。
- ・信頼度曲線上の大きい標本数に対応する点が、点 $(P_{fcst}, P_{obs}) = (P_c, P_c)$ （気候値予報）から離れた位置（確率値別出現率図の左下または右上寄り）に分布する（分離度が大きい）。

C.4.5 ROC面積スキルスコア

確率予報では、予報の現象出現確率にある閾値を設定し、これを予報の「現象あり」「現象なし」を判定する基準とすることが可能である。さまざまな閾値それぞれについて作成した分割表をもとに、閾値が変化したときの $Fr - Hr$ 平面（ここで Fr は第 C.3.6 項の False Alarm Rate、 Hr は第 C.3.5 項の Hit Rate）上の軌跡をプロットしたものが ROC 曲線（相対作用特性曲線、Relative Operating Characteristic curve、ROC curve）である（図 C.4.2 参照、高野(2002)などに詳しい）。平面内の左上方の領域では $Hr > Fr$ であり、平面の左上側に膨らんだ ROC 曲線特性を持つ確率予報ほど精度が高いものと見なせる。従って、ROC 曲線から下の領域（図 C.4.2 灰色の領域）の面積（ROC 面積、ROC area、ROCA）は、情報価値の高い確率予報ほど大きくなる。ROC 面積スキルスコア(ROC Area Skill Score, ROCASS)は、情報価値のない予報($Hr = Fr$)を基準として ROC 面積を評価するものであり、次式で定義される。

$$ROCASS \equiv 2(ROCA - 0.5) \quad (-1 \leq ROCASS \leq 1)$$

本スコアは、完全予報で最大値の1をとる。また、



図C.4.2 ROC 曲線の模式図。横軸はFr、縦軸はHrである。灰色の領域の面積がROC面積である。

情報価値のない予報（例えば、区間[0,1]から一様ランダムに抽出した値を確率予報値とする予報など）では0となる。

C.4.6 CRPS

CRPS(Continuous Ranked Probability Score)は、確率予報の統計検証の指標の一つである。連続物理量 x に対するCRPSは次式で定義される。

$$CRPS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} [P_i(x) - A_i(x)]^2 dx \quad (0 \leq CRPS)$$

ここで、 N は標本数、 P_i と A_i はそれぞれ予報と実況の累積分布関数であり、次式で定義される。

$$P_i(x) = \int_{-\infty}^x \rho_i(x') dx'$$

$$A_i(x) = H(x - a_i)$$

ここで、 ρ_i は予報された確率密度関数、 a_i は実況値、 $H(x)$ はヘビサイド関数である。

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases}$$

CRPSは完全に適中する決定論的な予報で最小値0をとる、0に近いほど予報の精度が高いことを示す。単位は物理量 x と同じである。

また、物理量 x が閾値 t 以下となる現象の確率予報に対するブライアスコアを $BS(t)$ とおくと、

$$CRPS = \int_{-\infty}^{\infty} BS(t) dt$$

の関係がある。

参考文献

- 梅津浩典, 室井ちあし, 原旅人, 2013: 検証指標. 数値予報課報告・別冊第59号, 気象庁予報部, 6-15.
- 北川裕人, 2005: 全球・領域・台風モデル. 平成17年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 38-43.
- 高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術. アンサンブル予報, 気象研究ノート, **201**, 73-103.
- Murphy, A. H., 1973: A new vector partition of the probability score. *J. Appl. Meteor.*, **12**, 595-600.
- Schaefer, J. T., 1990: The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, **5**, 570-575.
- Stanski, H. R., L. J. Wilson, and W. R. Burrows, 1989: Survey of common verification methods in meteorology. *Research Report No. (MSRB) 89-5*, Forecast Research Division, Atmospheric Environment Service, Environment Canada.
- Wilks, D. S., 2011: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences Third Edition. *International Geophysical Series vol.100*, Academic Press, 676pp.