第4章 RI インデックス¹

4-1 RI インデックスとは

RIインデックスは、急発達(以下、RIと記す。)インデックスの略で、熱帯低気圧が今後24時間以内に急発達する確率を予測する指標である。SHIPSと同様に、数値モデルが予測する熱帯低気圧進路に沿った環境場条件と統計量等を用いて、RIの確率を算出する統計力学モデルである。第2章で示した通り、SHIPSは急発達の予測を不得手としており、強度を弱めに予想する傾向がある。この欠点を補うため、RIの発生確率の予測に特化したモデルとして、RIインデックスがKaplan et al. (2010)により開発された。現場の台風予報官は、RIインデックスを通じてRIの可能性が高いと予測される時に、SHIPSの予測強度を大きめに補正することが可能となる。

ここで、RIの確率がどのように計算されるかを説明する。RIインデックスは、判別関数に基づき、 その関数に対応づけられた RI の確率値として作成される。判別関数とは、ある事例がいくつかのグル ープの中の一つに属していると考えられる時、関連する説明変数を用いてその事例がどのグループに属 するのか判別するために使われる関数である。気象庁で使用する RIインデックス(以下、「気象庁版 RIインデックス」という。)では、Kaplan *et al.* (2010)と同様に、各事例を RI しているグループ(RI グ ループ)と、RI していないグループ(non-RI グループ)の2つに分け、判別関数として線形判別式を 用いる。線形判別式は説明変数の数 p に対し次式で表される。

 $z = w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + \cdots + w_p x_p \quad (4.1)$

zは、各説明変数($x_1, x_2, x_3, \cdot \cdot \cdot, x_p$)に対し、各事例がどちらのグループに属するか最適に判別する重み($W_1, W_2, W_3, \cdot \cdot \cdot, W_p$)によって線形写像される値である。重みベクトル**W**は、

w = **S**⁻¹ ($\overline{\mathbf{x}_{RI}} - \overline{\mathbf{x}_{non-RI}}$) (4.2) で計算され、それぞれのグループの説明変数の平均値の差($\overline{\mathbf{x}_{RI}} - \overline{\mathbf{x}_{non-RI}}$)が大きく、説明変数の共分 散**S**が小さくなるように与えられる。ここで太字はベクトルを表す。詳しくは、例えば Wilks (2006)の 第 13 章第 2 節を参照されたい。

実際の作業では、まずトレーニングサンプル(従属サンプル)を用い、各事例を RI グループと、 non-RI グループに分ける。次に、その分類に基づき、線形判別式 (4.1)の重みを算出する。判別関数で 使用する説明変数は、RI 事例と non-RI 事例で統計的に有意な差があるものを用いる。

こうして算出した判別関数に、トレーニングサンプルの各事例の説明変数を改めて代入しても、ある z値できれいに RI 事例と non-RI 事例が分かれるわけではない。複数の事例でほぼ同じz値になっても、 実際にある事例は RI 事例で、別の事例は non-RI 事例となり得る。しかし、全体的には、z値とそこに RI 事例が含まれる確率は比例する関係となる。RI インデックスは、判別関数のz値をマッチアップテ ーブルによって RI の確率値に対応づけたものである。マッチアップテーブルは、一度トレーニングサ ンプルを用いて判別関数を作成した後、トレーニングサンプルの説明変数を再び判別関数に代入して z 値を得て、それを RI の確率と対応させることで作成する。ここまでがトレーニングサンプルを使った 事前準備である。予測の際には、説明変数から判別関数のz値を計算し、その値とマッチアップテーブ ルから RI の確率を求めることになる。

4-2 気象庁版 RI インデックスの構築

気象庁版 RI インデックスは、24 時間に 20 hPa 以上、または 20 kt 以上発達するものを急発達と定義し、 その発生確率を計算するものとした。この定量的基準は、全体のトレーニングサンプルの十数 % 程度

¹ 嶋田宇大

が RI グループに属するよう(つまり、RI の確率の気候値が十数%となるように)決定された。通常、 RI の定量的基準として、24 時間に 30 hPa (Shimada *et al.* 2017) や 30 kt (Kaplan and DeMaria 2003) 以上の 強度変化量が用いられることが多い。しかしながら、2000 年から 2012 年までのトレーニングサンプル では、通常の基準だと RI の確率の気候値が 5-10 % となり、RI の確率を算出するのに十分なサンプル が集まらなかった。

4-2-1 使用データ

気象庁版 RI インデックスに使用するデータは、SHIPS と同様である。表 2-1 及び第 2-2-1 節を参照い ただきたい。

4-2-2 説明変数

表 4.1 に RI インデックスで使用される説明変数リストを示す。Pmin、Vmax の RI インデックスは、 その計算にあたってそれぞれ 9 つの説明変数を使用している。これらは Kaplan et al. (2010) で使用され ていたものを基準として選んでいる。ただし、Pmin の RI インデックスの説明変数のうち、下層または 中層湿度は、RI 事例と non-RI 事例で大きな差が見られなかったため、SHIPS で寄与度の大きな変数と して使われている「初期時刻の Pmin と 970hPa の差の絶対値 (OSLP)」を代わりに使用することにした。 なお、RI インデックスの説明変数については、SHIPS のそれと同様に、表 4.1 の「最大到達可能強度 (MPI) と初期時刻の Vmax との差 (POT)」、「鉛直シアー (SHDC)」、「200 hPa 高度の発散 (D200)」、「海洋貯 熱量 (OHC)」及び「下層湿度 (RHLO)」は RI 予測の対象期間である初期時刻から 24 時間先までの予 測された台風進路に沿った平均値である。

表 4.2 及び表 4.3 はそれぞれ、RI 事例と non-RI 事例に対する各説明変数の平均差を示す。Pmin の説 明変数は、全ての変数で 99.9 %の水準で統計的に有意な平均差があった。POT、D200、「前 12 時間の Pmin の変化傾向(PERP)」、「輝度温度 –30℃以下の割合(PC30)」、OHC、「数値モデル(GSM)におけ る擾乱の 850 hPa 接線風速の時間変化傾向(TWAT)」は RI 事例ほど大きい傾向があった。一方、SHDC、「輝 度温度の標準偏差(SDIR)」、OSLP は RI 事例ほど小さい傾向があった。Vmax については、SDIR 以外 の変数で統計的に有意な差があった。その値の傾向は Pmin と整合的である。SDIR において、Pmin と Vmax で傾向が異なる理由は不明である。SDIR については今後、RI 事例と non-RI 事例間で統計的に有 意な差がある別の変数に変更することが課題として残る。

説明変数	説明	対象
CONST	環境場の気候値	P, V
POT	最大到達可能強度(MPI)と初期時刻の Vmax との差	P, V
SHDC	850–200 ⁻ hPa 間の鉛直シアー (r=0–500 km)	P, V
D200	200hPa 高度の発散	P, V
PERP	前 12 時間の Pmin の変化傾向	Р
PERV	前 12 時間の Vmax の変化傾向	V
PC30	中心から半径 50–200km 以内の IR 輝度温度–30℃以下の割合	P, V
SDIR	中心から半径 100–300km 以内の IR 輝度温度の標準偏差	P, V
OHC	海洋貯熱量 (熱帯低気圧中心付近)	
OSLP	初期時刻の Pmin と 970hPa の差の絶対値	Р
RHLO	下層湿度(850–700 hPa)	V
TWAT	850hPa 接線風速の変化傾向	P, V

表 4.1 RI インデックスの説明変数リスト。Pmin 及び Vmax 用の説明変数として、P 及び V で記されている。

Predictor	RI	non-RI	RI – non-RI	unit
POT	107.7	92.9	14.8	kt
SHDC	8.8	12.7	-4.0	kt
D200	67.2	50.2	17.0	$\times \ 10^{-7} \ \mathrm{s}^{-1}$
PERP	9.8	2.2	7.5	hPa
PC30	92.7	81.7	11.0	%
SDIR	19.7	21.0	-1.3	К
OHC	90.0	53.2	36.9	kJ cm ⁻²
OSLP	12.5	19.5	-7.0	hPa
TWAT	1.9	0.3	1.5	kt

表 4.2 Pmin 用の RI インデックスで使用される説明変数の、RI 事例及び non-RI 事例の平均値。太字は non-RI 事例と RI 事例で説明変数の平均差が統計的有意(99.9% レベル)であることを示す。

表 4.3 Vmax 用の RI インデックスで使用される説明変数の、RI 事例及び non-RI 事例の平均値。太字は non-RI 事例と RI 事例で説明変数の差が統計的有意(99.9% レベル)であることを示す。

Predictor	RI	non-RI	$\mathrm{RI}-\mathrm{non}\text{-}\mathrm{RI}$	unit
POT	112.2	92.7	19.5	kt
SHDC	9.0	12.6	-3.6	\mathbf{kt}
D200	67.5	50.7	16.9	$\times \ 10^{-7} \ s^{-1}$
PERV	9.2	2.4	6.9	\mathbf{kt}
PC30	90.7	82.3	8.3	%
SDIR	20.7	20.8	-0.1	Κ
OHC	92.5	53.9	38.5	$kJ \ cm^{-2}$
RHLO	71.2	69.9	1.3	%
TWAT	1.8	0.4	1.4	kt

4-2-3 RI インデックスの作成

第4-1節で説明した通りの手順で、第2章と同じトレーニングサンプルを使用して RI インデックス を作成した。判別関数の構築に当たり、本研究では IMSL ライブラリーを利用した。ここで注意したい のは、判別関数を使っても、RI 事例と non-RI 事例がきれいに分類されるわけではないということである。 表4.4 及び表4.5 は、トレーニングサンプルを使用し、Pmin 及び Vmax の RI が判別関数そのものによ ってどの程度判定できるかを分割表に示したものである。判別関数で RI と判別されても実際には RI し ない事例、及び non-RI と判別されても実際には RI した事例が、従属サンプルでさえ多く存在する。

とはいえ、判別関数に基づく RI インデックスは、気候学的な RI の確率よりも精度が良いことは確認 できる。ここではその指標として、ブライア・スキル・スコア(BSS)(付録 2 参照)を使用する。従 属サンプルを利用して計算した RI インデックスの BSS は、Pmin で 32.2, Vmax で 26.4 であり、気候学 に基づく RI 予測よりも精度が良いことを示す(表 4.6)。

表 4.6 では、BSS の他に、RI インデックスの値がある閾値以上の時は RI 予測、以下の時は non-RI 予測とした場合、どの閾値をとると、スレット・スコア(TS)(付録 2 参照)の値が最も良いかを従属サンプルで調べた結果を示す。その結果、Pmin については RI インデックスの閾値を 32.5、Vmax は 22.5 にすると良いという結果が得られた。この時の各種指標値は表 4.6 に示す通りである。

表 4.4 RI インデックスの判別関数を用いて従属サンプルを分類した場合の分割表 (Pmin の場合)。この結 果は、この判別関数がそもそもどの程度従属サンプルを分類できるのかを示している。

Pmin		non-RI 判別	RI 判別	
	non-RI 観測	2965	305	
	RI 観測	227	360	

表 4.5 表 4.4 と同じ、ただし Vmax に対する分割表。

Pmin	non-RI 判別	RI 判別
non-RI 観測	2965	305
RI 観測	227	360

表 4.6 RI インデックスの導出に使用した従属サンプルの数と、従属サンプルを利用して計算した RI イン デックスのブライア・スキル・スコア (BSS)、従属サンプルを使用した場合に最も大きな(最適な)ス レット・スコア (TS) 値をとる RI インデックスの閾値、及びその場合の精度評価。各種指標の定義は付 録 2 を参照のこと。

	Pmin	Vmax
予測事例数	3857	3857
BSS	32.2	26.4
最適な TS 値	40.4	35.6
(その時の RI インデックス値)	(32.5)	(22.5)
バイアス	113.3	174.3
捕捉率(Hit Rate, POD)	61.3	72.1
空振り率 (FAR)	45.9	58.7
誤検出率(F, POFD)	9.3	14.6

4-3 精度検証

4-3-1 統計検証

2013 年から 2016 年までの独立サンプルを用いた RI インデックスの信頼度評価として、信頼度曲線 図を用いる(図 4.1)。この図は、RI インデックスの値に対して、実際に RI が起こった確率は何% で



図 4.1 独立サンプル(2013-2016 の事例)による RI インデックスの信頼度曲線。横軸が RI インデックス、 左縦軸が実際に RI が起きた確率(緑)、右横軸がサンプル数(棒グラフ)。(a)Pmin。(b)Vmax。 あったかを示すもので、横軸が RI インデックス、左縦軸が各 RI インデックス値のサンプル数に対する 実際の RI 比率 (%)、右縦軸が各 RI インデックス値のサンプル数である。緑の線が実際の RI の比率を 示し、1 対 1 線上にあれば、信頼度情報として RI インデックスは十分な精度を持つことを示す。図 4.1 によると、Pmin については、おおむね 1 対 1 線上に乗っている。一方で、RI インデックスが 0 の時に も実際には RI していた事例がいくつか存在していたことも示している。Vmax については、おおむね 良いが、RI インデックスが 20% から 40% の間にある時、実際に RI が起きた比率が低すぎる傾向がある。 また、Pmin と同様に、RI インデックスが 0 を示した時にも RI が起きていた。

次に、確率予測の精度として、独立サンプルの BSS で評価する(表 4.7)。Vmax の BSS 値(7.2)が Pmin の BSS 値(19.9)よりもずっと低くなっており、独立サンプルでは Vmax の RI の確率予測精度が かなり劣ることがわかる。ただしそれでも気候値予測よりは精度が良かった。

次に、最も TS 値が大きくなる RI インデックス値を調べる(表 4.7、表 4.8、表 4.9)。Pmin は 33.5、 Vmax は 36.5 を RI 予測とするかどうかの閾値とした時の TS 値が最も良かった。従属サンプルで決定 された閾値と比べると(表 4.6)、Pmin はほぼ同じ値に対し、Vmax は大きめの値となった。図 4.2 は、 横軸に RI インデックス値、縦軸に 24 時間の実際の強度変化(hPa)の散布図を示す。基本的には、RI イ ンデックスが大きいほど、実際の強度変化量も大きい関係にあった。一方でばらつきも大きく、決定論 的に RI を予測することの難しさを示すものとなっていた。

表 4.7 RI インデックスの導出に使用した独立サンプルの数と、独立サンプルを利用して計算した RI イン デックスのブライア・スキル・スコア (BSS)、独立サンプルを使用した場合に最も大きな(最適な)ス レット・スコア (TS) 値をとる RI インデックスの閾値、及びその場合の精度評価。最適な RI インデッ クス値で判別した場合の分割表は、表 4.8 及び表 4.9 に示されている。各種指標の定義は付録 2 を参照の こと。

Pmin	Vmax
2112	1551
19.9	7.2
32.6	25.9
(33.5)	(36.5)
89.7	95.1
46.6	40.1
48.0	57.8
5.1	7.3
	Pmin 2112 19.9 32.6 (33.5) 89.7 46.6 48.0 5.1

表 4.8 表 4.7 の TS (32.6) をとる RI インデックスの閾値(33.5%)を用いた場合の分割表(Pmin の場合)。

Pmin	non-RI 予測	RI 予測
non-RI 観測	1793	96
RI 観測	119	104

表 4.9 表 4.7 の TS (25.9) をとる RI インデックスの閾値 (36.5%)を用いた場合の分割表 (Vmax の場合)。

Vmax	non-RI 予測	RI 予測
non-RI 観測	1269	100
RI 観測	109	73



図 4.2 独立サンプル(2013-2016の事例)による RI インデックス(横軸)、実際の 24 時間後までの強度 変化量(縦軸)の散布図。RI を予測する基準を表 4.8、表 4.9 に基づき決定し、分割表にしている。(a) Pmin。(b)Vmax。

4-3-2 事例検証

2015年台風第15号を例に、RIインデックスの特性を例示する(図4.3)。この台風は一度、-20 hPa (24h)⁻¹のRIを経験し、その後やや衰弱した後、再びRIを経験した事例である。一度目のRIについてみると、実際にRIをする24時間前からRIインデックスがPminでは20%以上、Vmaxでは30%以上を示すようになっていた。しかし、RIインデックスの大きさと実際の強度変化量が必ずしも比例しているわけではなかった。二回目のRIについては一回目と異なり、PminのRIインデックスはRIの発生に合わせてほとんど値が上がらなかった。VmaxのRIインデックスは、実際の発生時に20%強を示し、前節に示した最もTS値が大きくなるRIインデックス値(36.5)以下ではあるものの、RIの可能性を示唆していた。このようにRIが起こる時に必ずしもRIインデックスが高くなるわけではないため、RI インデックスの精度には課題が残る。このような現状の精度に合わせて、RIインデックスをどのように効果的に使うべきかという課題が残っている。

4-4 まとめと課題

Kaplan *et al.* (2010) に基づき、気象庁版 RI インデックスを作成した。独立サンプルによる 2013 年から 2016 年までの検証では、この RI インデックスは、気候値予測よりも高い精度を持つという点で、 RI 予測の参考資料として使用できるものであることが確認された。ただし、RI インデックスに基づく Vmax の RI 予測は、Pmin のそれよりも精度が劣ることもわかった。

RI 予測に関する、さらなる精度向上の取組みが現在行われている。例えば、SHIPS と同様に、 GSMaP の降水情報(熱帯低気圧の軸対称度や熱帯低気圧周辺の積算降水雨量)を使った RI インデッ クスの開発を著者は行っている。また、最近 Kaplan *et al.* (2015)は、静止衛星データから抽出した新し



図 4.3 2015 年台風第 15 号の事例。6 時間毎に算出される RI インデックスを赤棒で、実際の 24 時間後ま での強度変化量を青棒で示す。(a)Pmin の RI インデックス。(b)Vmax の RI インデックス。ベストトラッ クの強度(緑線)を右縦軸に示す。

い説明変数を用いた RI インデックスを開発している。さらに、米国では、線形判別関数だけでなく、 ベイズ推定やロジスティック回帰に基づく手法も開発されている(Rozoff and Kossin 2011; Rozoff *et al.* 2015; Kaplan *et al.* 2015)。著者は、ランダムフォレスト等の機械学習アルゴリズムを利用する手法も考 案中である。

上記とは別に、複数の RI 基準(例えば、25 kt (24h)⁻¹, 30 kt (24h)⁻¹, 35 kt (24h)⁻¹) に基づく RI インデ ックスを用意しておき、RI インデックスを決定論的に利用する方法も提唱されている。Sampson *et al.* (2011) は、RI インデックスの閾値を 40% と設定し、もし 35 kt (24h)⁻¹ の RI インデックスが閾値以上な らば、強度予報コンセンサス(詳しくは第6章参照)に 35 kt (24h)⁻¹ のメンバーを追加し、もし 35 kt (24h)⁻¹ が閾値以下でも 30 kt (24h)⁻¹ が閾値以上なら、30 kt (24h)⁻¹ のメンバーをコンセンサスに追加する という方法を提案した。しかし、5日先まで行う強度予報の中で、24 時間先までのメンバーを一つ追加 する方法は、時間連続的な強度予報の算出を困難にするため、米国ハリケーンセンター(NHC)にお いては現在のところ、その手法の現業利用はされていない(DeMaria 2017, personal communication)。

気象庁での現業利用の観点から見て、RIインデックスを実際の強度予報でどのように活用するかが 今後の検討課題として残されている。特に現在のRIインデックスでは、RIが予想される時に、SHIPS やコンセンサス予報の予測値を定量的にどの程度修正するべきか、不明である。現在の台風強度予報が 決定論的である以上、予報官の主観に頼らない、客観的で定量的にRIを予測する手法の開発が望まれる。 その際、24時間先、48時間先にどの程度発達するかだけでなく、どのタイミングでRIがスタートする かも予想できるとよい。タイミングのずれは大きな予報誤差を生むためである。台風の強度予報誤差は 主にRI事例によってもたらされているため、このような開発により、強度予報誤差の低減が図られる よう引き続き取り組みたい。 参考文献

- Kaplan, J., and M. DeMaria, 2003: Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin. Wea. Forecasting, 18, 1093–1108, doi:10.1175/1520-0434(2003)018<1093:LCORIT>2.0.CO;2
- Kaplan, J., M. DeMaria, and J. A. Knaff, 2010: A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and east Pacific basins. *Wea. Forecasting*, 25, 220–241, doi:10.1175/2009WAF2222280.1
- Kaplan, J., and Coauthors, 2015: Evaluating environmental impacts on tropical cyclone rapid intensification predictability utilizing statistical models. *Wea. Forecasting*, **30**, 1374–1396, doi:10.1175/WAF-D-15-0032.1
- Rozoff, C. M., and J. P. Kossin, 2011: New probabilistic forecast models for the prediction of tropical cyclone rapid intensification. *Wea. Forecasting*, **26**, 677–689, doi:10.1175/WAF-D-10-05059.1
- Rozoff, C. M., C. S. Velden, J. Kaplan, J. P. Kossin, and A. J. Wimmers, 2015: Improvements in the probabilistic prediction of tropical cyclone rapid intensification with passive microwave observations. *Wea. Forecasting*, **30**, 1016–1038, doi:10.1175/ WAF-D-14-00109.1
- Sampson, C. R., J. Kaplan, J. A. Knaff, M. DeMaria, and C. A. Sisko, 2011: A deterministic rapid intensification aid. Wea. Forecasting, 26, 579–585, doi:10.1175/WAF-D-10-05010.1
- Shimada, U., K. Aonashi, and Y. Miyamoto, 2017: Tropical cyclone intensity change and axisymmetricity deduced from GSMaP. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 1003–1017, doi: 10.1175/MWR-D-16-0244.1