



令和元年度 予報技術研修テキスト



台風進路予報の予報円 改善について

予報課アジア太平洋気象防災センター

平成30年度予報技術研修テキストの第6章「台風進路予報の高度化」では、台風進路予報に関する国際的動向、当庁における予報手法や現業作業手順の現状及び改善に向けた最近の取組についてまとめた。

その中で、予報円の改善として、2016年と2017年に実施した改善について詳細な内容を説明するとともに、2019年の台風シーズン前に実施予定の予報円改善に向けた調査結果について簡単に紹介した。

本稿では、2017年の改善後の予報円の課題、その改善に向けた調査、その結果を受けて2019年6月に実施した改善について詳細な内容を説明する。なお、本内容については、英語でも原稿を執筆しているため、参考文献として挙げておく。

(参考文献)

西村修司、福田純也, 2019: 台風進路予報の高度化. 平成30年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 114-141.

Fukuda, J. and M. Yamaguchi, 2019: Determining Probability-Circle Radii of Tropical Cyclone Track Forecasts with Multiple Ensembles. RSMC Tokyo – Typhoon Center Technical Review, 21. (<http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/techrev/text21-1.pdf>)

Fukuda, J. and M. Yamaguchi, 2019: Determining 70 Percent Probability-Circle Radii of Tropical Cyclone Track Forecasts with Multiple Ensembles. *SOLA*, 15, 250-256.

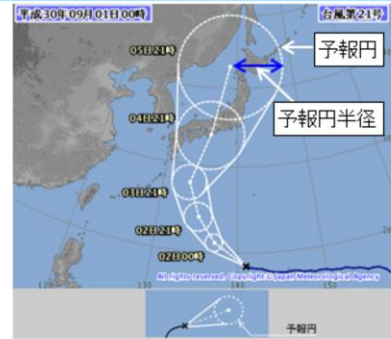
1. はじめに

はじめに、予報円の概要、2019年6月の改善前の予報円とその課題について紹介する。

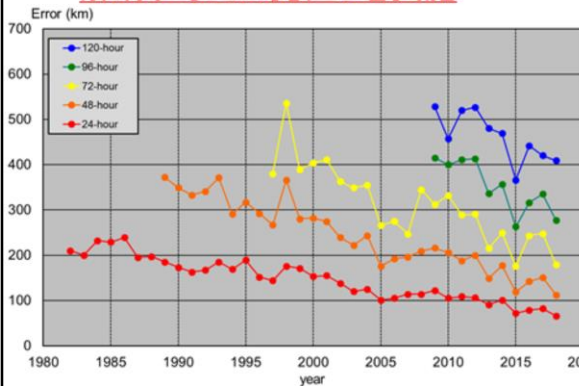


予報円の概要

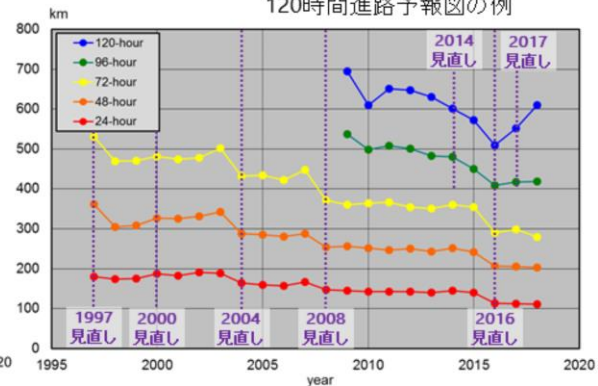
- 台風進路予報は、台風の中心位置が70%の確率で入ると予測される範囲を予報円で示して発表
- 予報円の半径は予測される台風の進行方向や速度、アンサンブル予報によるスプレッド毎に、過去の当庁の進路予報誤差の統計から予め算出
- 進路予報の精度向上に伴い、最新の統計結果に基づき定期的に見直しを実施
- **2019年6月にそれまでの予報円の様々な課題を解消するため見直しを実施**



120時間進路予報図の例



台風進路予報の年平均誤差の推移 [km]



予報円の年平均半径の推移 [km]

令和元年度 予報技術研修テキスト

気象庁では、2009年から120時間先までの台風進路予報を実施しており、右上図の進路予報図に示すように、各予報時間の台風の中心位置が70%の確率で入ると予測される範囲を予報円(白点線の円)で示して発表している。

予報円の半径は予測される台風の進行方向や速度、アンサンブル予報システムによるばらつき具合(スプレッド)毎に、過去の当庁の進路予報誤差の統計から予め算出された値を用いている。

左下図は当庁の台風進路予報の年平均誤差の推移について24時間～120時間予報に対して示したものである。縦軸は誤差 [km]、横軸は年を表し、下方向ほど誤差が小さい、つまり精度が高いことを意味する。

その年の台風の特徴に起因する年々変動はあるものの、長期的に見れば進路予報の精度は全ての予報時間で向上し続けていることが分かる。

※表示期間は、24時間予報は進路予報が扇型表示(方向のみの誤差を表示)から予報円表示(方向・速度の誤差を表示)に変わった1982年以降、48時間、72時間、96・120時間予報はそれぞれ予報を開始した1989年、1997年、2009年以降を示す。

※2015年の精度が急激に良くなっている理由は、進路予報に当庁を含む複数の数値予報モデルの進路予測結果を平均するコンセンサス手法を導入したこと、2015年はエルニーニョの影響で平年よりも東寄りでも台風が発生し、進行速度・方向を変えずに西進し続けるような比較的予報しやすい台風が多かったこと等が考えられる。

右下図は予報円の年平均半径の推移について24時間～120時間予報に対して示したものである。縦軸は半径 [km]、横軸は年を表す。

進路予報の精度向上に伴い、最新の統計結果に基づき予報円は定期的に見直されており(紫の文字・点線)、見直しのたびに予報円半径が小さくなっていることがわかる。

※96時間先以降の予報円半径については、2009年の運用開始以降、当庁のアンサンブル予報システムのスプレッドを用いて決定されており、全ての予報時間に対する定期的な見直しに加え、アンサンブル予報システムの仕様が変わるたび(2014年、2017年)に見直しが行われている。

※120時間予報の年平均半径が2017・2018年と大きくなっている理由は、120時間予報で当庁のアンサンブル予報システムのスプレッドが大きような予報が難しい事例が多かったことが考えられる。

そして、2019年6月にそれまでの予報円の様々な課題を解消するため、見直しを実施した。



2019年6月の改善前の予報円

2019年6月の改善前の予報円半径[海里] 0内は信頼度

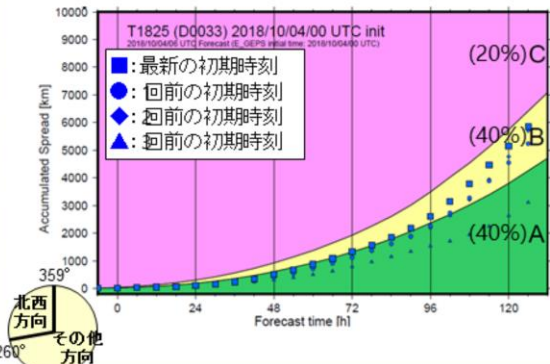
予報時間	進行方向	進行速度		
		≦10kt	11~30kt	31kt≦
3	全方向	15	20	25
6	全方向	20	25	30
9	全方向	25	30	35
12	全方向	30		40
15	北西方向	35		45
	その他	40		50
18	北西方向	40		50
	その他	45		60
21	北西方向	45		55
	その他	50		70
24	北西方向	50		60
	その他	60		80
48	北西方向	95		110
	その他	110		150
72	北西方向	130		140
	その他	170		220
96	北西方向	160(AB)/200(B')/240(C)	160(AB)/200(B')/240(C)	
	その他	210(AB)/300(B')/350(C)	260(AB)/300(B')/350(C)	
120	北西方向	200(AB)/290(B')/375(C)	200(AB)/290(B')/375(C)	
	その他	290(AB)/425(B')/500(C)	350(AB)/425(B')/500(C)	

72時間先までの算出手法(2016年6月見直し)

- 過去5年間(2011~2015年)の予報誤差の70%が入る予報円半径を統計的に算出
- 進行方向・速度による区分別に設定

96時間先以降の算出手法(2017年6月見直し)

- 過去2年間(2015~2016年)の当庁のアンサンブルの積算スプレッドに基づく信頼度(ABC)毎に予報誤差の70%が入る予報円半径を統計的に算出
- さらに移動方向・一部速度による区分別に設定



令和元年度 予報技術研修テキスト

4

まず、2019年6月の改善前の予報円について紹介する。

左の表は予報時間毎の2019年6月の改善前の予報円半径[海里]を示す。

72時間先までの予報円は、2016年6月に見直しが行われ、過去5年間(2011~2015年)の当庁の進路予報誤差の70%が入る予報円半径を統計的に算出しており、台風の進行方向・速度による区分別に設定されていた。

中央下図にあるように、進行方向の「全方向」、「北西方向」、「その他」は、北方向0度からの時計回りを正方向として、それぞれ0~359度、260~359度、0~259度を表す。

※北西方向とその他方向に区分しているのは、各進行方向別の予報誤差を検証した際に、転向前の北西方向に進む台風に対する予報誤差がその他方向に比べて有意に小さいことが確認されたため。

96時間先以降の予報円は、2017年6月に見直しが行われ、過去2年間(2015~2016年)の当庁の全球アンサンブル予報システムの積算スプレッドに基づく信頼度(ABC)毎に当庁の進路予報誤差の70%が入る予報円半径を統計的に算出しており、さらに移動方向・一部速度による区分別に設定されていた。

スプレッドとは、アンサンブル平均の予測位置とアンサンブルメンバーの予測位置の間の距離の2乗を全メンバーについて平均して平方根を取ったもので、台風位置予想の不確実性を表すものとして6時間間隔の予報時間毎に求め、積算スプレッドは、ある予報時間までの不確実性の履歴を表すものとして初期時刻からその予報時間までの6時毎のスプレッドを積算して求める。信頼度は、予報時間毎に統計期間全ての積算スプレッドを小さいものから並べ、事例数が40%、40%、20%の割合で入る区分をそれぞれ信頼度A(高)、B(中)、C(低)と予め定義する。

右下図は、ある初期時刻の予報時間(横軸)に対する積算スプレッド(縦軸)を示し、最新の初期時刻(大きい四角)では、72時間先までは積算スプレッドが小さく信頼度A、それ以降は積算スプレッドが大きくなり信頼度Bとなっている。

なお、信頼度AとBで予報誤差に大きな違いが見られなかったため区分を統合したうえで、信頼度ABとCのみでは半径が急激に変化するため、補完区分として信頼度B'を導入した。

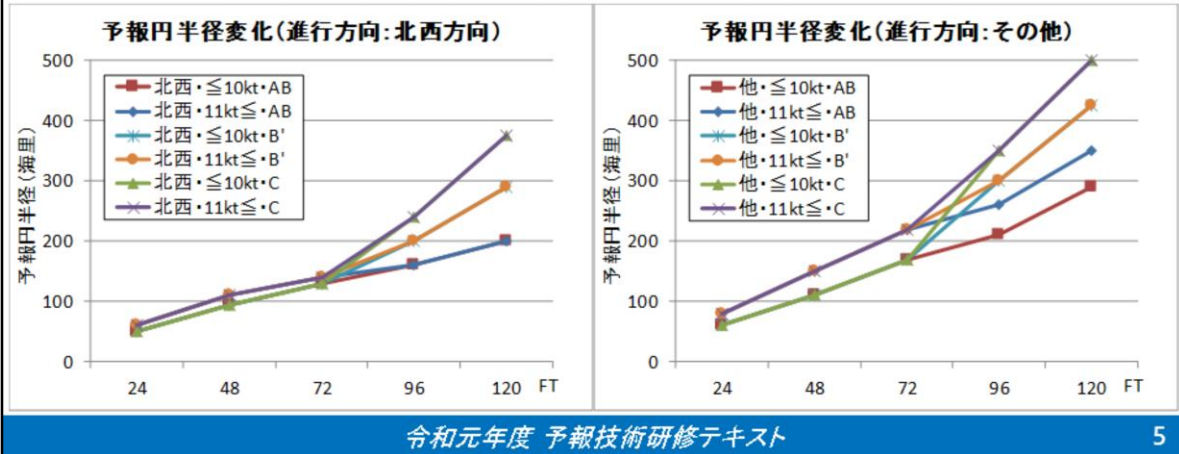
※現業作業では、例えば信頼度がABとCの間付近である場合や、1回前から最新の初期時刻でAB→Cに変化したような場合に、信頼度B'を利用している。



2019年6月の改善前の予報円の課題

- 72時間先までと96時間先以降で予報円半径の算出手法が異なることにより、予報円半径の時間変化が不自然な場合がある
- 72時間先まではアンサンブル予報に基づく予測不確実性が予報円半径に反映されていない
- 単独アンサンブルの利用では複数アンサンブルを利用した場合よりも予測不確実性の反映が十分でない可能性がある
- 最新の予報誤差の統計結果が反映されていない

2019年6月の改善前の予報円半径の予報時間に対する変化(進行方向別)



2019年6月の改善前の予報円には、以下の課題があった。

- 72時間先までと96時間先以降で予報円半径の算出手法が異なることにより、予報円半径の時間変化が不自然な場合がある。
-図は2019年6月の改善前の予報円半径の予報時間に対する変化を示しており、縦軸が予報円半径 [海里]、横軸が予報時間[時間] を示し、左図が進行方向が北西方向の場合、右図がその他方向の場合を表す。72時間先までと96時間先以降で予報円半径の時間変化が不自然な場合があることがわかる。
- 72時間先まではアンサンブル予報に基づく予測不確実性が予報円半径に反映されていない
- 96時間先以降はアンサンブル予報に基づいているが、単独アンサンブルの利用では、複数アンサンブルを利用した場合よりも予測不確実性の反映が十分でない可能性がある
- 複数アンサンブルとは、複数のアンサンブル(例えばJMAとECMWFのアンサンブル)の全メンバーを組合せたもの。
- 近年の調査研究で、複数アンサンブルを利用した方がアンサンブルスプレッドと予測誤差の相関が良く、予測不確実性をより良く表現できることが報告されている(Yamaguchi et al. 2012)
- 前回2016年の見直しから約3年が経過し、最新の予報誤差の統計結果が反映されていない

(参考文献)

Yamaguchi, M., T. Nakazawa, and S. Hoshino, 2012: On the Relative Benefits of a Multi-Centre Grand Ensemble for Tropical Cyclone Track Prediction in the Western North Pacific. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **138**, 2019-2029.

2. 改善に向けた調査結果

次に、2019年6月の改善前の予報円の様々な課題を解決するために実施した調査結果について紹介する。



予報円の改善に向けた調査対象データ

- 単独アンサンブル: JMA, ECMWF, NCEP, UKMOの4つ
- 複数アンサンブル: 4つの単独アンサンブルの全11通りの組合せ(頭文字を組み合わせせてJENU, JEN等と表す)
- 期間: 2016~2018年の3年間(台風:T1601-T1829)
- 予報時間: 0~24時間の3時間毎、24~120時間の6時間/24時間毎
- 初期時刻: 00, 06, 12, 18UTCの6時間毎
 - ECMWFは00, 12UTC初期値しかないため、06, 18UTCは6時間前初期値を利用
- 入手時刻の遅れを考慮し、初期時刻時点で利用できる初期値を用いて検証
 - JMAは初期時刻の6時間前の初期値、その他は12時間前の初期値を利用
- 事例: 初期時刻および予測対象時刻がベストトラックで台風の場合で、かつ全ての単独アンサンブルで2メンバー以上の予測が存在する場合

各アンサンブルの仕様

単独アンサンブル	メンバー数	初期時刻 [UTC]	予報時間 [時間]	予報間隔 [時間]	利用可能時刻 [時間後]
JMA	27	00,6,12,18	00,12UTC: 264 06,18UTC: 12	3	6
ECMWF	2	00,12	240	6	12
NCEP	21	00,6,12,18	384	6	12
UKMO	24 (~T1703) 35 (T1704~)	00,6,12,18	168	6	12

令和元年度 予報技術研修テキスト

7

まず、予報円の改善に向けた調査対象データについて説明する。

単独アンサンブルとして、当庁(JMA)・欧州中期予報センター(ECMWF)・米国環境予測センター(NCEP)・英国気象局(UKMO)の主要な4つの数値予報センターの全球アンサンブルを利用し、複数アンサンブルとして、それら4つの単独アンサンブルの全11通りの組合せを対象とした。JMA・ECMWF・NCEP・UKMOの組合せはJENU、JMA・ECMWF・NCEPの組合せはJENというように、各組合せを構成する単独アンサンブルの頭文字を組合せて表す。

対象期間は2016~2018年の3年間で、対象台風は3年間の全台風(T1601~T1829)である。

予報時間は0~24時間は3時間毎、24~120時間は6または24時間毎である。

初期時刻は00, 06, 12, 18UTCの6時間毎である。ECMWFは00, 12UTC初期値しかないため、06, 18UTCは6時間前の初期値を利用。例えば、06UTC初期値の6時間後の予測値は、同日の00UTC初期値の12時間後の予測値を利用する。

各アンサンブルデータの入手時刻の遅れを考慮し、初期時刻時点で利用できる初期値を用いて検証した。具体的には、JMAのアンサンブルは初期時刻の6時間前の初期値、その他は12時間前の初期値を用いて検証した。

調査対象の事例は、初期時刻および予測対象時刻が当庁のベストトラックで台風の場合で、かつ全ての単独アンサンブルにおいて2メンバー以上の予測が存在する場合とした。



単独・複数アンサンブルに対する調査項目

- 単独・複数アンサンブルに対して、以下について調査
 - アンサンブル平均のRMSEとスプレッドの関係
 - アンサンブル平均の誤差と積算スプレッドの相関
 - 信頼度別の当庁の予報誤差と積算スプレッドの相関
 - 信頼度別の当庁の予報誤差の累積相対度数分布
 - 信頼度別の当庁の予報誤差70%値

- ※ 予報時間毎の結果は、代表して1つの予報時間を示す。
- ※ 複数アンサンブルの結果は、主なものとして、JENU, JEN, JEU, ENUを示す。

- ✓ 複数アンサンブルの組合せは以下のように構成アンサンブルの頭文字の組合せで表す。
 - ✓ JENU→JMA+ECMWF+NCEP+UKMO
 - ✓ JEN→JMA+ECMWF+NCEP
 - ✓ JEU→JMA+ECMWF+UKMO
 - ✓ ENU→ECMWF+NCEP+UKMO

まず、単独・複数アンサンブルの特性、それらを利用した予報円について調査を行った。

調査した内容は以下の通り。

- ・アンサンブル平均のRMSEとスプレッドの関係
- ・アンサンブル平均の誤差と積算スプレッドの相関
- ・信頼度別の当庁予報誤差と積算スプレッドの相関
- ・信頼度別の当庁予報誤差の累積相対度数分布
- ・信頼度別の当庁予報誤差70%値

予報時間毎の結果は、代表して1つの予報時間を示す。

複数アンサンブルの結果は、主なものとして、JENU, JEN, JEU, ENUを示す。

複数アンサンブルの組合せは以下のように構成アンサンブルの頭文字の組合せで表す。

JENU→JMA+ECMWF+NCEP+UKMO

JEN→JMA+ECMWF+NCEP

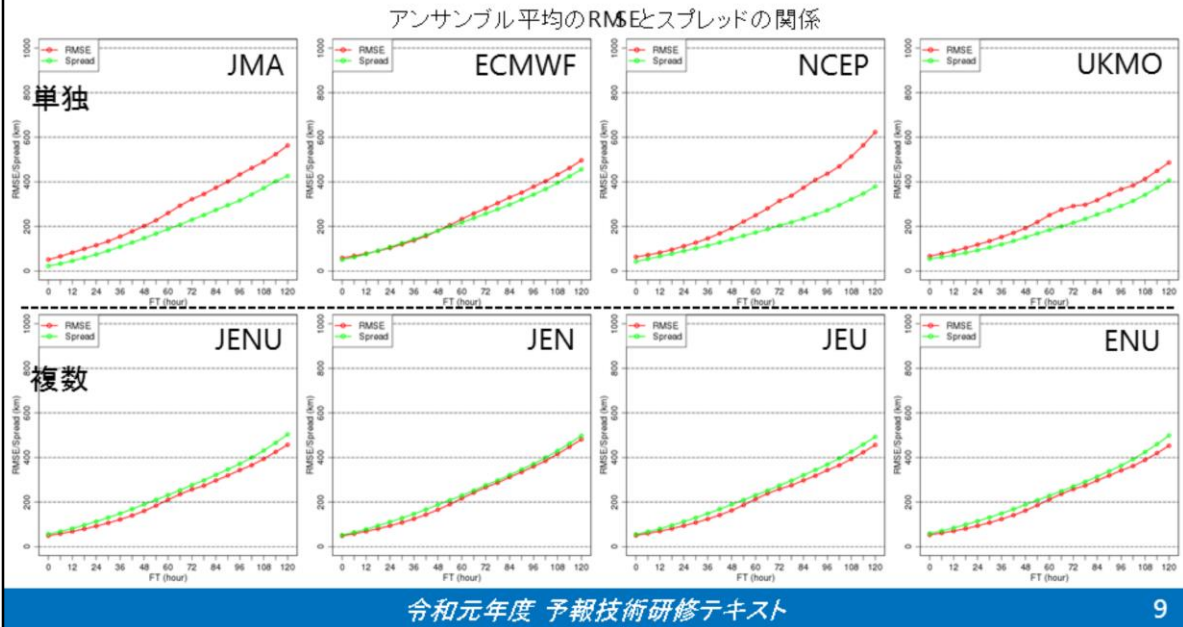
JEU→JMA+ECMWF+UKMO

ENU→ECMWF+NCEP+UKMO



アンサンブル平均のRMSEとスプレッドの関係

- 単独アンサンブルのスプレッドはアンサンブル平均のRMSEよりもFT後半を中心に過小傾向で、NCEP、JMAは特にその差が顕著。
- 複数アンサンブルのスプレッドはRMSEと同程度。



まず、アンサンブル平均のRMSEとスプレッドの関係を調査した。

図は、アンサンブル平均のRMSE(赤)とスプレッド(緑)の関係を示し、縦軸がRMSEやスプレッド[km]、横軸が予報時間[時間]を表す。上段が各単独アンサンブル、下段が各複数アンサンブルのものを示す。

アンサンブル平均のRMSE(二乗平均平方根誤差: Root Mean Square Error)とは、アンサンブル平均の予測誤差(アンサンブル平均の予測位置とベストトラックによる解析位置の間の距離)の2乗を全期間にわたって平均して平方根を取ったもので、スプレッドとは、アンサンブル平均の予測位置とアンサンブルメンバーの予測位置の間の距離の2乗を全メンバーについて平均して平方根を取ったもので、図には各時刻のスプレッドを全期間にわたって平均したものを表示している。

アンサンブルとしては、アンサンブル平均の予測位置から見たアンサンブルの全メンバーによる広がり具合と、アンサンブル平均の予測誤差(アンサンブル平均の予測位置から見た解析位置)の広がり具合が同程度であることが望ましい、つまり、スプレッドはアンサンブル平均のRMSEと同程度となることが望ましい。

単独アンサンブルのスプレッドはRMSEよりもFT後半を中心に過小傾向で、NCEP、JMAは特にその差が顕著となっている。

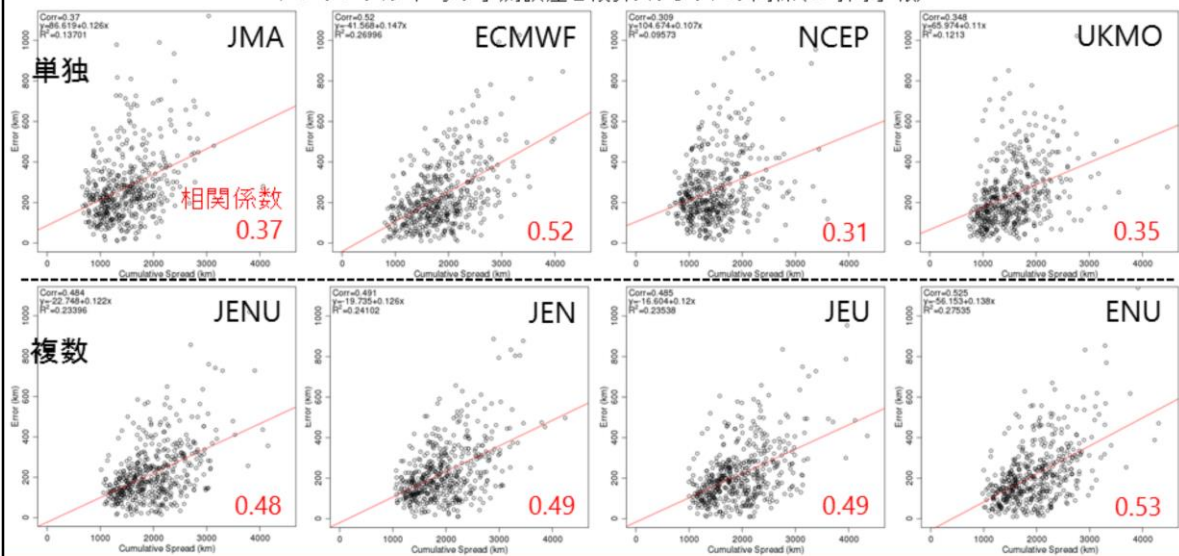
複数アンサンブルのスプレッドはRMSEと同程度で、より適切となっていることがわかる。



アンサンブル平均予測誤差と積算スプレッドの関係

- 全ての単独・複数アンサンブルについて、アンサンブル平均の予測誤差と積算スプレッドの相関係数は正である。
- 単独アンサンブルでは十分な相関が見られない場合があるが、複数アンサンブルでは安定して正の相関が見られる。

アンサンブル平均の予測誤差と積算スプレッドの関係(2時間予報)



令和元年度 予報技術研修テキスト

10

次に、アンサンブル平均の予測誤差と積算スプレッドの関係を調査した。

アンサンブルの特性を見るだけであれば、アンサンブル平均の予測誤差と(積算でない)スプレッドを比較すればよいが、予報円半径は予報時間に対して単調に増加する積算スプレッドを用いて算出しているため、次スライドの当庁の発表予報と積算スプレッドの関係の前に、アンサンブル平均の予測誤差と積算スプレッドの関係を確認した。

図は72時間予報におけるアンサンブル平均の予測誤差と積算スプレッドの散布図で、縦軸が予測誤差[km]、横軸が積算スプレッド[km]を表し、赤線は回帰直線、赤数字は相関係数を示す。上段が各単独アンサンブル、下段が各複数アンサンブルのものを示す。

全ての単独・複数アンサンブルについて、両者の相関係数は正である。単独アンサンブルでは十分な相関が見られない場合があるが、複数アンサンブルでは安定して正の相関が見られる。

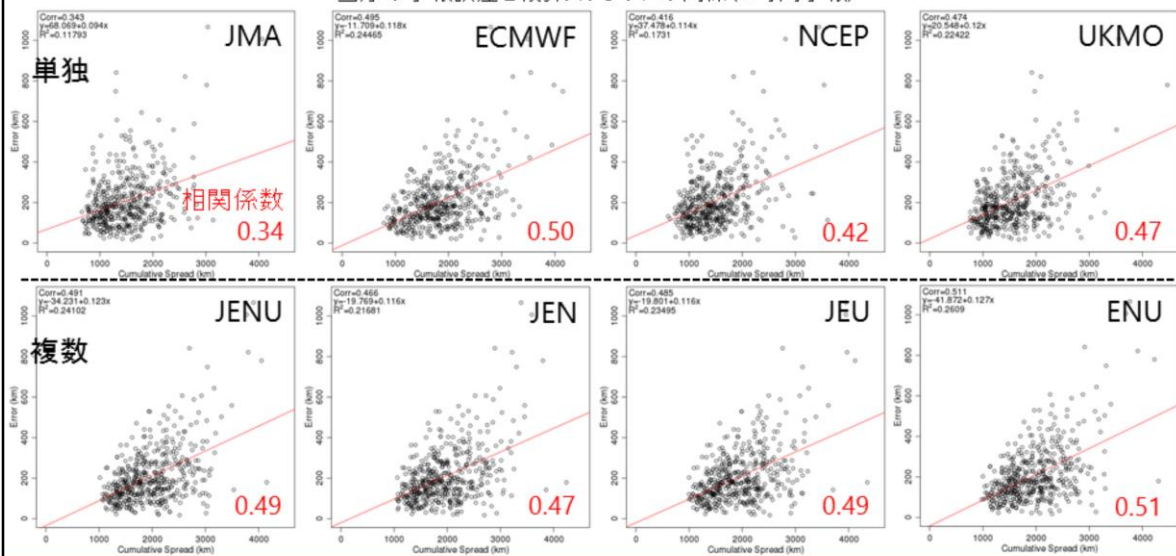
他の予報時間についても同様の結果が見られた。



当庁の予報誤差と積算スプレッドの関係

- 全ての単独・複数アンサンブルについて、当庁の予報誤差と積算スプレッドの相関係数は正である。
- 単独アンサンブルでは十分な相関が見られない場合があるが、複数アンサンブルでは安定して正の相関が見られる。

当庁の予報誤差と積算スプレッドの関係(2時間予報)



令和元年度 予報技術研修テキスト

11

次に、当庁の予報誤差と積算スプレッドの関係を調査した。

図は72時間予報における当庁の予報誤差と積算スプレッドの散布図で、縦軸が予報誤差[km]、横軸が積算スプレッド[km]を表し、赤線は回帰直線、赤数字は相関係数を示す。上段が各単独アンサンブル、下段が各複数アンサンブルのものを示す。

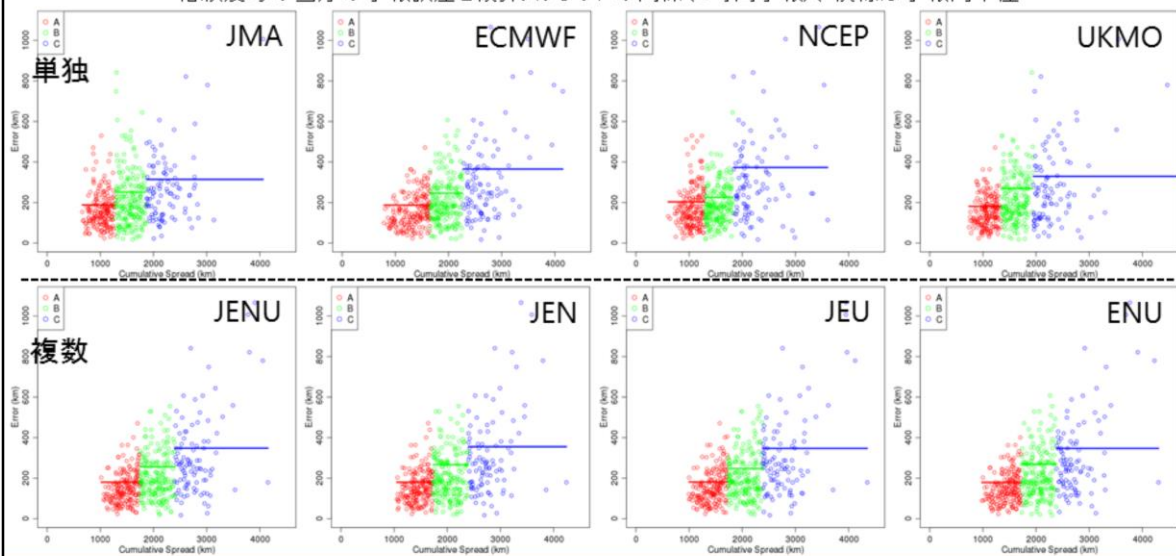
全ての単独・複数アンサンブルについて、当庁の予報誤差と積算スプレッドの相関係数は正である。単独アンサンブルでは十分な相関が見られない場合があるが、複数アンサンブルでは安定して正の相関が見られる。
他の予報時間についても同様の結果が見られた。



信頼度毎の当庁の予報誤差と積算スプレッドの関係

- 全ての単独・複数アンサンブルについて、信頼度と当庁の予報誤差には正の相関があり、信頼度毎の予報円半径は、比較的分離している。
- 複数アンサンブルの方が単独アンサンブルよりも相関が強く、信頼度間の分離度も大きい傾向がある。

信頼度毎の当庁の予報誤差と積算スプレッドの関係(2時間予報)、横線は予報円半径



令和元年度 予報技術研修テキスト

12

次に、信頼度毎の当庁の発表予報誤差と積算スプレッドの関係を調査した。

図は前ページの図と同じ、72時間予報における当庁の予報誤差と積算スプレッドの散布図だが、積算スプレッドに基づく信頼度毎に色付けし(A:B:C=赤:緑:青)、横線は信頼度毎の予報誤差の70%値、つまり予報円半径を示す。

上段が各単独アンサンブル、下段が各複数アンサンブルのものを示す。

全ての単独・複数アンサンブルについて、信頼度と当庁の予報誤差には正の相関がある、つまり信頼度がABCとなるにつれて予報誤差が大きくなる、かつ信頼度別の予報円半径は、比較的分離している。

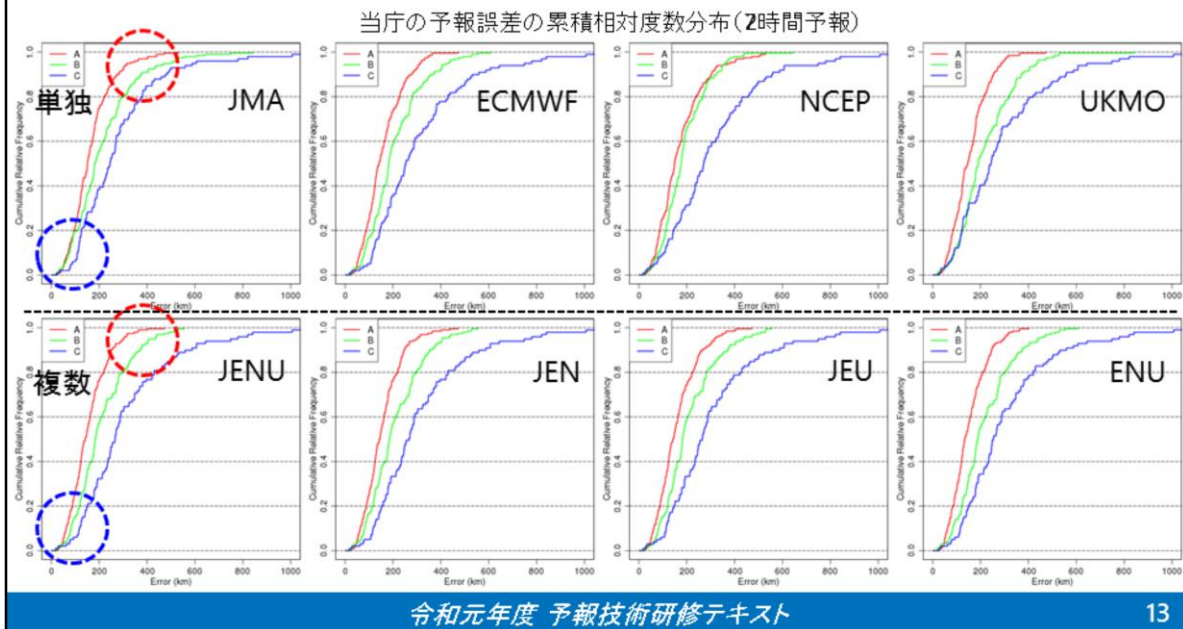
ただし、単独アンサンブルでは、NCEPの信頼度AとBのように相関が弱く、信頼度間の分離度が小さい場合があるが、複数アンサンブルでは安定して相関が強く、分離度が大きい傾向があることがわかる。

他の予報時間についても同様の結果が見られた。



当庁の予報誤差の累積相対度数分布

- 複数アンサンブルの方が単独アンサンブルよりも、アウトライヤー率が小さく、信頼度間の分離度が大きくなる傾向がある
 - 例えば信頼度Aで予報誤差が大きい事例の割合(赤点線内)や信頼度Cで予報誤差が小さい事例の割合(青点線内)が小さい



次に当庁の予報誤差の累積相対度数分布を調査した。

図は72時間予報におけるアンサンブルの積算スプレッドに基づく信頼度毎に、当庁の予報誤差の累積相対度数分布を示し、縦軸が累積相対度数、横軸が予報誤差[km]を表す。つまり、信頼度毎に、ある誤差以下の事例がどのくらいの割合存在するかを示す。上段が各単独アンサンブル、下段が各複数アンサンブルのものを示す。

理想的には、信頼度Aで予報誤差が大きい事例や信頼度Cで予報誤差が小さい事例の割合が小さい、つまりアウトライヤー率(本来あるべき誤差の程度から大きく外れた事例の割合)が小さい状況が望ましい。

そのような状況は、累積相対度数分布では、信頼度A(赤)がなるべく左寄りに、信頼度C(青)がなるべく右寄りに描かれ、かつ信頼度ABC(赤緑青)が分離する。

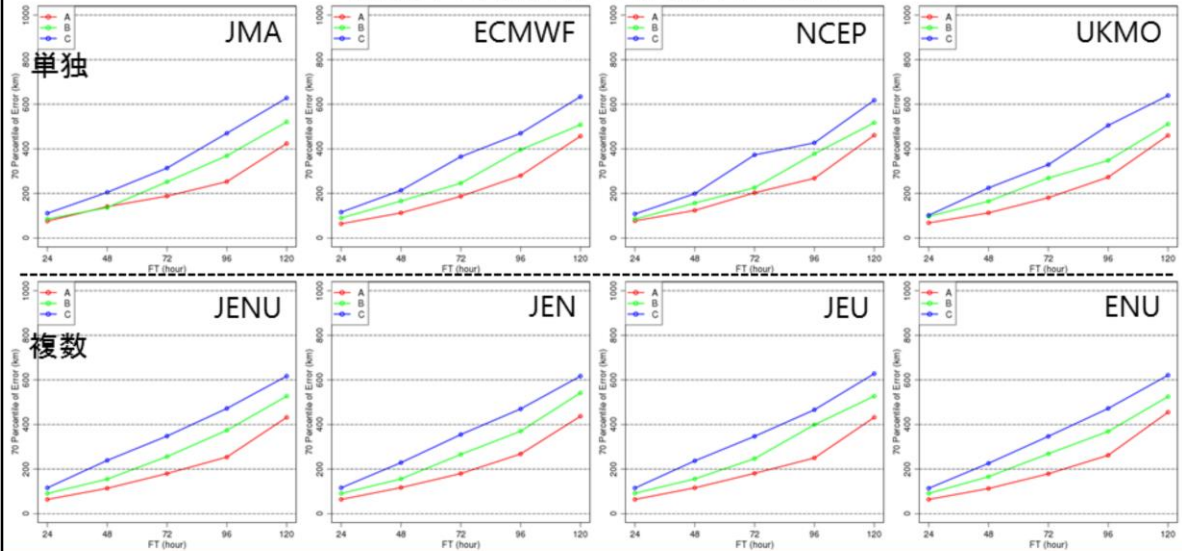
単独アンサンブルでは信頼度Aで予報誤差が大きかった事例が、複数アンサンブルでは信頼度BやCに移ったり(赤点線内)、逆に信頼度Cで予報誤差が小さい事例が、複数アンサンブルでは信頼度AやBに移ることにより(青点線内)、複数アンサンブルの方が単独アンサンブルよりも、信頼度Aで予報誤差が大きい事例や信頼度Cで予報誤差が小さい事例の割合が小さい、つまりアウトライヤー率が小さく、信頼度間の分離度が大きくなる傾向があり、より望ましい状況となっていることがわかる。他の予報時間についても同様の結果が見られた。



信頼度毎の予報円半径

- 全ての単独・複数アンサンブルについて、信頼度と予報円半径には正の相関がある。
- 複数アンサンブルの方が単独アンサンブルより、相関が強く、予報円半径の予報時間に対する変化が滑らかになる傾向があるが、値自体はそれほど変化は無い。

信頼度毎の予報円半径の予報時間に対する変化



令和元年度 予報技術研修テキスト

14

単独・複数アンサンブルの比較の最後に、信頼度毎の予報円半径について調査した。

図は、信頼度毎の予報円半径の予報時間に対する変化について示し、縦軸が予報円半径 [km]、横軸が予報時間[時間]を表す。上段が各単独アンサンブル、下段が各複数アンサンブルのものを示す。

全ての単独・複数アンサンブルについて、信頼度と予報円半径には正の相関があることがわかる。

また、複数アンサンブルの方が単独アンサンブルより、相関が強く、予報円半径の予報時間に対する変化が滑らかになる傾向があるが、値自体はそれほど変化は無い。

以上の調査から、単独アンサンブルよりも複数アンサンブルの方が、スプレッドとアンサンブル平均予測誤差や当庁の予報誤差との間に強い相関を持ち、アウト라이어率が小さく、作成された予報円半径についても、信頼度間の分離度が大きく、予報時間に対する変化が滑らかになるなど、予報円作成により適していることがわかる。



統計的手法、単独・複数アンサンブル手法の比較

- 統計的手法、単独アンサンブル手法、複数アンサンブル手法を用いた予報円について、どれが**最も良い予報円**か比較
 - 統計的手法: 2019年6月の改善前の72時間先までの予報円のように、台風の進行方向(北西・その他)と速度(10kt以下、超)毎に統計的に算出
 - 単独アンサンブル手法: 2019年6月の改善前の96時間先以降の予報円のように、JMA単独アンサンブルの積算スプレッドに基づく信頼度ABC(40:40:20%)毎に算出
 - 複数アンサンブル手法: JENU複数アンサンブルの積算スプレッドに基づく信頼度ABC(40:40:20%)毎に算出
 - 複数アンサンブルの組合せ間でそれほど優劣はなかったが、最も早く利用でき、利用できる頻度が最も高いJMAアンサンブルを含み、かつメンバー数が最大で、各アンサンブルの更新の影響を最も受けにくい、JENUを選択
- 以下の観点で良い予報円かどうかを判断
 - 平均半径ができるだけ小さい
 - 台風の接近が予測される地域が絞り込まれ、これらの地域では従来以上に防災対応を強化するなどの効果が期待される
 - 半径と当庁の予報誤差の相関が良い(区分間の分離度が大きくメリハリがある)
 - 従来よりも予測不確実性が予報円半径に適切に反映され、メリハリのある防災対応が可能となる効果が期待される

次に、統計的手法、単独アンサンブル手法、複数アンサンブル手法の3つの手法を用いて作成した予報円について、どれが最も良い予報円なのか比較を行った。

ここで、各手法は以下のように定義する。

- ・統計的手法は、2019年6月の改善前の72時間先までの予報円のように、台風の進行方向(北西・その他)と速度(10kt以下、超)毎に統計的に算出する手法
- ・単独アンサンブル手法: 2019年6月の改善前の96時間先以降の予報円のように、JMAの単独アンサンブルの積算スプレッドに基づく信頼度ABC(40:40:20%)毎に算出
- ・複数アンサンブル手法: JENU複数アンサンブルの積算スプレッドに基づく信頼度ABC(40:40:20%)毎に算出

なお、複数アンサンブルの組合せ間でそれほど優劣はなかったが、アンサンブルの中で最も早く利用でき、利用できる頻度が高いJMAアンサンブルを含み、かつメンバー数が最大で、各アンサンブル更新の影響を最も受けにくいJENUを選択。

以下の観点で良い予報円かどうかを判断

- ・平均半径ができるだけ小さい

台風の接近が予測される地域が絞り込まれ、これらの地域では従来以上に防災対応を強化するなどの効果が期待される

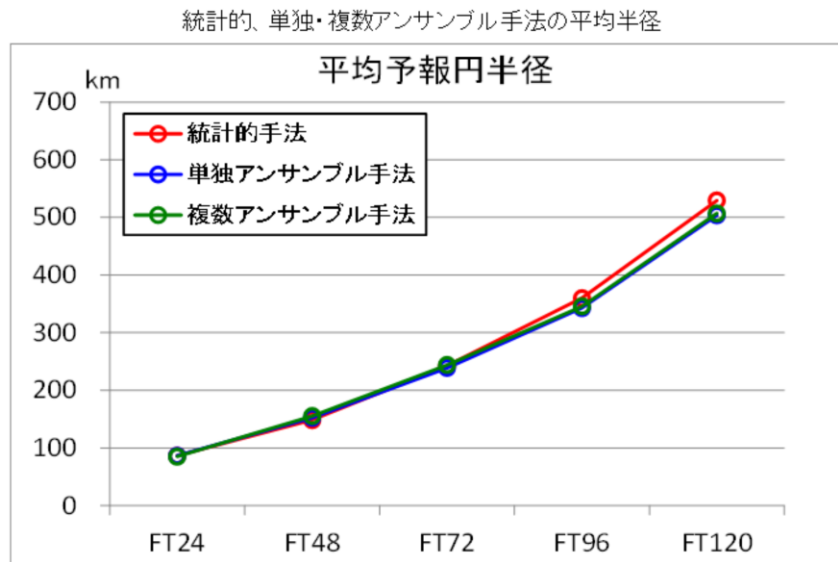
- ・半径と当庁の予報誤差の相関が良い(区分間の分離度が大きくメリハリがある)

従来よりも予測不確実性が予報円半径に適切に反映され、メリハリのある防災対応が可能となる効果が期待される



平均予報円半径

- 96時間先以降で統計的手法の平均半径がやや大きいほかは、3手法でほとんど変わらない。



令和元年度 予報技術研修テキスト

16

まずは、平均予報円半径について比較した。

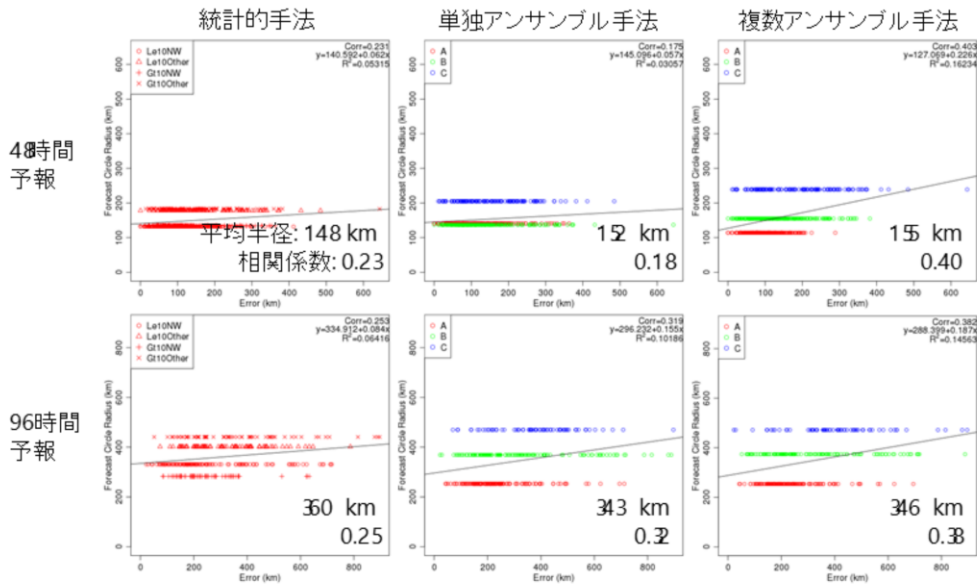
図は3手法における平均半径を示し、縦軸が平均半径[km]、横軸が予報時間を表す。96時間先以降で統計的手法の半径がやや大きいほかは、3手法でほとんど変わらないことがわかる。



予報円半径と当庁予報誤差の関係

- 統計的手法、単独、複数アンサンブル手法の順に予報円半径と当庁の予報誤差の相関が良くなる。

予報円半径と当庁の発表予報誤差の相関



令和元年度 予報技術研修テキスト

次に、予報円半径と当庁の予報誤差の関係を調査した。

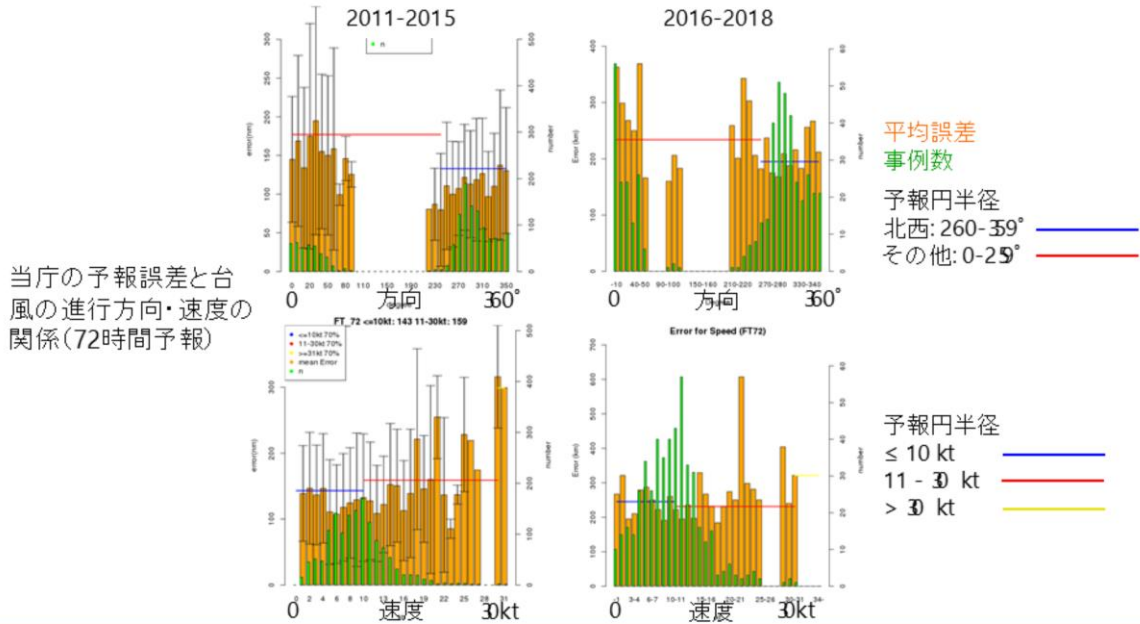
図は、予報円半径と当庁の予報誤差の散布図を示しており、縦軸が予報円半径[km]、横軸が予報誤差[km]で、黒線は回帰直線、各図に平均半径と相関係数を数字で示す。上段が48時間予報、下段が96時間予報のもの、左列が統計的手法、中央が単独アンサンブル手法、右列が複数アンサンブル手法を用いたものを示す。

これらから、統計的手法、単独、複数アンサンブル手法の順に、予報円半径と当庁の予報誤差の相関が良くなっていることが分かる。他の予報時間についても同様の結果が見られた。



当庁の予報誤差と進行方向・速度の関係

- 過去の検証では、当庁の予報誤差と台風の進行方向・速度に相関(北西方向、低速度の場合は誤差が小さい)があったが、最新の検証では相関が小さくなった。
- 数値予報モデルの改良や、その利用手法の改善(2015年にJMA, ECMWF, NCEP, UKMOの決定論モデルによるコンセンサス手法の導入等)による効果と考えられる。



当庁の予報誤差と台風の進行方向・速度の関係(72時間予報)

令和元年度 予報技術研修テキスト

18

次に、当庁の予報誤差と台風の進行方向・速度の関係を調査した。

図は、72時間予報に対する当庁の予報誤差と台風の進行方向・速度との関係を示し、上段は進行方向、下段は速度との関係を示し、左列は過去(2011~2015年)の検証、右列は最新(2016~2018年)の検証を示す。

オレンジ色と緑色はそれぞれ平均誤差と事例数、上段の赤線と青線はそれぞれ其他方向と北西方向の予報円半径、下段の青線・赤線・黄色線はそれぞれ10kt以下、10kt超30kt以下、30kt超の予報円半径を表す。

過去の2011~2015年の検証では、当庁の予報誤差と台風の進行方向・速度に相関(北西方向、低速度の場合は誤差が小さい)があったが、最新の2016~2018年の検証では相関が小さくなった。

他の予報時間に対しても同様の結果が見られた。

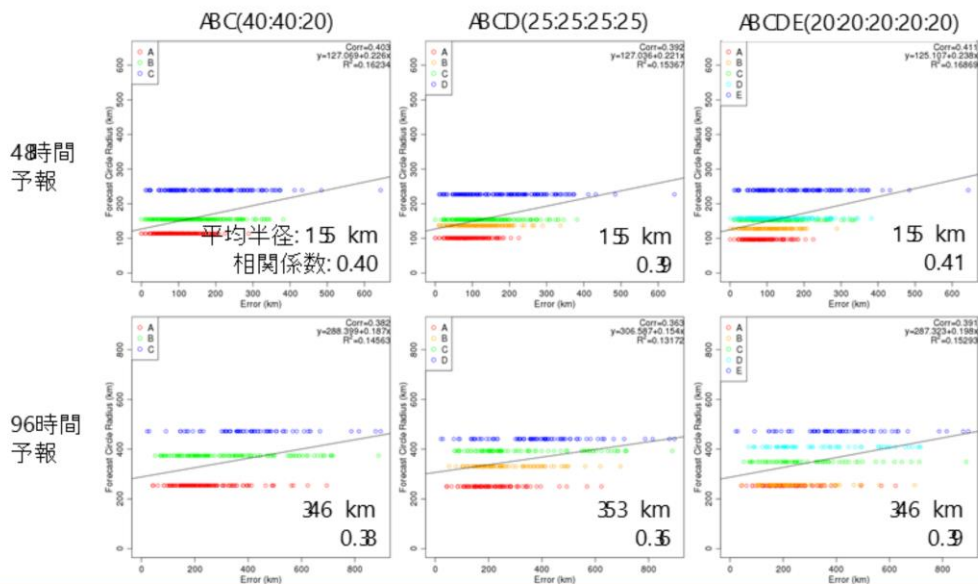
この理由としては、数値予報モデルの改良や、その利用手法の改善(2015年にJMA, ECMWF, NCEP, UKMOの決定論モデルによるコンセンサス手法の導入等)による効果と考えられる。



信頼度の区分数増加の効果

- 区分を増やしても相関が良くなるわけではない。
- 区分が増えると区分毎の事例数が減るため、信頼度間の逆転が見られる。

信頼度の区分数3, 4, 5の場合の予報円半径と当庁の予報誤差の相関(複数アンサンブル)



令和元年度 予報技術研修テキスト

19

次に、信頼度の区分数を変化させた場合の予報円の平均半径や予報誤差との相関への効果について調査した。

図は、複数アンサンブル手法に対して、信頼度の区分数を変化させた場合の予報円半径と当庁の予報誤差の散布図を示し、縦軸が予報円半径[km]、横軸が予報誤差[km]を表す。左列、中央、右列がそれぞれ区分数が3(ABC=40:40:20)、4(ABCD=25:25:25:25)、5(ABCDE=20:20:20:20:20)の場合で、上段が48時間予報、下段が96時間予報に対するものを示す。

各図に平均半径、相関係数の値も表示している。

これらから、区分を増やしても相関が良くなるわけではなく、また、区分が増えると区分毎の事例数が減るため、信頼度間の逆転(信頼度が高くなるのに半径が大きくなる)が見られるようになる。

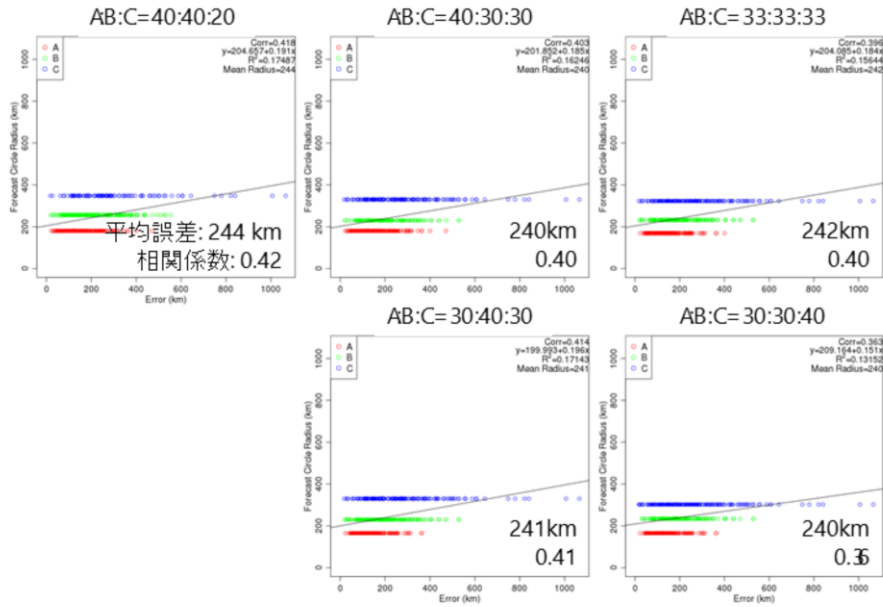
他の予報時間に対しても同様の結果が見られた。



信頼度毎の事例数割合変更の効果

- 予報円半径の平均、当庁の予報誤差との相関、信頼度間の分離度いずれもそれほど変わらないが、ABC=40:40:20%の割合が最も良い傾向がある。

信頼度ABC毎の様々な事例数割合に対する予報円半径と当庁の予報誤差の相関(複数アンサンブル: 2時間予報)



令和元年度 予報技術研修テキスト

20

また、信頼度毎の事例数割合を変化させた場合の予報円の平均半径や予報誤差との相関への効果について調査した。

図は、複数アンサンブル手法の72時間予報に対して、信頼度3つ(ABC)の事例数割合を変化させた場合の予報円半径と当庁の予報誤差の散布図を示し、縦軸が予報円半径[km]、横軸が予報誤差[km]を表す。

各図に平均半径、相関係数の値も表示している。

これらから、予報円半径の平均、当庁の予報誤差との相関、信頼度間の分離度いずれもそれほど変わらないが、ABC=40:40:20%の割合が最も良い傾向があることがわかる。

他の予報時間についても同様の結果が見られた。



改善に向けた調査結果のまとめ

- 単独・複数アンサンブルについて、アンサンブルの特性、それらを利用した予報円を比較
 - 複数アンサンブルの方が、スプレッドとアンサンブル平均予測誤差や当庁の予報誤差の相関が良く、アウト라이어率が小さく、信頼度間の予報円半径の分離度も大きい傾向がある。
- 統計的手法、単独・複数アンサンブルを用いた予報円について、どれが最も良い予報円か比較
 - 平均半径はそれほど変わらない
 - 半径と当庁の予報誤差の相関は統計的手法、単独、複数アンサンブル手法の順に良くなる
- 当庁の予報誤差と進行方向・速度の関係
 - 過去の検証で見られた相関は最新の検証では小さくなる
- 信頼度の区分数増加の効果
 - 区分を増やしても相関が良くなるわけではなく、区分毎の事例数が減るため、信頼度間の逆転が見られる。
- 信頼度毎の事例数割合変更の効果
 - 予報円半径の平均、当庁の予報誤差との相関、信頼度間の分離度いずれもそれほど変わらないが、ABC=40:40:20%の割合が最も良い傾向がある。
- 以上より、予報円の作成手法として以下を採用
 - 全ての予報時間に対して、台風の進行方向・速度による区分は廃止し、複数アンサンブル(JENU)の積算スプレッドに基づく信頼度ABC(40:40:20%)のみで区分する。

令和元年度 予報技術研修テキスト

21

以上、改善に向けた調査結果をまとめると以下ようになる。

- 単独・複数アンサンブルについて、アンサンブルの特性、それらを利用した予報円を比較
 - 複数アンサンブルの方が、スプレッドとアンサンブル平均予測誤差や当庁の予報誤差の相関が良く、アウト라이어率が小さく、信頼度間の予報円半径の分離度も大きい傾向がある。
- 統計的手法、単独・複数アンサンブルを用いた予報円について、どれが最も良い予報円か比較
 - 平均半径はそれほど変わらない
 - 半径と当庁の予報誤差の相関は統計的手法、単独、複数アンサンブル手法の順に良くなる
- 当庁の予報誤差と進行方向・速度の関係
 - 過去の検証で見られた相関は最新の検証では見られない
- 信頼度の区分数増加の効果
 - 区分を増やしても相関が良くなるわけではなく、区分毎の事例数が減るため、信頼度間の逆転が見られる。
- 信頼度毎の事例数割合変更の効果
 - 予報円半径の平均、当庁の予報誤差との相関、信頼度間の分離度いずれもそれほど変わらないが、ABC=40:40:20%の割合が最も良い傾向がある。
- 以上より、予報円の作成手法として以下を採用
 - 全ての予報時間に対して、台風の進行方向・速度による区分は廃止し、複数アンサンブル(JENU)の積算スプレッドに基づく信頼度ABC(40:40:20%)のみで区分する。

3. 新しい予報円

最後に、新しい予報円の概要と検証結果を紹介する。



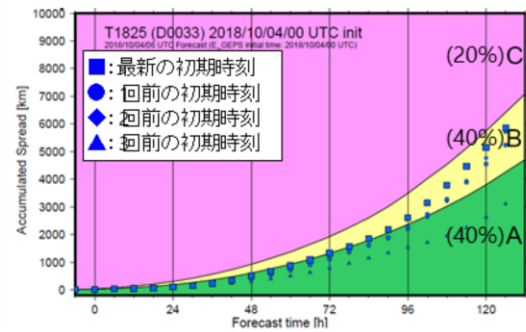
新しい予報円

新しい予報円半径 [海里]

予報時間	信頼度				
	A	A'	B	B'	C
3	17	21	25	29	33
6	19	24	28	32	37
9	22	27	31	36	41
12	25	30	35	40	45
15	27	33	38	44	50
18	30	36	42	48	55
21	32	39	46	52	60
24	35	42	50	57	65
48	60	75	90	105	120
72	100	120	140	160	180
96	140	170	200	230	260
120	200	240	280	320	360

120時間先まで統一した算出手法

- 過去3年間(2016~2018年)のJMA, ECMWF, NCEP, UKMOの複数のアンサンブルの積算スプレッドに基づく信頼度(ABC)毎に予報誤差の70%が入る予報円半径を統計的に算出
- 予報誤差と進行方向・速度の相関が見られなくなったことから、進行方向・速度による区分を廃止
- 信頼度間の半径の急な変化を緩和するため、補完区分A', B'を設定



令和元年度 予報技術研修テキスト

23

左の表は予報時間毎の予報円半径[海里]を示す。

これまで紹介した調査結果から、120時間先まで統一した算出手法を採用し、過去3年間(2016~2018年)のJMA, ECMWF, NCEP, UKMOの複数のアンサンブルの積算スプレッドに基づく信頼度(ABC)毎に予報誤差の70%が入る予報円半径を統計的に算出することとした。

また、予報誤差と進行方向・速度の相関が見られなくなったことから、進行方向・速度による区分を廃止した。

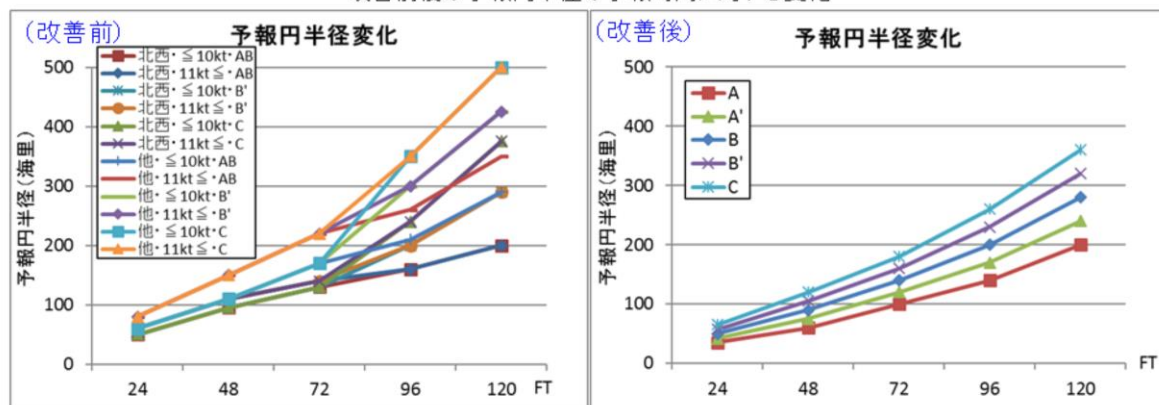
信頼度間の半径の急な変化を緩和するため、補完区分A', B'を設定した。現業作業では、例えば信頼度がAとBの間付近である場合や、1回前から最新の初期時刻でA→Bに変化したような場合に、信頼度A'を利用している。



改善前後の予報円の比較

- 全ての予報時間で統一的手法を導入することで、**予報円半径の不自然な時間変化が解消される**
- **72時間先までの予報にもアンサンブル予報に基づく予測不確実性が予報円半径に反映される**
- 単独アンサンブルよりも**複数アンサンブルを用いることで、より予報誤差と相関の強い、つまり予測不確実性をより正確に反映した予報円となる**
- 最新の予報誤差の検証結果を反映して、**予報円半径は平均約20%小さくなる**

改善前後の予報円半径の予報時間に対する変化



令和元年度 予報技術研修テキスト

24

改善前後の予報円を比較する。

図は、改善前(左)と改善後(右)の予報円半径の予報時間に対する変化を示し、縦軸が予報円半径[海里]、横軸が予報時間[時間]を表す。

今回の予報円改善により、以下の効果が得られる。

- 全ての予報時間で統一的手法を導入することで、予報円半径の不自然な時間変化が解消される(図参照)
- 72時間先までの予報にもアンサンブル予報に基づく予測不確実性が予報円半径に反映される
- 単独アンサンブルよりも複数アンサンブルを用いることで、より予報誤差と相関の強い、つまり予測不確実性をより正確に反映した予報円となる
- 最新の予報誤差の検証結果を反映して、予報円半径は平均約20%小さくなる(図参照)



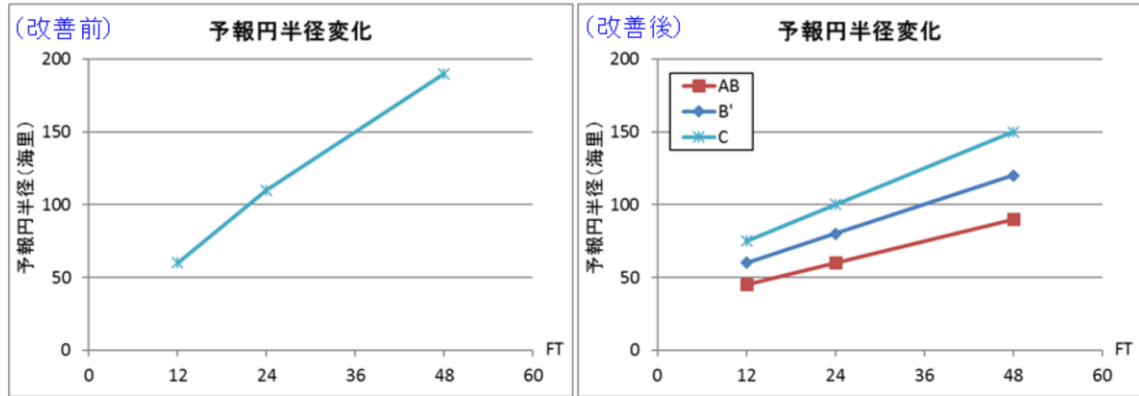
熱帯低気圧用の予報円

- 熱帯低気圧に対する予報誤差は台風に対する誤差よりも大きいことを反映して予報円も大きい。
- 従来は各予報時間で一通りの半径を設定していたが、**台風と同じく複数アンサンブルに基づく信頼度を用いて設定。**
- 信頼度AとBの値は変わらないが、CはABに比べて値が大きいため、AとBは統合し、補完区分Bを設定。
- 改善により、台風の場合と同様の効果が得られる。**

改善後の熱帯低気圧用の予報円半径[海里]

予報時間	信頼度		
	AB	B'	C
12	45	60	75
24	60	80	100
48	90	120	150

改善前後の予報円半径の予報時間に対する変化



これまで、台風に対する予報円の改善について説明してきたが、併せて熱帯低気圧用の予報円についても改善を行った。

右の表は改善後の熱帯低気圧用の予報円半径[海里]を示す。

熱帯低気圧に対する予報誤差は、台風に対する誤差よりも大きい。これは熱帯低気圧は台風に比べてしっかりした構造を持っておらず、その後の進路の予報が難しいことを反映している。したがって、台風に対する予報円半径よりも大きい。

また、従来は熱帯低気圧の進行方向や速度、アンサンブル予報のスプレッドに基づく信頼度等で区分せず、各予報時間で一通りの半径が設定されていたが、台風用と同じく主要4センターの複数のアンサンブルに基づく信頼度を用いて設定することとした。

ただし、事例数が少ないこともあり、信頼度AとBの値は変わらないが、CはA,Bに比べて大きいため、AとBを統合し、ABとCの間に補完区分B'を設定した。

図は、改善前(左)と改善後(右)の予報円半径の予報時間に対する変化を示し、縦軸が予報円半径[海里]、横軸が予報時間[時間]を表す。

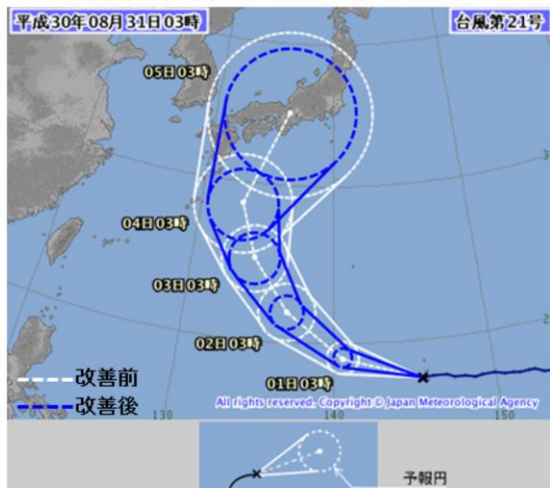
改善により、半径の縮小や、予測不確実性のより適切な反映など、台風の場合と同様の効果が得られる。



事例紹介

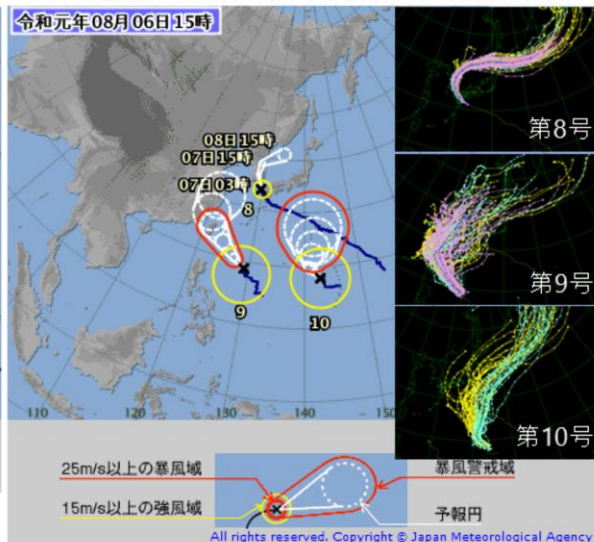
予報円の縮小

2018年台風第21号(2018年8月30日18UTC)



予測不確実性の反映

2019年台風第8号、第9号、第10号(2019年8月6日06 UTC)



- 予報円が小さくなることで、**台風の接近が予測される地域が絞り込まれ、これらの地域では従来以上に防災対応を強化するなどの効果が期待されるとともに、全ての予報時間において予測不確実性をより正確に反映した予報円となることで、従来よりもメリハリのある防災対応が可能となる効果が期待される。**

26

改善により、予報円が縮小した点、予測不確実性をより正確に反映できるようになった点について、それぞれ事例を紹介する。

左図は、2018年台風第21号に対する2018年8月30日18UTCの進路予報図を示す。白線が改善前の予報円、青線が改善後の予報円で、予報円が小さくなっている様子が分かる。

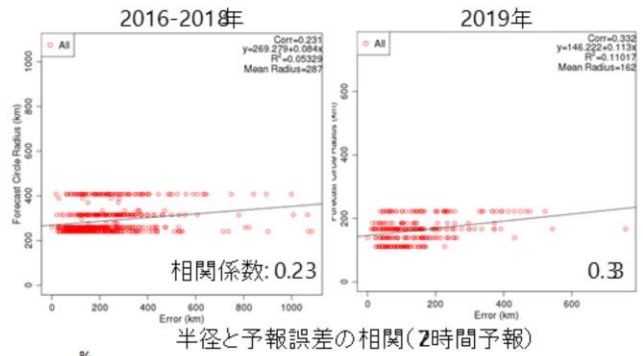
右図は、2019年台風第8号、第9号、第10号が同時に存在した2019年8月6日06UTCの進路予報図を示す。右側には各台風に対する複数アンサンブルによる追跡結果(色はセンター毎に異なる)を示しており、ばらつきが大きい第9号や第10号は予報円も大きく、ばらつきが小さい第8号は予報円が小さくなっており、アンサンブルによる予測不確実性が予報円に反映されている様子が分かる。

このように、予報円が小さくなることで、台風の接近が予測される地域が絞り込まれ、これらの地域では従来以上に防災対応を強化するなどの効果が期待されるとともに、全ての予報時間において予測不確実性をより正確に反映した予報円となることで、従来よりもメリハリのある防災対応が可能となる効果が期待される。

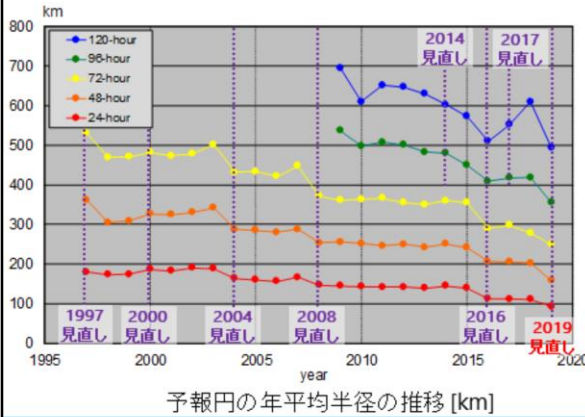


改善後の統計検証

- 改善後の2019年全台風(第3号～第29号)について2016～2018年平均と比較
- 平均半径は10%～20%縮小
- 適中率は小さくなり70%に近づき適正化
- 予報誤差との相関は向上



半径と予報誤差の相関(2時間予報)



予報円の年平均半径の推移 [km]



予報円の適中率の推移 [%]

改善後の2019年全台風(第3号から第29号)に対して予報円に関する検証を実施し、2016～2018年の3年平均の結果と比較した。

左下図は、予報円の年平均半径の推移を示し、縦軸は半径[km]、横軸は年を表す。2019年は過去最少となっており、2016～2018年の3年平均と比べて10%～20%小さくなっている。

右下図は予報円の適中率の推移を示し、縦軸が適中率[%]、横軸は年を表す。2019年は2016～2018年の3年平均よりも概ね小さくなり、70%に近づき適正となっていることがわかる。

右上図は、72時間予報に対する予報円半径と当庁の予報誤差の散布図を表しており、縦軸は半径[km]、横軸は誤差[km]で、黒線は回帰直線、各図には相関係数を値で示している。左図が2016～2018年、右図が2019年の結果を示す。2019年の方が、2016～2018年よりも相関係数が大きくなっていることが分かる。他の予報時間についても同様の結果が見られた。

4. まとめと今後の課題

最後に、まとめと今後の課題について述べる。



まとめと今後の課題

• まとめ

- 2019年6月に予報円を改善し、全予報時間で複数アンサンブル手法を導入。
- 台風の進行方向・速度による区分は廃止し、複数アンサンブル(JMA, ECMWF, NCEP, UKMO)の積算スプレッドに基づく信頼度のみで区分。
- 予報円半径は平均約20%小さくなり、予測不確実性をより正確に反映した予報円となるとともに、予報円半径の不自然な時間変化が解消。

• 今後の課題

- (短期) 選択的コンセンサス手法や重み付けコンセンサス手法の導入
 - アンサンブルメンバーからより適切なものを選択したり、メンバー間やモデル間で重み付けを実施する手法。
 - アンサンブルの仕様変更により、選択する基準や重み付けを変更する必要があり、現業利用は難しい可能性がある。
- (長期) 予測不確実性の表現手法の高度化
 - 現状の予報円方式では、コースの不確実性は小さいが、速度の不確実性が大きいような場合、コースの不確実性を過大に表現してしまう課題がある。
 - 例えば、楕円方式を導入することで、コースと速度の不確実性を別々に表現することが可能となり、70%の確率は変更せずに、面積を減らせる可能性がある。ただし、業務化には文字・音声情報での表現の難しさや大規模なシステム改修など様々な課題がある。
 - 他の案としては、アンサンブル予報のばらつきを利用した確率分布を図情報で提供することも考えられるが、現業化に向けては楕円方式と同様の様々な課題がある。
 - 以上の観点も含め、予測不確実性の表現手法の高度化について検討していきたい。

29

まとめ

- 2019年6月に予報円を改善し、全予報時間で複数アンサンブル手法を導入。
- 台風の進行方向・速度による区分は廃止し、複数アンサンブル(JMA, ECMWF, NCEP, UKMO)の積算スプレッドに基づく信頼度のみで区分。
- 予報円半径は平均約20%小さくなり、予測不確実性をより正確に反映した予報円となるとともに、予報円半径の不自然な時間変化が解消。

今後の課題

- 短期的には選択的コンセンサス手法(Elsberry and Carr 2000)や重み付けコンセンサス手法(Dong and Zhang 2016)の導入
 - アンサンブルメンバーからより適切なものを選択したり、メンバー間やモデル間で重み付けを実施する手法
 - アンサンブルの仕様変更により、選択する基準や重み付けを変更する必要があり、現業利用は難しい可能性がある
- 長期的には予測不確実性の表現手法の高度化
 - 現状の予報円方式では、コースの不確実性は小さいが、速度の不確実性が大きいような場合、コースの不確実性を過大に表現してしまう課題がある。
 - 例えば、楕円方式(Zhang and Yu 2017)を導入することで、コースと速度の不確実性を別々に表現することが可能となり、70%の確率は変更せずに、面積を減らせる可能性がある。ただし、業務化には文字・音声情報での表現の難しさや大規模なシステム改修など様々な課題がある。
 - 他の案としては、アンサンブル予報のばらつきを利用した確率分布を図情報で提供することも考えられるが、現業化に向けては楕円方式と同様の様々な課題がある。
 - 以上の観点も含め、予測不確実性の表現手法の高度化について検討していきたい。

(参考文献)

- Dong, L., and Zhang, F., 2016: OBEST: An observation-based ensemble subsetting technique for tropical cyclone track prediction. *Wea. Forecasting*, **31**, 57-70.
- Elsberry, R. L., and L. E. Carr III, 2000: Consensus of dynamical tropical cyclone track forecasts—Errors versus spread. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 4131–4138.
- Zhang, X., and H. Yu, 2017: A Probabilistic Tropical Cyclone Track Forecast Scheme Based on the Selective Consensus of Ensemble Prediction Systems. *Wea. Forecasting*, **32**, 2143-2157.