

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1040

July 2018

台風の中心気圧と最大風速半径の関係式の確率評価

本多和彦・鮫島和範

Stochastic Formula between Radius of Maximum Wind Speed and Central Pressure of a Typhoon

Kazuhiko HONDA, Kazunori SAMESHIMA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

台風を中心気圧と最大風速半径の関係式の確率評価

本多和彦*・鮫島和範**

要 旨

台風を中心気圧と最大風速半径について、いくつかの関係式が提案されている。しかし、その多くは、中心気圧に対して最大風速半径の平均値を用いて算出したものであり、最大風速半径のばらつきを考慮していない。

本検討では、この最大風速半径のばらつきを考慮し、台風を中心気圧と最大風速半径の関係について、確率的に評価する関係式を算出した。

キーワード：最大風速半径，中心気圧，確率評価式，経験的台風モデル

* 沿岸海洋・防災研究部 主任研究官

** 沿岸海洋・防災研究部 沿岸防災研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所

電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail：ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

Stochastic Formula between Radius of Maximum Wind Speed and Central Pressure of a Typhoon

Kazuhiko HONDA*

Kazunori SAMESHIMA**

Synopsis

Some researchers have proposed empirical formulae that show a relationship between the radius of maximum wind speed and central pressure of a typhoon.

Most of these formulae were obtained from the average radius for each central pressure. Therefore, the dispersion of the radius is not considered by these formulae.

This study proposes a stochastic formula that shows the relationship between the radius of maximum wind speed and the central pressure of a typhoon while considering its dispersion.

Key words: radius of maximum wind speed, central pressure, stochastic formula, parametric typhoon model

* Senior Researcher, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department

** Head of Coastal Disaster Prevention Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone: +81-46-844-5019 Fax: +81-46-842-9265 e-mail: ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

目 次

1. まえがき	1
2. 最大風速半径の実績値の分析	2
3. 最大風速半径の確率評価式の算出	3
4. 確率評価式と実績値との比較	4
5. まとめ	8
6. あとがき	8
謝辞	8
参考文献	8
付録 A 確率評価式と実績値との比較（発達期）	9
付録 B 確率評価式と実績値との比較（減衰期）	14
付録 C 確率評価式と実績値との比較（全ステージ）	19

1. まえがき

日本は、台風がほぼ毎年のように上陸するため、日本の沿岸部では、台風に伴う高潮による被害が発生している。

例えば、伊勢湾内の沿岸では、1959年の伊勢湾台風に伴う高潮浸水により、死者・行方不明者がおおよそ5,000人（内、名古屋市港区および南区では1,800人以上）に上り、また、ゼロメートル地帯が広がっていることから、浸水は40日ほど続いた。また、大阪湾内の沿岸では、1934年の室戸台風、1950年のジェーン台風、1961年の第2室戸台風等、度重なる高潮浸水によって、多くの死者・行方不明者や建物等の被害が発生した。この他にも、瀬戸内海、八代海等といった海域でも、多くの被害が発生している（例えば、河合、2010）。

台風に伴う高潮被害が発生すると、被災した地域の高潮防災対策の見直しや検討のため、潮位の観測記録、痕跡調査および高潮追算により、被災原因を明らかにする必要がある。また、過去に大きな高潮被害を経験していない地域については、高潮防災対策の検討のため、将来発生し得る高潮を想定する必要がある。そのためには、台風シナリオを想定するとともに、この想定台風を用いた高潮推算が実施される。

このような高潮追算および高潮推算では、高潮の外力となる気圧場および風場を解析するモデル、および、この外力によって生じる水位および流速を解析するモデルを用いて、高潮の伝播や浸水を解析する。

高潮は、水深と比較して波長が非常に大きい現象であることから、海底から海面までの流速分布が一様であると仮定でき、この仮定から得られる非線形長波方程式を用いた解析モデルを用いて、水位および流速を解析することが一般的である。この解析モデルにおいては、いくつかのパラメータが含まれ、それぞれ最適な値に設定する必要があるが、それらの設定する値による解析結果の差異は、比較的小さいものである。

気圧場および風場を解析するモデルとして、局地気象モデル、経験的台風モデル等が一般的に用いられる。

局地気象モデルは、一定時間毎の気象庁客観解析値（GPV）をデータ同化させ、さらに、台風構造を擬似的に再現するために台風ボーガスを組み込むことで、台風に伴う気圧分布および風速分布の時間変化を、精度良く再現することができる。しかし、その計算コストが高く、解析に要する時間が非常に長くなる。さらに、将来の気象現象の予測の場合、データ同化に用いる客観解析値がなく、再現時間が長くなるにつれて再現精度が低下する。

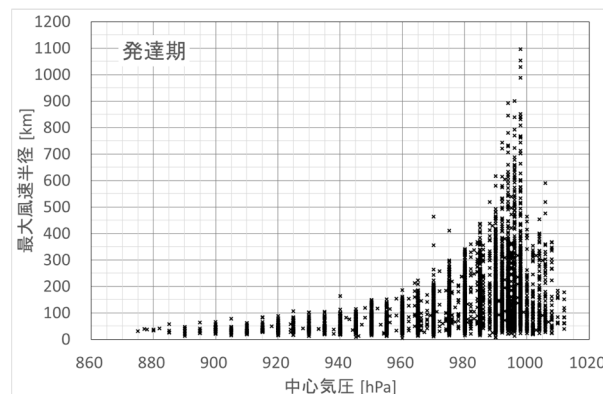


図-1.1 中心気圧と最大風速半径（発達期）

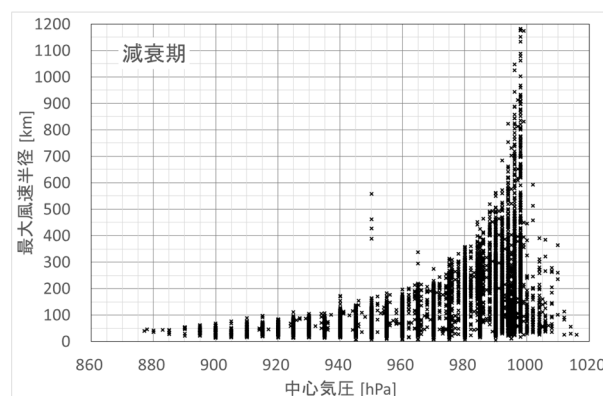


図-1.2 中心気圧と最大風速半径（減衰期）

一方、従来から高潮解析に用いられ実績の多い経験的台風モデルは、台風の中心気圧、最大風速半径および台風経路を設定することで、台風に伴う気圧場および風速場の時空間変化を評価するモデルである。この経験的台風モデルは、局地気象モデルと比較して計算コストが低く、非常に有利なモデルである。

一般的に、台風シナリオを想定する際には、過去に大きな高潮被害をもたらした台風の実績を参考にして、台風の中心気圧および台風経路を設定する。台風の最大風速半径についても、同様に過去の台風実績を参考に設定されるが、台風の発達期および減衰期といった台風ステージや、中心気圧といった台風の強さといった台風の状態を踏まえて設定されることはない（例えば、本多ら、2016, 2017a, 2017b）。

河合ら（2005）は、台風の発達期および減衰期の台風ステージ別の中心気圧と最大風速半径の実績値を用いて、いくつかの回帰式を算出した。この河合らが用いた実績値を、図-1.1および図-1.2に示す。

このように、台風の最大風速半径は、台風ステージや中心気圧によって変化するものである。さらに、同じ台風ステージおよび中心気圧であっても、個々の台風によ

って、その最大風速半径にばらつきがあるが分かる。

Honda et al. (2018) および本多ら (2018) によると、経験的台風モデルで設定する必要がある最大風速半径は、設定する値によって高潮解析結果に大きな差異が生じることがある。

中心気圧と最大風速半径との関係について、例えば、加藤 (2005)、河合ら (2005)、気象協会 (北野ら, 2002) によって提案された関係式がある。これらは、中心気圧が変化すると、最大風速半径も変化することが考慮されている。しかし、いずれの提案式も、任意の中心気圧に対して、最大風速半径の平均値といった代表値を算出するものであり、最大風速半径のばらつきを考慮していない。

安田ら (2010) は、中心気圧と最大風速半径との関係について、最大風速半径のばらつきを考慮し、確率的な関係式を提案した。しかし、この確率評価式を算出する際には、発達期・減衰期といった台風ステージの違いは考慮せず、全てのステージを対象にしている。

以上のことを踏まえ、本検討では、中心気圧と最大風速半径との関係について、過去の台風の実績値を用いて、最大風速半径のばらつきを考慮するとともに、発達期・減衰期といった台風ステージ別に確率的な関係式を提案する。

2. 最大風速半径の実績値の分析

加藤 (2005)、河合ら (2005)、気象協会 (北野ら, 2002) による提案された中心気圧と最大風速半径の関係式について、高木ら (2015) は、沖縄に接近した中心気圧 935hPa 以下の 17 台風の実績との比較から、式(2.1)に示す河合らの提案式が精度良く再現していると指摘している。

$$r_0 = 94.89 \exp\left(\frac{p_c - 967}{61.5}\right) \quad (2.1)$$

このことから、本検討における中心気圧と最大風速半径との関係の確率評価式の算出において用いる台風の実績値は、河合ら (2005) が用いた実績値とした (図-1.1 および図-1.2)。

これらの発達期および減衰期の実績値を合わせた全ステージの実績値について、各中心気圧に対する最大風速半径の上位10%、上位50%、上位90%の実績値、および、それらの指数回帰曲線、ならびに、式(2.1)に示す河合らの提案式を、図-2.1に示す。ただし、各中心気圧のサン

プル数および分布傾向を考慮し、対象とする中心気圧の範囲は910hPaから990hPaとした。

上位10%と上位90%の実績値を比較すると、中心気圧が低い場合でも、上位10%の最大風速半径は、上位90%の値の2倍以上であり、中心気圧が高くなると、その差は大きくなり、5倍以上にもなる。

上位10%および上位90%の実績値について、各中心気圧に対する最大風速半径の平均値を用いて算出した河合らによる提案式と比較すると、上位10%の実績値は提案式の2倍以上となる最大風速半径となることがあり、上位90%の実績値は提案式の半分程度の最大風速半径となることがある。

このように、実際の台風の最大風速半径は、個々の台風や状態によって大きく異なり、上位10%から上位90%までの80%の範囲であっても、既往の提案式による最大風速半径で代表させることはできない。

図-2.1の最大風速半径の実績値の分布から、上位10%については、線形分布ではなく、指数分布の形状と考えられるが、上位50%および上位90%については、線形分布であるか、指数分布であるか、図からは判別することができない。

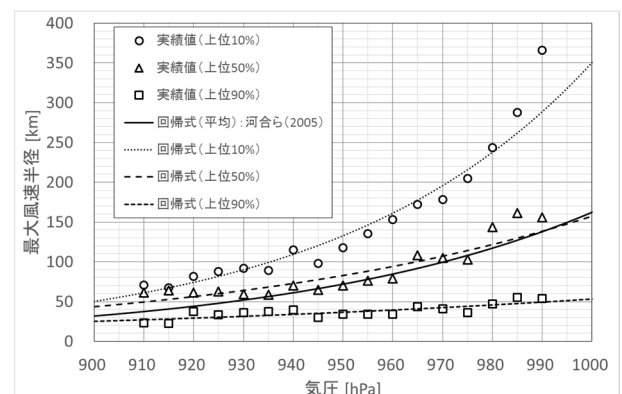


図-2.1 最大風速半径の回帰式 (全ステージ)

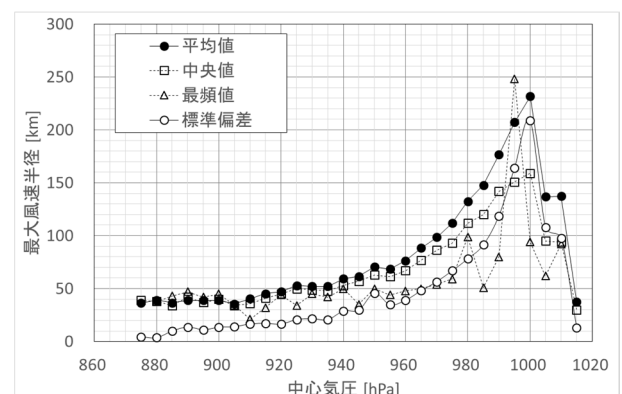


図-2.2 最大風速半径の代表値 (全ステージ)

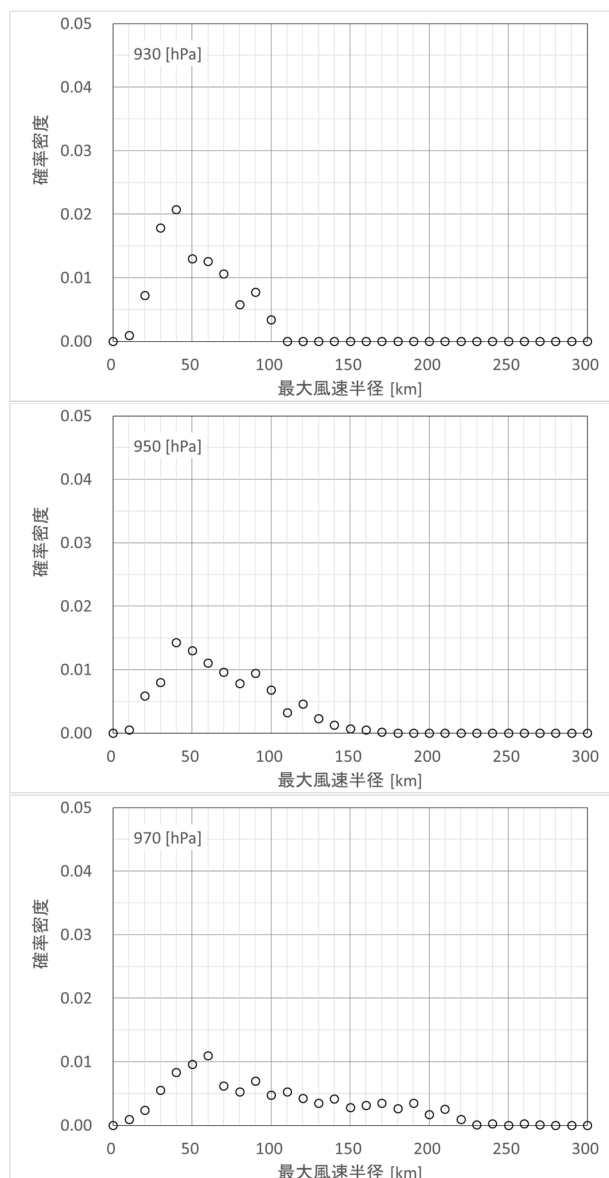


図-2.3 最大風速半径の確率密度

そこで、これらの実績値について、各中心気圧に対する最大風速半径の平均値、中央値、最頻値、および標準偏差を算出した（図-2.2）。

これら全ての代表値について、1,000hPa未満の範囲と1,000hPa以上の範囲とでは、その分布の傾向は異なる。これは、気象庁による台風の定義の1つとして、10分平均風速の最大が17m/s以上という条件があり、これを満たす気圧深度（遠方での気圧と中心気圧との差）の目安は10hPa程度となることから、遠方での気圧にばらつきがあるが標準気圧1,013hPaと同程度であることを踏まえると、台風として定義できる目安は中心気圧が1,000hPa前後であることが理由である。

1,000hPa未満の範囲においては、平均値、中央値および標準偏差の分布形状は、いずれも線形ではなく、指数

分布の傾向を示している。最頻値については、ばらつきが認められるが、これは最大風速半径の実績値を1km単位で読み取っているためである。しかし、その分布は、他の代表値と同様の傾向を示している。

次に、全ステージの実績値を用いて、各中心気圧に対する最大風速半径について、10km毎に区分した頻度分布から確率密度を算出した。一例として、中心気圧930hPa、950hPaおよび970hPaに対して算出した確率密度を、図-2.3に示す。

最大風速半径は、物理的に0未満になることはない。そのため、図-2.3に示す確率密度は、下限値のない正規分布といった分布形状ではなく、例えば、対数正規分布のように、下限値がある分布形状となっている。

3. 最大風速半径の確率評価式の算出

第2章での分析結果を踏まえ、各中心気圧に対する最大風速半径は、対数正規分布となると仮定する。

中心気圧 p_c [hPa]の台風における最大風速半径 r_0 [km]の確率密度関数および累積分布関数を、式(3.1)および式(3.2)に示す。

$$f(r_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{(p_c)}r_0} \exp\left(-\frac{(\ln(r_0) - \mu_{(p_c)})^2}{2\sigma_{(p_c)}^2}\right) \quad (3.1)$$

$$F(r_0) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(r_0) - \mu_{(p_c)}}{\sigma_{(p_c)}\sqrt{2}}\right) \right) \quad (3.2)$$

ここで、 $\mu_{(p_c)}$ および $\sigma_{(p_c)}$ は、対数正規分布のパラメータであり、最大風速半径の自然対数の次元を有する。

さらに、第2章での分析結果により、最大風速半径の平均値、標準偏差等は、指数分布の形状を有することが分かった。

これらのことから、対数正規分布のパラメータ $\mu_{(p_c)}$ および $\sigma_{(p_c)}$ は、それぞれ、係数 α_μ 、 β_μ 、 γ_μ および α_σ 、 β_σ 、 γ_σ を用いて、次のように設定した。

$$\mu_{(p_c)} = \ln\left(\alpha_\mu \exp\left(\frac{p_c - \beta_\mu}{\gamma_\mu}\right)\right) \quad (3.3)$$

$$\sigma_{(p_c)} = \ln\left(\alpha_\sigma \exp\left(\frac{p_c - \beta_\sigma}{\gamma_\sigma}\right)\right) \quad (3.4)$$

式(3.3)および式(3.4)内にある係数値については、式

(3.5)および式(3.6)に示す最大風速半径の対数正規分布の期待値および標準偏差に対して、実績値を用いて指数回帰することで求めた。ここで、線形回帰ではなく、指数回帰としたのは、前述のとおり、最大風速半径の平均値、標準偏差等は、指数分布の形状を有するためである。

ここで、実測値については、最大風速半径を10km毎に区分した頻度分布から算出した確率密度を用いた。

回帰する中心気圧の範囲については、第2章での分析結果から分かるように、1,000hPa前後で分布の傾向が異なることを踏まえ、範囲の上限を990hPaとした。また、サンプル数が少ないことから、範囲の下限を910hPaとした。なお、回帰する中心気圧は5hPa間隔とした。

$$\exp(\mu_{(p_c)} + \sigma_{(p_c)}^2/2) \quad (3.5)$$

$$\sqrt{\exp(2\mu_{(p_c)} + \sigma_{(p_c)}^2)(\exp(\sigma_{(p_c)}^2) - 1)} \quad (3.6)$$

台風ステージ毎に指数回帰にて求めた式(3.3)および式(3.4)内にある係数値を、表-3.1に示す。

なお、式(3.3)および式(3.4)から分かるように、係数 α_μ 、 β_μ および α_σ 、 β_σ の組み合わせは無数に存在する。そのため、本検討では、河合ら（2005）による提案式である式(2.1)を参考に、 β_μ および β_σ を全ステージでの中心気圧の平均値として設定した。

表-3.1 台風ステージ毎の係数値

係数	発達期	減衰期	全ステージ
α_μ	76.42	87.76	83.31
β_μ	967.0	967.0	967.0
γ_μ	64.65	65.05	66.18
α_σ	1.765	1.842	1.819
β_σ	967.0	967.0	967.0
γ_σ	249.2	235.1	247.8

4. 確率評価式と実績値との比較

第3章にて算出した最大風速半径の確率評価式の再現性について、台風ステージ毎に確認するため、本検討での提案式と実測値の比較を行った。

各中心気圧における最大風速半径の確率密度および累積分布について、発達期の比較を図-4.1および図-4.2に、減衰期の比較を図-4.3および図-4.4に、全ステージの比較を図-4.5および図-4.6に示す。なお、図-4.1～図

-4.6は、中心気圧920hPa～980hPaの範囲を対象に20hPa間隔の結果のみを示しているため、今回の検討範囲である910hPa～990hPaを5hPa間隔で示した詳細な結果については、付録A～付録Cを参照されたい。

図中の「提案式」の表記の曲線は、本検討で提案した確率評価式であり、図中の「個別回帰」の表記の曲線は、当該中心気圧における実績値のみを用いて、対数正規分布として個別に回帰した結果を示している。この個別回帰の曲線に近ければ、その中心気圧における最大風速半径の評価について、十分な精度を有していると判断できる。

いずれの台風ステージにおいても、本検討で提案した確率評価式、個別回帰および実績値の確率密度および累積分布は、共通した傾向を示している。同じ中心気圧のときは、発達期の最大風速半径の方が小さく、また、発達期の確率密度の方がシャープな形状であり、分散性が小さい傾向を示している。

確率密度については、実績値に若干のばらつきが認められる。しかし、当該中心気圧の実績値のみから算出した個別回帰の曲線と、本検討における提案式による曲線は、近い値となっているため、本検討の提案式は、一定の精度を有している。

次に、累積分布については、中心気圧が950hPa以下の範囲では、実績値、個別回帰および提案式は、非常によく一致している。一方、960hPa前後において、個別回帰曲線と比較して、提案式は、累積値について最大10%ほど過少評価となっており、同一の累積値に対する最大風速半径について最大20kmほど過大評価となっている。また、980hPa前後においては、個別回帰曲線と比較して、提案式は、累積値について最大5%ほど過大評価となっており、同一の累積値に対する最大風速半径について最大10kmほど過少評価となっている。

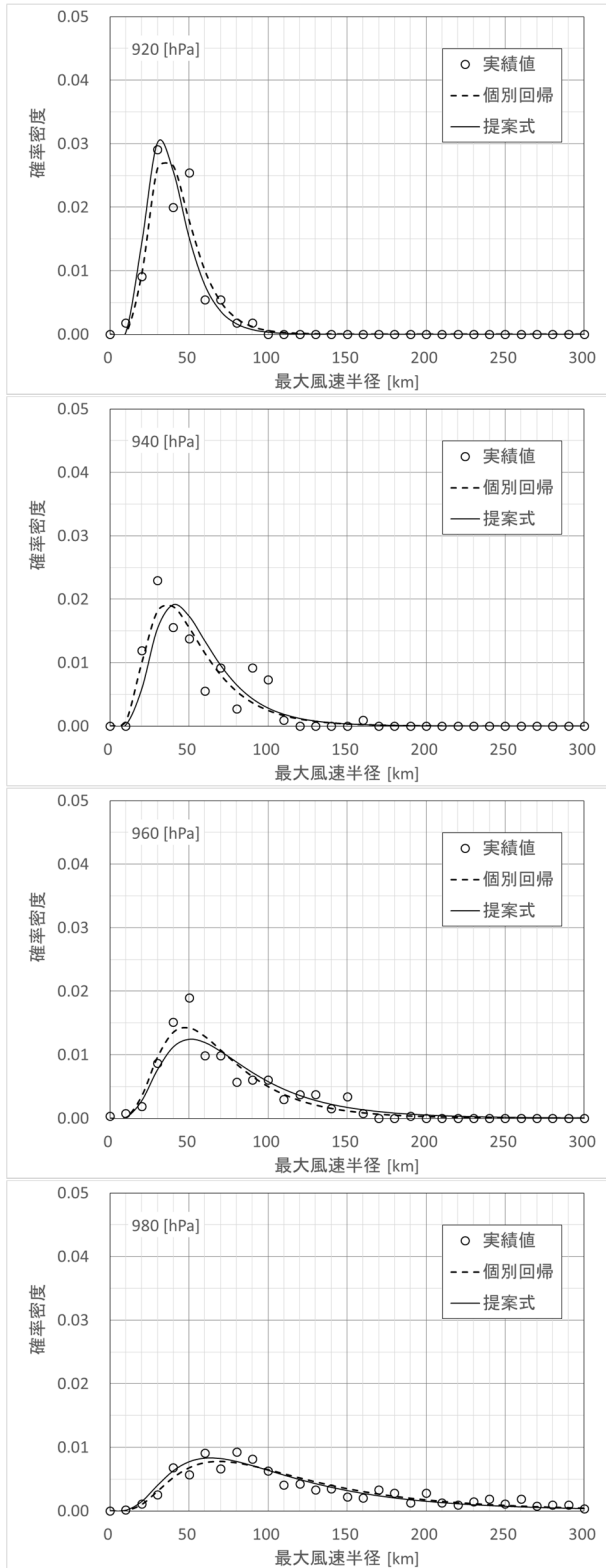


図-4.1 確率密度（発達期）

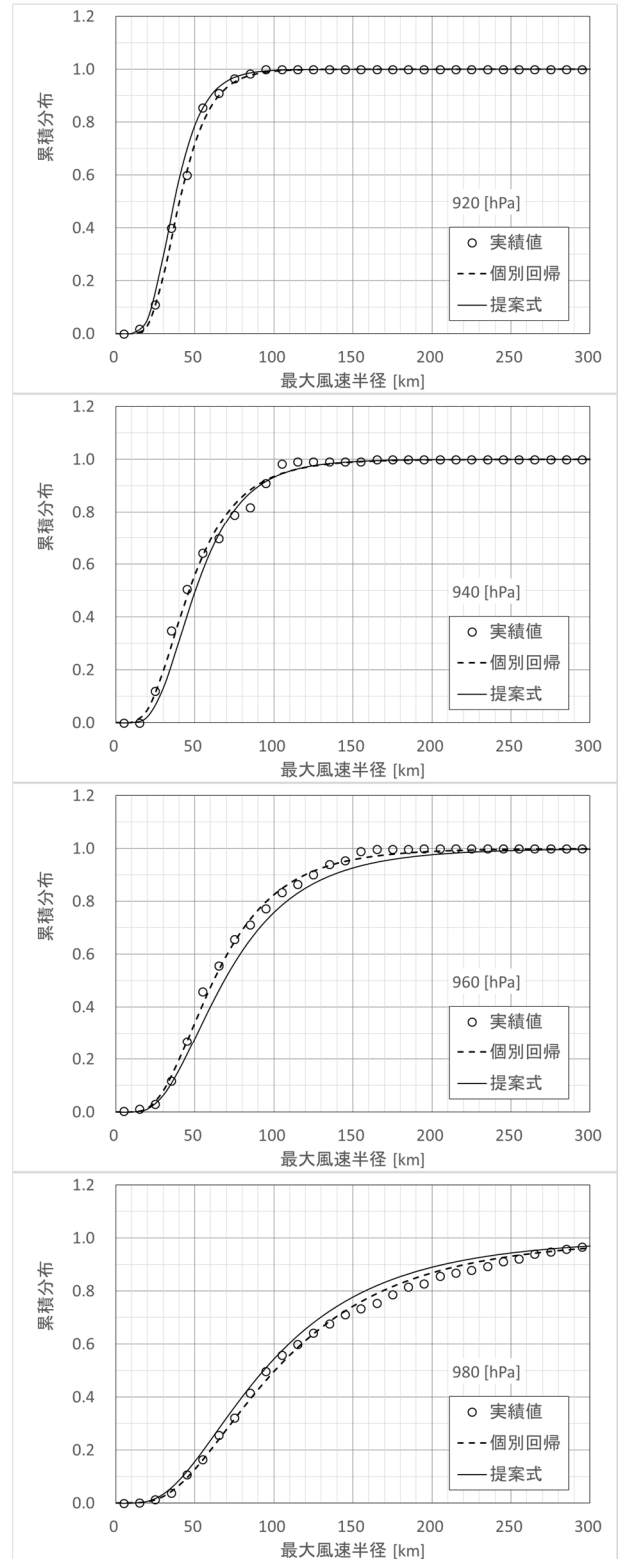


図-4.2 累積分布（発達期）

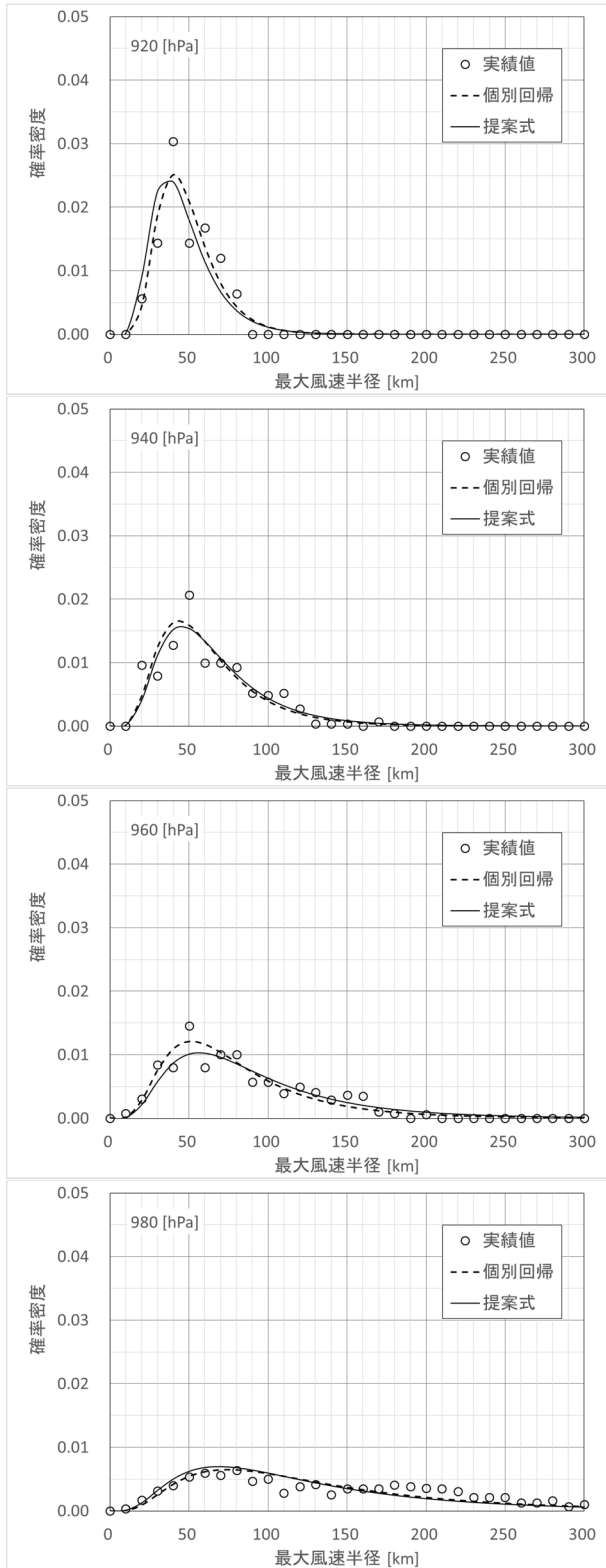


図-4.3 確率密度 (減衰期)

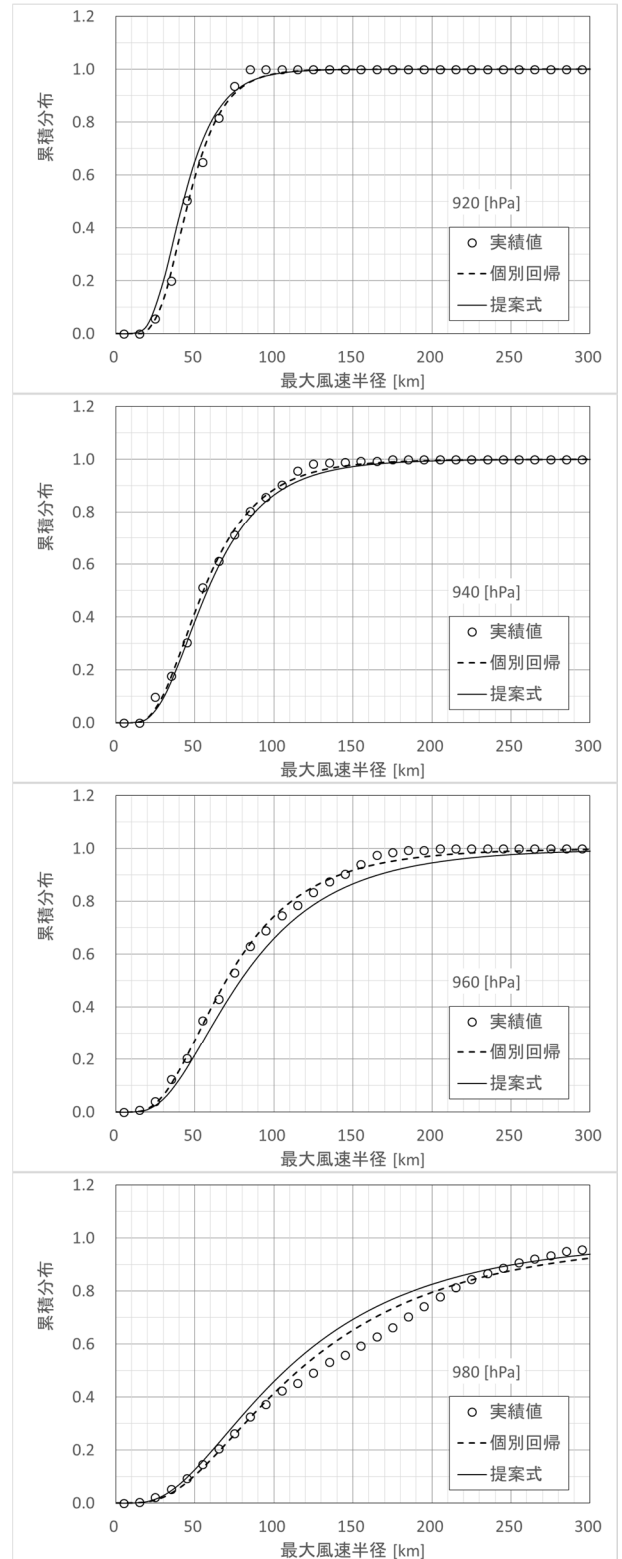


図-4.4 累積分布 (減衰期)

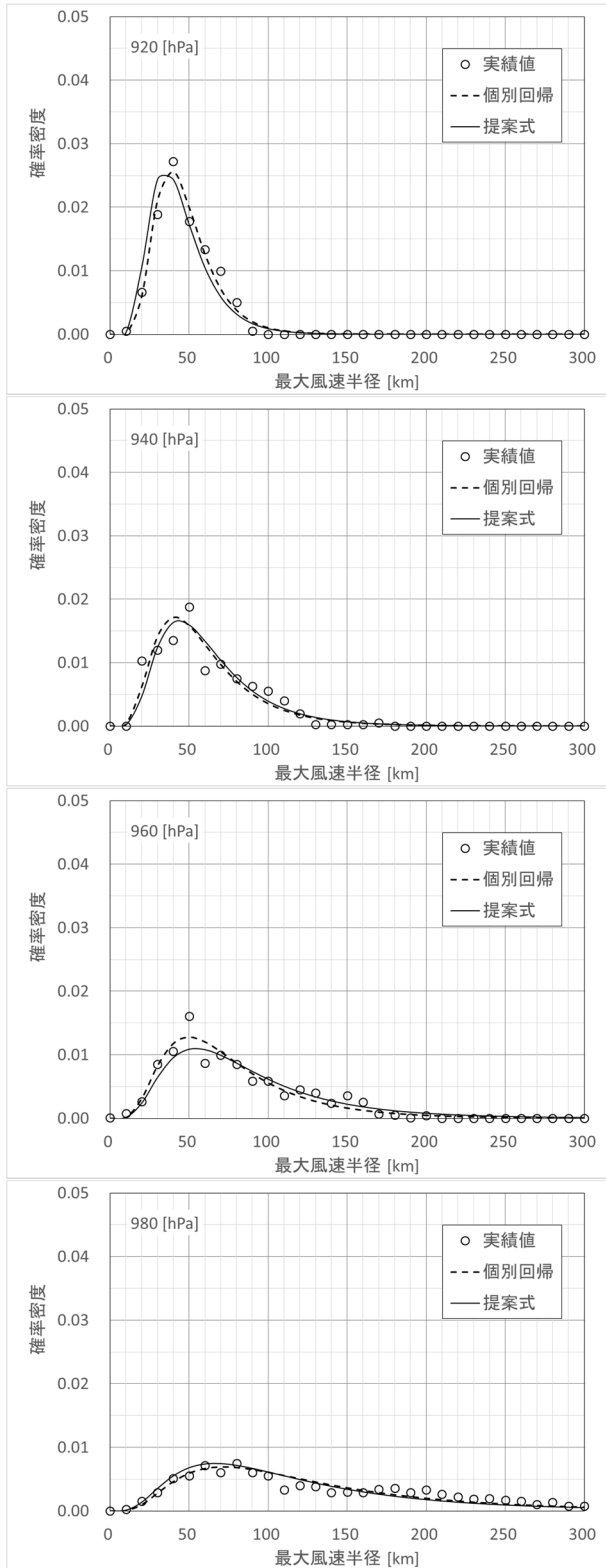


図-4.5 確率密度 (全ステージ)

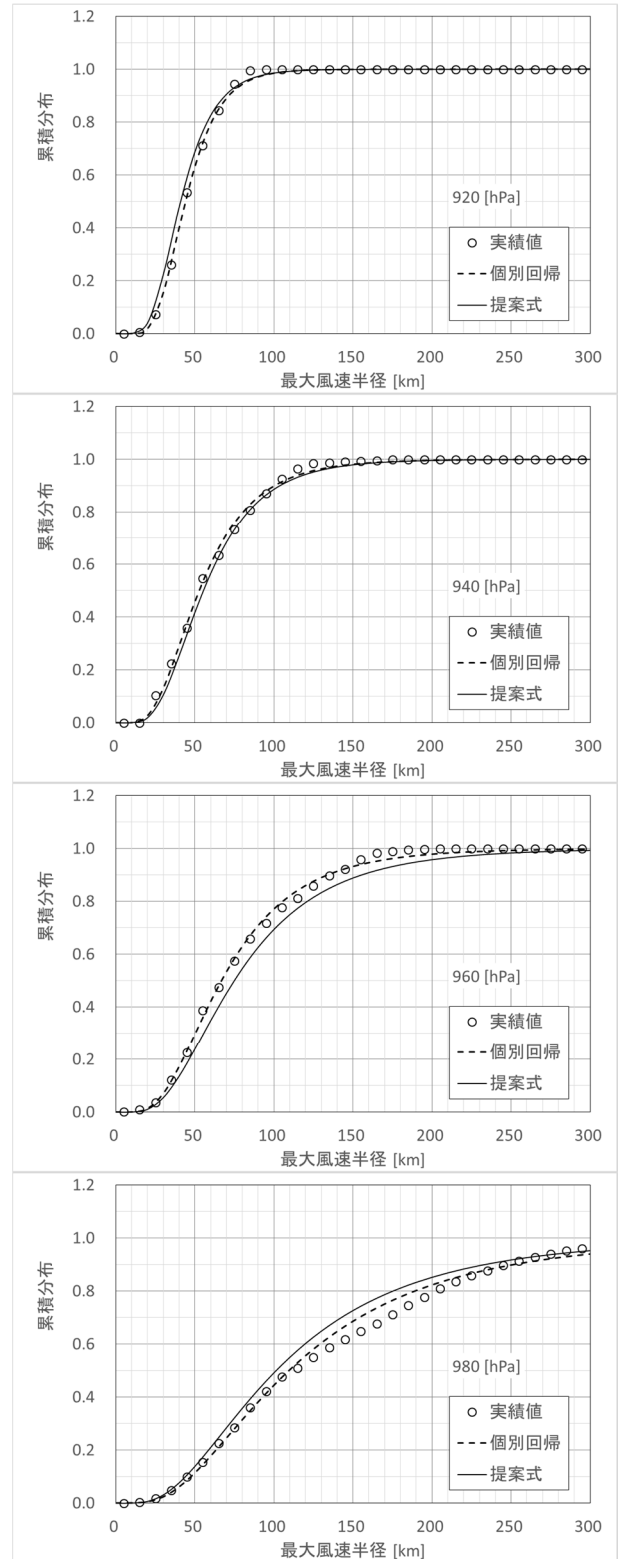


図-4.6 累積分布 (全ステージ)

5. まとめ

本検討では、河合ら（2005）による過去の台風の実績値を用いて、中心気圧と最大風速半径との関係について、最大風速半径のばらつきを考慮するとともに、発達期・減衰期といった台風ステージ別に、確率的な評価式を提案した。

本検討における実績値の分析結果から、中心気圧が1,000hPa以下の範囲では、最大風速半径の平均値、中央値、最頻値および標準偏差の分布は、いずれも、指数分布の形状を有することが明らかとなった。また、各中心気圧に対する最大風速半径の分布は、対数正規分布の形状を有することが明らかとなった。

本検討における確率評価式は、実績値および中心気圧毎に個別に回帰した分布曲線との比較から、一定の精度を有しており、とくに、中心気圧が950hPa以下の範囲においては、非常に良い再現性を有していることが確認できた。

一方、960hPa前後においては、提案式は、同一の累積値に対する最大風速半径に対して若干過大評価となり、また、980hPa前後においては、提案式は、同一の累積値に対する最大風速半径に対して若干過少評価となる。

6. あとがき

本検討において提案した確率評価式を用いる際には、中心気圧が910hPaから990hPaの実績値を用いて回帰して求めた提案式であることから、この適用範囲に留意する必要がある。また、中心気圧が955hPa以上の範囲については、最大風速半径の算出値に、最大10%程度の誤差が含まれていることにも注意が必要である。

（2018年5月31日受付）

謝辞

本検討を進めるにあたり、(国研)海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所の河合弘泰海洋情報・津波研究領域長に、貴重な台風の実績データを提供して頂きました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 加藤史訓（2005）：高潮危険度評価に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，No.275，108p.
- 河合弘泰・本多和彦・富田孝史・柿沼太郎（2005）：2004年に発生した台風の特徴と高祖の予測・再現計算，港湾空港技術研究所資料，No.1103，34p.
- 河合弘泰（2010）：高潮数値計算技術の高精度化と気候変動に備えた防災への適用，港湾空港技術研究所資料，No.1210，97p.
- 北野正夫・有光 剛・高山知司（2002）：うねりの発生特性と海域利用時の防災を目的としたうねりの簡易予測手法について，海岸工学論文集，vol.49，pp.1431-1435.
- 高木泰士・呉 文潔（2015）：日本南方海域を通過する台風の最大風速半径の推定手法，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.71，No.1，pp.1-6.
- 本多和彦・鈴木健之・鈴木 武（2016）：東京湾内の港湾地域を対象とした高潮浸水解析，国土技術政策総合研究所資料，No.934，55p.
- 本多和彦・鈴木健之・鈴木 武（2017）：伊勢湾内の港湾地域を対象とした高潮浸水解析，国土技術政策総合研究所資料，No.960，45p.
- 本多和彦・鮫島和範（2017）：大阪湾内の港湾地域を対象とした高潮浸水解析，国土技術政策総合研究所資料，No.990，38p.
- 本多和彦・鮫島和範（2018）：三大湾内の高潮推算における台風パラメータの影響，国土技術政策総合研究所資料，No.1039，55p.
- 宮澤清治（2008）：台風・気象災害全史，日外アソシエーツ，477p.
- 安田誠宏・林 祐太・森 信人・間瀬 肇（2010）：地球温暖化による高潮・高波推算に対応可能な確率台風モデル，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.1241-1245.
- Honda, K., Sameshima, K. (2018): Inundation Risk due to Storm Surge for Ports in Three Major Bays of Japan, *Proc. 28th Int. Ocean & Polar Eng. Conf.*, ISOPE, pp.1130-1137.

付録A 確率評価式と実績値との比較（発達期）

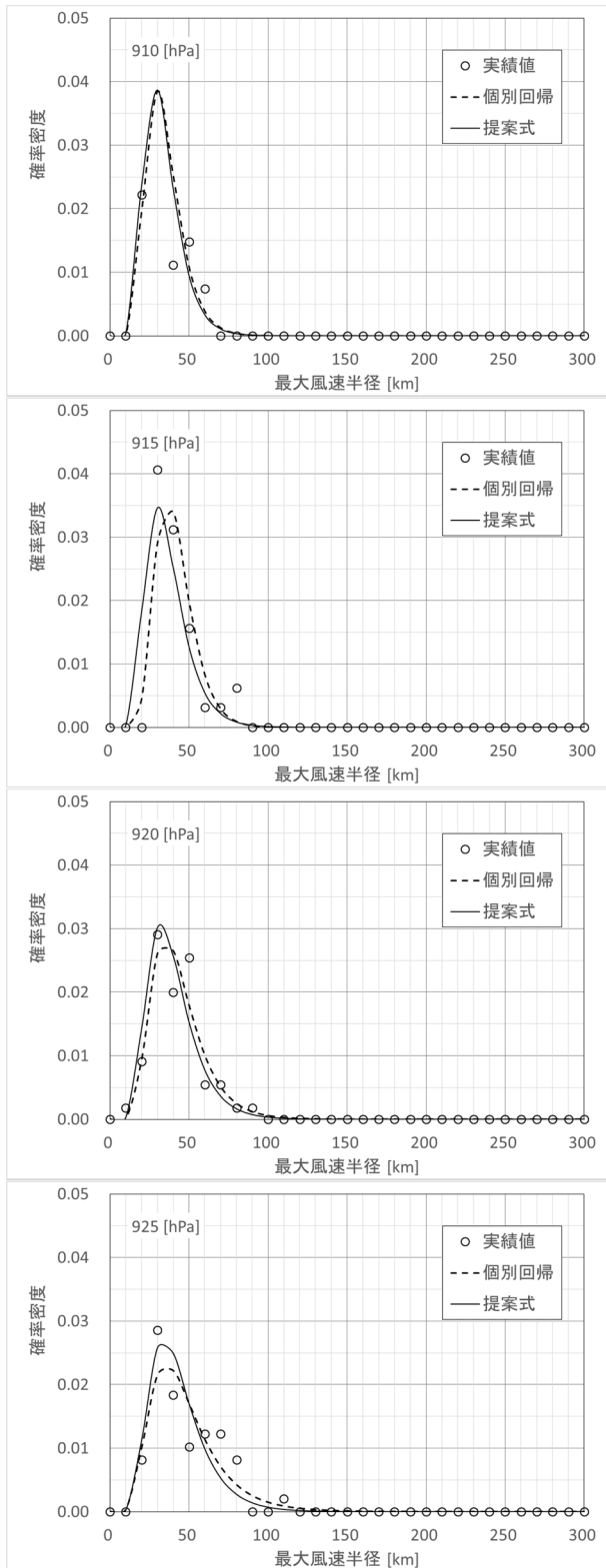


図-A.1 確率密度（発達期）
（その1）

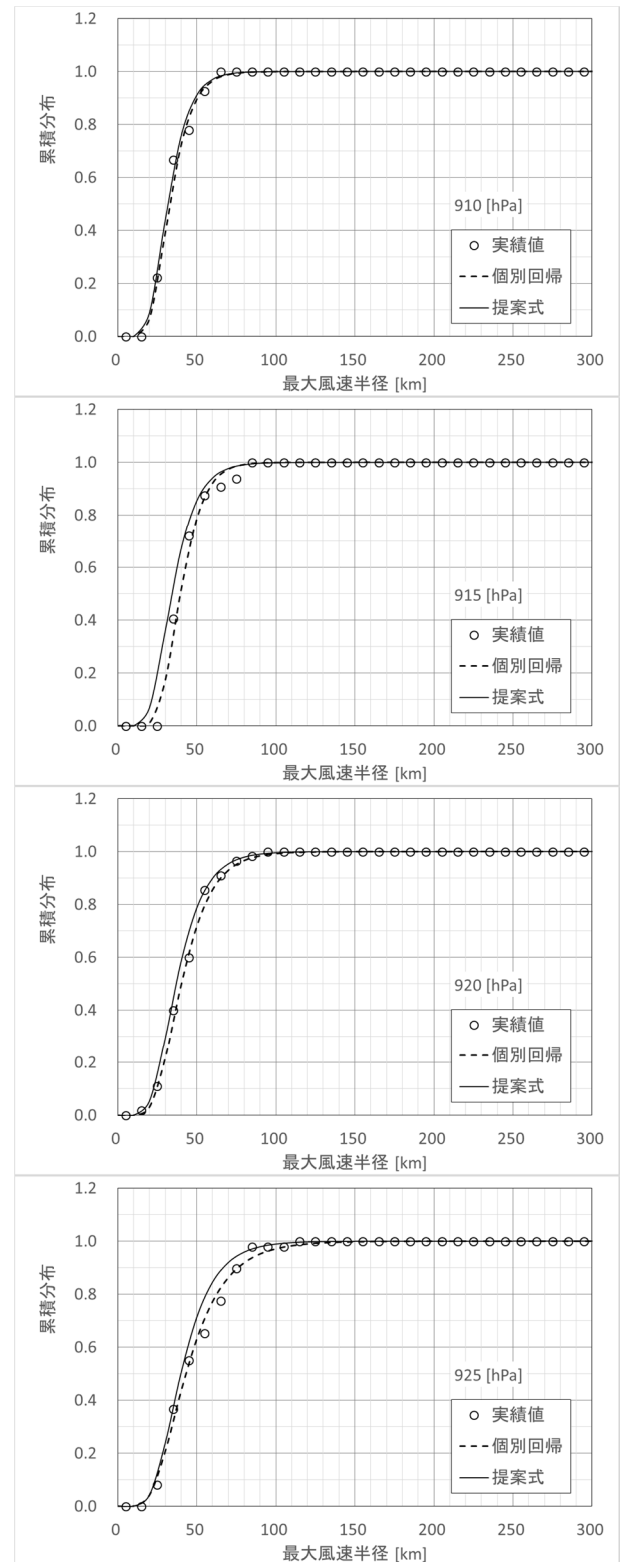


図-A.2 累積分布（発達期）
（その1）

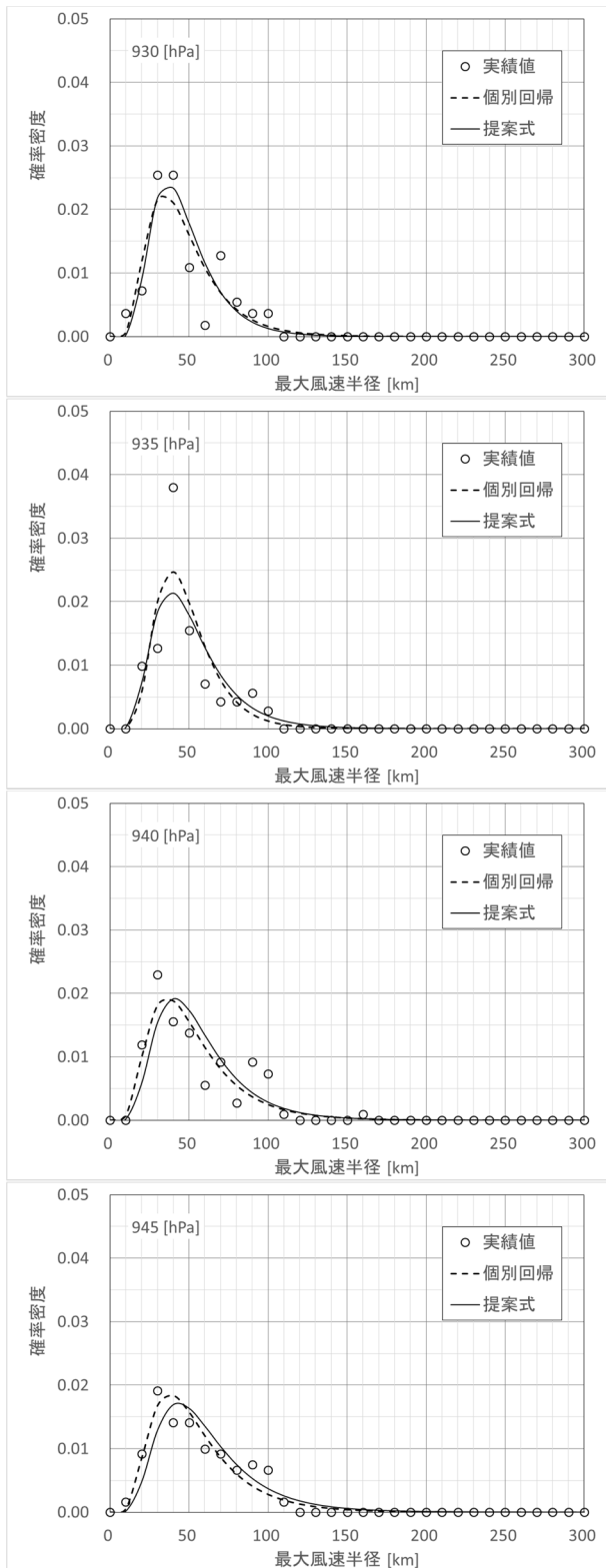


図-A.3 確率密度（発達期）
（その2）

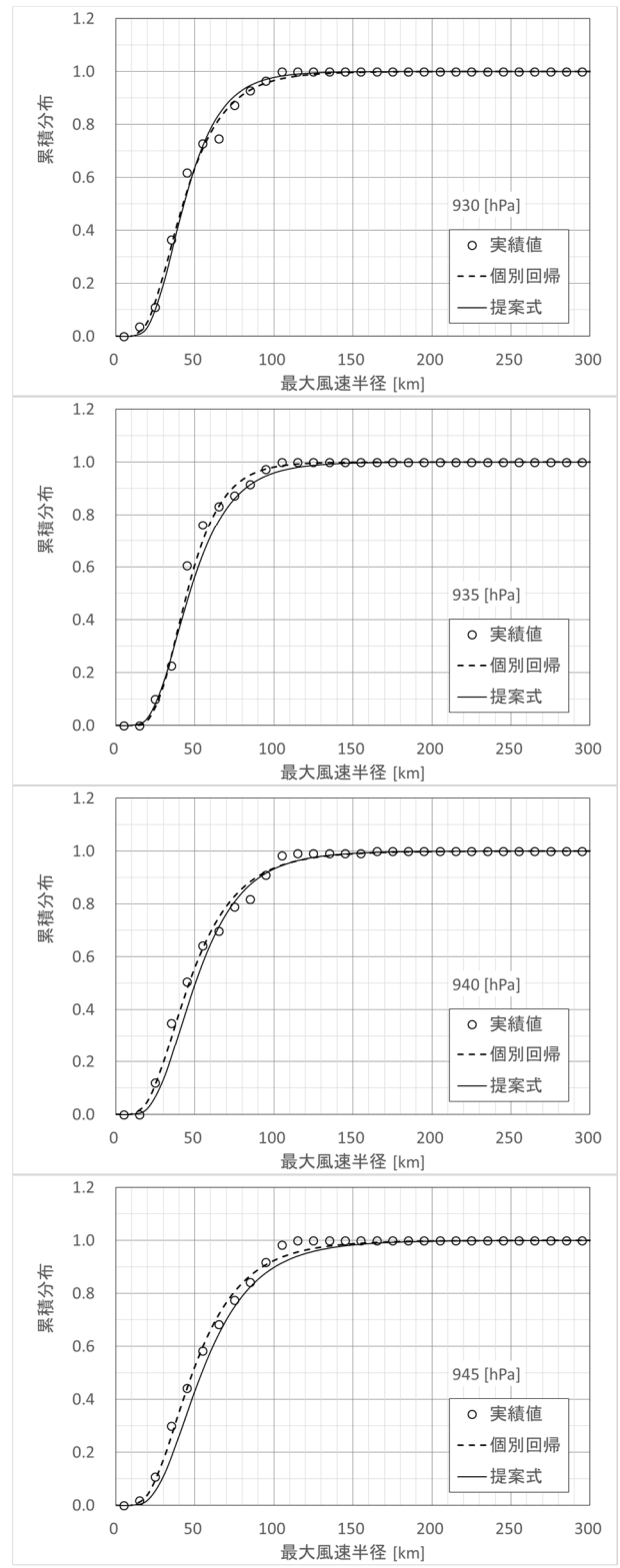


図-A.4 累積分布（発達期）
（その2）

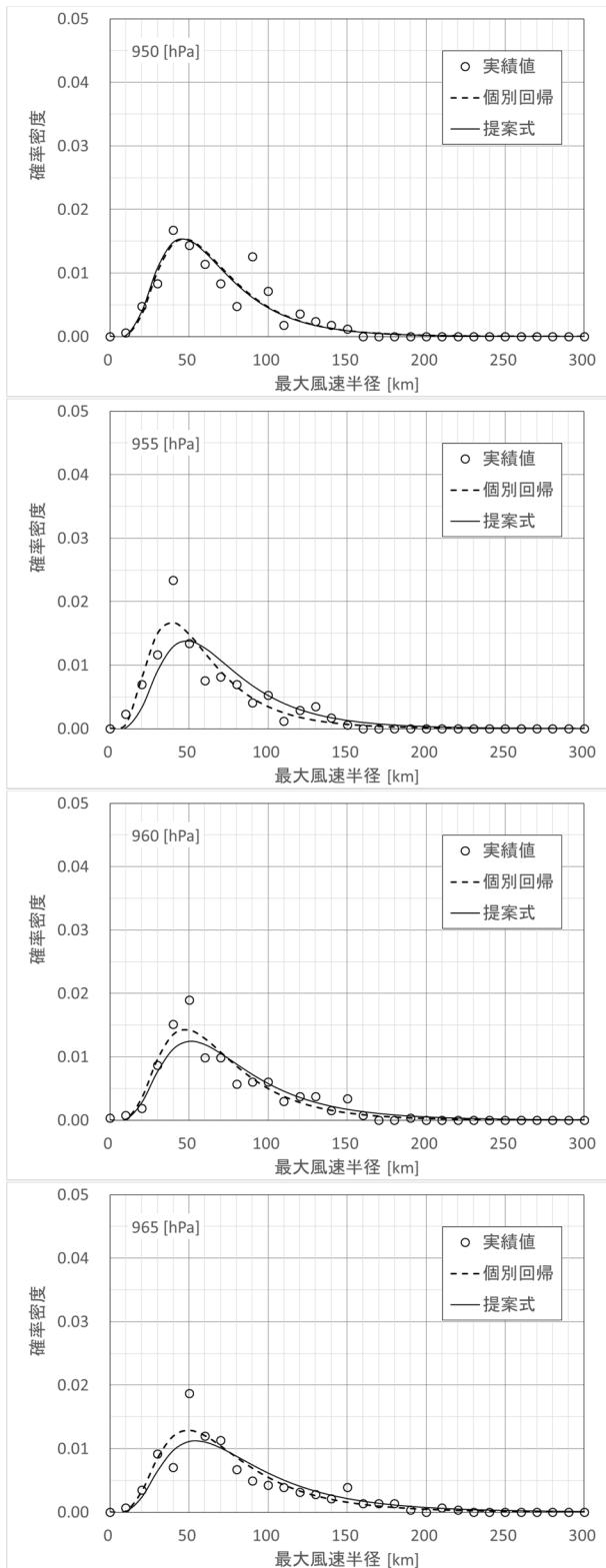


図-A.5 確率密度（発達期）
（その3）

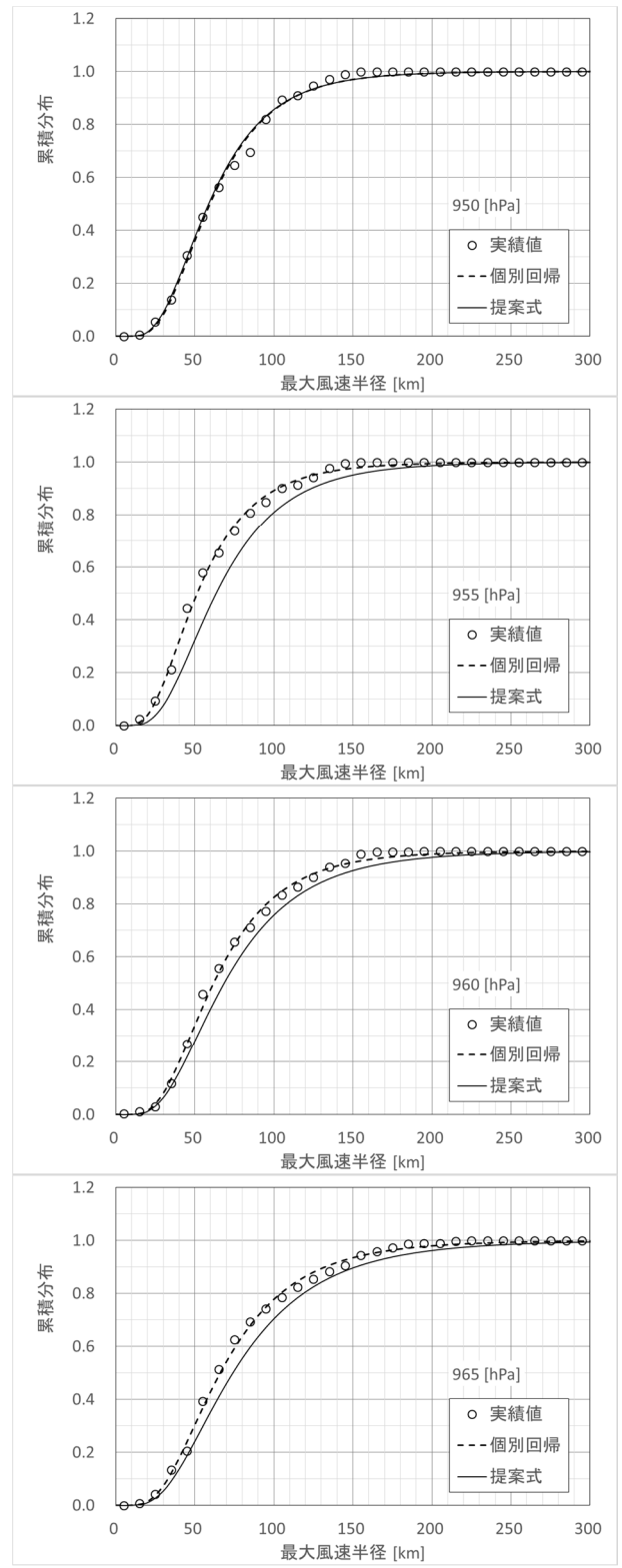


図-A.6 累積分布（発達期）
（その3）

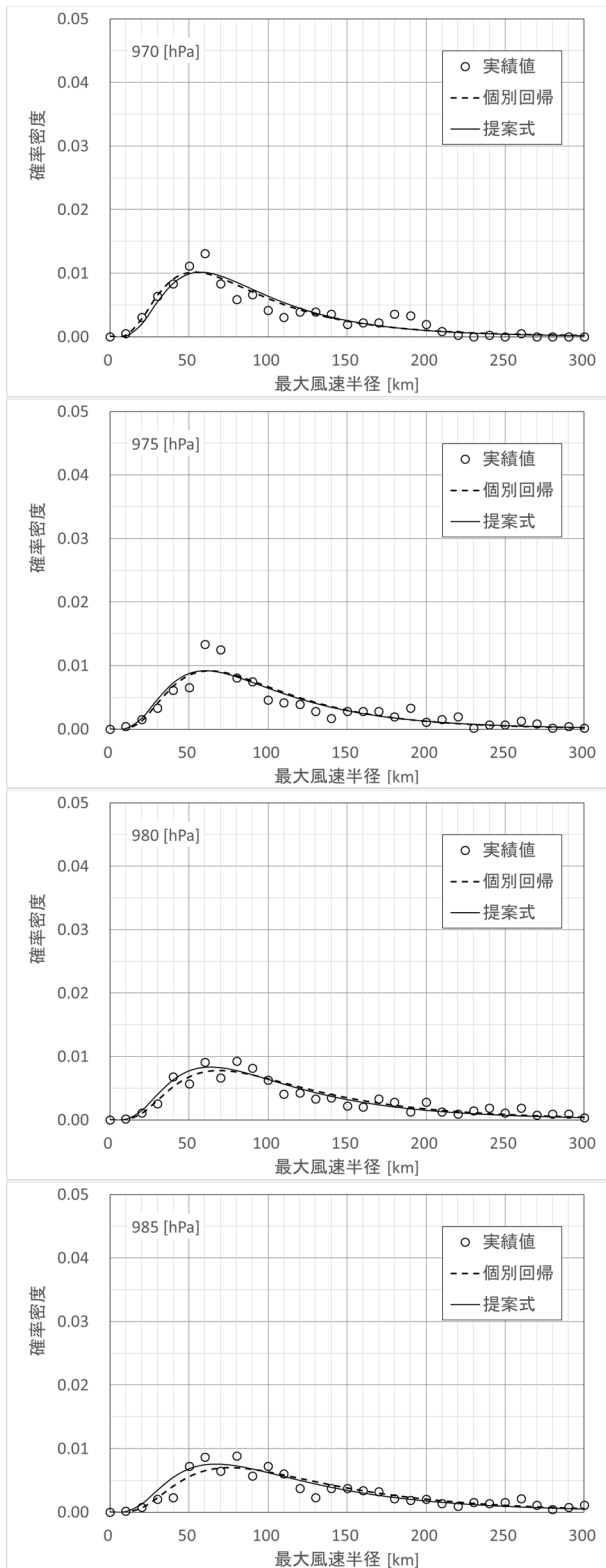


図-A.7 確率密度（発達期）
（その4）

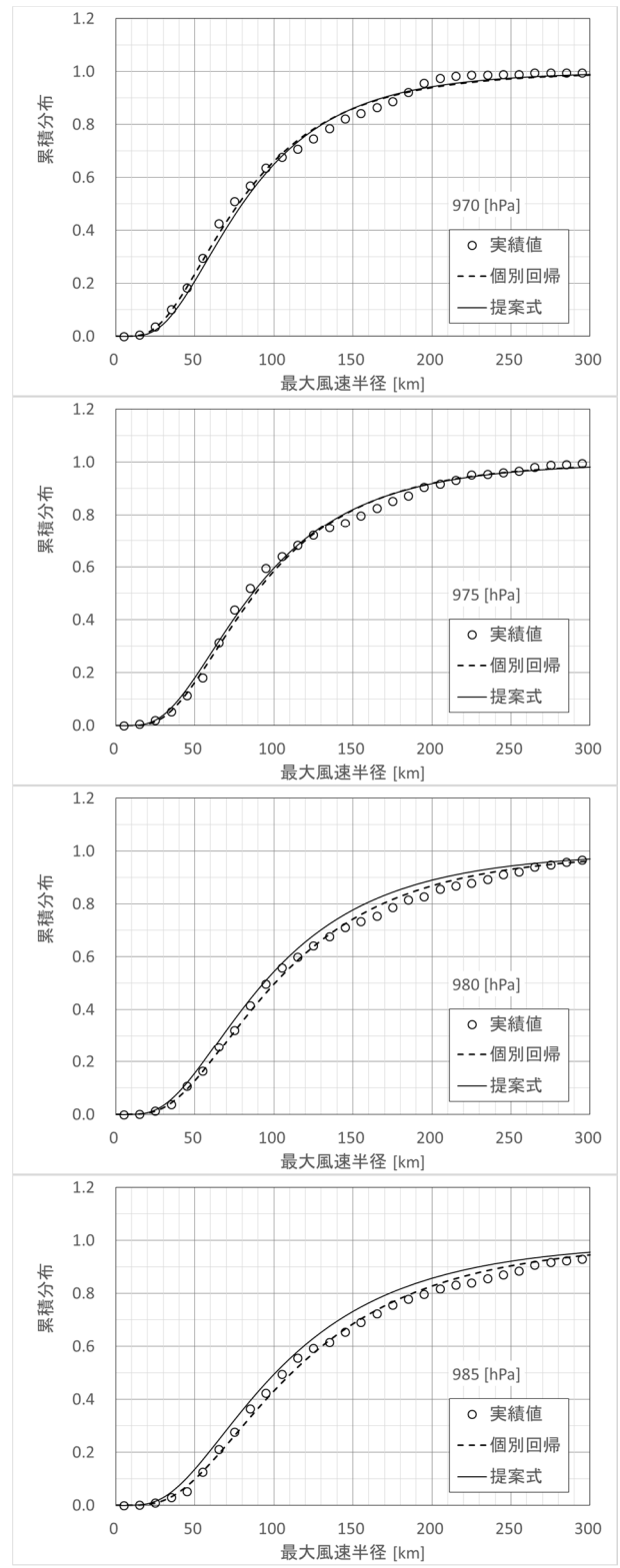


図-A.8 累積分布（発達期）
（その4）

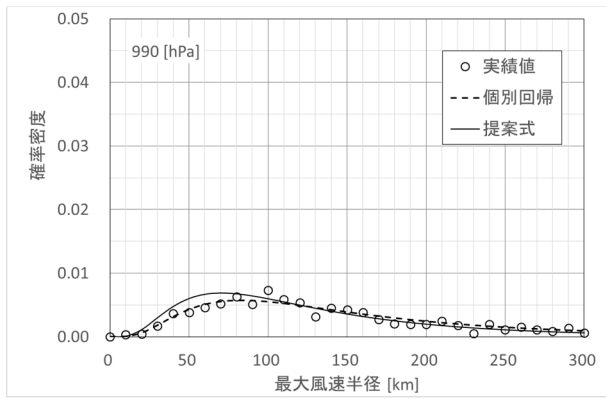


図-A.9 確率密度（発達期）
（その5）

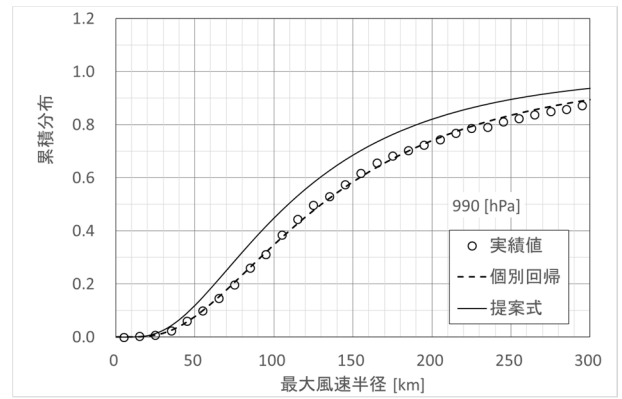


図-A.10 累積分布（発達期）
（その5）

付録B 確率評価式と実績値との比較（減衰期）

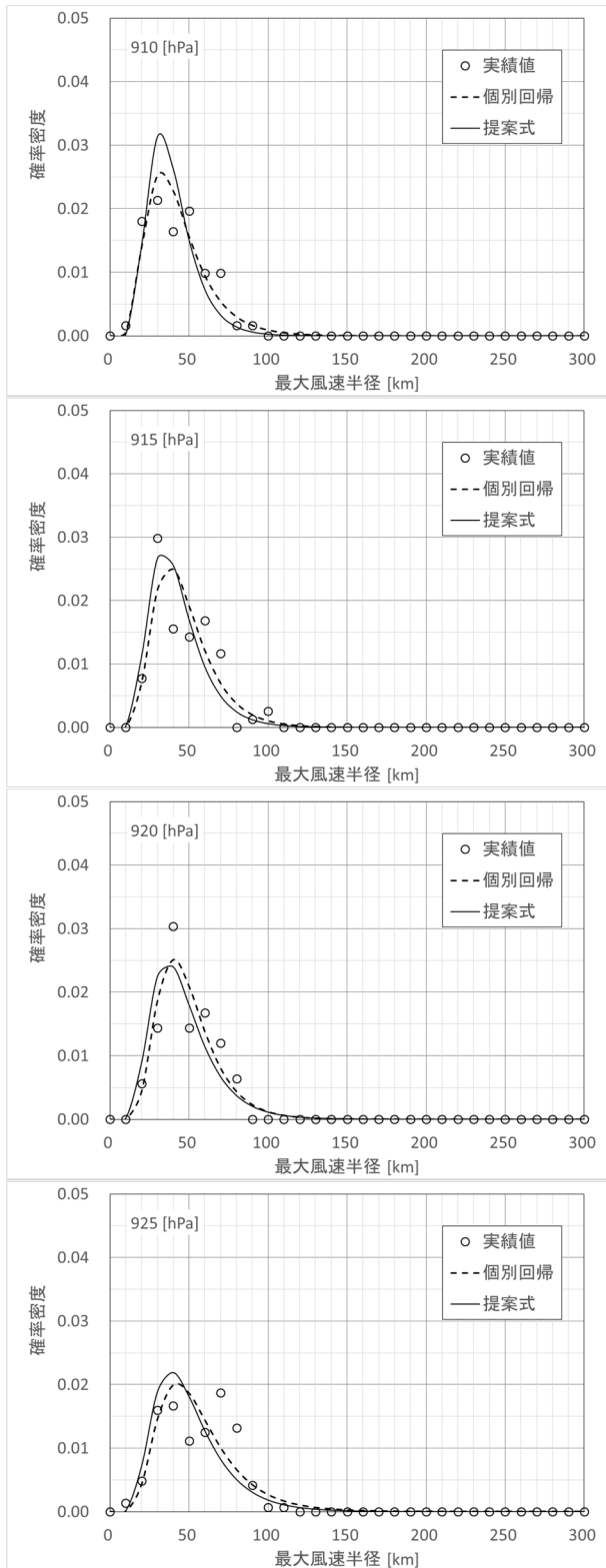


図-B.1 確率密度（減衰期）
（その1）

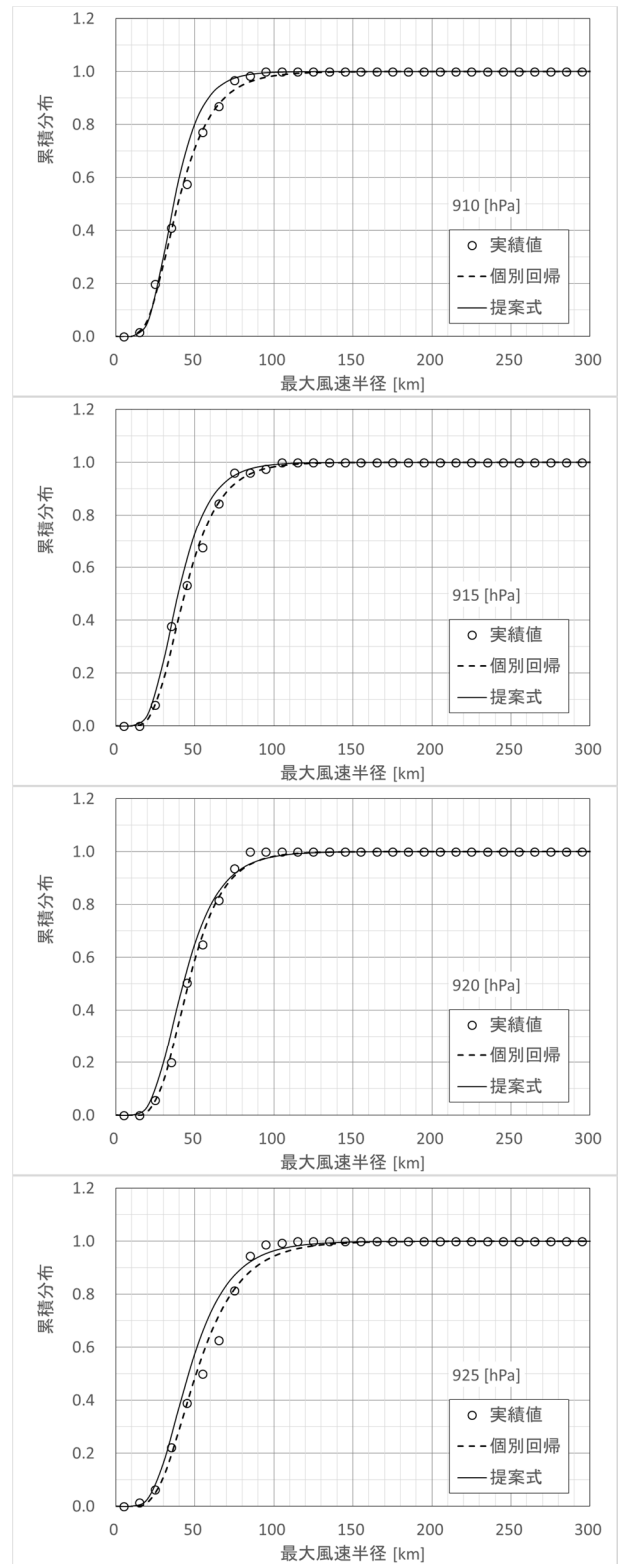


図-B.2 累積分布（減衰期）
（その1）

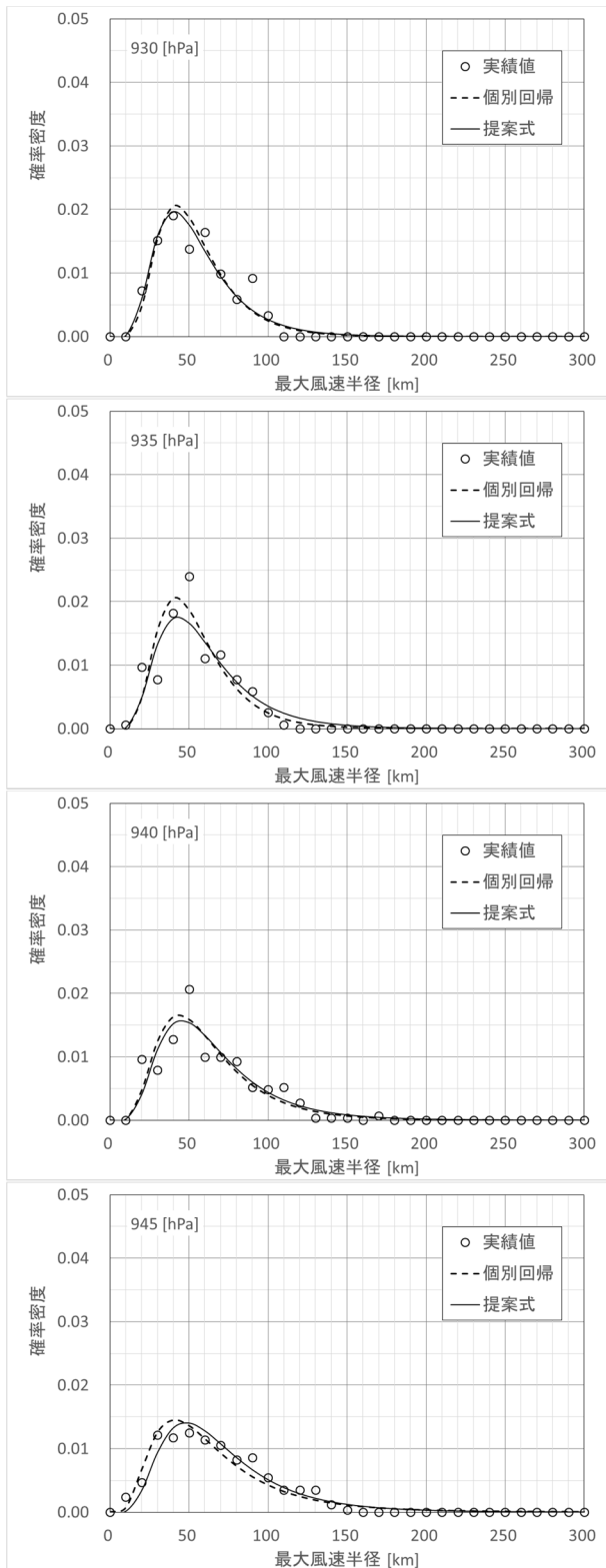


図-B.3 確率密度 (減衰期)
(その2)

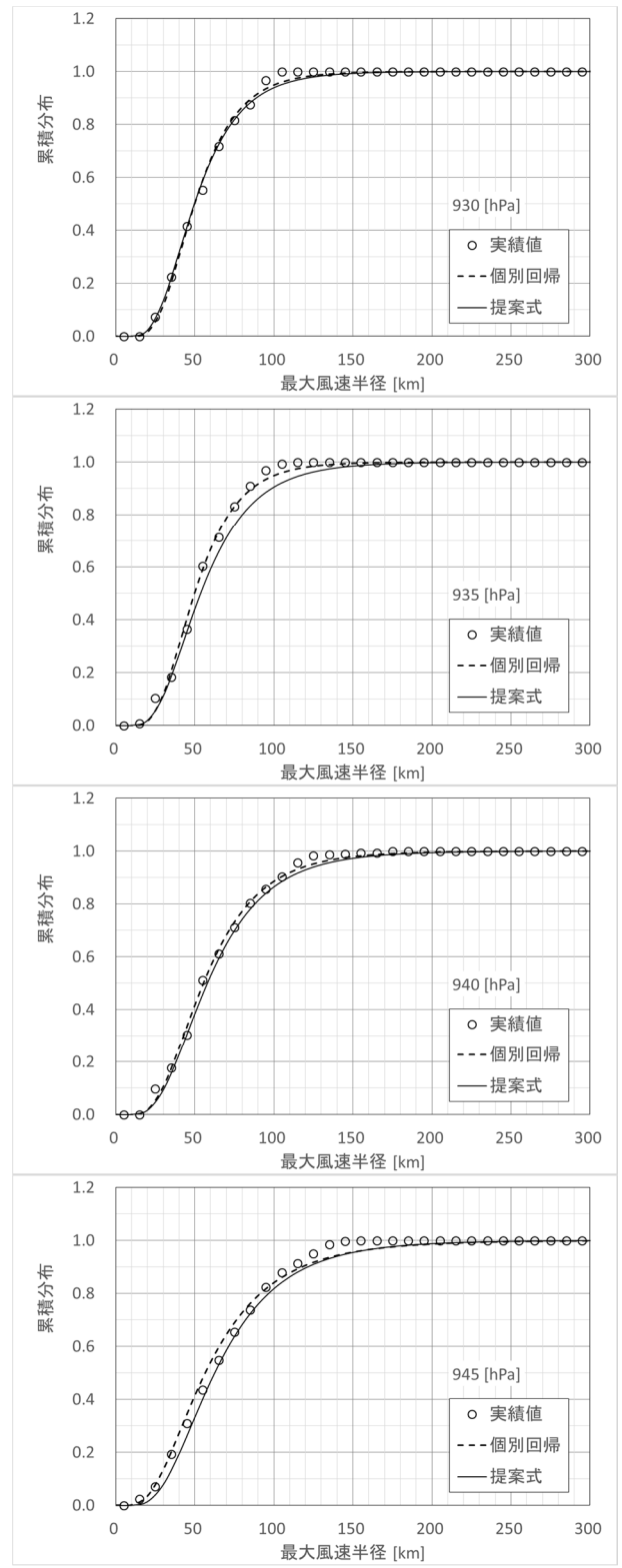


図-B.4 累積分布 (減衰期)
(その2)

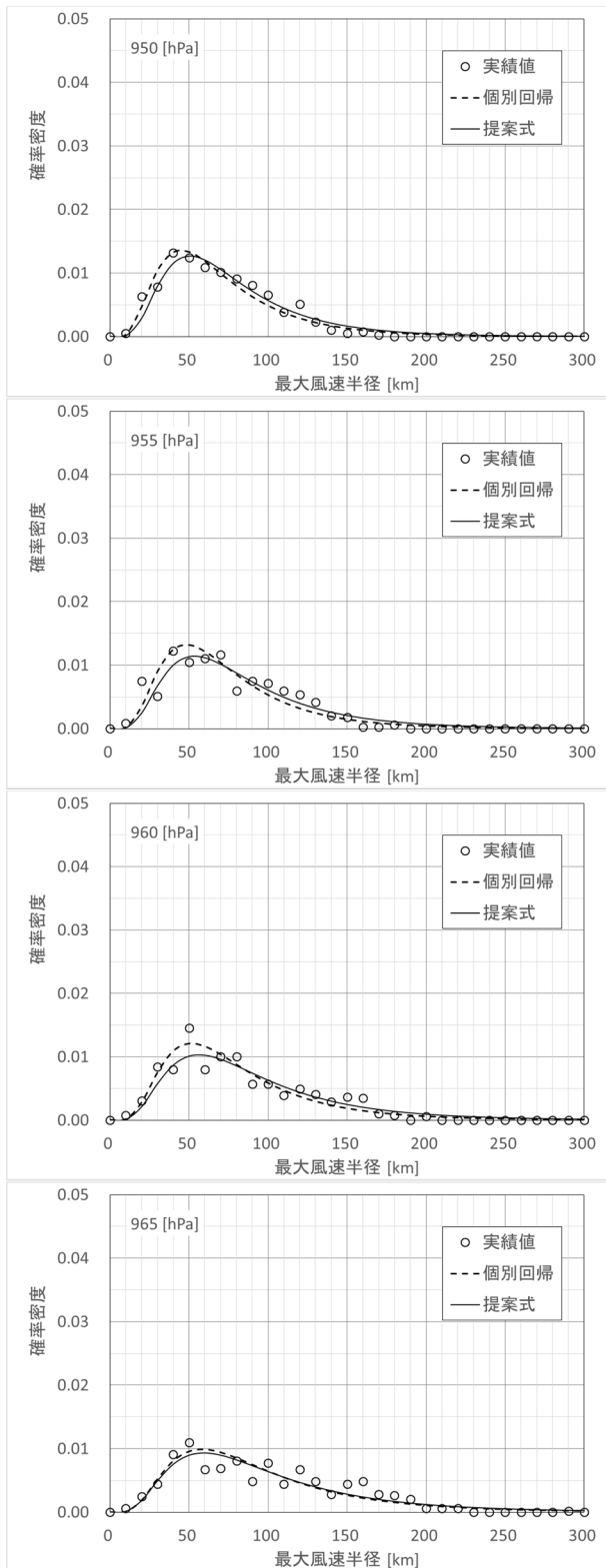


図-B.5 確率密度 (減衰期)
(その3)

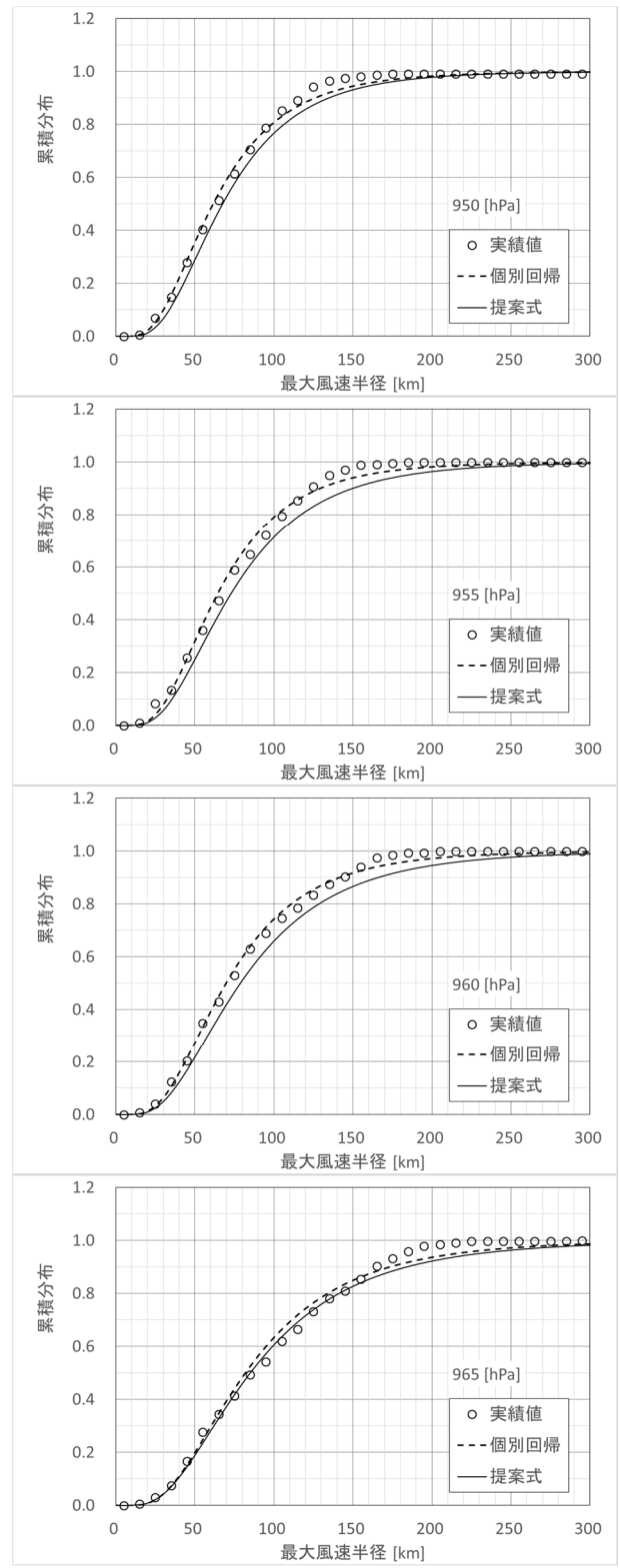


図-B.6 累積分布 (減衰期)
(その3)

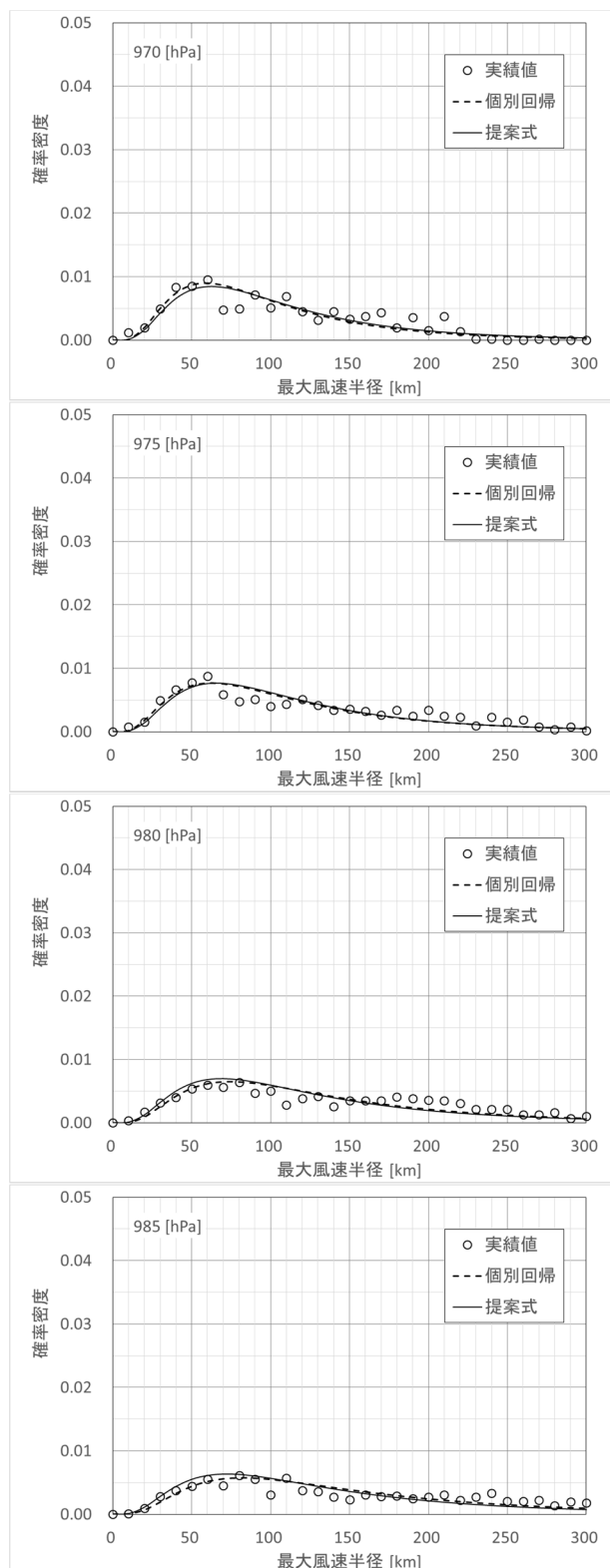


図-B.7 確率密度 (減衰期)
(その4)

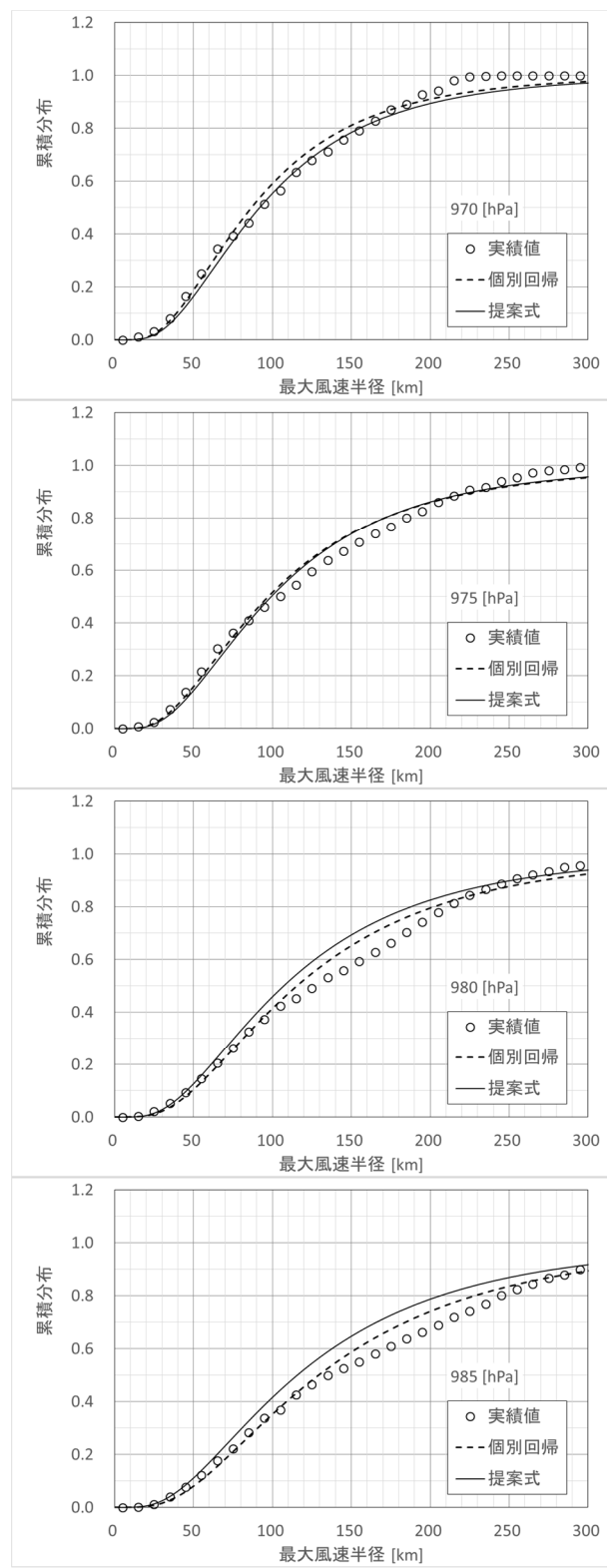


図-B.8 累積分布 (減衰期)
(その4)

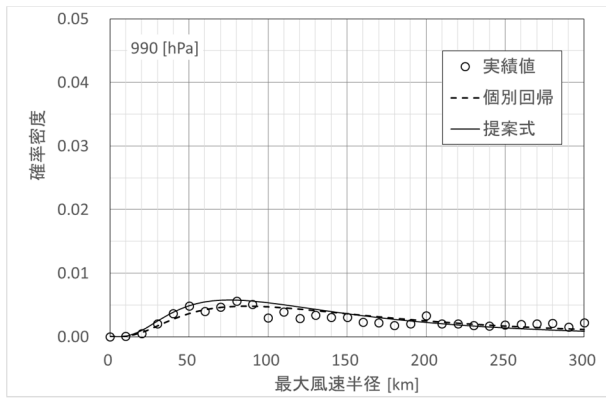


図-B.9 確率密度（減衰期）
（その5）

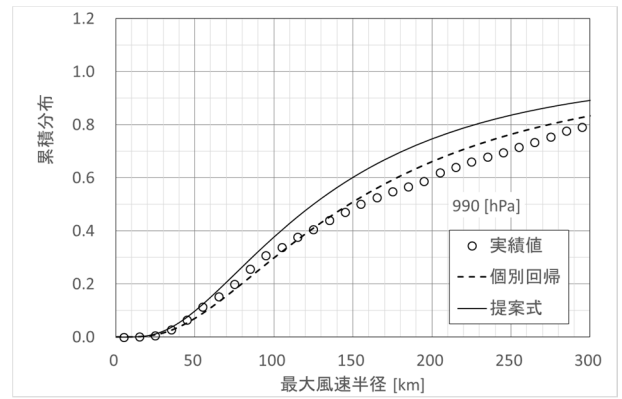


図-B.10 累積分布（減衰期）
（その5）

付録C 確率評価式と実績値との比較(全ステージ)

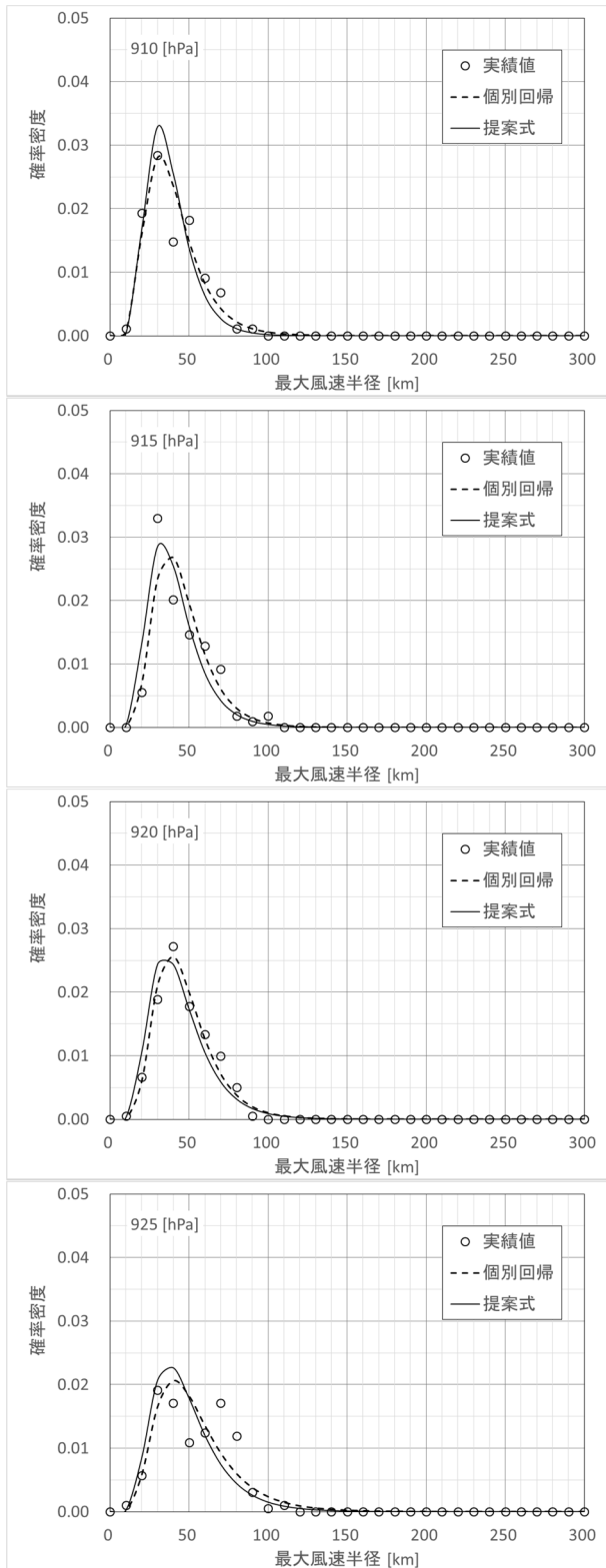


図-C.1 確率密度 (全ステージ)
(その1)

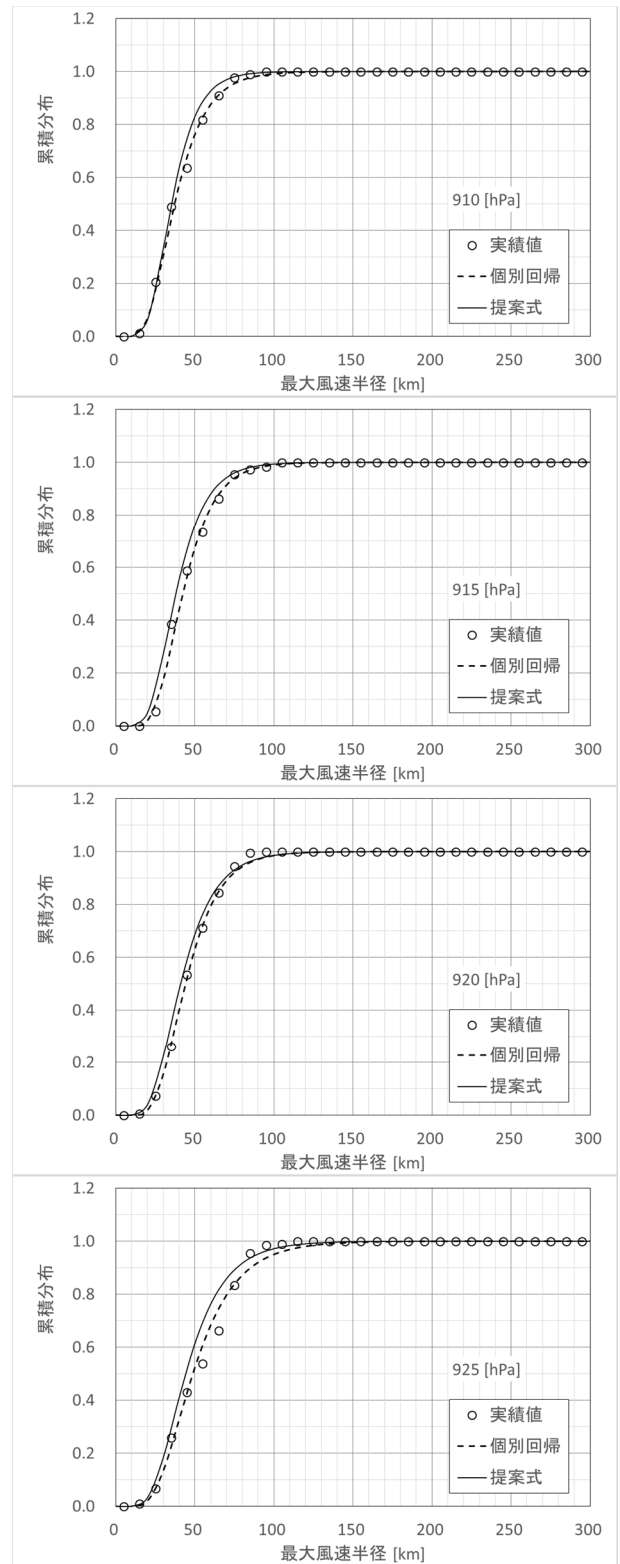


図-C.2 累積分布 (全ステージ)
(その1)

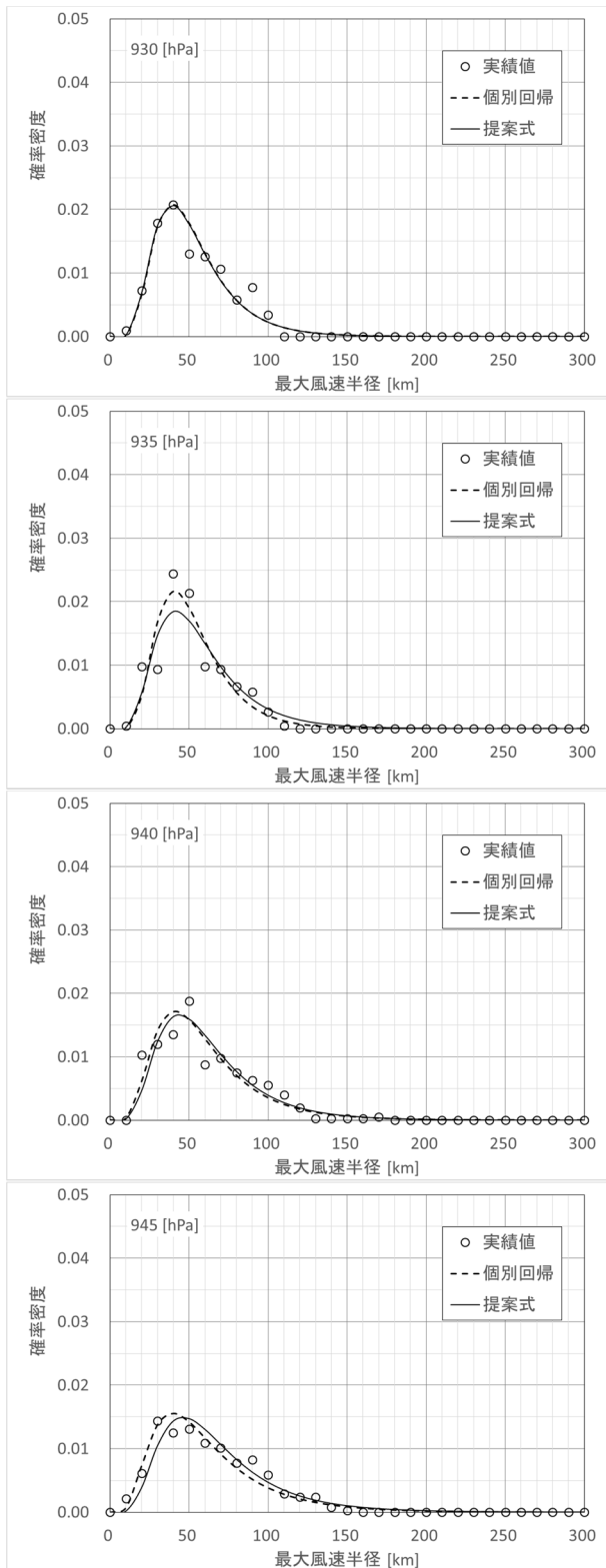


図-C.3 確率密度 (全ステージ)
(その2)

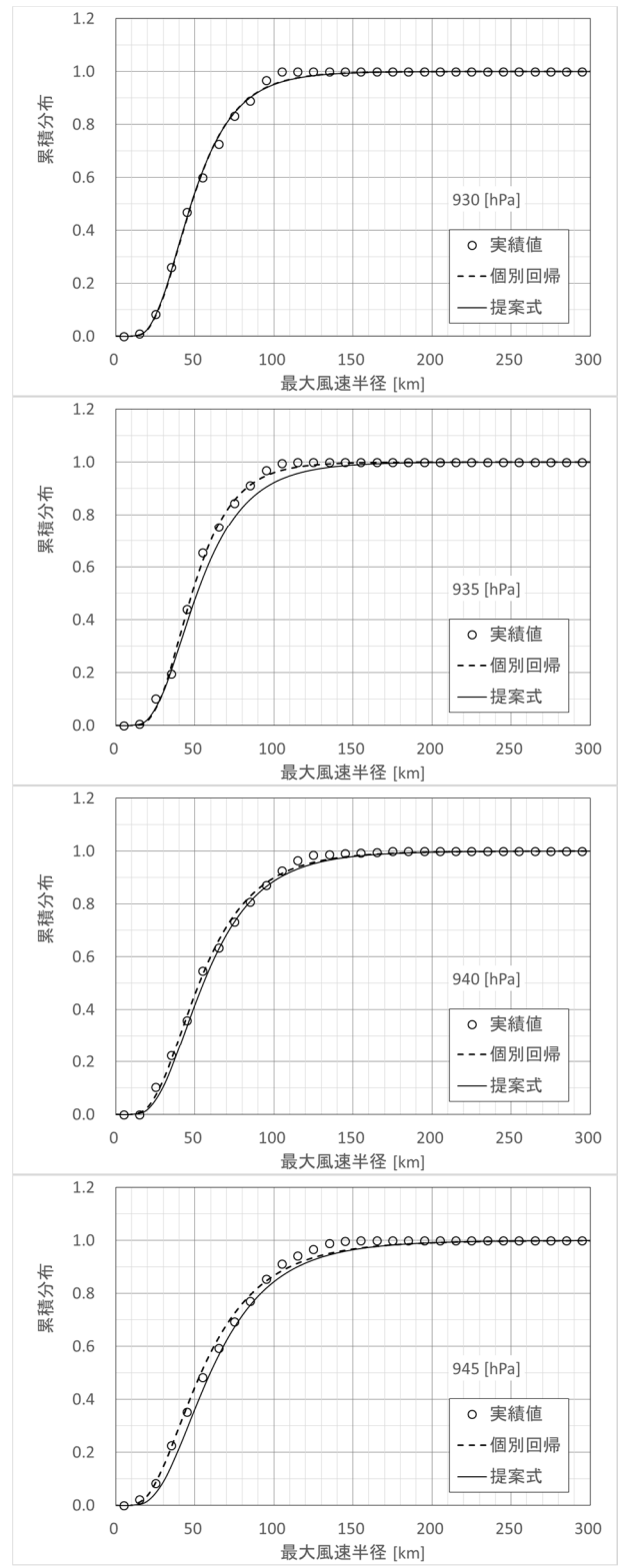


図-C.4 累積分布 (全ステージ)
(その2)

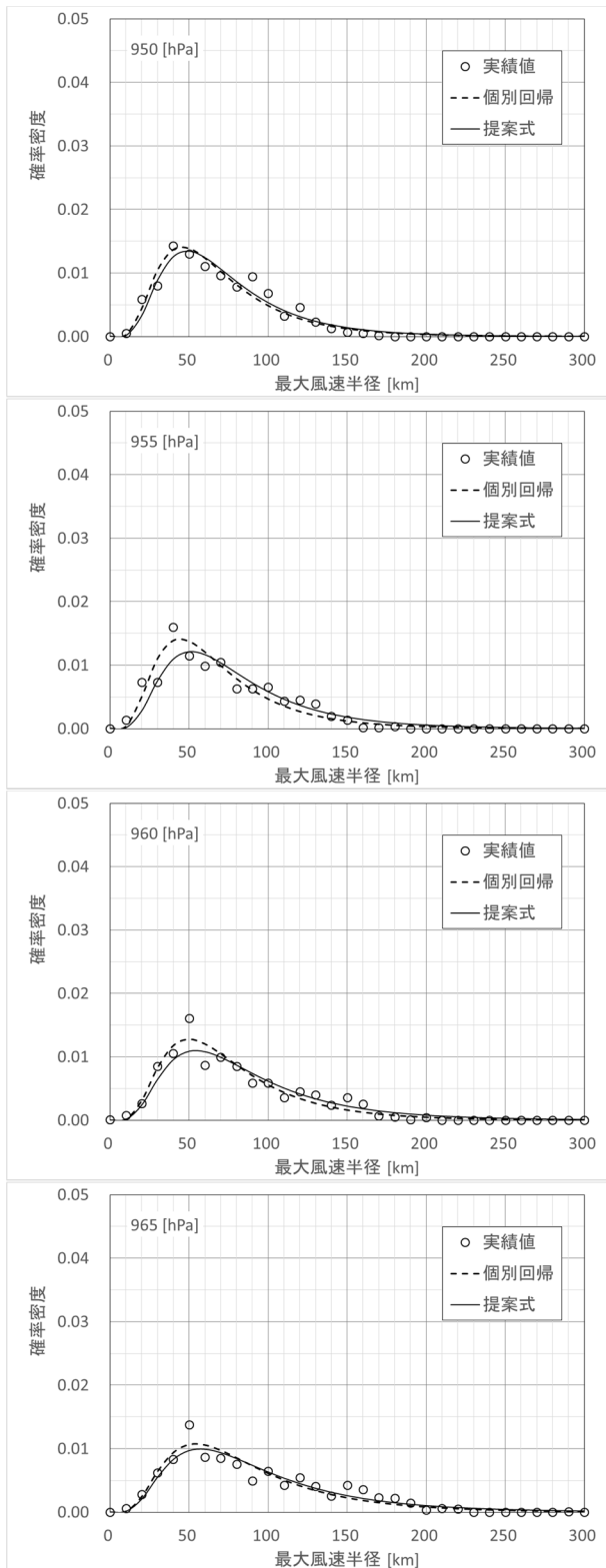


図-C.5 確率密度 (全ステージ)
(その3)

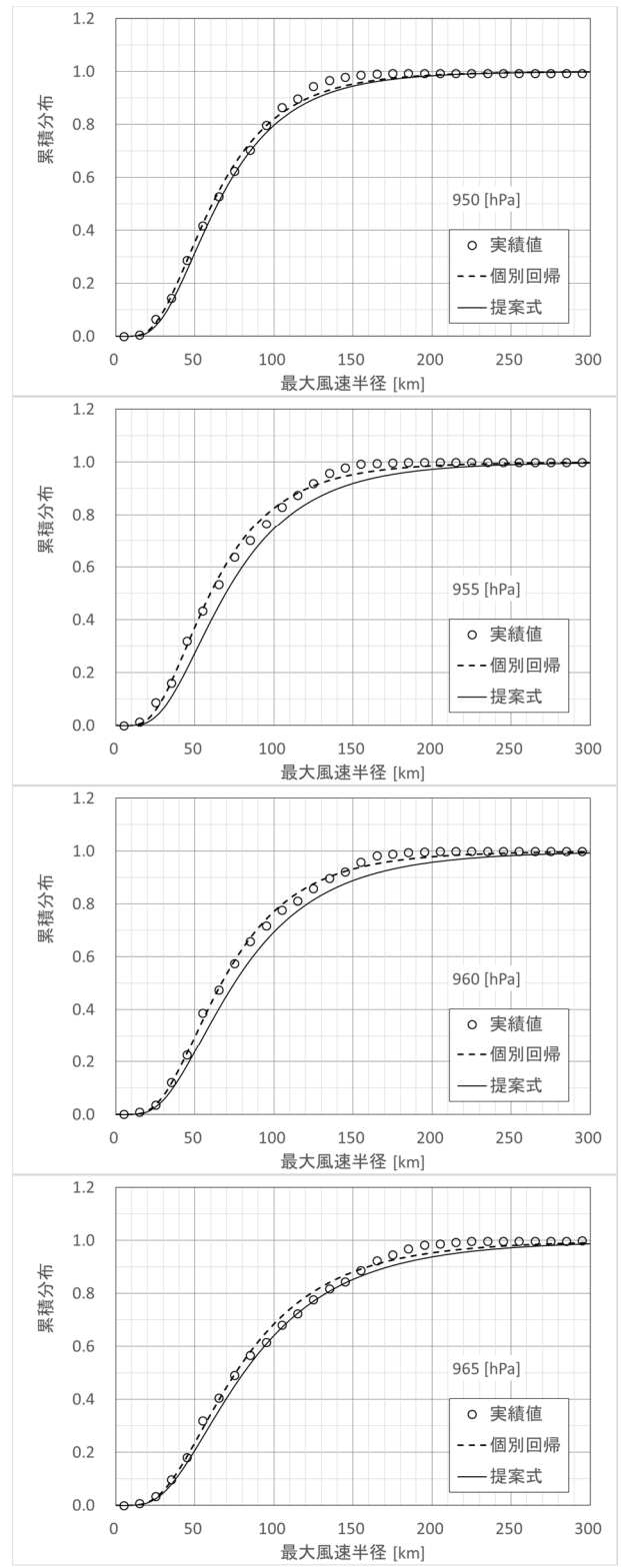


図-C.6 累積分布 (全ステージ)
(その3)

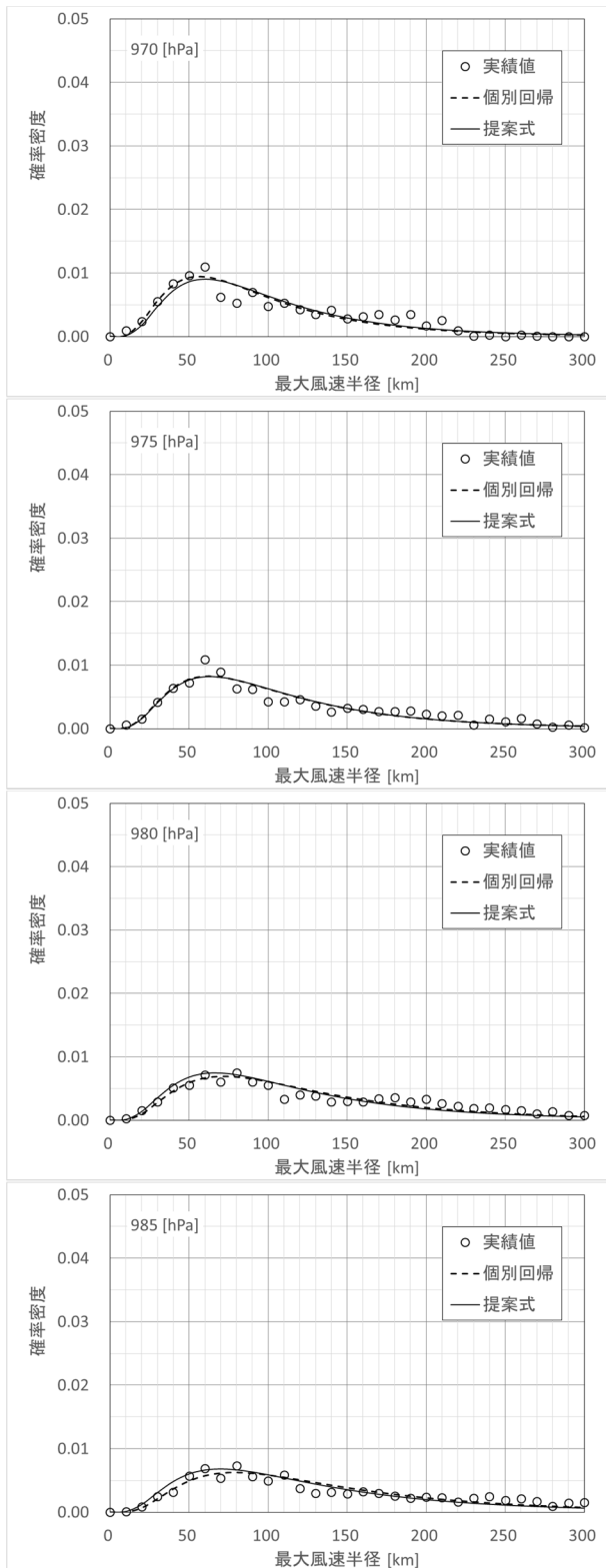


図-C.7 確率密度 (全ステージ)
(その4)

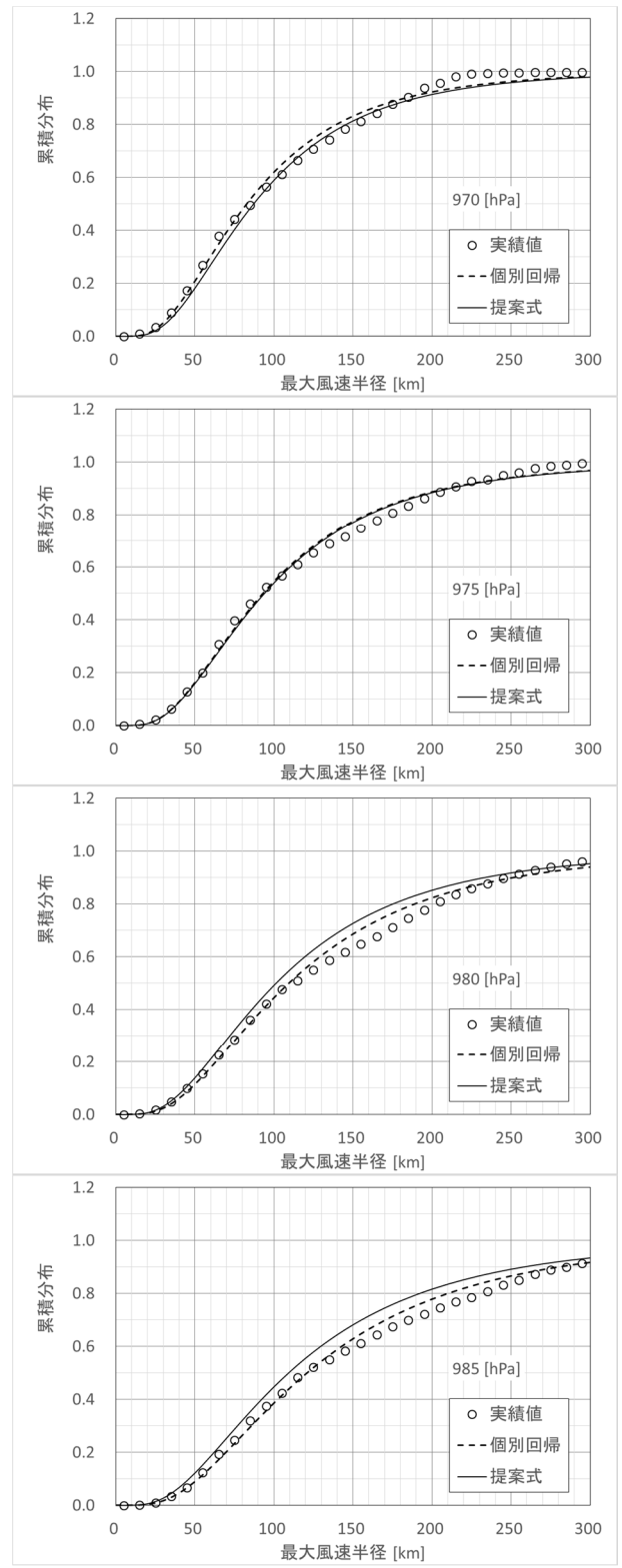


図-C.8 累積分布 (全ステージ)
(その4)

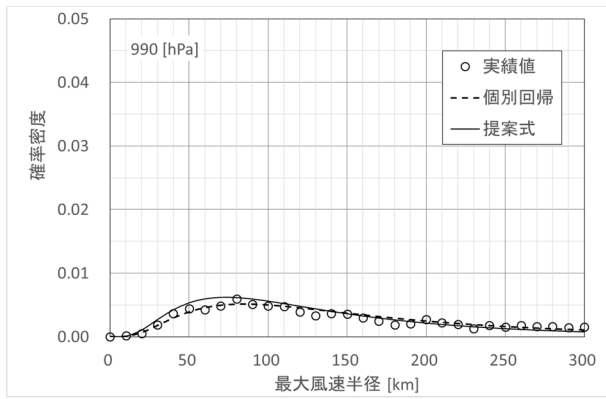


図-C.9 確率密度（全ステージ）
（その5）

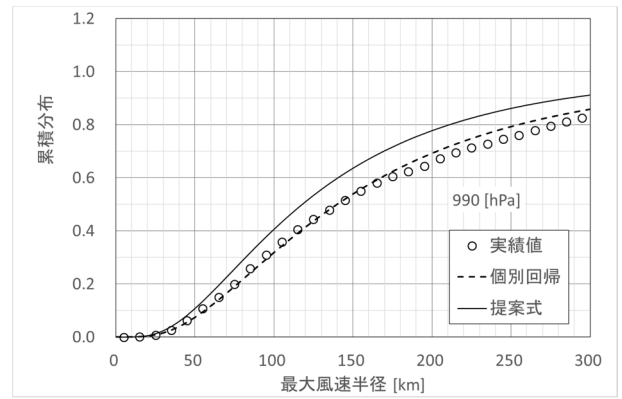


図-C.10 累積分布（全ステージ）
（その5）

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1040

July 2018

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019
E-mail:ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp