

局地風を考慮した強風箇所抽出方法

福原 隆彰* 荒木 啓司* 谷本 早紀*

Method to Pinpoint Locations along Railway That Are Subject to
Strong Winds with Due Consideration on Local Winds

Takaaki FUKUHARA Keiji ARAKI Saki TANIMOTO

In order to pinpoint locations along railway that are subject to strong local winds, which occur under specific topographical and/or climate conditions, we have studied on development of a method to extract strong wind areas in consideration of local winds based on the method that we developed in our previous study. Although meteorological model and computational fluid dynamics model were used in numerical simulations in the previous method, it has become possible to extract strong local wind areas more exactly by using a meteorological model with high resolution in numerical simulation.

キーワード：局地風，強風箇所，数値シミュレーション，地形因子解析

1. はじめに

強風による列車脱線転覆事故を未然に防ぐために、鉄道沿線に規制用風速計が設置されている。これらの風速計であらかじめ定められた閾値を超える強風が検知された場合に、その風速計が監視している規制区間で運転抑止や速度規制などの運転規制が行われる。この区間内で列車の転覆限界風速を超える風速の出現頻度が最も高い箇所（強風箇所）に風速計を設置すれば、規制区間で強風に対する安全性が向上することが見込まれる。筆者らは鉄道沿線の強風箇所の抽出方法の開発に向けた研究開発を行っている。これまでに、広範囲で強風となる気象現象のときにより強い風となる箇所を抽出する方法として気象モデルおよび気流モデルを用いた数値シミュレーション手法と地形因子解析を組み合わせた強風箇所抽出方法を開発した¹⁾（以下、この方法を「既往の手法」と表記する）。

この中で、気象モデルでの計算を行う強風日の選定や地形因子解析による日突風率（日最大瞬間風速を日最大風速で除した値）の推定式の作成には、気象官署の長期間にわたる日最大風速（10分間平均風速の日最大値）および日最大瞬間風速（瞬間風速の日最大値）のデータを使用している。気象官署は比較的開けた地形に設置されていることが多いため、その周辺では特定の気象条件や周辺地形の影響を受けて特定の風向で吹くおろし風やだし風といった強風（局地風）が吹くことはまれである。そのため、既往の手法で強風箇所を抽出する際には、強

風日として台風時や冬の低気圧が発達した日が抽出されることが多くなり、おろし風やだし風などの局地風による強風事例はあまり反映されていない状況にあった。

一方、地域によっては台風など、広い領域で強い風が吹くときだけでなく、局地風が強く吹いた場合に運転規制が発令されることや、局地風のほうが台風などより大きな風速値をもたらすことがあり、実際の最大瞬間風速の再現期待値が既往の手法を用いて算出されるそれよりも大きな値となる可能性がある。また、局地風は特定の気象条件や地形条件の影響を受けることから、既往の手法がそのまま局地風が吹く領域についても適用できるかを改めて検討する必要性が生じた。

本研究では、気象官署ではあまり得ることができない局地風の観測を行い、局地風による強風のデータを得るとともに、得られた局地風について、既往の手法による再現性を確認した。さらに、局地風の再現性を向上させるために既往の手法を改良した。

2. 既往の手法による強風箇所抽出方法の概要

既往の手法による鉄道沿線の強風箇所抽出方法のフローを図1に、また概要を以下に示す。

- (1) 強風箇所の抽出領域を設定する。領域内にある気象官署の風データを数年間収集し、年ごとに気象モデルでの計算を行う強風日を選定する。
- (2) 選定した強風日について、気象モデルを用いて格子（モデルで計算を行う点に相当）間隔を3kmとした計算を行い、この間隔での平均風速の再現期待値を求める。

* 防災技術研究部 気象防災研究室

特集：防災技術

- (3) 3kmの領域ごとに地形を考慮した気流モデルを用いて格子間隔を200mとした計算を行い、これらの結果と(2)で得られる3km間隔の平均風速の再現期待値から、200m間隔の平均風速の再現期待値を算出する。
- (4) 平均風速から最大瞬間風速への変換を行うため、地形因子解析より得られた推定式から日突風率を求め、最大瞬間風速の再現期待値を求める。
- (5) (4)で求めた値と線路構造物別の転覆限界風速を比較し、強風に対する警戒箇所を求める。

この中で(5)の線路構造物別の転覆限界風速は線区を走行する車両諸元、走行速度に依存し、自然風の状況には左右されない値である。このため、本稿では上記の(2)～(4)についての検討を行った結果を述べる。

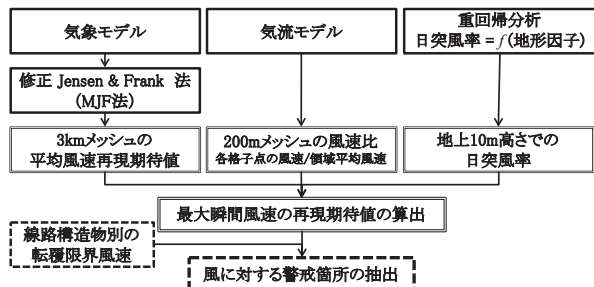


図1 既往の手法による鉄道沿線の強風箇所抽出フロー¹⁾

3. 検討対象とした局地風

局地風は10km程度のオーダーで空間的な広がりをもちた特定の地域、地方で特定の気象条件下で発生し、強風をもたらすものである。成因は主に2種類あり、水平方向や高さ方向の温度分布によるもの、山脈や谷地形によるものがある。局地風は北海道から九州までに見られており、それぞれの地方で固有の名前が付けられているものが多い。

その中で本検討においては愛媛県東部の四国中央市周辺で3月～6月にかけて南よりの強風となる「やまじ風」を対象とした。やまじ風は山形県の「清川だし」、岡山県の「広戸風」とともに、三大悪風ともいわれることがあり、しばしば大きな被害をもたらしている。例えば、2007年5月に発生したやまじ風では、東予地方(愛媛県東部)を中心に強風が吹き、人的被害とともに、農作物に多大な被害が発生した²⁾。このとき以外にも、交通網への影響があり、鉄道の安全・安定輸送に対して度々支障が発生する風となっている。

4. 局地風の現地観測

4.1 風観測の概要

現地での風観測は、四国中央市のJR予讃線沿線で行った。やまじ風が吹くと予想される箇所を含む5箇所に向風速計を設置し、風観測網を構築した。各観測点においてサンプリング周波数1Hzで風向風速(一部の観測点は風速のみ)を2010年11月～2012年11月までの2年間収録した。分解能は風速を0.1m/s、風向は1度とした。設置した風観測点を図2に示す。

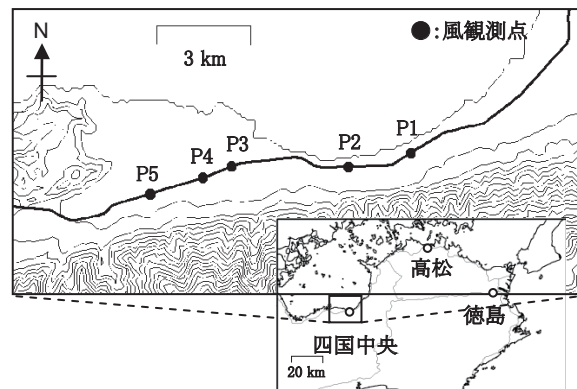


図2 配置した風観測点

4.2 局地風の抽出

今回対象としたやまじ風は、既往の研究³⁾⁴⁾において「南寄りの風となる、風速の増加がある、フェーンを伴うため温度の上昇が生じる」などと定性的には定義されているが、風速値や温度上昇について具体的な数値での定義はされていない。そのため、既往の研究による定義ではやまじ風と判定される場合でも、風速値自体はそれほど大きくない場合がある。本検討では鉄道において強風による運転規制や警戒を要する事例や強風災害が発生するような事例を対象とするため、やまじ風の発生条件を「観測網のいずれかの観測点で、①：3～11月の期間中に、②：南東～南西の風向が継続して発生し、③：条件②が発生している時間帯での10分間最大瞬間風速が20m/s以上かつ10分間平均風速が10m/s以上となった場合」とした。

この条件により抽出したやまじ風の発生日は合計16日であった。観測された風向風速の傾向からは大きく分けて2つのパターンがあることが確認された。

- (1) 全ての観測点で①～③の条件を満たした事例
 - (2) 一部の観測点では①～③の条件を満たしたものの、残りの観測点はこれらの条件を満たしていなかった事例
- このうち、(2)のパターンで、P2～P4の観測点が①～③の条件を満たした観測事例について観測網の東側(P2)および西側の観測点(P5)における10分間最大瞬間風速と10分間平均風向の時系列(24時間分)を図3に示す。図3にはやまじ風の特徴が現れた時間帯を実線の四角で合わせて示す。

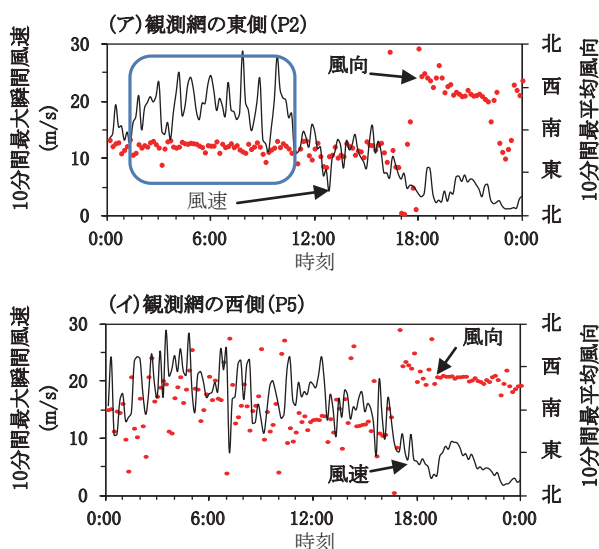


図3 局地風発生時の風向風速の時系列の例

5. 既往の手法における強風箇所の抽出（数値シミュレーション）

現地観測で得られた局地風の事例をもとに、既往の手法を適用したときの強風箇所抽出結果を示す。

5.1 気象モデルによる平均風速値の算出

5.1.1 計算の概要

本検討では、気象モデルに WRF (The Weather Research and Forecasting Model, アメリカ大気研究センターなどの複数の機関が開発) を用いた。このモデルは気象の研究分野や日々の天気予報に幅広く用いられており、ユーザー側で初期条件（計算開始時に入力する条件）などのパラメータを自由に設定できることが特徴である。計算における初期条件、境界条件にはアメリカの環境予測センター (NCEP: National Centers for Environmental Prediction) の客観解析データ (NCEP-fnl) を用いた。このデータは風、気温、気圧などのデータが緯度、経度方向に1度（約110km）間隔で整備されている。また、標高データおよび土地利用データはモデルにデフォルトで収録されているデータを用いた。格子（モデルで計算を行う点に相当）間隔を既往の方法と同じ3kmとする場合、初期条件、境界条件のデータの解像度より一度に計算することができないため、格子間隔を27km, 9km, 3kmと次第に小さくして計算を順次行った。

計算の対象は観測期間内におけるやまじ風の発生日とした。既往の手法では気象モデルでの計算は3km格子間隔の領域で前日の21時から当日の24時までの27時間とした。しかしながら、今回の観測では局地風が日をまたいで発生したケースが数例あったため、計算時間は上記の27時間とはせずに、やまじ風が発生した時間帯を含む42～48時間の範囲で設定した。

5.1.2 計算の結果

対象としたやまじ風事例の計算結果では、観測点に近い格子点における地上付近の水平風速と風向はやまじ風の条件である南風の強風を概ね示していることが確認された。そこで、現地風観測と同様、やまじ風の特徴をもつ南風の強風が得られた領域を抽出することとした。ここでは、南よりの風が継続して発生し、かつ、風速の最大値が20m/s以上のときを抽出条件とした。

4.2節で示した(2)のパターンとなった事例の1つを対象として、この条件でやまじ風の発生領域を抽出した結果を図4に例示する。この図より、観測網周辺で南風の強風が継続して吹いていることがわかる。

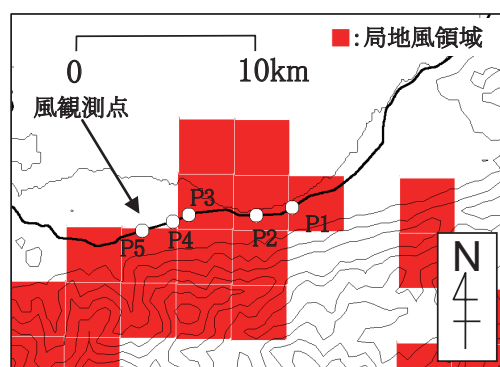


図4 局地風領域の抽出結果の例
(格子間隔3km, 実線：線路)

5.2 気流モデルを用いた風速分布解析

5.2.1 計算の概要

気流モデルでの計算は、既往の手法で使用したものと同一モデル（九州大学応用力学研究所が開発したRIAM-COMPACTの中立成層版⁵⁾）を用いた。計算を行った領域（以下、計算領域）は24km四方に設定し、境界などの影響を取り除くため、計算領域の中央部のみを解析に用いた。解析に用いた領域（以下、解析領域）は3km四方、解析領域における格子点間隔は200mとした。

5.2.2 計算の結果

気流モデルに風観測網周辺の領域におけるやまじ風のときの主な風向である南風を流した時の、解析領域内の各格子点における地上10mの平均風速と3km四方の各解析領域内全ての格子点における地上10mの平均風速の平均値との比を示したものを図5に示す。この図より、楕円で示した観測点P2, P3付近、ならびにP4の西側において、解析領域で平均した風速（気象モデルで計算される風速と対応）に対する比が大きくなる傾向が現れた。

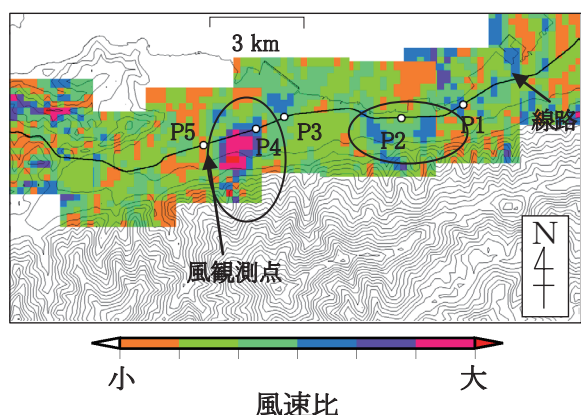


図5 気流モデルによる風速比^{*}の計算結果
(※各格子点での風速 / 各青枠領域の平均風速)

5.3 局地風領域の抽出結果および考察

気象モデルおよび気流モデルを用いて求めた地上高さ10mでの平均風速をもとに、局地風が吹いたと推測される領域を求めた結果を図6に示す。この事例において現地風観測によるやまじ風の条件である4.2節の②、③の両方を満たしていた観測点を白丸に、それ以外の観測点を黒丸で図中にあわせて示す。図6よりやまじ風と判定された領域とそうでない領域とが細かく混在している結果となった。

これは、気流モデルで求められた風速比によるものと推測される。既往の手法では、気流モデルで気流を8方位（北、北東、…、北西）で流したときの風速比を求め、気象モデルの計算で得られた風向を上記の8方位に置き換えてそれぞれの風速比を乗じている。このため、気象モデルの計算で得られた風向と気流モデルで流す風向にずれが生じる場合がある。200m程度と細かな格子点間隔にした場合、細かく再現された尾根や沢の走向方向と風の流れの方向に違いが生じ、それを受けて200m程度の格子間隔で計算された風速値に違いが生じ、結果として図6に示したように強風領域の中に風が弱い地域が点在する結果となったものと考えられる。

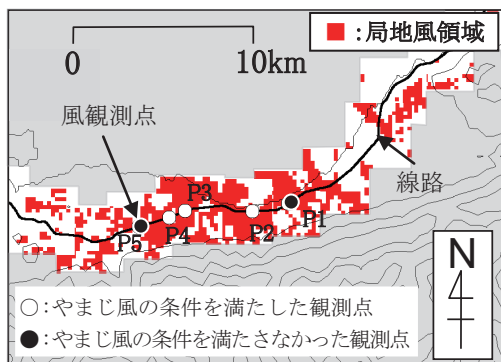


図6 既往の手法による局地風領域の抽出例
(図4の事例における結果)

6. 局地風を考慮した強風箇所抽出方法への改良

5章で述べたように、既往の手法を用いた局地風の再現結果では局地風の領域とそうでない領域が細かく混在しており、現実的ではない結果となった。今回対象としたやまじ風が吹く領域には風上側に複雑な地形が分布していることや、既往の手法の開発時期よりも計算機技術が進歩していることから、数値シミュレーションモデルの格子間隔を既往の手法のそれよりもさらに細かくして再現計算を行い、精度向上を図った。検討は①気流モデルの格子間隔をさらに細かくしたケース、②気象モデルのみを用いて既往の手法での気流モデルの格子間隔に近い間隔としたケースの2種類について行った。

6.1 気流モデルの格子間隔を細かくしたケース

気流モデルの格子間隔を細かくしたケースについては、5.2節で示した気流モデルの解析領域での格子点間隔をより細かい50mとして計算を行った。なお、モデルの仕様により計算領域を12km四方と狭くするとともに、解析領域は観測網の周辺のみとした。風観測網周辺の領域において、やまじ風のときの主な風向である南風を流した時の、解析領域内の各格子点での地上10mでの平均風速と3km四方の各解析領域内全ての格子点での地上10mの平均風速の平均値との比を示したものを図7に示す。この結果を用いて、5.3節と同様に局地風が吹いたと推測される領域を抽出した結果を図8に示す。図8には局地風の現地観測においてやまじ風の条件である4.2節の②、③の両方を満たしていた観測点を白丸に、それ以外の観測点を黒丸であわせて示す。なお、この図は既往の手法で求めた局地風の領域を示した図6に対応する。

このケースでは観測点P4付近は局地風が強い領域とは判定されなかった。これは、P4を含む解析領域ではP4より東の領域の風速値が大きく、気象モデルと気流モデルを組み合わせたときにP4の風速値が相対的に小さくなったため（図7）と推測される。

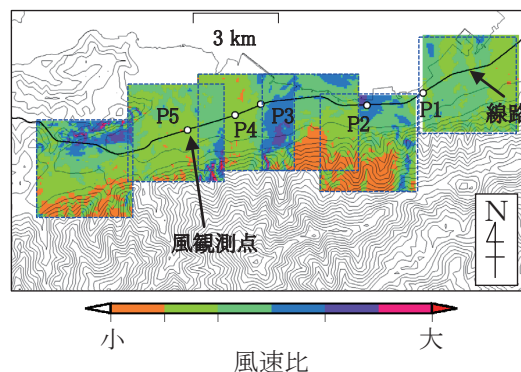


図7 格子間隔を50mとした気流モデルによる風速比^{*}の計算結果
(※各格子点での風速 / 各青枠領域の平均風速)

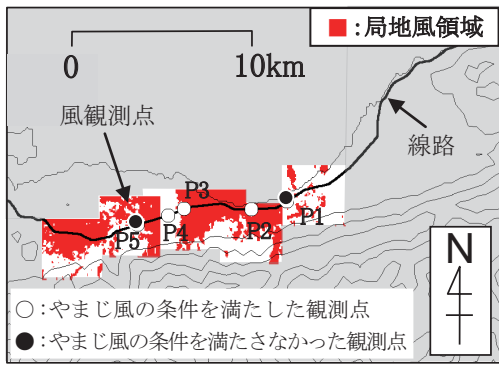


図8 気流モデルの格子間隔を細かくしたケースでの局地風領域の抽出例

6.2 気象モデルのみを用いて格子間隔を細かくしたケース

本検討では、既往の手法における気流モデルの格子間隔とは異なるが、格子間隔を250mとして気象モデルによる計算手法の適用性を検討した。

やまじ風発生事例について、既往の手法である格子間隔を3kmとしたときと同様、やまじ風が発生する時間帯を含む42～48時間分の計算を行った。なお、初期条件、境界条件のデータには先に述べたデータに加え、より空間分解能が高いデータである気象庁GSM（日本域）客観解析データ（20km間隔）、標高データには国土地理院の50mメッシュ標高データ、土地利用については国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ（100m間隔）をあわせて使用した。この計算結果を図9に示す。

この図より、気象モデルの格子間隔を細かくしたケースについては局地風と判断された領域は観測結果と比較すると広いものの、局地風の領域が面的に得られていることがわかる。これらの図6、図8、図9より、局地風のような地形の影響を受けやすい領域において、細かな空間間隔で風速値を求めようとする場合、気象モデルのみでの計算を行うほうがより現実的な値が求められると考えられる。ただし、気象モデルでは風速のみならず、雲、雨、雪、温度なども同時に計算される上に、細かな空間間隔とした場合には時間間隔も細かく設定する必要がある、その分計算に要する時間が長くなる。

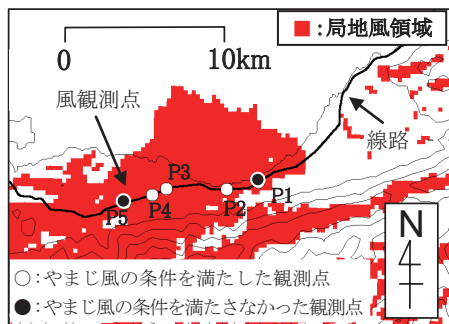


図9 気象モデルのみを用いて格子間隔を細かくしたケースでの局地風領域の抽出例

7. 日突風率の推定式の適合性の検討

既往の手法では、気象モデルおよび気流モデルより得られた平均風速から最大瞬間風速への変換を行うために、地形因子解析を用いて日突風率の推定式を求め、その式により各地点での日突風率を算出している。冒頭に述べたように、この推定式の算出に使用した風データは気象官署のものであり、主に広い範囲で吹く強風事例をもとにしている。そこで、日突風率の推定式が局地風が吹く場合にも適合するかを検討した。その結果を以下に示す。

7.1 推定式による日突風率の推定値

既往の手法での方位 θ における日突風率 $G_{day}(\theta)$ の推定式を以下に再掲する。なお、日突風率とは日最大瞬間風速（瞬間風速の日最大値）を日最大風速（10分間平均風速の日最大値）で割った値である。

$$G_{day}(\theta) = 0.44 \cdot \frac{1}{\ln(z/z_0) - 0.009 \cdot z} - 0.68 \cdot OP(ALL, 200, 10) + 0.27 \cdot Gr(\theta, 3) + 2.34 \quad (1)$$

ここで、 z_0 は方位 θ での算出領域で平均した粗度長（平面の空気力学的な抵抗を表す指標）、 z は風速計が設置されている高さ、 $OP(ALL, 200, 10)$ は開放度、 $Gr(\theta, 3)$ は陸度である。式にある粗度長 z_0 は国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ（100m間隔、平成18年度版）をもとに求めた。また、陸度と開放度の算出は国土地理院の50mメッシュ数値標高データを用いた。

この式(1)による観測点P1～P5（図2参照）での南風における日突風率の推定値は2.24～2.31となった。

7.2 観測結果との比較

7.1節で求めた推定式により求めた日突風率と、今回の風観測で得られた値より求めた日突風率の比較を行った。各観測点における、やまじ風発生日の日突風率の平均値（観測値）と推定式による日突風率との関係を図10に示す。図10には既往の手法で同様の検証を行うときに使用した関西地区と九州地区にある気象官署の風データから得られた日突風率をあわせて示した。図より、今回の風観測で得られた局地風領域での日突風率における観測値と推定値のばらつきと、これまでの方法で検証に用いた関西地区および九州地区の気象官署における日突風率の観測値と推定値のばらつきが同程度であることがわかる。従って、やまじ風においても既往の手法で作成した日突風率の推定式が適用できるといえる。

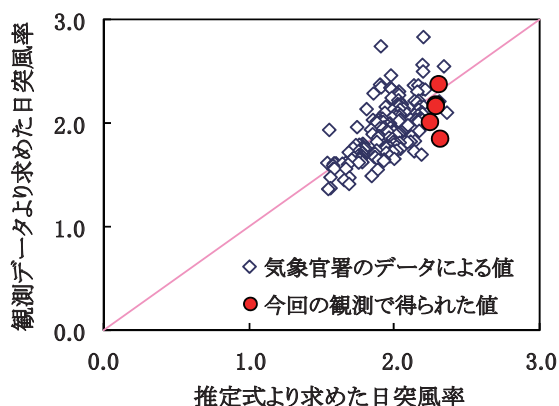


図 10 推定式による日突風率と観測結果より得られた日突風率との比較結果

8. 局地風を考慮した強風箇所抽出方法

本研究では、既往の強風箇所抽出方法で比較的狭い領域で吹く局地風の再現性を確認するとともに再現性の向上および既往の日突風率の推定式の適合性を確認した。その結果をまとめるとともに、改良した手法のフローを図 11 に示す。

- (1) 既往の手法では、狭い領域に吹く局地風による強風箇所の抽出が難しいことがわかった。
- (2) 既往の手法では、気象モデルと気流モデルを組み合わせていたが、気象モデルに詳細地形情報を取り入れて高分解能化することで、気象モデルのみでより細かい水平分解能での再現計算が行えるようになり、局地風の再現性が向上するとともに、強風箇所の抽出における計算過程を簡素化することができた。
- (3) 平均風速から最大瞬間風速への変換をするときに使用する突風率は、既往の研究で求めた推定式による値と局地風領域での観測結果から求められる突風率とで大きな違いはみられなかった。このことから、既往の手法で得られた推定式を局地風の領域にも適用できることがわかった。

これらを踏まえ、局地風を考慮した強風箇所抽出方法を構築した。このフローを図 11 に示す。

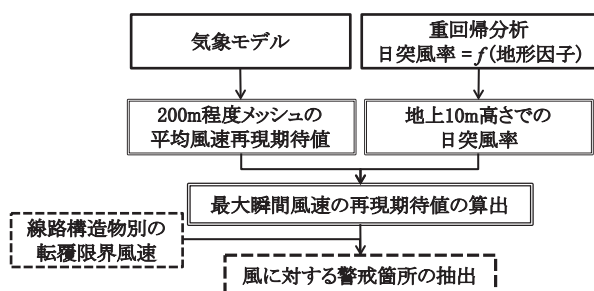


図 11 局地風を考慮した強風箇所抽出フロー

9. おわりに

既往の手法では、局地風による強風箇所の抽出についてはあまり考慮されていなかった。このため、既往の手法について局地風での適合性を確認し、より局地風の再現性のよい手法を構築した。この方法は、計算過程は簡素化できるものの、気象モデルのみを用いて細かい間隔で計算を行うため、計算に要する時間が長くなるデメリットがある。従って、本稿で示した方法と既往の手法を使い分けることで鉄道沿線の強風箇所を効率的に抽出できるものとする。

なお、既往の手法では過去 20 年間の強風事例（計 300 例）を気象モデルで計算して平均風速の再現期待値を求めている。今回の検討にあたり行った 2 年間の風観測期間内での局地風の発生日数は 16 日であった。そのため、今回の検討結果はこの期間特有のものである可能性があり、局地風の事例を増やして検証を行うことが必要である。加えて、本稿では局地風としてやまじ風を対象としたが、他の局地風についても本手法と同様の検討を行い、局地風による強風が吹く領域に対する強風箇所抽出方法の一般化を図っていくとともに、計算機技術の発達を踏まえて更なる改良を行っていく予定である。

謝 辞

本稿内の局地風の現地観測は四国旅客鉄道株式会社の協力の下に行った。ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) 荒木啓司, 福原隆彰, 島村泰介, 今井俊昭: 数値解析手法を用いた鉄道沿線における強風箇所の抽出方法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.5, pp.29-34, 2010
- 2) 松山地方気象台: 5月の天候の特徴, <http://www.pref.ehime.jp/noukei/gijutu/2005kisyoyougo.pdf> (2011年8月18日閲覧)
- 3) 高見佳浩: 「やまじ風」の調査 ―やまじ風の発生頻度について―, 日本気象学会関西支部例会講演要旨集, pp18～21, 1991
- 4) 紀井伸章, 寺尾徹, 松村雅文, 森征洋: やまじ風発生時の気象状況について (1) ―統計的特徴―, 香川大学教育学部研究報告第2部, Vol.58, No.2, pp53～84, 2008
- 5) 内田孝紀, 大屋祐二: 風況シミュレータ RIAM-COMPACT の開発 ―風況精査とリアルタイムシミュレーション―, ながれ, Vol.22, No.5, pp417～428, 2003