論文

地形および樹木が開発地域周辺の 風の流れに及ぼす影響予測*

渡 邊 知 子¹ 大 塚 尚 寛² 齊 藤 貢³

Prediction of Wind Flow Change around the Development Area Caused by Land Deformation and Tree Felling

by Tomoko WATANABE^a, Naohiro OTSUKA^a and Mitsugu SAITO^a

a. Faculty of Engineering, Iwate University, Ueda, Morioka 020-8551, Japan

Land deformation and tree felling caused by the development actions influences on the wind shift around the development areas. We defined the topographical features that affected the wind flow as a topographical factor. We also defined the decrease in the wind velocity by trees as a tree factor. The AMeDAS weather stations were classified into 4 topographical feature forms by these topographical factors' conditions. These were coast, flatland, flatland mixed with mountain and mountain valley. From the viewpoint of macroclimate, Tohoku district was divided into the Japan Sea side and the Pacific Ocean side.

Statistical study was conducted to investigate the relation between influences the factors and the wind flow. Multiple regression analysis using the factors could reach the relative equations for the frequency of the wind direction and the mean of the wind velocity for the flatland mixed with mountain in summer and winter.

Using the relative equations as the prediction formulas, it was examined the prediction of the wind flow change at the development area which had land deformation. As a result, it was predicted that the wind flow around the development area would change caused by development.

KEY WORDS : Development Area, Wind Direction, Wind Velocity, Topographical Factor, Tree Factor

1. は じ め に

露天採掘などの森林伐採や地形改変を伴う開発は、生態系や自然景観の破壊、さらに微気象の変化など周辺の環境に様々な影響を与える¹⁾²⁾。ここで微気象とは、局部的地形差によって生じる数km範囲の気候のことである。特に微気象のなかでも重要な要素である風体系の変化は、他の微気象要素を左右するだけではなく、いままで風が吹かなかった地域に風が吹き込むようになるなどの風害を発生させ問題となる場合がある³⁾。したがって、風と地形との関係を定量化し、地形改変を伴う開発が周辺地域の風体系にどのような影響を与えるかを予測することは、環境アセスメントの観点からも重要である。

風の流れに関する研究としては、大気汚染に関わる大気の流れに関する研究⁴⁾、林学分野における防風林に関する研究⁵⁾⁶⁾などこれまで多くの研究が行われている。しかし、森林の伐採や地形改変を伴う開発地域周辺の風体系変化に関する研究は国内外を問わずほとんど行われていない現状にある。

風が地形によって変化する場合、様々な地表の状態や、構造物や植生による地表粗度などが影響を及ぼしていると考えられる。そこで本研究では、風の流れに影響を与える地形の状態を表す因子として、地形の開け具合、高低差などを取り上げ、地形因子として定義した。また、わが国では通常、山地は樹木で覆われ

ている場合がほとんどであり、地形改変に伴って樹木の伐採も行われること、樹木には大きな減風効果があることなどから、地形以外で特に風速に影響を及ぼす因子として樹木を取り上げた。そして、露天採掘などの地形改変を伴う開発地域周辺の風の流れの変化を予測するために、東北6県のアメダス気象観測点を対象として、観測点における風向、風速と観測点周辺の地形因子および樹木因子との関係について、重回帰分析を用いて統計的検討を行い関係式を導いた。

次に、導かれた関係式を予測式として用いて、地形改変を伴う開発計画を事例として、開発に伴う周辺地域の風向および風速の変化について予測を行った。

2. 風の流れの循環規模と地域性

大気境界層内で起こる局地風や海風、陸風などに見られる大気の状態は、地表状態の影響を受けて局地循環として生じるので、上空の自由大気における風の循環と区別する必要がある⁷⁾。すなわち、日常われわれが生活を営む大気境界層における風の流れは、上空の自由大気の流れが地形や地表の影響を受けて複雑に変化したものであるといえる。したがって、地形改変が周辺地域の風体系にどのような影響を及ぼすかを解析するに当たっては、地表付近で観測された気象データを用いる必要がある。

そこで本研究では、地表付近において気象観測が行われているアメダス気象観測点を対象とすることとした。アメダス気象観測点の風向風速計の設置高さは通常6.5mであり、地表風を対象としている。なお、設置高さの異なる観測点については、高さ6.5mにおける観測値になるように補正して解析に用いた。これらの観測点は位置が既知であり周辺の地形情報を得るのが容易であ

* 2001年9月20日受付 2002年5月24日受理 資源・素材学会平成12年度秋季大会において一部発表

1. 学生会員 岩手大学大学院生 工学研究科生産開発工学専攻 博士後期課程

2. 普通会員 工博 岩手大学教授 工学部建設環境工学科

3. 普通会員 岩手大学助手 工学部建設環境工学科

[著者連絡先] FAX 019-621-6451 (岩手大・工・建設環境)

キーワード: 開発地域, 風向, 風速, 地形因子, 樹木因子

ること、継続した観測が行われていること、さらにデータの入手が容易であることなどから、研究対象として最適であると考えられる。

また風の流れは、循環規模による違いだけではなく地域による違いもある。特にわが国における気候の地域差は、国土が南北に長いことや中央部に気候境界を形成する山脈があることなどから複雑である。したがって、本研究で対象とする青森、秋田、岩手、山形、宮城、福島県の東北6県のアメダス気象観測点について、気候の地域差を考慮して検討を進めることとした。日本の気候区分にはいくつかの方法がある⁸⁾が、本研究では大気候を構成する最も重要な要素である気温と降水量に基づいて⁹⁾、東北地方のアメダス気象観測点を日本海側と太平洋側とに区分した。

図1は、東北地方におけるアメダス気象観測点の地域区分を示したものである。東北地方日本海側の観測点は72箇所、東北地方太平洋側の観測点は73箇所に区分された。ただし、福島県太平洋側は、年間降水量が北東北地方太平洋側と比べると多く、関東圏の区分に属するので、本研究では福島県太平洋側を除いた青森県、岩手県、宮城県の57箇所を東北地方太平洋側の観測点とした。

なお、季節区分は気象学分野で用いられている区分に従い、春季は3～5月、夏季は6～8月、秋季は9～11月、冬季は12～2月とした。

3. 風の流れを表す指標の定義

風は風向と風速の2つの量によって示されるベクトル量である。

図1 アメダス気象観測点の区分

したがって、風の流れが環境に及ぼす影響について考える場合には、どれぐらいの強さの風がどの方向から吹くかについて知る必要がある。そこで本研究では、以下の項目を風の流れを表す指標として定義した。なお、風向、風速については、1日24回、毎正時に観測されたデータを用いることとし、気象庁監修アメダス観測年報CD-ROM版の1987年から1996年までの過去10年間の観測値を用いた。

また、いずれの定義においても、季節のようなある期間を対象として、10年間の観測データについて集計を行った。

(a) 風向頻度 $F_i(\%)$: 全観測回数に対する16方位別の観測回数を百分率で示したもので、式(1)によって表される。

$$F_i = N_i / NA \times 100 \quad (i = N, NNE, \dots, NW, NNW) \dots\dots (1)$$

(b) 平均風速 $V_i(m/s)$: 全観測データの風速を16方位別に集計して平均値を求めたもので、式(2)によって表される。

$$V_i = \sum v_i / N_i \quad (i = N, NNE, \dots, NW, NNW) \dots\dots (2)$$

ここで、 NA : 全観測回数

N_i : 16方位別の観測回数

v_i : 16方位別に観測された風速(m/s)

4. 因子の定義

微気象に影響を与えるのは数km範囲内の地形であることから、本研究では観測点を中心に半径1km以内の範囲を対象として、風向、風速に影響を与えると考えられる地形の状態と樹木による減風効果を定量的に表す因子を定義した。表1に各因子の定義を示す。

4.1 地形因子

地形因子として10種類を取り上げた。このうち、標高範囲と障害距離については観測点との標高差が100mの場合と、200mの場合をそれぞれ因子として定義したので、地形因子の数は10種類12因子である。これらの地形因子を採用した理由は、次のとおりである。

①海岸距離は、海岸までの最短距離を表している。障害物のない海上では陸上に比べ強い風が吹く。また、海上と陸上では温度差があるため沿岸で観測される風は、海陸風に代表されるように内陸部で観測される風と異なる傾向を示す¹⁰⁾といわれている。したがって、この因子を用いることによって、海の有無だけではなく、海までの距離が風に与える影響についても考慮することができる。

表1 因子の定義

		因子名	記号	単位	定 義	
地形因子	①	海岸距離	S	(m)	半径1km以内に海がある場合の海までの最短距離	
	②	海拔高度	L	(m)	観測点の海面からの高さ	
	③	最高点標高差	Ma	(m)	半径1kmの円内の最高点と観測点の標高差	
	④	最低点標高差	Mi	(m)	半径1kmの円内の最低点と観測点の標高差	
	⑤	標高の偏差	Ld	(m)	半径1kmの円周上の16方位の標高の平均と観測点の標高の差	
	⑥	地形傾斜の偏差	K		半径1kmの16方位の最高点(最低点)と観測点の標高差のtanの平均値からの各方位のtanの差	
	⑦	標高範囲	100	Ro	(%)	半径1kmの円内の陸地面積に対する観測点との標高差が100m以上の面積の割合
			200	Rt	(%)	半径1kmの円内の陸地面積に対する観測点との標高差が200m以上の面積の割合
	⑧	開放度	A	(°)	半径1kmの円内で観測点よりも100m以上高い障害物のない開けている部分の角度の総和	
	⑨	流通方向	D	(°)	観測点との標高差が50m以下で最も障害物のない開いた方位の北からの方位角	
	⑩	障害距離	100	Ho	(m)	観測点との標高差が100m以上の地域までの最短距離
200			Ht	(m)	観測点との標高差が200m以上の地域までの最短距離	
樹木因子	⑪	減風率	G	(%)	観測点から樹木までの距離(高倍距離)と相対風速との関係から導く	

②海拔高度は、観測点の海面からの高さを表している。一般に海拔高度が高くなると風速は増加するといわれている¹¹⁾ので、海拔高度を因子とすることで標高と風速との関係について考慮することができる。

③、④の最高点および最低点標高差は、周辺の地形を代表する点として最高点および最低点を取り、観測点との標高差を因子としたものである。風は周辺の標高が高ければ遮られるが、低ければその方向へ向かって流れていく。したがって、この因子を用いることによって、観測点との相対的な高さの違いによる風の吹きやすさを考慮することができる。

⑤標高の偏差は、半径 1 km の円周上で 16 方位の標高値の平均値と観測点の標高の差をとったものである。風はある方位またはある一点における地形の影響だけを受けているのではなく、周辺の連続した地形の影響を受けて変化している。標高の偏差は他の因子と異なり、周辺の連続した地形の状況を反映することができる因子である。

⑥地形傾斜の偏差は、16 方位線上で最高点または最低点の標高値を用いて正接 (tan) を求め、16 方位の tan の平均値と各方位の tan の差を因子としたものである。標高の偏差と同様に周辺の連続した地形の影響を反映する因子であるが、標高の偏差よりもさらに詳細に周辺の地形を反映することができる。最高点または最低点の標高とその地点までの距離について考慮していることと、1 つの観測点について各方位で値が算出される、すなわち、16 個の値が得られることがその理由である。

⑦風を遮るものがない平野などの開けたところでは、山岳や建物の密集している市街地よりも風は強くなることが知られている¹²⁾。そこで、風を遮る障害物の存在を因子としたものが、標高範囲 100 および 200、開放度、流通方向、障害距離 100 および 200 の 4 種類 6 因子である。

これらの因子のうち、障害物の占める面積の割合を表したのが、標高範囲 100 および 200 である。この因子によって、障害物が風に及ぼす影響を、面積比をパラメータとして考慮することができる。

⑧開放度は、障害物のない開けている部分の角度の総和を表している。この因子を用いることによって、地形の開け具合と風の吹きやすさの関係について考慮することができる。

⑨流通方向は、障害物が最も少ない方向の北からの方位角を示している。この因子を用いることによって、最も風の吹き込みやすい方位について考慮することができる。

⑩障害距離 100 および 200 は、障害物までの最短距離を表している。障害物が近くにあるほど風は大きな影響を受けるので、この因子を用いることによって、障害物が風に及ぼす影響について距離をパラメータとして考慮することができる。

4・2 樹木因子

風には地形以外の要因も大きく影響していると考えられる。その要因として、観測点周辺の樹木、建物などによる影響が考えられる。なかでも樹木には防風林に代表されるように大きな減風効果があることが知られている。減風効果とは、樹木が風に対する障害物となり、風の持つエネルギーを奪うことによって風が弱まる作用のことである¹³⁾。また、開発による地形改変が行われる山地は、樹木で覆われている場合がほとんどであり、山地の切り取りに伴って樹木の伐採が行われる場合が多い。したがって、本研究では地形以外で特に風に影響を与える要因として、樹木を取り上げ、樹木の風に対する影響を考慮するため、減風率を樹木因子として加えることとした。

図 2 は、樹木の高さを H_0 とし、式 (3) に示す樹木からの距離を

H_0 の倍数で表した高倍距離と、風上側 - 10 で観測された風速を 100 % とした相対風速との関係を示したものである¹³⁾。この減風曲線から、相対風速を高倍距離の関数 $f(H)$ とした。そして、100 % から相対風速を減じた値を減風率として、式 (4) のように定義した。

$$H = l / H_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$G = 100 - f(H) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 H : 高倍距離

l : 樹木からの距離 (m)

H_0 : 樹木の高さ (m)

G : 減風率 (%)

本研究では、16 方位線上でそれぞれ減風率を算出した。

図 2 をみると、樹木の葉が落葉した場合の相対風速の方が、繁茂した状態より高い値を示しており、減風率は夏季に比べて冬季に低下することがわかる。

なお、地形因子は、国土地理院発行 CD-ROM 版の数値地図 50 m メッシュ (標高) をもとにして求めた。また、樹木因子については、国土地理院発行 CD-ROM 版の数値地図 25,000 (地図画像) をもとに、観測点周辺の樹種および観測点から樹木までの距離を調べ、樹高を針葉樹 15 m、落葉樹 10 m、果樹 3 m、竹 9 m、桑 2 m として減風率を算出した。

5. 地形因子による地形形態の分類

アメダス気象観測点は、設置個所周辺の地形が考慮されていない場合がほとんどである。そのためアメダス気象観測データは、隣り合った観測点でも異なる傾向を示すことがあり、周辺の地形の影響を受けていると考えられる。そこで、各観測点における風速別の風向頻度を求め、地形の状態による風の傾向を調べた。

図 3(a) は鹿島台観測点における風速別の風向頻度で、図 3(b) は観測点周辺の地形図を示したものである。図から、4.0 m/s 未満の低風速での風配図は卓越風向が認められないが、4.0 m/s 以上の風速の場合には卓越する風向が定まっていることがわかる。これは、地形の影響を受けていない風の一般的な傾向である。

一方、図 4(a) と (b) に示した小本観測点の場合は、4.0 m/s 未満と 4.0 m/s 以上の風配図は類似し、さらにその卓越風向方位は西から西南西となっている。これは、地形の開けている方位、すなわち風が吹き込むと考えられる方位と一致しており、地形の影響を受けていることがわかる。

その他のアメダス気象観測点においても、観測される風は周辺の地形の状態によって異なる傾向を示すことが確認された。したがって、地形を形態別に分類することによって、風の流れの傾向を分類することが可能になると考えられる。そこで、アメダス気象観測点を表 1 に示した地形因子を用いて、微気象に影響を与えると一般的に考えられている沿岸、平地、平地と山の混在、山間の 4 つの地形形態¹⁴⁾に次の順序で分類した。

(1) 観測点から半径 1 km の範囲内に海がある観測点 ($0 < S \leq$

図 2 高倍距離と相対風速との関係

図3 鹿島台観測点

図4 小本観測点

1000)は「沿岸」とする。

(2) 最高点標高差および最低点標高差がそれぞれ 50 m 以下 ($Ma, Mi \leq 50$) で、標高の偏差が ± 20 m 以下 ($-20 \leq Ld \leq 20$) の観測点は「平地」とする。

(3) 最高点標高差が 50 m より大きく ($Ma > 50$)、さらに開放度が 270° 以上 ($A \geq 270$) の観測点は「平地と山の混在」とする。

(4) 開放度が 270° 未満 ($A < 270$) の観測点は「山間」とする。
この分類方法を用いることによって、周辺の地形情報があれば、どのような傾向の風が吹く地点であるのかを推定することが可能となる。

表 2 に、地形因子を用いた地形形態の分類条件と分類結果を示す。分類は東北地方のアメダス気象観測点 129 個所について行った。なお、東北地方太平洋側の 5 個所の観測点は、山頂や山腹などにあるために、4 つの地形形態のいずれにも属さなかった。

6. 重回帰分析による予測式の導出

風が地形的にどの方向から最も吹きやすいのか、どのくらいの速さで吹くのかを予測するために、風の流れと影響因子との関係について、重回帰分析を行った。

重回帰分析とは、目的変数とそれに影響すると考えられる説明変数との間の関係式を求め、説明変数の値から目的変数の値を予測したり、説明変数の影響の大きさを評価したりすることができる統計的解析手法の 1 つである¹⁵⁾。したがって、この手法を用いて風の流れと各因子間との関係式を導くことができれば、因子の値から風の流れを予測することが可能となる。そこで、風向頻度、平均風速を目的変数、地形および樹木因子を説明変数として重回帰分析を行った。

重回帰分析の解析方法は、はじめに予備的解析を行い、因子相互の単相関係数が 0.8 以上を示す類似因子については、目的変数との相関の低い因子を省き、残りの因子を用いて重回帰分析を行った。次に、導かれた関係式を信頼性の高い予測式として用い

表 2 地形因子による地形形態の分類条件および分類結果

地形形態	分類条件	分類結果	
		日本海側	太平洋側
沿岸	$0 < S \leq 1000$	9	8
平地	$Ma \leq 50$	22	13
	$Mi \leq 50$		
	$-20 \leq Ld \leq 20$		
平地と山の混在	$Ma > 50$	24	20
	$A \geq 270$		
山間	$A < 270$	17	11
その他	—	0	5

るためには、重相関係数の高い関係式を得なければならない。そのためには変数選択によって重要度の低い因子を省く必要がある。そこで本研究では、変数減増法を用いる対話型変数選択法¹⁶⁾によって変数選択を行い、最も精度の良い因子の組み合わせを導いた。変数減増法とは、目的変数に対する影響度を表す係数である標準偏回帰係数をもとに、この値の小さい因子を順に除きながら、場合によっては一度除いた因子を再度選択しながら、重回帰分析を繰り返す方法である。なお、解析は大気候による地域差を考慮するために、日本海側と太平洋側とに区分して行った。

6・1 地形形態別の風向・風速と影響因子との関係

5. で述べたとおり、風の流れは観測点周辺の地形形態によって異なる傾向を示す。したがって、地形形態ごとに風の流れと影響因子との関係について解析を行う必要があるといえる。また、わが国においては、夏季は南東、冬季は北西というように季節によって卓越する風向が異なる傾向を示す¹⁷⁾ので、季節別に解析を行う必要がある。そこで、東北地方日本海側と太平洋側のアメダス気象観測点を、4 つの地形形態に分類して、形態ごとに季節別の風向頻度および平均風速を求めて、前述の解析手順に従って重回帰分析を行った。

なお東北地方における樹木の葉の状態を考慮して、6 月から 11 月の夏季と秋季に樹木の葉が繁茂した状態、12 月から 5 月の冬季と春季に樹木の葉が落葉した状態として減風率の算出を行った。また、日本海側および太平洋側のいずれの気候区分においても、地形形態が沿岸の観測点については、観測点数が少ないために解析を行うことができなかった。さらに、太平洋側の山間の地形形態の観測点も、同様の理由で解析を行うことができなかった。

表 3 は、風向頻度に関する地形形態および季節別の解析結果を示したものである。表中の偏回帰係数とは、関係式において各変数項の係数となる。標準偏回帰係数とは、単位が異なる説明変数間の目的変数に対する影響度を比較するのに用いられる係数である。自由度修正済み重相関係数とは、無意味な説明変数を用いた場合には数値が下がるように自由度で補正した重相関係数のことである。重相関係数とは、重回帰分析の精度を表している。なお、自由度修正済み重相関係数が 0 となり相関を求めることができなかった季節は、空欄となっている。

表 4 は、平均風速に関する地形形態および季節別の解析結果を示したものである。

これらの表から、いずれの気候区分および地形形態においても、春季と秋季の多くの場合で、相関係数が低いか相関を求めることができない傾向にあることがわかる。これは、春季の 3～4 月頃に冬の季節風が、また秋季の 9～10 月に夏の季節風が収まり、それぞれ夏および冬の季節風に切り替わる時期¹⁸⁾であるため、風向が定まらず影響因子との間に明瞭な関係を得ることができないためと考えられる。したがって、春季と秋季における関係式を予測式とするのは、信頼性に欠けると判断される。

表3 風向頻度の重回帰分析結果

形態季節	因子名	記号	偏回帰係数	標準偏回帰係数	自由度修正済み重相関係数	重相関係数		
平地	春季	海拔高度	L	0.00986	0.311	0.289	0.508	
		最低点標高差	Mi	-0.0821	-0.285			
		地形傾斜の偏差	K	39.7	0.356			
		減風率	G	-0.0257	-0.101			
	夏季	定数項		18.1				
		海拔高度	L	-0.0269	-0.367	0.305	0.556	
		最高点標高差	Ma	0.141	0.283			
		最低点標高差	Mi	-0.217	-0.326			
	地形傾斜の偏差	K	56.3	0.224				
	秋季	減風率	G	-0.0339	-0.0770			
		定数項		19.7				
		冬季	海拔高度	L	-0.0208	-0.338	0.503	0.600
			地形傾斜の偏差	K	67.2	0.319		
	減風率		G	0.203	0.411			
定数項			21.6					
東北地方日本海側	春季	海拔高度	L	0.0203	0.782	0.781	0.836	
		標高の偏差	Ld	-0.0687	-0.195			
		地形傾斜の偏差	K	38.6	0.310			
		流通方向	D	0.0245	0.223			
	夏季	減風率	G	-0.149	-0.370	0.660	0.734	
		定数項		16.0				
		海拔高度	L	0.0110	0.627			
		標高の偏差	Ld	-0.0660	-0.307			
	秋季	地形傾斜の偏差	K	34.0	0.311	0.691	0.769	
		減風率	G	-0.0442	-0.193			
		定数項		14.0				
		最高点標高差	Ma	-0.151	-0.886			
	冬季	最低点標高差	Mi	0.129	0.928	0.880	0.914	
		標高の偏差	Ld	0.242	0.836			
		地形傾斜の偏差	K	-24.3	-0.233			
		減風率	G	-0.0591	-0.231			
	山間	春季	定数項		24.6		0.268	0.618
			海拔高度	L	0.0336	0.942		
			最高点標高差	Ma	0.0532	0.210		
			地形傾斜の偏差	K	53.4	0.318		
夏季		流通方向	D	0.0461	0.306	0.374	0.653	
		障害距離100	Ho	-0.00766	-0.273			
		減風率	G	-0.283	-0.513			
		定数項		10.6				
秋季		海拔高度	L	-0.0173	-0.374	0.444	0.641	
		地形傾斜の偏差	K	58.5	0.446			
		標高の偏差	Ld	0.126	0.512			
		障害距離200	Ht	0.0111	0.407			
冬季		減風率	G	-0.193	-0.344	0.893	0.921	
		定数項		13.1				
		海拔高度	L	-0.0132	-0.324			
		標高の偏差	Ld	0.114	0.522			
春季		地形傾斜の偏差	K	20.0	0.136	0.834	0.878	
		流通方向	D	0.0276	0.235			
		減風率	G	-0.0819	-0.224			
		定数項		10.0				
東北地方太平洋側	夏季	地形傾斜の偏差	K	-4.44	-0.0326	0.354	0.700	
		開放度	A	-0.101	-0.563			
		流通方向	D	0.0463	0.331			
		減風率	G	-0.261	-0.441			
	秋季	定数項		40.1		0.702	0.825	
		標高の偏差	Ld	-0.802	-0.514			
		地形傾斜の偏差	K	160	0.686			
		減風率	G	0.0819	0.357			
	冬季	定数項		13.7		0.615	0.757	
		最低点標高差	Mi	0.147	0.594			
		地形傾斜の偏差	K	-97.3	-0.658			
		減風率	G	-0.100	-0.744			
	春季	定数項		12.6		0.541	0.636	
		海拔高度	L	-0.0674	-0.874			
		最低点標高差	Mi	0.417	0.813			
		標高の偏差	Ld	1.10	0.794			
	夏季	地形傾斜の偏差	K	-2.99	-0.00808	0.764	0.834	
		減風率	G	-0.0906	-0.210			
		定数項		17.9				
		海拔高度	L	0.0305	0.932			
秋季	最低点標高差	Mi	-0.150	-0.609	0.645	0.739		
	地形傾斜の偏差	K	5.10	0.0454				
	標高範囲100	Ro	1.98	0.212				
	流通方向	D	0.0552	0.487				
冬季	障害距離100	Ho	0.00705	0.517	0.615	0.757		
	減風率	G	0.101	0.275				
	定数項		8.82					
	海拔高度	L	0.0294	0.711				
春季	最低点標高差	Mi	-0.0791	-0.213	0.541	0.636		
	地形傾斜の偏差	K	14.7	0.0879				
	流通方向	D	0.0707	0.516				
	減風率	G	-0.0740	-0.282				
夏季	定数項		10.7		0.764	0.834		
	最高点標高差	Ma	0.0630	0.517				
	地形傾斜の偏差	K	31.6	0.347				
	減風率	G	0.0264	0.124				
秋季	定数項		7.56		0.764	0.834		
	最低点標高差	Mi	0.0962	0.210				
	地形傾斜の偏差	K	29.7	0.172				
	障害距離100	Ho	0.0175	0.791				
冬季	減風率	G	-0.0642	-0.127	0.764	0.834		
	定数項		14.4					

表4 平均風速の重回帰分析結果

形態	季節	因子名	記号	偏回帰係数		自由度修正済み重相関係数	重相関係数	
				標準偏回帰係数				
東北地方日本海側	平地	春季	-	-	-			
		夏季	海拔高度	L	-0.00502	-0.536	0.397	0.599
		最低点標高差	Mi	-0.0186	-0.219			
		標高の偏差	Ld	-0.0744	-0.323			
		地形傾斜の偏差	K	4.45	0.138			
		減風率	G	0.00141	0.0249			
		定数項	-	3.16				
		秋季	最高点標高差	Ma	-0.0183	-0.347	0.138	0.503
		最低点標高差	Mi	0.0296	0.420			
		標高の偏差	Ld	0.0565	0.296			
		地形傾斜の偏差	K	14.9	0.370			
		減風率	G	0.0178	0.413			
	定数項	-	2.61					
	冬季	海拔高度	L	-0.00477	-0.356	0.305	0.556	
	最低点標高差	Mi	-0.0464	-0.382				
	標高の偏差	Ld	-0.101	-0.306				
	地形傾斜の偏差	K	-1.79	-0.0391				
	減風率	G	-0.00276	-0.0256				
	定数項	-	4.42					
	山間	春季	地形傾斜の偏差	K	6.07	0.421	0.268	0.491
		流通方向	D	0.00386	0.301			
		障害距離100	Ho	0.000800	0.335			
		減風率	G	-0.0147	-0.361			
		定数項	-	2.53				
夏季		最低点標高差	Mi	0.00935	0.552	0.617	0.706	
標高の偏差		Ld	-0.0151	-0.426				
地形傾斜の偏差		K	9.80	0.539				
減風率		G	-0.0310	-0.821				
定数項		-	2.84					
秋季		地形傾斜の偏差	K	0.391	0.0353	0.262	0.496	
流通方向		D	0.00456	0.424				
障害距離100	Ho	0.000911	0.447					
減風率	G	-0.00586	-0.207					
定数項	-	2.02						
冬季	海拔高度	L	0.00248	0.891	0.792	0.838		
地形傾斜の偏差	K	3.96	0.308					
障害距離100	Ho	-0.00114	-0.520					
減風率	G	-0.0178	-0.424					
定数項	-	2.85						
東北地方太平洋側	平地	春季	地形傾斜の偏差	K	6.76	0.646	0.649	0.759
		開放度	A	-0.00861	-0.643			
		障害距離200	Ho	0.000969	0.448			
		減風率	G	-0.00491	-0.115			
		定数項	-	3.90				
		夏季	最低点標高差	Mi	0.0143	0.403	0.454	0.686
		標高の偏差	Ld	0.00383	0.289			
		地形傾斜の偏差	K	-0.528	-0.0594			
		流通方向	D	0.00315	0.444			
		減風率	G	-0.000637	-0.0288			
		定数項	-	1.00				
		秋季	海拔高度	L	0.000560	0.212	0.496	0.74
	最低点標高差	Mi	0.0285	0.747				
	標高の偏差	Ld	0.00272	0.191				
	地形傾斜の偏差	K	-3.52	-0.327				
	障害距離100	Ho	0.000365	0.102				
	減風率	G	-0.00711	-0.299				
	定数項	-	0.719					
	冬季	地形傾斜の偏差	K	2.23	0.235	0.455	0.647	
	開放度	A	-0.00738	-0.593				
	流通方向	D	0.00332	0.341				
	減風率	G	-0.00720	-0.175				
	定数項	-	3.67					
	山間	春季	海拔高度	L	-0.0106	-0.666	0.673	0.797
最低点標高差		Mi	-0.0729	-0.688				
地形傾斜の偏差		K	69.6	0.522				
減風率		G	0.0156	0.146				
定数項		-	4.94					
夏季		海拔高度	L	0.00747	0.865	0.455	0.733	
最低点標高差		Mi	-0.0519	-0.906				
標高の偏差		Ld	-0.158	-1.02				
地形傾斜の偏差		K	10.3	0.446				
減風率		G	-0.00982	-0.432				
定数項		-	2.80					
秋季		海拔高度	L	-0.00315	-0.289	0.487	0.745	
最高点標高差	Ma	0.0249	0.443					
最低点標高差	Mi	-0.0233	-0.322					
地形傾斜の偏差	K	-8.26	-0.191					
減風率	G	-0.0204	-0.519					
定数項	-	2.77						
冬季	海拔高度	L	-0.00780	-0.533	0.657	0.788		
最低点標高差	Mi	-0.0486	-0.499					
地形傾斜の偏差	K	26.4	0.375					
減風率	G	-0.00939	-0.114					
定数項	-	4.49						
平地と山の混在	春季	標高の偏差	Ld	-0.00931	-0.266	0.589	0.720	
	地形傾斜の偏差	K	0.218	0.0151				
	標高範囲100	Ro	0.442	0.370				
	流通方向	D	0.00824	0.568				
	減風率	G	-0.0355	-0.754				
	定数項	-	2.67					
	夏季	最高点標高差	Ma	0.00787	0.607	0.609	0.762	
	最低点標高差	Mi	-0.00695	-0.301				
	地形傾斜の偏差	K	4.43	0.352				
	流通方向	D	0.00625	0.590				
	障害距離100	Ho	-0.000563	-0.434				
	減風率	G	-0.000891	-0.042				
定数項	-	1.29						
秋季	海拔高度	L	0.000913	0.253	0.113	0.570		
地形傾斜の偏差	K	-2.44	-0.220					
開放度	A	0.0107	0.283					
流通方向	D	0.00668	0.539					
障害距離100	Ho	0.000579	0.387					
減風率	G	-0.00960	-0.360					
定数項	-	-2.14						
冬季	最低点標高差	Mi	0.0199	0.525	0.645	0.739		
地形傾斜の偏差	K	2.14	0.121					
流通方向	D	0.00794	0.458					
減風率	G	-0.0515	-0.915					
定数項	-	2.32						

さらに表から、平地と山の混在する地形形態についてみると、両気候区分ともに自由度修正済み重相関係数は、夏季と冬季では0.6以上の値を示していることがわかる。このことから、平地と山の混在する地形形態における風向および風速は、周辺の地形や樹木との関係が、他の地形形態に比べてより強く現れているものと考えられる。また、山地が国土の80%以上を占めるわが国では、平地から山地へ移り変わるような、平地と山の混在する地域が様々な開発行為の対象となる場合が多い。したがって、このような地域において開発に伴う地形変化が周辺の風体系にどのような影響を与えるかを予測することは重要なことであるといえる。

以上のことから、平地と山の混在する地形形態における東北地方日本海側および太平洋側の風向頻度 $F(\%)$ の関係式として式(5)～(8)が求められた。

・東北地方日本海側

$$\text{夏季 } F_{jsui} = 0.0110L - 0.0660Ld + 34.0K_i - 0.0442G_i + 14.0 \quad (5)$$

$$\text{冬季 } F_{jwi} = 0.0336L + 0.0532Ma + 53.4K_i + 0.0461D - 0.00766Ho - 0.283G_i + 10.6 \quad (6)$$

・東北地方太平洋側

$$\text{夏季 } F_{psui} = 0.0294L - 0.0791Mi + 14.7K_i + 0.0707D - 0.0740G_i + 10.7 \quad (7)$$

$$\text{冬季 } F_{pwi} = 0.0962Mi + 29.7K_i + 0.0175Ho - 0.0642G_i + 14.4 \quad (8)$$

同じく東北地方日本海側および太平洋側の平均風速 $V(\text{m/s})$ の関係式として式(9)～(12)が求められた。

・東北地方日本海側

$$\text{夏季 } V_{jsui} = 0.00935Mi - 0.0151Ld + 9.80K_i - 0.0310G_i + 2.84 \quad (9)$$

$$\text{冬季 } V_{jwi} = 0.00248L + 3.96K_i - 0.00114Ho - 0.0178G_i + 2.85 \quad (10)$$

・東北地方太平洋側

$$\text{夏季 } V_{psui} = 0.00787Ma - 0.00695Mi + 4.43K_i + 0.00625D - 0.000563Ho - 0.000891G_i + 1.29 \quad (11)$$

$$\text{冬季 } V_{pwi} = 0.0199Mi + 2.14K_i + 0.00794D - 0.0515G_i + 2.35 \quad (12)$$

($i=N, NNE, NE, \dots, NW, NNW$)

ここで、 L ：海拔高度 (m)

Ma ：最高点標高差 (m)

Mi ：最低点標高差 (m)

Ld ：標高の偏差 (m)

K ：地形傾斜の偏差

D ：流通方向 ($^\circ$)

Ho ：障害距離 100(m)

G ：減風率 (%)

これらの関係式の重相関係数は、いずれも0.7以上の高い値を示しており、これらを地形変化を伴う開発地域周辺の風向、風速変化を予測する式として用いるのに十分な精度を有するものと判断される。

7. 地形変化を伴う開発地域周辺の風向・風速変化予測

6.で導かれた予測式を用いて、地形変化を伴う開発計画を事例として、開発の前後で周辺地域の風向、風速がどのように変化するか予測を行った。

研究事例としては、山形県内にある標高194mの山を対象とし、この山を切り取って得られる岩石は碎石用原石として利用し、跡地に運動公園を建設する複合開発計画を想定して予測を行った。

標高130mレベルまで山の切り取りを行った場合、約33haの用地が造成され、野球場や陸上競技用トラックなどの施設を建設するのに十分な用地が得られる。したがって、現状の地形を開発前とし、標高130mレベルまで山地を切り取った地形を開発後として、開発前および開発後における風の流れについて予測を行った。なお開発対象地域は、住宅地および田畑がある平地に対象とする山があり、平地と山の混在する地形形態である。また、開発対象の山は樹木に覆われており、山地の切り取りが行われる区域の樹木は、開発に伴って伐採されるものとした。

開発地域周辺の風体系変化を予測するために、開発計画地を中心として、東西南北に200m間隔で11×11のメッシュを切り、メッシュの交点121点について予測を行った。各交点において、それぞれ半径1kmの範囲の地形と樹木の分布状況をもとに各因子の算出を行った。なお、対象とする開発地域が東北地方日本海側にあることから東北地方日本海側における予測式を用いた。また、東北地方では冬季の季節風による風害がしばしば発生することなどから、ここでは冬季の予測結果について述べる。なお、東北地方日本海側の平地と山の混在する地形形態における冬季の風向頻度および平均風速の予測式の重相関係数は、0.914および0.838であり、予測式としての精度は十分なものであると判断される。

図5は、開発前および開発後における卓越風向とその方位の風向頻度の予測結果を示したものである。卓越風向方位は、式(5)によって計算される16方位の風向頻度のうちで、その値が最大となる方位として定めた。図中の矢印の向きが卓越風向方位を示し、その長さが風向頻度を表している。太い矢印は、開発後に卓越風向方位が変化すると予測された地点の開発後の卓越風向とその方位の風向頻度を表している。なお、図中の灰色で示した部分が、開発計画地を表している。図から、卓越風向は山頂を中心として放射状になることがわかる。これは、今回対象とした開発事例では、開発対象の山が平地部に独立峰として存在するため、周辺の地形の状態から最も風の吹きやすい方位が、山頂からの吹き下ろしの方向になるものと考えられる。卓越風向頻度は、開発前には山の中腹で15～35%、平地部で10～35%の値を示し、開発後には中腹では10～20%、平地部では10～30%の値を示す。なお、開発後に20%前後の値の地点がほとんどであることから、開発前に比べると周辺地域の卓越風向頻度に差がみられなくなることがわかる。また、開発前に比べて卓越風向方位が変化すると予測された地点は43箇所である。卓越風向方位が開発後に最も変化するのは開発計画地の西北西端の地点で、卓越風向方位が東から西南西へと方位角で157.5°(=22.5°×7)も変化すると予測された。

図6は、卓越風向頻度の変化を比で表したものである。図中の数値は、開発前に対する開発後の卓越風向頻度の比で、1.00以上の地点は開発後に卓越風向頻度が増加する地点を、1.00以下の地点は開発後に卓越風向頻度が減少する地点を示している。なお下線を引いた数値は、開発後に卓越風向方位が変化すると予測された地点を表しており、開発後の卓越風向方位における開発前後の風向頻度の変化比を示している。

図から、開発計画地内では開発後に卓越風向頻度が増加することに対して、周辺の平地部では開発後に減少することがわかる。また、最も変化比の大きい地点は開発計画地内の北西端で、開発前6.9%であった風向頻度が開発後には19.0%へと2.75倍になると予測された。

次に、風速の変化予測を行った。図7は、開発前および開発後における卓越風向方位における平均風速の予測結果を示したものである。卓越風向方位は、図5に示す予測結果の方位とした。図中の矢印の向きが卓越風向方位を示し、その長さが平均風速を表

図5 開発前後の卓越風向とその方位の風向頻度

図7 開発前後の卓越風向方位における平均風速

図6 開発前後の卓越風向頻度の変化比

図8 開発前後の卓越風向方位の平均風速の変化比

している。図から、開発計画地内における平均風速は3.0～4.0 m/sで、開発計画地の端から400 mほど離れた範囲における平均風速は2.5～3.0 m/sとやや遅くなり、開発計画地から1 km程度離れた地域では3.0～3.5 m/sになると予測された。

図8は、卓越風向方位における平均風速の変化を比で表したものである。図から、ほとんどの地点において、平均風速の変化比が1.00以上であることから、山地の切り取りが行われる開発後には、周辺地域の平均風速が速くなることがわかる。最も変化比の大きい地点は開発計画地の北西側で、開発前2.3 m/sであった平均風速が開発後には4.0 m/sへと変化し、1.57倍になると予測された。

以上の予測結果から、開発に伴って山地の切り取りを行うことによって、周辺地域の風向および風速に変化が生じることが明らかとなった。また、開発計画地内およびその付近では、開発後に

卓越風向方位が変化し、その方位における風向頻度と平均風速がそれぞれ低下する傾向があると予測された。特に開発計画地内の北西側では、山の切り取り高さが大きいために、風向および風速が大きく変化すると予測された。さらに開発計画地の周辺では、卓越風向頻度が低下して平均風速が速くなる傾向があると予測された。これは、開発に伴って開発計画地の標高が低くなることによって、周辺の地点では、風の流れを遮る障害物の影響が小さくなり、風向頻度はある方向に極端に卓越しなくなり、風の流れが速くなるためと考えられる。

8. ま と め

本研究では、地形改変を伴う開発地域周辺の風の流れの変化を予測するに当たり、風の流れに影響を及ぼす地形の状態や樹木の

分布をもとに地形因子および樹木因子を定義し、これらの因子と風の流れとの関係について統計的検討を行った。得られた結果をまとめると、次のとおりである。

(1) 風の流れは周辺の地形の状態によって異なる傾向を示すことから、風を傾向別に分類する方法として、地形形態の分類を行った。その結果、地形因子を用いて沿岸、平地、平地と山の混在および山間の4つの地形形態に分類する方法を定めることができた。

(2) 風の流れと地形および樹木因子との関係について重回帰分析を用いて統計的検討を行った。その結果、平地と山の混在する地形形態において、東北地方日本海側と太平洋側における風向頻度と平均風速の夏季と冬季の予測式を導くことができた。

(3) 導かれた予測式を用いて開発地域周辺の風向、風速の変化予測を行った。その結果、開発計画地内のほとんどの地点では卓越風向方位が変化し、その方位における風向頻度および平均風速がともに増加すると予測された。また、開発計画地の周辺の平地部では、卓越風向頻度は開発後に減少する傾向があり、平均風速は速くなる傾向があると予測された。

引用文献

- 1) 大塚尚寛・関本善則：資源と素材，Vol. 109, No. 3, p. 203-208, (1993)
- 2) 大塚尚寛・関本善則・齊藤 貢・鎌田 武：資源と素材，Vol. 113, No. 7, p. 543-548, (1997)
- 3) 大塚尚寛・関本善則・齊藤 貢・千葉 新：資源と素材，Vol. 113, No. 2, p. 115-120, (1997)
- 4) 横山長之：大気環境シミュレーション，白亜書房（東京），(1992)
- 5) 只木良也：森林環境科学，朝倉書店（東京），p. 86-88, (1996)
- 6) 荒木真之：森林気象，川島書店（東京），p. 92-94, (1995)
- 7) 青木 滋・大草重康・奥田 穰・根 勇・永田 豊：土木工学大系 2，彰国社（東京），p. 88-96, (1977)
- 8) 吉野正敏：気候学，大明堂（東京），p. 36-43, (1978)
- 9) 前出 7)，p. 67-97
- 10) 吉野正敏：小気候，地人書館（東京），p. 105-113, (1986)
- 11) 前出 9)，p. 158-160
- 12) 伊藤 学：風のはなし I，技報堂出版（東京），p. 21-25, (1986)
- 13) 真木太一：風害と防風施設，文永堂出版（東京），p. 99-118, (1987)
- 14) 真木太一：風と自然，開発社（東京），p. 33-193, (1989)
- 15) 柳井晴夫・高木廣文：多変量解析ハンドブック，現代数学社（京都），p. 18-30, (1989)
- 16) 内田 治：すぐわかる EXCEL による多変量解析，東京図書（東京），p. 84-91, (1996)
- 17) 倉嶋 厚：日本の気候，古今書院（東京），p. 169-179, (1966)
- 18) 前出 17)，p. 169-179