露天採掘が周辺地域の風体系に及ぼす影響*

大塚 尚寛¹ 関本 善則²

Influence of Open-cut Mining on Wind System around Quarry

by Naohiro OTSUKA¹ and Yoshinori SEKIMOTO¹

1. Faculty of Engineering, Iwate University, Ueda, Morioka 020

It is considered that land deformation caused by open-cut mining influences on wind system around the quarry. Two case studies were conducted to investigate the change of wind system around the quarry.

The results are summarized as follows:

- (1) Land deformations caused by open-cut mining were simulated with three dimensional computer graphics, and it became possible to forecast the changes of wind direction visually.
- (2) By use of quantitative formula that showed the relationship between lay of land and wind direction frequency, it became possible to forecast the changes of prevailing wind direction and wind direction frequency quantitatively.
- (3) It became clear that deforestation according to open-cut mining influenced on increase of wind speed around the quarry.
- (4) In case A, the ridge of the quarry will be mined, it was forecasted that change of wind system affected on living environment a little.
- (5) In case B, all over the mountain will be mined-out, it was forecasted that wind system around the quarry was changed widely.

KEY WORDS: Open-cut Mining, Land Deformation, Microclimate, Wind Direction, Wind Speed

1. 緒 言

石灰石や碎石用原石などの露天採掘が大規模化するに伴い、採掘方式も大規模生産に適した方式への移行が進んでいる。すなわち、従来の山の片側斜面のみにベンチを構築する、いわゆる山腹式ベンチカット工法から、最初に山頂部に切羽を設け、尾根を越えて順次掘り下がる山頂式ベンチカット工法や、原石山の頂上部よりスライスダウン式に採掘を進めて山全体を取り去ってしまう全山開発方式などの採掘方式を採用する例がかなり増加してきている。これらの採掘方式は、初期投資は大きい、先行剝土が行えること、可採量が大きく生産性が高いこと、終掘後の残壁緑化面が少ないことなどの利点を有する¹⁾。しかし、このような大規模な開発行為による森林の伐採や、尾根、山塊の切り取りなどの結果生じる大幅な地形改変は、周辺地域の環境に様々な影響を及ぼしている。例えば、動物や植物の生態系を破壊して生物を絶滅の危機にさらしたり、景観を阻害して住民との間に摩擦を生じたりしている。さらには、周辺地域の微気候、特に風向、風速などの風体系に従前と異なる現象が生じ、問題となっている例がみら

れる。露天採掘に伴う森林の伐採や地形改変は、それまで風が吹き込まなかった地域に風が吹き込むようになり、風速が強くなったりすることによって、農作物や住宅に被害をもたらす場合がある。また、風による直接的な被害ばかりでなく、採掘場から発生する粉じんの飛散や騒音の伝搬などによって生活にも影響を及ぼし、思わぬ環境問題となっている例もみられる。

本研究は、このような露天採掘に起因する森林の伐採や地形改変が、周辺地域の風向、風速などの風体系に及ぼす影響について検討したものである。

2. 風体系変化予測のプロセス

国土の80%近くが山地であり、地形も複雑なわが国では、狭い地域の中でも気候がかなり違うことが経験的に知られている。気候学の分野では、数m～数kmの範囲の気候を微気候といい、地形と密接な関係にあることが指摘されている²⁾。微気候の要素には、気温、降水量、気圧、風、日照、日射などがあり、これらのうちでは風が最も重要な要素であるといわれている。それは、風の状態によって他の微気候要素の分布が左右されることが多いからである。また、微気候の因子としては、微気候の要素の分布に影響を与える地表の諸性質、すなわち、海拔高度、水陸分布、地表の状態(起伏、温度、植生、色など)、斜面の傾斜、付近の山地の状態などがあげられている。

* 1993年4月5日受付 6月25日受理 資源・素材学会平成3年度秋季大会および平成4年度春季大会にて一部発表

1. 正会員 工博 岩手大学助教授 工学部建設環境工学科

2. 正会員 工博 岩手大学教授 工学部建設環境工学科

キーワード: 露天採掘, 地形改変, 微気候, 風向, 風速

Fig. 1 Process of forecast for change of wind system.

露天採掘による森林伐採や地形改変は、地表の状態、斜面の傾斜、付近の山地の状態などの微気候の因子を大きく変化させる行為であり、周辺地域の微気候に少なからぬ影響を及ぼすことが考えられる。

以上のことから、本研究では、露天採掘に起因する微気候変化を予測する方法として、地形と風との関係に焦点を絞り検討を行った。Fig. 1 に風体系変化予測のプロセスを示す。その手順は、以下のとおりである。

- (1) 当該地域の気象観測所で観測された既往の気象データから風配図、風速度数分布図を作成し、原石山周辺の現況の風体系を把握する。
- (2) 開発計画などに基づいて、コンピュータグラフィックスにより鳥瞰図を作成し、地形改変状況を立体的にシミュレーションする。これにより、地形と風向の関係を目視的、定性的に予測する。
- (3) 地形と風向との関係を数量的に表現する方法を用いて、地形改変前後の風向変化を定量的に予測する。
- (4) 原石山、特に稜線部に樹林が覆われている場合には、その樹林が防風林として機能していることが想定されるので、伐採による風体系の変化、とくに防風効果の減衰を検討予測する。
- (5) 以上の結果をもとに、地形改変と風体系変化との関連を求める。

3. 既往の気象データによる現況の風体系

本研究では、2箇所の砕石山を事例として取り上げ検討した。事例Aは、宮城県石巻市の南東約2 kmに位置する砕石山を、今後20年間にわたり全山採掘方式で標高50 mレベルまで採掘を進め、その跡に得られる約20万m²の造成地を公共用地として利用しようとするもので、原石山の背後に山がある例である。また、事例Bは、岩手県西根町の北北西約1 kmに位置する砕石山で、原石山は平坦部に独立した山塊であり、周囲には平坦部に独立した山塊が点在している。現在、全山のほぼ半分が採掘されているが、最終的には全山が採掘される予定である。

当該地域の現況の風体系を把握するために、事例Aでは原石山の南東約2 km、事例Bでは北北西約3 kmの地点にある気象観測所の過去3年間の観測データをもとに、風配図および風速度数分布図を作成した。

Fig. 2, Fig. 3 は、事例A, Bの月別風配図のうち季別の代表例を示したものである。両事例とも冬期は北西方向、夏期は南東方向の風が卓越しており、春と秋には

Fig. 2 Example of wind rose for each season. (Case A)

Fig. 3 Example of wind rose for each season. (Case B)

Fig. 4 Example of histogram of wind speed for each season. (Case A)

Fig. 5 Example of histogram of wind speed for each season. (Case B)

それらの風向が相半ばする傾向がみとめられる。

Fig.4, Fig.5は、事例A, Bの月別風速度数分布のうち季別の代表例を示したものである。事例Aでは2~4 m/s, 事例Bでは0.2~2 m/sの度数が高く、年間を通じて微風の日が多いようである。なお、春先に事例Aでは10 m/sを超える南風が、事例Bでは8 m/s程度の西風が吹く日が通常、年に数日みられる。

事例Aは海に面した位置に、また、事例Bは内陸に位置するが、ともにこれまで風による被害はほとんどみられない。

4. 採掘前後の鳥瞰図による風体系変化の予測

Fig.6, Fig.7は、今回事例として取り上げたA, B2箇所の碎石山の採掘前後の状況を、コンピュータグラフィックスによる鳥瞰図で表したものである。これらのコンピュータグラフィックスは、採掘場を含む対象地域のメッシュ標高データによる3次元数値地形モデルを、任意の視点を想定して、透視図でディスプレイする方法³⁾⁴⁾を用いて作成したものである。なお、メッシュの大きさは、事例Aが37.5×37.5 m, 事例Bが15×15 mで、東西51×南北51=計2,601の格子点の標高データを入力して作成した。

採掘前後の鳥瞰図を比較すると、事例Aでは、前面の尾根の切り取りにより、北西方向から風が吹き込み易い状況になることが予測される。また、事例Bでは原石山の周囲に山がないため、いずれの方向にも風が吹き抜け易い状況になると予測される。

既往の気象データから推測すると、両事例とも、当該地域は冬

Fig. 6 Birds-eye view of pre-mined and mined-out quarry. (Case A)

Fig. 7 Birds-eye view of pre-mined and mined-out quarry. (Case B)

期は北西、夏期は南東の風が卓越していることから、定性的には冬期に北西風の影響が現れることが予測される。

5. 風体系変化の定量的予測

地形と風向との関係を数量的に表現する方法は、現在のところ試論の域をでていない。しかし、吉野⁵⁾によれば、山地の近くにあってその影響のみとめられる地点の年間最多風向頻度(F)と、16方位別の傾斜の偏差(K)との間には、(1)および(2)式のような関係が成り立つとしている。

$$F_1 = -193.15 K_1 + 18.33 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F_2 = -208.25 K_2 + 19.81 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

F_1 : 半径1 kmの地形について求めた年間最多風向(%)

F_2 : 半径2 kmの地形について求めた年間最多風向(%)

K_1 : 半径1 kmの地形について求めた傾斜の偏差

K_2 : 半径2 kmの地形について求めた傾斜の偏差

(1), (2)式により求められる年間最多風向頻度 F は、偏差 K が負で最も大きいものに対応して、年間の卓越風向頻度を示すものである。ところで、既往の気象データによれば、通常、年間を通じて風向頻度が0となる方位がみられる。そこで本研究では、16方位のうち最も風向頻度が低い方位の頻度を0とする考え方を導入し、(3)式により16方位の相対風向頻度 E を求めた。

$$E = \frac{100 \times (F - F_{\min})}{\sum_{i=1}^{16} (F_i - F_{\min})} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$F_{\min}$: 最小風向頻度(%)

F_i : 16方位別の風向頻度(%)

Table 1は、採掘前後の風向頻度の計算結果の一例として、事例Aの採掘予定地から南西に約2 km離れた地点での計算結果を示したものである。計算方法を説明すると、まず、基準地点を中心として16方位に線を引き、各線上2 km以内の最高地点と基準地点との標高差を求める。標高差を2 kmで割って、16方位別の傾斜($\tan \alpha$)を算出する。各方位の $\tan \alpha$ と16方位のこれらの平均値との差として偏差 K_2 を求める。半径1 kmについても同様の方法で、 K_1 が求められる。この方法により求められる偏差 K は、地形の傾斜の程度を示すものであり、偏差が負で絶対値が大きいほど谷が深く刻んでいる(風が吹き易い)ことを意味し、偏差が正で絶対値が大きいほど高い山がある(風が吹きにくい)ことを意味している。これらの K の値から、(1), (2)式により F を求め、(3)式から各方位の相対風向頻度 E を求める。Table 1の例では、採掘により東北東方向で最大53mの標高差の変化がみられ、その結果、2%近くの風向頻度の増加が生じると予測される。

Fig.8は、Table 1の採掘前後における風向頻度 E_2 をもとに作成した地形因子による風配図である。この地点では、地形的には北西~北東および南東~南南東方向から風が吹き込み易く、東方向からは風が吹きにくいことがわかる。採掘による地形改変に伴い北西~北東方向および南東~南南東方向の風向頻度が増加し、南~西北西方向の風向頻度が減少すると予測される。

つぎに、原石山周辺地域の地形因子による卓越風向の変化を全体的に把握するために、1/25,000の地形図に原石山を中心として200 m毎に東西22, 南北25のメッシュを切り、その格子点計550点について半径2 kmで16方位の採掘前後の最高点を求めて、風向頻度の計算を行った。

Fig.9, Fig.10は、上記の方法で求めた風向頻度より、各地点の採掘前後の卓越風向を表したものである。図中の矢印は、そ

Table 1 Example of calculation results of wind direction frequency for pre-mined and mined-out conditions.

基準地点標高：2 m

採 掘 前						
風 向	最高点 (m)	高低差 (m)	$\tan \alpha$	K_2	F_2 (%)	E_2 (%)
N	2	0	0	-0.01975	23.92	8.43
NNE	2	0	0	-0.01975	23.92	8.43
NE	2	0	0	-0.01975	23.92	8.43
ENE	155	153	0.0765	0.05675	7.99	0
E	126	124	0.0620	0.04225	11.01	1.60
ESE	105	103	0.0515	0.03175	13.20	2.75
SE	2	0	0	-0.01975	23.92	8.43
SSE	2	0	0	-0.01975	23.92	8.43
S	62	60	0.0300	0.01025	17.68	5.12
SSW	45	43	0.0215	0.00175	19.44	6.06
SW	35	33	0.0165	-0.00325	20.49	6.61
WSW	35	33	0.0165	-0.00325	20.49	6.61
W	45	43	0.0215	0.00175	19.44	6.06
WNW	42	40	0.0200	0.00025	19.76	6.22
NW	2	0	0	-0.01975	23.92	8.43
NNW	2	0	0	-0.01975	23.92	8.43

採 掘 後						
風 向	最高点 (m)	高低差 (m)	$\tan \alpha$	K_2	F_2 (%)	E_2 (%)
N	2	0	0	-0.01809	23.58	8.83
NNE	2	0	0	-0.01809	23.58	8.83
NE	2	0	0	-0.01809	23.58	8.83
ENE	102	100	0.0500	0.03191	13.17	1.71
E	126	124	0.0620	0.04391	10.67	0
ESE	105	103	0.0515	0.03341	12.85	1.49
SE	2	0	0	-0.01809	23.58	8.83
SSE	2	0	0	-0.01809	23.58	8.83
S	62	60	0.0300	0.01191	17.33	4.56
SSW	45	43	0.0215	0.00341	19.10	5.77
SW	35	33	0.0165	-0.00159	20.14	6.48
WSW	35	33	0.0165	-0.00159	20.14	6.48
W	45	43	0.0215	0.00341	19.10	5.77
WNW	42	40	0.0200	0.00191	19.41	5.98
NW	2	0	0	-0.01809	23.58	8.83
NNW	2	0	0	-0.01809	23.58	8.83

Fig. 8 Wind rose drawn by topography factor.

の方向への風の吹き易さを示している。採掘による地形改変に伴って卓越風向が変化する地点については、採掘後の卓越風向を太い矢印で示した。図をみると、地形と風の吹き込み易さが一致しており、今回採用した定量的予測法が適していることがわかる。すなわち、事例Aにおける地形因子による卓越風向は、海岸地域では南から北に吹き易く、市街地では西から東に吹き易い傾向を示している。また、山地部では尾根や谷に沿って平地の方向から吹き易い傾向を示している。事例Bの場合には、点在する山塊に

対応して卓越風向は複雑に変化しているが、地形と卓越風向との関係は一致した傾向を示している。

採掘前後での卓越風向を比較すると、事例Aでは採掘予定地の東側から南側にかけて約2 kmの範囲の22地点で風向変化がみられるが、最大で45°すなわち2方位分の変化で、極端な風向変化はみとめられない。事例Bでは、採掘場の西から南西部にかけて31地点で卓越風向の変化がみられ、最大では112.5°、すなわち5

Fig. 9 Prevailing wind direction of pre-mined and mined-out condition. (Case A)

Fig. 10 Prevailing wind direction of pre-mined and mined-out condition. (Case B)

方位分の風向変化がみられるなど、事例Aに比べ広範囲でかつ大きく風体系変化が生じると予測される。

Fig.11, Fig.12は、採掘による地形改変に伴う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、採掘前に対する採掘後の卓越風向頻度の比で、1.00 以上は採掘により風向頻度が増加することを表し、1.00 未満は逆に減少することを表している。また、太文字は卓越する風向が変化する地点を示している。卓越風向頻度の変化は、事例Aでは計 137 地点でみられ、最高で

Fig. 11 Ratio of prevailing wind direction frequency of pre-mined and mined-out condition. (Case A)

Fig. 12 Ratio of prevailing wind direction frequency of pre-mined and mined-out condition. (Case B)

36%の頻度増加、11%の頻度減少が生じると予測される。また、事例Bでは、175 地点で卓越風向頻度の変化があり、最高で30%の頻度増加、12%の頻度減少が生じると予測された。両事例とも、卓越風向が変化する地点では変化しない地点に比べて、風向頻度の変化が大きい傾向がみられる。

風向変化の定量的予測結果をまとめると、事例Aの原石山周辺地域では、地形的には西から北寄りの風が吹き易く、この地域では夏期は南東、冬期は西北西の風向頻度が高いことから、採掘場南東部で冬期に採掘による風体系変化の影響が現れ易いと予測される。しかし、この地域を吹く風の多くが微風であることや、影響する地域が山側であることなどを考慮すると、生活環境への影響は少ないものと判断される。一方、平坦部に山塊が点在する事例Bでは、原石山の採掘により採掘場南西部の広い範囲で風向変化が起これると予測される。周辺地域のほとんどが農耕地で住宅も点在していることから、農作物や生活環境への影響は大きいと考えられる。

6. 森林の減風効果の検討

露天採掘に伴う風体系変化を予測する場合、伐採される森林がどの程度の減風効果を有しているかを検討する必要がある。そこで、森林の減風効果について調べるために、岩手県雫石町の小岩井農場において、防風林前後の各点で風向、風速の観測を行った。減風効果を調べた同農場の防風林は杉の植生林で、その規模は、樹高約13m、植生間隔約3m、長さ約500m、幅約60mである。

Fig.13は、観測結果をもとに、相対風速と高倍距離との関係を示したものである。なお、相対風速とは、防風林の風上側で樹高の15倍の距離の地点における風速を基準とし、各観測点での風速を比として表したものである。また、高倍距離とは、防風林からの距離を樹高の倍数で表したもので、風上側を負、風下側を正とした。

図より、風上側-10Hでの相対風速は平均で80%程度で、すでに減風効果が現れており、防風林に近づくにつれて相対風速は減少していることがわかる。風下側では、相対風速はさらに小さくなり、減風効果がより顕著に現れている。風下側3Hで相対風速は最小となるが、防風林から離れるにしたがって、相対風速は再び増加し、減風効果が低下していくことがわかる。通常、風下側での減風効果は20H程度までであるといわれている⁶⁾。

このように、防風林による減風効果は明らかにみとめられ、相対風速が最小となる3Hでは、風速が半分以下に低下し、また、10Hでも70%程度に減少することが明らかとなった。防風林の減風効果は、樹高、風の性質、防風林の構造のほかに、防風林前後の状態などによって変化するといわれている⁷⁾。これらの要因のうち、今回減風効果を調査した小岩井農場の防風林と、両事例の原石山の森林とは、樹高や植生間隔はほぼ類似したものといえる。しかし、森林周辺の状態に関しては、かなり異なっている。すなわち、小岩井農場では周辺が平坦な牧草地であるのに対して、当

Fig. 13 Relationship between relative wind speed and proportion of distance to height of forest.

該地域周辺は丘陵状になっており、民家などの風の流れを乱す障害物も多く、地表の状態、斜面の傾斜、付近の山地の状態など微気候の因子が異なっている。したがって、小岩井農場における観測結果をそのまま当該地域に当てはめることはできない。例えば、防風林の減風効果は、周辺の地形と防風林の設置箇所との関係で大いに異なるといわれている。小岩井農場では防風林は平地に設置されているのに対して、当該地域では尾根部分にも森林が植生されている。これに関して、山本⁸⁾によれば、山稜を吹き越す風に対しては、山頂部の稜線に防風林を設置した場合には、風下側の減風効果は平地に比べてはるかに大きく、かつ広い領域が保護されるといわれている。よって、先の観測結果以上の減風効果があることも考えられる。

いずれにしても、露天採掘に伴う森林の伐採は、森林が有している防風林としての機能を奪うものである。特に稜線部の樹林の伐採は、風向変化や風速増加などの風体系変化に大きく影響することが考えられる。したがって、尾根部にまで及ぶ採掘は、森林の伐採を含めて周辺地域の風体系に及ぼす影響が大きいことを十分に考慮して、採掘計画を立てる必要がある。

7. 結 言

地形変化に伴う大規模な露天採掘が周辺地域の風体系に及ぼす影響について、2つの事例を取り上げ検討した。その結果を要約すると以下の通りである。

1) 露天採掘に伴う地形変化状況をコンピュータグラフィックスによりシミュレーションし、風向変化を定性的に予測する方法を確立した。

2) 地形と風向頻度との関係を数量的に表現する方法を用いて、地形変化に伴う風向頻度変化を定量的に予測する方法を確立した。

3) 森林の減風効果を調べ、伐採による風速への影響を推定し得る可能性を示した。

4) 尾根の切り取りが比較的少ない事例Aでは、風体系変化の影響は生活環境へは直接的には少ないと予測された。一方、平坦部にひと山だけある事例Bでは、全山採掘による風体系変化の影響は広範囲かつ大きなものになるので、防風林帯を残すなど何らかの防風対策が必要であるという結論になった。

尾根部にまで及ぶ採掘や全山採掘方式は、大量の原石採取や跡地利用などの利点を有する反面、周囲の環境に及ぼす影響も大きいと想定される。今回の研究結果からも、大幅な地形変化を伴う露天採掘が周辺地域の風体系に影響を及ぼすことが明らかである。したがって、露天掘鉱山の開発計画策定にあたっては、風体系変化の予測を含め、様々な観点から環境影響評価を十分に行う必要があるといえる。

最後に、本研究に協力された岩手大学工学部主演英夫技官ならびに大学院生の海老名弘明氏（現釧路労働基準監督署）に感謝の意を表す。また、この研究の一部は、文部省科学研究費補助金一般研究(C)（課題番号 03650511）により行われたことを付記し、謝意を表す。

引 用 文 献

- 1) 中井 裕：新版砒石，p.97-107，（1990），技術書院（東京）
- 2) 吉野正敏：小気候，p.1-7，（1986），地人書館（東京）
- 3) 白岩隆己・田中正央・藤森博美：実例パソコン立体図，p.71-118，（1986），講談社（東京）
- 4) 野上道男・杉浦芳夫：パソコンによる数理地理学演習，p.28-29，（1986），古今書院（東京）
- 5) 吉野正敏：地理学評論，Vol.25，p.103-108，（1952）
- 6) 真木太一：風害と防風施設，p.174-180，（1987），文永堂出版（東京）
- 7) 羽生寿郎・中川行夫・山本良三・坂上 務・矢吹万寿・堂腰 純：農業気象学，p.158-169，（1978），文永堂出版（東京）
- 8) 山本良三：日作紀，Vol.24，p.217-218，（1956）