足尾地区における植生変化が周辺地域の短期的な降水特性に与える影響に関する研究

EFFECTS OF THE VEGETATION CHANGE IN THE ASHIO DISTRICT ON SHORT-TERM RAINFALL CHARACTERISTICS IN ITS SURROUNDING REGION

小山 隼平¹・夏井 志康²・鈴木 善晴³

Junpei KOYAMA, Motoyasu NATSUI, Yoshiharu SUZUKI

¹学生会員 法政大学大学院 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻

²正会員 工修 (株)建設技術研究所

³正会員 工博 法政大学 准教授 デザイン工学部都市環境デザイン工学科

In order to clarify effects of the vegetation change in the Ashio district on short-term rainfall characteristics in its surrounding region, the current study conducted statistical analysis of observation data and experimental numerical simulations of precipitation systems using a mesoscale meteorological model with past and present conditions of land cover. Results of the statistical analysis show that the frequency of short-term heavy rainfall with over 30 mmh at the stations located 10 to 30 km north of the Ashio district show a slight decrease, which is a tendency totally different from other stations in the surrounding region. On the other hand, simulation results of 61 events show that the vegetation recovery in the Ashio district can cause such a frequency decrease of rainfall due to the impact of ground roughness increase on the location and frequency of convective cloud initiation, which indicates that the result of the statistical analysis can be attributed to the vegetation recovery.

Key Words : *vegetation change, land cover, rainfall characteristics, ground roughness, mesoscale meteorological model*

1. はじめに

栃木県日光市に位置する足尾地区（旧栃木県上都賀郡足尾町）では、1870年代からの足尾銅山の鉱山活動を起因とする、大規模な土壌流失や森林の荒廃現象が長年の問題となっている¹⁾。荒廃の原因としては、過度の森林伐採、製錬所からの排煙による煙害、度重なる山火事などが挙げられる。

森林の働きを失った山岳域からは大雨のたびに洪水や土石流が発生し、同地域を水源とする渡良瀬川の沿岸住民に猛威を奮ったが、1956年に設置された自熔製錬設備（亜硫酸ガスの除去装置）により煙害の被害が大幅に軽減され、この期を境に本格的な緑化・治山事業が行われるようになった¹⁾。今日では、植生盤やヘリコプター緑化工などを利用した事業の成果が実を結び、岩山と化した足尾地区周辺の山岳にも植生が回復しつつある。ここで、過去の空中写真をもとに推定された同地区における荒廃地面積率の変化を図-1に示す²⁾。同図より、同地区の荒廃地が1947年～2000年の約50年

間で概ね20～30%程度減少しており、また現地調査からも多くの地域で植生の回復が確認されている。

一方、同地域においては、1998年8月の栃木・福島豪雨（那須豪雨）をはじめ、南からの風が卓越した状況で足尾山地をトリガーとして発生した線状対流系が豪雨をもたらすケースが数多く観測されており、そのメカニズム等についてこれまで様々な解析が行われている（例えば中北ら³⁾）。しかしながら、同地域における植生状態の変遷が降水現象にどのような影響を与えているかについては、これまでほとんど調査・分析がなされていない。後藤ら^{2),4)}が、空中写真と観測値を用いて、荒廃地面積と降水量の関係を解析しているが、年降水量および年最大日降水量のどちらの観点からも、植生回復による有意な影響は確認されていない。

一般に、植生などの土地利用・土地被覆の変化は、アルベドや潜熱フラックスの変化等を通じて、年降水量や河川流量など周辺地域の中長期的な水文特性や気候特性に影響を及ぼすと考えられるが、近年は、雷雨などの短期的な降水現象も含め、様々な降水システムを

図-1 空中写真をもとに推定された足尾地区の各流域における荒廃地面積率の変化（後藤²⁾による推定結果を参考にグラフを作成）

対象とした影響評価が行われている⁵⁾。

例えば、Pitman ら⁶⁾は、複数のモデルによる再現結果と観測データを解析することでオーストラリア西部の沿岸地域における降水量減少のメカニズムについて検討を行い、同地域における植生変化（森林の減少）が地表面粗度の低下と水平風速の増加をもたらし、その結果、水蒸気の収束域が内陸部へ移動するようになったためにそのような現象が生じたと述べている。

このように、従来の研究の多くは、観測に基づいた統計的な解析あるいは数値モデルを用いた感度実験により、森林や草原の農耕地化の影響や、ヒートアイランド現象を含む都市化の影響などを明らかにしようとするものであるが、それらの影響の現れ方は、降水システムのタイプや地理的な特性、土地被覆の変化の程度や空間的なパターンなどによって様々であり、未だ包括的な結論を得るには至っていない。

また、足尾地区のように、南からの風に起因する積雲の発生頻度が高く線状対流系が形成されやすい地域においては、植生状態の変化が短期的な降水特性に対して何らかの影響を及ぼしていることも十分予想されるが、同地区の線状対流系やそれがもたらす集中豪雨を対象とした研究はほとんど行われていない。

そこで本研究では、足尾地区とその周辺地域を対象として、植生変化が短期的な降水特性に与える影響を明らかにするため、気象庁気象統計情報を用いて統計的な検討を行った。また、領域気象モデル WRF を用いて、同地区の植生状態を可能な限り再現した実験的な数値シミュレーションにより植生変化前後の降水量や降水分布がどのような変化傾向を示すかについての解析を行った。なお、本稿では、Pitman ら⁶⁾が行っているような、マルチモデル実験による有意性の検討を目的とはせず、統計的な影響評価を目的とするシングルモデル実験を実施した。

2. 気象統計情報を用いた降水特性の解析

(1) 解析に使用した観測データの概要

本研究では、気象庁気象統計情報を用いた統計解析を行った。使用したデータは、足尾地区周辺の6観測所（足尾、奥日光、土呂部、五十里、那須、宇都宮）で観測された年降水量、年最大日降水量、年最大時間降

図-2 関東周辺と足尾地区周辺の地形標高と6観測所の位置（凡例は地形標高（m））

水量で、期間は1980年～2012年（ただし時間降水量は2009年まで）とした。

関東周辺と足尾地区周辺の地形標高と各観測所の位置を図-2に示す。各観測所における降水量に対して、5年移動平均を適用した上で線形近似により回帰直線を求めた。その回帰直線の傾きについてT検定およびMann Kendall 検定を使用して、有意性の検定を行った。

(2) 足尾地区周辺の降水特性の解析

まず、一例として、4観測所（足尾、奥日光、土呂部、宇都宮）における年降水量の5年移動平均後の経年変化、30mm以上の時間降水発生回数の5年移動平均後の経年変化および、線形近似により求めたそれぞれの回帰直線を図-3に示す。同図(1)より、年降水量は4観測所のいずれにおいても回帰直線の傾きが正の値を示しており、長期的なトレンドは増加傾向にあることが分かる。また、足尾の年降水量に対する回帰直線の傾きが、他の観測所よりも相対的に大きくなっている。同図(2)では、足尾と宇都宮において過去から現在にかけて増加傾向であるのに対して、奥日光と土呂部においては減少傾向であることが特徴的である。

ここで、全6観測所における年降水量、降水量極値の回帰直線の傾きを一覧にして表-1に示す。年降水量、降水量極値のいずれも、多くの観測所で正の傾き（降水量の増加傾向）を示している。これは、断定はできないものの地球温暖化等の影響によるものと推測される。年最大日降水量について見ると、奥日光と土呂部において、負の傾きとなっている。また、年最大時間降水量について見ると、足尾、五十里、那須において正の傾きとなっており、かつ、有意水準5%で有意な増加傾向を示している。奥日光では有意水準5%で有意な減少傾向を示しており、土呂部、宇都宮に関してはそれぞれ正、負の傾きを示しているが、その傾きは他の観測所と比較して相対的に小さく、有意性が見られない。

次に、全6観測所における各閾値（10mm、20mm、30mm）以上の時間降水量発生回数における回帰直線の傾きを表-2に示す。10mm以上の降水発生回数の傾きがすべて正の値を示しており、奥日光および土呂部を除いた4地点の観測所の値は有意水準5%または10%で有意である。また、特徴的な傾向として、30mm以上

(1) 年降水量 (左から, 足尾, 奥日光, 土呂部, 宇都宮)

(2) 30mm 以上の時間降水発生回数 (左から, 足尾, 奥日光, 土呂部, 宇都宮)

図-3 各観測所における年降水量および 30mm 以上の時間降水発生回数の経年変化と回帰直線

表-1 各観測所における年降水量・年最大日降水量・年最大時間降水量に対して求めた回帰直線の傾き

観測所	標高	年降水量	年最大日降水量	年最大時間降水量
足尾	650	8.706	0.7039	0.2834
奥日光	1291	6.229	-0.5859	-0.3619
土呂部	925	3.053	-0.2579	0.001482
五十里	620	8.481	1.196	0.5085
那須	749	15.65	2.029	0.5076
宇都宮	119	5.479	0.2090	-0.03374

, : T 検定において有意水準 5 %, 10 % で有意
, : Mann Kendall 検定において有意水準 5 %, 10 % で有意

の降水発生回数の傾きにおいて足尾, 五十里, 那須が有意な増加傾向となっているのに対して, 土呂部, 奥日光では減少傾向 (土呂部では 有意な減少) を示していることが挙げられる。

これらから推測されることは, 足尾地区における植生回復の影響を含む何らかの影響により同地区の降水量が増加し, その結果, 同地区の北方への水蒸気の移流量が減少して 10 ~ 30km 北側に位置する土呂部や奥日光における降水量極値の減少をもたらしたのではないかと考えられる (土呂部は年降水量の傾きも若干小さい)。また, 隣接する土呂部と五十里の両観測所で明らかに傾向が異なるのは, 奥日光と土呂部の間に位置する標高 2500m 級の二つの山岳 (男体山・女峰山) の影響や, 周辺の地理的な要因によるものと考えられる。

なお, 移動平均の年数の違いによる影響を検証するため, 移動平均 3 年・5 年・7 年の比較を行ったが, 年降水量, 日最大降水量, 時間最大降水量, 各閾値以上の時間降水発生回数のいずれも大きな傾向の違いは見られなかった。

次に, これらの降水量の変化が足尾地区における植生回復に起因するものかどうかを検証するため, 次節では領域気象モデルを用いた数値実験により, 降水の発生頻度や風速場等に関する詳細な解析を行った。

表-2 各観測所における各閾値以上の時間降水発生回数に対して求めた回帰直線の傾き

観測所	10.0 mm 以上	20.0 mm 以上	30.0 mm 以上
足尾	0.2672	-0.00006838	0.03788
奥日光	0.2347	0.03260	-0.02414
土呂部	0.1355	-0.05990	-0.02885
五十里	0.3634	0.1281	0.03665
那須	0.6286	0.1307	0.06455
宇都宮	0.2254	0.07733	0.02024

, : T 検定において有意水準 5 %, 10 % で有意
, : Mann Kendall 検定において有意水準 5 %, 10 % で有意

3. 植生変化が降水特性に与える影響に関する数値実験の概要

(1) モデルの概要と本研究の計算条件

本研究の数値実験には領域気象モデルのひとつである WRF (Weather Research and Forecasting model) を用いた。WRF は, 米国大気研究センター (National Center for Atmospheric Research), オクラホマ大学, 米国海洋大気庁環境予測研究センター (NCEP) などによって共同開発されたモデルで, 水蒸気量, 雲, 雨, 雪, あられ, などの予報方程式からなる雲微物理モデルや, 放射モデル, 地表面モデル等の多数の力学法則が取り入れられている。

本研究では, 3 つの Domain を用いて 2-way によるネスティング計算を行った。格子間隔を 3km (Domain1), 1km (Domain2), 0.33km (Domain3) と設定し, Domain3 のグリッド数は 121 × 121 とした。表-3 に本研究で用いた WRF の物理過程のオプションを示す。初期条件及び境界条件として, メソ数値予報モデル (MSM) GPV データ (気象庁提供, 解像度 5km, 3 時間間隔の解析値) を使用し, 土壌温度, 土壌湿度, 及び海面水温は客観解析データ FNL (NCEP 提供, 解像度 30km) を使用した。地形標高には, 国土地理院提供の数値地図 50m メッシュデータ, また土地利用情報として, 国土交

表-3 本研究で用いた WRF の物理過程のオプション

雲微物理	WSM6
積雲過程	None
短波放射	Goddard shortwave
長波放射	RRTM scheme
大気境界層	Mello-yamada-Janjic scheme
地表面過程	Noah land-surface model

表-4 各植生に対して設定された物理パラメータの値

No.	分類種別	アルベド (%)	蒸発効率 (%)	粗度長 (cm)	熱慣性 (W/m・K)
3	灌漑された耕作地	17	30	15	4
5	耕作地と草原の混合	18	25	14	4
7	草原	19	15	12	3
15	混合林	13	30	50	4
16	水面	8	100	0.01	6
19	不毛, 疎らな植生	25	2	10	2
32	都市	10	10	80	3

図-4 設定領域における植生状態と領域内の地形標高
(凡例の数字は表-4 の分類 No. に対応する)

通省刊行の国土数値情報 100m メッシュデータを用いた。ここで本研究のシミュレーションで使用した WRF の主な植生分類と各植生に対して設定された物理パラメータの値を表-4 に示す。表 3 および表 4 については、多数の既存研究を参考に標準的なものを設定した。

(2) 足尾地区の植生状態の設定

本研究では、足尾地域を対象領域として同地区の植生状態を可能な限り再現した Case1957 と、近年の植生回復を反映した Case2009 の 2 つの土地利用データを使用して、実験的な数値シミュレーションを行った。Case1957 では、1976 年度の土地利用データを基に、参考文献¹⁾にある煙害地状況図を参照しながら一部地域を人為的に植生変化させることで 1957 年前後の植生状態を再現した。ここで植生変化(裸地化)に用いた土地利用分類は表-4 から No.19 (不毛または疎らな植生)を使用した。また、Case2009 では、2009 年度の土地利用データを用いて近年の植生状態を再現した。各 Domain における植生状態と地形標高を図-4 に示す (Case1957 は Domain3 のみ示す)。図中に各観測所の位置を示しており、南から足尾観測所、奥日光観測所、土呂部観測所となっている。

また、大気データとしては、2010～2013 年の 7、8 月

図-5 対象領域における日中の風向・風速及び 24 時間積算降水量の一例 (2011 年 8 月 18 日)

における降水が確認された日(全 134 日)のうち、台風による事例とシミュレーションによって対象領域における降水が確認されなかった事例を除いた 61 事例の大気データを使用した。各事例に対して 2 種類の土地利用データ (Case1957 および Case2009) を与え、計 122 ケースのシミュレーションを行った (21 時 JST から 27 時間、このうち助走時間 3 時間)。次節において数値実験の結果と考察を述べる。

4. 植生変化が降水特性に与える影響に関する数値実験の結果と考察

(1) 対象領域における風速場の傾向

はじめに、シミュレーション結果の中から代表事例として 2011 年 8 月 18 日の事例に着目し、足尾地区周辺の風の流れの傾向を見てみると、図-5 に示すように夏季の足尾地区では日中に太平洋側気候の特徴である南風が確認できる。また、同図 (1) からは足尾観測所周辺において、南から北へと進む風の流れが、東西二手に分かれる様子が見て取れる。これは足尾が備前楯山(標高 1272m)と赤倉山(標高 1442m)などの山に囲まれた谷筋にあり、その谷筋と平行に吹き込んだ風が奥日光手前の山岳にぶつかって分流したと考えられ

図-6 全 61 事例における階級ごとの時間降水発生回数の偏差
(Case2009 - Case1957)

図-7 各領域における階級ごとの降水発生回数の増減率

る。また、同図(2)では、奥日光以北において領域の西側から西風、東側から東風が吹き込んでおり、特に、土呂部観測所周辺において東西からの風の衝突が生じている。そのため、足尾地区での植生変化が風下の奥日光周辺および土呂部観測所周辺の気象現象に十分影響を与え得る状況にあると考えられる。なお、他の事例については、およそ半数の事例で 2011 年 8 月 18 日の代表事例と同様に南からの風が卓越しており、上記と同様の特徴を有していることが確認された。

(2) 数値実験による降水量の変化傾向

次に、全 61 事例、各 2 ケースのシミュレーション結果を用いて、階級ごとの時間降水発生回数およびその偏差 (Case2009 - Case1957) を求めた。図-6 に 10mm 以上 20mm 未満の時間降水発生回数の偏差および、30mm 以上の時間降水発生回数の偏差を示す。図中の赤枠は各観測所を中心とした 100km² (10km × 10km) の領域を表しており、南から足尾エリア、奥日光エリア、土呂部エリアとする。ここで、設定した各領域における階級ごとの降水発生回数 (30 × 30 グリッドにおける発生回数の合計値) の増減率を図-7 に示す。

図-6(1) および図-7 より、足尾エリアおよび奥日光エリアにて 10mm 以上 20mm 未満の時間降水発生回数の増加が確認される。また、図-6(2) および図-7 より、30mm 以上の時間降水発生回数は、足尾エリアと土呂部エリアにおいて傾向が大きく異なっており、足尾では約 20% の増加、土呂部では 40% 以上減少する結果となっている。図-6(2) では奥日光と土呂部の間の領域においても顕著な減少傾向が見て取れる。

ここで、図-7 と表-2 を比較すると、各対象領域および各階級 (特に 30mm 以上) の降水発生回数は、シミュ

図-8 0.1m/s 以上 0.3m/s 未満の上昇流発生回数の偏差

図-9 0.3m/s 以上の上昇流発生回数の偏差

レーション結果と観測値の間で増加・減少の傾向がおおむね一致する結果となった。

(3) 数値実験による上昇流の変化傾向

降水量と同様に、全 61 事例のシミュレーション結果を用いて上昇流に関する解析を行った。0.1m/s 以上 0.3m/s 未満の上昇流発生回数と 0.3m/s 以上の上昇流発生回数およびそれらの偏差 (Case2009 - Case1957) を求めた。各階級それぞれの大気下層 (高度約 1000m) と大気上層 (高度約 8000m) における発生回数の偏差を図-8、図-9 に示す。

図-8(1) および図-9(1) より、大気下層ではどちらの階級でも過去から現在にかけて足尾エリアで発生回数の増加が見られる。足尾周辺の植生が回復したことにより地表面粗度長の値が大きくなり、水平風速の減衰と収束量の増加をもたらし、その結果、同地区で対流の発生が促進されたと考えられる。図-9(2) を見ると、大気上層における 0.3m/s 以上の上昇流が、足尾エリアと奥日光エリアの南部で増加しており、その北側に位置する土呂部エリアでは減少傾向が確認される。

(4) 植生変化が降水特性に与える影響とそのメカニズムに関する考察

次に、図-9 に示した A-A' 断面での 0.3m/s 以上の上昇流発生回数の偏差 (Case2009 - Case1957) と植生回復前後の大気の流れに関する概念図を図-10 に示す。図-10 の縦軸は標高を示している。同図を見ると、図-8(1) および図-9(1) と同様に下層で植生回復後の上昇流発生回数の増加が確認できる。また、下層で上昇流の発生が顕著な足尾エリアでは、上層にも上昇流の増加傾向が見て取れる。これらの結果から、図-10(2) に示

図-10 上昇流の発生回数の偏差と植生回復前後の大気の流れに関する概念図（縦軸は標高（m））

すように、地表面付近で発生した上昇流が積雲の発生・発達を促し、その結果足尾における時間降水量極値の増加をもたらしたのではないかと考えられる。

また、奥日光上空および土呂部上空にて植生回復後の上昇流発生回数の減少、すなわち植生回復前の上昇流発生回数の増加が確認される。回復前の植生では地表面粗度長が小さく、水平風速の減衰と収束量の増加が発生しないまま山岳（男体山・女峰山）に風がぶつかり、また山岳の裏側の風が回り込むことによって、図-10(3)に示すように奥日光上空および土呂部上空にて上昇流が発生したと推察される。この上昇流が、過去の植生状態における奥日光と土呂部における時間降水量極値の増加（すなわち、過去から現在にかけての減少傾向）をもたらす原因となったと考えられる。

本研究が対象とした足尾地区では、山岳をトリガーとして複数の積雲（対流セル）が次々と発生・発達することから、Pitman ら⁶⁾が扱った事例と同様に、積雲発生領域における地表面粗度の変化による影響を強く受けたと考えられる。モデル内で植生変化に用いた No.19 の植生（不毛または疎らな植生）は、粗度長パラメータの値（すなわち地表面の摩擦）が森林の場合の 5 分の 1 と小さく、また蒸発効率も 15 分の 1 と非常に小さい。足尾地区における局地的な植生の回復は、地表面粗度長や蒸発効率を増加させることとなり、同地区における水平風速の減衰と収束量の増加、また、上昇流の発生回数の増加及び水蒸気量の増加をもたらす、積雲の発生・発達の促進による降水発生回数の増加につながったと考えられる。一方、足尾地区において降水発生回数が増加したことにより、その風下側に位置する奥日光および土呂部への水蒸気の移流量が減少し、積雲の発生・発達が抑制され、その結果、風下域における降水量の減少につながったと推察される。

5. まとめ

本研究では、足尾地区とその周辺を対象として、植生変化が短期的な降水特性に与える影響を明らかにすることを目的として、気象庁気象統計情報を用いた統計的な検討と領域気象モデル WRF を用いた数値シミュレーションを行った。その結果、足尾観測値の解析からは、同地区の 10～30km 北側に位置する観測所（奥

日光、土呂部）において、日降水量および時間降水量の極値が横ばいあるいは減少傾向にあり、さらに、強い時間降水の発生回数では減少傾向が表れており、周辺の他の観測所とは大きく異なる傾向を示すことが明らかとなった。

領域気象モデル WRF を用いた解析では、過去と現在の植生状態を再現した土地利用データを用意し、全 61 事例（計 122 ケース）のシミュレーションを行った。その結果、降水発生回数の増加、減少の傾向が観測値とおおむね一致する結果となった。また、風速場の解析からは、足尾周辺における局地的な植生の変化が上昇流の発生位置及び発生回数に影響を与え、その結果、対象領域周辺の積雲の発生・発達を促進または抑制することにより、経年変化での増加傾向または減少傾向が生じた可能性が高いことが確認された。

参考文献

- 1) 秋山智英：森よ、よみがえれ - 足尾銅山の教訓と緑化作戦，第一プランニングセンター，1990。
- 2) 後藤明：足尾地域の治山事業に伴う流出特性の変遷に関する基礎的研究，宇都宮大学工学部建設学科卒業論文，2008。
- 3) 中北英一・矢神卓也・池淵周一：1998 那須集中豪雨の生起・伝播特性，水工学論文集，第 44 巻，pp.109-114，2000。
- 4) 後藤明・池田裕一：足尾地域の治山事業に伴う流出特性の変遷に関する基礎的研究，第 35 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集（CD-ROM），2-76，2008。
- 5) Pielke, R. A., J. Adegoke, A. Beltran-przekurat, C. A. Hiemstra, J. Lin, U. S. Nair, D. Niyogi and T. E. Nobis: An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall, Tellus, 59B, pp.587-601, 2007。
- 6) Pitman, A. J., G. T. Narisma, R. A. Pielke, and N. J. Holbrook: Impact of land cover change on the climate of southwest Western Australia, J. Geophys. Res., 109, D18109, doi:10.1029/2003JD004347, 2004。

(2014. 9. 30 受付)