

高速道路における 降雨時の自動車の運転走行速度特性

服部 充宏¹・稲村 肇²・日比野 直彦³・森地 茂⁴

¹正会員 一般財団法人日本気象協会 防災ソリューション事業部 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1 サンシャイン60 55F)

E-mail:hattori.mitsuhiro@jwa.or.jp

²フェロー会員 政策研究大学院大学教授 大学院政策研究科 (〒106-8677 東京都港区六本木7-22-1)

E-mail: hajime.inamura@gmail.com

³正会員 政策研究大学院大学准教授 大学院政策研究科 (〒106-8677 東京都港区六本木7-22-1)

E-mail: hibino@grips.ac.jp

⁴フェロー会員 政策研究大学院大学教授 大学院政策研究科 (〒106-8677 東京都港区六本木7-22-1)

E-mail:smorichi.pl@grips.ac.jp

従来の雨量観測は、アメダス雨量計とCバンドレーダーが主となっていた。2009年より開始されたXバンドMPレーダーの設置および運用により、従来の雨量観測と比較して高精度で時空間解像度の高い雨量観測が行えるようになった。XバンドMPレーダーを主とした雨量観測ネットワークであるXRRAINのデータは気象分野や河川・砂防分野での研究に利用されてきたが、道路分野での研究は少ない。高速道路上の自動車速度に関する先行研究ではアメダス雨量計のデータを利用したものが主であったことから、本研究では、XRRAINのデータを利用して雨量と速度の関係を分析することを目的としている。

本研究は、高速道路上の自動車走行データとして車両感知器(トラフィックカウンター)のデータを利用し、雨量のデータとしてアメダス雨量計のデータとXRRAINの雨量データを利用した。分析対象期間は2015年4月から2016年3月までとし、対象路線を首都高速3号渋谷線と首都高速4号新宿線とした。

本研究から得られた結論は次の通り、①アメダス雨量計のデータと比較してXRRAINを利用したデータは高速道路上の降水強度を詳細に表現できる。②高速道路上の自動車の速度は降水強度の増加に伴い減少するが、降水強度の増加に伴って速度の減少率は低下する。③降水強度の増加により実現最大交通量が低下することが示唆される。

Key Words: 高速道路, 都市高速道路, 降雨, 降水, 雨量, XバンドMPレーダー, 実勢速度, 標準速度, 自動運転

1. 序論

(1) 研究の背景

近年、レーダー技術の発達と共に短時間強雨(いわゆるゲリラ豪雨)を精度よく捕らえられるようになってきた。従前の雨量の観測は主に雨量計(転倒ます型雨量計)によって測定されており、雨量計の設置地点の雨量は計測できたものの雨量計から離れた場所の雨量は雨量計の値を推計値として利用した。そのため、雨量計の設置密度が雨量をとらえる密度となっていた。しかし、雨雲の一つの水平面の大きさは1km程度である場合もあり、雨量計ではとらえきれない現象が発生している。レーダー技術の発展は面的に雨量をとらえることを可能にし、雨量計が設置されていない場所における雨量の把握を可能

にした。

レーダーは電波の中でも波長は1mから100 μ m程度のマイクロ波を利用しており、マイクロ波の中でも周波数によって分類が存在する。そのうち、2-4GHzのSバンド、4-8GHzのCバンド、8-12GHzのXバンドなどが気象レーダーの電波として利用されている。電波は大気による吸収や雲や雨滴による散乱によって減衰し、SバンドからXバンドになるにしたがって電波の減衰が大きくなる。そのため、減衰の大きいXバンドのレーダーではなく、Cバンドレーダーが従来の主力レーダーとなっていた。しかし、Cバンドのレーダーは局地的な雨の観測に不向きであり、雨量を小さく観測してしまう弱点があった。

近年、短時間強雨による被害が多く報告される中で、局地的な雨の観測が注目され始めた。特に、川の水位が

約10分間で1.3m上昇し河川敷で遊んでいた小学生や保育園児が死亡した2008年7月の兵庫県神戸市の都賀川の水難事故や、短時間強雨による下水道管の水位上昇によって作業員が死亡した同年8月の事故は短時間強雨の恐ろしさを訴えるものとなった。このような背景から、2009年より国土交通省から局地的な短時間強雨を観測できるXバンドレーダーの設置が開始されることとなった。現在、全国約40局のXバンドMPレーダーが国土交通省によって設置されており、それぞれのレーダーの観測情報がXRRAINと呼ばれるネットワークを通じて運用されている。

本研究ではレーダーによって観測された雨量を用いて高速道路上の車両の走行特性を説明しようと試みた。

(2) 研究の目的

本研究では、高速道路における降雨時の自動車の運転走行速度特性を把握するために、XRRAIN降水強度と車両感知器から得られる5分間平均速度を用いて分析を行う。また、先行研究で使われてきたアメダス雨量と車両感知器から得られた5分間平均速度を利用して、アメダス雨量と速度の分析を行う。

分析については次の3つの点を中心に行う。①アメダス雨量計とXRRAINによるデータを車両感知器に対応させて比較を行う。②詳細な降水強度を得ることができるXRRAINのデータを利用して、高速道路上の自動車速度を説明することを試みる。③降水強度別のQV図を示し包絡線と交通量について検討する。

2. 既存研究の整理と研究の位置づけ

森¹⁾は2009年に雨天時の高速自動車国道における人身事故（軽傷から死亡）に関する分析を行った。この研究では、雨天下において5つの事項を指摘している。車両の単独事故が多いこと、線形が急である部分（急なカーブや急な勾配）で事故が多いこと、晴天時と比べて90km/hから100km/hの高速度領域で事故が多いこと、高速度領域でも単独事故が多いこと、原因は運転操作の誤りが多いことが指摘されている。この研究は雨量についての記載はなく、雨天時のデータを採用している。

森ら²⁾は2011年に高速道路上において降雨時に実勢速度がどの程度低下するか、その傾向を分析した。その結果、降雨により実勢速度は低下し、走行車線は追い越し車線と比較して速度が遅いものの低下率は追い越し車線において顕著であること、5mm/hから10mm/hの雨量で5分間平均速度が80km/h以下となることが示された。この研究は、速度および交通量のデータは車両感知器のデータ、雨量のデータはAMeDASのデータを利用した。

洪ら³⁾は2011年に高速道路における、道路、交通、降

雨の条件を考慮して、任意の条件設定下での速度特性を推定できるモデルの開発を行った。この研究は東名高速道路（東京-三ヶ日区間）および東北・中央・中国自動車道（全区間）について1998年から2001年までを分析対象としている。速度および交通量のデータは車両感知器のデータを、雨量のデータはAMeDASのデータを利用した。

横関ら⁴⁾は2012年に高速道路における降雨時の安全な速度について分析し、雨量が15mm/h未満では80km/h、15-20mm/hでは60-70km/hが安全な速度であると示した。その中で、高速であるほど運転操作ミスが発生しやすいこと、雨量が少ない場合でも速度が高いと事故が発生し、雨量が多くなると速度が低くとも事故が発生する傾向を得ている。雨量のデータは1kmメッシュの降水量である解析雨量を利用した。

藪本⁵⁾は2017年に任意の降雨、道路線形、交通条件において走行速度を推定すべくデータベースの作成とそのデータの分析を行った。そこで、標準速度推定モデルを作成し、事故の要因について速度超過であるかどうかを地点ごとに考察した。この研究は、首都高速道路における車両感知器データと事故例のデータを利用し、分析対象は2016年度の1年間としている。速度および交通量のデータは車両感知器のデータを、雨量のデータはAMeDAS雨量計の東京地点を利用した。この研究では、対象とした雨量を0mmから5mmに設定し、高速道路上の5分間平均の自動車速度の85パーセントイル（以下、%tile）値を利用して雨量と速度の関係を見出している。その結果、雨量の増加とともに速度の低下が見られ、雨量と速度に線形の関係を見出している。

上述の研究のうち近年の研究を交通データごとに分類すると「車両感知器」を利用した研究、「事故データ」を利用した研究、「保険物損データ」を利用した研究の3つに分類される。車両感知器を利用した研究は雨量計のデータをもとに研究が進められていることがわかる。

本研究は車両感知器の対象としている地点の雨量としてレーダーデータを利用することで、降雨時の自動車の走行特性について理解を深めるものとした。被説明変数を速度として回帰式を作成することを目指す。

3. 分析データ

(1) 車両感知器の設置データ

車両感知器の設置データは、「距離標（キロポスト）」「車線数」「規制速度」「遮蔽の有無（トンネル部かどうか）」「平面曲率」「有効平面曲率」「縦断勾配」「有効縦断勾配」等の情報を先行研究より得られた統合交通データベースより抽出し利用することとした。

(2) 車両感知器の取得データ

研究対象である首都高速の車両感知器は超音波式車両感知器であり、車両感知器から得られるデータは「平均速度」「交通量」「大型車交通量」「時間占有率」である。このうち、本研究では「平均速度」「交通量」「大型車交通量」を利用している。

(3) アメダス雨量データ

アメダス雨量データは転倒ます型雨量計によって計測されている。転倒ます型雨量計は雨量計の中に2つのますがあり、1つのますに0.5mm相当の雨量が流れ込んだ段階でますが転倒する仕組みとなっている。データは10分毎のデータとして蓄積され、10分間の雨量や10分間の雨量を1時間の雨量に換算したものが雨量として使用されている。

(4) XRAIN雨量データ

XRAINは、国土交通省XバンドMPレーダーネットワークの略であり、既存のCバンドレーダーをMP化（水平・垂直偏波の利用）したものとXバンドMPレーダーをネットワークとして繋げ、システム化したものである。このシステムにより、対象地域の雨量を計測しその情報を提供している。XバンドMPレーダーのカバー範囲では250mメッシュ毎の雨量が1分おきに観測されている。

このデータは国家基幹技術「海洋地球観測探査システ

ム」、データ統合・解析システムDIAS（Data In-tegration and Analysis System）においてデータが蓄積され、研究に利用することができる。この研究ではDIASよりデータを取得して分析を行った。

4. 分析データの整理

それぞれのデータは、各測器の用途や性能に応じてデータ収集を行っているため、データの単位がそろっていない。そのため、一つの基準を設けてデータの基準を設定し単位を合わせる必要がある（表-1）。

表-1 分析データの対応表

測器	雨量データ	交通データ	位置情報	データ間隔
車両感知器	-	平均速度 交通量 大型車混入率	キロポスト (kp)	5分
アメダス雨量	10分間雨量 (mm)	-	緯度経度	10分
XRAIN雨量	降水強度 (mm/h)	-	緯度経度	1分
基準単位	降水強度 (mm/h)	平均速度 交通量 大型車混入率	緯度経度	5分

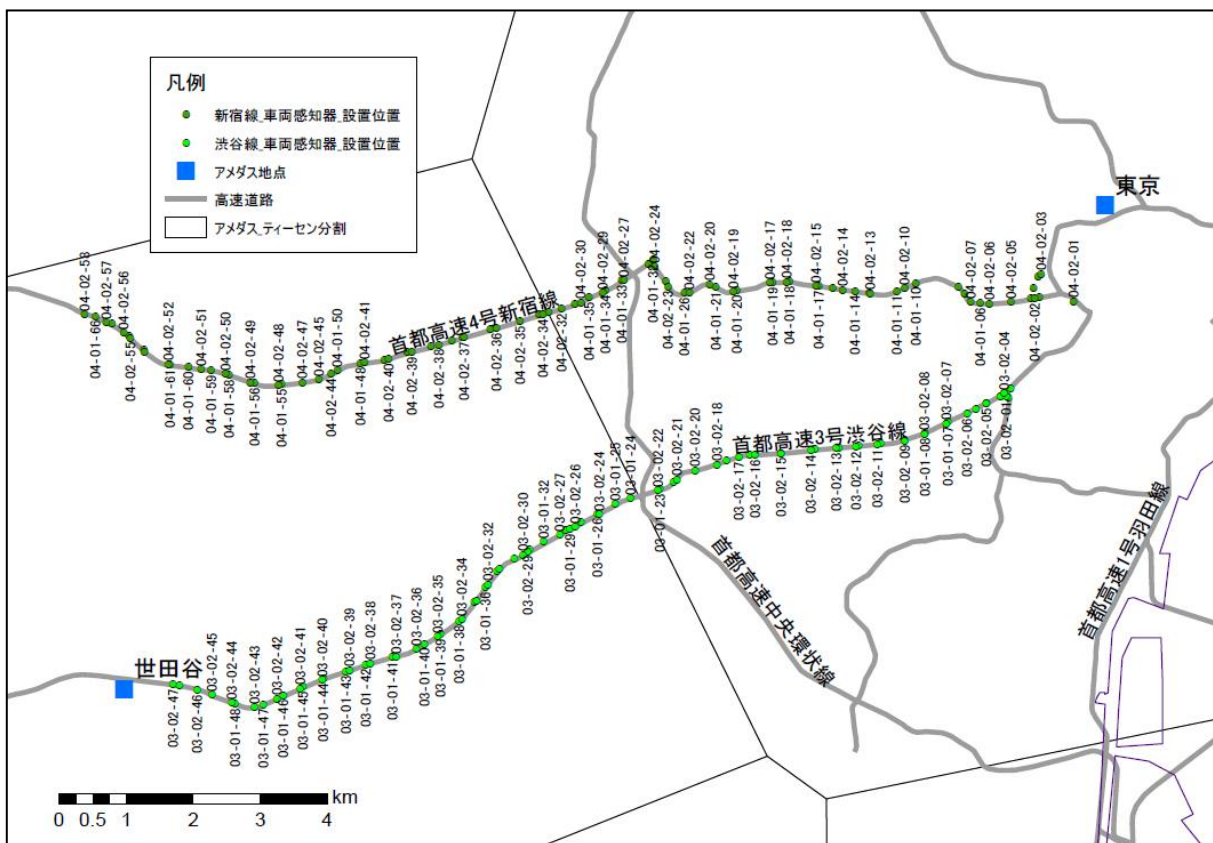


図-1 ティーセン分割による車両感知器とアメダス地点対応図

アメダス雨量の10分間雨量を降水強度へ、車両感知器の位置情報を緯度経度へ変換した。その後、各車両感知器にアメダス雨量とXRAIN雨量を対応させることで、雨量と交通データの分析を可能にした。

(1) アメダス雨量の降雨強度への変換

取得したアメダス雨量は対象時刻の前10分間の雨量(mm/10min)を記録したものである。これを車両感知器データと対応させるために、前5分間の雨量に変換した。まず、10分間雨量をそれぞれ2等分し5分間雨量にした。この5分間雨量は対象時刻の前5分間で降った雨量となっている。これをさらに1時間降水強度へ変換するため、12倍し前5分の降水強度(mm/h)を得た。このデータをアメダス降水強度として分析に利用した。表-2は雨量換算の例である。

(2) アメダス雨量と車両感知器の対応

車両感知器の交通データとアメダス降水強度を分析するために、分析対象となるそれぞれの車両感知器と近傍のアメダス雨量計を対応させた。近傍のアメダス雨量計の特定については、対象路線をアメダス雨量計の地点を基準としてティーセン分割を行った(図-1)。それによって分割されたそれぞれの領域に設置されている車両感知器に、対象アメダス雨量計を対応させた。

(3) 車両感知器の座標変換

車両感知器の交通データとXRAINのデータを分析するために、車両感知器の位置情報を緯度経度へ変換した。車両感知器の位置はキロポスト(kp)によって管理され、設置位置を特定することに利用されている。しかし、XRAINのデータは緯度経度で管理されているため、車両感知器ごとに緯度経度情報を付記する必要がある。

本研究では、車両感知器ごとの設置位置を首都高速株式会社所有の安全対策図から特定することとした。安全対策図には車両感知器の設置位置が記載されている。ここから設置位置を把握し、同じ位置を国土地理院の電子国土地理院地図から特定することで、緯度経度を得る作業を行った。

表-2 アメダス雨量換算の例

時間	前10分間雨量(mm)	前5分間雨量(mm)	降水強度(mm/h)
2015/04/13/18:50	0.5	0.25	3
18:55		0.5	6
19:00	1.0	0.5	6
19:05		0.5	6
19:10	1.0	0.5	6
19:15		0.25	3
19:20	0.5	0.25	3

(4) 車両感知器の設置位置に対応するXRAIN雨量

車両感知器の交通データとXRAIN降水強度を分析するために、分析対象となるそれぞれの車両感知器ごとに与えた緯度経度を利用して、それぞれの地点のXRAIN降水強度を抽出した。

DIASより取得した合成レーダー雨量データはTAR形式で保存されており、これを解凍した対象期間の2015年4月から2016年3月までの首都圏のデータ量は合計約1TB(テラバイト)のファイルサイズになる。この中から対象期間のデータを抽出するために降水強度抽出プログラムを作成して、降水強度を抽出した。この作業により、地点ごとの5分毎の降水強度データを得た。

5. 雨量による走行特性の変化について

(1) アメダス降水強度とXRAIN降水強度の比較検証

アメダス降水強度およびXRAIN降水強度と自動車走行速度を散布図で示す(図-2・図-3)。自動車の走行速度については85%tile値と50%tile値を示している。両方の図では共に降水強度の増加とともに速度の低下が見られるが、アメダスと5分間平均速度のうち、50mm/hから60mm/hの部分では50%tile値と85%tile値ともに平均速度が大きく出ている。

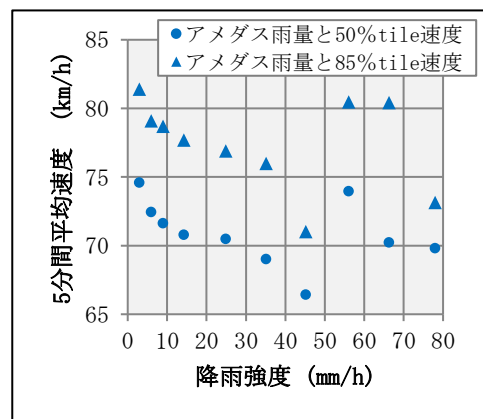


図-2 アメダスと5分間平均速度

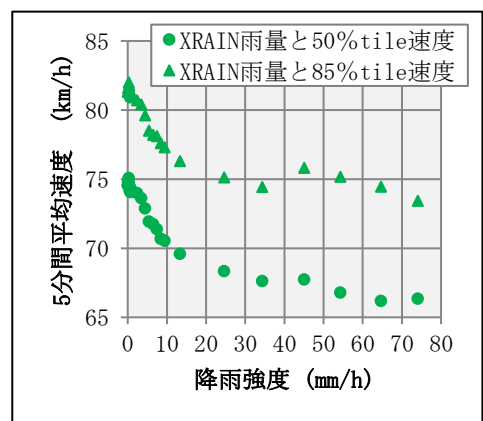


図-3 XRAINと5分間平均速度

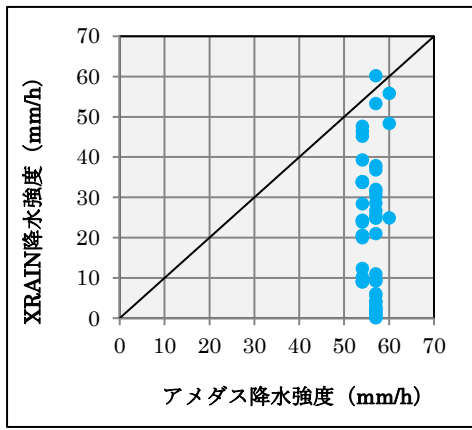


図-4 アメダスと車両感知機上の XRAIN

そのため、この値が出ている部分のアメダス降水強度とXRAIN降水強度を比較した(図-4)。ここから、アメダス降水強度では50mm/hから60mm/hの降水強度が観測されているが、XRAIN降水強度では0mm/hから60mm/hまでデータがばらついていて、ここからアメダスによって観測された雨量が高速道路上の車両感知器上の降水をとらえきれていないことがわかる。

次に、特定の降水事例(2015年8月10日15時45分から17時10分)を抽出してアメダス雨量と車両感知器上のXRAIN雨量を比較する。表-3は2015年8月10日15時45分から17時10分までのアメダス降水強度と車両感知器上のXRAIN降水強度の値である。各列にアメダス地点および車両感知器毎の雨量を示し、時間を行で示している。

また、アメダスと車両感知器の各地点は西に位置している地点から順に記載している。これを見ると、アメダスの世田谷地点では15時40分から15時50分までに降水を検知しているが、車両感知器上のXRAIN降水強度ではほとんどの地点で雨量が0となっている。また、アメダスの東京地点では16時から16時20分までに0.5mmに満たない雨を観測しているが、この時間は30mm/h以上の雨を観測している地点がある。

ここから、最も近いアメダス雨量計の値を利用しても、時間的なずれ、空間的なずれ、降水強度のずれが生じてしまい、高速道路上の雨量をとらえきれていないことがわかる。

上記分析は、降雨の影響を調査するため、渋滞流や線形の影響が大きい場合のデータを取り除いた。条件は、交通量を360~2400台/h、平均速度を50km/h以上、有効平面曲率を0、有効縦断勾配を-1~1%で固定した。

(2) 回帰分析

ここでは、XRAIN降水強度と車両感知器による5分間平均速度のうち、85%tile値および50%tile値の関係について分析した結果を示す。

図-5はXRAIN降水強度によって5分間平均速度の変化を示したものである。ここから、XRAIN降水強度によって5分間平均速度は線形の関係ではないことが示唆される。

表-3 2015年8月10日の事例検証

	アメダス地点	トラフィックカウンター地点番号														アメダス地点
		← 中央自動車道側							都心環状線側 →							
	世田谷	04_01_66	04_01_60	04_01_55	04_01_50	04_01_45	04_01_40	04_01_35	04_01_32	04_01_26	04_01_20	04_01_15	04_01_10	04_01_06	04_01_01	東京
2015/8/10 15:45	3.0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	--
2015/8/10 15:50	3.0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	--
2015/8/10 15:55	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	--
2015/8/10 16:00	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	--
2015/8/10 16:05	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.04	4.78	0.0
2015/8/10 16:10	--	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.08	0.76	0.32	6.32	25.8	22.5	0.0
2015/8/10 16:15	--	0	0	0	0	0	0	0.26	5.06	8.84	10.5	1.44	23.4	12.8	4.92	0.0
2015/8/10 16:20	--	0	0	0	0	0.04	5.9	18.4	24.7	18.7	8.06	5.64	9.58	2.58	1.06	0.0
2015/8/10 16:25	--	0	0	0	0	6.96	31.8	34.8	15.6	3.16	2.04	3.98	2.56	0.54	0.1	--
2015/8/10 16:30	--	0	0	0	0.56	21.9	15.9	12.3	5.78	1.24	1.22	1.04	0.62	0.12	0	--
2015/8/10 16:35	--	0	0	0.34	2	2.1	2.8	4.12	11.6	1.88	0.4	0.16	0.06	0	0	--
2015/8/10 16:40	--	0	0.28	1.82	1.06	1.04	1.44	2.8	4.28	0.4	0.02	0	0	0	0	--
2015/8/10 16:45	--	0.02	1.54	0.26	0.14	0.54	0.54	1.24	0.58	0.04	0	0	0	0	0	--
2015/8/10 16:50	--	0.02	0.06	0	0	0	0.04	0.1	0	0	0	0	0	0	0	--
2015/8/10 16:55	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	--
2015/8/10 17:00	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	--
2015/8/10 17:05	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	--
2015/8/10 17:10	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	--

--: 降水なし

--: 降水なし

0.0: 10分間雨量が0.5mmに満たない場合

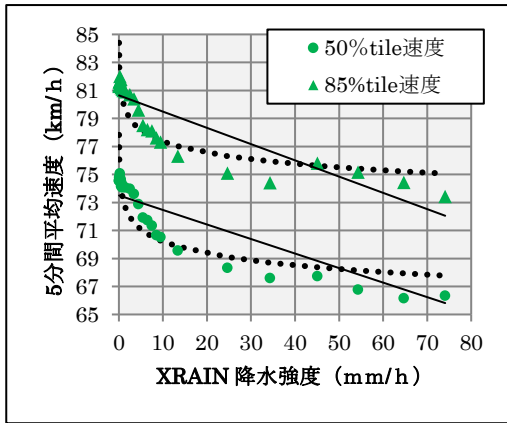


図-5 XRAIN と 5 分間平均速度

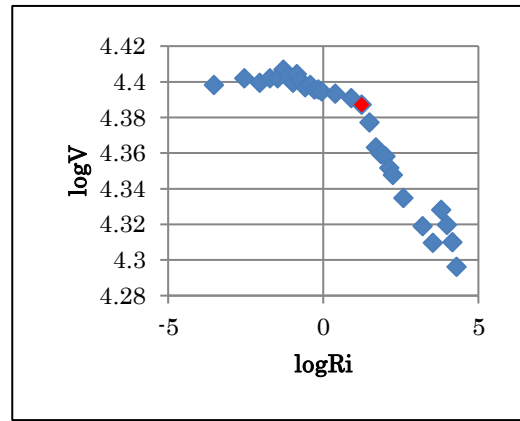


図-6 5 分間平均速度の 85%tile 値と降水強度の対数

表-4 アメダスと車両感知機上の XRAIN

回帰式		決定係数	データ数	t-値
5.1-85%tile	べき関数	0.87	31	14.21
5.2-85%tile	線形	0.76	31	-9.56
5.3-50%tile	べき関数	0.87	31	14.09
5.4-50%tile	線形	0.85	31	-12.02

ここで、線形回帰式とべき関数による回帰式を求めた。85パーセンタイル値のべき関数の回帰式を(5.1-85%tile)、85パーセンタイル値の線形の回帰式を(5.2-85%tile)、50パーセンタイル値のべき関数の回帰式を(5.3-50%tile)、50パーセンタイル値のべき関数の回帰式を(5.4-50%tile)、さらにこれらの式に関して決定係数、データ数、t値を求めたものが表-4である。まず、85%tile値について、べき関数の回帰式の決定係数が0.87であるのに対し、線形の回帰式は0.75であり、線形の回帰式と比較してべき関数の回帰式がXRAIN降水強度によって5分間平均速度をより説明できていることがわかる。同様に、50%tile値についても、べき関数の回帰式の決定係数が0.87であるのに対し、線形の回帰式は0.83であり、線形の回帰式と比較してべき関数の回帰式がXRAIN降水強度によって5分間平均速度をより説明できていることがわかる。

$$V = 80.07e^{-0.015\log R} \quad (5.1)$$

$$V = 80.65 - 0.116R \quad (5.2)$$

$$V = 73.13e^{-0.0177\log R} \quad (5.3)$$

$$V = 73.83 - 0.13R \quad (5.4)$$

ここで、

V = パーセンタイル速度 (km/h)

R = 降水強度 (mm/h)

とする。

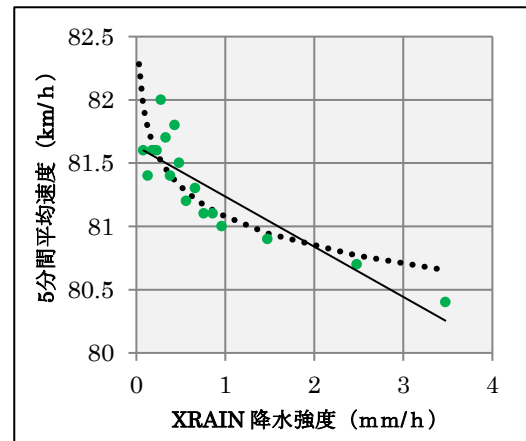


図-7 0.05mm/hから4mm/hにおけるXRAINと5分間平均速度

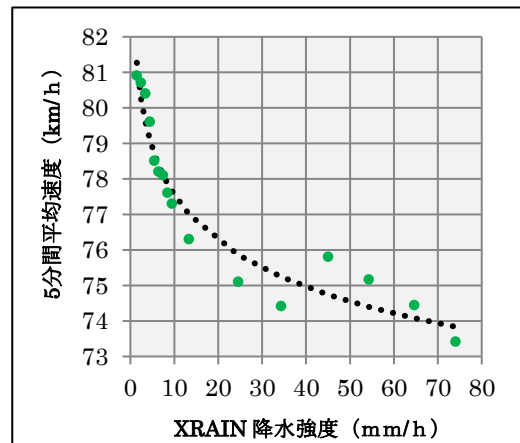


図-8 3mm/hから80mm/hにおけるXRAINと5分間平均速度

さらに、図-5を見ると、1mm/hから5mm/hの部分でべき関数の回帰式とXRAIN降水強度と車両感知器による5分間平均速度の点が離れている。そのため、85%tile値に関して降水強度を2つの区間に分けて、それぞれの回帰式を求めることを試みた。図-6は5分間平均速度の85%tile値と降水強度の対数を取ったものである。

表-5 アメダスと車両感知機上の XRAIN

回帰式		決定係数	データ数	t-値
5.5-85%tile	べき関数	0.67	18	5.81
5.6-85%tile	線形	0.71	18	5.81
5.7-50%tile	べき関数	0.93	18	13.93

ここで、変曲点を探し、その点について検討する。図-6の赤点を変曲点とするとこの点は4mm/hの降水強度に相当する点であることがわかった。そのため、4mm/h付近の降水強度を境として降水強度を2つに分けて回帰式を求めた(図-7・図-8)。降水強度が0.05mm/hから4mm/hの区間において、線形の回帰式の決定係数が0.71であるのに対し、べき関数の回帰式は0.67であり、べき関数の回帰式と比較して線形の回帰式がXRAIN降水強度によって5分間平均速度をより説明できていることがわかる。そのため、4mm/h程度の降水強度より弱い降水強度では、べき関数の回帰式と比較して線形の回帰式がXRAIN降水強度によって5分間平均速度をより説明できていることがわかる。ここで、線形回帰式とべき関数による回帰式を求めた。降水強度が0.05mm/hから4mm/hにおけるべき関数の回帰式を(5.5-85%tile)、線形の回帰式を(5.6-85%tile)、降水強度が4mm/hから80mm/hを(5.7-85%tile)、さらにこれらの式に関して決定係数、データ数、t-値を求めたものが表-5である。

$$V = 81.75e^{-0.0042\log R} \quad (5.5)$$

$$V = 81.6 - 0.37R \quad (5.6)$$

$$V = 81.75e^{-0.0042\log R} \quad (5.7)$$

a) 交通量別の回帰分析

交通量を360台/hから1320台/hと1320台/hから2400台/hに分割して上記と同様に分析を行った。結果は次の表-6の通りである。それぞれの回帰式は下記のとおりである。

$$V = \alpha_1 e^{\alpha_2 \log R} \quad (5.8)$$

$$V = \beta_1 + \beta_2 R \quad (5.9)$$

b) 大型車混入率別の回帰分析

大型車混入率を15%未満と15%以上に分割して上記と同様に分析を行った。結果は次の表-7の通りである。それぞれの回帰式は下記のとおりである。

$$V = \alpha_1 e^{\alpha_2 \log R} \quad (5.10)$$

$$V = \beta_1 + \beta_2 R \quad (5.11)$$

c) 路線別の回帰分析

首都高速3号渋谷線と首都高速4号新宿線に分けて上記と同様に分析を行った。結果は次の表-8の通りである。

それぞれの回帰式は下記のとおりである。

$$V = \alpha_1 e^{\alpha_2 \log R} \quad (5.12)$$

$$V = \beta_1 + \beta_2 R \quad (5.13)$$

表-6 交通量別の回帰分析結果

条件	降水量区間	% tile	回帰式	$\alpha 1$ $\beta 1$	$\alpha 2$ $\beta 2$	決定係数	データ数	t-値
交通量: 360台/h~1320台/h	0.05mm/h ~80mm/h	85	べき	82.14	-0.012	0.7	31	8.36
		50	線形	82.48	-0.083	0.49	31	-5.3
	0.05mm/h ~4mm/h	85	べき	75.33	-0.014	0.86	31	13.2
		50	線形	75.33	-0.103	0.74	31	-9.1
	3mm/h ~80mm/h	85	線形	83.5	-0.32	0.6	18	-5
		50	べき	82.3	-0.014	0.3	14	2.3
交通量: 1320台/h~2400台/h	0.05mm/h ~80mm/h	85	べき	76.89	-0.018	0.85	31	13.2
		50	線形	77.71	-0.146	0.86	31	-14
	0.05mm/h ~4mm/h	85	べき	70.82	-0.02	0.86	31	13.2
		50	線形	71.63	-0.147	0.87	31	-14
	3mm/h ~80mm/h	85	線形	78	-0.425	0.69	18	-5
		50	べき	81	-0.037	0.98	14	2.3

表-7 大型車混入率別の回帰分析結果

条件	降水量区間	% tile	回帰式	$\alpha 1$ $\beta 1$	$\alpha 2$ $\beta 2$	決定係数	データ数	t-値
大型車混入率: 15%未満	0.05mm/h ~80mm/h	85	べき	79.48	-0.014	0.84	31	12.6
		50	線形	79.94	-0.1	0.67	31	-7.7
	0.05mm/h ~4mm/h	85	べき	72.44	-0.018	0.88	31	14.4
		50	線形	73.08	-0.13	0.78	31	-10
	3mm/h ~80mm/h	85	線形	80.46	-0.38	0.68	18	-5.8
		50	べき	80.98	-0.021	0.86	14	8.6
大型車混入率: 15%以上	0.05mm/h ~80mm/h	85	べき	80.78	-0.016	0.86	31	13.4
		50	線形	81.43	-0.13	0.77	31	-9.9
	0.05mm/h ~4mm/h	85	べき	74.18	-0.018	0.86	31	13.1
		50	線形	74.97	-0.14	0.89	31	-15
	3mm/h ~80mm/h	85	線形	81.88	-0.38	0.7	18	-0.7
		50	べき	82.9	-0.026	0.83	14	7.69

表-8 路線別の回帰分析結果

条件	降水量区間	% tile	回帰式	$\alpha 1$ $\beta 1$	$\alpha 2$ $\beta 2$	決定係数	データ数	t-値
渋谷線	0.05mm/h ~80mm/h	85	べき	79.2	-0.016	0.82	31	11.6
		50	線形	79.94	0.13	0.88	31	-15
	0.05mm/h ~4mm/h	85	べき	72.87	-0.019	0.81	31	11.2
		50	線形	73.8	-0.15	0.93	31	-20
	3mm/h ~80mm/h	85	線形	80.7	-0.38	0.69	17	-5.6
		50	べき	82.53	-0.031	0.95	15	16.2
新宿線	0.05mm/h ~80mm/h	85	べき	81.92	-0.017	0.85	31	13.3
		50	線形	82.52	-0.13	0.69	31	-8.1
	0.05mm/h ~4mm/h	85	べき	73.88	-0.017	0.87	31	13.8
		50	線形	74.43	-0.11	0.702	31	-8.3
	3mm/h ~80mm/h	85	線形	83.83	-0.58	0.44	17	-3.3
		50	べき	83.85	-0.026	0.88	15	10.3

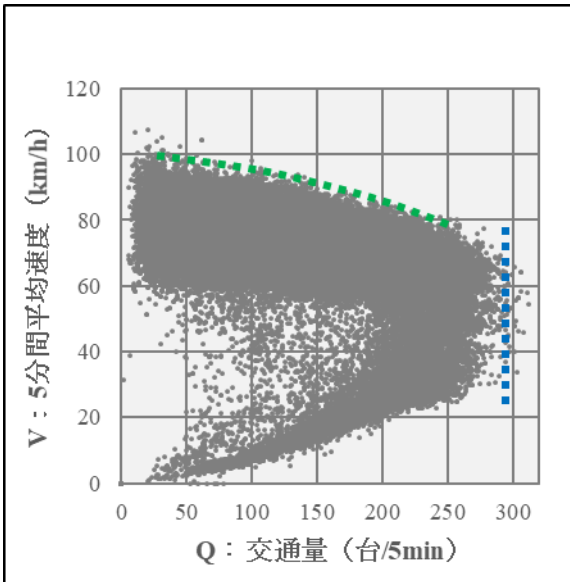


図-9 降水強度 $0\text{mm/h} < R \leq 1\text{mm/h}$ の QV 図

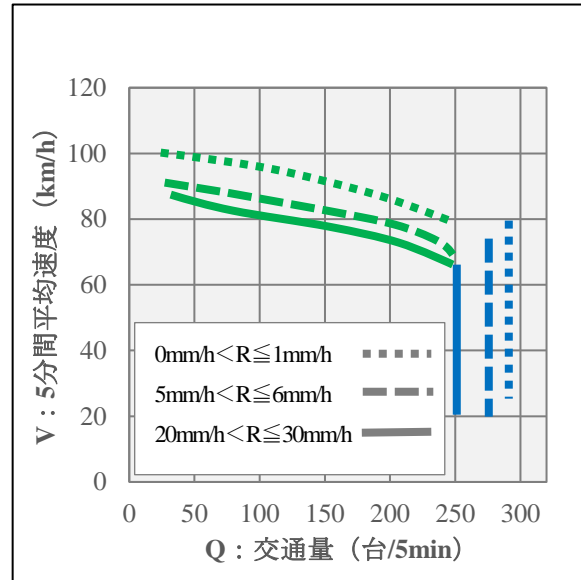


図-12 降水強度別包絡線と実現最大交通量線

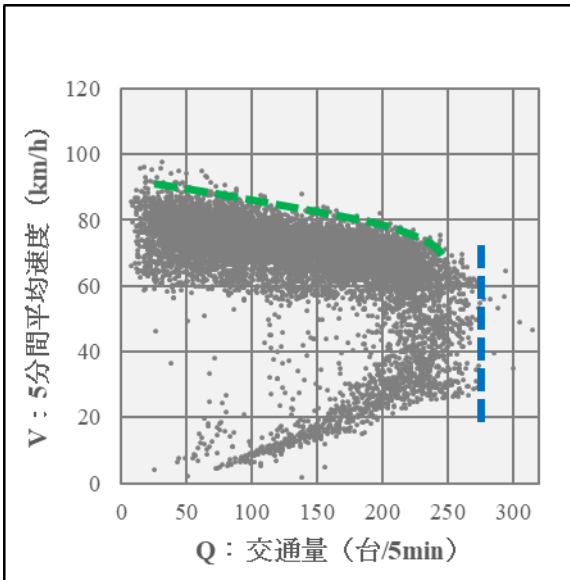


図-10 降水強度 $5\text{mm/h} < R \leq 6\text{mm/h}$ の QV 図

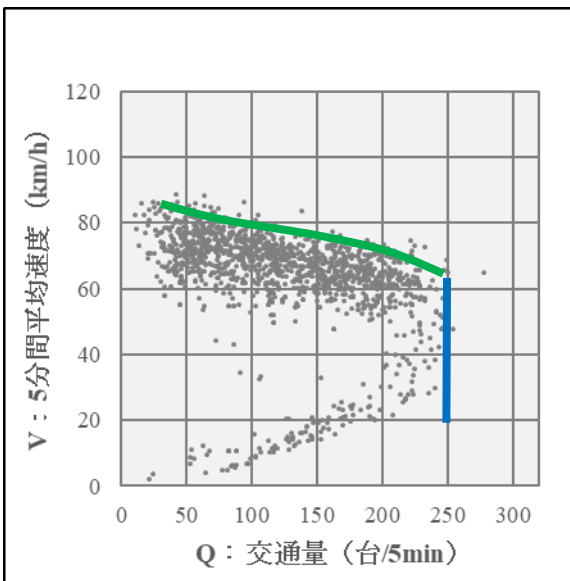


図-11 降水強度 $20\text{mm/h} < R \leq 30\text{mm/h}$ の QV 図

(3) 降水強度別のQV図

ここでは、降水強度別のQV図を分析することで、降水強度の変化による交通性能の変化を確認する。

図-9は降水強度が 0mm/h より大きく 1mm/h 以下の場合のQV図となっており、自由流における速度の包絡線を緑色、実現最大交通量を青線で表現している。図-10及び図-11は、降水強度が 5mm/h より大きく 6mm/h 以下の場合と降水強度が 20mm/h より大きく 30mm/h 以下の場合について図-9と同様に表現したものである。さらに図-12は図-9及び、図-10、図-11の自由流における速度の包絡線と実現最大交通量の線を重ね合わせたものである。これらから、降水強度の増加とともに自由流における速度の包絡線が下がることと実現最大交通量線が左にシフトしていることがわかる。

6. 結論と課題

(1) 結論

本研究では、高速道路における降雨時の自動車の運転走行速度特性を把握するために、XRAIN 降水強度と車両感知器から得られる5分間平均速度を用いて分析を行った。その際に、アメダス雨量と車両感知器から得られた5分間平均速度を利用して、アメダス雨量と速度の分析も比較検証として行った。これらの分析から「アメダスと XRAIN による高速道路上の雨量の把握」および「XRAIN 降水強度と高速道路上の自動車走行速度の関係」、「降水強度別の QV 図」について次のような知見が得られた。

- ① アメダス降水強度と XRAIN 降水強度による高速道路上の雨の把握
XRAIN による降水強度はアメダスを用いた降水強

度より高速道路上の雨量をより詳細に捉えることができ、高速道路上の走行特性をより詳細に説明できる。

② XRAIN 降水強度と高速道路上の自動車走行速度の関係

先行研究では、降水量の増加によって高速道路上の車両速度が低下し、線形の関係を見出していた。本研究では詳細な雨量情報を利用することにより、降水強度の増加によって自動車の走行速度が低下し、降水強度の増加とともに速度の低下率は減少する。

③ 降水強度別の QV 図

降水強度の増加により QV 図の自由流における速度の包絡線が下がること、及び実現最大交通量が低下することが示唆される。

(2) 課題

降水強度と高速道路上の自動車走行速度特性に関する今後の課題は、「首都高速道路での分析対象範囲の拡大」および「都市間高速道路への分析対象の拡大」、「最高速度引き上げ区間での分析」、「プローブデータの利用による自動車毎のデータ分析」が考えられる。これらについて下記の通り説明する。

- ① 降水強度の強い区間 (80mm/h 以上) では分析するためのデータが不足している。首都高速道路での分析対象路線を増やすことでデータの蓄積を図ることができる。
- ② 首都高速道路は都市高速道路であり、都市間高速道路とは特性が異なる。そのため、本研究と同様の分析を都市間高速道路で分析することで、都市間高速道路の降水強度と高速道路上の自動車走行速度特性を把握することができる。
- ③ 新東名高速道路において最高速度が 110km/h に引き上げられている。今後の安全対策を考えるため、最高速度引き上げの試行が行われている区間における降雨時の自動車の運転走行速度特性を分析することができる。
- ④ 個々の自動車の挙動を調査するため、ETC2.0やカーナビゲーションシステムに蓄積された情報等、プローブデータを取得し分析することで、自動車ごとの走行特性を把握することができる。

謝辞：本論文は筆者が政策研究大学院大学公共政策プログラム防災・危機管理コースに在籍中の研究成果を論文としてまとめたものである。

本研究の高速道路車両感知器データに関して、首都高速道路株式会社よりデータ提供をしていただいた。特に田畑大氏をはじめ、西岡友樹氏、坂田喜章氏、藪本篤氏には研究を進める上で大きな協力を戴いた。ここに深く感謝の意を表す。

本研究を進めるにあたって、筆者の所属元である一般財団法人日本気象協会の皆様、特に川上俊一氏には研究の方針とデータ取得に関するご助言を戴いた。板戸昌子氏にはレーダーデータに関する技術指導を戴いた。さらに、同社遠藤理氏にはデータ処理に関してご助力戴いた。ここに深く感謝の意を表す。

利用したデータセットは、国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」：データ統合・解析システム(DIAS)、地球環境情報統融合プログラム(DIAS-P)、並びに地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラムの枠組みの下で収集・提供されたものである。また、利用したデータセットは、文部科学省の委託事業により開発・運用されているデータ統合・解析システム(DIAS)の下で、収集・提供されたものである。さらに、そのうち利用した XRAIN データは、国土交通省より提供されたものである。(利用規約に基づく記載事項)

参考文献

- 1) 森健二：雨天時の高速自動車国道での事故,月刊交通/警察庁交通局, Vol.40, No.11, pp.86-93, 2009.
- 2) 森健二, 矢野伸裕, 横関俊也：高速道路における降雨時の実勢速度, 交通工学研究発表会論文集(CD-ROM), 31st, 2011.
- 3) 洪性俊, 大口敬：多車線高速道路における統合型速度推定モデル, 土木学会論文集D3 (土木計画学), Vol.67, No.3, pp.244-260, 2011.
- 4) 横関俊也, 森健二, 矢野伸裕, 萩田賢司, 牧下寛：雨量と事故データの分析からみた高速道路における安全な速度, 土木学会論文集D3 (土木計画学), Vol.68, No.5, L1309-L1317, 2012.
- 5) 藪本篤：首都高速道路の統合交通データベースの作成と交通環境・実勢速度の関係, 政策研究大学院大学修士論文, 2017.

(2018. 7. 31 受付)

PRECIPITATION INTENSITY AND CHARACTERISTICS OF DRIVING SPEED ON EXPRESSWAY

Mitsuhiro HATTORI, Hajime INAMURA, Naohiko HIBINO and Shigeru MORICHI

Background: More and more localized torrential rainfall occur in urban area. The new radar, called X band MP radar which can get the data in higher spatial and temporal resolution, started to install from 2009. The new radar data has been used in the weather and sabo research field. In the transportation field, there is few research to use the new radar data. **Objective:** Using X band MP radar data to analyze the relationship between precipitation intensity and traffic speed on the expressway. **Data:** The X band MP radar data were used to measure precipitation intensity at various points along the expressway. Traffic speed was measured by vehicle detectors installed along the expressway. The data period is from April 2015 to March 2016. The research covered the Metropolitan Highway No. 3 Shibuya Line and No. 4 Shinjuku Line in Tokyo. **Results:** 1) The X band MP radar data, compared with the AMeDAS rain gauge data, can explain the precipitation intensity on the expressway in detail. 2) A traffic speed on the expressway decreases as precipitation intensity increases, but the reduction rate in speed decreases as the precipitation intensity increases. 3) Analysis of the QV diagram suggests that the realized maximum traffic volume decreases due to the increase in precipitation intensity.

Key Words: Highway, Expressway, Rainfall, Precipitation, X band MP radar, Autonomous driving.