

京都大学	博士（工学）	氏名	Hwayeon Kim
論文題目	<p>Development of Quantitative Risk Prediction Method of Guerilla-Heavy Rainfall Using Parimetric Radars and its Application for the Flash Flood Guidance (偏波レーダーを用いたゲリラ豪雨の定量的危険性予測手法の開発とその鉄砲水ガイダンスへの利用に関する研究)</p>		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文はゲリラ豪雨（単独積乱雲による突然の豪雨）の早期探知・危険性予測に関し、偏波ドップラー降水レーダーによって観測される様々な物理量を用いて豪雨リスク、すなわち本研究では地上での最大降雨量を、離散定量的に予測する手法を開発した。ここでいう早期探知・危険性予測とは、上空でゲリラ豪雨のタマゴ（ファーストレーダーエコー）がレーダー観測された時点で、20、30分先のゲリラ豪雨による地上最大降雨強度の特徴を予測することを言う。この定量手法の開発により、直後に生起するゲリラ豪雨および小河川における鉄砲水の水位と言った出水そのもの激しさを定量的に予測できる道を開いたと言える。</p> <p>その方向をさらに追求すべく、実際に悲惨な鉄砲水災害のあった神戸市都賀川流域に対して、水文流出モデルを基にして出水警報発出に応用できる鉄砲水ガイダンス（FFG）をレーダー観測情報から算出できるシステムを導入した。このことにより、今後、前半で新たに開発したゲリラ豪雨の離散定量的予測手法が神戸都賀川での出水警報に利用できる道を開いた。</p> <p>本論文はゲリラ豪雨並びに出水予測に関する研究であり全7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景としてゲリラ豪雨の早期探知と危険性予測の定量化が重要であることに触れながら、積乱雲急発達メカニズムやその危険性予測、鉄砲水警報システムについてレビューするとともに、本研究の目的と構成について記述している。</p> <p>第2章では、対象とした領域およびその領域で利用する国土交通省Xバンド偏波ドップラーレーダー立体観測網（XRAIN）ならびに利用可能なデータについて記述している。</p> <p>第3章では、もたらされる地上最大降雨強度を30mm以下、30～50mm、50～70mm、70mm以上という4つの危険性レベルで予測できるよう、基礎的な解析やその物理的解釈を得ることにより、危険性予測手法を初めて定量化手法として世に問うた。今後の出水予測や避難判断への応用を考えると大きな飛躍となる。すなわち、まず、上空でゲリラ豪雨のタマゴ（ファーストレーダエコー）が発生してから5分ごとに定義されるレインステージごとに、これまでの手法で利用してきた「上空の最大レーダー反射因子（レーダーエコーの強さ）と気流の最大鉛直渦度」と「危険性レベル」の関係を線型重回帰式を基に分析し、第1レインステージでは「鉛直渦度」が最も重要な役割を果たすこと、次第にレーダー反射因子の役割が高くなり、最大降雨が持たされる直前では「レーダー反射因子」が最も重要になることを、レインステージごとの偏重回帰係数から明らかにした。レインステージが後になるにつれ「レーダー反射因子」が次第に重要になることは「上空にためられている雨滴が最終的には地上に落下してくる」ことを意味していることになる。</p> <p>また、危険レベルという定量的な関係でも初期の「鉛直渦度」の重要性を確認できた</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	Hwayeon Kim
<p>ことは、「鉛直渦度」生成に係わる推論を含めたこれまでの研究成果をより後押しすることになるとともに、その定量的な関係を初めて世に問うたことになる。</p> <p>第4章では、複数台の偏波ドップラーレーダーによって推定される3次元風速場を推定することによって初めて得られる鉛直渦度、水平収束、鉛直風速を用いた解析を進めた。すなわち、第3章では1台の偏波ドップラーレーダーによるレーダービーム方向という1次元的なドップラー速度のみから推定される擬似渦度を「鉛直渦度」として解析を進めたのに比して、より現実に近いと考えられる「鉛直渦度」を用いた重相関解析を行った。加えて新たに説明変数として利用可能となる気流の「水平収束」、「鉛直上昇速度」もまた危険性レベルを表現できる指標となり得るのか、またその役割について、重回帰分析と各説明変数の3次元分布の動的解析を行った。その結果、「擬似鉛直渦度」、「擬似水平収束」よりも複数ドップラー解析から得られる「渦度」、「水平収束」を用いた危険性レベルの方が予測精度が高いこと、「鉛直風速」を説明変数に加えた方が精度が高い事が示された。また、レインステージ初期では「鉛直渦度」が最も重要な役割（高い偏相関係数）を示すことも第3章の結果を追認する形で得られた。加えて、「鉛直風速」がレインステージ初期と後期で高い重要性があることも示した。これは、初期では上昇流、後期では下降流が積乱雲の生成と消滅に大きな役割を果たしていることを、危険性レベルとの関係を通して定量的に示した興味深い結果である。</p> <p>第5章では、5分ごとにカウントするレインステージではなく、積乱雲の発達期、成熟前期、成熟後期、消滅期というライフステージを基に、複数ドップラー解析から得られる「渦度」、「水平収束」、「鉛直風速」の役割と危険性予測精度の解析を行った。そもそもゲリラ豪雨をもたらす積乱雲の寿命は約1時間ではあるものの常に同じとは限らない。そのため5分という固定時間で定義されたステージを基にした解析・予測手法よりもライフステージを基にしたものの方が物理的解釈として理にかなっている。ここでは偏波レーダー情報から推定されるレインステージを基に、レインステージを用いた4章と同じかそれ以上の成果が得られることを示し、ライフステージ導入の重要性を示した。</p> <p>第6章では、実際に悲惨な鉄砲水災害のあった神戸市都賀川流域に対して、水文流出モデルを基にして出水警報発出に応用できる鉄砲水ガイドランス (FFG) 手法をレーダー観測情報から算出できるシステムとして導入した。FFGとは小河川から水流が溢れるまで受け入れることができる各時点の流域降雨量のことを言う。山地や森林域などの自然流域にはユニットハイドログラフモデルを基にしたTR (Threshold Runoff) とSD (Soil Moisture Deficit) を組み合わせた手法を、SDの更新と都市下水道網にはSWMMモデルを利用した。いくつかのゲリラ豪雨事例によるレーダー推定降雨情報に適用して、自然域からと都市域からの流出成分の比較解析を行った結果、これまで定性的に推定していた都賀川流域の流出特性として豪雨のうち都市域にもたらされた部分が早期に都賀川に排出され、早期の高水位ピークをもたらしていることを明らかにした。この都賀川流域でのモデル化により、今後、5章までで新たに開発したゲリラ豪雨の離散定量的に予測手法を神戸都賀川での出水警報に利用できる道を開いた。</p> <p>第7章は結論であり、各章で得られた成果について要約するとともに今後のさらなる発展への課題について整理した。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、世界をリードする形で、複数の偏波ドップラーレーダーを用いたゲリラ豪雨の早期探知・“定量的”危険性予測手法を開発すること、ならびにそれを小河川の出水予測に結びつける基礎をつくったことで、今後地球温暖化で頻度と強度が増すと予測されているゲリラ豪雨による災害を軽減するための大きなポテンシャルを有しているものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 基礎的な解析やその物理的解釈を得ることにより、レーダーによるゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測手法を初めて定量化手法として世に問うた。
2. 危険性レベルの予測には線型回帰式を用いるという初歩的な数理手法ではあるものの、偏相関係数を基に、それを積乱雲成長の様々なレインステージの状態に別々に利用することにより、ステージ初期の鉛直渦度の危険性予測における本質的な重要性を示したことは、これまでの物理的解釈を含めた研究成果を普遍化させる大きな成果である。
3. 複数台の偏波ドップラーレーダーによって推定される3次元風速場を推定することによって初めて得られる鉛直渦度、水平収束、鉛直風速を用いた解析を進めた。これにより、ゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測手法において複数台の偏波ドップラーレーダー利用を標準とする道を開いた。
4. レーダー反射因子、鉛直渦度、水平収束、鉛直風速の偏相関係数によるレインステージごとの解析は、積乱雲の成長・発達・消滅過程を定性的・定量的両面から示すものである。たとえば、2.でも述べた他に、「上空にためられている雨滴が最終的には地上に落下してくる」こと、初期では上昇流、後期では下降流が積乱雲の生成と消滅に大きな役割を果たしていることを、危険性レベルとの関係を通して定量的に示した興味深い結果である。
5. 偏波レーダーの利点である積乱雲のライフステージが推定可能であることを生かしたライフステージ、それをベースにした解析にまで及んでいることは物理的解釈として理にかなっており、理工融合の大事な視点を示している。
6. 水文流出モデルを基にして出水警報発出に応用できる鉄砲水ガイドンス (FFG) をレーダー観測情報から算出できるシステムを導入した。今後、前半で新たに開発したゲリラ豪雨の離散定量的予測手法が鉄砲水の出水警報に利用できる道を開いた。

本論文は、上記の様に社会基盤工学と気象学を融合した論文であり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年8月2日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。