

令和元年6月5日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06240

研究課題名(和文)人為的豪雨抑制手法の有効性・信頼性・実施可能性の評価・検証に関する数値実験的研究

研究課題名(英文) Numerical experimental study on the evaluation and verification of the effectivity, reliability and feasibility of artificial mitigation techniques applied to torrential rains

研究代表者

鈴木 善晴 (SUZUKI, Yoshiharu)

法政大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：80344901

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、メソ気象モデルを用いた数値実験を実施するとともに、簡易ドライアイス製造機を用いた屋外散布実験を実施し、防災・減災対策としての人為的豪雨抑制の早期実用化を目指すものである。複数のシーディング手法について検討を行った結果、実施規模が比較的小さくても十分な抑制効果が得られ、かつ降水促進リスクが低い実施条件を明らかにすることができた。同時に、シーディングが上昇気流の発達を抑制し得ることなど降水抑制メカニズムに関する新たな知見を得た。また、ドライアイスパウダーの効率的な封入方法や散布方法に関する試行実験を行うことで、今後のドライアイス散布システムの改良・実用化に向けた知見を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温暖化に起因する局地的豪雨の頻発化や台風の強大化によって、今後、気象災害が地球規模で増加すると懸念されている。我が国においても、集中豪雨による土砂災害や都市域への浸水被害など数多くの被害が発生しており、極端な降水現象に対する防災策、減災策の必要性が強く叫ばれている。そこで本研究では、クラウド・シーディングによる降水抑制の有効性と信頼性(降水促進リスク)を定量的に評価するため、複数の散布手法を想定したシーディングに関する実験的な数値シミュレーションを行った。さらに、簡易ドライアイス製造機を用いた屋外散布実験を実施し、防災・減災対策としての人為的豪雨抑制の早期実用化に向けた検討を行った。

研究成果の概要(英文)： For the purpose of the early practical use of artificial mitigation techniques applied to torrential rains, this study conducted numerical experiments using nonhydrostatic mesoscale meteorological model, and also attempted some dispersion experiments using portable devices for producing dry ice powder. As a result of the comparison among various cloud seeding techniques based on simulation results, torrential rains can be mitigated by relatively small-scale cloud seeding implementation with low risk of rainfall promotion depending on the implementation conditions. As new findings regarding the mitigation mechanism, it was found, for example, that the development of ascending air currents and cumulus clouds in the atmosphere can be suppressed by the down force of falling precipitation particles produced by cloud seeding. Some findings were also obtained, as a result of some trial experiments, toward the improvement and practical use of the dispersion system of dry ice powder.

研究分野：水工学，水文学，気象学

キーワード：集中豪雨 気象制御 シーディング メソ気象モデル ドライアイス 線状降水帯

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の評価報告書によれば、気候システムが温暖化していることは疑いのない事実であり、温暖化に起因すると思われる局地的集中豪雨の多発や水資源の偏在化による旱魃など、現在および将来における地球規模での異常気象災害の頻発化が指摘・懸念されている。我が国においても、局地性が極めて強く時間雨量が 80 ~ 100 mm を越えるような短時間豪雨 (いわゆるゲリラ豪雨) や大型台風の発生頻度が近年増加傾向にあり、毎年のように人的・経済的被害をもたらしている。新型降雨レーダーの都市域への配備や、甚大な災害発生を想定した特別警報の運用開始など、行政や研究機関により様々な防災対策が試みられているものの、従来の安全基準で整備された都市社会システムにおいて豪雨のさらなる頻発化や台風の強大化に対処することは極めて難しいと言わざるを得ない。

現在、気候変動の将来予測とその影響評価、および人的・経済的被害を防止・軽減するための「適応策」に関する研究が盛んに行われており、それらの成果に基づいた早期の対策実現が期待される。しかしながら、近い将来に有効な「適応策」が策定されたとしても、その実現には都市社会システムの抜本的な見直しや再構築が必要となる可能性が高く、施工完了までには相当な年月と費用を要することが予想されることから、我々は単に社会基盤の整備 (国土強靱化の推進) に期待するだけでなく、現在の科学技術で実現可能なあらゆる手段を駆使して人的・経済的被害の最小化を追求することが必要であろう。

2. 研究の目的

上記のような問題意識をモチベーションとして、本研究の代表者はこれまで、気象モデルによる数値実験に基づいた人為的豪雨抑制手法の開発に関する研究に取り組んで来た。本研究は、これまでの成果をベースに人為的豪雨抑制の早期実用化を実現すべく、数値実験に基づいたクラウド・シーディングの効果検証を試みるとともに、意図した効果が得られない場合のリスク評価を行うことで、有効性および信頼性の高い豪雨抑制手法の確立を目指すものである。

クラウド・シーディングとは、自然の雲にドライアイス等の降水粒子の「種 (シード)」となる物質をまいて雲の内部構造を変化させる技術であり、シーディングを用いて人為的に雨や雪を降らせることを人工降雨・人工降雪・降水調節などと呼ぶ。1940 年代以降、欧米諸国を中心として数多くの業務実験や学術的研究が行われ、我が国においても、九州大学や防衛大学、電力会社などによって古くから人工降雨・降雪の実験が行われている。2000 年代後半には、大都市周辺における水不足の懸念を受けて、文科省や気象研究所を中心に水資源の確保を目的とした大規模なプロジェクトが実施されている。

一方で、集中豪雨の緩和・抑制を目的とした本格的な実験や研究についてはこれまでほとんど実施されていない。本研究は、降水量を人為的に増減させることを目的とするのではなく、地上に到達する降水の分布を時間的・空間的に分散させることで集中豪雨の強度を緩和・抑制するという発想に基づいているが、このような発想はシーディングに関する従来の研究にはないもので、本研究の代表者がこれまでの取り組みを通して得た貴重な成果であり、本研究の最大の特色である。シーディングに伴う降水粒子の増減メカニズムや、豪雨の発生・発達に一定の変化を与える効果的なシーディングの実施条件を明らかにすることができれば、大がかりな制御を伴わずとも高い豪雨抑制効果を持つ気象制御手法の確立が可能になり、画期的な防災・減災策として社会に大きなインパクトを与えることが期待される。

3. 研究の方法

本研究では、ドライアイス散布を想定した強冷法シーディングによる豪雨抑制効果に関する感度分析やメカニズム解析を行うため、非静力学メソ気象モデル WRF を用いた数値実験を行った。さらに、ヨウ化銀等の化学物質散布を想定した人工核法シーディングによる豪雨抑制効果に関する感度分析やメカニズム解析を行うため、化学物質モデルを統合した化学輸送モデル WRF-Chem を用いた数値実験を実施した。

強冷法・人工核法の両者において、抑制効果が得られるケースと得られないケースではどのような実施条件の相違があるのか、また最大限の抑制効果を得るためには、どのタイミングで、どの場所に、どの程度の規模でシーディングを実施すればよいかを検討した。また、豪雨抑制効果が得られた事例を対象に抑制メカニズムの解析を行い、氷晶や霰などの降水粒子がシーディングによってどのような挙動の変化を示すかを解析することで、豪雨の発生・発達・停滞の各プロセスにシーディングがどのような影響を与え得るのかを検討した。

一方、実際にシーディングを実行する際には、意図に反して豪雨が強化される可能性があり、それが災害発生の引き金となることも考えられる。人為的豪雨抑制手法の早期実用化のためには十分な豪雨抑制効果がありかつ降水促進リスクが極めて小さい手法の確立や実施条件の解明が必須である。本研究では、様々な実施条件に対する多数のシミュレーションを実施し、シー

ディングに伴う降水増減の定量的評価・確率的評価を行うことで、豪雨抑制効果の最大化と降水促進リスクの最小化を同時に満足することが可能かどうかについて検討した。

実際にシーディングを実行する際には、降水粒子の発生状況をリアルタイムに監視しながら実施のタイミングやシーディング領域の判断を行うことが必要である。近年の都市域における豪雨の頻発化を受けて、我が国では、新型の降雨レーダー（XバンドMPレーダー）による観測ネットワーク（XRAIN）の整備が進められており、本研究では、XRAINによる観測データおよび自己組織化マップSOMを用いて、積乱雲のタマゴ（上空で発生した初期の雨域）の発達・非発達を判別・予測するためのクラスタリング手法について検討した。

シーディングによる豪雨抑制効果を検証するための第一段階として、本研究では、簡易ドライアイス製造機を用いた屋内・屋外散布実験を実施した。はじめに、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーに設置されている降雨発生装置を借用し、ゴム気球と簡易ドライアイス製造機を用いた屋内散布実験を実施した。次に、所属研究機関（法政大学）のキャンパス内において、係留気球および簡易ドライアイス製造機を用いた屋外散布実験を実施した。時間や気圧の設定値に応じてドライアイス散布のタイミングを指定することが可能な装置の利用方法や、ドライアイスパウダーのより効率的な封入方法や散布方法に関する試行実験を行った。

4. 研究成果

初年度の平成27年度は、上記のモデルを使用してゴム気球等による物質散布（離散的・動的シーディング）をモデル内でより詳細に表現するため、計算フローの改良や計算要素の追加等により従来の数値実験をさらに高度化したうえで、線状対流系を含む様々な豪雨事例に対して感度分析および降水抑制・降水促進メカニズムの解析を行った。

その結果、WRFを用いた強冷法シーディングでは、低い操作倍率による離散的・動的シーディングにおいても10%以上の抑制効果が得られたことから、限られたシーディング散布量および領域を限定した比較的小規模なシーディングにおいても一定の豪雨抑制効果が期待できることが示された。また、WRF-Chemを用いた人工核法シーディングにおいても、エアロゾルが降水過程に影響を与え降水量が大きく減少するケースが確認された。さらに、両手法の抑制メカニズムの違いを比較した結果、シーディングにより直接的に生成される降水粒子の種類は異なるものの、それら降水粒子の落下が積雲内の鉛直風速を弱めて、高高度における霰の成長を抑制することが両手法における共通のメカニズムであることが確認された。

平成28年度は、ゴム気球等による物質散布（離散的・動的シーディング）が表現可能となるよう改良を加えたモデルを使用して、線状対流系を含む様々な豪雨事例に対して感度分析および降水抑制・降水促進メカニズムの解析を行った。また、シーディングによる豪雨促進リスクの定量的評価を行うことで抑制効果が高かつ促進リスクが小さいシーディング実施条件の検討を行った。さらに、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーにおいて、ゴム気球および簡易ドライアイス製造機を用いた屋内散布実験を実施した。

その結果、WRFを用いた強冷法シーディングでは、従来の面的シーディングによる氷晶核数濃度の操作倍率が大きい大規模なシーディングではなく、操作倍率が小さく実施領域が限定された比較的小規模な（離散的・動的）シーディングであっても一定の降水抑制効果が得られる可能性があることが示唆された。また、抑制メカニズムの解析を行った結果、線状降水系の事例では鉛直風速の弱体化が降水抑制に繋がることが確認された。さらに、降水促進リスクの観点からは、対象とする事例を線状対流系に限定することによってリスクが低下すること、またシーディング実施領域を鉛直流が発生している領域に限定することによってさらにリスクが低下することが確認された。

平成29年度は、前年度に引き続き、ゴム気球等による物質散布（離散的・動的シーディング）が表現可能となるよう改良を加えたモデルを使用して、線状対流系を含む様々な豪雨事例に対して感度分析および降水抑制・降水促進メカニズムの解析を行った。特に領域の設定高度を従来よりも高高度に変更することで、高層における氷晶の生成（オーバーシーディング状態の形成）やその風下側への移流（降水域の分散化）などの現象がより明確となり、降水抑制メカニズムに関する新たな知見を得ることができた。

また、自己組織化マップSOMに入力する偏波レーダ情報、大気場指標、降水粒子の分布割合、ドップラー渦度のデータの組み合わせを検討することで、積乱雲のタマゴの発達・非発達に関する判別精度を向上し、シーディングを実施するタイミングや領域の判断を行う際に必要となるリアルタイムの予測手法の開発に取り組んだ。なお、平成29年度は、ゴム気球および簡易ドライアイス製造機を用いた屋外散布実験を実施する予定であったが、研究代表者の業務上の都合により実験実施を断念するとともに、補助事業期間の1年延長を申請した。

平成30年度は、これまで検討を行った複数のシーディング手法の中でも降水促進リスクが低

く実施可能性が高いと考えられる「気流シーディング」に着目し、線状降水帯を中心とした様々な豪雨事例に対する感度分析を行うとともに、降水抑制メカニズムに関するより詳細な解析を行った。積雲発生初期（上昇気流の発達期）および積雲成熟期（上昇気流のピーク時）のそれぞれにおいて上昇気流発生領域を中心にシーディングを行うことで、実施規模が比較的小さくても十分な抑制効果（-20～30%程度）が得られかつ降水促進リスクが低い実施条件を明らかにすることができた。同時に、シーディングが上昇気流および積乱雲の発達を抑制し得ることなど降水抑制メカニズムに関する新たな知見を得た。

また、前年度に引き続き、シーディングを実施するタイミングや領域の判断を行う際に必要となるリアルタイムの予測手法の開発に取り組み、SOM や K-means 法、Ward 法を用いたクラスタリング手法の検討、偏波レーダ情報や大気場指標等の入力データの組み合わせの検討を行うことで、従来の手法と比較して積乱雲のタマゴの発達・非発達に関する判別精度・予測精度を向上させることができた。さらに、所属研究機関（法政大学）のキャンパス内において、係留気球および簡易ドライアイス製造機を用いた屋外散布実験を実施し、時間や気圧の設定値に応じてドライアイス散布のタイミングを指定することが可能な装置の利用方法や、ドライアイスパウダーのより効率的な封入方法や散布方法に関する試行実験を行うことで、今後のドライアイス散布システムの改良・実用化に向けた新たな知見を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

鈴木善晴：強冷法クラウド・シーディングによる豪雨抑制効果と降水促進リスクに関する数値実験，水循環 貯留と浸透，雨水貯留浸透技術協会，104，6-10，2017，査読無
(http://arsit.or.jp/mizu_vol104).

八木柊一郎，鈴木善晴，横山一博：豪雨を対象とした強冷法シーディングによる降水抑制効果と促進リスクに関する研究，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.73，No.4，pp. 1_259-1_264，2017，査読有 (doi: 10.2208 / jscejhe.73.1_259).

横山一博，尾中俊之，鈴木善晴：積雲発生初期のクラウド・シーディングによる豪雨抑制効果とそのメカニズムに関する研究，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71，No.4，pp. 1_499-1_504，2015，査読有 (doi: 10.2208 / jscejhe.71.1_499).

小山隼平，夏井志康，鈴木善晴：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，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71，No.4，pp. 1_481-1_486，2015，査読有 (doi: 10.2208 / jscejhe.71.1_481).

〔学会発表〕(計15件)

中村嶺太，鈴木善晴：上昇気流に着目したシーディング手法による豪雨抑制効果とそのメカニズムに関する研究，第46回土木学会関東支部技術研究発表会，2019。

青木光一，鈴木善晴：SOM と大気場情報に基づいた積乱雲のタマゴの発達リスクに関する研究，第46回土木学会関東支部技術研究発表会，2019。

岡寄智也，小山隼平，鈴木善晴：擬似温暖化手法を用いた降水システムに対する都市化や地球温暖化の影響に関する研究，第44回土木学会関東支部技術研究発表会，2017。

丸山葉，三村昂大，鈴木善晴：豪雨の捕捉や予測に向けたひまわり8号による衛星観測情報の利用可能性に関する検討，第44回土木学会関東支部技術研究発表会，2017。

八木柊一郎，鈴木善晴，横山一博：豪雨の抑制を目的とした複数のシーディング手法による有効性・信頼性に関する研究，水文・水資源学会2016年度研究発表会，2016。

三村昂大，岡田翔太，鈴木善晴：SOM 及び積雲発生初期の大気場情報に基づいた豪雨の発達リスクに関する研究，水文・水資源学会2016年度研究発表会，2016。

八木柊一郎，鈴木善晴，横山一博：複数の散布手法を想定したシーディングによる豪雨抑制効果の有効性・信頼性に関する研究，土木学会第71回年次学術講演会，2016。

三村昂大，岡田翔太，鈴木善晴：SOM によるクラスタ解析に基づいた局地的豪雨の発生発達可能性に関する研究，土木学会第71回年次学術講演会，2016。

横山一博，鈴木善晴，八木柊一郎：領域気象モデルWRFを用いたシーディングによる豪雨抑制効果に関する数値実験，第34回日本自然災害学会学術講演会，2015。

三村昂大, 中根武志, 鈴木善晴: SOM を用いたクラスター解析による局地的豪雨の発生・発達リスクに関する研究, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015 .

八木柗一郎, 鈴木善晴, 横山一博: 豪雨抑制を目的とした積雲発生初期のシーディングにおける有効性・信頼性に関する数値実験, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015 .

小山隼平, 石綿勇人, 鈴木善晴: 首都圏における都市内構造の経年変化が短期的な降水特性に与える影響に関する数値実験, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015 .

三村昂大, 鈴木善晴: X-RAIN 及び MSMGPV に基づいた局地的豪雨の発生・発達構造に関する解析, 水文・水資源学会 2015 年度研究発表会, 2015 .

八木柗一郎, 鈴木善晴, 横山一博: 積雲発生初期のシーディングによる豪雨抑制効果と降水促進リスクに関する数値実験, 水文・水資源学会 2015 年度研究発表会, 2015 .

小山隼平, 石綿勇人, 鈴木善晴: 首都圏における都市化の進展が短期的な降水特性に与える影響に関する数値実験, 水文・水資源学会 2015 年度研究発表会, 2015 .

6 . 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 八木 柗一郎, 横山 一博, 小山 隼平

ローマ字氏名: Shuichiro YAGI , Kazuhiro YOKOYAMA , Junpei KOYAMA

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。