



ムーンショット型研究開発事業  
新たな目標検討のためのビジョン策定

「気象制御可能性に関する調査研究」  
調査研究報告書

令和3年7月

目標検討チーム「気象制御可能性検討チーム」

チームリーダー：三好 建正（理化学研究所 計算科学研究センター チームリーダー）

サブリーダー：澤田 洋平（東京大学 大学院工学系研究科 准教授）

チームメンバー：坂上 貴之（京都大学 大学院理学研究科 教授）

富田 浩文（理化学研究所 計算科学研究センター チームリーダー）

牛尾 知雄（大阪大学大学院工学研究科 教授）

寺崎 康児（理化学研究所 計算科学研究センター 研究員）

前島 康光（理化学研究所 計算科学研究センター 特別研究員）

Sun Qiwen（理化学研究所 計算科学研究センター 大学院生リサーチアソシエイト）

## 目次

### I. MS 目標案のコンセプト

1. MS 目標案
  - 1.1 MS 目標案の名称
  - 1.2 実現したい 2050 年の社会像
2. Targets (当該 MS 目標の達成シーン。2050 年 (及び 2030 年) に何が実現しているか)
3. 当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等
  - 3.1 当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが、今必要である理由
  - 3.2 目標達成の社会的意義
  - 3.3 当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要
4. 当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

### II. 統計・俯瞰的分析

1. 当該 MS 目標を達成するための課題 (科学技術的・社会的課題) や必要な取組
2. 当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰
3. 当該目標に関連する研究開発の動向 (全体)、海外動向及び日本の強み

### III. 社会像実現に向けたシナリオ

1. 挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題
2. 2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標 (マイルストーン)、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果)
3. 目標達成に向けた国際連携の在り方
4. 目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方
5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)  
(目標達成に向けて取り組む上での倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

### IV. 結論

### V. 参考文献

## I. 提案する MS 目標案のコンセプト

### 1. MS 目標案

#### 1.1 MS 目標案の名称

「2050 年までに、気象を制御し、豪雨や台風などの気象災害の恐怖から解放された社会を実現」

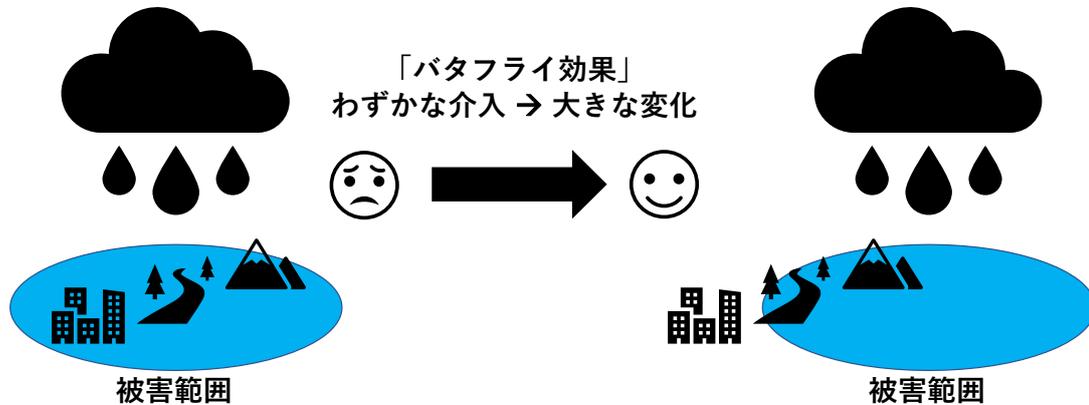
#### 1.2 実現したい 2050 年の社会像

気候変動が進み、豪雨や台風などの気象災害が増えている。豪雨の場所をずらして人里に影響のない場所で洪水や土砂崩れを起こせば、気象災害という理不尽な不遇に怯えることはなくなる。すべての豪雨を完全に思い通りに制御できなくとも、能動的な介入操作を連続的に行い、少しでも望む方向へ制御しながら、それに応じた対応、人間活動の最適化を同時に行うことで、大幅に気象災害リスクを減らす。このように気象災害の恐怖から解放された社会が、2050 年の社会像である。

都市機能や、風力・太陽光などの自然エネルギー施設は、大気とエネルギーをやりとりし、大気の運動を変化させる。これらを介入の方法として組織的に操作することで、スマートシティとの一体的な最適化を行い、サイバーと現実が高度に融合した超スマート社会 Society 5.0 の未来像を実現する。台風や豪雨の被害を防いだり、野外イベントで雨を避けたり（科学的な定量的な坊主）、気象の影響を受ける様々な人間活動でロスを減らし便益を増やす。予測に基づいた受け身の対応しかできなかったものが、能動的に先手を打って制御することで発想が逆転し、価値観が根底から変化する。産業・文化・社会にもたらされる価値は大きい一方、気象は神が司る自然そのものという伝統的な世界観を覆す点で、宗教や倫理面も含めて人類の総合的發展を実現する。

気象の影響は大きく、太古の昔より予測が望まれ、雨乞い等の介入制御が望まれてきた。これまで、人工降雨や雷誘導等に関する研究が行われてきたほか、地球規模のジオエンジニアリングに関する議論や研究も進んでいる。ここでは新たに「バタフライ効果」として知られる気象のカオス性、つまり蝶の羽ばたきのような小さな変化が時間とともに膨らみ後の大きな変化を生む性質をテコのように活用する。制御の対象を豪雨や台風といった局所的・短時間の気象に絞り、地球規模に永久に影響を与えるような介入制御は考えない。

## 気象を制御し、豪雨や台風などの気象災害の恐怖から解放された社会



2. Targets (当該 MS 目標の達成シーン。2050 年 (及び 2030 年) に何が実現しているか) 以下 2 点を 2050 年に向けた Targets とする。

- 2050 年までに、豪雨や台風などの気象の場所や強度を変化させる介入制御によって気象災害の発生、被害を大幅に軽減する。
- 2050 年までに、ロケット発射時や果物収穫時の雨のタイミングをずらすなどの気象介入制御技術により、幅広く便益を得る。

このような達成シーンの実現可能性を以下で論じる。1950 年代から始まったコンピュータを使った数値天気予報は、当初 30 年ほどの間に数理モデルや計算アルゴリズムが進化し、その後 80 年代頃からの 30 年ほどの間に予測可能性の研究や方法が進展した。これにより、数値天気予報の精度は着実に向上してきた。予測向上のために、実測データを数理モデルに取り込むデータ同化が高度に発展したが、データ同化の方法は制御の方法と共通している。これまで予測可能性に注力してきた天気予報の研究が、予測の対となる制御の視点で新たに展開するための準備が整ってきた。

以上のような数値天気予報の時代の潮流を外挿すると、2020 年代から 30 年ほどの間に制御可能性の理論が進展することは、実現可能性の高いシナリオである。80 年代頃にデータ同化が台頭し、90 年代中頃にアンサンブル予報という形で予測可能性研究が確立したことを考えれば、2030 年に制御可能性研究を確立させることは妥当な達成目標となる。これと同時に、実際に実現可能な介入操作によって気象をどの程度変化させうるのか、という実現可能性に目処が付く。実際の概念実証 (Proof of Concept) の実証実験は、2040 年頃のマイルストーンとなろう。これにより、2050 年の実用化が現実的となる。

社会面での実現可能性については、リアルタイムに経済合理性を判断して実際の介入操作を行うための意思決定を行う方法や、予期しない副作用が起こった場合の紛争等の解決方法、国を跨ぐ紛争の場合は条約締結等の検討が必要になる。経済合理性に関しては、近年波及効果も含めた災害の被害算定の手法が発達している。紛争解決に関しては過去に起

こった公害訴訟等との共通点があり、これまで人類が経験してきた新技術による負の側面を検討するが有効である。宗教や倫理面にも大きな影響を及ぼしうる技術開発であるため、人々に受け入れられ、社会実装が叶うまでには紆余曲折があることが想定されるものの、上記の社会面での実現可能性を一つ一つ突き詰め、市民と対話することで、2050年までに社会的に受容される技術として実現可能性がある。

### 3.当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等

#### 3.1 当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが今必要である理由

人為起源の地球温暖化は着実に進んでおり、もはや止めることは難しい。気候変動も関係し、近年気象災害が増えている。ここ数年だけを見ても、2020年7月豪雨、2019年の台風、2018年の西日本豪雨や台風、2017年7月の九州北部豪雨、2015年9月の関東・東北豪雨、2014年8月の広島豪雨による甚大な災害は記憶に新しい。また、コロナ禍により、避難所の密な環境が感染リスクとなっている。

二酸化炭素等の温室効果ガス排出を押さえ、自然エネルギーを活用し、リサイクルを進めることは、疑いもなく重要である。これと同時に、変化していく気候に対応する力も増やしていく必要がある。気象を制御する技術は、人類の新たな力として有望である。

これまでコンピュータを使った数値天気予報により、人類は予測能力を大幅に向上してきた。例えば数日先の台風進路は、30年前と比べてはるかに高精度に予測できるようになった。この高度な天気予報技術は、センサ技術やスーパーコンピューティング技術、情報通信技術、人工衛星技術、シミュレーション技術など、人類の幅広い英知を集結した結晶といえる。

予測は、制御のための下地である。気象はカオス的の性質を示す。「バタフライ効果」として知られるこの性質は、一匹の蝶の羽ばたきが数日先の嵐を引き起こすたとえで知られるように、わずかな違いが後の大きな違いを引き起こす。このために予測が難しく、予測可能性に限界が生じるのだが、逆を返せば、わずかな違いを人為的に作り出し、これが後の大きな違いとなることも意味する。予測可能性の理解が深まってきた今、新たに制御可能性を切り拓く準備が整った。

気象は、人間活動に多岐に影響するため、太古の昔より予測が望まれ、雨乞い等の介入制御も望まれてきた。このように人類が共通して持つイメージとして、気象の制御が存在しうる。現代科学は、衛星を含む高度計測、情報通信、スーパーコンピューティングという人類の英知を集結して気象予測を向上してきた。テクノロジーによって、予測困難だったものが可能となってきた。制御困難だったものが可能となるという未来の可能性もイメージできる。人類共通の目標として、幅広い分野の英知を集結するに相応しい目標を与える。

#### 3.2 目標達成の社会的意義

気象災害は、天に与えられた不遇と捉えられる。これを制御できれば、理不尽な不遇を避け、平等な社会、産業に貢献する。また気象の影響を受ける人間活動は多岐に及び、気象制御による産業・社会へのインパクトは極めて大きい。さらに災害を起こす気象を制御し、理不尽な不遇を避けて、平等な社会、産業に貢献することは、SDGs 目標に合致し、広く人類共通の価値観を共有する。

### 3.3 当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要

気象制御により、好都合な場合と、不都合な場合が混在することが想定される。例えば豪雨の場所をずらすことで、本来豪雨が起こって困っていたはずの地域にとっては好都合だが、逆に本来豪雨が起こるはずのなかった地域に豪雨が起こるかもしれない。このような場合の合意形成のための条約や法令の整備、紛争の際の解決方法が必要である。これは、ダム建設や公害などこれまで人類が経験してきた問題と共通する観点もあるため、これまでの経験に基づき、気象制御技術の実現までに、適切な対応策を検討しておく必要がある。

## 4. 当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

これまで気象は天から下されるものとして、人間は受け身で予測をして対応をとってきた。介入制御という逆転の発想により、気象に関するあらゆる社会システムが根底から変革する。完全に思い通りに制御できなくとも、少しでも介入により望む方向に変化させるもの、ということが実現できれば、この制御可能という考え方や概念が社会に変革をもたらし、人間活動の最適化も含めたトータルな気象制御技術の向上へと向かって行く。まさに新たな文明の開化となる。

## II. 統計・俯瞰的分析

### 1. 当該 MS 目標を達成するための課題（科学技術的・社会的課題）や必要な取組み

科学技術的な課題として、これまで予測可能性の視点で発展してきた気象予測の研究を、新たに制御可能性の視点で展開していく新潮流が必要となる。

また、技術的に可能であっても、実際に実現するには様々なステークホルダーの合意形成が必要となる。一つの制御が、ある人にとっては利益であっても、他の人にとっては不利益となる状況がある。すべての人にとって利益となる、あるいは誰にも不利益が一切生じ得ない制御は合意が容易であるが、そうでない場合に直面する可能性は高い。

また、図らずも望ましくない結果をもたらした場合の紛争解決も必要となる。技術開発の初期段階では、想定通りになると期待することはできず、実証実験の際には実験デザインも含めて特に注意を要する。

### 2. 当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰

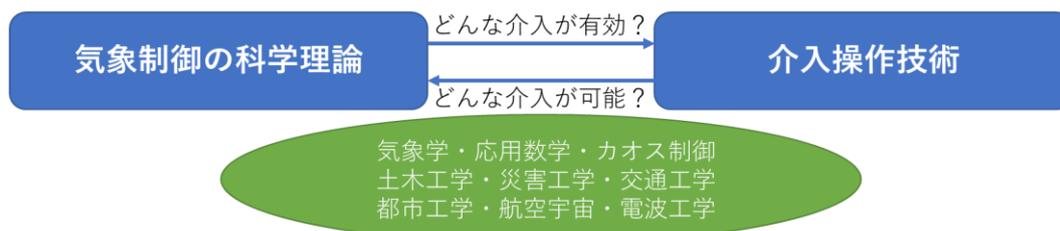
気象学分野における予測可能性の対となる制御可能性の理論研究分野を切り拓く。これ

と同時に、両輪となるべき具体的な介入操作技術を検討する。どのような介入がどのような変化を気象にもたらしうるのかは、制御可能性の理論研究で明らかにすることができる。逆に、どのような介入が技術的に可能であるか、有効かつ実現可能な介入操作の方法を切り拓く必要がある。これを一体的に行うために、気象学、応用数学、カオス制御、土木工学、災害工学、交通工学、都市工学、航空宇宙、電波工学等の様々な分野が一体となって英知を結集する必要がある。

また、技術的に実現可能であっても、社会に受け入れられるための社会科学面の検討も同時に必要となる。合意形成や経済合理性の判断は、実際に介入操作を実施する意思決定にリアルタイムで必要となる。また、宗教倫理面や合意形成・紛争解決に関わる法制度など、オフラインでじっくりと解決すべき問題もある。経済学、法学、社会学等、様々な分野が一体となって取り組む必要がある。

このように、気象の制御を実現するには、理科、文科を問わずあらゆる分野の人類の英知を結集することが必要である。

#### • 技術的実現可能性の精査



#### • 社会的課題の特定、解決策の検討

- 合意形成
- 経済合理性
- 宗教倫理面



### 3. 当該目標に関連する研究開発の動向（全体）、海外動向及び日本の強み

気象制御に対し、カオス力学系の理論に基づく予測可能性の視点で取り組むことは全く新しく独創的である。これまで、予測改善のためのデータ同化・予測可能性研究が行われてきた。小さな変化が後の大きな変化を引き起こすことは、制御の可能性に繋がるが、そのような制御の視点でのデータ同化・予測可能性研究はなく、本提案は極めて新しく独創的である。力学系の数理ではカオス制御という言葉があるが、気象のように高次元な力学系で、その逆問題の可解性に本質的な困難があるような場合に適用する視点はなかった。

また、気象を制御する科学的な方法論が確立していない。先行研究として、例えば人工降雨の研究があるが、その効果は決定的とはなっていない。

日本には、2002年の地球シミュレータ(Tomita et al. 2005)、2012年のスーパーコンピュ

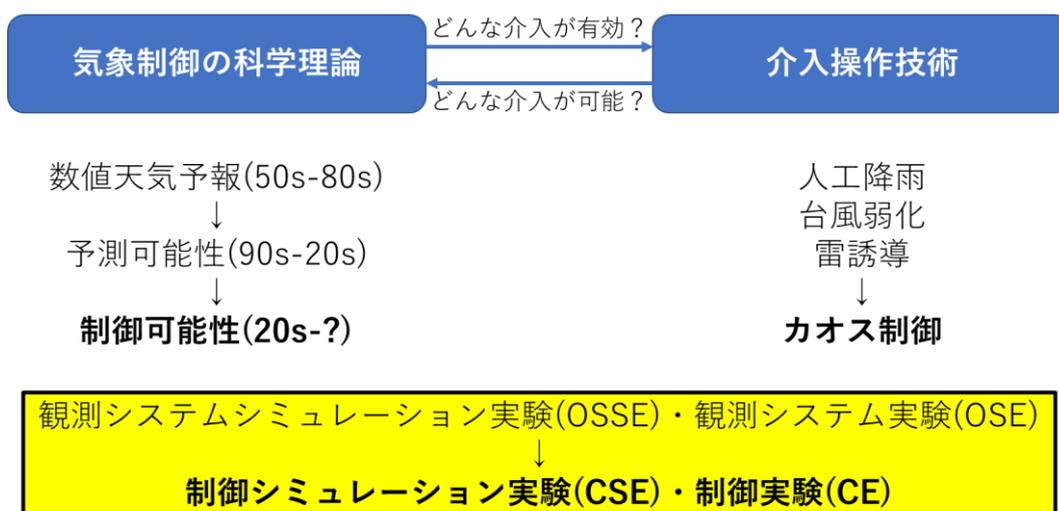
ータ「京」(Miyamoto et al. 2013)、2021年のスーパーコンピュータ「富岳」と、ここ20年ほど世界トップレベルのスーパーコンピュータによって培われてきた大規模気象シミュレーション及び数値天気予報技術がある。実際の気象の制御可能性には、大規模シミュレーションが必須であり、特に大規模アンサンブルシミュレーション(Miyoshi et al. 2014; 2015; Kondo and Miyoshi 2016; 2019; Necker et al. 2020a; 2020b; Yashiro et al. 2020)において「富岳」を使う優位性が高い。

我が国が世界的な災害大国であるという認識は、国民全体に広がっている。過去の災害の経済的被害額等をまとめたデータから、このような認識は客観的にも正しいことがわかる。災害が頻発する先進国として我が国が率先して気象制御による減災という革新的な技術開発を先導することは、人類文明全体への責務でもある。我が国で気象制御研究を行うことの重要性は高い。

### III.社会像実現に向けたシナリオ

#### 1.挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題

気象制御の科学理論(気象学、応用数学、計算科学、制御工学)と、具体的な介入操作技術(各種工学分野)とが両輪となって一体的に取り組む必要がある。1950年代に黎明期のコンピュータを使って始まった数値天気予報は、予測可能性という分野に発展し、現在に至る。予測と対をなす制御への発展は自然な方向であり、今後30年の大きな方向性となる。一方、実際に実現可能な介入操作技術がなければ、コンピュータ上の空論としかならない。このため、制御のシミュレーション実験では、具体的に実現可能な介入操作技術を意図して取り組む必要がある。



2. 2030年・2040年・2050年のそれぞれにおける、達成すべき目標(マイルストーン)、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果

|      | ~2030   | ~2040  | ~2050             |
|------|---|--|-------------------|
| 科学技術 | 制御可能性の理論<br>介入操作の効果検証法<br>制御シミュレーション<br>実験(CSE)<br>実現可能性に目処 | 介入操作方法の具体化<br>効果検証方法の確立<br>制御実験(CE)<br>概念実証(POC)達成 | 実用化               |
| 社会適応 | 課題の精査<br>解決策の検討   | 解決策の精査<br>実施着手                                     | 解決策の実施<br>(条約締結等) |

各マイルストーンを上表にまとめた。2030年まではコンピュータシミュレーション上で、効果的な制御を行う理論構築、および制御を行った時の効果を定量的に見積もる技術を開発する。これにより気象制御の実現を可能にする数理理論を構築し、実現可能性にめどを立てる。予測可能性と制御可能性は表裏一体であるという立場からは、このような制御可能性の理論構築は、予測可能性、つまり気象予測の精度向上にも大きな貢献があることが想定される。2030年でのマイルストーン達成は従来型の気象予測の精度改善という形で社会に正の効果をもたらす。加えて、2030年に向けて、社会実装の可能性についても基礎的な検討を行う。

2040年までには、上述した制御可能性の理論に基づいて、実際に現実世界の気象に対してどのような方法で介入するかを具体化する。その上で、実際に介入を行う制御実験を小規模に実施することで、Proof-Of-Conceptを達成する。このマイルストーンが達成されると、気象が制御可能であるということが人々に広く知れ渡ることになるだろう。これを契機として、具体的な気象制御の合意形成・紛争解決のメカニズムについて、非専門家を巻き込んだ議論や実際の法整備等を進める。

2050年までに実用化を目指す。小規模な制御実験と理論研究を繰り返し、技術の安全性・安定性の厳密な検証を絶え間なく続ける。その積み重ねによって社会実装が実現する。社会実装に向けた法整備・条約等の整備や、万が一うまくいかなかった場合の補償メカニズムなどの整備もこの段階で整うようにする。「気象が制御できる世界」の幕開けである。

### 3. 目標達成に向けた国際連携の在り方

気象制御技術は、軍事利用の可能性も含むため、国際協調をとり、ある国が突出して技術を高めることを防ぐ必要がある。また、ある国にとっての利益のための気象制御が、他の国にとって不利益となることも考えられる。雨が降らない地域で降らせる制御を行ったせいで、本来降っていたはずの地域で雨が降らなくなるかもしれない。このような場合、一つの制御が、ある国の利益と他の国の不利益を生み、紛争となる恐れもある。国際河川におけるダム建設や公害等においても似た状況があり、条約締結等により紛争を未然に防いだり、解決したりということが可能である。

#### 4. 目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方

| 要素項目  | 専門分野  |
|---|---|
| 制御可能性研究への新展開<br>気象制御理論の構築<br>介入操作のシミュレーション技術<br>介入操作を加味した確率的予測の逐次更新 | 予測可能性研究<br>気象気候シミュレーション<br>データ同化<br>応用数学（力学系理論、不確実性定量化） |
| 介入操作技術  | 気象計測技術<br>自然エネルギー工学                                     |
| 気象の影響を受ける人間活動の最適制御<br>気象制御と人間活動の同時制御                                | 水文気象、土木工学<br>群集制御、避難シミュレーション                            |
| 気象制御の倫理、社会適応<br>介入操作が想定外の結果を生む場合の検討                                 | 科学技術倫理、宗教学、科学哲学   |

上記の表が示すように、目標達成に向けては、水害への対処にこれまでも直接取り組んできている気象学・水文学・土木工学にとどまらず、幅広い学術分野間の協力・連携が欠かせない。気象は制御できないが、すでに人類はありとあらゆるものを数学理論に基づいて巧みに制御している。既存の応用数学・制御工学から学ぶことが多くある一方で、気象のような超大規模システムに対する制御というのは前例がないため、気象制御という目標は、応用数学・制御工学側にも新しいチャレンジを突きつける。このように数学分野との連携が目標達成には不可欠である。

気象制御のために、現実の地球にどのように介入し、かく乱を与えるかという問題に対して、私たちはありとあらゆる可能性を考えていかなければならない。電磁波を用いた介入に始まり、土地利用の変化や既存の自然エネルギー施設の操作等、あらゆる介入操作を考慮する中で多くの学術分野との協力・連携が必要である。

加えて、これまで議論してきたように、気象制御技術の社会実装においては解かねばならない人文学・社会科学的課題は多い。新しい強大な技術をどのように効率よく利用するか、技術がもたらしうる係争をどのように解決するか、新技術が社会に受け入れるためにはどのような取り組みが必要か。こういったことを議論するために多くの学術分野との協力・連携が欠かせない。

#### 5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)

(目標達成に向けて取り組むうえでの倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

社会的課題は既述の通り認識しているものの、国際河川におけるダム建設や、公害等において、これまで国際社会が取り組んできた経験が役に立つ。複数の国を跨いで流れる国際河川においては、ダム建設等の開発の環境影響が他国にも及ぶ。Espoo 条約等をはじめとする様々な国際条約により、このような場合における河川流域開発のルールや係争調停の方法は確立されつつある。このような既存の枠組みを効果的に援用することによって、

気象制御技術の社会への導入に向けた国際的な合意形成を推進していくことが重要である。

気象制御技術がもたらすであろう人々の世界観・倫理観への影響は大きい。そのため、科学的には十分な安全性を担保することができたとしても、気象制御技術の実装には一定の反発があることは想像に難くない。前述の法整備に始まり、万が一うまくいかなかったときに備え様々な補償メカニズムを用意することで、技術の実装にあたり人々から不安を取り除く不断の努力が重要である。カオス理論に基づく気象制御技術は直感的に理解しやすいものとは言えない。これまでの再生医療等での事例も踏まえ、適切な科学コミュニケーションを促す仕組みを早期から構築する。

#### IV. 結論

各界から優れた外部専門家を招聘し、気象制御可能性検討セミナーを計16回行った。多様な分野から招いた外部専門家の協力により、このセミナーでは気象学・制御工学といった気象制御技術の自然科学的な側面はもちろん、経済学・国際法学・科学コミュニケーション・倫理学といった社会科学・人文学的な側面からも気象制御技術がもたらす可能性を幅広く検討した。また、セミナーは誰でも参加できるオープンな形式で行い、外部専門家・当 MS チーム・参加者で自由闊達な議論を行った。加えて、コンピュータシミュレーションを用いて我々が独自に検討を進めた気象制御可能性の理論研究の初期的な成果を関連する研究者と議論するワークショップも1回を行い、現状の研究水準で制御可能性にどこまで迫れるか、自由闊達な議論を展開できた。

このレポートで得られた結論はこのセミナー及びワークショップでの議論を通じて得られた、現状の研究水準への理解と将来に向けた課題分析に基づくものである。

本調査研究の結論は以下の通りである：

- 気象制御研究は *inspiring* である。なぜなら、この研究は困難ではあるが、気象は制御しうるものとして新たな文明を切り拓き、気象災害という社会問題の根本的な解決に大きく貢献し、人類の持続的な発展に大きく貢献するものだからである。
- 気象制御研究は *imaginable* である。なぜなら、この研究により実現する気象災害の恐怖から解放された社会という未来はイメージが容易であるとともに、人々の価値観を変え、社会システムの変革をもたらすからである。
- 気象制御研究は *credible* である。なぜなら、カオス理論に基づいた気象制御のアイデアは真に新しいものの、予測可能性研究をはじめとする様々な科学分野の横断的な融合によって実現可能性があり、科学的に検証可能で、時間をかけて探究するに値するからである。

#### V. 参考文献

1. *Kondo, K. and T. Miyoshi, 2016: Impact of removing covariance localization in an ensemble Kalman filter: experiments with 10,240 members using an intermediate AGCM.*

- Mon. Wea. Rev.*, 144, 4849-4865. doi:10.1175/MWR-D-15-0388.1
2. Kondo, K., and T. Miyoshi, 2019: Non-Gaussian statistics in global atmospheric dynamics: a study with a 10240-member ensemble Kalman filter using an intermediate AGCM. *Nonlinear Processes in Geophys.*, 26, 211-225. doi:10.5194/npg-26-211-2019
  3. Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, and H. Tomita, 2013: Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4922-4926. <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50944>
  4. Miyoshi, T., K. Kondo, and T. Imamura, 2014: The 10240-member ensemble Kalman filtering with an intermediate AGCM. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5264-5271, doi:10.1002/2014GL060863.
  5. Miyoshi, T., K. Kondo, and K. Terasaki, 2015: Big Ensemble Data Assimilation in Numerical Weather Prediction. *Computer*, 48, 15-21. doi:10.1109/MC.2015.332
  6. Necker, T., S. Geiss, M. Weissmann, J. Ruiz, T. Miyoshi, G.-Y. Lien, 2020a: A convective-scale 1000-member ensemble simulation and potential applications. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146, 1423-1442. doi:10.1002/qj.3744
  7. Necker, T., M. Weissmann, Y. Ruckstuhl, J. Anderson, and T. Miyoshi, 2020b: Sampling error correction evaluated using a convective-scale 1000-member ensemble. *Mon. Wea. Rev.*, 148, 1229-1249. doi:10.1175/MWR-D-19-0154.1
  8. Tomita H, Miura H, Iga S, Nasuno T, Satoh M, 2005: A global cloud-resolving simulation: preliminary results from an aqua planet experiment. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L08805. doi:10.1029/2005GL022459
  9. Yashiro, H., K. Terasaki, Y. Kawai, S. Kudo, T. Miyoshi, T. Imamura, K. Minami, H. Inoue, T. Nishiki, T. Saji, M. Satoh, and H. Tomita, 2020: A 1024-member ensemble data assimilation with 3.5-km mesh global weather simulations. *SC '20: Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, 1, 1-10. doi:10.5555/3433701.3433703