

CREST 研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」

追跡評価報告書

総合所見

本研究領域は、地球全体スケールあるいは人間活動が直接関与するような地域スケールにおいて、水循環モデルの構築と持続可能で効率的な水利用システムの構築を目標としたものである。追跡評価の結果、わが国の水循環モデリングと水利用に関する科学技術の基盤の拡大とレベルの向上に本研究領域は大きく貢献していると評価できる。

本研究領域は、研究総括以下 17 名の研究代表者のもとで優れた成果を得たが、研究領域終了後の展開においても、以下のとおり様々な展開がなされている。

沖の Science 誌掲載論文は現在まで 400 件近くの論文に引用されて、地球規模での水循環と人間活動のかかわりに関する世界の研究をリードしている。沖が提唱したモデルは世界最先端のモデルであり、その研究成果は気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第 4、5 次報告書にも引用された。木本も IPCC の第 4 次、第 5 次報告書において重要な役割を果たしており、国際的な気候変動プログラムに対して先導的な役割を果たした。寶は流域水環境に関する広域多次元的情報処理技術を駆使して、社会環境と自然環境の変化に伴う水循環・水災害変動の予測研究を進展させた。中村は最新の観測機器による継続した観測と集中観測により、他に類例を見ない、体系的な大気境界層過程に関する詳細な観測データを取得した。船水のコンポスト型トイレの考え方については、乾燥地や水資源の乏しい発展途上国のみならず、ヨーロッパでも高い関心を集め、低コスト・省エネルギー・地域貢献を基本とした持続可能な水利用システムの研究という新たな潮流を創出した。永田が開発した手法は、安定同位体比の解析から、流域に固有な自然条件や人為条件を含む窒素循環の仕組みを把握することを可能にした。岡本が作成した全球降水マップ(GSMap)は、JAXA による世界雨量分布図作成に実用されている。恩田の研究は科研費での放射性物質の環境移動に係るプロジェクトにつながり、2011 年に発生した福島第一原子力発電所事故後には、社会の関心に答える科学的データを提供している。

本研究課題終了後の発表論文数をみると、沖チームが 83 報、木本チームが 74 報、太田チームが 60 報、小池チームが 50 報、寶チームが 38 報、古米チームが 33 報を発表し、それらのうち責任著者数は沖が 45 報、木本が 45 報と非常に多く、さらに、これら論文は被引用回数も多く、科学技術への貢献が大きい。本研究課題終了後も、多くの研究代表者が影響度の高い国際誌に継続的に論文を発表していることは評価できる。なお、研究課題終了後の受賞数は、沖 8 回、古米 7 回、楠田 5 回、神田 5 回、木本が 4 回と、短期間に学会賞その他を授与されており、学術面への貢献が大きいことがわかる。

本研究領域に引き続き始まった CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」(大垣眞一郎研究総括：以下大垣 CREST と呼ぶ)に、本研究領域から沖、古米、恩田の研究代表者の提案課題が採択され、さらに研究を展開している。

以上のように、本研究領域における特筆すべき成果から、本研究領域終了後に多くの研究展開がなされ、科学技術の進歩に貢献していると評価できる。

1. 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域は「環境低負荷型の社会システム（茅陽一研究総括：以下茅 CREST と呼ぶ）」（1995-2002）、本研究領域（2001-2008）、大垣 CREST（2009-2016）という 3 つの CREST 研究領域として研究展開されたものの 2 番目に位置する。特に、本研究領域の 3 人の研究代表者（沖、古米、恩田）の研究課題が発展的に大垣 CREST で実施されたことは、本研究領域の成果の継続の観点から高く評価できる。

本研究領域の研究代表者の多くは、大垣 CREST 以外にも外部競争的資金を獲得して研究を継続・発展させている。特に、木本が海洋研究開発機構（JAMSTEC）の 2 件のプロジェクト、「気候変動リスク情報創生プログラム A」及び「21 世紀気候変動予測革新プログラム」で研究を進展させている。また科研費では、基盤研究（S）として 1 億円以上の資金を沖が 2 件、船水が 1 件獲得しているほか、多くの研究者が基盤研究（A）などの大型資金を得て研究を継続・発展させている。また、JST と（独）国際協力機構（JICA）が連携して実施している地球規模課題対応国際科学技術協力事業（SATREPS）に、沖（2008-2013）、船水（2009-2014）が参加して研究が展開されている。

沖は、流域の水量・水質管理方策、環境評価の手法を提示し、全球規模の統合水資源モデルの構築と気候変動対応策と洪水防災などに展開をしている。その成果は国連ミレニアムレポート（Millennium Ecosystem Assessment, MA）、IPCC 報告書、国際水文科学会（IAHS）の特集号などにおいて発表され、沖の世界への発信という主目標は達成されている。さらに、大垣 CREST においては、本研究領域で構築したグローバルな水循環・水資源モデルをダウンスケールし、東京電力福島第一原子力発電所事故による東京の水道及び利根川流域への放射能汚染の影響を解析している。木本も、大気海洋結合モデルで世界に誇る成果をあげており、IPCC の報告書に取り入れられるだけでなく、執筆者としても本研究領域の成果を世界に発信している。

古米は、都市域の自己水源である雨水、地下水そして都市排水の再生水を用途に応じて効果的に利用することを目標とし、特にそれらの水質の実態把握とリスク評価に重点をおいて研究展開した。大垣 CREST では、本研究領域の成果を荒川流域とハノイ地域の河川流域に適用して、気候変動に対応した調和型都市水利用システムの開発のための研究を行っている。

恩田は、人工林管理の不備による森林の荒廃が水環境、洪水発生、下流河川環境に与える影響の実態解明と将来予測、及び望ましい人工林の維持・管理についての提言を行った。大垣 CREST では、この提言に基づく適切な荒廃人工林の管理による流量増加と河川環境の改善効果が水利用システムに及ぼす効果の実証を目指している。恩田については、2011 年東日本大震災後の福島第一原子力発電所の放射性物質移行過程について研究し、リスク解析への展開を見せたことは評価できる。神田は、継続して都市域の水と熱の循環系についての研究をリードしている。さらに、都市という現代社会における重要な地域において、熱交換を評価する新分野を切り開くことに成功しており、当該分野への貢献は大きい。船水は、モンスーンアジアを研究対象として水質の汚濁の改善に取り組み、し尿処理分野の科学技術的課題を解決させ、実用化・普及への段階に進展させ、若手研究者の育成にも貢献している。特に、JST と JICA が共同で実施している事業の SATREPS に採択されて、日本と開発途上国の共同研究が進展していることは評価できる。SATREPS では西アフリカサヘル地域のブルキナファソにおいて、水・衛生システムの実用化・普及に向けた活動を行っているが、これは途上国におけるし尿処理を対象としたユニークな研究であり、高く評価

する。砂田は、基礎科学としての水循環変動のケーススタディーのみならず、社会実装に着眼点を持ち、湿潤から乾燥地域の9河川の流域の水問題の実態を構造的に把握・分析して、各々の地域が直面する洪水問題、渇水問題、水質汚濁に関わる諸問題について、個別情報の集約化を行うとともに、具体的な流域のモル問題解決へ向けた政策シナリオまでを提示したことは評価できる。永田は、治水の概念のもとに環境・生態系を重視し、安定同位体を用いた物質循環・生態系解析への科学技術への挑戦を継続的に行っている。特に、微量分析技法を進展させ、より精密な分析によって安定同位体を用いた分析を高度化させた。

中村、岡本、小池が関わって成果をあげた JAXA と NASA による熱帯降雨観測衛星 (TRMM) のミッションは、世界から高い評価を受けて最近終了したが、後継として水循環変動観測衛星 (GCOM-W1) や全球降水観測計画 (GPM) などのミッションにつながり、世界中の研究者との共同研究が継続されていることは、高く評価できる。

論文に関しては、期間中にも多くの成果があがっていたが、期間後にはさらに多くの論文が発表されている。特に、沖、木本、小池の3名は100報近くの論文を発表し、顕著な成果をあげている。特に沖の複数の論文が非常に多く引用されている。また、研究代表者17名中16名が本研究領域終了後に学会等から受賞されており、そのうち9名が複数の賞を受賞している。プレス発表も多くされている。

特許に関しては、17名の研究代表者合計で出願が18件、成立が1件、公開が7件ではあるが、特許を出願しにくい本研究分野としては、この数は不足とは言えないと考えられる。

以上のように、研究領域終了後における研究の継続性と研究成果の発展については、いずれのグループも外部資金の受託率が高く、論文発表件数も多いので、本研究領域の研究成果を踏まえて、新規・継続の研究を旺盛に発展させていると評価できる。

2. 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

2.1 研究成果の科学技術の進歩への貢献

本研究領域の一つの特色は、グローバルな問題だけではなく、断水が起きている黄河流域（楠田）、乾燥化するモンゴル（杉田）、湿潤域と乾燥地の境界である淮河流域水田域・東シナ海島嶼（中村）、シベリア森林域（太田）、メコン川（丹治）、熱帯モンスーンアジア（鈴木）など、アジア域を中心に、様々な地域での水循環を明らかにすることにチャレンジしたことにある。これに加えて、都市と田舎の間での水循環の問題に焦点を当てた研究（寶、神田、古米、恩田）、安定同位体を用いた流域環境評価（永田）のような手法開発研究、流域水政策（砂田）にまで踏み込んだ研究まで幅広く行われた。すべての課題における研究成果は、科学技術の進歩に大きく貢献したことが認められる。

沖は全球統合水資源モデルを構築した。このモデルは世界をリードしており、これを用いて推定された世界の水循環と水資源の現状と将来見通しは、IPCC 第4次報告書にも引用された。さらにモデルは改良され、IPCC 第5次報告書においても引用されており、重要な役割を果たすとともに、気候変動への対応策として改良モデルが利用された。タイの洪水のための治水モデルとしても使われ、モデル計算を基に、タイ政府がダムの放水を行った。沖の研究成果を盛り込んだ Science 誌掲載論文（2004年）の被引用件数は本研究領域終了後も増加している。木本の研究成果も IPCC

の第4次、第5次報告書に引用されており、国際的な気候変動プログラムに対して大きく貢献した。木本は当時世界最高の高解像度・高精度の大気大循環モデルならびに大気海洋統合モデルを開発し、梅雨前線帯の強雨や、モンスーン域の季節内変動の再現性を大幅に改善した。2010年に木本が責任著者として Journal of Climate に掲載された2論文の調査時点での被引用件数はそれぞれ55件と43件である。2012、2013年に CLIMATE DYNAMICS 誌等に掲載された論文の被引用件数も引き続き増えるものと推測される。これらの実績より、沖、木本は世界をリードする成果をあげていると評価できる。

小池は、世界的に見て重要な課題である、ダウンスケーリング問題へのブレークスルーを与え、衛星マイクロ波放射計観測データを効果的に用いて、全球規模—地域規模—流域規模の異なるスケールにおいて一貫して記述できる物理的ダウンスケーリングシステムを構築した。これらの技術手法はエネルギー・水収支分布型循環モデルの高度化、大気—陸面データ同化システムの改良、気候変動にともなう水災害リスク軽減に向けた研究に寄与している。寶は、流域水環境に関する広域多次元的情報の加工技術を高度化し、社会環境と自然環境の変化に伴う水循環・水災害変動を予測する研究を進展させた。また、アジア太平洋地域における水文・水資源研究によって、ユネスコ国際水文学計画(IHP: International Hydrological Programme)の活動を継続的にリードしている。砂田は、アジア地域における持続可能な水管理政策を提言し、その研究成果がタイの水害対策への一指針を与えるなど、社会実装に貢献している。さらに、本研究領域終了後も土砂生産モデルを結合させ、流域総合土砂生産モデルへと発展させている。永田は、環境中に存在する元素の安定同位体比を用いて流域環境を評価する手法を確立した。この手法は化合物別の同位体分析へと発展し、タンパク質のアミノ酸の同位体比プロファイルから、時間的な経緯を伴った環境情報の取得、水中の硝酸イオンの安定同位体比の解析から、流域に固有な自然条件や人為条件を含む窒素循環の仕組みの把握などにも適用が可能になってきた。古米は大垣 CREST に研究展開し、持続可能な都市域における水資源確保と水循環の構築に向けた研究を行った。恩田も大垣 CREST に研究展開し、荒廃人工林での水流出プロセスと土砂流出プロセスの詳細を明らかにした。中村は最新の観測機器による継続観測と集中観測により、他に類例を見ない体系的な大気境界層過程に関する詳細な観測データを取得し、データ解析とモデルによる数値シミュレーションを通して、境界層が降雨システムに与える影響に関する多くの知見を得ている。

2.2 研究成果の応用に向けての発展状況

砂田の研究は、2003年度採択の21世紀COE「アジアモンスーン域流域総合水管理研究教育」(砂田担当)を更に進化させる方向で遂行され、国際的に広く貢献した。すなわち、湿潤地帯から乾燥地帯にわたるアジアの水問題への貢献を目指し、気候変動の影響を考慮しながら、それぞれの流域での水問題の実態を構造的に把握・分析して、問題解決のための水政策シナリオの提言に結びつける研究を展開した。この種の事例研究は学術的評価が困難であるが、さまざまな経験や知識情報を集約するためのナレッジマイニング(知識・経験の発見的掘り起こし)システムの開発を目指し、成果をあげたことは極めて先駆的であり、この分野の道を開いた点で高く評価できる。本研究では、2つのタイプのナレッジマイニングシステム(KMS)、すなわち、課題項目別に事例の参照が可能なシステム(EXCEL I型KMS-1)とクロスリレーショナルデータベースとして水課題と

水政策を参照できるシステム (Wiki 型 KMS-2) の構築が試みられ、前者は国際的利用に供するため、(独) 土木研究所の水害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) のホームページに英語版で実装された。こうした成果が認められて、砂田の研究成果を柱とした GCOE 「アジア域での流域総合水管理研究教育」が 2009 年度に採択されたが、ここでは水分野の先端技術教育と、地域事情を考慮して応用できる人材養成がなされた。これらにより、砂田の研究成果の社会的・教育的波及効果は極めて高いと評価できる。

沖の研究成果も社会的に大きく注目されている。タイでは、沖が開発したモデル計算に基づいて、2012 年に実際に政府によるダム放水が行われた。また IPCC 第 5 次報告書第 2 作業部会では、沖が本研究領域で開発したモデルが適用され、沖自身も第 2 作業部会報告書の総括執筆責任者となった。さらに、世界の大陸河川における大規模洪水の物理的シミュレーションモデルは、ヨーロッパ中期予報センターの洪水予測に活用されつつある。沖の研究成果は、IPCC の報告書だけではなく、高校の英語の教科書や子供用絵本にまで引用されており、教育面でも重要な役割を果たしている。TRMM から GCOM-W1、GPM につながる衛星システムの開発は、国内の宇宙産業の中でも重要な役割を果たしており、今後のさらなる継続・展開により国際的な貢献が一層期待される。船水は、発展途上国 (地域) の水環境におけるし尿処理の重要性に着目し、「混ぜない」、「集めない」、農村に適したコンポスト型トイレの科学技術的課題の多くを解決した。先端的な技術が注目される傾向が強い科学技術研究プロジェクトにおいて、低コスト・省エネルギー・地域貢献を基本とした持続可能な水利用システムの研究という新たな潮流を創出した。このコンポスト型トイレの考え方については、乾燥地や水資源の乏しい発展途上国のみならず、ヨーロッパでも関心を呼び、2011 年にスペインでの講演依頼があった。

他に、木本の気候変動リスク情報創成プログラム構築、寶のユネスコ国際水文学計画への貢献、古米の都市の水循環系リスク対策、恩田の放射性物質の環境動態解明、船水の持続的なサニタリーシステム、岡本の GSMap による情報提供、神田の「ゲリラ豪雨」メカニズム解明、楠田の中国側研究者との共同研究、などがインパクトを与えた。

2.3 その他の特筆すべき波及効果

いくつかの研究は、国内外の研究者や公的機関から注目され、それが機となって新たなネットワークに発展している。降水関連の衛星プロジェクトとの連携に関して、国内外の研究者や産業界とのネットワーク形成が進み、国際プロジェクトとして発展していることなども、そうした展開の 1 つである。

2011 年東日本大震災や 2011 年タイ洪水は、本研究領域終了後に発生した自然災害であった。しかしながら、本研究領域で培われた研究技法、研究成果、研究人材のネットワークなどを通して、こうした激甚な災害に対する科学技術的貢献の道が開かれていったことは、大きな研究の新展開であった。

沖の研究成果は、英語の教科書や子供用の絵本としても取り上げられ、若い世代に水問題・水循環を考える機会を提供している。楠田は、本研究領域で対象地として共同研究を行った中国側の研究者と、共同研究や留学生受け入れ等の交流を継続・発展させている。また本研究の成果を英文著書にまとめて海外にも発信している。寶は、IHP などでの積極的な活動を行うことで、当

該研究分野での日本のプレゼンスを高めている。それに加えて、研究者ネットワークを国内外に構築していることから、若手研究者を含む人材育成にも寄与していると考えられる。小池は、世界気象機関 (WMO) / 国連環境計画 (UNEP) の第 4 次評価報告書第 1 作業部会 (自然科学的根拠) の評価編集に携わり、ノーベル平和賞受賞への貢献が表彰された。砂田は、本研究領域に関連して、文部科学省の 2 つの GCOE (鳥取大学「乾燥地科学拠点の世界展開」、山梨大学「アジア域での流域総合水管理研究教育の展開」) を受託し、国内外から博士課程学生を積極的に受け入れ、若手研究者の人材育成に貢献している。丹治は、メコン委員会 (MRC) という国際技術支援機構に日本から関与・寄与する道を開くことに腐心し、政策シナリオの提示に貢献した。

以上、本研究領域は終了後、国内外で多くの研究展開がなされ、科学技術の進歩、社会的な貢献がなされていると評価できる。

3. その他

本研究領域は茅 CREST、本研究領域、大垣 CREST という 3 つの研究領域の 2 番目に位置付けられ、その研究内容は現在進行中の大垣 CREST によく受け継がれている。CREST の中での「水」に特化した研究領域の充実・継続が望まれる。

その際、以下のような課題の検討を提言する。

(1) 本研究領域の研究課題は、一部政策提言的な内容が含まれたが、実際に政策提言につながっているものは多いとは言えない。政策提言までを視野に入れるためには、自然科学と社会科学の協力体制も検討すべきであろう。

(2) 水循環のテーマでは、本研究領域と TRMM プロジェクトがある程度同期したことが、大きな成果をあげることを後押ししたと考えられる。今後も、JAXA の地球環境観測ミッションなどとの連携を強めていくことが望まれる。

(3) 本研究領域の中では、陸水が海洋に供給される沿岸域の研究がほとんど入っていない。淡水の最終的な輸送先である沿岸域は人間活動も盛んであり、また生物生産も高い。今後、このような「陸—海循環」での現象について、水だけでなく広く物質循環や生物生産をも含めた新しい研究プログラムが望まれる。

(4) 本研究領域で得られた研究成果と比較した場合、同じような内容で小規模な科学予算においても近似する、あるいは、世界をリードするような研究がある。例えば、メコン流域にかかわる研究課題については、この大型予算に匹敵する研究成果を生み出しているものもある。このような状況を踏まえると、億単位の予算を執行している部局ではさらに研究成果を可視化すべきであり、社会実装にむけた次のアクション計画を設定して、研究成果をあげることが必要であろう。

(5) 本研究領域が主にモデル開発が主体であったのに対し、大垣 CREST は本研究領域よりも社会実装に近いシステム開発を大きな目的としている。この流れをさらに推進するために、成果の実証・実用化への効果的な、言い換えれば民間企業が参加しやすい形態のプログラムへつなげることを期待する。

以上