

CRDS-FY2009-SP-09

戦略プログラム

自立シミュレーションの連携システム構築

～地球システムモデリング研究での実践～

STRATEGIC PROGRAM

Building a system for the integration of
multiple simulations

- A practice in earth system modeling research -



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

研究開発戦略センターでは、国として重点的に推進すべき研究領域や課題を選び、以下3種類いずれかの戦略プロポーザルとして発行している。

戦略イニシアティブ

国として大々的に推進すべき研究で、社会ビジョンの実現に貢献し、科学技術の促進に寄与する

戦略プログラム

研究分野を設定し、各チームが協調、競争的に研究することによって、その分野を発展させる

戦略プロジェクト

共通目的を設定し、各チームがこれに向かって研究することによって、その分野を発展させると同時に共通の目的を達成する

エグゼクティブサマリー

自立したシミュレーションを連携して活用するためのコミュニティと技術基盤を構築する。ここで「自立したシミュレーション」とは、ある特定の目的に対して単独で機能するよう構築され、それ自身で機能が完結しているシミュレーションをいう。自立したシミュレーションは個別には高い価値を持つが、そのままでは他のシミュレーションと連携させたより高度なシミュレーション（連携シミュレーション）を行うことができない。連携シミュレーションのための技術基盤を構築し、個別分野に蓄積された高度な知見の統合的な活用に道を切り拓く。

これまでの国内における先行投資の成果を有効活用し、誰もが自由にアクセスできるオープンな連携シミュレーション環境の構築を目指すことで、他国よりも有利に研究開発を進める。

近年、地球温暖化、環境汚染、資源枯渇、生物多様性の減少等、地球環境問題が深刻化している。国際交渉の場でも、気候変動緩和のための具体的な目標が掲げられ、それを達成するための取り組みが急務となっている。また、気候変動に適応した社会システムの創出が喫緊の課題として強く認識されている。こうした社会ニーズに応えるための政策決定は、今後大きな影響を持つようになる。

政策決定の合理性や説得性を向上させるには、将来の予測や対策の設計を的確に行う必要がある。予測や設計の対象は様々な要素が複雑に関連した“地球システム”であるため、シミュレーションによる技術的支援が強く求められる。しかし、大気循環、海洋循環、エアロゾル拡散、生態システム、交通システム、経済システム等、個別の分野で蓄積される知見が日進月歩である一方で、これらを連携して活用するシステム作りは非常に遅れている。

研究者の知的探究の中で、他分野との整合性を確保するインセンティブを持たせることは困難である。これが知的生産の成果たるシミュレーションプログラムを連携して活用する困難性の原因である。この困難性を克服するため、個別分野における研究とは別のインセンティブを持った新しいコミュニティを形成し、連携のためのシステム構築にあたる。コミュニティの形成は「気候変動に適応した新たな社会の創出」という課題を掲げて推進する。気候変動に適応しなければならないという社会の強い機運を駆動力として、行政と研究者が一体となってこの困難性を克服する。

気候学、海洋学、地球化学、生態学、社会心理学、交通工学、経済学等、独自のモデルに基づくシミュレーションプログラムを構築して研究を推進している学術分野と、統計数理科学、計算機科学等、連携シミュレーションを実行するために必要となる科学的知見を提供しうる学術分野から、連携シミュレーションに興味を持つ研究者を募り、必要な連携シミュレーションの全体像と、自立したシミュレーションを相互連携させるための技術仕様をこのコミュニティで検討し、定義し、合意する。

合意した技術仕様に基づき、連携シミュレーションが実行可能な技術プラットフォーム

を構築する。具体的には、情報通信回線を介して複数のシミュレーションプログラム及びデータベースを接続し、それらを制御するプログラムを実装する。また、この技術プラットフォーム上で実施する様々な連携シミュレーションを通じて、大規模シミュレーションプログラムを最適化する統計数理科学的な技術の充実に努める。前記コミュニティのメンバーはこの技術基盤が活用できる独自のシミュレーションプログラムやデータベースを各分野で構築し、他者との連携による新しい知見の獲得に挑戦する。このための試行錯誤を通じて、技術基盤は継続的に発展していく。このような方法は、地球システムモデリング分野以外（マーケティングや金融等）にも適用が可能である。

技術基盤の継続的な発展のため、新しく形成されるコミュニティの核となるプロジェクト本部を公的研究機関に設置する^(注)。この本部には、プロジェクトの統括責任者であるプログラムオフィサー、技術基盤の開発主体となる数名の研究代表者、エキスパートエンジニア、予算調達の責任者であるファンドマネージャーを配置する。プログラムオフィサーとファンドマネージャーは、研究代表者に研究資金を提供し、プロジェクトを統率する。エキスパートエンジニアは、国内外の研究者との緊密な連携をとりながら、研究代表者を技術面でバックアップする。

このような基盤的な研究開発は、資金調達や国内外の研究者との対話や連携を継続して行っていく必要がある。こうした努力を研究者の自助努力に任せてきた過去の反省に立ち、プログラムオフィサーとファンドマネージャーのリーダーシップのもと、研究者が研究開発に専念できる環境を資金面と技術面で整えることで基盤的な研究開発に求心力と継続性を持たせる。

この戦略プログラムで提案される技術プラットフォームはシミュレーションプログラムやデータベースを相互流通させるためのものであるため、普及しなければその機能を発揮することができない。研究開発の推進にあたっては、各国の技術開発の動向を睨みつつ適宜連携し、この技術プラットフォームが世界標準となって広く普及するように努める。世界各国（大規模な計算機資源を持たない発展途上国を含む）の研究者が共同利用可能な新しい技術基盤を構築し、大規模で複雑な地球規模問題の解決に向けて技術的なリーダーシップを発揮する。

研究成果をオープンにし、その説明責任を研究者が果たすことは、社会にとって大きな利益がある。説明責任をプロジェクト本部全体で果たす体制を構築し、研究者に過大な負荷がかかることを回避することで、研究者コミュニティのマインドセットのオープン化に向けた変革を促す。

(注) このようなプロジェクト本部は、国の基幹的な活動と位置づけ、継続的な予算措置がなされるべきである。複数のアイデアを競う性格のものではなく、継続性が重要であるため、競争的資金による単発的な予算措置とは別の支援形態が適切である点に留意が必要である。

Executive Summary

There is a growing need to integrate multiple simulations (integrated simulation) in order to simulate complicated system's behavior. Earth system simulation is a typical example. If we want to simulate total behavior of the earth system, we need to integrate simulations of atmospheric circulation, oceanic circulation, aerosol diffusion, ecological system, traffic system, economic system and so on. Researchers in different fields, such as climatology, oceanography, geochemistry, etc. are developing simulation programs for their own research purposes. To understand and predict the behavior of the earth system, which is a quite complicated system involving all of such fields, it is necessary to integrate the simulation programs developed independently for different purposes. Only limited effort, however, has been so far made to make the integration possible.

From this point of view, this strategic program proposes:

1. Building a community of collaborative researchers who are willing to accept a certain level of restrictions in their simulation programs to make them inter-operative, and
2. Developing infrastructure that allows the researchers' community to carry out integrated simulations without imposing an excessive burden on the researchers.

Taking advantage of achievements made through prior investment, freely accessed/open environment for integration of multiple simulations is recommended to be constructed and research and development should be carried out going ahead of other countries.

In recent years, the problems of global environments get worse, as seen in global warming, environmental pollution, the exhaustion of resources, the reduction of biodiversity, and so forth. Concrete targets for mitigating the climate change have been set in international negotiation. It is urgent to tackle the problems so as to achieve the targets. In addition, it is sufficiently recognized that the creation of a social system adapted for the climate change is urgent. Policy decisions meeting such social needs have huge influences over the future.

In order to make decisions more reasonable and convincing, it is required to properly forecast future and also design countermeasures against the problems. The object of the forecast and the design is an "earth system" in which a variety of elements are interacted mutually. Accordingly, it is strongly required that the policy decisions are technologically supported by simulations. Pieces of knowledge have been accumulated in the disciplines of atmospheric circulation, oceanic circulation, aerosol diffusion, ecological system, traffic system, economic system, and so forth. On the other hand,

the system for linking and using the pieces of knowledge is extremely insufficient.

It is difficult for researchers carrying out intellectual exploration to have an incentive for taking care of a technical consistency with other disciplines. That is why it is difficult to link and use simulation programs each other. To overcome this difficulty, a new community should be built which has an incentive different from that of individual disciplines. The community will work to construct a system for the integration of multiple simulations. Community building is recommended to be promoted with an issue of "Creating a New Society Adapted for Climate Change". Driven by a strong social wish adapting for climate change, the government and the researchers collaborate to overcome this difficult issue.

The community should be formed by researchers interested in the integrated simulation from the academic disciplines such as climatology, oceanography, geochemistry, bionomics, social psychology, traffic engineering, economics, and so on in which their own simulation programs have been constructed for their own researches, and from the academic disciplines such as statistical mathematics, computer science, and so on which can provide scientific knowledge required to execute the integrated simulation. In the community, the whole image of a required simulation and technological specifications necessary for integrated simulations should be investigated, defined, and agreed.

A technological platform on which the integrated simulations are executable should be constructed based on the agreed technological specifications. On the technological platform, a number of simulation programs and databases will be connected via an information network, and a control program will be implemented. In addition, statistical mathematics technologies for optimizing a large-scale simulation program will be developed through a number of integrated simulations. The community members will build their own simulation programs and databases on the technological infrastructure, and will try to get new perspectives through the collaborations. Accordingly, the technological infrastructure should be continuously developed through the trial and error.

To continuously develop the technological infrastructure, a project head office, the core of the newly formed community, is recommended to be set up in a public research organization*. A program officer as a president for this project and a fund manager as a responsible person for fund-raising should be deployed in the head office. They will captain the project teams and provide research-fund. Engineers staffed in the project head office should support the construction and maintenance of a research infrastructure through close cooperation with the researchers from home and abroad.

Continuous fund-raising, dialogues and cooperation with the researches from home and abroad are necessary for the research and development of fundamental

infrastructures. In the past, such efforts were made by researchers themselves. Reflecting on the facts, financially and technologically supported research environment should be provided to researchers under the leadership of program officer and fund manager. It makes the research project attractive and continuous.

As the technological platform is aiming at the platform for mutual connections, it should be common. The related technological trends of other countries should be studied, and the collaboration should be made appropriately. The project promotes that the technological platform becomes widely used and is recognized as a world standard. Japan should provide technological leaderships to solve the large-scale, complicated global problems. Researchers from abroad (including developing countries having no large-scale computational resources) are welcome to construct shared technological infrastructures.

It is very beneficial for the society that the results of research are opened for public and are accountable. The head office should ensure accountability for the results without imposing an excessive burden on individual researchers. Under the system, open mind-set of the researchers will be encouraged.

* This project head office should be taken as the essential activity of the nation, and budgeting for the head office should be continuously made. Accordingly, it is to be noted that the activity should be supported not by temporal budgeting but by continuous supporting form.

目 次

エグゼクティブサマリー

1. 提案の内容	1
2. 研究投資する意義	5
3. コミュニティの形成および研究開発の推進方法	7
4. 具体的な研究開発課題	13
5. 科学技術上の効果	17
6. 社会・経済的效果	21
7. 時間軸に関する考察	23
8. 検討の経緯	25
9. 国内外の状況	29
用語の説明	37

付録 I 環境技術・環境問題・アクションアイテムの整理

1. 提案の内容

本戦略プログラムでは、自立したシミュレーションを連携¹して活用するためのコミュニティと技術基盤²を構築することを提案する。

ここで「自立したシミュレーション」とは、ある特定の目的に対して単独で機能するよう構築され、それ自身で機能が完結しているシミュレーションをいう。自立したシミュレーションは個別には高い価値を持つが、そのままでは他のシミュレーションと連携させてより高度なシミュレーションを行うことができない（●コラム1）。

連携シミュレーション³のための技術基盤を構築し、個別分野に蓄積された高度な知見の統合的な活用に道を切り拓く。本提案は、誰もが自由にアクセスできるオープンな連携シミュレーション環境の構築を目指す点で、欧米のプロジェクト（9. 国内外の動向 参照）と異なる。これまでの国内における先行投資の成果を有効活用して、技術開発を進めることで、他国よりも有利に進められる可能性がある。

研究者の知的探究の中で、他分野との整合性確保という制約を自発的に生じさせることは困難である。これが知的生産の成果たる自立したシミュレーションプログラムやデータベースを連携して活用する困難性の原因である。この困難性を克服するため、個別分野における研究とは別のインセンティブを持った新しいコミュニティを形成し、連携のためのシステム構築にあたる。

新しいコミュニティの形成は、「気候変動に適応した新たな社会の創出」という課題を掲げて推進する。気候学、海洋学、地球化学、生態学、社会心理学、交通工学、経済学等、独自のモデルに基づくシミュレーションプログラムを構築して研究を推進している学術分野と、統計数理科学、計算機科学等、連携シミュレーションを実行するために必要となる科学的知見を提供しうる学術分野から、連携シミュレーションに興味を持つ研究者を募り、必要な連携シミュレーションの全体像と、自立したシミュレーションプログラムやデータベースを相互流通させるための技術仕様をこのコミュニティで検討し、定義し、合意する。

技術仕様は、後述する技術プラットフォーム⁴の機能やアーキテクチャ⁵、それに接続されるシミュレーションプログラムやデータベースの具備すべき形式的な要件等に関するものである。

1 「連携」とは、より多面的な要素を考慮するために、様々な研究分野で構築され続けている個別のシミュレーションプログラムを結合・最適化して実行可能にすることをいう。

「シミュレーションプログラムの結合」とは、複数のシミュレーションプログラム間で一方の計算結果を他方のシミュレーションプログラムの入力となるように組み合わせることをいう。

「シミュレーションプログラムの最適化」とは、観測データ等が最もよく説明できるようにシミュレーションプログラムを構成する変数等を調整することをいう。

2 技術基盤：「用語の説明」参照

3 連携シミュレーション：「用語の説明」参照

4 技術プラットフォーム：「用語の説明」参照

5 アーキテクチャ：「用語の説明」参照

●コラム 1 政策決定に統合モデルを活用する例

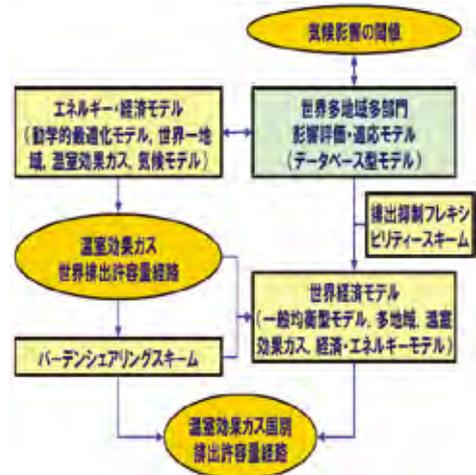
気候変動対応のための政策決定に、統合モデルによる評価が活用されている。

しかし、こうした評価において、モデルの連携には大変な労力を要し、様々なモデルをつなぎかえて多角的に評価を行うことは事実上不可能である。精緻で多角的な検討を行うには、様々なモデルを、自在に連携させることができる技術基盤の整備が求められる。

(1) Asia-Pacific Integrated Model (AIM/Impact [Policy]) モデル

京大、国立環境研などでは、温室効果ガス排出と温暖化影響を表す複数のモデルを連結し、複雑に絡みあう関連因子を総合的に考え、多種多様な政策方針の是非について比較検討する Asia-Pacific Integrated Model (AIM/Impact [Policy]) モデルを作成している [1]。

このモデルは、環境省「地球環境研究総合推進費」の“脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案手法の確立に関する総合研究プロジェクト（2050年脱温暖化社会プロジェクト）”や、“温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究”などで活用が期待されている。

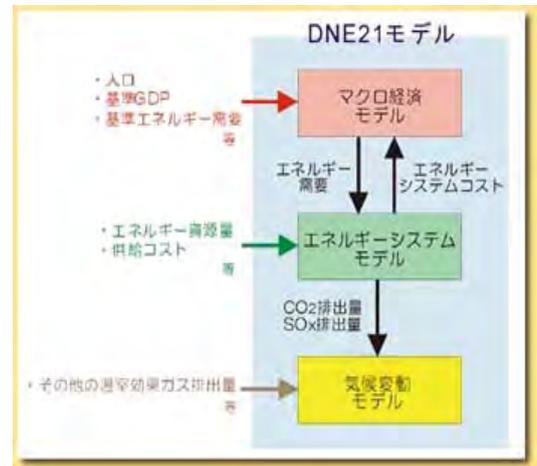


(2) Dynamic New Earth 21 (DNE21) モデル

東大、地球環境産業技術研究機構 (RITE) は、世界を10地域に分割し、地域間のエネルギー・CO₂の輸送、CO₂排出量取引を考慮したエネルギーシステムモデル、マクロ経済モデル、気候変動モデルをリンクした統合評価モデル Dynamic New Earth 21 (DNE21) を作成している [2]。

マクロ経済モデルは、人口、基準GDP、基準エネルギー需要等を考慮し、エネルギー需要を算出する。エネルギーシステムモデルは、エネルギー資源量、供給コスト等を考慮し、エネルギーシステムコストとCO₂排出量、SO_x排出量を算出する。気候変動モデルは、CO₂排出量、SO_x排出量、その他の温室効果ガス排出量等を考慮し、地球の気候変動を予測する。

このモデルの発展形である「DNE21+」モデルは、京都議定書（2008～2012年）以降の期間の枠組み・目標について検討するために内閣総理大臣が開催する「地球温暖化問題に関する懇談会 中期目標検討委員会」での検討にも活用された [3]。



(出典)

- [1] 研究ノート「温室効果ガス安定化レベル検討のための統合評価モデルの開発」 脇岡靖明 (国立環境研究所), <http://www.nies.go.jp/kanko/news/24/24-2/24-2-03.html>
- [2] 統合評価モデル DNE21 の概要 (財団法人 地球環境産業技術研究機構), <http://www.rite.or.jp/Japanese/labo/sysken/research/new-earth/DNE21-model/DNE21-model-Outline.html>
- [3] 地球温暖化問題に関する懇談会 中期目標検討委員会 (第1回) 配布資料, <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/tikyuu/kaisai/dai01tyuuki/01gijisidai.html>

形成されたコミュニティで合意した技術仕様にに基づき、技術基盤を構築する。技術基盤は3つの柱によって構成される（図 1.1）。

- 一つ目は、シミュレーションプログラム及びデータベースを結合するための技術プラットフォームである。現在は、技術仕様が統一されず結合ができないシミュレーションプログラム（変数定義、時間・空間分解能等が異なる）やデータベース（形式、時間・空間分解能が異なる）を、目的に合わせて選択・結合し、制御・実行可能にするミドルウェア⁶を実装したシミュレーション環境を提供する。この環境は、情報通信回線を介して接続されたネットワーク上に具現化される。
- 二つ目は、技術プラットフォームを支えるシミュレーションプログラムライブラリ⁷とデータベースライブラリ⁸である。シミュレーションプログラムライブラリには、シミュレーションプログラムが格納され、提供される。データベースライブラリには、シミュレーションプログラム最適化⁹の基礎となる観測データ及びその解析結果が格納され、提供される。現在は、技術仕様が統一されず、接続可能な形で構築されていないが、技術仕様に則って構築されたシミュレーションプログラムやデータベースがコミュニティのメンバーによって少しずつ充実されていく。
- 三つ目は、結合したシミュレーションプログラムを最適化するための数理科学的方法論である。結合したシミュレーションプログラムを最適化するに際して、大規模なものほどその困難性が増大するという課題に対して、様々な統計数理科学的方法論が提供される。この方法論は、様々な連携シミュレーションの実践を通じて、コミュニティのメンバーによって少しずつ充実されていく。

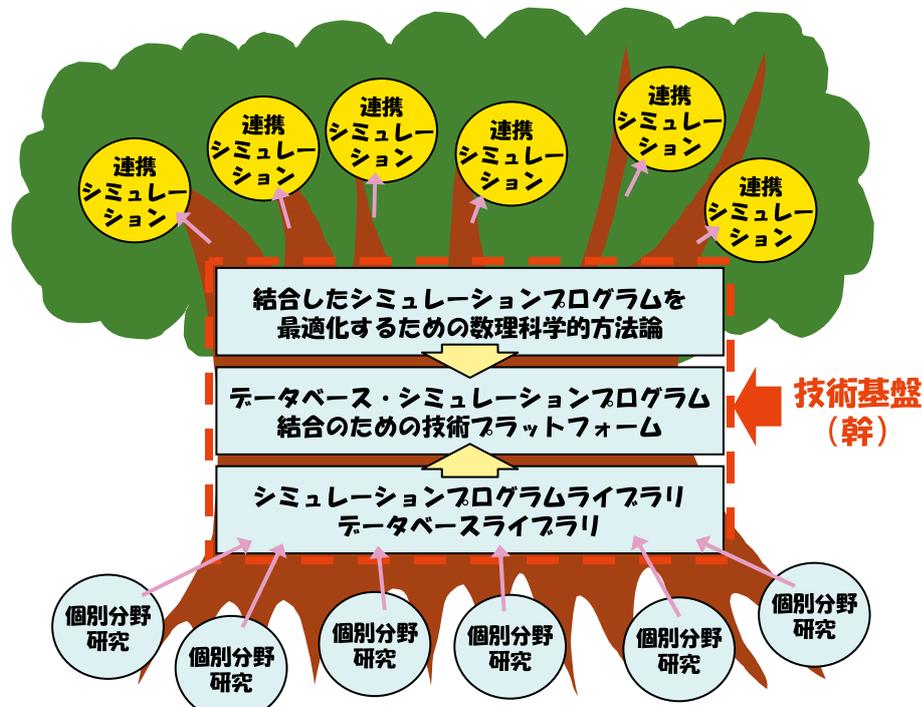


図 1.1 構築を提案する技術基盤の構成とその位置づけ

6 ミドルウェア：「用語の説明」参照
 7 シミュレーションプログラムライブラリ：「用語の説明」参照
 8 データベースライブラリ：「用語の説明」参
 9 最適化：「用語の説明」参照

コミュニティのメンバーはこの技術基盤が活用できる独自のシミュレーションプログラムやデータベースを各分野で構築し、他者との連携による新しい知見の獲得に挑戦する。このための試行錯誤を通じて、技術基盤は継続的に発展していく。

技術基盤の継続的な発展のため、新しく形成されるコミュニティの核となるプロジェクト本部を公的研究機関に設置する。この本部に配置されたプログラムオフィサーとファンドマネージャーは、プロジェクトを統括しつつ自律的に研究資金を調達し、プロジェクトに参加する研究者に研究資金を提供する。また、プロジェクト本部に配置されたエキスパートエンジニアは、国内外の研究者との緊密な連携を通じて研究インフラの構築を支援し、技術基盤の発展を技術面でバックアップする。

このような基盤的な研究開発は、資金調達や国内外の研究者との対話や連携を継続して行っていく必要がある。しかし、こうした努力を研究者の自助努力に任せてきた過去の反省に立ち、プログラムオフィサーとファンドマネージャーのリーダーシップのもと、研究者が研究開発に専念できる環境を資金面と技術面で整えることで基盤的な研究開発に求心力と継続性を持たせる。

2. 研究投資する意義

2. 1 政策決定の合理化や合意形成過程の説得性向上

近年の地球温暖化予測や低炭素社会に向けた有効な政策立案の必要性¹⁰の高まりに代表されるように、将来を予測し、自らの行動を設計していこうというニーズが大きく高まっている。

社会の持続可能性にとって、社会や自然を観測して課題を発見し、その課題を解決するためのシナリオを設計して提示するという科学者の役割は極めて重要である。モデルを作るという行為は、科学者が観察した結果から課題を発見し、課題を解決するためのシナリオを設計する際に必須の行為である。合理的な政策決定や合意形成のために、検証可能なモデルによる説明を社会は求める。しかし、モデルやそれに基づくシミュレーションプログラム作りにかかる技術的困難さが過大になると、こうした説明が実質的には不可能になってしまう。

現在、シミュレーションプログラムのアーキテクチャ、使用言語、変数・関数の定義、出力データのフォーマット等は、研究者が自由に設定している。このため、個別のシミュレーションを連携させて活用することが困難である。また、別の用途で再利用しようとすると設計の根本的な変更が必要となるため、再利用されることは希で、ゼロから作り直されるケースが多い。今後、複雑なシミュレーションプログラム構築への要請は高まるはずである。現状を放置するならば、その開発効率率は著しく低下していくことになるだろう。

自立シミュレーションの連携システム構築により、より多元的な要素を考慮したシミュレーションの実施を容易にし、目的に合わせて様々な試行錯誤が可能になる。シミュレーションプログラムやデータベースの再利用・検証可能性を高め、政策決定に具体的な資料を提供し、その合理性・説得性を向上させることができる。また、研究成果のオープン化が進み、研究者コミュニティとアクター（政策決定者や市民等）の間に無用な不信感が生まれることを回避できる。

2. 2 研究成果の有効活用による、科学的な知識の拡大

これは、上記政策決定の合理化や合意形成過程の説得性向上の要請に応える意義と表裏一体をなす。

今後も開発・蓄積され続ける様々なシミュレーションプログラム、データやシミュレーション結果等を、再利用・有効活用できる技術基盤を構築し、この技術基盤を利用するための技術的な障壁を下げっていくことで、複雑なシステムを扱う研究分野に様々な分野からの参入を促し、研究の多様性が広がる。これは、新しい学術研究の姿“e-Science¹¹”の具現化の促進にもつながる。連携シミュレーションの試行錯誤による事例の蓄積は、シミュレーションプログラムやデータベースを作るプロセスに関する新しい学術分野の開拓の可能性も期待できる。この結果、複雑なシステムの理解が深まり、その科学的知識の拡大とともに、科学技術のフロンティアはますます拡大する。

10 鳩山由紀夫総理は、第173回国会における所信表明演説（2009年10月26日）において、2020年までに1990年比で二酸化炭素などの温室効果ガスの排出を25%削減するとの野心的な目標を掲げた。今後、この目標を達成するための取組を「チャレンジ25」と名付け、鳩山総理のリーダーシップの下、あらゆる政策を総動員して推進していくとしている。

11 e-Science：「用語の説明」参照

本戦略プログラムで提案するプロジェクトの適切な運営が図られれば、こうした学術の発展を支える様々な人材が育成される点でも大きな意義がある。

3. コミュニティの形成および研究開発の推進方法

3. 1 全体設計

新しいコミュニティの形成は、「気候変動に適応した新たな社会の創出」という課題を掲げて推進する。研究者の知的探究の中で、他分野との整合性確保という制約を自発的に生じさせることは困難である。これが知的生産の成果たる自立したシミュレーションプログラムやデータベースを連携して活用する困難性の原因である。この困難性を克服するため、個別分野における研究とは別のインセンティブを持った新しいコミュニティを形成し、連携のためのシステム構築にあたる。気候変動に適応しなければならないという社会の強い機運を駆動力として、行政と研究者が一体となってこの困難性を克服する。

技術基盤の継続的な発展のため、新しく形成されるコミュニティの核となるプロジェクト本部を公的研究機関に設置して研究開発プロジェクトを推進する（図 3.1）。このプロジェクト本部は上記コミュニティの形成を主導し、技術プラットフォームのアーキテクチャ、シミュレーションプログラム・データベースの技術仕様のとりまとめ、ソフトウェアの配布、広報宣伝、訓練等を行うとともに、ミドルウェアの開発とバージョンアップの管理も行う。

研究開発の推進にあたっては、資金調達や国内外の研究者コミュニティとの対話や連携を継続して行っていく必要がある。こうした努力を研究者の自助努力に任せてきた過去の反省に立ち、研究者が研究開発に専念できる環境を資金面と技術面で整えることで、基盤的な研究開発に求心力と継続性を持たせる。

気候学、海洋学、地球化学、生態学、社会心理学、交通工学、経済学等、独自のモデルに基づくシミュレーションプログラムを構築して研究を推進している学術分野と、統計数理科学、計算機科学等、連携シミュレーションを実行するために必要となる科学的知見を提供しうる学術分野から、連携シミュレーションに興味を持つ研究者を募り、必要な連携シミュレーションの全体像と、自立したシミュレーションプログラムを相互流通させるための技術仕様をこの新しいコミュニティで検討し、定義し、合意する。

合意した技術仕様に基づき、連携シミュレーションが実行可能な技術プラットフォームを **Cyber Science Infrastructure**¹² 上に構築する。具体的には、情報通信回線を介して複数のシミュレーションプログラム及びデータベースを接続し、それらを制御するミドルウェア（β版¹³）の開発を当初3年程度で行い、利用可能にする。

仕様のとりまとめとミドルウェアの構築は、プロジェクト本部の研究代表者（Principal Investigator）数名が主導する。コーディングのための人件費と関連研究開発のための予算として、研究代表者には各々年間1～2億円の予算措置を継続的に行う。

この技術プラットフォーム上で実施する様々な連携シミュレーションを通じて、大規模なシミュレーションプログラムを最適化する統計数理科学的な技術の充実に努める。

新しいコミュニティのメンバーはこの技術基盤が活用できる独自のシミュレーションプログラムやデータベースを各分野で構築し、他者との連携による新しい知見の獲得に挑戦

12 Cyber Science Infrastructure : 「用語の説明」 参照

13 β版（ベータ版） : 「用語の説明」 参照

する。このための試行錯誤を通じて、コミュニティは拡大し、技術基盤は継続的に発展していく。

アジア研究圏創設への機運¹⁴などを背景に、海外（特にアジア諸国）から関連研究者を広く募り、共同研究開発体制を構築する。欧米の研究者コミュニティとの協力関係も構築・維持する。

シミュレーションプログラムやデータベースを社会にオープンにすることで多くの説明責任が発生する。このため、これまで以上に研究者にかかる負荷が大きくなる可能性があることには十分な注意が必要である。研究者は、過大な負荷等を恐れて公開をためらいがちである。この結果、成果の有効活用が円滑に進まないばかりか、アクター（政策決定者や市民等）との間に無用の相互不信を招く可能性すらある。研究成果をオープンにし、その説明責任を研究者が果たすことは、社会にとって大きな利益がある。説明責任をプロジェクト本部全体で果たす体制を構築し、研究者に過大な負荷がかかることを回避することにより、研究者コミュニティのマインドセットのオープン化に向けた変革を促し、プロジェクトを社会全体として継続的に支えていく。なお、戦略上、公開すべきでない成果は、このプロジェクトの対象外である。

地球システムモデリング分野で一定の成果をあげた場合は、同様の手法を他分野（マーケティングや交通など）にも展開することを視野に入れる。

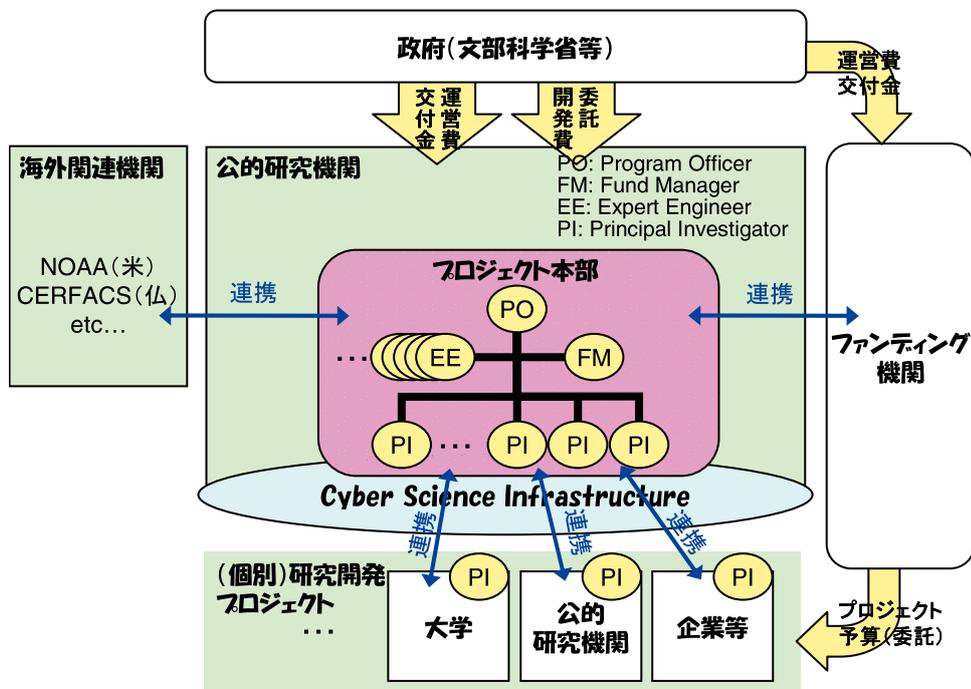


図 3.1 研究開発推進体制

14 アジア諸国が連携して新たな社会像の構築を目指すため、武田計測先端知財団「科学技術の国際連携戦略研究会」（座長・有本建男・科学技術振興機構 社会技術研究開発センター長）が 2009 年 12 月 15 日に発表した中間報告で提案されている概念で、欧州連合の「欧州研究圏」のアジア版に相当する。
http://www.takeda-foundation.jp/asia/asia_20091215.pdf

3. 2 新しいコミュニティの構成

気候学、海洋学、地球化学、生態学、社会心理学、交通工学、経済学等、独自のモデルに基づくシミュレーションプログラムを構築して研究を推進している学術分野と、統計数理科学、計算機科学等、連携シミュレーションを実行するために必要となる科学的知見を提供しうる学術分野から募った、連携シミュレーションに興味を持つ研究者たちが新しいコミュニティの主体となる。外国人も含めて数名～数十名（兼務可）で構成する。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change¹⁵) 等にシミュレーション結果を提供している研究チームからの参画が望ましい。

3. 3 プロジェクト本部の設置と予算措置

プロジェクト本部を日本の公的研究機関に設置し、研究開発を推進する。

理由は下記の通りである：

- (1) 新しく形成されるコミュニティの核となる組織が必要である。
- (2) 技術基盤の維持、その後の改良は、エンジニアと先端研究者の継続的な協業が不可欠であることから、時限付きの研究にはなじまない。継続的な発展を目指すべきである。
- (3) これまで国が National Research Grid Initiative (NAREGI) プロジェクト (2003-2007) 等、グリッド技術活用等によりデータや計算結果の共有化に関する先進的な研究を推進してきており、その蓄積を効率的に承継・発展させるべきである。
- (4) 本提案が求める柔軟な機能を民間企業への委託研究で実現するには、経費が過大になりがちである。

プロジェクト本部は、技術基盤の開発及びその維持やメンテナンスに継続的な予算措置がなされるよう努める。このようなプロジェクト本部は、国の基幹的な活動と位置づけ、継続的な予算措置がなされるべきである。複数のアイデアを競う性格のものではなく、継続性が重要であるため、競争的資金による単発的な予算措置とは別の支援形態が適切である点に留意が必要である。

3. 4 プログラムオフィサーとファンドマネージャーの配置

プロジェクト本部には、技術基盤全体の開発責任者であるプログラムオフィサーと、予算調達の責任者であるファンドマネージャーを配置する。プログラムオフィサーとファンドマネージャーは、研究代表者に研究資金を提供し、プロジェクトを統率する。

プログラムオフィサーは、技術基盤全体の進捗を総括する。様々なドメインの研究者と連絡を密にとり、技術基盤全体の設計を主体的に進める。

ファンドマネージャーは、プログラムオフィサーと連携しながら全体の進捗を掌握しつつ、予算調達と執行に関する実務を行う。様々なファンディング機関のファンディングスキームを研究し、費用対効果が最大になるよう、常に進展フェーズに最適なプログラムの設計・調整を行い、自律的に研究資金を調達し、プロジェクトに参加する研究者に研究資金を提供する。なお、効果の計測手段を設定する必要がある。

15 <http://www.ipcc.ch/>

プログラムオフィサーとファンドマネージャーは、技術プラットフォームの開発に必要な付加研究へのサブファンディングが迅速かつ柔軟に行える体制の構築と運用に努める。想定されるマネジメントの例としては、ソフトウェアの開発が遅延していれば、それを促進させるためのタスクフォースの組織、新しく得られた学術的な成果に基づく新規研究開発プロジェクトの立ち上げ、実用化にすぐに結びつけられる成果が上がった際の技術移転プロジェクトの立ち上げなどが挙げられる。

また、Cyber Science Infrastructure の上に構築された技術基盤を活用し、個別研究開発プロジェクトを適宜立ち上げる。（Cyber Science Infrastructure 上の実験の例は、●コラム 2 参照）

この研究開発プロジェクトでは、様々なシミュレーションプログラムやデータベースの結合実験や、結合したシミュレーションプログラムを最適化する研究開発が行われ、自立したシミュレーションを連携させるための技術開発が本格的に行われる。

3. 5 連携シミュレーションを制御するミドルウェアの開発

連携シミュレーションを制御するミドルウェアの開発と実装実験は、プロジェクト本部内に特別チームを構成して推進する。このチームに参画する研究代表者たちは技術仕様の検討チームと兼務でなければならない。この特別チームは、情報技術のエキスパートエンジニアの支援を受ける。

情報技術のエキスパートエンジニアは、研究代表者たちを支援し、シミュレーションプログラムライブラリやデータベースライブラリの整備、それに伴うデータ加工、プログラミング、ソフトウェア開発・配布、広報宣伝等を行う。エキスパートエンジニアは長期的な雇用が確保され、技術基盤の継続的な維持とバージョンアップを担う。エキスパートエンジニアは、国の最先端学術情報基盤の運用に詳しい者、オープンソースソフトウェアの開発に熱心な者が適任である。

3. 6 海外の先行事例の研究と国際交流

研究開発の推進にあたっては、各国の技術開発の動向を睨みつつ適宜連携し、できる限り調和するよう努める。

この戦略プログラムで提案される技術プラットフォームはシミュレーションプログラムやデータベースを相互流通させるためのものであるため、普及しなければその機能を発揮することができない。従って、技術プラットフォームの普及がプロジェクト成功の一つの評価基準となる。

技術プラットフォームの普及率を上げるためには、その開発段階から多くの国（特にアジア諸国）の研究者やエンジニアを広く受け入れ、共同で研究開発を進める。国際共同研究プロジェクトを立ち上げることも考えて良い。この技術プラットフォーム構築に参加した研究者やエンジニアは、自ら作り出した技術を各国に持ち帰って研究開発を続けることとなるため、技術プラットフォームが各国に普及しやすくなる。

各国の研究者やエンジニアとの継続的な情報交換を行う窓口を公的研究機関に設置し、多くの国の研究者・技術者が技術基盤の継続的な発展に参加できるように配慮する。研究開発の成果は逐次世界中に公表し、研究開発成果の利用環境も世界中に公開する。

研究開発にあたっては、すでに一部先行している米国 ESMF（Earth System Modeling

Framework¹⁶⁾ や欧州の PRISM (Partnership for Research Infrastructures in earth System Modeling¹⁷⁾) の技術仕様を研究し、協力関係を構築し、活用可能な好例はできる限り取り入れる努力をする。シミュレーションプログラムやデータの相互流通性は高いほど良いことを念頭に、ESMF や PRISM とできる限り協調する。

3. 7 人材の育成

技術基盤の継続的な維持とバージョンアップのために、専属の技術スタッフ（情報技術のエキスパートエンジニア）を恒久的に配置できるポストを用意し、その能力の開発に努める。こうしたポストを作って維持することで、最先端学術情報基盤の運用スキルを持ち、様々なドメインの研究者との連携をとりながら技術基盤を発展させていくことができる高い専門性を持ったエンジニアを、学術の現場で継続的に育成する。

こうした措置はこれまでなされてこなかったため、エキスパートエンジニアの育成プログラムを、この研究開発プロジェクトには当初から組み込む。

エキスパートエンジニアの育成は、常時最先端の研究が推進されている現場を持つことで可能となる。また、ファンドマネージャーは、研究開発プロジェクトだけでなく、それらを実現可能にする基盤となる高度な研究者・エンジニアの養成に必要な予算措置を怠ることのないよう十分注意しなければならない。

16 <http://www.esmf.ucar.edu/>

17 <http://prism.enes.org/>

●コラム 2 : 最先端学術情報基盤上での観測システム統合

国立情報学研究所が運営している学術情報ネットワーク (SINET3; Science Information NETwork 3) は、日本全国の大学、研究機関等の学術情報基盤を高速回線で結んでおり、同研究所が構築を推進している最先端学術情報基盤 (Cyber Science Infrastructure) を構成している。

この基盤上で、天文台の観測結果を統合的に活用する研究がスタートしている。

VONUS(Vlbi Optically linked Network Using Super-sinet) と呼ばれる、スーパーサイネット回線を使った光結合 VLBI (Very Long Baseline Interferometry: 超長基線干渉計) ネットワーク計画は、国土地理院、岐阜大学、山口大学と国立天文台といった、異なる研究機関を双方向光回線で結合することで観測網を拡大し、その後継プロジェクトにおいてリアルタイム相関処理ができるところまで進んでいる [1]。

この初期のインフラ活用によって、現在、大容量ディスクバッファ [2]、超高速サンプリング [3] などの技術開発と共に、光結合 VLBI プロジェクト [4] として国立天文台にて推進されており、遠く離れた電波望遠鏡を高速光通信回線で結合、大量の観測情報を合成することで、これまでにない高い観測感度を実現しようとしている。

最先端学術情報基盤上で既存のインフラを結びつけて研究開発を進めている好例といえよう。

(出典)

[1] <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/evlbi/vonus/>

[2] 2Gbps のデータをハードディスクに記録し、ハードディスクから 2Gbps のデータとして再生することができる。ハードディスク部だけを取り外してデータを簡単に輸送することができるので、超高速光ファイバで結ばれていない観測局でも広帯域観測が可能。

<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/evlbi/techno/>

[3] 観測帯域の広帯域化で、より高感度な観測が可能になり、特に 22GHz 帯の全帯域をサンプリングすることができるため、水蒸気のスペクトルライン特性を高感度に観測する「水蒸気ラジオメータ」としての活躍も期待できる。また、26GHz の信号を直接サンプリングできるので周波数変換が不要となり、観測システムを簡素化・軽量化でき、運用が安定するため、衛星搭載 VLBI 観測装置としても期待されている。<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/evlbi/techno/>

[4] <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/evlbi/>

4. 具体的な研究開発課題

プロジェクト本部が主導して形成されたコミュニティにおいて実際に取り組みられる具体的な研究開発課題は、下記のようなものが考えられる。

4. 1 シミュレーションプログラム及びデータベース結合のための技術プラットフォームの研究開発 (図 4.1)

情報通信回線で接続された様々なシミュレーションプログラム(変数定義、時間・空間分解能等が異なる)やデータ(形式、時間・空間分解能が異なる)を目的に合わせて選択・結合し、実行可能にする技術プラットフォームを研究開発する。この研究開発は、プロジェクト本部が主導する。

現在、複数の研究分野で構築されたシミュレーションプログラムを利用して統合的なシミュレーションを行う場合、それぞれのシミュレーションプログラムの必要箇所を切り出して統合プログラムを構築している。しかし、この統合には多大な労力を要する。既存のシミュレーションプログラムは変数定義・時間分解能・空間分解能等がそれぞれ異なるため、実質的には最初からコーディングをやりなおすことになってしまう場合がほとんどだからである。データ形式や解像度が異なるデータベースの統合的な活用も困難である。本提案では、こうしたシミュレーションプログラムやデータベースにインデックスを付与し、その機能を明確にすることで読み出すためのインタフェース仕様¹⁸を統一し、自立したシミュレーションプログラムの一部または全部をファンクションコール¹⁹にて呼び出し、変数定義や分解能を自動的にそろえる機能を持った技術プラットフォームを整備することで、インターネット上で接続されたシミュレーションプログラム群、データベース群を自在に連携させられるようにする。

(1) 技術プラットフォームのアーキテクチャとインタフェース仕様の定義

変数定義、時間・空間分解能、使用言語の異なるシミュレーションプログラムライブラリやフォーマットが異なるデータベースライブラリを、共通のファンクションコールで連携させるために、資源管理、ファイル要求、データ転送、認証等セキュリティなど、技術プラットフォーム全体のアーキテクチャを設計する。

このアーキテクチャに則り、共通のファンクションコールで情報処理が可能なインタフェース仕様(プロトコルやヘッダーの定義等、Application Program Interface²⁰に類するもの)を設計し、定義する。

シミュレーションプログラムの再利用可能性を高めるため、シミュレーションプログラムの機能をモジュール化し、機能の取捨選択が柔軟に行えるアーキテクチャ及びインタフェース仕様にする。プログラミング言語レベルか、モデリング言語レベル(Universal Modeling Language²¹等)でプログラムを表現する方法の共通化を図る。

なお、シミュレーションプログラムライブラリやデータベースライブラリは、物理的に一元管理される場合と、仮想的に一元管理される場合(データベースやシミュレーション

18 インタフェース仕様：「用語の説明」参照

19 ファンクションコール：「用語の説明」参照

20 Application Program Interface：「用語の説明」参照

21 Universal Modeling Language：「用語の説明」参照

プログラムは物理的に分散して保持される) が考えられる。

(2) ミドルウェアの開発

シミュレーションプログラム及びデータベースを結合するためのミドルウェアを開発する。空間分解能や時間分解能を自動的に整合させる再グリッド化²²機能、カレンダー管理²³機能、ロギング²⁴、エラーハンドリング²⁵機能、並列処理機能を開発してこれに組み込む。

これは、現在地球システムモデリング分野で使われているカップラ²⁶の機能に類似する(●コラム3)。

●コラム3 欧米のプロジェクトで開発されているカップラの特徴

複数のシミュレーションを連携させる際に、プログラムごとに異なる座標表現や時間軸の相違を解消し、データの交換に統一的なインタフェースを与えるソフトウェアを“カップラ”と呼ぶ。米国のESMF及び欧州のPRISMでは、それぞれ独自にカップラが開発されている。

(1) ESMF (Earth System Modeling Framework・米国)

ESMFのモデル(シミュレーションプログラム)は、要素モデルの結合点毎に別個のカップラが挿入される点に特徴がある。カップラが各要素モデルに付属するため、データパスが単純で高速性を得やすい。また、ESMF全体としてモデル作成のためのフレームワークを設定しているため、互換性の高いプログラムが開発しやすい。一方で、この枠組みに適応させるための手続きが煩雑になるのが難点である。

(2) PRISM (Partnership for Research Infrastructures in earth System Modelling・欧州)

PRISMのモデルは、OASISと呼ばれるカップラで全要素モデルを結合している点に特徴がある。そもそも、つなぐモデルに合わせてカップラが開発されているので、枠組みに適応させる煩雑な手続きは生じない。一方で、単一のカップラで全てのモデル間のデータ送受信を媒介するため、ESMF統合モデルに比べて通信効率が低下する可能性が高い。カップラ自体に複数のコアを割り当てることによるハードウェアの利用効率の低下や、コア数の割り当てが少ない場合には多量のデータを一つのカップラに集めることによるコアメモリの容量不足なども課題となっている。

(参考文献)

荒川隆・吉村裕正:「気候シミュレーションにおける結合ソフトウェアの開発」RIST ニュース No.47, (2009)
<http://www.rist.or.jp/rist/rnews/47/47s4.pdf>

4. 2 シミュレーションプログラムとデータベースのライブラリ構築を支援するツールの開発 (図4.1)

シミュレーションプログラムライブラリやデータベースライブラリの構築を支援するための各種ツールを開発する。この開発は、プロジェクト本部が主導する。

ライブラリの整備は、共通の技術仕様に則ってシミュレーションプログラムやデータベースを構築する継続的な努力によって進められる。その多くは、ソフトウェアの配布、広報宣伝、訓練等の努力となるが、各種支援ツールの開発によって普及が格段に促進される。

22 再グリッド化:「用語の説明」参照
 23 カレンダー管理:「用語の説明」参照
 24 ロギング:「用語の説明」参照
 25 エラーハンドリング:「用語の説明」参照
 26 カップラ:「用語の説明」参照

(1) シミュレーションプログラムライブラリの整備を支援するツール

- ・ プログラムアーキテクチャの解析ツール： シミュレーションプログラムのアーキテクチャを半自動的に解析し、モジュラー化する。
- ・ プログラムアーキテクチャの変換ツール： シミュレーションプログラムのアーキテクチャを半自動的に変換する。

(2) データベースライブラリの整備を支援するツール

- ・ データ自動変換ツール： データの形式や解像度を自動的に変換する。
- ・ データインデキシングツール： データベースに所定のインデックスを付与する。
- ・ データ補完ツール： 再解析により観測データやシミュレーションデータを補完する。
- ・ 簡易入力インタフェース： 観測データを簡便に入力可能にする。

4. 3 結合したシミュレーションプログラムを最適化するための数理科学的方法論の研究開発 (図 4.2)

統計数理科学的方法により、結合したシミュレーションプログラムを最適化する技術を研究開発する。この研究開発は、技術プラットフォームを共有するコミュニティ全体で推進し、その成果をプロジェクト本部に結集し、相互利用可能にする。

シミュレーションプログラムは、観測データや他の計算結果を説明することができるように調整しなければ、将来の予測や対象の制御に使うことはできない。多くのシミュレーションプログラムを結合して複雑なシミュレーションプログラムを作ると、シミュレーションプログラムの調整方法の選択肢は爆発的に増大してしまう。この課題を克服するため、爆発的に増大した候補の中から最適の調整方法を選択する（シミュレーションプログラムを最適化する）技術を研究開発する。

数値シミュレーション²⁷の場合は、データ同化技術²⁸、エージェントベースドシミュレーション²⁹の場合は、エージェントの設計を調整する技術等が重要になる。その他、状態空間モデル³⁰、ベイズモデル³¹、ブースティング³²（機械学習）といった技術の活用が想定される。

シミュレーションプログラムの評価技術の研究開発も行う。現在、統計モデルの予測性能を評価する技術として、赤池情報量規準³³がある。目的に応じてこうした評価技術の研究開発し、国際標準規格とすることも検討する。

27 数値シミュレーション：「用語の説明」参照

28 データ同化技術：「用語の説明」参照

29 エージェントベースドシミュレーション：「用語の説明」参照

30 状態空間モデル：「用語の説明」参照

31 ベイズモデル：「用語の説明」参照

32 ブースティング：「用語の説明」参照

33 赤池情報量規準：「用語の説明」参照

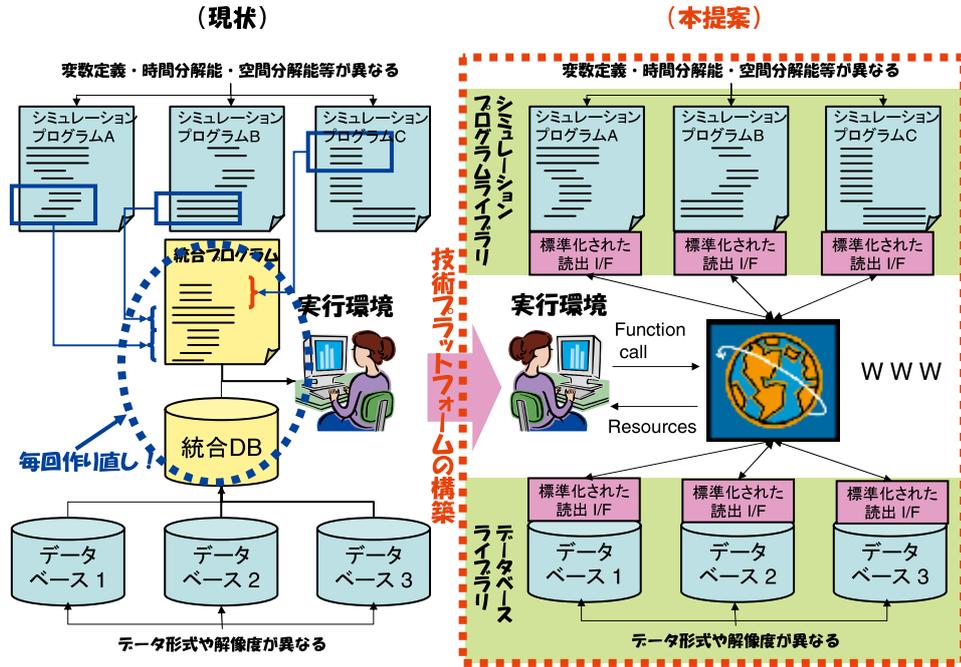


図 4.1 シミュレーションプログラム結合技術プラットフォームの概念図

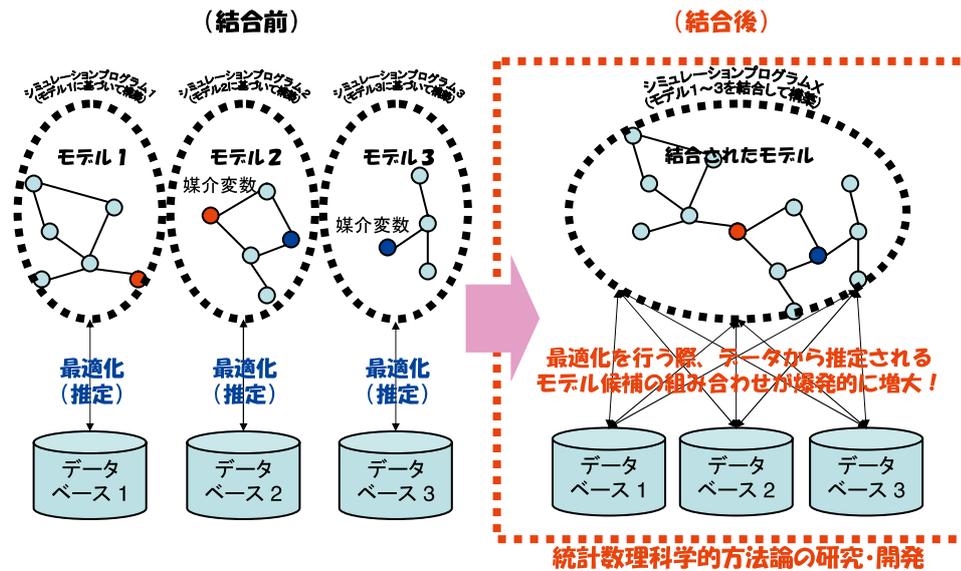


図 4.2 シミュレーションプログラムの結合が大規模化することによる最適化の困難性の概念図

5. 科学技術上の効果

(1) 研究成果の有効活用

様々な研究分野で作られたシミュレーションプログラム、観測データ、シミュレーションの計算結果等、多くの研究成果が現在でも開発・蓄積され続けている。また、情報通信技術の発達により、これらの資源の利用可能性が高まっている。一方で、シミュレーションプログラムで使われている言語や変数・関数の定義、時間・空間分解能、出力データの形式、データベースの形式や解像度等がバラバラであり、別の用途で活用しようとしても、設計を根本的に変更しなければならないことが多く、結果として有効活用できないケースがほとんどである。

自立シミュレーションの連携システムを構築することにより、こうした多くの研究成果の多様性を確保しつつ、一定範囲の制約を加えることで、有効活用する道が開ける。この結果、シミュレーションプログラムやデータベースといった研究成果が有効活用され、科学技術フロンティアの拡大が促進される。

(2) 分野融合による対象理解の深化

地球環境は複雑なシステムの相互作用によって変動するため、そのメカニズムを理解して将来を予測したり、緩和・適応策を策定したりするには多くの困難を伴う。この困難を克服するために、幅広く知識を活用する必要がある。現在、学問分野は専門分化し、各専門分野に多くの知識が蓄積されている。地球環境の理解を深めるためには、これらを統合的に活用しなければならない。例えば地球システムモデリングの分野では、大気や海洋の循環シミュレーションプログラムで自然現象を記述し、予測に活用する研究が主流だが、生態系シミュレーションプログラムや社会シミュレーションプログラムとこれらの大気・海洋循環シミュレーションプログラムをつなげることができれば、社会現象と自然現象の相互作用を把握できる可能性がある（●コラム4）。

自立シミュレーションの連携システムを構築することで、大規模なシミュレーションプログラムをコーディングしなくてもシミュレーションが可能になるため、当該分野への技術的な参入障壁が低下し、幅広い分野の研究者の参加が可能になる。この結果、この技術基盤を介して様々な分野の知識が結合可能になり、対象の理解が深まる。

●コラム 4 人間の活動がサンゴ礁に与える複雑な影響

人間の活動がサンゴ礁に与える複雑な影響の解明に先駆的に取り組むプロジェクト「サンゴ礁学」がある [1]。サンゴ礁を持つ島嶼（とうしょ：大小の島々）への人間居住がはじまって数千年ほどたち、人間の活動との微妙な均衡状態を保っていると考えられている。現在、このサンゴ礁は、ローカルな環境ストレスと地球温暖化が複合したストレスによって、劣化・破壊の危機にある。しかし、現状では、サンゴ礁の階層的な共生系の維持機構とそのストレス応答が不明なため、科学的根拠に基づいて制御・再生策をとることができない。「サンゴ礁学」では、このサンゴ礁共生系の複合ストレスに対する応答モデルを構築するとともに、応答モデルに基づいてサンゴ礁の監視・診断を行う手法を開発し、適切なストレス制御と修復・再生のために必要なガイドラインを示し、人とサンゴ礁の新たな共生・共存系構築のための学術的基礎を創ろうとしている。

一方で、海は大気中の二酸化炭素の吸収源の一つであり、大気中の二酸化炭素濃度が 600ppm を超えると海の水素イオン指数（pH）が 0.2～0.3 下がり、サンゴや貝殻の炭酸カルシウムが溶出することが計算機シミュレーションによって予測されている。この結果、殻を持つプランクトン（翼足類）が激減し、魚類やクジラが餌を失う可能性もあるという [2]。海の水素イオン指数は、大気中の二酸化炭素との関係だけで決まるわけではない。温度やその他の微生物の生息状況、人間社会から流れ込む生活排水などからも影響を受ける。しかし、こうした複雑なシステムの動的挙動を予測することは今のところ困難なままである。サンゴ礁保全のための政策を決定するには、こうした複雑で多面的な共生、共存系を具体的に理解し、合意形成を行うべきである。このためには、海洋生態系、大気海洋循環系、経済社会系の知見を統合的に活用する必要がある。具体的に考えられる例としては、経済社会活動によって発生する二酸化炭素排出量、川から海に排出される生活排水の酸性度等のシミュレーション結果を大気海洋循環シミュレーションに入力し、出力される各所の海水の二酸化炭素濃度や栄養塩の濃度を更にサンゴ礁の生態シミュレーションに入力する。そのシミュレーション結果から、サンゴ礁消滅の確率を計算する。

様々な状況を想定して、連携シミュレーションによる試行錯誤を繰り返すことで、人間の活動と海洋生態系との関連性を検討することが可能になるかもしれない。



(上図は、文部科学省科学研究費補助金「サンゴ礁学」のウェブサイトから許諾を得て転載したものです)

(出典)

[1] 文部科学省科研費補助金「サンゴ礁学」 <http://www.coralreefscience.jp/index.html>

[2] Orr, J. et al., Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature, 437, 681-686, 2005.
<http://www.nature.com/nature/journal/v437/n7059/full/nature04095.html>

(3) 情報学の新しい研究分野の開拓

経営判断、政策立案、商品やサービスの設計など、複雑な要素がからみあう対象をシミュレートするニーズは大きい。しかし、様々な洞察や意図をふまえてシミュレーションプログラムを作る技術は研究者の職人技とされており、一部の統計数理科学的手法を除き、その作成過程が十分に体系化されているとは言えない。

自立シミュレーションの連携システムを構築することで、シミュレーションプログラムやデータベースを作るための試行錯誤が促進され、シミュレーションプログラムやデータベース作りに関する知見が多く蓄積される。そして、「シミュレーションプログラムやデータベースを作る」プロセスを合理的に進める方法論について、蓄積された多くの事例をもとに議論することが可能になる。この結果、シミュレーションプログラムやデータベースを作るプロセスに関する新しい学術分野が生まれる可能性がある。

(4) 新しい学術研究の姿“e-Science”の具現化促進

情報通信回線で接続された様々な計算機資源を使いこなすことで実現する新しい科学研究を「e-Science」と呼ぶ。e-Scienceは、様々な学問分野の研究リソース、研究成果、人材等を情報通信技術で有機的に結びつけ、これまでにない価値を生み出す可能性を持つ。

自立シミュレーションの連携システムを構築することで、計算機資源の活用に熟達した特定の研究者コミュニティ内でのみ活用されてきた技術が、その他の研究者コミュニティでも活用可能になり、新しい研究ツールとしての存在感が高まる。この結果、シミュレーションプログラムやデータベースをつなぐための全体設計や運用の経験が、幅広い研究者コミュニティに蓄積され、e-Scienceの具現化が促進される。

(5) 人材育成

大きな情報インフラを使った研究で成果を出すには、研究者とそれを支えるエンジニアの適切な役割分担が決定的に重要である。近年の日本の情報分野への研究開発投資は、そのほとんどが情報通信インフラか研究者に投入されており、それを支えるエンジニアの層を育てるような投資はほとんどされていない。この結果、研究者にインフラ整備のための負担が過度に集中し、研究開発投資によって構築されたインフラを継続的に発展させる基盤ができにくかった。

自立シミュレーションの連携システムを構築するため、シミュレーションプログラムライブラリの整備と維持、データベースライブラリの整備と維持、自立シミュレーションの連携に関する共通技術基盤の研究開発・発展に継続的に投資がなされると、それを支えるエンジニアの育成が可能になる。また、共通の技術基盤の開発・維持・発展を継続していくことで、共通の経験や知識を蓄積した研究者やエンジニアが様々な研究ドメインで育成され、この技術基盤での経験を生かした多様なキャリアパスのデザインも可能になる。

6. 社会・経済的効果

(1) 政策決定の合理化

近年、地球温暖化、環境汚染、資源枯渇、生物多様性の減少等、地球環境問題が深刻化している。国際交渉の場でも、気候変動緩和のための具体的な目標が掲げられ、それを達成するための取り組みが急務となっている。また、気候変動に適応した社会システムの創出が喫緊の課題として強く認識されている。こうした社会ニーズに応えるための政策決定は、今後大きな影響を持つようになる。

しかし、地球環境は複雑なシステムの相互作用によって変動しており、自らの行動と結果の間の因果関係推定は困難である。一方で、一旦政策が実施されると、設備や人材に対して莫大な投資が必要になる。失敗した時の損失も甚大である。

政策決定の合理性や説得性を向上させるには、将来の予測や対策の設計を的確に行う必要がある。予測や設計の対象は様々な要素が複雑に関連した“地球システム”であるため、シミュレーションによる技術的支援が強く求められる。このため、例えば温暖化対策のために世界各国で様々なシミュレーションプログラムが作られ、政策決定に活用されてきている。しかし、大気循環、海洋循環、エアロゾル拡散、生態システム、交通システム、経済システム等、個別の分野で蓄積される知見が日進月歩である一方で、これらを連携して活用するシステム作りは非常に遅れている。このため、シミュレーションプログラム構築には莫大なコスト（費用・機材・人材・時間）が投入され、一部の専門家に過大な負荷を強いざるを得ない状況になっている。今後、より合理的な判断を行うための根拠となる材料を求める社会の要請に応えようとする、そのコストや負荷は益々増大していく可能性が高い。

自立シミュレーションの連携システムを構築することで、政策決定者の合理的な判断に資する具体的な資料を提供することが今よりも格段に容易になる。また、シミュレーションプログラムを作るためのコストを低減でき、一部の専門家への負荷の集中も緩和される。

(2) 合意形成過程の説得性向上

シミュレーションによって得られた知見を実際の政策に反映するためには、アクター（政策決定者や市民等）の間での合意形成が不可欠である。形成される合意に唯一の正解は存在しないため、提供されたシミュレーション結果の意味について様々な角度から検証し、アクターの納得が得られなければ、合意形成はできない。

自立シミュレーションの連携システムを構築することで、コンピュータシミュレーションを介した様々な試行錯誤も容易になり、シミュレーションが示す計算結果の意味を多角的な視点から検証しながら議論することが可能になる。このため、合意形成過程の説得性が高まる。また、研究成果のオープン化が進み、研究者コミュニティとアクターの間は無用な不信感が生まれることを回避できる。

(3) 科学技術外交におけるリーダーシップの発揮

発展途上国の多くは、温暖化に伴って発生する様々な災害の被害者になりうる。一方で、多くの発展途上国は日本のような高度な計算機資源を保有しない。こうした高度な計算機資源を保有しなくても、研究者や政策決定者が協力して様々な試行錯誤を自ら行い、自国の政策を検討するためのシミュレーション結果を得られることが理想である。

自立シミュレーションの連携システムを構築し、各国に利用可能にすることで、汎用性の高い計算機資源を使って各国のシミュレーションプログラムを相互流通させる仕組みが作られる。この結果、日本の研究開発投資が、日本国内にとどまらず広範囲に成果をもたらす。各国の研究者が共同利用可能な使いやすい技術基盤を構築して世界に提供することで、科学技術分野でのリーダーシップを発揮し、日本のプレゼンスを向上させていくことができる。

7. 時間軸に関する考察

公的研究機関にプロジェクト本部を設置し、以下のタイムラインでコミュニティの形成と研究開発を推進する（図 7.1）。このプロジェクト本部はコミュニティの形成を主導し、技術プラットフォームのアーキテクチャ、シミュレーションプログラム・データベースの技術仕様のとりまとめ、ソフトウェアの配布、広報宣伝、訓練等を行うとともに、ミドルウェアの開発とバージョンアップの管理も行う。

(1) 1年目～2年目 【プロジェクト本部で実施】

プロジェクト本部は、学会や自ら開催するワークショップ等を通じて安定的にコミュニティの形成を主導する。気候学、海洋学、地球化学、生態学、社会心理学、交通工学、経済学等、独自のモデルに基づくシミュレーションプログラムやデータベースを構築して研究を推進している学術分野と、統計数理科学、計算機科学等、連携シミュレーションを実行するために必要となる科学的知見を提供しうる学術分野から、連携シミュレーションに興味を持つ研究者を募り、必要な連携シミュレーションの全体像と、自立したシミュレーションプログラムやデータベースを相互流通させるための技術仕様をこのコミュニティで検討し、定義し、合意する。

技術面では、仕様検討チームのメンバーがサンプルとなるシミュレーションプログラムやデータベースを持ち寄って、機能のモジュラー化、アーキテクチャの共通化について具体的な検討を行う。

(2) 2年目～3年目 【プロジェクト本部で実施】

1～2年目に決定したアーキテクチャとインタフェース仕様に基づいて、ミドルウェアのコーディング、サンプルシミュレーションプログラム・サンプルデータベースの加工を開始。

(3) 3年目以降 【プロジェクト本部で実施】

ミドルウェア（β版）の公開と配布開始。

並行して、連携シミュレーション実験（技術プラットフォーム上で複数のシミュレーションプログラムやデータベースを結合し、最適化して実行する実験）を開始。

3年目の開発期間終了時に技術プラットフォームの技術仕様・利用価値をレビューし、継続して発展させる価値があると判断された場合、技術基盤を継続的に開発・維持・発展・普及させる体制を公的研究機関に整える。一定の完成度に満たない場合は3年間でプロジェクトを中止。

(4) 4年目 【研究機関・大学等で実施・プロジェクト本部で支援】

一定の品質基準を満たしたβ版に基づき、関連研究機関に協力を要請し、連携シミュレーション実験を開始。

アジア諸国等（発展途上国を含む）海外から研究者を招聘する等して、様々な連携シミュレーションプロジェクトを実施。

(5) 4年目～10年目

数カ国以上の参画を得て、技術プラットフォーム上での連携シミュレーションに関する研究開発プロジェクトを推進。海外研究者や関連行政機関との連携を強化していく。

また、10年目以降に継続的にシミュレーションプログラム結合環境を保持するためのインフラに関する研究を開始。長期的には、同様の枠組を地球システムモデリング分野以外（マーケティングや金融等）へ適用することも視野に入れる。

なお、技術プラットフォームのアーキテクチャやインタフェースに関する技術仕様は、研究成果をふまえて適宜コミュニティで見直す。

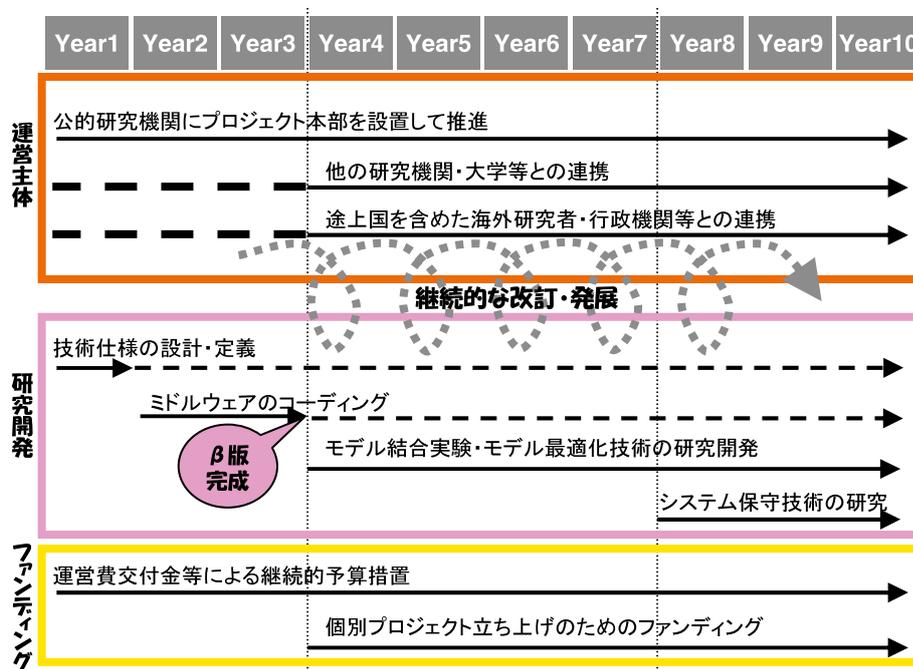


図 7.1 研究開発推進のための時間軸に関する考察

8. 検討の経緯

2009年4月に戦略スコープ「地球環境問題解決への貢献のための新しい情報技術研究の推進（地球環境情報技術）」の下、CRDS内に深掘検討チームが結成された。この戦略スコープは、前年の電子情報通信ユニットと産業技術ユニットの俯瞰的検討の中から抽出されたコンセプトであり、情報通信分野の研究開発に環境問題解決への貢献の要請が強まっているという認識に基づく。環境技術のうち、情報技術を活用するもので、新しい研究開発投資が必要なプログラムを検討することとした。

2009年5月までに、環境技術と地球環境問題について、主要な文献^{34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41}に基づき整理を行った（付録I参照）。社会で現在主要な環境問題として合意が得られているものは「地球温暖化」「資源循環」「環境汚染対策・質向上」「生態系保全」の4項目であった。

上記地球環境問題解決に向けて、情報技術の研究開発の方向性は、(1)Green by IT：情報技術を使って環境問題解決に貢献、(2)Green of IT：情報通信機器の環境負荷を低減、の二つに大別される。後者は経済産業省の「グリーンITイニシアティブ」⁴²の下、グリーンIT推進協議会⁴³が設立され、NEDOでのファンディングも開始⁴⁴されていることから、検討の方向性を前者に集中することとした。

地球環境問題の解決と、情報技術のフロンティアの拡大の両方に貢献するような研究開発プログラムを設計するという観点から、電子情報通信系俯瞰ワークショップ^{45, 46}で抽出されている電子情報通信分野の重要研究開発課題の中から、環境問題の解決に貢献しうるものを選択して検討した（図8.1）。

検討した課題は大きく分けて「全体設計に関する課題」「理解・発見・予測に関する課題」「データの由来や意味構造に関する課題」「データの統合・融合に関する課題」に分けられる。（図8.2）

34 CRDS-FY2008-WR-07, 環境技術俯瞰ワークショップ報告書 平成20年(2008年)7月 JST/CRDS, <http://crds.jst.go.jp/output/pdf/08wr07.pdf>

35 CRDS-FY2008-RR-02, 科学技術による地球規模問題の解決に向けて調査報告書 平成21年(2009年)3月 JST/CRDS, <http://crds.jst.go.jp/output/pdf/08rr02.pdf>

36 Agenda 21 June, 1992, UNEP <http://www.un.org/esa/dsd/agenda21/>

37 地球環境科学技術に関する研究開発の推進方策について 平成18年(2006年)7月 文部科学省, http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/suishin/06091121/all.pdf

38 分野別推進戦略 Ⅲ環境分野 平成18年(2006年)3月 総合科学技術会議, <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihon3/bunyabetu5.pdf>

39 第三次環境基本計画 平成18年(2006年)4月 環境省, http://www.env.go.jp/policy/kihon_keikaku/thirdplan01.html

40 21世紀環境立国戦略 平成19年6月 環境省, http://www.env.go.jp/guide/info/21c_ens/index.html

41 環境・循環型社会白書(平成20年版) 2008年6月 環境省, <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h20/index.html>

42 <http://www.meti.go.jp/press/20071207005/20071207005.html>

43 <http://www.greenit-pc.jp/>

44 <http://www.nedo.go.jp/informations/koubo/list.html>

45 CRDS-FY2007-WR-15, 科学技術未来戦略ワークショップ(電子情報通信系俯瞰WSⅢ)報告書 平成20年(2007年)3月 JST/CRDS, <http://crds.jst.go.jp/output/pdf/07wr15.pdf>

46 CRDS-FY2009-WR-04, 科学技術未来戦略ワークショップ(電子情報通信系俯瞰WSⅣ)報告書 平成21年(2009年)12月 JST/CRDS, <http://crds.jst.go.jp/output/pdf/09wr04.pdf>

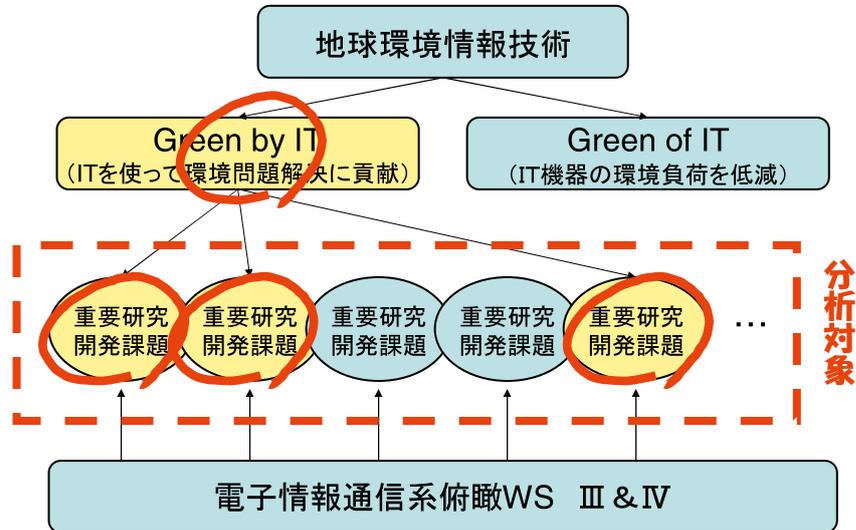


図 8.1 分析対象とすべき地球環境情報技術に関連した重要研究開発課題の選定手順

- **全体設計に関する課題:**

 - 超分散・超集中コンピューティング (俯瞰IV・コンピューティング分科会)
 - 自己組織化技術 (俯瞰III・丸山分科会)
 - インテグレーション技術 (俯瞰III・丸山分科会)
 - リアルワールド・リアルタイムアーキテクチャ (俯瞰III・丸山分科会)
 - マネジメント・運用技術 (俯瞰III・丸山分科会)

プログラムのターゲットとしては漠然としている
- **理解・発見・予測に関する課題:**

 - モデリング技術 (モデルの統合・連成)、評価論、国際規格 (俯瞰III・丸山分科会)
 - 最適化技術 (俯瞰III・丸山分科会)
- データマイニング技術 (俯瞰III・丸山分科会)

○ シミュレーション技術 (俯瞰III・丸山分科会)

情報爆発IT、CREST等で実施中
- **データの由来や意味構造に関する課題:**

 - コンテキスト・インテンションコンピューティング (俯瞰IV・コンピューティング分科会)
 - セマンティックコンピューティング (俯瞰IV・コンピューティング分科会)

DIASで実施中
- **データの統合・融合に関する課題:**

 - フェデレーションコンピューティング (俯瞰IV・コンピューティング分科会)

図 8.2 重要研究開発課題の分析と主要提案事項の選択 (赤枠が主要提案事項)

これらの課題群のうち、モデリング技術や最適化技術については、体系的な研究開発投資がまだなされておらず、今後重要な研究開発課題であることが有識者との意見交換や文献調査等を通じて明らかになってきたため、これらの技術を中心に、研究開発プロジェクトを設計した。

本戦略プログラムの検討は、文部科学省地球・環境科学技術推進室及び関係有識者との意見交換、チームメンバーによる議論により進められてきたものである（「活動の記録」参照）。国内外の動向をふまえた上で、地球システムモデリング分野、統計数理科学分野、情報科学分野の専門家と議論を重ねた。

CRDS 内部の議論では、ソフトウェアのモジュラー化など、人の知的生産の成果をつないで新たな価値を生み出そうとする試みがこれまで多くなされているにもかかわらずうまくいっていない原因が大きな論点となった。何度か議論を重ね、研究者の知的探究の中で、他分野との整合性確保という制約を自発的に生じさせることは困難であることがこの原因であるとの結論に至った。

この困難性を克服するため、新しいコミュニティを形成して連携のためのシステム構築にあたることを提案の柱の一つとした。そして、シミュレーションを連携させるための汎用的な理論の追求よりもむしろ、大きな社会ニーズに応える新しい研究者コミュニティと、そこで合意を形成しながら作っていく技術基盤を総称して「システム」とよび、これを構築することとした。

活動の記録

◆ 外部有識者等との意見交換（所属・役職は当時）

- 2009/05/15 湯本道明（文部科学省地球・環境科学技術推進室 地球観測推進専門官）
 田辺玲（同 行政調査員）
 石川直史（同 専門職）
- 2009/05/21 小池俊雄（東京大学大学院工学系研究科 教授）
- 2009/06/15 柴崎亮介（東京大学空間情報科学研究センター 教授）
- 2009/09/04 安井至（製品評価技術基盤機構 理事長）
- 2009/09/07 守屋和幸（京都大学大学院情報学研究科 教授）
- 2009/10/01 丸山宏（日本 IBM 執行役員）
- 2009/10/09 北川源四郎（統計数理研究所 所長）
 樋口知之（統計数理研究所 副所長）
- 2009/11/02 山中康裕（北海道大学大学院地球環境科学研究院 准教授）
- 2009/11/12 山中康裕（北海道大学大学院地球環境科学研究院 准教授）
- 2009/11/30 湯本道明（文部科学省地球・環境科学技術推進室 地球観測推進専門官）
 田辺玲（同 行政調査員）
- 2009/12/08 小池俊雄（東京大学大学院工学系研究科 教授）
- 2009/12/11 安達淳（国立情報学研究所 教授）
- 2009/12/17 喜連川優（東京大学生産技術研究所 教授）
- 2009/12/25 河宮未知生（海洋研究開発機構 主任研究員）
 荒川隆（高度情報科学技術研究機構 主任研究員）
- 2010/01/21 山中康裕（北海道大学大学院地球環境科学研究院 准教授）
- 2010/01/21 柴崎亮介（東京大学空間情報科学研究センター 教授）
- 2010/03/05 荒川隆（高度情報科学技術研究機構 主任研究員）
 江守正多（国立環境研究所 温暖化リスク評価研究室長）
 山中康裕（北海道大学大学院地球環境科学研究院 准教授）

◆ 内部検討

- 2009/04/01 チーム発足
- 2009/04/14 フェロー戦略会議で活動計画を発表
- 2009/04/30 「気候変動時代の環境研究のあり方」検討会（地域環境予測モデルチーム主催）
- 2009/05/12 フェロー戦略会議で検討状況を発表
- 2009/07/27 「気候変動時代における生態系研究のあり方」検討会（地域環境予測モデルチーム主催）
- 2009/09/29 フェロー戦略会議で提案の方向性を発表
- 2009/10/13 吉川弘之センター長と提案の方向性について議論
- 2009/10/27 フェロー戦略会議で提案の方向性を発表・承認
- 2010/01/05 フェロー戦略会議で提案内容を発表
- 2010/01/21 吉川弘之センター長と提案の方向性について議論
- 2010/02/02 吉川弘之センター長と提案の方向性について議論
- 2010/02/19 CRDS 内部の査読委員との意見交換会

9. 国内外の状況

本提案は、誰もが自由にアクセスできるオープンな連携シミュレーション環境の構築を目指す点で、欧米のプロジェクト（PRISM や ESMF）と異なっている。なお、NAREGI, RENKEI, DIAS といった先行投資の成果をうまく活用して、技術開発が進められると、他国の技術開発よりも有利に進められる可能性がある。また、ミドルウェアの開発に際しては、文部科学省が推進する 21 世紀気候変動予測革新プログラム等で開発されている個別のカップラの技術仕様が参考になるかもしれない。欧米のプロジェクト（PRISM や ESMF）のカップラも研究して参考にすべきである。

		技術プラットフォームの研究開発		シミュレーションプログラムライブラリの開発・整備	データベースライブラリの開発・整備	最適化するための数理工学的方法論の研究開発
		カップラ	オープンな連携シミュレーション環境			
本提案		○	○	○	○	○
欧	PRISM	○				△
米	ESMF	○				△
日	NAREGI RENKEI		○			
	DIAS				○	

図 9.1 本提案の位置づけ（関連の取り組みとの関係）

(1) 日本の取り組み

日本では、シミュレーションプログラムを結合して実行するためのソフトウェア環境を整備する活動は今のところ存在しない。しかし、グリッドコンピューティングを実現するための環境整備や、シミュレーションプログラムを統合する研究等はこれまで取り組まれてきているので、こうした取り組みの成果を積極的に活用することで、技術基盤の整備は促進される。

◆超高速コンピュータ網形成プロジェクト（National Research Grid Initiative : NAREGI)⁴⁷

NAREGI は、大学・研究機関のスーパーコンピュータを連携させたサイエンスグリッドの実現を目指した、グリッドミドルウェアの研究開発プロジェクトである。

2003 年に文部科学省の研究委託事業としてスタートし、2006 年度から 2007 年度まで

47 <http://www.naregi.org/project/index.html>

「最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用プロジェクト NAREGI プログラム」の一環として推進された。

国立情報学研究所が推進する最先端学術情報基盤 (Cyber Science Infrastructure) 整備の一環として、広域分散型の最先端研究教育用大規模計算環境 (サイエンスグリッド) の実現を目指して開発が進められている。国立情報学研究所 (リサーチグリッド研究開発センター) において、ソフトウェアメンテナンスやユーザサポートを継続し、グリッド基盤の構築がなされている。

2008年に NAREGI ミドルウェア Ver.1 がリリースされた。このミドルウェアは、資源管理、プログラミング環境、ファイル共有システム、データ転送システム、ネットワーク & セキュリティ基盤等の機能を提供する。また、あわせて提供されるグリッド連成ミドルウェア (Mediator) は複数アプリケーション間での高度意味変換機能を有し、グリッド環境上で連成計算プログラムを実行する機能を有する。連成計算 (Co-execution) とは、複数のプログラムを同期しながら実行する計算方法をいう。マクロなスケールのシミュレーションとマイクロなスケールのシミュレーションを同期させながら実行する計算などが可能になる。現在、国立情報学研究所において、このミドルウェアの学術コミュニティへの展開を進めている。

◆研究コミュニティ形成のための資源連携技術に関する研究 (REsources liNKage for E-science : RENKEI)⁴⁸

RENKEI は、e-サイエンスコミュニティを形成するための新しいミドルウェア技術の研究開発を目的としたプロジェクトである。このプロジェクトでは、研究室、計算機センター、国際的なグリッド等の複数の組織に分散された様々な資源 (計算機、ストレージ、データベース、アプリケーション) を連携または共有するためのミドルウェアを開発することを目標としている。

文部科学省の科学技術試験研究委託事業として 2008 年から推進されている。プロジェクト参加組織は、国立情報学研究所の他に、玉川大学、富士通、大阪大学、筑波大学、産業技術総合研究所、高エネルギー加速器研究機構、東京工業大学である。

サブテーマとして、計算連携技術に関する研究、データ共有技術に関する研究、データベース連携技術に関する研究 (データベース連携, セキュリティ)、マルチグリッドミドルウェア環境下でのアプリケーションインタフェースに関する研究、実証評価・ユーザー連携、が推進中である。

◆データ統合・解析システム (DIAS)⁴⁹

2006 年～ 2010 年

DIAS は、衛星観測、海洋観測、陸上観測などの様々な手段で得られた観測データを科学的・社会的に有用な情報に変換し、その結果を社会に提供するためのツールを開発・運用するプロジェクトである。国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」の基幹要素に位置づけられる。

多種多様な観測データを収集し、品質管理・フォーマット変換を行うとともに、大容量

48 <http://www.e-sciren.org/>

49 <http://www.editoria.u-tokyo.ac.jp/dias/>

データの検索、可視化、時間的・空間的な相関関係の解析など高度な情報処理を集中的に行う。技術的には、データ蓄積・解析空間の整備や大容量データの投入・解析処理等の技術開発、他分野間で用語や保存形式の異なるデータを利用するための相互流通性の技術開発等が挙げられている。

文部科学省が東京大学を中核機関として選定し、東京大学を中心に海洋研究開発機構、宇宙航空研究開発機構、京都大学、国立情報学研究所、慶應義塾大学、農業環境技術研究所、農業・食品産業技術総合研究機構の連携により推進されている。

多種多様な観測データを収集し、品質管理・フォーマット変換を行うとともに、大容量データの検索、可視化、時間的・空間的な相関関係の解析など高度な情報処理を集中的に行うことによって、社会的・科学的に有用な情報に変換して提供するシステムの実現を図ることとしている。

◆地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験⁵⁰

2007年～2011年

CO₂についての大気の化学的過程や陸域・海洋の生態系を気候モデルに取り入れた「地球システム統合モデルプログラム」を開発し、大気中CO₂濃度を安定させるためには、人為起源のCO₂の排出がどこまで許容できるかなどを調べる長期予測実験を行なうもの。

文部科学省が推進する21世紀気候変動予測革新プログラムのテーマの一つ。

予測モデルの高度化のための研究課題として、「地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験」「大気海洋結合気候モデルと結合される全球植生動態モデルの高度化と検証」「全球雲解像モデルによる雲降水システムの気候予測精度向上」がある。

不確定性の定量化・低減のための研究課題として、「階層的モデル実験による長期気候変化予測の不確実性定量化」がある。

◆高解像度気候モデルによる近未来気候変動予測に関する研究⁵¹

2007年～2011年

大気・海洋結合モデルをこれまでになく高解像度化し、エアロゾルなどの気候変化要因をより詳しく扱い、計算手法も高度化する。増大傾向の人為起源要因の下で、2030年頃の近未来での異常気象の変化や水災害などを中心に調べる予測実験を行なうもの。

文部科学省が推進する21世紀気候変動予測革新プログラムのテーマの一つ。

予測モデルの高度化のための研究課題として、「高解像度大気海洋結合モデルによる近未来予測実験」「海洋モデルの高精度化による気候変動予測の向上に関する研究」がある。

不確定性の定量化・低減のための研究課題として、「アンサンブルデータ同化手法を用いた不確実性定量化技術の開発」がある。

50 <http://www.kakushin21.jp/jp/team1.html>

51 <http://www.kakushin21.jp/jp/team2.html>

(2) 欧米の取り組み

欧米では、日本に先行して、モデルを結合して実行するためのソフトウェア環境を整備する活動が始まっている。ただし、オープンなグリッドコンピューティング環境での結合実験はまだみられない。

◆ Partnership for Research Infrastructures in earth System Modelling (PRISM)⁵²

PRISM は、欧州を中心に組織されている、包括的な地球システムモデリングのためのソフトウェア環境の開発・維持・支援を共有する枠組みである⁵³。1998年の Euroclivar recommendation⁵⁴ で提唱されたコンセプトに基づいて組織された。

2004年に設立された PRISM Support Initiative (PSI) の下、複数の研究機関による支援体制が構築されている⁵⁵。全体調整は、PRISM Core Group によって行われている。

PRISM では、欧州やそれ以外の地域の異なる気候研究センターで開発された最新の要素モデルを結合して、地球システムシミュレーションの実行・モニタ・後処理を可能にするためのソフトウェア環境を開発・整備している。このソフトウェア環境には、標準カップラ (モデル結合ソフト OASIS, OASIS4)、標準結合環境、標準実行環境、グラフィカルユーザーインタフェース、標準診断・可視化ツール等が含まれる。モデル結合ソフトの OASIS は、フランスの CERFACS⁵⁶ で開発されてきたものである。

2001年から2004年まで、欧州委員会の FP5 によって「Program for integrated Earth System Modelling」に 5M ユーロのファンディングがなされた。ただし、PRISM を継続的に支援するファンディングスキームは無く、独自での資金調達によって活動が支えられている。2007年からは FP 7 の Capacities Programme において、PRISM がきっかけとなった METAFOR (Common Metadata for Climate Modeling Digital Repositories) プロジェクトが実施されている。

米国の ESMF プロジェクトとも連携している。オープンなグリッド環境でのモデル結合実験はなされていないようである。また、各国のシミュレーションプログラムを一つ一つつなぐ方法論をとっており、進展は緩やかである。

52 <http://www.prism.enes.org/>

53 http://www.prism.enes.org/Publications/Papers/PRISM_sustained_support.pdf

54 Euroclivar プロジェクト (1994-1998) 終了後に出された提言。Euroclivar プロジェクトは、World Climate Research Programme の下で 1995年から推進中の CLIVAR (Climate Variability and Predictability) プロジェクトを欧州で展開するために立ち上がったプロジェクトで、欧州委員会によって支援された、<http://www.knmi.nl/euroclivar/>

55 http://www.prism.enes.org/Publications/Reports/PSI_structure_spring06.pdf

56 CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique) は、フランス Toulouse にある数値シミュレーションやアルゴリズムに関する研究所、<http://www.cerfacs.fr/>

【参考】

PRISM には下記開発領域 (PRISM Areas of Expertise) が設けられ、開発が進められている。

(1) Code coupling and I/O

- ・ 気候モデルのコンポーネントコードを結合するツールの開発、維持、支援
- ・ PRISM 以外で開発された結合ツールに関する定常的な技術調査
- ・ 開発されたツールを使う気候モデル研究者と技術的な議論を行うフォーラムの開催
- ・ 気候モデル構築に利用可能な、他のモデル結合方法についての議論を行うフォーラムの開催
- ・ 気候モデルの結合を志向した他のプロジェクト (GENIE, FLUME, ESMF 等) との緊密な関係の構築

(2) Integration & Modelling Environments

- ・ モデルやソフトウェアの集積とバージョン管理
- ・ ジョブ構成：モデル統合のための作業工程の定義と設計
- ・ 編集 (コンパイル)：実行ファイル構築の指導
- ・ ジョブ実行：結合モデルの実行を制御するための枠組み
- ・ 保存・集積：保存システムへの計算結果の移送

(3) Data processing, visualization and management

- ・ 地球システムモデリングや一般的な地球システム研究のためのデータ処理、データ保存、データ変換のための標準とインフラの開発

(4) Meta-data

- ・ 地球システムモデリングのためのメタデータに関する課題の調査、展開、調整
- ・ 地球システムモデル、カップラそしてデータのためのメタデータ構想の展開と実装の支援
- ・ メタデータに関する課題について議論するためのフォーラム開催、関連会議への出席
- ・ メタデータ構想に関する文書、ならびにメタデータを生産、チェック、表示するツールの保持

(5) Computing issues (検討中)

- ・ 地球システムモデリングに関する計算に関する未解決課題の同定
- ・ ユーザーとベンダーの間の議論の活性化
- ・ 地球システムモデリング分野のペタスケールコンピューティングに向けた課題の検討 (ファイル入出力やデータ保存、アルゴリズムの開発とその性能、移植しやすく柔軟なプログラミング、並列プログラミング等)
- ・ 地球シミュレータや同様の大規模システムを使うことで得られた知見の検討

◆ Earth System Modeling Framework (ESMF)⁵⁷

ESMF は、米国の複数機関が連携して推進している、高性能な地球システムモデルを柔軟に構築するための枠組みである。この枠組みで、地球システムモデルのための標準的なソフトウェア環境を開発している。この枠組みにより、気候、数値予報、データ同化、その他地球科学分野におけるソフトウェアの利用容易性、性能の移植容易性、相互操作性、再利用性を高める。

ESMF は、地球システムモデルを個別の要素に分解し、その要素を様々な用途に合わせて再結合して活用することを目指している。具体的には、空間分解能や時間分解能を自動的に整合させる再グリッド機能、カレンダー管理機能、ロギング、エラーハンドリング機能、並列処理機能等をもった結合アプリケーションツール（カップラ）の開発が行われている。

ESMF は Working Project と Executive Management により組織されている。Working Project は日々 ESMF の成果物を作るために協力し合う利用者や開発者のチームであり、Core Team、Joint Specification Team、Change Review Board より構成される。Core Team は ESMF のソフトウェア構築（テスト、維持管理、支援、協力環境の監督）の責任者である。Joint Specification Team は活発な利用者のグループで、Core Team や他の利用者コミュニティと連携して要求やフィードバック、標準化を行う。ESMF のアーキテクチャはこの Joint Specification Team によって定義された。Change Review Board は複数のユーザーやスポンサーからの要求を集めて優先付けする。Working Project は Executive Management から資金提供、指導、評価を受けている。

ESMF の資金源は、Department of Defense (DoD)、the National Aeronautics and Space Administration (NASA)、the National Science Foundation (NSF)、the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) である。

欧州の PRISM プロジェクトとも連携している。オープンなグリッド環境でのモデル結合実験を志向したプロジェクトではない。NCAR を中心としたコアチームのトップダウン型のマネジメントがなされており、幅広いユーザーの参加はまだ得られていないようである。

⁵⁷ <http://www.earthsystemmodeling.org/>

●コラム 4 地球観測に関する世界的な協力の枠組

地球観測データの共有やシミュレーションプログラムの研究開発については、いくつかの世界的な協力の枠組が存在する（連携シミュレーションに関する枠組は存在しない）。

◆全球地球観測システム（Global Earth Observation System of Systems : GEOSS） [1]

2005年-2014年

GEOSSは、国際的な連携によって、衛星、地上、海洋観測等の地球観測や情報システムを統合し、地球全体を対象とした包括的かつ持続的な地球観測を実現するための国際的な枠組みである。

GEOSSは2003年のG8エビアンサミットにおいて小泉純一郎首相（当時）の提唱により10年実施計画の策定について閣僚会合の開催が合意され、その後3回の地球観測サミット（第1回：2003年7月・ワシントン、第2回：2004年4月・東京、第3回：2005年2月・ブリュッセル）を経て、2005年から2014年までの10年実施計画「GEOSS 10-Year Implementation Plan [2]」が策定された。10年実施計画には、① Disasters、② Health、③ Energy、④ Climate、⑤ Water、⑥ Weather、⑦ Ecosystems、⑧ Agriculture、⑨ Biodiversityの9つの社会利益分野が設定されている。

GEOSS推進のために、GEO (Group of Earth Observation: 政府間地球観測作業部会) が設置されている。GEOには現在、日本をはじめとする60以上の国と欧州委員会、更に世界気象機関 (WMO)、国際連合教育科学文化機関 (UNESCO)、国連環境計画 (UNEP) 等40以上の国際機関が参加している。

GEOは、執行委員会 (12カ国)、専門委員会、GEO事務局 (ジュネーブ・世界気象機関内) により運営されている。専門委員会は、「構造及びデータ委員会」「能力開発委員会」「科学技術委員会」「ユーザインタフェース委員会」が存在する。

GEOSSは現在、世界中に存在する観測データ等について、相互報知する段階にある。

◆ Analysis, Integration and Modeling of the Earth System (AIMES) [3]

AIMESは、地球システムモデリングの国際研究プロジェクトである。人間活動が地球の生化学的な循環やそれと連動した気候システムとの相互作用に及ぼす影響をより深く、より定量的に理解することを目指し、気候のモデル (注) に人間社会の行動を組み込んだモデルを作ることにより重点を置いている。

プロジェクトの究極のゴールは、政策立案や資源管理のコミュニティに対して、地球規模の変化や地球システムに関する有益な情報を提供することであるとしている。

AIMESは、地球規模の変化を研究する国際研究プログラムである International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP [4]) で実施されている研究プログラムの一つであり、NCAR (National Center for Atmospheric Research) の The Climate and Global Dynamics Division が事務局を務める。過去にIGBPで組織されたプロジェクト GAIM (Global Analysis, Integration and Modelling, 1993-2004) のタスクフォースを基礎として新しく組織された。

(注) 地球システムモデル研究の分野で「モデル」とは、「シミュレーションプログラム」のことをいう。

(参考資料)

[1] <http://www.earthobservations.org/geoss.shtml>

[2] <http://www.earthobservations.org/documents/10-Year%20Implementation%20Plan.pdf>

[3] <http://www.aimes.ucar.edu/>

[4] <http://www.igbp.net/>

地球規模の変化に関する国際共同研究の必要性に鑑み、1987年にICSU (International Council for Science) により創設され、地球における居住の持続可能性を改善するための科学的知識を提供することを目的として研究が進められている。

用語の説明

赤池情報量規準

統計モデルの良さを評価するための指標。元統計数理研究所長の赤池弘次博士により考案された。統計モデルは、パラメータ数を増やすほど測定データとの適合性は上がるが、予測性能は下がってしまう。このバランスを評価するための指標として、最大尤度の対数と自由パラメータの数から成る指標「赤池情報量基準 (AIC)」が作られた。具体的には AIC 最小のモデルを選択すれば、多くの場合、良いモデルが選択できる。

アーキテクチャ

設計思想のこと。シミュレーションの実行に必要なリソースをどのように配置して活用するかといった、全体設計の概念的構造である。

インタフェース仕様

シミュレーションプログラムやデータベースで用いられる、データやプロトコルを受け渡せるように共通化された単位や記述様式のこと。

エージェントベースドシミュレーション

自律的に意思決定を行うエージェントをシステムの基本的な構成要素として設計し、それらの相互作用によって生み出されるシステムの全体的な挙動を、エージェントの挙動と連携させて考察するための一手法をいう。

エラーハンドリング

技術プラットフォームのエラーを取り扱う機能の総称。技術プラットフォームの安定稼働のためには、予想外のデータ入力やプログラムの暴走等によるエラー

を防止し、必要に応じてエラーを報告するといった機能が求められる。

カップラ

シミュレーションプログラム間でのデータのやりとりを媒介するソフトウェアのこと。変数の型や座標の表現方法等をそろえる機能を持つ。カップラを使って複数の要素をつなぐことで、所定のインタフェース仕様を具備すれば別の要素に組み替えることが可能になり、シミュレーションプログラムの拡張性が高まるというメリットがある。

カレンダー管理

データの時系列を管理することを行う。地球システムに関するシミュレーションでは、観測データや他のシミュレーション結果のデータを利用する場合に、そのデータの取得年月を管理しておく必要が出てくる。また、その時系列も分単位から年単位までの不均一なデータを管理する必要がある。

技術基盤

本稿では、技術プラットフォーム、最適化技術、シミュレーションプログラムライブラリ、データベースライブラリから成る有益な技術群の総称をいう。

技術プラットフォーム

本稿では、連携シミュレーションのために構築されたコミュニティで合意された技術仕様（アーキテクチャ・インタフェース仕様）に基づいて構築されたミドルウェアをいう。

最適化

本稿では、観測データ等が最もよく説明できるようにシミュレーションプログラムの構成を調整するための統計数理科学的な技術のことをいう。

再グリッド化

数値モデルにおいて、数値を割り当てるグリッドのメッシュの区切り方を変更することをいう。通常、地球システムモデルは、地球上の位置を一定の方法でメッシュに区切り（グリッド化）、それぞれの区域に数値を割り当てられるようになっている。複数のモデルを連携させる場合に、このメッシュの区切り方に不整合があるとデータの受け渡しができない。このため、メッシュの区切り方を整合させるため、再グリッド化が必要になる。

シミュレーションプログラムライブラリ

整理され、情報通信回線でアクセス可能になった多様なシミュレーションプログラム群をいう。

状態空間モデル

物理的システムを微分方程式で表した数学的モデルのこと。複数の入力と出力を持つシステムをコンパクトにモデル化でき解析が容易になる。

数値シミュレーション

物理現象を数式で表現し、計算機を使って計算する方法をいう。

データ同化技術

数値シミュレーションモデルが観測値をうまく説明できるように、観測データに基づいてモデルのパラメータや初期値・境界条件を調整する技術の総称をいう。粗く構築されたモデルを、観測データに基づいてブラッシュアップする際に用いられる。例えば、天気予報のための数値モデルは、気温や気圧等の観測データに基づいて修正される。

データベースライブラリ

整理され、情報通信回線でアクセス可能になった多様なデータベース群をいう。

ファンクションコール

プログラムを実行するにあたって、必要な関数やデータ等のリソースを呼び出す命令のこと。

ブースティング

事前に与えられたデータをガイドに何らかのフィッティングを行う学習アルゴリズムの一種。

ベイズモデル

いくつかの未観測要素からの推論等に利用可能な選択（ふるい分け）モデルのこと。

ミドルウェア

本稿では、個別プログラムを連携させるために必要となる汎用（共通）的な機能を集めたソフトウェアのことをいう。

連携シミュレーション

本稿では、個別のシミュレーションプログラムを結合・最適化して実行可能にすることをいう。なお、「シミュレーションプログラムの結合」とは、複数のシミュレーションプログラムの中で一方の計算結果を他方のシミュレーションプログラムの入力となるように組み合わせることをいう。「シミュレーションプログラムの最適化」とは、観測データ等が最もよく説明できるようにシミュレーションプログラムの構成を調整することをいう。

ロギング

アクセスのログ（記録）を監視することをいう。自由にアクセスできる技術プラットフォームは、不正行為やエラーの原因追及のために、誰がいつどのようなアクセスをしたかを記録できる機能を備える必要がある。

Application Program Interface

あるプラットフォーム（OS やミドルウェア）向けのソフトウェアを開発する際に使用できる命令や関数の集合のこと。また、それらを利用するためのプログラム上の手続きを定めた規約の集合。（<http://e-words.jp/w/API.html>）

β版

ソフトウェアの開発途上版のこと。開発初期版であるα版で使用感等のテストを行って仕様を固めた後のもので、正式配布前の評価版として関係者や重要顧客に配布される。

Cyber Science Infrastructure

最先端学術情報基盤のこと。国立情報学研究所が情報通信回線を活用して構築を進める学術研究の基盤である。学術情報ネットワーク（SINET3）をベースに、研究者によるコミュニティ形成、ドメイン知識蓄積、研究連携、研究資源共有等、より高度な研究を効率よく進める次世代研究環境構築を目指している。

e-Science

情報通信回線で接続された様々な計算機資源を使いこなすことで実現する新しい科学研究のこと。

Universal Modeling Language

統一モデル言語のこと。ソフトウェアの仕様記述のための言語である。状態遷移図、シーケンス図などグラフィカルに記述された仕様記述言語で国際標準規格になっている。

付録Ⅰ 環境技術・環境問題・アクションアイテムの整理

環境技術	環境技術俯瞰図 (CRDS)	温暖化対策技術	資源循環技術		環境汚染対策・質向上技術			生態系保全技術	応用技術／基礎科学	社会技術／システム化技術 人文社会科学／応用技術				
	環境問題	科学技術による地球規模問題の解決に向けて CRDS 政シU, 2009	温室効果ガス排出	水資源／農業資源／森林資源／漁業資源／鉱物資源	廃棄物増加	水環境汚染／大気汚染／土壌汚染／越境汚染／オゾン層破壊ガス排出／砂漠化／海洋汚染		有害物質拡散	生態系破壊／生物多様性損失	化石燃料／原子力エネルギー／再生可能エネルギー／土地利用問題	景観破壊／交通渋滞／災害リスク増大／不衛生・不健康			
アクションアイテム	Agenda 21 UN, 1992		Section II : 大気／地下資源／砂漠化・干魃／山／農業／地方／海洋／水					Section II : 毒物管理／危険物／汚水／核廃棄物	Section II : 生物多様性／バイオテクノロジー／森林破壊	Section I : 国際協力／貧困／生活様式／人口／健康／生活環境／環境と発展に配慮した政策決定 Section III : 女性／子供／土着民／NGO／地方自治体／労働者／ビジネス・産業／科学者・技術者／農民 Section IV : 金融資源とメカニズム／技術移転協力・能力開発／持続性の科学／教育・気づき・訓練／発展途上国の能力開発／機関間の合意／法制度とメカニズム／政策決定のための情報				
	地球環境科学技術に関する研究開発の推進方策について MEXT, 2002	地球温暖化研究	地球規模水循環変動研究	ゴミゼロ型・資源循環型技術研究				化学物質リスク総合管理技術研究		自然共生型流域圏・都市再生技術研究	環境分野の知的研究基盤の拡充			
	分野別推進戦略 内閣府総合科学技術会議・環境 PT, 2006	気候変動	水・物質循環と流域圏	3R 技術				科学物質リスク・安全管理	生態系管理	バイオマス利活用				
	第三次環境基本計画 環境省, 2006	地球温暖化問題に対する取組	環境保全上健全な水循環の確保に向けた取組	物質循環の確保と循環型社会の構築のための取組	都市における良好な大気環境の確保に関する取組			化学物質の環境リスクの低減に向けた取組	生物多様性の保全のための取組	環境保全の人づくり・地域づくりの推進	長期的な視野を持った科学技術、環境情報、政策手法等の基盤の整備	市場において環境の価値が積極的に評価される仕組みづくり	国際的枠組みやルールの形成等の国際的取組の推進	
	21世紀環境立国戦略 環境省, 2007	気候変動問題の克服に向けた国際的リーダーシップ		3Rを通じた持続可能な資源循環					生物多様性の保全による自然の恵みの享受と継承	環境・エネルギー技術の中核とした経済成長	自然の恵みを活かした活力溢れる地域づくり	環境を感じ、考え、行動する人づくり	環境立国を支える仕組みづくり	公害克服の経験と智慧を生かした国際協力
	環境・循環型社会白書 環境省, 2008	地球環境の保全 (地球温暖化)		廃棄物・リサイクル対策などの物質循環に係る施策	地球環境の保全 (オゾン層の破壊／酸性雨・黄砂／海洋環境／森林／砂漠化／南極地域の環境)	水環境、土壌環境、地盤環境の保全	大気環境の保全 (光化学オキシダント／窒素酸化物／浮遊粒子状物質／硫酸化物／一酸化炭素／有害大気汚染物質／石綿／騒音・振動／悪臭)	化学物質の環境リスクの評価・管理に係る施策			自然環境の保全と自然とのふれあいの推進	各種施策の基盤、各主体の参加及び国際協力に係る施策		

■戦略プロポーザル作成メンバー■

嶋田一義	フェロー	(電子情報通信ユニット)	リーダー
高野 守	フェロー	(ライフサイエンスユニット)	
伊東義曜	主任調査員	(電子情報通信ユニット)	
金子健司	フェロー	(電子情報通信ユニット)	
丹羽邦彦	上席フェロー	(電子情報通信ユニット)	総括責任者

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2009-SP-09

戦略プログラム

自立シミュレーションの連携システム構築

～地球システムモデリング研究での実践～

STRATEGIC PROGRAM

Building a system for the integration of multiple simulations

- A practice in earth system modeling research -

平成 22 年 3 月 March 2010

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 電子情報通信ユニット

Electronics, Information and Communication Technology Unit

Center for Research and Development Strategy

Japan Science and Technology Agency

〒 102-0084 東京都千代田区二番町 3 番地

電 話 03-5214-7484

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

© 2010 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
CT CTCGCC AATTAATA
TAA TAATC
TTGCAATTGGA CCCC
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC
ATAAGA CTCTAACT CTCGCC
AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT
CTCGCC AATTAATA
ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
ATTAATC A AAGA CCT
GA CCTAACT CTCAGACC

0011 1110 000
00 11 001010 1
0011 1110 000
0100 11100 11100 101010000111
001100 110010
0001 0011 11110 000101

