

スーパーコンピュータを活用した高効率な地球観測データ処理の検証

齋藤紀男*1, 齋藤進*1, 藤澤達也*1, 竹島敏明*1, 内田友恵*2, 今中誠*2, 山崎朋朗*2

Verification of efficient earth observation data processing which utilized the JAXA Supercomputer System

Norio Saito*1, Susumu Saitoh*1, Tatsuya Fujisawa*1, Toshiaki Takeshima*1, Tomoe Uchida*2, Makoto Imanaka*2, Tomoo Ymasaki*2

Abstract

The effect which utilizes the JAXA supercomputer system for processing of earth observation data has been studied. AMSR-E products, which are accumulated over 10 years till the present, were used for data. First, it was verified that the quality of the processing data by the supercomputer system was equivalent to the standard product offered to the users. In process of verification, the subjects depending on a compiler or a processor architecture and those depending on the mathematical model of an algorithm were found out. The possibility of the improvement towards the future was discussed about this point. Next, the processing performance was evaluated and we found that reprocessing of all the data in which about 14 months was required can be considerably shortened within 22-day duration. Therefore, it is expected that the waiting period which offers data to a user can be shortened sharply.

Keyword: Earth observation, data processing, super computer

概要

JAXA スーパーコンピュータシステムを地球観測データの処理に活用した効果を検証したので報告する。検証には約 10 年分のデータが蓄積されている AMSR-E を用いた。まず、処理データの品質について、ユーザーへ提供されている標準プロダクトと同等であることを検証し、問題ないことが確認された。検証の過程で、コンパイラやプロセッサに依存する課題、及び、アルゴリズムの数理モデルに依存する課題が発見されたので、将来へ向けた改良の可能性を考察する。次に処理性能の評価を行い、従来は約 14 か月を要していた全データの再処理を 22 日間以内の期間に短縮できることが示された。これにより、ユーザーへデータを提供する待ち期間を大幅に短縮できることが確認された。

1. はじめに

地球環境のモニタリングや防災／減災等に活用されている地球観測データであるが、衛星の増加、運用期間の長期化によりデータが年々蓄積され、その処理に要する計算機の規模も大きくなっている。また、衛星の運用停止後にもアルゴリズムの更新やパラメーターの変更に伴うデータの再処理が必要であり、その頻度も年一回、センサーによってはより高い頻度が必要とされるため、その処理を行う計算機

*1 第一衛星利用ミッション本部 (Satellite Applications Mission Directorate I)

*2 三菱スペース・ソフトウェア株式会社 (Mitsubishi Space Software Co., Ltd.)

システムの調達及び、維持管理にかかる負担は増大する一方である。今回、JAXA 全体として計算機リソースを効率的に使い、併せて、高性能計算機を活用することでユーザーへのサービス向上へ繋げる施策の一環として、JAXA スーパーコンピュータシステム（以下、JSS と略す。）を地球観測データの処理に活用することを試みた^{1),2)}。

対象として選んだ AMSR-E は、2002 年に打ち上げられた NASA の衛星 Aqua に搭載されたマイクロ波放射計である。同じく 2002 年打上げの ADEOS-II に搭載された AMSR と同系のセンサーである。公式に提供されているデータ（標準プロダクトという）としては、2003 年 6 月からレベル 1 プロダクトが、2003 年 9 月からは高次処理プロダクトが一般提供され、これ以降、約 10 年間にわたる観測データが蓄積されている。

ここでは、まず、AMSR-E の標準プロダクトと、JSS による計算結果の比較を行い、プロダクトの同一性の検証を行った。検証に用いるデータには、季節ごとに数日分のデータを選択し、年間の季節変動による影響がないか観察することとした。

次に、JSS を使うことでスループットの向上がどの程度期待できるかを見積もった。長期にわたって蓄積されているという特徴を生かし、精度よく定量的に性能向上の効果を評価するために、最大で 3 ヶ月分の AMSR-E データを JSS 上へ持ち込み、性能測定を実施した。

検証の結果、プロダクトの検証では、最終的に品質上の問題はないことが確認できたが、2 者間の数値差が完全には解消されず、その原因となるいくつかの課題が見いだされた。性能については、従来、再処理に要していた期間を大幅に短縮可能であることが明らかになった。プロダクト検証の結果は 3 章、性能検証の結果は 4 章に示す。5 章に、プロダクト検証にて見いだされた問題点に関して、将来へ向けた改良の可能性について考察を加える。

2. 背景

2.1. 地球観測データの処理と再処理の必要性

衛星による地球観測の方式は、利用の観点からは大きく二つに分けられる。一つは関心領域（area of interest）を必要なときに観測するもので、ALOS2 などがそれに当たる。このような観測データの場合、ユーザーの観測要求や注文にしたがってデータ処理を行うこととなる。一方、地球環境の継続観測などのためには、衛星が軌道上を運動している間、常に観測を行う必要がある。そのような衛星では、センサーによる観測データは取得次第、全てが処理され、それにより地球全体を覆うような全球観測が可能となっている。AMSR-E は後者のセンサーの一種で、1 日 24 時間休みなく地上の観測を行っている。

観測データはシーンと呼ばれる単位に分割されて処理され、ユーザーに提供されるプロダクトとなる。AMSR-E の場合は、衛星の半周回分のデータをシーンとし、昇交軌道と降交軌道のそれぞれでプロダクトのファイルとなっている。ただし、後述するレベル 3 プロダクトは全球のデータを 1 ファイルに収めたものである。

AMSR-E が地表を観測する様子を表す概要図と、観測データの例を、それぞれ図 1 の左図、右図に示す。図 1 左図に示すように、AMSR-E は地心方向を軸とする回転運動をしており、地表面から放射されるマイクロ波を円に沿うようにスキャンする。1 スキャンで得られるデータは約 1450km の観測幅を持ち、図 2 右図に示すように、観測される。時間経過とともに衛星が観測する領域は経度方向に移動して地表全体を観測することとなる。AMSR-E の場合は、約 3 日間で全球をカバーする。

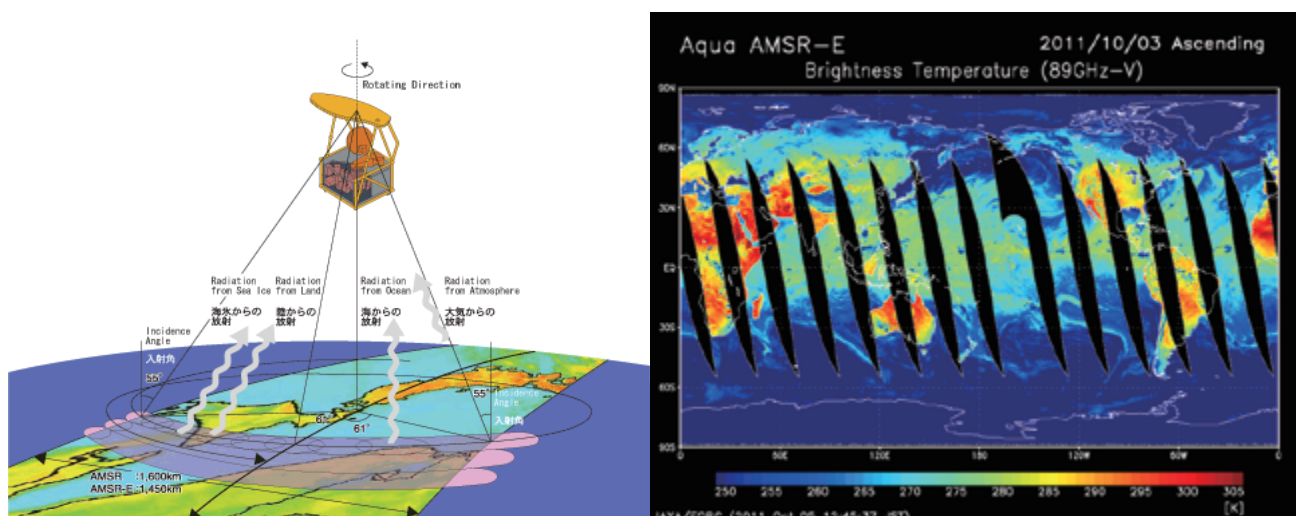


図1 AMSR-Eの地表観測の様子：左図はAMSR-Eが軌道上から地表面を観測の様子を示し、右図は実際の観測データ（輝度温度）の例を示す。ここに示す観測データの例は、2011年10月3日の昇交軌道での観測のものである。（AMSR-Eプロジェクトのホームページ³⁾より）

ユーザーに提供されるプロダクトは全ての種類が JAXA 第一衛星利用ミッション本部が開催する審査を経て、品質が確認される。計算機のリースアウトに伴う換装時には、プロダクトのデータ値が変わることがあり、その際には、品質保証の観点で検証が行われる。検証済みのデータでなければユーザーには公開されない。

観測を継続する間に、観測機器の校正係数の更新や、研究の進展によりアルゴリズムが変更されることがある。AMSR-Eのようなグローバルセンサーでは、それらの変更に伴い、蓄積された全ての観測データの再処理が必要となる。再処理は年に1回程度の頻度で実施される。ここで、処理の対象となるデータ量は観測期間が長くなるにつれて時間に比例して増大する。したがって、観測データの再処理に要する時間は、計算機の規模が変わらなければ、再処理するたびに衛星の運用期間に比例して長期化することとなる。

2.2. スーパーコンピューター活用の狙い

従来の地球観測衛星分野での計算機調達の見え方は、それぞれの衛星ごとに開発・運用のプロジェクトが組織され、プロジェクトごとに必要な規模の計算機を調達、維持、管理している。衛星は1日24時間運用しているから、併せて衛星それぞれの地上系システムも1日24時間の体制で取得した観測データの処理を行っている。このような処理を定常処理と呼んでいる。

定常処理用の計算機資源は、データ量や処理のための計算性能に関する要求により決められる。また、再処理が定常処理と計算機資源の点で競合してしまうことを避けるため、同一構成の計算機をプラス α して再処理用として調達している。このプラス α 分は規模が大きいとは限らず、AMSR-Eの再処理の実績では、約10年間の蓄積データの再処理に14か月の期間を要していた。

また、衛星が運用終了した場合、定常処理は停止することになるが、再処理は継続して行われることがある。近年では、例えばAMSR-Eの後継センサーとなるAMSR2が運用しているように、同じミッションを担いつつ性能を改良したセンサーをシリーズで運用するケースが多い。その場合、後継センサー

の運用で新たに得られた知見を過去のセンサーのデータに反映し、アルゴリズムの改良等が行われるのが普通である。したがって、この再処理を目的として、センサーの運用停止後であっても計算機資源を維持する必要がある。

このような従来の計算機の調達方式を継続した場合、次のようなコストインパクトが有る。

- ①衛星の寿命は、一般に計算機のリース期間より長く、換装の度にソフトウェアの移植、プロダクト検証のコストがかかる。
- ②再処理のために計算機保守、運用費用が継続して必要となる。
- ③再処理に要する期間が長期化し、ユーザーサービスが年々、低下する。

これらのインパクトを JSS を有効に活用することで解決、または軽減できないか検討している。すなわち、JAXA が保有する大規模計算リソースである JSS を有効利用することで、プロジェクト側が保有する計算機資源と運用体制を削減し、コスト削減と運用効率化を図ること、また、データ処理期間の短縮により、ユーザーサービスを向上させることである。

このためには、まず、品質保証の条件をクリアすることが必須である。JSS 上でデータ処理を実際に行い、プロダクトの同一性検証を行うのは、第一に、品質が妥当であることを示す必要があるからである。

次に、プロダクトの同一性に問題が無い場合、再処理期間がどれだけ短縮できると期待できるか、が重要である。従来はプロジェクト側に必要とされていた計算機資源の削減だけでなく、運用に係る人件費、光熱水費用等のコストの削減に直接つながるからである。

3. AMSR-E 処理プログラムの移植とプロダクト検証

3.1. 移植、検証の対象について

移植対象のソフトウェアは 3 種類に分類でき、それらを表 1 に示す。

表 1 移植対象のソフトウェア

分類	概要
レベル 1 処理ソフトウェア	シーン単位にまとめられた観測データであるレベル 0 データを入力としてレベル 1 プロダクトを作成する。 主に観測点の経度、緯度の計算、観測データから輝度温度の計算等を行う。また、観測点における太陽方位角の計算等を併せて実施する。
レベル 2 処理ソフトウェア	レベル 1 プロダクトを入力としてレベル 2 プロダクトを作成する。ただし、過去 3 日分のレベル 3 海面水温（日平均）と過去 6 日分のレベル 3 輝度温度（日平均）も必要である。 レベル 1 のデータから数理モデルに基づいて物理量を計算する。それらは、積算水蒸気量、積算雲水量、降水量、海上風速、海面水温、海氷密接度、土壌水分量、積雪深の 8 種類である。

レベル 3 処理ソフトウェア	レベル 1 プロダクトとレベル 2 プロダクトを入力としてレベル 3 プロダクトを作成する。 輝度温度, 各物理量の空間的, 時間的な平均を求める。 プロダクトは日平均の輝度温度, 月平均の輝度温度, 日平均の物理量 (8 種類), 月平均の物理量 (8 種類) からなる。
----------------	---

表中のレベル 1, レベル 2, 及び, レベル 3 の名称について, 以降, L1, L2, 及び, L3 と略すこととする。

移植作業は JAXA 第一衛星利用ミッション本部が主体となって, JAXA 情報・計算工学センターの協力を得て, 三菱スペース・ソフトウェアに主な移植作業を委託して実施した。移植したソフトウェアによって作成されたデータに標準プロダクトとの差異がある場合, アルゴリズム開発を総括する JAXA 地球観測研究センターの助言を受けながら調査を進めた。

移植前後のプログラミング環境の違いは移植性へ影響する重要なポイントである。JSS と現在の AMSR-E 処理の計算機環境の概略を表 2 に示す。

表 2 計算機環境の比較

区分	JSS	AMSR-E 運用環境
CPU	SPARC64 VII 32GB / ノード(CPU)	Intel Xeon-E5630 6.0GB/2CPU
プログラム開発環境	Solaris11 富士通コンパイラ	RHEL5 for x86 GNU GCC4.1.2 20080704 (Red Hat 4.1.2-50) PGI Fortran Work-station

JSS は平成 26 年度にリプレース作業に着手しており, 表の CPU の後継機が導入される予定である⁴⁾。現行システムと後継システムの CPU は, AMSR-E 運用環境における Intel の CPU とはバイトオーダーが異なることが知られている。この違いはバイナリデータの入出力を伴うプログラムの移植性に大きく影響する。また一般に, コンパイラ, ライブラリ等の違いは計算結果の差異の原因になり, その詳細な調査結果は 3.2 節に示す。

バイトオーダーの違いによって, 一部の処理プログラムで, 処理のためのパラメーターを定義したバイナリデータを入力した後, 引き続き計算処理部分に誤りが生じた。これに対しては, 当該パラメーターファイルのコンバージョンツールを使用することで解決した。このツールは処理システムの維持管理作業の中で数年前に作成されたものであったため, 今回, 特別にツールを作成する必要はなく, かつ, 当初予期した範囲の作業であった。次に, ビッグエンディアンとリトルエンディアン間の変換を自動化しているコードと, リトルエンディアンでのみ正常動作するコードとが混在しているプログラムがあり, 対処のための調査と修正が必要となった。

一方、プロダクトが準拠する **HDF** 形式は計算機環境の差を吸収する機能を具備⁵⁾しており、そのルールに従ったファイルの入出力では、全く問題を生じなかった。**HDF** 形式は衛星リモートセンシングの分野で標準的に使われており、天文分野で普及している **FITS** 形式と同様に、異機種間のデータの互換性を保つための規格、及び、ツールからなっている。

3.2. AMSR-E プロダクトの同一性の検証

観測データの全数を調査するのは作業期間等により現実的でないため、季節毎の影響を考慮できることを条件に、一部のプロダクトを選択することとした。選択したデータの特性を表 3 に示す。

表 3 検証に用いたデータ

季節	処理期間	シーン数
冬 (1 月)	2008 年 1 月 17 日～18 日	58
春 (4 月)	2008 年 4 月 23 日～24 日	58
夏 (7 月)	2008 年 7 月 13 日～14 日	58
秋 (10 月)	2008 年 10 月 18 日～19 日	55

処理結果の比較のために、表 4 に示すように、各処理プログラムの入力データには運用環境に蓄積されたプロダクトを用い、その出力を標準プロダクトと比較した。

表 4 データ比較の方法

プロダクトの種別	処理プログラムの入力データ	比較データ
L1 プロダクト	運用システムに蓄積された L0 プロダクト	運用システムで作成された L1 プロダクトと JSS 上で作成した L1 データ
L2 プロダクト	運用システムに蓄積された L1 プロダクト	運用システムで作成された L2 プロダクトと JSS 上で作成した L2 データ
L3 プロダクト	運用システムに蓄積された L1 プロダクトと L2 プロダクト	運用システムで作成された L3 プロダクトと JSS 上で作成した L3 データ

プロダクト比較結果のサマリーを表 5 に示す。L1 プロダクトには観測点の経緯度の値が分解能 0.01 度で格納されているが、緯度については全観測点の 0.02%程度、経度については 0.2%程度の観測点において、分解能に相当する差が認められた。発生原因について調査したところ、処理プログラムで共通ライブラリとして用いている部分に原因があることを突き止めたので、次節に示す。L2 プロダクトについては 4 種の物理量に、浮動小数点数の最下位ビット (LSB) の差より大きい有意な差が認められた。これらの差の原因の調査結果は 3.2.2 節に示す。L3 プロダクトに関しては差異は無く、全観測点で完全に一致した。

表 5 プロダクト比較結果のサマリー

処理レベル	データの差異の概要
L1	観測点の経緯度に大きさ 0.01 度（データの分解能に相当）の差異が見られた。 観測点の差異により，太陽方位角等にも差異が生じた。
L2	3 種の物理量に LSB を超える差異が見られた。 ※差異のある物理量：海上風速，積算水蒸気量，積雪深
L3	差異無く，JSS と運用システム間でプロダクトは一致した。

3.2.1. L1 プロダクトの差異の原因

データ値の差異の原因となる箇所は，L1 プロダクト作成の処理フローの一部の計算にあった。

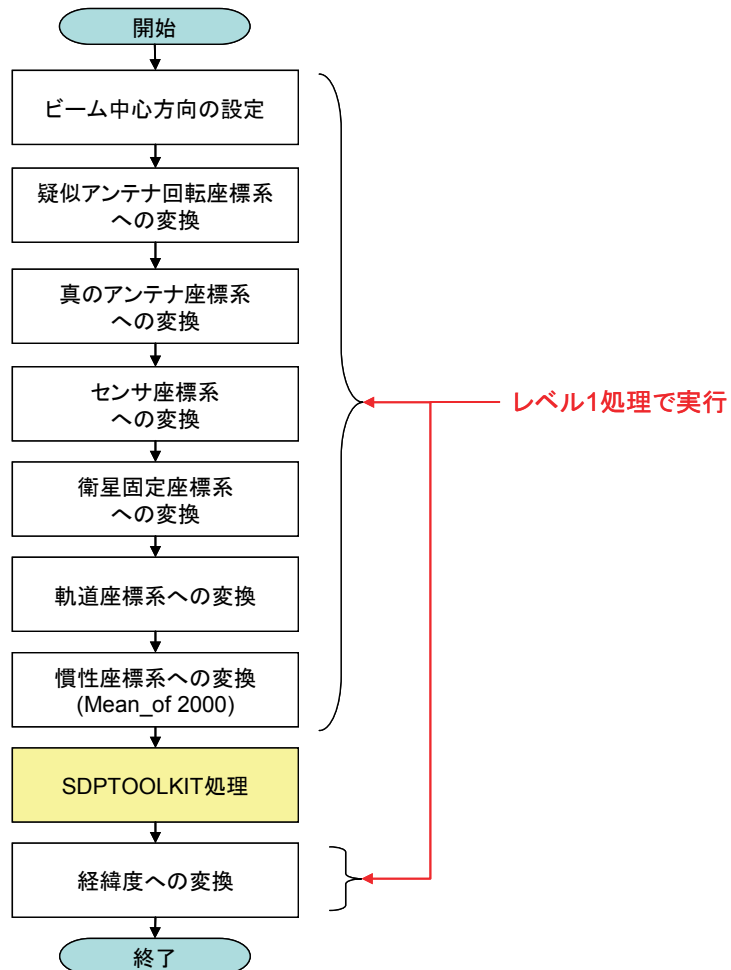


図 2 AMSR-E L1 プロダクト作成の処理フロー（参考文献 2）より引用

図 2 に示す L1 処理の一連の計算の中で，背景色付きで示す SDPTOOLKIT は NASA より提供されたライブラリである。図 2 のフローの各段階ごとの出力データを調査した結果，SDPTOOLKIT において，

数値計算の精度が倍精度浮動小数点数から単精度浮動小数点数に落ちていることが分かった。これにより、経緯度への変換時に 0.01 度の差異を生じていたものである。なお、他の計算ブロックにおいてはデータ値の差異を生じる問題は無かった。

このような問題はあったが、プロダクトとして提供される物理量に要求される精度には影響しないこと、したがって、プロダクトの品質には影響しないことが確認されている。将来的に高精度の地上分解能を有するセンサーが実用された場合、この限りではないであろう。今回発見されたデータの差の原因を参考に、ソフトウェア開発上の教訓として活かしていく必要がある。

3.2.2. L2 プロダクトの差異の原因

L2 プロダクトのうち、まず、海上風速について、データ比較の結果を図 3 に示す。これは、あるシーンについて横軸に標準プロダクトのデータ値、縦軸に JSS での出力データ値から標準プロダクトのデータ値を差し引いた値を示したものである。全観測点のうち、約 0.02% にこのような差が生じた。

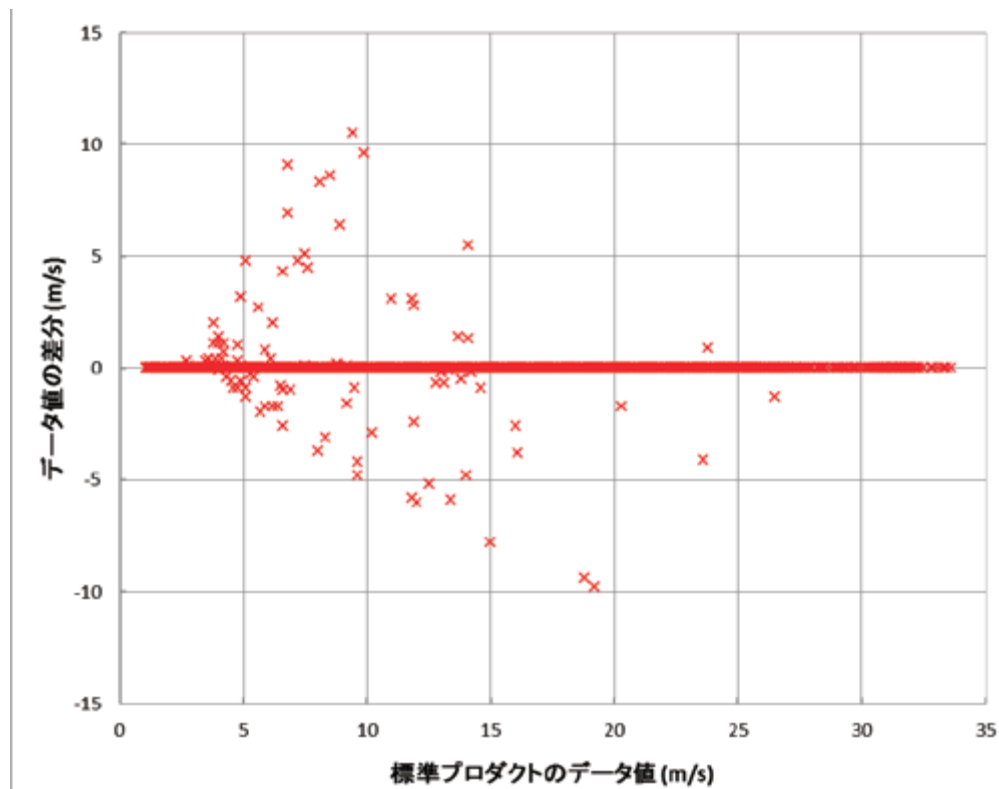


図 3 海上風速のデータ差異（参考文献 2）に基づき作成）：横軸は標準プロダクトのデータ値、縦軸は JSS での出力データ値から標準プロダクトのデータ値を差し引いた値

データの差の特徴を示すため、ある 1 スキャンについて 2 種のデータを重ね合わせたグラフを図 4 に示す。

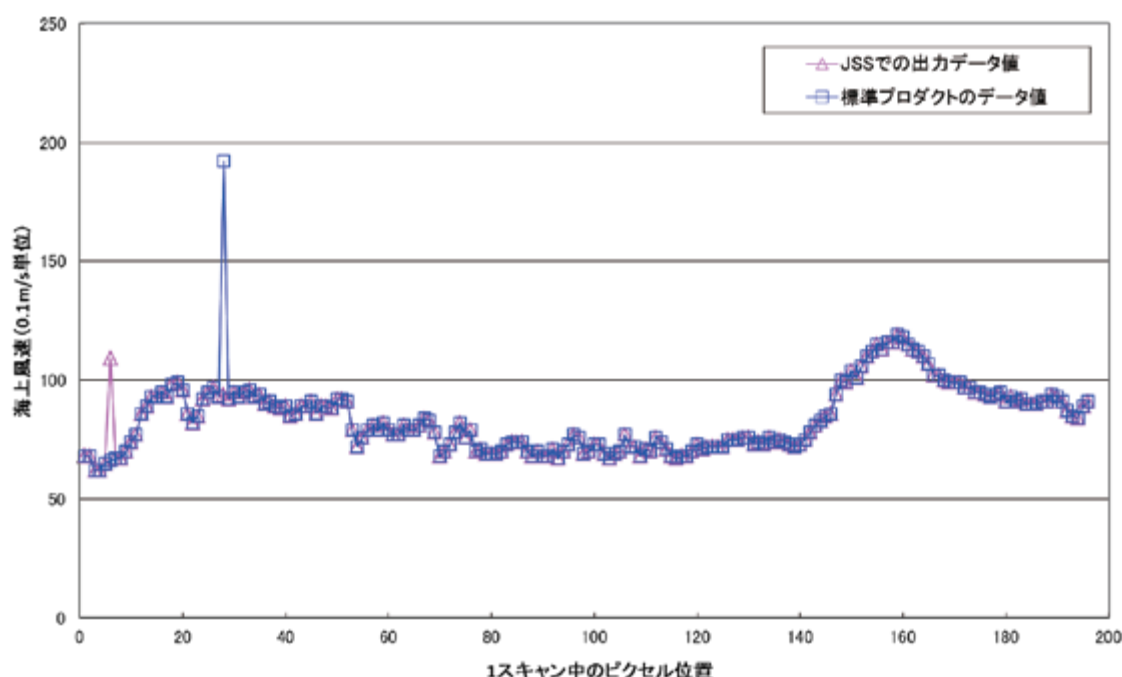


図4 海上風速のあるスキャンにおけるデータ差異（参考文献2）に基づき作成）：“△”の点はJSSでの出力データ値，“□”の点は標準プロダクトのデータ値を示す。

図4で，“△”の点はJSSでの出力データ値，“□”の点は標準プロダクトのデータ値を示す。本図から、本プロダクトにはスパイク状に誤差が大きい個所があり、加えて、もともとのプロダクトにも問題があったことが判明した。

プログラムを調査した結果、風速を算出する際に行う風向補正と呼ばれる処理において、補正值の最小値探索を行うループに問題があり、データによっては最小値の探索に失敗し、異常値が設定される場合があることが分かった。また、この最小値探索では、標準プロダクトを計算した環境とJSS上の計算との間で補正值のLSBの差が影響し、探索失敗が発生するケースが異なることとなり、そのため、図4でスパイク状の誤差が生じたピクセル位置が異なる結果となった。

次に、積算水蒸気量について、図3と同様の比較結果を図5に示す。全観測点のうち、約0.005%にこのような差が生じた。

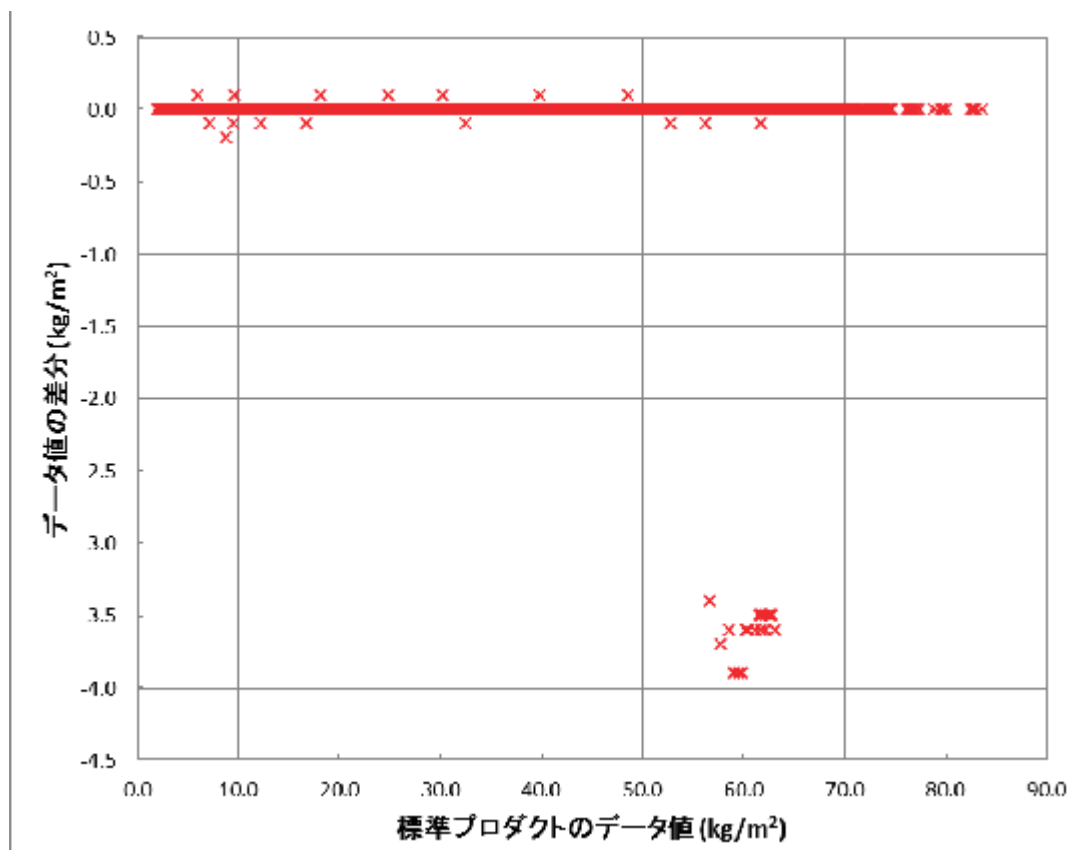


図5 積算水蒸気量の比較結果（参考文献2）に基づき作成）：横軸は標準プロダクトのデータ値，縦軸はJSSでの出力データ値から標準プロダクトのデータ値を差し引いた値

本プロダクトの処理プログラムは，雲域判別指数と呼ばれるパラメーターを計算し，その値に従って晴天，曇天，雨天の3つの数理モデルに処理を振り分ける．どのモデルを適用するかによって計算結果が異なることになる．その境界値には2進数で厳密値を持たない数値である0.2(2進数で0.00110011...)が使用されている．そのため，パラメーター値のLSBでの差によっても，異なるモデルを選択することとなり，データ値に有意な差が発生する結果となった．十進数0.2は2進数で必ず丸め誤差を持つので，どちらのモデルが選択されるかは，計算機の環境に依存する結果を生じる．

また，大気平均温度と呼ばれるパラメーターを使う計算部分も差を生じる原因となった．大気平均温度は離散値を取る配列で定義されている．そのデータを参照する際に，配列番号を決定するロジックにおいて単精度浮動小数点数による演算を行っているため，演算結果のLSBが異なると配列番号がずれてしまうようになっていた．JSS上での計算と運用システムでの計算では，このLSBに差が生じ，その結果，大気平均温度の値が不連続に飛んでしまい，データの差が生じたものである．図5のデータ値の差は，これら雲域判別指数，及び，大気平均温度による制御方式が重なって発生した．

次に，積雪深について，図6に，図5と同様にデータの比較結果を示す．全観測点のうち，約0.002%で差が生じている．また，1点のみであるが，標準プロダクトのデータ値が0である観測点で，50mmという極端に大きな数値が得られたことも特徴である．

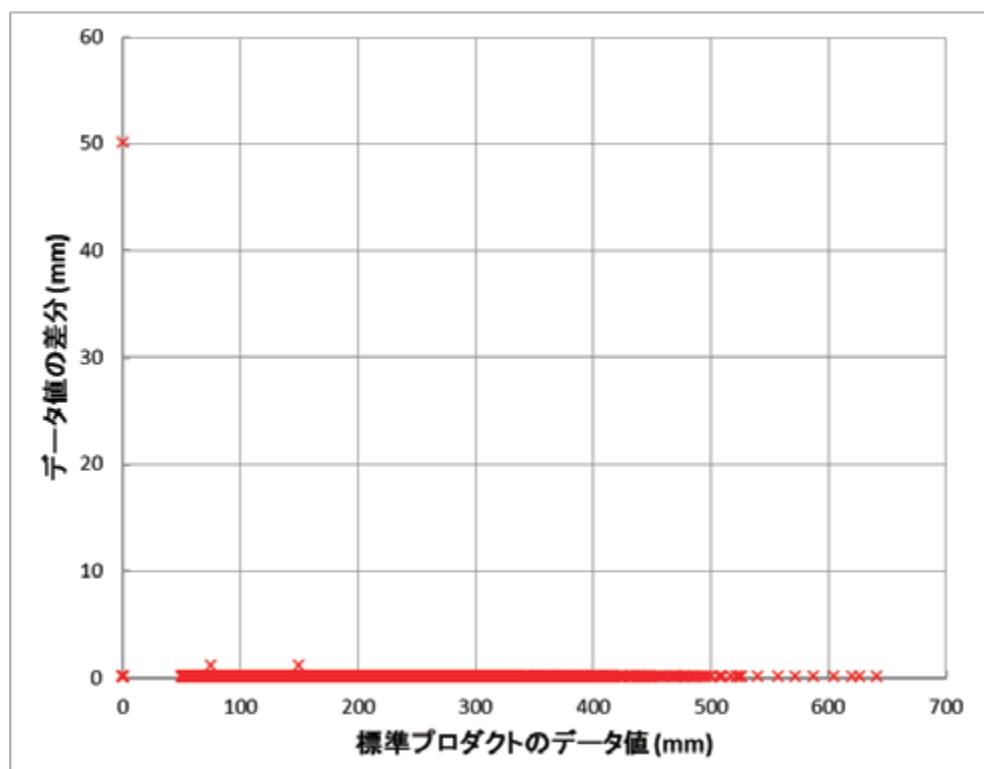


図6 積雪深の比較結果 (参考文献 2)に基づき作成) : 横軸は標準プロダクトのデータ値, 縦軸は JSS での出力データ値から標準プロダクトのデータ値を差し引いた値

積雪深の計算においても, 積算水蒸気量の計算と同様に, パラメーターの値によって 3 種類の数理モデルが設定されている. この場合も, 上記の物理量と同様, 適用するモデルを振り分けるための境界値において, 判定に用いられるパラメーター (単精度浮動小数点数) の LSB での差異によって, 適用されるモデルが異なり, その結果, データの差を生じる制御方式がとられていた. 1 点だけ生じていた極端に大きな差も同じ原因によることを確認した.

以上より, 積算水蒸気量と積雪深の計算で誤差を生じる様子は次のように要約できる.

- ①物理量の計算に複数の数理モデルが設定されている. または, 離散的な係数が用意されている.
- ②数理モデル (系数) の決定にあたって, 浮動小数点数を判定基準に用いている.
- ③浮動小数点数を判定基準とするため, その LSB が異なるだけで選択する数理モデル (系数) が異なり, したがって, 計算結果に丸め誤差を大きく超える有意な差が生じる.

浮動小数点数の下位ビットに誤差が発生するのは, 多数回の四則演算を繰り返したり, 関数を使用する際には避けられない. その誤差の発生傾向は CPU が有する演算機構の違いや, コンパイラ及びライブラリの実装に依存するものである. したがって, 数理モデル (または係数) を選択する際のパラメーター値に差が生じることは避けられない. このことから, 上記 2 種の物理量のプロダクトについては, JSS のデータと標準プロダクトで生じる差は, 合理的に説明が可能な範囲の結果であると言える.

一方、海上風速の計算で最小値探索に失敗するケースでは、探索失敗としてエラーを返すか、または、探索方法を修正するなどの対応が必要である。この点では、AMSR-Eの後継センサーであるAMSR2の処理システムでは改善されていることが確認されている。

4. 処理性能の検証

4.1. 処理プログラムの実行方式

大規模なシミュレーションとは異なり、衛星観測データの処理はシーンなどの小規模な単位で行うのが普通である。AMSR-Eにおいて、処理プログラムの実行単位は表6の通りである。

表6 処理プログラムの実行単位

処理レベル	実行単位
L1	シーン AMSR-Eにおいては、衛星の軌道半周分のデータの集まり
L2	同上
L3	日平均プロダクト：1日分の観測データ 月平均プロダクト：1月分の観測データ

シーン毎の処理は数分程度で完了するため、スパコン向けの特別なチューニングは行っていない。ただし、コンパイラによる自動最適化（スレッド並列を含む）が性能の向上に効果が有る場合は、コンパイルオプションで並列化を含む最適化を指定した。L1処理で用いられるライブラリ（SDPTOOLKIT）、及び、L3処理プログラムはコンパイラによる自動最適化を行った。

JSSで実行するジョブの単位は、3つのケースで試行した。一つは処理プログラムの実行単位、すなわち1シーンの処理を1ジョブとするものである。このほか、1日分のシーンの処理をまとめて1ジョブとするケースや1ヶ月または3ヶ月のシーンをまとめて1ジョブとするケースを設定した。これらと比較し、ジョブの実行の効率を含めて評価を行った。また、プロセス並列は適用しないので、計算ノードの1ノード当たり1シーンの処理を行う。これらの多数のジョブを連続して投入し、全ての処理が完了するまでの時間によって性能を評価した。

4.2. 性能測定の結果とスループットの向上

実行状態の例を図7に示す。図7はL1処理を1ジョブ当たり1シーンとして大量投入した際の実行状態を示す。横軸はジョブ投入開始からの経過時間（分）、縦軸は使用されている計算ノードの数を表し、“-”の点は実行中のノード数（実行状態のジョブ数）、“+”の点はウェイト状態のノード数（実行待ちのジョブ数）を表す。

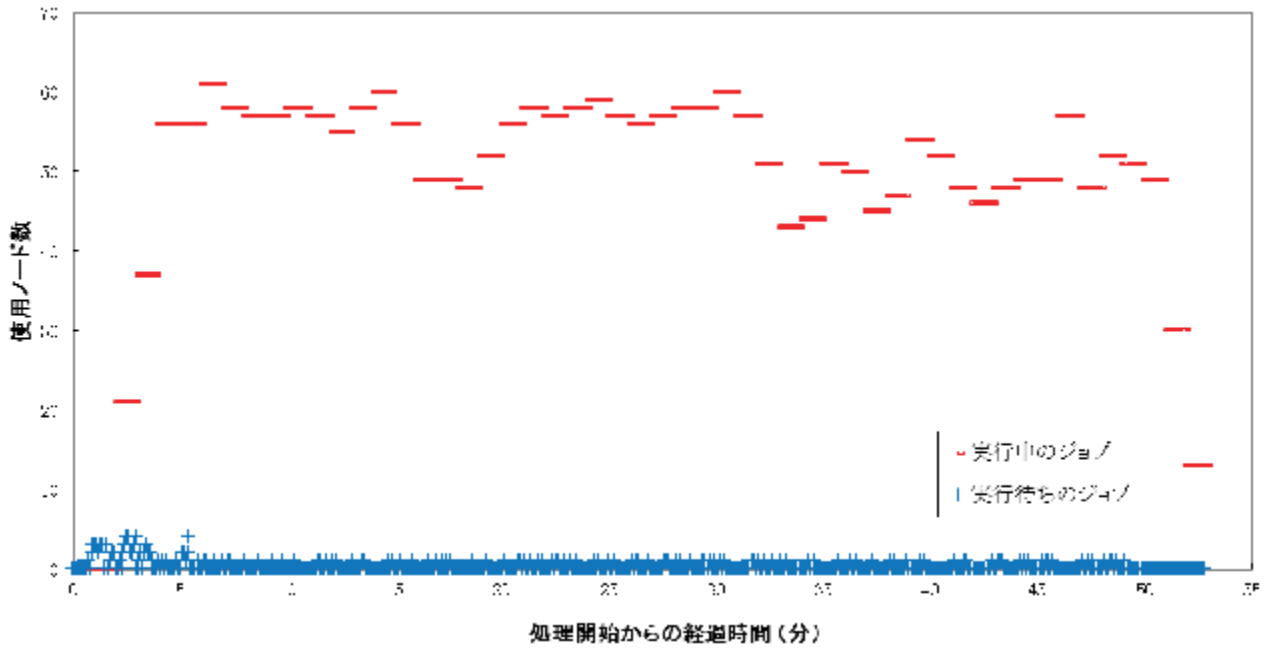


図 7 L1 処理の実行状態 (参考文献 2)に基づき作成)：横軸はジョブ投入開始からの経過時間 (分)，縦軸は使用されている計算ノードの数を表し，“-”の点は実行中のノード数 (実行状態のジョブ数)，“+”の点はウェイト状態のノード数 (実行待ちのジョブ数) を表す。

ジョブの実行数は最大で 61 ノードとなったが、これは、ジョブの実行時間が短いため、実行待ちの時間が露わに影響していることを示している。すなわち、(ジョブの実行時間) / (ジョブの待ち時間) が 60 程度であることの結果である。

同時並行して実行できるジョブ数が増えれば増えるほど、全シーンの処理完了に要する時間は短縮され、スループットの向上が期待できる。今回の実験のうち、L3 プロダクトの作成処理では、1 ヶ月間のデータの処理を 100 ノードに割り当てたケースでは、全ての計算ノードを使用して実行することができた。

性能測定の結果に基づき、10 年分の全データの再処理に要する時間を見積もった。見積もりの前提とした測定結果は、表 7 に示す性能測定の方法を前提とした。これらの場合に効率よい性能が達成できたことによる。

表 7 見積りの前提とした性能測定方法

処理レベル	ジョブの単位	性能値の前提
L1	1 シーン / ジョブ	1 ヶ月の観測データを連続処理し、シーン当たりの平均を用いる。
L2	1 シーン / ジョブ	1 ヶ月の観測データを連続処理し、シーン当たりの平均を用いる。
L3 (輝度温度 / 日平均)	1 ヶ月分 / ジョブ	1 ヶ月の観測データの連続処理を複数回実行し、平均を取る。

L3 (輝度温度/月平均)	3 ヶ月分/ジョブ	3 ヶ月の観測データの連続処理を複数回実行し、その平均を用いる。
L3 (物理量/日平均)	1 ヶ月分/ジョブ	1 ヶ月の観測データの連続処理を複数回実行し、その平均を用いる。
L3 (物理量/月平均)	3 ヶ月分/ジョブ	3 ヶ月の観測データの連続処理を複数回実行し、その平均を用いる。

表 8 に 10 年分の処理時間の見積もりを示す。表には、使用ノード数の仮定、及び、その根拠を併せて示す。

表 8 10 年分の全データの再処理に要する時間

処理レベル	処理時間	使用ノード数 (仮定)	使用ノード数の根拠
レベル 1	約 4.0 日	56	実験結果の同時に使用可能なノード数の平均 (図 7 参照)
レベル 2	約 8.0 日	29	処理アルゴリズムの制約により、並列実行が可能な最大の観測期間が 1 日間に制限される。
レベル 3 輝度温度/日平均	約 9.1 日	100	システムからの割り当てを 100 ノードと仮定した。本実験の最大割当て数と等しい。
レベル 3 輝度温度/月平均	約 5 分	100	同上
レベル 3 物理量/日平均	約 16 分	100	同上
レベル 3 物理量/月平均	約 2 分	100	同上

この結果、従来、約 14 か月を要していた再処理期間を 22 日間以内に短縮できることが分かった。今後、JSS のリプレースによってシステムの基本性能が向上することから、ジョブの起動・管理に要するオーバーヘッドが短縮されること、CPU の演算能力が高まることを考慮すると、さらに処理期間が短縮されることが期待できる。JSS の次期システム構築はこの 4 月から開始しており、新しいシステムで改めて性能を検証する価値はある。

5. データ値の差異に関する考察

プロダクトの同一性検証では L1 処理ソフトウェアにおいて、JAXA 及び NASA で共有しているライブラリ内の計算で演算精度が落ちているという問題が発見された。AMSR-E の観測分解能から見るとプロダクトの品質には影響ないが、将来的に分解能が大幅に向上する場合には改善が必要となる可能性が

ある。今後の教訓とすべきであろう。

L2 プロダクトにおいては、3種の物理量（海上風速、積算水蒸気量、積雪深）に、発生頻度は小さいながら有意な差異があることが分かった。海上風速のデータに見いだされた差異は、最小値探索における考慮不足が原因である。プログラムの動作に関する十分な点検が必要であることを示している。

積算水蒸気量と積雪深に見いだされた差異は様相が異なる。ここで生じた差異は、数理モデルが3種用意されており、その選択の前提となった判定条件における境界値のわずかなずれのために、数理モデルが変動することが原因であった。一般的な数値計算誤差については、その理解が進み、精度よく計算するための方法論も多くのテキストに示されている（文献6）など。例えば、数値シミュレーションでよく行われる反復計算（いわゆるループ計算）において、ループの制御変数は原則的に整数型にすべきであり、それにより丸め誤差の影響を除くことが必要とされる⁷⁾。制御変数に実数型を用いると、丸め誤差の累積によってループ回数を誤る可能性があるためだ。これと同様の考え方が応用できる可能性が有る。すなわち、モデル選択の判定条件を整数型で行えるような改良が可能であれば、選択のぶれを抑止できる。また、別の改良の可能性としては、境界値に単精度数が使用されていたことから、倍精度などの多倍長の変数を使用することも考えられる。これらの改良はアルゴリズムの改訂やプログラム修正を要するもので、今回の検証の範囲を超えるものではあったが、今後の検討テーマとして重要であると考えられる。

この他に全く異なるアプローチとして、Intel CPU 上で動作させる時のコンパイル条件を変更する方法も有りうる。この例として、偶然ではあるが、今回のデータと同じ AMSR-E のデータを用いた実験がある⁸⁾。Intel 系の CPU では SPARC 系には無い、IEEE 規格と異なる 80 ビット長の浮動小数点ユニットを持っており、そのため、単純な二項演算でも差が発生することが多い。この実験では、数値計算に Intel CPU の SSE2 を使用することによって IEEE 規格 (IEEE754) に則った計算をさせ、これによりデータの差異が解消することを示した。また、CPU 間の計算の差異を抑止するためのオプションを準備しているコンパイラもある⁹⁾。こうした対策にはある程度の技術習熟が必要であるが、そのためのコストが検証コストを下回る限り投資効果が高いと言え、今後、検討を続けていくのが重要と考えられる。

6. まとめ

今回、衛星データの再処理のスループットの向上、及び、JAXA 全体としての計算機コストの効率化へ貢献することを目標に、AMSR-E データの処理ソフトウェアを用いて JAXA が保有するスーパーコンピュータ JSS の活用を試行した。

プロダクトの同一性検証については、L2 プロダクトの2種の物理量（積算水蒸気量、積雪深）に有意な差異が残っているが、現状では問題ないことが確認できた。アルゴリズムの制約として、浮動小数点数による演算では避けられないものであることが確認できたが、今後の改良の余地があり、さらなる検討を行いたい。

処理性能に関しては、約10年間の観測データの再処理に約14か月の期間を要していたことに対して、JSS の計算ノードを大規模に用いて、22日以内に処理が完了することが分かった。これにより、JSS を有効活用することにより、処理期間が大幅に短縮され、ユーザーサービスが向上することが実証された。

謝辞

JSS (JAXA Supercomputer System) へのプログラム移植にはシステムのサポートグループ諸氏の支援を得た。また、アルゴリズムの調査に関連して、JAXA/EORC (地球観測研究センター) 前田様の支援を得た。紙面を借り謝辞申し上げる。

参考文献

- 1)AMSR-E 処理システムソフトウェアの JAXA Supercomputer System への移植・検証 (JX-PSPC-360307) 成果報告書 (DS 5A26-91-001), 2013
- 2)改良型高性能マイクロ波放射計 (AMSR-E) 処理ソフトウェアの JAXA Supercomputer System 上での整合性検証及び性能の再確認 (JX-PSPC-381958) 成果報告書 (DS 5B52-91-001), 2014
- 3)AMSR-E プロジェクトのホームページ, http://sharaku.eorc.jaxa.jp/AMSR/index_j.html
- 4)富士通プレスリリース (2014年4月7日), <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2014/04/7.html>, 2014
- 5)http://www.hdfgroup.org/HDF5/doc/UG/UG_frame11Datatypes.html
- 6)伊理 正夫, 藤野 和建, 数値計算の常識, 1985
- 7)牧野 淳一郎, パソコン物理実地指導, 1999
- 8)改良型高性能マイクロ波放射計 (AMSR-E) 処理ソフトウェアを用いた仮想化検証 (JX-PSPC-389694) 成果報告書 (DS 5B8A-91-001), 2014
- 9)Martyn J. Corden, David Kreitzer (Software Services Group, Intel Corporation), Consistency of Floating-Point Results using the Intel® Compiler or Why doesn't my application always give the same answer?, 2012