

地球観測衛星データ処理における JAXA スパコン活用の効果検証

齋藤 紀男, 上田 陽子, 田中 誠, 中西 功, 仁尾 友美, 小西 利幸, 南 貴博(国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
第一宇宙技術部門 衛星利用運用センター)
井口 茂(日本電気株式会社)
井上 淳一, 鳥居 雅也(富士通株式会社)

Verification of Extreme Time Reduction for Earth Observation Satellite Data Reprocessing with JAXA Supercomputer

by

Norio Saito, Yoko Ueda, Makoto Tanaka, Isao Nakanishi, Tomomi Nio, Toshiyuki Konishi, Takahiro Minami (Satellite Applications and Operations Center, Space Technology Directorate I, Japan Aerospace Exploration Agency)
Shigeru Iguchi (NEC Corporation)
Junichi Inoue, Masaya Torii (FUJITSU Limited)

ABSTRACT

Earth observation by satellites is an important tool for scientific study of global environmental changes. Observation data are reprocessed almost every year according to progress in computational model to obtain physical information from observation. As the amount of observation data grows day by day, reprocessing time of the data expands longer and longer. However, data latency is an important subject because quick access to earth observation data considerably encourages research into global environmental changes and their effects to our society. On this point, JAXA Supercomputer System Generation 2 (JSS2) helps us to solve the problem since it can enhance throughput of data processing by using a number of computing nodes. First, we have utilized JSS2 for reprocessing of GOSAT(GOSAT: Greenhouse gases Observing Satellite) observation data. GOSAT was launched on Jan. 23rd, 2009, and the data during 6.5 year period has been reprocessed in Nov. 2015. We obtained incredibly high throughput; 30 nodes (360 cores) of Pre-Post system of JSS2 were assigned and resulted in 33 times shorter latency. Next, we used JSS2 for GPM (Global Precipitation Measurement) Core Observatory that was launched on Feb. 28th, 2014. The data during 2.2 year period has been processed and 4 times shorter latency was achieved in June 2016 by using 3 nodes at a maximum. As a conclusion, it is shown that JSS2 is a powerful tool to improve data latency of Earth observation data.

1. はじめに

人工衛星による地球観測のデータ処理は、日々の観測データを処理する“定常処理”と、継続的に改善・改良している解析アルゴリズム(パラメタ調整含む)を使った“再処理”に大きく分けられる。再処理の場合、これまでに蓄積された膨大な観測データ全てを対象とするため、処理に要する時間は観測期間に比例して増大する。

定常処理および再処理は、筑波宇宙センター(以下、「TKSC」という)に整備されたデータ処理設備を用いて実施される。データ処理設備は、コストや設置スペースの制約もあり、人工衛星の設計寿命を元に必要最小限の設備で運用を行う。そのため、衛星が想定期間をこえて、観測を継続するケースでは、計算規模が膨大となることに加え、計算リソースを定常処理に優先的に割り当てる必要もあり、再処理に数ヶ月から1年を要するケースもある。その結果、データを必要とする研究者等への観測データの提供にかなりの時間を要するなど、運用上の課題となっていた。

我々は、JAXA 調布航空宇宙センターにある JAXA Supercomputer System 2(以下、「JSS2」という)を活用することにより、再処理のスループットを大幅に向上させることに成功した。JSS2は本来、大規模並列計算で効果を発揮する。しかし、人工衛星の観測データ処理は、独立した計算を大量に処理するパラメタスタディ的な処理の割合が高く、JSS2を効果的に活用するためには工夫が必要となる。ワークフロー制御と呼ばれるジョブのフロー制御を行う機能やスクリプトを活用し、大量のジョブを効率よく計算ノードに割り振ることで、大幅な性能向上を達成した。

2. 衛星観測の概要

(1) 温室効果ガス観測技術衛星

(GOSAT: Greenhouse gases Observing SATellite)

温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT は、宇宙から主要な温室効果ガスを全球規模で監視することを目的に、2009年1月23日に打ち上げられた。GOSATは2種類のセンサを搭載している。1つは、温室効果ガス観測センサ(TANSO-FTS)で、太陽光近赤外線(SWIR)の気体吸収スペクトルや地面や大気から放射される熱赤外線(TIR)を計測し、二酸化炭素(CO₂)およびメタン(CH₄)の濃度と分布を観測する。もう1つは、雲・エアロゾルセンサ(TANSO-CAI)で、紫外域、可視域、近赤外域の放射特性から、雲・エアロゾルの分布を観測する。

図1はGOSATの2種類のセンサによる地球観測の様子

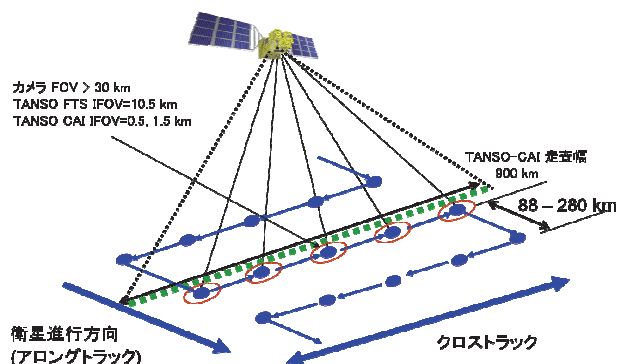


図1 いぶき(GOSAT)による地球観測の様子

を示したものである。TANSO-CAI は、衛星の進行方向に垂直な方向（クロストラック）に帯状に連続観測を行う。TANSO-FTS は、図 1 の楕円の点で示すように飛び飛びのポイント毎に観測を行う。

図 2 に TANSO-CAI の観測結果を、図 3 に TANSO-FTS の観測結果を示す。

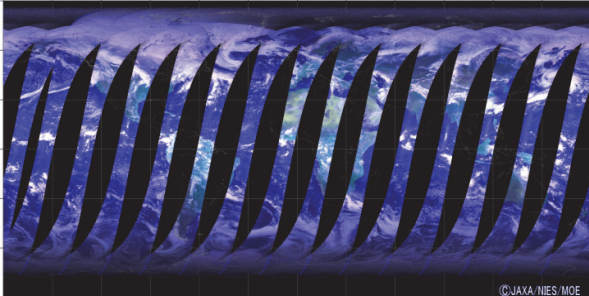


図 2 TANSO-CAI の日毎の観測ブラウザ画像
(JAXA/EORC のホームページより)

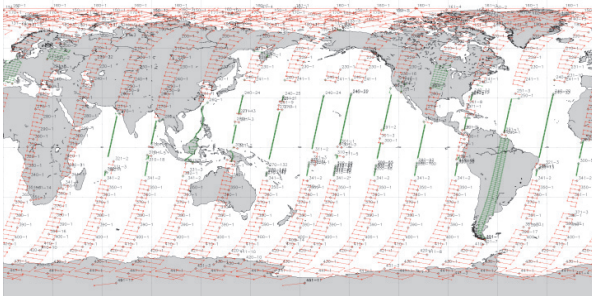


図 3 TANSO-FTS の日照域の格子点観測マップ
(JAXA/EORC のホームページより)

これらのデータを使ってさらに高次処理・モデル計算を実施することで、図 4 のように温室効果ガスの全球分布を得ることができる。

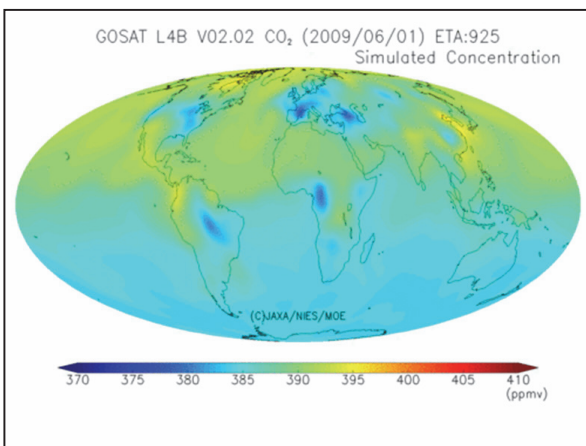


図 4 日平均の CO₂ 濃度分布
(国立環境研究所のホームページより)

GOSAT の観測データは、国立環境研究所のホームページから容易に入手できる。時系列のデータも蓄積されており、大気中の温室効果ガスの濃度が、年々上昇していく様子を見てとることができる。

(2) 全球降水観測計画 (GPM: Global Precipitation Measurement)

全球降水観測計画（GPM）は、熱帯降雨観測衛星（TRMM）の後継・拡大ミッションとして、国際的な協力のもとに進められている。GPM 主衛星を軸に、各国・各機関が個別に打ち上げた複数の衛星と連携することにより、観測範囲、観測頻度を大きく向上させているのが特徴である。GPM 主衛星は、米国航空宇宙局（NASA）と JAXA が共同で開発した衛星であり、2014 年 2 月 28 日に打ち上げられた。搭載されているセンサは 2 種類あり、1 つは JAXA と国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）が共同で開発した二周波降水レーダ（DPR）で、もうひとつは NASA が開発したマイクロ波放射計（GMI）である。

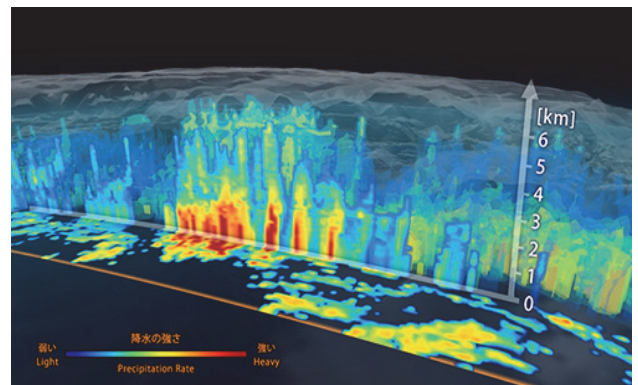


図 5 二周波降水レーダ（DPR）の観測例
(JAXA/EORC のホームページより)

図 5 は GPM 主衛星に搭載された二周波降水レーダ（DPR; Dual frequency Precipitation Radar）の観測結果である。二周波降水レーダは、Ka バンド、Ku バンドの 2 つの異なる周波数の電波を使い、降水の三次元構造を観測する。2 つの周波数を使うことで、熱帯の強い雨から高緯度の弱い降雪までを高精度で検出することが可能となっている。

一方、複数衛星のデータや気象データを使って作成される全球合成降雨マップ（GSMaP）は、1 時間毎のデータ提供が可能であり、ほぼリアルタイムのデータ提供を行えるのが特徴である。低高度を周回する衛星観測では、全球を網羅するのに数日を要し、リアルタイムの全球データの提供が難しいという課題があるが、複数衛星のデータで補完することで、リアルタイムに近いデータ提供を可能としている。図 6 に GSMaP のイメージを示す。

これらのデータは、JAXA 第一宇宙技術部門の地球観測研究センター（EORC）のホームページから入手できる。また、地球観測データ提供システム（G-Portal）では、観測時刻や場所をキーにプロダクトを検索し、一般ユーザへ提供するサービスを行っている。

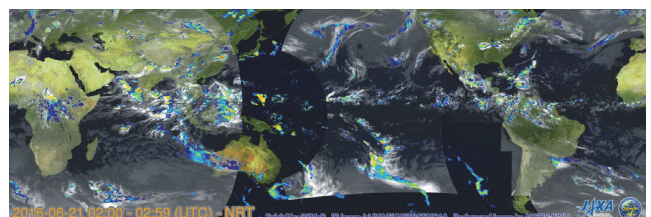


図 6 GSMaP の例 (JAXA/EORC のホームページより)

3. 運用上の課題

地球観測データは、衛星の軌道周回の単位（衛星によっては1周回あたり2ファイルの場合もある）にデータファイルを作り、その単位で処理を行い、各種プロダクトとして提供される。（図7）

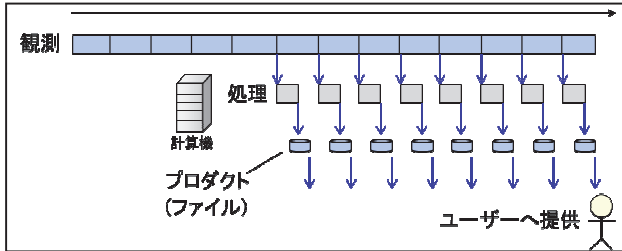


図7 定常運用とプロダクト提供の概念図

地球観測データの処理は大きく4つの処理区分に分けられる。（表1）

表1 地球観測データの処理区分

名称	処理概要
準リアルタイム処理 (NRT)	観測データを周回単位に地上へダウンロードし、即時処理してユーザへ提供する。（頻度：1回/軌道周回）
標準処理 (STD)	軌道データ、姿勢データ等の確定後に再度、データ処理し、ユーザへ提供する。このプロダクトを標準プロダクトとし、保存・管理する。（頻度：軌道データの受領後）
再処理	アルゴリズムの改訂、パラメータ（校正係数等）の改訂時に累積した観測データを全数、処理し、ユーザへ提供する。（頻度：1回/年）
長期試験処理	再処理に先立ち、アルゴリズム評価のために実施する処理。（頻度：1回/年）

表1の準リアルタイム処理および標準処理は、日々実施され、定常処理と呼ばれる。また、観測データの解析処理アルゴリズムの改善、処理パラメータの改訂（センサの校正係数の改訂など）、センサの経年変化に対応するためのアルゴリズム、パラメータの変更が継続的に行われており、最新のアルゴリズム・パラメータを使って、これまでに蓄積された観測データに対して処理を行うことを、再処理運用と言う。定常処理や再処理に先立って、処理アルゴリズムが正しいかどうか、センサの校正係数が妥当かなど、処理の結果に関する検証が必要であり、そのために行うデータ処理を試験処理というが、特にこれまでに蓄積されたデータを使い、運用に近い形で処理を行い検証することを長期試験処理という。

再処理や長期試験処理は、これまでに蓄積された長期間のデータに対して処理を行うため、観測が長期化するとデータ量が膨大になり、処理を完了するまでかなりの期間を要する。例えば、降水量の観測を担ってきた衛星TRMMは2015年4月に運用終了したが、その観測期間は17年間に及ぶ。主要な衛星の蓄積データ（再処理/長期試験処理の入力データ）の規模を表2に示す。

表2 各衛星の観測データ規模

衛星名称	観測期間	データ規模
TRMM	17年	8TB
Aqua	10年	2TB
GCOM-W	4年(運用中)	1TB
GOSAT	7年(運用中)	45TB
GPM	2.5年(運用中)	5TB

定常運用や再処理などの各処理は、TKSCに整備されたデータ処理設備を用いて実施される。データ処理設備の計算資源は、各衛星の設計寿命を元に、必要最小限の設備で運用している。しかし、多くの衛星は設計寿命をこえて観測を継続し、蓄積された観測データは膨大なものとなっている。地球観測のデータ処理の運用では、定常処理が優先されるため、空き時間を利用して試験処理や再処理が行われる。その為、設計寿命を迎える前までの期間は、運用に大きな問題はなかったが、観測が長期化すると、再処理に要する期間が数ヶ月から1年の単位に達するなど、研究機関、研究者へのデータ提供のレスポンス悪化が課題となっていた。

我々は課題解決のため、JAXA 調布航空宇宙センターにあるJSS2 (JAXA Supercomputer System 2) を活用し、再処理のスループットを大幅に向上させることに取り組んだ。従来は数ヶ月から年単位の時間を要した再処理を数日から数日へ短縮させることが目標である。これにより、データ提供を抜本的に早め、防災・減災などへの社会貢献や、地球環境変動の研究利用に対するさらなる貢献を果たすことが可能となる。

4. JSS2の利用について

JAXA 調布航空宇宙センターのJSS2は、用途別に3つのシステムから構成される。それぞれのシステムのスペックは、表3のとおりである。

表3 JSS2のシステム構成

	計算システム (SORA-MA)	プレポストシステム (SORA-PP)	大メモリ計算システム (SORA-LM)
機種名	PRIMEHPC FX100	PRIMERGY RX350 S8	
CPU	SPARC64 XIfx	Intel Xeon E5-2643 v2	Intel Xeon E5-2667 v2
メモリ	32GiB	64GiB	0.5/1.0 TiB
コア数	32+7システムコア2	12	16
ノード数	3240ノード	160ノード	5ノード

地球観測データの処理は、3章で述べたように、多くの処理は軌道周回の単位で行われる。従って、処理の並列度よりも、パラメータスタディのように独立した計算を同時に多く実行できることのメリットが大きい。また、TKSCのデータ処理設備の計算機のアーキテクチャは主にIntel Xeonであるため、同じアーキテクチャの計算機を使ったほうが移植の手間は少ない。以上の理由から、主にプレポストシステム (SORA-PP) を利用するケースが多い。各衛星の移植作業の状況を以下に述べる。

(1) GOSAT 処理プログラムの再処理

GOSATでは、JSS2のプリポストシステム (SORA-PP) を利用する。TKSCのデータ処理設備とJSS2環境の主な相違点を表4に示す。

表4 プログラミング・実行環境の比較 (GOSAT)

項目	JSS2 (SORA-PP)	TKSC 運用環境
CPU アーキテクチャ	Intel Xeon E5-2643 v2	Intel Xeon E5640
ソフトウェア	RHEL 6.4 gcc4.4.7	RHEL 5.5 gcc4.1.2

計算機のアーキテクチャやコンパイラは同じであるため、プログラムの大きな変更は不要であった。プロダクトの妥当性については、数値計算の誤差の程度の差異はあったが、プロダクト品質への影響は無い範囲であった。プロダクト品質の検証は、JAXA/EORCの協力を得て実施している。

性能見積りについては、異なる衛星周回のデータは互いに独立に処理できるため、処理アルゴリズムの単体の実行時間の測定値から推測することができる。プロダクト一つの平均的な処理時間から類推して、今回の処理を10日程度で完了させるため、SORA-PPの30ノード(360コア)を占有利用することとした。

今回実施する6.5年分のデータ処理では、データ数は数百万のオーダーとなり、ジョブ投入などの操作をマニュアルで行うのは困難なため、操作を自動化するためにスクリプトを作成した。JSS2のジョブスケジューラにジョブリクエストが集中しすぎないように、スクリプト中でジョブリクエスト数を監視し、一定数以上のジョブが投入されないよう制御した。

これらの準備作業は2015年10月までに完了し、TKSCからJSS2へのデータ移行を行い、2015年11月に6.5年分の観測データに対する再処理を実施した。

その結果、TKSCのシステムを利用する従来通りの再処理運用では約1年を要すると見積もられた再処理を11日間、約9.5万コア時間(コア数×H)で完了することができた。(図8)

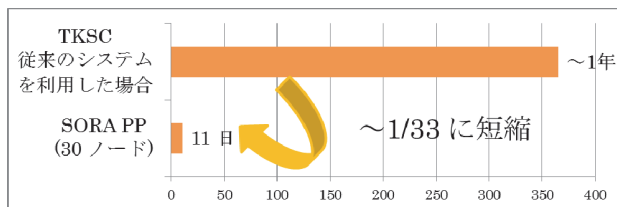


図8 再処理実施結果

これ以降に、センサの運用状況に応じたパラメタの見直しを行い、再処理を2回実施したが、初回の反省を活かし、再処理の実行スクリプトに次のような改善を施している。

- 処理の進捗状況が容易に確認できるようにした。
- 処理エラーが生じたケースについて、その内容を容易に確認・識別できるようにした。
- エラーが生じた処理を容易に識別し、再投入できるようにした。
- 処理ログ等の中間ファイルを自動削除するようにした。

2回の再処理の合計で約35.7万コア時間を要する再処理を、シェルスクリプトの改善効果もあって最大の効率で実施できた。このとき、占有した計算ノードの利用効率ほぼ100%に達した。

(2) GPM/DPR 処理プログラムの再処理

TKSCのデータ処理設備とJSS2環境の主な相違点を表5に示す。

表5 プログラミング・実行環境の比較 (GPM/DPR, GSMaPのケース)

項目	JSS2 (SORA-PP)	TKSC 運用環境	JSS2 (SORA-MA)
CPU アーキテクチャ	Intel Xeon E5-2643 v2	Intel Xeon E5640	SPARC64XI fx
ソフトウェア	RHEL 6.4 Intel Cluster Studio XE 2013	RHEL 6.4 Intel Cluster Studio XE 2013	Technical Computing Suit (富士通製)

GPMの場合は、SORA-PPとSORA-MAのどちらを使うのが適切であるか事前に検証を行った。メインの計算システムであるSORA-MAは京コンピュータの後継とされるSPARCプロセッサを用いたシステムであり、言語環境は富士通製コンパイラである。そのためプログラム移植が必要となる。処理プログラムの一部を選んでSORA-MAへの移植を試みたところ、言語環境の変更への対応とともに、バイナリデータのエンディアンの違いに伴うプログラム修正が必要であることが分かった。移植後のプログラムの処理結果を評価したところ、コンパイラの違いや移植作業に伴うアルゴリズム修正などに起因すると思われる計算誤差も発生することが分かった。今回の計算誤差は、単体処理としては有効桁数の範囲で問題ないが、全処理を通して実行した場合の計算結果の検証を実施する必要があることが分かった。

以上の事前検証の結果から、移植とデータ検証の作業期間や手間を考慮して、再処理にはSORA-PPを使用することを選択した。SORA-PPの場合、計算機のアーキテクチャやコンパイラは同じであるため、プログラムの変更は不要である。プロダクトの妥当性については、SORA-PPの計算結果は完全にTKSCの計算結果と一致した。

GOSATのケースと同様に、処理プログラムの単体性能の見積りを行い、SORA-PPの30ノード程度の計算リソースの占有利用が必要と想定した。次にジョブ制御についてだが、GPMでは処理アルゴリズムの順序に制約がある。例えば、GPM主衛星に搭載されたセンサDPRは、最終的なアウトプットは処理レベル3のプロダクトとなり、日単位あるいは月単位のアウトプットとなる。一方、処理レベル1およびレベル2では、衛星周回毎の処理となる。従って、最終的に、ある月のレベル3のアウトプットを得るには、レベル1およびレベル2の周回データを束ねて、月単位にまとめてレベル3の処理をする必要がある。これらの処理フローを制御するために、JSS2が提供するワークフロー制御機能を利用した。

さらに、JSS2が提供するMPI同時起動機能を使いジョブの同時実行の高密度化を図った。レベル1の処理では、1つ1つの周回毎の処理時間が短いため、新規ジョブの生成が実行処理に追いつかず、計算ノードの占有率が低いという問題があった。MPI同時起動機能を使うことで、新規ジョブの生成効率を高め、計算効率を高めることが可能となる。この様子を図9に示す。

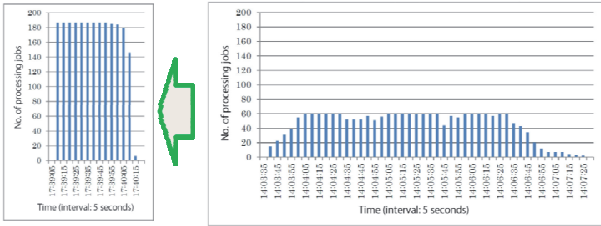


図9 MPI同時起動機能によるスループット向上

2016年6月、JSS2を利用して、GPM主衛星打上げ(2014年2月末)後の2年3ヶ月間の観測データの長期試験処理を実施し、再処理用アルゴリズムの評価を実施した。今回はレベル1のみの試験処理であることから計算ノードの占有は行わなかったが、処理は2日ほどで完了した。さらに2016年11月に、レベル3までを通して処理する長期試験処理を計画している。今回のレベル1の処理結果から、30ノードの占有実行により、従来より20倍程度のスループットが達成できると予測している。

なお、GOSATの処理プログラムの移植は日本電気株式会社²⁾、GPMの処理プログラムの移植は、富士通株式会社³⁾に委託して作業を実施した。

5. 考察

再処理運用において、JSS2を利用した場合と同等のスループットを達成するためにTKSCで単独に計算機調達を行う場合、JSS2への移植作業やデータ移行のコストと比較して、10倍以上のコストがかかると試算している。また、衛星が設計寿命を超えて運用可能なケースや、突然、衛星が故障して運用ができなくなるケースも考えられ、予算調達の面でも、計画的な運用が難しいという課題があった。その点、JSS2を利用する場合、再処理のスループットが劇的に短縮される性能面のメリットだけでなく、衛星の運用期間が予測できないという課題に対しても柔軟な対応が可能となる。

一方で年々蓄積される膨大なデータを、どのように管理するかという課題に今後取り組む必要がある。現状は、再処理の入力となる観測データと、再処理の出力となるプロダクトの何れもTKSC側のBASSと呼ばれるストレージに保存する運用となっている。つまり、再処理を行うたびに、入力データをTKSCからJSS2へデータ移送し、出力結果をJSS2からTKSCに戻すという作業が発生する。観測データの容量は膨大なため、データの転送手段には工夫が必要である。現状の各衛星のデータ量と年毎の増加量は表6のとおりである。

表6 各衛星のデータ量と推移予想

衛星, センサ	入力データ	出力データ	入力データの年毎の増加量
GOSAT	45TB	45TB	6TB/年
TRMM/PR	8TB	120TB	※1
GPM/DPR	5TB	60TB	2TB/年
AMSR-E/AMSR2	2TB	6TB	0.2TB/年

※1 観測運用は2015/4で終了。

昨年度までは、TKSCとJSS2のネットワーク経路として利用可能なものはJAXAnet(帯域幅100Mbps)のみであった。現状のデータ量からすると、帯域幅が100Mbps

のオーダーではネットワーク経由のデータ転送では運用に耐えないため、テープ媒体やハードディスクによる物理的なデータ移送で運用していた。しかし、本年5月初めに、TKSCの地球観測システムと調布のJSS2とをSINET5を介して高速に接続するネットワーク環境が整備された。これにより、TKSCとJSS2は10Gbpsの帯域を持つネットワークで接続され、ネットワーク経由のデータ転送が可能となった。しかし、それでもデータ転送に数日を要するレベルであり、GridFTPやirodsといったグリッドツールを活用したデータ転送時間の短縮を試行錯誤中である。

また、運用上の工夫も模索しており、たとえば、GOSATの機関ユーザ(国立環境研究所など)に対して、JSS2からプロダクトを直接提供する方式を採用している。JSS2からTKSCへプロダクト(再処理結果)を戻す必要がなくなるため、ユーザへのデータ提供までの期間が数日短縮される。なお、GOSATの場合、プロダクト利用者に非居住者(日本国外の機関に在籍している研究者や、入国後6ヶ月が経過していない留学生等)も含まれるため、外為法の規制対象となり、所定の手続きを経る必要があった。今後、他衛星でも定常的なデータ提供手段として選択肢の一つとなる。

昨年度より、地球観測衛星データ処理はJSS2の重点利用課題となった。業務上の直接のメリットは以下の2点である。

- ▶ ジョブクラスの優先度が最高レベルに設定されるようになった。
- ▶ 申請によりノード占有が可能となった。

こうした特典により、再処理のスループットが短縮されるのはもちろんだが、終了までの時間が予測しやすくなり、計画的な再処理が可能となる。

TKSCにおけるJSS2利用は、他の衛星へも拡大中である。2016年6月にはAqua(AMSR-E)の10年分のレベル1処理を完了した。2016年後半には、Aqua(AMSR-E)及びGCOM-W(AMSR2)の全処理レベルの再処理を計画している。さらにGOSATについては、7.5年分の再処理を実施予定である。2017年には、TRMM/PRの17年分の再処理を計画しており、2018年にはGSMaPの再処理を計画している。

他の機関の事例りでは、GOSATと同様に温室効果ガスを観測する衛星にOCO-2(Orbiting Carbon Observatory-2, 2014年7月2日打上げ)がある。これはNASAが打ち上げ、運用を行っている。昨年、NASAのAmes Research CenterにあるスーパーコンピュータPleiadesを利用して10か月分の観測データの再処理を行った。観測データの60%の再処理にHaswell Node(2088ノード、4176CPU)のうち500ノードを利用し、140万CPU時間で完了したとの報告があり、NASAにおいてもスーパーコンピュータを活用している。

6. 結論

今回、GOSAT、GPMの再処理において、JSS2を利用することのメリットを検証することができた。これらの結果を踏まえ、JAXA衛星利用運用センター(SAOC)では、今後、JSS2を利用した衛星の再処理を、Aqua(AMSR-

E) , GCOM-W (AMSR2) , TRMM/PR といった他の衛星へと適用範囲を拡大する予定である。

以上の通り、JAXA/SAOCでの衛星データ処理の業務では、JSS2は業務効率化とユーザの利便性を両立させて実現するための必須のツールとなっている。

7. 謝辞

今回、GOSAT および GPM の再処理を実施するに当たっては、JAXA のセキュリティ・情報化推進部スーパーコンピュータ活用課の協力を得た。ここに紙面をお借りして謝辞を申し上げる。

参考文献

- 1) Tsengdar Lee, Climate Data Downscaling Projects at NASA, Presented at SC15 Conference, Nov 16 – 20, 2015
- 2) 日本電気株式会社, 「温室効果ガス観測センサ(FTS)処理固有部 ソフトウェアの移植」 (JX-PSPC-421815) 成果報告書 (GOSAT-H27移植-提005) , 2015, 日本電気株式会社
- 3) 富士通株式会社, 「全球降水観測計画 (GPM) プロダクト再処理時のJAXA Supercomputer System 2 (JSS2) 利用検討 (その2)」 (JX-PSPC-410301) 成果報告書 (FJ-GPM-JSS2利用検討-14-020) , 2015, 富士通株式会社