

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### SOI-SOC3とSpaceRによる SpaceWire-Rプロトコル疎通試験結果

Results of SpaceWire-R Protocol Interoperability Test  
between SOI-SOC3 and SpaceR

石田 貴行, 松崎 恵一, 能町 正治, 福田 盛介

ISHIDA Takayuki, MATSUZAKI Keiichi, NOMACHI Masaharu and FUKUDA Seisuke

2020年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 目次

1. はじめに	1
2. SpaceWire-R 概要	2
2.1. SpaceWire-R の概要と特色	2
2.2. SpaceCube2 上の実装	3
2.3. SOI-SOC3 上の実装	3
3. SOI-SOC3 同士による SpaceWire-R 通信試験（予備試験）	4
3.1. 試験セットアップ	4
3.2. 試験条件	5
3.3. 試験結果	9
4. SpaceWire-R 疎通試験	15
4.1. 試験セットアップ	15
4.2. 試験条件	16
4.3. 試験結果	16
5. SpaceWire-R による画像送信デモンストレーション	23
6. まとめ	23
7. 今後の展望	24
謝辞	24
参考文献	24

# SOI-SOC3 と SpaceR による SpaceWire-R プロトコル疎通試験結果

石田 貴行<sup>\*1</sup>, 松崎 恵一<sup>\*2</sup>, 能町 正治<sup>\*3</sup>, 福田 盛介<sup>\*2</sup>

## Results of SpaceWire-R Protocol Interoperability Test between SOI-SOC3 and SpaceR

ISHIDA Takayuki<sup>\*1</sup>, MATSUZAKI Keiichi<sup>\*2</sup>, NOMACHI Masaharu<sup>\*3</sup>, FUKUDA Seisuke<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

SpaceWire-R (SpW-R) is an upper layer protocol of SpaceWire, and is a protocol for mixing data of different QoS (Quality of Service) requirements on the network. JAXA and Mitsubishi Heavy Industries have developed SOI-SOC3, the first general-purpose space-grade CPU that supports SpW-R in hardware. For standardization of SpW-R, interoperability tests of SpW-R protocol between SOI-SOC3 and software implementation (SpaceR) developed by ITTI were conducted in March 2019 to verify whether the protocol in specification can be implemented without ambiguity. This paper shows the results of detailed performance and functional tests of SpW-R supported by SOI-SOC3 and the results of the interoperability tests with SpaceR.

**Keywords:** SpaceWire, SpaceWire-R, SOI-SOC3, Interoperability test

### 概要

SpaceWire-R (SpW-R) は SpaceWire の上位プロトコルとして規定され、異なる QoS (Quality of Service) 要求のデータをネットワーク上に混在させるためのプロトコルである。JAXA および三菱重工業は世界で初めて SpW-R をハードウェアでサポートした、衛星搭載可能なアーキテクチャを持つ汎用 CPU, SOI-SOC3 を開発した。SpW-R の標準化に向け、規格文書が曖昧さなく実装可能な記述になっているかを検証するため、ポーランド ITTI 社が開発した SpW-R のソフトウェア実装 (SpaceR) と SOI-SOC3 の疎通試験を 2019 年 3 月に実施した。本稿では、SOI-SOC3 でサポートされる SpW-R の詳細な性能試験・機能試験の結果と、SpaceR との疎通試験の結果を示す。

### 1. はじめに

SpaceWire は ESA (European Space Agency) が管理する宇宙機用データ通信規格である (ECSS-E-ST-50-12C)。SpaceWire-R<sup>1)</sup>(以降 SpW-R) は JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) / ISAS (Institute of Space and Aeronautical Science) の山田隆弘が提案した、SpaceWire の上位の層で使うことを想定したプロトコルであり、再送やセグメンテーション、ハートビートなどの信頼性の高い通信を実現するものである。JAXA/ISAS の研究グループでは、International SpaceWire Working Group (SpW WG) 発足当初の 2003 年前後から、衛星アーキテクチャのネットワーク化に好適なキー技術として SpaceWire に着目し、ステップ・バイ・ステップで研究開発を進めるとともに、「日本 SpaceWire ユーザ会」を組織し、これを核として国際規格の制定活動にも深く参画してきた。一方、JAXA の「SpaceWire オンボードサブネットワーク設計標準 (JERG-2-432)」は、SpW RMAP (Remote Memory Access Protocol) や SpW-R, SpW-D<sup>2)</sup>等の SpaceWire の上位プロトコルを用いたサブネットワークサービスを規定する文書として制定された (WG リーダ: 大阪大学・能町)。このうち、SpW-R は、異なる QoS (Quality of Service) 要求のデータをネットワーク上に混在させるためのプロトコルであり、山田が提案し、SpaceWire WG でプロトコル ID が付与されている (2.1 節参照)。

doi: 10.20637/JAXA-RM-19-006/0001

\* 2019 年 11 月 29 日受付 (Received November 29, 2019)

<sup>\*1</sup> 研究開発部門 第一研究ユニット (Research Unit I, Research and Development Directorate)

<sup>\*2</sup> 宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系 (Department of Spacecraft Engineering, Institute of Space and Astronautical Science)

<sup>\*3</sup> 大阪大学 放射線科学基盤機構 (Institute for Radiation Sciences, Osaka University)

SpW-Rのソフトウェア実装としては、ポーランドにあるITTI社の開発したSpaceR<sup>34)</sup>がある。SpaceRはSpW-Rの実装および実証を目的としたプロジェクトで作られたものであり、英Star-Dundee社のUSB-Brick mk2を用いてPC (Personal Computer) とSpWネットワークとを接続する。スクリプト言語Pythonによって実装されており、また、ユーザアプリケーションを作成可能である。

かねてよりSpW-Rの標準化には、規格文書が曖昧さなく実装可能な記述になっているかを検証するために独立した実装間の疎通試験 (Interoperability Test) が複数必要とされており、まず、2018年にITTIの実装 (SpaceR) と衛星搭載汎用計算機SpaceCube2 (2.2節参照)のBBM (Bread Board Model) 上のJAXA/NECによる実装で疎通試験を行った<sup>5)</sup>。この試験では、通信の疎通が確認され、規格に一部読みづらいところはあるものの、曖昧なく実装可能なことが確認された。この試験ではいずれの実装もソフトウェアによるものであったため性能は評価の対象に含めなかった。そこで我々は2019年、SpaceRとまた別の実装であるSOI-SOC3 (2.3節参照)を用いて性能測定を含めた疎通試験を行うこととした (SOI: Silicon on Insulator, SOC: System On Chip)。これらの疎通試験を通じて、SpW-Rの国際的な認知度が向上すれば試験装置等が国際的に流通し、JAXAプロジェクトや関連メーカーにも大きなメリットがあると考えられる。

SOI-SOC3<sup>67)</sup>はJAXA / MHI (Mitsubishi Heavy Industry, Ltd.; 三菱重工業(株)) が産業連携の枠組みで開発した衛星搭載可能なアーキテクチャを持つ汎用CPUであり、標準でSpaceWireプロトコルに加えその上位レイヤの protocols であるSpW-D, SpW-R, SpW RMAP, CCSDS-PTPをサポートする。SOI-SOC3は世界で初めてSpW-RをASIC (Application Specific Integrated Circuit) でサポートした。SOI-SOC3の概要はすでにSpaceWire WG Meeting等に報告済みであるが、そのサマリーを2.3節に示す。今回の報告では、SpW-Rについて詳細な性能試験・機能試験の結果(3章参照)と、SpaceRとの疎通試験の結果(4章参照)を示す。本試験の目的は、2018年の試験と同様にSpW-Rの規格が曖昧さなく実装可能かの検証することに加えて、性能を検証することである。本資料は2019年にJAXAとITTIが行ったSpW-R疎通試験およびそれに先駆けて行ったSOI-SOC3同士の予備試験の結果を示すものである。なお、本実験の結果のサマリーは30th SpaceWire and SpaceFibre Working Group Meeting (SpW and SpFi WG Meeting) で発表済み<sup>8)</sup>である。

## 2. SpaceWire-R 概要

### 2.1. SpaceWire-R の概要と特色

SpW-Rは山田が提案した、SpaceWireの上位の層で使うことを想定したプロトコルである。このプロトコルはSpaceWireのネットワーク上で信頼性の高い通信を実現するため、以下の機能を備えている。

#### (1) Multiplexing

Transport Channelという通信路により、異なるノード間の通信路を多重化し、同時に扱うことができる。Transport Channelごとに異なる通信パラメータを持たせることも可能である。

#### (2) Segmentation

SpW-R層よりも上位の層で、SpW-R層で定めた最大パケット長よりも長いService Data Unit (SDU)を送る場合、SpW-RはSDUを分割し、より短いProtocol Data Unit (PDU) を用いて送ることができる。PDUは、受信ノードでSDUに再構築される。これにより、データ長の大きく異なるSDUが混在した用途でも、ネットワーク上でリアルタイム性を損なうことなく通信することができる。

#### (3) Reliable transfer

送信したPDUが送信先で受信したことが確認できない場合は、再送を行う機能を持つ。

#### (4) Flow control (option)

受信ノードがあとどれほどのデータを受信可能か、送信ノードへ通知する機能を持つ。これにより受信不可能なパケットの送信を防ぐことができる。

### (5) Heartbeat (option)

ノード間に何もデータの送受信がない場合に、接続が保たれていることを確認するためのパケットを送受信する機能を持つ。

上記の機能に加え、SpW-RはSliding Windowの機能を持つ。そのため、ウィンドウに余裕のある限り送信側は受信側の受信完了の応答を待たずに次のパケットを送信することが可能である。本機能によってSDUの送信を連続的に行うことができ、通常のSpaceWire通信と比べ高いデータ転送効率を実現できる。

## 2.2. SpaceCube2 上の実装

SpaceCube2<sup>9)</sup>は、ハードウェアとしてはSpaceWireプロトコルとその上位レイヤのSpW RMAPをサポートするのみだが、ソフトウェアアプリケーションとして他の上位レイヤのプロトコルを実装することが可能である。SpaceCube2は、「ひさき」「ひとみ」などJAXA/ISASが開発した衛星に搭載されバス系機器（コマンド・テレメトリ等の通信でリアルタイム性が必要となる）およびミッション系機器（センサデータ等、大容量なデータ通信が必要となる）で使われてきた。これらの衛星ではバス系機器がミッションデータの収集までを行い、同一のSpaceWireネットワークを時分割で利用することで、リアルタイム性と大容量のデータ通信を両立させていたが、これらを両立させるにはアプリケーションの作りこみが必要だった。また、実装が複雑になるため大容量通信ではDataパケットをロスした際にも再送を行わないなどサービスレベルが犠牲にされることがあった。2018年に実施した疎通試験では、SpaceCube2のBBM上にSpW-Rのプロトコルを実装し、使用した。

## 2.3. SOI-SOC3 上の実装

SOI-SOC3は衛星搭載可能なアーキテクチャを持つ汎用CPU (Central Processing Unit)であり、「ひとみ」「あらせ」のミッション系等に搭載された一世代前のSOI-SOC2に対しDeterministicかつ高信頼な通信を可能とする機能を付加し、SpW-DおよびSpW-Rをハードウェアでサポートしている。また、これらを容易に扱うためのミドルウェア・APIを備えており、4chのSpaceWireポートがある。図1に開発されたSOI-SOC3のBBM評価ボードを示す。SOI-SOC3はSpW-D,Rをサポートしているため、時刻同期・スケジューリングによるリアルタイム通信およびデータ分割・再送制御による通信を行うことができる。よって、バス系機器と、ミッション系機器との通信が同時に可能である。SpW-Rを用いることで、Dataパケットをロスした際に再送が行われ、伝送を保証することができる。また、大きなSDUをプロトコルの機能により自動で分割し送ることができる。

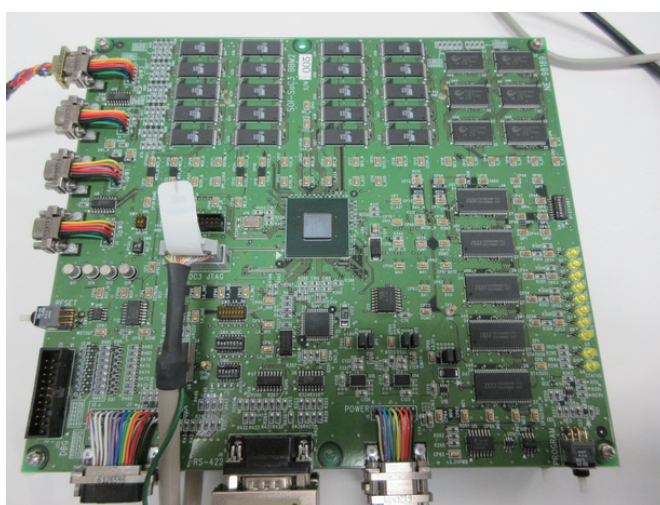


図 1 SOI-SOC3 BBM 評価ボード

### 3. SOI-SOC3 同士による SpaceWire-R 通信試験（予備試験）

SpaceRとの疎通試験を行う前の2019年の3月15日までの2週間程度をかけ、SOI-SOC3同士を接続したSpW-R通信試験を行った。本章では本試験の試験結果について述べる。本試験はSpaceRとの疎通試験に対し、予備試験と呼ぶ。本試験の目的は、ハードウェア実装されたSpW-Rの通信性能を計測し、後の疎通試験の結果に対するリファレンスとすることにある。

#### 3.1. 試験セットアップ

図 2, 図 3に予備試験セットアップの図を示す。予備試験では2つのSOI-SOC3 (BBM版, FPGA (Field Program Gate Array) 上に実装) を用いており、それぞれを1本のSpWケーブルで接続している。一方をInitiator, 一方をTargetとし、SpW-Rの性能測定を行った。

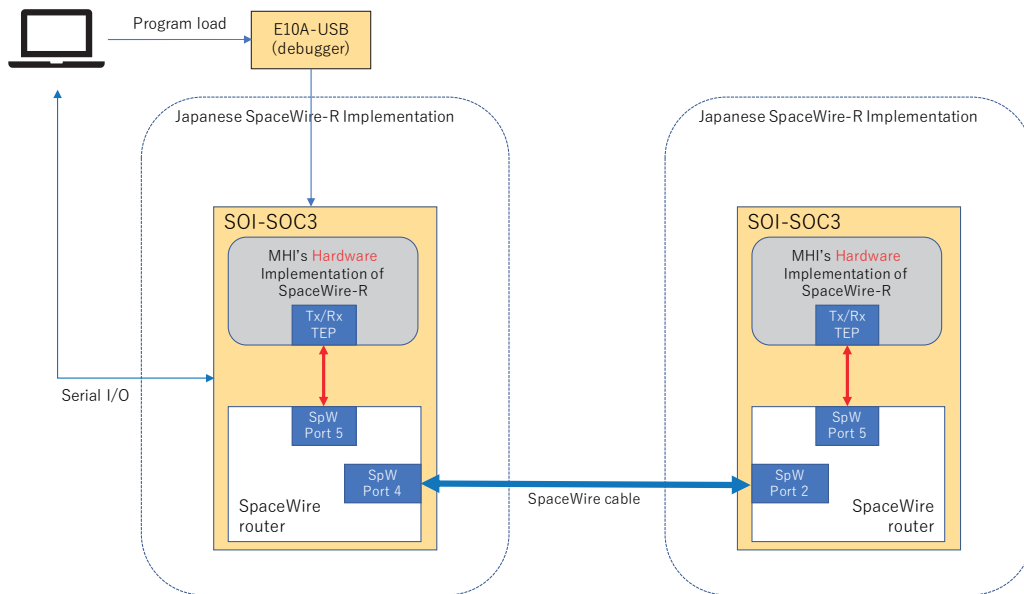


図 2 予備試験セットアップ

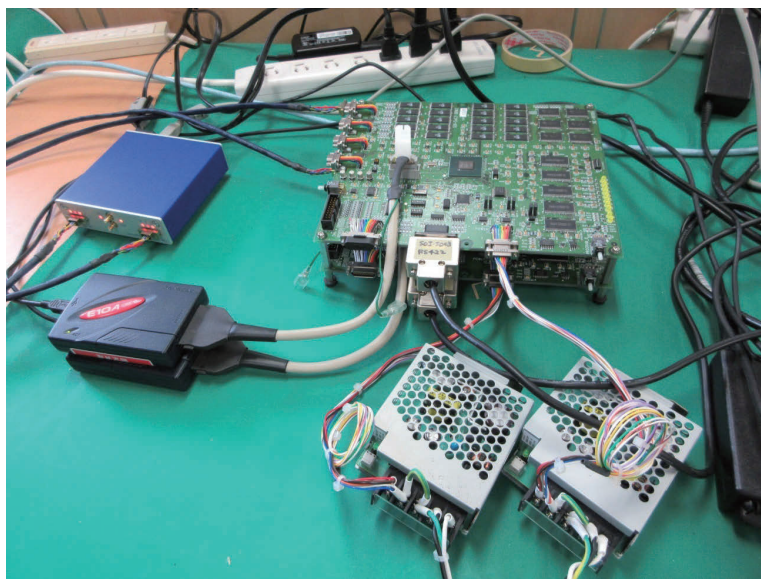


図 3 予備試験セットアップ写真

### 3.2. 試験条件

試験条件を以下の表 1～表 4に示す。試験は各目的に基づいて4つに分けて行った。なお、すべての試験において1秒あたり64個のタイムコード（TC）のうち、TC00-61をSpW-Rに割り当てている。なお、SpaceWireのリンクスピードは120MHzとした。

#### 【予備試験1】 non-segmentation throughput test

予備試験 1 ではSDUはセグメンテーションせず、1SDUにつき1PDUを用いてTargetに送信する。この試験ではSDUサイズごとにスループットを測定し、純粋なパケット送信速度の限界値を測定する。

表 1 予備試験 1 試験条件

(a) 定数パラメータ

Constant channel parameters	value
Transmitted SDU count	64
Transmit Timer Initial Value	1000
Sliding Window Size	16
Maximum Length of SDU	32768
Maximum Length of Application Data Field	32768

(b) 試験パラメータ

Tested channel parameters	Parameter name
SDU size	sduSize

(c) Transport Ch.および試験条件

Test no.	Transport Ch.	sduSize
1	1	32
2	1	128
3	1	512
4	1	2048
5	1	8192
6	1	32768

### 【予備試験2】 non-segmentation throughput test with Heartbeat

予備試験2ではSDUをセグメンテーションせず、Heartbeatを使用する。Heartbeatはチャンネル間で通信がないときにHeartbeatパケットを送り合って経路に異常がないことを常に確認する仕組みだが、本試験ではチャンネルオープン後から最初のDataパケットを送るまで3秒空けており、その際にHeartbeatパケットが送られることになる。また最後のDataパケットを送ってからチャンネルクローズまでにもHeartbeatパケットが送られる。この試験では、正しくHeartbeatが送受信でき、かつそれがSDUの送信性能に大きく影響を与えないことを確認する。

表 2 予備試験 2 試験条件

(a) 定数パラメータ

Constant channel parameters	value
Transmitted SDU count	64
Transmit Timer Initial Value	1000
Sliding Window Size	16
Maximum Length of SDU	32768
Maximum Length of Application Data Field	32768

(b) 試験パラメータ

Tested channel parameters	Parameter name
SDU size	sduSize
Transmit Heartbeat	hbTxUsd
Receive Heartbeat	hbRxUsd

(c) Transport Ch.および試験条件

Test no.	Transport Ch.	hbTxUsd	hbRxUsd	sduSize
1	1	0	0	32
2	1	0	0	1024
3	1	0	0	4096
4	2	1	0	32
5	2	1	0	1024
6	2	1	0	4096
7	3	0	1	32
8	3	0	1	1024
9	3	0	1	4096
10	4	1	1	32
11	4	1	1	1024
12	4	1	1	4096



### 【予備試験3】 segmentation throughput test

予備試験3では、SDUをセグメンテーションし送信する。セグメンテーションは大容量のDataパケットを送信する際に他のパケットの送受信を阻害しないために重要な機能だが、一般的にセグメンテーションサイズを小さくしていくとヘッダや通信オーバーヘッドによりスループットは低下する。一方でSpW-Rにはセグメンテーションによるスループット低下を抑えるSliding Windowの仕組みを備えている。本試験ではセグメンテーションの機能を確認すると共に、Sliding Windowの機能確認と、スループットの変化を検証する。

表 3 予備試験 3 試験条件

(a) 定数パラメータ

Constant channel parameters	value
Transmit Timer Initial Value	1000
Sliding Window Size	16
Maximum Length of SDU	32768
Transmitted SDU count	64

(b) 試験パラメータ

Tested channel parameters	Parameter name
SDU size	sduSize
Maximum Length of Application Data Field	appFieldMaxLength

(c) Transport Ch.および試験条件

Test no.	Transport Ch.	sduSize	appFieldMaxLength
1	5	32768	32
2	6	32768	128
3	7	32768	512
4	8	32768	2048
5	9	32768	8192
6	10	32768	32768

#### 【予備試験4】 Sliding Window throughput test

予備試験4では、Sliding Windowサイズを変化させながら、スループットを測定する。通信経路が長いなど、Ack (Acknowledge) が返るまでの時間が長くなる場合はSliding Windowサイズを大きくすると効果があるが、今回の試験のように通信経路間が短い場合はSliding Windowを使い切る前にAckが返ることが予想され、そのような場合は特にスループットの変化はないと考えられる。

表 4 予備試験 4 試験条件

(a) 定数パラメータ

Constant channel parameters	value
Transmit Timer Initial Value	1000
Maximum Length of SDU	32768
Maximum Length of Application Data Field	32768
Transmitted SDU count	64

(b) 試験パラメータ

Tested channel parameters	Parameter name
SDU size	sduSize
Sliding Window Size	slidingWindowSz

(c) Transport Ch.および試験条件

Test no.	Transport Ch.	slidingWindowSz	sduSize
1	11	4	32
2	11	4	128
3	11	4	512
4	11	4	2048
5	11	4	8192
6	12	8	32
7	12	8	128
8	12	8	512
9	12	8	2048
10	12	8	8192
11	13	16	32
12	13	16	128
13	13	16	512
14	13	16	2048
15	13	16	8192

### 3.3. 試験結果

#### 【予備試験1】

予備試験1の結果を表 5, 図 4に示す. SpaceWireは仕様上Data Characterの先頭にParity bitとData-control flagが付くため理論上の最大スループットはリンクレートの80%になる. 今回の場合リンクレートは120MHzのため理論上最大スループットは96Mbpsになる. 実際にはヘッダによるオーバーヘッド等が存在するためこの性能を出すことは不可能である. しかしながらPDU長が長くなればヘッダオーバーヘッドの影響も少なくなり32kBのSDUではほぼ理論値のスループットが出ることが確認された.

図 5にNo.6のテストケースのリンクアナライザのログを示す. End AはInitiator側, End BはTarget側からの通信を示す. 8.85 s以降がデータ通信を示すが, 特に最初のうちはSliding WindowによりDataパケットの先出しをしておき, スループットを最大限まで引き出せていることが確認できる. なお, 本試験ではSOI-SOC3同士を直接接続しているためノード間の通信遅延が非常に小さいが, 遅延が大きくなると, Sliding Windowの効果はより高くなると考えられる.

表 5 予備試験1 スループット

test no.	SDU size [oct]	Throughput [Mbps]
1	32	6.25
2	128	22.30
3	512	59.18
4	2048	82.39
5	8192	92.32
6	32768	95.00

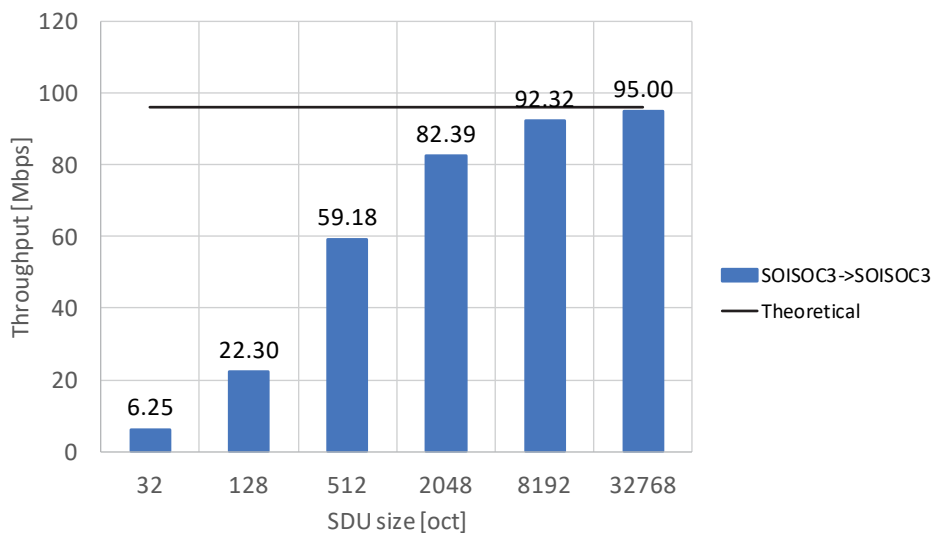


図 4 予備試験1 スループット

Time From Trigger	Time Delta	End A	End A Delta	End B	End B Delta
2.85989414 s		Header: 05			
2.85989542 s	1.280 µs	Cargo Size: 14 bytes	1.280 µs		
2.85989774 s	2.320 µs	EDP	2.320 µs		
3.85989794 s	1.0000002 s	Header: 05	1.0000002 s		
3.85989902 s	1.080 µs	Cargo Size: 14 bytes	1.080 µs	Header: 05	
3.8599002 s	1.180 µs			Cargo Size: 14 bytes	1.180 µs
3.85990121 s	1.010 µs	EDP	2.190 µs		
3.85990222 s	1.010 µs			EDP	2.020 µs
4.85990268 s	1.00000046 s			Header: 05	1.00000046 s
4.85990383 s	1.150 µs			Cargo Size: 14 bytes	1.150 µs
4.85990595 s	2.120 µs			EDP	2.120 µs
8.85992174 s	4.00001579 s	Header: 05	5.00002053 s		
8.85992302 s	1.280 µs	Cargo Size: 64 bytes	1.280 µs		
8.86265662 s	2.7336 ms	EDP	2.7336 ms		
8.8626627 s	6.080 µs	Header: 05	6.080 µs		
8.86266287 s	170 ns	Cargo Size: 64 bytes	1.150 µs	Header: 05	4.00275692 s
8.86266382 s	950 ns			Cargo Size: 12 bytes	950 ns
8.86266527 s	1.450 µs			EDP	1.450 µs
8.86539748 s	2.73221 ms	EDP	2.73363 ms		
8.86540323 s	5.750 µs	Header: 05	5.750 µs		
8.86540361 s	380 ns	Cargo Size: 64 bytes	1.150 µs	Header: 05	2.73834 ms
8.8654047 s	1.090 µs			Cargo Size: 12 bytes	1.090 µs
8.86540608 s	1.380 µs			EDP	1.380 µs
8.8681381 s	2.73202 ms	EDP	2.73372 ms		
8.86814432 s	6.220 µs	Header: 05	6.220 µs		
8.86814536 s	1.040 µs	Cargo Size: 64 bytes	1.150 µs	Header: 05	2.73928 ms
8.86814701 s	1.650 µs			Cargo Size: 12 bytes	1.650 µs
8.86814933 s	2.320 µs			EDP	2.320 µs
8.8708792 s	2.72987 ms	EDP	2.73373 ms		
8.87088537 s	6.170 µs			Header: 05	2.73604 ms
8.87088639 s	1.020 µs			Cargo Size: 12 bytes	1.020 µs
8.87088807 s	1.680 µs			EDP	1.680 µs
8.87088802 s	550 ns	Header: 05	9.420 µs		
8.87088976 s	1.140 µs	Cargo Size: 64 bytes	1.140 µs		
8.87362436 s	2.7346 ms	EDP	2.7346 ms		
8.87363085 s	6.490 µs			Header: 05	2.74278 ms
8.87363187 s	1.020 µs			Cargo Size: 12 bytes	1.020 µs
8.87363328 s	1.410 µs			EDP	1.410 µs
8.87363421 s	930 ns	Header: 05	9.850 µs		
8.87363523 s	1.020 µs	Cargo Size: 64 bytes	1.020 µs		
8.87637054 s	2.73531 ms	EDP	2.73531 ms		
8.87637671 s	6.170 µs			Header: 05	2.74343 ms
8.87637773 s	1.020 µs			Cargo Size: 12 bytes	1.020 µs
8.87637921 s	1.480 µs			EDP	1.480 µs
8.87637976 s	550 ns	Header: 05	9.220 µs		
8.8763809 s	1.140 µs	Cargo Size: 64 bytes	1.140 µs		
8.8791155 s	2.7346 ms	EDP	2.7346 ms		
8.87912199 s	6.490 µs			Header: 05	2.74278 ms
8.87912301 s	1.020 µs			Cargo Size: 12 bytes	1.020 µs

図 5 予備試験 1 No.6 パケットログ

## 【予備試験2】

予備試験2の結果を表 6、図 6に示す。Heartbeatを使うために若干のスループット低下が認められる。また、図 7にNo.12のテストケースのHeartbeat通信の様子を示す。Heartbeatパケットを相互に送り合っている様子が確認できる。

表 6 予備試験 2 スループット

test no.	SDU size [oct]	hbTxUsd	hbRxUsd	Throughput [Mbps]
1	32	0	0	6.23
2	1024	0	0	73.37
3	4096	0	0	88.96
4	32	1	0	5.65
5	1024	1	0	69.03
6	4096	1	0	88.00
7	32	0	1	5.03
8	1024	0	1	67.61
9	4096	0	1	86.83
10	32	1	1	4.59
11	1024	1	1	64.47
12	4096	1	1	85.55

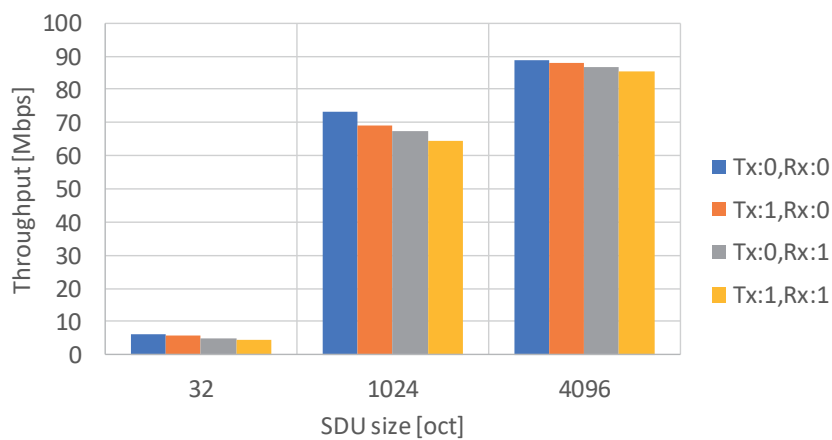


図 6 予備試験 2 スループット  
(Tx: Initiator, Rx: Target, 数字は Heartbeat の有無を表す)

Time From Trigger	Time Delta	End A	End A Delta	End B	End B Delta
2.53176793 s		Header: 05			
2.53176911 s	1,280 µs	Cargo Size: 14 bytes	1,200 µs		
2.53177116 s	2,050 µs	EOP	2,050 µs		
3.53177177 s	1,00000061 s	Header: 05	1,00000061 s		
3.53177272 s	950 ns	Cargo Size: 14 bytes	1,150 µs	Header: 05	
3.53177394 s	1,220 µs			Cargo Size: 14 bytes	1,220 µs
3.53177497 s	1,030 µs	EOP	2,050 µs		
3.53177599 s	1,020 µs			EOP	2,050 µs
4.5317766 s	1,00000061 s			Header: 05	1,00000061 s
4.53177769 s	1,080 µs			Cargo Size: 14 bytes	1,080 µs
4.53177798 s	2,120 µs			EOP	2,120 µs
5.53178031 s	1,00000051 s	Header: 05	2,00000534 s		
5.53178152 s	1,210 µs	00 05 50 00 00 00 04 00	1,210 µs		
5.53178266 s	1,140 µs	02 02 05 80 90 30	1,140 µs		
5.53178351 s	850 ns	EOP	850 ns		
5.53179241 s	8,900 µs			Header: 05	1,00001261 s
5.53179342 s	1,010 µs			80 05 50 00 00 00 04 00	1,010 µs
5.53179456 s	1,140 µs			00 C0 F0 7C	1,140 µs
5.53179484 s	280 ns			EOP	280 ns
7.53178921 s	1,99999337 s	Header: 05	2,0000047 s		
7.53178931 s	1,100 µs	00 05 50 00 00 00 04 00	1,220 µs	Header: 05	1,99999447 s
7.53179046 s	1,150 µs	02 02 05 80 90 30	1,130 µs	80 05 50 00 00 00 04 00	1,150 µs
7.53179145 s	990 ns	EOP	890 ns	02 04 05 C0 B7 14	1,160 µs
7.53179251 s	1,060 µs			EOP	890 ns
7.53180616 s	13,650 µs	Header: 05	14,710 µs		
7.53180699 s	830 ns	00 05 50 00 00 00 04 00	1,140 µs	Header: 05	14,480 µs
7.53180831 s	1,320 µs	00 80 C6 A2	1,130 µs	80 05 50 00 00 00 04 00	1,380 µs
7.5318089 s	290 ns	EOP	290 ns	00 C0 F0 7C	1,070 µs
7.53180972 s	1,120 µs			EOP	280 ns
8.53179614 s	999 98642 ms	Header: 05	999 98754 ms		
8.53179729 s	1,150 µs	Cargo Size: 64 bytes	1,150 µs		
8.53214154 s	344,250 µs	EOP	344,250 µs		
8.5321488 s	7,260 µs			Header: 05	1,00033908 s

Format:  Data  ASCII  Integer  Protocol  
 Hex

Data View:  Data  ASCII  Integer  Protocol

Bit Width:  8 Bit (Byte)  32 Bit (DWord)  LSB First  
 16 Bit (Word)  64 Bit (QWord)

Byte Settings: Bytes Per Row: 8

Character Display Packet Display Bit-Stream Display

No device attached (Trigger Time: 21/02/2019 20:34:46) End A: 0.000 Hz End B: 0.000 Hz

図 7 Heartbeatの様子 (no.12 ログ先頭)

## 【予備試験3】

予備試験3の結果を表 7, 図 8に示す. セグメンテーションサイズに対するスループットの関係は, 予備試験1のSDUサイズに対するスループットの関係とおよそ一致している. 予備試験3では全て  $32764 \times 64 = 2096 \text{ kB}$ を送信しているため, セグメンテーションサイズが小さくなるほどパケット数が増える. 例えばセグメンテーションサイズが32Byteの結果と予備試験1のSDUサイズが32 Byteの結果を比較して前者の方が性能が高い理由は, パケット数が増えたことにより全体のオーバーヘッドの影響が少なくなったためと考えられる.

表 7 予備試験 3 スループット

test no.	Segment Size [oct]	Throughput [Mbps]
1	32	8.81
2	128	25.21
3	512	67.16
4	2048	85.88
5	8192	89.92
6	32768	94.56

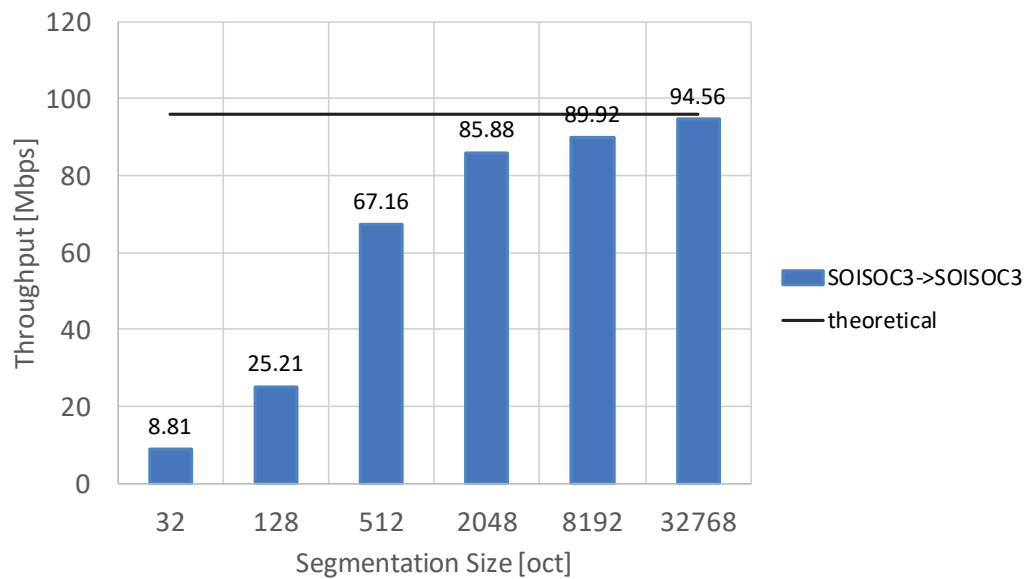


図 8 予備試験 3 スループット

## 【予備試験4】

予備試験4の結果を表 8、図 9に示す。Sliding Windowサイズが大きくなるとスループットがそれに応じて若干小さくなっている。SOI-SOC3同士を直接つないだ本試験では、ノード間の通信遅延はほとんどないためSliding Windowを使い切らずに送信が可能である。そのためSliding Windowサイズを大きくしてもこの結果のようにスループットは向上しない。実際の衛星コンポーネント間トポロジのようにノード間のパスが長くなる場合は、Sliding Windowサイズを大きくした方がスループットは有利になると考えられる。

表 8 予備試験 4 スループット

test no.	SDU size [oct]	Sliding Window Size	Throughput [Mbps]
1	32	4	6.64
2	128	4	22.56
3	512	4	59.83
4	2048	4	82.58
5	8192	4	92.47
6	32	8	5.65
7	128	8	20.94
8	512	8	54.43
9	2048	8	81.32
10	8192	8	91.66
11	32	16	5.02
12	128	16	18.82
13	512	16	50.79
14	2048	16	79.33
15	8192	16	91.17

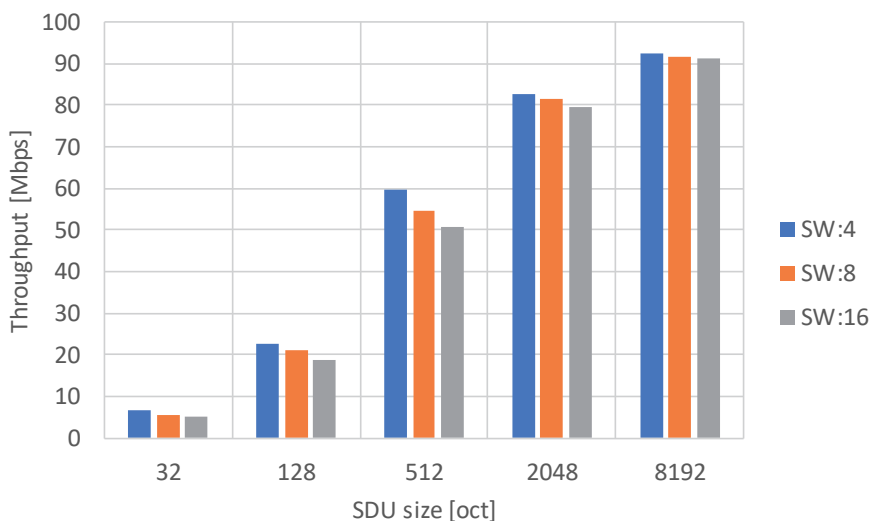


図 9 予備試験 4 スループット



#### 4. SpaceWire-R 疎通試験

前項に示した予備試験の後、ポーランドにあるITTI社が実装したSpW-Rのソフトウェアによる実装 (SpaceR) との疎通試験を2019年3月18日から19日にかけてITTI社オフィスにて実施した。本章ではその結果を示す。

##### 4.1. 試験セットアップ

図 10に疎通試験時のセットアップを示す。また、図 11に疎通試験の際の写真を示す。SOI-SOC3の相手方として、SpaceRを接続しており、SpaceR側のPCとSpWのI/FはStar-Dundee社のUSB-Brick mk2となっている。ただし、SpaceRはUSB-Brick以外のStar-Dundee製品にも対応しており、図 11の写真はSpaceWire Routerで接続している。試験中によくUSB-Brickがリンク断になる現象が起きたため、SpW Routerに置き換えて試験を行う場合もあったが、記録は全てUSB-Brickを使ったものである。なお、試験のセットアップの段階で、SOI-SOC3の実装においてSegmentationに関する情報に関して、仕様書のビットオーダに関する記述が分かりにくいことに起因する実装誤りが見つかった。これに関しては、直ちに処置が可能であったSpaceRにおいて、仕様を、SOI-SOC3の実装に合わせることでインタフェースを整合させ試験を実施した。

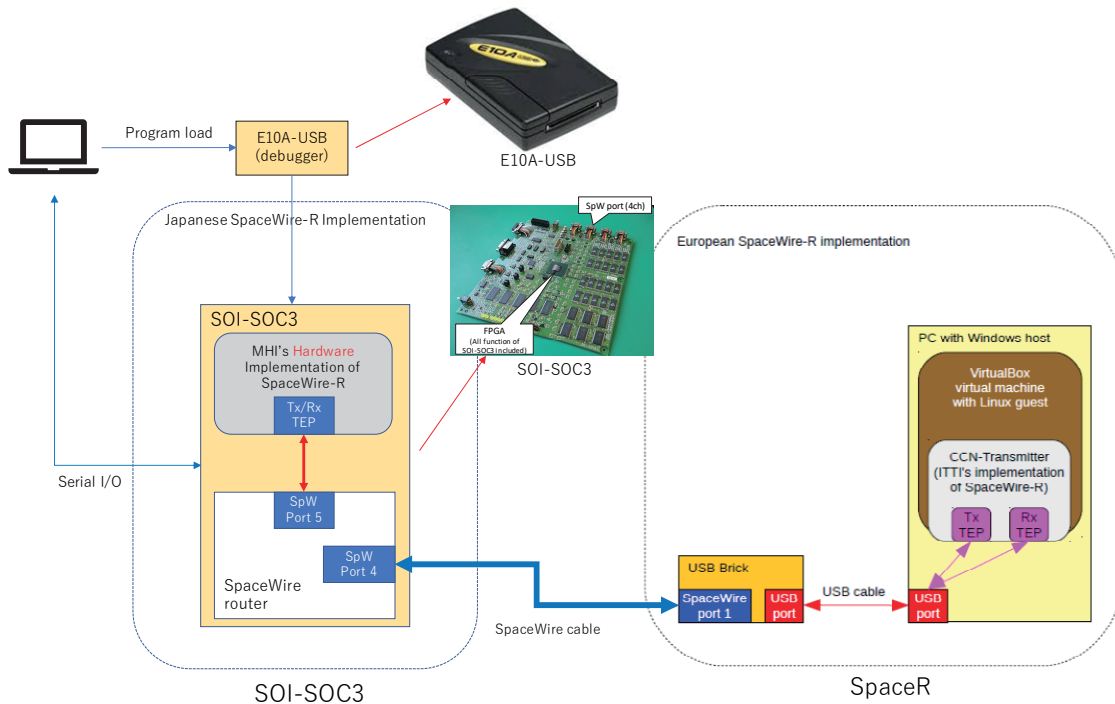


図 10 疎通試験セットアップ

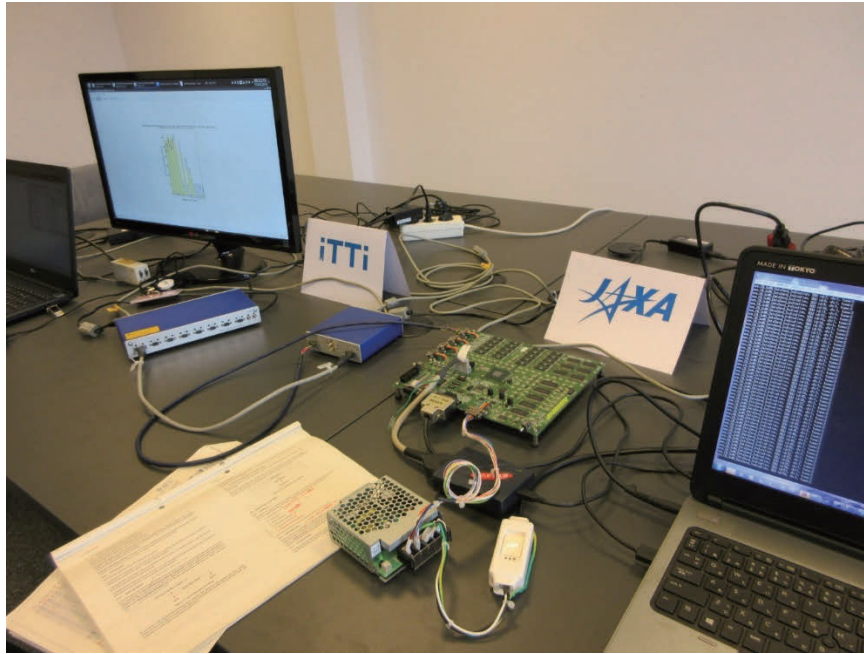


図 11 疎通試験セットアップ写真

#### 4.2. 試験条件

表 9に疎通試験における各試験共通のパラメータを示す。Time-Code masterはSOI-SOC3だが、SpaceR側は特にTime-Codeを使用していない。USB-BrickはSpWリンク上はパススルーになるため、SpWパスアドレスはSOI-SOC3内のSpWルータのアドレスとなる。また、リンクスピードはSOI-SOC3の仕様によりInitiator, Targetともに120MHzとした。

表 9 共通パラメータ

Parameter name	value
Time-Code master	SOI-SOC3
Path address (JAXA→ITTI)	0x04
Path address (ITTI→JAXA)	0x05
Logical address (JAXA)	0x80
Logical address (ITTI)	0x81
Link Speed	120 MHz
Transmitted SDU num	64

なお、各試験の固有パラメータは3章と同様である。

#### 4.3. 試験結果

##### 【疎通試験1】

疎通試験1の結果を表 10, 図 12に示す。図 12には、参考のため図 4のSOI-SOC3同士のスループットも記載している。疎通試験で16kB SDUの送受信試験（表 10中ではtest no.5'としている）を行ったのは、疎通試験で32kB SDUを送受信した際にスループットが下がる現象が確認されたため、どこに限界があるのかを詳細に確認するために現地で急遽追加した試験ケースである。結果を見る限り、ハードウェア同士であればSDUがおよそ4~8kB程度になればほぼ理論値のスループットが出て、ソフトウェアハードウェアであればそれに追従してスループットが上昇することがわかる。

SpaceRからSOI-SOC3に送信する場合に16kB SDU以降スループットが下がっている理由として、SpaceR側のSpW I/FであるUSB Brickの内部バッファサイズの限界が考えられる。SpaceRからSpaceRに送信する場合には大きなサイズのSDUでも高いスループットが出ているが、これはリンクスピード100MHzで試験した際の結果を1.2倍にスケールしたものであり、120MHzのリンクスピードで同じ結果が出るかは未確認である。

表 10 疎通試験 1 スループット

test no.	SDU size [oct]	Throughput [Mbps]		
		SpaceR→SOI-SOC3	SOI-SOC3→SpaceR	SpaceR→SpaceR※1
1	32	0.64	0.55	0.59
2	128	0.99	2.36	1.68
3	512	3.52	15.52	6.97
4	2048	30.17	26.74	19.41
5	8192	80.28	43.07	80.46
5'	16384	60.43	- (※2)	94.67
6	32768	54.57	60.38	94.99

※1 ITTI 社で以前行われた SpaceR 同士の結果を参考のため掲載している。ただしその際はリンクスピードが 100MHz だったため、単に結果を 1.2 倍にスケールしている。

※2 16kB SDU の試験はスループットの変化の確認のため、SpaceR→SOI-SOC3 でのみ行った。

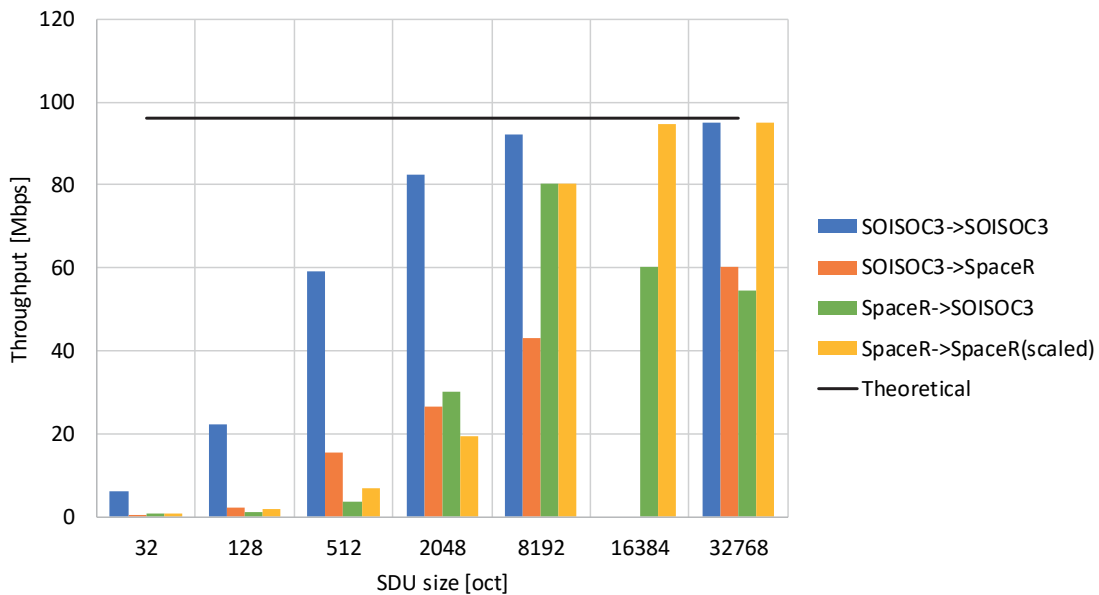


図 12 疎通試験 1 スループット

### 【疎通試験2】

本試験は性能試験ではなく機能試験のため、Virtual Machine (VM) 上に構築したSpaceR環境を用いて試験をしている。そのためスループットは下がることに注意が必要である。疎通試験2の結果を表11、図13に示す。図13には参考のため予備試験の結果も示す。また、表中のTransmitted SDU numは、SOI-SOC3のミドルウェア制約により当該実験条件において64SDU全てが送れなかったため、送信が停止されたDataパケットのAckのEOP (End of Packet) までをスループット計測対象とした。

図14、図15、図16にログを示す。各ログはSOI-SOC3がInitiatorの場合の結果である。SOI-SOC3、SpaceRからHeartbeat (HB) を正しく送信できている。図16は双方でHBを使う設定の際の試験ログである。InitiatorからTransmit HBは送信されていないが、毎秒Receive HBに対するAckを送信しているためTransmit HBを送信する必要はなく、動作としては正しい。

SOI-SOC3からSpaceRに送る場合は、SpaceRがAckを送信するまでに若干時間がかかり、Sliding Windowを使い切ってしまう。この場合、現状ではSOI-SOC3に搭載されたミドルウェア制約のため途中で送信が停止してしまう。そのため全体としてはスループットは下がってしまう。一方でSpaceRからSOI-SOC3に送る場合は、64SDU全てを送り切ることができている。しかしながらSpaceRは疎通試験2ではVM上に実装されているためソフトウェア処理のパフォーマンスは最大まで発揮できておらず、結果的に最大でも25Mbps程度にとどまっている。SpaceRを十分なパフォーマンスを持ったPCに実装すればこのパフォーマンスは大幅に改善すると考えられる。

表 11 疎通試験 2 スループット

test no.	SDU size [oct]	hbTxUsd	hbRxUsd	Transmitted SDU num		Throughput [Mbps]	
				SOI-SOC3 →SpaceR	SpaceR → SOI-SOC3	SOI-SOC3 →SpaceR	SpaceR → SOI-SOC3
1	32	0	0	19	64	0.40	0.58
2	1024	0	0	64	64	12.97	13.01
3	4096	0	0	51	64	20.27	25.19
4	32	1	0	19	64	0.40	0.70
5	1024	1	0	23	64	10.09	13.06
6	4096	1	0	19	64	12.79	25.79
7	32	0	1	27	64	0.77	0.63
8	1024	0	1	59	64	11.14	15.35
9	4096	0	1	19	64	16.41	24.75
10	32	1	1	19	64	0.49	0.47
11	1024	1	1	64	64	9.60	12.33
12	4096	1	1	19	64	16.81	23.78

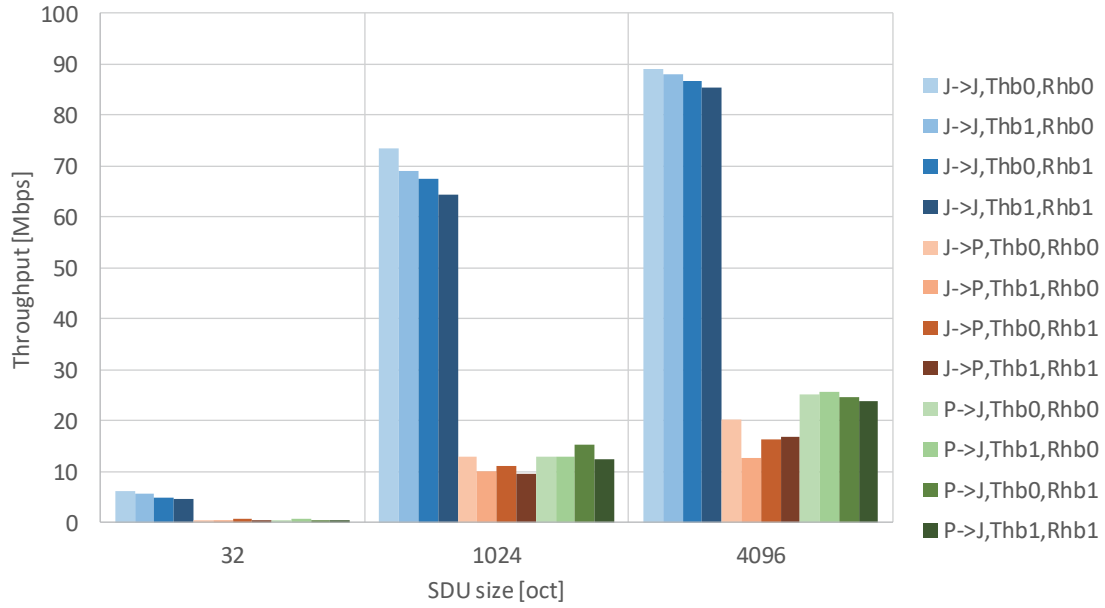


図 13 疎通試験 2 スループット (J:SOI-SOC3, P:SpaceR, Thb : 送信 HB, Rhb : 受信 HB, 数字は HB の有無を表す)

Time From Trigger	Time Delta	End A	End A Delta	End B	End B Delta
4.09427832 s		Header: 01			
4.0942784 s	80 ns	Cargo Size: 12 bytes	80 ns		
4.09428028 s	1.880 μs	EDP	1.880 μs		
4.09976703 s	5.48675 ms			Header: 05	
4.09976711 s	80 ns			Cargo Size: 13 bytes	80 ns
4.09976815 s	1.040 μs			EDP	1.040 μs
6.09428844 s	1.99452029 s	Header: 01	2.00000816 s		
6.09428853 s	90 ns	05 5C 00 00 00 02 00 01	90 ns		
6.09428959 s	1.060 μs	05 30 E3 85	1.060 μs		
6.09429061 s	1.020 μs	EDP	1.020 μs		
6.09688665 s	2.59604 ms			Header: 05	1.9971185 s
6.09688673 s	80 ns			80 05 5D 00 00 00 02 00	80 ns
6.0968874 s	670 ns			01 04 81 F3 1F	670 ns
6.09688776 s	360 ns			EDP	360 ns
8.09429777 s	1.99741001 s	Header: 01	2.00000716 s		
8.09429785 s	90 ns	05 5C 00 00 00 02 00 01	90 ns		
8.09429912 s	1.260 μs	05 30 E3 85	1.260 μs		
8.09429994 s	820 ns	EDP	820 ns		
8.09608994 s	1.790 ms			Header: 05	1.99920218 s
8.09609002 s	80 ns			80 05 5D 00 00 00 02 00	80 ns
8.09609069 s	670 ns			01 04 81 F3 1F	670 ns
8.09609106 s	370 ns			EDP	370 ns
9.09430576 s	998.2147 ms	Header: 01	1.00000582 s		
9.09430584 s	80 ns	Cargo Size: 44 bytes	80 ns		
9.09431139 s	5.550 μs	EDP	5.550 μs		

図 14 疎通試験 2 No.4 ログ (赤矢印が HB および Ack)

Time From Trigger	Time Delta	End A	End A Delta	End B	End B Delta
3.70365238 s		Header: 01			
3.70365246 s	80 ns	Cargo Size: 12 bytes	80 ns		
3.70365428 s	1.820 μs	EOP	1.820 μs		
3.70536941 s	1.71513 ms			Header: 05	
3.70536949 s	80 ns			Cargo Size: 13 bytes	80 ns
3.70537053 s	1.040 μs			EOP	1.040 μs
4.71041016 s	1.00503963 s			Header: 05	1.00503963 s
4.71041025 s	90 ns			00 05 5C 00 00 00 03 00	90 ns
4.71041091 s	660 ns			01 04 81 B2 6D	660 ns
4.71041128 s	370 ns			EOP	370 ns
4.71042131 s	10.030 μs	Header: 01	1.00676703 s		
4.71042139 s	80 ns	05 5D 00 00 00 03 00 00	80 ns		
4.71042259 s	1.200 μs	80 8A D0	1.200 μs		
4.71042279 s	200 ns	EOP	200 ns		
5.71216018 s	1.00173739 s			Header: 05	1.0017489 s
5.71216026 s	80 ns			00 05 5C 00 00 00 03 00	80 ns
5.71216093 s	670 ns			01 04 81 B2 6D	670 ns
5.71216129 s	360 ns			EOP	360 ns
5.71217109 s	9.770 μs	Header: 01	1.00174827 s		
5.71217114 s	80 ns	05 5D 00 00 00 03 00 00	80 ns		
5.71217261 s	1.470 μs	80 8A D0	1.470 μs		
5.71217281 s	200 ns	EOP	200 ns		
6.71313447 s	1.00096166 s			Header: 05	1.00097318 s
6.71313455 s	80 ns			00 05 5C 00 00 00 03 00	80 ns
6.71313522 s	670 ns			01 04 81 B2 6D	670 ns
6.71313559 s	370 ns			EOP	370 ns
6.71314558 s	9.990 μs	Header: 01	1.00097277 s		
6.71314566 s	80 ns	05 5D 00 00 00 03 00 00	80 ns		
6.71314679 s	1.130 μs	80 8A D0	1.130 μs		
6.71314699 s	200 ns	EOP	200 ns		
7.71726267 s	1.00411568 s			Header: 05	1.00412708 s
7.71726275 s	80 ns			00 05 5C 00 00 00 03 00	80 ns
7.71726342 s	670 ns			01 04 81 B2 6D	670 ns
7.71726379 s	370 ns			EOP	370 ns
7.71728227 s	18.480 μs	Header: 01	1.00413528 s		
7.71728235 s	80 ns	05 5D 00 00 00 03 00 00	80 ns		
7.71728349 s	1.140 μs	80 8A D0	1.140 μs		
7.71728369 s	200 ns	EOP	200 ns		
8.70367975 s	986.39606 ms	Header: 01	986.39606 ms		
8.70367983 s	80 ns	Cargo Size: 33 bytes	80 ns		
8.70368538 s	5.550 μs	EOP	5.550 μs		

図 15 疎通試験 2 No.7 ログ (赤矢印が HB および Ack)

Time From Trigger	Time Delta	End A	End A Delta	End B	End B Delta
5.26616024 s		Header: 01			
5.26616032 s	80 ns	Cargo Size: 12 bytes	80 ns		
5.26616214 s	1.820 μs	EOP	1.820 μs		
5.26835943 s	2.19729 ms			Header: 05	
5.26835951 s	80 ns			Cargo Size: 13 bytes	80 ns
5.26836095 s	1.040 μs			EOP	1.040 μs
6.27240732 s	1.00404677 s			Header: 05	1.00404677 s
6.2724074 s	80 ns			00 05 5C 00 00 00 04 00	80 ns
6.27240807 s	670 ns			01 04 81 05 B3	670 ns
6.27240843 s	360 ns			EOP	360 ns
6.27241852 s	10.090 μs	Header: 01	1.00625638 s		
6.27241861 s	90 ns	05 5D 00 00 00 04 00 00	90 ns		
6.27241974 s	1.130 μs	80 D8 FD	1.130 μs		
6.27241994 s	200 ns	EOP	200 ns		
7.27387264 s	1.0014527 s			Header: 05	1.00146421 s
7.27387273 s	90 ns			Cargo Size: 13 bytes	90 ns
7.27387376 s	1.030 μs			EOP	1.030 μs
7.2738839 s	10.140 μs	Header: 01	1.00146396 s		
7.27388398 s	80 ns	05 5D 00 00 00 04 00 00	80 ns		
7.27388518 s	1.200 μs	80 D8 FD	1.200 μs		
7.27388538 s	200 ns	EOP	200 ns		
8.27663957 s	1.00275419 s			Header: 05	1.00276581 s
8.27663965 s	80 ns			00 05 5C 00 00 00 04 00	80 ns
8.27664032 s	670 ns			01 04 81 D5 E3	670 ns
8.27664068 s	360 ns			EOP	360 ns
8.27665111 s	10.430 μs	Header: 01	1.00276573 s		
8.27665119 s	80 ns	05 5D 00 00 00 04 00 00	80 ns		
8.27665233 s	1.140 μs	80 D8 FD	1.140 μs		
8.27665253 s	200 ns	EOP	200 ns		
9.27890808 s	1.00225555 s			Header: 05	1.0022674 s
9.27890816 s	80 ns			Cargo Size: 13 bytes	80 ns
9.27890919 s	1.030 μs			EOP	1.030 μs
9.27891942 s	10.230 μs	Header: 01	1.00226689 s		
9.27891951 s	90 ns	Cargo Size: 11 bytes	90 ns		
9.27892091 s	1.400 μs	EOP	1.400 μs		
10.26618813 s	987.26722 ms	Header: 01	987.26722 ms		
10.26618821 s	80 ns	Cargo Size: 32 bytes	80 ns		
10.26619369 s	5.480 μs	EOP	5.480 μs		
10.26621524 s	21.550 μs	Header: 01	21.550 μs		

図 16 疎通試験 2 No.10 ログ (赤矢印が HB および Ack)

## 【疎通試験 3】

疎通試験3の結果を表 12, 図 17に示す。まず, SOI-SOC3からSpaceRへパケット送信をした場合の結果について見てみると, 逆の場合と比べスループットが非常に低いことがわかる。これはSOI-SOC3のミドルウェア制約によりSliding Windowを使い切ってしまうとパケット送信を停止してしまうため, パケット送信間隔を試験時にわざと入れているためである(試験時のパケット送信間隔は2ms強)。逆方向の通信を見てみると, セグメントサイズが2kB以上にすればほぼハードウェア同士の性能に近づいていることがわかる。ソフトウェア実行環境が十分に良く, USB Brickのバッファサイズをオーバーフローしない範囲内で通信できればかなり理想に近いスループットが出せることがわかる。一方で32kBの時は疎通試験1と同様にスループットが低下している。これはUSB Brickのバッファサイズに関連していると考えられる。

表 12 疎通試験 3 スループット

test no.	Segment Size [oct]	Throughput [Mbps]	
		SOI-SOC3→SpaceR	SpaceR→SOI-SOC3
1	32	1.67	1.82
2	128	4.41	7.08
3	512	7.19	28.10
4	2048	14.54	81.23
5	8192	25.33	94.28
6	32768	46.88	51.47

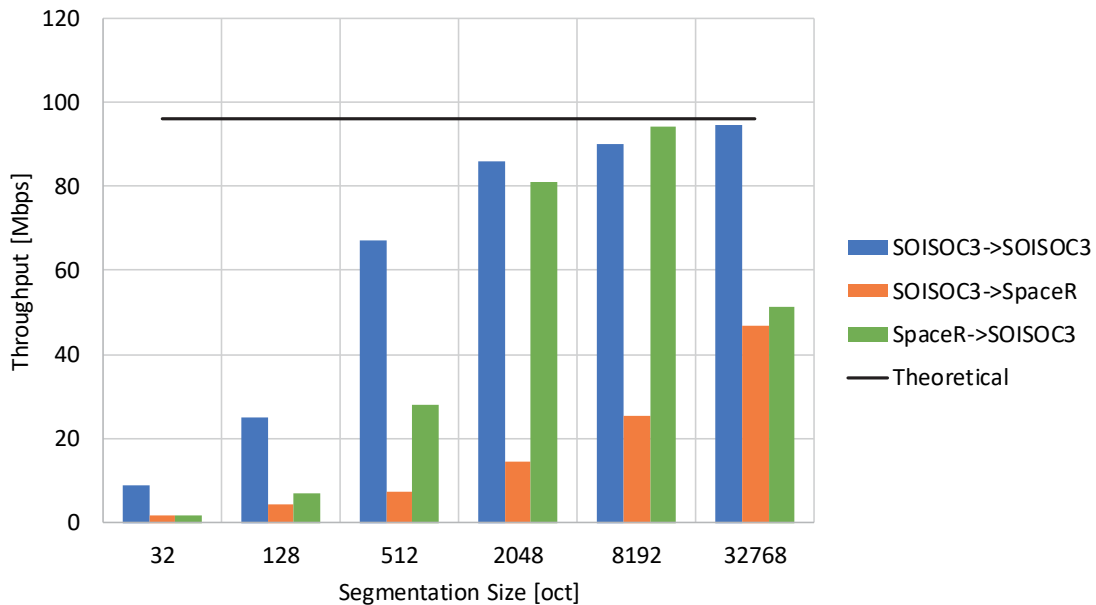


図 17 疎通試験 3 スループット

## 【疎通試験 4】

疎通試験4の結果を表 13, 図 18に示す. 図 18には参考に予備試験の結果も示している. 本試験ではSpaceRはVM上に実装されたものを使用したため, 疎通試験時には最大のパフォーマンスは出ておらず, 結果として8kB SDU時に30Mbps弱の結果になっている. 表中のTransmitted SDU numはSOI-SOC3のミドルウェア制約よりSDUを64個全て送り出せなかったためであり, パケット送信が停止した際のAckのEOPまでを計測対象とした.

表 13 疎通試験 4 スループット

test no.	SDU size [oct]	Sliding Window	Transmitted SDU num		Throughput [Mbps]	
			SOI-SOC3 →SpaceR	SpaceR→ SOI-SOC3	SOI-SOC3 →SpaceR	SpaceR→ SOI-SOC3
1	32	4	7	64	0.18	0.36
2	128	4	7	64	0.68	1.34
3	512	4	7	64	3.62	5.25
4	2048	4	35	64	14.67	16.44
5	8192	4	16	64	27.69	27.87
6	32	8	11	64	0.17	0.44
7	128	8	11	64	0.75	2.02
8	512	8	39	64	5.92	6.12
9	2048	8	11	64	6.41	17.27
10	8192	8	11	64	23.89	29.09
11	32	16	19	64	0.45	0.59
12	128	16	23	64	1.68	2.14
13	512	16	64	64	8.25	9.02
14	2048	16	27	64	16.34	22.67
15	8192	16	39	64	26.04	28.71

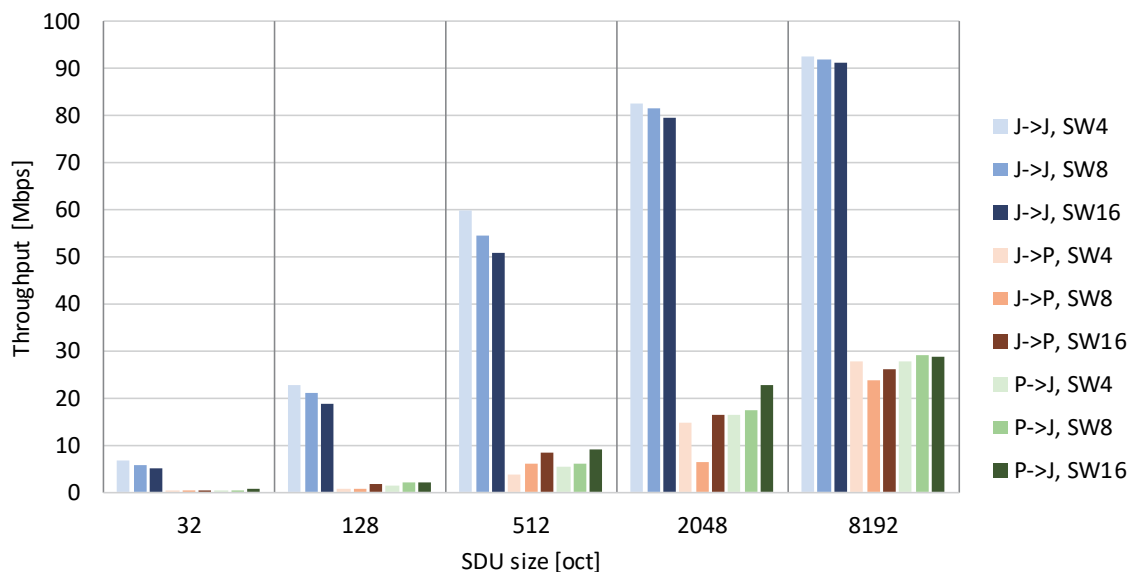


図 18 疎通試験 4 スループット  
(J : SOI-SOC3, P:SpaceR, SW は Sliding Window のサイズを表す)



## 5. SpaceWire-R による画像送信デモンストレーション

30th SpW and SpFi WG meetingでの発表に際して、SpW-Rのデモンストレーションとして、SOI-SOC3からSpaceRへの画像送信デモンストレーションを行った。ここではその詳細について述べる。

画像送信を行った際のコンフィギュレーションは疎通試験と同様である。リアルタイムに受信したデータを画像化する必要があったため、InitiatorはSOI-SOC3、TargetがSpaceRとしてSpaceRのLinux上で画像表示をすることとした。デモに使った画像データを図 19に示す。画像は各々の組織のロゴ画像を組み合わせたものであり、RGB画像である。画像データを64個のSDUに分割し、SDUをセグメンテーションなしで送信した。送信の際、フルスピードで送信すると表示が早すぎてデモンストレーションとして適当でないため、8タイムスロットに1パケット送り、8秒で1枚の画像を送り、それを4度繰り返すデモンストレーションとした。



図 19 SpW-R デモンストレーション用ロゴ画像

画像データはあらかじめSOI-SOC3のメモリ上に置いておく必要があるが、画像データが大きい(約2MB)ため、ROM上に配置し、そこから送信バッファにコピーすることとした。また、SOI-SOC3のBBMボードでは外部ファイルが扱えないためソースコード中に画像データをハードコーディングする必要がある。ただ全画像データのバイナリ値を1つのソースコードファイルに記述するとファイルサイズが大きすぎてエディタが動かないため、1SDUごとに別ファイルとして合計64個(加えて各パケットサイズを示したヘッダ1個)のソースコードファイルを加えてコンパイルした。デモンストレーションでは上記画像を4度送り、その様子を画面にリアルタイムに表示、またその通信ログを示すことでSpW-Rの独立した実装同士の疎通ができていることを示した。

## 6. まとめ

2019年の3月15日までの2週間程度をかけ、SOI-SOC3同士を接続したSpW-R通信試験を行った。さらに、3月17,18日にポーランドITTI社において、ITTI社の開発したSpW-Rソフトウェア実装のSpaceRとSOI-SOC3のSpW-R疎通試験を行い、全ケースで機能性能測定を行うことができた。結果、SOI-SOC3同士(ハードウェア実装)での最大性能の測定が完了し、さらに独立したソフトウェア実装との疎通が確認できた。SpW-Rプロトコル上の不具合は確認されず、性能に関してもSpaceRソフトウェアが十分なりソースを持った計算機上で処理されていれば、SDUサイズが大きくなればハードウェアに近い性能が出せることを確認した。Heartbeat, Segmentation, Sliding Windowなどの各機能についてもパフォーマンス劣化につながる事象が見られたものの、機能自体の動作確認は行うことができた。

## 7. 今後の展望

SpW-Rの仕様書（ドラフト）に、いくつか改善すべき点が見られる。ビットオーダの明確化やパケット構造の図などをSpaceWireの仕様書に合わせるなど、SpaceWireを使用する人から見て誤解の生まれない仕様とすることが望まれる。

また、この試験を通して、SOI-SOC3のSpW-R機能を実際の衛星で有効に用いるためには、ミドルウェアを中心に改修が望まれる箇所が何点か識別された。今後のメーカーと調整を継続したい。

本試験結果を報告した30th SpW and SpFi WG MeetingにおけるInter-Agency MeetingでSpW-RのECSS (European Cooperation for Space Standardization) 標準化に向けての道筋を尋ねたところ、実プロジェクトでの実証が必要であろうとの示唆を得た。そのため、今回出た様々な課題を解決した上で独立した実装との疎通試験を重ね、実績を重ねた上で、可能ならESAが絡んだプロジェクトでSpW-Rが採用されることが、ECSS標準化への近道であると考えられる。SpW-Rの実装としては、NECによるソフトウェア実装（2019年3月時点で別にFPGA上の実装もあるとの報告あり）などがあり、それらとの疎通試験が望まれる。いずれにせよ、他の機関でSpW-Rの実装が進む前にSpW-Rの仕様書を明確化し、少なくともJAXAでは標準化することが望まれる。

また、今回2度目となったポーランドITTI社とのSpW-R通信疎通試験だが、今後もポーランドとの良好な関係を築いていくことが重要だろう。ITTI社のSpaceRはとても信頼性が高く、ソフトウェア実装ゆえハードウェア並のパフォーマンスを出すことは難しいが機能的には完成したものになっており、また柔軟性も高い。SpaceRを改良し、SpW-Rコンフォーマンステスタのように使うやり方も十分考えられる。

SpW-Rを実際の衛星に搭載するとして、問題のひとつはメイン計算機以外のコンポーネントがどのようにSpW-RでI/Fできるようにするか、だと思われる。現状のインタフェースモジュール（「ひさき」「ひとみ」等におけるACIM (Attitude Control Interface Module)など）と同じ課題と思われるが、SpW-Rを採用するのであればネットワーク全体でSpW-Rを採用することが最も効果が高いため、各コンポーネントが低リソースにSpW-Rで通信できるようになる必要があると考えられる。今後そのような技術の開発が期待される。

## 謝辞

SOI-SOC3は三菱重工業㈱とJAXAが産業連携の枠組みで開発した宇宙用高信頼CPUである。また、本試験は、ポーランドITTI社のWojciech Mich氏、Krzysztof Romanowski氏、Piotr Tyczka氏と共同で実施した。また、予備実験含めSOI-SOC3を用いた各種の実験には、名古屋大学の高田光隆研究員、高田広章教授に多大なるご協力を頂いた。厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) T. Yamada, "SpaceWire-R DRAFT0.4," SCDHA 151-0.4 draft, 2015.
- 2) S. Parkes, A. Ferrer, D. Gibson, "SpaceWire-D Standard Draft D Issue 0.15," 2014.
- 3) W. Mich, K. Romanowski, P. Tyczka, R. Renk, V. D. Kollias, and N. Pogkas, "Implementation and validation of the SpaceWire-R protocol," Proceedings of the International SpaceWire Conference 2016, pp. 41-44, Oct. 2016.
- 4) K. Romanowski and P. Tyczka, "SpaceWire-R protocol implementation: test results, assessment, and future work," 26th SpaceWire Working Group Meeting, Apr. 2017.
- 5) M. Nomachi, K. Romanowski, W. Mich, P. Tyczka, K. Matsuzaki, H. Hihara, K. Tanaka, T. Tozawa, S. Fukuda, and T. Ishida, "SpaceWire-R Interoperability test," 28th SpaceWire Working Group Meeting, Mar. 2018.
- 6) T. Narita, M. Taeda, M. Kato, M. Kusano, K. Masukawa, M. Takada, H. Takada, T. Ishida, S. Fukuda, K. Matsuzaki, T. Takahashi, and M. Nomachi, "High-reliability SpaceWire engine implemented on the SOISOC3 microprocessor," Proceedings of the International SpaceWire Conference 2016, pp. 75-78, Oct. 2016.

- 7) T. Ishida, S. Fukuda, K. Matsuzaki, T. Takahashi, M. Takada, H. Takada, M. Nomachi, T. Narita, M. Taeda, K. Masukawa, and K. Saso, "Software and SpaceWire evaluation of SOI-SOC3," Proceedings of the International SpaceWire Conference 2016, pp. 79-82, Oct. 2016.
- 8) T. Ishida, K. Matsuzaki, S. Fukuda, M. Nomachi, W. Mich, K. Romanowski, P. Tyczka, M. Takada, and H. Takada, "SpaceWire-R interoperability test results 2019," 30th SpaceWire and SpaceFibre Working Group Meeting, Mar, 2019.
- 9) T. Takahashi, T. Takashima, S. Fukuda, S. Kuboyama, M. Nomachi, Y. Kasaba, T. Tohma, H. Hihara, S. Moriyama, and T. Tamura, "Space Cube 2 – An Onboard Computer Based on Space Cube Architecture," Proceedings of the International SpaceWire Conference 2007, pp. 65-68, Sept. 2007.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-19-006

JAXA Research and Development Memorandum

## SOI-SOC3とSpaceRによるSpaceWire-Rプロトコル疎通試験結果

Results of SpaceWire-R Protocol Interoperability Test between SOI-SOC3 and SpaceR

---

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 2020年2月27日

電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

