

Empowered by innovation **NEC**

人工衛星のしくみ

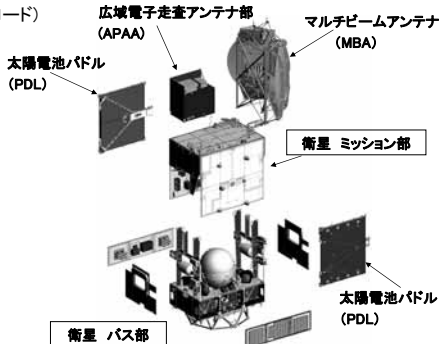
ー 人工衛星は大規模な組込みシステム

■ ミッション部 (パイロッド)

- 観測機器制御
- トランスポンダ
- アンテナ

■ 衛星バス部

- 姿勢制御
- 通信制御
- 電源制御
- 熱制御
- 構造
- 推進



参考: NPOCS (きずな)

提供: 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

Page 7

© NEC Corporation / NTSpace Ltd. 2010

Empowered by Innovation

NEC

人工衛星のしくみ

ー 人工衛星と携帯電話は良く似ている (1)

■ アンテナ/アンテナ制御装置

■ 送受信機

■ ベースバンド処理装置

■ 姿勢軌道制御装置

■ センサ (カメラ, etc.)

■ リアクションホイール

■ GPSレシーバ

■ 磁気トルカ

■ スラスター

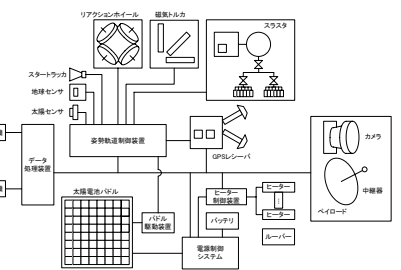
■ 電池

■ 太陽電池パドル

■ 電力制御システム

■ ヒーター

■ ルーバ (放熱制御盤)



一般的な人工衛星のブロック図

Page 8

© NEC Corporation / NTSpace Ltd. 2010

Empowered by Innovation

NEC

人工衛星のしくみ

ー 人工衛星と携帯電話は良く似ている (2)

■ 通話回線用アンテナ

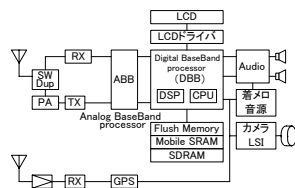
■ 送受信機

■ ベースバンドプロセッサ

■ カメラ

■ バイブレータ制御

■ 電池パック



一般的な携帯電話のブロック図

機能カテゴリ	人工衛星	携帯電話
無線通信	アンテナ、送受信機	アンテナ、送受信機
コンピュータ	データ処理装置	ベースバンドプロセッサ
カメラ	観測センサ、カメラ	カメラ
GPSレシーバ	GPSレシーバ	GPSレシーバ
メカトロニクス	姿勢軌道制御システム	バイブレータ制御
電力制御システム	太陽電池パドル、バッテリー、電力制御装置、電力安定化装置	電池パック、レギュレータ
熱制御システム	放熱板、ヒーター	最適な放熱設計

Page 9

© NEC Corporation / NTSpace Ltd. 2010

Empowered by Innovation

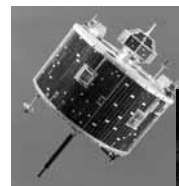
NEC

「はやぶさ」の軌跡

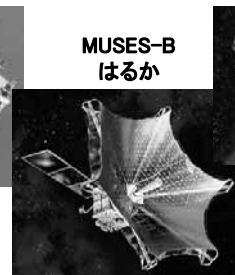
ー 第20号科学衛星MUSES-C

■ MUSESシリーズの3号機

- Mu Space Engineering Spacecraft
(ミュー・ロケットで打ち上げる工学実験探査機)



MUSES-A
ひてん



MUSES-B
はるか



MUSES-C
はやぶさ

提供: 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

Page 10

© NEC Corporation / NTSpace Ltd. 2010

Empowered by Innovation

NEC

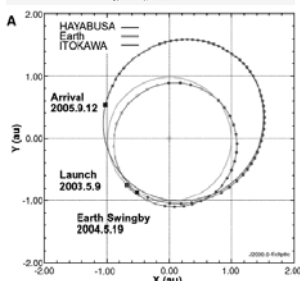
「はやぶさ」の軌跡

ー 打ち上げ (2003/05/09 13:29:25JST)

© JAXA



M-V、5号機により打ち上げ
一路太陽周回軌道へ
1周回後に地球スイングバイ実施
ITOKAWAへの接近軌道へ



提供: 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

Page 11

© NEC Corporation / NTSpace Ltd. 2010

Empowered by Innovation

NEC

「はやぶさ」の軌跡

ー 工学実験探査機としての課題達成状況

■ ミッション達成度 — ミッション完遂!

電気推進エンジン 稼働開始 (3台同時運転は世界初)	50 点
電気推進エンジン ある期間 (1000 時間) 稼働	100 点
地球スイングバイ成功 (電気推進によるスイングバイは世界初)	150 点
(自律航法に成功して) イトカワとランデブー成功	200 点
イトカワの科学観測成功	250 点
イトカワにタッチダウンしてサンプル採取	275 点
カプセルが地球に帰還、大気圏に再突入して回収	400 点
イトカワのサンプル入手	500 点

Page 12

© NEC Corporation / NTSpace Ltd. 2010

Empowered by Innovation

NEC

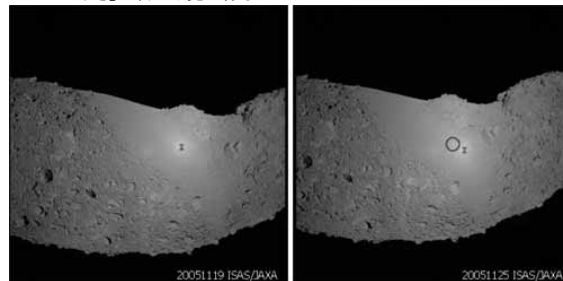
「はやぶさ」の軌跡
—ビデオによるご紹介—

7年間の宇宙の旅を終えて。
絆が生んだ奇跡の旅
HAYABUSA

「はやぶさ」の軌跡
— 未踏の地へ

イトカワへの着陸

- 「はやぶさ」の目から見た様子



はやぶさの影とターゲットマーカ―

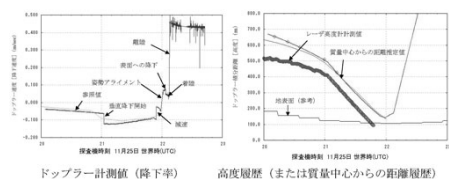
提供: 宇宙航空研究開發機構(JAXA)

「はやぶさ」の軌跡
— 未踏の地へ

■ イトカワへの着陸

- 地上から見た様子

高度と降下速度の履歴



左図は、DSN 局で計測されたドップラー速度履歴で、おおむね「はやぶさ」のイトカワへの降下速度を示している。右図は、ドップラー速度情報を積分して得られた高度を更新して表示している。

提供:宇宙航空研究開発機構(JAXA)

なぜ高信頼性設計をするのか

- 一 地球周回軌道から深宇宙まで確実に動作する人工衛星

信頼性＝設計、製造、試験および運用の
ライフサイクルを通じて配慮すべきもの

■ 打ち上げた後は修理が難しい

■ 信頼性保障が「当たり前品質」

それでもなお・・・

通信時間の制約のためにマイコンに
頼る局面が多い



提供: 宇宙航空研究開発機構

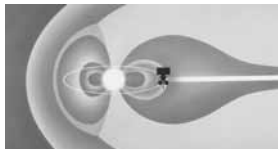
地球	だいち	ひまわり	はやぶさ
距離 0	700km	36,000km	300,000,000km
往復通信時間	5ミリ秒、非可視あり	240ミリ秒	34分、非可視あり

なぜ高信頼性設計をするのか

一 耐環境性

■ 厳しい宇宙環境への対応

- ロケット打ち上げ振動: 10G~20G超
- 宇宙空間の大きな温度差
- 高い放射線レベル
 - ・ ソフトエラー対策
 - ・ ラッチアップ対策
 - ...等々



太陽から放射される高エネルギー粒子に
晒される人工衛星(イメージ図)

提供: 宇宙航空研究開発機構

■ 投資回収と低コスト化

- 数十億円から100億円以上の投資を無駄にしない。
- 海外競争力のある低コスト化と高信頼性を両立させる。

なぜ高信頼性設計をするのか
—コンピュータを使って得られる成果— Science 2006/06/02 Hayabusa Special Issue



2006/6/2号は「はやぶさ」特集号として7本の論文を掲載。特に密度1.9g/立方cmという数値は、表面の様相と合わせて「ラブル・パイル」という名で推定されていた未知の天体の素顔を明らかにする画期的な発見だった。

ITOKAWAの詳細形状推定、タッチダウン誘導に関してもNECの技術が活用された。

なぜ高信頼性設計をするのか —ソフトウェアの対処 (1)—

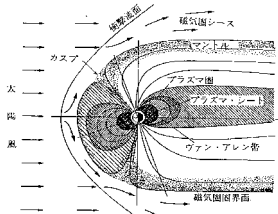
宇宙放射線環境

- 宇宙空間に存在する高エネルギー粒子
 - ・ 陽子(プロトン)、電子、重イオン粒子、 α 粒子等
- 高エネルギー粒子が半導体デバイスに与える影響
- トータルドーズ効果
 - ・ 照射される放射線の総量に応じて半導体デバイスの性能が劣化する現象。永久劣化と見なされる(アニール効果も有り得る)。
 - ・ 陽子、電子が引き起こす。
- シングルイベントアップセット(Single Event Upset: SEU)
 - ・ メモリ、フリップフロップ等のLSIに高エネルギー粒子が当たることによって引き起こされるデータ誤り。一過性のソフトウェアと見なされる。
 - ・ 重イオン粒子、陽子が引き起こす。
- シングルイベントラッチアップ(Single Event Latch-Up: SEL)
 - ・ SEUと同様の現象により、半導体基板上に形成されているサイリスタ構造がONし、過大な電源電流が流れる。永久故障につながり得る。
- ・ SEUとSELとを合わせて(SEE: Single Event Effect)と呼ぶこともある。

なぜ高信頼性設計をするのか —ソフトウェアの対処 (2)—

太陽風と地球磁気圏

- 太陽風
 - ・ 太陽表面から吹き出す、約10 nTの磁場を伴った超音速のプラズマ(電荷を帯びた粒子)の流れ。地球の近くでのその速度は約300 km/秒にも達する。
 - ・ 主成分は陽子。その他、電子、 α 粒子、重イオン粒子も存在する。
- 地球磁気圏
 - ・ 宇宙空間の中で地球が持つ磁場の勢力が届く領域。
 - ・ 地球の持つ磁場が太陽風の影響により太陽風方向で潰れ、夜側に向かって引き延ばされる。



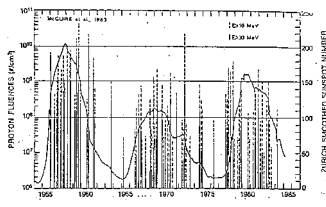
磁気圏: Magnetosphere
太陽風: Solar Wind
磁気圏シース: Magneto-sheath
カスプ: Cusp
プラズマ圏: Plasma Sphere
ヴァン・アレン帯: Van Allen Belt
プラズマシート: Plasma Sheet
磁気圏(面): Magnetopause
衝撃波面: Bow Shock

図-1 地球磁気圏

なぜ高信頼性設計をするのか —ソフトウェアの対処 (3)—

太陽フレア

- 太陽表面で起こる爆発現象。この時放出される粒子を太陽フレア粒子(Solar Flare Particles: SFP)と呼ぶ。太陽フレア粒子は非常に大きなエネルギーを持つ。X線
- 陽子が主。その他 α 粒子、電子、重イオン粒子が放出される。X線、 γ 線、電波等も放出される。X線は8分程度で地球に到達する。粒子は早いもので20~30分程度、遅い場合は数日を要する。



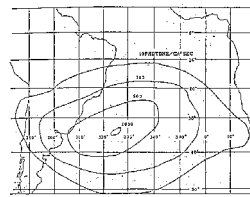
OR (Ordinary Event):
通常の太陽フレアイベント

AL (Anomalously-Large Event):
太陽活動極大期(Solar Max)の初期及び後期に起こる。ほぼ11年周期であり、太陽フレアは予測可能。

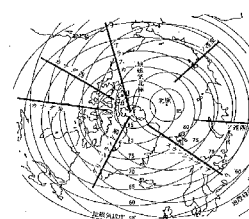
なぜ高信頼性設計をするのか —ソフトウェアの対処 (4)—

ヴァン・アレン帯の特異点

- SEEが起こり易い。



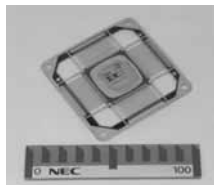
ヴァン・アレン帯はブラジル沖上空では300km近くまで地球に接近している。
日本付近では約1,300kmの高度にある。



なぜ高信頼性設計をするのか —ソフトウェアの対処 (5)—

放射線対策を施した宇宙機搭載用マイクロプロセッサの例

- μ PD55177B-018
 - ・ 1 chip 16 bit micro-controller.
 - ・ On-chip floating point arithmetic function
 - ・ On-chip peripheral devices
 - Bus controller
 - DMA controller
 - Memory controller
 - ECC (EDAC)
 - Timer
 - Interrupt controller
 - Serial port
 - Parallel port
 - ・ High reliability
 - Flight proven processor implemented on NASDA authorized high density ASIC
 - Radiation Hardness (TID, SEU/SEL)



ソフトウェア開発を振り返る —オーソドックスな開発プロセス (1)—

高信頼性システムを実現するための四つのポリシー

最初から正しく作る

見逃さない

リスクに備える

コンティンジェンシ(緊急時)に対応する

ソフトウェア開発を振り返る
－日本的な擦り合わせプロセス（RTOSの導入効果を例として-2）

リアルタイムOSを導入した背景

- 試験済みソフトウェアを共通的に使用することによる信頼性の確保。
- レビューし易くする
 - ・ 対象とするレビューの観点
 - － 大規模なアプリケーションプログラムのスケジューリング管理
 - － 時間制約への対応
 - ・ 当事者、関係者のみならず、第三者もレビューに加われる枠組みの構築
 - － タスクの導入（プログラムの構造の体系化）。
 - － プログラムのノウハウの体系化。

最後の決め手は
人！

ソフトウェア開発を振り返る
－日本的な擦り合わせプロセス（RTOSの導入効果を例として-3）

当初は独自のリアルタイムモニタを開発

- ITRON仕様は8/16 MPU用としては重かった。

独自開発のリアルタイムモニタから
共通リアルタイムOSへ

- 組込ソフトウェアの
共通化の機運の高まり
- 社内横断的な
リアルタイムOSの
開発体制
- μ ITRON仕様の登場



太陽観測衛星「ようこう」 1991年8月30日打上
※ 独自リアルタイムモニタ採用

© 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

ソフトウェア開発を振り返る
－日本的な擦り合わせプロセス（RTOSの導入効果を例として-4）

μ ITRON仕様のメリット

- 組込マイコン向けに
最適化が施されている。

共通リアルタイムOSの
メリット

- ユーザー数が飛躍的に増大
 - ・ OSとして十分枯れる。
バグトレンドが収束し、
品質が安定。
- 専門の開発組織の確保。
 - ・ タスクスイッチング速度等の
性能が飛躍的に向上。
 - ・ 正式な品質確認試験の
実施。



X線天文観測衛星「すざく」
2005年7月10日打上げ



DHU
(Data Handling Unit)
通信制御装置

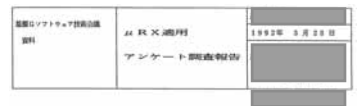
© 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

ソフトウェア開発を振り返る
－日本的な擦り合わせプロセス（RTOSの導入効果を例として-5）

μ RX116S/SF - μ ITRON準拠RTOSを宇宙機搭載用MPUIに最適化

- NEC基盤事業グループ横断的な開発

- ・ 高信頼性を求められる
製品の事業グループが
一体となって組込機器用
高信頼性リアルタイムOSを
開発した。
 - － 交換機
 - － 伝送通信機器
 - － 無線通信機器
 - － 通信制御機器
 - － 移動通信機器



1. マルチタスク処理能力
国際プラットフォームの通信制約大の為、
→ 基盤内の要求仕様を明確化
→ 基盤内基盤部門への依頼
を目的にマルチタスク開発を行った。



宇宙システム機器市場だけでは
実現が困難な、多数のユーザー
によるフィールド実績の積み重ね
が可能となった。

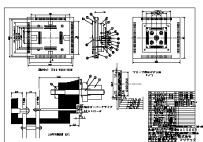
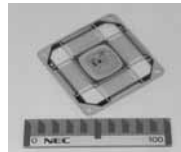
サブグループ	開発件数
交換機	1
伝送	1
無線	1
通信	1
移動	1
合計	5

ソフトウェア開発を振り返る
－日本的な擦り合わせプロセス（RTOSの導入効果を例として-6）

TRONの採用によって改善した開発環境

- ICE
- ソケット
- コンパイラ
- コンパイラ検証システム

ユニークな技術を持
する中小企業群との
共同開発



ANSI 準拠 C コンパイラ

コンパイラ評価サービス

ソフトウェア開発を振り返る
－異業種の技術を貪欲に吸収する (1)

T-Engineフォーラム

- <http://www.t-engine.org/>

組込みソフトウェア管理者技術者育成研究会

- <http://www.sesame.jp/>

TOPPERSプロジェクト

- <http://www.toppers.jp/>

ソフトウェアテスト技術者交流会

- <http://www.swtest.jp/>

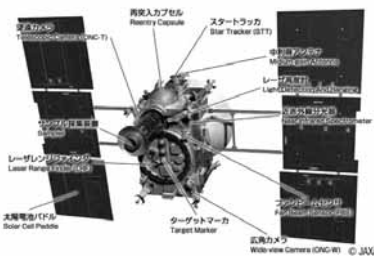


－Web、メーリングリスト、講演会、ワークショップなど多彩な交流の場
－技術者、管理者、経営者など多様な立場のキーパーソンの交流の場

ソフトウェア開発を振り返る －異業種の技術を貪欲に吸収する(2)

自律型の探査機技術の実現

- 電波(光速)でも往復に34分かかかる遠いところにある、正確な形さえ判らない小惑星に接近するために、高度な自律機能が必要。
- カメラの撮像やレーザー高度計により距離や形をとらえ、探査機自身がその場でどういう行動をとるべきかを考える。



提供: 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

ソフトウェア開発を振り返る －異業種の技術を貪欲に吸収する(3)

産業用画像認識技術の応用

- 課題
 - ・ 処理速度の遅い宇宙機用MPUで処理可能か?
 - ・ リソース制約
 - － 消費電力
 - － 質量
 - － コスト
 - ・ クレーターのような自然画像が認識できるか?
- プラズマディスプレイパネルの検査装置技術の応用
 - ・ 工場の検査設備の応用 — 実現アーキテクチャの選択
 - － 高速なCPUによるソフト化 Δ(消費電力、質量、etc.)
 - － 個々の画像処理をLSI化し、ソフトで処理を繋ぐ ○(最適化)
 - » 画像入力、平滑化、エッジ抽出、ルックアップテーブルによる変換、ラベリング、画像binning、相関演算、差分演算、CPU I/F
- ビデオレートの画像認識と誘導制御を人工衛星向けに実現



ソフトウェア開発を振り返る －コンティンジェンシー対策(1)

- 想定外のできごと
- 「はやぶさ」の復旧
- 「はやぶさ」を復旧させた技術
- 予期しない事態に対する備えや対処



提供: 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

ソフトウェア開発を振り返る －コンティンジェンシー対策(2)

研究開発時には想定できなかった3億km彼方の小惑星(1)

- 地球から3億km離れた現場に到達してみると。。。
 - ・ クレーターは殆ど見当たらず、ごっこつした岩ばかり
 - ・ クレーター前提の画像認識による着陸戦略の見直し



提供: 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

ソフトウェア開発を振り返る －コンティンジェンシー対策(3)

研究開発時には想定できなかった3億km彼方の小惑星(2)

- グローバルマッピング
 - ・ まずは良く観察する＝人間のサポート
 - ・ 日本の進んだ3D画像処理による状況の把握

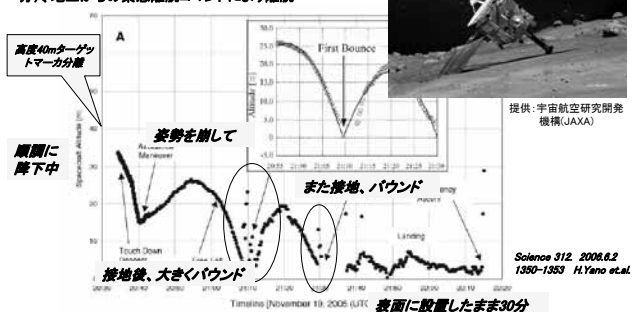


提供: 宇宙航空研究開発機構(JAXA)



ソフトウェア開発を振り返る －コンティンジェンシー対策(4)

2005/11/20 3回のリハーサルの後タッチダウン実施、高度40mでターゲットマーカ降下、その後姿勢を乱して、ゆっくりと自由降下、バウンドしながら最終的に接地(30分)、地上からの緊急離脱コマンドにより離脱



提供: 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

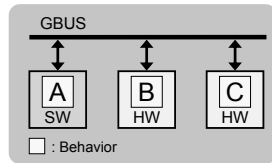
Science 312, 2006.6.2
1350-1353 H.Yano et al.

今後の展開

一 高級言語によるシステム記述とハードウェア／ソフトウェアの自動生成 (2)

目的

- ビヘイビアを HW / SW に複数のパターンで分割後、各ビヘイビアのソフトウェア実行時の処理時間と、ハードウェア規模を比較する



HW / SW分割パターン

	データ受信処理	メモリR/W処理	データ送信処理	受信データCRC値チェック	送信データCRC値生成
パターン1	SW	HW	HW	HW	HW
パターン2	HW	SW	HW	HW	HW
パターン3	HW	HW	SW	HW	HW
パターン4	HW	HW	HW	SW	HW
パターン5	HW	HW	HW	HW	SW

Page 49

© NEC Corporation / NTSpace Ltd. 2010

Empowered by Innovation

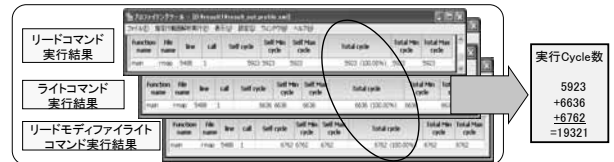
NEC

今後の展開

一 高級言語によるシステム記述とハードウェア／ソフトウェアの自動生成 (3)

ソフトウェアの実行Cycle数算出

- プロファイリングツールにて、コマンド実行に要したcycle数を確認
- 分割パターン毎に、リードコマンド(32byte)、ライトコマンド(32byte)、リードモディファイライトコマンド(4byte)をサンプルとして実行し、合計のcycle数を算出



ツール実行例 (メモリR/W処理をSWにした分割パターンの結果)

Page 50

© NEC Corporation / NTSpace Ltd. 2010

Empowered by Innovation

NEC

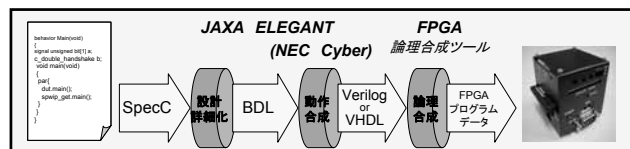
今後の展開

一 高級言語によるシステム記述とハードウェア／ソフトウェアの自動生成 (4)

ハードウェア (FPGA) 規模算出

- 以下の作業にてLogic Element数を確認

システムレベル記述から生成されたHDLをSpace Cube上のFPGAに実装し、実動作を確認



Logic Element数を算出

Page 51

© NEC Corporation / NTSpace Ltd. 2010

Empowered by Innovation

NEC

今後の展開

一 高級言語によるシステム記述とハードウェア／ソフトウェアの自動生成 (5)

マッピングのパターンによる HW / SW分割試行結果

検証 パターン	ソフトウェア実行 ビヘイビア	ソフトウェア 実行Cycle数	ハードウェア規模 FPGA Logic Element 数		有効性
パターン1	データ受信処理	5,394	少	2,428	小★
パターン2	メモリR/W 処理	19,321	中	3,128	中
パターン3	データ送信処理	1,022,650	多	3,761	中
パターン4	受信CRC値チェック	16,689	中	4,507	大
パターン5	送信CRC値生成	674,255	多	4,452	大

- パターン1がソフトウェアの実行Cycle数が少ない
- パターン1がハードウェア規模が小さい



ハードウェア／ソフトウェア分割のトレードオフを定量的に表すことが可能

Page 52

© NEC Corporation / NTSpace Ltd. 2010

Empowered by Innovation

NEC

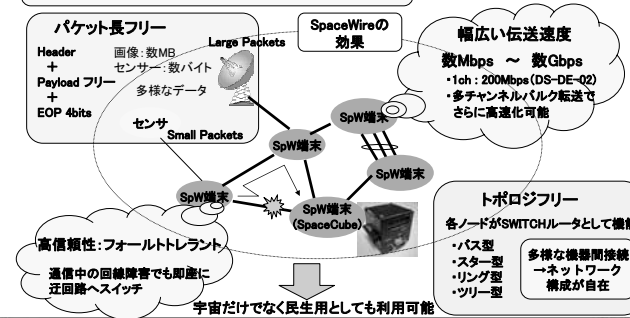
今後の展開

一 自在性を追求した組込システムネットワーク規格の標準化

SpaceWire

- 一 ESA (ESTEC)が中心となり標準化
- 一 ESAに加え、NASA、商用衛星等でも採用計画急増

組込システム向けの極めて高速なネットワーク規格
機器間からモジュール間まで幅広く使用可能
安価なハードウェア／軽いソフトウェア／自在な部品調達



Page 53

© NEC Corporation / NTSpace Ltd. 2010

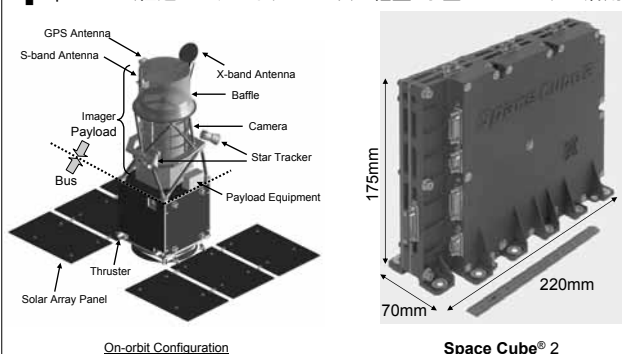
Empowered by Innovation

NEC

今後の展開

「はやぶさ」の技術を汎用化 NEXTAR® 標準プラットフォーム

SpaceWire(組込システムネットワーク)と軽量・小型コンピュータの活用



Page 54

© NEC Corporation / NTSpace Ltd. 2010

Empowered by Innovation

NEC