

# 超小型母娘衛星システムの概念設計と信頼性評価

05174048 猪股 壮太  
指導教員 佐原 宏典

## 1. 研究背景と目的

1990年代後半から2000年代初頭にかけて研究開発が盛んに行われるようになった超小型衛星は、従来の衛星に比べ低コストかつ短期間での開発が可能であり、大規模な予算を持たない大学等でも本格的な宇宙への進出を可能とする画期的な宇宙システムである。

しかし搭載機器等の条件に厳しい制限があり、ミッションの選択肢を狭めてしまっているのが現状である。本研究では、信頼性評価に基づき超小型衛星間の連携によりミッション精度を達成するアーキテクチャである超小型母娘衛星システムを提案する。さらに今後需要が高まると予測される標準バス化構想のための汎用プラットフォームを実現するCANバスを用いた衛星内ネットワークの模擬実験を行い、その有用性を示す。

## 2. 信頼性評価に基づく衛星アーキテクチャの比較

衛星に用いられる代表的なアーキテクチャ（システムの構造）の例として中央集権型や冗長型、将来衛星への適用が見込まれるアーキテクチャとしては自律分散型などが挙げられる。

ここでは信頼度をもとにアーキテクチャを比較しその評価を行う。

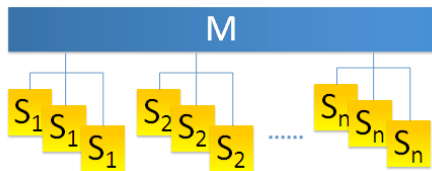


Fig.1 中央集権型アーキテクチャ (冗長系を含む)

Fig.1に示す中央集権型アーキテクチャは、1機のマスタ衛星と多数のスレイブ衛星からなるアーキテクチャであり、マスタからの命令に基づきミッションを行ったスレイブがマスタに結果を返信するような例では、システム信頼度 $R$ はマスタが故障しない場合、スレイブの信頼度 $R_S$ と要素数 $N$ を用いて(1)式のように表わされる。

$$R = 3R_S^N - 3R_S^{2N} + R_S^{3N} \quad (1)$$

一方、Fig.2に示す自律分散アーキテクチャは各サブシステム間の主従関係が存在せず、状況に応じて連携を変え機能を達成するフォールトトレラント（故障許容型）なアーキテクチャである。サブシステムの個数を $N$ 、信頼度を $R_S$ とおくと

$$R = 2R_S^N - R_S^{2N} + (N-2)R_S^{2(N-1)}(1-R_S)^2 + \sum_{k=1}^{N-2} \frac{k(k-1)}{N-1} R_S^{2k} (1-R_S)^2 [(1+R_S)^2 - 2R_S^{N-k}] \quad (2)$$

と表わされる。これを図示したものがFig.3である。閾値 $N^*$ を境にサブシステム数が増えれば自律分散型のMFA (Mean Functional Availability; 自律分散型におけるシステム信頼度と同義) が中央集権型のシステム信頼度を上回る。

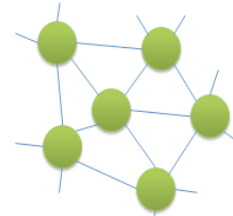


Fig.2 自律分散アーキテクチャ

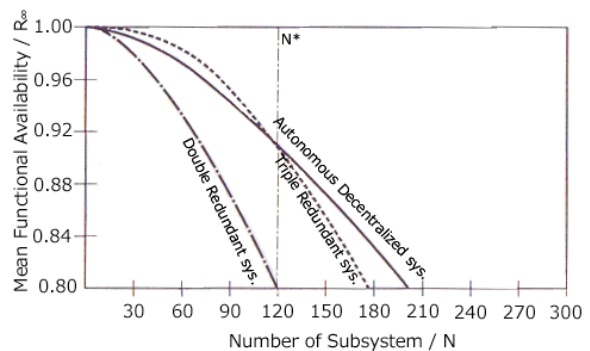


Fig.3 サブシステム数と平均機能達成度の関係 ( $R_S=0.995$ の場合)

また、本研究ではコストを指標として導入し、群衛星系において異常発生により信頼度が低下した衛星の処遇を検討した。信頼度の低下に構わず所定のミッションを行う場合を基準とし、1機の衛星が信頼度の低下した衛星をカバーする場合を比較し、仮想成功報酬（初期投資やミッションから与えられる仮想の成果）の期待値を算出した。双方の仮想成功報酬の差 $E-E_0$ は以下の式で表わされる。

$$E - E_0 = C_{r1} R_M^2 R_S (1 - \alpha R_S) - C_{r2} R_M^2 R_S = R_M^2 R_S [(1 - \alpha R_S) C_{r1} - C_{r2}] \quad (3)$$

(3)式の符号が正となるのは  $(1 - \alpha R_S) C_{r1} - C_{r2} > 0$  が成り立つ場合であり、 $C_{r1}$ が $C_{r2}$ を大きく上回るような場合には、カバー衛星をおいた方が成果が大きいことがある。

## 3. 超小型母娘衛星システムの提案

これらの信頼性評価に基づき、Fig.4に示すようなフォールトトレラントな超小型母娘衛星システムを提案する。

娘衛星を自律分散的に連携させ、従来弱点であった精度の低さを補うとともに、宇宙用部品に比べ信頼度が低い民生品主体の超小型衛星自体の信頼度を向上させる。

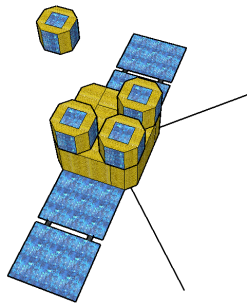


Fig.4 超小型母娘衛星システム

母衛星は、Fig.5に示すように内部ネットワークにCANバスを用いて各サブシステムを同等に扱い、中枢CPUの状態に左右されない柔軟な運用を目指す。また、分離まで娘衛星を母衛星内CANバスに接続し、母衛星各サブシステムと同等に扱うことで汎用プラットフォームとして衛星用CANを整備する。

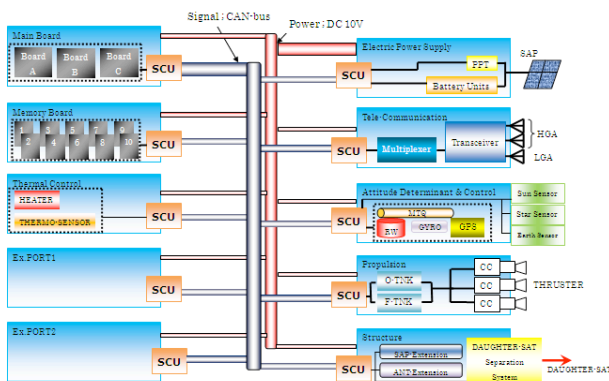


Fig.5 CANバスを用いた衛星内ネットワーク

#### 4. CANバスを用いた衛星内ネットワーク

本研究では、CANバスによる衛星内ネットワークについて、簡単な模擬実験を行い適性を確認した。Fig.6に示す実験装置を用いてPC（地上局に相当）から通信系（ID:0）に相当するマイコンを経由してCANバスに接続された他の2つのマイコンにIDを設定し（ID:1,2）各サブシステムの生存状況を確認するコマンドを送る。

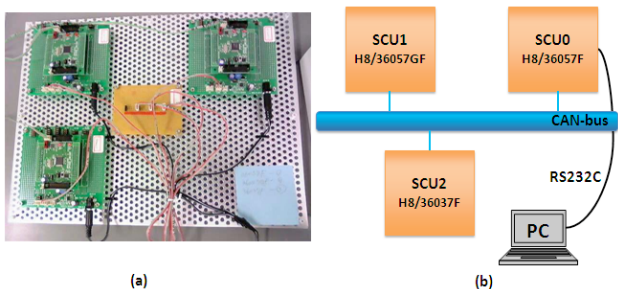


Fig.6 衛星内ネットワーク模擬実験装置

この実験の結果、正常にID設定を行い、生存状況も各マイコンからのAck（Acknowledgement;返信）にて確認することができた（Fig.7参照）。仮にいずれかのマイコンに不具合があればAckが送られずそのサブシステムは故障したと判断される。

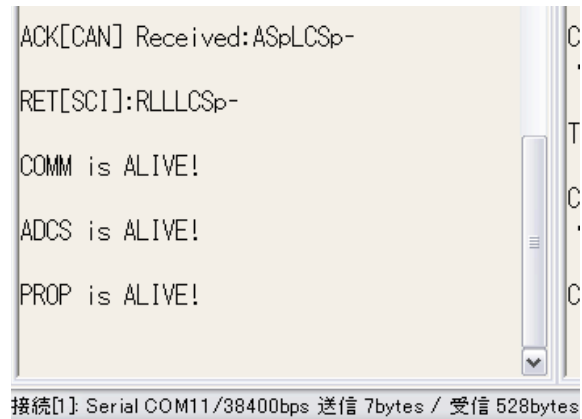


Fig.7 生存状況確認実験結果

#### 5. インターフェース部の設計

インターフェース部は母娘衛星システムにとってシステムとしての成立性を左右する重要な部分と言える。本研究では分離検知システムのBBMを用いてハードウェア面からの分離検知を確認するとともに、CANバス上のAckの有無によりソフト的に分離を確認・定義する手法を考案した（Fig.8参照）。

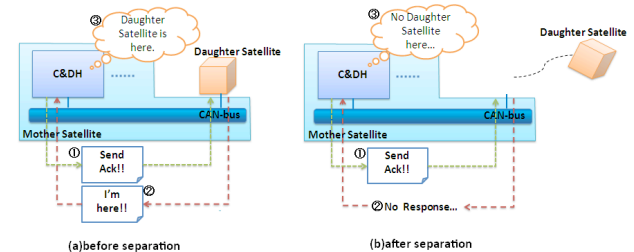


Fig.8 CANバスを利用した分離検知システム

#### 6. 結論

本研究の結論を以下に述べる。

- 群衛星系を例にアーキテクチャの比較とミッション成果の期待値を算出することで信頼度の面で劣る超小型衛星の可能性を示した。
- フォールトトレラントな超小型母娘衛星システムを提案し、汎用プラットフォームとしてCANバスを用いた衛星を設計した。
- CANバスを用いた衛星内ネットワークの模擬実験を行い、衛星内ネットワークとしての成立性を確認した。
- 娘衛星分離検知システムをハード、ソフト両面から検討し、より確実に娘衛星の分離を検知するシステムを提案した。

#### 参考文献

- ▶ 市川昌弘ほか：機械工学選書 信頼性工学，裳華房，2004
- ▶ 森欣司：自律分散システム入門 システムコンセプトから応用技術まで，森北出版，2006
- ▶ 茂原正道，鳥山芳夫：衛星設計入門，培風館，2002
- ▶ 五十嵐資朗，佐藤正幸，玉城礼二：CAN入門講座，電波新聞社，2006