

## CanSat 開発を通じたシステムズ・エンジニアリング教育の実践

坂本 啓<sup>1,\*†</sup>, 神武直彦<sup>2</sup>, 白坂成功<sup>2</sup>, 伊藤琢博<sup>3</sup>, 山田皓司<sup>4</sup>, 成田伸一郎<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 大学院理工学研究科 機械宇宙システム専攻,  
〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 #I3-17

<sup>2</sup> 慶應義塾大学大学院 システムデザイン・マネジメント研究科,  
〒223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1

<sup>3</sup> 大阪府立大学 工学研究科 小型宇宙機システム研究センター,  
〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1

<sup>4</sup> 東京理科大学大学院 理工学研究科 電気工学専攻,  
〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

<sup>5</sup> 宇宙航空研究開発機構,  
〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

### 概要

著者らは小型模擬人工衛星 CanSat を開発する学生に対し、システムズ・エンジニアリング(SE)の教育プログラムを 2010 年から提供している。参加学生に SE 体系の理解を促し、さらに彼らの CanSat ミッションを効率よく確実に成功させる、という 2 点を本プログラムは目的としている。教育プログラムでは、特に次の 3 点を重点的な教育項目と設定した。(i) ミッション定義・要求仕様の明確化、(ii) スケジュールの作成・管理、(iii) 検証計画の明確化、である。教育プログラム実践の結果として、CanSat ミッションの成功率向上は短期的には確認できていないものの、参加学生および開発審査員を務めた社会人たちには多くの学びがあった。本稿では構築した教育プログラムの狙いと内容を紹介し、2010 年～2011 年の 2 年間の実践から得た知見について述べる。

## Systems Engineering Education Program through Students' CanSat Development

Hiraku SAKAMOTO<sup>1,\*†</sup>, Naohiko KOHTAKE<sup>2</sup>, Seiko SHIRASAKA<sup>2</sup>, Takahiro ITO<sup>3</sup>,  
Koji YAMADA<sup>4</sup>, and Shinichiro NARITA<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Tokyo Institute of Technology,  
2-12-1 #I3-17 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

<sup>2</sup> Graduate School of System Design and Management, Keio University,  
4-1-1 Hiyoshi, Kita-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 223-8526, Japan

<sup>3</sup> Small Satellite Systems Research Center, Osaka Prefecture University  
1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan

<sup>4</sup> Department of Electrical Engineering, Tokyo University of Science  
2541 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510, Japan

\* Corresponding author. Assistant Professor, Member UNISEC.

† E-mail: [hsakamoto@mech.titech.ac.jp](mailto:hsakamoto@mech.titech.ac.jp).

Received and presented July 1st, 2012 in 2nd UNISEC Space Takumi Conference, Tokyo, Japan.  
Revised July 24th, 2012. Accepted October 16th, 2012..

<sup>5</sup> Japan Aerospace Exploration Agency,  
3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara-shi, Kanagawa 252-5210, Japan

#### SUMMARY

The authors have been offering a Systems Engineering (SE) educational program for university students who develop small model satellites, CanSat. The educational program aims at teaching SE methodologies to students, and assisting students' CanSat missions to success reliably and efficiently. The educational program focuses on the following three SE essentials: (i) clarifying requirement specification of CanSat, (ii) managing development schedules, and (iii) planning verification tests. The outcomes of this educational program have not clearly suggested the improvement of CanSats' success rate yet; on the other hand, they do suggest that there have been many findings for each of participating students as well as professional engineers who involved in the program as reviewers. This article introduces the objectives and contents of the educational program, and discusses lessons learned during the two years of our practice from 2010 to 2011.

**KEY WORDS:** Systems Engineering; Project Management; CanSat; UNISEC; UNISAS;

## 1. はじめに

### 1.1 システム開発のための体系的な教育プログラムの必要性

人工衛星をはじめとする宇宙システムの開発過程では、様々な学問分野の知識を用いて開発された多数のサブシステムを、複雑に統合することが求められる。さらに、構想・設計・製造・試験・運用・廃棄というシステムのライフサイクルすべてを考慮することも必要である。宇宙システムのみならず、近年開発されているあらゆるシステムは大規模化や複雑化が進み、特定分野の専門化や詳細化だけでは対処し難い問題が生じている[1]。しかし一方で、複合分野やシステムライフサイクルを考慮してシステムを開発する手法を体系化し、その体系に基づいた教育を実践している例は、日本ではいまだ希少である。

UNISEC では、前身の大学衛星コンソーシアムが 2001 年に設立された当初から、学生の手による宇宙システム開発を実践してきた。特に超小型人工衛星の開発に成功した学生たちは、試行錯誤を重ねる中で独自のシステム開発手法を確立してきた [2-5]。その手法を後輩たちに継承するために、独自の教育プログラムを各団体で作成し、実践してきてもいる [6-9]。いま学生の手による小型宇宙システムの開発手法を体系化し、その体系に基づいて統一的に教育を実施することは、以下の 4 つの意味で意義深い。第一に、基礎からの教育すべてを個別の団体で独自に行ってしまうと、UNISEC 内に開発の方法論が複数混在することとなり、団体間のコミュニケーションを難しくする。共通の体系に基づく教育は、団体外との交流を円滑にする。第二に、東京大学を始めとする小型衛星開発を先導してきた団体の開発手法を可視化でき、新規参入の団体に知見を継承することを容易にする。第三に、UNISEC の技術と教育方法を世界に展開していくにあたっては、オール・ジャパンとしての体系を有することが求められる。第四に、体系的な宇宙システム開発教育を実現すれば、システム開発の教育がいまだ希少な日本に対して教育の実践例を示すことができ、より一般的なシステム開発教育を構築していく一歩となる。

欧米ではシステムズ・エンジニアリング(SE)と呼称される体系に沿ったシステム開発の教育が、広く提供されている[10-11]。SE の体系化は国際協議会 International Council on Systems Engineering (INCOSE) を中心に実施されている[12]。INCOSE の SE 体系に基づいた教育を行う機関として、日本では 2008 年に慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科が設立された[13]が、他の日本の教育機関では SE を体系的に学べる機会は少ない。日本の複数の大学の工学部ではものづくりを通して創造性を育てる教育が実施されているが (例えば[14-16])、INCOSE ほど体系化された方法論を教育しているとは言い難い。

以上に述べた背景のもと、著者らは 2010 年から、宇宙システム開発の知見を体系的に学べる教育プログラムの実現を目指し、SE の体系に基づいて学生たちが CanSat の開発手法を考え、開発を実践していく形式の教育プログラムを構築し実践してきた。その活動の過程では、学生時代に UNISEC に所属した社会人が、現役の UNISEC 学生を助言する仕組みも構築した。この教育プログラムの試みは、日本で極めて珍しい実践的で体系的なシステム開発教育を実現している点で、意義深いものであると考えている。本稿ではその教育の狙いと内容、そして 2 年間教育を実施して得た教訓を共有する。

### 1.2 本論文の構成

本稿を次のように構成する。第 2 章では、本稿で述べる教育プログラムが対象とする CanSat の特徴と開発の問題点について述べ、教育プログラムによって何が改善できるかを議論する。第 3 章では構築した教育プログラムの狙いと、具体的な内容を紹介する。第 4 章では 2010 年～2011 年の教育プログラムを運営した経験から得た成果と表出した問題点について述べ、第 5 章に結論を述べる。

## 2. CanSat 開発の特徴と問題点

### 2.1 CanSat 開発の特徴

宇宙システム開発手法の体系的な教育を提供する対象として、著者らは CanSat 開発[2]を選択した。その理由は CanSat 開発が以下の 5 つの特徴を有するからである。

- (i) 開発期間が通常半年～1 年であり、基本的に開発に参加した学生全員がシステムのライフサイクルすべてを経験できる。
- (ii) 宇宙で運用される人工衛星と極めて似たシステム構成を持っており、複合分野の知識を用いなければシステム統合が難しいという意味で、宇宙システム開発の優れた教材である。
- (iii) CanSat 開発を行う多くの団体は ARLISS (A Rocket Launch for International Student Satellite)[17]という米国ネバダ州において毎年 9 月に開催される大会に出場する。したがって、似た状況が 1 年周期で繰り返されるため、教育効果を評価し、教育プログラムの内容を改善していくことが容易である。
- (iv) UNISEC から ARLISS に参加する学生数は例年 100 人強と、教育の対象となる人数が多い。
- (v) ARLISS は 10 年以上の歴史があるにも関わらず、初歩的なミスで CanSat ミッションが失敗に終わるチームが多く、改善が望まれる。(教育プログラムの構築に先立ち、UNISEC 学生代表らからミッション成功率向上のための対策立案の相談があった。)

上記(v)に関して、表 1 に著者らの教育プログラムが導入される以前の ARLISS で、「カムバックコンペティション」に参加した日本チームの制御履歴の提出率を示す。ゴールに CanSat が戻ってきた確率ではなく、ミッション後にデータの保存が確認できた確率を示している。極めて低い水準で推移しており、多くの日本チームが基礎的な失敗に終わっていることがわかる。

表 1 2006～2009 年の ARLISS カムバックコンペでの制御履歴提出率  
([17]掲載の情報をもとに作成)

	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
総打ち上げ数	23	19	32	17
提出数	7	7	14	5
提出率	30.4%	36.8%	43.8%	29.4%

### 2.2 2 つの失敗原因

CanSat ミッションの成功率の低さの原因は、次の 2 点にあると著者らは考えた。第一に、渡米前の日本での CanSat システムの検証の不十分さがある。例えば、教育プログラムの構築に先立ち 2009 年に CanSat 開発を経験した日本の 6 チームにアンケートを実施したところ、全 6 チームが本番での失敗の原因として試験の不十分さに言及していた。第二に、CanSat 開発に関して技術および開発方法を指導や支援する体制の不十分さがある。図 1 に、著者らの教育プログラムが導入される以前の UNISEC 内での CanSat 支援体制を模式的に示す。基本的に各団体は独立に開発を進めており、団体間で知見が共有される機会は少ない。団体内で CanSat 開発の技術や開発手法が文書として蓄積されていたり、CanSat 開発経験者が新人メンバーに対して密接に指導を行ったり、開発審査会を提供したりする団体もある(図 1 の団体 A)。一方で、そのような支援が希少な団体(図 1 の団体 B)も存在する。また UNISEC 卒業生の団体である UNISAS も存在するが、CanSat 開発に関して社会人となった卒業生が支援に参加することは稀である。

したがって教育プログラムを導入して CanSat ミッションを成功に導くには、CanSat システムの検証を可能にする方法を特に重点的に教えることと、開発を支援する体制を整えることの 2 点が有効と著者らは考えた。

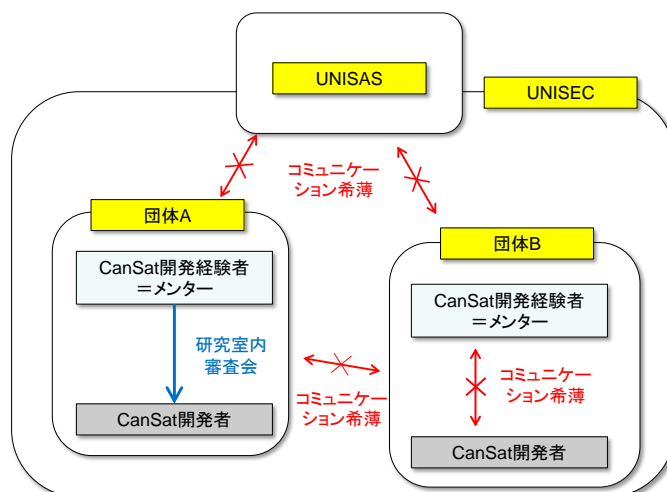


図1 団体内外でのコミュニケーションが希薄な開発支援体制

### 3. 構築した SE 教育プログラム

#### 3.1 教育プログラムの目的

著者らは CanSat 開発を通じて小型宇宙システム開発の方法を学ぶ教育プログラムを構築し、これを SPindle (Systems Engineering / Project Management introductory lesson) と名付けた。SPindle の構築にあたって、次の 2 つの目的を設定した。

目的 1： SE の体系を、システム開発の実践を通して教育すること

目的 2： CanSat でのミッションを確実に効率よく成功に導くための支援を行うこと

前者は 1.1 節で述べた、体系に基づく教育を行う意義に対応するものであり、後者は 2.2 節で述べた CanSat 開発における課題を克服するための目的である。

上記 2 つの目的は短期的には必ずしも同時に達成されるものではない。図 2 に、CanSat 開発に求められる知識と能力を模式的に示す。図が示す通り、単一分野の知識に基づいて各サブシステムを開発する確かな技術があって初めて、SE が有効に活用できる。上記「目的 2」だけを目指すのであれば、複数の単一分野の知識を新人に密接に教育した上で、サブシステム間の連成が少ない単純な CanSat システムを開発させれば、短期でミッション成功率を向上させられるだろう。しかしそのような方法だけではより複雑なシステム開発を成功させる技能については教育することは難しい。また、CanSat 開発に必要な単一分野の知識については様々な教科書・マニュアルが日本国内でも入手できる一方で、CanSat 開発に必要な SE に関してはいまだ体系は示されておらず、学べる機会が極めて限られている。したがって本教育プログラムではまず、上記目的 1 を特に重視して教育プログラムを構築する。目的 2 に関しては、各団体内での単一分野の知識教育を促す仕組みを作り、中長期的に CanSat ミッションの成功率が向上することを目指すこととする。

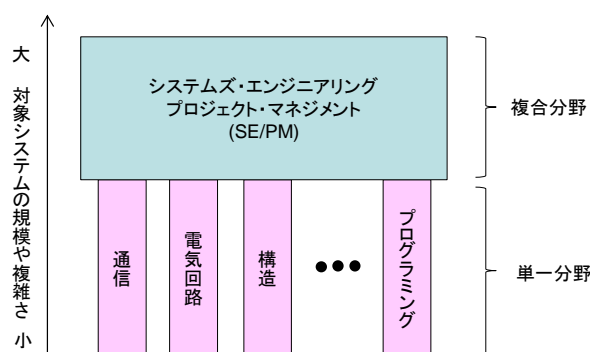


図2 CanSat 開発に求められる能力と知識 ([13]の図を参考に作成)

### 3.2 教育項目と開発支援体制

上記 2 つの目的の達成を目指して、以下に述べる教育プログラムと開発支援体制を構築した。まず教育プログラムに関して述べる。9月中旬に開催される ARLISS を目指すチームの多くは 4 月～5 月に CanSat 開発を開始し、開発の期間は極めて短い。その時間制約の中で、CanSat 開発全過程を網羅する教育プログラムを提供することは難しい。そこで、2.2 節に述べたシステムの検証が不十分である現状を改善することを特に目指し、以下の 3 つの教育項目に限定した教育プログラムを構築、運営することにした。

教育項目 1： ミッション定義・要求仕様の明確化

教育項目 2： 検証に余裕を持たせたスケジュール作成と管理

教育項目 3： 検証計画・検証項目の明確化

CanSat 開発過程における上記教育項目の位置づけを図 3 に示す。検証計画を立案する方法論を指導するが（教育項目 3）、検証を実行するためには、検証に必要な時間を確保する技術が求められるのでこれを指導する（教育項目 2）。さらに、ミッション定義・要求仕様を明確にしておかなければ検証計画を適切に立案することが難しいため、開発初期でのミッション定義・要求仕様の明確化の方法を教える（教育項目 1）。

次に、SPindle では 2.2 節で問題を指摘した、コミュニケーションが希薄な開発支援体制の改善も実施した。図 4 に SPindle が構築した CanSat 開発支援体制を模式的に示す。SPindle 参加チームは後述のフォーマットを用いて開発資料を残し、その資料を用いて他の団体や UNISEC 卒業生である UNISAS メンバーと情報交換を行いながら開発を進める。また、各団体での CanSat 開発経験者（メンター）の役割を、(I) 単一領域の技術指導と、(II) UNISAS による開発審査会に向けて SE について開発メンバーと共に考えること、の 2 点に明確化した。

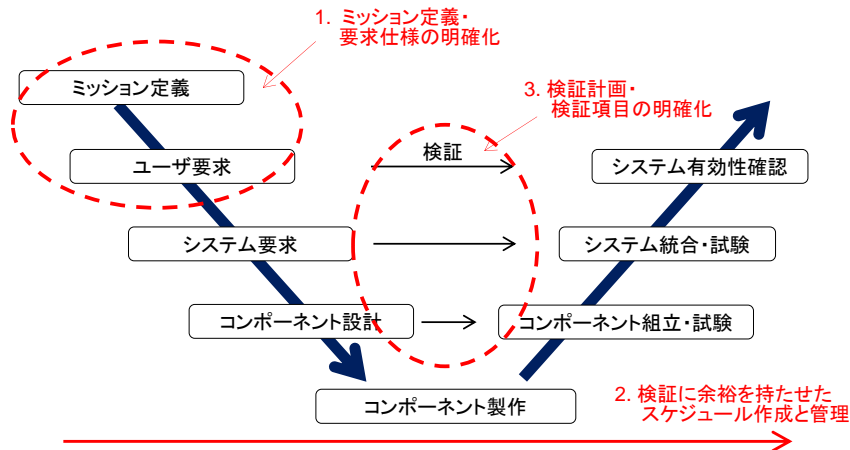


図 3 開発プロセスにおける教育項目の位置付け

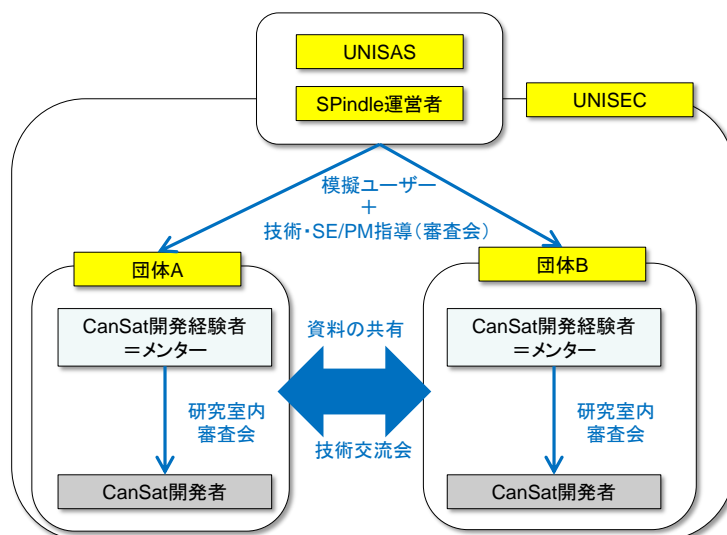


図4 SPindleが構築した開発支援体制

### 3.3 具体的な教育プログラム

構築した教育プログラムは、大きく分けて SE 講習会と開発審査会からなる。初回の 2010 年と第 2 回の 2011 年は概ね同一の内容であるので、以下では主に 2011 年の内容について述べる。2010 年から 2011 年への変更点、および 2011 年から 2012 年への変更点について、それぞれ詳細を付録にまとめて示している。

#### 3.3.1 SE 講習会

表 2 に実施した 2 度の SE 講習会の内容を示す。3.2 節に述べた 3 つの教育項目をまずは座学で学ぶ内容となっている。宇宙業界で実際のシステム開発の経験がある SE の専門家 2 名が主に講師を務めた。さらにこれらの SE 講習会の動画を公開して反復学習を可能にすることで、開発メンバー・メンター・社会人審査員ら、SPindle に参加する全員が、共通基盤としての知識を獲得・維持できるようにした。2011 年は、2010 年の受講生の意見を反映し、前年より事例紹介を増やした内容とした。

表 2 SE 講習会の実施内容

2011 年度日程	講習会	内容	時間
5/11	SE 序論 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ミッション定義・要求仕様の明確化 (Goal Statement, BrainStorming, Scenario Graph, Concept Selection などミッション創出法の演習, 要求仕様作成のプロセスと重要点の解説)</li> <li>✓ スケジュール作成・管理 (料理レシピを題材にした WBS 作成の演習)</li> <li>✓ フィージビリティスタディの事例紹介 (BBM 開発を通じた要求分析)</li> </ul>	2 時間
5/31	SE 序論 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 過去のチームの失敗事例の分析</li> <li>✓ 検証計画・項目の明確化/EM, FM 試験の事例紹介 (検証ケース作成の重要点を例を挙げて解説)</li> <li>✓ 技術文書の書き方講座 (文書を残す意義と、意義に応じた作文法の解説)</li> </ul>	2 時間

#### 3.3.2 開発審査資料による情報共有と社会人による開発審査会

上記 SE 講習会で学んだ開発過程に沿って CanSat 開発を進める中で、残すと良い情報を記述できる 7 つの文書テンプレートを提供した。表 3 にその 7 種を示す。これらの文書は後述の開発審査会にも用いるものだが、基本的に開発する学生にとって必要な情報だけを文書に記述すれば良く、開発審査の

ために改めて文書を作成する必要はない構成とした。参加チームは、開発審査会ごとにこれら 7 種の資料を書き加え、修正する。最終の LLR (Lessons Learned Review)において資料が完成し、そのまま報告書となるような章立ておよび構成になっている。これらの開発審査資料はクラウドサービスを用いて審査員と共有されるだけでなく、SPindleに参加する全チームにも公開され、他のチームの文書を参考にして開発を進められる形とした。

毎年 9 月に開催される ARLISS 本番に向け、いつまでに開発プロセスのどこまで完了していなければならないかは日数を逆算することである程度算出することができ、その結果はどのチームも概ね同一である。そのため、その開発フェーズに対応させる形で表 4 のように 3 回の開発審査会を設定した。それぞれの時期にあわせ、各チームは各フェーズでの開発成果を文書としてアップロードし、審査員と共有する。審査会に先立ってまず審査員が開発審査資料を読んで資料(6)「コメント対応表」にコメントを記す。次に審査会を開催し、前述のコメントを元に開発チームと審査員でともに対応を協議する。審査会はインターネットを用いて同時通話が可能なシステム (Skype) を用いて実施した。2010 年は文書のみでのやり取りでの開発審査であったが、2011 年に Skype を導入してコミュニケーションを円滑化した。また、審査会の回数は 2010 年は 5 回であったのを、2011 年は 3 回に減少させた。

審査会では審査員がその分野において、学生以上の知識と技能を持っている必要がある。そのため、UNISAS のネットワークを利用して CanSat の開発を経験した社会人からボランティアを募り、2010 年度は総勢 13 名、2011 年は 21 名の社会人が審査員を務めた。表 5 に審査員の現所属の内訳を示す。

表 3 7 種の開発審査資料

資料番号	開発審査資料名
(1)	ミッション計画書
(2)	プロジェクト管理計画書
(3)	システム仕様書
(4)	設計書・運用計画書
(5)	試験計画・結果報告書
(6)	審査会コメント対応表
(7)	ミッション完了報告書

表 4 開発審査

2011 年度日程	審査会名称	内容
6 月中旬	第 1 回開発審査	開発体制・ミッション定義・要求仕様を文書および Skype で確認
7/23	UNISEC 総会にて技術交流会	開発中の機体を持って、社会人審査員・他チームメンバーと意見交換
8 月上旬	第 2 回開発審査	設計と検証計画・結果を文書および Skype で確認
9/12~15	ARLISS 本番	-
10 月中旬	Lessons Learned Review (LLR)	プロジェクトの自己評価を文書および Skype で確認 (2010 年度は口頭発表会に参集)



表 5 開発審査の審査員の所属

実施年度	所属内訳と人数	合計人数
2010	民間企業 2名	13名
	JAXA 7名	
	大学 4名	
2011	民間企業 10名	21名
	JAXA 9名	
	大学 2名	

## 4. 実践からの教訓

### 4.1 教育プログラム実施の経過

初回の 2010 年度は SPindle に全国 8 大学 9 チームが参加し、うち 8 チームが ARLISS へ出場した。2011 年度は 4 大学 4 チームが SPindle に参加し、うち 3 チームが ARLISS へ出場した。それぞれの年度で ARLISS へ出場できなかった 1 チームは、主に技術力の不足から、UNISEC による安全審査通過前に開発を断念した。

各 SE 講習会には概ね 20~30 名が参加した。さらに多くの人数が動画を視聴したと思われる。さらに初年度の 2010 年度は最終の開発審査である LLR を、日本大学の講堂を会場にして口頭発表会として開催したところ、全 9 チームからの参加があった。開発メンバー、社会人審査員、および UNISEC 教員を合わせ 40 名を超える参加者が会場に集って議論した。図 5 に 2010 年の初回の SE 講習会と、最終審査会である LLR に集まった参加者の様子を示す。



(a) 2010 年 SE 序論第一講の参加者



(b) 2010 年 Lessons Learned Review の参加者

図 5 SPindle SE 講習会と口頭発表会の様子

### 4.2 教育プログラムの成果

3.1 節に述べた 2 つの目的に対応する成果として、目的 2 に対応する「CanSat ミッションの成功率の向上」については、十分に効果を確認できていない一方で、目的 1 に対応する SE 体系の教育に関しては以下の通り成果が残っている。

#### 4.2.1 成功率

2.1 節に示した SPindle 導入以前のカムバックミッションを選択した日本チームの「制御履歴提出率」と比較するため、SPindle を導入した 2010 年、2011 年の同制御履歴提出率を表 6 に示す。日本から参加した全チームの結果と、そのうち SPindle に参加したチームの結果を示す。2010 年は SPindle に参加して ARLISS に出場した 8 チームのうち 7 チームが、2011 年は 3 チームのうち 2 チームが、カムバックミッションを選択した。表 6 から、SPindle の導入によって特に成功率が上がったという結果にはなっていないことがわかる。

この理由として、3.1 節に述べたとおり CanSat 開発にはまず複数の単一分野の知識をもとに確実なサブシステムを作る技術が欠かせないが、CanSat 開発で初めてマイコンを触るような初心者が多数を占めるチームではその技術がしばしば欠如し、システム開発手法を学ぶ準備ができていないことが考えられる。そこで2年目の2011年では、図4に示す通り、各団体でCanSat経験者にメンターとしてSPindleプログラムに参加してもらい、主に単一分野の技術について密接に指導してもらうことを依頼した。このメンターの導入もおそらく一因となって、2011年にSPindleに参加したチームは全3チームがARLISSでミニマムサクセスを達成した。ただし2011年はSPindle参加チーム数が少なかったため、SPindleの導入とミッション成功率に真に相関があるかは十分に明確でなく、継続的な試行が必要である。

表 6 2010～2011年のARLISSカムバックコンペでの制御履歴提出率  
([17]掲載の情報をもとに作成)

	2010年		2011年	
	全チーム	SPindle参加チーム	全チーム	SPindle参加チーム
総打ち上げ数	27	15	34	4
提出数	5	3	11	2
提出率	18.5%	20%	32%	50%

#### 4.2.2 SEに関する学びと知見の蓄積

前述の通り目的2に対応する成功率に関しては明確な効果をまだ十分に確認できていないものの、SPindleの開始によってSE体系を学び、そしてその学びの過程で学生・社会人が気付いた事項を蓄積し、体系化していく試みは確実に前進した。表7に、2010年・2011年のLLRで社会人審査員と学生のそれぞれが書いたSPindleに対する意見の一部を示す。3.2節に述べたSPindleの3つの教育項目の理解が進んだことがわかる。一方、問題点も指摘されておりこれについては次節で議論する。

3つの教育項目について学生の理解が進んだことは、LLRにおける学生自身の失敗分析を見ても感じられる。表8に、LLRにおける失敗の要因分析と、学生の分析に対する社会人審査員のコメントを3例示す。これらのやり取りを見ると、SPindleの導入で2つの効果があったことがわかる。第一に、学生がシステム開発の体系を学んだことで、その枠内で系統的に思考することが可能になっている。第二に、開発過程で用いる用語を統一したことで、開発チーム外の社会人審査員とも、円滑なコミュニケーションが可能になっている。

また知見の蓄積という意味でも成果があった。2010年、2011年のSPindleの実施により、表3に示した7種の統一文書テンプレートに沿った文書が残り、今後CanSatを開発する学生がデータベースとして参考にできる。(但し、閲覧に際しては秘密保持誓約書を提出してもらっている。)さらに、2010年に蓄積された資料の中で著者らが特に重要と考えた知見を抽出し、2011年のSE講習会で共有することも実施した。SPindleは、CanSatシステム開発に関する知見を系統的に蓄積し、抽出することを継続できる仕組みを創出したと言える。

表 7 Lessons Learned Review における参加者からのコメント (抜粋)

社会人審査員からのコメント
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 反省で挙げられた内容が SPindle の 3 つの狙いに対してとても的を得た言葉が多く、SPindle 参加者が得たものの大きさを感じた。</li> <li>✓ 思った以上に LLR の報告を聞いて、SE/PM の重要性を理解している学生が多いと思った。</li> <li>✓ 今はまだ参加した学生の皆さんにこのことの有用性が理解されていない部分もあるのかも知れませんが、これを続けていき、かつ SPindle の重要性が理解されていくと、どんどん良くなっていくと思う。</li> <li>✓ 物作りゆえの楽しさや、独創性にとらわれてしまっているチームがあり、その状況では SPindle 参加は負担に感じるばかりであったらう。</li> </ul>
参加した学生からのコメント
<p><b>良かった点：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ SE/PM 手法の体系的なやり方を学べた。</li> <li>✓ SE や PM について、自分が思っているより周囲の人・大学は意識していないことに驚いた。</li> <li>✓ 外部の方々の意見を聞くことができ、設計のあいまいな箇所が浮かび上がった。</li> <li>✓ OB の方々や JAXA の方々や先生方のコメントをいただける機会があり、参考になった。</li> <li>✓ 審査会でスケジュールの見直しを行うことができた。</li> <li>✓ BBM レベルでの試験が充実したように思える。それにより EM での試験での注目点が減り、一つ一つ丁寧にバグを取り除くことができた。</li> <li>✓ チーム内の情報の共有化にもなった。</li> <li>✓ 体系化された資料が残り、過去の財産になる。</li> <li>✓ 色んなチームの開発が見れたのは有益であった。このように全体でフィードバックできることは全体のレベルアップになる。</li> </ul> <p><b>悪かった点：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 文章作成量が多い。開発人数などの関係から負担が多くなる場合がある。</li> <li>✓ 文書を書く負担を減らすため、より詳細にテンプレート化して欲しい。</li> <li>✓ 書類作成の為に開発の時間が減ってしまった。</li> <li>✓ レビューの重さによっては、レビューの提出自体が目的となってしまって、本来の目的である詳細な検証や仕様項目を見落とししてしまう場合がある。</li> <li>✓ 良くも悪くも愚直にコメントに従ってしまった。ARLISS の成功が目的なら、必要十分のみに絞ることが必要だった。</li> </ul>

表 8 Lessons Learned Review での学生の失敗の要因分析と審査員からのコメントの例

失敗事例	学生による要因分析	審査員のコメント
GPS データを処理するプログラムに誤りがあり、移動範囲が 500m を超えると正しく計算しないアルゴリズムとなっていた	<b>検証条件の不備：</b> 日本で移動できる範囲でしか試験していなかった	例えば、ダミーの GPS データをプログラムに与えれば、砂漠の状況を模擬できる
過去と同じ制御機構を採用したので試験をせずに本番に望んだところ、動作しなかった	<b>検証計画の不備：</b> SE 講習会で検証は「設計」「製造」両方に行うと習ったが、後者が未実施だった	完全コピーができるソフトウェアでない限り、基本的に必ず実機での試験が必要
空中でパラシュートを分離してしまい、自由落下して CanSat が大破した	<b>スケジュール管理の不備：</b> 天候不良等で日本で試験できないまま本番を迎えた	スケジュール管理の不備もあるが、むしろ未検証項目が何かを認識していなかった点で、検証計画に漏れがあったのではないかと

### 4.3 顕在化した問題点とその対策

2010年、2011年の2年間のSPindleの実施の過程で、大きく分けて2点の問題が顕在化した。第一の問題点は、開発審査資料を執筆することや、開発審査会に臨むという仕組みが形骸化したことである。一部を表7に示した通り、学生からの意見でも、「作成する文書が多い」「審査会への提出自体が目的となってしまった」との意見が多かった。実際はSPindleでは開発審査資料の作成量は指定しておらず、学生が必要とを感じる情報だけを残せばよいという自由度の高い文書テンプレートを採用している。「(自由度が高すぎるので)より詳細にテンプレート化して欲しい」との意見も複数あり、これもSPindleの教育内容が形骸化して理解されてしまっていることを示している。2010年のSPindleには9チームが参加していたが、2011年は参加がわずかに4チームへと減少してしまったのは、2010年に資料作成・審査会を単なる負担と感じた学生が多かったことが大きな原因であると考えている。

対策としては、学生が必要性を自ら考えた上で、自発的に資料を残し、開発審査会に臨めるように教育プログラムを改変することが考えられる。また、そもそも「CanSat ミッションを絶対に成功させたい」という意識が、UNISEC黎明期にCanSat開発を経験した社会人審査員と比較すると、希薄な学生が見受けられた。本気でCanSat開発に挑める仕組みを、現在の学生に対しても提供することが、学生の学びを深めるためには必要である。

第二の問題点としては、4.2.1節で述べた通り、複合分野を統合するシステム開発の学びのためには、単一分野での技術を持っていることが前提だが、その教育体制が不十分であることである。マイコンキットを用いるなどして各団体独自で教育を実施している[6-9]が、この教育手法についてもSPindleのようにUNISECで共有を図っていくことが求められる。また、そもそも単一分野の基礎技術からUNISEC独自で教育しなければならない日本の教育体制に問題があるとも言える。SPindleのような試みを通してシステム開発の教育に求められる項目を明確化することで、初等教育から高等教育の在り方を、広く国内外へ提言していくことが可能となる。

### 4.4 2012年度の状況と今後

3.2節で述べたような教育項目を学べる機会を提供することと、知見の蓄積・抽出を可能にするCanSat開発の支援体制を継続的に運営することは意義が高いと考え、著者らは2012年度もSPindleを開始している。4.3節に述べた問題点を踏まえ、2011年と比較して2012年度は大きくは以下の2点の改変を加えている。より詳細な変更点については、付録にまとめている。

第一に、社会人審査員による開発審査の実施の是非や、実施する場合の回数・時期については開発メンバーが独自に決定すれば良く、開発審査資料も自分たちで考えて必要なものだけを執筆すれば良いとしている。これらの改変により、開発審査の形骸化の問題は改善が見込めるが、系統的な開発審査資料が残りにくく、知見の蓄積・継承という面では不利となる。第二に、学生の意識改革を目指し、近い将来の惑星間探査で必要となる技術を開発するためのCanSat ミッションを、UNISASから学生に対して提案する試みを行った。しかし現状(2012年7月本稿執筆時点)で、この惑星間探査ミッションを選択した開発チームは今年には居ないため、来年に向けて広く告知を行っていく。

さらに、2012年度は、過去2回のSPindleへ参加した複数の団体が、SPindleの教材や開発審査資料を独自に発展させて、SEの手法を取り入れたCanSat開発を実施している。このようにSPindleから派生して各団体で発展させたシステム開発手法および教育手法を団体間で共有し、互いに洗練させていく試みも今後は必要となる。

## 5. おわりに

本稿では実践的なCanSat開発を通してシステム開発の体系を学ぶ教育プログラムの構築と、2年間の運営について、著者らの経験を述べた。成果も残った一方で、複数の問題点も明らかになった。本稿に述べたような教育プログラムの意義や実施方法について今後も継続的に議論し、方法を改善していくことが求められる。

## 付録

本付録では、まず、4章に述べた SPindle の 2010 年と 2011 年の実施内容の違いを、表 9 にまとめて示す。変更の理由と、変更の結果についても記す。次に、原稿執筆時に実施中である 2012 年において新しく始めた試みについて表 10 に示す。最後に、本文中に用いた略語の一覧を表 11 に示す。

表 9 2010 年と 2011 年の SPindle 実施内容の違い

カテゴリ	2011 年の内容	2010 年と異なる理由と結果
SE 講習会	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ SE の解説に、CanSat 開発の事例を取り入れた。</li> <li>✓ 過去の失敗事例を紹介。</li> <li>✓ 技術文書の書き方を指導。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ 2010 年の講習の内容はシステム開発一般に関するもので、CanSat 開発への適用法が明確でなかった。事例の提示により、解説に具体性が増した。</li> <li>→ 2010 年の SPindle 開発審査資料をすべて見直すのは時間がかかるため、特に重要な情報を講師が抽出して示した。</li> <li>→ 2010 年度の開発審査資料には極めて長文を書いたチームが多く、作成する側も審査する側も、負担が大きかった。そこで 2011 年の講習会では、要点だけを短文で記述する効率的な作文法を指導した。</li> </ul>
開発審査資料	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2010 年の全チームの開発審査資料を閲覧可能にした。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ 初年度の 2010 年の知見の蓄積を、2 年目の 2011 年に活用できるようにした。</li> </ul>
開発審査会	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 回数を全 5 回 (2010 年) から、全 3 回 (2011 年) へ減らした。</li> <li>✓ 文書だけの交換 (2010 年) ではなく、Skype を用いたコミュニケーション (2011 年) を導入。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ 2010 年度、開発審査会が負担になるという声から多かつたため変更した。2011 年度のチームは 3 回で適当だったと評価した一方で、審査会の間隔が長い必要の手戻りが大きくなり、審査会でのコメントを適切に活かすににくい状況も生じていた。</li> <li>→ 2010 年の開発審査会では、文書上の記述の不備に関する指摘が社会人審査員から多くなされてしまい、SE の要点を学生が理解しづらい状況だった。そこで Skype を用いて口頭のコミュニケーションを行い、どの指摘項目をなぜ優先的に対応すべきか等の意見交換を可能にした。</li> </ul>
メンター	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 新たに「メンター」という存在を定義。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ 2010 年は単一分野の技術力の欠如により、SE についての学びにうまく到達できなかったチームがいたと著者らは感じた。したがって、メンターの規定により各団体内での技術指導体制の整備を促した。</li> </ul>
参加チーム数	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2010 年は 9 チームが SPindle に参加し、うち 8 チームが ARLISS に出場したのに対し、2011 年は 4 チームが SPindle に参加し、うち 3 チームが ARLISS へ出場。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ 参加チームが大幅に減少したのは、2010 年度に参加したチームのうちの多くの学生が、「SPindle は開発に不要な文書作成・開発審査を強いる仕組みである」との理解をしたためであると考えている。実際は開発審査資料は、学生たちが必要と考える情報だけを残せば良いとしている。2011 年はこの点を強調して伝えた結果、文書作成が負担だったという声はなかった。</li> </ul>

表 10 2011 年と 2012 年度の SPindle 実施内容の違い

カテゴリ	2012 年の内容	2011 年と異なる理由と結果の予想
SE 講習会	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2011 年の講習会の資料・動画を公開し, 2012 年の講習会参加者はまず動画で予習をしてきてもらった。<sup>‡</sup>脚注</li> <li>✓ 第 1 回 SE 講習会で WBS 作成法を指導.</li> <li>✓ ロジカルシンキングに関するレクチャービデオ (90 分×2) を公開.</li> <li>✓ 第 2 回 SE 講習会で参加チームに相談セッションを開催.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ 動画を用いて自宅等での受講を可能にすることで, 各自の理解度に応じた学習を可能にした. また, 参加学生・メンター・社会人審査員が同一の教材を共有することで, コミュニケーションの円滑化を促進できる.</li> <li>→ 過去 2 年間の開発審査資料を見ると, WBS 作成に難航しているチームが多かったため, より実践的な助言を行った.</li> <li>→ WBS 作成の基礎となるロジカルシンキングを習得するには, SPindle の SE 講習会だけでは時間が足りないと考え, 補習用の動画教材を提供した.</li> <li>→ 必要性を感じながら SPindle の仕組みを利用してもらえるように, 各チームの現状を発表してもらい, チーム事情に応じた SE の活用法を助言した.</li> </ul>
開発審査資料	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2011 年度と同一の開発審査資料テンプレートを提供はするが, その利用の仕方はチームごとに自由に決定してもらった.</li> <li>✓ 自分たちは開発審査資料を作成しなくても, 秘密保持誓約書を提出すれば過去の資料を閲覧可能とした.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ 自分たちが必要と考える情報を残すのが SPindle の開発審査資料であるという意識を強く持ってもらうことを狙った. この変更により, 文書作成を負担と感じる学生は減るだろうが, 一方で体系的な文書が残りにくくなる危険がある.</li> <li>→ 2010 年~2011 年の SPindle が残した知見の蓄積を, より多くの団体に利用してもらうことを狙った. しかし他チームの情報は参考にするが, 自分のチームの情報は記録しないし公開もしない, という一方のコミュニケーションが多発する危険がある.</li> </ul>
開発審査会	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 希望すれば 2011 年と同様の社会人審査員による Skype での開発審査を開催できるが, その回数, 時期はチームごとに独自に調整してもらう.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ 開発審査の意義を参加学生自らが考え, 自分たちの CanSat 開発に一番うまく活かす方法を SE 講習会講師や社会人審査員と相談しながら自ら見出してもらう形とした. 形骸化を防ぐことができ, 深い学びを可能にすると予想している.</li> </ul>
ミッション提案	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ UNISAS から, 惑星間探査ミッションを提案した.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ 近い将来の宇宙探査に求められる技術を社会人審査員と共に CanSat を用いて開発し, 本気度を高めることを狙った. しかし, 2012 年度は提案に応じたチームはなかった.</li> </ul>
参加チーム数	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Skype で開発審査会を開いているのは 2 チームであり, 他に複数のチームが過去の資料の閲覧のみを希望.</li> <li>✓ 上記チームの以外にも, 過去の SPindle に参加したチームが団体内で独自に SE 教育を実施中.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ 開発支援のリソースがある団体では, 下記のように団体内で独自の支援を実施する傾向がある. 一方で CanSat 開発の経験が少ない団体はまず 2012 年に資料の閲覧のみをして, 翌年以降に開発審査会などの利用を検討するだろうと予想している.</li> <li>→ 可能な団体は, 各団体内で独自の SE 教育を実施することはたいへん望ましい. ただし, 他団体との交流を促し, 方法論を標準化していく仕組みが別途必要である.</li> </ul>

<sup>‡</sup> 講習会の動画・資料を UNISEC 会員に限り公開している. 閲覧希望者は, 所属・使用目的を明記の上, 本稿筆頭著者まで連絡のこと.

表 11 略語一覧

略語	意味
ARLISS	A Rocket Launch for International Student Satellites
BBM	Bread Board Model
EM	Engineering Model
FM	Flight Model
LLR	Lessons Learned Review
PM	Project Management
SE	Systems Engineering
SPindle	SE/PM Introductory Lesson
UNISAS	UNISEC Alumni Association
UNISEC	University Space Engineering Consortium
WBS	Work Breakdown Structure

### 謝辞

教育プログラム SPindle の構築にあたって支援下さった狼嘉彰氏, 小川亮氏, 審査員として参加下さった赤城弘樹氏, 秋山恭平氏, 荒木友太氏, 粟田晃平氏, 稲川慎一氏, 宇井恭一氏, 江野口章人氏, 梯友哉氏, 河村知浩氏, 小林雄太氏, 須崎祐多氏, 永井将貴氏, 永峰健太氏, 中谷幸司氏, 船瀬龍氏, 舟根司氏, 三輪章子氏, 山田興人氏, 遊佐淳也氏, 横田一毅氏, 四元和彦氏, 学生代表として運営に参加してくれた須藤雄哉氏, 土岐周平氏, 梯氏, そして本教育プログラムに参加下さった全国の CanSat チームの参加者・関係者に深く感謝する。また, 日本大学 宮崎研究室の皆様には 2010 年に報告会会場をご提供いただいた。さらに本研究の一部は文部科学省グローバル COE プログラム「環境共生・安全システムデザインの先導拠点」の援助により行われた。記して謝意を表する。

### 参考文献

- [1] N. G. Leveson, *Safeware: System Safety and Computers*, Addison-Wesley Professional, 1995.
- [2] 中須賀真一, 松永三郎, 「CanSat 計画一日米大学における手作り小型衛星への挑戦」, 日本航空宇宙学会誌, 48(562), pp. 589-596, Nov. 2000.
- [3] 八坂哲雄, 「大学における宇宙実地教育 - UNISEC によるもの作り活動」, 日本航空宇宙学会誌, 第 53 巻 613 号, pp. 57-59, 2005.
- [4] Shinichi Nakasuka, Nobutada Sako, Hironori Sahara, Yuya Nakamura, Takashi Eishima, Mitsuhiko Komatsu, "Evolution from Education to Practical Use in University of Tokyo's Nano-satellite Activities," *Acta Astronautica*, 66(7), pp. 1099-1105, Apr. 2010.
- [5] 中須賀真一, 「東京大学における超小型衛星開発の歴史と超小型衛星設計および開発プロセスにおける議論点について」, *UNISEC Space Takumi Journal*, 2(2), Jun. 2012, pp. 12-26.
- [6] 中島佑太, 七森泰之, 高橋正樹, 吉田和夫, 「慶應義塾大学における CanSat プロジェクトへの取り組み」, 日本機会学会 第 16 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集, No.07-96, 2008, pp.55-59.
- [7] 井上祥子, 藤井大輔, 亀村裕之, 相浦啓司, 屋宮拓海, 斉藤美幸, 間戸場包弥, 「超小型衛星開発の技術伝承における新入生教育の試み」, 1<sup>st</sup> UNISEC Space Takumi Conference, UNISEC2011-04, 2011.
- [8] 別所昂, 荒木俊輔, 西村剛, 稲垣章弥, 窪田智之, 南部陽介, 大久保博志, 「先進電源システム実証衛星 OPUSAT の開発について」, 日本航空宇宙学会 第 55 回宇宙科学技術連合講演会, 1L12, 2011.
- [9] 別所昂, 「大阪府立大学 SSSRC “OPUSAT” 開発報告」, University Space Engineering Consortium Workshop 2011, UNISEC 11-06, Dec. 2011.

- [10] Mark Turnquist, *et al.*, “Designing a Systems Engineering Educational Program Using Academic/Industry Collaboration,” INCOSE International Symposium 2000, Minneapolis, MN, Jul. 2000.
- [11] David Miller, Doris R. Brodeur, “The CDIO Capstone Course: An Innovation in Undergraduate Systems Engineering Education,” Proceedings of the 2002 American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition, 2002.
- [12] SE Handbook Working Group, *Systems Engineering Handbook – A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, INCOSE-TP-2003-002-03.2.1, International Council on Systems Engineering, Jan. 2011.
- [13] 神武直彦, 前野隆司, 西村秀和, 狼嘉彰, 「学問分野を超えた『システムデザイン・マネジメント学』の大学院教育の構築—大規模・複雑システムの構築と運用をリードする人材の育成を目指して—」, *Synthesiology*, 3(2), pp. 112-126, May 2010.
- [14] 広瀬茂男, 「東京工業大学における創造性教育」, 日本ロボット学会誌, 16(4), 1998, pp. 447-451.
- [15] 広瀬茂男, 「実習・実感・創造教育の試み」, 日本機械学会誌, 94(875), Oct. 1998, pp. 874-879.
- [16] 中尾政之, 濱口哲也, 草加浩平, 「創造設計の技法—東大創造設計演習に学ぶ設計の奥義」, 日科技連出版社, 2008.
- [17] UNISEC ウェブサイト, <http://www.unisec.jp/>.