

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^{1,*†}, 神武直彦², 白坂成功², 伊藤琢博³, 山田皓司⁴, 成田伸一郎⁵

¹ 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

² 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

³ 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

⁴ 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

⁵ 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提供している。本プログラムでは学生が SE の体系に基づいて CanSat の開発手法を考え、開発過程を記録に残し、社会人からの助言をもらいながら開発を進める。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^{1,*†}, Naohiko KOHTAKE², Seiko SHIRASAKA², Takahiro ITO³,
Koji YAMADA⁴, and Shinichiro NARITA⁵

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

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

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

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

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

* Corresponding author. Assistant Professor, Member UNISEC.

† E-mail: hsakamoto@mech.titech.ac.jp.

SUMMARY

The authors have been offering a Systems Engineering (SE) educational program for students who develop small model satellites, CanSat. The educational program enables for students to think about their development process, to record their development activities, and to obtain advices from professional Aerospace engineers. 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することができ、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、広く行われている[10-11]。SE の体系化は国際学会 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顕在化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要望があった。)

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である。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ことは少ない。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。

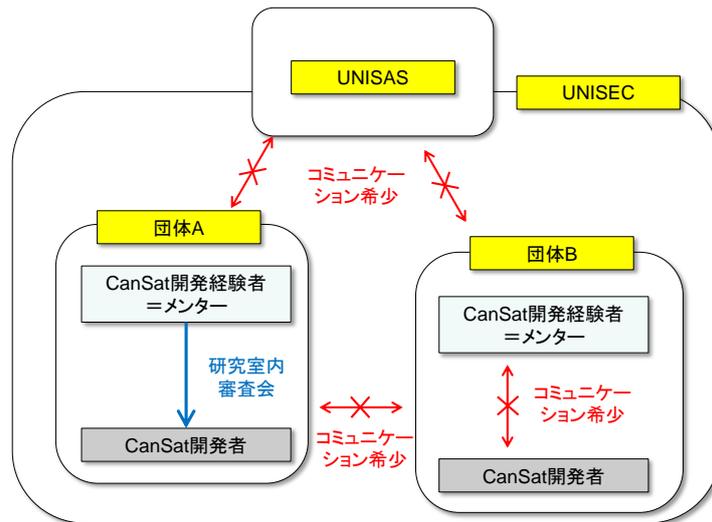


図1 団体内外でのコミュニケーションが希薄な開発支援体制

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サブシステムを開発する確かな技術があつて初めて、SE が有効に活用できる。したがって上記「目的2」だけを目指すのであれば、まず複数の単一分野の知識を新人に密接に教育することが、短期的にミッション成功率を向上させる方法である。しかしそのような教育だけでは、より複雑なシステム開発を成功させることは難しい。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に示されておらず、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上記目的1を特に重視して教育プログラムを構築し、目的2に関しては、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。

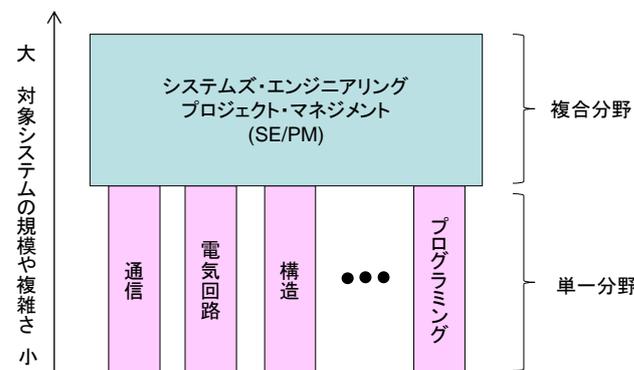


図2 CanSat 開発に求められる能力と知識 ([13]の図を参考に作成)

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、開発の期間が短期であるため、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。したがって 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。

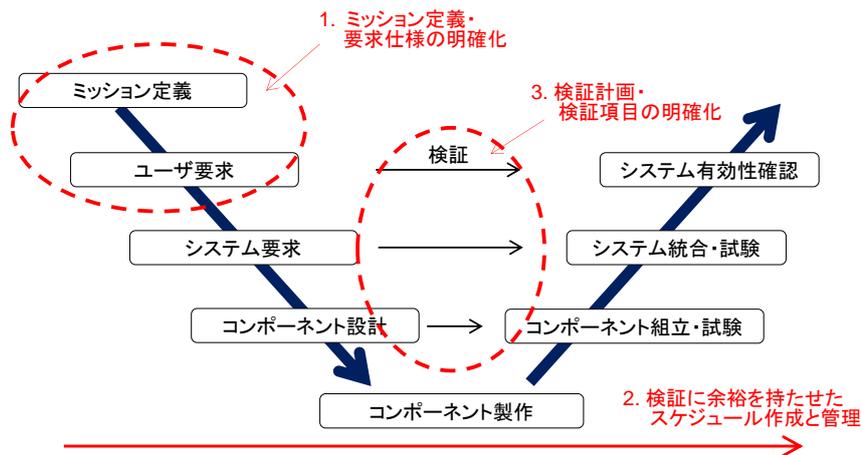


図3 開発プロセスにおける教育項目の位置付け

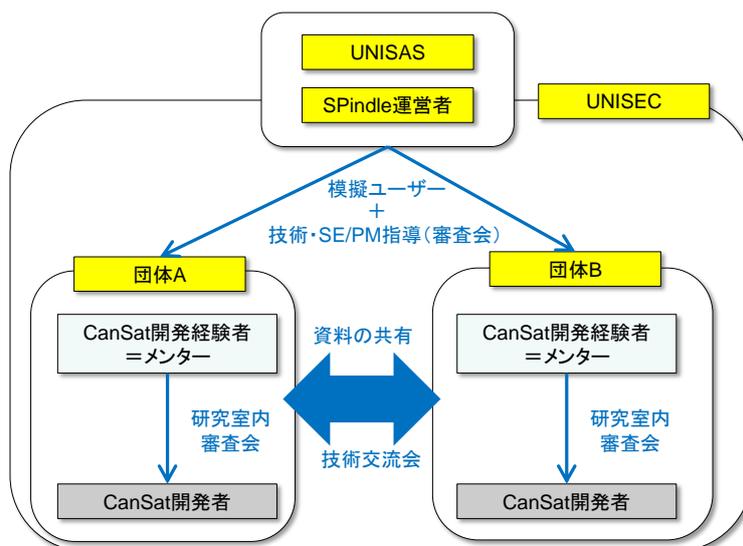


図 4 SPindle が構築した開発支援体制

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。

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保有することを目指した。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"> ✓ 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) ✓ 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) ✓ 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) 	2 時間
5/31	SE 序論 2	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 過去のチームの失敗事例の分析 ✓ 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) ✓ 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) 	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、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本当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。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"> ✓ 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。 ✓ 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。 ✓ 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。 ✓ 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。
参加した学生からのコメント
<p>良かった点：</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ SE/PM 手法の体系的なやり方を学べた。 ✓ 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。 ✓ 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。 ✓ 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。 ✓ 審査会でスケジュールの見直しを行うことができた。 ✓ 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。 ✓ チーム内の情報の共有化にもなった。 ✓ 体系化された資料が残り、過去の財産になる。 ✓ 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。 <p>悪かった点：</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 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。 ✓ 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。 ✓ 書類作成の為に開発の時間が減ってしまった。 ✓ 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。 ✓ 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、必要充分のみに絞ることが必要だった。

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	検証条件の不備： 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	検証計画の不備： 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	スケジュール管理の不備： 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点の問題点が顕在化した。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。逆に、「(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・高等教育の在り方を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、過去の知見の蓄積・抽出可能にする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。

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、体系的な開発審査資料が残りにくいという点で、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6月本稿執筆時点)でこの惑星探査ミッションを選択した開発チームは今年は居ないため、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を続け、改善を続けていくことが必要である。

付録

本稿に用いた略語の一覧を表 9 に示す。

表 9 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、成田伸一郎氏、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—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, pp.55-59, 2008.
- [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」, 1st 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/>.