超小型衛星のミッション成否分析に基づく現状把握と将来予測^{*1}

Current State and Future Forecast for Microsatellites Based on Success and Failure Analysis of Their Space Missions

石井 亮介^{*2}・佐原 宏典^{*3}
Ryosuke ISHII and Hironori SAHARA

Key Words: Mission Result Analysis, Multiple Classification, Logistic Regression, Principle Component, CubeSat

Abstract: We conducted various sorts of multiple classification analysis concerning CubeSats primarily developed by universities, based on information published on papers and websites. Single regression analysis led to a future forecast of the numbers of CubeSat launches, and logistic regression analysis predicted accomplishment probability of minimum and full success levels by CubeSats being launched on 2011. Furthermore, we clarified positions of the experienced countries of CubeSat launches, and indicated the direction they should progress for their developments. Thus, we here propose information sharing and collaborative development for beneficial change of CubeSat's success rate.

1. は じ め に

宇宙開発は冷戦構造の中では国家の威信を掛けた事業であり、衛星の大型化に伴うその開発期間の長期化と開発費の肥大化が1990年代まで続いたが、冷戦の終結と共に費用対効果が強く意識されるようになった。その状況の中で予算の削減、開発期間の短縮を実現しつつ、質の高いミッションを行う“Smaller, faster, better, cheaper”という新たな流れが生じ、より規模の小さな衛星が提起されるようになった¹⁾。1995年にはStanford University's Space Systems Development Laboratory (SSDL)において人工衛星開発プロジェクトOPALが立ち上がった²⁾。OPALは母衛星の内部に搭載した6個のピコサットクラス(質量0.1~1 kg)の娘衛星を軌道上で放出する母娘衛星の実証が主要なミッションであり、低コスト、短期間で衛星開発を目指した。このプロジェクトで得た知見を受けて、短期開発、低コストを満たす衛星としてSSDLのB. Twiggs教授は1999年のUniversity Space Systems Symposium (USSS)において、1辺10 cm、質量1 kgの超小型衛星CubeSatを提唱した。CubeSatは大学にとって衛星開発が可能な規模であるため、多くの大学がCubeSatの開発に参加を表明した。そして2003年6月30日、東京大学のXI-IV³⁾と東京工業大学のCUTE-I⁴⁾を含む6機のCubeSatが打ち上げられた。この瞬間、大学による衛星開発の実現性が実証され、世界各国で大学による超小型衛星開発が盛んに行われるようになった。

しかしながら現在の大学におけるCubeSatの開発、運用は教育目的という側面が強いため、ミッション成否に対

する関心が低い傾向にあることは、その成功基準の第一を「学生の手による衛星開発、打上」に設定する事例が少ないことから垣間見える。そのため不具合が発生しても原因の究明が専門的かつ熱心に行われず、解決策や防止策が示されることが少ないのが現状である。不具合原因の究明はその衛星のみならず、次機開発の際にも非常に重要な情報となる。更に大学では学生の世代交代が頻繁に発生し、衛星開発に関する情報が蓄積、継承されにくい。自らが得た知見を文書化する等が重要になるが、不具合原因を特定する手段を心得ていない場合が多く、情報の蓄積は限定的となっている。

そこで本研究では特にCubeSatに焦点を当てた統計的分析を行うことによって現状把握と将来予測を行い、その傾向や問題点を抽出する。また、実績の少ない国が実績の多い国と共同で開発した場合の予測を示すことで、情報や実績を共有することの有効性を示す。

2. 統計的分析方法

人工衛星の開発能力が未成熟な大学や新規参入の企業が打ち上げたCubeSatを対象として、論文や文献、ウェブサイト等から収集した公開情報を用いて統計的分析を行う。本研究では主に複数の指標を元に、その指標同士の関係性を分析する多変量解析法を用いて情報を分析する。

2.1 単回帰分析 ある n 個のデータ組を散布図に描いたとき直線的な分布

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \cdots + \beta_p x_{i,p} + \varepsilon_i \quad (1)$$

が想定されたとする。ここで $x_{i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p$) 及び y_i は実測された説明変数及び目的変数、 β_j は回帰係数、 ε_i は誤差項である。式(1)の回帰式は説明変数が p 個の場合の一般的なものであるが、ここでは $p = 1$

^{*1} © 2012 日本航空宇宙学会

平成23年3月7日原稿受付

^{*2} 首都大学東京システムデザイン研究科航空宇宙システム工学域

^{*3} 首都大学東京システムデザイン学部航空宇宙システム工学コース

の単回帰分析について話を進め、以下では $x_{i,1} \equiv x_i$ と表記する。最小二乗法を用いれば最小二乗推定値 $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$ は、

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (2)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (3)$$

と求まり、回帰式を得る。ここで $\bar{x}$, $\bar{y}$ はそれぞれの平均値であり、

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (4)$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

である。推定された回帰式の精度を示す指標として寄与率 R^2 を用いる。ここで R^2 は、

$$S_R = \hat{\beta}_1 S_{xy} \quad (6)$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (7)$$

$$S_e = \sum_{i=1}^n e_i^2 = S_{yy} - \hat{\beta}_1 S_{xy}, \quad e_i = \hat{y}_i - y_i \quad (8)$$

を用いて、

$$R^2 = \frac{S_R}{S_{yy}} = 1 - \frac{S_e}{S_{yy}} \quad (9)$$

と定義される。 e_i は残差、 $\hat{y}_i$ は回帰式で得られる推定値である。誤差 ε の母分散は次のように推定できる。

$$\hat{\sigma}^2 = V_e = \frac{S_e}{n-2} \quad (10)$$

また、分析結果の妥当性を検証するために標準化残差

$$e'_i = \frac{e_i}{\sqrt{V_e}} \quad (11)$$

を導入する。標準化偏差は標準正規分布に近似的に従い、この値の絶対値が 3.0 以上であればそのデータを除外すべきと判断する。また、各説明変数を横軸に取り、 e'_i を散布図に描いたとき、分布が無規則であるように見えることを確認する。

2.2 ロジスティック回帰分析 ロジスティック回帰分析はデータの持つ情報からある現象の発生確率を求める手法であり、 p 個の説明変数 $x_{i,j}$ に対して目的変数 y_i が 1 となる確率 P_i が 0 から 1 の間を取る次式でモデルを想定する。

$$\log \frac{P_i}{1-P_i} = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \cdots + \beta_p x_{i,p} \equiv z_i \quad (12)$$

最尤法を用いれば、尤度関数及び対数尤度関数はそれぞれ式 (13), (14) で表される。

$$\begin{aligned} \prod_{i=1}^n P_i^{y_i} (1-P_i)^{1-y_i} &= \prod_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{1-P_i} \right)^{y_i} (1-P_i) \\ &= \prod_{i=1}^n e^{z_i y_i} \frac{1}{1+e^{z_i}} \end{aligned} \quad (13)$$

$$L = \sum_{i=1}^n z_i y_i - \sum_{i=1}^n \log(1+e^{z_i}) \quad (14)$$

ここで式 (14) を各 β_j でそれぞれ偏微分してできる連立方程式を解けば各 β_j が求まるので、式 (12) より確率の推定値 $\hat{P}_i$ を得る。

ところで説明変数の選択は χ^2 検定や尤度比検定等様々な方法があるが、ここでは Akaike's Information Criteria (AIC) を用いる。AIC は、

$$\text{AIC} = -2 \{L_{\max} - (p+1)\} \quad (15)$$

で求められ、この値が最小となる説明変数の組み合わせを採用する。また、各説明変数が意味のある変数であるか否かをワルド検定を用いて検証する。ワルド検定では帰無仮説として回帰係数 $\hat{\beta}_j = 0$ を仮定し、 se を標準誤差であるとして検定統計量

$$\chi^2_{\text{Wald}} = \frac{\beta}{se(\beta)} \quad (16)$$

の P 値が有意水準より小さいことを確認する。

次にデータの中に外れ値が無いことを標準化残差

$$\varepsilon_i = \frac{y_i - \hat{P}_i}{\sqrt{\hat{P}_i(1-\hat{P}_i)}} \quad (17)$$

を用いて確認する。 ε_i が 3.0 以上のデータは異質なものとして除外する。

2.3 主成分分析 主成分分析では互いに相関のある変数について、収集されたデータの持つ情報をできるだけ損なわないように次元を圧縮し、新たな指標を作り出す手法である。いま簡単のため変数 x が 2 個の場合を考える。第一主成分 z_1 はデータの持つ情報の損失が最小となる方向、即ちデータの分散が最も大きくなる方向の軸なので、分散 V_{z_1} を最大にすることを目指す。 z_1 を係数 a_1 , a_2 を用いて、

$$z_1 = a_1 u_1 + a_2 u_2 \quad (18)$$

とおく。ここで、

$$u_1 = \frac{x_1 - \bar{x}_1}{s_1}, \quad u_2 = \frac{x_2 - \bar{x}_2}{s_2} \quad (19)$$

であり、変数 x_1 , x_2 をそれぞれの標準偏差 s_1 , s_2 によって標準化したものである。これにより標準化変数の平均は $\bar{u}_1 = \bar{u}_2 = 0$ 、標準化残差は $V_{u_1} = V_{u_2} = 1$ となり、

$$\bar{z}_1 = 0 \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^n u_{1,i}^2 = \sum_{i=1}^n u_{2,i}^2 = n-1 \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^n u_{1,i}^2 u_{2,i}^2 = (n-1) r_{x_1 x_2} \quad (22)$$

となるので式 (20)~(22) を用いて V_{z_1} を求めると、

$$V_{z_1} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_{1,i} - \bar{z}_1)^2$$

$$= a_1^2 + a_2^2 + 2r_{x_1x_2}a_1a_2 \quad (23)$$

$r_{x_1x_2}$ は添字に記載の変数同士の相関係数である。ここで制約条件を $a_1^2 + a_2^2 = 1$ とし、ラグランジュの未定乗数法を用いて V_{z_1} の最大値を求める。未定乗数を λ として、

$$f(a_1, a_2, \lambda) = a_1^2 + a_2^2 + 2r_{x_1x_2}a_1a_2 - \lambda(a_1^2 + a_2^2 - 1) \quad (24)$$

とし、式 (24) を a_1, a_2 で偏微分して整理すれば、

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{x_1x_2} \\ r_{x_1x_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

という固有値問題に帰着する。式 (25) に左から $[a_1 \ a_2]$ を掛けると、

$$V_{z_1} = \lambda \quad (26)$$

となるので、結局 λ の最大値を求めることになる。即ち、最大の固有値 λ_1 のときの固有ベクトル $[a_1 \ a_2]^T$ を求めれば z_1 を求めることができる。また、異なる固有値に対応する固有ベクトルは互いに直交しているため、2 番目に大きな固有値に対応する固有ベクトルから第二主成分 z_2 を求めることができる。それぞれの主成分は当初用いた変数 x の意味を鑑み、合理的にその意味を解釈する。

3. 集計結果

3.1 情報収集と集計方法 本研究では超小型衛星の内、2011 年 3 月時点で公知されている CubeSat を情報収集対象として選択した。CubeSat は多くの大学が衛星開発の入門的な位置付けで開発するため、その開発組織は大学をはじめとするアマチュア団体の比率が高い。また、最近になって盛り上がっている衛星であるためウェブ上に情報が豊富にあるという利点がある。情報収集では宇宙機関や衛星メーカー等のものも含め、これらの大学等のアマチュア団体への技術移転を踏まえて打上数には計上するが、ミッションの達成状況に関しては特に大学衛星のみを対象とし、宇宙機関や衛星メーカーは評価の対象外 (Out of evaluation) としている。これは宇宙機関等のミッションが非常に高度かつ高価な技術実証や軍事利用であるため、大学等のミッションとは単純に比較できないためである。情報収集の方法としては、超小型衛星に関する文献や各 CubeSat に関する論文、ウェブサイトを用いて各項目 (衛星名・開発国・運用組織・打上日・打上ロケット・質量・サイズ・ミニマムサクセス達成状況・フルサクセス達成状況) の収集を行った。なお、ミニマムサクセス、フルサクセスについては開発団体によってその難易度の設定が様々であるため、本研究では次の統一基準を設定した。

- ・ミニマムサクセス：軌道上の衛星が発したビーコン等の送信データを継続的に受信する。但し、運用チームが成

第 1 表 集計項目と集計方法

単純集計	クロス集計
年別 CubeSat 打上数	年-ロケット別 CubeSat 打上数
国別 CubeSat 打上数	年-国別 CubeSat 打上数
ロケット別 CubeSat 打上数	ロケット別ミニマム/フルサクセス達成数
ミニマムサクセス達成割合	年別ミニマム/フルサクセス達成数
フルサクセス達成割合	国別ミニマム/フルサクセス達成数

第 1 図 年別 CubeSat 打上数

功基準を公表し、ミニマムサクセスの項目に軌道上ミッションを含む場合はその基準に従う。

- ・フルサクセス：衛星の掲げるミッションをすべて達成する。但し、運用チームが成功基準を公表し、フルサクセスの項目が存在する場合はその基準に従う。

データの集計は単純集計とクロス集計とに分けて行う。第 1 表にそれぞれの集計項目を示し、分析方法は以下のように選択する。

- ・単回帰分析：年別打上数における将来打上数予測
- ・ロジスティック回帰分析：ミッション達成確率予測
- ・主成分分析：国別 CubeSat 打上数、ミニマムサクセス達成数、フルサクセス達成数のそれぞれの関係抽出

なお、クロス集計においてもミッションの達成状況が含まれるものに関しては大学衛星のみを対象とし、宇宙機関や衛星メーカーは評価の対象外 (Out of evaluation) としている。

3.2 単純集計結果

年別 CubeSat 打上数：年別の CubeSat 打上数を第 1 図に示す。1999 年に CubeSat プロジェクトが開始され、2003 年に第一陣の CubeSat 打上が実現した。2004 年には 1 機も打ち上げられていないが 2005 年以降は継続的に増加傾向にあり、2010 年には 10 機を超えた。2010 年までに 48 機の CubeSat が打ち上げられており、2011 年には現時点で判明しているだけで 15 機の打上が予定されている。

国別 CubeSat 打上数：国別に CubeSat 打上数を集計した結果を第 2 図に示す。2010 年までに打ち上げられた 48 機の CubeSat の内、アメリカが全体のほぼ半分の 48% を占め、次いで日本 (21%)、ドイツ (9%) と続き、以降にはヨーロッパ諸国、カナダ、コロンビアが並ぶ。ロシアや中国が含まれていないことから、CubeSat の開発は西側諸国が中心となっていることが分かる。

ロケット別 CubeSat 打上数：ロケット別の CubeSat 打

第2図 国別 CubeSat 打上数

第4図 ミニマムサクセス達成割合

第5図 フルサクセス達成割合

第3図 ロケット別 CubeSat 打上数

第6図 年-ロケット別 CubeSat 打上数

上数を第3図に示す。ここでは2011年打上予定のVega, Falcon-1, Taurus-3110を含んでいる。但し、2011年打上予定のCubeSatの中で1機だけは打上ロケットが未定であるため、これを除外している。従ってここでは62機のCubeSatが対象となっている。第3図を見ればインドのPSLVが最多の18%となっているが、これはロシアの打上費用の高騰の状況の中でPSLVの打上費用が他よりも安いことから多くの利用があったものと考えられる。次いでESA (European Space Agency) のVega (14%)、ウクライナのDnepr (11%)が続く。日本のH-IIAやM-Vも利用されており、更にスペースシャトルからの放出もなされる等、多種多様な手段でCubeSatが軌道に投入されており、既に打上手段の分散化がかなり進んでいることが分かる。

ミニマムサクセス達成割合：評価対象である大学によるCubeSatは35機であり、そのミニマムサクセス達成割合を第4図に示す。ミニマムサクセスを達成したCubeSatは29機で全体の83%であった。また、1機については打上後の情報を発見できなかったため、不明 (Unknown) と評価した。

フルサクセス達成割合：同じく評価対象である35機のCubeSatのフルサクセス達成割合を第5図に示す。フルサクセスを達成したCubeSatは10機で全体の29%であっ

た。失敗は12機で全体の34%を占めている。また、ミニマムサクセスは達成したがフルサクセスを達成できなかったものは7機であった。なお、フルサクセス達成に関する情報が発見できなかったものは11機と多く、成功・失敗のいずれも数は増える可能性がある。ミッションを継続中 (Continued) の2機については2010年後半に打ち上げられたもので、2011年1月現在も成否の結果は出していない。

3.3 クロス集計結果

年-ロケット別 CubeSat 打上数：ロケット別のCubeSat打上数を年ごとに集計したものを第6図に示す。2003年のCubeSat初打上にはロシアのRockotが、2005年には同じくロシアのKosmos-3Mが利用された。2006年には赤外線天文衛星「あかり」と共にM-Vに搭載され、2008年からはPSLVが3年連続で使用された。2011年には打上予定の15機の内、9機のCubeSatがVegaにより打上予定である。なお、2006年にはDneprによって14機の打上が試みられたが、ロケットの失敗により軌道に投入されることはなかった。

年-国別 CubeSat 打上数：国別のCubeSat打上数を年ごとに集計したものを第7図に示す。日本は2003年のCubeSat初打上から継続的に打上を行っており、2010年までに10機が打ち上げられた。一方アメリカは2005年と2008年には打上が無かったものの、2007年から年間打上機数を増加させており、現在までに23機の打上がなされた。アメリ

第7図 年-国別 CubeSat 打上数

第8図 ロケット別ミニマム/フルサクセス達成数

カはNASA（National Aeronautics and Space Administration）がCubeSatの開発に積極的であり、例えばQbXシリーズは2009年9月時点で12機が製作され、2010年に既に2機が打ち上げられたことに加え、更に20~50機の追加開発が計画されている状況にあり、今後も年間打上数は増加すると予想される。

ロケット別ミニマム/フルサクセス達成数：ロケット別にミニマム/フルサクセスの達成状況を集計したものを第8図に示す。ここではミニマムサクセスを達成したがフルサクセスを達成できなかった衛星数をミニマムサクセス数に含め、ミニマム/フルサクセスを共に達成した衛星数をフルサクセス達成数としている。評価対象外（Out of evaluation）の13機はいずれもアメリカが開発した衛星である。また、情報不足または現在ミッション継続中のため評価外となっている衛星はUnknownとして分類している。第6図と合わせて見れば、ミニマムサクセスを達成できなかった衛星（Failure）は、1回の衛星の打上数が少ないロケットに集中していることが見て取れる。言い換えれば1回の衛星の打上数が多いロケットは衛星のミニマムサクセス達成数が多いことになるが、その理由として、打上延期によって衛星の追試験の機会があったことや、ある一定の技術段階にある衛星を採択したコーディネータの手腕によること等も考えられ⁵⁾、相関や因果を断言することはできない。

年別ミニマム/フルサクセス達成数：年別にミニマム/フルサクセスの達成状況を集計したものを第9図に示す。近年の打上数増加は前述の通りNASA等の影響が大きい。前項と同じくUnknownとなっている衛星が幾つかあり、そ

第9図 年別ミニマム/フルサクセス達成数

第10図 国別ミニマム/フルサクセス達成数

の成否によって達成数は変化すると考えられるが、増加する打上数に応じた達成数を得ているとは言い難く、年を経るごとにミッション達成状況の改善が成されているとは言えない。

国別ミニマム/フルサクセス達成数：国別にミニマム/フルサクセスの達成状況を集計したものを第10図に示す。アメリカのCubeSat打上数の半数以上がNASAやメーカーが開発した衛星であることが分かる。また、打上数とフルサクセス達成率には相関が見られない。

4. 分析結果

以上のように集計した結果を用いて本節ではそれらの統計的分析を行い、現状把握及び将来推定を行う。また、その結果から見て取れる傾向や問題点を抽出する。

4.1 将来の年間打上数予測 第1図で得た集計を元に、将来におけるCubeSatの打上数を予測する。ここでは説明変数 x は年、目的関数 y は衛星打上数を表し、回帰式は以下のように求めた。

$$y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x = -4008 + 2x \quad (27)$$

このとき寄与率 $R^2 = 0.933$ となり、強い相関があることを確認した。また、 $x = x_0$ における信頼率95%の予測区間は、

$$\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_0 \pm t(n-2, 0.05) \sqrt{\left\{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}}\right\} V_e} \quad (28)$$

から求められる。以上より求めた回帰直線と予測区間を第11図に示す。2011年の打上数予測は10~18機と予測され、

第 11 図 将来の年間打上数予測

第 12 図 国別打上数-ミニマムサクセス達成数の予測

これは現時点での予定である 15 機と適合する。直線的な打上数の増加が見られることは CubeSat の順調な滑り出しの時期を経験していることを示しているが、現在の参加団体の結果が呼び水となって更に CubeSat を開発する国や団体が拡大して発展がなされるためには、この直線及び予測区間よりも上を行くことを目指すことが一つの目標となる。

4.2 国別打上数-ミニマムサクセス達成数 説明変数 x を国別打上数、目的変数 y をミニマムサクセス達成数として単回帰分析を行った結果、回帰式は次のように求まった。

$$y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x = -0.08 + 0.852x \quad (29)$$

このとき寄与率 $R^2 = 0.9779$ となり、強い相関があることを確認した。即ち、各国の打上数に対するミニマムサクセス達成数は一定の割合に留まっており、打上数の多い国が必ずしもミニマムサクセスの達成率が高いとは言えず、打上数の多少にかかわらずミニマムサクセス達成率の改善が表れていないことを示している。回帰直線に予測区間を加えた結果を第 12 図に示す。CubeSat の発展のためには少なくとも最低限の成功基準であるミニマムサクセスを達成する必要がある、図中の直線や予測区間を上回ることを目指す必要がある。

4.3 ミッション達成確率予測 ロジスティック回帰分析により、ミッション達成状況の評価対象である 35 機の大学による CubeSat の集計結果を用いて、2011 年打上予定の

第 13 図 質量とミニマムサクセス達成率の関係

第 14 図 質量とフルサクセス達成率の関係

CubeSat についてミッション達成確率を予測する。ミニマムサクセス達成確率の予測には質量別及び国別のミニマムサクセス達成率を、フルサクセス達成率の予測には質量別及び国別のフルサクセス達成率をそれぞれ使用する。なお、達成率と達成確率とを混同しないよう留意する。

第 13 図及び第 14 図の横軸は 0 を失敗、1 を成功として質量別に衛星の機数を集計し、その質量におけるミニマム/フルサクセスの達成率を球の大きさで表している。質量別のミニマムサクセス達成率は第 13 図から質量が大きいほど達成率が高くなっており、一方フルサクセス達成率は第 14 図から質量が小さいほど達成率が高い傾向がある。

ミニマムサクセス、フルサクセス達成確率のそれぞれにおいて対数尤度関数

$$\begin{aligned} L &= \sum_{i=1}^n z_i y_i - \sum_{i=1}^n \log(1 + e^{z_i}) \\ &= \sum_{i=1}^n (\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2}) y_i \\ &\quad - \sum_{i=1}^n \log(1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2}}) \end{aligned} \quad (30)$$

が最大となる $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ を求めることによって、ミニマムサクセス、フルサクセスの達成確率の予測値 P_M, P_F は、

$$P_M = \frac{1}{1 + \exp\{-(-54.92 + 7.55x_1 + 63.93x_2)\}} \quad (31)$$

$$P_F = \frac{1}{1 + \exp\{-(-7.27 + 9.67x_1 + 10.22x_2)\}} \quad (32)$$

から求まる。ここでミニマムサクセス、フルサクセスのそ

れぞれに対して x_1 を国別達成率, x_2 を質量別達成率とした. ミニマムサクセス及びフルサクセスの達成確率の誤判率は $5/35 = 0.143$ 及び $6/35 = 0.171$ となり, 問題無い. また, 尤度比検定を行った結果, χ^2 値はそれぞれ 8.17, 19.38 であり, 有意水準 95% の自由度 2 における χ^2 値 5.99 を上回っていることから $\hat{\beta}_1 = \hat{\beta}_2 = 0$ ではない.

以上で求めた予測式を用いて, 2011 年打上予定の CubeSat についてミッション達成状況を予測した結果を第 2 表に示す. 打上予定の 15 機の内, 13 機がシングルタイプ (10 cm 角, 表中□), 2 機がトリプルタイプ (シングルタイプの 3 倍長, 表中□□□) である. アメリカ, ドイツ, ノルウェー以外は新規参入国 (表中では網掛けで示す) であり, それらの国々は過去のデータが無く予測不可能であるため評価対象外とした. また, ノルウェーについては過去の実績が 1 機しかないため, 予測の精度は十分であるとは言えないことに留意するべきである. ミッション達成確率が 50% を超えているものを成功, 下回ったものを失敗として評価すると, 過去に打上実績のある国の衛星 7 機の内 6 機がミニマムサクセスを達成する. 一方, フルサクセスについては達成する衛星は 0 機であるという厳しい予測となった.

ここで, ノルウェーについて考える. ノルウェーはこれまでに CubeSat の打上経験はあるものの, 成功経験は未だ無い. 従って予測の精度は十分であるとは言えないことを念頭におきつつも, ミニマムサクセス達成確率ですら 1% と非常に厳しい予測となっている. ところがもしノルウェーが世界平均レベルの実績を有すると仮定し, これを統計上は打上数とミニマム/フルサクセス達成数の世界的な平均値をノルウェーが有しているとすれば, ミニマムサクセス達成確率及びフルサクセス達成確率はそれぞれ 83% 及び 13% に向上する. これは世界的にはミニマムサクセス達成率が高いことに起因する. あるいはノルウェーが日本と共同で開発すると仮定し, 統計上は日本とノルウェーを合計した実績を有しているとすれば, ミニマムサクセス達成確率及びフルサクセス達成確率はそれぞれ 69% 及び 45% に向上する. これは日本のフルサクセス達成率が高いことが寄与し

ている. このことは共同開発によって新規参入国や成績不振の国が大きく成長し, そして全体の成績が向上すれば更に全体の成績が向上することを意味している.

4.4 主成分分析による国別の特徴 第 10 図における各国の特徴をその国の CubeSat 開発者の多さ, 開発した CubeSat の質という観点から総合評価する. 開発者の多さは打上数に, CubeSat の質はミニマム/フルサクセス達成数に反映されるものと見なす. 第一主成分 z_1 , 第二主成分 z_2 をそれぞれ,

$$z_1 = a_{11}u_1 + a_{12}u_2 + a_{13}u_3 \quad (33)$$

$$z_2 = a_{21}u_1 + a_{22}u_2 + a_{23}u_3 \quad (34)$$

としたとき, u_1, u_2, u_3 はそれぞれ国別打上数, ミニマムサクセス達成数, フルサクセス達成数を標準化した値を示す. 相関行列 R を求めると,

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{x_1x_2} & r_{x_1x_3} \\ r_{x_2x_1} & 1 & r_{x_2x_3} \\ r_{x_3x_1} & r_{x_3x_2} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.989 & 0.690 \\ 0.989 & 1 & 0.655 \\ 0.690 & 0.655 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

となり, 固有値と固有ベクトルはそれぞれ,

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 2.566 & 0.424 & 0.010 \end{bmatrix}^T \quad (36)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.608 & 0.331 & 0.722 \\ 0.601 & 0.402 & -0.691 \\ 0.519 & -0.854 & -0.046 \end{bmatrix} \quad (37)$$

となった. また, 因子負荷量は次式で表される.

$$\begin{bmatrix} r_{z_1x_1} & r_{z_2x_1} & r_{z_3x_1} \\ r_{z_1x_2} & r_{z_2x_2} & r_{z_3x_2} \\ r_{z_1x_3} & r_{z_2x_3} & r_{z_3x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1}a_{11} & \sqrt{\lambda_2}a_{12} & \sqrt{\lambda_3}a_{13} \\ \sqrt{\lambda_1}a_{21} & \sqrt{\lambda_2}a_{22} & \sqrt{\lambda_3}a_{23} \\ \sqrt{\lambda_1}a_{31} & \sqrt{\lambda_2}a_{32} & \sqrt{\lambda_3}a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.974 & 0.216 & 0.072 \\ 0.963 & 0.262 & -0.069 \\ 0.831 & -0.556 & -0.005 \end{bmatrix} \quad (38)$$

以上から国別打上数, ミニマムサクセス達成数, フルサクセス達成数の因子負荷量の第一主成分と第二主成分の値を用いてその位置 $(r_{z_1x_1}, r_{z_2x_1})$, $(r_{z_1x_2}, r_{z_2x_2})$, $(r_{z_1x_3}, r_{z_2x_3})$ を描いたものを第 15 図に示す. また, 各国のデータにおける第一主成分と第二主成分を求め, 散布図に描いたものを第 16 図に示す.

第 15 図において打上数とミニマムサクセス達成数の点がほぼ同じ位置にあるが, これはミニマムサクセス達成確

第 2 表 データの収集項目と集計方法

衛星名	国名	タイプ	ミニマムサクセス 達成確率	フルサクセス 達成確率
AtmoCube 1	イタリア	□	#N/A	#N/A
E1P	アメリカ	□	89%	2%
e-st@r	イタリア	□	#N/A	#N/A
Goliat	ルーマニア	□	#N/A	#N/A
HEIDELSAT	ドイツ	□	73%	9%
HERMES	アメリカ	□	89%	2%
HiNCube	ノルウェー	□	1% (83%/69%)	1% (13%/45%)
InnoSat	マレーシア	□□□	#N/A	#N/A
KySat 1	アメリカ	□	89%	2%
Lightsail 1	アメリカ	□□□	100%	39%
OUFIT 1	ベルギー	□	#N/A	#N/A
PW-Sat 1	ポーランド	□	#N/A	#N/A
ROBUSTA	フランス	□	#N/A	#N/A
UNICubeSAT	イタリア	□	#N/A	#N/A
UWE-3	ドイツ	□	73%	9%
ミッション達成数予測			6/7	0/7

第 15 図 因子負荷量の位置

第 16 図 国別の総合評価

率が 9 割と高く、打上数とミニмумサクセス達成数の値が近いことに起因する。これより第 16 図の横軸である第一主成分は式 (33), (38) から各説明変数の数が大きくなるほど軸の正向きに進むため、総合評価を示していると見なせる。また、各説明変数において評価の比重は打上数とミニмумサクセス達成数がほぼ同等であり、フルサクセスを達成することによる評価の比重が他の 2 つのパラメータと比較して低くなっている。しかし実際にはミニмумサクセスを達成しなければフルサクセスを達成できないので、フルサクセスを達成した場合はミニмумサクセス + フルサクセスの評価と考えることができる。即ち、打上数が多く、かつフルサクセスを多く達成しているほど総合評価が高くなる。従って第 16 図において、打上数とミニмумサクセス達成数により評価された国は上平面に、フルサクセス達成数により評価された国は下平面に位置する。総合評価において全体の平均より低い国は第一主成分の座標が負の値となる。なお、第 16 図は各国の第一主成分の座標を比較して例えば日本はアメリカより 1.5 倍優れているといった見方はできず、あくまで各国の相対的な位置から順位付けを行って評価するものである。

以上のことを踏まえて第 15 図と共に第 16 図を見ると、総合評価第 1 位は日本であり、これはフルサクセス達成数の多さで評価されていることが分かる。また、第 2 位のアメリカは打上数とミニмумサクセス達成数で評価されていることが分かる。第 3 位のドイツは全体におけるほぼ平均

的な位置にいる。フルサクセス達成により評価された国は日本、カナダ、オランダ、コロンビアで、打上数とミニмумサクセス達成数で評価された国はアメリカ、デンマーク、スイス、トルコであった。目指すべき方向としては、図の右下の第 4 象限となる。

5. 考 察

まず CubeSat の打上数については、第 1 図から継続的な増加傾向にあることが分かる。第 2 図及び第 7 図も併せて見れば、未だ少数の国々ではあるが、段々と新規参入国を増やししながら増加している。第 11 図よりこの傾向が続けば 2014 年には年間 20 機の打上を超えるという、規模の大きな動きになることが予測される。

一方、衛星の打上数の増加が予測されても打上ロケットの確保には限度がある。第 3 図及び第 6 図を見れば、幾つかの新規のロケットの他、最近になってピギーバックでの打上を行うようになったロケットも含まれ、現在既に打上ロケットの分散化が進んでいることが読み取れる。衛星の打上数の増加に伴ってロケットの打上機会も増加すれば良いが、そうではない場合、衛星の打上数予測に基づいたロケット開発、ロケット打上計画が立てられることが期待される。

ミッション達成の成否については、第 4 図及び第 5 図よりミニмумサクセスについては高成績であるが、フルサクセスについては判明しているだけで明確な失敗と判断されるものが 3 割以上ある。第 9 図を見ればその成否の割合は年々改善しているとは言えない。第 10 図からは特に成功数が突出した国は見られず、第 12 図を見ると打上数に対する成功数の比率はほぼ一定である。これは一つの国の中で次々と新規参入の団体による衛星が打ち上げられており、打上数は結果として増加するものの、経験を活用しながらの打上数増加ではないことによると考えられる。もし一つの国の中で開発や打上の経験、不具合情報等の実績を共有することができれば、その国は全体として経験を蓄積・活用することとなるため、成功率の向上が見られるものと期待される。

第 8 図を見ると特に PSLV と Dnepr で打ち上げたときにミニмумサクセス、フルサクセスの達成率が極めて高いことが分かる。軌道上の衛星の成否と打上ロケットの種別とは相関は無く、また、いずれのロケットも突出して多く打ち上げられたものではない。一つの可能性として 1 回の衛星の打上数が多いロケットの場合、複数の衛星開発グループが他グループの状況を見ながら開発を行い、更には共同で打上手続きや初期運用を行うため情報の共有がなされ易い状況が考えられる⁵⁾。実際にはすべてのグループが他グループとそのような関係にあったとは言いがたいが、例えば欧州の CubeSat の場合には ESA からの技術指導があったことがうかがえるため、その指導を通して実質的な情報や実績の共有があったと言える。4.3 節で述べたノルウェーの例を見れば、共同開発に基づく実績の共有を前提とすれば達成率向上が予測され、このことは複数の技術段階にある

国々が共同することによって総体として発展して行くことが期待される。

第 15 図と第 16 図より、現在までに CubeSat の打上経験のある国々の相対的な総合評価が明確になった。原点付近は世界的な平均を表すので、右半面に位置する日本やアメリカに対して打上数の少ない国々は左半面に位置しており、打上数やミニマム/フルサクセス達成数の増加によって次第に右へと移動する。また、フルサクセス達成数が増加すれば次第に下へ移動する。従って、図中において目指すべき方向は右下であり、日本は世界の CubeSat 開発において総合評価で先駆的な位置にあることが分かった。

6. 結 論

本研究では公開情報を集計し、統計的な分析を行うことによって CubeSat の現状把握と将来予測を行った。その結果、次の事項を見出した。

- ・ CubeSat の打上数は継続的に増加傾向であり、2014 年には年間打上数 20 機に達する。
- ・ 打上ロケットは新規のものが登場すれば直ちに CubeSat 打上手段として用いられ、既に打上手段の分散化が進んでいる。従って CubeSat の打上数の増加に伴って、ロケットの打上機会も連動して増加することが期待される。
- ・ CubeSat はミニマムサクセス達成では高成績であるが、フルサクセスでは 3 割程度しか成功と言えない状況であ

る。また、打上数の多少にかかわらず成功率はほぼ一定である。これは衛星開発未経験の新規参入団体が継続的に参加し、かつ、新規参入団体は衛星開発経験団体の知見を共有していないことに起因する。

- ・ 共同開発に基づく実績の共有を前提とすれば達成率向上が予測され、このことは複数の技術段階にある国々が共同することによって総体として発展して行くことが期待される。

- ・ 日本は総合評価で先駆的な位置付けとなっている。

例えば第 16 図中で国々の年々の動きを見ることで本研究で行った統計的分析を継続的に行えば、今後どのように宇宙開発計画を進めるべきであるかの方針を立てることができる。そのためには今後も更に情報の収集を行い、統計的分析に用いるデータ項目の拡大とデータ数の増大に努めることで、継続的かつ詳細に分析を行うことが肝要である。

参 考 文 献

- 1) Helvajian, H. and Janson, S.: Small Satellites: Past, Present, and Future, The Aerospace Press, El Segundo, California, 2008, 876pp.
- 2) OPAL Main Web Pages, <http://ssdl.stanford.edu/opal/> [cited on Feb. 1, 2011]
- 3) 東京大学中須賀研究室: 東京大学 CubeSat プロジェクト, <http://www.space.t.u-tokyo.ac.jp/cubesat/> [cited on Feb. 1, 2011]
- 4) 東京工業大学松永研究室: 東工大 CubeSat CUTE-I, <http://lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cubesat/> [cited on Feb. 1, 2011]
- 5) 中須賀真一, 宮崎康行, 松永三郎: private communication, 2011.