

# 超小型衛星の現状と将来



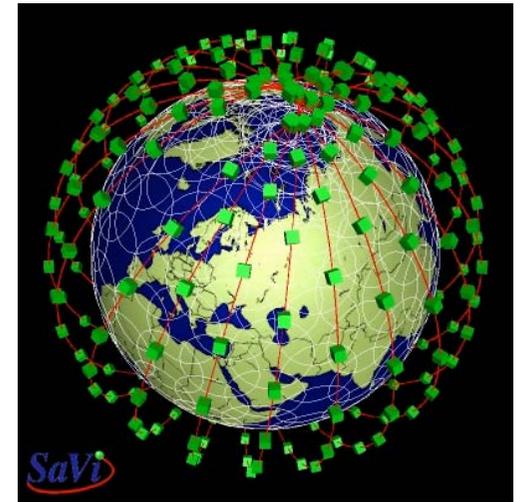
**La SEINE**

趙孟佑

九州工業大学 超小型衛星試験センター  
2015年9月11日

# 超小型衛星とは

- 衛星を安く、早く作ることを優先
  - 非宇宙用の部品や技術を使用
  - リスクをとる
  - 少人数による開発体制
- 多数同時運用で、地球全体を面でカバー
  - コンステレーション
  - 宇宙利用のあり方を根本から覆す可能性
- 宇宙参入の格好の入り口
  - 大学、中小企業、発展途上国



コンステレーション  
イメージ



写真読売新聞

まいど1号

# 衛星サイズ

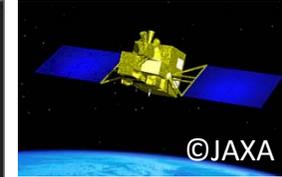
<http://www2.theiet.org>

<http://www.space.t.u-tokyo.ac.jp>

<http://www.sorae.jp>

<http://space.skyrocket.de>

<http://www.usef.or.jp/>



PCBSat  
10x10x2cm<sup>3</sup>  
200g

XI-IV  
10x10x10cm<sup>3</sup>  
1kg

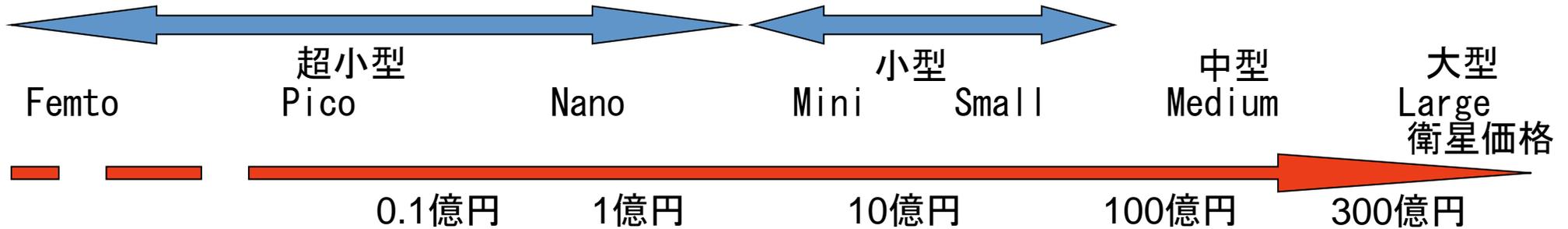
まいど1号  
50x50x50cm<sup>3</sup>  
50kg

UK-DMC  
60x60x60cm<sup>3</sup>  
100kg

ASNARO  
1x1x3m<sup>3</sup>  
3x3x3m<sup>3</sup>  
450kg

いぶき  
2x2x4m<sup>3</sup>  
3x12x4m<sup>3</sup>  
1750kg

きく8号  
2.5x2.5x8m<sup>2</sup>  
40x40x20m<sup>3</sup>  
2800kg



別の国では

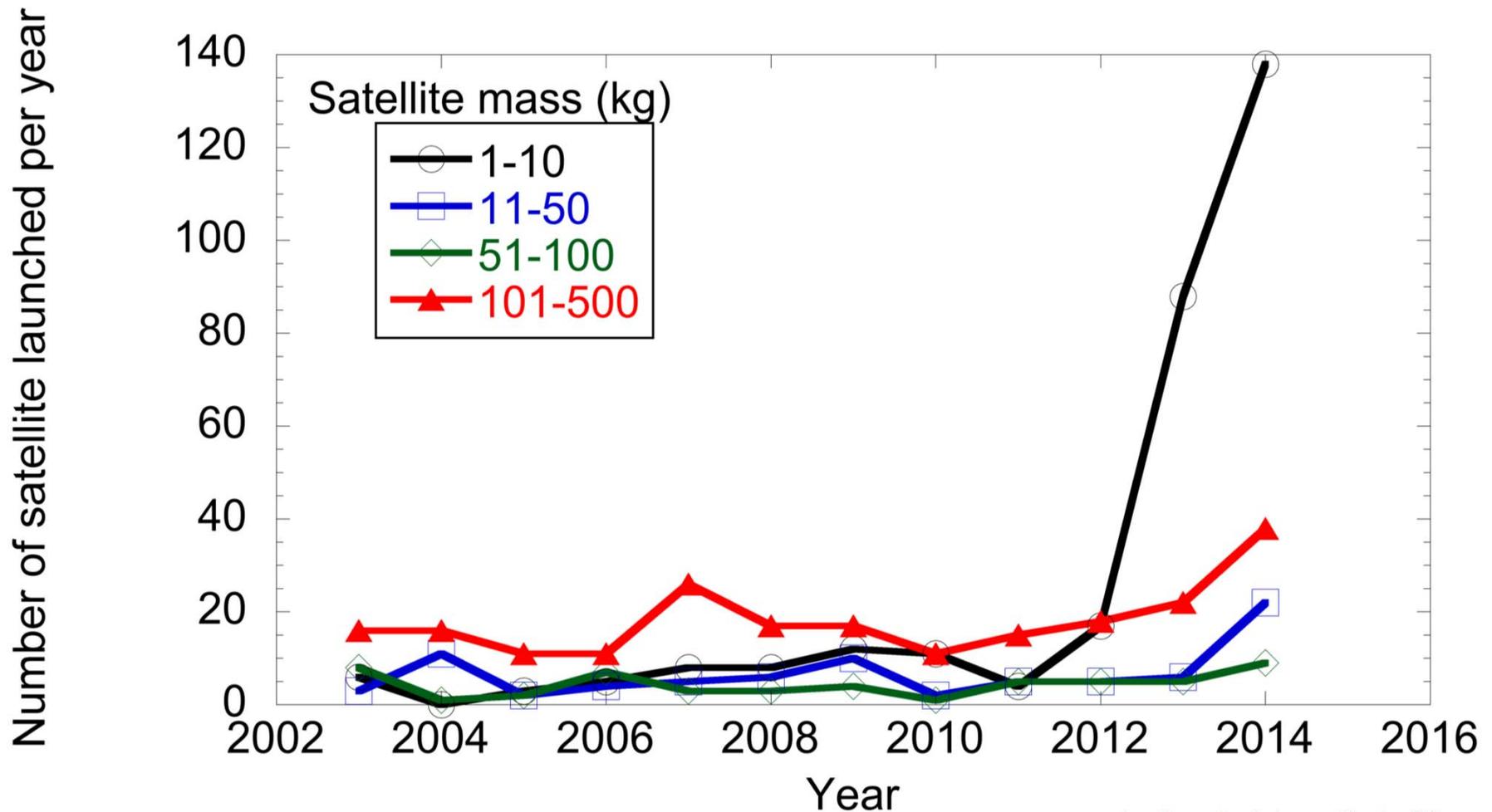
Microsatellite = 10~100kg

Nanosatellite = 1~10kg

Picosatellite = 0.1~1kg

Femtosatellite = 0.01~0.1kg

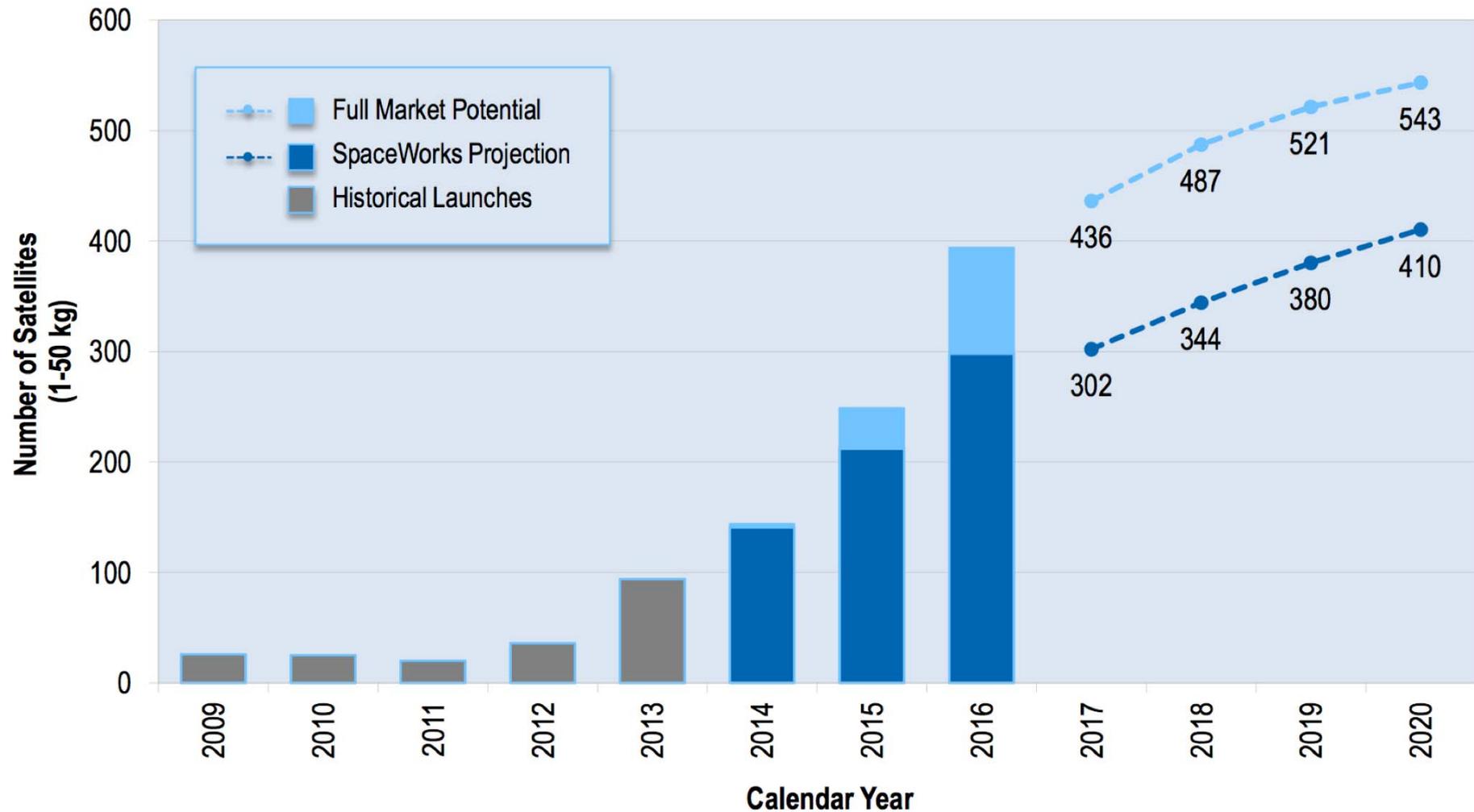
# 小型衛星打ち上げ数



出典:九州工業大学

2012年から爆発的な増加

# 小型衛星打ち上げ数

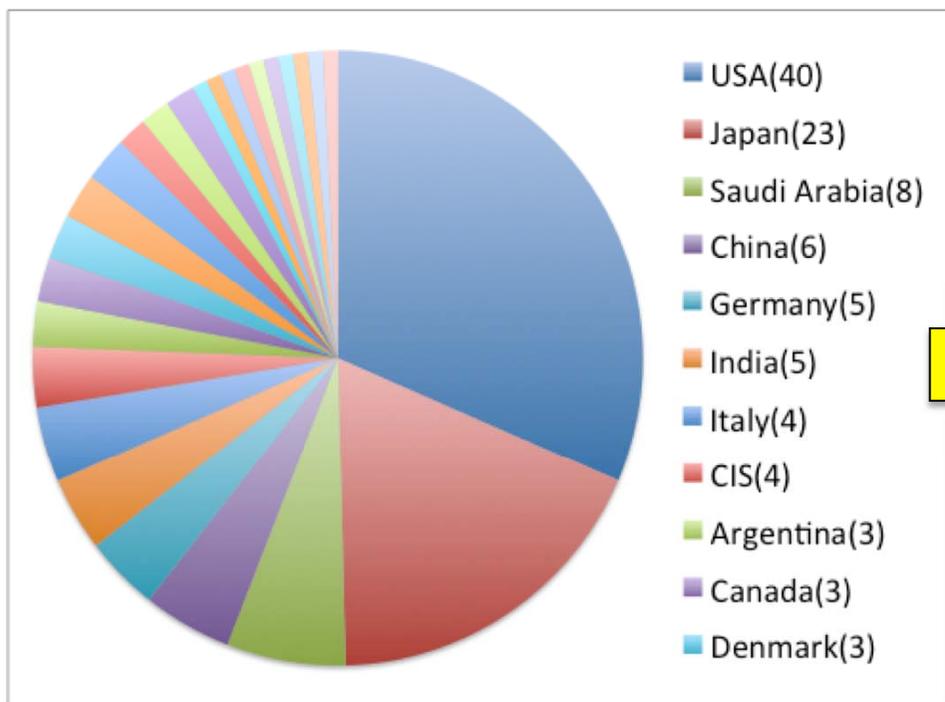


SpaceWorks, "2014 Nano/Microsatellite Market Assessment"

# Small satellite launch trend

## Owners of small satellites (1~50kg)

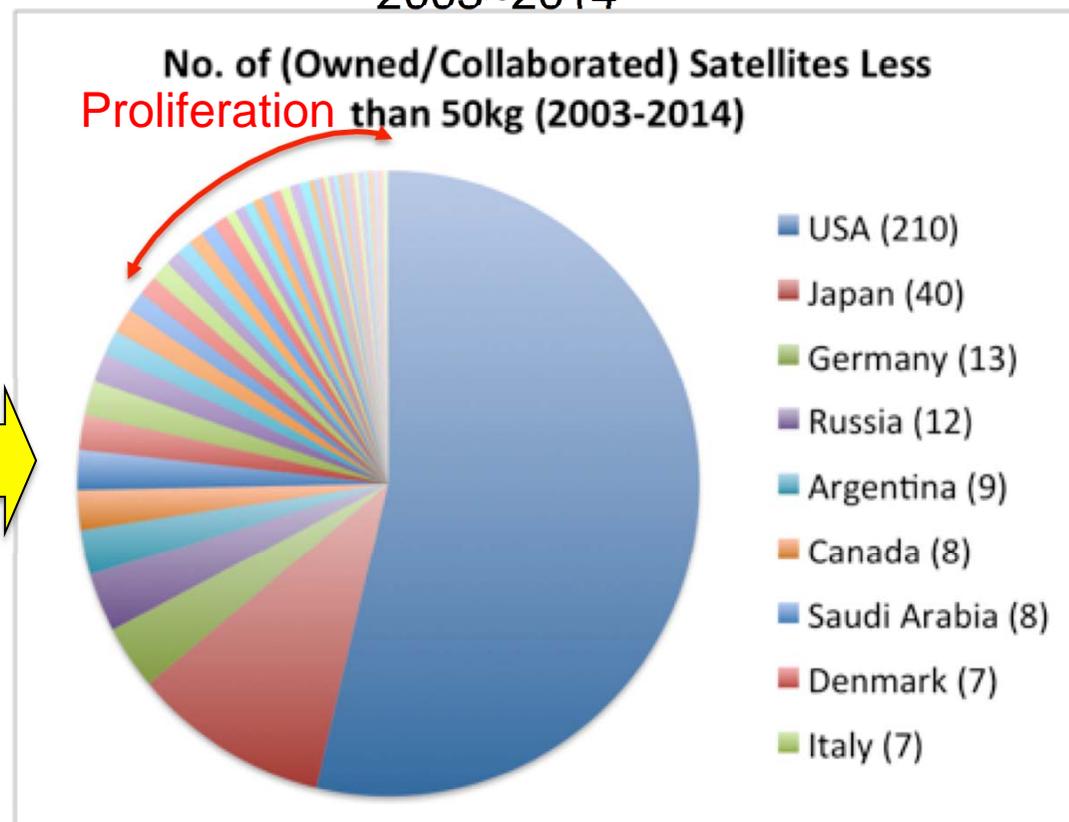
2003~2012



26 countries

超小型衛星に参入する国が増加

2003~2014



45 countries

# 処女打ち上げ

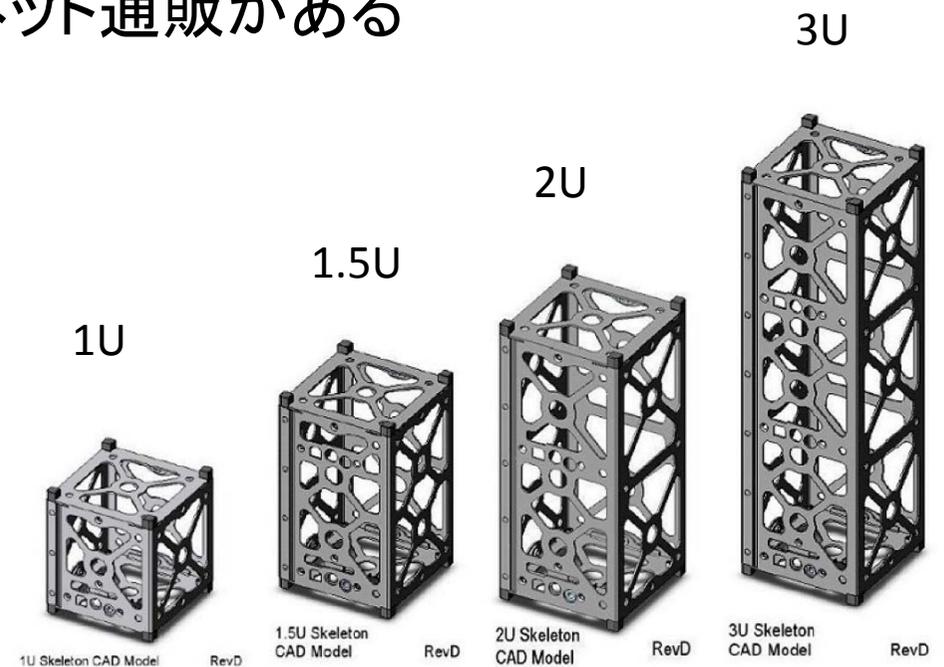
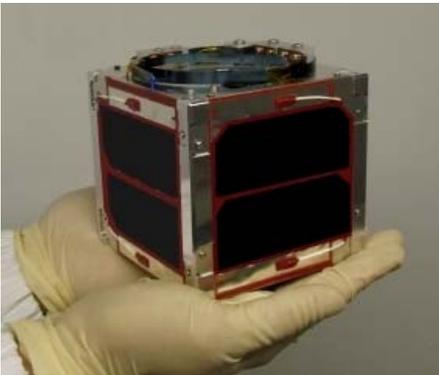
## 各国にとっての第1号衛星の種類

	1990s	2000s	2010s
Small satellites	2	3	8
Traditional	14	10	11

多くの国が超小型衛星を使って宇宙参入しようとしている

# キューブサット (CubeSat)

- 10cm単位で外形寸法を標準化
- 箱(POD)に入れてロケットに搭載
  - ロケット間の互換性
- キューブサット用部品のインターネット通販がある

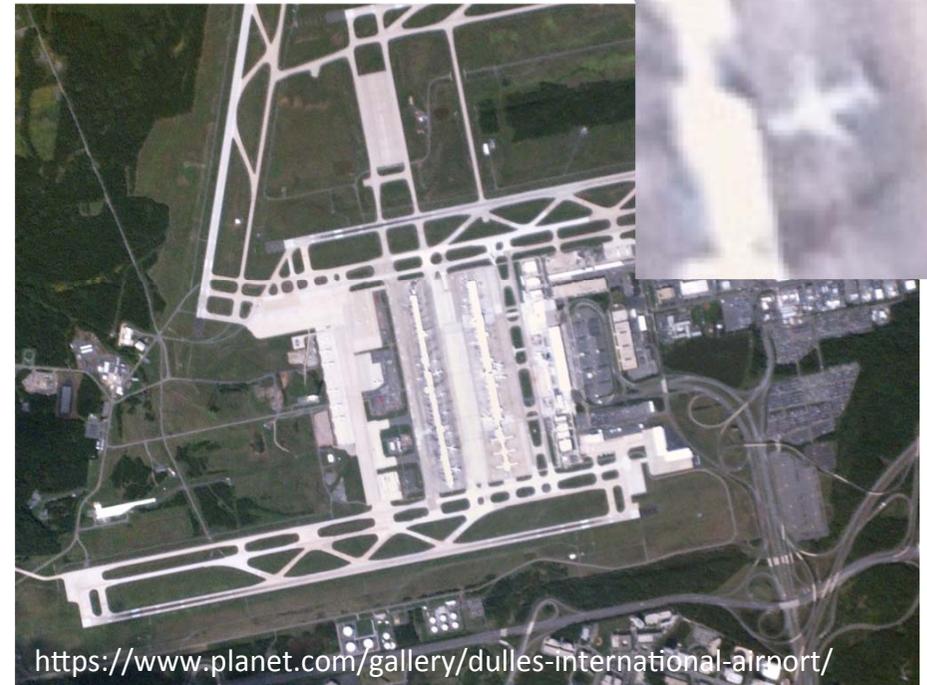
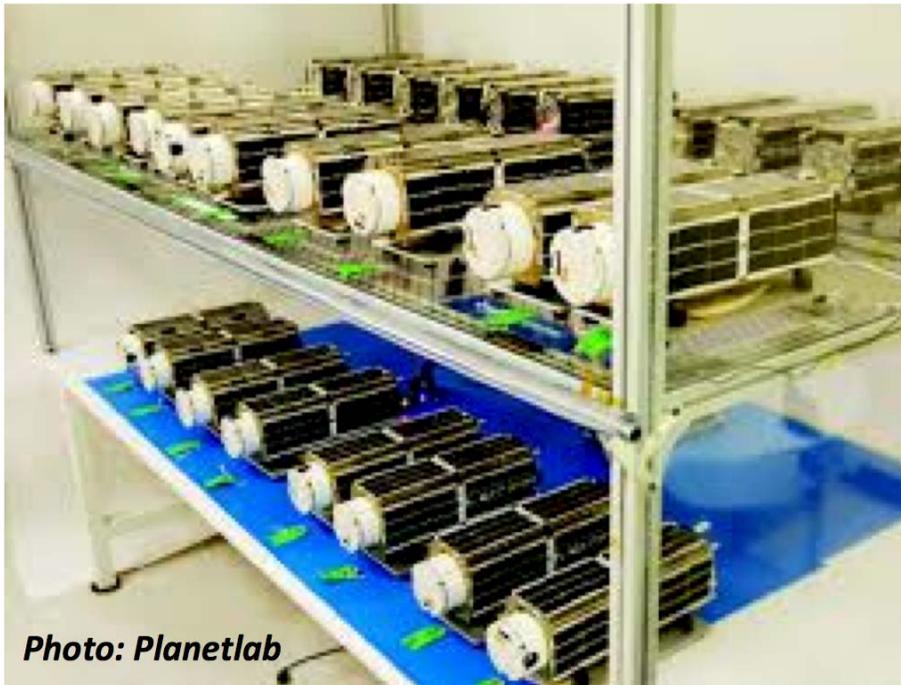


[http://ccar.colorado.edu/asen5050/projects/projects\\_2013/Naik\\_Siddhesh/Cubesats.html](http://ccar.colorado.edu/asen5050/projects/projects_2013/Naik_Siddhesh/Cubesats.html)

# 超小型衛星の開発利用目的

- 教育
  - 学生にシステム工学を通じたモノ作りを体験させる
  - 宇宙機関・企業等の人材育成
  - アウトプット: 学生
- 技術実証・科学観測
  - 新技術の宇宙実証
  - 自分のやりたい実験や観測を宇宙でするために自分で衛星を作る
  - アウトプット: 論文、特許、新たな知見
- 実(商業)利用
  - 自分以外の他者のために、お金を貰って衛星を作る
  - アウトプット: データ(画像、通信、観測、etc)

# 超小型衛星の商業利用



3U キューブサットで撮った写真

2014年だけで、92基が打ち上げられる(内、26基は打ち上げ失敗)

- 超小型衛星(キューブサット)の商業コンステレーションが2013年に始まる
- 市場調査では、50kg以下の衛星の世界市場は2014年の7億ドルから2019年に18億ドルに成長すると予測

# 超小型衛星企業

- Planetlab (US)
- Spire (US)
- Skybox Imaging (US)
- Pumpkin (US)
- Tyvak (US)
- アクセルスペース (JPN)
- キヤノン電子 (JPN)
- Astroscale (Singapore)
- ClydeSpace (UK)
- ISIS (Netherland)
- Gomspace (Denmark)
- Sequoia Space (Columbia)
- Cubespace (South Africa)
- ----
- ----
- ----

衛星製造メーカーではなく、データ  
プロバイダとしてのビジネスへ

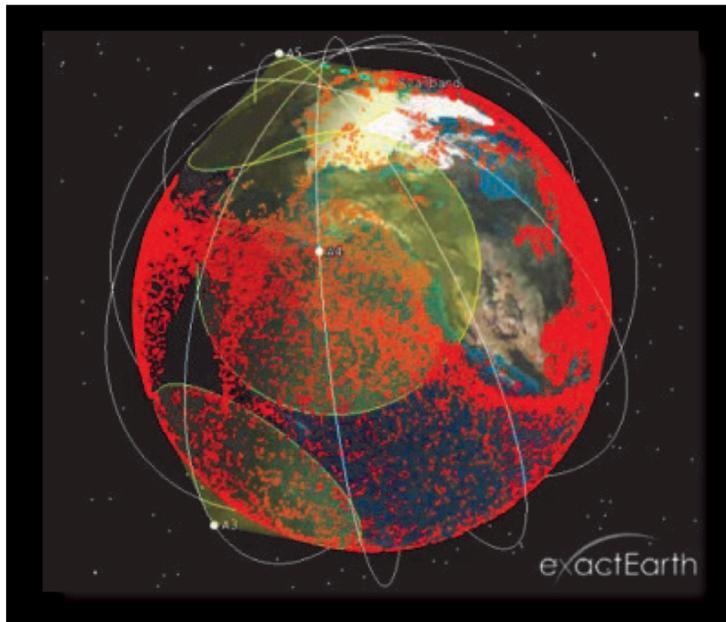
殆どがベンチャー又は異業種参入(キヤノン電子)

# 超小型衛星ビジネス

- 超小型衛星の商業的価値が最も高まるのは、  
コンステレーション運用した時
  - 個々の衛星の信頼度の低さを全体システムで補う
  - 地球を点でなく、面でカバー

# 超小型衛星による海洋監視

- AIS(Automatic Identification system)受信による船舶の追跡



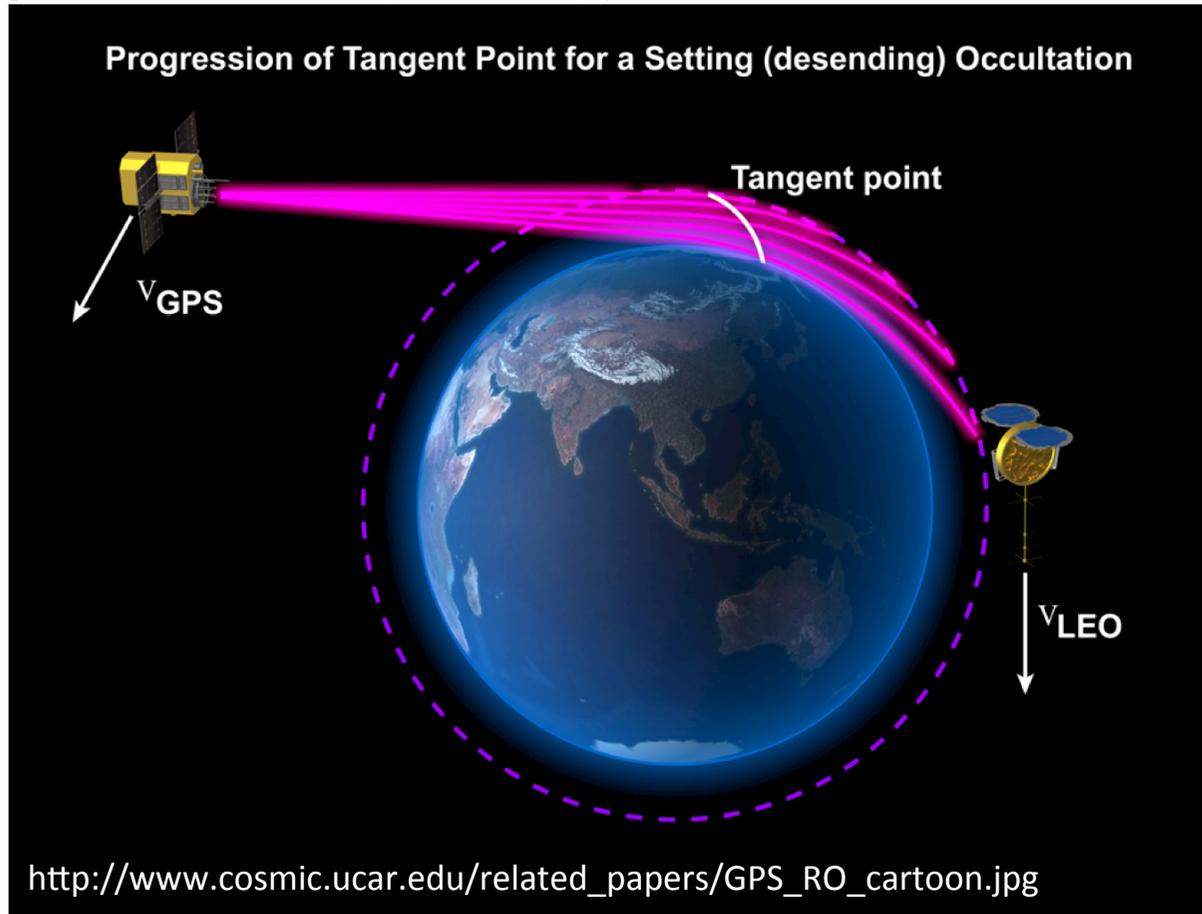
100kg

<http://www.sstl.co.uk/Missions/exactView-1--EV1---Launched-2012>

Exactview constellation (カナダ) 7基の衛星によるコンステレーション

# 超小型衛星による気象観測

- GPSオカルテーションによる地球大気の水蒸気密度鉛直方向分布の測定



# 超小型衛星によるデータ中継

## OneWeb



<http://oneweb.world/#solution>

650 150kg satellites in LEO  
(800km and 950km)

Airbus  
Virgin Galactic  
Intelsat

5億ドル(=600億円)調達

衛星1個 40万~50万ドルで製作?

## Space X



<http://spacenews.com/intelsat-asks-fcc-to-block-spacex-experimental-satellite-launch/>

4000 100-to-500kg satellites in LEO  
(650km)

Google

10億ドル(=1200億円)調達

メガコンステレーション

Internet 中継

# 第一世代コンステレーション

## 例: OrbComm

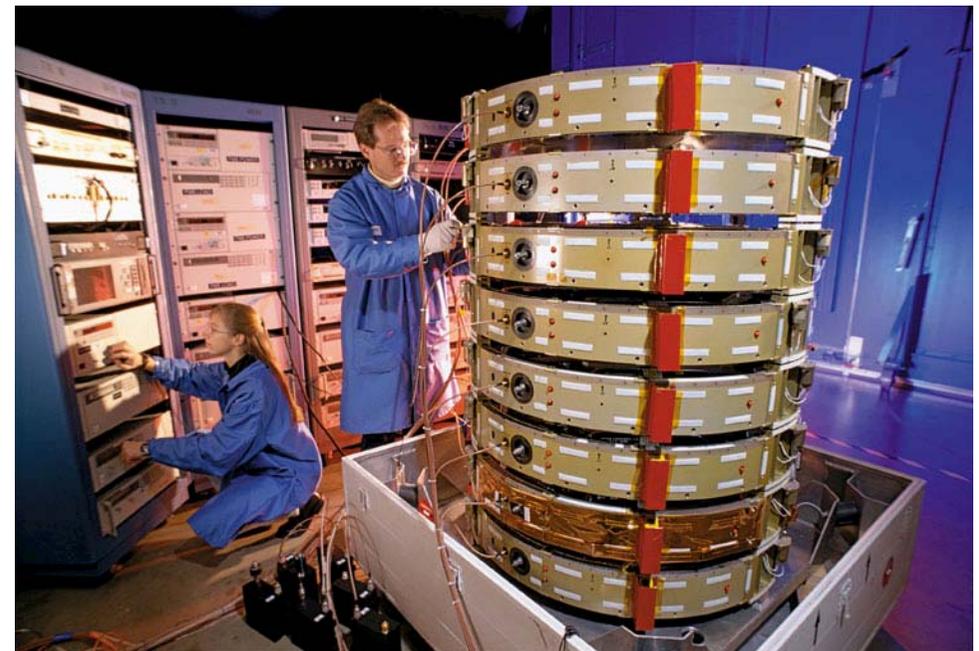


- Mass 46kg,
- 1m diameter, 16.5cm thick, 0.21m<sup>3</sup>
- 150W (BOL) (GaAs solar cell)
- 35 Satellites in 740 to 825km
- 6 orbital planes
- 5 life years
- FM1, FM2 Launched in April 1995
- Others launched from late 1997 to late 1999
- Bankrupt in 2000
  
- Second generation to be launched from 2010

# 第一世代コンステレーション

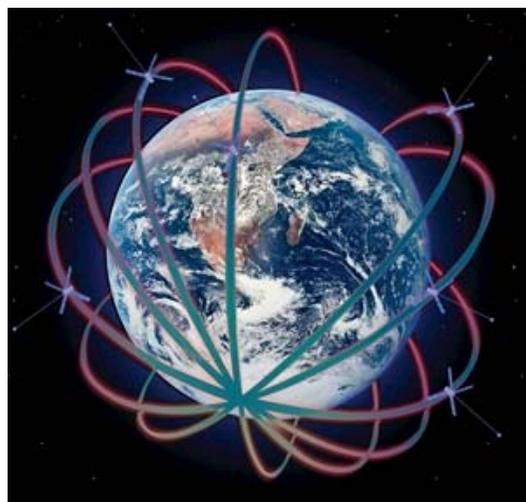
## 例: OrbComm

- 一度に5個の衛星を同時に製作
- 1ヶ月あたり5個生産
- 1個あたり5億円



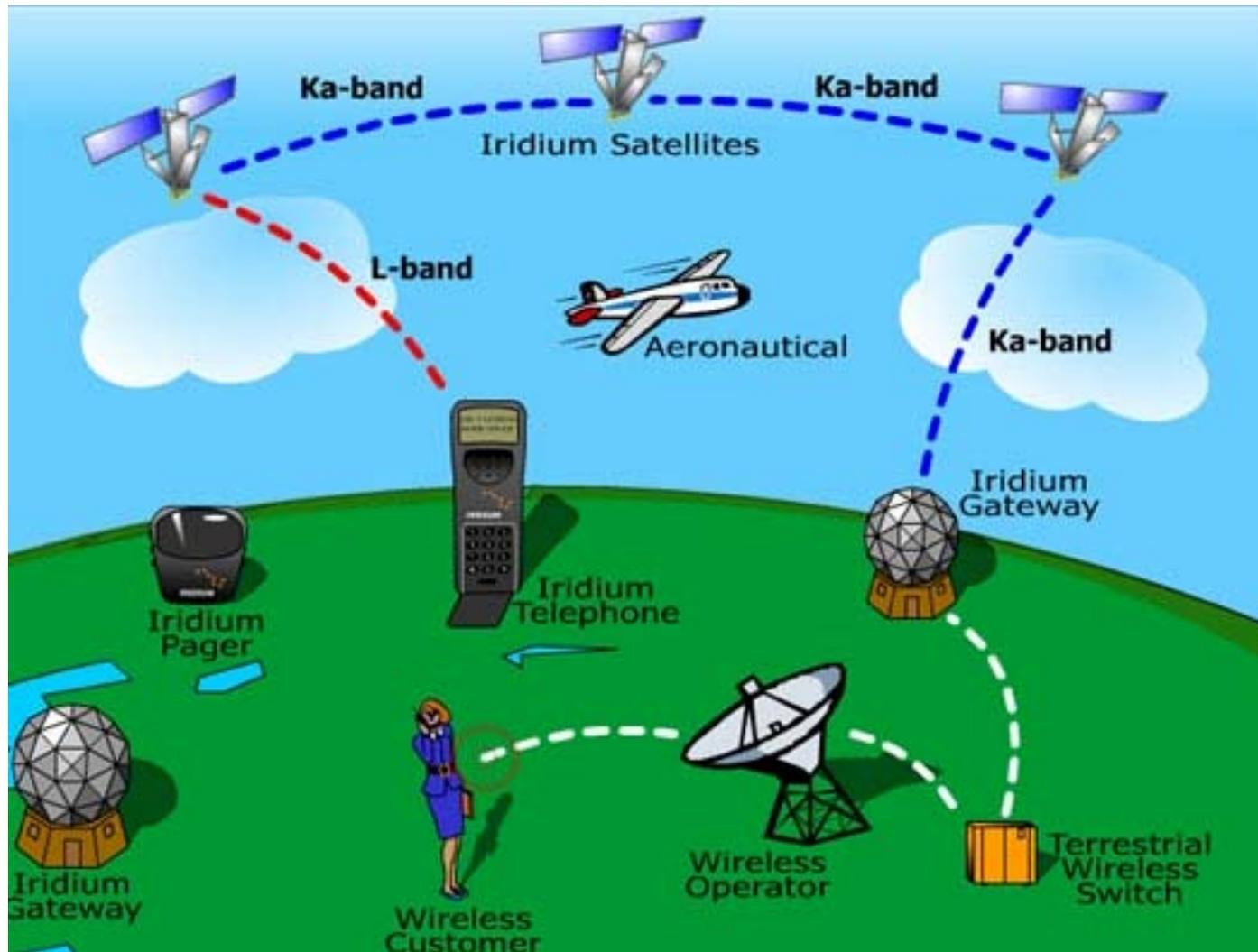
# 第0世代コンステレーション

- TRANSIT (1960s)
  - 46 Satellites from 1959 to 1988
  - Position determination of US Naval Ship (nuclear submarines)
  - 55kg each
  - 1100km altitude



*Credit APL*

# イリジウムシステム



[http://www.wcclp.com/designimgs/iridium\\_overview2.jpg](http://www.wcclp.com/designimgs/iridium_overview2.jpg)

# イリジウム衛星

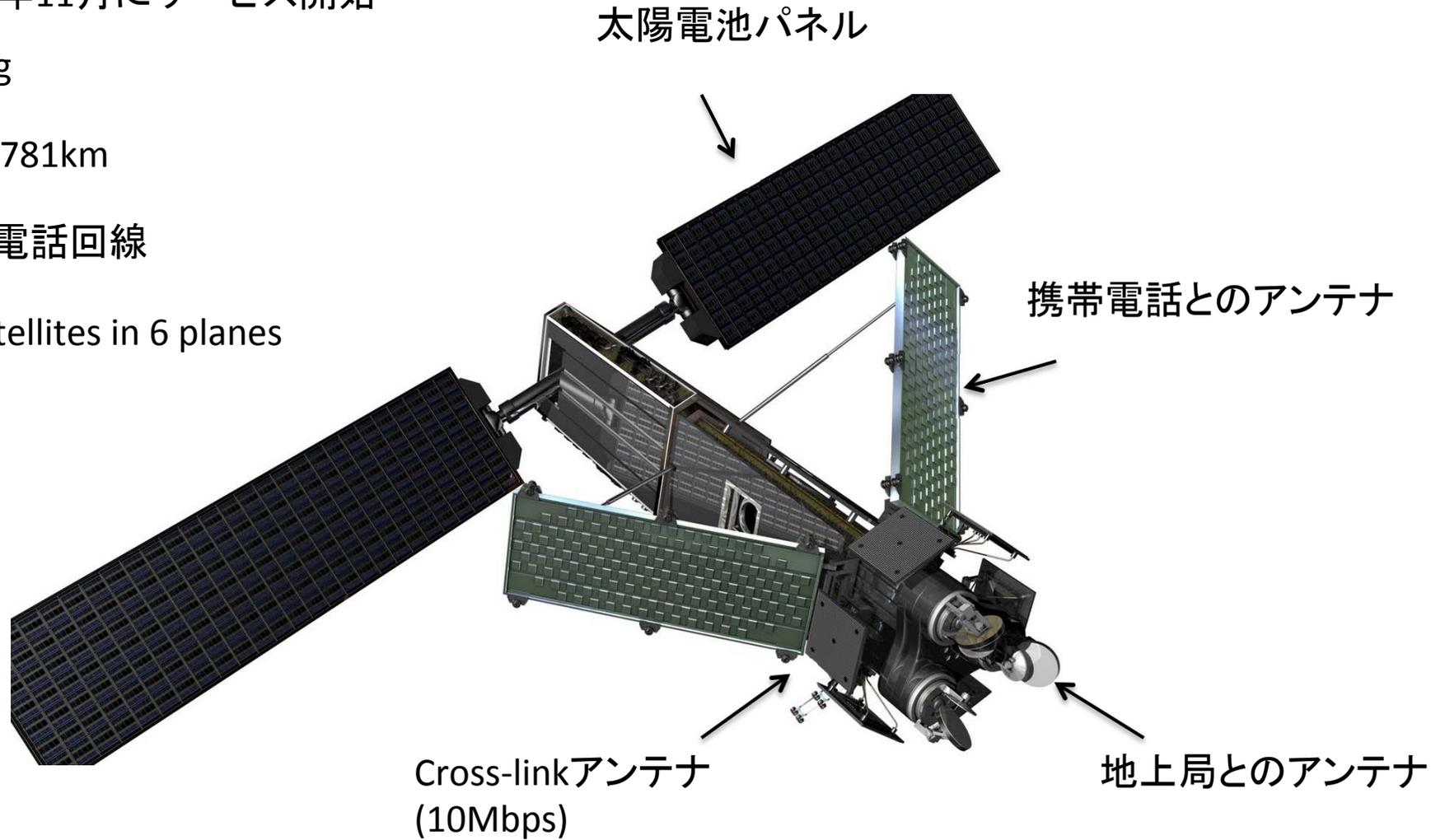
1998年11月にサービス開始

680kg

高度:781km

1100電話回線

66 satellites in 6 planes



<http://svescapevelocity.blogspot.com/2009/12/iridium-communications-satellite-et.html>

# なぜ第一世代コンステレーションは失敗したのか？

- 地上の携帯電話とまともに勝負しようとした
  - イリジウム
  - Globalstar
  - Teledesic
  - 価格が高すぎた
    - 地上携帯電話に価格競争で破れる
  - 端末が大きすぎた
  - システム完成の遅れ
- Orbcomm
  - 35個の超小型衛星
  - 宇宙用として作った⇒システムが高い(500億円)
  - 通信速度が遅すぎた
  - 資金繰りに失敗
  - 初期投資の回収に失敗(15万に対し、3万の契約)

# なぜ第一世代コンステレーションは失敗したのか？



## **Established Companies Feeling 'Déjà Vu' on Mega-constellations**

by Dan Leone — April 15, 2015

The low Earth orbit constellations planned by upstarts OneWeb and SpaceX have garnered comparisons to the 1990s space-telecom bust.

*Space News April 15, 2015*

# 超小型衛星の課題と将来

- 打ち上げ手段
- 周波数
- デブリ
- 衛星技術
- 信頼性
- 開発の哲学
- 地上局
- 開発・試験インフラ
- 国際標準
- インターフェース
- 投資促進

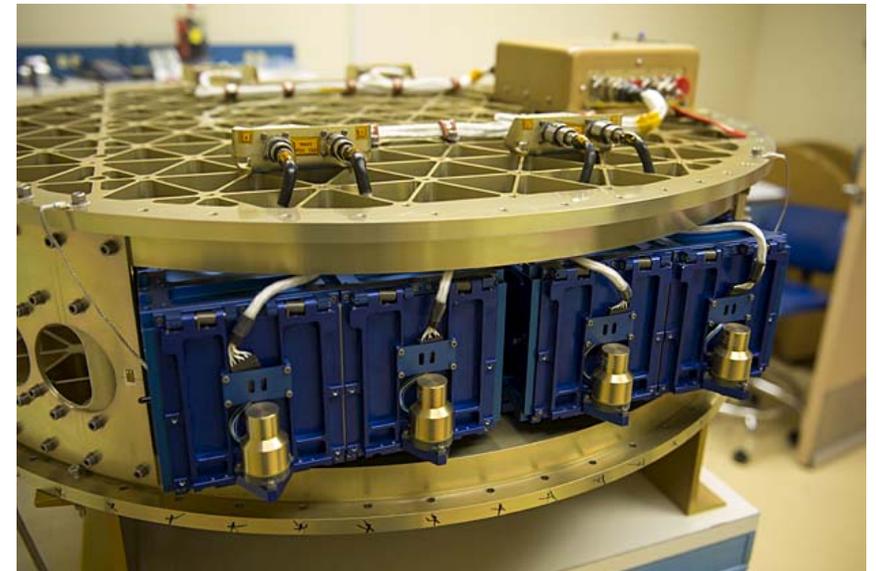
# 打ち上げ手段

- 殆ど全てが相乗りに頼る
  - 軌道面を選べない

## Russian Style



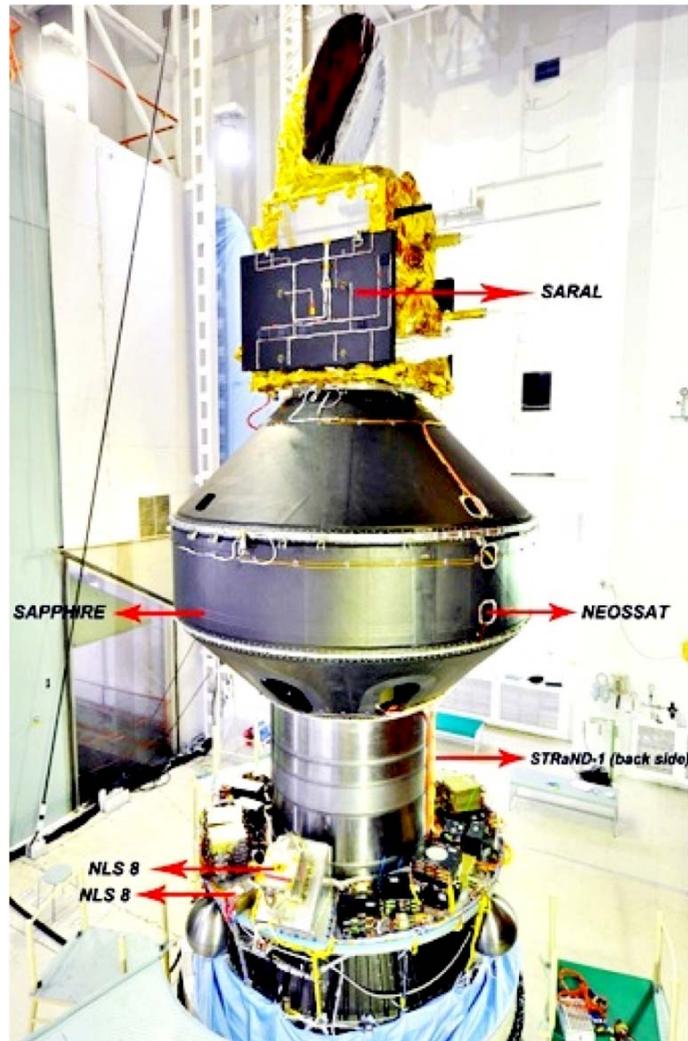
# US style



[www.csaengineering.com](http://www.csaengineering.com)

<http://www.nasa.gov/centers/ames/news/2013/NLAS-ready-for-flight.html>

# Indian Style



PSLV C-20 (2013)

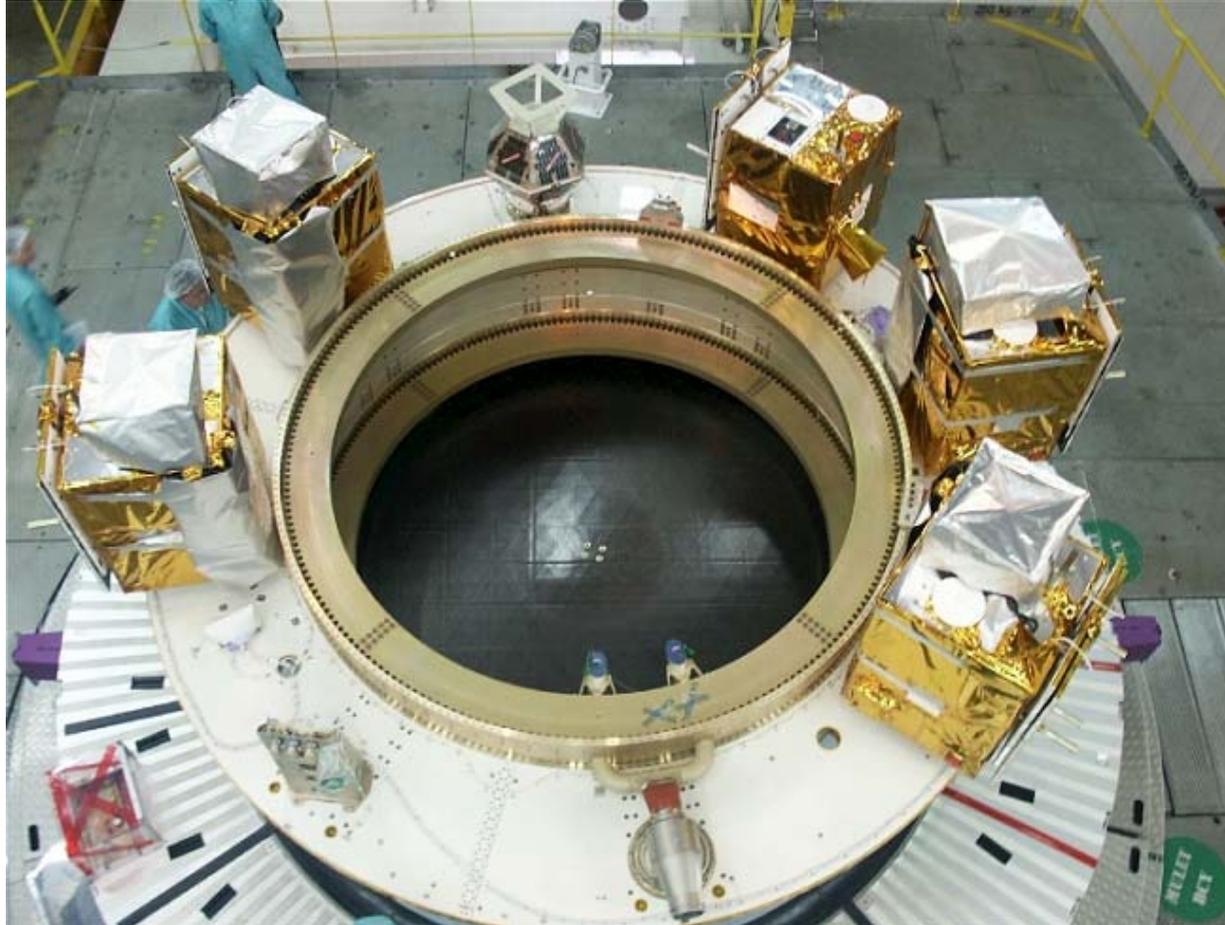
<https://www.utias-sfl.net/NLS-8/?p=130>



PSLV C-9 (2008)

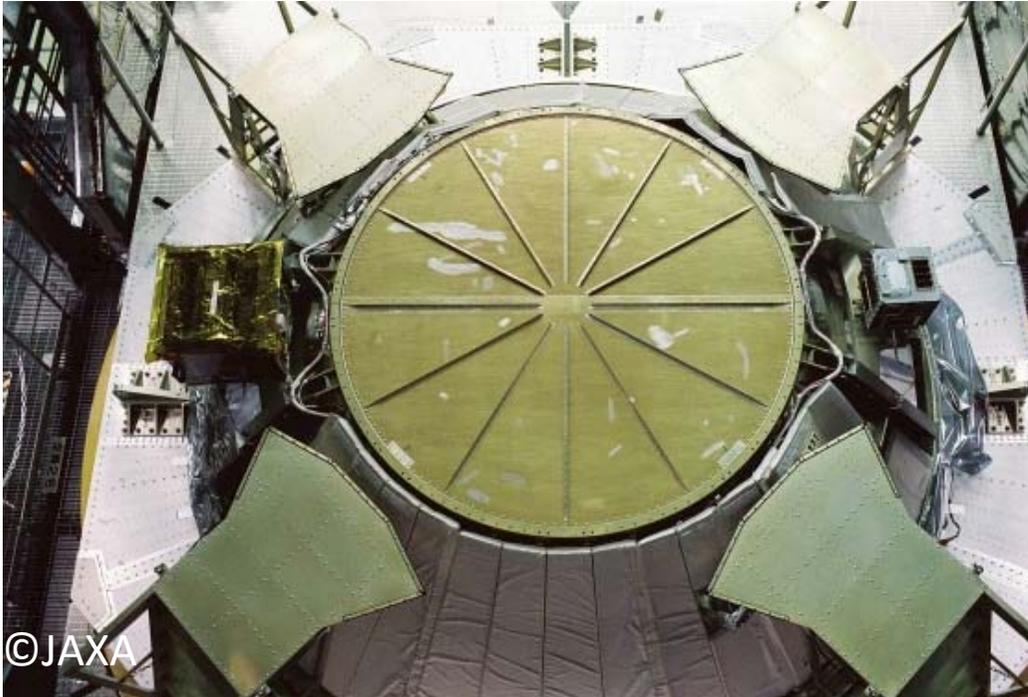
<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=434074&page=17>

# European Style



[http://smc.cnes.fr/MYRIADE/GP\\_lanceurs.htm](http://smc.cnes.fr/MYRIADE/GP_lanceurs.htm)

# Japanese style



# コンステレーション

- コンステレーションの場合、打ち上げは通常、ロケット全てを使う
  - 軌道面毎の打ち上げが必要



[http://en.wikipedia.org/wiki/Pegasus\\_\(rocket\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Pegasus_(rocket))

# コンステレーション

- コンステレーションの場合、打ち上げは通常、ロケット全てを使う
- 如何にして効率的にフェアリング内におさめるか

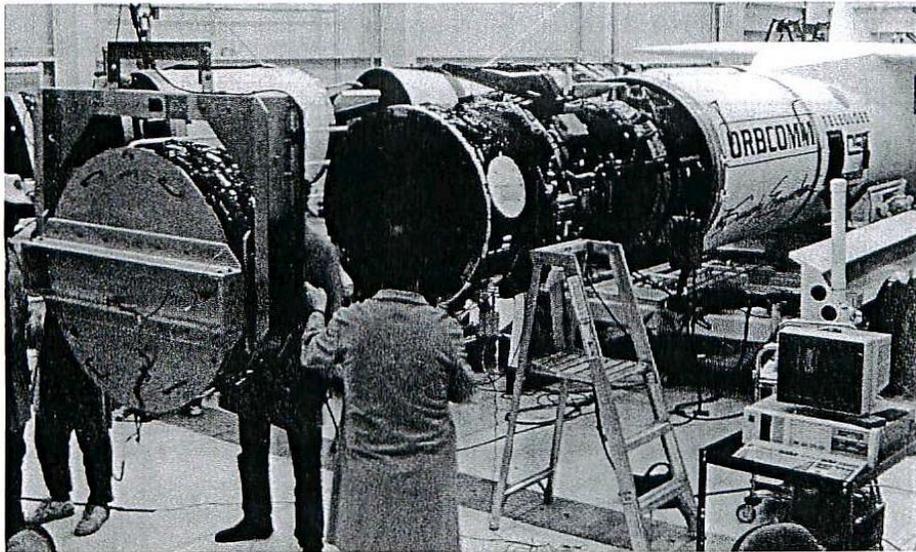
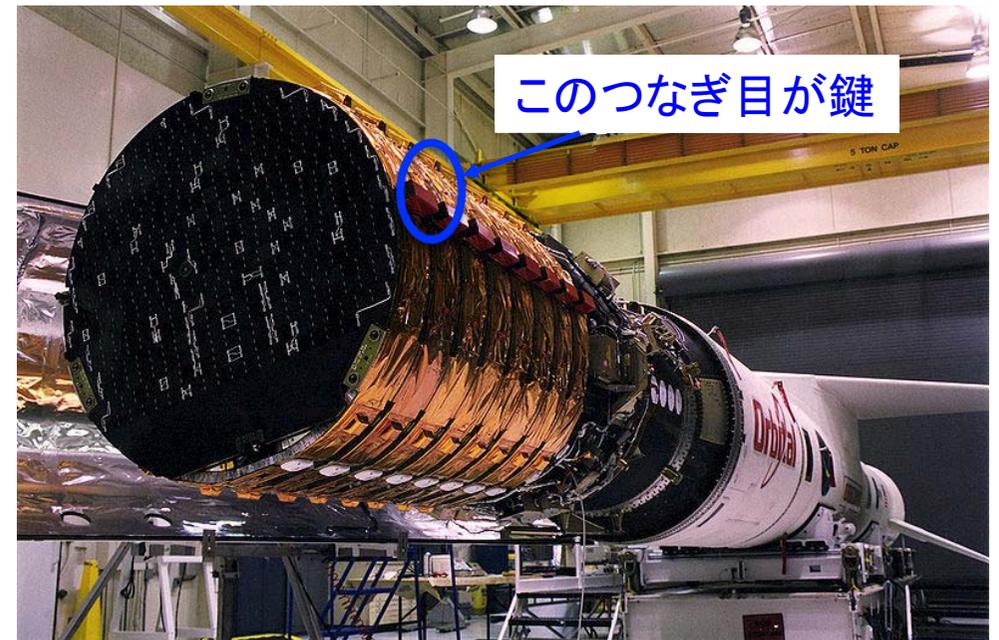


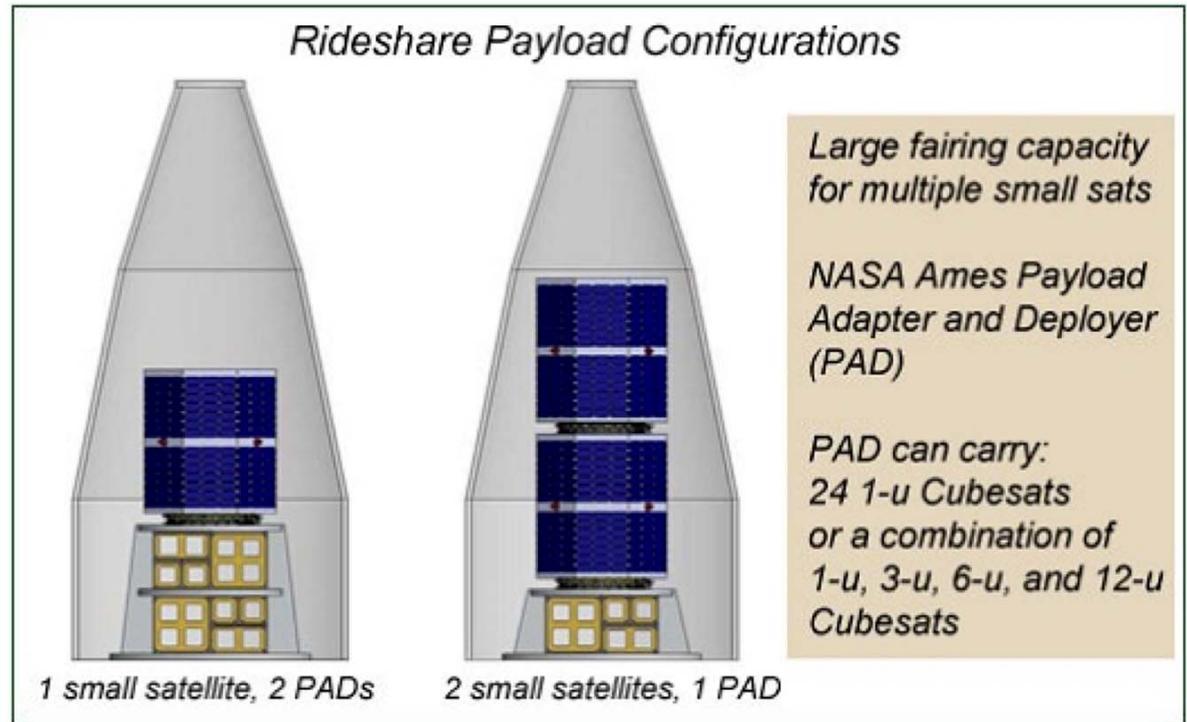
Fig. 14.8. ORBCOMM FM1, FM2, and MicroLab mating to Pegasus XL.



[http://en.wikipedia.org/wiki/File:ORBCOMM\\_integrated.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:ORBCOMM_integrated.jpg)

How to adapt the satellites into the fairing effectively

# New Style

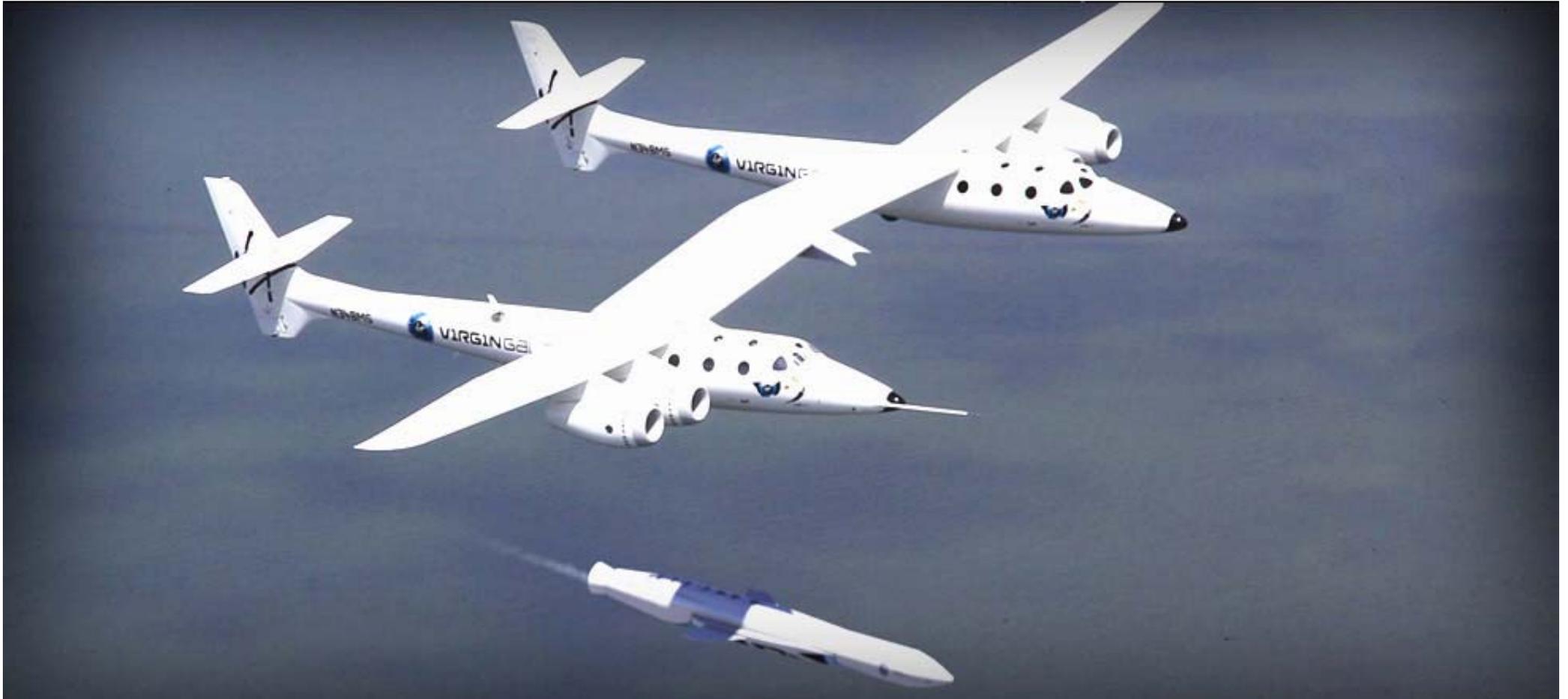


<http://www.parabolicarc.com/2013/01/26/ors-university-of-hawaii-team-up-on-new-small-satellite-launcher/>

Launch 250kg to 400-km  
Debut in 2014 from Hawaii

**Dedicated launch!**

# New Style



<http://www.virgingalactic.com/launcherOne/performance-and-specification/>

225kg to low-inclination LEO  
100kg to Sun-synchronous orbit  
10M\$/launch

Dedicated launch!

1kg 440万円!!

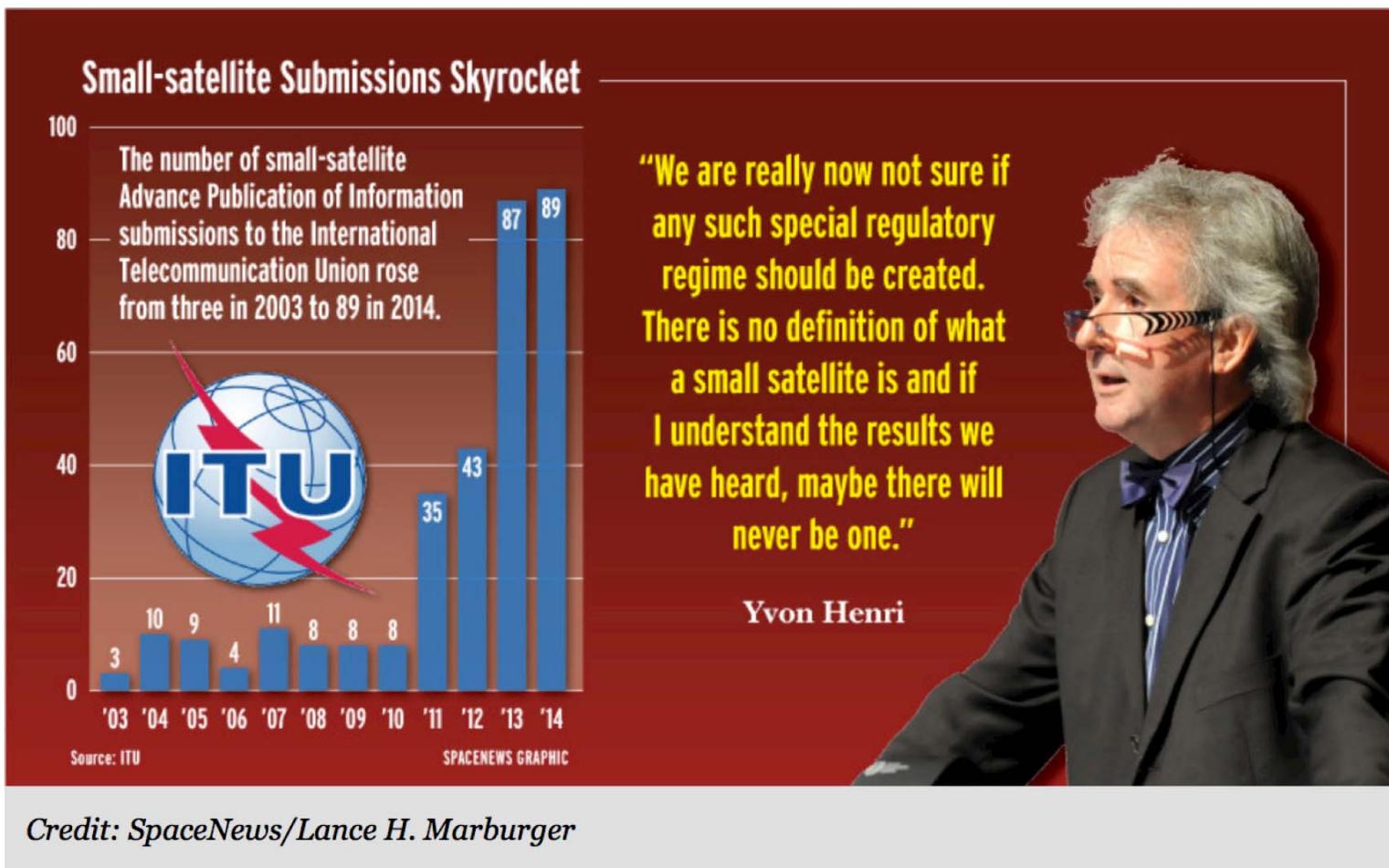
# 周波数

- 衛星とやりとりする電波の周波数は国際電波連合 (ITU) で国際調整を経ないといけない
  - 超小型衛星だろうと超大型衛星だろうと同じ
- 周波数取得までに
  - アマチュア無線帯~2年
    - 商業利用は不可
  - 非アマチュア無線帯~5年
  - 超小型衛星の開発スケジュールより遥かに長い
    - 超小型衛星向け周波数帯の創設⇒頓挫
- メガコンステレーションに如何に割り当てるか
- 運用中止 (失敗) した超小型衛星の停波

# 周波数

## ITU Grapples with Small-satellite Regulatory Challenge

by Peter B. de Selding — March 13, 2015



Credit: SpaceNews/Lance H. Marburger

# デブリ

- デブリ防止策は衛星の種類によらず皆同じ
  - ミッション終了後、25年で地球に落下(低軌道)
- 現状では、打ち上げ前に25年以内の落下をシミュレーションにより示せばよい
  - Area-to-mass ratioで決まる
  - もし、25年を超えるときは、
    - 空力抵抗増加
      - 展開機構の信頼性
    - 推進系
      - 安全性
  - 現状では、これらの対策は解析による実証で可とされている
- Mega-constellationやキューブサットの増加に伴い、
  - 衝突回避(推進系搭載)を求める声
  - キューブサットの軌道高度の上限を設定する声
  - が増加している
- 超小型衛星の技術革新
- Traditional Space Sectorと超小型衛星コミュニティの相互理解

# 超小型衛星の特徴

特徴	利点	欠点
軽い	一機あたりの打ち上げ費用安い	Kgあたりの打ち上げ費用は高い
小さい	扱いやすい	機能に制約
簡単	開発期間短い 信頼度高い 管理コスト安い 人件費安い	機能に制約
民生品を使用	開発期間短い 部品コスト安い 機能高い	信頼度低い

# 超小型衛星技術の限界

- 超小型衛星の欠点は、「小さい」ことから
  - 小さいので、あまりモノを詰め込めず、機能を絞らざるを得ない
  - この問題は、高機能の民生部品を使用し、環境試験等で信頼度を保証すれば解決できる
  - 「小ささ」による根本的な問題とは？

# 超小型衛星の限界

- 電力

- 電力は太陽に向ける面積で決まる
- 展開物を大きく広げない限り、50cm級衛星では100W程度が最大

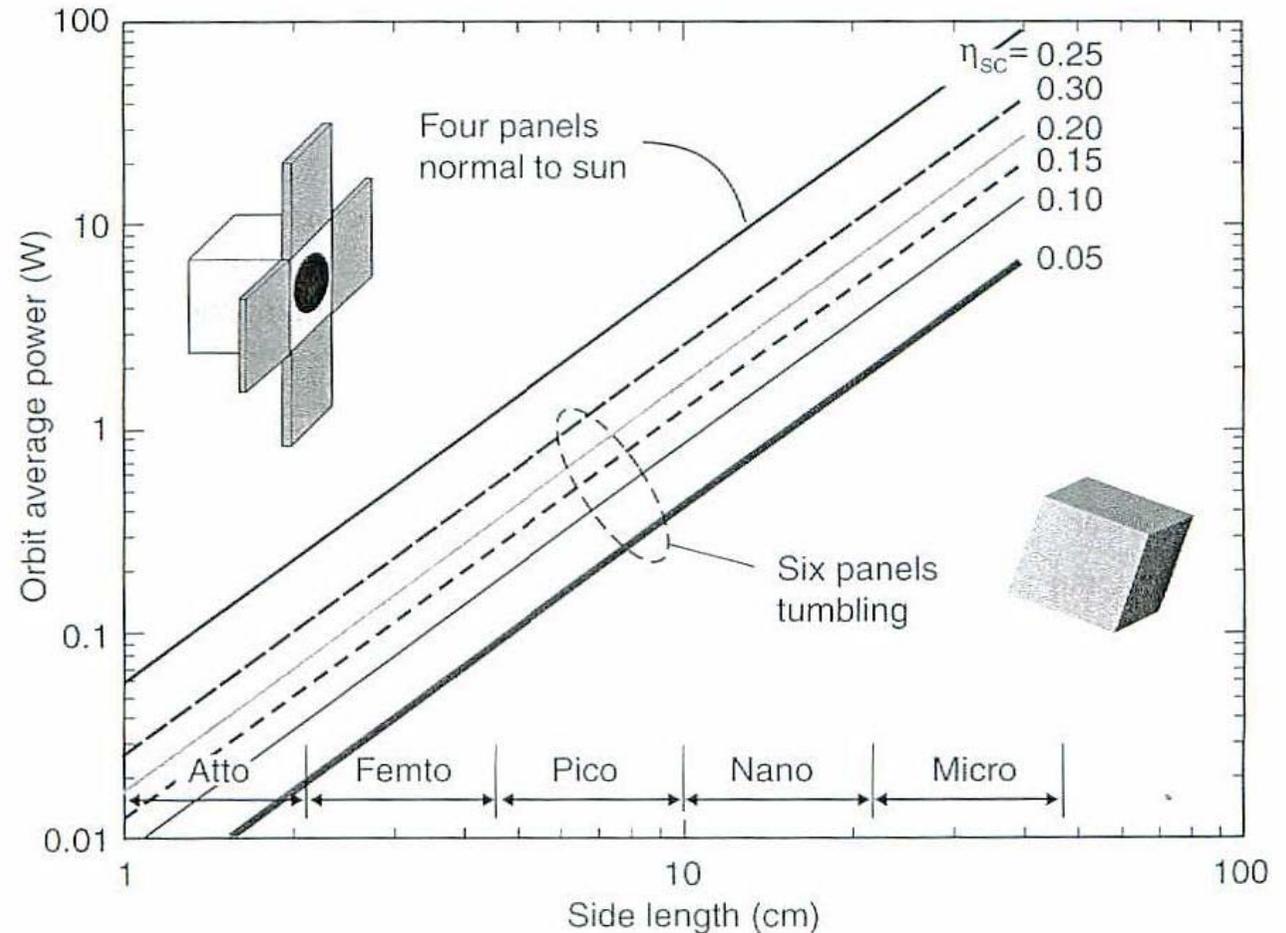


Fig. 23.1. Orbit average electric power for a cubical solar-powered spacecraft in LEO as a function of side length. The solar collection efficiency  $\eta_{sc}$  is the solar-array energy conversion efficiency times the surface coverage fraction for each side. This illustration assumes a 40 min eclipse in a 100 min orbit with an array-output-to-bus-power conversion efficiency of 70%. The mass classifications along the bottom are based on an average spacecraft density of 1 g/cm<sup>3</sup>.

# 超小型衛星の限界

- 通信

- 周波数が高くなれば、大きなアンテナは不要
- しかし、電力で通信速度が決まる

Shannon's theory

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

C: 通信容量 (bps)

B: 通信帯域幅 (Hz)

S: 信号の総電力 (W)

N: ノイズの総電力 (W)

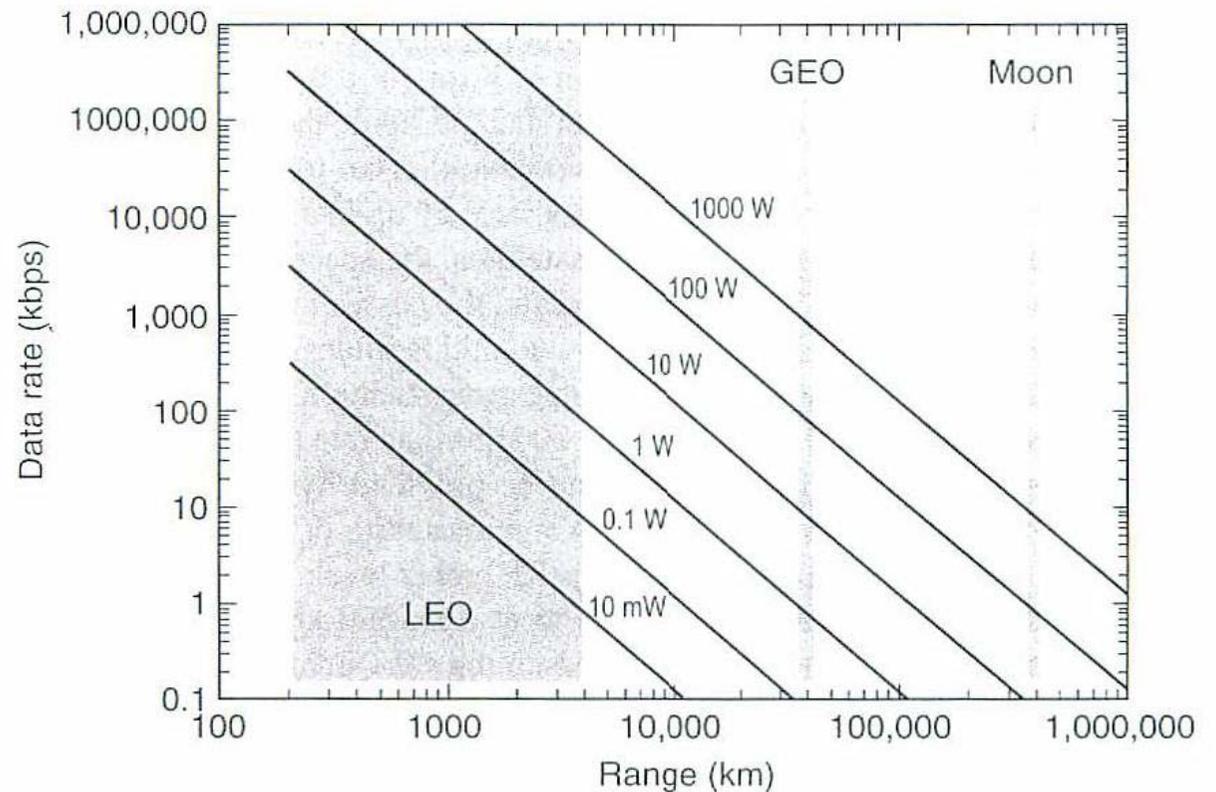
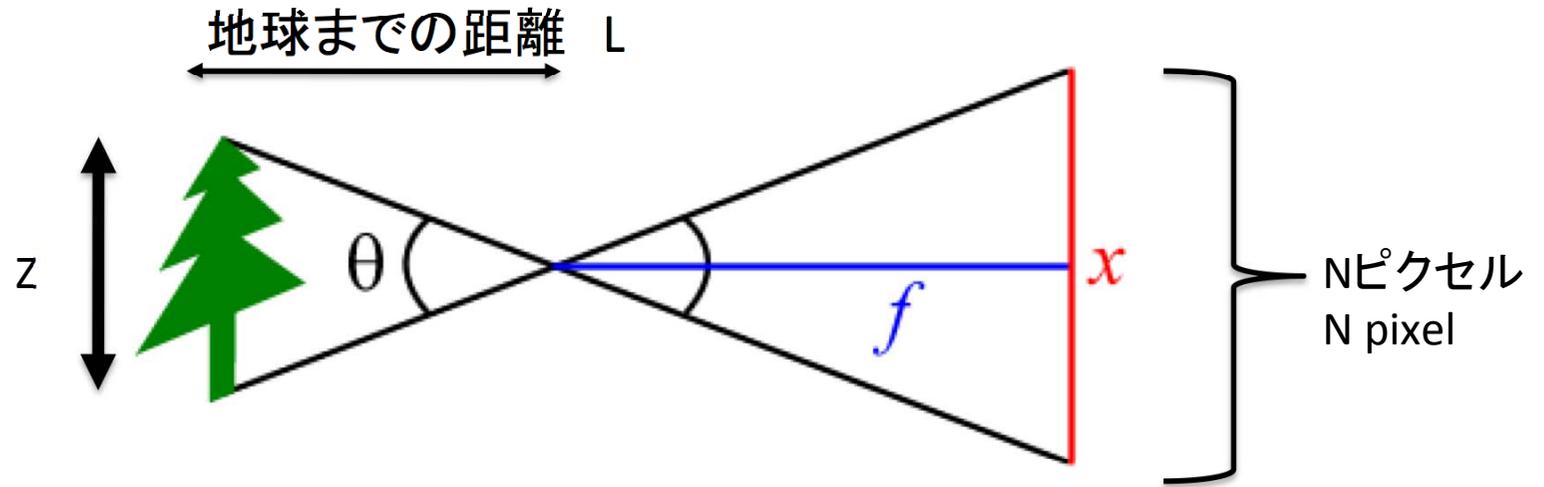


Fig. 23.8. Data rate as a function of range for different spacecraft isotropic radiated powers. Frequency is 2 GHz.

# 超小型衛星の限界

- 分解能
  - 回折限界
  - 焦点距離



Resolution  
Diffraction  
Focal length

<http://www.cmehappy.jp/articles/angleofview.html>

f; 焦点距離  
x: CCDの大きさ

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{x}{2f} = \frac{Z/2}{L}$$

$$\text{Resolution} \propto \frac{\text{Size of CCD} \times \text{distance}}{\text{Focal length}}$$

CCDのピクセルの数: N  
1ピクセルの大きさ: y

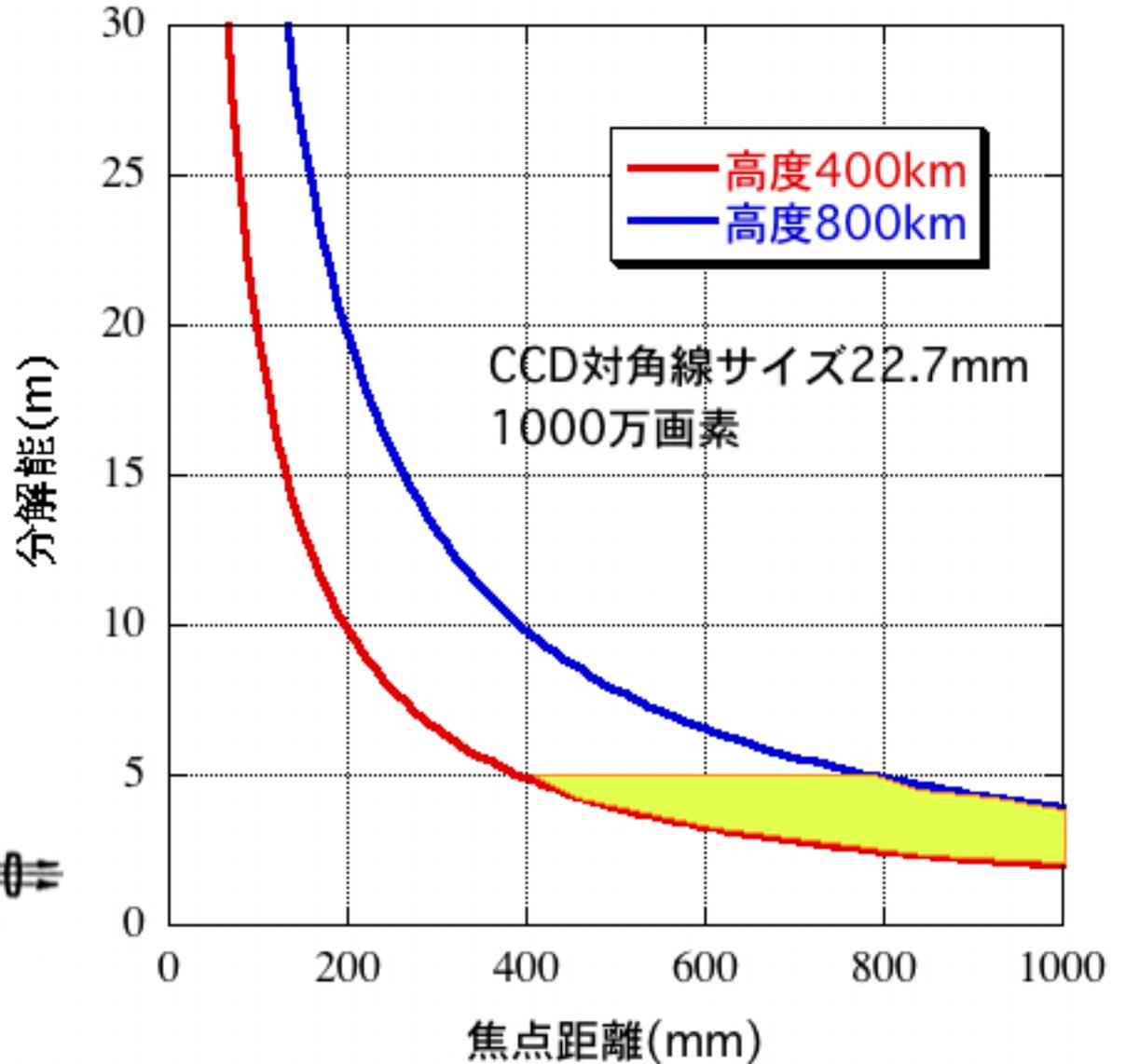
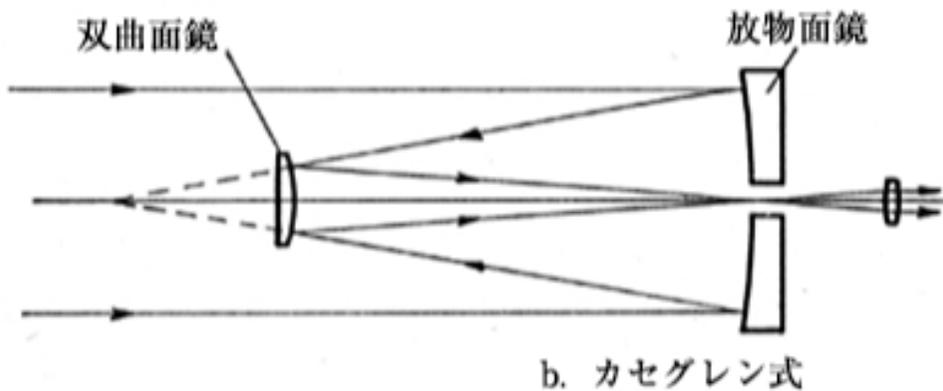
$$x = Ny$$

$$\frac{Z}{N} = \frac{yL}{f}$$

$$\text{分解能} \propto \frac{\text{CCDの大きさ} \times \text{距離}}{\text{焦点距離}}$$

# 超小型衛星の限界

- 現在のところは焦点距離による限界で分解能が決まっている



# 超小型衛星の限界

最後は、回折で分解能が決まる ← 物理的な限界

$$\sin \alpha = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

$\lambda$ : 光の波長 ~500nm

$D$ : レンズの口径

$\alpha$ : 角度分解能

$L$ : 地球までの距離

$$L \tan \alpha \approx 1.22 L \frac{\lambda}{D}$$

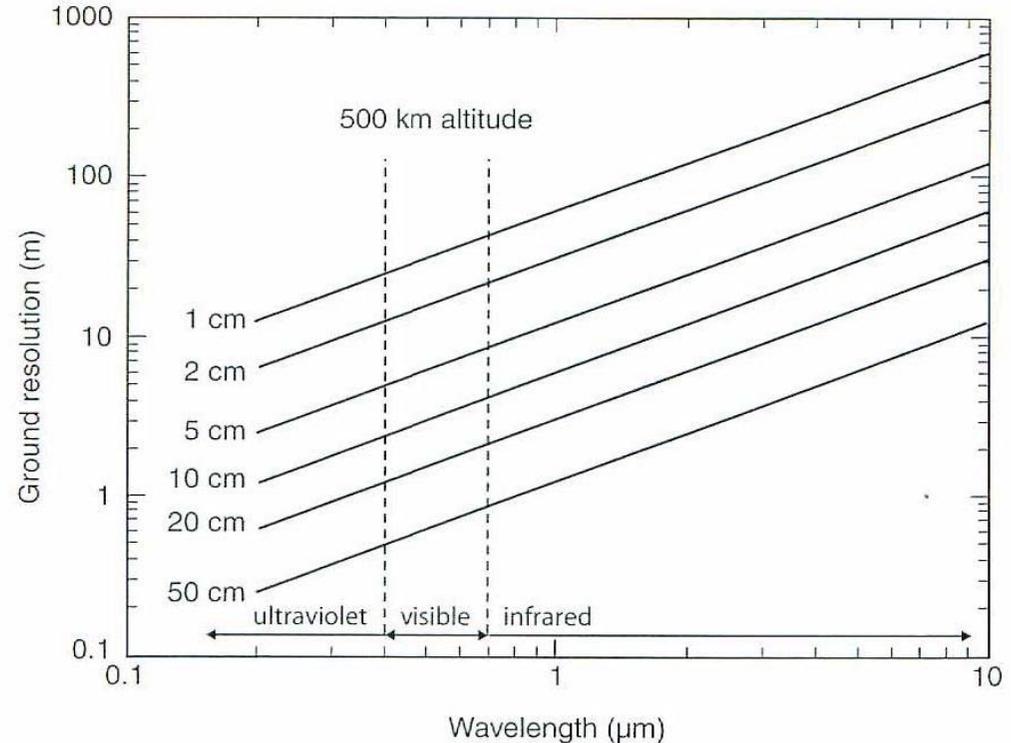


Fig. 23.6. Diffraction-limited ground resolution as a function of wavelength for 1, 2, 5, 10, 20 and 50 cm diameter primary optics at a range of 500 km.

*Small Satellites: Past, Present and Future*

$L=400\text{km}$ 、 $\lambda=500\text{nm}$ 、 $D=0.5\text{m}$ で $0.5\text{m}$

超小型衛星でも1m以下の分解能は可能!!

# 超小型衛星の限界

- 小さくていいこと
  - 姿勢制御がしやすい
    - 小さなトルクで動く
    - 常に首を振りながら、地上の一点を撮影可能
  - 軌道制御がしやすい
    - 小さな推力で大きな速度増分
  - 但し、姿勢制御、軌道制御のための機器を小型化する必要

$$T = \dot{\omega}I$$

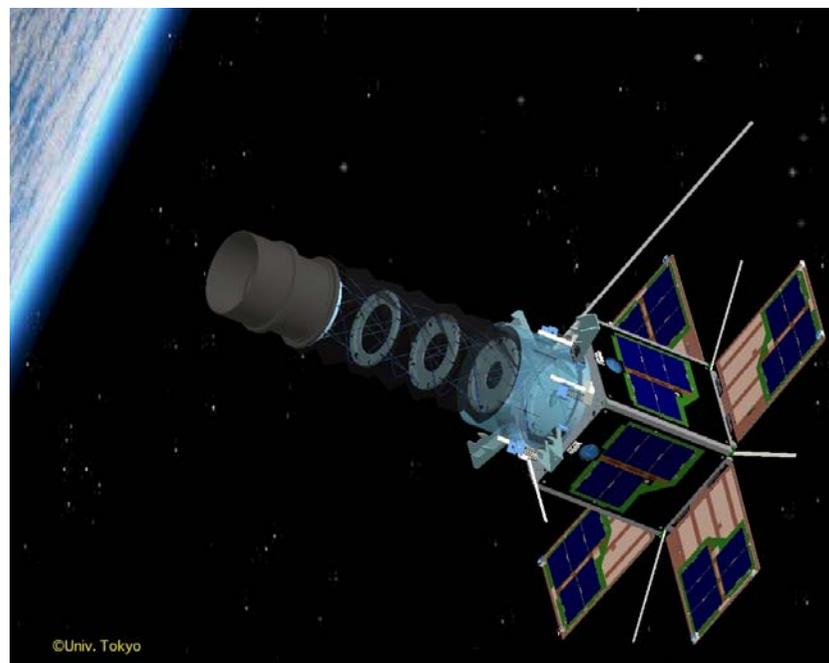
$$I = \int \rho r^2 dV \propto L^5$$

慣性モーメント  $\propto$  大きさの5乗

$$F = ma$$

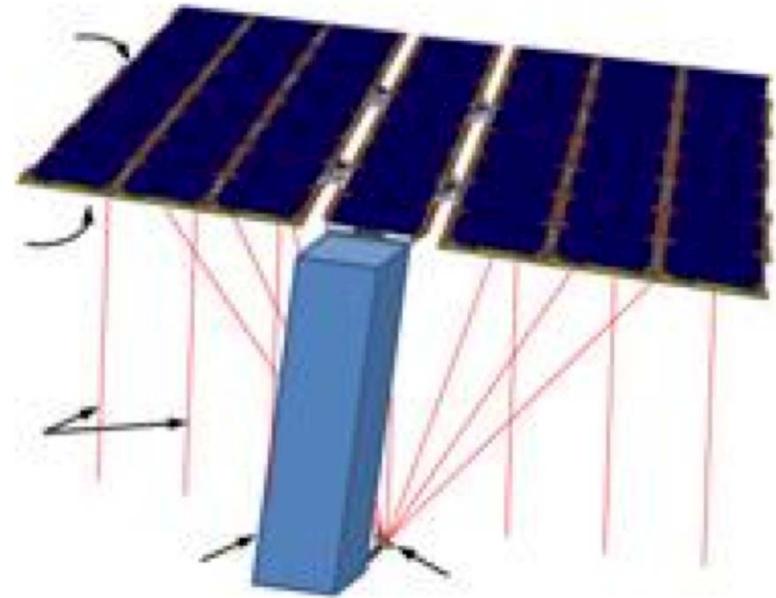
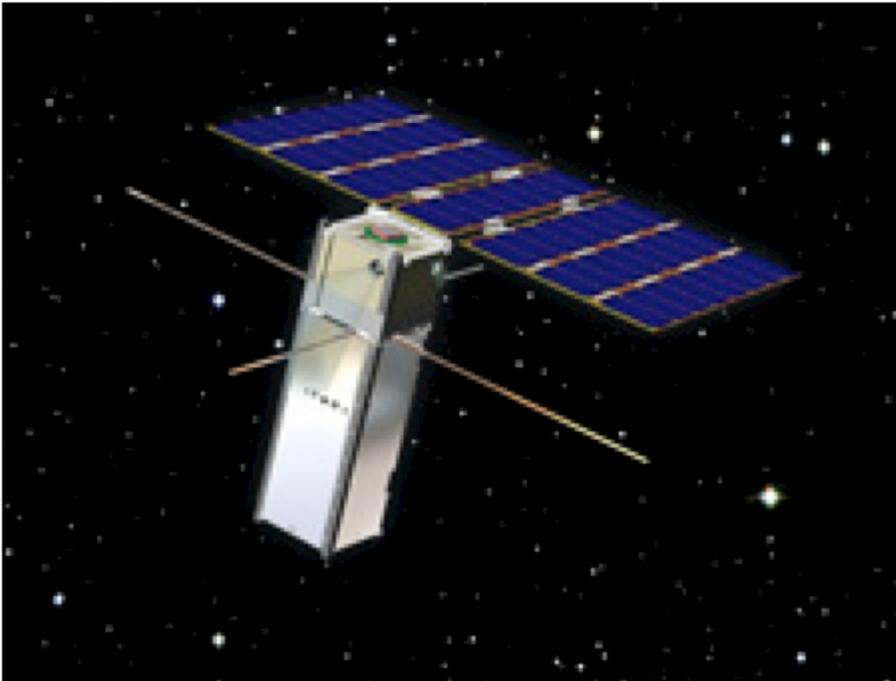
# 超小型衛星にとって必要な技術革新

- 軌道上での望遠レンズの進展
  - 画像分解能
- 太陽電池パネルの展開
  - 電力 $\propto$ 面積
- 高速通信
  - 高解像度画像・映像の転送
- 姿勢制御
  - 手ぶれ防止・斜め撮り
- 軌道制御
  - 編隊飛行
- 超小型衛星用小型ロケット



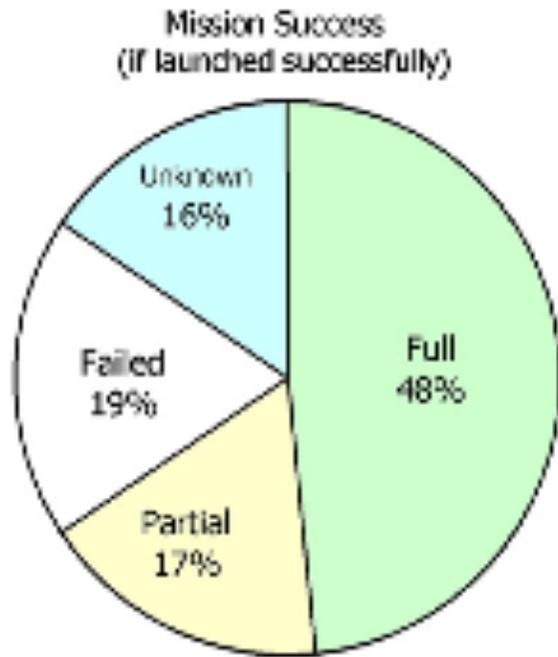
# Integrated Solar Array and Reflectarray Antenna

Use deployable solar panel also as a reflector for communication

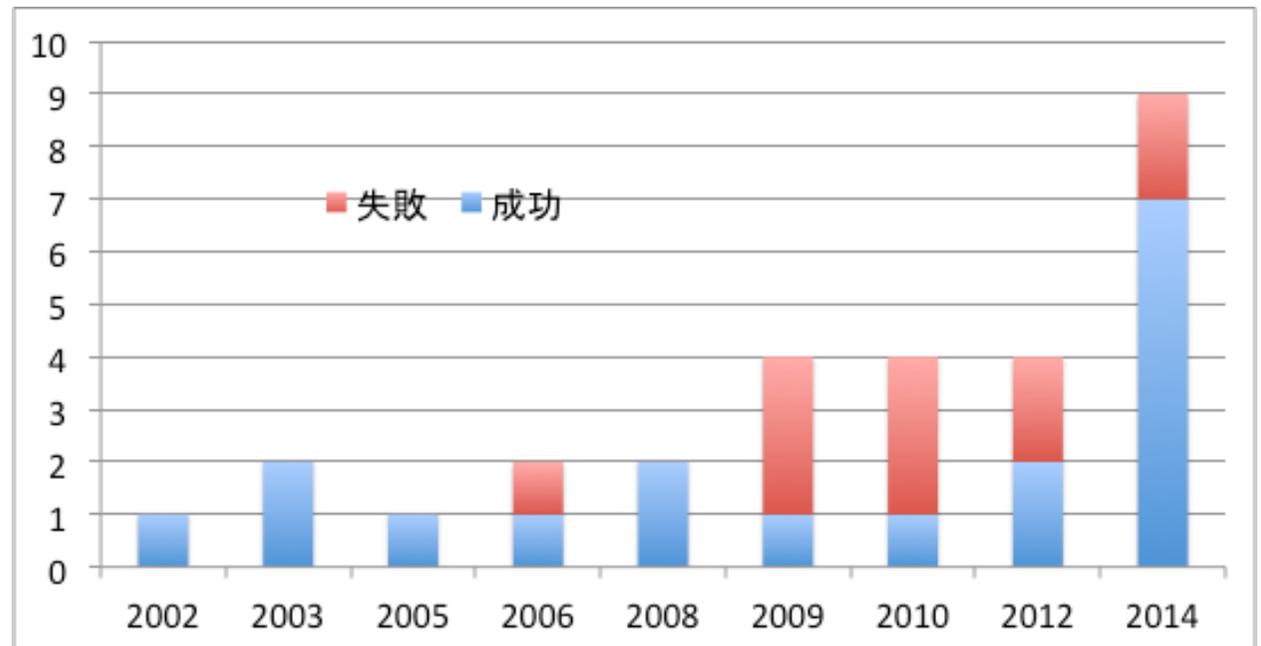


[http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/small\\_spacecraft/isara\\_project.html](http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/small_spacecraft/isara_project.html)

# 信頼性

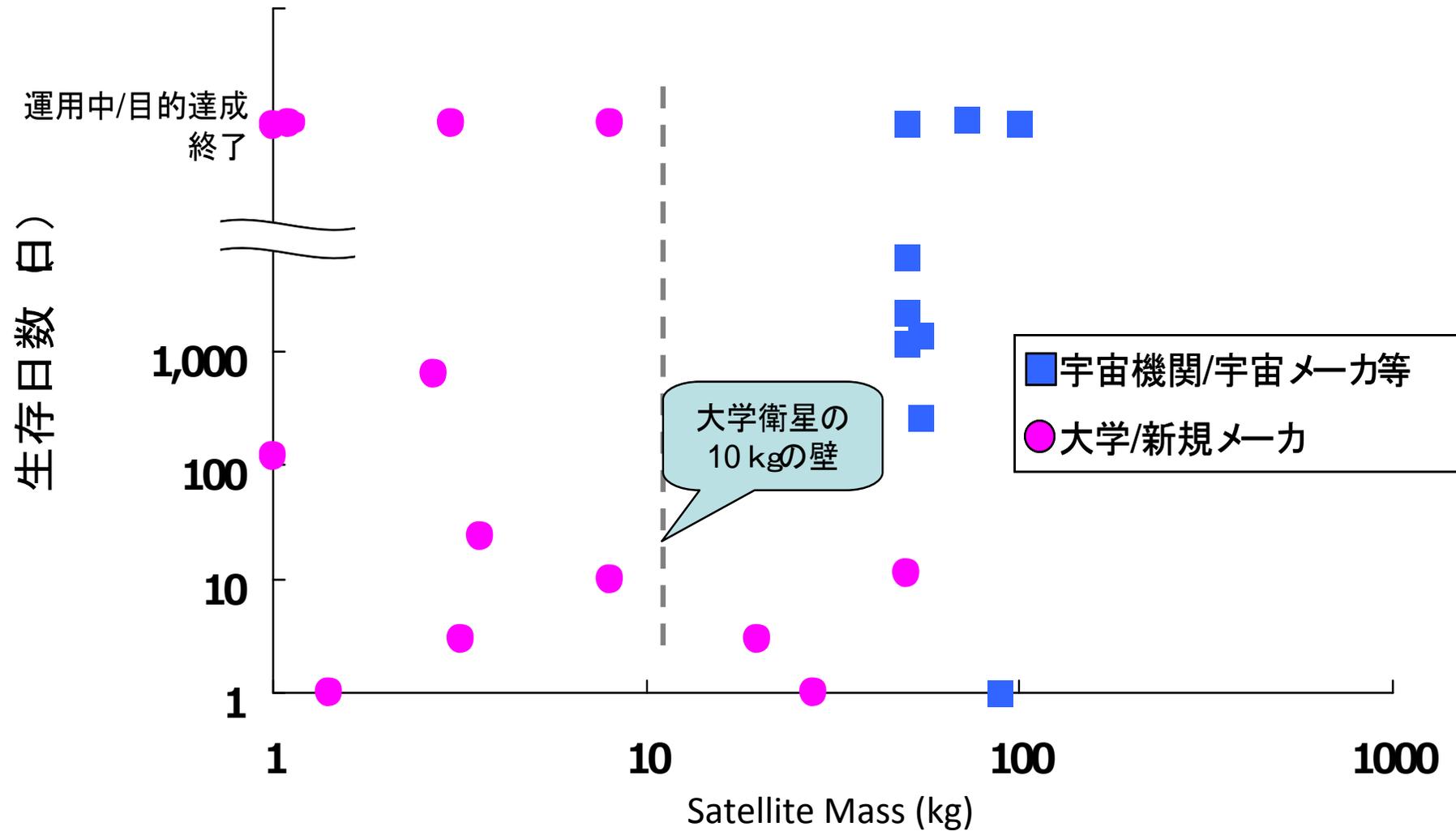


ミッション成功率 (<10kg)  
(Bouwmeester et al., 2010)



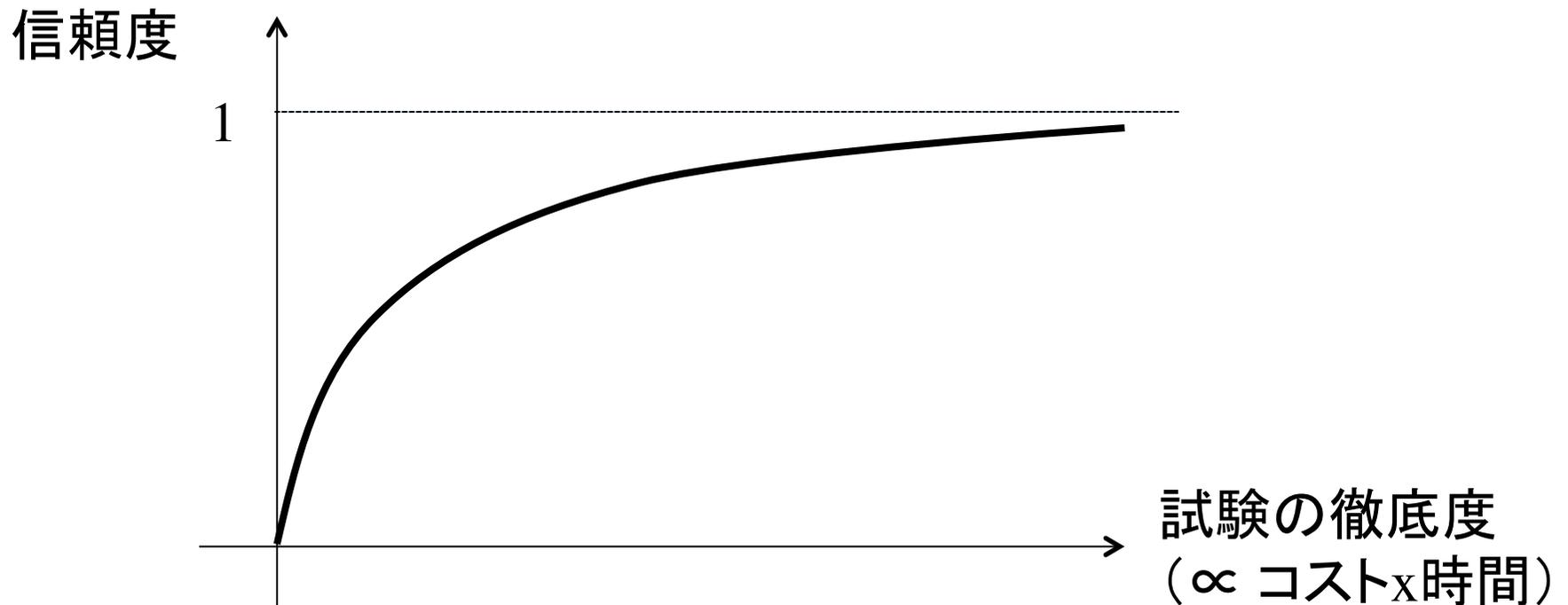
日本の大学衛星のミッション成功数と失敗数

# 信頼性



# 信頼性

- 試験をすればするほど信頼性は上がる
  - どこまで試験すべきか？



本当に必要な試験は？  
解析で試験を代替できないのか？  
別の試験方法は？

新たな研究分野

# 信頼性

- 超小型衛星は地上民生品を多用
- 多くの機器がインターネット上で売られている
  - 宇宙での動作保証はない
- 宇宙で動くという最低限の保証が求められる

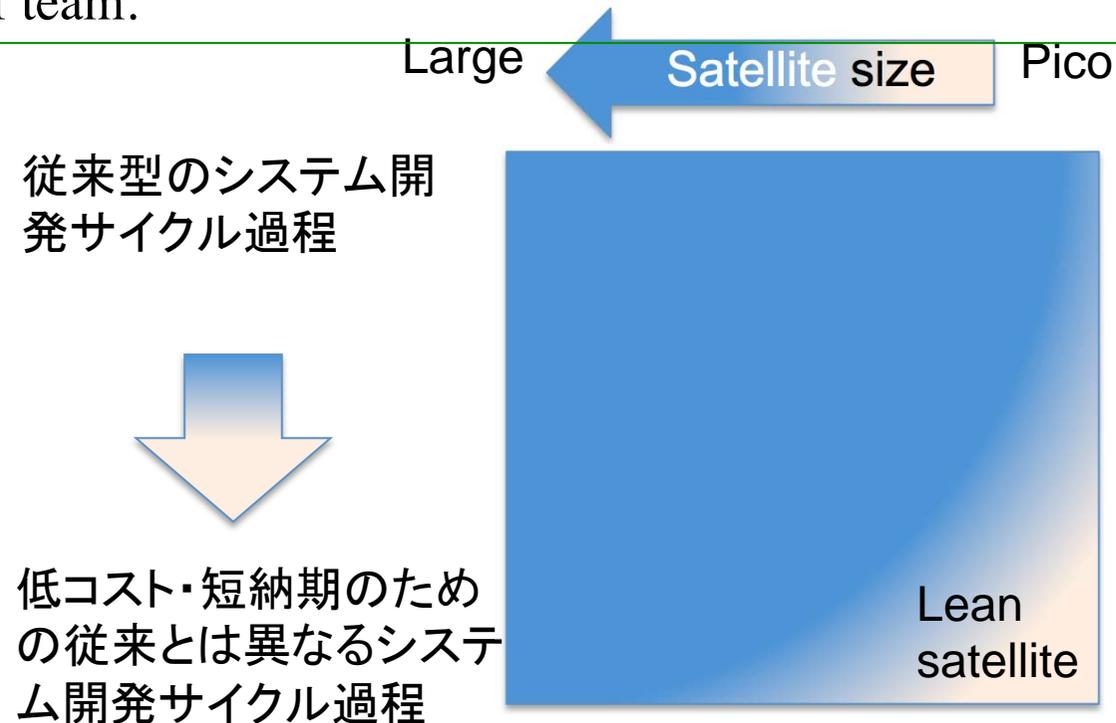
# 開発の哲学

- 我々は「小さな衛星」を作ろうとしているのか？
- 否。安く、早く衛星を作ろうとしているだけ
- 結果的に衛星が小さくなる
- Small, Micro, Nano, Pico satellites と言った呼び方は適しているのか？
- IAA Study Group 4.18 “Definition and Requirements of Small Satellites Seeking Low-Cost and Fast-Delivery”
  - **Lean Satellite**

# Lean satellite

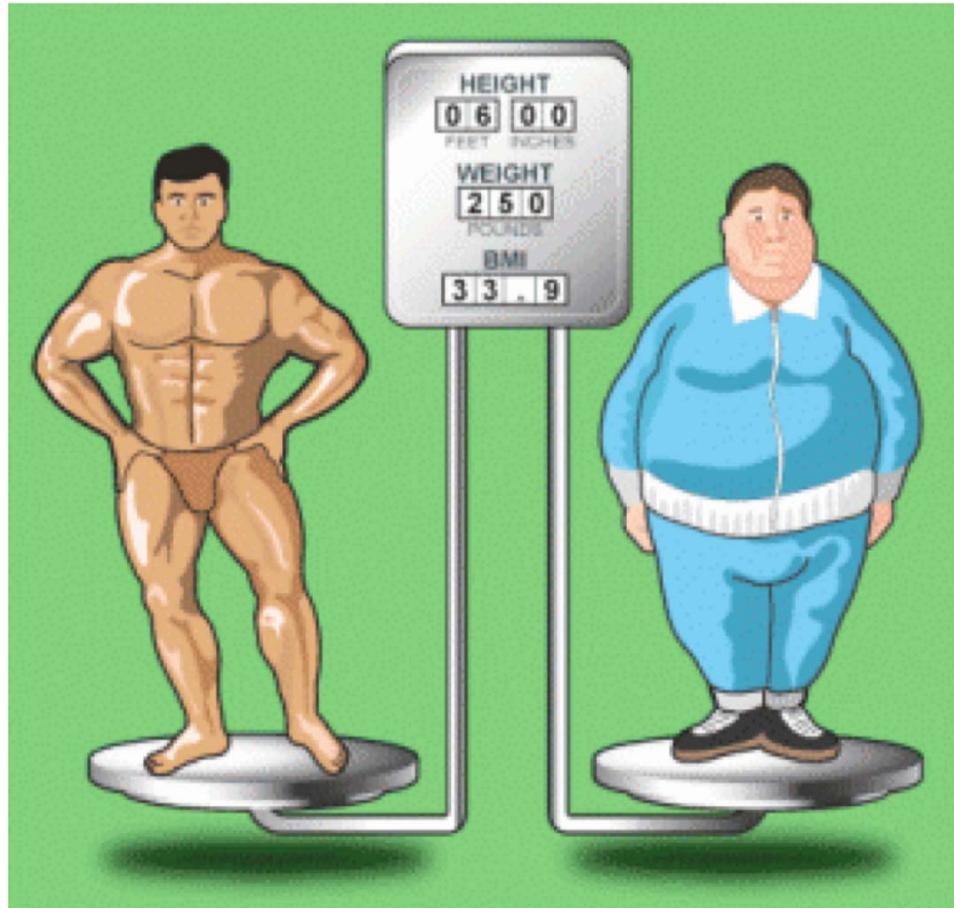
Lean Satelliteとは、低コスト・短納期を少人数チームで達成するために、従来とは異なったリスク許容型の開発・マネジメント手法を用いる衛星である。

A lean satellite is a satellite that utilizes untraditional risk-taking development and management approaches to achieve low-cost and fast-delivery with a small number of team.



低コスト・短納期を達成するために、従来とは異なった開発手法をとると、必然的に衛星サイズは小さくなる

# What is “lean”?



<http://the6thfloor.com/2013/02/24/body-fat-vs-lean-muscle-mass-part-4/>

It is not “lean” or “fat”

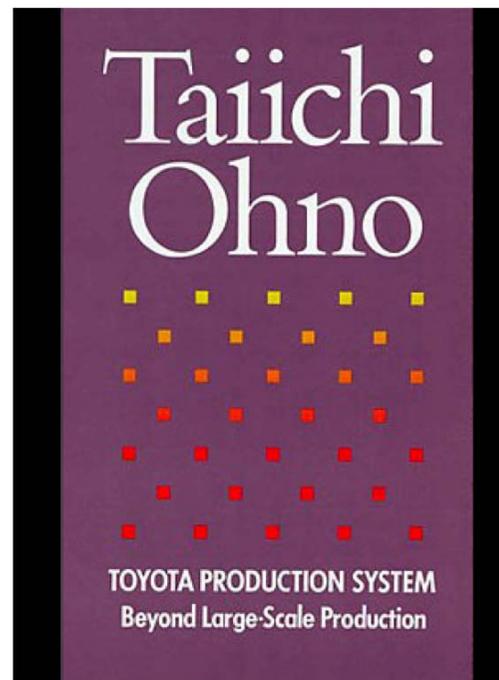
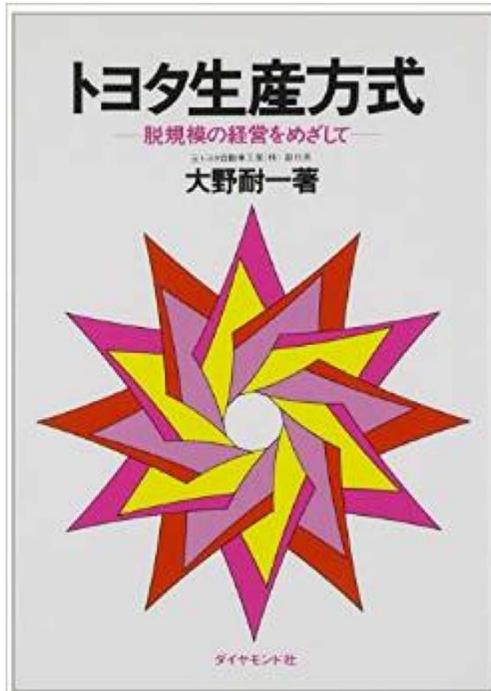
# What is “lean”?

- The origin of the word “lean”
  - Toyota Production System by Taichi Ohno in 1978
  - *Just-in-Time, Kanban, Kaizen, etc*



Taichi Ohno (1912-1990)

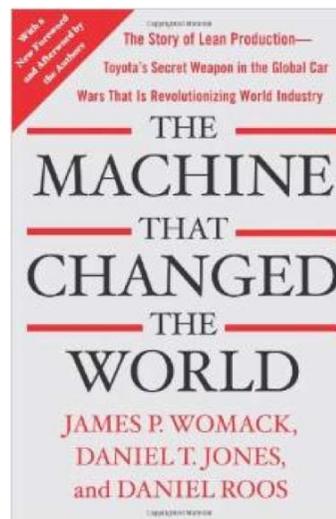
<https://parts.olathetoyota.com>



Japanese (original) and English versions are both available via Kindle format in Amazon

# What is “lean”?

- Best-seller book “The machine that changed the world” (1990) by a MIT research team
  - Investigated why Toyota was successful in spite of downfall of Big-Three US auto-makers, e.g. GM, Ford, Chrysler
  - Named the manufacturing process of Toyota as “Lean Manufacturing”
  - From “Mass production” (Ford, early 20<sup>th</sup> Century) to “Lean Production”

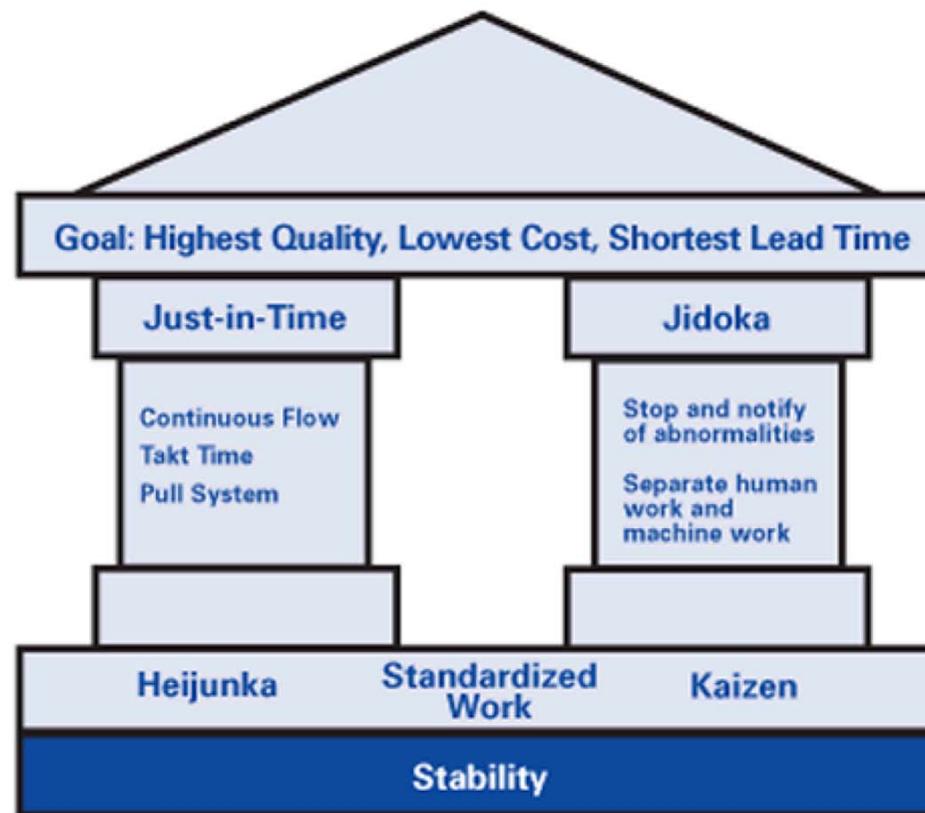


English (original) and Japanese versions are both available via Kindle format in Amazon

# Lean manufacturing

- “Making the vehicles ordered by customers in the quickest and most efficient way, in order to deliver the vehicles as quickly as possible”.

[http://www.toyota-global.com/company/vision\\_philosophy/toyota\\_production\\_system/](http://www.toyota-global.com/company/vision_philosophy/toyota_production_system/)

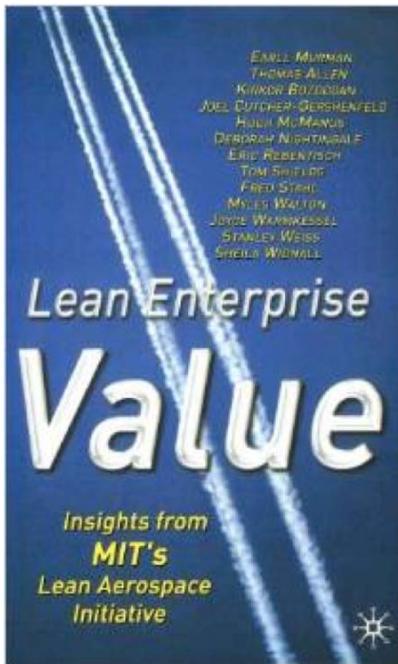


Toyota Production System "House."

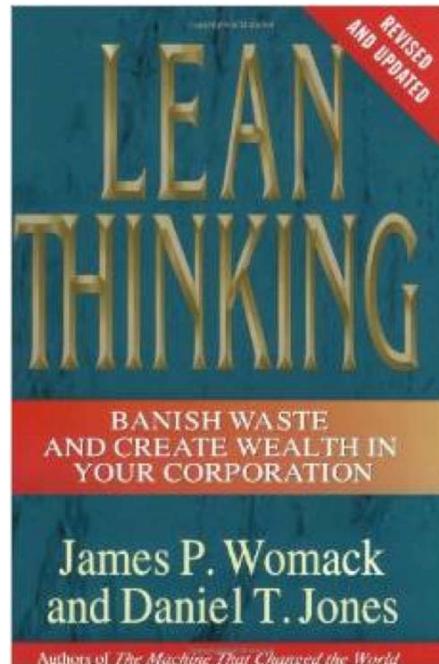
<http://www.lean.org/Common/LexiconTerm.cfm?TermId=353>

# Lean principle

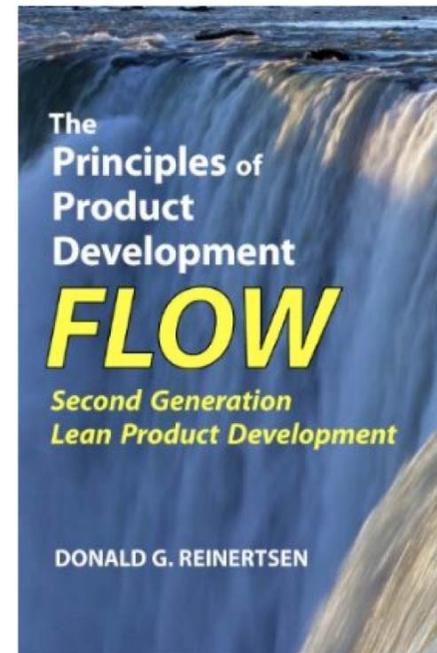
- The idea of “lean” has expanded from “lean manufacturing” to “lean development” and “lean enterprise”



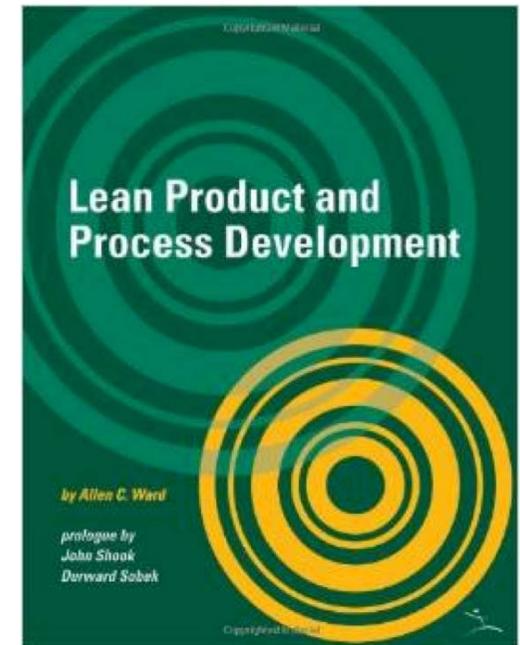
2002



2003



2009



2014

# Systems Engineering and Lean

- **Systems Engineering** which grew out of the space industry to help deliver flawless complex systems is focused on technical performance and risk management.
- **Lean** which grew out of Toyota to help deliver quality products at minimum cost is focused on waste minimization, short schedules, low cost, flexibility, and quality.
- *Both* have the common goal to deliver system lifecycle value to the customer.

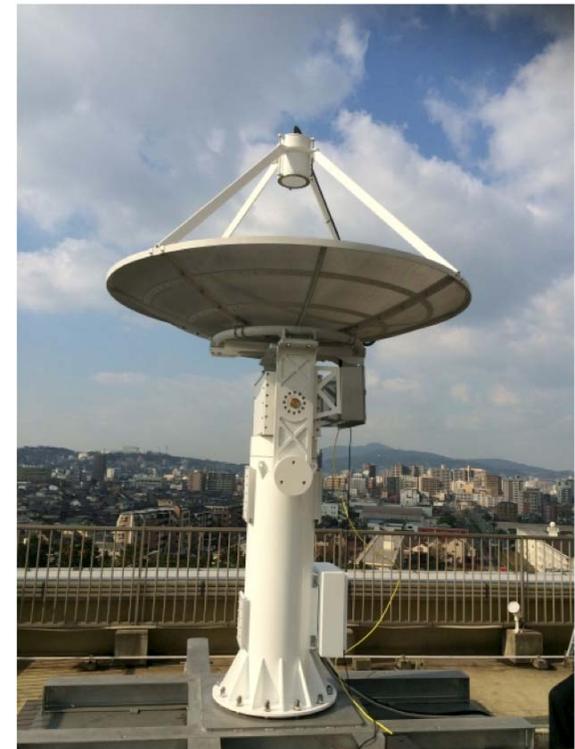
From “Lean Enablers for Systems Engineering” by Bohdan W. Oppenheim, Earll M. Murman, and Deborah A. Secor, *Systems Engineering*, Vol 14, No. 1, 2011, pp.29-55

# システム工学の新たな1分野としてのLean Satellite

- 自動車と衛星は全く違うモノ
  - 使用目的
  - 生産量
  - メンテナンスや安全性の考え方
  - 一個あたりの値段
  - Etc
- Lean Satellite を定義することは、新たなクラスの衛星に適用されるシステム工学の新分野を開くことになる
  - 新たな衛星作りの哲学を明らかにする

# 地上局

- やりとりできる情報量
  - 可視時間 $\times$ データ通信速度
  - どちらかを増やすしかない
  - 地上局を増やして可視時間を増やすことが得策
- 地上局は高価なインフラ
  - 周波数が高くなる程、関連機器は高くなる
    - 但し、アンテナサイズは小さくてよい
  - 衛星の可視時間しか動いていない
    - 単一の衛星しか運用しないのはムダ
  - 地上局の稼働時間を増やす
- 地上局のネットワーク化が大事
  - 地上局運用ソフトやデータプロトコルの標準化



# Standards, regulation and law

- Standard (標準)
  - Regulation (規則)
  - Law (法律)
- 
- 標準は同意に基づいて作られる
  - 標準に従う、従わないは自由
  - 標準に従わないからと言って、罰せられることはない

# なぜ標準が必要か？

- 完璧な世界では皆が信用しあう

This is  
wool 100%

I trust you.



Photo: Asahi Shinbun

# なぜ標準が必要か？

- でも、残念なことに我々は不完全な世界にいる



Photo: Asahi Shinbun

# 国際標準

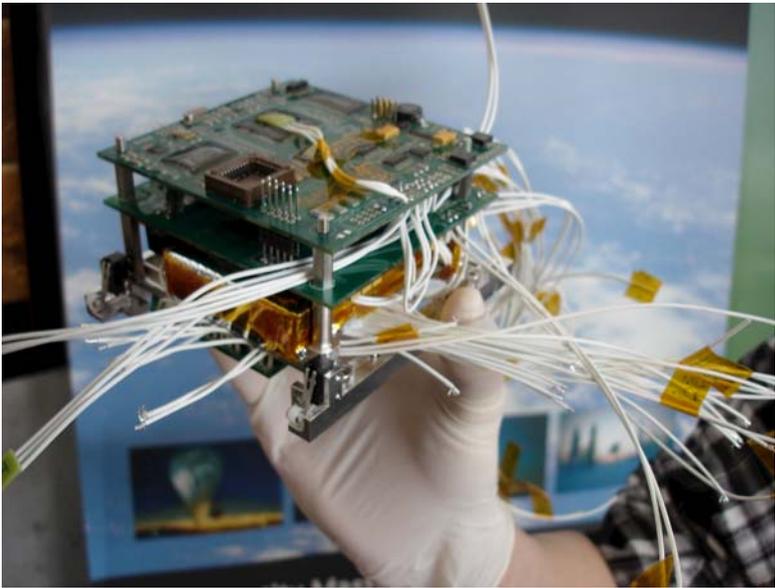
- 超小型衛星に関連した国際標準の動向
  - キューブサット(ISO/CD/17770)
  - 試験方法(ISO/CD/19683)
  - 小型衛星の要求事項(ISO/NWI/1144)
- 課題
  - ISO等の国際標準活動はボランティア
    - 大企業や宇宙機関のメンバーが中心
    - 超小型衛星関連企業にはISO活動に人員を割く体力がない
    - ステークホルダ(超小型衛星関連者)の意見を反映させる必要

# インターフェース

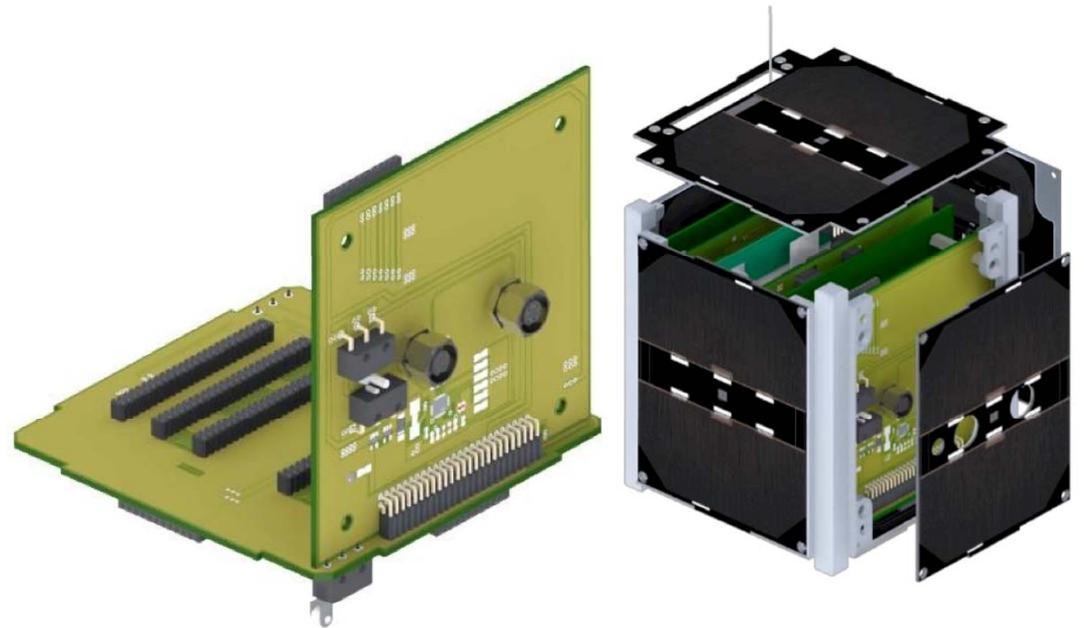
- 超小型衛星を早く作るには？
  - 「買えるものは買う」
- 流通されている機器のインターフェースの互換性が鍵
  - プラグ&プレイが理想
- キューブサットではPC104が主流
  - ピン間に互換性が殆どない

# インターフェース

- ケーブルレスインターフェース



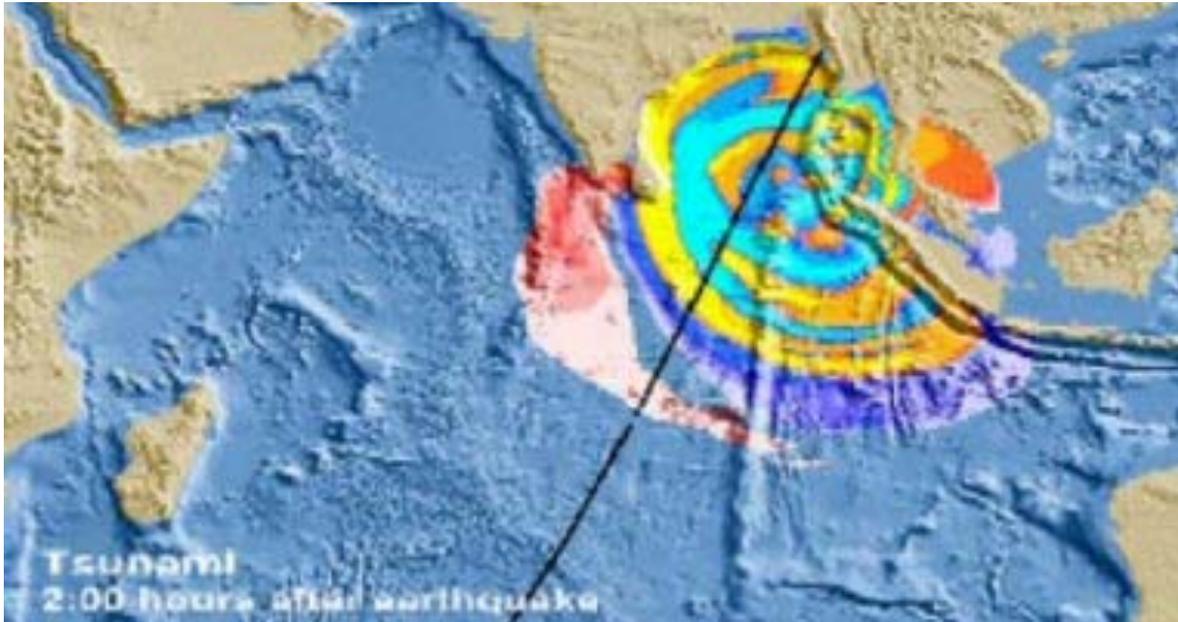
UWE-2 (Wurzburg大学)



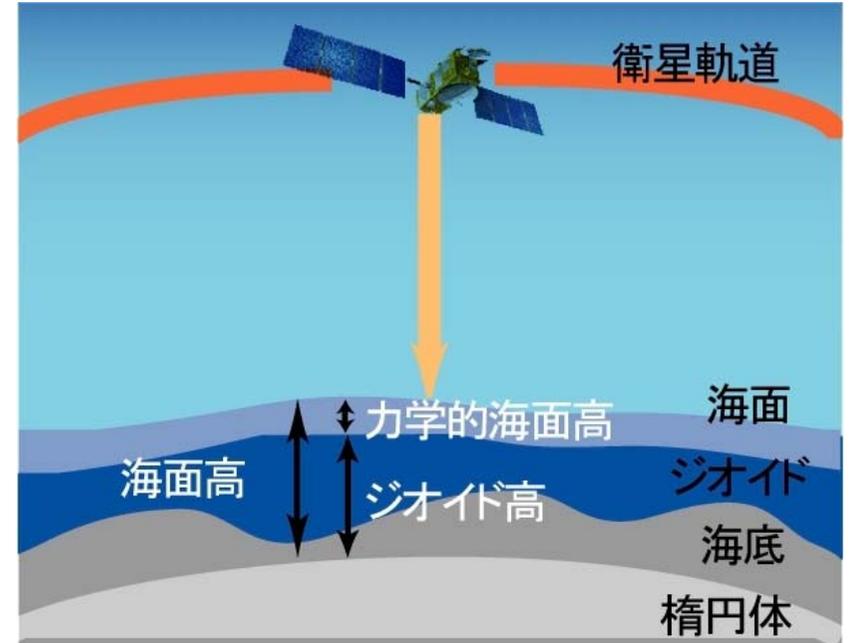
UWE-3 (Wurzburg大学)

# 超小型衛星と海

# 津波警報



Observation of Indian Ocean Tsunami (Credit: NASA)



Sea height monitoring  
(出典: 日本測地学会)



Scud Missile  
*(Wikipedia)*



DSP Satellite (36000km)



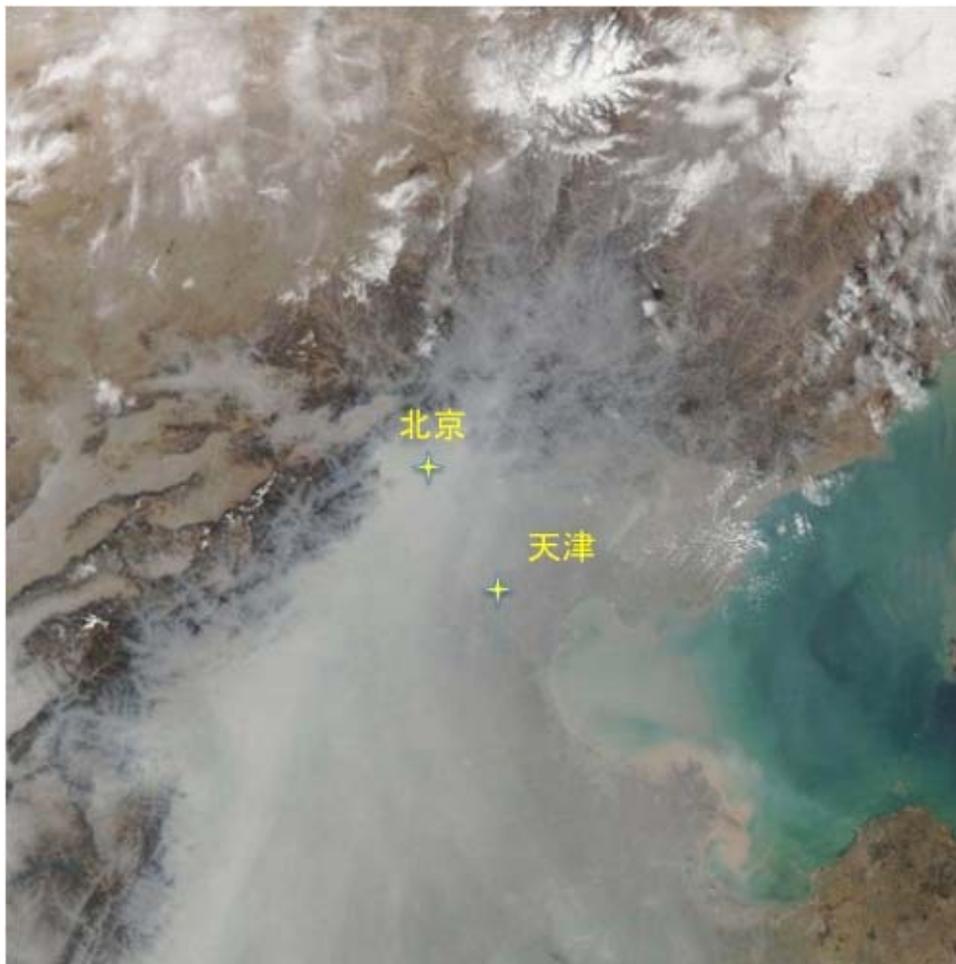
500km



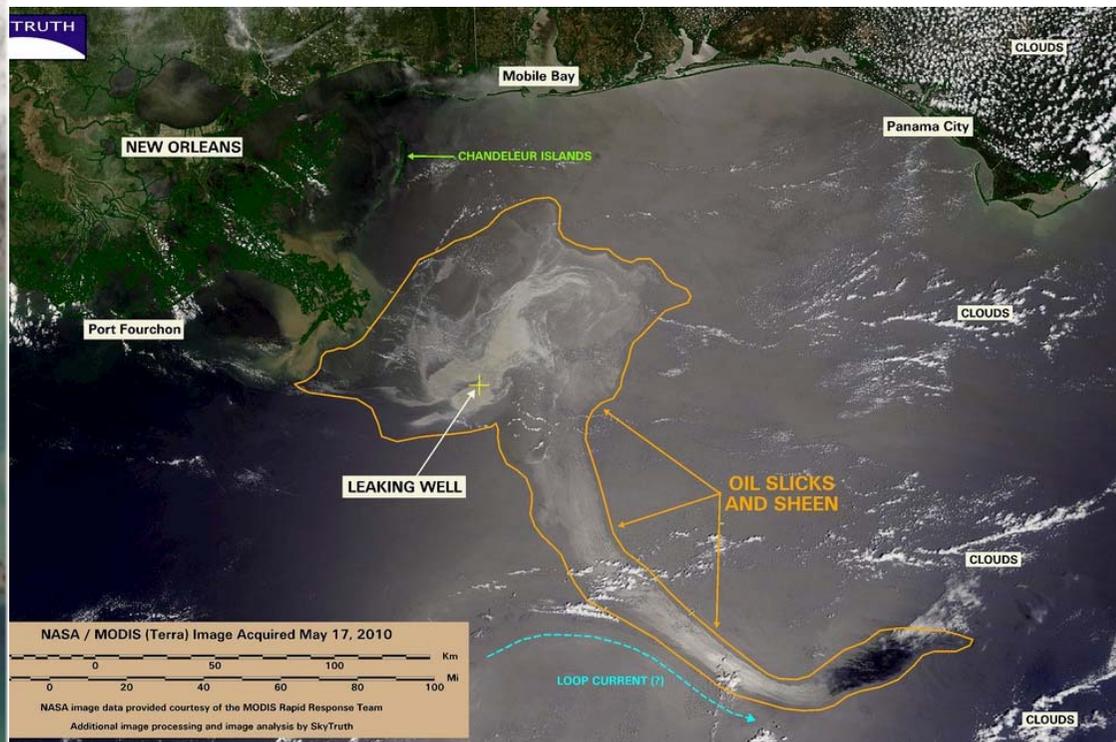
Patriot Missile  
*(Wikipedia)*

第一次湾岸戦争では、7分間でミサイルを探知し、迎撃した

# 環境監視



市街地周辺の大気汚染 (Smithonian.com)



流出原油の追跡 (NASA)

# 最後に

- 超小型衛星は、宇宙分野で最も成長の著しい分野
- 多くの課題があるが、技術革新と建設的議論により解決可能
- 地上インフラに頼れない海洋では宇宙の存在は大
  - 超小型衛星コンステレーションによる常時観測・常時中継は魅力