

2018年2月27日 (火)

Fujii Laboratory

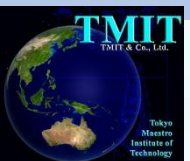
Dynamics and Control of Space Infrastructure



株式会社 **TMIT** (東京メトロポリタン工学研究所)

# 最近の高空風力発電研究の歩み

2007年公立大学法人首都大学東京発研究成果活用型ベンチャー企業第1号として設立。



# TMITの主なマイルストーン

- 2007年8月16日 首都大学東京のベンチャー企業第1号として設立。
- 2010年8月 観測ロケットS520-25による132.6mスーパーテザーの宇宙伸展に世界で初めて成功。日本・米国・欧州・豪州の国際協力。

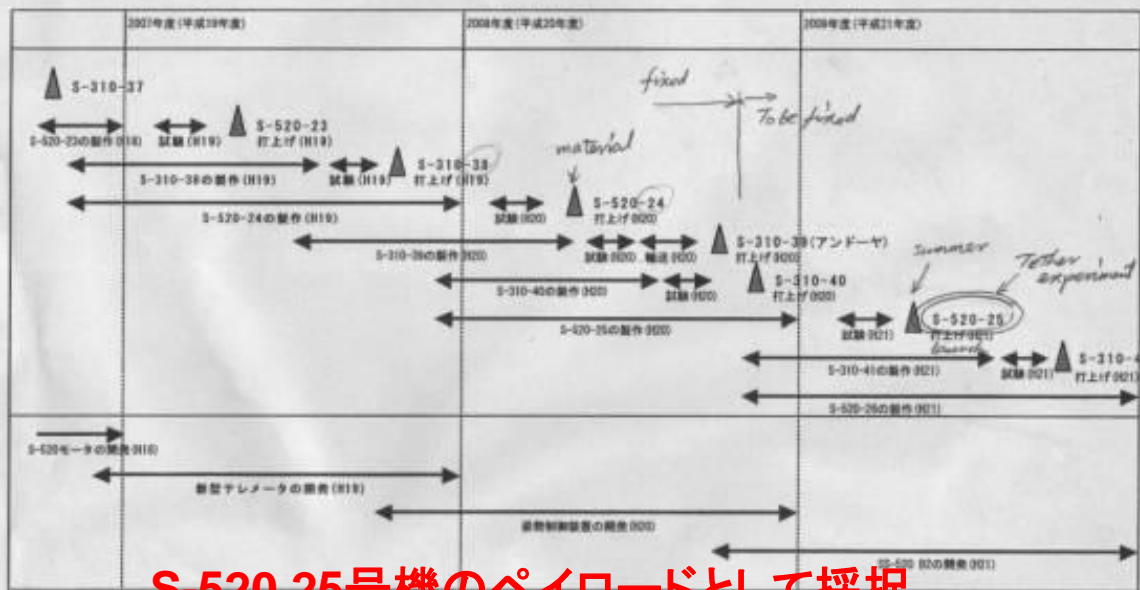


- 2015年2月3日 科学研究費補助金取扱規程に規定する研究機関に指定
- 2015年3月30日 「高空風力発電研究会」 第1回全体会議（日大駿河台校舎）

-ベア導電テザーの実験-  
日本/欧州/米国/豪州国際協力-

\* 打上ロケット (高度300km) S-520

\* 打ち上げ: 2009年8月1日 5:30am



S-520 25号機のペイロードとして採択



## \* 高速テープテザー展開 (Success level 1)

高信頼性のテザー展開手法の検討:

1. エアー・テーブル上での実験
2. タワー型装置による検証
3. 真空チェンバー内での検討
4. ペットボトルロケットでの実験(A,B)
5. リニアモーター装置での検討
6. カートモデルでの検討(D,E,F)
7. スピンテーブルでの実験(C)
8. 放物線飛行による実証(G)
9. カッターを用いた打ち上げ実証
10. 水平引き出しによる全長伸展実験
11. 数値シミュレーションによる検討.
12. 観測ロケットによる宇宙実験



“Hayabusa” mission

# 弾道飛行による無重力実験 (TMU&JAXA)



テープテザーの展開の実証  
(航空機による微小重力実験)

# 新技術： 微小重力飛行実験





図12. DAU側からMOT側を写した映像

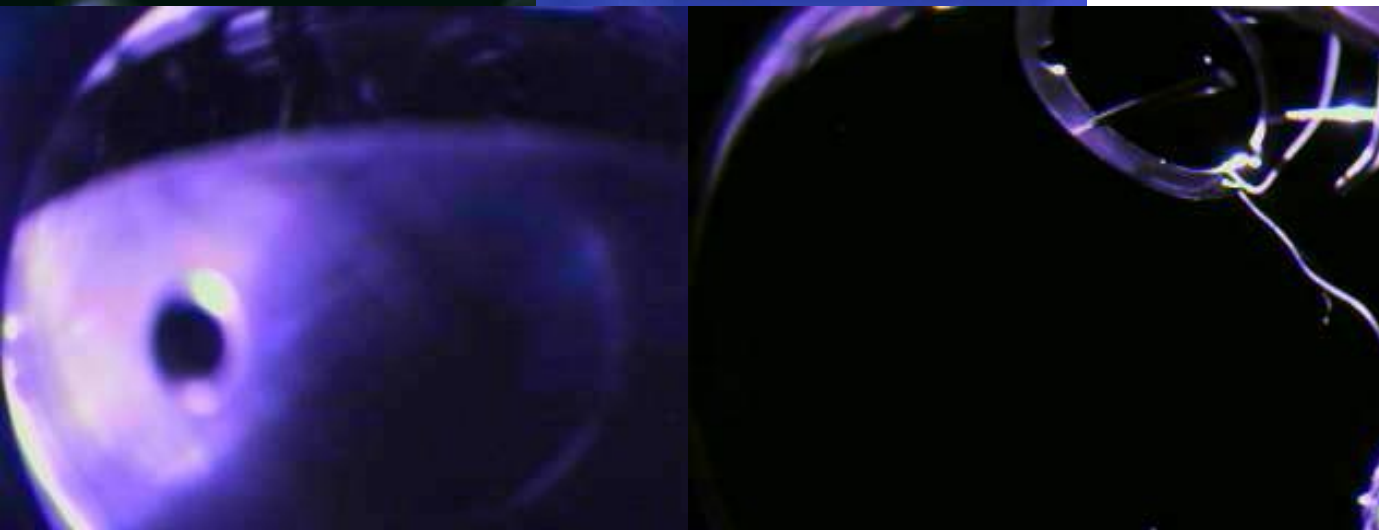
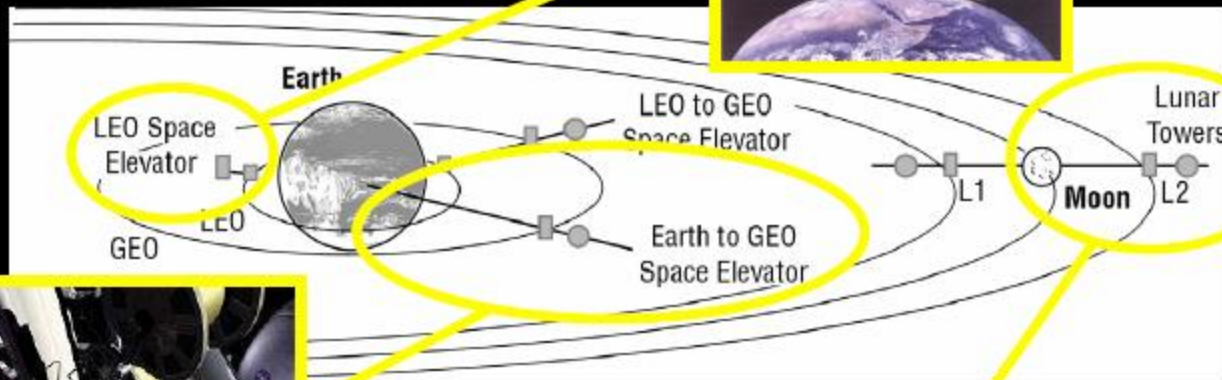
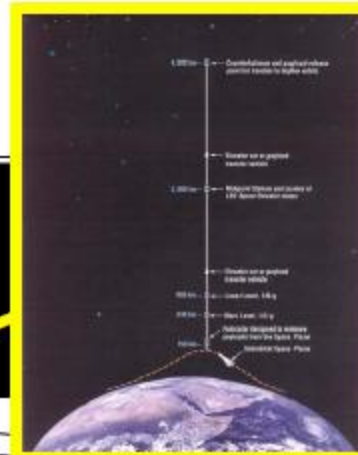


図13 DAU側からTSR側を写した映像



# Space Tethers Will Play a Key Role: The Project of Japan Will Be A Critical Step

LEO Space Elevator, also called "Bridge to Space" by Lockheed Martin

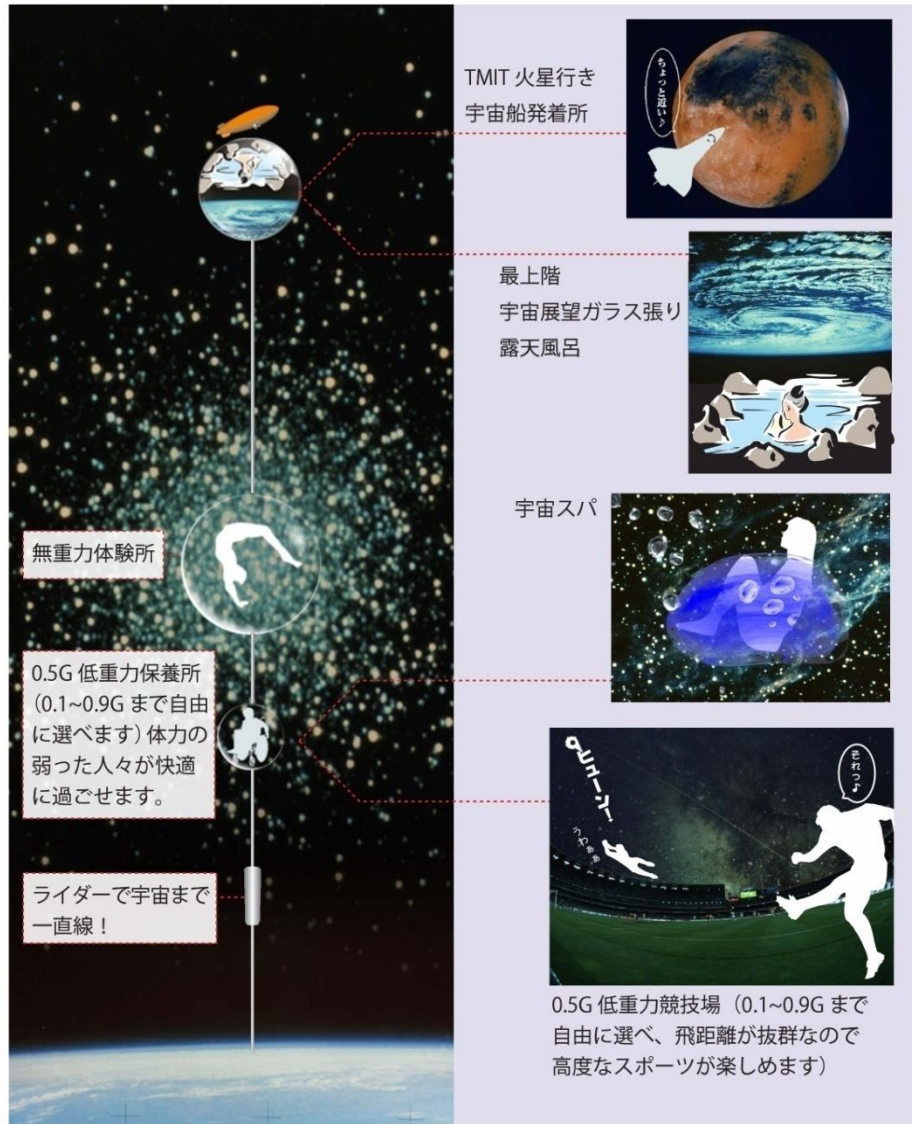
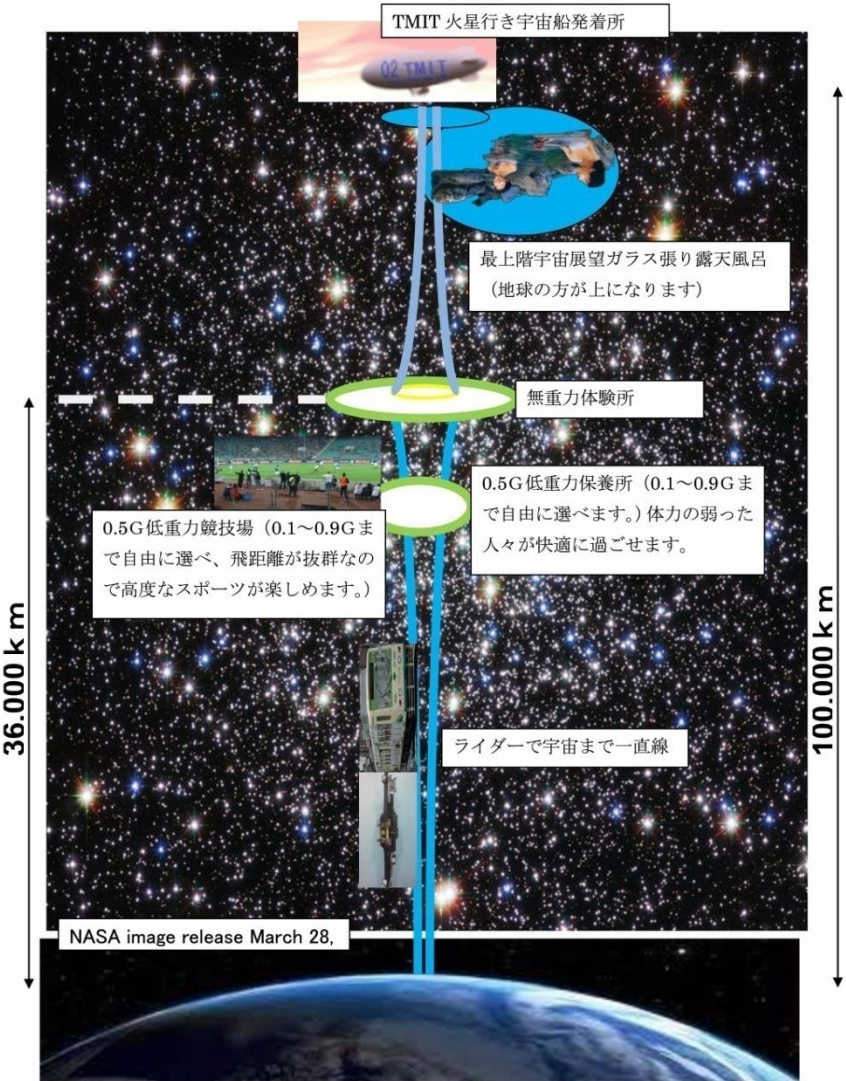


Space Elevator concept from 1999 NASA study



Lunar Tethered Satellite concept





# 宇宙エレベーターKAIT構想

# 宇宙テザー技術の波及効果

## 1. 成層圏プラットフォーム (SPF: Stratospheric Platform) 宇宙エレベーターの発展途上型

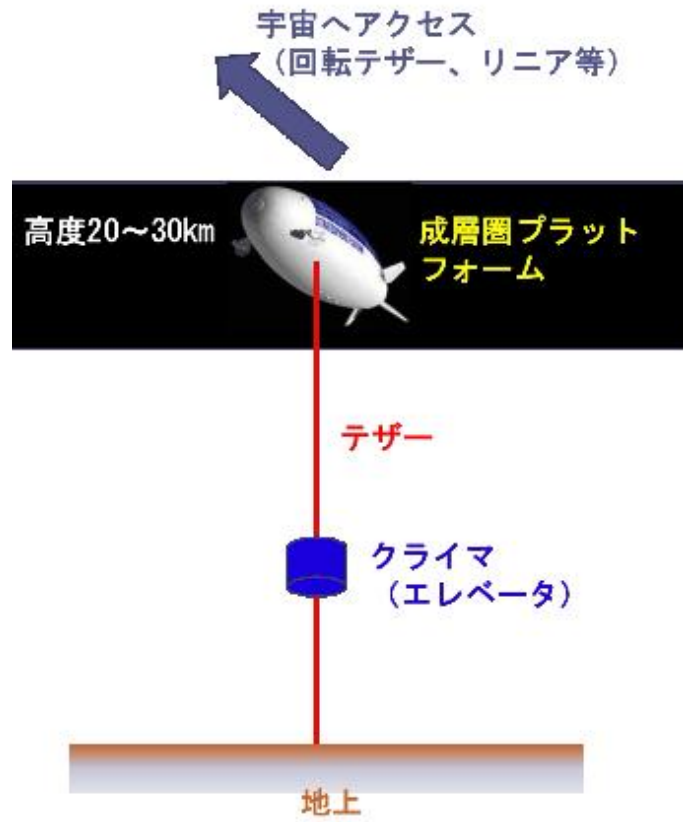


図2 成層圏エレベータ概念図

- 利用目的：
- 発電
  - 通信中継
  - 気象観測



# 宇宙テザー技術の波及効果

## 2. Ladder Mill (凧式風車)

高度 10m~20km

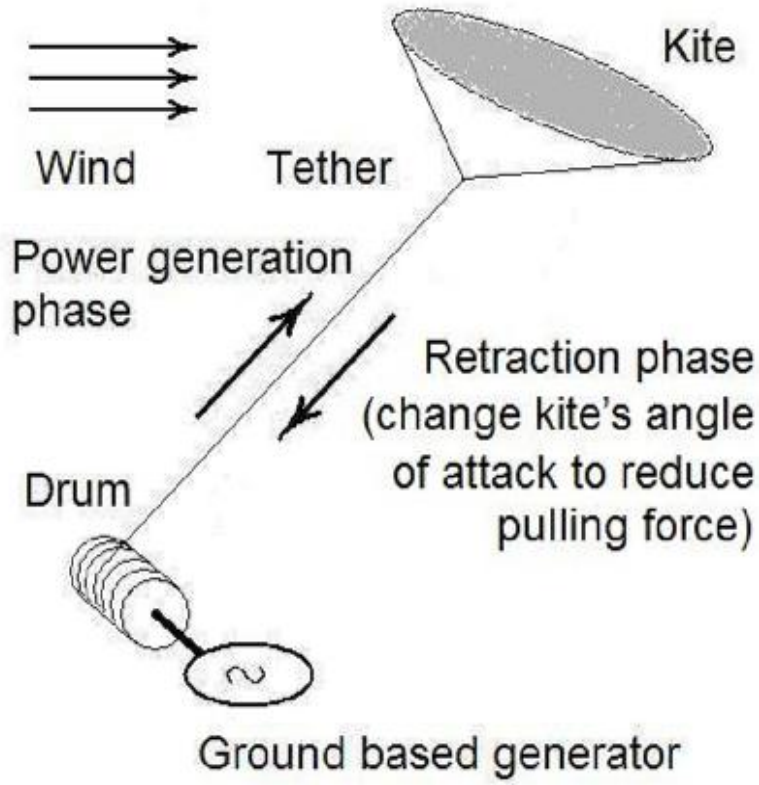
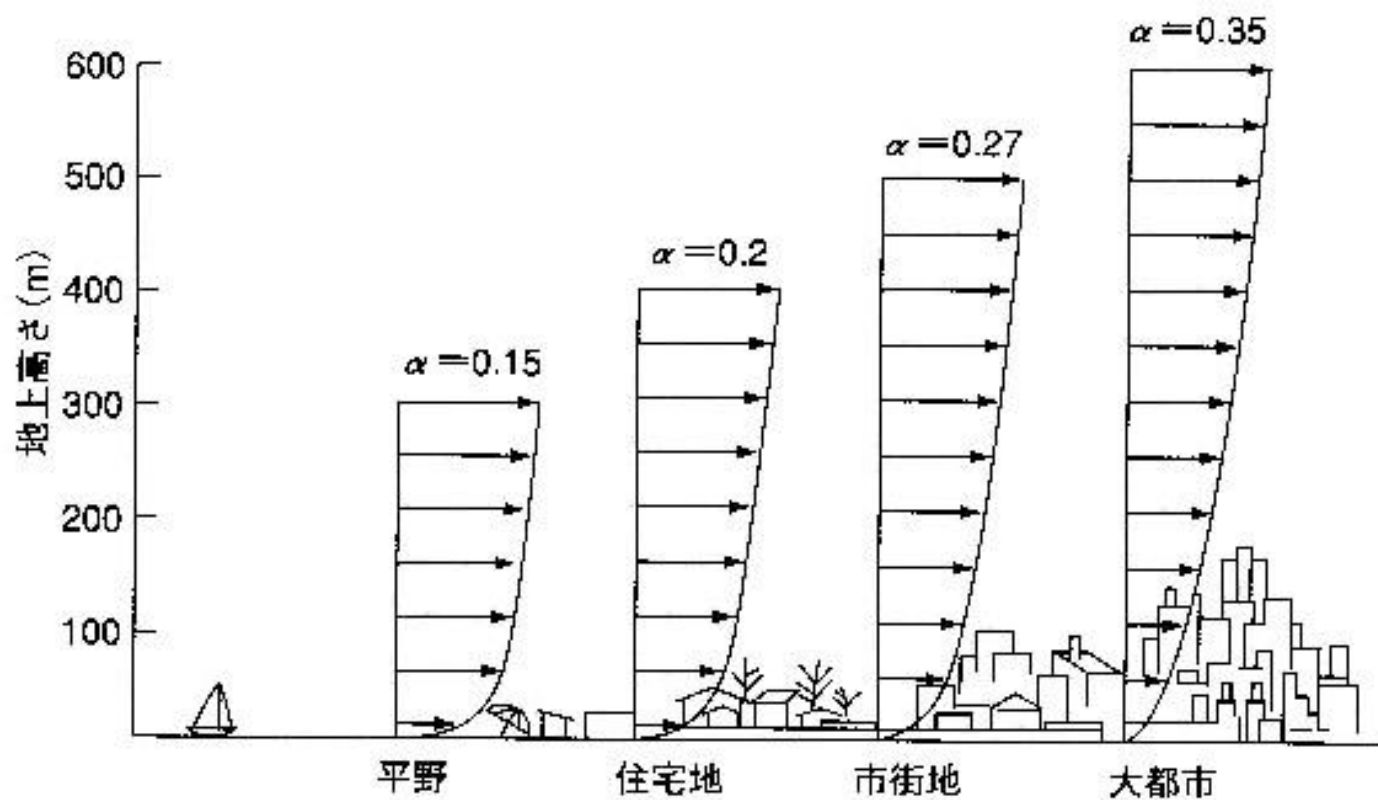


Figure 1: Principle of operation of a kite wind generator.

# 高空風力発電 AWE (Airborne Wind Energy)

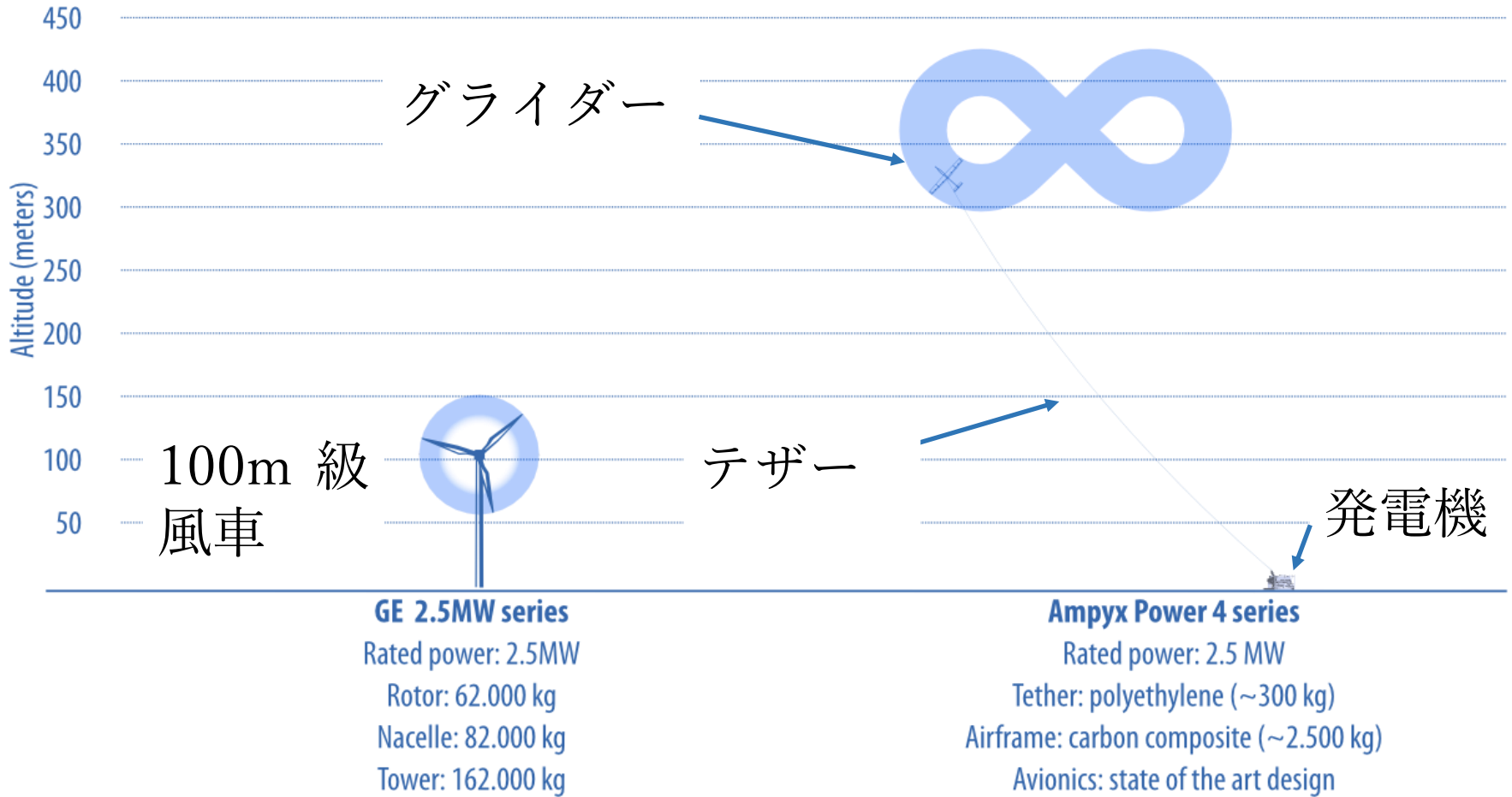


© Google, EON, Shell, Schlumberger, Tata、さらに、ソフトバンクのような先端企業が2兆米ドルを超える投資を行っている。このためAWEは今後成長を加速すると思われる。

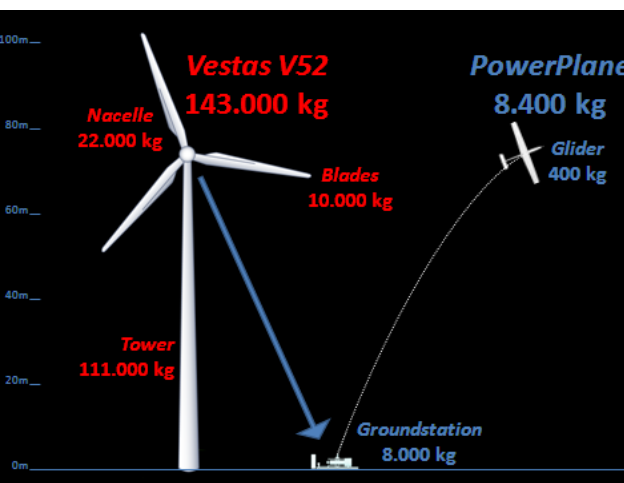
欧州各国はCO2軽減のロードマップ2050などに乗り遅れないために、クリーンなAWEに期待を持ち援助を行っている。

<https://www.businesswire.com/news/home/20180105005354/en/Global-Airborne-Wind-Energy-AWE-Systems-Market>





◎大型風車との比較

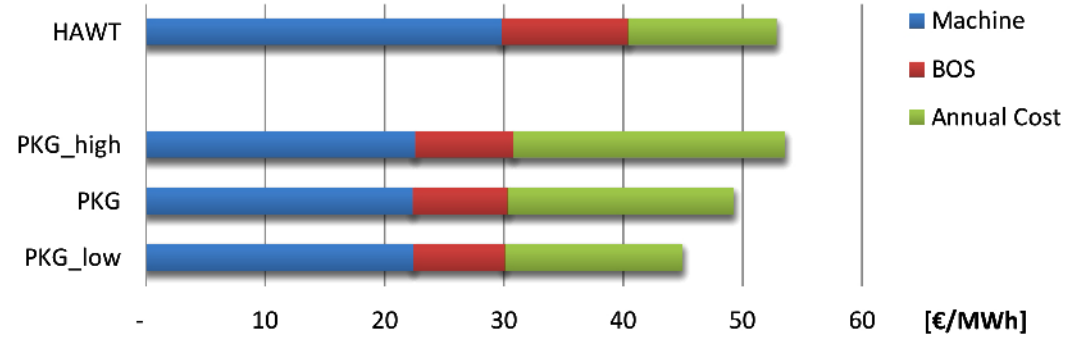
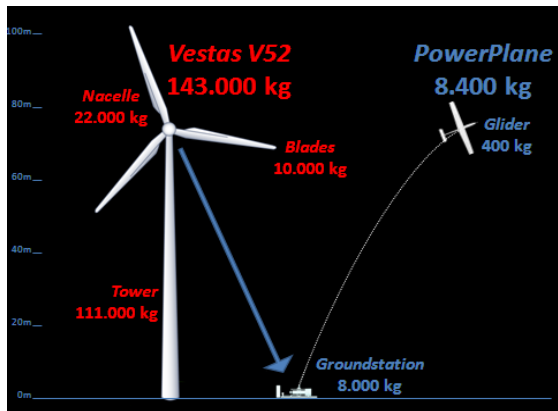


	大型風車	テザー型
構造	複雑（ギアなど）	シンプル
建設コスト	100%（支柱と補強）	5~10%（テザー型：要交換）
維持方法	高所作業	緻密な整備
安全性	安全	高度な無人化が必要
台風などの被害	不可避	退避可（日本に最適）
最高高度	180m	100~1000m
発電量（重量）	2.5MW （143,000 kg）	2.5Mw （8,400kg）
設備利用率	30~40%	60~70%

©HAWT (大型風車) とPKG(Pumping Kite Generator)のLCOE (Levelized Cost of Electricity)

LCOE Comparison

Heilmann Jannis, "The Technical and Economic Potential of Airborne Wind Energy," UTRECHT UNIVERSITY Master Thesis, 8/30/2012.



Component	Component Costs \$1000	Component Mass kg
Rotor	237	28,291
Blades	153	13,845
Hub	43	10,053
Pitch mechanism & bearings	33	3,533
Spinner, Nose Cone	4	775
Drive train, nacelle	617	43,556
Low speed shaft	21	3,025
Bearings	12	679
Gearbox	153	10,241
Mech brake, HS cabling etc	3	
Generator	99	5,501
Variable spd electronics	118	
Yaw drive & bearing	20	1,875
Main frame	93	19,763
Electrical connections	60	
Hydraulic, Cooling system	18	120
Nacelle cover	21	2,351
Control, Safety System, Condition Monitoring	39	
Tower	147	97,538
<b>TURBINE CAPITAL COST (TCC)</b>	<b>1,036</b>	<b>169,804</b>
Foundations	46	
Transportation	50	
Roads, Civil Work	79	
Assembly & Installation	38	
Electrical Interface/Connections	122	
Engineering & Permits	25	
	0	
	0	
<b>BALANCE OF STATION COST (BOS)</b>	<b>367</b>	<b>0</b>
	0	
<b>Initial capital cost (ICC)</b>	<b>1,403</b>	<b>169,804</b>
Installed Cost per kW (cost in \$)	935	113,203
Turbine Capital per kW sans BOS & Warranty (cost in \$)	691	113,203
Levelized Replacement Cost \$ per year	18	
O&M \$ per turbine/yr	30	
Land Lease Cost	5	
<b>CAPACITY FACTOR</b>	<b>32.82%</b>	
<b>Net ANNUAL ENERGY PRODUCTION Energy MWh (AEP)</b>	<b>4312</b>	
Fixed Charge Rate	11.85%	
<b>COE \$/kWh</b>	<b>0.0476</b>	

COE	Initial Capital Cost	low	high	mid
Kite		59.242	133.182	96.212
Wing	36.742		88.182	62.462
KCU	22.500		45.000	33.750
<b>Mechanical Systems</b>	<b>88.402</b>		<b>316.218</b>	<b>202.310</b>
Mast	23.883		47.765	35.824
Tether	24.000		90.000	57.000
Winch Drum	2.235		73.600	37.918
Line handling	28.284		84.853	56.569
Bearings	10.000		20.000	15.000
<b>Electrical Systems</b>	<b>372.267</b>		<b>409.494</b>	<b>390.881</b>
Generator	191.345		210.479	200.912
Power electronics	112.800		124.080	118.440
Yaw drive and bearing	26.129		28.742	27.435
Hydraulic and cooling systems	13.680		15.048	14.364
Ground station cover	28.314		31.145	29.729
Control and Monitoring	39.382		51.199	45.290
<b>Balance of station</b>	<b>199.277</b>		<b>288.749</b>	<b>244.013</b>
Total ICC	719.189		1,147.643	933.416
<b>Specific ICC</b>	<b>599</b>		<b>956</b>	<b>778</b>

TABLE 3-5 SCREENSHOT OF COST MODEL SPREADSHEET, COMPONENT COSTS

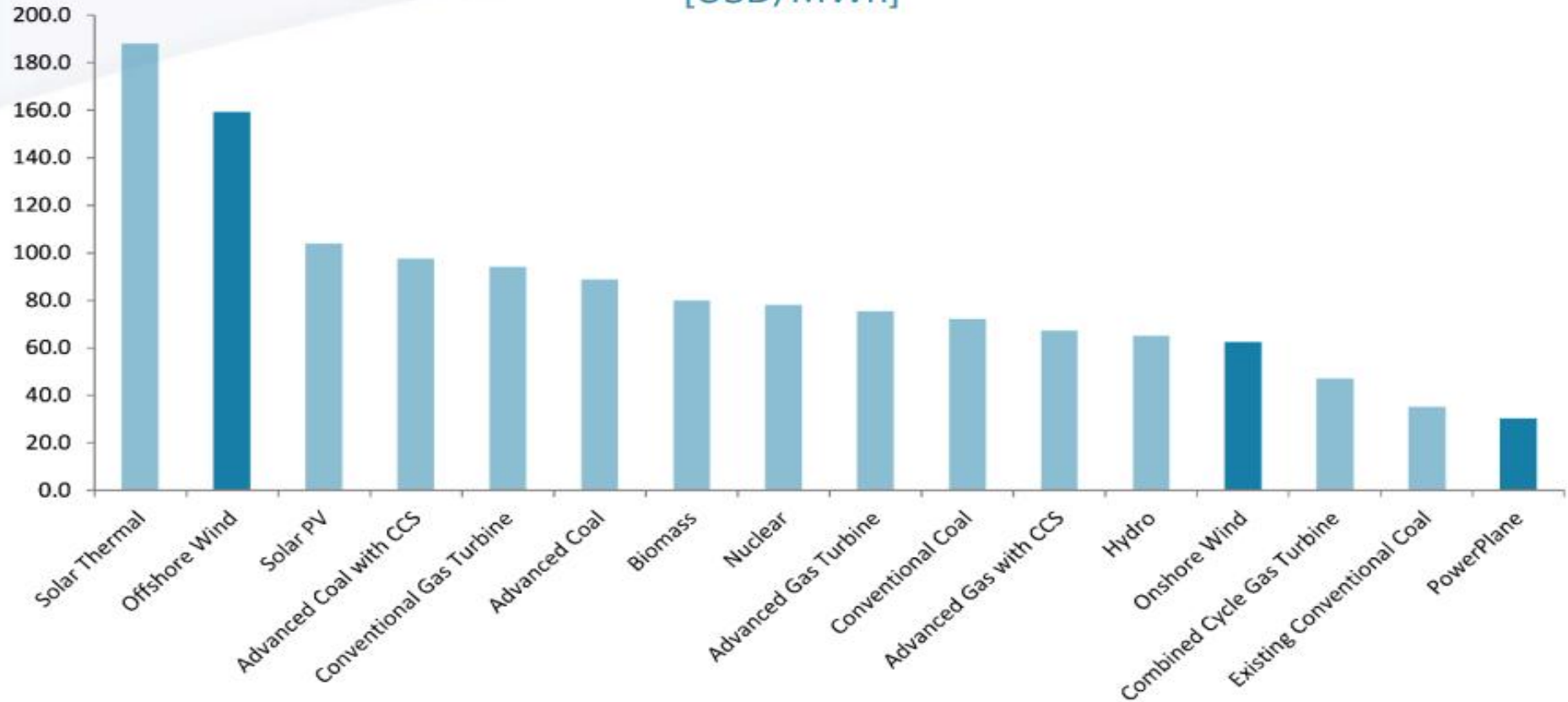
大型風車の構成 (左図) とPKG(Pumping Kite Generator)の構成 (右図) の比較

© 色々な発電方法のLCOE (米国国立再生可能エネルギー研究所 : **National Renewable Energy Laboratory NREL**)

**The PowerPlane®**  
Renewable electricity cheaper than fossil fuels



NREL: Estimated levelized cost of new generation resources, 2018  
[USD/MWh]

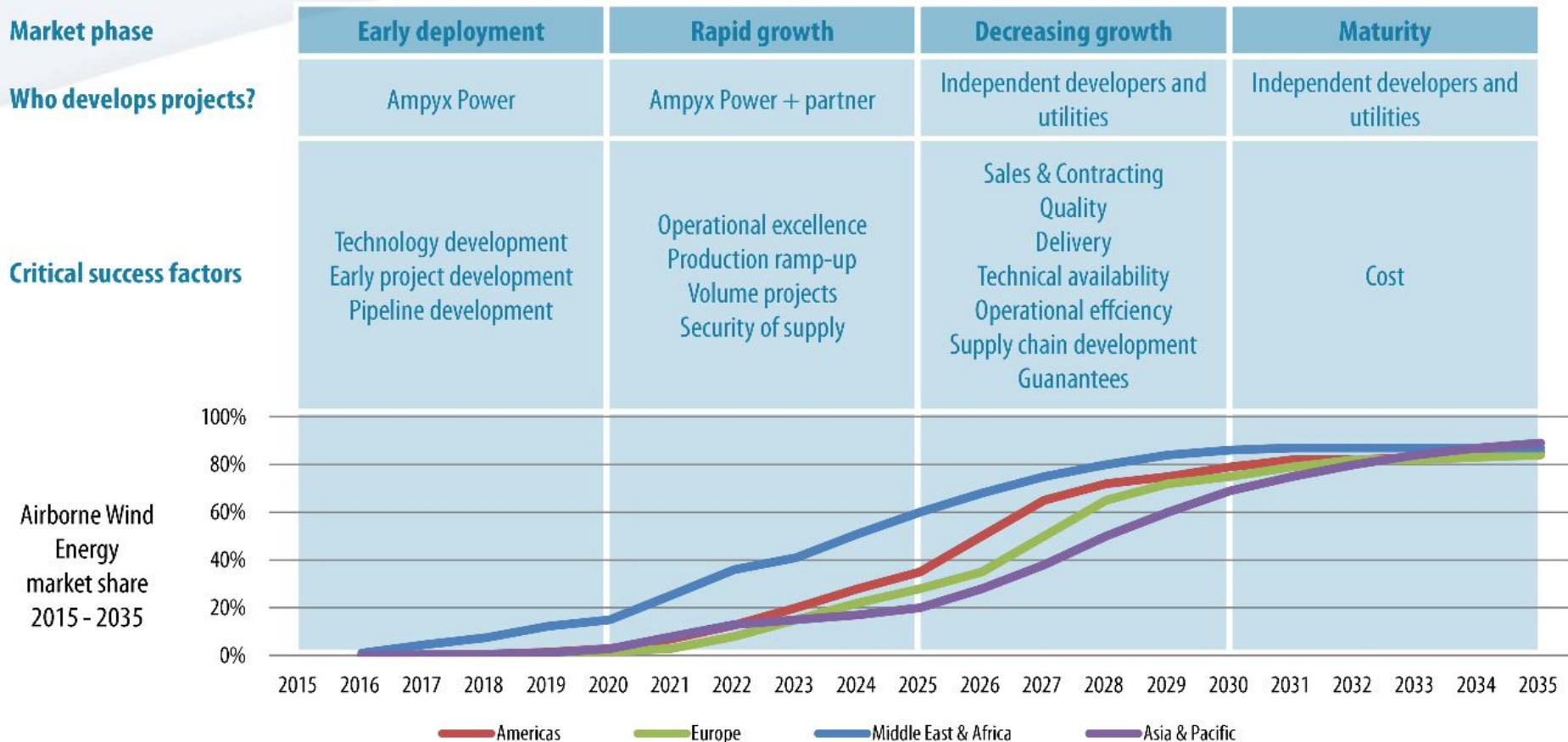




# ◎世界市場の予測：AmpyxPowerによる。

## Market development

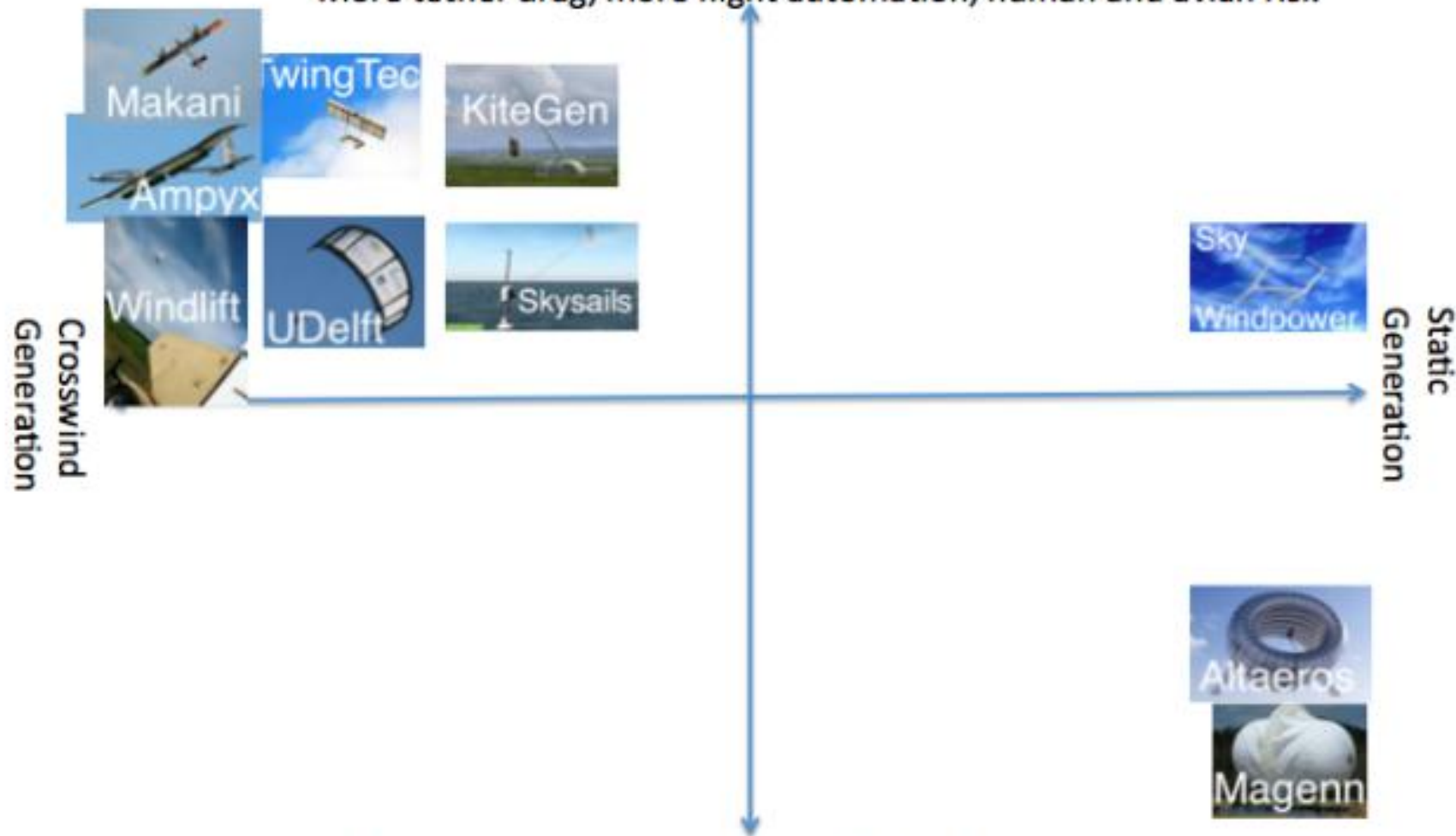
Airborne Wind Energy to replace conventional wind by 2035



# Cross-wind vs static flight Compromises

Greater power output

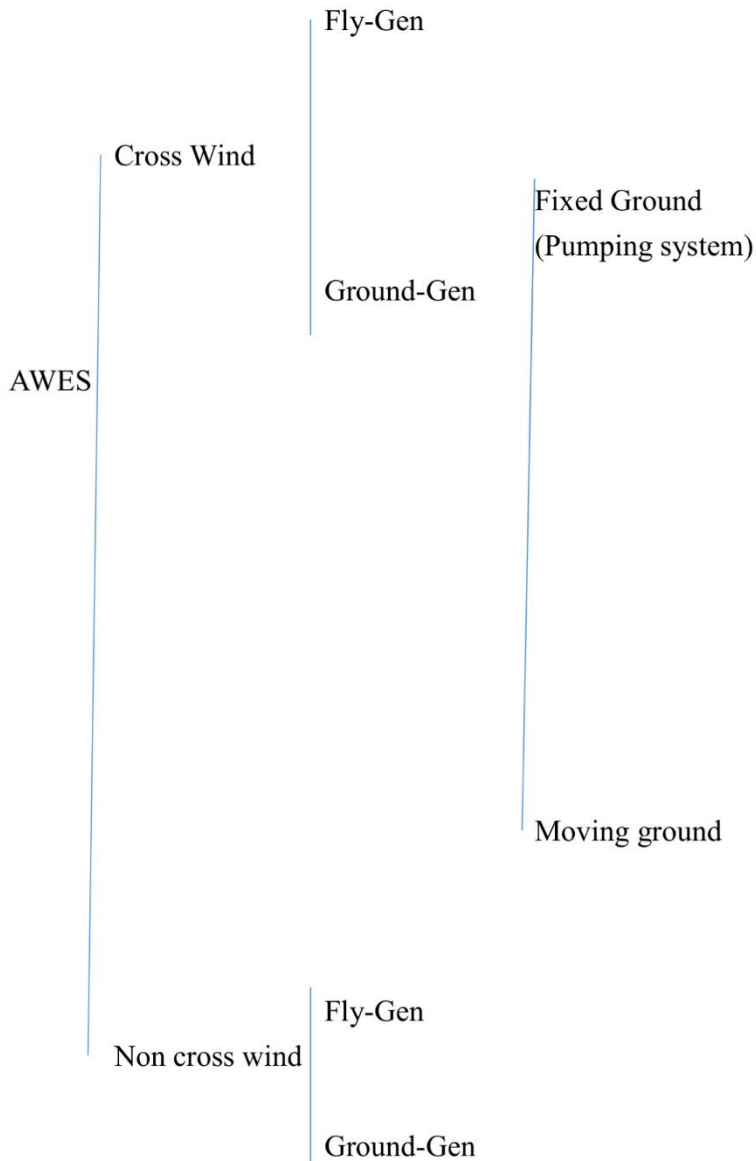
More tether drag, more flight automation, human and avian risk



Lower power output (at same altitude)

Less complex control automation, lower human and avian risk

⊙MW class



⊙MakaniPower CA Aircraft 200-1000m Circle 8m 20kW  
2013 Google 28m 600kW prototype, 65m 5MW

⊙Joby Energy CA 2MW Aircraft circle

Kite power (TUD) (20kW(2012), 100kW-1MW, 24h ①CP)

⊙AmpyxPower (NL 5.5m, 6kW(15kW max), 35m 2MW ①)

⊙Kite Gen (Italy 3MW Stem ②)

⊙Guangdong Tech. (China 1MW)

⊙Sky sale power (Germany 250kW 1MW 3.5MW ①CP)

Swiss kite power (Swiss 10kW ①CP ② ③) → Twing Tec

⊙Kite Gen (Italy 5kW (40kW MAX) 4.5m/s ground 3MW ②)

Twing Tec (Swiss 100kW)

EnerKite (Germany 30kW, 100-500kW, ③)

e-Kite (NL 50kW GG Low altitude ②)

Kitemill (Norway ①)

KU Leuven

Universidad Carlos III de Madrid (Spain ①CP)

⊙Kite energy (Italy 0WatUCSB ②)

⊙HSWG (JPN 1MW)

NTS (Germany ②④)

KiteGen Research (100kites with 500m<sup>2</sup> 1500m radius 1000MW 12m/s)

⊙Sky Wind power (CA Quadcopter 4600m 10m/s, 12kW, 1MW) Out of business  
Altaeros Energies (Acrostat, 100m straight railway, 1kW per m<sup>2</sup> 40m<sup>2</sup>)

⊙Mnidea

HSWG (JPN 20kW)

LadderMill (TUDelft 20.2kW) → Kite power (TUD)

高空（120m）に設置



8の字型の閉飛行軌道



両者の併用



風速 3~5倍

風力エネルギー

27~125倍

風速1.6倍

風速は2~3倍に増加





# テザー型風力発電の概念 (20kW class)

AIRBORNE WIND ENERGY CONFERENCE 2017

Freiburg, Germany 2017/10/5-6



## HSWG(High Sky Wind energy Generation) on tethered system

Hironori A. FUJII[1][2], Hiroshi OKUBO[3], Yasutake TAKAHASHI[4], Yusuke MARUYAMA[5]

Tairo KUSAGAYA[6], Shigeo YOSHIDA[7], Kazuo ARAKAWA[7], Hiroki ENDO[1][7],

Kenji UCHIYAMA[8], Kazuichi SEKI[9], and Takeo WATANABE[3]

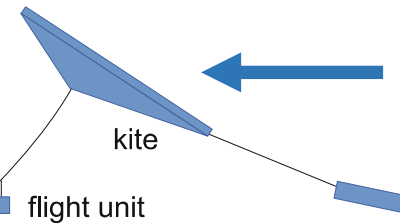
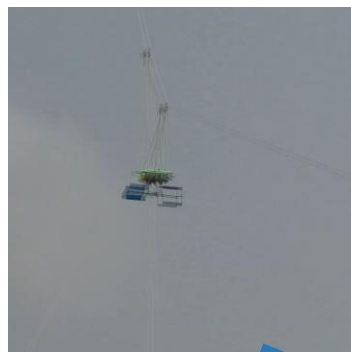
[1]TMIT & Co., [2]Tokyo Metropolitan University, [3]Kanagawa Institute of Technology,

[4]University of Fukui, [5]Maeda Corporation, [6]Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology,

[7]Kyusyu University, [8]Nihon University, [9]Tokai University



Wind tunnel test



kite

flight unit

Safety line

Windmill Mount

Windmill

Generator

winch

ground control unit



Anemometer,  
Motion sensor

Kite

Drag tail

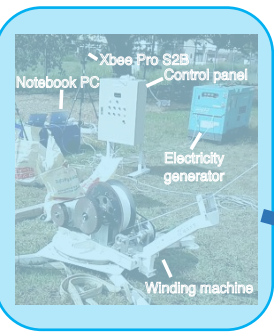
GPS, Barometer,  
Microcontroller,  
Xbee pro S2B

Kite

- span: 4.5m
- Chord length: 2.1m
- weight: 1.8kg

Windmill

- 0.6m\*0.6m\*2 (6kW)



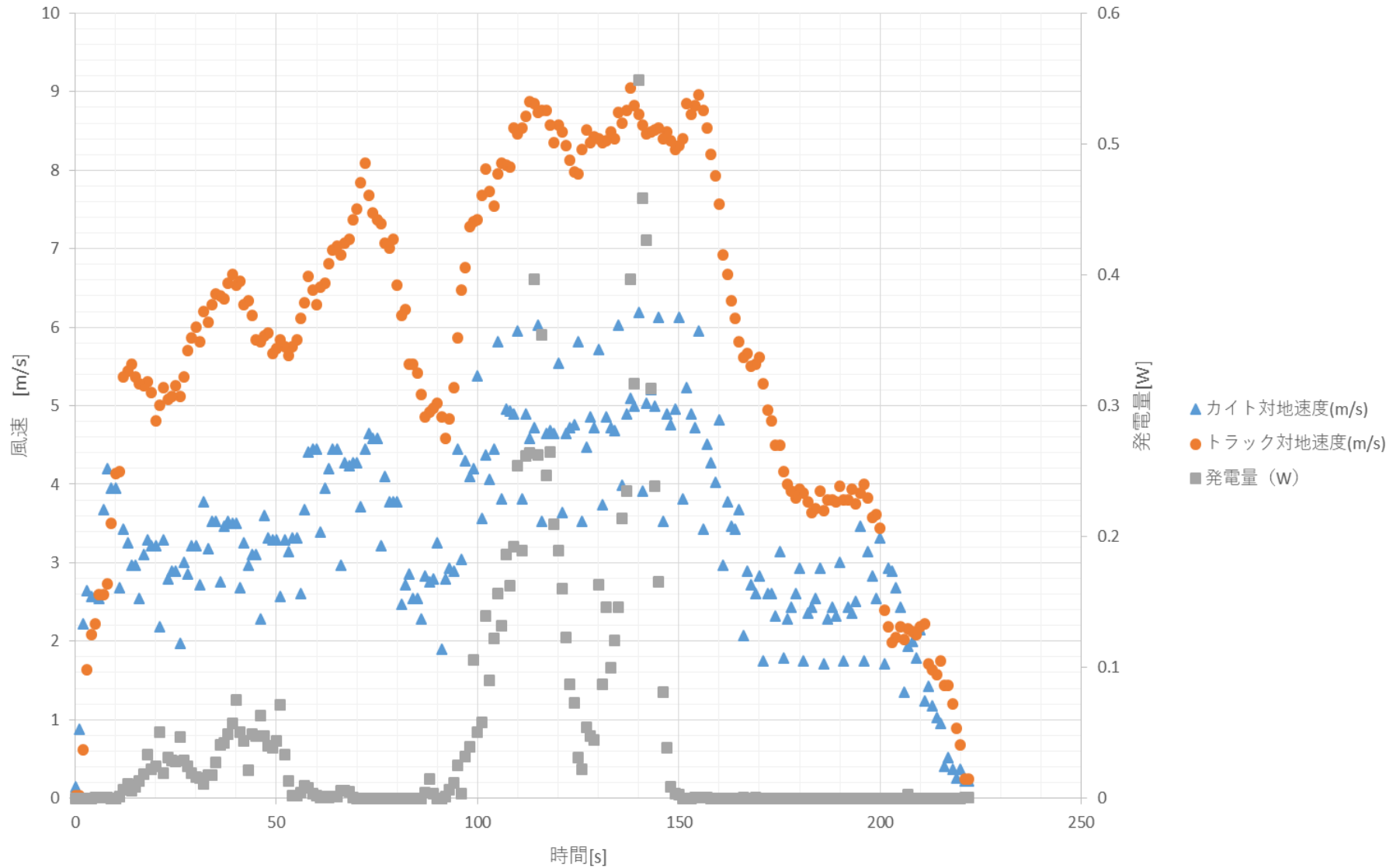
妻沼滑空場 2017/11/15 午前 Phase 1+ 原田風車 CASE 3





妻沼滑空場 2017/11/15 午前 Phase 1+ 原田風車 CASE 3

風速一発電量







### 船舶搭載型SkySails (独：推進と発電)

船舶上に帆を設置し、船の推進に利用したり、発電 (50 kW) も行う。現在までにすでに応用されており、成功した一例。



### グライダーを用いた引き綱方式AmPyx Power (オランダ)

8の字飛行を行う翼全体が効率的な発電ブレードとなり対気速度を増加、得た風力エネルギーにより発電する。間欠的な電力取得となる。現在 10kW10時間連続2日発電の実績を持つ。オランダ財務省が国として援助。



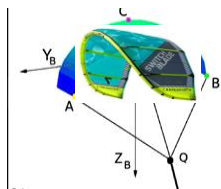
### 気球を用いた発電 Altaeros (米国：MIT)

重い発電機も持ち上げるので大型化するのに加え、気球本来の弱点であるヘリウムガスの補給が必要となる。このため、発電コストが大きくなる。ソフトバンクとMHIが資金援助している。極地での利用。



### パラグライダーを用いた発電 Enerkite (欧州：独、オランダなど)

常時8の字飛行を行うが、パラグライダーは柔らかい材料なので激しい飛行では機材の消耗が増加する。



### サーフカイトを用いた発電Universidad Carlos III de Madrid (欧州：西)

常時8の字飛行を行う。インフレーターブルの補強材を用いる。新しい材料と構造を用いている。スペイン政府が積極的に援助。TMITと共同研究中。



### 無人飛行機を用いた発電 Makani Power (米国)

発電機を積載し電力ケーブルで地上に送電するためケーブル重量が大きくなり、また、送電損失が大きい。Googleが買収した。



Fig.1 Makani power社 The M600 energy kite (600 kW級) (21 Nov 2016)

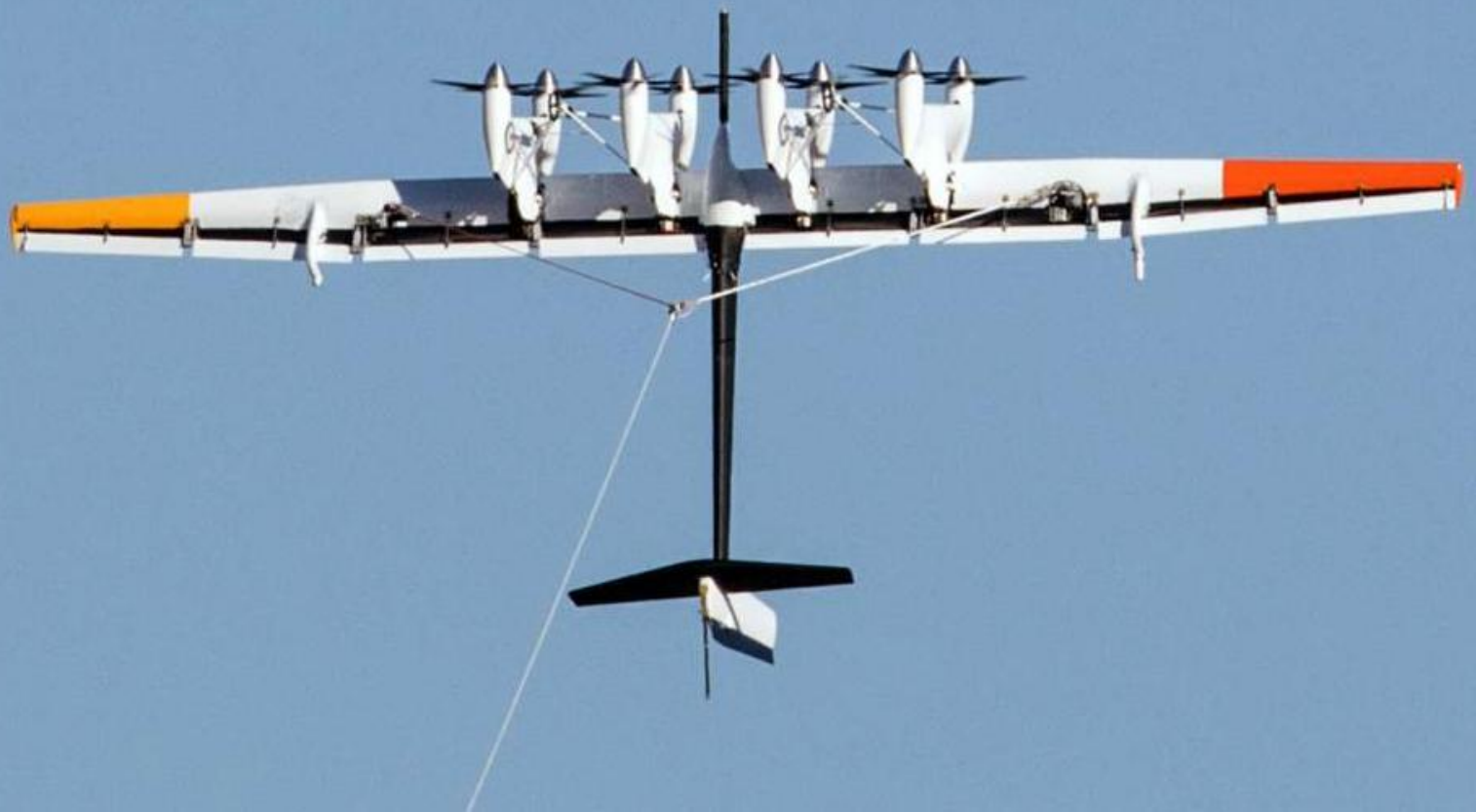


Fig.1 Makani power社 The M600 energy kite (600 k W級) (21 Nov 2016)



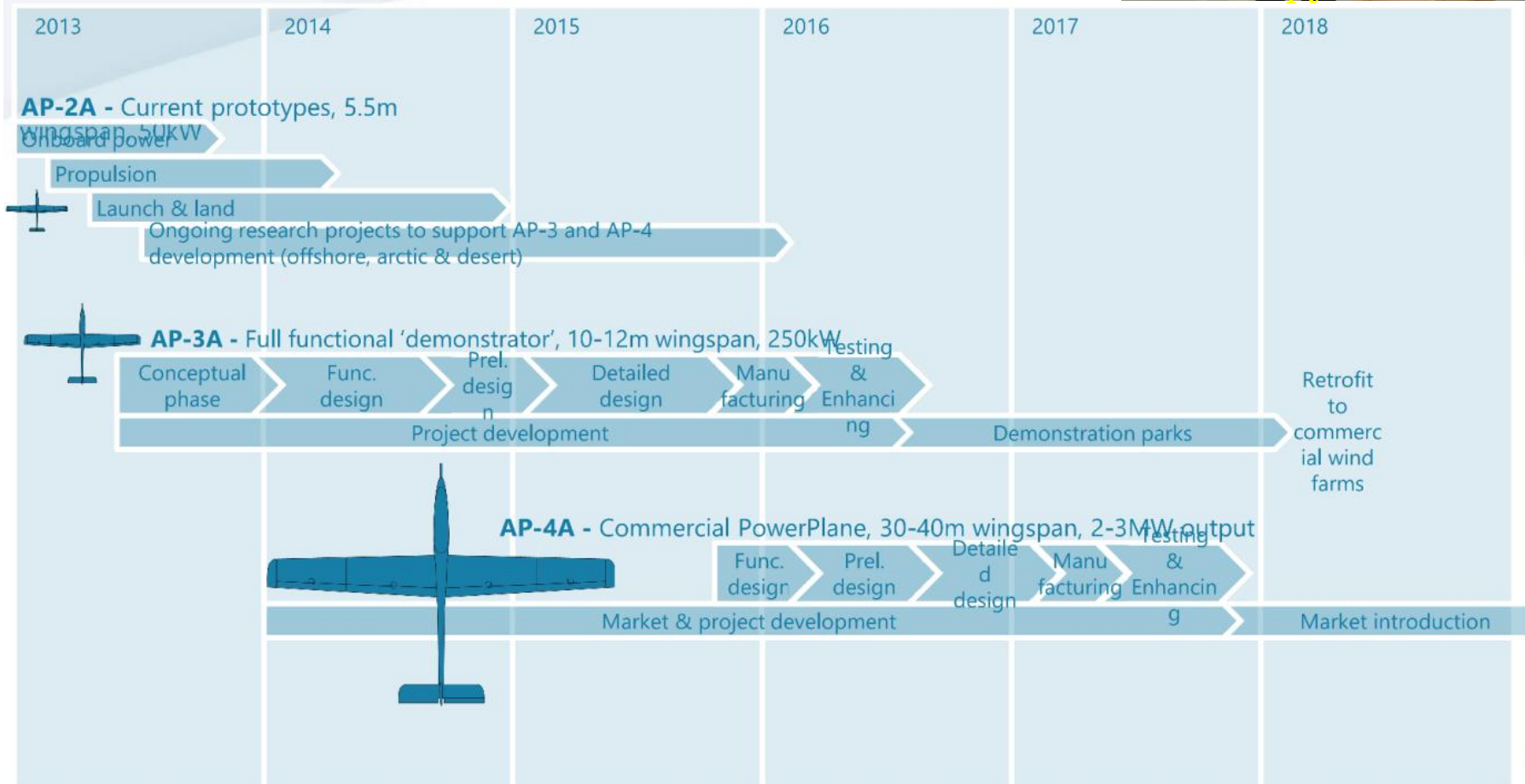


Fig.2 オランダ Ampyx Power社のAP-3 (250 kW級) 2018年に飛行予定



# Technology roadmap

Compete with coal at commercial introduction in 2017



◎開発仕様 VII 高空風力：コンセプト検討（TMIT藤井2017Dec25）参照

		Model			
CONCEPT		Small model	Middle	TwingTec	ASK21
EVALUATION					
	Power[kW]	0.05	0.14	0.89	257.33
KITE					
	chord[m]	0.3	0.2	0.5	1.05
	span[m]	1.2	3	3	17
	Kite Area; S[m2]	0.36	0.6	1.5	17.85
Weight	W[kg]	0.75	2.6		600
W/S	[kg/m2]	2.08	4.33		33.61
Size	6.25	0.24	0.4	1	11.9
Altitude	[m]	100	100	100	600
WIND					
	Wind Speed; U[m/s]	5	5	5	5
	Wind Speed; U[m/s]	5.4	5.4	5.4	7.7
	Speed Ratio[-]	4	4	5	5
	Relative WS[m/s]	21.5	21.5	26.8	38.4
	Density[kg/m3]	1.225	1.225	1.225	1.225
	Dynamic Pressure[Pa]	282.57	282.57	441.52	904.08
定常時	CL[-]	1	1	1	1
	Lift; L[N]	101.73	169.54	662.27	16137.85
翼面荷重	L/S[kg/m2]	28.83	28.83	45.05	92.25
荷重倍数	L/W	38.44	11.09		0.15
	Tension; T[N]	101.73	169.54	662.27	16137.85
POWER					
	Reel-out Speed; v[m/s]	0.48	0.8	2	23.8



## Parrot Disco FPV

**Size:** 1150 mm x 580 mm x 120 mm  
**Wingspan:** 1150 mm (45")  
26.45 oz

HARISSA(アリッサ)フルカーボン OK模型 13013-71赤/  
白/紺 ネット限定商品 コンポジットグライダー  
PILOT 4xp ラジコン



## ハイテック

(HiTEC)/A1200/A1200 RTF  
キット(7チャンネルブラシ  
レスモーター 3D6G システ  
ムエアプレーン)



## アレキサンダーシュライハーASK21

初飛行：1978年

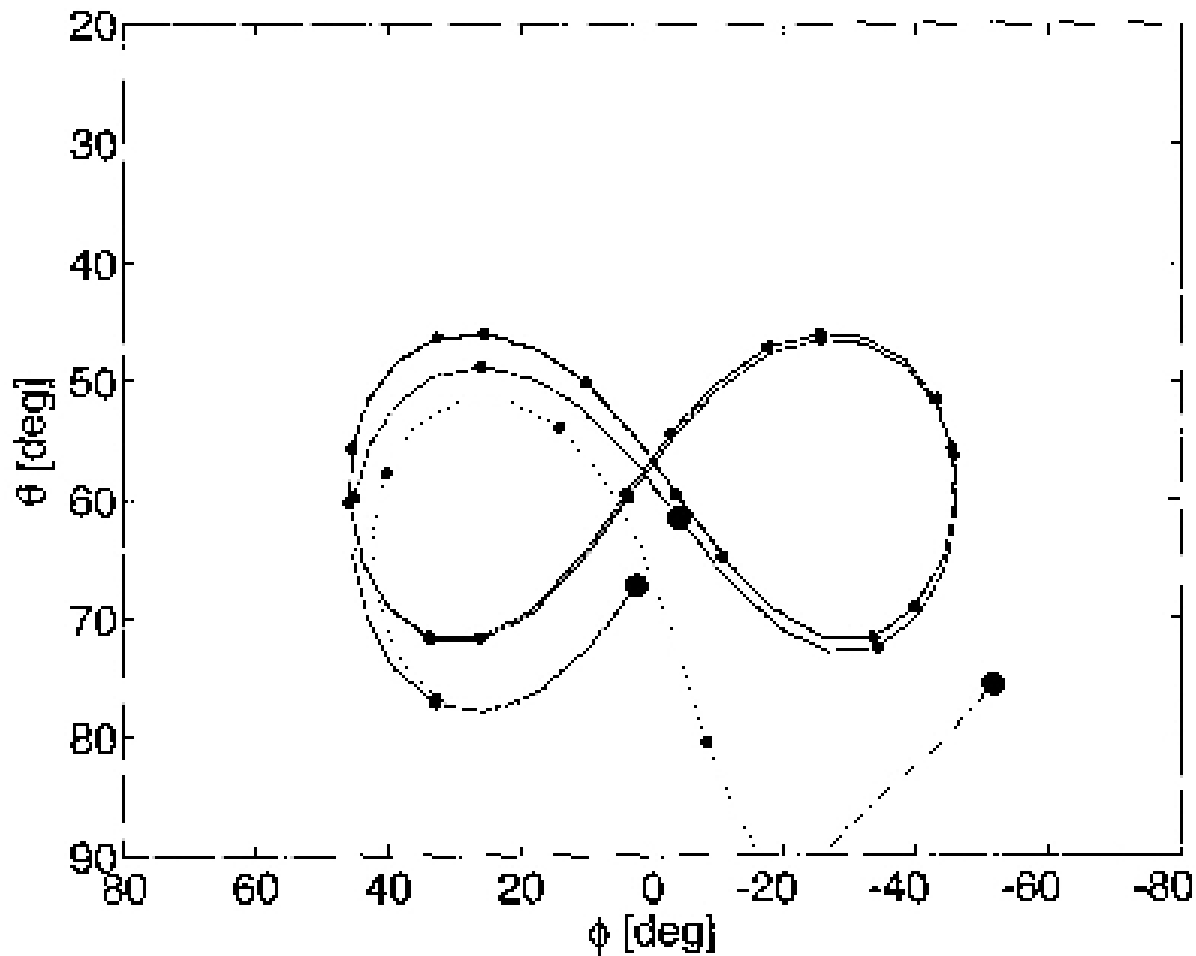
構造：ガラス繊維強化プラスチック

全幅：17.0m、全高：1.55m

全長：8.35m、翼面積：17.95m<sup>2</sup>

360kg、最大離陸重量：600kg

超過禁止速度：280km/h



モデル予測型制御  
が必要。

Fig. 5. The linear periodic controller is able to stabilize the system locally from slightly disturbed system states (solid line), in contrast to the open loop system (dotted), but let the kite crash onto the ground for a larger deviation (dash dotted).





図4 実験に用いた UAV

表1 UAV 諸元

翼幅 0.93[m]

全長 0.86[m]

質量 0.54[m]

固有角振動数

縦運動 1.76[rad/s]

横・方向運動 10.3[rad/s]

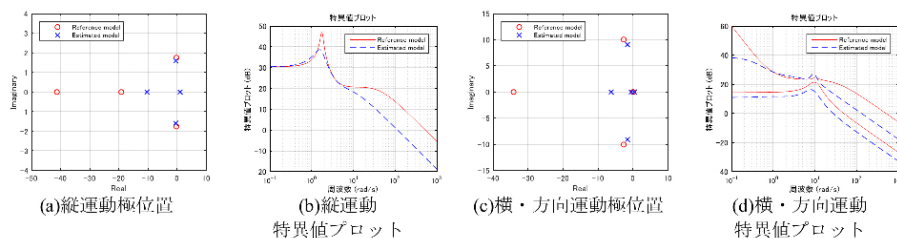


図6 数値シミュレーションにおける機体ダイナミクスの推定結果

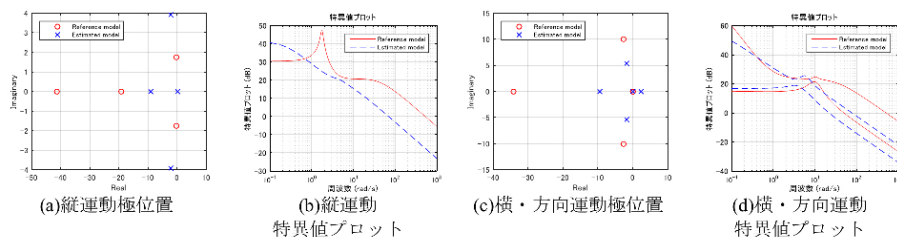


図7 実証実験における機体ダイナミクスの推定結果

宮沢和博, 内山賢治,  
 「再帰的最小二乗法と Self-Tuning Regulator を用いた無人航空機のオンラインシステム同定」, 第53回飛行機シンポジウム, JSASS-2015-5058 (2015)

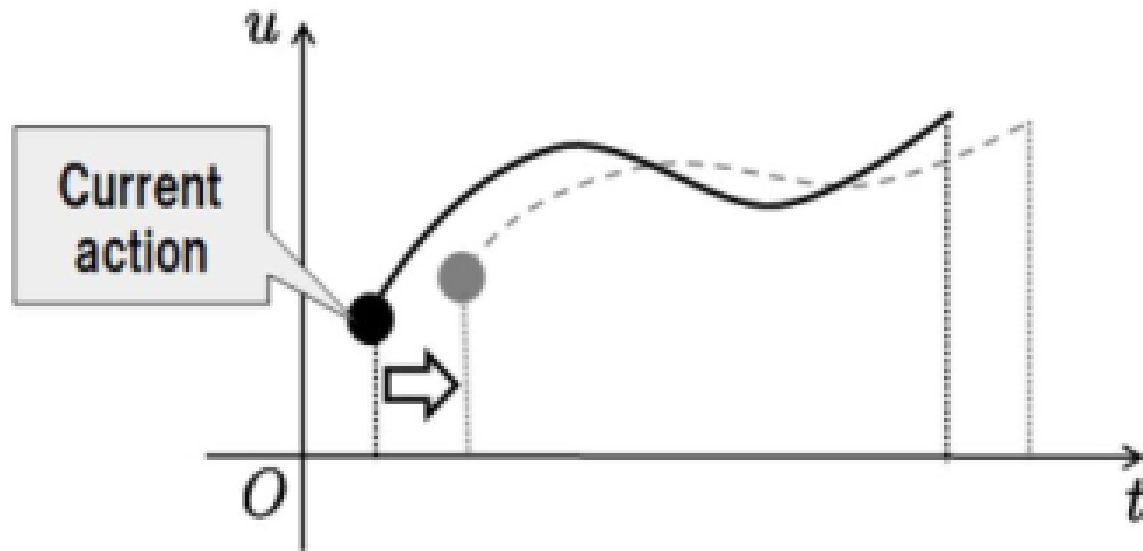
飛行体の制御手法 (Receding Horizon制御)

[http://www.symlab.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~ohtsuka/index\\_j.htm](http://www.symlab.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~ohtsuka/index_j.htm)

Ohtsuka, T., and Fujii, H. A., “Nonlinear Receding-Horizon State Estimation by Real-Time Optimization Technique,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 19, No. 4, July-Aug. 1996, pp. 863-870.

2014年4月：自動コード生成ツール[AutoGenUのMaple版](#)が公開

Nonlinear Model Predictive Control



\* 大塚敏之編「実時間最適化による制御の実応用」コロナ社、  
(適用事例：自動操船システムにおける実用化事例，航空機誘導の飛行実験事例，自動車，ロボット等。)







# Bio-suit

It's a piece of cake!



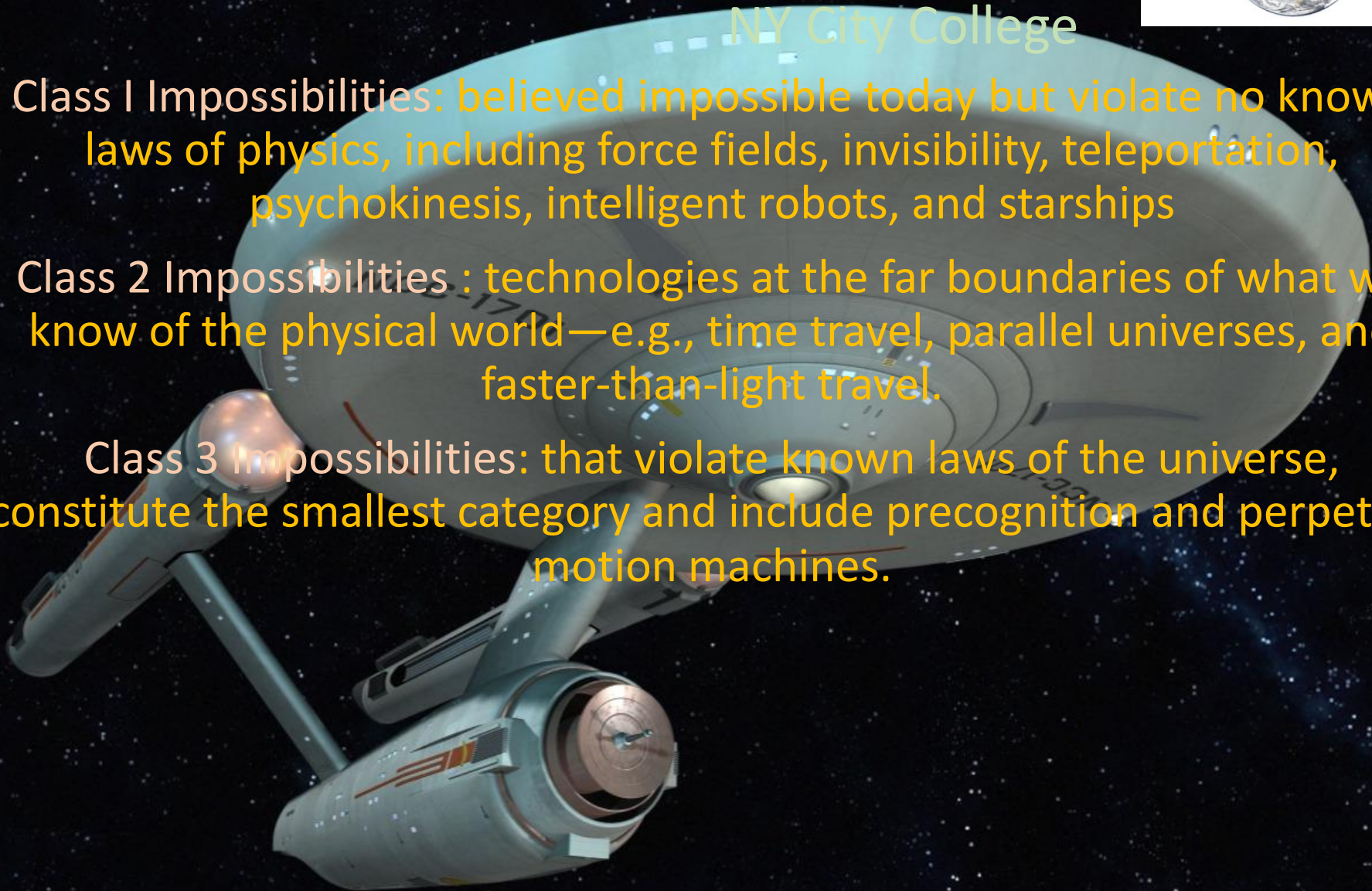
# Science Impossible!

By Prof. Michio KAKU  
NY City College

Class 1 Impossibilities: believed impossible today but violate no known laws of physics, including force fields, invisibility, teleportation, psychokinesis, intelligent robots, and starships

Class 2 Impossibilities : technologies at the far boundaries of what we know of the physical world—e.g., time travel, parallel universes, and faster-than-light travel.

Class 3 Impossibilities: that violate known laws of the universe, constitute the smallest category and include precognition and perpetual motion machines.





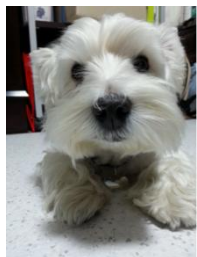
100 100 100

研究開発部

所長	藤井	裕矩	
客員研究員	遠藤	大希	
客員研究員	永尾	陽典	(2018年4月から)
研究企画顧問	草谷	大郎	(都立産技高専 准教授)
研究企画顧問	渡部	武夫	(神奈川工科大学 准教授)

事務局

総務部	総務部長	山崎	真由実
庶務課長		小島	昌子
広報課長		渡部	紀子



Rudolf the 1th世 (大塚本宅常駐)



Alex



Vivian

(浅草事務所常駐)