

世界記録への挑戦：長距離人力飛行機研究調査について

大林 茂^{*2} Shigeru Obayashi

東北大学 流体科学研究所

Key Words: Human-Powered Flight, Aircraft Design, Risk Analysis, Weather Prediction, Pilot Performance

1. はじめに

鳥人間コンテストでは、大学チームにより年々飛行記録が更新され、世界記録達成を視野に活動を行うことが可能になってきた。しかし、テレビ番組の枠内では、ルールやスポンサーの都合で、世界公認記録を達成することはできない。そこで、世界記録挑戦を行うための、機体設計・気象予測・パイロットトレーニング・プロジェクト管理に関する研究調査を東北大学 Windnauts(ウィンドナウト)協力の下に実施し[1]、今後日本の大学チームで世界記録に挑戦するための基礎データを収集した。

具体的には、飛行にあたって以下の 4 項目の調査を実施し、それぞれ飛行中にデータ収集もしくは実証を行うことで、達成度評価、更なる改善点とその方法の明確化を行った。

1. 長距離飛行を可能にする人力飛行機の機体設計と飛行実証
2. 長距離飛行を可能にするプロジェクト管理・リスク解析
3. 長距離飛行を可能にするパイロットトレーニングと飛行実証
4. 長距離飛行を可能にする風況予測と飛行時の観測による実証

人力飛行機の分野において、いわゆる世界記録とは FAI (Fédération Aéronautique Internationale[2], 国際航空連盟) の規定に準拠した形での飛行距離の認定を受けるもので、我が国では日本航空協会[3]が窓口となっている。人力飛行機部門では、機体の離陸、巡航における動力を搭乗者の筋力のみによってまかなわなければならない。搭乗者の筋力エネルギーを蓄える装置については搭載が許される部門もあるが、本調査はこのような装置も搭載しない部門に則った。なお、機体の重量やスパン、搭乗者数の制限はない。記録認定には二通りの方法がある。一つは単純に離陸地点と着陸(着水)地点の直線距離を飛行距離とするものである。もう一つはクローズド・サーキットと呼ばれるもので、図 1 のように

2~4 点の旋回点を設け、これらで構成される閉じた経路の外周を飛行することにより、旋回点を順に結んだ距離の和を飛行距離とするものである。また、滞空時間についても記録が認定され、これは飛行距離への挑戦と並行して行うことができる。さらに、これらとは別に飛行速度についての世界記録も存在する。

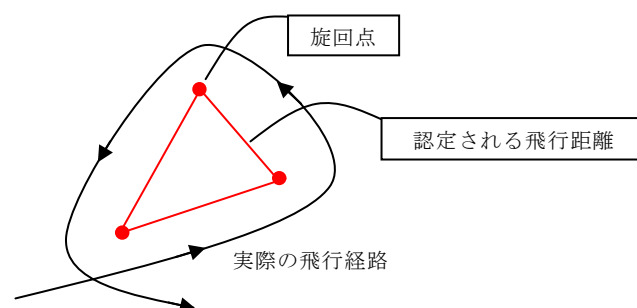


図 1 クローズド・サーキット概要

直線距離、クローズド・サーキット、滞空時間の世界記録は、男女とも NASA とマサチューセッツ工科大学の一連のプロジェクトにおいて樹立された。男性の直線距離は 1988 年に Daedalus 88 号が樹立した 115.11 [km] であり、同時に滞空時間 3 時間 54 分 59 秒の世界記録も誕生した。クローズド・サーキットでは、Daedalus 号の前身機である Michelob Light Eagle 号が 1987 年に 58.66 [km] を記録している[2]。本調査では、当初直線距離による飛行を計画したが、ハザード解析の結果、クローズド・サーキットの飛行計画に変更した。

2. 研究調査計画

機体の設計及び製作は大林が顧問を務める東北大学 Windnauts が主体的に行い、リスクマネジメントの監修を JAXA 技術開発本部・泉耕二フェローにご指導いただいた。また、パイロットのパフォーマンス管理は、東北大学医工学研究科永富良一教授が監修し、ダウンスケール気象予報を、東北大学理学研究科岩崎研究室所属沢田雅洋氏が担当した。

2.1 人力飛行機設計 構造力学的に許される限りアスペクト比を最大化した超軽量機体の設計・製作を行った。表 1 に機体諸元を示す。

表 1 機体諸元

総重量		97.5 [kg]
空虚重量		31 [kg]
巡航速度		7.2 [m/s]
必要パワー		226 [W]
主翼	翼型	DAE21,DAE31
	スパン	33 [m]
	アスペクト比	37.9
	平均空力翼弦	0.90 [m]
	翼面荷重	3.39 [kg/m ²]
	上反角	8.37 [deg]
	水平尾翼 翼型	NACA0009
	水平尾翼容積	0.415
垂直尾翼	翼型	NACA0009
	垂直尾翼容積	0.0137
プロペラ	翼型	DAE51
	推力	23.1 [N]

一次構造材であるCFRPパイプは積層構成の決定から焼成まで全て Windnauts が行った (図 2)。構造の強度は、構造設計開始前に行う材料破壊試験 (図 3) 及び、主翼桁・フライングワイヤ・コクピットに対する、定常飛行時の 1.5 倍負荷の荷重試験 (図 4) により、フライトエンベロープ内で保障する。なお、主翼桁の安全率は 1G において 3, 1.5G において 2 である。機体完成後は川内北キャンパスグラウンドおよび角田滑空場で試験飛行を実施した (図 5)。試験飛行では主翼取り付け位置の前後移動による重心位置の変更、ワイヤー張力による上半角の変更により、機体操縦特性をパイロットの操縦技術に適合するよう調整した。



図 2 CFRP パイプ製作



図 3 材料破壊試験



図 4 荷重試験(1.5G)



図 5 試験飛行

2.2 リスクマネジメント リスクマネジメントは、人力飛行機の飛行の安全に関わる要素を、①機体、②パイロット、③インフラストラクチャーの三つに分類し、各々に対して詳細なハザード解析を実施することと、企画の各フェーズにおける Go/Nogo 判断基準の策定を行った。

ハザード解析においては、事前に、企画進行中発生するリスクを予測し、各リスクの発生頻度とプロジェクトへの影響度を評価・分類(頻度の高い順にⅣ,Ⅲ,Ⅱ,Ⅰ, 影響の高い順に D,C,B,A)する。次に想定されたリスクに対し、予防策を講じ、安全基準までリスクの頻度及び影響度を低減する。以上により、想定しうるリスクを全て分類し、図 6 のようなマトリックスに整理することで、プロジェクト期間中発生しうるリスクが安全基準を満たしていることを保障する。具体的は対処法としては、

- ・天候判断やパイロットの体調不良に対する延期措置
- ・機体に対する試験飛行
- ・機器に対する予備の準備
- ・現地におけるインフラの調整 (滑走路の凹凸, 木々の伐採)

などを行った。

	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
D	0	0	21	82
C	1	9	18	17
B	3	19	37	30
A	0	14	14	47

リスク対処前

	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
D	0	0	0	102
C	0	0	2	40
B	0	0	16	77
A	0	0	17	58

リスク対処後

図 6 ハザード解析結果例 (機体)

一方、Go/Nogo 判断基準においては、先のハザード解析により明確化された重大なリスクを事前に回避することを目的として、プロジェクトの停止/続行/再開の判断基準を

リストアップする．これにより，プロジェクト実施中のリスクを確実に安全基準内に収め，作業者の逡巡通減を図るものである．

今回の飛行調査において，学生は飛行記録の樹立という目標を持って参加した．始めは大樹町多目的航空公園を利用し，海岸に沿って飛ぶことで直線距離での世界記録達成を狙って検討を開始したが，ハザード解析の結果，リスク対策を講じても安全を確保できないことが判明し，琵琶湖でクローズドサーキット飛行し，世界記録に挑戦することに変更した．

2.3 パイロットパフォーマンス パイロットパフォーマンスでは，パイロットに対しエアロバイクを用いた斬新負荷試験を実施し，出力・心拍数・血中乳酸値濃度を測定した．このデータをもとに飛行時間中，必要出力の維持が可能な心拍数を求め，疲労蓄積・エネルギー消費を最低限に抑える運動形態を決定した．加えて上記取得データより，現時点でのパフォーマンスを解析し，トレーニングメニューを更新した．さらに，目標飛行時間（3 時間）以上のシミュレーショントレーニングを実施し，フライト中の水分補給及び炭水化物補給のより効率的方法を決定した．

2.4 気象予測 気象予測では，気象庁から配信される気象データ（MSM-GPV）をもとに，東北大学岩崎研究室の CFD 解析システム（Down Scaling Simulation System = DS3）により飛行領域を 1km 格子に分割し，力学的ダウンスケーリングな気象予測を行った．これにより，飛行領域におけるフライト時の風況，降水予測を行い，リスクマネジメントの Go/Nogo 判断基準に従って飛行の可否を判断する．さらに，この風況予測と主観解析に基づいて，長距離飛行を可能にする飛行計画を作成する．

3. 調査飛行

3.1 飛行計画 本研究では機体の離陸地点を，滋賀県野洲市湖岸のビワコマイアミランドとした．砂浜に鉄板製の滑走路（1.5m×70m）を建設し，その上にレールを敷設した．また，湖上にはクローズド・サーキットを形成するためのゲート（サーキットへの進入ライン），および旋回点 1, 2 を設けた（図 7）．ゲートおよび旋回点 1 はプロジェクト用に Windnauts でブイを設置し，旋回点 2 については既存の水質検査用ブイを用いた．図 8 に機体の飛行経路（青線）および飛行領域（橙斜線）を示す．船舶のマナーブックに則り，湖岸から 400m 以内の機体の侵入を防止するため，飛行領域は湖岸から 600m 以上離れた場所に設定した．600m 以内に機体が侵入した場合は機体を着水させるよう定めた．

飛行中は，パイロットの心拍数及びコックピット内気温の記録を実施し，上記提案の運動形態，トレーニングメニュー及び補給法の効果を検証した．

また，飛行時には機体に GPS 及び対風速度計を搭載し，人力飛行機の飛行軌跡，対地・対気速度経時データを収集する．また，機体前方約 1km を先行する船舶では，

水面付近の風況を 10 分間隔で観測・記録する．以上の予測データと実測データ，予定経路と実飛行経路の比較により，ダウンスケール予測の予測精度と実用性の検証を行った．

図 9 に示すように飛行実施には，機体の周りに 3 隻の船を配置した．先行船は風況の情報収集，船舶の監視を行う．伴走船は船舶の指揮，地上の本部との通信を担当する．また，FAI 船は FAI 記録証明ために動く．

琵琶湖上での飛行にあたり，計画に含まれない船舶等が計画飛行経路へ侵入することが考えられる．そこで，先行船・伴走船は常に目視による監視を行い，機体と障害物のニアミス避けるよう飛行経路を選択することとした．



図 7 離陸点周辺配置図

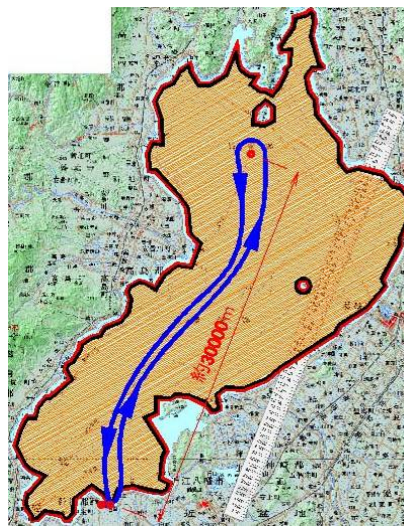


図 8 飛行計画および飛行領域

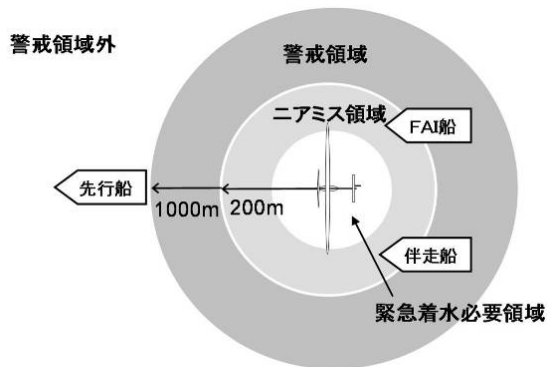


図 9 船舶配置及び警戒領域定義

3.2 天候判断 天候判断は、予め気象担当者が作成した天候判断規範に従って行われるものとし、これに記載されている飛行許可基準を満たさない場合は飛行を許可しないこととした。

<8月9日>12時：雨が降り続き、10日も午前中から雨が予測されていたので、天候判断規範に従って10日の飛行実施延期を判断した。

<8月10日>12時：翌日は晴れが予想されていたが、正午の時点で雨が降っており、夕方まで雨が予想されていた。また、台風が翌日の午前中に最接近する予報であり、11日朝の時点で風向が追い風になる可能性が高いと予想したため、天候判断規範に従って11日の飛行実施延期を判断した。

<8月11日>12時：翌日は大きな天気の流れはなく、降水なし、風も穏やかであると予測した。また、最近の風観測より、一般風が弱い場合は離陸地点では向かい風になることが判明していたので、「飛行許可基準」を満たすと予想した。天候判断規範に従って12日の飛行実施を判断した。

<8月12日>5時：ほぼ無風、時より南東より（滑走路右前）の微風が吹く程度、当日12時まで降水の可能性がほとんどなく、視程は目視で30km以上、雷雲の発生もなかった。天候判断規範に従って出発を許可した。

<飛行中>飛行許可基準に反する気象条件は発生しなかった。

3.3 飛行状況 2009年8月12日06:10に滑走を開始し、滑走開始点より約64m地点でパイロットのエレベータ操作により離陸した（図10～14）。緩やかに左旋回後、約150m地点にて2m高度証明点を高度約3.5mで通過した。さらに緩やかな左旋回を続け、約400m先のゲート（スタート点）に到達したが、ゲートの間は通過せず、ゲートを構成する3個のブイに沿うように通過した。FAI船に乗船していた水上の公式立会人はコース内への進入を認定したが、先行船ではゲート通過失敗と判断し、パイロットに復航を指示した。旋回中にゲート通過が確認されたため、飛行経路は沖合で離陸直後反時計回りに1周している。

その後、予定の経路の飛行を継続した。予定の経路上では安定した飛行を続けたが、飛行高度は高い状態が継続し、高度5m程度（目視により判断）を下回ることがなく、最高で30m程度まで上昇したこともあった。

07:06にプロペラの回転数が一時的に減少し、パイロットからチェーン脱落の連絡が入った。この時伴走船は滑空を続けた後の緩やかな着水を決出し、その旨を各船舶・パイロット・本部に伝達した。その後、パイロットからテンショナーが破損したことによるチェーン脱落であったとの詳しい連絡が入った。3分の滑空の後、07:09に機体は着水した。それと同時に伴走船・FAI船は機体に近づき、ダイバーはパイロットの救出に向かった。引き上げ後、伴走船の医師がパイロットの体調に問題がな

いことを確認した。その後、伴走船は帰港し、残りの船舶で機体の回収を行った。



図10 離陸前の機体調整と写真撮影



図11 翼が揚力を持ってまもなく離陸



図12 離陸！



図13 湖上へ



図 14 湖上を飛行中の機体

3.4 飛行記録 以下の(1)～(6)および図 15 に本研究における飛行記録を示す。なお、飛行距離および滞空時間が該当の記録に達しなかったため、公式記録は成立しなかった。

- (1) 離陸時刻 2009 年 8 月 12 日 06 時 10 分 09 秒
- (2) 着水地点 琵琶湖（安曇川河口沖合付近）
- (3) 着水時刻 同日 07 時 09 分 31 秒
- (4) 滞空時間 59 分 22 秒
- (5) 飛行距離* 20.72 km
- (6) 飛行経路図（機体搭載の GPS）

*飛行距離：スタートラインから旋回点 1 と、旋回点 1 から着水地点までの大圏コース距離の和

4. 調査結果

4.1 機体の飛行実証 離陸からゲートおよび旋回点 1 の通過、360 度の旋回を考慮すると、機体の制御・安定性のバランスは適切であったといえる。次に、必要出力および回転数については電装機器のログが消失したため、パイロットの証言によるものであるが設計値との対応がとれていた。

最後に着水原因となった機体部品の破損に関して、機体製作の管理体制の不備が原因と考えられ、製作者とは別の管理者が必要であった。

4.2 リスクマネジメント 大樹町から琵琶湖への計画変更により、調査飛行の実現性が改善し、飛行実施にいった。ハザードのリストアップに関して、起こり得る項目をほぼ挙げる事ができた。それらに関しては、適切な対策が施せたと考えられる。しかし、項目の多さから煩雑になっていたのも、更なる工夫が必要である。

飛行高度については、墜落時の安全確保と、地面効果の活用の点から、10m 以上の高度における飛行は不適切であった。飛行高度管理ができなかったことは、大きな反省点である。

4.3 パイロットパフォーマンス 飛行中は、パイロットの心拍数及びコックピット内気温の記録を実施し、運動形態、トレーニングメニュー及び補給法の効果を検証した。フェアリング内の温度は外気温に保たれていることがわか

り、今回通気口の設置位置変更により、密閉されたコックピットで温度が上昇するという運動環境の特異性が解決されて、トレーニングと同様のパフォーマンスが期待できた。心拍数については巡航時であれば琵琶湖周回という記録達成に十分な値に収まっていたものの、背風時・旋回時には過剰となっており飛行技術によるカバーが必要である。

4.4 気象予測 天候判断に用いた気象予測は実況とほぼ一致した[4]。当日においては、天候判断規範にある飛行許可基準に沿った条件のもと飛行を行うことができた。

5. まとめ

人力飛行機による長距離飛行の可能性を検討するために、東北大学 Windnauts の協力の下で、機体設計・リスクマネジメント・パイロットパフォーマンス・気象予測について検討し、2009 年 8 月 12 日に調査飛行を実施した。その結果、機体設計は世界記録挑戦に十分なレベルにあるものの実際の製作にはまだ改善点があること、リスクマネジメントについても今回の経験で改善点が発見されたこと、パイロットパフォーマンスも非巡航時に課題があること、気象予測についてはほぼ一致したものの実用的には改善の余地があることが分かった。今回の記録を糧に、是非全国の学生チームで世界記録に挑戦してもらいたい。

今回の研究調査の実施に当たっては、JAXA 泉耕二フェロー、東北大学医工学研究科永富良一教授、理学研究科岩崎俊樹教授、沢田雅洋氏に、ご尽力いただいた。最後に、プロジェクト実施にあたりご協力いただいたすべての方々にお礼を申し上げる。



図 15 2009 年 8 月 12 日飛行経路図

参考文献

- 1) 苗村伸夫, 塚原秀行, 庄司薫, 「人力飛行機の安全かつ円滑な運用について」第 15 回スカイスポーツシンポジウム, pp1-14, 2009 年 12 月.
- 2) Fédération Aéronautique Internationale, <http://www.fai.org/>
- 3) 日本航空協会, <http://www.aero.or.jp/>
- 4) 沢田雅洋, 山下博, 岩崎俊樹, 大林茂, 「人力飛行機長距離飛行におけるダウンスケール気象予測の適用とその検証」日本航空宇宙学会北部支部 2010 年講演会, 2010 年 3 月.

著 者 紹 介



大林 茂（正会員）

1960 年生．神奈川県出身．1987 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了．工学博士．同年 NASA Ames 研究所客員研究員，1994 年東北大学工学部助教授に採用，2000 年流体科学研究所へ移動，2003 年教授昇任．数値流体力学・

進化的計算法・設計探索の研究・教育に従事．