

定量的なデータ評価による操縦訓練の標準化・効率化 — その 1 データ取得方法選定のための飛行試験 —

井戸田 典彦, 関部 真吾

Standardization and optimization of flight training method using quantitative flight data

([1] Flight test report for data acquisition method selection)

Norihiko ITODA, Shingo SEKIBE

1. はじめに

近年, 半導体集積技術の発展に伴って出現してきたデバイスである MEMS^(注1)により, 飛行中の速度や姿勢などの詳細な飛行データを取得できるようになってきた. この技術を活用して, 航空大学校(以下, 本校という)での操縦訓練や大学の航空工学コースでの飛行試験教育に活用する試みが行われ始めた.⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾ また, 小型航空機の安全性向上を主目的とした国土交通省主導の「簡易型飛行記録装置(FDM)の実証実験」^{(6),(7)}^(注2)(以下, 国交省主導 FDM という)も始まった.

そこで, 定量的な飛行データを用いて学生の操縦訓練を標準化・効率化すべく研究に着手し, 最初のステップとしてデータ取得方法選定のための飛行試験を行い, 汎用シングルボードコンピュータ Raspberry Pi⁽⁸⁾ とセンサボードである Navio 2⁽⁹⁾ とを組み合わせた方法で, 所要の飛行データを取得できることを確認した.

2. 飛行データ取得方法の候補

操縦訓練での評価や振り返りに用いるに足る精度ある飛行データを, 安全を確保した上で容易に取得する必要がある. その方法の候補を以下に示す. 各方法の特徴の比較を表 1 に示す.

(1) 搭載アビオニクスである G1000 の活用

本校で導入が完了した新型機(Cirrus 式 SR22 型機, Hawker Beechcraft 式 G58 型機)搭載の G1000(図 1)の飛行データロギング機能を活用する. 気圧高度, 対気速度, 外気温度を含め, International Civil Aviation Organization (ICAO)^{(10),(11)} Annex6 規定の FDM 要件^(注3)相当の項目(高度, 速度, 位置, 飛行経路, 姿勢, 加速度)を, MFD に挿入した SD カードにより簡便に取得可能である.

以下は, 耐空証明のない追加機器による方法である. 価格は数万円~数百万円規模で, 安価なものもあるが, いずれの方法も, 機内持ち込み品の扱いとなるのか, 追加型式設計承認及び修理改造としての扱

いが必要となるかの仕分け，離着陸時に使用可能かの整理，計測精度の検証が必要である。

(2) シングルボードコンピュータ 機内持ち込み

汎用シングルボードコンピュータ **Raspberry Pi** とセンサボードである **Navio 2** とを組み合わせ（図 2），機内へ持ち込む。

(3) スマートフォン 機内持ち込み

iPhone とそのアプリである **iBFD**⁽¹²⁾ とを組み合わせ（図 3），機内へ持ち込む。

(4) 国交省主導 FDM

国交省主導 FDM（**Vision1000** 等，図 4）を機内へ持ち込む。現在，実運航を通して評価進行中である。

なお，操縦訓練として学生が適切なフィードバックを得るためには，操縦の結果としての経路等の飛行データだけではなく，その元となった操縦入力やパイロット操作を把握できることが望ましい。現状では，**G1000** を含めたいずれの方法においても操縦入力を定量的に取得することは極めて困難であり，光学的計測・ビデオ映像解析等，適切な取得方法を検討する必要がある。これについては **JAXA** の研究成果^{(13)・(15)}等を注視していく必要がある。

表 1 に示すように，機体搭載アビオニクスである **G1000** のデータは，気圧高度，対気速度，外気温度（機体エアデータセンサによる）を取得可能で，かつ，精度・信頼性に優れるが，データ取得レートが **1Hz** と低く，3.2(2)項で述べるように操縦や風等の擾乱に伴う過渡的な運動を捉えきれない。一方，その他の方法は，データ取得レートが高い。そこでこれらを併用し，互いの欠点を補うことが有用であると考えられる。

表 1 飛行データ取得方法の比較

	(1) G1000 図 1	(2) シングルボードコンピュータ (Raspberry Pi + Navio 2) 図 2	(3) スマートフォン (iPhone + iBFD) 図 3	(4) 国交省主導 FDM (Vision1000 等) 図 4
精度	<ul style="list-style-type: none"> ・精度・信頼性あり （航法・飛行制御用の flight essential 計器） 	<ul style="list-style-type: none"> ・精度を検証する必要あり （安価な汎用品） 		
取得データ	<ul style="list-style-type: none"> ・気圧高度，対気速度，外気温度を含め，ICAO Annex6 規定の FDM 相当の項目を取得可能 ・エンジン出力取得可能 ・操縦入力・パイロット操作取得不可 	<ul style="list-style-type: none"> ・対気速度，外気温度取得不可 *1 ・操縦入力・パイロット操作取得不可 	<ul style="list-style-type: none"> ・気圧高度，対気速度，外気温度取得不可 ・操縦入力・パイロット操作取得不可 	
データ取得レート	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 5～50 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1～10 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ≒ 10 Hz
追加機器	<ul style="list-style-type: none"> ・ 不要 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 要 （機内持ち込み品/追加型式設計承認+修理改造の別，離着陸時使用可否の整理要） *SR22 型機：現飛行規程では離着陸時使用禁止 G58 型機：飛行規定には記述なし 		

*1 Raspberry Pi + Navio 2 では気圧高度も計測できるが，外気温に基づくキャリブレーションが困難なため十分な精度は得られない



図 1 G1000

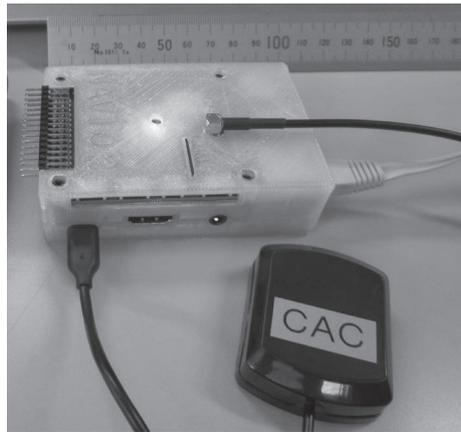


図 2 シングルボードコンピュータ (Raspberry Pi + Navio 2)



図 3 スマートフォン (iPhone + iBFD アプリ)

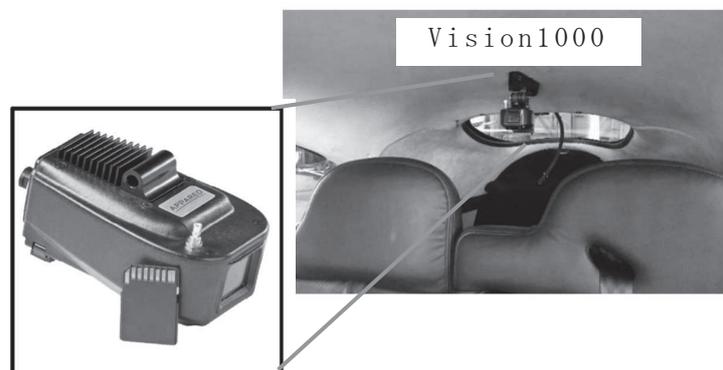


図 4 国交省主導 FDM^{(6),(7)}

3. 飛行試験

3・1 試験状況

シングルボードコンピュータ(Raspberry Pi + Navio 2)及びスマートフォン(iPhone + iBFD)の精度を評価するため、SR22型機を用いて飛行試験を2回実施した。試験項目は、訓練で行う安定した水平直線飛行の維持及びレイジーエイト、ダッチロール等の非定常運動である。計測データ項目は、高度、速度、位置、姿勢、加速度を表す荷重倍数である。これらを機器配置、飛行プロファイルと併せて表2及び図5～9に示す。

表2 飛行試験状況

		試験 1	試験 2
実施日		2020/07/01	2020/07/22
試験項目		水平直線飛行, 非定常運動 (レイジーエイト, ダッチロール等)	
計測データ項目		海拔高度, 上昇率*1, 位置, 対地速度, トラック, ピッチ角, バンク角, 方位角, 縦荷重倍数, 横荷重倍数	
機器配置	Raspberry Pi + Navio2	後部荷物室 (図5)	前席アームレスト上部 (図7)
	iPhone + iBFD	右席計器パネル下部 (図6)	
飛行プロファイル		図8	図9

*1 昇降計が示す気圧高度の変化率ではなく、海拔高度 (= 真高度) の変化率



図5 Raspberry Pi + Navio2 (後部荷物室)



図 6 iPhone + iBFD (右席計器パネル下部)



図 7 Raspberry Pi + Navio2 (前席アームレスト上部)

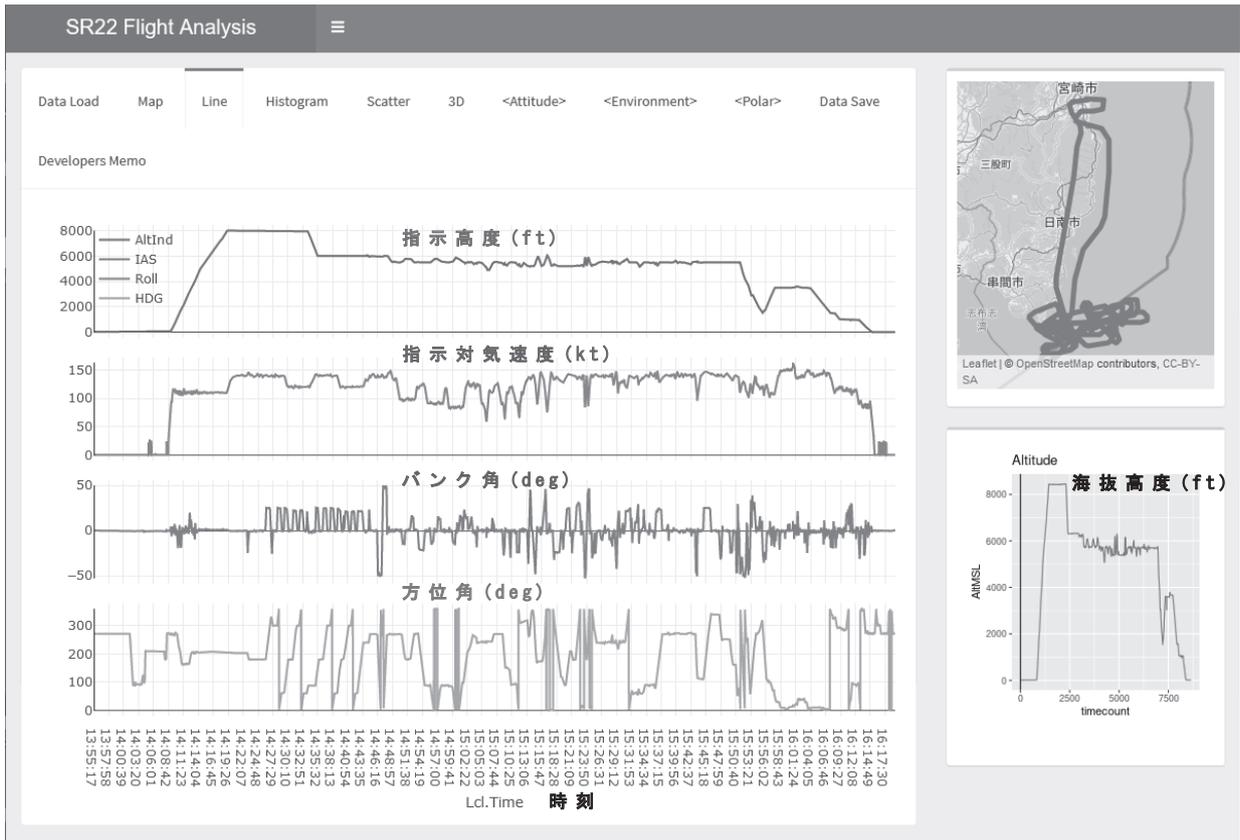


図 8 飛行プロファイル (試験 1)



図 9 飛行プロファイル (試験 2)

3・2 飛行試験結果

航法・飛行制御用の flight essential 計器として十分な精度のある G1000 のデータを基準データとして用いて、Raspberry Pi + Navio 2 及び iPhone + iBFD の計測データの精度を評価した。

(1) 水平直線飛行時の評価

2 試験×2 高度×2 速度×3 方位 = 24 ケースの水平直線飛行時において、各機器の精度を評価した。当該部分の飛行プロファイルを図 10,11 に示す。

・ iPhone + iBFD

飛行試験データ（試験 1，指示高度 6,000 ft，指示対気速度 120 kt，方位角 180 deg；全計測項目）を図 12～15 に示す。iPhone + iBFD では、図 14 に示すような姿勢角（ピッチ角，バンク角）のふらつきが見られることがあった。このとき図 12,13 に示すように、上昇率，対地速度も差が大きくなっていった。これは、GPS アンテナが機器本体に内蔵されており見通しの良い場所に設置できないため、変針時のバンクした姿勢によってはアンテナが遮蔽され衛星が十分捕捉できず、水平直線飛行に移った後もしばらく速度の精度劣化が継続し、速度情報を加味して推定している姿勢角に影響が現れたものと考えられる。安定した水平直線飛行を捉えることができないため、操縦訓練の評価や振り返りの用途には適していないことを確認した。

・ Raspberry Pi + Navio 2

Raspberry Pi + Navio 2 の各計測値と G1000 での計測値との差の最大値を表 3 に、差が最大となったものを図 12,13,15,16～23 に示す。図には、差の最大値が読み取れるよう、Raspberry Pi + Navio 2 の計測値に加え、各試験を通して共通の量だけ上下にオフセットさせたものを併せて示してある。これらから、Raspberry Pi + Navio 2 の計測値は表 3 に示すように G1000 での計測値と一定のレベルの一致（高度差 15 ft 以内，速度 有意差なし等）を示すことが確認できた。

なお、図 22,23,15 に示すように、荷重倍数（取得レート 50 Hz）については、G1000（取得レート 1 Hz）との差が大きく見えるが、これは細かい振動のピーク値まで捉えているためである。ウィンドウ幅 50 区間（1 Hz）で移動平均して振動成分を除いたものを見ると、G1000 との差は大きくないことが確認できた。したがって、ゆっくりした運動時の評価には移動平均値を、変化の激しい運動や不具合等の分析には生データ等と、使い分けをするとよいと考える。

また、表 3 の*3，図 18,19,23,15 に示すように、姿勢角（ピッチ角），横荷重倍数では、G1000 との差が正側負側均等でなく機器の配置を異にする試験単位で特定方向側への偏りが見られるが、これは配置した機器（図 5～7 参照）と G1000 基準軸との差及び機内の磁場環境によるものと推測される。したがって、姿勢角，荷重倍数の評価に当たっては、G1000 のデータを参考に必要に応じ補正して使用する必要がある。



水平直線飛行：2 高度 × 2 速度 × 3 方位 = 12 ケース

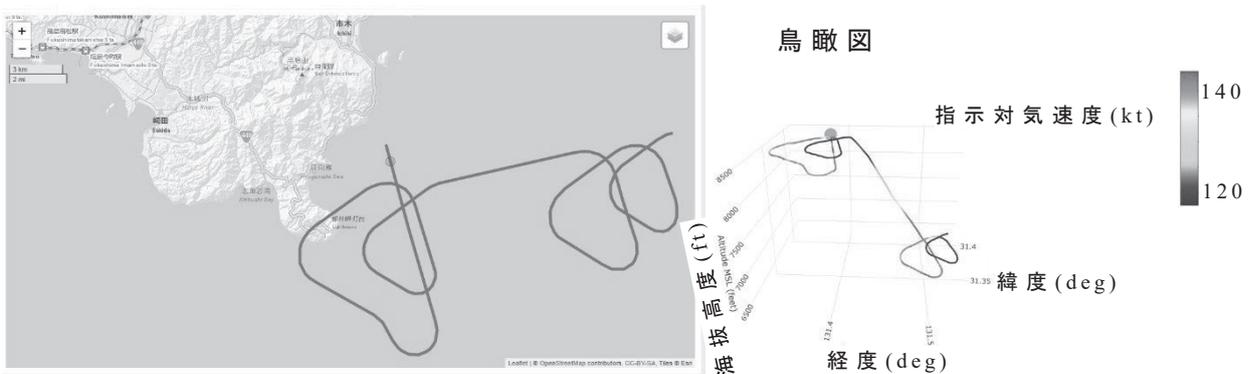
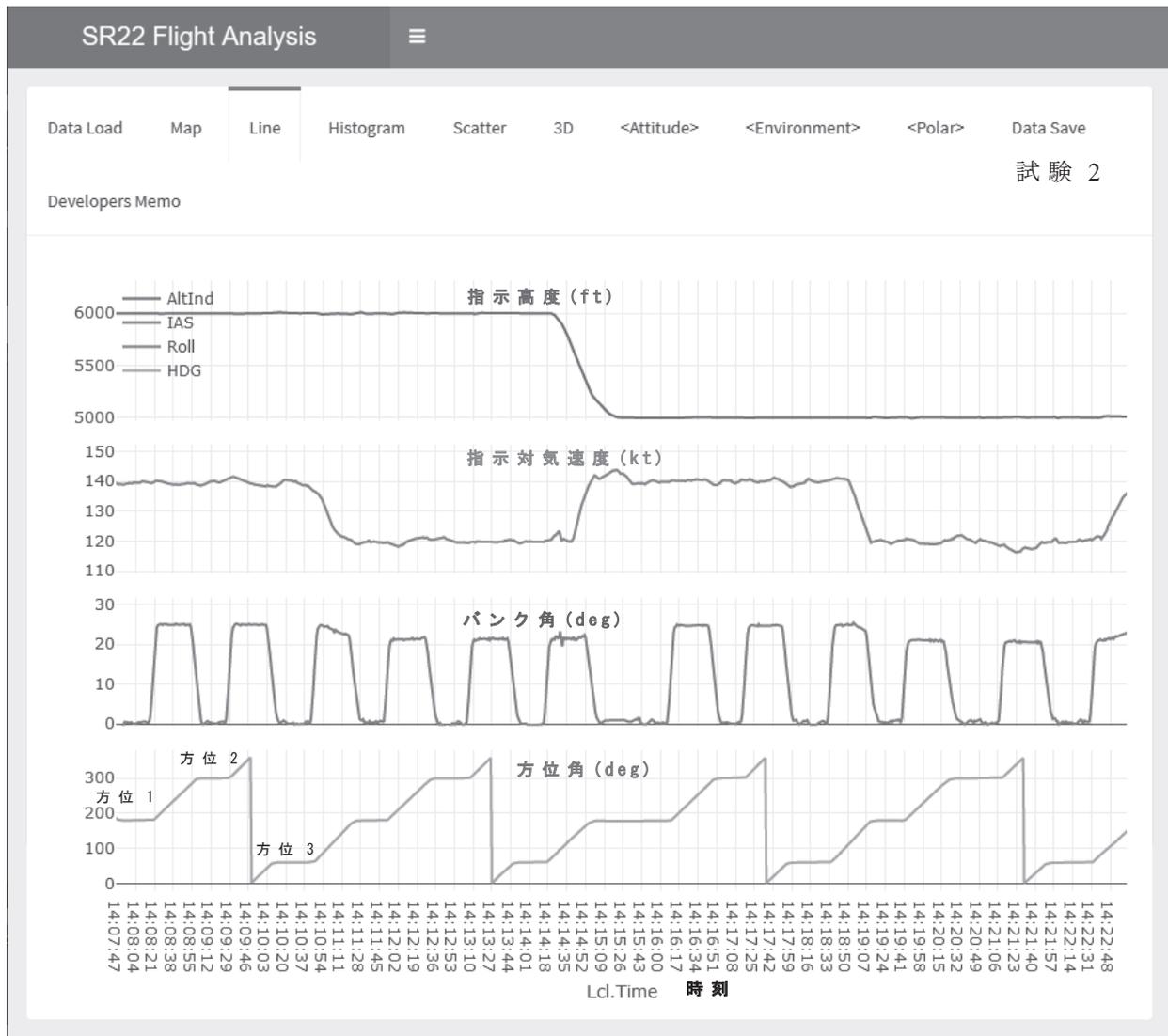


図 10 水平直線飛行時の飛行プロファイル (試験 1)



水平直線飛行：2高度×2速度×3方位＝12ケース

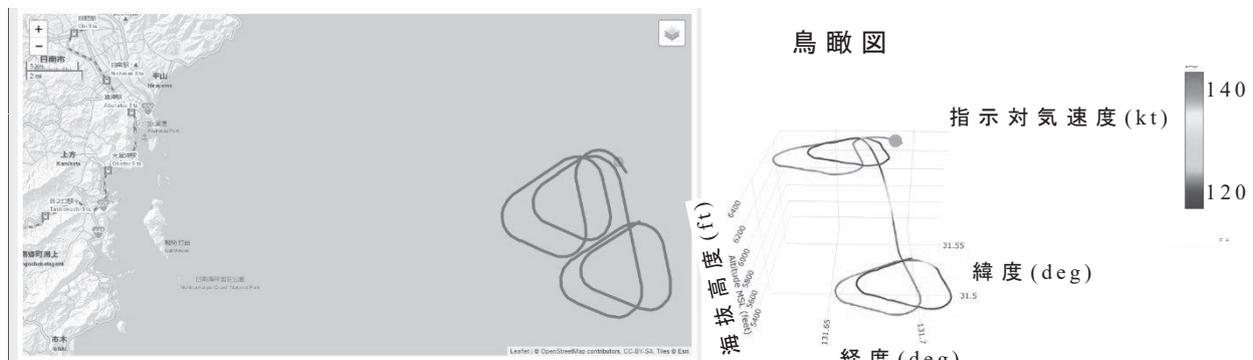


図 11 水平直線飛行時の飛行プロファイル (試験 2)

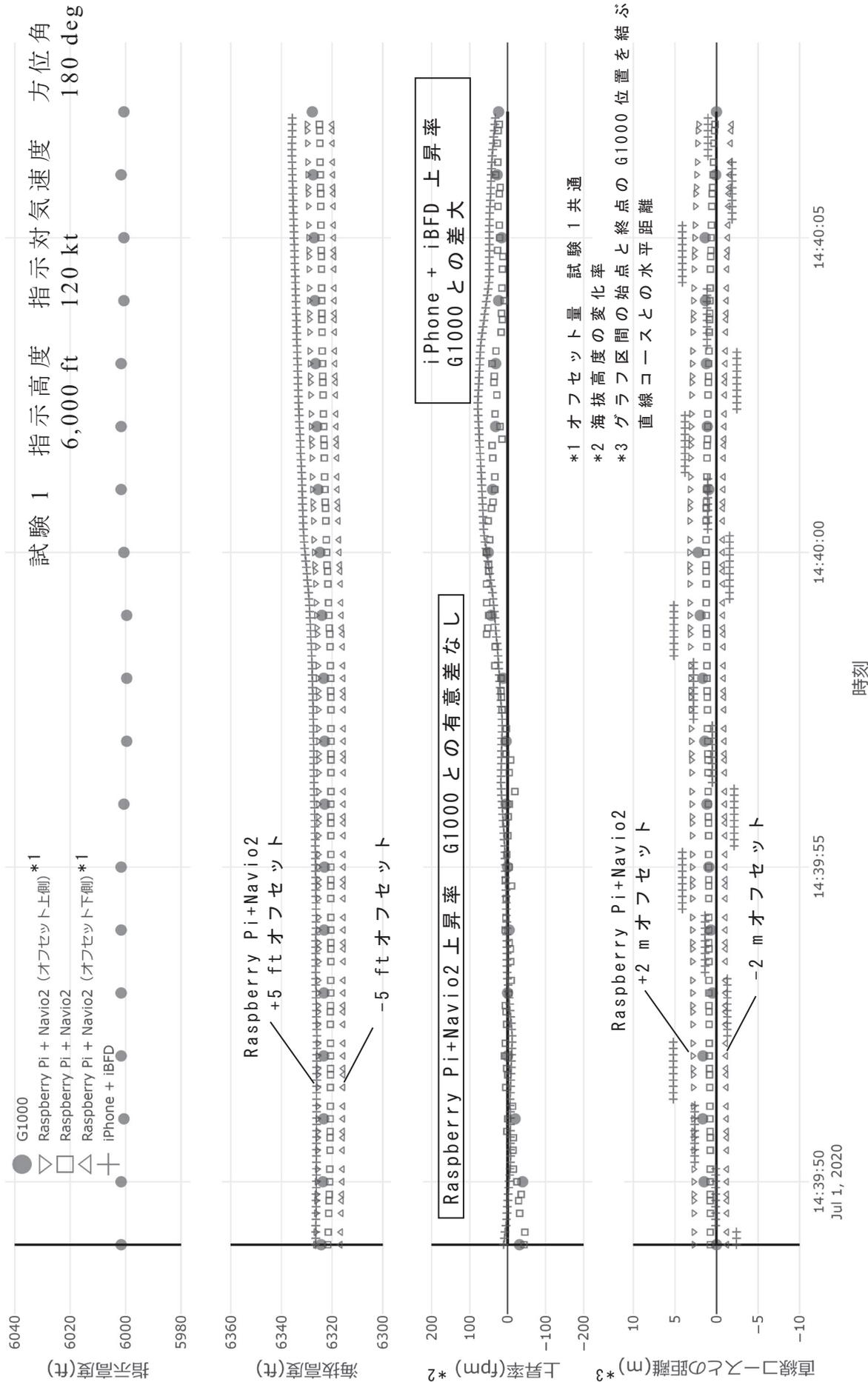


図 12 水平直線飛行時の飛行試験データ (時間履歴)
 指示高度, 海拔高度, 上昇率, 直線コースとの距離

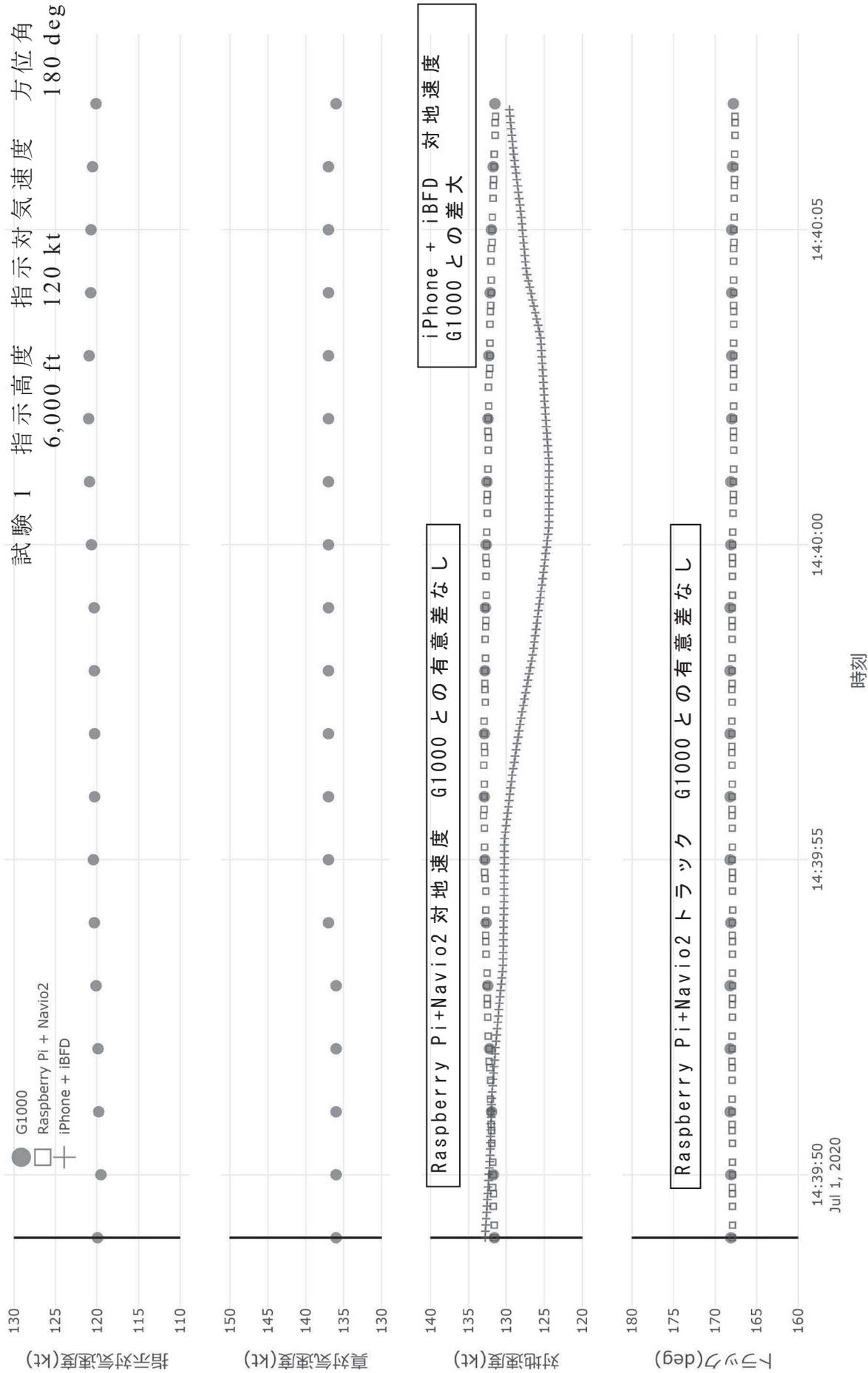


図 13 水平直線飛行時の飛行試験データ (時間履歴)
指示対気速度, 真対気速度, 対地速度, トラック

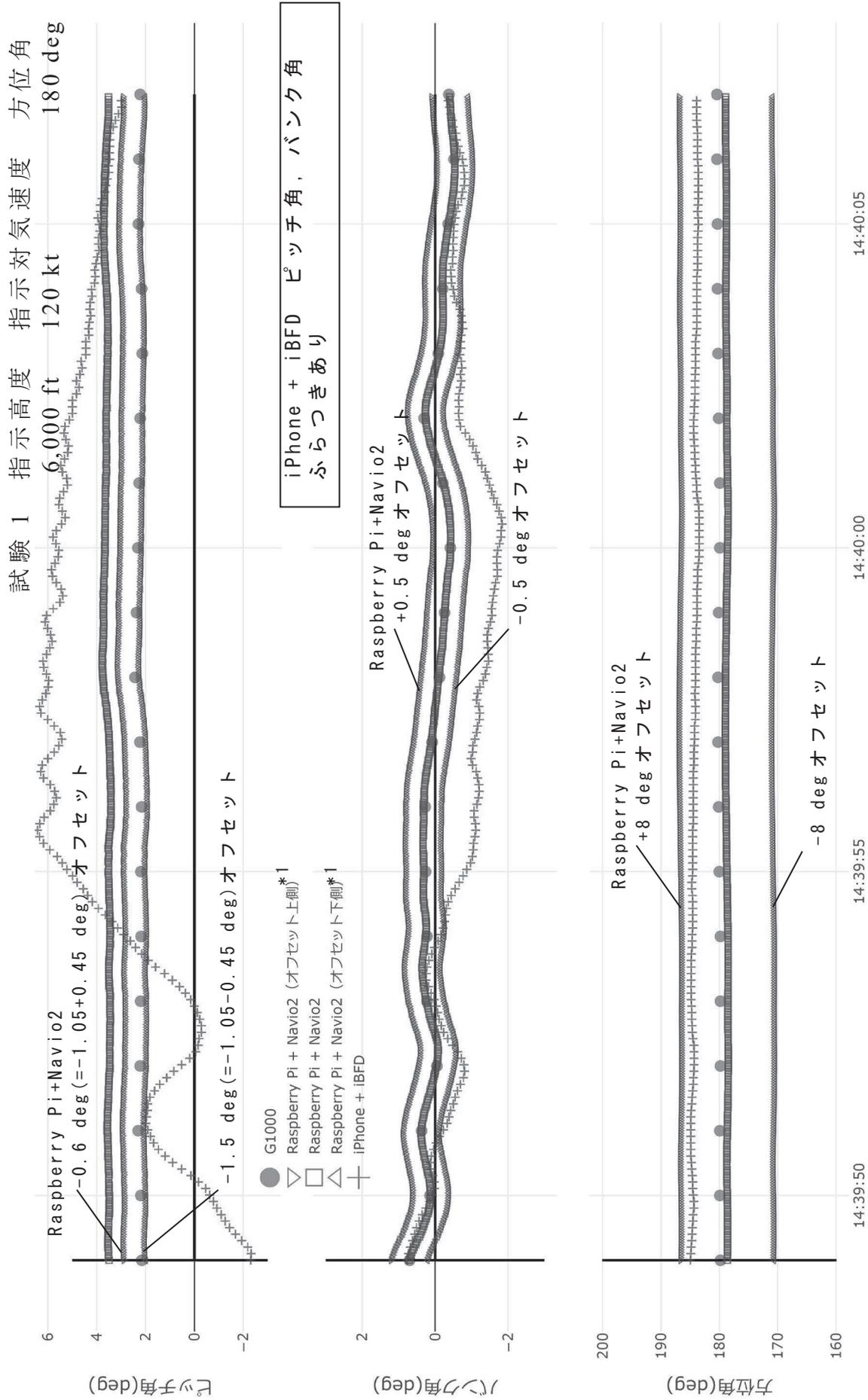


図 14 水平直線飛行時の飛行試験データ (時間履歴) ピッチ角, バンク角, 方位角

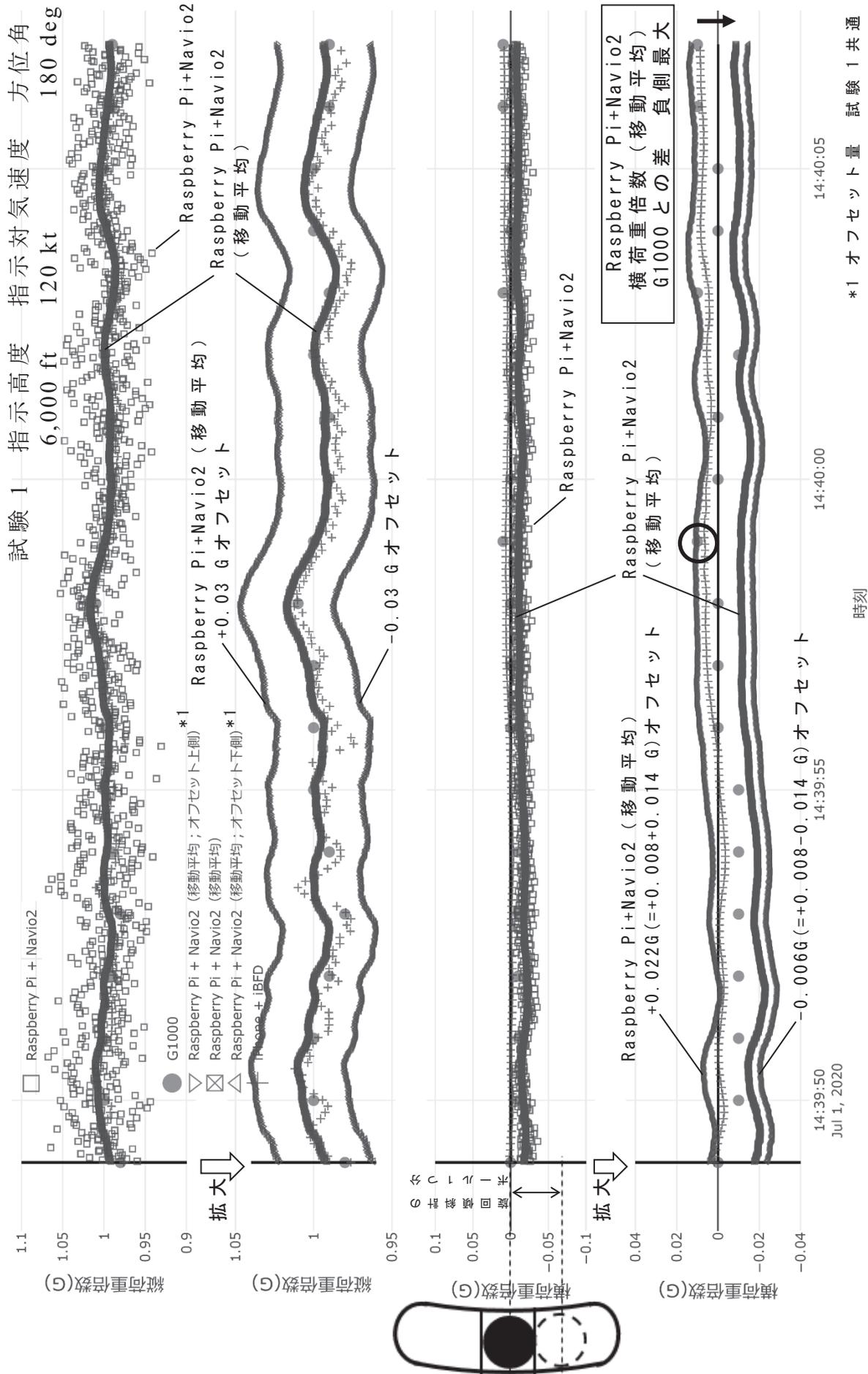


図 15 水平直線飛行時の飛行試験データ (時間履歴) 縦荷重倍数, 横荷重倍数

表 3 水平直線飛行時における Raspberry Pi + Navio 2 計測値と基準値(G1000)との差の最大値

	差の最大値	対応する図
海拔高度	15 ft	図 16
上昇率*1	有意差なし	図 12,16,17
位置*2	5 m	図 17
対地速度	有意差なし	図 13
トラック	有意差なし	図 13
ピッチ角	1 deg (0.65 deg *3 を 0.5 deg 単位で丸め)	図 18 (負側最大) 図 19 (負側最小)
バンク角	0.5 deg	図 20
方位角	8 deg	図 21
縦荷重倍数	0.03 G	図 22
横荷重倍数	0.02 G (0.014G *3 を G1000 最小計測単位 0.01G で丸め)	図 23 (正側最大) 図 15 (負側最大)

*1 昇降計が示す気圧高度の変化率ではなく、海拔高度 (= 真高度) の変化率

*2 各水平直線飛行区間の始点と終点の G1000 位置を結ぶ直線コースとの水平距離

*3 G1000 との差が正側負側均等でなく、機器の配置を異にする試験単位で特定方向側への偏りが見られるため、G1000 との差の幅 (最大値-最小値) の半分を示す。

ピッチ角を例にとると、差の最大値 (図 18 から G1000 より負側へ 2.2 deg) と差の最小値 (図 19 から G1000 より負側へ 0.9 deg) の幅 2.2 deg - 0.9 deg = 1.3 deg の半分の 0.65 deg。

試験 1 と 2 では異なる日に異なる機体に機器を配置しており、配置機器 (図 5~7 参照) と G1000 基準軸との差及び機内の磁場環境等により偏りが生じているものと推測される。

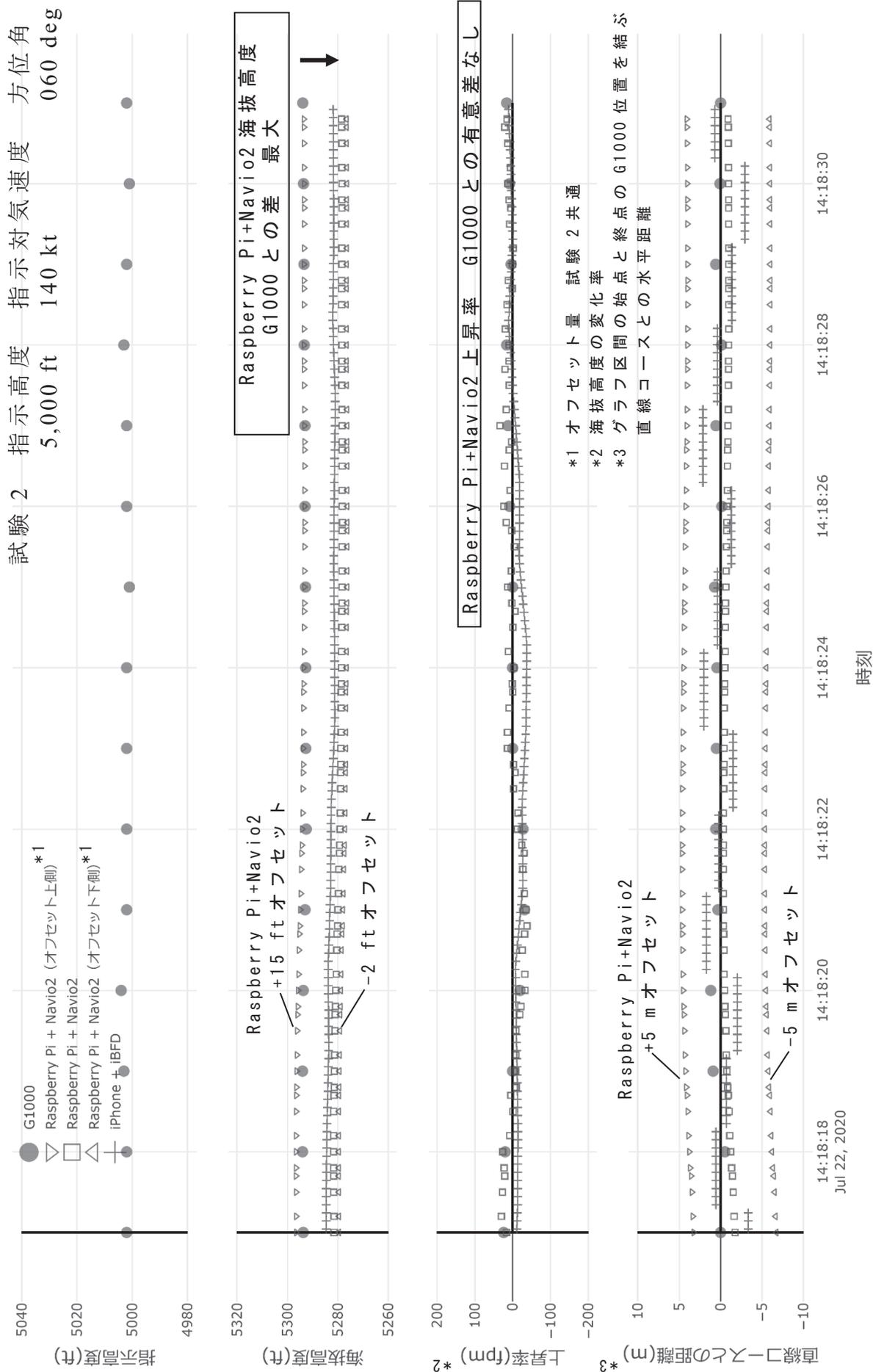


図 16 水平直線飛行時の飛行試験データ (時間履歴) 海拔高度の差最大, 上昇率有意差なし

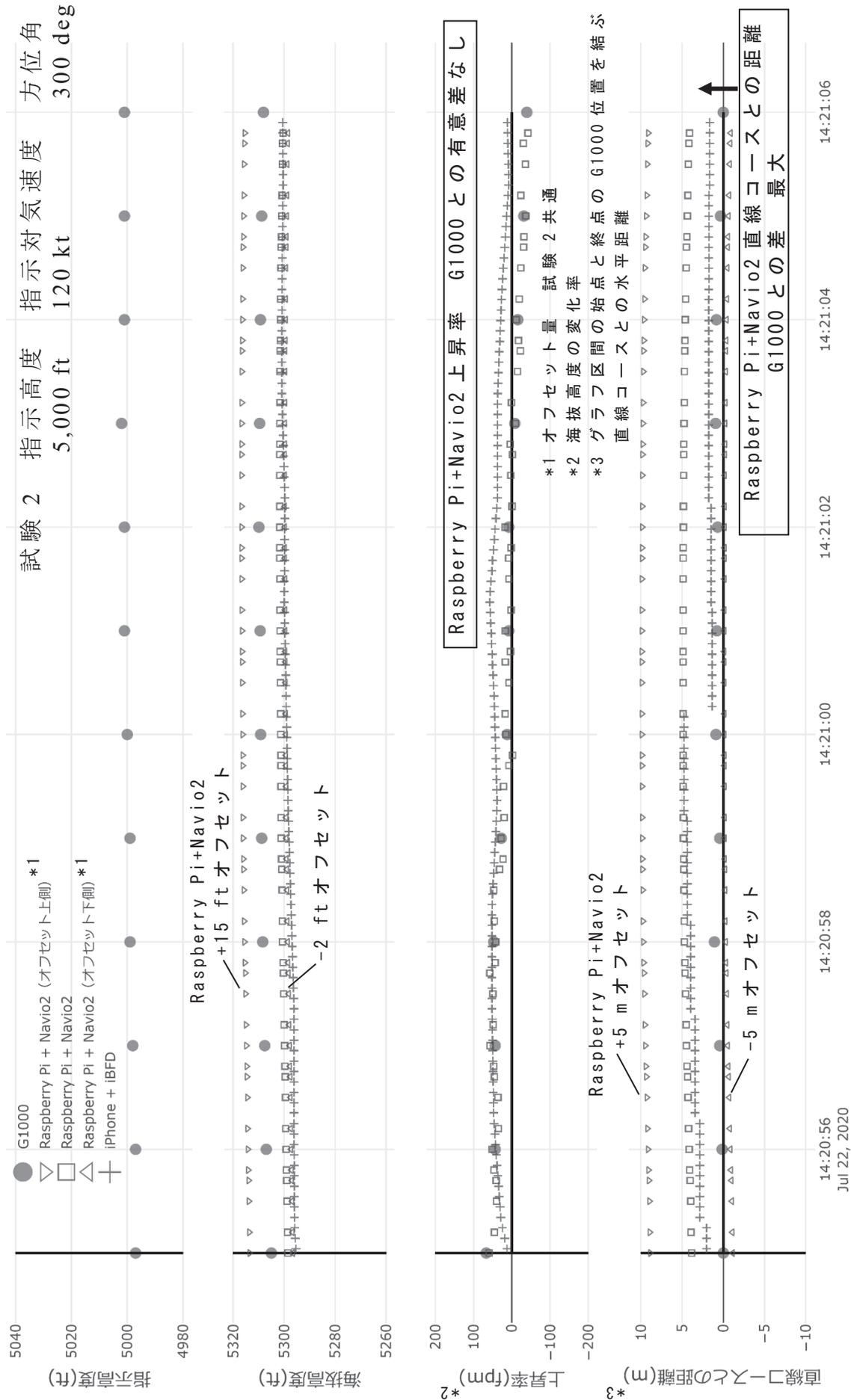


図 17 水平直線飛行時の飛行試験データ (時間履歴)
直線コースとの距離の差最大, 上昇率有意差なし

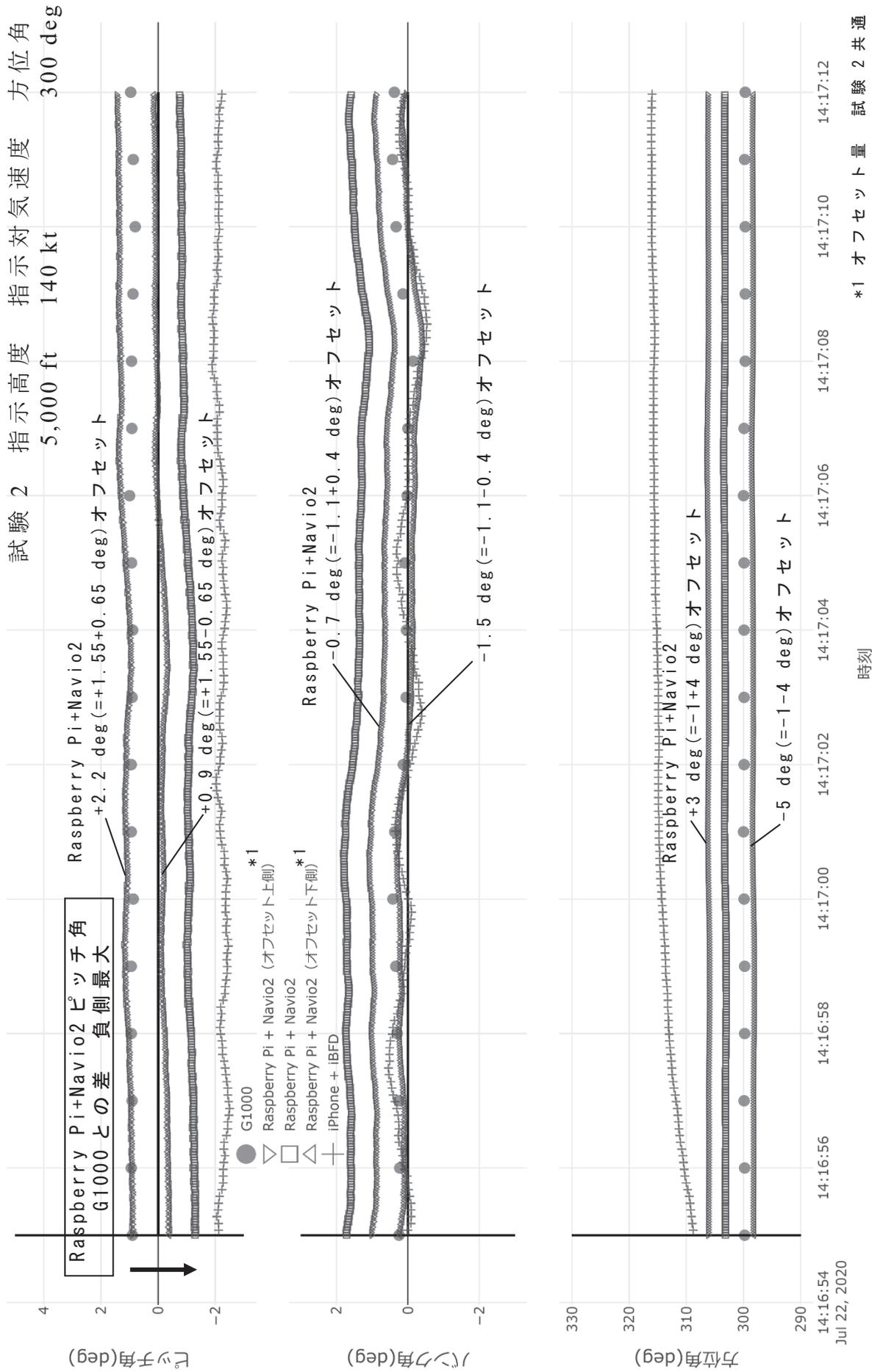


図 18 水平直線飛行時の飛行試験データ (時間履歴) ピッチ角の差 負側最大

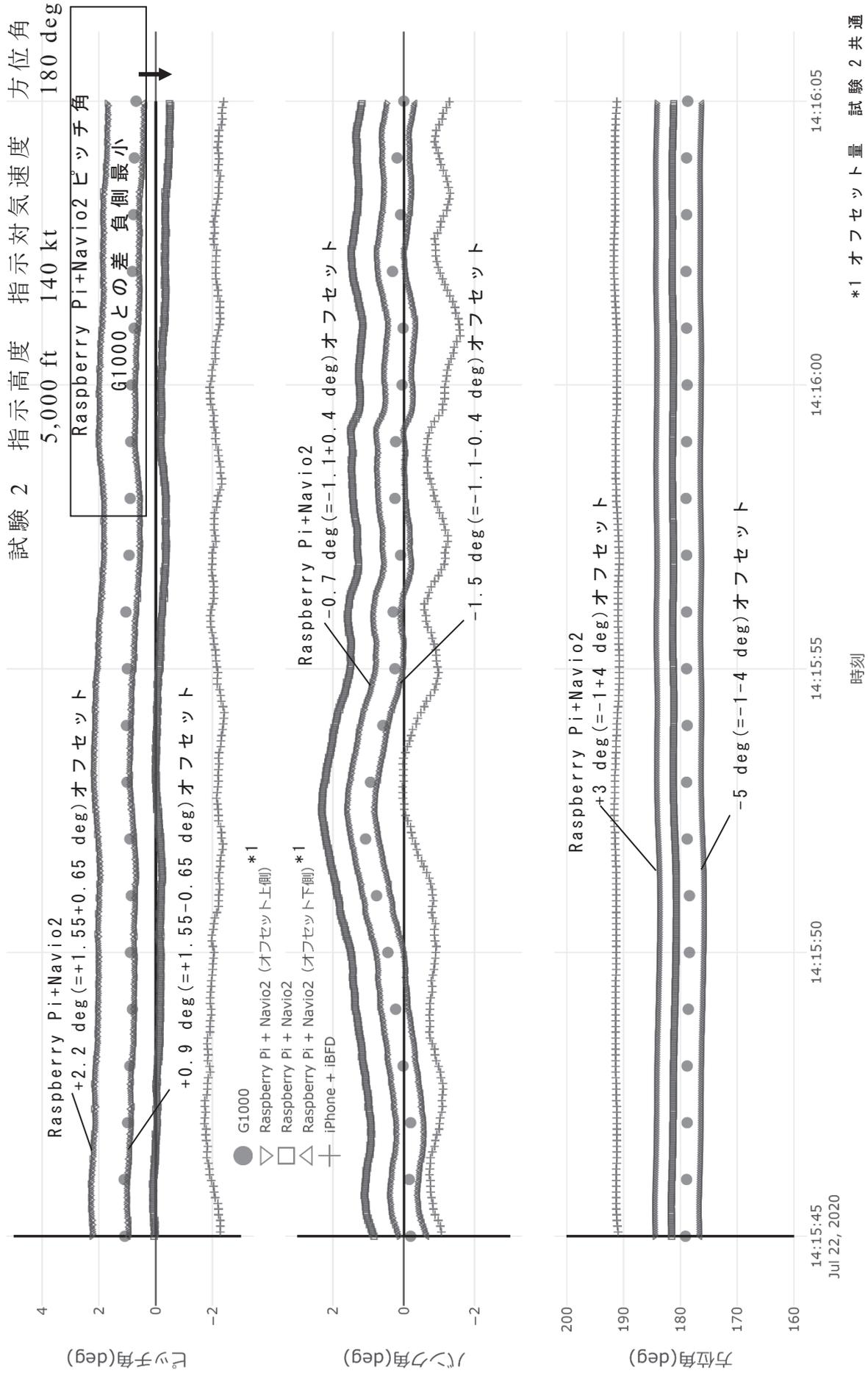


図 19 水平直線飛行時の飛行試験データ (時間履歴) ピッチ角の差 負側最小

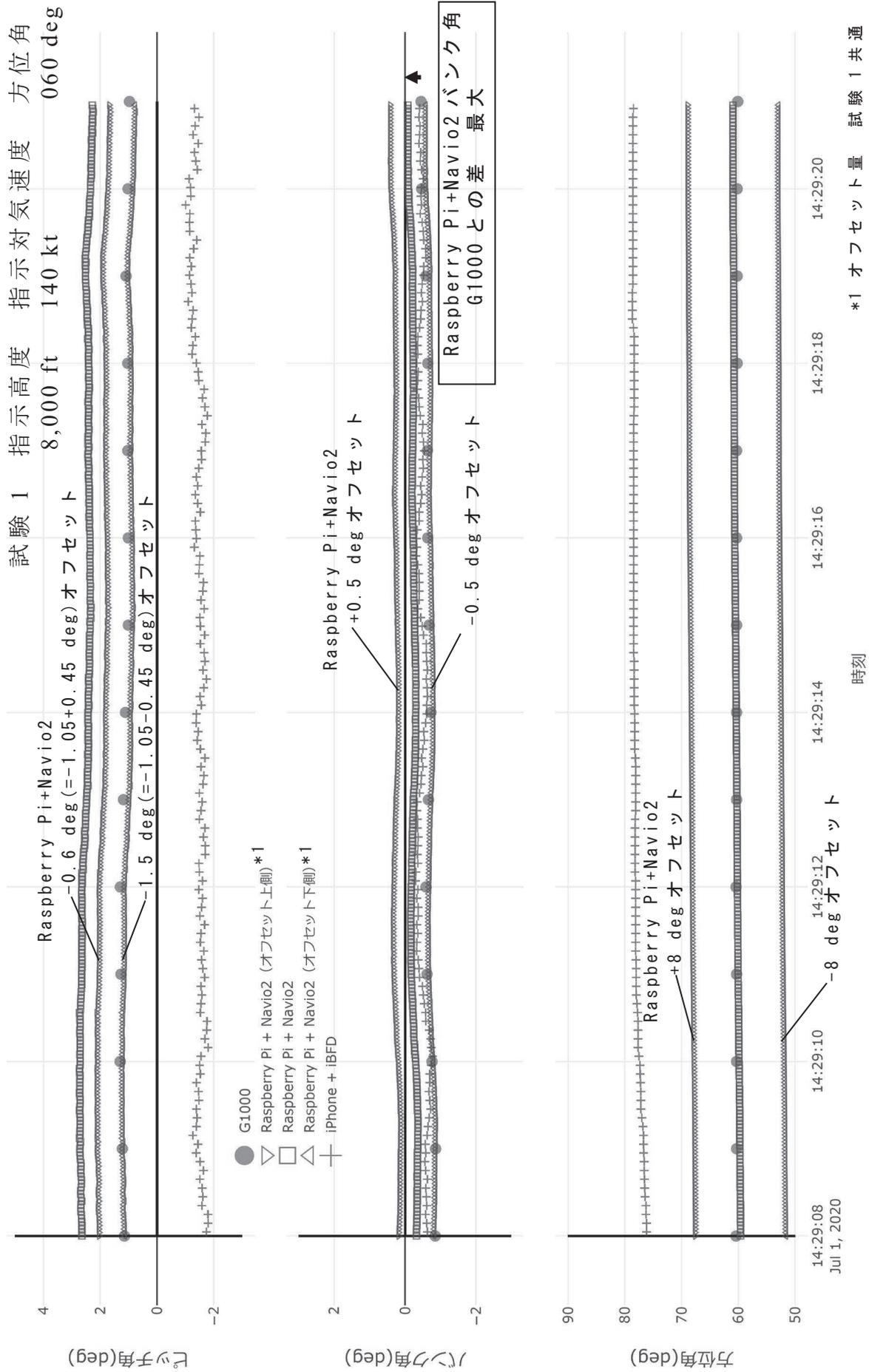


図 20 水平直線飛行時の飛行試験データ (時間履歴) バンク角の差最大

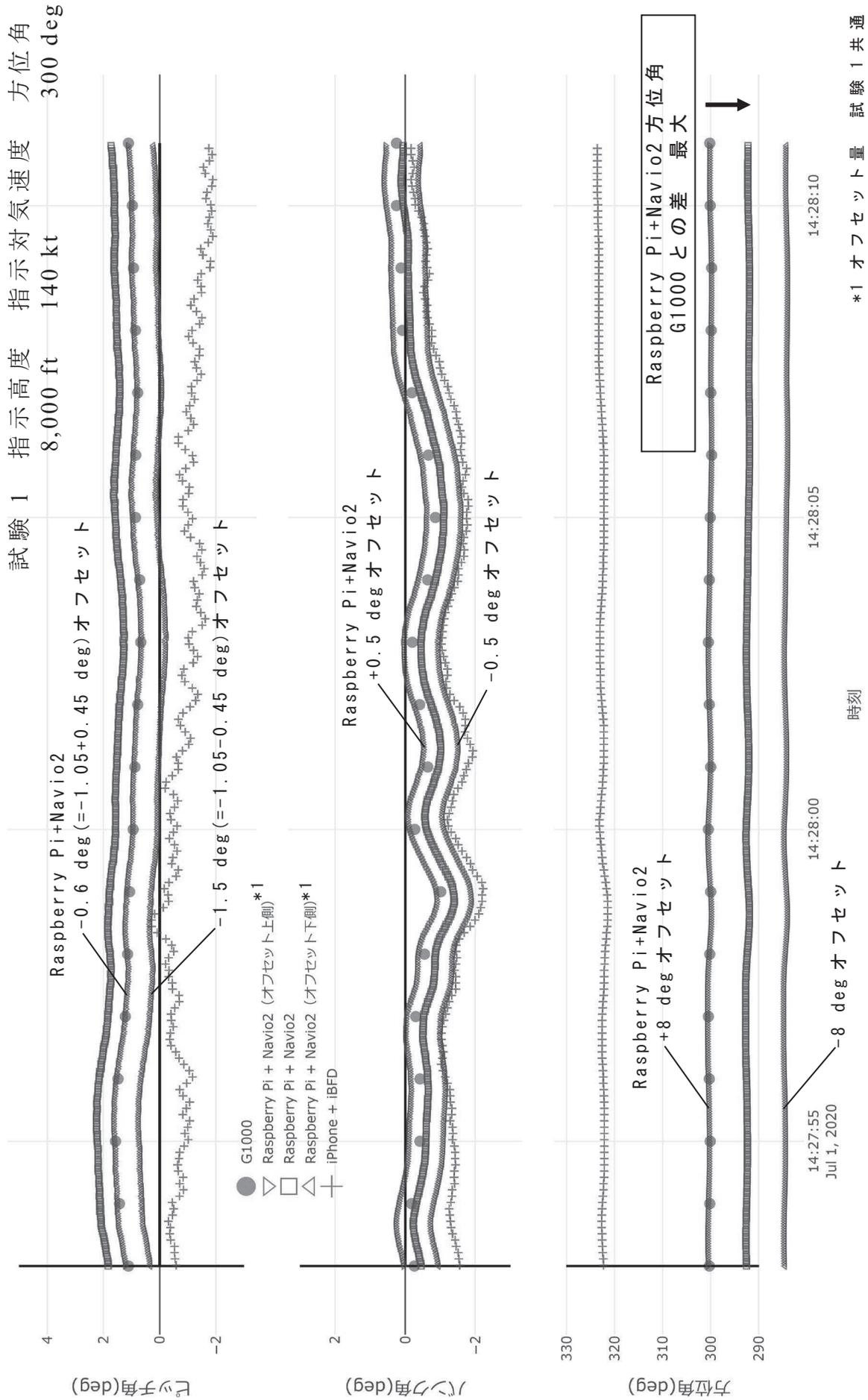


図 21 水平直線飛行時の飛行試験データ (時間履歴) 方位角の差最大

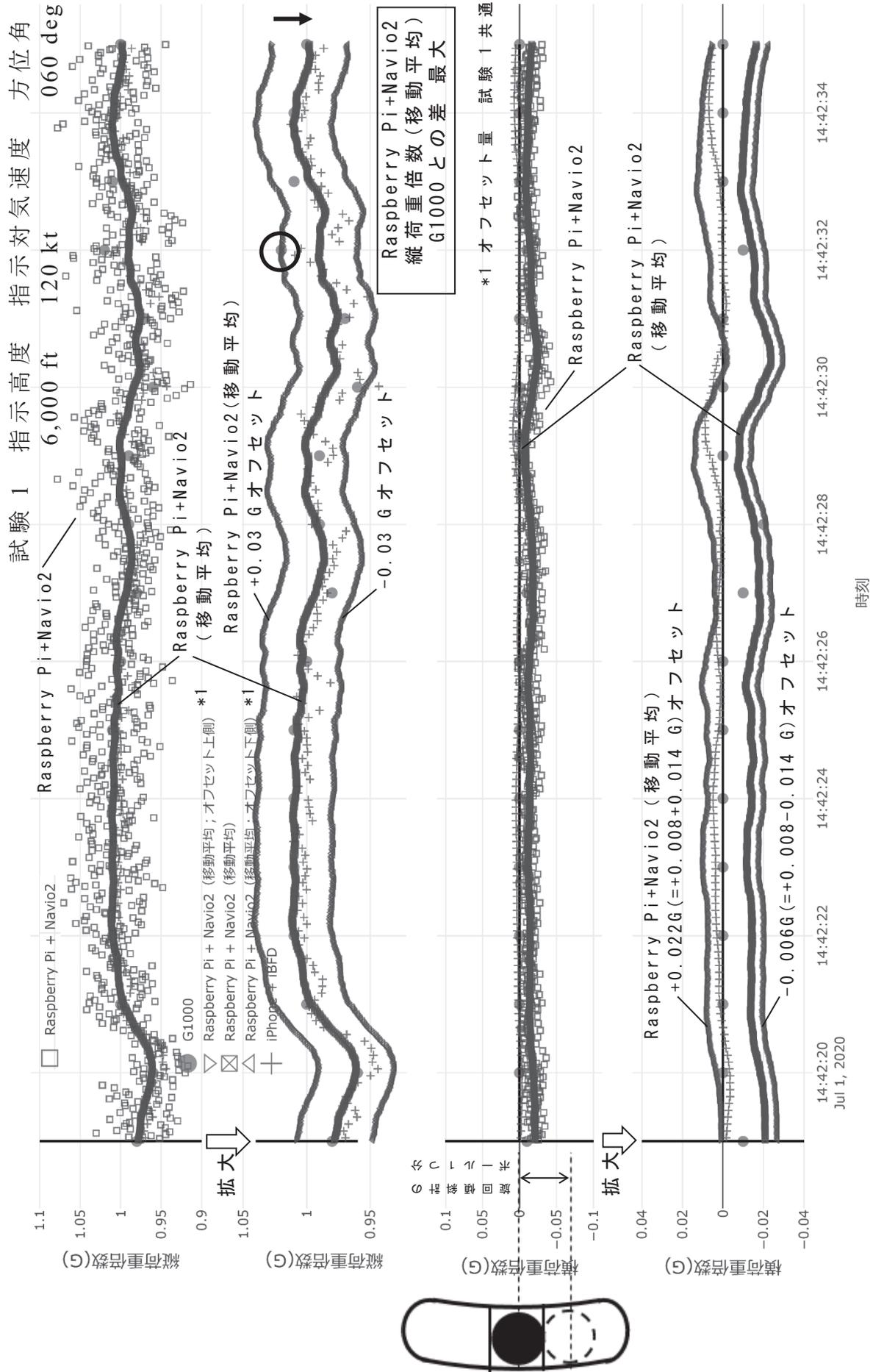


図 22 水平直線飛行時の飛行試験データ (時間履歴) 縦荷重倍数の差最大

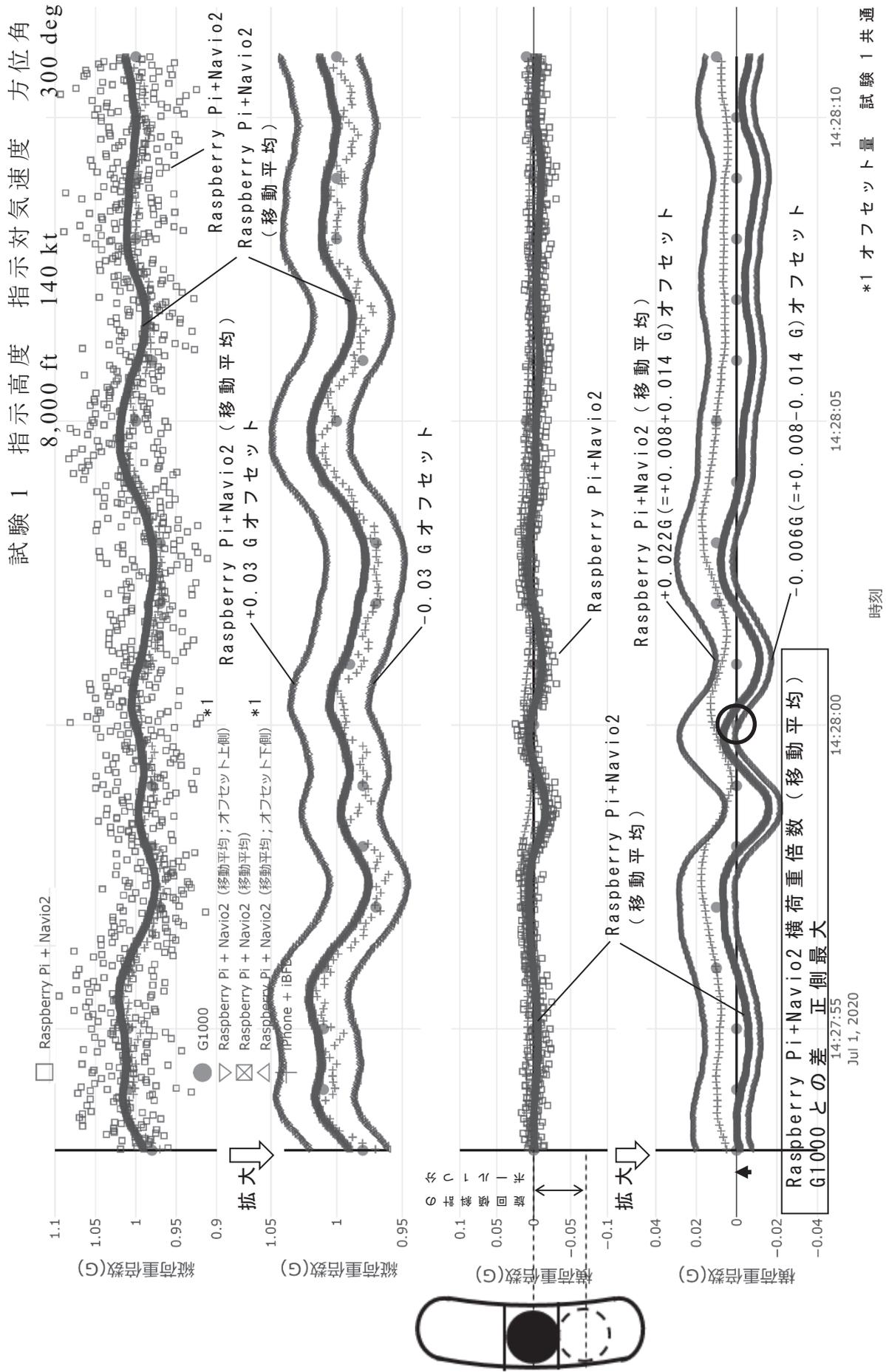


図 23 水平直線飛行時の飛行試験データ (時間履歴) 横荷重倍数の差 正側最大

(2) 非定常運動時の評価

非定常運動として、様々な諸元が大きくかつ継続して変化する運動であるレイジーエイト及び、操縦や風等の擾乱を受けて短時間に大きく諸元が変化する運動であるダッチロールモードについて、**Raspberry Pi + Navio 2** 計測値を評価した。**iPhone + iBFD** については、(1)項の水平直線飛行時の評価にて操縦訓練の評価や振り返りの用途には適していないことを確認したため、非定常運動時の評価は行わない。なお、**iPhone + iBFD** 方位角に時折跳躍がみられたが、これはソフトウェア処理に起因する無効データであり、その後のアップデートにて修正されている。

レイジーエイト開始から終了までの時間履歴を図 24~28 に、その一部の拡大を図 29~33 に示す。図には、水平直線飛行時に確認した差と比較できるように、**Raspberry Pi + Navio 2** の計測値に加え、(1)項の水平直線飛行時の図と同じ量だけ上下にオフセットさせたものを併せて示してある。上昇率、対地速度、トラックに若干の時刻の進みが、直線コースとの距離、バンク角に水平直線飛行時に確認した差を若干逸脱する差が見られるものの、運動全体を通して諸元の変化の傾向をよく捉えていることが確認できた。

ダッチロールモードの時間履歴を図 34,35 に示す。前図と同様、水平直線飛行時の図と同じ量だけ上下にオフセットさせたものを併せて示してある。5~50Hz と高いデータ取得レートの **Raspberry Pi + Navio 2** 計測値は、姿勢角（ピッチ角、バンク角、方位角）、荷重倍数に現れているような、データ取得レート 1 Hz の **G1000** 計測値では捉えられない過渡的な運動を良く捉えることができている。一方、このような変化の速い運動では、移動平均をとった荷重倍数はピークを捉えきれないため、場合によっては **G1000** との差が大きくなることが確認できた。したがって、(1)項で述べたように、ゆっくりした運動時の評価には移動平均値を、変化の激しい運動や不具合等の分析には生データ等と、使い分けをするとよいと考える。

なお、3章全体を通して、各機器の時刻は、諸元変化が特徴的なダッチロールモード時のバンク角を基準に **G1000** 計測データに対し補正してある。各機器の時刻補正データ図 36 に示す。

以上から、**iPhone + iBFD** は操縦訓練での使用には適していないが、**Raspberry Pi + Navio 2** はタスクに応じ誤差幅を踏まえた評価をすることにより、操縦訓練に使用できるものと考えられる。

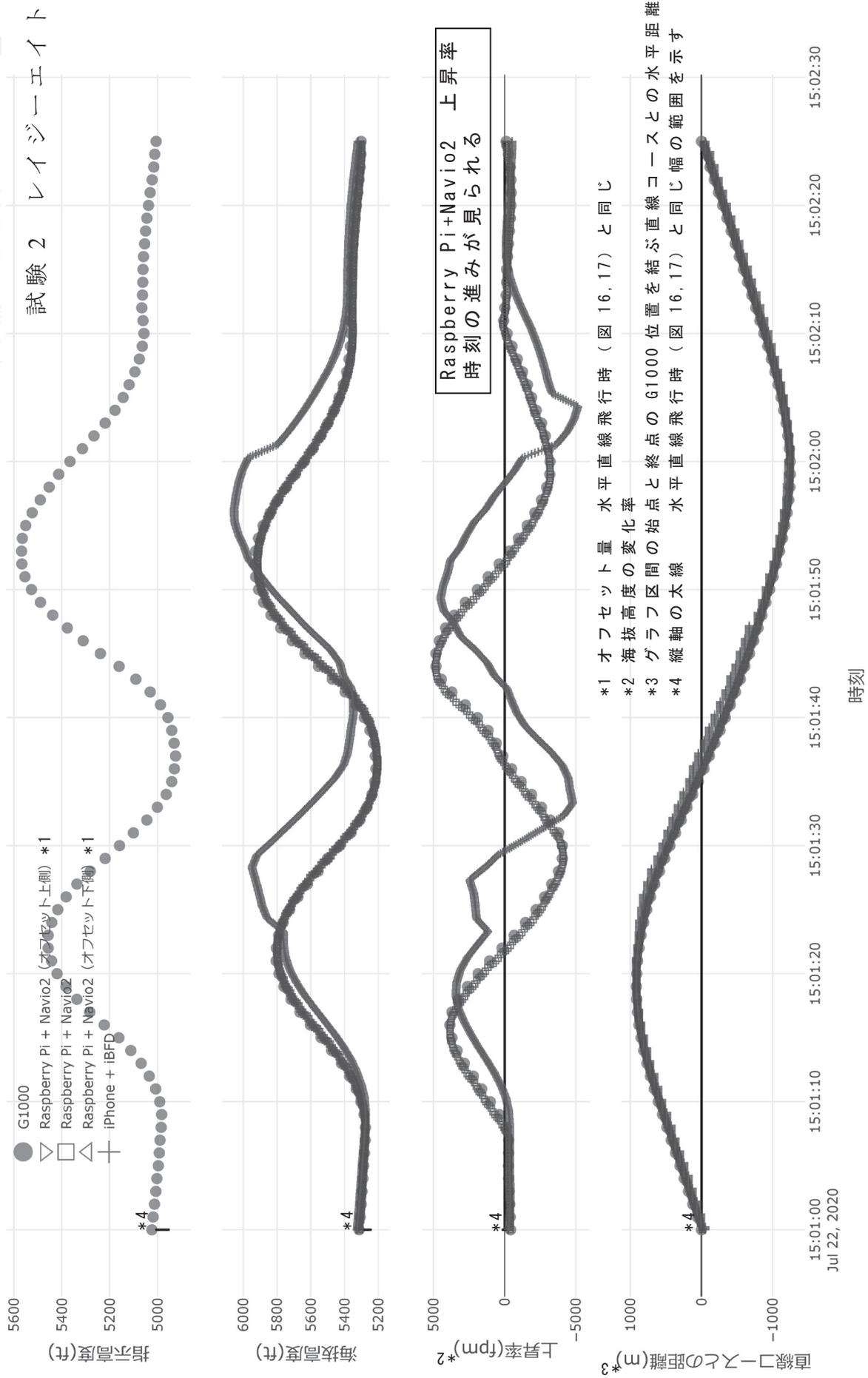


図 24 非定常運動時の飛行試験データ (時間履歴) 上昇率の時刻の進み

試験 1 レイジーエイト

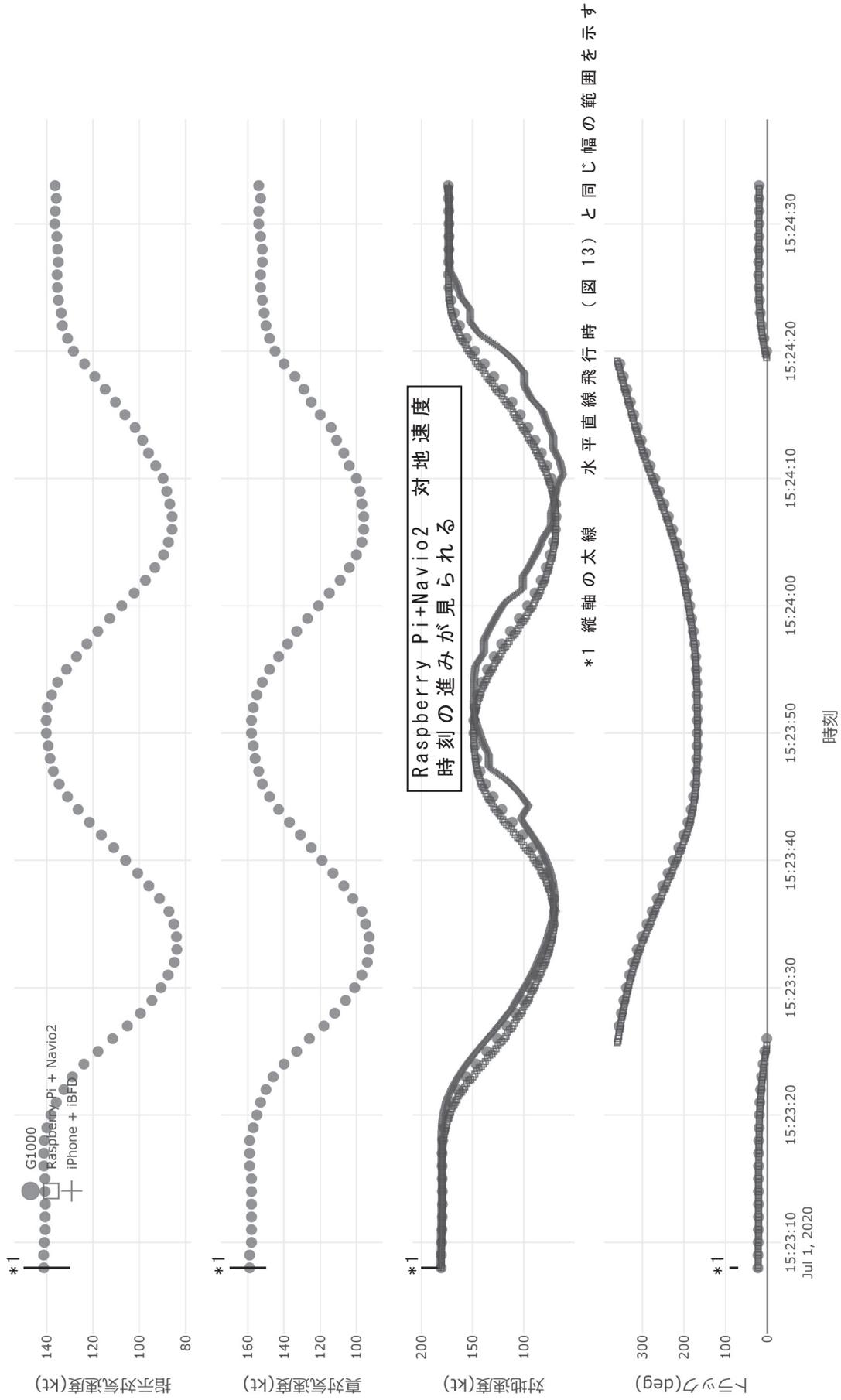


図 25 非常運動時の飛行試験データ (時間履歴) 対地速度の時刻の進み

試験 2 レイジージェイト

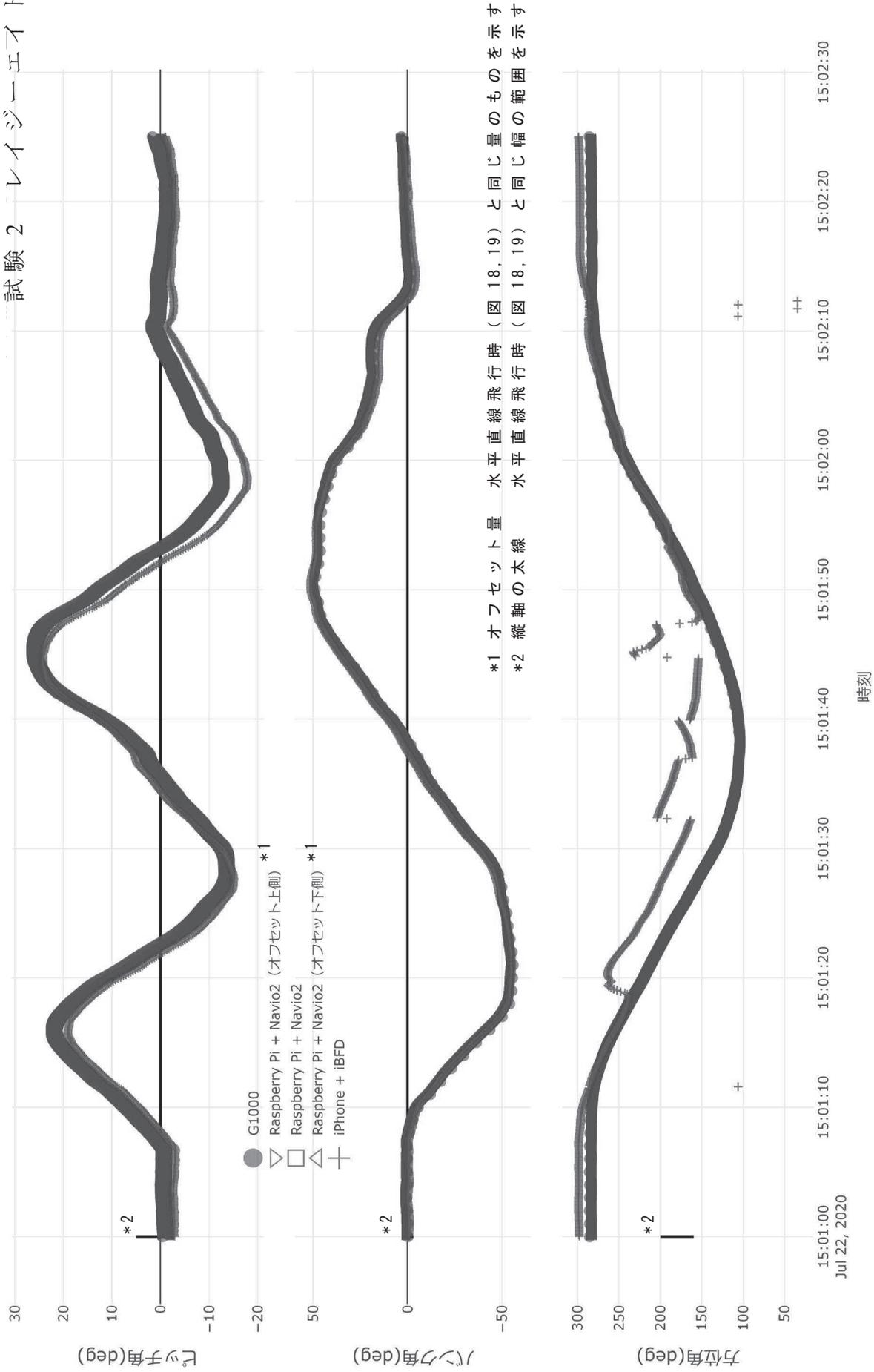


図 26 非定常運動時の飛行試験データ (時間履歴) ピッチ角

試験 1 レイジエイト

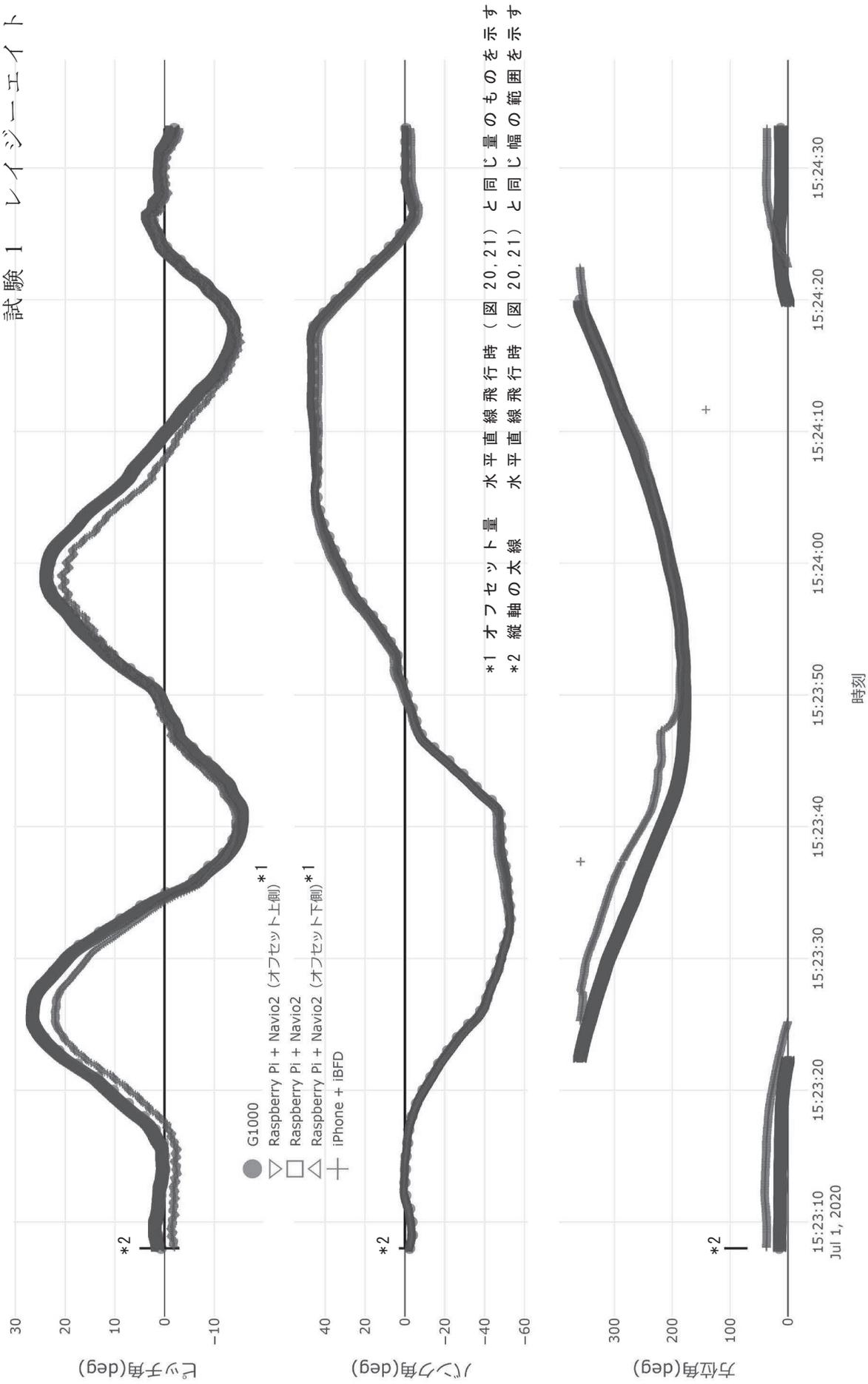


図 27 非定常運動時の飛行試験データ (時間履歴) バンク角, 方位角

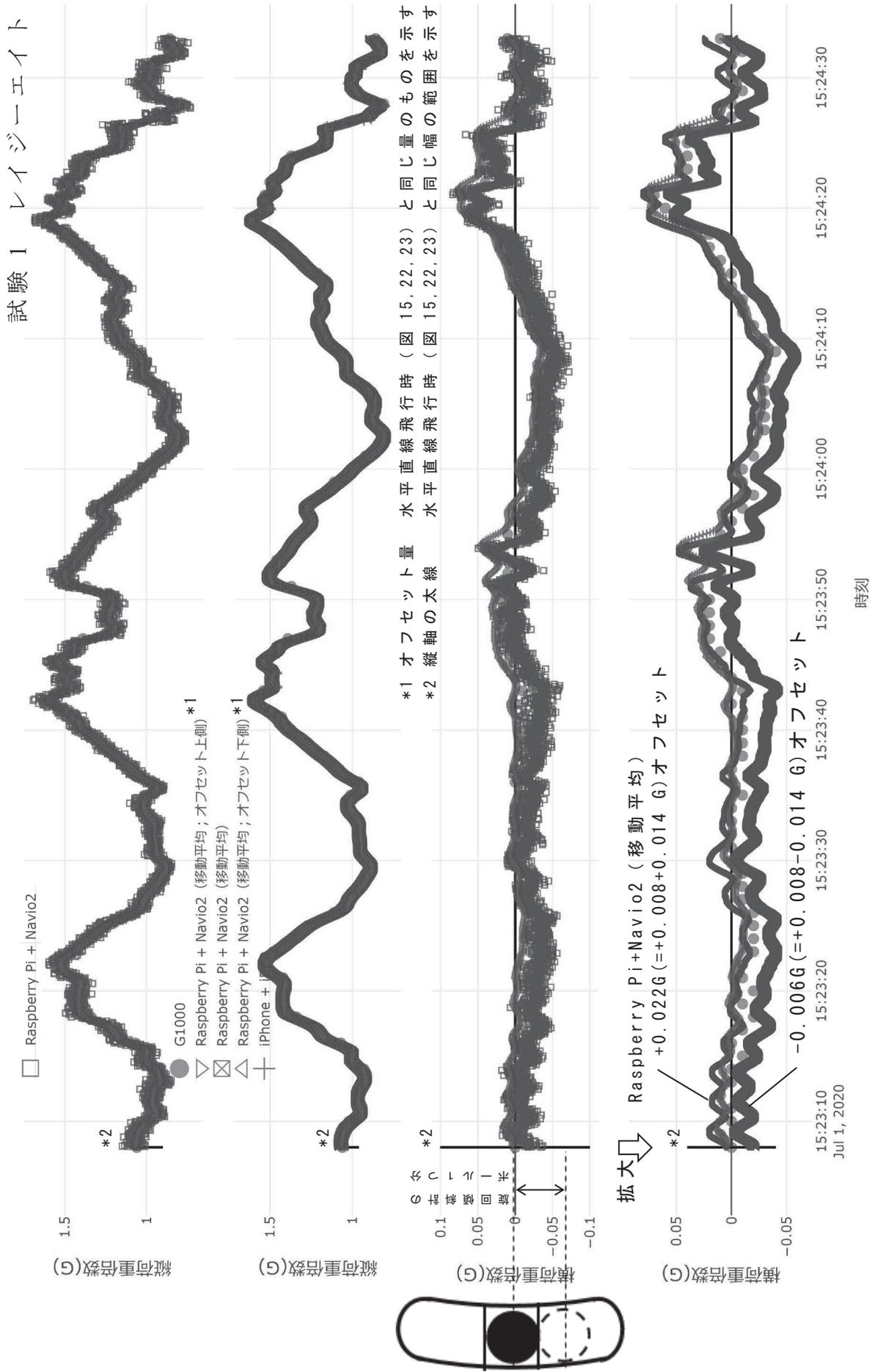


図 28 非定常運動時の飛行試験データ (時間履歴) 荷重倍数

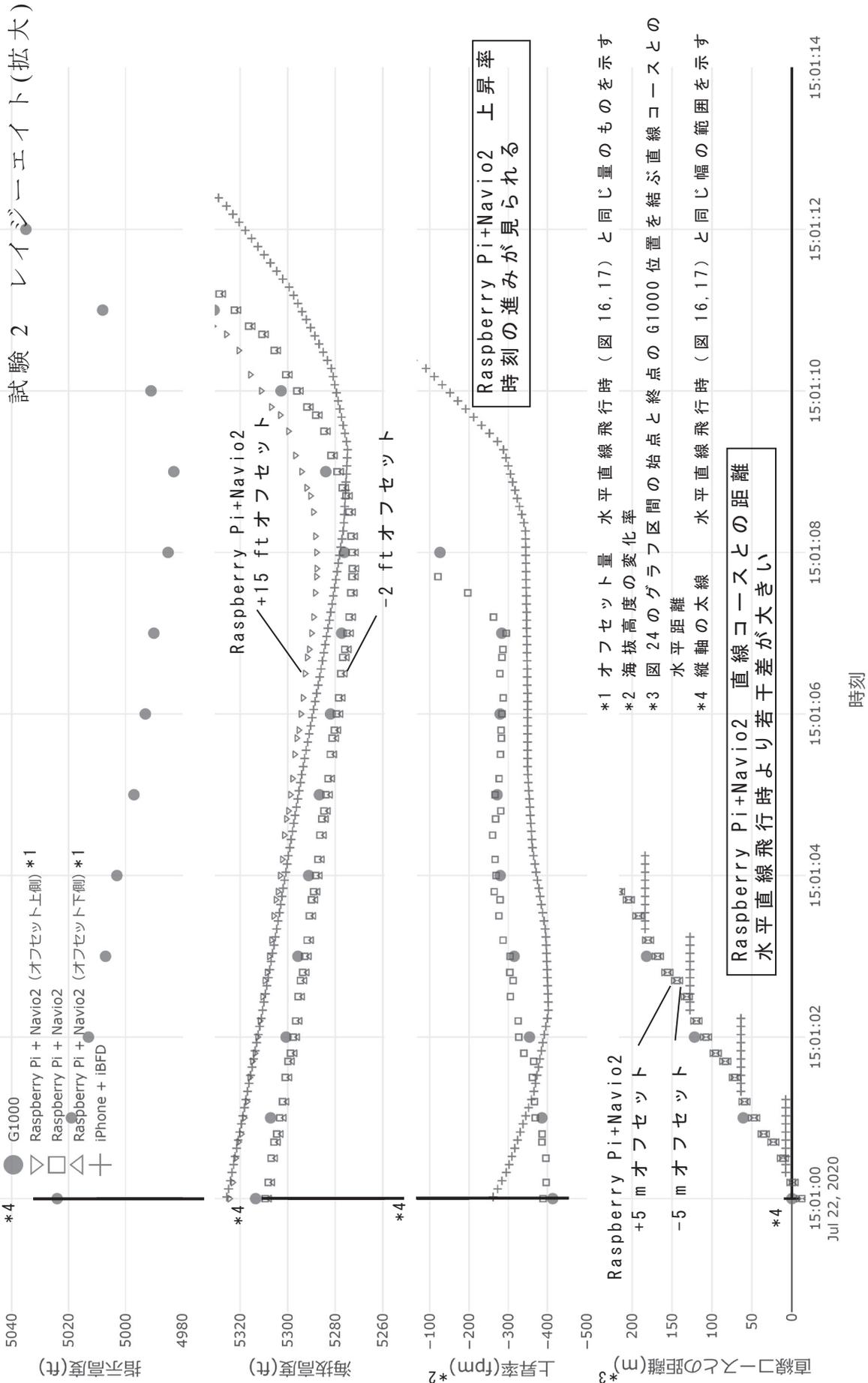


図 29 非常運動時の飛行試験データ (時間履歴)
 上昇率の時刻の進み, 直線コースとの距離の差

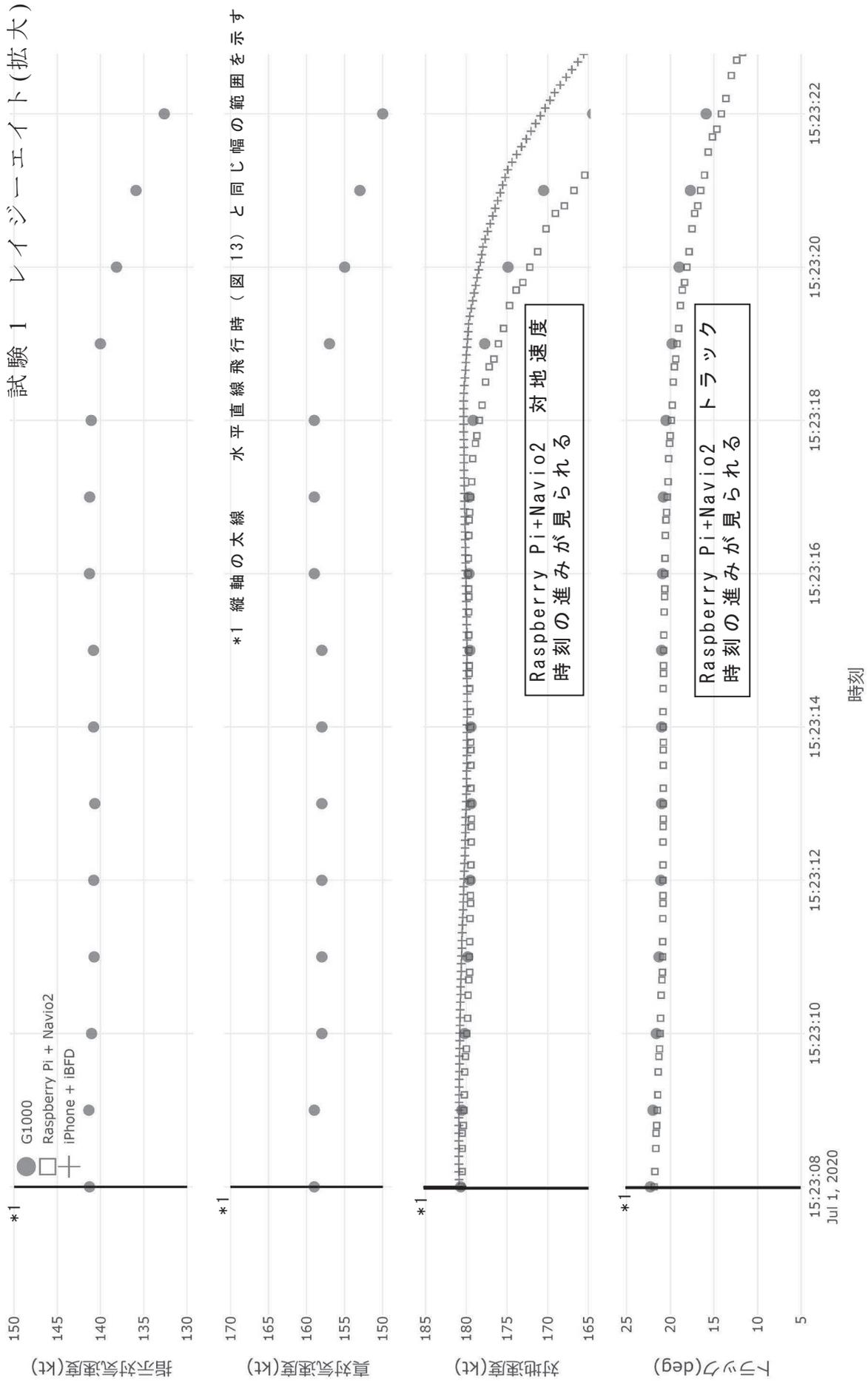


図 30 非定常運動時の飛行試験データ(時間履歴) 対地速度の進み, トラックの時刻の進み

試験 2 レイジーエイト(拡大)

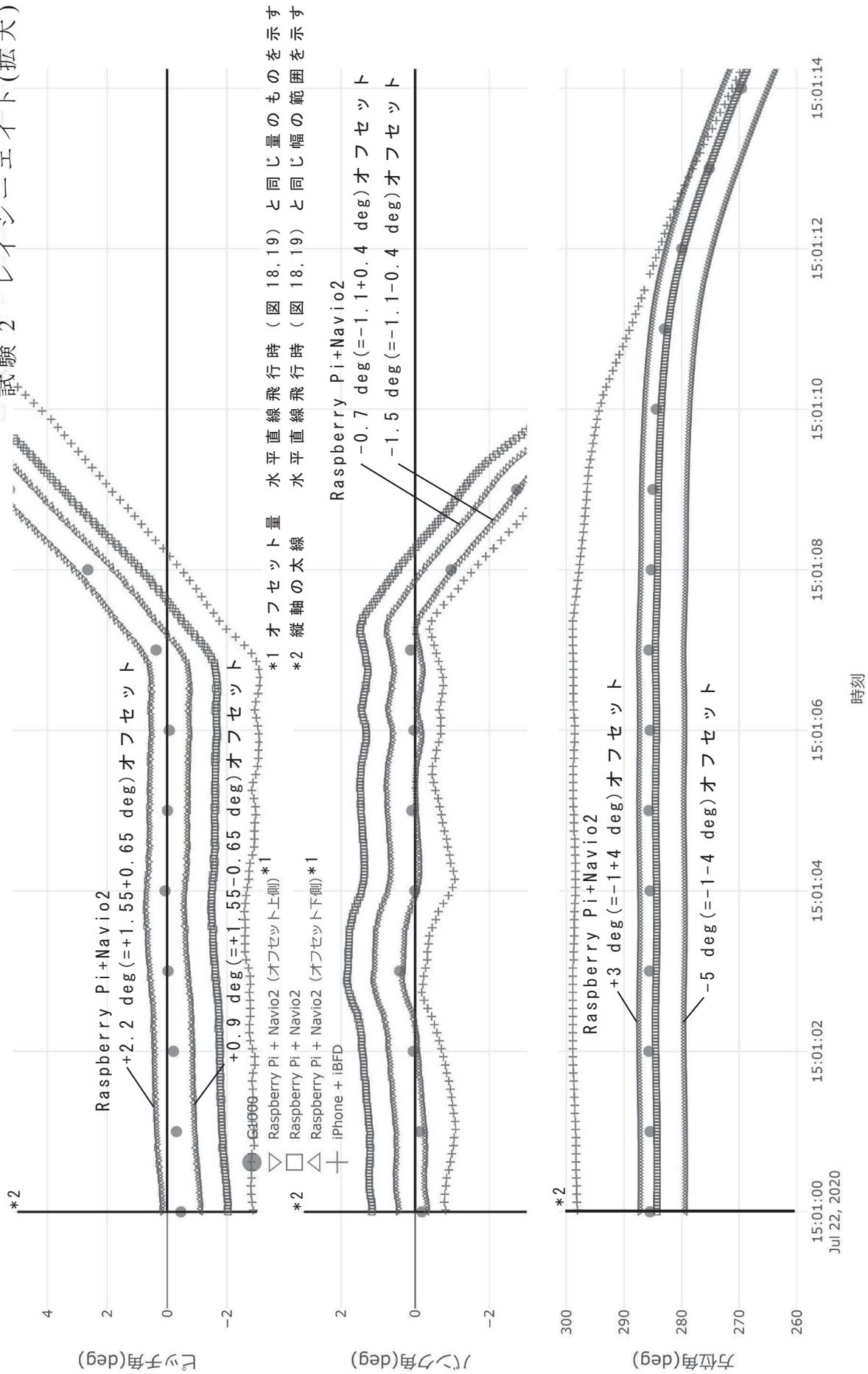


図 31 非定常運動時の飛行試験データ (時間履歴) ピッチ角の差

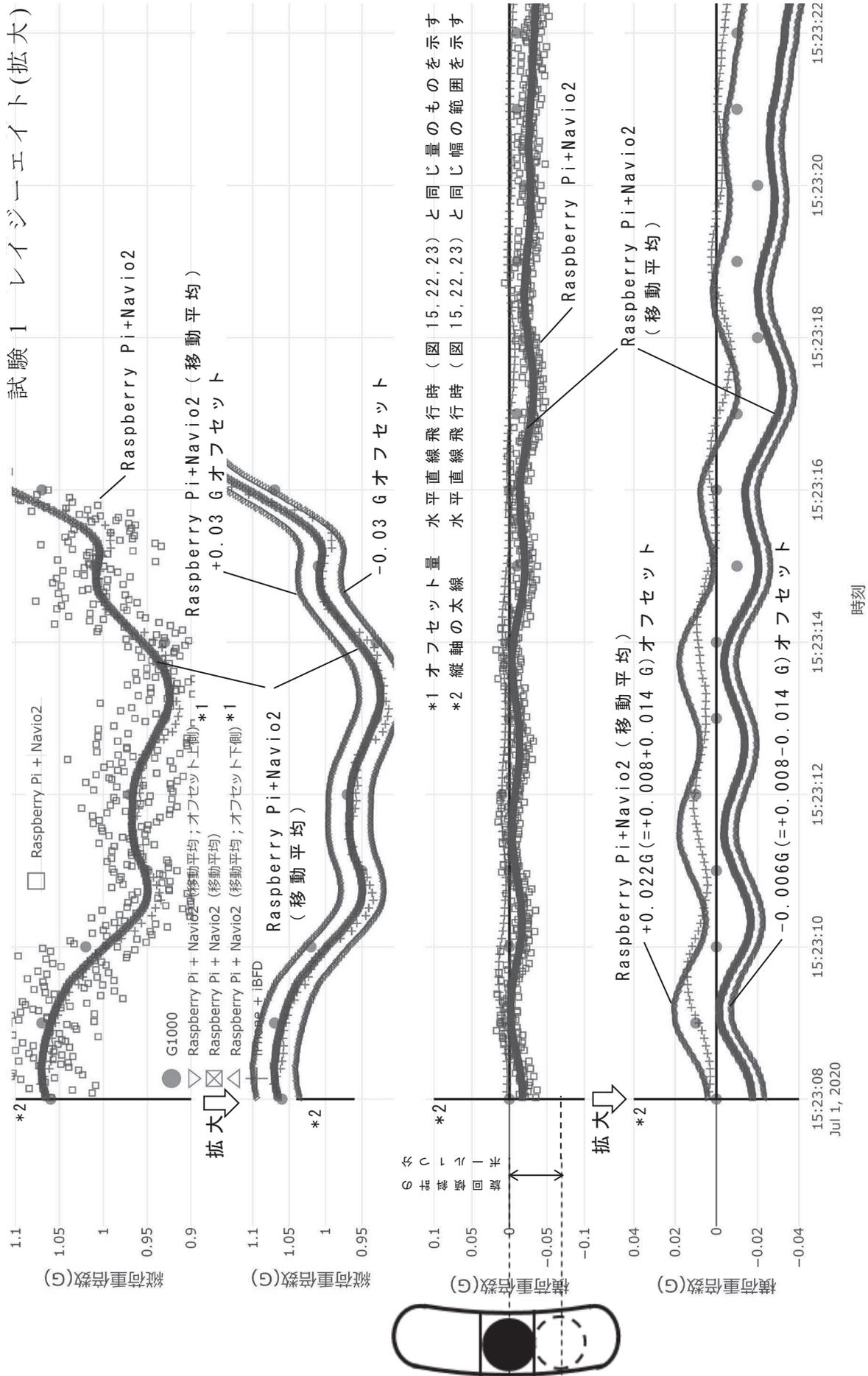
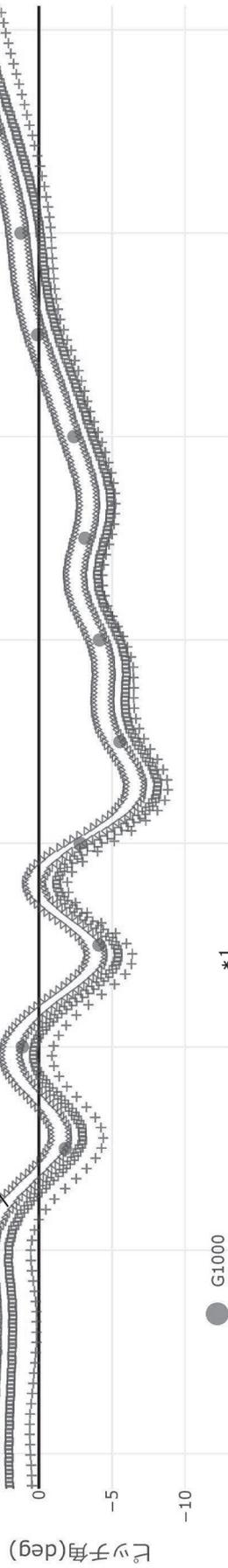


図 33 非定常運動時の飛行試験データ (時間履歴) 荷重倍数の差

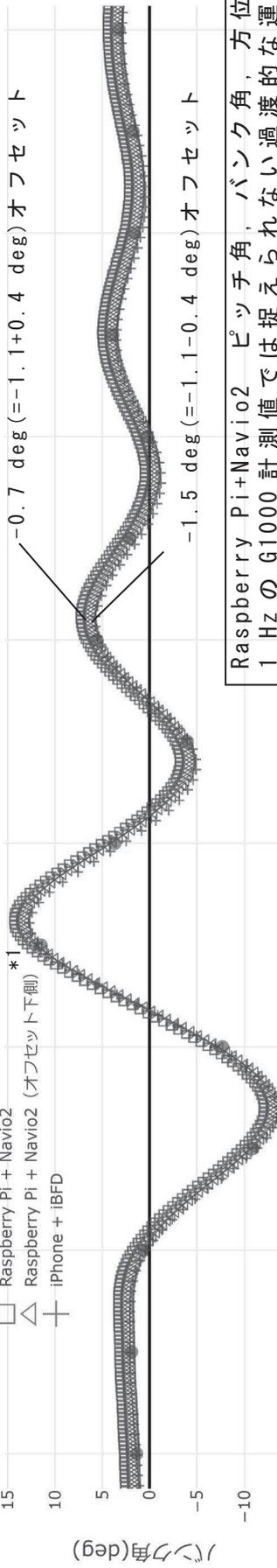
試験 2 ダッチロールモード

Raspberry Pi+Navio2
+2.2 deg(=+1.55+0.65 deg)オフセット
+0.9 deg(=+1.55-0.65 deg)オフセット



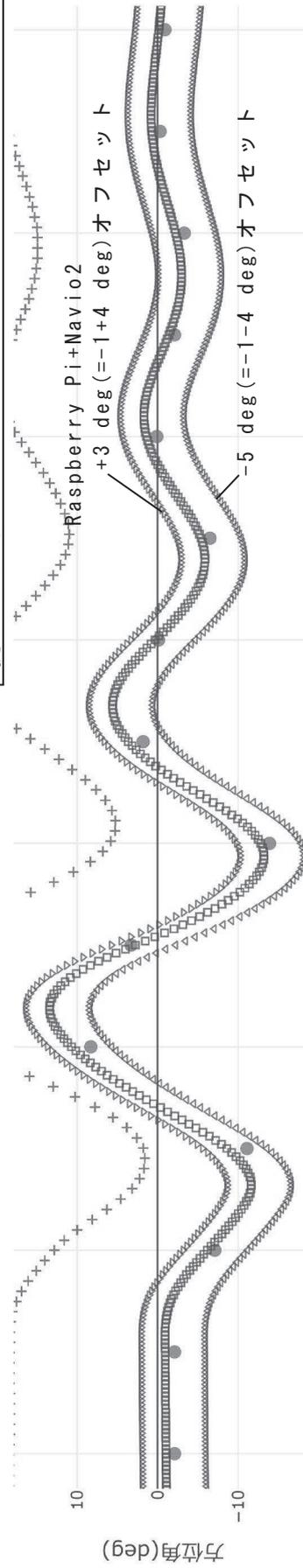
- G1000
- ▽ Raspberry Pi + Navio2 (オフセット上側) *1
- Raspberry Pi + Navio2
- △ Raspberry Pi + Navio2 (オフセット下側) *1
- + iPhone + iBFD

Raspberry Pi+Navio2
-0.7 deg(=-1.1+0.4 deg)オフセット



-1.5 deg(=-1.1-0.4 deg)オフセット

Raspberry Pi+Navio2 ピッチ角, バンク角, 方位角
1 Hz の G1000 計測値では捉えられない過渡的な運動を
捉えている



Raspberry Pi+Navio2
+3 deg(=-1+4 deg)オフセット

-5 deg(=-1-4 deg)オフセット

15:19:34
Jul 22, 2020

時刻

15:19:44 15:19:46 15:19:48

*1 オフセット量 水平直線飛行時 (図 18, 19) と同じ量のものを示す

図 34 非定常運動時の飛行試験データ (時間履歴) 姿勢角の過渡的な運動

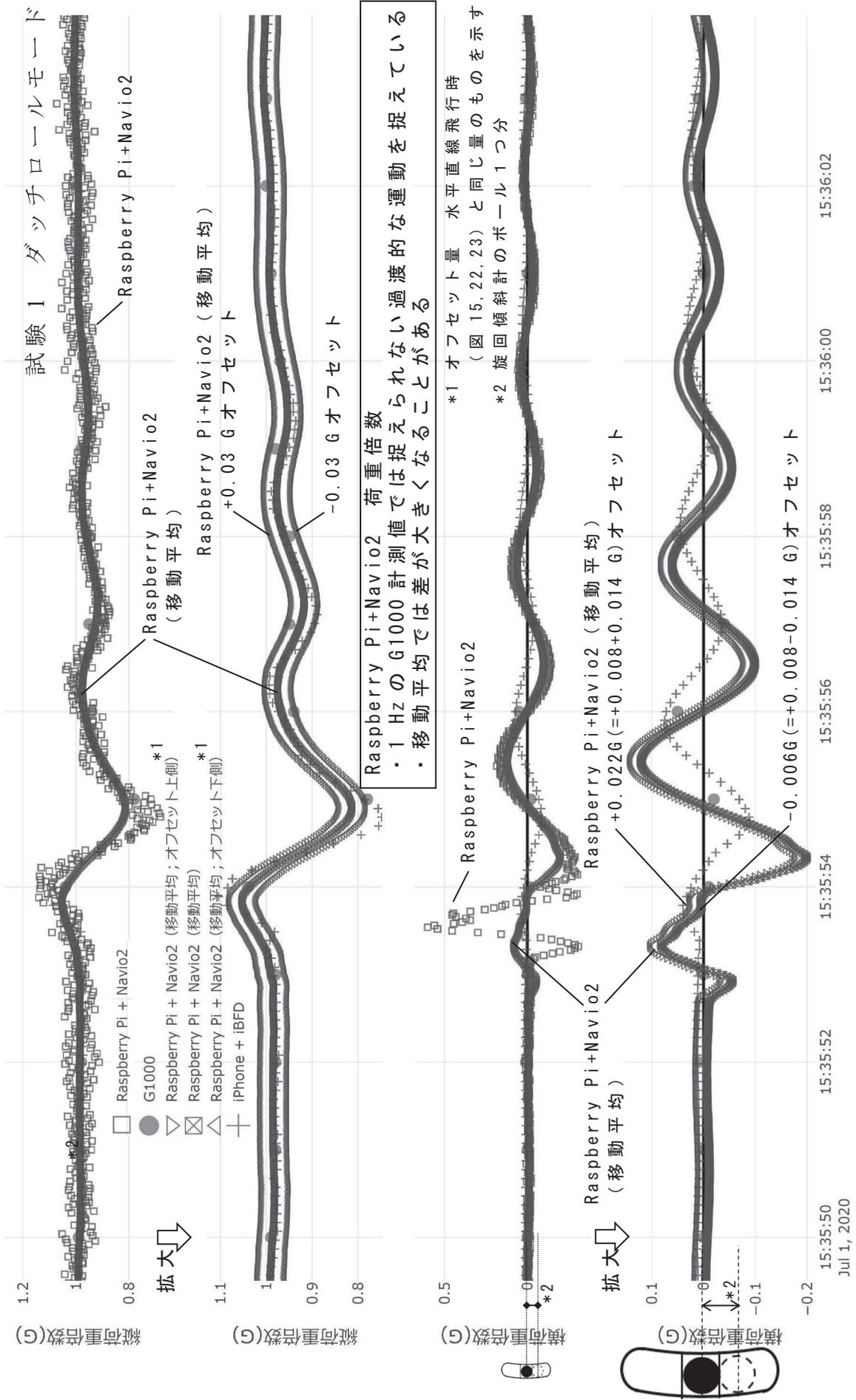


図 35 非定常運動時の飛行試験データ (時間履歴) 荷重倍数の過渡的な運動, 荷重倍数の移動平均の差

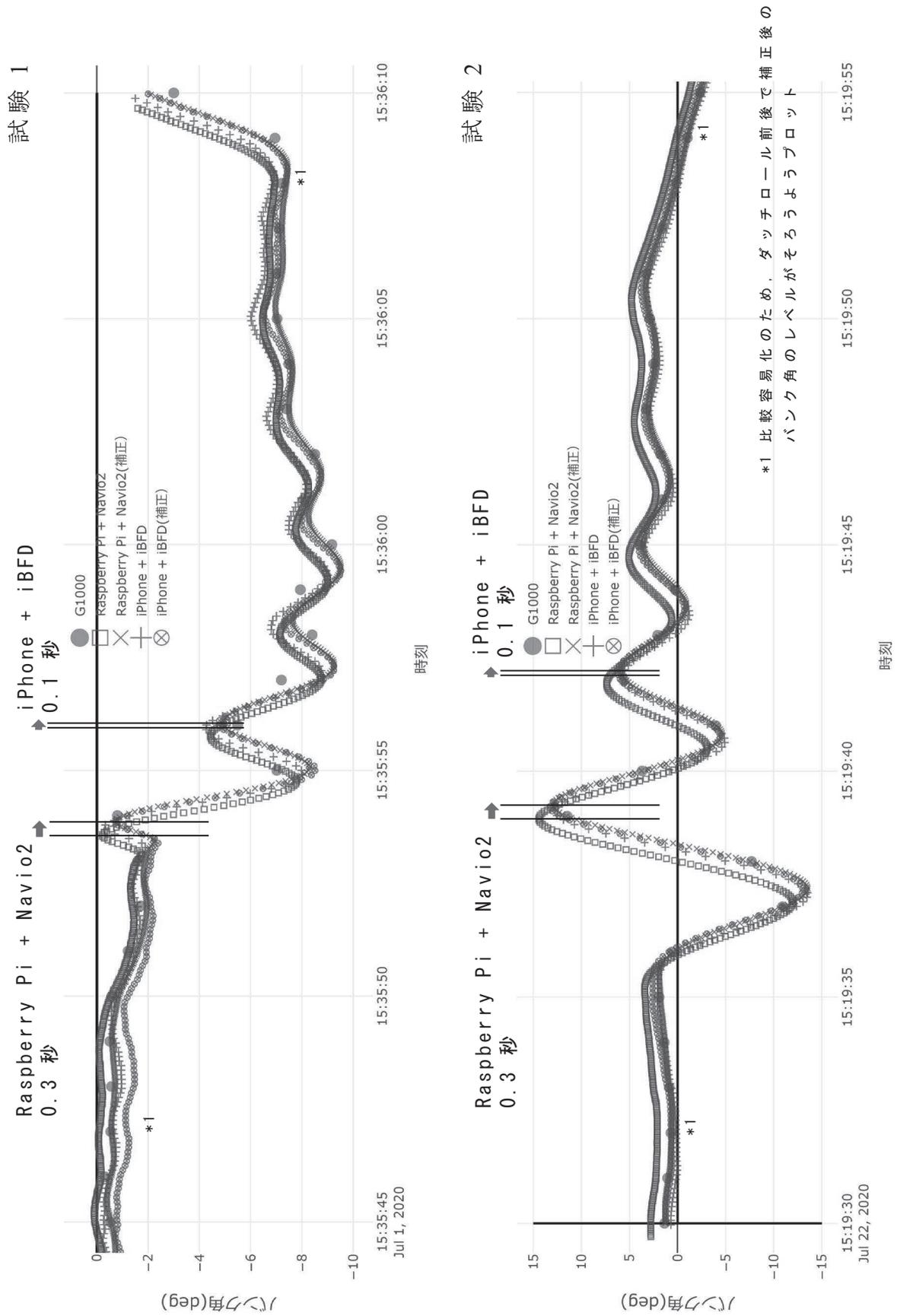


図 36 各機器の時刻補正データ

4. まとめ及び今後の計画

定量的な飛行データを取得し学生の操縦訓練を標準化・効率化すべく研究に着手し、最初のステップである飛行データ取得方法選定のための飛行試験を実施した。iPhone + iBFD には姿勢角のふらつきが見られ、操縦訓練には適さないことが確認できた。一方、Raspberry Pi + Navio 2 は、水平直線飛行時の G1000 との差は表 3 に示すように一定のレベル（高度差 15 ft 以内、速度 有意差なし等）で、また非定常運動時はそれを若干逸脱するものの、諸元の変化の傾向をよく捉えていることが確認できた。従って、タスクに応じ誤差幅を踏まえた評価をすることにより、Raspberry Pi + Navio 2 は操縦訓練に使用できるものと考えられる。

今後は、以下のようなステップで、定量的なデータ評価による操縦訓練の標準化・効率化を進めていく計画である。

- ・ 国交省主導 FDM 成果を取り込んだ飛行データ取得方法選定
- ・ 飛行再現・評価法の試行
- ・ 定量的なデータ評価による操縦訓練方法の提案
- ・ 離着陸時への適用拡大
- ・ 操縦入力 of 取得方法の検討

注

1) MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) :

近年、半導体集積技術の発展に伴って出現してきた、機械部品・センサ・電子回路等を集積化したデバイスで、これを用いることにより、従来より軽量・小型・安価な計測機器が実現できるようになってきた。

2) 簡易型飛行記録装置 (FDM ; Flight Data Monitoring) の実証実験 :

小型航空機の安全性向上及び操縦技量の向上を目的として、国土交通省が主導で検討を行っている、FDM 搭載義務化を視野に入れた調査活動。

3) ICAO Annex6 (国際民間航空条約 附属書 6) の FDM 要件 :

事故調査を目的として、ICAO が締結国に対して標準/勧告として規定している FDR/FDM 等が満たすべき要件。航空機の種別や重量毎に取得しなければならないデータ項目が定められており、小型機に対しては簡易な機器である FDM で対応できるデータ項目 (高度, 速度, 位置, 飛行経路, 姿勢, 加速度) に絞った要求となっている。なお, Annex6 では, 墜落事故にも耐えうる高価なものを FDR(Flight Data Recorder), 簡易型のものを ADRS(Aircraft Data Recording System) と呼んでいるが, 本論文では, 2)での呼称に合わせ, ADRS のことを指して FDM と呼んでいる。

引用文献

- (1) 瀬川陽, 竹之内修. 操縦訓練のための姿勢記録装置と飛行再現システムの構築. 航空大学校研究報告. R-63, 2010.
- (2) Mandziuk, M.; Yurk, S.; Grashik, M. and Liu, T. Flight Testing on Cirrus Aircraft, AIAA 2009-0571, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2009.
- (3) James W. Gregory and Christopher D. Jensen. Smartphone-Based Data Acquisition for an Undergraduate Course on Aircraft Flight Testing. AIAA 2012-0883, 2012.
- (4) 山口皓平, 砂田茂, 井戸田典彦, 辻本邦之, 佐伯達夫. スマホ等の活用による実機飛行実習内容充実の検討と実施. JSASS-2018-5098. 第 56 回飛行機シンポジウム CD-ROM 講演集. 日本航空宇宙学会, 2018.
- (5) 山口皓平, 砂田茂, 井戸田典彦, 辻本邦之, 佐伯達夫. 機内持込み型飛行データ測定システムの開発と実機飛行実習の学習内容充実への活用, 工学教育. 67-4, 2019. pp.49-55.
- (6) 国土交通省航空局. “小型航空機等の安全性向上に向けた取組状況及び今後の方向性”. 国土交通省. 2018-10-03. <http://www.mlit.go.jp/common/001256494.pdf>, (参照 2021-03-20).
- (7) 国土交通省航空局. “小型航空機等の安全性向上に向けた取組状況及び今後の方向性”. 国土交通省. 2019-03-20. <http://www.mlit.go.jp/common/001284633.pdf>, (参照 2021-03-20).
- (8) Raspberry Pi Foundation (ラズベリーパイ財団). “Raspberry Pi Foundation トップページ”. <https://www.raspberrypi.org/>, (参照 2021-03-20)
- (9) EMLID. “Navio 2 製品ページ”. EMLID. <https://docs.emlid.com/navio2/>, (参照 2021-03-20)
- (10) International Civil Aviation Organization (ICAO). “ICAO トップページ”. ICAO. <https://www.icao.int/Pages/default.aspx>, (参照 2021-03-20).
- (11) 国立国会図書館. “ICAO (国際民間航空機関)”. 国立国会図書館. <https://rnavi.ndl.go.jp/politics/entry/icao.php>, (参照 2021-03-20).
- (12) Apple. “iBFD App store ページ”. Apple. <https://apps.apple.com/jp/app/ibfd/id1195301027>, (参照 2021-03-20)
- (13) 村岡浩治, 杉原有理花, 船引浩平, 渡邊篤. 簡易カメラ画像記録による飛行安全データ解析技術の研究. JSASS-2019-5181. 第 57 回飛行機シンポジウム講演集. 日本航空宇宙学会, 2019.
- (14) 津田宏果, 船引浩平. 機械学習を適用したパイロット行動推定プログラムの開発. JSASS-2020-5103. 第 58 回飛行機シンポジウム講演集. 日本航空宇宙学会, 2020.
- (15) 津田宏果, 村岡浩治, 杉原有理花, 渡邊篤, 船引浩平. 小型アクションカメラ・データによる飛行状況再構築の試行. JSASS-2020-5104. 第 58 回飛行機シンポジウム講演集. 日本航空宇宙学会, 2020.