

地盤変動情報(JISLaD)の実際の測量への応用(その4) ダイナミック座標のための時間変化を求める方法について

植田伸一¹・#里村幹夫¹・島田誠一¹・末野幹雄²・多田吉成¹・
藤井綾香¹・田部井隆雄¹・伊藤広和¹・庭野 基¹・相京幸一¹・
中川雄二¹・工藤智幸³・長谷部行生³・永井隆一³

1: 株式会社日豊; 2: 中央大学研究開発機構;
3: 一般財団法人航空保安無線システム協会

日本測地学会第142回講演会
2024年11月1日
ビュー・ポートくれ

本日は、こういう題とメンバーで発表しますが、内容はバックの写真にあるように空港の測量についてです。

空港座標の再測

- 航空機の着陸については、空港が出す電波を受けて、そのデータを活用して着陸する方式が広く用いられているが、すべての空港で利用できるとは限らない。
- GNSSを補強するSBAS (Satellite-Based Argumentation System)やGBAS (Ground-Based Argumentation System)の発達により、GNSSを使った航空機の位置決定精度が各段に上がった。
- SBAS,GBASで補強されたGNSSデータを使った航空機の計器着陸がすでに行なわれている。
- この計器着陸のためには、空港における滑走路末端のその時点での(今期の)精密な位置座標が必要となる。
- 1990年代に日本の空港のWGS-84座標を求めている。
- その後、様々な地殻変動があることから、1990年代に求めた座標を確認するとともに、今後も座標を維持管理する必要がある。

今回空港の精密座標を求めることになった経緯について説明します。

最近、GNSSを補強するSBASやGBASといわれる技術が発達し、時々刻々の航空機の正確な位置が求められるようになってきました。航空機の着陸については、飛行場から出す電波を航空機が受けて、そのデータを活用して滑走路に着陸するという方式が広く採用されています。ただこの方式は経費等の関係ですべての空港で利用できるとは限らず、それに代わって、SBASやGBASで補強され精度の上がったGNSSデータを用いた航空機の計器着陸がすでに行われています。座標で着陸するためには当然のことながらそれに対応できる滑走路の両端のその時の精密な位置座標が必要です。日本の空港の座標についてはほとんどが1990年代にWGS-84座標が求められています。しかしその後の地殻変動があることを考えると、その値を確認するとともに、今後も変動を監視するなど維持管理する必要があります。

空港の座標値

衛星航法を使った航空機の離発着では、ICAO(国際民間航空機関)が、
その精度及び分解能を規定している

Data element	Accuracy	Resolution	Integrity
FPAP (Flight Path alignment point) (latitude, longitude)	0.3m (1ft)	0.0005"(1.5cm)	10 ⁻⁸ *
LTP/FTP (Loading threshold point/Fictitious threshold point) (latitude, longitude)	0.3m (1ft)	0.0005"(1.5cm)	10 ⁻⁸ *
LTP/FTP (Loading threshold point/Fictitious threshold point) (ellipsoidal height)	0.25m	0.1m	10 ⁻⁸ *
Approach TCH (threshold crossing height)	0.5m	0.05m	10 ⁻⁸ *
Glide path angle	0.01°	0.01°	N/A
Course width	N/A	0.25m	10 ⁻⁸ *
Delta length offset	N/A	8m	N/A

* 10⁻⁸というのは、最高の品質という意味

(ICAO(2020): Doc 8168より)

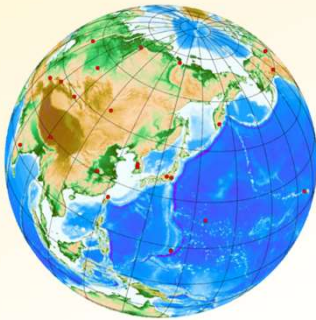
滑走路の座標については、航空機の位置情報と同等の精度が必要となり、水平30cm
高さ25cmの精度の座標が求められている

→ **ダイナミック座標管理**が必要

航空機の衛星航法を用いた着陸を実施するために、着陸時のポイントとなる位置について、ここに示すような航空機の位置精度をICAOが求めています。当然のことながら、空港の、特に滑走路の座標は、これ以上のWGS-84座標精度が必要です。つまり、空港の滑走路の座標は、WGS84座標で、水平30cm高さ25cmの精度の座標が求められています。

この値を維持するには単に精密測量で座標値を求めるだけでなく、それ以降の地殻変動の考慮が必要になってきます

JISLaD ～GEONETの解析について～



—解析条件—

GAMITver10.7

BERNESEver5.4

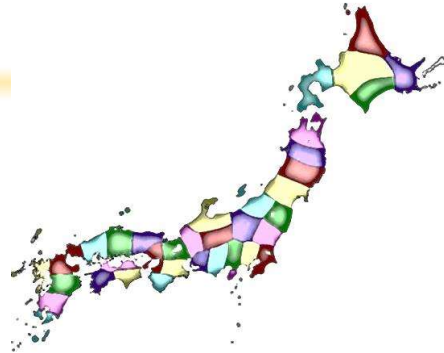
ITRF2020座標系

IGS点約30点

全国約1300点の電子基準点を
絶対座標 (ITRF) で毎日決定している。

全国の観測点を39のブロックに分けて
解析し、各ブロックの計算結果を統合
している。

また、GAMITとBerneseの両方で解析
し、お互いの解を相互チェックしている。



今期のITRF座
標をためている
ので、空港座
標の決定にそ
れを使用

IGS: International GNSS Service

ITRF: International Terrestrial Reference Frame

4

我々はこの座標を求めるのに、日豊が従来から行っていたJISLaDを使って行いました。そこでこのJISLaDについて説明します。国土地理院が公開している全国約1300点の電子基準点データを日豊が独自の方式で解析し、その結果をずっとためているものです。もともとは地盤変動を見るためとして始めたものです。国土地理院のF3解やF5解とは違って、すべての観測点の座標値をGAMITとBerneseを使って海外のIGS点と直接結合し、座標を求めています。

空港測量

- 昨年度までの3年間で43空港で実施
- 各空港4点(二次基準点)を新設し、24時間×2回のGNSS測量(周辺のGEONET点3点を一次基準点とする)
- ICAOの測量の規定Doc.9674に準拠して、空港に設置した4点の基準点はIGS点を既知点としてGamitとBerneseで長基線の解析をして座標の精度を検証している。
- 二次基準点と滑走路端の間をトータルステーション(TS)で測量
- 空港周辺の障害物の座標を測量 (VRS-RTKとTSの組み合わせ)
- 空港での電波状態の調査



実際に行った空港での測量について説明します。昨年度までの3年間で43空港で実施しました。

まず各空港内に4点の2次基準点を新設し、24時間GNSS観測を2日間に渡って行いました。解析には測量用ソフトであるトワイズを使っていますが、ICA0の測量の規定Doc.9674に準拠して、空港に設置した4点の基準点はIGS点を既知点としてGamitとBerneseで長基線の解析をして座標の精度を検証しています。

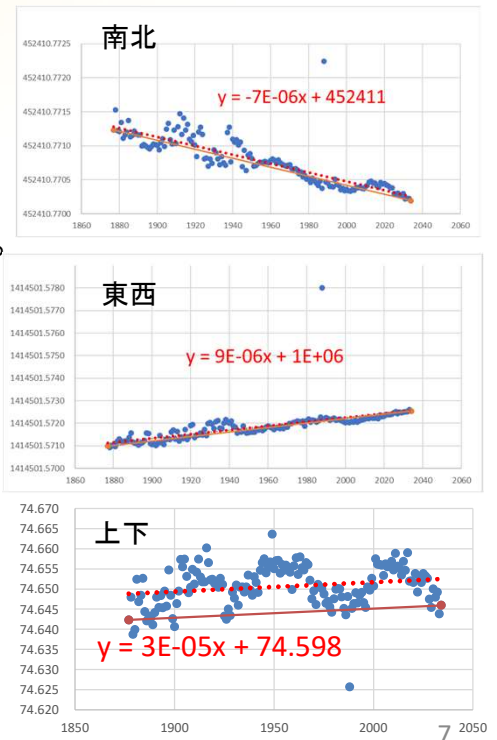
GPS、GALILEO、GLONASS、準天頂のデータをとりました。ただし、実際のGNSS解析ではGPSのデータのみを使っています。またその2次基準点と滑走路端の間を航空機のとんでいない深夜にトータルステーション測量でつなぎました。また、航空機の運航に障害となる可能性のある高い建物、タワーや高い木などの位置の測量を、仮想基準点RTK測量とトータルステーション測量を組み合わせで行いました。また、空港で航空機が受ける電波状態を調べるため、SBAS電波の受信状況だけではなく各方位からどのような電波がやってきているかの調査も行いました。

A satellite map of Japan with numerous airports labeled with their IATA codes and names in Chinese. The labels are as follows:
RHCW 札幌新千歳空港
RJCM 女満別空港
RJCO 札幌飛行場
RJED 釧路空港
RJCH 函館空港
RJSK 秋田空港
RJNO 新潟空港
RJOC 出雲空港
RJBT 岡山国際空港
RJOM 松山空港
RJTF 那覇飛行場
RJTO 沖縄国際空港
RJDT 対馬空港
RJFE 豊後高田空港
RJFH 福岡空港
RJFK 鹿児島空港
RJFG 鹿儿岛空港
RJAH 阿波市川口空港
RJNH 佐賀空港
ROKJ 熊本空港
ROOR 大分空港
ROVY 与那国空港
ROBM 石垣島空港
ROBE 那覇国際空港

変動予測

- 座標値で航空機の離着陸を行うには、地殻変動を考慮した今期のWGS84座標が必要。
- 空港周辺のJISLaDデータより、過去3年間の空港の変動速度を求め、ICAOの規定を超える時期を予測。
- 変動速度は、とりえず、空港周辺の3～4点の電子基準点の、観測年の1月1日を含む週平均値と3年前の同値から年変動速度を求めて将来に外挿している(右図の赤実線)。この方法について、これでいいか、どういう方法が最適かを検討する。
- 空港の座標値は、観測したときの値しかわからないので、現在の座標値も求められている電子基準点について、2016～2019年(1877週～2034週)のデータからこの方法で2024年9月(2332週)の値を推定し、どの程度の違いが出るかを調べる。

940001(稚内)



座標値で航空機の離着陸を行うには、地殻変動も考慮した今期のWGS84座標が必要となります。

空港周辺のJISLaDデータより、過去3年間の空港の変動速度を求め、それを基に将来の座標を予測しているのですが、信頼性は高くないと考えているので、実際にはICAOの規定を超える時期の予測にとどめています。

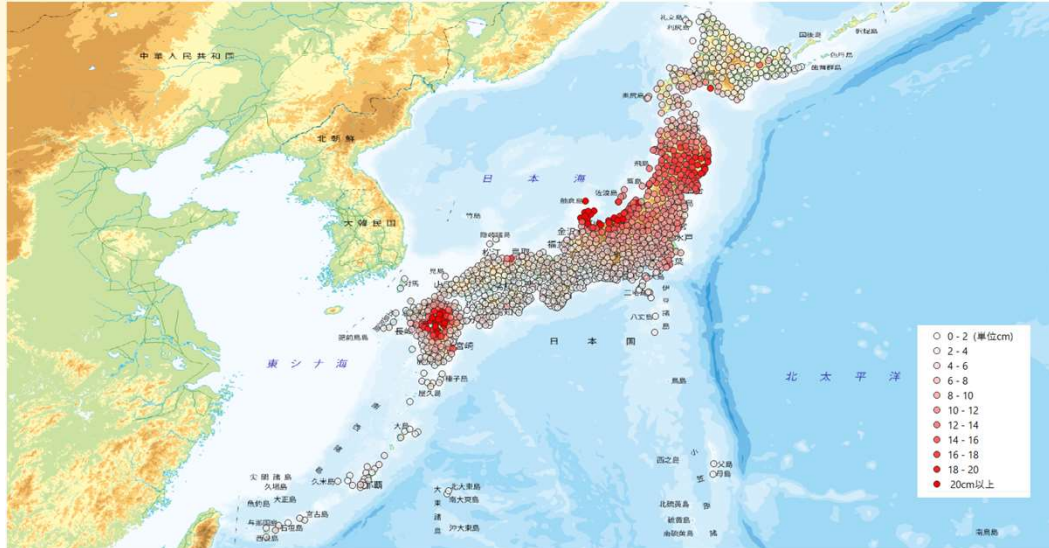
変動速度はとりえず、空港周辺の3～4点の電子基準点の、観測年の1月1日を含む週平均値と3年前の同値から年変動速度を求めて将来に外挿している。この方法について、これでいいか、どういう方法がより適切かを検討します。

本来なら空港の滑走路の座標の将来予測の精度を調べたいのですが、空港の座標値は、観測したときの値しかわからないので、それをチェックできません。そこで、現在の座標値も求められている電子基準点について、2016～2019年のデータから2024年9月の値を推定し、どの程度の違いが出るかを調べてみました。

赤実線が現在行っている変動予測の方法(つまり両端を単純につなぐ方法)赤点線が全データを直線で最小二乗近似したものです。

予測値と実測値の差(水平位置)

1877週(2016年1月1日を含む週)と2034週(2019年1月1日を含む週)の座標差を2332週まで外挿した位置と2232週(2024年9月15日からの週)の実測値との差



この期間に大地震が起こった能登や熊本で差が大きい、他に東北地方が大きい

差が25cm以上

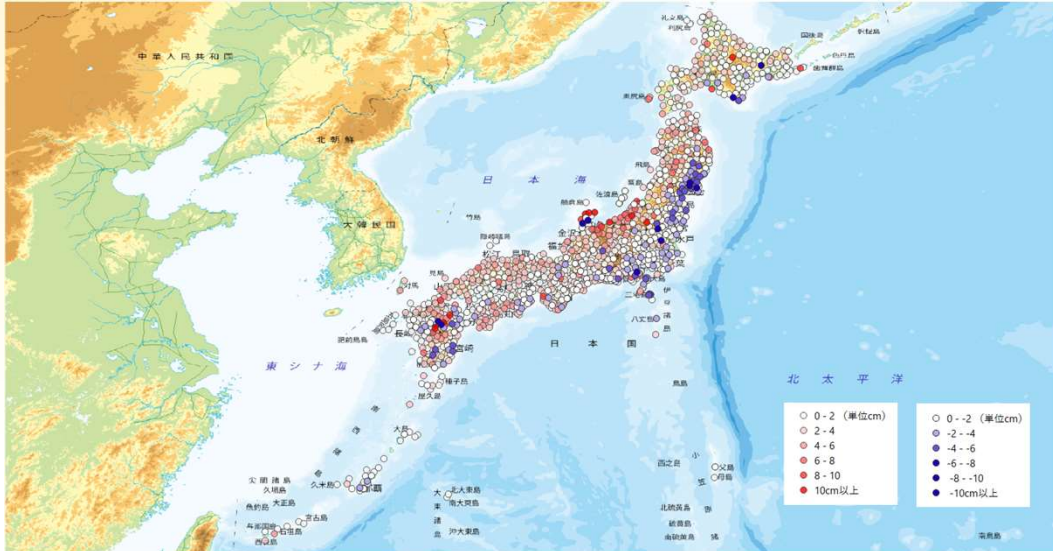
輪島(129cm)
舩倉島(25cm)
珠洲(89cm)
能登島(71cm)
輪島2(210cm)
穴水(102cm)
能都(80cm)
富来(93cm)
安塚(36cm)
熊本(165cm)
清和(36cm)
熊本小国(46cm)
鹿本(53cm)
長陽(220cm)
泉(76cm)
阿蘇(39cm)
高森(53cm)
前津江(40cm)
菊池(108cm)
城南(98cm)
五木(30cm)
糸魚川1(36cm)
新井(42cm)
小須戸(30cm)

全国の電子基準点データを基に、2016年と2019年の最初の週平均値を単純につないで、それを現在まで外挿したときの値と最新の座標値と比べてみました。この間に大地震のあった熊本近くと能登半島で差が大きいのは仕方がないと思うが、それ以外の点も差が大きいところがある。特に東北地方の太平洋岸で大きめに出ており、2011年の東北地方太平洋沖地震の余効変動の推定がこの方法では不十分であると思われる。

予測値と実測値の差(楕円体高)

1877週(2016年1月1日を含む週)と2034週(2019年1月1日を含む週)の座標差を2332週まで外挿した楕円体高と2232週(2024年9月15日からの週)の楕円体高実測値との差

差が10cm以上



この期間に大地震の起こった能登や熊本で差が大きいが、他に日本海側で差が大きい。

輪島(99cm)
珠洲(26cm)
能登島(-32cm)
輪島2(130cm)
熊本(30cm)
長陽(-61cm)
湯布院(15cm)
菊池(-11cm)
城南(47cm)
小千谷(14cm)
糸魚川(11cm)
松枝岐(11cm)
塩谷(-48cm)
上川(10cm)
阿寒2(-21cm)
下館(-49cm)
志賀A(12cm)

上下方向で比較したのがこの図です、水平変動に比べ差は小さいが、日本海側や東北地方の太平洋側で差の大きい点が多い。特に日本海側は積雪や融雪のためのくみ上げ等で地下水くみ上げ等で年周変動が大きい点があるのに、それを考慮していないことが原因であろう。

2332週(2024年9月)での予測値と実測値との差 (単位: cm)

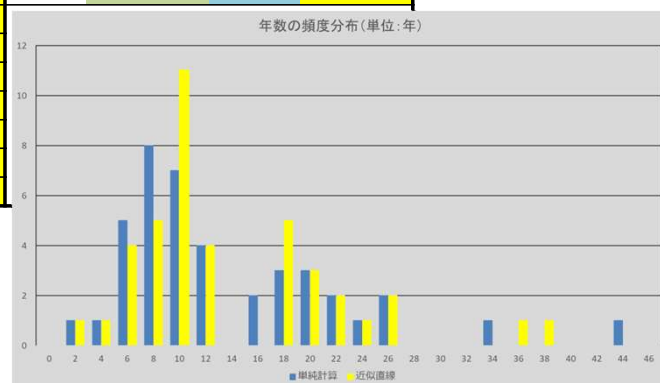
局番号	局名称	近傍の空港	両端のデータから予測				直線近似で予測			
			南北	東西	水平	上下	南北	東西	水平	上下
940001	稚内	稚内空港	2.5	-2.2	3.3	1.8	1.7	-1.2	2.1	1.0
950113	中標津	中標津空港	0.1	-0.1	0.1	0.7	0.3	-0.5	0.6	0.2
020925	岩城	秋田空港	6.8	-12.6	14.3	3.3	4.3	-9.1	10.1	2.0
93019	小金井	調布飛行場	2.9	-3.7	4.7	-2.0	2.4	-3.0	3.8	-0.3
93057	新島	新島空港	0.4	1.0	1.1	0.2	-1.0	0.4	1.1	-0.8
950353	宝塚	大阪国際空港	-0.8	-1.6	1.8	0.7	-1.5	-0.4	1.6	0.6
021018	松江2	出雲空港	0.4	-3.7	3.7	2.8	0.0	-1.5	1.5	1.4
950465	熊本	熊本空港	-98.1	-133.3	165.5	29.8	-60.6	-73.4	95.2	15.4
960730	笠利	奄美空港	1.0	-0.8	1.3	0.1	-0.9	1.8	2.0	1.3
02P212	P那覇	那覇空港	1.9	-0.9	2.1	-2.1	-0.1	2.3	2.3	-1.8
45点のRMS			15.0	20.3	25.2	5.1	9.4	11.3	14.7	2.9
熊本を除く44点のRMS			3.2	4.1	5.1	2.5	2.5	3.0	3.8	1.8

現在は、3年程度の時間差の週平均値の差を外挿してICAOの基準を外れそうな時期を予測しているが、両端の差ではなくすべての週平均値を直線近似した方がより適切な予測になる

3年間の座標値の差を単純に伸ばしたときと3年間の全データを直線近似した線を伸ばした時の今年の9月の予報値と実測値の差です。この表では全データを使って予測した方が今年9月の座標値によく合っています

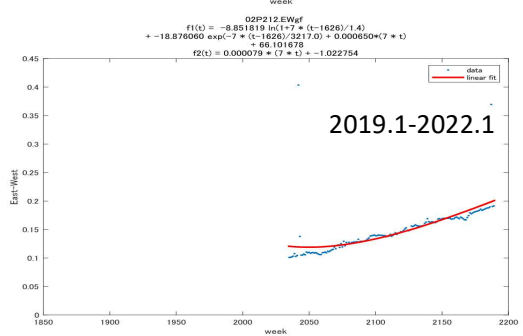
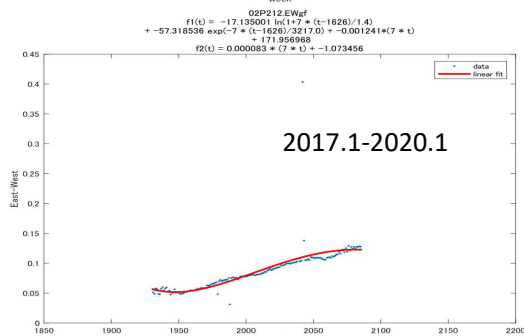
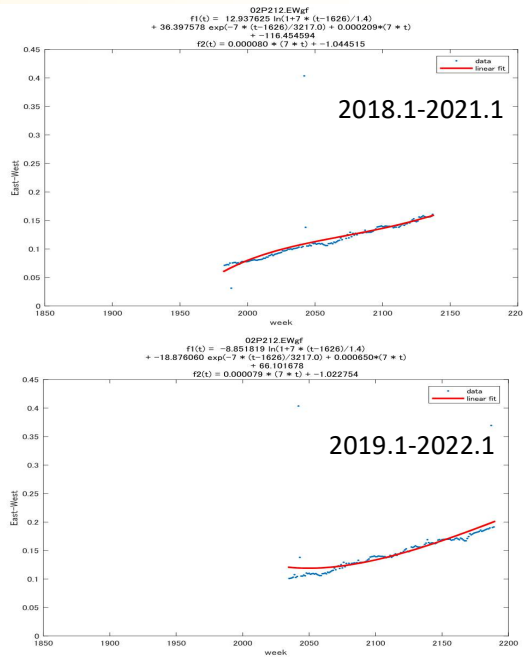
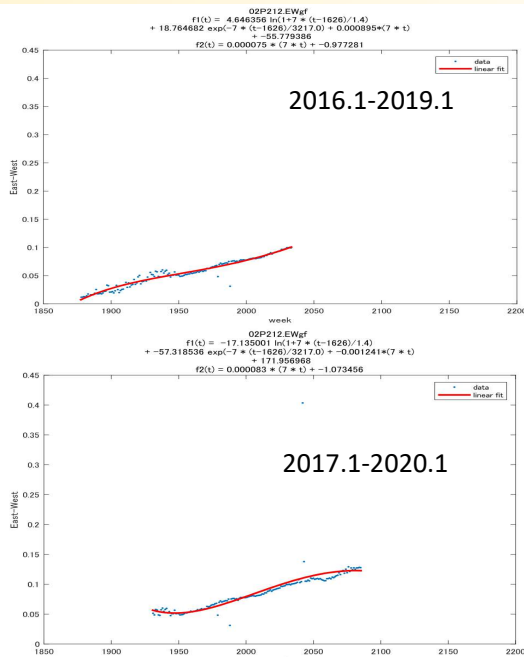
水平位置がICAOの基準30cmを超える年数

局番号	近傍の空港	両端単純計 算	直線近似	局番号	近傍の空港	両端単純計 算	直線近似	局番号	近傍の空港	両端単純計 算	直線近似
960774	天草飛行場	7.9	9.2	960772	長崎空港	8.1	9.4	960732	喜界空港	8.4	8.8
950486	鹿児島空港	7.6	8.4	950462	福江空港	9.2	9.7	020925	秋田空港	3.6	3.6
950451	福岡空港	14.7	16.9	950458	杵岐空港	10.5	10.9	950113	中標津空港	18.6	17.4
960527	奥尻空港	9.2	9.6	950457	対馬空港	10.2	10.8	940001	稚内空港	19.3	20.2
940022	函館空港	10.1	10.7	950495	与論空港	6.2	6.3	960646	但馬飛行場	11.4	11.9
960501	利尻空港	16.2	16.3	950492	種子島空港	7.7	8.1	950382	隠岐空港	8.8	9.1
960507	女満別空港	44.0	36.4	950493	屋久島空港	8.0	8.5	960735	沖永良部空港	6.4	6.6
950124	釧路空港	21.1	19.6	960730	奄美空港	8.5	8.8	950434	松山空港	33.4	35.1
020876	丘珠空港	17.0	18.0	950465	熊本空港	1.1	2.0	021018	出雲空港	9.5	9.7
93057	新島空港	25.0	24.3	950353	大阪国際空港	16.2	16.3				
141202	神津島空港	24.1	23.9	960743	久米島空港	5.8	5.8				
960599	三宅島空港	18.4	19.6	950498	宮古空港	5.4	5.4				
960522	新千歳空港	15.4	18.6	960748	多良間空港	5.1	5.1				
93051	大島空港	22.6	25.6	960750	新石垣空港	4.5	4.5				
93019	調布飛行場	20.1	21.0	960746	北大東空港	6.6	6.4				
02P212	那覇空港	6.0	6.1	950497	南大東空港	6.5	6.2				



今年9月の座標値で比べると予測の方法によりその値にかなり違った結果が得られたが、水平位置の座標が基準値を超える年数については、予測方法を変えても大きな変化はみられなかった。

対数関数や指数関数を含む関数で近似



Tobita (2016)によれば、2011年以降の変動は直線ではなく対数と指数の項を含めた関数が、より近似がよくなるという

例：沖縄02P2121のEW成分

近似するデータの期間によって関数が上に凸になったり下に凸になったりして、地震発生から時間が経過した3年程度のデータからでは将来予測には不適

東北地方太平洋沖地震以降の地殻変動は、対数関数や指数関数を含む関数を使うと近似がよくなるという論文を飛田さんが書いておられます。

我々もそれにならって対数や指数関数を含む関数での近似を試みました。ただし結果はよくありませんでした。

使っている期間のデータが短いので、わずかな誤差によって上に凸の関数になったり、下にと凸の関数になったりして、それを外挿で伸ばすと実際の値とは大きく外れてしまっています。

地震直後を含む長い期間のデータにこの関数を当てはめればいいのかもしれませんが、我々の行っている数年のデータから将来予測に使うのは適切ではないと考えます。

まとめ

- GNSSを使った航空機の着陸の実用化に向け、JISLaDデータを測量に応用して空港の滑走路末端の今期の座標測量を行っている(2021から2023年度で43空港で実施)。
- 近傍の電子基準点の3年間の元日を含む週平均座標値の差から変動を予測し、ICAOの基準を外れる時期を予測。
- 3か年の単純な差を使うより、3年間のすべての週平均データを直線近似して予測した方が精度がよくなる。
- しかし、ICAOの基準を越えるまでの年数はほとんど変わらない。
- 対数や指数を使った関数による変動予測は、地震発生時から時間が経過した3年程度の長さのデータからでは予測精度が落ちる。

13

まとめると次のようになります。

GNSSを使った航空機の着陸の実用化に向け、JISLaDデータを測量に応用して空港の滑走路末端の今期の座標測量を行っている(2021から2023年度で38空港で実施)。

測量用プログラム『TOWISE』を用い、周辺の電子基準点座標から二次基準点4点のITRF座標を求め、その点からTSを用いて滑走路両端の座標を求めた。

近傍の電子基準点の3年間の元日を含む3年間の週平均座標値の差から変動を予測し、ICAOの基準を外れる時期を予測。

3年間の週平均値の単純な差を使うより、3年間のデータを直線近似して予測した方が精度がよくなる。

対数や指数を使った変動予測は、3年程度の長さのデータからでは予測精度が落ちる

また、将来的には、再測の時期だけではなく、座標の時間変動から将来の座標値も推定できるようにしたいと考えています。