GPS空中三角測量の精度検証と有効性の検討
Evaluation of GPS-assisted Aerial Triangulation

測図部　野口真弓
Topographic Department Mayumi NOGUCHI
国土交通大学校　浦部ぼくろう
College of Land, Infrastructure and Transport Bokuro URABE

要　旨

近年，GPSによる航空カメラ位置情報を利用した空中三角測量（GPS空中三角測量）の研究が進み，実用化される段階となった。本研究では，GPS空中三角測量手法としてShift-Drift法及び整数値バイアス同時決定法（CPAS法）を用い実験を行い，従来の空中三角測量手法との精度の比較を行った。また，理論的には可能であるとされている地上基準点を全く使用しないGPS空中三角測量についても実験を試みた。その結果，CPAS法について十分な精度が得られることを確認した。

1．はじめに

航空写真に写っている地上基準点（対空標識）および標定点の写真座標を計測し，中心投影モデルによる座標変換式のパラメータを最小二乗法で解く空中三角測量は，1950年代に理論的な整備が終わり，コンピュータの進歩とともにごく一般的な測量技術になっている。一方，室内作業の多くが効率化されていく中で，対空標識に関わる時間・経済的コストはほとんど軽減されず，地形図作成事業の足かせとなっていた。

人工衛星の軌道情報を利用して全地球上で3次元位置を計測できるGPSシステムは，1990年代初頭に基準点測量をはじめとする測量分野への適用が急速に進んだ。写真測量分野においても，撮影用航空機の飛行軌跡座標の取得にGPSを用いる研究が進められ（Frieβ，1991など），これに基づく写真測量システムが近年実用化されるに至った。従来の空中三角測量で未知量として条件方程式に組み込まれていた各写真の投影中心座標が与えられれば，写真一枚ごとに3個一組（X，Y，Z）の座標が既知量として与えられ，独立の観測方程式を得ることができる。この技術を利用すれば，地上基準点を大幅に減らすことができ，標識設置の労力を削減できると期待される。

国土地理院では，1996年度にGPS支援写真測量ナビゲーションシステム（Leica　ASCOT）を導入し，Shift-Drift法による空中三角測量プログラムPATB-GPSによる実験を実施した。その後，最新理論が適用された整数値バイアス同時決定法（CPAS法）を用いたGPS基線解析プログラムGEONAPとバンドル法調整プログラムBINGO-Fの2つのモジュールからなるGPS空中三角測量用アプリケーションが導入された。

そこで，本研究では，初期に実用化・導入されたShift-Drift法と今回新しく開発・導入されたCPAS法の2つのGPS空中三角測量手法を用いて，精度検証の実験を行い，従来のバンドル法，独立モデル法による調整結果と比較した。また，CPAS法のオプションを使用して，GPSデータを使った場合と使わない場合を比較し，GPSデータの影響を考察した。さらに，CPAS法を用いて理論的には可能な地上基準点を全く使用しないGPS空中三角測量を試みた。

これらの実験の結果はUrabe et.al（2001）で報告されているが，新たに得られたデータを追加し，報告する。

2．GPS空中三角測量手法

2．1　Shift-Drift法

本手法では，GPS解析で求められる投影中心座標を，通常コースごとにShift量，Drift量を変量とする幾何モデル（1．1）に当てはめ，その変量を対地標定パラメータと同時に解く（久保，1994）。

$$\begin{bmatrix}\bar{X}\\ \bar{Y}\\ \bar{Z}\end{bmatrix}_{GPS}=\begin{bmatrix}X\\ Y\\ Z\end{bmatrix}_{GPS}+T\cdot\begin{bmatrix}D_1\\ D_2\\ D_3\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}S_1\\ S_2\\ S_3\end{bmatrix}\quad(1.1)$$

$D_1D_2D_3$ …drift, $S_1S_2S_3$ …shift parameters; T …time

コース単位に幾何モデルが形成されるため，残差の影響が隣接するコース間の不整合となって現れる。そのため，この手法による調整計算の精度を高めるには，平行コースをつなぎ合わせるための余分なコース（クロスストリップ）をブロックの両端に追加する必要がある（GIP，1998）。

過去の実験では，Shift-Drift法を用いて従来の手法と同等の精度を得るには，少なくとも4隅に基準点が必要であると報告されている。

2．2　整数値バイアス同時決定法（Combined Phase Ambiguity Solution Method ; CPAS法）

本手法では，全位相波数がブロック計算中で未知数として扱われる。未定バイアスとアンテナ位置は（1．2）の関係式で表される。

$$\begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix}_{GPS} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{GPS} + \begin{bmatrix} \partial X/\partial\rho \\ \partial Y/\partial\rho \\ \partial Z/\partial\rho \end{bmatrix} \Delta\rho \qquad (1.2)$$

ρ …phase counter

この手法の特長は，キネマティック連続観測で得られる冗長観測量を整数値バイアス決定に費やしてしまわず，未定バイアスに関する観測方程式（未定バイアスとアンテナ位置の関係式）をバンドル調整計算の計画行列に持ち込んで全未知量（地上座標及び未定バイアス）を同時に調整するため，ブロック全体の強度が非常に高いことである（Kruck，1999）。この手法によれば，空中三角測量においてGPS技術を効果的に利用できる。また，クロスストリップを追加する必要もなく，小さなブロックにおいても従来手法と比べて作業量が増加することはない。

CPAS法では，従来の手法と同等の精度を得るのにたった1点の基準点のみで十分であったことがすでに他の実験で報告されている（長谷川他，1999）（GIP，1998）。

3．GPS空中三角測量実験

3．1　従来方法との比較

3．1．1　伊豆大島地区

1998年国土地理院撮影の航空写真を使用し，様々なブロック調整プログラムによる空中三角測量の実験を行った。本実験では，2つの従来法（独立モデル法及びバンドル法）と2つのGPSデータを用いる方法（Shift-Drift法及びCPAS法）について同じデータセットで調整計算を行った。すべての手法について，様々な基準点数で計算を行い，基準点を減らすことの調整精度への影響を比較した。

（1）実験条件

実験に使用したデータは表－1のとおりである。また，調整計算に使用したプログラムを表－2に示す。

実験は，4手法それぞれについて，表－3で示した基準点数によるケースごとに実施した。クロスストリップはPGの計算のみで使用した。除外した基準点は検証点として使用し，調整計算結果と成果値との較差の比較を行った。GPSデータを使用しないBUとIMでは，理論上，基準点3点以下では計算が行えない。また，BUでは基準点4点以下で，PGにおいて基準点1点では，プログラムエラーとなり，計算は行えなかった。

表－1　伊豆大島地区実験データ

写真	撮影縮尺：1/10,000 コース数：平行4＋クロス2 写真枚数：84枚（78モデル）
標定基準点	三角点本点設置対空標識4点 ＋標定点10点 平面位置成果：ITRF94＋GRS80 標高成果：成果表値（三角点） 及びJGEOID96による計算値
航空機GPSデータ	1Hz/L1 基準局からの平均距離：約50km

表－2　比較実験使用プログラム

	略号	プログラム
従来手法	BU	日本写真測量学会製バンドル法
	IM	国土地理院製独立モデル法
GPS空三	PG	ライカ製Shift-Drift法（PATB-GPS）
	BG	GIP製CPAS法（BINGO-F）

表－3　ケースごとの基準点及び検証点数（伊豆大島地区）

ケース	A	B	C	D	E
基準点数	14	10	6	4	1
検証点数	0	4	8	10	13

（2）実験結果

表－4及び図－1に各ケースのそれぞれのプログラムによる結果を示した。ケースAでは，基準点残差を，その他のケースでは，成果値と検証点の調整結果との格差の変化を示している。この結果から，基準点の数を減らしたとき，CPAS法での調整結果が最も安定していて，特に高さ方向の精度が安定していることがよくわかる。

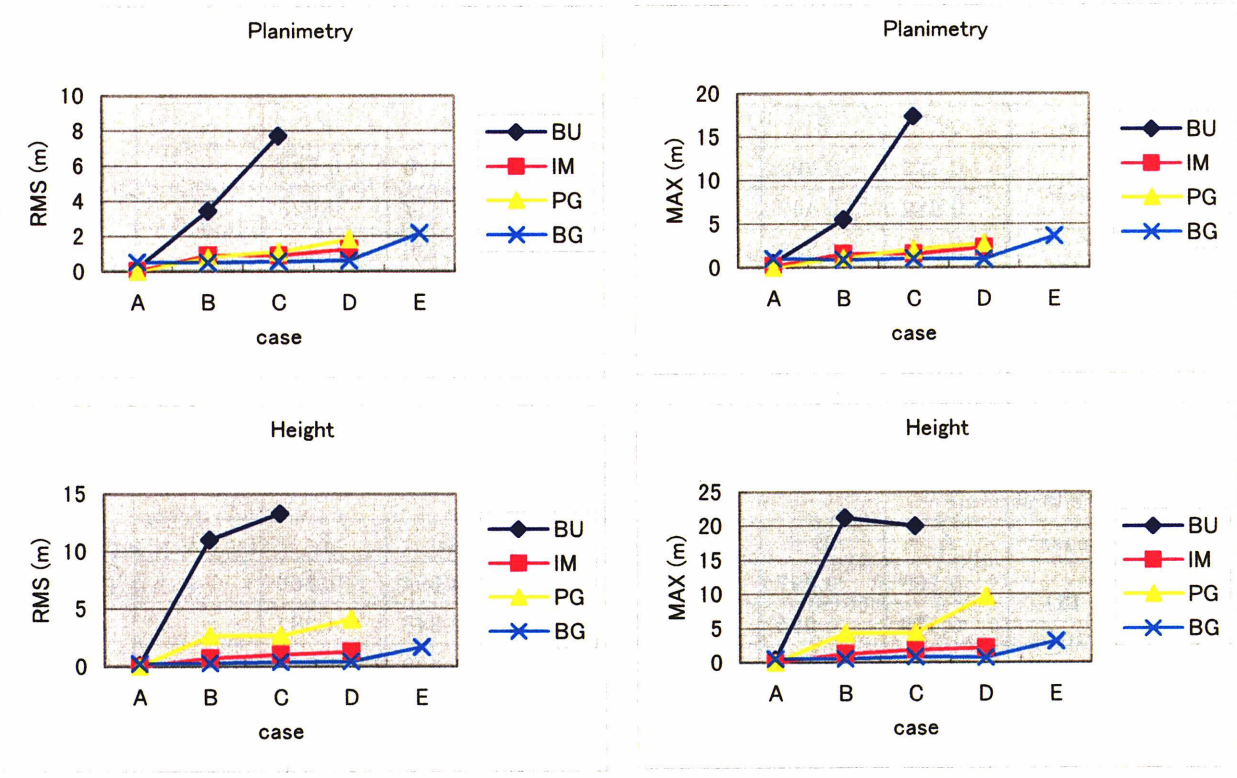
3．1．2　つくば地区

別のデータセットを用いて，3．1．1と同様の実験を行った。この実験で使用した写真は1997年にCPAS法の立証のために撮影されたもので，その結果，CPAS法の性能の良さが示された（Kruck，1998）。今回の実験では，このデータセットを使って，各種手法の比較実験を行い，基準点を少なくした場合のCPAS法の安定性を調べた。

（1）実験条件

実験に使用したデータは表－5のとおりである。また，調整計算に使用したプログラムは3．1．1の実験と同じである。クロスストリップはPGのみで使用した。

基準点数を表－6のように変化させて，比較実験を行った。ただし，基準点1点のケースGについては，BGのみ計算を行った。



図－1　各種空中三角測量手法の比較実験結果（伊豆大島地区）

表－4　各種空中三角測量手法の比較実験結果（伊豆大島地区）
それぞれ上段はRMS*，下段は最大値

(a) 平面位置誤差　(m)

case	A	B	C	D	E
BU	0.186	3.439	7.699		
	0.540	5.519	17.394		
IM	0.065	0.929	0.941	1.292	
	0.198	1.602	1.595	2.331	
PG	0.000	0.847	1.086	1.832	
	0.000	1.179	2.004	2.742	
BG	0.527	0.502	0.572	0.636	2.165
	1.039	0.920	1.009	0.973	3.653

(b) 標高誤差　(m)

case	A	B	C	D	E
BU	0.161	10.993	13.288		
	0.484	21.201	20.015		
IM	0.019	0.739	1.039	1.295	
	0.050	1.230	1.880	2.120	
PG	0.000	2.667	2.687	4.113	
	0.000	4.299	4.362	9.684	
BG	0.257	0.322	0.394	0.470	1.695
	0.555	0.554	0.892	0.799	3.182

$$^{*}RMS\ (\text{平均二乗誤差}) = \sqrt{\frac{\sum(\text{各点の較差})^2}{\text{点数}}}$$

表－5　つくば地区実験データ

写真	撮影縮尺：1/10,000 コース数：平行５＋クロス２ 写真枚数：123 枚（116 モデル）
標定基準点	標定点１５点 成果：東京原点、ベッセル 1841
航空機 GPS データ	1Hz/L1 基準局からの平均距離：約４km

表－6　ケースごとの基準点及び検証点数（つくば地区）

ケース	A	B	C	D	E	F	G
基準点数	15	11	7	5	4	3	1
検証点数	0	4	8	10	11	12	14

（2）実験結果

表－７及び図－２に各ケースのそれぞれのプログラムによる結果を示した。ケースAでは，基準点残差を，その他のケースでは，成果値と検証点の調整結果との格差の変化を示している。この結果から，３．１．１の実験と同様の傾向が読みとれる。基準点数を減らしたときのCPAS法の安定性がはっきりとわかる。

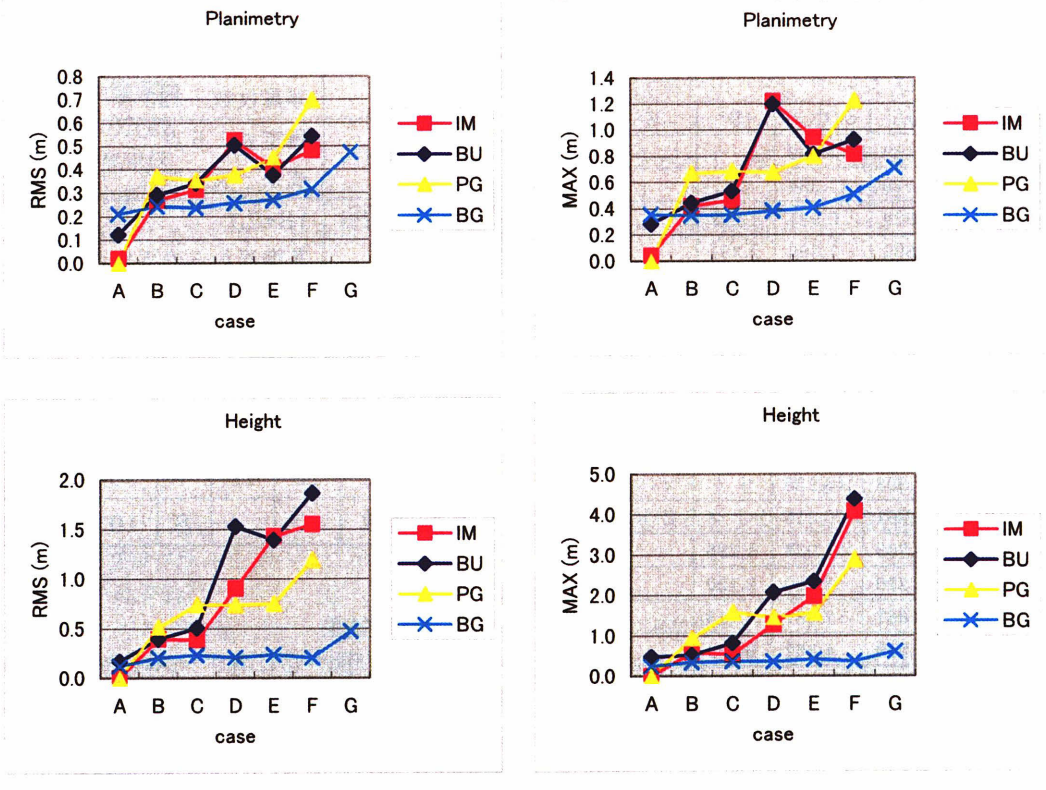
表－7　各種空中三角測量手法の比較実験結果（つくば地区）
それぞれ上段はRMS，下段は最大値

(a) 平面位置誤差　(m)

case	A	B	C	D	E	F	G
BU	0.123	0.292	0.341	0.506	0.376	0.543	
	0.287	0.442	0.533	1.199	0.817	0.926	
IM	0.018	0.268	0.313	0.524	0.406	0.482	
	0.041	0.420	0.463	1.218	0.942	0.813	
PG	0.000	0.371	0.352	0.377	0.449	0.698	
	0.000	0.669	0.683	0.677	0.803	1.226	
BG	0.212	0.245	0.237	0.257	0.270	0.316	0.475
	0.357	0.351	0.356	0.386	0.406	0.509	0.709

(b) 標高誤差　(m)

case	A	B	C	D	E	F	G
BU	0.169	0.397	0.504	1.531	1.394	1.866	
	0.479	0.525	0.821	2.082	2.348	4.387	
IM	0.005	0.396	0.391	0.907	1.430	1.552	
	0.011	0.591	0.551	1.286	1.988	4.091	
PG	0.000	0.512	0.742	0.737	0.751	1.190	
	0.000	0.935	1.581	1.456	1.566	2.885	
BG	0.123	0.206	0.232	0.207	0.236	0.203	0.472
	0.244	0.347	0.371	0.359	0.414	0.371	0.611



図－2　各種空中三角測量手法の比較実験結果（つくば地区）

3．2　航空機GPSデータの影響

CPAS法を用いて，ブロック調整におけるGPSデータの影響をみる実験を行った。BINGO-Fでは，プログラムのオプション設定により，GEONAPから出力したGPS基線解析データの使用，不使用を選択できる。今回はその機能を用いて，GPSデータを使用した場合と使用しない場合のブロック調整計算を行い，比較した。また，参考として，独立モデル法の調整計算も行い，その結果とも比較した。3．1の比較実験と同様に，それぞれの手法で基準点数を変化させて実験を行った。

3．2．1　実験条件

本実験では，2000年撮影の有珠地区の航空写真を用いた。実験に使用したデータは表－8のとおりである。使用プログラムは表－9に示す。

各ケースの基準点及び検証点数は表－10のとおりである。基準点1点の場合（ケースD）は，BGのみで行った。

表－8　有珠地区実験データ

写真	撮影縮尺：1/20,000 コース数：4 写真枚数：30枚（27モデル）
標定基準点	標定点7点 成果：ITRF94＋GRS80、JGEOID96
航空機GPSデータ	1Hz/L1 基準局からの平均距離：約10km

表－9　GPS比較実験使用プログラム

略号	プログラム
IM	国土地理院製独立モデル法
BF	GIP製BINGO-F（GPSなし）
BG	GIP製BINGO-F（GPSあり）

表－10　ケースごとの基準点及び検証点数（有珠地区）

case	A	B	C	D
基準点数	7	4	3	1
検証点数	0	3	4	6

3．2．2　実験結果

表－11及び図－3に実験の結果を示す。ケースAでは，基準点残差，その他のケースは検証点の成果と調整結果の格差を示している。これらの結果から，基準点数が非常に少ない条件下でのブロック調整におけるGPSデータ使用の効果が明確にわかる。

表－11　GPSデータの有無による比較実験の結果（有珠地区）
それぞれ上段はRMS，下段は最大値

(a) 平面位置誤差　(m)

case	A	B	C	D
IM	0.020	1.116	1.465	
	0.031	1.814	1.860	
BF	0.279	0.836	1.346	
	0.420	1.182	1.897	
BG	0.240	0.583	0.462	1.215
	0.371	0.868	0.815	1.754

(b) 標高誤差　(m)

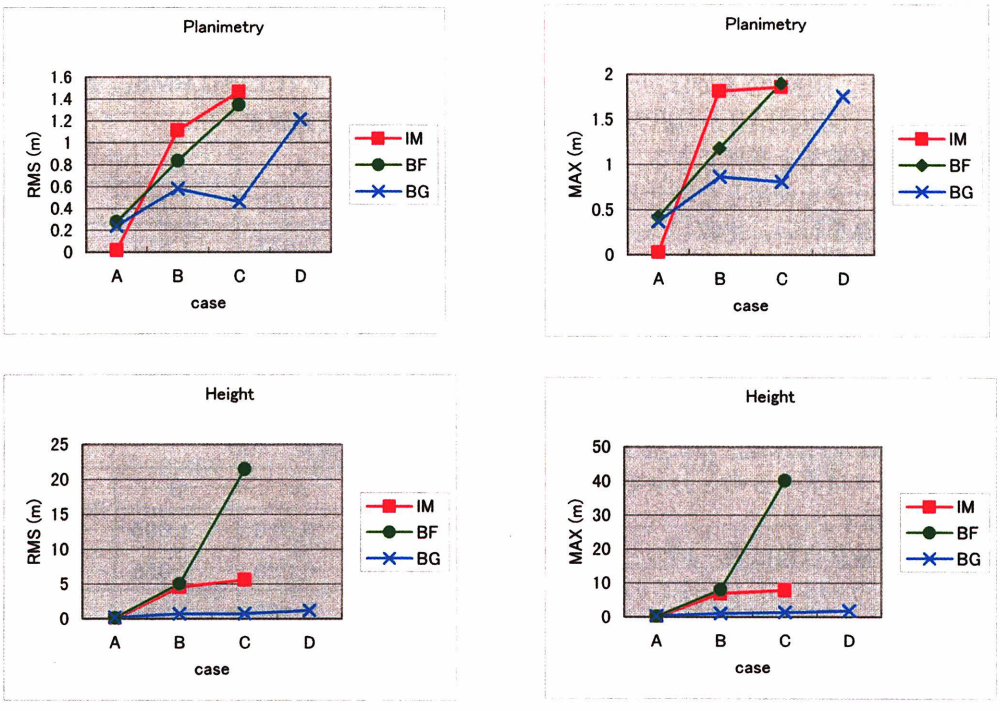
case	A	B	C	D
IM	0.010	4.605	5.644	
	0.020	7.055	7.990	
BF	0.135	4.984	21.455	
	0.196	7.991	40.164	
BG	0.179	0.698	0.732	1.233
	0.337	1.073	1.360	1.887

3．3　結果の考察

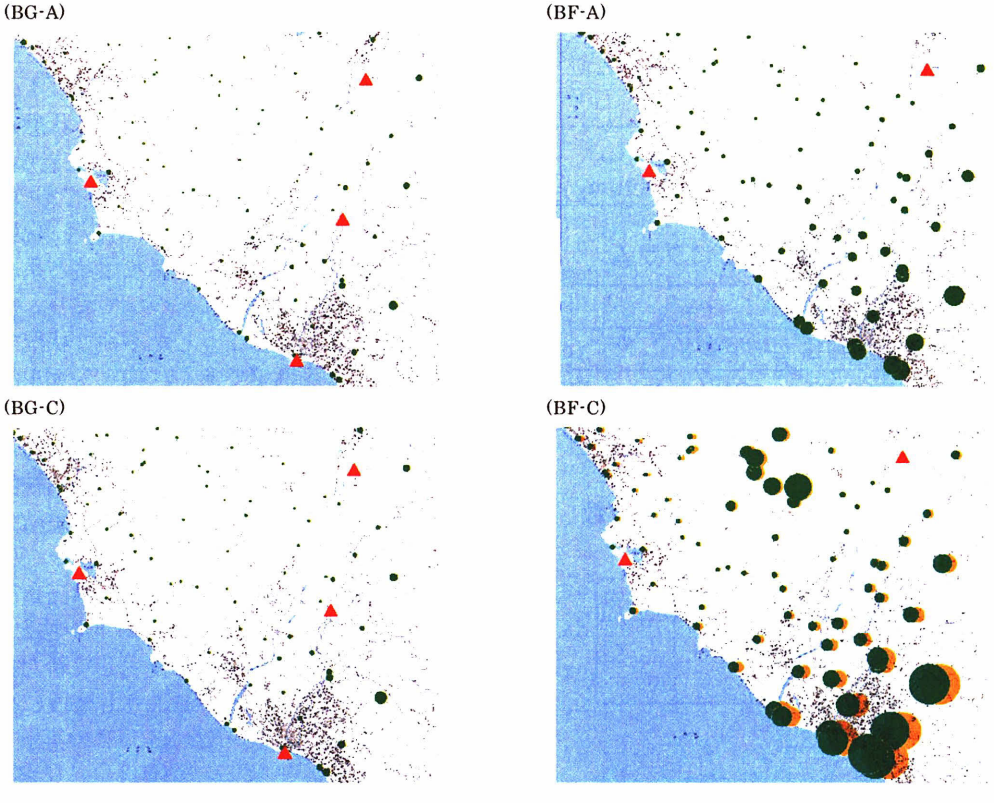
基準点を減らすことは，ブロック調整過程における観測方程式が減るということで，それだけ観測誤差が結果に及ぼす影響が大きくなる。3．1．1の実験で使用した伊豆大島地区の航空写真はかなり状態が悪く，さらに三原山山頂の火口付近は切り立った岩崖となっていて，パスポイント等の観測が非常に困難であった。

このような悪条件においても，観測誤差は増加する。空中三角測量プログラムが偶然誤差と系統誤差を分離できる適切な誤差モデルに基づいており，かつ十分な観測数が与えられれば，こうした不利な状況でも良好な最確値を求められるはずであり，独立モデル法やバンドル法が多項式法（独立ストリップ法）よりも少ない基準点で安定した調整ができるのはこのためである。それでもなお誤差モデルに組み込まれていない系統的誤差があるために，バンドル法等を利用しても調整結果が真値から大きくはずれてしまうことがある。

BINGO-Fに代表されるGPS空中三角測量手法で使われる誤差モデルは，従来のバンドル法と同じであるが，GPSによる投影中心座標を使用して新たな観測方程式を獲得することで，従来手法よりも格段に有利な条件に立つことができる。表－12に3．2の実験のケースA（基準点7点）とケースC（基準点3点）におけるパスポイント残差を，GPSデータを使用した場合（BG）と使用しない場合（BF）で比較した。また，図－4にはケースA及びケースCについてのパスポイント残差の分布図を示した。これらを見て分かるとおり，基準点が比較的多いケースAでは，航空機GPSデータの利用の有無はBINGO-F



図－3　GPSデータの有無による比較実験の結果（有珠地区）



図－4　パスポイント残差分布図
平面位置残差0.2m，標高残差0.4mの見本
（BG－A）ケースA，GPSあり　（BF－A）ケースA，GPSなし
（BG－C）ケースC，GPSあり　（BF－C）ケースC，GPSなし

の調整能力にはあまり影響しない。

しかし，基準点が少ないケースCでは，GPSによる投影中心を利用する効果がはっきりと表れ，パスポイント調整残差に大きな差が出ている。

表－12　パスポイント残差の比較（有珠地区）

Method	BF		BG	
Case	A	C	A	C
Control Points	7	3	7	3
Planimetry (s.d)	0.06	0.19	0.05	0.12
Planimetry (max)	0.25	0.93	0.18	0.43
Height (s.d.)	0.57	6.51	0.39	0.53
Height (max)	1.25	27.20	0.66	0.89

4．基準点なし空中三角測量実験

4．1　基準点なし空中三角測量の問題点

地上基準点（対空標識）を使わない空中三角測量は，GPSの空中三角測量への応用が提唱された当初から可能性が示されていた（Lucas，1987）。Shift-Drift法によるGPS空中三角測量では，コースごとのShift-Driftパラメータを決定するため4隅の基準点とクロスストリップが不可欠であったが，CPAS法では，この問題が解消されている。それ以外に地上基準点がない場合に問題になるのは，国家測地系への座標変換及びジオイド高補正である。

絶対標定のための基準点として航空機GPSによる投影中心座標のみを用いる場合，一次成果として得られる標定点座標は，GPSの準拠するWGS84地球重心座標である。国家測地系に基づく地図作成や公共測量のためには，WGS84からの座標変換が必要となる。日本の場合，現行の国家測地系（ベッセル楕円体準拠）の内包する歪みのためWGS84測地系との非定常な乖離が大きく，GPS空中三角測量による調整結果は地上の基準点を使って局所的な測地系変換をしなければならない。また周知のごとく，GPSで求められる3次元座標のZ値は楕円体高（準拠楕円体面からの高さ）であって，標高ではない。航空機GPSデータのみによる調整結果は楕円体高で求められるため，ジオイド高を補正して標高に直す必要がある。

日本では全国を覆う精密なジオイド高データ（JGEOID96）と変換プログラムが整備されているので，非常に精度良く標高に変換することが可能だが，ジオイド面の傾斜が急な地区では補正誤差が大きくなるおそれがある。

4．2　実験方法

2001年6月，国会で測量法の改正法案が可決され，向こう1年以内に測量の基準として世界測地系を採用することになった。世界測地系をITRF94に準拠して実現したものを日本測地系2000と名づけているが，この新しい測地系はWGS84と実質上同一で，GPS測量による座標値がほぼそのまま改訂後の基準点成果（測地成果2000）と地図作成に必要な精度の範囲で整合する（例：http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/datum/tokyodatum.html参照）。

今回，地上基準点を使わない空中三角測量がどの程度有効かを見るため，日本測地系2000およびJGEOID96に基づく検証点成果（基準点なし実験用検証点成果）をあらかじめ作成しておき，3．2の実験と同じデータを使用して地上基準点を使わない空中三角測量を実施し，調整結果と比較した。この実験における調整計算手順は以下の通りである。

1) 検証点7点について，日本測地系2000およびJGEOID96に基づくUTM座標を計算。
2) GPS基線解析プログラムGEONAPにより航空機GPSデータの基線解析，各写真投影中心のUTM座標（WGS84，楕円体高）計算。各点におけるUTM縮尺係数により，Z座標を補正。
3) BINGO-Fによる基準点なしブロック調整。初期値として，検証点3点の大まかな座標値（1kmオーダー）を入力。検証点7点を求点とし，調整計算結果と同時にUTM座標出力（WGS84，楕円体高）。
4) 出力した検証点のZ座標をJGEOID96により標高に変換。その結果と1)の座標を比較。

4．3　実験結果

上記の方法で実験を行った結果，基準点なし空中三角測量の調整結果として，表－13を得た。この値は，基準点なし実験用検証点成果と調整結果の格差のRMS及び最大値を表す。

この結果を見ると，基準点なし空中三角測量の精度は良好とは言えない。特に，各検証点の格差を調べると，水平方向に明らかなシフトが見られた。GPS解析計算の誤差，写真座標の観測誤差などを吟味し，原因を特定する必要がある。

表－13　基準点なし実験の検証点格差

	平面位置誤差(m)	標高誤差(m)
RMS	2.73	1.44
MAX	3.44	2.39

5．まとめ

実験結果より，従来要求されていたものと比較して，基準点数が格段に少ない状況下で，GPS基線解析を組み込んだ空中三角測量理論の効果が現れることが確認された。特にCPAS法の使用が有効であることがわかった。ただし，この実験事例を検討する際に以下の点に留意する必要がある。

1) 本研究における実験データは，いずれも検証点数が非

常に少ない。本来は数十点～百点以上の検証点を設けて較差の分布や系統誤差を検証すべきである。

2) この実験では，撮影及び室内作業（点刻，観測など）において，あくまで現在一般に行われている空中三角測量の作業手順を踏襲している。BINGO-Fマニュアル（GIP，1998）では写真座標の観測誤差の影響を極力少なくするため，より緻密なパスポイント配置などが勧められているが，今回はそれには則していない。

3) 3つの実験によって，CPAS法による調整計算の安定性は確かめられた。しかし，3．1．1の実験での検証点較差や調整残差は全体的に大きめであった（標準偏差で対地高度の0.03％程度）。原因の一つとして，航空機GPSデータのキネマティック解析に使用した地上基準局と撮影区域の距離が平均約50km程度とかなり遠かったことが考えられる。また，2周波方式の受信機を使用すればよりよい精度が得られる可能性もある（Kruck，1999）。

4) 基準点なし空中三角測量の実験では，今回のデータでは実用的な精度を得ることができなかった。誤差要因を検討し，さらに検証を重ねる必要がある。

本研究から，基準点4点を使用したCPAS法による空中三角測量の実用が見込めると考えられる。最適な適用方法を決定するために，さらなる研究が必要であろう。さらに，効果的で信頼性のある調整結果の精度検査のための手順を考える必要がある。

さらに，CPAS法は斜め写真やCCDセンサーのデータにも適用することができると期待される。

また，公共測量にCPAS法を適用するには，公共測量作業規程中のいくつかの制限－航空カメラの撮影角度や地上基準点の数など－を見直す必要がある。

参考文献

Frieβ, P.（1991） Aerotriangulation with GPS-methods, Experience, Expectation., Proceedings of the 42. Photogrammetric Week at Stuttgart Univarsity, 43-49

GIP：Gesellschaft für Indusriephotogrammetrie（1998） BINGO-F 4.0 User's Manual

長谷川博幸，福島芳和，山根清一，阿久津修（1999）GPS空中三角測量，APA，72-2，8-27

Kruck, E.（1998） Tsukuba and Kanazawa Bundle block adjustment with BINGO-F Rev.4.0 Including kinematic GPS positioning., Internal Work Report of verification projects.

Kruck, E.（1999） Results of Bundle Adjustment with BINGO-F Toyonaka I + II, Work Report by Gesellschaft für Industriephotogrammetrie.

久保紀重（1994） GPSを利用した空中三角測量について，国土地理院時報，79，15-21

Lucas, J. R.（1987） Aerotriangulation without Ground Control, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 53（3), 311-314

Urabe, B., Noguchi, M., Koarai M.（2001） Evaluation of Combined Phase Ambiguity Solution Method on GPS Assisted Aerial Triangulation，写真測量とリモートセンシング，40-4，37-44