

# 第1章

## RTK-GPSの原理と応用

Principle and Practice of RTK-GPS

浪江 宏宗 (防衛大学校)

### 1.1 はじめに

本章では、RTK-GPSの測位原理について、筆者が実際に取得したデータを交えて詳述する。まず、図1.1にRTK-GPSの構成概念図を示す。RTK-GPSの主な構成要素は、既知位置に設置した固定基準局 (Reference Station, Base Station 以下基準局と記述する)、データ伝送システム、および利用者局 (ユーザ局: User Station, 移動局: Remote Station, Rover Station) である。既知の固定点に設置された基準局の受信機では、常時可視GPS衛星からの電波を受信し、搬送波位相の積算値データ (Carrier Phase 以下、搬送波位相データ) を測定する。そして、それらのデータを含む測位用データを利用者局に伝送する。利用者局でも同様に搬送波位相を測定し、基準局から伝送されてきた測位用データと共に使用して、利用者局の三次元位置が求められる。

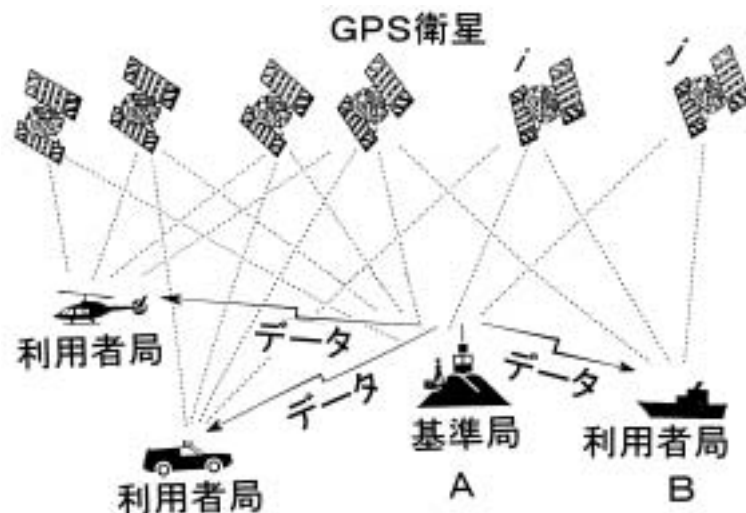


図 1.1: RTK-GPS の構成概念図

GPS 受信機で取得したデータは、衛星からの搬送波の、波数を単位とした位相データである。そこで、まず搬送波位相データについて述べる。次に、mm オーダの高精度測距を実現する、搬送波の一重位相差および二重位相差について記述する。そして、搬送波位相データのアンビグイティ (Ambiguity<sup>1</sup>) および RTK-GPS の測位計算について述べる。さらに、最後に RTK-GPS 測位の幾何学的な解釈について記述する。

<sup>1</sup> 整数値バイアス。搬送波位相データを測距に使用したときに、必然的に発生する搬送波長の整数倍の位相不明確量。

## 1.2 搬送波位相データおよび位相差

### (1) 搬送波位相の積算値データ

RTK-GPS では衛星からの搬送波位相積算値データを用いて測位計算を行う。電離層や対流圏等による誤差、および受信系の S/N 比等による搬送波位相データの観測の偶然誤差を無視すると、受信機 A で測定された衛星 i からの搬送波位相データ  $\phi_{iA}$  は、式 (1.1)<sup>(1)</sup> で表される。

$$\phi_{iA} = \frac{f}{c} r_{iA} + d_i + \delta_A + N_{iA} \quad (1.1)$$

ただし、

$f$	:	搬送波周波数
$c$	:	光速
$r_{iA}$	:	GPS 受信機アンテナ A と衛星 i 間の真の距離
$d_i$	:	衛星 i の時計誤差による搬送波位相データの誤差
$\delta_A$	:	受信機 A の内部時計誤差による搬送波位相データの誤差
$N$	:	アンビギュイティ ( 整数値 )

である。

図 1.2 に実際に NovAtel Inc. 社製 GPS 受信機 RT-20 ( 以下 NovAtel RT-20 ) から得た、搬送波位相データの一部を時系列で示す。同図には複数の衛星から同時に得たデータを一括して示した。搬送波位相データの増減は緩やかであるように見える。しかし、縦軸は搬送波の波数を単位として  $10^7$  のオーダーであり、大きく増減していることが分かる。

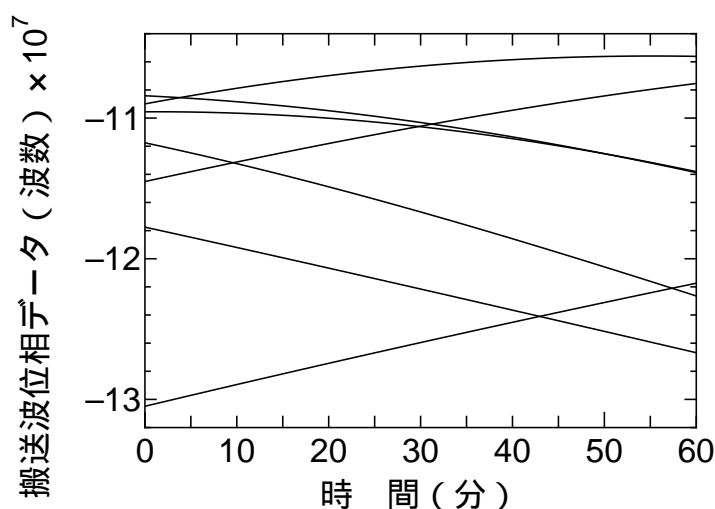


図 1.2: 搬送波位相データの時系列 ( 複数衛星 )

次に、図 1.3 に SA による搬送波位相積算値データの、揺らぎ誤差の一例を時系列で示す。同図から、平均 60 m 程度の振幅で変動していることが分かる。同データは、2000 年 5 月の SA 解除前に取得したものであるため、SA の影響が出ている。SA は衛星内の基準発振器の位相に対して施されていることが分かる。SA 解除後のデータでは、まだ解析していない。

### (2) 衛星間一重位相差

次に、ある時刻に GPS 受信機 A で受信している衛星群中の 2 機を、それぞれ衛星 i、および j とする。また、測定された搬送波位相データをそれぞれ  $\phi_{iA}$ 、 $\phi_{jA}$  とすると、受信機 A に対する搬送

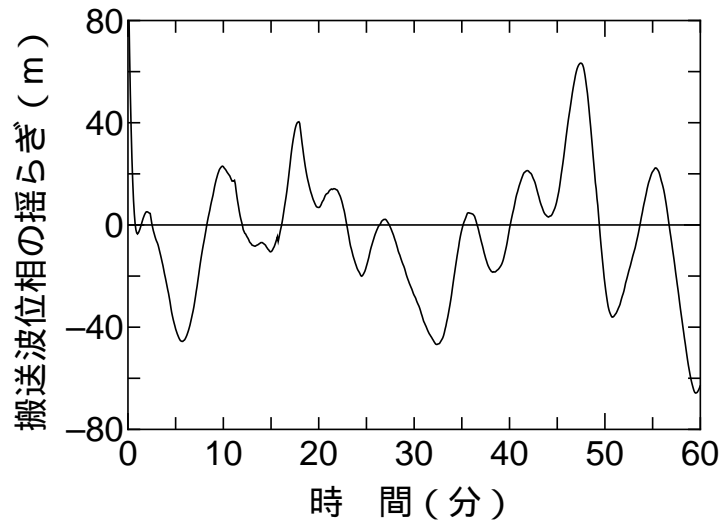


図 1.3: 搬送波位相データの揺らぎ誤差の時系列

波位相データの衛星間一重位相差  $D\phi_{ijA}$  は、

$$D\phi_{ijA} = \phi_{jA} - \phi_{iA} \quad (1.2)$$

で表される。2つの搬送波位相データ  $\phi_{iA}, \phi_{jA}$  に共通して含まれていた、受信機の時計の誤差による搬送波位相誤差が、この処理によって完全に消去される。しかし、衛星の時計の誤差による位相誤差は残る。

(3) 受信機間一重位相差

ある時刻に、受信機 A, B でそれぞれ測定した衛星  $i$  からの搬送波位相データを  $\phi_{iA}, \phi_{iB}$  とすると、衛星  $i$  に対する搬送波位相データの受信機間一重位相差  $D\phi_{iAB}$  は、

$$D\phi_{iAB} = \phi_{iB} - \phi_{iA} \quad (1.3)$$

で表される。2つの搬送波位相データ  $\phi_{iA}, \phi_{iB}$  に共通して含まれていた、衛星内部の時計誤差による位相誤差が、この計算により完全に消去される。しかし、GPS 受信機内部の時計誤差による位相誤差は残る。

(4) 二重位相差

ある時刻に、衛星  $i$  と  $j$  の搬送波位相データを、それぞれ A, B 2 台の GPS 受信機で測定する。このとき、各受信機で測定された衛星  $i$  からの搬送波位相を  $\phi_{iA}, \phi_{iB}$  し、衛星  $j$  からの搬送波位相データを  $\phi_{jA}, \phi_{jB}$  とすると、搬送波位相データの二重位相差  $DD\phi_{ijAB}$  は式 (1.4)<sup>(1)</sup> のようになる。

$$\begin{aligned} DD\phi_{ijAB} &= (\phi_{jB} - \phi_{jA}) - (\phi_{iB} - \phi_{iA}) \\ &= (\phi_{jB} - \phi_{iB}) - (\phi_{jA} - \phi_{iA}) \end{aligned} \quad (1.4)$$

ここで、GPS 受信機内部の時計誤差、および衛星内部の時計の誤差による位相誤差、SA による位相誤差、さらに電離層や対流圏に起因する位相誤差が消去される。衛星  $i, j$  と点 A の位置が既知なので、 $DD\phi_{ijAB}$  を求めることができれば  $\phi_{jB} - \phi_{iB}$ 、すなわち未知の点 B から衛星  $i, j$  までの距離差に関連した値<sup>2</sup> が測定できる。以上のように、RTK-GPS では二重位相差の処理を行うことで、SA 等による搬送波位相誤差を消去して、mm オーダの高精度測距を実現している。

<sup>2</sup> 整数値アンビギュイティを決定できれば距離差と同義

図 1.4 に前述の搬送波位相データを使用して計算した、二重位相差の一例を時系列で示す。同図のように二重位相差はサイクルスリップ<sup>3</sup>が発生していなければ、1 波長以上の位相のジャンプはなく、連続的に変化する。

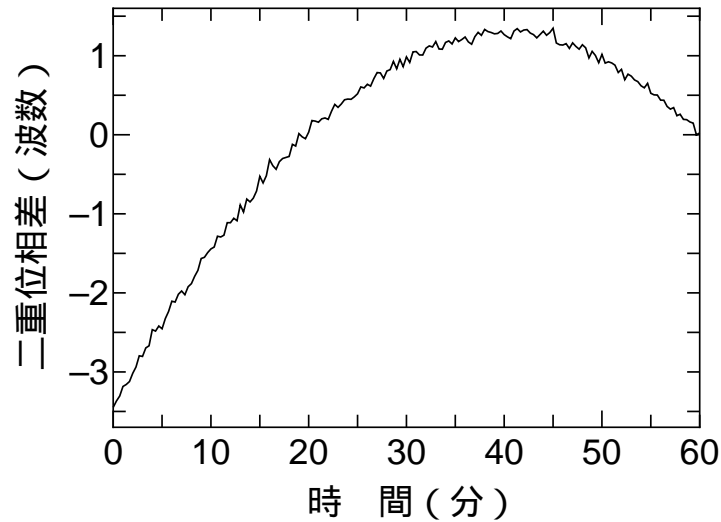


図 1.4: 二重位相差の時系列

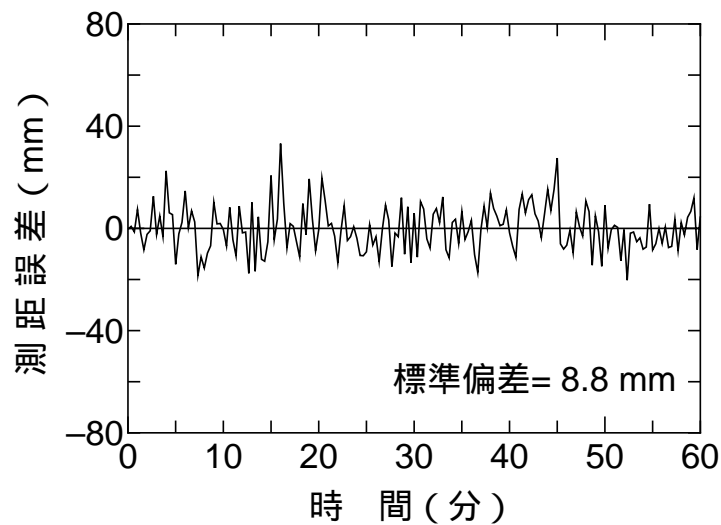


図 1.5: 二重位相差の測距誤差時系列

さらに、図 1.5 にこの二重位相差の回帰曲線からの残差、すなわち、ランダムな測距誤差の一例を時系列で示す。同図より、二重位相差の計算によって相殺されなかったランダムな誤差は、回帰曲線に対して標準偏差が 8.8 mm 程度であることが分かる。これが NovAtel RT-20 を使用した場合の、搬送波位相データによる測距精度であるといえる。この値に DOP<sup>4</sup> 値を乗じたものが、RTK-GPS の測位精度の性能限界となる。

<sup>3</sup> Cycle slip: 衛星からの電波が遮断されることにより、アンビギュイティの値が変わること。

<sup>4</sup> Dilution of Precision: 衛星配置にのみ依存する測位精度劣化指数







ると次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned}
 \alpha_{i,n}(0) &= \frac{\partial r_{1iB,n}(0)}{\partial x_{B,n}(0)} \\
 &= \frac{x_{B,n}(t) - x_1(0)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_1(0))^2 + (y_{B,n}(t) - y_1(0))^2 + (z_{B,n}(t) - z_1(0))^2}} \\
 &= \frac{x_{B,n}(t) - x_i(0)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_i(0))^2 + (y_{B,n}(t) - y_i(0))^2 + (z_{B,n}(t) - z_i(0))^2}} \\
 \beta_{i,n}(0) &= \frac{\partial r_{1iB,n}(0)}{\partial y_{B,n}(0)} \\
 &= \frac{y_{B,n}(t) - y_1(0)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_1(0))^2 + (y_{B,n}(t) - y_1(0))^2 + (z_{B,n}(t) - z_1(0))^2}} \\
 &= \frac{y_{B,n}(t) - y_i(0)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_i(0))^2 + (y_{B,n}(t) - y_i(0))^2 + (z_{B,n}(t) - z_i(0))^2}} \\
 \gamma_{i,n}(0) &= \frac{\partial r_{1iB,n}(0)}{\partial z_{B,n}(0)} \\
 &= \frac{z_{B,n}(t) - z_1(0)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_1(0))^2 + (y_{B,n}(t) - y_1(0))^2 + (z_{B,n}(t) - z_1(0))^2}} \\
 &= \frac{z_{B,n}(t) - z_i(0)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_i(0))^2 + (y_{B,n}(t) - y_i(0))^2 + (z_{B,n}(t) - z_i(0))^2}} \\
 \alpha_{i,n}(t) &= \frac{\partial r_{1iB,n}(t)}{\partial x_{B,n}(t)} \\
 &= \frac{x_{B,n}(t) - x_1(t)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_1(t))^2 + (y_{B,n}(t) - y_1(t))^2 + (z_{B,n}(t) - z_1(t))^2}} \\
 &= \frac{x_{B,n}(t) - x_i(t)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_i(t))^2 + (y_{B,n}(t) - y_i(t))^2 + (z_{B,n}(t) - z_i(t))^2}} \\
 \beta_{i,n}(t) &= \frac{\partial r_{1iB,n}(t)}{\partial y_{B,n}(t)} \\
 &= \frac{y_{B,n}(t) - y_1(t)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_1(t))^2 + (y_{B,n}(t) - y_1(t))^2 + (z_{B,n}(t) - z_1(t))^2}} \\
 &= \frac{y_{B,n}(t) - y_i(t)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_i(t))^2 + (y_{B,n}(t) - y_i(t))^2 + (z_{B,n}(t) - z_i(t))^2}} \\
 \gamma_{i,n}(t) &= \frac{\partial r_{1iB,n}(t)}{\partial z_{B,n}(t)} \\
 &= \frac{z_{B,n}(t) - z_1(t)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_1(t))^2 + (y_{B,n}(t) - y_1(t))^2 + (z_{B,n}(t) - z_1(t))^2}} \\
 &= \frac{z_{B,n}(t) - z_i(t)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_i(t))^2 + (y_{B,n}(t) - y_i(t))^2 + (z_{B,n}(t) - z_i(t))^2}}
 \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

これらは、適当に与えた利用者局の初期位置、および最小自乗法の逐次計算の途中段階における利用者局の位置に対して、 $x$ ,  $y$ ,  $z$  成分別に、それぞれの変化が距離差にどの程度の影響を及ぼすかを示すものである。



そして、行列  $A_n(t)$  を次のように定める。

$$A_n(t) = \begin{pmatrix} \alpha_{2,n}(0) & \beta_{2,n}(0) & \gamma_{2,n}(0) & \frac{c}{f} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \alpha_{3,n}(0) & \beta_{3,n}(0) & \gamma_{3,n}(0) & 0 & \frac{c}{f} & 0 & & \vdots \\ \alpha_{4,n}(0) & \beta_{4,n}(0) & \gamma_{4,n}(0) & 0 & 0 & \frac{c}{f} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ \alpha_{s,n}(0) & \beta_{s,n}(0) & \gamma_{s,n}(0) & 0 & \cdots & \cdots & 0 & \frac{c}{f} \\ \alpha_{2,n}(t) & \beta_{2,n}(t) & \gamma_{2,n}(t) & \frac{c}{f} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \alpha_{3,n}(t) & \beta_{3,n}(t) & \gamma_{3,n}(t) & 0 & \frac{c}{f} & 0 & & \vdots \\ \alpha_{4,n}(t) & \beta_{4,n}(t) & \gamma_{4,n}(t) & 0 & 0 & \frac{c}{f} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ \alpha_{s,n}(t) & \beta_{s,n}(t) & \gamma_{s,n}(t) & 0 & \cdots & \cdots & 0 & \frac{c}{f} \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

さらに、最小自乗法により次のような行列計算を行うと、それぞれのパラメータの修正量が計算できる。

$$(A_n(t)^T A_n(t))^{-1} A_n(t)^T B_n(t) = \begin{pmatrix} \Delta x_{B,n}(t) \\ \Delta y_{B,n}(t) \\ \Delta z_{B,n}(t) \\ \Delta N_{12AB,n}(t) \\ \Delta N_{13AB,n}(t) \\ \Delta N_{14AB,n}(t) \\ \vdots \\ \Delta N_{1sAB,n}(t) \end{pmatrix} \quad (1.16)$$

式 (1.6) から式 (1.16) までを、例えば  $\Delta x_{B,n} \leq 0.01$  cm,  $\Delta y_{B,n} \leq 0.01$  cm,  $\Delta z_{B,n} \leq 0.01$  cm となるまで繰り返すことにより、1 エポックの測位計算が完了する。以上の逐次計算で求められるものは、xyz 三次元直交座標系における利用者局位置  $(x_B, y_B, z_B)$  である。したがって、さらにこれを日常私達が使用している、地球上の緯度、経度、および高さの座標系に変換する必要がある。しかし、ここではこの問題には触れない。

## 1.4 アンビギュイティ

次に、アンビギュイティについて詳述する。

真のアンビギュイティは搬送波波長の整数倍となり、整数値バイアスとも呼ばれる。しかし、前述の計算で求めた値は整数とはならず、エポック毎に値の変化する実数となるので、この解を FLOAT 解という。FLOAT 解は整数値アンビギュイティを求める過程において、アンビギュイティを実数値で測位計算を行うもので、測位結果にはアンビギュイティの決定誤差が含まれる。

図 1.6 に前述の測位計算アルゴリズムを使用して計算を行い、同時に求めたアンビギュイティの一例を時系列で示す。なお、二重位相差の計算に使用した衛星間の直線距離が最も近い場合を (a)、最も遠い場合 (b) としてそれぞれ示す。それぞれ時間の経過と共に、ある整数値に収束してゆく様子が分かる。

収束するまでに要する時間は異なったが、他の二重位相差のアンビギュイティも、同様にある整数値に収束した。

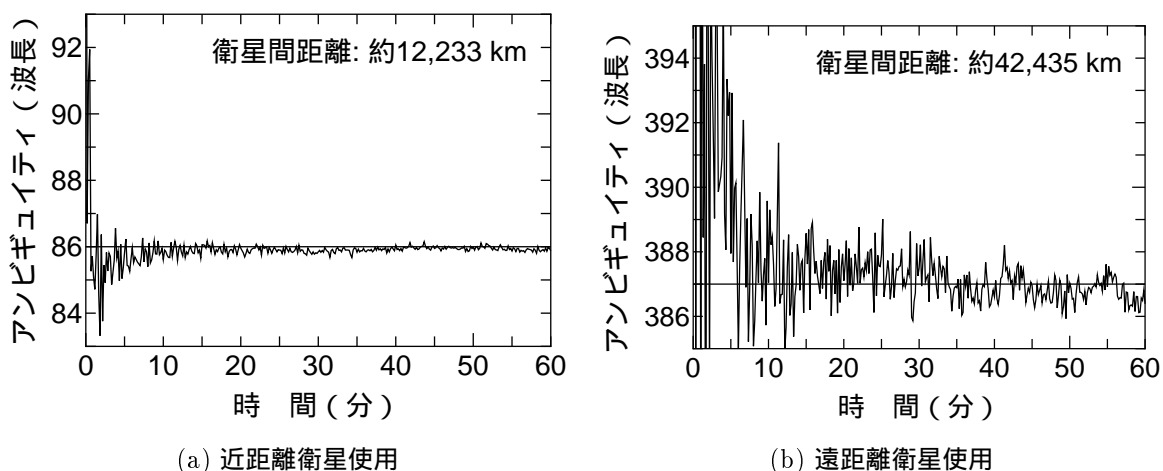


図 1.6: アンビギュイティの収束状況

図 1.7 に二重位相差の計算に使用した 2 衛星間の直線距離と、アンビギュイティの標準偏差との関係を示す。同図から、衛星間の直線距離が短いほど、標準偏差が小さいことが分かる。この原因は、使用している衛星同士の距離が近いほど、電波の伝送路中の電離層、および対流圏の影響が同程度であり、二重位相差によって相殺される割合が高いためであると考えられる。

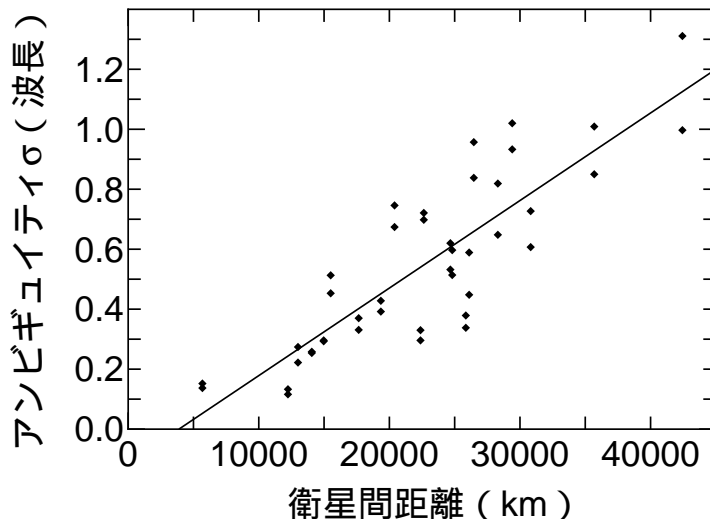


図 1.7: アンビギュイティの標準偏差と衛星間距離

FLOAT 解のままでは、測位結果にアンビギュイティの決定誤差が含まれる。そこで、求めたこの値を整数化する必要がある。整数化にあたっては、最も簡単な方法は四捨五入することである。しかし、実数値のアンビギュイティの標準偏差が大きい場合には、この方法は適当ではない。一般的には、アンビギュイティの平均値と、標準偏差から判断して、可能性のある整数値の、幾つかの組み合わせを仮定する。次に、最小自乗法の残差を計算して、その残差を最も小さくする組み合わせを、真の整数値のアンビギュイティとする方法が考えられる。

サイクル スリップが発生しなければ、アンビギュイティの値は変化しないという性質がある。これ



ような行列  $B_n(t)$  を次のように定める。

$$B_n(t) = \begin{pmatrix} \left\{ \frac{c}{f}(DD\phi_{12AB}(t) - N_{12AB,n}) + r_{12A}(t) \right\} & - & r_{12B,n}(t) \\ \left\{ \frac{c}{f}(DD\phi_{13AB}(t) - N_{13AB,n}) + r_{13A}(t) \right\} & - & r_{13B,n}(t) \\ \left\{ \frac{c}{f}(DD\phi_{14AB}(t) - N_{14AB,n}) + r_{14A}(t) \right\} & - & r_{14B,n}(t) \\ & \vdots & \vdots \\ \left\{ \frac{c}{f}(DD\phi_{1sAB}(t) - N_{1sAB,n}) + r_{1sA}(t) \right\} & - & r_{1sB,n}(t) \end{pmatrix} \quad (1.19)$$

また、利用者局の近似位置  $(x_{B,n}(t), y_{B,n}(t), z_{B,n}(t))$  に対する修正値を、それぞれ  $\Delta x_{B,n}(t), \Delta y_{B,n}(t), \Delta z_{B,n}(t)$  とすると、両者の関係は式 (1.12) のようになる。

次に、式 (1.9) から概略の利用者局位置から見た、衛星へ向かう視線の方向余弦の差の、各 xyz 座標成分である  $\frac{\partial r_{1sB,n}(t)}{\partial x_{B,n}(t)}, \frac{\partial r_{1sB,n}(t)}{\partial y_{B,n}(t)}, \frac{\partial r_{1sB,n}(t)}{\partial z_{B,n}(t)}$  を計算すると、次式ようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{s,n}(t) = \frac{\partial r_{1sB,n}(t)}{\partial x_{B,n}(t)} \\ = \frac{x_{B,n}(t) - x_1(t)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_1(t))^2 + (y_{B,n}(t) - y_1(t))^2 + (z_{B,n}(t) - z_1(t))^2}} \\ \quad \frac{x_{B,n}(t) - x_s(t)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_s(t))^2 + (y_{B,n}(t) - y_s(t))^2 + (z_{B,n}(t) - z_s(t))^2}} \\ \beta_{s,n}(t) = \frac{\partial r_{1sB,n}(t)}{\partial y_{B,n}(t)} \\ = \frac{y_{B,n}(t) - y_1(t)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_1(t))^2 + (y_{B,n}(t) - y_1(t))^2 + (z_{B,n}(t) - z_1(t))^2}} \\ \quad \frac{y_{B,n}(t) - y_s(t)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_s(t))^2 + (y_{B,n}(t) - y_s(t))^2 + (z_{B,n}(t) - z_s(t))^2}} \\ \gamma_{s,n}(t) = \frac{\partial r_{1sB,n}(t)}{\partial z_{B,n}(t)} \\ = \frac{z_{B,n}(t) - z_1(t)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_1(t))^2 + (y_{B,n}(t) - y_1(t))^2 + (z_{B,n}(t) - z_1(t))^2}} \\ \quad \frac{z_{B,n}(t) - z_s(t)}{\sqrt{(x_{B,n}(t) - x_s(t))^2 + (y_{B,n}(t) - y_s(t))^2 + (z_{B,n}(t) - z_s(t))^2}} \end{array} \right. \quad (1.20)$$

そして、行列  $A_n(t)$  を次のように定める。

$$A_n(t) = \begin{pmatrix} \alpha_{2,n}(t) & \beta_{2,n}(t) & \gamma_{2,n}(t) & 1.0 \\ \alpha_{3,n}(t) & \beta_{3,n}(t) & \gamma_{3,n}(t) & 1.0 \\ \alpha_{4,n}(t) & \beta_{4,n}(t) & \gamma_{4,n}(t) & 1.0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{s,n}(t) & \beta_{s,n}(t) & \gamma_{s,n}(t) & 1.0 \end{pmatrix} \quad (1.21)$$

さらに、最小自乗法により、次のような行列計算を行う。すると、それぞれのパラメータの修正量が

計算できる。

$$(\mathbf{A}_n(t)^T \mathbf{A}_n(t))^{-1} \mathbf{A}_n(t)^T \mathbf{B}_n(t) = \begin{pmatrix} \Delta x_{B,n}(t) \\ \Delta y_{B,n}(t) \\ \Delta z_{B,n}(t) \\ \Delta Time_{B,n}(t) \end{pmatrix} \quad (1.22)$$

式(1.22)までを、FLOAT解の場合と同様に、例えば  $\Delta x_{B,n} \leq 0.01$  cm,  $\Delta y_{B,n} \leq 0.01$  cm,  $\Delta z_{B,n} \leq 0.01$  cm となるまで繰り返す。以上の過程により、1エポックの測位計算が完了する。

## 1.6 KGPS/RTK-GPS 実例

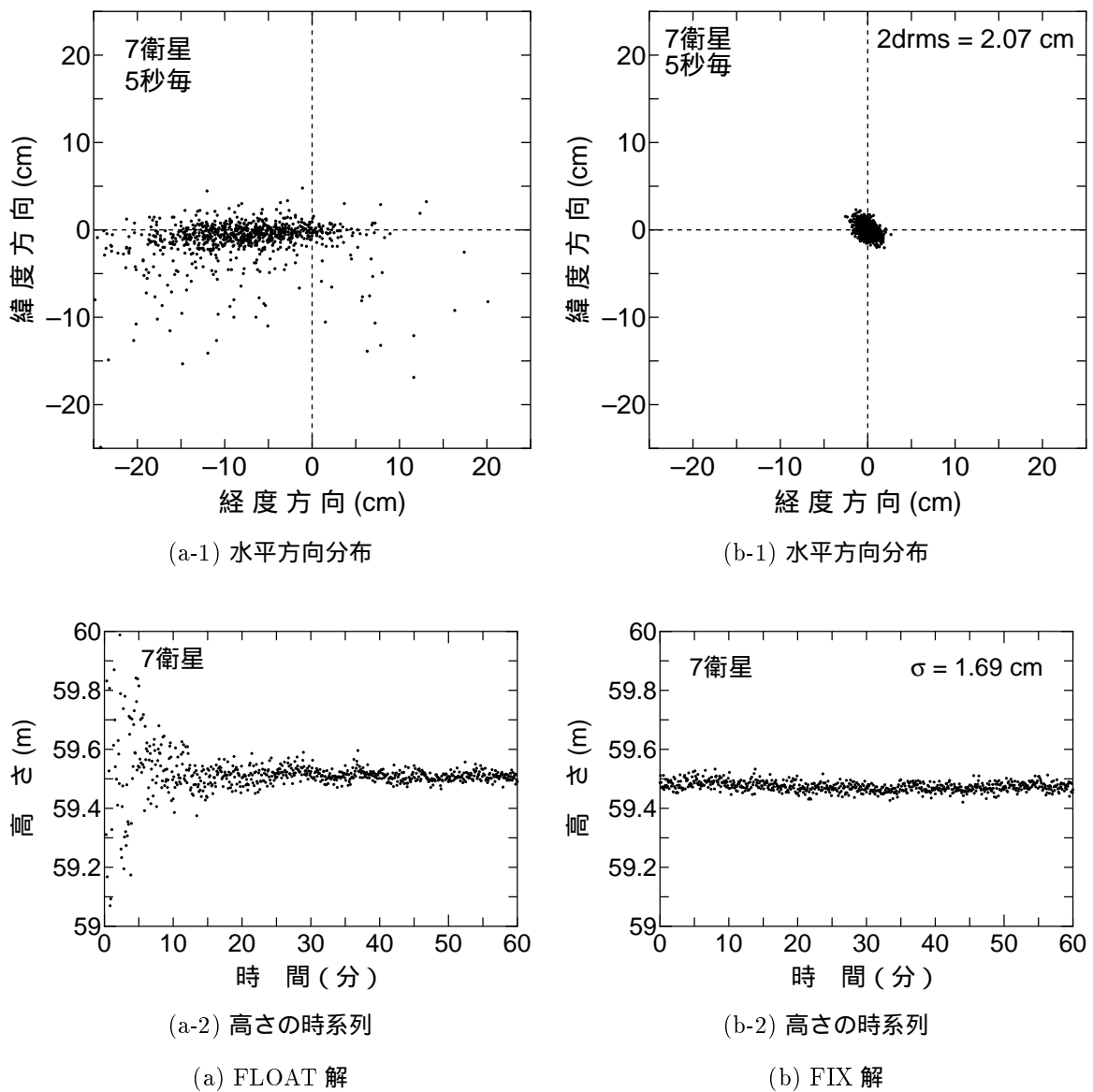


図 1.8: KGPS 測位結果

ここで、実際に計算したFLOAT解と、FIX解の測位精度について考察する。図1.8(a), (b)にFLOAT解、およびFIX解のうち水平方向分布と、高さの時系列の一例をそれぞれ示す。同図はまったく同じ搬

送波位相データを使用して計算したものである。しかし、明かに FLOAT 解より FIX 解の精度が良いことが分かる。また、FLOAT 解は測位計算の開始時には特に精度が悪く、時間の経過と共にある一定の値に収束することが分かる。これは、衛星の移動によって利用者局の位置における「位置の面」の、見掛けの交角が変化し、搬送波位相データの測距誤差の、測位計算への影響が小さくなったためであると考えられる。

次に、RTK-GPS の測位精度の性能限界を調査するために、ゼロベースライン<sup>6</sup>（以下 ZBL と記述する）と基線長 20 m で測位を行った。図 1.9(a), (b) にこのときの測位結果の水平方向分布と、高さ方向の時系列の一例をそれぞれ示す。使用した GPS 受信機は、Trimble Navigation（以下トリンプルと記述する）社製の 4000SSi（以下 Trimble 4000SSi と記述する）である。この測位では、基準局から利用者局への測位用データの伝送は、受信機の入出力ポート同士をケーブルで直結した、最も理想的な状況で行っている。ZBL では、マルチパスが基準局と利用者局の搬送波位相データに全く同じ影響を及ぼすので、二重位相差の計算によって相殺され、マルチパスの影響の無い測位が可能となる。これに対して、基線長 20 m の場合では、( ZBL の精度 ) + ( マルチパス誤差 ) の精度で測位される。

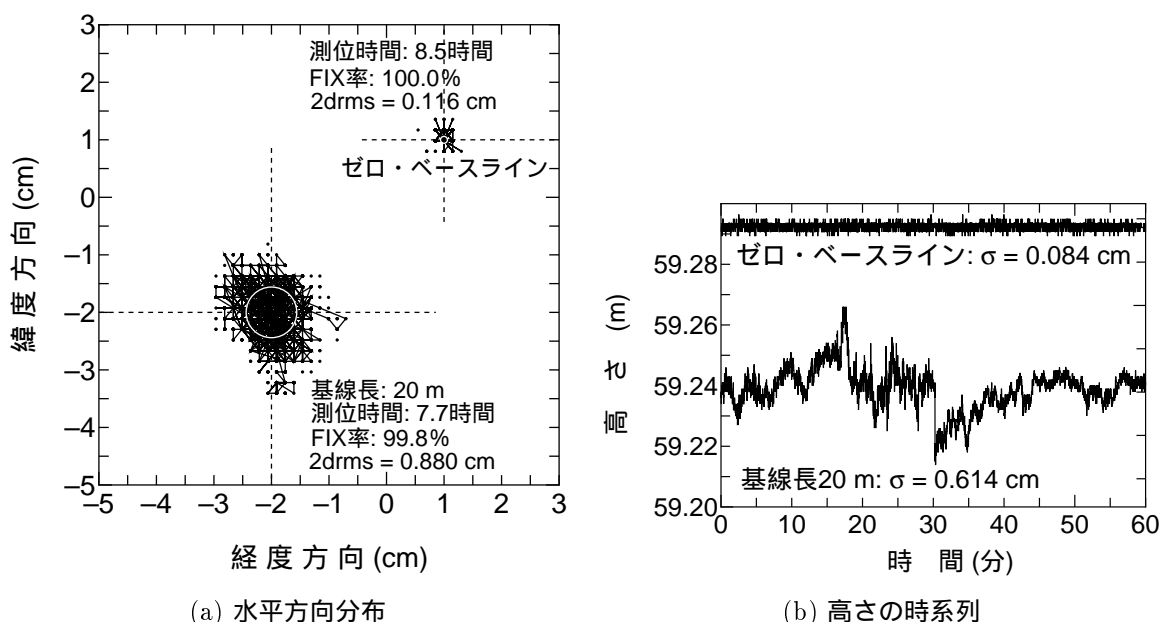


図 1.9: RTK-GPS 測位結果 ( ZBL および基線長 20 m )

表 1.1 にこの測位結果をまとめて示す。ここで、FIX 率とは毎秒の正秒の全測位時間 ( 3,600 回/時間 ) に対する、FIX 解の割合である。2drms と高さの標準偏差は共に mm オーダであり、これが Trimble 4000SSi の測位の性能限界であるといえる。

表 1.1: RTK-GPS 測位結果 ( ZBL )

基線長	測位時間	FIX 率	2drms	高さ標準偏差
ZBL	8.5 時間	100.0 %	0.116 cm	0.084 cm
20 m	7.7 時間	99.8 %	0.880 cm	0.614 cm

<sup>6</sup> Zero base line ( ZBL ): 基準局と利用者局で同一のアンテナを使用して、基線長を 0 としたもの。

## 1.7 RTK-GPS の幾何学的解釈

RTK-GPS の幾何学的にな意味合いについて考察する。

図 1.10 に示すように、RTK-GPS は二重位相差の計算に使用した 2 衛星を焦点とした回転双曲面の、複数組の交点として位置を求める方法である。そこで、まず衛星 1  $(x_1, y_1, z_1)$ 、衛星 2  $(x_2, y_2, z_2)$  を焦点とする回転双曲面の式を求めることからアプローチを試みる。この 2 衛星と、ある点  $(x, y, z)$  との距離差を  $r$  とすると、この距離差が一定であるような点の集合を表す図形の式は、

$$\begin{aligned} F(x, y, z) &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} - r \\ &= 0 \end{aligned} \quad (1.23)$$

となる。この式によって定義される図形は、2 衛星（回転双曲面の焦点となっている）を通る平面で切断した切り口にできる双曲線を、2 衛星を通る直線を回転軸として、その周りに回転させてできる回転面となる。これが回転双曲面体（Hyperboloid）と呼ばれる理由である<sup>(3)</sup>。

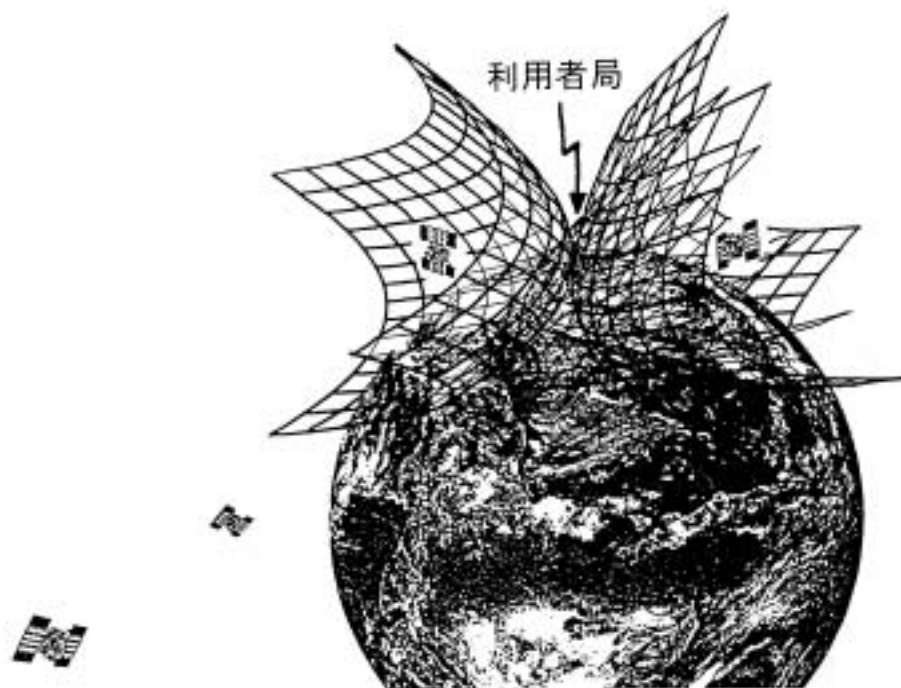


図 1.10: 回転双曲面群の移動

## 1.8 RTK-GPS のデータ伝送フォーマット

RTK-GPS のデータ伝送手段としては、特定小電力無線システムがよく使用される。しかし、通信費用が高価ながら携帯電話回線も使用される。また、最近になってデジタル MCA (Multi-channel Access) 業務用移動体無線通信システムを使用したものも実用化されている。しかし、依然としてデータ伝送システムのメディアとして、伝送に使用可能な周波数割り当てが整っていない状況にある。したがって、データ伝送フォーマットを作成するには、データ量を小さくすることが望ましい。このデータ伝送フォーマットに関しては、現在まで受信機メーカー各社共に独自のものを採用しており、公開されていない状況であった。このように、公表された標準フォーマットが無い状態では、利用者は

異なるメーカーの受信機を混在して使用することができないばかりか、測位結果に対して信頼性を確保することが困難な場合も多い。

RTK-GPSの測位用データのために、RTCM SC-104<sup>7</sup>がバージョン2.1文書中のメッセージタイプ18~21で、伝送フォーマットを定義している<sup>(4)</sup>。受信機がRTCMの規定するRTK-GPSデータに対応していれば、異なるメーカーの受信機を使用してもRTK-GPSが可能である。一方、トリンプルはION GPS-96で、伝送フォーマットCMR<sup>8</sup>を公開した<sup>(5)</sup>。以上のように、異なるメーカーの受信機を混在して使用しても、RTK-GPS測位ができる環境が整備されつつある。データ伝送フォーマットを規格化することの利点は、利用者としても測位用のデータの内容を把握した上で使用することにより、信頼性が向上することである。

#### (1) RTCM SC-104 Ver.2.1

DGPSを手軽に利用するために、データ内容および伝送フォーマット等の規格がSC-104 Ver.2.1で細かく決められており、現在このフォーマットはほぼ世界標準となっている。RTK-GPSに関するデータもType18~21に含まれており、すでにこのフォーマットに準拠したGPS受信機が市販されている。このデータを使用したRTK-GPSをRTCM RTK-GPSと呼ぶことにする。RTCM RTK-GPSではType18, 19に搬送波位相データと、擬似距離測定データの生データの伝送フォーマット等が定義されている。また、データ伝送が不安定な場合、RTK-GPSの測位結果が取得できない可能性があることから、通常のDGPS補正データType1、およびType3も同時に伝送される場合がある。この結果、RTCM RTK-GPS測位では、データ伝送の状況が悪い場合にも測位は中断せず、自動的にDGPS測位に切り替わる設定となっている場合が多い。

表1.2に二周波でType18を使用した場合の、衛星数とデータ量の関係を示す。Type19~21もまったく同様のデータ量である。ここでの1ワードは30ビットである。今後、公表されるVer. 3.0の文書では、実用化に向けたデータ伝送量の少ないフォーマットが公開されると聞いており、世界標準となる可能性が高いと考える。

表 1.2: 衛星数と RTCM Type18 のデータ量

衛星数	ワード数 (words)	ビット数 (bits)
4 機	2+1+4 × 4 機 = 19	19 × 30 = 570
5 機	2+1+4 × 5 機 = 23	23 × 30 = 690
6 機	2+1+4 × 6 機 = 27	27 × 30 = 810
7 機	2+1+4 × 7 機 = 31	31 × 30 = 930
8 機	2+1+4 × 8 機 = 35	35 × 30 = 1,050
9 機	2+1+4 × 9 機 = 39	39 × 30 = 1,170
10 機	2+1+4 × 10 機 = 43	43 × 30 = 1,290
11 機	2+1+4 × 11 機 = 47	47 × 30 = 1,410
12 機	2+1+4 × 12 機 = 51	51 × 30 = 1,530

#### (2) Trimble Navigation CMR

前述の通り、RTCMでは、RTK-GPS測位用データの伝送フォーマットをType18~21に定義しているが、データ量が多いため、9,600 bps以上の伝送速度を実現できるデータ伝送システムを準備する必要がある。したがって、現在までのところ、RTK-GPSのデータ伝送フォーマットは、各メーカーが独自に開発したものを使用しており、初期の段階ではどのメーカーも、そのフォーマットを公表していなかった。しかし、1996年9月、カンザスシティで開催されたION GPS-96において、トリンプル社(Trimble Navigation Co.,Ltd.)は独自のRTK-GPS測位用データ伝送フォーマットであるCMRを公開した。このフォーマットには、メッセージプロトコルだけでなく、デー

<sup>7</sup> Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee No.104 : 米国海上無線技術委員会 第104特別会議

<sup>8</sup> Compact measurement record : コンパクト観測レコード



データの圧縮伸長アルゴリズムが含まれている。これにより、RTCM RTK-GPS データと比較して半分以下のデータ伝送速度 (2,400 bps) で RTK-GPS 測位を実現できるといわれている。

CMR フォーマットの Type1 は、基準局のアンテナ位相中心の ECEF 座標と、そのオフセット量を含んでいる。基準局の状態を記述するパラメータには、基準局も移動することを前提にした「Kinematic」のパラメータが含まれている。つまり、そのような状態での RTK-GPS 測位が可能であることを示唆している。また、GPS 受信機の種類のパラメータに、他社の受信機の種類を記述するスペースがもうけられており、異なるメーカーの受信機による RTK-GPS に対応する準備があることを示している<sup>(5)</sup>。

同一のアンテナに接続した 4000SSi から、同時にそれぞれ 3 時間 25 分収集した平均データ量は、RTCM RTK-GPS データ (Type3, 18, 19, 59) では毎秒およそ 3.9 kbit/秒 (1 セット) であった。これに対して、CMR では約 1/4 の 1.0 kbit/秒 (1 セット) 程度であった。したがって、CMR に要求される回線のデータ伝送性能は、RTCM RTK-GPS のそれと比較して、低速度で良いことになる。

## 参考文献

- (1) 日本測地学会：「新訂版 - 人工衛星による精密測位システム - 」, 社団法人 日本測量協会, 1989 年 11 月 15 日
- (2) 土屋 淳・辻 宏道：「GPS 測定の基礎」, 社団法人 日本測量協会
- (3) 占部 実・光藤 富士男：「理工系一般教育 代数・幾何教科書」, 共立出版株式会社, 昭和 44 年 3 月 15 日
- (4) Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee No.104, 'RTCM Recommended Standards for Differential Navstar GPS Service Version 2.1', RTCM Paper194-93/SC104-STD, Washington,D.C., JANUARY 3 (1994)
- (5) Dr.Nicholas, C.Talbot, 'Compact Data Transmission Standard for High-Precision GPS', PROCEEDING OF THE 9TH INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION ION GPS-96 PART 1 OF 2, pp.861-871