

出張報告：南太平洋域における衛星回線による宇宙測地データのTCP/IP 伝送実験

-平成 15 年度実験：衛星ルータによる GPS、及び VLBI データの伝送速度評価-

通信総合研究所鹿島宇宙通信研究センター宇宙電波応用G 市川隆一 [richi@crl.go.jp]

平成 16 年 2 月 23 日 10:57am

1 目的

VLBI による地球姿勢決定観測の高精度化を握るカギの一つとして南北両半球をまたぐ基線での観測がある。しかしながら、わが国の南側に基線を伸ばしたとしても、オーストラリア大陸以外はネットワークインフラも不十分な南太平洋の島嶼国がほとんどであり、e-VLBI の実現まではまだほど遠いのが現状である。そのため、近い将来に小型 VLBI 観測局による実証観測を実施することを念頭に置いた場合、島嶼域などの遠隔地からの TCP/IP データ伝送で必要とされるノウハウを把握することが重要である。そこで、総務省主導の新ポストパートナーズ計画の一環として“南太平洋域における衛星回線による宇宙測地データの準リアルタイム IP 伝送実験報告”の題目で平成 14～16 年度の 3 カ年計画で研究を継続している。

新ポストパートナーズ基地局のあるフィジー共和国は、地球物理学・測地学の観点からも興味深い地域でもある。ここでの VLBI 観測、およびこれと GPS 観測網との結合は、地域の測地基準網高精度化、プレート運動計測によるテクトニクス解明、海水準変動モニターなどの研究にも寄与が期待できる。

今年度については、疑似 Ack 送出により局間遅延の影響を軽減可能な spoofing 機能搭載の衛星ルータ [1] を用いて、日本-フィジー共和国間で GPS、及び VLBI の観測データを TCP/IP 伝送し、データ伝送速度の評価を行う。なお、伝送する GPS データは、実験期間中にフィジー共和国スバ市の南太平洋大学構内において臨時に我々が設置する GPS 点、および同市行政ビルにあるハワイ大学が設置した IGS(International GPS Service)/GPS 点から取得されたデータであり、これらについてはフィジーから通信総合研究所小金井本所新 PP 実験室経由でハワイ大学が設置するサーバーへ ftp 伝送するまでを実験に含めている。

2 実験概要

- 実験場所：小金井本所 3 号館 1 階 PP 実験室、フィジー共和国スバ (SUVA) 市南太平洋大学、同市行政ビル測量局オフィス (その他、鹿島、ハワイ大学にもサーバーが設置されている)
- 衛星通信実験日時：
 - 2004 年 2 月 9 日 04:00 - 06:30(UTC)[13:00-15:30(JST)/16:00-18:30(FST)] 天候：午前晴、午後雨
 - 2004 年 2 月 10 日 01:00 - 04:00(UTC)[10:00-13:00(JST)/13:00-16:00(FST)] 天候：雨
 - 2004 年 2 月 12 日 01:00 - 03:00(UTC)[10:00-12:00(JST)/13:00-15:00(FST)] 天候：雨
 - なお、上記は日本-フィジー間の衛星通信が可能であった時間帯であるが、実験準備とデータ整理にそれぞれの時間帯の前後 2～3 時間程度を要している。

● 実験参加者 (敬称略) :

- 市川隆一 宇宙電波応用G
- 大崎裕生 宇宙電波応用G
- 長谷川晃朗 本所カオス暗号チップP
- 高橋富士信 南太平洋大学 (USP:University of South Pacific, SUVA, Fiji Islands)
- **Eroni Vari and Paserio Samisoni** フィジー政府測量局 (Lands & Survey Dept., SUVA, Fiji Islands)
- **David A. PHILLIPS** ハワイ大学太平洋 GPS 観測研究室 (Pacific GPS Facilities, University of Hawaii, USA)
- **Michael BEVIS** オハイオ州立大学測地学科 (Ohio State University, USA)
- 飯田光元 (社) 電波産業会 (ARIB)
- 村上かおり シモレックス (株)
- 砂走正樹 国際通信企画 (株)
- 松下直史 白山工業 (株)
- 金内隆 日本電気 (株)

3 実験結果

まず、今回の実験の概念図を図 1 に示す。図に示すように、今年度についてはフィジーに設置された GPS 観測局のデータ、および以前取得した VLBI 観測データを衛星回線を用いて TCP/IP 伝送し、そのスループット速度を評価することを主目的とした。また、将来の遠隔地からの測地データの準リアルタイム伝送を念頭に置き、フィジーにおいて観測された GPS データを迅速に衛星回線、および通常のインターネット回線経由でハワイ大学まで伝送することも副次的な目的とした。

今回の実験では、図 2 に示すようなネットワークを構成してデータ伝送を行った。図に示すように、小金井側にネットワークカード 2 枚差しの PC 1 台 (Linux) を用意し、プライベートアドレスで構成される衛星通信系と、小金井から外部へインターネット経由でデータ伝送を行うためのブリッジシステムとした。フィジー側は計 4 台の PC (Windows 系 3 台、及び Linux 1 台) を HUB を介して繋ぎ、それぞれにプライベートアドレスを固定で割り振った。なお、小金井側、フィジー側共に ftp クライアント & サーバーとして機能するように必要なソフトウェアが前もってインストールされている。

小金井ーフィジー間は Superbird C 衛星を介して TCP/IP 接続され、この衛星系は双方向の通信ができるように 2 つのチャンネルを使用した。周波数設定は、表 1 の通りである。この系を構築するにあたって、TCP/IP 伝送のために小金井とフィジーの両局に spoofing 機能搭載の衛星ルータ (図 3) を接続して実験した。この新ルータには spoofing と呼ばれる、疑似 Ack を送受信側に返すことによって長距離の通信でも遅延の影響を軽減できる機能が搭載されている。ルータにはコンパクトフラッシュメモリが搭載され、そこに専用の linuxOS がインストールされている。ルータの設定は 10baseT ケーブルを PC との間で繋いで WEB ブラウザ上で行う。設定画面は非常にシンプルでわかりやすい。なお、spoofing 機能のオンとオフの切り替えのみは、フラッシュメモリ上の OS に telnet 接続して初期設定ファイルを vi などのエディタで書き換えて行う。ルータの設定は今までに使用したものと格段に簡単であり、今回の実験でも初日 (2/9) の実験開始時に特に問題なく衛星回線経由での TCP/IP 接続が確立できた。

スループット計測結果などの定量的既述を網羅した実験の詳細については別途報告書を取りまとめ中であるので、ここでは概略の実験内容と簡単な結果について日を追って記載するにとどめる。今回の実験を実施した場所の地理的な位置関係については図 4 を参照にして頂きたい。

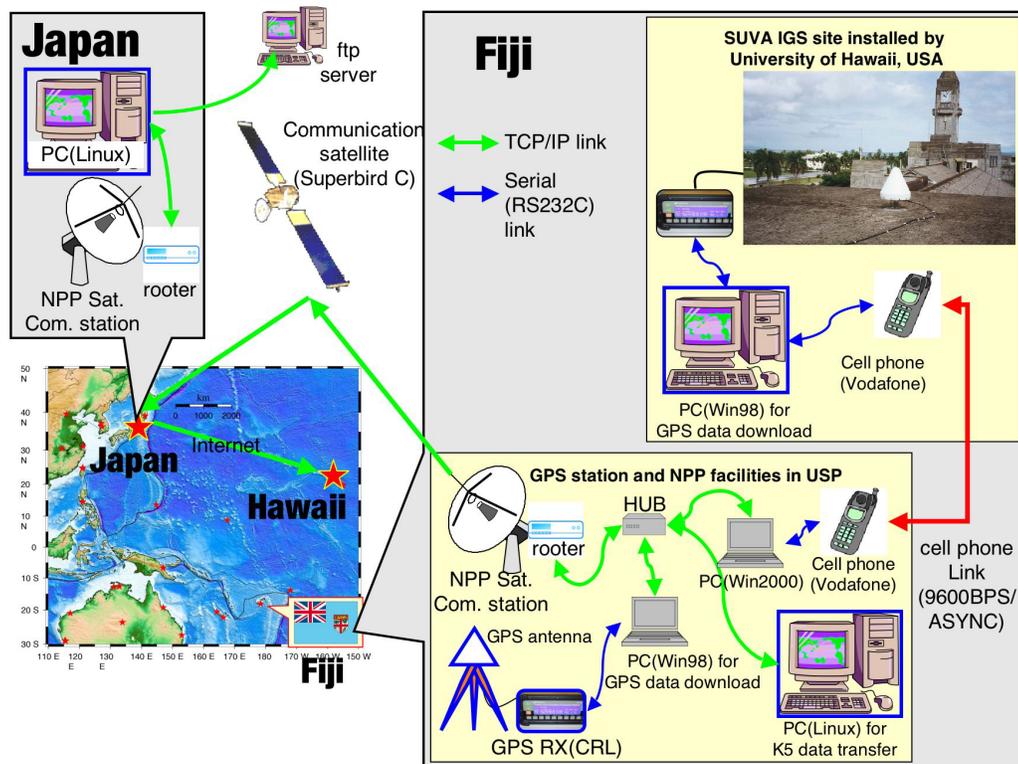


図 1: 今回の衛星回線による TCP/IP データ送信実験の概念図

表 1: 新 PP 衛星折り返し実験 ch の周波数設定

経路	CH1	CH2
uplink	14213.500MHz	14216.500MHz
downlink	12486.500MHz	12483.500MHz

3.1 第 1 日目 (2/8)

フィジー時間朝 7 時にナンディ国際空港に成田発 AirPacific FJ303 便で到着。天候は快晴。高橋富士信氏経由で JICA 事務所から事前に手配して頂いたタクシーで空港からスバ市へ移動。なお、空港ースバ市の間は約 200km 離れており、休憩を含めて 4 時間あまりの行程となる。お昼過ぎにスバ市のホテルに到着した。スバでは貿易風の影響をまともに受けるため、島の西部のナンディと気候が全く異なり激しい雨が降っていた。

3.2 第 2 日目 (2/9)

朝 10 時頃までは晴れていたが、その後雨となり、夜間まで断続的に降り続いた。

まず、午前中はスバ市行政府ビル測量局オフィスにおいて、ハワイ大学が過去に設置したものの故障のためここ数ヶ月にわたって稼働していない GPS 受信機を正常な受信機と交換すると共に、我々の臨時観測用 GPS 受信機を併設した (図 5)。ここで、行政府ビル屋上に設置したアンテナ (図 6) からの GPS 信号を分配器で分けて双方の受信機に入力した (図 5 の後方に分配器が見える)。次に、午後より南太平洋大学構内

Plan B

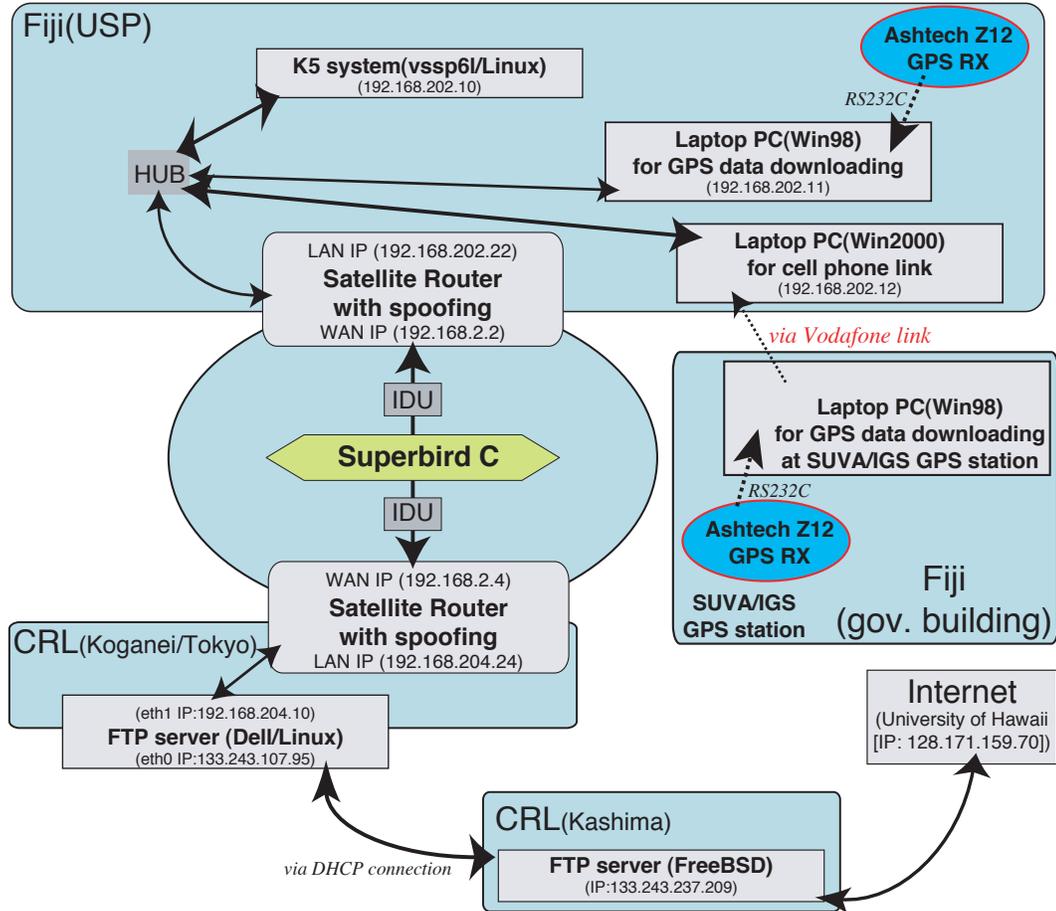


図 2: 実験における機器構成、およびネットワーク構成図



図 3: 衛星ルーターの写真

に臨時の GPS 観測点 (図 7) を設置し、観測を開始した。

ちなみに、この GPS 観測点は、現在全世界に約 300カ所に存在する IGS 観測点の一つであり、フィ



図 4: 今回の実験実施場所の地理的位置関係 (この図はフィジー測量局発行の図幅を用いて作成した)

ジーとその東方約 800km に位置するトンガとの間にあるラウ海盆 (Lau Basin) の背弧海盆拡大¹の様子を把握し、周辺のテクトニクスを解明するためにハワイ大学が展開した南太平洋 GPS 観測網のキー局でもある。Bevis et al.[1995][2] によれば、トンガ海溝の東側では年間約 25cm という世界に例をみないプレート運動速度が求められており、Lau Basin の拡大速度も最大約 17cm が得られている。

GPS 設置後、フィジー時間 16 時 (日本時間 13 時) より南太平洋大学構内のポストパートナーズ実験室において衛星通信実験を開始した。図 8、及び 9 に示すように、実験室には衛星ルータ、UDP の他、NetMeeting 用の WindowsPC、ビデオ会議用のビデオカメラとモニターなどの各種機器が設置されている。既に述べたように衛星ルータによる TCP/IP の伝送経路確立は問題なく、すぐにデータスループット計測ツールの iperf により、フィジー-日本間のスループット計測を実施した。なお、このとき今回使用した衛星ルータの特徴である spoofing 機能 (既述) を ON として計測を行った。

まず、ping 送出により確認したフィジー-小金井間の往復時間は約 536msec であった。次に、iperf によるスループット速度計測を行ったところ、小金井サーバー/フィジークライアント、小金井クライアント/フィジーサーバーの双方向共に 1.44Mbps となった。これは、今回の実験でのスペック上のスループット 1.536Mbps の約 94% に達する速度である。spoofing 機能を使用しない通常の衛星経由の TCP/IP 伝送では往復遅延時間の影響を顕著に受けてスループットは半分に以下に低下することが既にこれまでの実験で確認されており、今回の結果により遠隔衛星通信においても spoofing 機能の有効性が確認できた。iperf 計測後は WindowsXP マシンどうしによる NetMeeting のテストに移ったが、こちらは映像は滑らかに送られるものの音声伝送に問題あるため翌日再度テストすることとなった。

¹プレートの沈み込み帯において、沈み込まれる側 [上盤側] のプレートの海溝に面した場所に海溝軸に沿ってしばしば弧状列島が形成される。こうした場所では、弧状列島の海溝とは反対側、つまり背中側に海洋底が現れて徐々に拡大する現象がみられる。これを背弧海盆拡大という。例として Lau Basin の他に日本海、マリアナトラフ周辺がある。



図 5: 行政府ビル測量局オフィス会議室内に設置された GPS。左が CRL、そして右がハワイ大学の GPS 受信機 (2 つは同機種である)。2 台の受信機の後方にアンテナ分配器が見える。



図 6: 1997 年にハワイ大学が行政府ビル屋上に設置した GPS アンテナ。

3.3 第 3 日目 (2/10)

朝からずっと雨。ときおり激しいスコールが降る。

2 日目は、前日同様 iperf によるスループット計測を実施した。ただし、ここでは TCP window size を



図 7: 南太平洋大学構内に設置した GPS 観測点。後方は新ポストパートナーズ計画で使用している衛星通信アンテナ

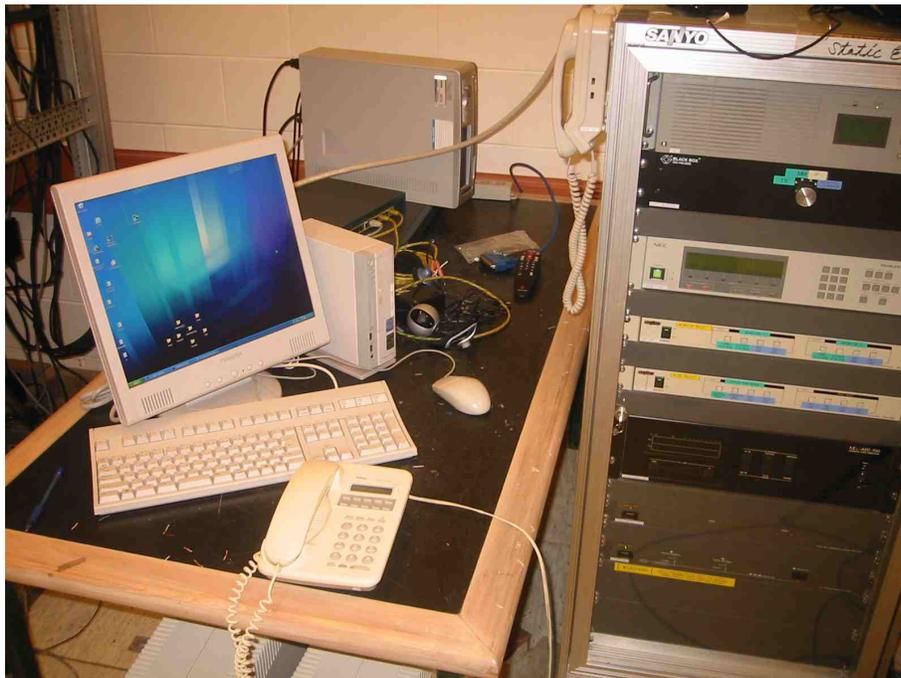


図 8: 南太平洋大学構内のポストパートナーズ実験室に設置されたルーター、IDU など。

8KB~128KB まで 5 通りの値に変え、小金井側をクライアント、フィジー側をサーバーとしてスループットを計測した。なお、spoofing 機能は OFF とした。その結果、TCP window size が小さいほどスループットが低下する現象が明瞭に見られた。さらに、従来から使用している CISCO ルータを小金井、フィジーの



図 9: 同じくポストパートナーズ室内の NetMeeting 用のネットワーク分配架と南太平洋大学の高橋富士信氏。

双方で用いて実施した同様の計測でも、ほぼ同じ結果が得られたが、window size が大きい場合に急激にスループットが低下する現象が見られた。

次に、spoofing 機能を ON として、GPS、および VLBI データの ftp 伝送実験を実施した。まず、小金井側をクライアントとしてフィジーのサーバーより 1 日分約 1MB の GPS データ (バイナリ) を 6 回 ftp/get し、次にフィジー側をクライアントとして、小金井サーバーより 200MB の K5/VLBI データ (バイナリ) を ftp/get した。いずれのケースでも、1 日目の実験同様に約 1.44 ~ 1.46Mbps のスループットが確認された。また、昨年の火星探査船「のぞみ」の軌道推定 VLBI 観測で取得した K5/VLBI データから切り出した 200MB のデータを小金井からフィジーへ ftp/get する実験も行った。その結果、データは 18 分 15 秒で伝送され、このときのスループットは 178.26KB/s(スペックに対して約 93%) となった。

その後、衛星ルータを引き続き用いて WindowsXP による NeMeeting テスト、および電気通信大学鈴木雅久助教授による「SOHO での Net 利用」の遠隔講義がビデオ会議により小金井からフィジーの南太平洋大学の学生に対してなされ、本日の実験は終了した。

3.4 第 4 日目 (2/11)

朝のうち涼しくもり。その後雨が降り出し、夜間まで断続的に降り続いた。

今回の実験では、スバ市行政府ビルにある IGS/GPS 点のデータをポストパートナーズ実験室まで伝送し、これも我々のデータと共に衛星により伝送することも目論んでいた。現在、大部分の IGS 観測点データが観測終了後数時間以内にインターネット経由で世界数カ所のデータセンター (例えば、CDDIS、JPL、Bern 大学など) に伝送される。しかしながら、フィジーの IGS 点はネットワーク接続がないため、現地測量局のスタッフが PC にダウンロードされたデータを ZIP ディスクにコピーして数ヶ月毎にハワイ大学に送付し、これをハワイ大のスタッフがデータセンターに ftp 伝送するという非常に手間取る方法を取っている。

そこで、今回将来的のより円滑、かつ迅速なデータ伝送を目指して、図 1 にあるように行政府ビルと南

太平洋大学との間に携帯電話“Vodafone”のリンクを確立してIGS/GPSデータをポストパートナーズ実験局に収集することを試みた。図4の右側に示したスバ市街図にあるように2カ所の間はわずか2kmほどしか離れていないが、この間を繋ぐことが出来れば衛星回線経由で迅速にIGS/GPSデータもハワイ大学への伝送が可能となる。実験第3日目は、このVodafone携帯電話を接続した2台のPC間でのデータ伝送テストを行った。

しかしながら、携帯電話からの発信がすぐに切れ、“no carrier”とのことで通信が成功しなかった。モデムのATコマンドでのtone検知無視(ATX3)など各種設定を試したが、残念ながらいずれの試みも徒勞に終わった。使用したVodafone電話が日本国内では使用できない機種であり、事前のテストができなかった事情はあるが、問題解決に向けてさらに検討が必要である。

3.5 第5日目(2/12)

朝から激しい雨が断続的に降る。実験時間中も激しい降雨。

前日のVodafoneリンク失敗を受けて、次に行政府ビル測量局の内線電話を臨時にお借りして南太平洋大学からダイヤルアップでIGS/GPSデータを収集することを試みることにした。幸いにも測量局側には早く内線電話の使用を了承して頂くことができた。行政府ビルと南太平洋大学の双方にモデム付きノートPCを設置して、Windowsのダイヤルアップサーバー機能を用いて2台のPC間の通信を試みた。しかしながら、一方のPCからの電話がもう一方に着信するにもかかわらず認証の段階で通信が確立しない現象が頻発し、データ伝送にまで至らなかった。アカウント、パスワードなど再々確認して認証がうまくいかない原因を探したが、残念ながら時間切れとなり衛星通信の時間となった。

この日の衛星実験では、前もって手動でダウンロードした行政府ビルIGS/GPS点のデータをポストパートナーズ実験室内のサーバーにコピーし、これを小金井経由でハワイ大学のサーバーまで送り込むという手順でのデータ伝送を行った。途中でハワイ大学のサーバーから“disk full”というメッセージが出るバフティングや、実験最初の30分ほどスバ側の降雨が激しく、これによる減衰と思われる回線断やルーターのハングアップなどの障害があったものの、最終的には伝送そのものは問題なく行われ、ほぼ初期の目標を達成することが出来た。

実験終了後、JICA事務所をお借りして、南太平洋大学の海洋地質学者Susanne Pohler博士、およびフィジー政府Mineral Resources DepartmentのBhaskar Rao博士と懇談を持った(他にSOPAC[South Pacific Applied Geoscience Commission]関係者と南太平洋大のGIS研究者も参加)。懇談の位置付けとしては、まずは情報交換であり、我々の実験の趣旨説明、VLBIや地球姿勢の説明と共に、南半球基線の重要性と同時にVLBIが地域の測地座標系の高精度化に寄与できる可能性があることを述べた。各博士からは、フィジーではまだ測地学や地球物理学的な面での受け皿が大学や政府機関でも不十分で、少しずつ理解を深めてもらう努力が必要との話があったが、全体としては我々の実験について好感を持って頂いたようである。

また、今回は時間的に難しかったが、南太平洋大学のGIS研究者からは今回の実験や地球姿勢に関するプレゼンを学生にしてもらえないかとの要請があった。次回にもし機会があれば対応を考えたい。その他、SOPACの研究者から、1000ドルかけてPCを1台測量局に置き、これを既設のネットワークに繋がれば簡単にデータがハワイまで送れるのではないかとの指摘があった。しかしながら、後ほど高橋富士信氏から聞いたところでは、各使用者のスキルが充分ではないとの観点から政府の各部局で使用しているPCネットワークにはセキュリティ上の制約が大きく、簡単にftpなどのデータ伝送をできる環境にはないとの話であった(昨年、政府の部局内でウイルス騒ぎが発生し、その結果ネットワーク管理担当からの締め付けが一層厳しくなったらしい)。

3.6 第6日目 (2/13)

くもり、時々雨。午後から雨脚がやや強くなった。

この日は、午前中に南太平洋大学、及び行政ビル測量局内のGPS機材、サーバーなどのPC関係すべてを撤収、梱包し運送業者へ託して日本への発送を依頼した。その後、午後にスバを離れ、国際空港のあるナンディ市周辺のホテルへ移動した。

3.7 第7日目 (2/14)

フィジー時間朝8時半にホテルから空港まで移動し、朝10時半ナンディ発成田行き AirPacific FJ302 便で帰国。

4 まとめ

まず、実験の主目的であったVLBIやGPSのデータを遠隔地からデータセンターへ衛星回線でTCP/IP伝送することについてはほぼ達成できた。この部分については、spoofing機能搭載の衛星ルータにより、衛星回線特有のRTT(Round Trip Time)の影響を最小限にして回線スループットのほぼ100%近い性能を引き出すという初期の目標を上回る成果を得たことは特筆すべきである。また、今回は我々のGPS、およびVLBIデータとあわせてハワイ大学のGPSデータをフィジーからハワイまで伝送するという実験も試みた。衛星回線、および通常のインターネット回線に関する部分については成功した。

しかしながら、ハワイ大学の観測点が設置された行政ビルから南太平洋大学までのわずか2kmの距離のデータ伝送には成功せず、今後の課題となった。具体的な解決方法としては、今回測量局から好意的な協力が得られたことから、南太平洋大学のポストパートナーズ室に設置したサーバを用いて有線電話経由でのダイヤルアップによりIGS/GPS受信機から直接データを吸い上げる方法が有効と考えられる。もし、有線電話の使用が定常的に可能となれば、毎日のデータはUSPのポストパートナーズ室内のサーバにため込んでおき、小金井-フィジー間のTCP/IP衛星実験の際に便乗して一気に小金井、あるいは鹿島までデータを持って来るといった方法も検討の余地がありそうである。

その他、現在宇宙電波応用グループでは測地用GPS観測データを簡便、高精度、かつ自動的に解析するための仕組みである、“高度精密測位システム APPS(Advanced Precise Positioning System)[例えば、[3]、[4]を参照]”を開発中である。一方、現在遂行中のe-VLBI技術による準リアルタイム地球姿勢に向けた開発研究とAPPSを組み合わせるにより地球姿勢のみならず測地網結合などの目的でも迅速に測地解を得ることが可能になる。南太平洋の島嶼域のようにこれまで観測の空白域であった地域からのGPSデータを速やかに処理して結果を得る手法を確立することは、グローバルな測地網の高精度化にも寄与すると考えられる。そこで、次年度では、このAPPSへフィジーのGPSデータを受け渡し、観測終了から24時間程度で解析結果を得ることを目的として準備を進める予定である。

最後に、遠隔地での屋外観測によるデータ伝送という観点から、実験に際しての温度・湿度・気圧などの気象データ、観測点や上空の雲の様子などの画像データなどを付加して伝送できると、より効果的な状況把握に役立つと考えられる。現状では測地データ伝送でほぼスループット一杯まで使い切っているが、今後回線の余裕があれば、気象データ、および画像データもあわせて伝送することも現実的になるであろう。

5 謝辞、および雑感

衛星回線使用について、無線従事者立ち会いで小金井本所企画部研究連携室研究開発ネットワーク推進Gの田中健二氏にお世話になった。また、企画室の五十嵐喜良氏にも実験準備段階から各種サポートを頂い

た。さらに、フィジー USP 内の JICA 事務所スタッフの皆さん、行政府ビル測量局の皆さんにも大変お世話になった。ここに記して感謝の意としたい。どうもありがとうございました。

最後に、今回は初めての海外のしかも発展途上国からの衛星利用での TCP/IP 測地データ伝送とのことで、手探りの状態で準備を進めてきたが、様々な皆さんにサポート頂いたと同時に、国際共同実験としても南太平洋大学、フィジー行政府測量局、ハワイ大学の各方面からも多大な協力を頂いたのが最大の成果と言えるかもしれない。今後より大きな成果に繋がられるように努力を続けたい。

参考文献

- [1] 福田 浩三、衛星ルータによる TCP/IP 高スループットの実証実験、新ポストパートナーズ実験報告書、2003.
- [2] Bevis, M., F.W. Taylor, B.E. Schutz, J. Recy, B.L. Isacks, S. Helu, R. Singh, E. Kendrick, J. Stowell, B. Taylor, and S. Calmant, Geodetic observations of very rapid convergence and back-arc extension at the Tonga Arc, Nature, 374, 249-251, 1995.
- [3] 小山泰弘、市川隆一、後藤忠広、高羽浩、神崎政之、渡辺義康、熊敏、高木達、高精度測位システムのデータ解析サーバー試験運用結果、2002 年地球惑星科学合同大会、2002.
- [4] APPS 解説 WEB サイト
<http://www2.crl.go.jp/ka/radioastro/APPS/index.html>