

3-10 洋上通信実験報告

片山典彦 赤石 明 浅井敏男 川崎和義 高橋 卓 吉村直子 豊嶋守生

近年、海洋資源調査技術の開発が進められており、洋上から観測したデータのリアルタイム伝送や観測状況モニタリングのための画像伝送等が検討されている。これらの実現には Mbps クラスの回線構築が必要であるため、情報通信研究機構 (NICT) では衛星通信を活用した高速通信技術の開発を進めている。洋上での衛星追尾の性能や通信状況等を確認するため WINDS 船舶用地球局を用いて、海域で実験を行ったので報告する。

1 まえがき

内閣府が進める戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の次世代海洋資源調査技術において、海洋資源調査技術の開発が進められており、海底で観測したデータを様々な調査拠点に伝送することや観測時の状況を監視するための画像伝送等が求められている [1] [2]。日本近海で利用できる通信サービスは主に衛星通信となっており、利用できる回線速度は数百 kbps となっている。これらのニーズを実現するためには Mbps クラスの回線が必要であり、NICT では衛星を活用した高速通信技術の開発を進め、洋上から数 Mbps の伝送を可能とする地球局を開発している。

既に WINDS を用いた実験においては、直径 2.4 m の大型アンテナを持つ地球局で 3.2 Gbps の伝送や直径 1.2 m の VSAT を用いて再生交換中継方式による 51 Mbps の伝送を実証している。さらに移動体衛星通信として、一般車両に衛星を追尾するアンテナを搭載した陸上移動用地球局も開発している。この陸上移動用地球局のアンテナ部を専用の架台に設置して船舶用地球局としても利用可能となっており、様々なエリアで回線構築が可能となっている。この船舶用地球局を用いた実証例としては、平成 25 年に海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 所有の調査船「かいよう」に WINDS 船舶用地球局を搭載し、WINDS を用いて陸上との間で衛星通信回線を構築し、HROV「おとひめ」の遠隔操作を成功させている [3]。

洋上で利用できる地球局の開発に向けては、この船舶用地球局をベースに検討し、調査船だけでなく小型船舶や洋上中継器 (ASV) 等へ搭載できる小型、軽量、低消費電力の装置とし、さらに波による大きな動揺に対しても正確な衛星追尾を実現するアンテナシステムを持つ装置開発を進めている。この開発のため、WINDS 船舶用地球局を用いて洋上における衛星通信実験を実施することとした。現状の追尾システムにお

いて、どの程度の能力があるか確認し、回線構築と通信実験を行い、船舶の移動や波による動揺がある環境における伝送特性を確認することとした。平成 28 年 1 月から 2 月にかけて JAMSTEC が実施した海域試験に参加し、WINDS 船舶用地球局を用いた衛星通信実験を実施したので、その結果を報告する。

2 海域試験について

JAMSTEC が保有する調査船「みらい」において、海域試験が行われた。横浜新港を出港後、相模湾と駿河湾周辺を航行し、その間の衛星捕捉や追尾の性能確認と衛星通信実験を行った。調査船「みらい」を図 1 に示す。

3 WINDS 用地球局

3.1 WINDS 船舶用地球局

調査船「みらい」に搭載した WINDS 船舶用地球局の外観と諸元をそれぞれ図 2 と表 1 に示す。WINDS



図 1 JAMSTEC 所有の調査船「みらい」

3 超高速衛星通信技術

船舶用地球局は衛星を自動で捕捉及び追尾をするアンテナシステムを搭載しており、移動しながらでも回線を構築することが可能となっている。WINDSの再生交換中継方式[4]において、本地球局を用いた場合、最大24 Mbpsの回線が構築可能となっている。WINDS船舶用地球局に搭載しているアンテナは自局の位置とWINDSのBeacon信号の受信強度から衛星位置を推定し、自動捕捉、自動追尾するシステムとなっている。同じアンテナシステムを搭載した小型車載局[5]においては時速100 km/hの高速移動で衛星を追尾し、回線を構築できることを実証している[5]。本アンテナの追尾システムの概要を述べる。

アンテナが衛星を捕捉するまでSearchingモードとなり、Open-Loop PointingでGPSによる自局の位置情報と衛星からのBeacon信号レベルを用いて衛星を捕捉する。捕捉後はBeacon Trackingモードに移り、モノパルス方式による衛星追尾が実行され、移動しながら回線を構築することが可能となる。Beacon Trackingモードで回線運用中に遮蔽物などでBeacon信号が受信できなくなった場合、Gyro Holdingモードに移り、GPSによる自局の位置情報や姿勢から推

定してアンテナを衛星方向に動作させる。しかし60秒以上、Beacon信号が受信できない場合、Searchingモードに戻り、再度Open Loop Pointingで衛星を捕捉する動作に移る。以上の衛星捕捉、衛星追尾の過程を図3に示す。

3.2 51M-VSAT

調査船「みらい」に搭載したWINDS船舶局の相手局として、NICT鹿島宇宙技術センター(茨城県鹿嶋市)にある51 M-VSATを使用した。この地球局の外観と諸元をそれぞれ図4と表2に示す。WINDSの再生交換中継方式[4]で最大51 Mbpsの回線構築が可能な地球局である。

4 実験方法

4.1 実験ネットワーク構成図

本実験はWINDSのマルチビームアンテナ(MBA)[4]のエリアで実施し、洋上を移動するWINDS船舶用地球局はMBA中部ビーム、NICT鹿島宇宙技術センターの51 M-VSATはMBA関東ビームを使用して



図2 WINDS船舶用地球局外観

表1 WINDS船舶用地球局諸元

| | |
|--------|--|
| アンテナ | オフセットパラボラアンテナ(φ0.65 m) |
| 周波数 | TX: 27.5 - 28.6 GHz RX: 17.7 - 18.8 GHz |
| 偏波 | 直線偏波 |
| 利得 | TX: 42.5 dBi RX: 38.0 dBi |
| 出力 | 20 W |
| G/T | 13.5 dB/K |
| データレート | TX: 1.5/6/24 Mbps RX: 155 Mbps |

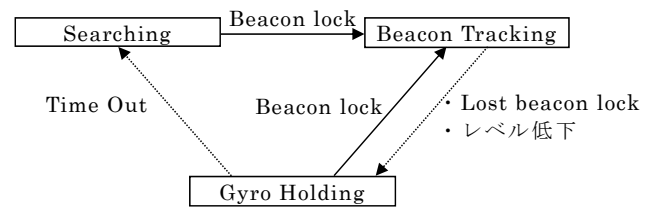


図3 衛星捕捉及び追尾過程



図4 51 M-VSAT外観

回線を構築した。実験のネットワーク構成を図5に示す。

各地球局には電話会議システムとスループット測定のための測定用PCが接続されている。WINDS 船舶用地球局にはアンテナの動作や衛星からの Beacon C/N₀ レベル等を記録するためのログ収集用PCが接続されている。

4.2 実験方法

(a) 衛星追尾性能確認実験

WINDS 船舶用地球局ではアンテナの動作状況、Beacon C/N₀ 受信レベル、地球局の位置情報、追尾精度等のログが取得できる。これらのデータを用いて、船舶の移動や動揺に対する衛星追尾の性能を評価する。

(b) 伝送特性確認実験

WINDS 船舶用地球局と 51 M-VSAT 間で TCP 通信の伝送特性を把握するため、地球局の IDU に接続した測定用 PC でスループット測定を行う。この PC の OS には Linux を用いており、輻輳制御を切り替えて高遅延環境に適した輻輳制御技術の評価する。また映像や音声伝送等を想定し UDP 通信における伝送状況も確認する。TCP 及び UDP における伝送特性は

表 2 51 M-VSAT 諸元

| | |
|--------|--|
| アンテナ | オフセットパラボラアンテナ (φ1.2 m) |
| 周波数 | TX: 27.5 - 28.6 GHz RX: 17.7 - 18.8 GHz |
| 偏波 | 直線偏波 |
| 利得 | TX: 47.6 dBi RX: 44.0 dBi |
| 出力 | 40 W |
| G/T | 18.9 dB/K |
| データレート | TX: 1.5/6/24/51 Mbps RX: 155 Mbps |

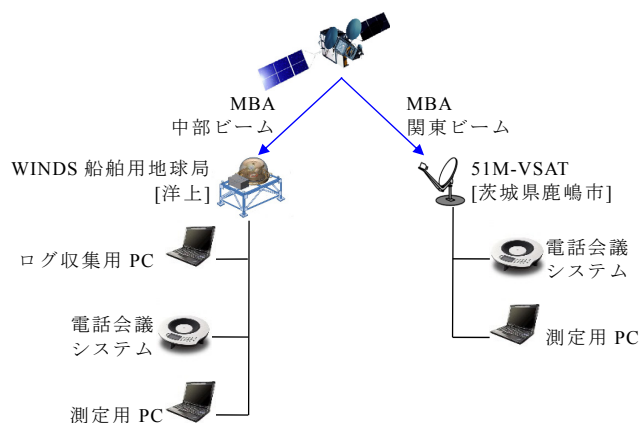


図5 実験ネットワーク構成図

iperf [6] を用いて測定を行う。

5 実験結果

5.1 WINDS 船舶用地球局の追尾特性

実験中、船舶は常に移動し、波により動揺しているため、静止状態は全くない。WINDS 船舶用地球局の衛星追尾状況の一例として、船舶が8の字で移動した時のアンテナ動作と Beacon C/N₀ レベルの関係を調査した。

船舶の移動の軌跡を図6に示す。今回の船には図7のような船舶の構造物があることから、船の向きにより、地球局と衛星の間の伝搬路を遮蔽して、通信ロス又は通信断が発生する。船上の遮蔽物により通信断となる範囲を調査するため方位角 (AZ) 方向と Beacon C/N₀ レベルの関係を図8のグラフに示した。アンテナ方位角情報は船首方向を0°として、アンテナの右回りが+方向、左回りが-方向となっている。衛星方向がほぼ南であり、図8のグラフより-120°~-147°の約27°の間で通信断となることから、船首がおよそ

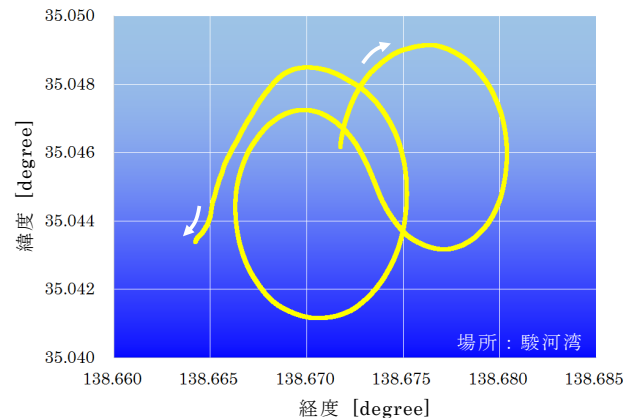


図6 8の字移動の軌跡



図7 船上の遮蔽物

3 超高速衛星通信技術

北西方向を向いた時に通信状況が悪くなる環境であった。

8の字移動時における衛星追尾のアンテナ動作状況を確認するため、AZとELの動作をそれぞれ図9と図10に示す。また衛星からのBeacon C/N₀受信レベルを図11に示す。

図7に示す船舶上の構造物による遮蔽を除き、図9と図10のアンテナ動作状況から船舶が大きく移動しても、図11に示すBeacon信号の受信状態は安定していたことからアンテナが衛星を正確に追尾して

いたことを確認した。WINDS 船舶用地球局の追尾精度は± 0.2°以内に設定しており、± 0.2°以上の誤差が発生すると、インターロック機能が働き、電波の発射を停止するようになっている。

図11に追尾精度も示す。この結果より、8の字移動中、追尾精度が± 0.2°以内となっていたことからアンテナの追尾制御が船舶の移動に対して十分であったことを確認した。また遮蔽物により、衛星からのBeacon信号を受信できなくなった場合、遮蔽物がなくなると直ぐに衛星を再捕捉し、追尾を始めているこ

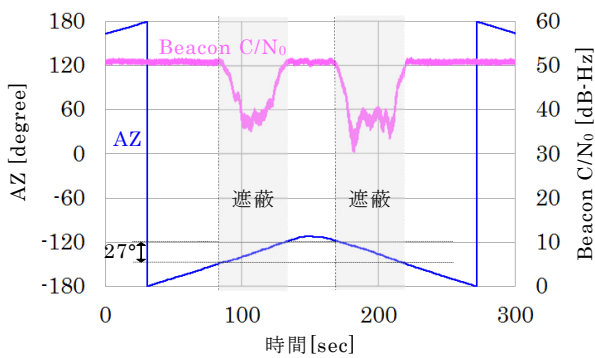


図8 船上遮蔽エリアの確認

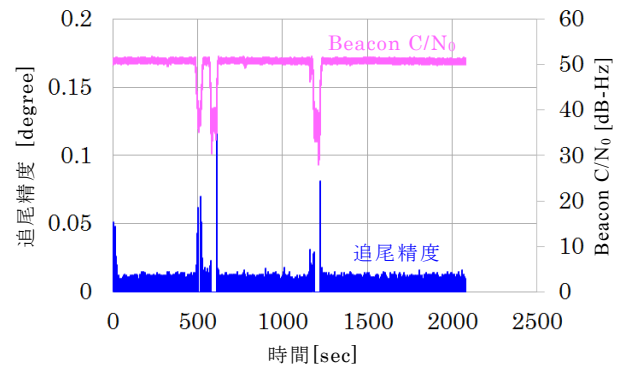


図11 8の字移動時の追尾精度

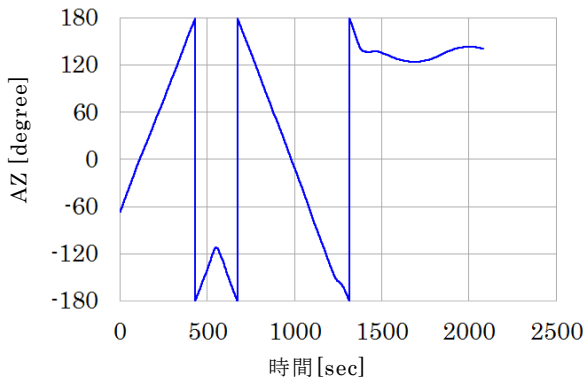


図9 8の字航行時のアンテナAZ動作状況

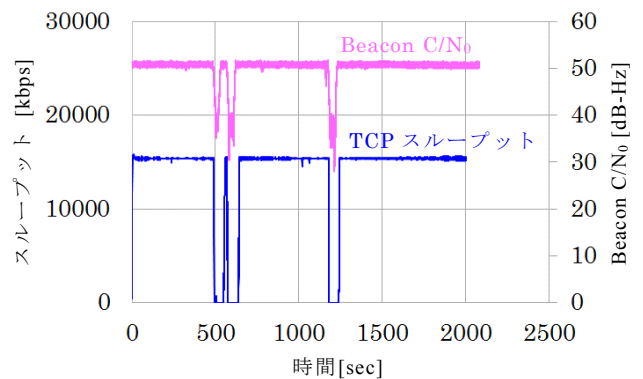


図12 8の字移動時のTCP通信状況

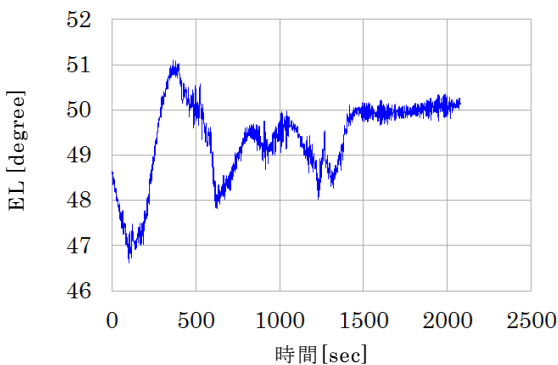


図10 8の字航行時のアンテナEL動作状況

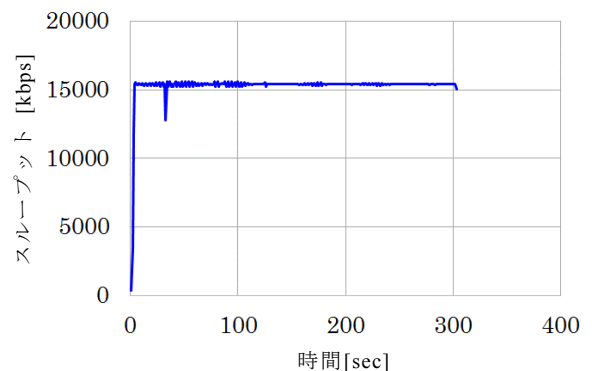


図13 WINDS向け輻輳制御によるTCP通信状況

とから、Gyro holding 機能が正常に動作していることも確認できた。

5.2 8の字移動時における TCP 通信の伝送特性

5.1 の 8 の字移動時にデータレート設定 24 Mbps モードで WINDS 回線を構築し、TCP 通信のデータ伝送を行った。この時の伝送状況を図 12 に示す。遮蔽による通信断との関係を示すため、同じグラフに図 11 で示した Beacon C/N₀ レベルも記載した。ここでは WINDS 向けにチューニングした輻輳制御技術 [7] を用いて TCP のスループット測定を行った。

遮蔽物により、Beacon 信号を受信できない時はインターロック機能が働き、電波の発射を停止するため通信断となるが、遮蔽物が衛星方向から外れ、再び Beacon 信号を受信すると送信が開始される。再度通信が開始されると回線速度も数秒で最大値に到達していることから、8 の字移動の間、遮蔽物による通信断を除き、TCP 通信の状況も安定していた。

5.3 WINDS データレートごとの TCP 通信伝送特性

衛星通信は遅延が非常に大きい環境であるため TCP 通信を行う場合は回線のネットワーク帯域を十分に利用できない状況がある。その対策の 1 つとして、RTT 値を基準に伝送するデータ量を制御する輻輳制御技術が有効 [7] であり、さらにそのデータ量を回線状況に合わせて制御することで、より安定した通信が可能となることをこれまでの検討により確認している [7]。船舶移動時において、WINDS 回線向けにチューニングした輻輳制御技術 [7] (WINDS 用 TCP) と Linux に標準搭載されている輻輳制御技術 (CUBIC [8]) を用いた時の TCP 通信のデータ伝送特性を比較した。WINDS 回線のデータレート設定ごとのスループット測定結果を表 3 に示す。また WINDS 回線のデータレート設定 24 Mbps モードにおける WINDS 用 TCP と CUBIC のスループット変動をそれぞれ図 13 と図 14 に示す。

表 3 より、6 Mbps モードでは 2 種類の輻輳制御技術の違いで大きな差は現れないが、ネットワーク帯域が大きくなると輻輳制御技術の違いで伝送速度の差も大きくなっている。今回はデータレート設定 51 Mbps においても測定を行い、WINDS 用 TCP におけるスループット測定値は約 30 Mbps を示し、CUBIC を用いた時の結果と比較し約 4 倍近くの差が現れた。

WINDS の再生交換中継方式では衛星搭載の交換機 (ABS) [4] で処理されるため独自のフォーマットで地球局からデータが送信される。そのフォーマットを MPEG TS ストリームと呼んでおり、その中に納まるデータ量がネットワーク帯域理論値の 87.3 % 程度 [7] になることを確認している。また WINDS の再生交換中継方式では TDMA 方式を採用しており、1 スーパーフレームが 320 スロットで構成される。本実験においては衛星回線構築に必要な情報スロット等を除いた、288 スロット使用してデータ伝送を行う回線とした。288 スロットにおける各データレート設定の実伝送速

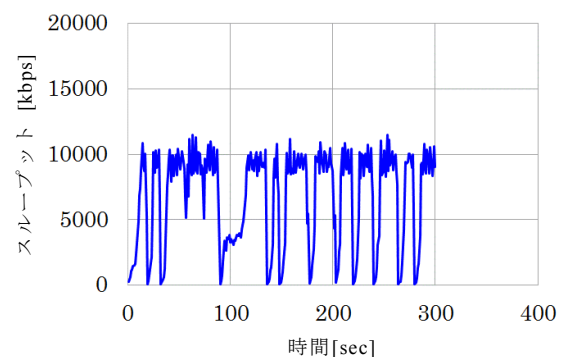


図 14 CUBIC による TCP 通信状況

表 3 輻輳制御別スループット比較

| WINDS 回線 | 輻輳制御 | |
|----------|-------------|------------|
| | WINDS 用 TCP | CUBIC |
| 6 Mbps | 3.912 Mbps | 3.731 Mbps |
| 24 Mbps | 15.052 Mbps | 6.851 Mbps |
| 51 Mbps | 29.772 Mbps | 7.774 Mbps |

表 4 WINDS 回線データレート別の 288 スロットにおける実伝送速度

| WINDS 回線 | ネットワーク帯域理論値 | TCP 実伝送速度 |
|----------|-------------|-------------|
| 6 Mbps | 5.105 Mbps | 4.457 Mbps |
| 24 Mbps | 19.143 Mbps | 16.712 Mbps |
| 51 Mbps | 38.286 Mbps | 33.424 Mbps |

度を表4にまとめる。

表3の結果と表4の実伝送速度を比較すると、一般的な輻輳制御技術であるCUBICでは、帯域を十分に利用できていないことがわかるが、WINDS用にチューニングした輻輳制御技術を使用すると十分に利用できていることがわかる。また通信を開始してから立ち上がりにおいても、CUBICでは最大値到達までに十数秒かかっていたが、WINDS向けにチューニングした輻輳制御技術では、3～4秒で最大値に到達した。

以上のことから、遅延の大きい衛星通信では、遅延や回線状況に合わせてTCPウィンドウサイズをコントロールするタイプの輻輳制御技術が有効であることを確認した。

5.4 UDP通信伝送特性

UDP通信[9]はTCP通信と異なり、セッションを確立せずにデータを送信する方式となっており、処理が高速であるが、パケットロスが発生しても再送処理等が行われない通信方式である。伝送測定においては、遅延の影響を受けず、伝送路の環境をロスの発生状況で確認できることやその伝送路の容量を把握できることからUDPによる測定を実施した。iperfによるUDP通信の測定の場合、伝送するデータ量を設定できるため、ロスが発生しない限界の容量を調査することができる。各データレート設定における容量の調査結果を表5に示す。また伝送時の変動状況例として図15にWINDS回線24Mbpsにおける1分間の測定結果を示す。

表5 UDP通信におけるWINDS回線ネットワーク帯域

| WINDS回線 | UDPネットワーク帯域 |
|---------|-------------|
| 6 Mbps | 4.6 Mbps |
| 24 Mbps | 18 Mbps |
| 51 Mbps | 36 Mbps |

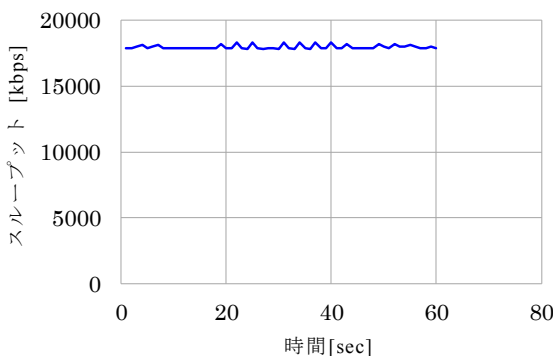


図15 UDP通信状況

TCP通信と比べ、UDP通信で使用されるヘッダのデータ量が少ないことなどから、WINDSの再生交換中継方式におけるネットワーク理論値とほぼ同等の容量で伝送できることを確認した。また、UDP通信時の変動結果においては、測定を開始した直後から指定した容量の送信が始まり、若干の変動はあるが、船舶の移動や動揺による影響を受けず、データ量がほぼ一定の安定した通信状況を確認した。

6 むすび

船舶用地球局の衛星捕捉と追尾特性を把握し、船舶の移動や動揺に対して十分な性能を持つことを確認した。また追尾性能が十分であったことから、TCPとUDPの通信状況も安定していたことを確認した。特にTCP通信においてはWINDS向けにチューニングした輻輳制御技術を用いていることで回線容量を最大限に利用できることも確認した。

洋上向けの通信手段として、衛星通信を用いるメリットは、拠点間の距離にかかわらず、衛星の通信エリア内であれば伝送速度が一定であることと複数拠点をネットワーク化することにおいても衛星を経由して柔軟に構築できること等が挙げられる。今後は小型、軽量で省電力の地球局を開発し、WINDSのMBAエリアだけでなく、主に海上をカバーする広域電子走査アンテナ[4](APAA)エリアにおいてもMbpsクラスの回線構築が必要となる。開発した地球局を用いて実海域における試験を積み重ね、Mbpsクラスの回線構築の実証と洋上におけるネットワーク化や有効な利用方法について検討を進める。

謝辞

本実験は、JAMSTECの海域試験の一環で行われたものであり、船舶への実験装置搭載や研究員の乗船等において、ご指導いただいた関係者の方々に感謝の意を表す。

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「次世代海洋資源調査技術」(管理法人：海洋研究開発機構)により実施した。

【参考文献】

- 1 Norihiko Katayama, Naoko Yoshimura, Takashi Takahashi, and Morio Toyoshima, "Conceptual Design of High-Speed Satellite Communication Equipment for ASV," 21st Ka and Broadband Communications Conference, Oct. 2015.
- 2 Norihiko Katayama, Naoko Yoshimura, Hideo Takamatsu, Susumu Kitazume, Yosuke Takahara, John Logan, and John Ness "Development of Ka-band mobile communications platform for Ocean

- Broadband Communications," ICSSC2015, Sept. 2015.
- 3 Takashi Takahashi, Naoko Yoshimura, Akira Akaishi, Norihiko Katayama, Morio Toyoshima, Naoto Kadowaki, Shojiro Ishibashi, Tatuya Fukuda, and Hiroshi Yoshida, "THE TELE-OPERATION EXPERIMENT OF THE HYBRID REMOTELY OPERATED VEHICLE USING SATELLITE LINK," International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2015), June 2015.
 - 4 "超高速インターネット衛星 (WINDS) 特集," 情報通信研究機構季報, vol.53, no.4, 2007年12月.
 - 5 Akira Akaishi, Takashi Takahashi, Kazuyoshi Kawasaki, Norihiko Katayama, Byeong-pyo Jeong, and Toshio Asai, "Ka-band Broadband Mobile Earth Station for WINDS Satellite," ICSSC2015, Sept. 2015.
 - 6 <https://iperf.fr/>
 - 7 Norihiko KATAYAMA, Toshio ASAI, Kazuyoshi KAWASAKI, and Takashi TAKAHASHI, "A Study on TCP Window Size Control Method Suitable for WINDS Regenerative mode," IEICE Technical Report, Aug. 2012.
 - 8 <http://www4.ncsu.edu/~rhee/export/bitcp/cubic-paper.pdf>
 - 9 <https://tools.ietf.org/html/rfc768>



片山典彦 (かたやま のりひこ)
 ワイヤレスネットワーク総合研究センター
 宇宙通信研究室
 研究員
 博士(工学)
 衛星通信、電波伝搬、ネットワーク



赤石 明 (あかいし あきら)
 ワイヤレスネットワーク総合研究センター
 宇宙通信研究室
 技術員(当時)
 衛星通信システム



浅井敏男 (あさい としお)
 ワイヤレスネットワーク総合研究センター
 宇宙通信研究室
 衛星通信システム



川崎和義 (かわさき かずよし)
 ワイヤレスネットワーク総合研究センター
 宇宙通信研究室
 主任研究員
 衛星通信



高橋 卓 (たかはし たかし)
 ワイヤレスネットワーク総合研究センター
 宇宙通信研究室
 副室長
 衛星通信

吉村直子 (よしむら なおこ)
 ワイヤレスネットワーク総合研究センター
 研究マネジャー
 衛星通信



豊嶋守生 (とよしま もりお)
 ワイヤレスネットワーク総合研究センター
 宇宙通信研究室
 室長
 博士(工学)
 光衛星通信