【資料2】

第3回空港除雪の省力化・自動化に向けた実証実験検討委員会

2. 実証実験結果の報告

(1) 検証内容

(2) 検証方法

(3) 検証結果(結果概要、各社報告)

○資料概要

国土交通省

1. 実証実験概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（資料1）

（1）目的等

（2）実施概要

（3）実験装置概要

2. 実証実験結果の報告・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（資料2）

（1）検証内容

（2）検証方法

（3）検証結果（結果概要、各社報告）

3. 今後の取組概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（資料3）

(1) 検証内容

国土交通省

1)精度

① 停止時の位置精度
② 移動時の位置精度
③ 電波等の影響

2)耐久性 :(気温に依る影響、防水性能、耐振動性能)

3)測位の遅延性(第2回委員会での指摘事項)

募集要項には記載が無いため、以下内容から各社可能な範囲で協力依頼

① GPS時刻
② Fix解
③ 自車位置出力時刻
④ モニタ表示時間

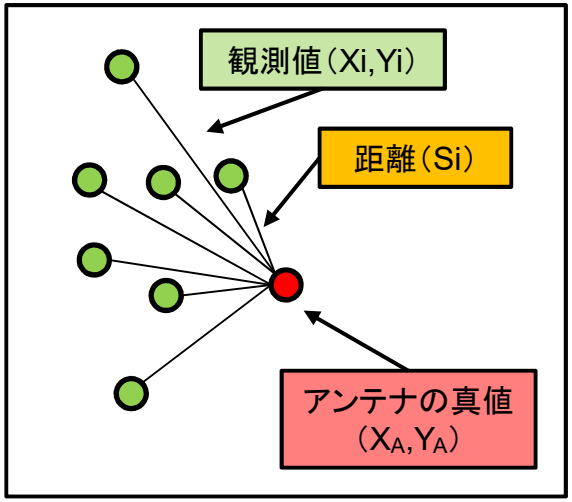
4)その他応募者からの提案により必要と考えられる事項 (追加提案事項)

–LTE通信を用いた映像伝送試験((株)NTTドコモ北海道支社からの提案)

(2) 検証方法

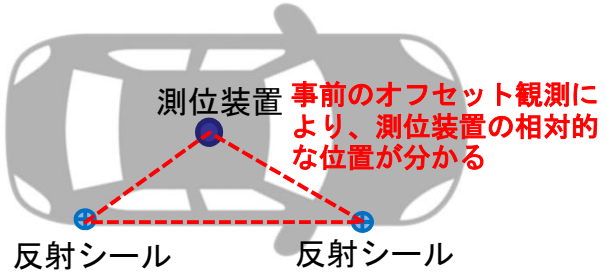
国土交通省

停止時の精度検証方法



アンテナの真値

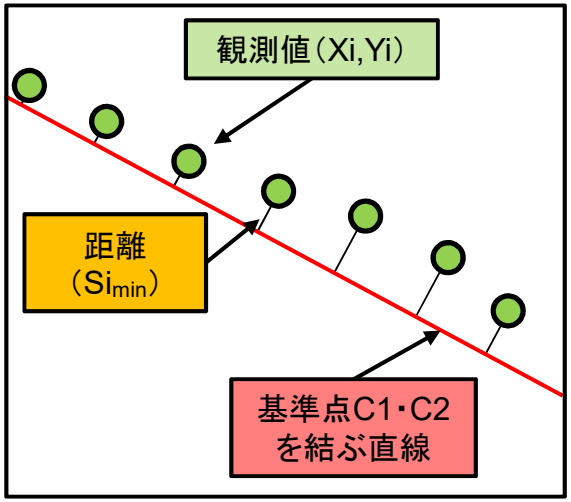
停止点に停車した状態で、トータルステーションを用いて反射シールの位置を計測する。事前に計測した3点の関係性からアンテナ位置を特定する。



精度検証方法

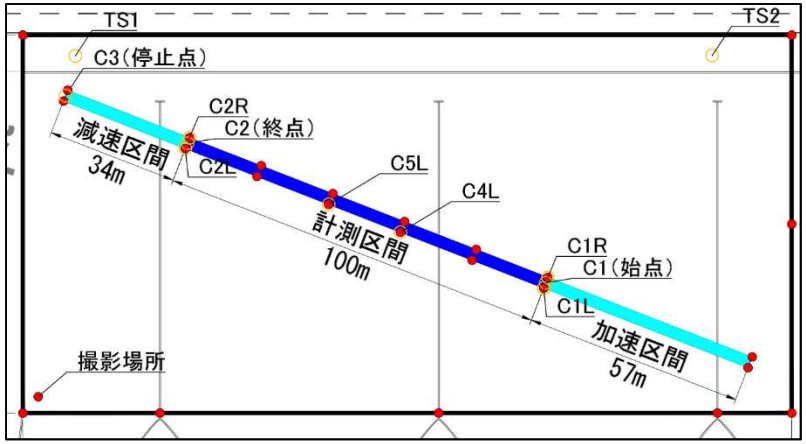
1. アンテナの真値と各観測値の座標から距離（Si）を算出する。
2. 一回の走行における距離（Si）の平均・最大・最小を算出する。

移動時の精度検証方法



精度検証方法

1. 基準点C1・C2を結ぶ直線を作成
2. 各観測値から直線の最短距離（Si_{min}）を算出
3. 一回の走行における最短距離（Si_{min}）の平均・最大・最小を算出



(3) 検証結果

国土交通省

検証結果は、車のステアリング操作(かじ取り操作)に影響が有る（移動時の精度に影響がある）と考えられたため、大きく「(A)路面積雪無」「（B）路面積雪有」の2種類に分類した。

また、測位への影響有無として「（a）降雪無」「(b)降雪有」で再分類した。

路面積雪有無	状態	降雪有無	状況	取得メーカー
(A)路面積雪無 ステアリングの影響小	 まだらな状態 積雪が全く無い状態 	(a)降雪無 干渉物影響無	ステアリングの影響小 測位干渉物の影響無	4社中4社
		(b)降雪有 干渉物影響有	ステアリングの影響小 測位干渉物の影響有	4社中4社
（B）路面積雪有 ステアリングの影響大	 人工圧雪状態 自然積雪状態 	(a)降雪無 干渉物影響小	ステアリングの影響大 測位干渉物の影響無	4社中4社
		(b)降雪有 干渉物影響有	ステアリングの影響大 測位干渉物の影響有	4社中1社のみ

(3) 検証結果　―4社の結果まとめ―

国土交通省

(A) 路面積雪なし

路面積雪なしの検証結果を以下に示す。

写真. 集計に使用した路面積雪の状態

企業名	降雪有無		最小誤差※[cm]		耐久性(○:問題無　×:問題有)			
			停止時	移動時	気温	防水	振動	電波影響
1) ㈱エルムデータ	(a)降雪無		2.2	2.8	○	○	○	○
	(b)降雪有		2.5	3.0	○	○	○	○
2) パナソニックシステムソリューションズジャパン㈱ ㈱三英技研	(a)降雪無		2.2	2.0	○	○	○	○
	(b)降雪有		2.4	2.3	○	○	○	○
3) アイサンテクノロジー㈱ ㈱建設技術研究所 ㈱マップフォー	(a)降雪無		1.5	3.0	○	○	○	○
	(b)降雪有		2.0	3.0	○	○	○	○
4) ㈱NTTドコモ 北海道支社	(a)降雪無	RTK	5.5	3.1	○	○	○	○
		CLAS	1.5	3.4	○	○	○	○
		SBAS	52.4	13.7	○	○	○	○
	(b)降雪有	RTK	6.2	2.7	○	○	○	○
		CLAS	1.4	1.9	○	○	○	○
		SBAS	71.6	40.8	○	○	○	○

※条件に該当する走行回の平均誤差の中から最小と最大を抽出(例:8回分の走行データの各平均誤差から最小最大を抽出)

(3) 検証結果　―4社の結果まとめ―

国土交通省

(B) 路面積雪あり

路面積雪ありの検証結果を以下に示す。

写真. 集計に使用した路面積雪の状態

企業名	降雪有無		最小誤差※[cm]		耐久性(○:問題無　×:問題有)			
			停止時	移動時	気温	防水	振動	電波影響
1) ㈱エルムデータ	(a)降雪無		4.1	2.3	○	○	○	○
	(b)降雪有		17.4	5.8	○	○	○	○
2) パナソニックシステムソリューションズジャパン㈱ ㈱三英技研	(a)降雪無		1.5	5.9	○	○	○	○
	(b)降雪有		—	—				
3) アイサンテクノロジー㈱ ㈱建設技術研究所 ㈱マップフォー	(a)降雪無		1.8	6.0	○	○	○	○
	(b)降雪有		—	—				
4) ㈱NTTドコモ 北海道支社	(a)降雪無	RTK	6.4	6.9	○	○	○	○
		CLAS	1.7	6.5	○	○	○	○
		SBAS	—	—				
	(b)降雪有	RTK	—	—				
		CLAS	—	—				
		SBAS	—	—				

※条件に該当する走行回の平均誤差の中から最小と最大を抽出(例:8回分の走行データの各平均誤差から最小最大を抽出)

実証実験参加者による検証結果の考察

1）株式会社エルムデータ

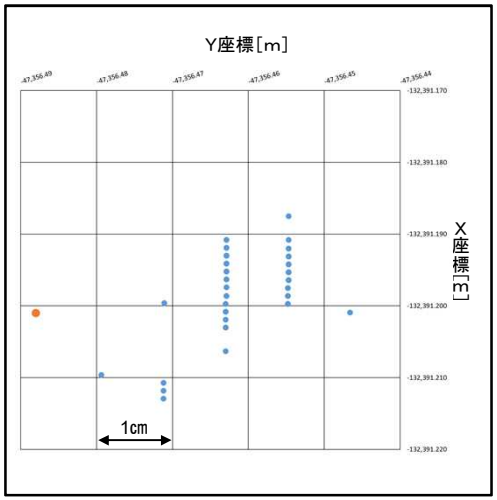
2）パナソニックシステムソリューションズジャパン株式会社
株式会社三英技研

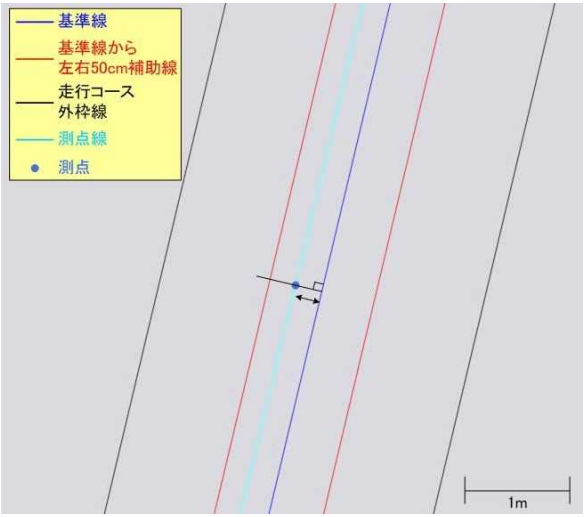
3）アイサンテクノロジー株式会社
株式会社建設技術研究所
株式会社マップフォー

4）株式会社NTTドコモ北海道支社

1）（株）エルムデータ　①精度検証結果

国土交通省

<table>
<tr><th></th><th>停止時</th><th>移動時</th></tr>
<tr><td>イメージ</td><td>


<table>
<tr><td>日付</td><td>2月3日</td></tr>
<tr><td>走行No.</td><td>4回目①</td></tr>
<tr><td>条件</td><td>積雪なし
降雪あり</td></tr>
<tr><td>平均誤差</td><td>2.96cm</td></tr>
</table>
● アンテナ真値
● 観測値
</td><td>


</td></tr>
<tr><td>検証方法</td><td>※3ページ参照</td><td>※3ページ参照</td></tr>
<tr><td>結果</td><td>
• RTK測位がFix時は精度30cm以内で安定
• Float時やRTK未測位時は最大で100cmを超える誤差も有り
</td><td>
• RTK測位がFix時は精度30cm以内で安定することが多い
• Float時は50cm以内の走行が多く、50cmラインを越えることも有り
• 比率的にもFloat時の割合が多い
</td></tr>
<tr><td>考察</td><td>
• Float状態の原因
➢ 基地局と移動局間の距離が離れたことにより接続が解除されたと考えられる。
➢ 解除要因として無線アンテナを車内に設置していたために、電波強度が下がったことが想定される。
• 対策
➢ 今回は8dBmの電波強度で基地局－移動局間の無線通信をおこなったが、空港の広さを考慮すると無線アンテナを車外への設置や、より電波強度を上げる必要があると考えられる。（8dBmで約300mは可能）
</td><td>
• Float状態の原因
➢ Fix状態にさせる為には、基地局の電源投入から車両のスタート迄の間に状態を安定させる為のアイドリング時間が必要だったのではないかと思われる。
➢ 今回使用したGPSモジュールは2種類の衛星（GPS（QZSS）＋GLONAS） でRTK測位を行っており、各衛星の数や幾何学的配置が影響したことも推察される。
• 対策
➢ 精度をより向上させるためにアイドリング時間を延ばすことや、他の衛星（Galileo、Beidou等）を利用した4種類でのRTK測位が有効と考えられる。
</td></tr>
</table>

1）（株）エルムデータ

①精度検証結果（補足資料）

国土交通省

日付	実験No.	天候	路面状態	走行速度	停止時の誤差(アンテナ真値とのずれ)			移動時の誤差(基準点C1C2を結ぶ中心線とのずれ)		
					平均値 [m]	最小値 [m]	最大値[m]	平均値 [m]	最小値 [m]	最大値[m]
2/2	1	曇り	積雪なし	40	0.399	0.286	0.469	0.468	0.362	0.527
				40	0.525	0.434	0.635	0.238	0.191	0.305
				40	1.022	0.650	1.339	2.310	1.935	2.779
2/3	1	曇り	新雪	40	0.201	0.060	0.387	0.040	0.003	0.075
				40	0.041	0.016	0.122	0.023	0.001	0.059
				40	0.157	0.040	0.248	0.104	0.081	0.135
	2	晴れ	積雪なし	40	0.513	0.103	0.710	0.062	0.013	0.180
				40	0.580	0.367	0.710	0.325	0.250	0.362
				40	0.132	0.007	0.237	0.028	0.004	0.059
	3	曇り	積雪なし	40	0.368	0.229	0.800	0.270	0.220	0.319
				40	0.022	0.006	0.044	0.095	0.062	0.118
				40	0.131	0.042	0.196	0.028	0.004	0.069
	4	降雪	積雪なし	40	0.030	0.012	0.041	0.037	0.000	0.106
				40	0.025	0.010	0.041	0.047	0.004	0.073
				40	0.028	0.011	0.038	0.030	0.001	0.098
2/4	1	曇り	積雪なし	40	0.106	0.017	0.268	0.030	0.011	0.050
				40	0.137	0.041	0.314	0.359	0.230	0.439
				40	0.220	0.024	0.470	0.032	0.002	0.056
	2	降雪	積雪なし	40	0.286	0.085	0.388	0.040	0.001	0.070
				40	0.162	0.037	0.227	0.038	0.009	0.071
				40	0.200	0.070	0.471	0.170	0.112	0.212
	3	晴れ	圧雪（人工コース）	43	0.300	0.019	1.440	0.117	0.010	0.326
				43	0.701	0.183	1.088	0.115	0.006	0.298
				41	0.314	0.119	1.229	0.362	0.253	0.440
2/5	1	降雪	圧雪（人工コース）	40	0.610	0.349	0.785	0.549	0.427	0.662
				40	0.174	0.131	0.250	0.058	0.002	0.141
				41	0.848	0.116	1.548	0.351	0.043	0.454

1）（株）エルムデータ　②耐久性　③測位の遅延性

国土交通省

検証項目		結果	考察
耐久性	気温	• 実証実験完了後、機器類の目視および動作確認をおこなったが、破損および動作等に問題ないことを確認した。 • 試験完了ごとに防水ボックス内に水等の侵入がないか確認したが問題なかった。	• 今回使用した端末は除雪機に実際に搭載したものを使用しており、-30度環境でも動作できるように部品を選定している。 • 開発後に恒温槽を使用して-30度環境を作り正常動作することを確認している。そのため低温環境下での動作には問題ないと考えられる。
	防水性能		• 車載端末は車内設置のため防水対応はしていないが、基地局側は防水ボックスに搭載して屋外設置をおこなった。
	耐振動性能		• 今回使用した端末は除雪機に実際に搭載したものを使用しており、今回の実証実験時に生じた振動では動作には問題はないと言える。
遅延性	GPS時刻	• GPS信号は1秒に1回受信しており、遅延なく受信は行われた。	• GPSモジュールから1秒周期で座標データを出力しているため、車載端末には遅延なくデータが収集されている。
	Fix解	• GPSモジュールの特性により電源投入後にRTK測位がFix状態になるのは最短でも60秒要する。	• 機器の仕様上最短で60秒程度であり、衛星の幾何学的配置が悪い場合はFix状態になるまで、より時間を要する。
	自車位置出力時間	• 車載端末からサーバへは10秒周期でGPSデータを送信している。そのため自車位置をサーバへ送るまでに最大で10秒の遅延が発生している。	• 今回は既存のシステムを活用したためサーバへの送受信を行った。システムの改良により1秒周期まで短縮は可能であると考えられる。
	モニタ表示時間	• サーバ内でデータ処理をおこなったのちにWEBページに走行ルートデータを表示している。WEBページは5秒周期で自動更新する作りになっているため走行ルートが表示されるまでは20～30秒程度の遅延が発生していた。	• 上記の検証より今回はサーバを介して地図表示をおこなったが、遅延性をなくすために地図データがインストールされた表示端末にGPS端末が直接送信するのが有効と考えられる。

検証結果の整理

- Fix時の精度は有用であると考えられるが、実験全体を通してFix率が小さい結果となった。車載端末の処理に時間を要しためFix状態になるまで時間がかかった可能性が高い。その他にも今回使用したGPSモジュールでは同時に受信できるGNSSが2種類（今回はGPS（QZSS）とGLONASS）だった為、衛星の位置等の条件によって測位の安定性が不足していたと考えられる。
- 空港特有の電波等の影響は無かったと思われるが、帯域外干渉が全く無かったどうか断定はできない。
- 1秒周期での計測ではデータ間の距離が大きくなり、自動運転に向けてはさらに高頻度でデータを取得する必要がある。
- モニタ表示は弊社データサーバを介した表示としたため、表示遅延が大きく見られた。サーバを介さずに直接モニタへGPSデータを伝送するようにしてデータ遅延をなくす必要があると考えられる。

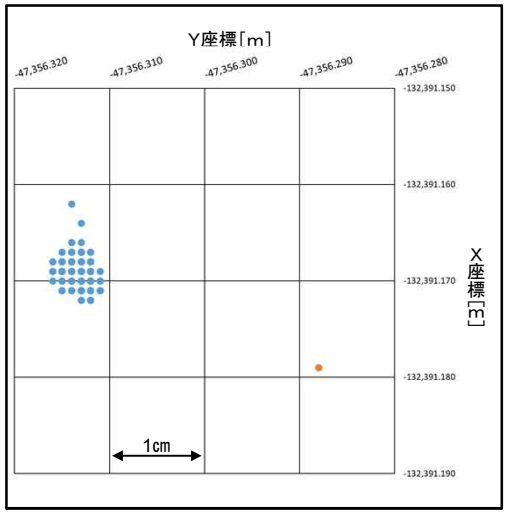
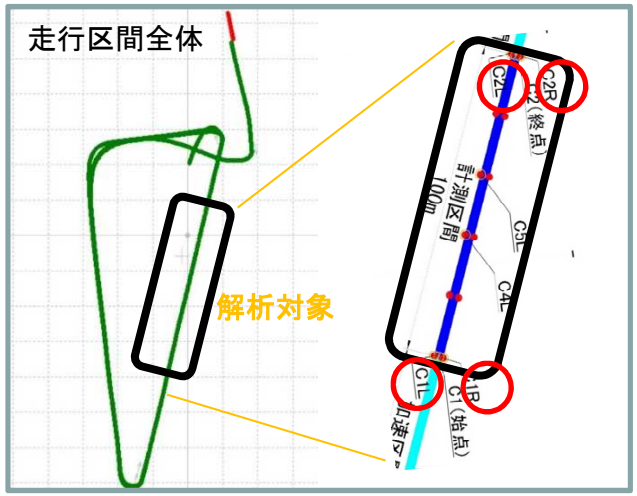
今後の展望・対応策

- 事前の動作検証時にはFix状態になるまで約10～15分を要していたため、アイドリング時間を十分に確保する必要が有る。
- 後継機種のGPSモジュールを使用することで、同時に受信できるGNSSを増加させ、4種類（GPS（QZSS）、GLONASS、Galileo、Beidou）とする事により測位精度が高まると期待される。
- 今回使用したGPSアンテナ（通常タイプのアクティブアンテナ）は移動体向けでは有ったが、今後は他の種類のアンテナも視野に入れ測位の安定性の観点から検証を行うことも必要である。
- 計測周期を0.1～0.5秒程度まで早めることによりより詳細な走行ルートデータの取得が可能となる。
- 車載端末を小型にすることで、様々な場所へ容易に設置できるサイズにする必要がある。
- 走行時にモニタを見ることを想定した場合、3Dマップへの出力対応も必要となる（今後の改良が必要である）。
- 今回は短期間での検証だったため、基地局の電源はモバイルバッテリーにて対応できたが、常設の場合は固定電源等の考慮が必要である。また、その際には基地局の設置場所（見通しの事も考慮すると高い場所への設置）の検討も必要である。
- 今回の検証では1つの基地局に対して1台の車両だったが、複数台が同時に動く場合は回線を圧迫することも懸念され、今後の検討が必要である。

2) パナソニックシステムソリューションズジャパン㈱ ㈱三英技研

①精度検証結果

国土交通省

	停止時	移動時
イメージ	 日付：2月3日 走行No.：3回目① 条件：積雪なし 降雪あり 平均誤差：2.72cm ● アンテナ真値 ● 観測値	
検証方法	※3ページ参照	※3ページ参照
結果	• 試験トータルで正確度（絶対誤差平均）が2.7cm以内に収まっており、非常に高精度に測位が出来ていると考えられる。 • 標準偏差からわかる精密度も、0.1cm未満～0.35cmの間に収まっており、非常に高精度に測位が出来ていると考えられる。	• 中心線に対する誤差平均は路面状態に依らず、16cm以内に収まっている。 • 圧雪時は他に比べて誤差が僅かに大きいが、平均誤差10cm以内を維持※詳細次ページ
考察	• トータルとして当社機材の性能が発揮出来たのではないかと考察する。 • 除雪ガイダンスシステムとして十分使用可能な機器であると結論付けられる。	• 運転時のオペレーション差分も含まれていることを前提とすると、かなりの高精度に測位ができたと考察する。

①精度検証結果（補足資料）

日付	実験No.	天候	路面状態	走行速度	停止時の誤差(アンテナ真値とのずれ)			移動時の誤差(基準点C1C2を結ぶ中心線とのずれ)		
					平均値 [m]	最小値 [m]	最大値[m]	平均値 [m]	最小値 [m]	最大値[m]
2/2	1	曇り	積雪なし	40	0.023	0.016	0.030	0.035	0.0001	0.077
				40	0.030	0.023	0.032	0.103	0.0021	0.192
				40	0.029	0.022	0.035	0.101	0.0006	0.188
2/3	1	晴れ	新雪	40	0.027	0.023	0.031	0.073	0.0129	0.094
				40	0.025	0.020	0.029	0.099	0.0004	0.142
				40	0.024	0.020	0.030	0.059	0.0001	0.129
	2	曇り	積雪なし	40	0.030	0.020	0.039	0.089	0.0054	0.142
				40	0.026	0.021	0.038	0.156	0.0010	0.310
				40	0.025	0.018	0.037	0.084	0.0001	0.169
	3	降雪	積雪なし	40	0.027	0.024	0.031	0.023	0.0001	0.044
				40	0.026	0.024	0.029	0.059	0.0004	0.150
				40	0.024	0.022	0.026	0.025	0.0013	0.058
2/4	1	晴れ	積雪なし	40	0.026	0.023	0.030	0.038	0.0017	0.061
				40	0.023	0.020	0.027	0.020	0.0001	0.039
				40	0.022	0.020	0.025	0.056	0.0063	0.111
	2	降雪	積雪なし	40	0.035	0.032	0.039	0.060	0.0349	0.086
				40	0.037	0.034	0.040	0.036	0.0125	0.061
				40	0.039	0.035	0.042	0.047	0.0001	0.097
	3	晴れ	圧雪（人工コース）	43	0.025	0.020	0.029	0.100	0.0014	0.204
				43	0.024	0.020	0.027	0.103	0.0039	0.217
				41	0.020	0.017	0.022	0.073	0.0038	0.185
2/5	1	曇り	圧雪（人工コース）	40	0.031	0.027	0.037	0.094	0.0007	0.229
				40	0.029	0.023	0.033	0.092	0.0007	0.171
				41	0.015	0.011	0.021	0.090	0.0017	0.198

②耐久性
③測位の遅延性

<table>
<tr><th colspan="2">検証項目</th><th>結果</th><th>考察</th></tr>
<tr><td rowspan="3">耐久性</td><td>気温</td><td>• アンテナ・ケーブルを外部に露出。準備期間含め4日間屋外に残置したが、動作含め影響はみられなかった。
• タブレット・モジュールについては車内残置ではあったが、気温による影響はみられなかった。</td><td rowspan="3">• 実験全体を通して耐久性に関する影響はないことから実運用での使用も有効であると言える。
• 本実験では降雪時の影響は無かったが、アンテナの上に20cm程度の積雪がある場合は精度に影響することが懸念される。</td></tr>
<tr><td>防水性能</td><td>• アンテナ・ケーブルを外部に露出。準備期間含め4日間屋外に晒したが、動作含め影響はみられなかった。</td></tr>
<tr><td>耐振動性能</td><td>• 実証実験中、及び実験後に目視により機材外殻の破損やシステムへの影響が無いことを確認した。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">遅延性</td><td>起動後～FIXまで単位（秒）</td><td>
<table>
<tr><th>実施日時</th><th>GNSSモジュールデータ受信～補正情報取得</th><th>RTK演算開始</th><th>FIX</th><th>合計</th></tr>
<tr><td>2/3-1</td><td>1.3</td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>1.5</td></tr>
<tr><td>2/3-2</td><td>2.1</td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>2.3</td></tr>
<tr><td>2/3-3</td><td>1.3</td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>1.5</td></tr>
<tr><td>2/4-1</td><td>1.0</td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>1.2</td></tr>
<tr><td>2/4-2</td><td>2.3</td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>2.5</td></tr>
<tr><td>2/4-3</td><td>2.3</td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>2.5</td></tr>
<tr><td>2/5-1</td><td>1.5</td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>1.7</td></tr>
<tr><td>平均</td><td>1.69</td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>1.89</td></tr>
</table>
</td><td>• ソフトウェア起動後からFIXまで平均1.89秒で完了していることが確認できた。
• 降雪時など天候には左右されてはおらず、速度としても運用に支障ないものが出ているといえる。</td></tr>
<tr><td>実験時のフロート状態</td><td>LT: 2/2-1 16:19:37
LT: 2/2-2 16:21:45
LT: 2/2-3 16:25:24-16:26:36
LT: 2/3-2 12:26:08
• 上記時間でDRが発生していた。</td><td>• 当該時間のPDOP値を確認すると
2/2 16:15～16:30 1.0～0.8
2/3 12:15～12:30 1.5～1.1
以上のため、衛星数は問題ないといえる。
その他外的要因等で一時的に発生したと考えられる。</td></tr>
<tr><td>モニタ表示時間</td><td>• 走行コースに設置したパイロンを目視で確認することで遅延を検証したが、大きな遅延は見られなかった。</td><td>• 除雪ガイダンスシステムとして十分使用可能な装置であると言える。</td></tr>
</table>

検証結果の整理

【全体的な精度の評価】

- 使用した機器は、走行測位時の中心線に対する誤差平均は、路面状態に依らず16cm以内で、圧雪時は他に比べて誤差が僅かに大きいが、平均誤差10cm以内を維持しており、実験車両の運転時におけるオペレーション誤差のレベルに収まっていると考えられる。
- 停止位置での測位誤差は、全計測の平均値は2.7cmで、高精度に測位できていることから、除雪ガイダンスシステムとして十分使用可能な機器であると結論付けられる。

【実証実験を通して把握できた課題】

特になし。

今後の展望・対応策

【除雪自動化への展望・対応策と懸念事項】

- 除雪自動化は、フロントプラウ等の「①作業装置の自動制御」と「②除雪車走行の自動制御」が考えられる。

① 作業装置の自動制御

高精度な3次元地図を作成した上で制御したい位置に制御情報を埋め込み、除雪車との通信ネットワークの構築と作業装置の自動制御機能を構築できれば実現できる。

除雪トラック用作業装置の自動制御は、北陸地方整備局で実証済みで、空港除雪における作業装置の自動制御は、滑走路上の地灯等への衝突を自動的に回避するフロントプラウの昇降自動制御が考えられる。本検証結果の精度で測位できる除雪ガイダンスシステムを構築できれば実現できる可能性がある。

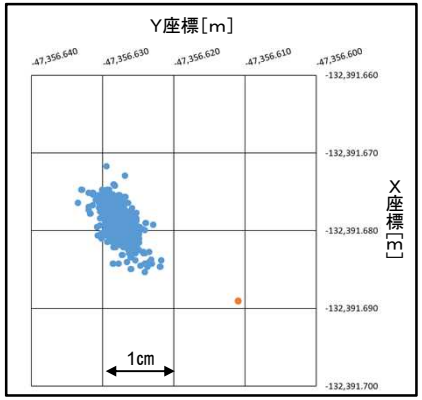
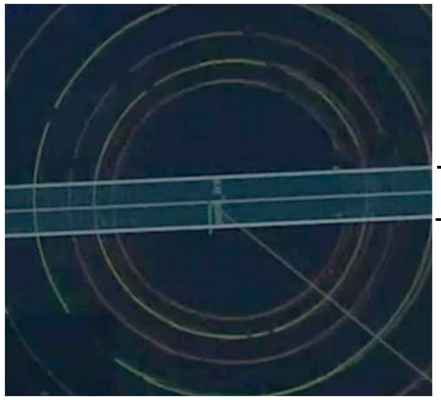
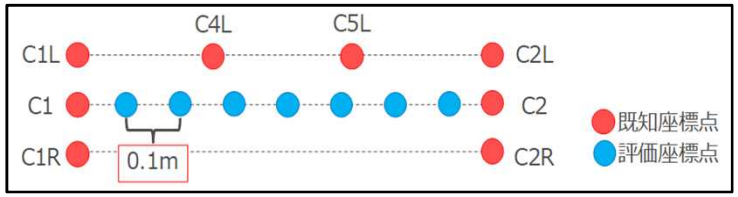
② 除雪車走行の自動制御

除雪トラックを真っすぐに走行できるようにするためのステアリングの自動操舵と、トラックの無人走行を実現する自動運転が考えられる。前者は主に農業用トラクターに導入されているシステムがあるが、低速走行を前提としたシステムのため時速40kmの走行では使えない可能性が高い。後者はトラックメーカが開発を加速させており、トラックの隊列走行の実証実験も行われているが、除雪車の更新周期が長く、隊列走行による無人運転を実現するためには、全ての除雪車を一斉に更新する必要があり、無人運転が困難なエプロン等の除雪作業もあるため、完全な無人運転を実現することには解決しなければならない課題があり、それらの解決に向けた対応策を検討していく必要がある。

3) アイサンテクノロジー㈱・㈱建設技術研究所 ㈱マップフォー

①精度検証結果

国土交通省

	停止時	移動時
イメージ	 日付：2月3日 走行No.：3回目① 条件：積雪なし 降雪あり 平均誤差：1.98cm ● アンテナ真値 ● 観測値	 図:位置推定結果の可視化の様子 予め測量で求められた座標を元にレーンを可視化しており、リアルタイムな位置推定結果が中心に表示されている。同心円状の線はLiDAR点群。
検証方法	※3ページ参照	• 評価基準は走行コースにおける中心線となるため、コース中心線において0.1[m]毎に評価点を設置(概要図参照)。誤差は、作成した評価点と測位点が最小となるような組み合わせを用いて算出を行う。 ＜評価点の概要図＞ 
結果	• 位置推定精度評価では、GNSS/IMUの複合航法、3次元地図とLiDARのスキャンマッチング、両者の統合の3種類を検討したが、今回の計測環境は3次元的な特徴が少なかったため、後二者は適用することが困難であった。 • GNSS/IMUの複合航法による位置推定手法による精度結果は，誤差最大値が0.05[m]，誤差最小値が0.014[m]となることを確認。	• 誤差の最大値が0.3[m]以内であることを確認。 • 誤差0.3[m]以内に推定できた箇所は全走行24回の100[%]を確認。 • 誤差平均0.08[m]を確認し、全体平均で高精度な自己位置推定データを取得。 • GNSS/IMUの複合航法による位置推定手法による精度結果は，誤差最大値が0.15[m]，誤差平均値が0.08[m]，誤差標準偏差が0.03[m]，2DRMSが0.08[m]となることを確認。
考察	• 実証実験フィールドでは、ビル街等の遮蔽物の多い都市部環境下と比較してマルチパスが発生しにくい環境であったことから、GNSSの精度が劣化することなく位置推定できたと考えられる。	• 実証実験フィールドでは、ビル街等の遮蔽物の多い都市部環境下と比較してマルチパスが発生しにくい環境であったことから、GNSSの精度が劣化することなく位置推定できたと考えられる。

①精度検証結果（補足資料）

日付	実験No.	天候	路面状態	走行速度	停止時の誤差(アンテナ真値とのずれ)			移動時の誤差(基準点C1C2を結ぶ中心線とのずれ)		
					平均値 [m]	最小値 [m]	最大値[m]	平均値 [m]	最小値 [m]	最大値[m]
2/2	1	晴れ	積雪なし	40	0.032	0.028	0.037	0.150	0.060	0.240
				41	0.034	0.034	0.038	0.070	0.020	0.110
				40	0.033	0.028	0.039	0.170	0.030	0.240
2/3	1	曇り	積雪なし	40	0.023	0.019	0.029	0.050	0.040	0.140
				40	0.023	0.018	0.027	0.030	0.010	0.070
				40	0.019	0.016	0.023	0.040	0.020	0.120
	2	曇り	積雪なし	40	0.031	0.025	0.036	0.120	0.050	0.180
				40	0.026	0.022	0.032	0.050	0.020	0.090
				40	0.023	0.017	0.029	0.080	0.030	0.130
	3	降雪	積雪なし	40	0.020	0.012	0.026	0.040	0.020	0.080
				40	0.022	0.015	0.027	0.060	0.020	0.110
				40	0.022	0.017	0.027	0.050	0.020	0.190
2/4	1	晴れ	積雪なし	40	0.015	0.002	0.025	0.050	0.020	0.100
				40	0.017	0.012	0.022	0.050	0.020	0.090
				40	0.024	0.020	0.030	0.070	0.030	0.110
	2	降雪	積雪なし	40	0.027	0.022	0.035	0.070	0.020	0.120
				40	0.029	0.023	0.033	0.030	0.010	0.090
				40	0.034	0.029	0.038	0.100	0.020	0.140
	3	晴れ	圧雪（人工コース）	42	0.026	0.023	0.029	0.080	0.040	0.180
				45	0.018	0.009	0.023	0.090	0.040	0.180
				43	0.019	0.014	0.027	0.060	0.040	0.210
2/5	1	曇り	圧雪（人工コース）	42	0.046	0.046	0.047	0.110	0.060	0.250
				42	0.051	0.049	0.054	0.100	0.050	0.240
				50	0.048	0.045	0.050	0.100	0.050	0.230

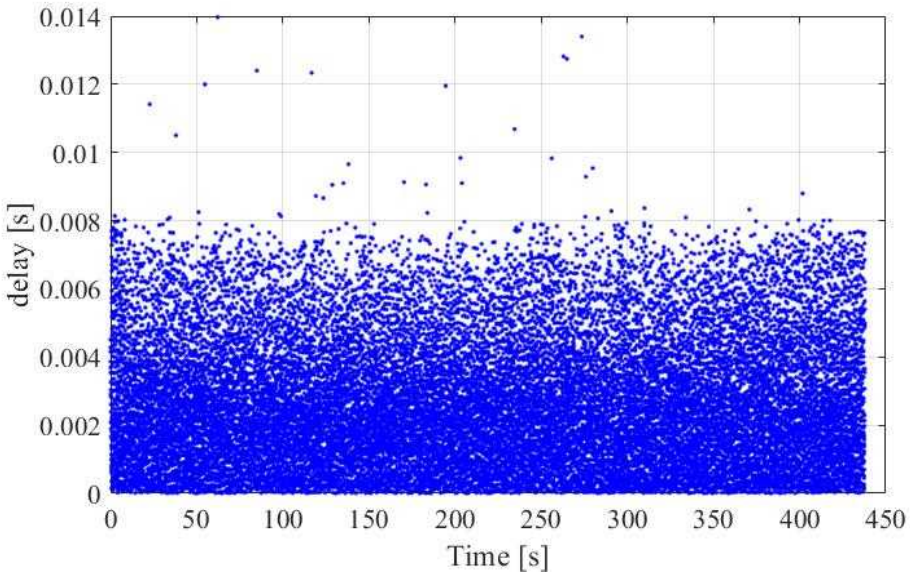
②耐久性
③測位の遅延性（1/2）

検証項目		結果	考察
耐久性	気温 防水性能 耐振動性能	• それぞれの外部要因がある環境下での各センサ及び処理結果のデータについて、連続するPC時間に対照してデータの乱れやデータ落ち等を確認した。全24回の走行データにおいて問題無いことを確認済み。 • 各機器も実験終了後、正常動作を確認し、故障等無いことを確認。	• LiDARは実証実験においては問題なく使用できたが、仕様では-10℃までとされており、仕様の範囲内で利用することが条件となる。
遅延性	GPS時刻	• 本実証実験で用いた受信機から出力されるGNSSデータはNMEA0183プロトコルのGGAセンテンスおよびRMCセンテンスである。また、UART設定としてスタートビット 1bit、データビット 8bit、ストップビット 1bit、パリティビット 無し、ボーレート115200bpsという設定から144[文字]×10[bit]/115200[bps]=0.0125[s]が送信に必要な時間と予想。	• 予測値としては0.01秒程度であり、この程度の遅延であれば、その他の遅延要因と比較しても大きな影響は無いと言える。
	Fix解	機器仕様上対象外	
	自車位置出力時間	• 概ね0.01[s]以内に処理が行われていることを確認。（次ページ参照）	• 実際の車両位置より，0.01[s]程度遅れた位置推定結果が出力されていることが予想される。
	モニタ表示時間	• 位置推定結果の表示にはROS (Robot Operating System)に含まれるrvizを用いた。こちらはROSで取り扱われるメッセージの可視化を行うためのツールである。こちらは30Hzの更新周期で自車位置推定結果を表示するため0.0~0.033[s]の表示遅延が想定される。	• 予測値として約0.033秒の遅延であるが、目視で実際のパイロン位置を確認した結果では大きな遅延は無く、ガイダンスシステムへの影響は小さいと考えられる。

②耐久性
③測位の遅延性（2/2）

遅延性検証結果の考察

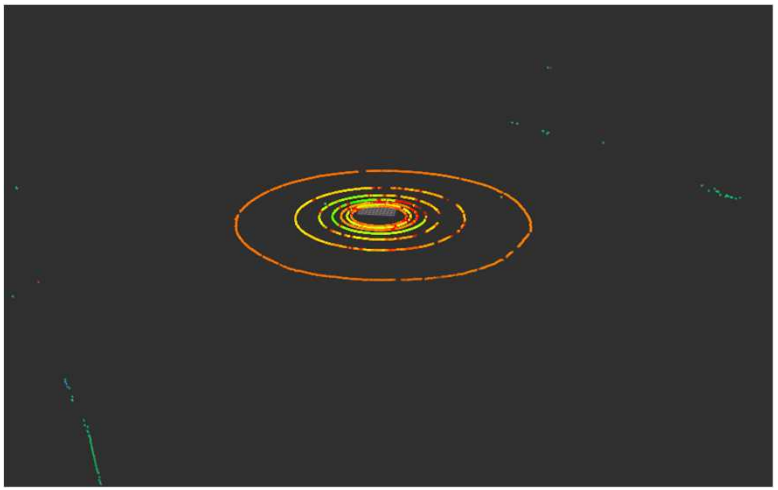
● 自社位置出力時間の遅延性検証
PCにて取得したIMUデータが最終的に位置結果になるまでの時間差分を処理時間として計算し、図に処理時間結果を明示。
図より，概ね0.01[s]以内に処理が行われていることが確認できる．従って，実際の車両位置より，0.01[s]程度遅れた位置推定結果が出力されていることが予想される。



LiDARのスキャンマッチング

本実証実験での環境では、SLAMによる地図作成は困難であり、3次元地図とLiDARデータのスキャンマッチングの手法は実施できなかった。スキャンマッチング及びそれを用いたSLAMによる地図作成では，LiDARから取得される家屋やビルなどの3次元的な特徴点をもとに処理するが、右図が示すように駐機場区域では広範囲にわたって立体的な特徴が少なく、同心円上の路面点群しか取得できていないことが確認できる。
また、本実証実験で用いたLiDAR Velodyne VLP-16はカタログスペックで100mまでの測定距離しかないため、この区域では周囲の3次元的な特徴を持った対象物までレーザが届かないことが多く確認できた。

＜取得されたLiDARスキャンデータ図＞



検証結果の整理

【検証結果に関する考察】

- 今回使用したGNSS/IMUの複合航法による位置推定手法は廉価なGNSS，IMUの組み合わせであり，コスト10万円程度の構成である。その構成においても走行位置推定精度が，誤差最大値が0.15[m]，誤差平均値が0.08[m]，誤差標準偏差が0.03[m]，2DRMSが0.08[m]と高精度な位置精度の結果が算出されたのは良点であった。これは，GNSSの精度に影響するマルチパスが発生しにくい環境であったことが考えられる．マルチパスは，ビル街等の遮蔽物の多い都市部環境下で発生しやすいが，駐機場区域ではそのような遮蔽物がないためGNSSの精度が劣化することなく位置推定できた事も好結果の要因の一つと考察する。
- GNSS/IMU複合航法演算アルゴリズムにおいてはマルチパス判定機能が備わっている。マルチパスを判定する場合，PC処理時間を費やしてしまうが，今回の駐機場区域ではそのような判定を必要としていないので処理時間も理想的な処理速度で計算されているのではないかと考察した。

【課題】

- 当初使用を予定したNDTスキャンマッチング（マップマッチング）による位置推定結果が得られなかった。原因は走行エリア環境では広範囲にわたって3次元的な特徴が少なく、配置コーンや電灯などの地物とのマッチングも成功しなかったためであると推察される。

今後の展望・対応策

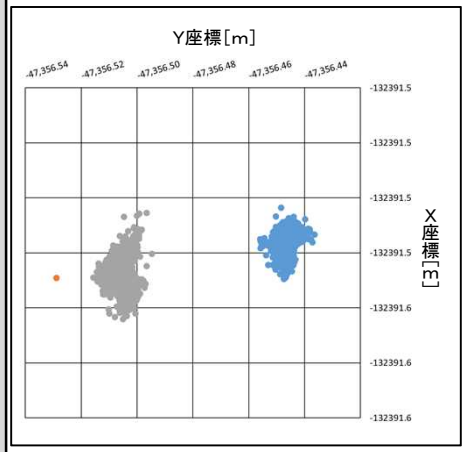
- 今回の実験フィールドにおいては、「3次元地図とLiDARのスキャンマッチング」を適用することができなかったが、ターミナル等の地物が多い場所では「GNSS/IMUの複合航法」と統合することで精度向上が期待できる。また、ガイダンスシステム以外にも、落下物等の地物の検出にも有効であると考えられる。
- 今回使用したLiDARセンサの測定距離は100mであったため、200mクラスの高スペック製品の搭載を検討するなど、空港環境下において適用するための改善も課題として挙げられる。

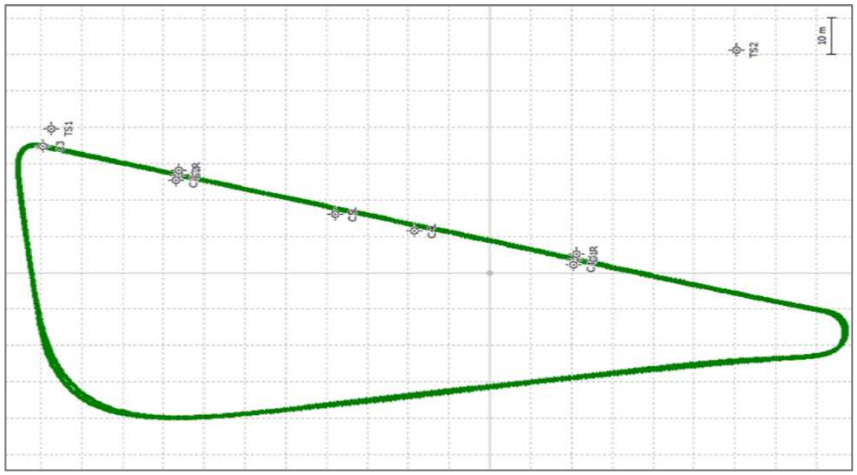
4) ㈱NTTドコモ北海道支社

①精度検証結果

国土交通省

基準点を真値とした時

<table>
<tr><th></th><th>停止時</th><th>移動時</th></tr>
<tr><td>イメージ</td><td>


<table>
<tr><td>日付</td><td>2月3日</td></tr>
<tr><td>走行No.</td><td>3回目①</td></tr>
<tr><td>条件</td><td>積雪なし
降雪あり</td></tr>
<tr><td>平均誤差</td><td>RTK：8.39cm
CLAS：2.44cm
SBAS：71.57cm</td></tr>
</table>
● アンテナ真値
● 観測値（RTK）
● 観測値（CLAS）
</td><td>


</td></tr>
<tr><td>検証方法</td><td>※3ページ参照</td><td>※3ページ参照</td></tr>
<tr><td>結果</td><td>
• 今回の要求精度となる50cm測位はSBASを除き満たしている。
• 精度は、AsteRx-U(CLAS)が最も良く、次点でAsteRx-SB(RTK)、次にChronosphere-L5S(SBAS)となった。
</td><td>
• 今回の要求精度となる50cm測位はSBASを除き満たしている。試験ごとに平均値を算出した結果、誤差の最大値は、RTKが63.6cm、CLASが33.5cmとなっていた。また、全ての測定値の平均はRTKが10.3cm、CLASは8.1cmとなっている。
• 精度は、AsteRx-U(CLAS)が最も良く、次点でAsteRx-SB(RTK)、次にChronosphere-L5S(SBAS)となった。
</td></tr>
<tr><td>結果に対する考察</td><td>
• 全体として高精度であったが、一部データにおいて電源の瞬断等の理由で取得できていない区間があった
• RTK測位とCLAS測位はセンチメータ級、SBAS測位はサブメータ級の結果が得られた。
• 天候による精度の差は見られなかった。
</td><td>
• 全体として高精度であったが、一部データにおいて電源の瞬断等の理由で取得できていない区間があった。
• RTK測位とCLAS測位はセンチメータ級、SBAS測位はサブメータ級の結果が得られた。
• 天候による精度の差は見られなかった。
</td></tr>
</table>

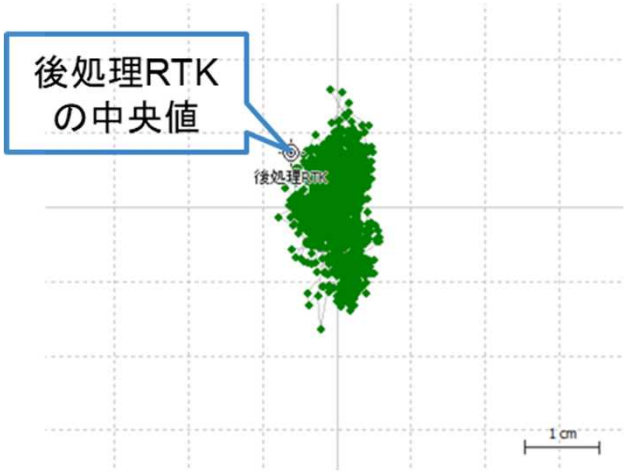
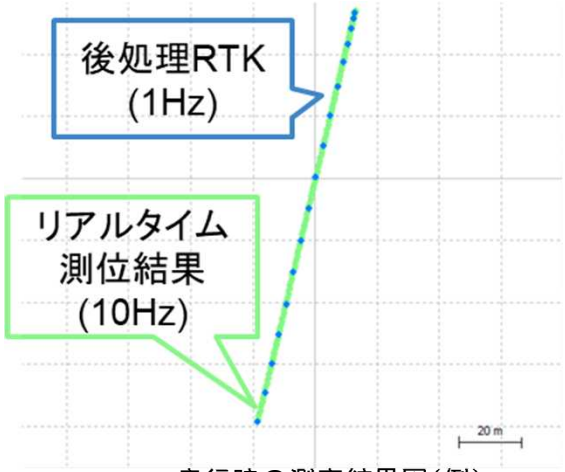
4) ㈱NTTドコモ北海道支社

①精度検証結果

国土交通省

後処理RTKを真値とした時

走行時の精度検証については基準線上を車両が確実に走ることは難しく、後処理RTKを用いた精度検証を行った。

	停止時	移動時
イメージ		 走行時の測定結果図（例）
検証方法	• 停止時、リアルタイムに取得した位置の測位結果と、後日、後処理RTKで導いた真値と、距離誤差の比較を行った	• 走行時、リアルタイムに取得した位置の測位結果と後日、後処理RTKで導いた真値と、距離誤差の比較を行った。
結果	• 今回の要求精度となる50㎝測位はSBASを除き満たしている。バラつき量に関してRTKの最大値は5.5cm、CLASの最大値は7.6cmとなっていた。また、平均値はRTKが1.7cm、CLASが5.1cmとなっている。 • 精度は、AsteRx-SB(RTK)が最も良く、次点でAsteRx-U(CLAS)、次にChronosphere-L5S(SBAS)となった。	• 今回の要求精度となる50㎝測位はSBASを除き満たしている。試験ごとに平均値を算出した結果、誤差の最大値は、RTKが9.5cm、CLASが10.8cmとなっていた。また、全ての測定値の平均はRTKが5.8cm、CLASは7.5cmとなっている。 • 精度は静止体と同じく、AsteRx-SB(RTK)が最も良く、次点でAsteRx-U(CLAS)、次にChronosphere-L5S(SBAS)となった。
結果に対する考察	• 全体として高精度であったが、一部データにおいて電源の瞬断等の理由で取得できていない区間があった • RTK測位とCLAS測位はセンチメータ級、SBAS測位はサブメータ級の結果が得られた。 • 天候による精度の差は見られなかった。	• 全体として高精度であったが、一部データにおいて電源の瞬断等の理由で取得できていない区間があった。 • RTK測位とCLAS測位はセンチメータ級、SBAS測位はサブメータ級の結果が得られた。 • 天候による精度の差は見られなかった。

4) ㈱NTTドコモ北海道支社

①精度検証結果（補足資料）

国土交通省

日付	実験No.	天候	路面状態	走行速度	停止時の誤差(アンテナ真値とのずれ)			移動時の誤差(基準点C1C2を結ぶ中心線とのずれ)		
					RTK	CLAS	SBAS	RTK	CLAS	SBAS
2/2	1	曇り	積雪なし	40	0.068	0.017	0.524	0.101	0.050	0.382
				40	0.061	0.019	0.793	0.037	0.058	0.137
				43	0.067	0.020	1.081	0.031	0.047	0.170
2/3	1	曇り	積雪なし	43	0.066	0.019	0.968	0.076	0.065	-
				44	0.074	0.020	0.958	0.042	0.060	-
				40	0.063	0.018	1.084	0.105	0.064	-
				42	0.072	0.015	1.138	0.083	0.047	-
	2	曇り	積雪なし	43	0.078	0.034	2.365	0.066	0.034	1.158
				43	0.089	0.039	2.130	0.330	0.285	0.790
				46	0.086	0.037	1.688	0.110	0.077	0.874
	3	降雪	積雪なし	42	0.084	0.024	0.716	0.027	0.019	0.408
				42	0.062	0.021	0.883	0.074	0.041	0.489
				41	0.067	0.027	0.852	0.048	0.028	0.523
2/4	1	晴れ	積雪なし	41	0.073	0.022	1.086	0.069	0.066	0.491
				40	0.062	0.024	0.894	0.048	0.039	0.413
				42	0.085	0.018	3.083	0.045	0.038	0.858
	2	降雪	積雪なし	40	0.062	0.025	1.022	0.059	0.085	0.908
				40	0.066	0.029	0.846	0.027	0.045	0.919
				38	0.074	0.014	0.840	0.074	0.035	0.789
	3	晴れ	積雪なし	40	0.055	0.020	4.657	0.105	0.082	0.643
				38	0.064	0.022	1.389	0.035	0.036	0.443
				41	0.079	0.021	0.987	0.084	0.075	0.499
	4	晴れ	圧雪（人工コース）	28	-	-	-	0.178	0.151	-
				31	0.064	0.381	-	0.636	0.335	-
				42	0.071	0.029	-	0.135	0.110	-
2/5	1	曇り	圧雪（人工コース）	44	0.077	0.021	-	0.069	0.065	-
				42	0.067	0.021	-	0.098	0.128	-
				41	0.069	0.017	-	0.087	0.113	-

4) ㈱NTTドコモ北海道支社

②耐久性　③測位の遅延性

国土交通省

【空港内の電波や気象等の影響】

- 方法：実証実験後、測定データの精度を確認。
- 結果：測定期間中に、測位精度の変化は見られず、影響がないことを確認済。

【電波干渉について】

- 方法：実証実験後、測定データの精度を確認。
- 結果：AsteRx-SB(RTK), AsteRx-U(CLAS)は、測定期間中の精度に変化は見られず、影響がないことを確認済。
  Chronosphere-L5S(SBAS)は、取得した保護レベルで調査を行ったが、保護レベルを上回る測位誤差が出ていないため、GNSSに関わる電波干渉は無いと想定。

検証項目		結果	考察
耐久性	気温	• 実証実験完了後、機器類の目視および動作確認をおこなったが、破損および動作等に問題ないことを確認した。	• 機器は屋内で保管し、今回の期間では気温の影響はなかった。SBASを除き仕様書上は-30℃~65℃まで使用可能であり、実装においてはこれに従う必要がある。
	防水性能		• 機器は車内に設置したため本実験での防塵防水検証は行っていないが、仕様書上はAsteRX-SBでIP68、AsteRX-UでIP67を取得しており、実装においてはこれに従う必要がある。
	耐振動性能	• 実証実験中、及び実験後に目視により機材外殻の破損の有無を確認。 • 機材外殻には破損等の問題は発生していないことを確認済。	• AsteRX-SB及びAsteRX-Uは振動対策機能があり、本実験での振動に対する影響はなかった。 • 一方で路面が雪で覆われている道を走行した際に受信機全てで一部データが取れていない区間があり、電源の瞬断が発生した可能性がある。実装においては電源タップの位置や接触について考慮する必要がある。
遅延性	GPS時刻	• 数値的な検証は困難であるが、実証実験中の車内での目視確認や体感として問題となるような遅延はなかった。	• 遅延性に関して大きな問題はなかった。ただし、目視での確認にとどまっており、今後はPC時刻を高精度に合わせる等の工夫を行うことで検証を行うことも必要であると考えられる。
	Fix解		
	自車位置出力時間		
	モニタ表示時間	• 実証実験期間中、車両内でリアルタイムに表示されていることを目視にて確認。 • 車両内ではリアルタイムに表示されており、遅延がないことを確認済。 • 一部、PCのスペックの影響により、マップの描画処理が遅れる事象を確認済。	• 測位は遅延なく実施できたが、マップの描画にPCのスペックが影響したと考えられる。リアルタイムに描画するためには、PCの処理能力を見直す必要がある。

4) ㈱NTTドコモ北海道支社　映像伝送結果について

国土交通省

【リアルタイム映像伝送の結果整理】

本実験を通じて行った映像伝送の結果を下記に示す。
別拠点で映像伝送結果を確認しながら実験を行ったが、大きなトラブル等はなく、スムーズな映像伝送、遠隔監視を実現できた。

日付	回	前カメラ（Zao-S）	後カメラ（Zao-S）	全体カメラ（Live-U）
2/2	1	○	○	○
2/3	1	○	○	○
	2	○	○	○
	3	○	○	○
2/4	1	○	○	○
	2	※1 クレードル接触不良のため中断 ⇒機器交換	○	○
	3	○	○	○
	4 (予定外実施)	※2 カメラバッテリー切れのため中断	※2 カメラバッテリー切れのため中断	○
2/5	1	○	○	○

※1 2/4の実験2回目に関してはネットワーク通信を行うルーターのクレードルに接触不良が発生したため映像伝送が一部中断したが、機器の交換によって以降問題なく伝送を行うことができた。
※2 2/4の実験4回目に関しては予定外の実施であったため、実験途中でカメラのバッテリーが切れ映像伝送が中断したが、給電しながらの映像伝送も可能であるため、問題ないと考えている。

検証結果の整理

【全体的な精度の評価】

●AsteRX-SB（RTK）及びAsteRX-U（CLAS)について
- 停止時　：FIX解が得られた結果に関して天候に関わらず目標の精度(±50cm)以内となっていることが確認できた。
- 走行時　：天候に関わらず、C1,C2,C3ともに目標の精度(±50cm)以内となっていることを確認できた。
- 基準点との比較　：2つの受信機共に十分な精度で位置情報を確認できた。
- 後処理RTK結果との比較：2つの受信機共に十分な精度で位置情報を確認できた。

●Chronosphere-L5S(SBAS)について
- SBAS測位結果　：サブメータ級の精度を超えてしまっている結果について、将来的に対応衛星が増えるため誤差量が改善される予定である。

誤差[cm]	AsteRX-SB(RTK)	AsteRX-U(CLAS)	Chronosphere-L5S(SBAS)
停止時	0.7~5.5	3.1~7.6	53.7~309.6
走行時	3.3~9.5	5.0~10.8	65.1~467.1

【GNSS位置情報】

- 精度においては、停止時、走行時ともに各測位方式が想定する結果を算出することができた。
- 気象条件も試験ごとに異なっていたが、降雪による影響はないことが判明した。
- 基準測量点との比較を行ったところ、AsteRx-UのCLAS方式の精度が最も良いことが確認できた。
  ⇒内閣府「みちびき」の仕様（https://qzss.go.jp/technical/system/l6.html#section01）を確認すると、CLASによる測位は静止状態で水平成分6cm、移動体で水平成分12cmとなっている。
  基準測量点との比較結果では静止状態で2～3cm程になっており、CLASにとって非常に高環境であった可能性がある。
- 後処理RTKの結果を真値として比較を行ったところ、測位結果、環境条件、外部要因の点で、docomo IoT高精度GNSS位置情報サービスを用いた、AsteRx-SBのRTK測位方式の精度が最も良いことが確認できた。
  ⇒後処理RTKの結果を真値とする精度検証方法は以下のような論文でも利用されている通り、位置情報の精度検証で一般的に用いられている方法である。「小型 GNSS 測量機による測位精度の向上に関する研究（第 3 年次）」
  (https://www.gsi.go.jp/common/000220227.pdf)
- 特に走行時の精度検証については基準線上を車両が確実に走ることは難しく、後処理RTKを用いた精度検証方法が有効である。AsteRX-SBは本実験で使用した他の受信機と比較して安価であり、振動対策機能等他機能も豊富で、寒冷地である北海道にも対応する温度範囲（-30℃～+65℃）となっている。
- docomo IoT高精度GNSS位置情報サービスは他のRTK補正情報サービスに比べて安価であり、国土交通省の基準局に加え独自の基準局を全国に配備しているため、AsteRX-SBと組み合わせて利用することで精度の高い位置情報を簡易に取得することが可能となる。

今後の展望・対応策

【明らかになった課題、対策】

①モニタ表示の遅延性

現象：一部、PCのスペック等の影響により、マップの描画処理が遅れる事象を確認した。

対策：位置情報の取得には問題ないが、PCの処理性能を見直す事で、マップの描画スピードを向上させる。
また今後の製品化、実用化を見据えた上でのアプリのバージョンアップを行い、描画処理を安定させる。

②SBAS測位の単独測位

現象：L5Q信号の信号強度が想定よりも低く、受信機設定の閾値を下回っていたため、SBAS解が得られないことがある。
また、時間帯によっては、みちびきがL5Q信号を送信しておらず、測位できないことがある。

対策：同じ測位エンジンを用いた後処理SBAS測位で信号強度マスクを低くしたところ、SBAS解が得られた。
同時刻の別地点（株式会社コアR＆Dセンター、神奈川県川崎市麻生区南黒川11-1 ）で取得した結果と比較すると信号強度が低いことが判明したため、今後は実験実施時にSBASの信号強度を確認し、環境に応じて閾値を設定することでSBAS解を得ることが可能となる。

③データの欠損

現象：一部、2/4の雪道走行時にデータの欠損があった。

対策：走行時に車内のポータブル電源や電源タップ等に瞬断が発生した可能性がある。
車内の受信機、電源タップなどの設置方法を見直し、ケーブルの接触不良などによる電源の瞬断を防ぐようにする。

【リアルタイム映像伝送】

- 取り付けたカメラで撮影した映像をモバイル通信を用いて伝送し、遠隔地からリアルタイムに確認することに成功した。
- 将来的な除雪作業の自動化、省力化における安全性の担保として、遠隔地からの監視は非常に有用であると考えられる。
- 国土交通省「自動運転車の安全技術ガイドライン」（https://www.mlit.go.jp/common/001253665.pdf）でも触れられている通り、高度な運転自動化には監視を行うカメラの搭載が必須となっていることから、除雪車両においても安全確保の観点からカメラの搭載を検討する必要があると考えられる。