

国際リニアコライダー（ILC）における防災 管理技術の開発ー長距離トンネル内での利用者 の位置情報測位システムに関する実験的研究ー

DEVELOPMENT OF THE POSITION MANAGERIAL SYSTEM BASED ON THE
POSITIONING SENSOR NETWORK FOR DISASTER PREVENTION IN ILC USING
UNDERGROUND OPENING

小林 薫¹・相馬 嵐史^{2*}・川端 康夫³・松田 浩朗⁴

Kaoru KOBAYASHI¹, Arashi SOUMA^{2*}, Yasuo KAWABATA³,
Hiroaki MATSUDA⁴

The paper shows the development of positioning information system using a local area network to ensure the safety of users in emergency in long tunnels like ILC facility. The system provides information of not only user-position in confined facilities, but also residence time and movement of the users, which can be easily transmitted on the interactive communication system. We conducted two experiments to confirm the effectiveness of the positioning information system. A experiment was conducted in a small and long tunnel which we aim to simulate the operation in the similar condition of ILC facility. As a result, we have confirmed the effectiveness of positioning information system using a local area network.

Key Words : underground opening, ILC, disaster prevention, sensor network, wireless LAN

1. はじめに

東日本大震災の際の危機的状況の中で、J-PARC（茨城県東海村）で作業中の職員がトンネル内からの脱出に時間を要したことが本研究開始の発端である。

大型加速器施設においては、施設利用者に対する放射線の管理や災害時の安全確保が極めて重要である。従来、加速器施設においては、PPS（出入口管理）が適用され¹⁾、施設利用者の安全性確保に効果を発揮している。施設利用者の施設内における位置やその動線に基づく安全管理、さらに防災時に適正な避難誘導が行えるシステムを構築・実装できれば、さらに有効性は高まるものと考えられると共に、大規模な施設になれば必要不可欠である。

一方、筆者らは、無線LAN端末を利用した屋内向け測位センサネットワーク技術の開発²⁾に取り組んでいる。測位センサネットワーク技術とは、無線LAN端末を測位センサとして利用し、情報通信と同時に無線LAN端末の通信位置を特定するものである。本技術により、空間内

の無線LAN端末保有者の所在やその動線等が把握可能となる。本研究は、大型加速器施設の利用者の安全性向上を目的に、測位センサネットワーク技術を応用し、加速器施設内における位置情報に基づく放射線管理・防災管理技術を開発するものである。既に、本システムの有効性の検証を目的に、いばらき中性子医療研究センター（以下、iNMRCと記す）での実験を開始し、無線LAN端末を有する人物の所在と動線がリアルタイムに把握できることを確認した³⁾。加えて、J-PARCのMR加速器トンネル内に測位センサネットワークシステムの機器類を持ち込み、高放射線環境下での装置及び通信状況への影響を調査中である。

本論文では、ILCを想定した既存の直線状の長距離かつ小断面トンネル（神戸ベルコントンネル）を用いて、無線LANの通信速度と同時測位の精度検証のために実施した各種実験結果について考察を加えた。特に、三角測量方式による座標管理を採用した上で、トンネル断面の大きさの違い、アクセスポイント（以下、APと記す）

キーワード：地下空間、ILC、防災、センサーネットワーク、無線LAN

¹正会員 茨城大学教授 工学部都市システム工学科 Professor, Faculty of Engineering, University of Ibaraki, (E-mail:k-kaoru@mx.ibaraki.ac.jp)

²非会員 茨城大学 工学部都市システム工学科 Student, Faculty of Engineering, University of Ibaraki,

³正会員 飛鳥建設株式会社 土木事業本部 Technical Development Division, Tobishima Corp.

⁴正会員 飛鳥建設株式会社 技術研究所 Research Institute of Technology, Tobishima Corp.

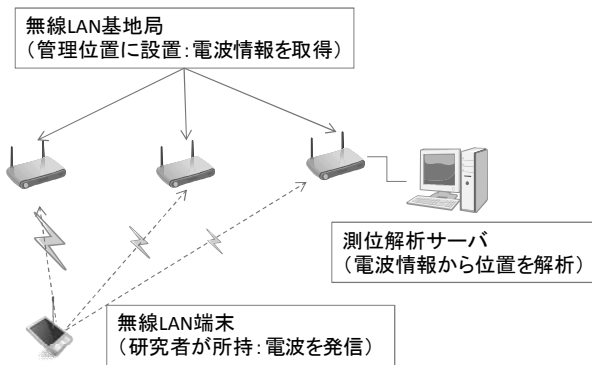


図-1 測位システムの概要

の配置方法（両側配置，千鳥配置および片側配置），配置間隔および無線LAN端末の利用台数などが，測位精度にどのような影響を及ぼすのかを明らかにし，長距離かつ小断面トンネル内での位置管理システムのマルチパス等の影響を考慮した適用性について論ずる。

2. 測位センサネットワークによる位置管理システムの概要

図-1に測位システムの概要・構成を示す。測位システムは，無線LAN端末，APおよび測位解析サーバで構成される。無線LAN端末は測位対象の研究者等が所持し，逐次電波を発信する。APは，無線通信ネットワーク機能に加え，無線LAN端末が発信した電波情報（端末識別情報，電波強度）を取得する測位センサ機能を有しており，測位センサネットワークを構築している。APが取得した電波情報は測位解析サーバに送られ，無線LAN端末位置が測位される。なお，開発している測位システムの測位方式としては，一番電波強度が大きいAP位置（管理位置）を無線LAN端末位置とする近接方式⁴⁾と三角測量方式による座標管理の2種類から選択可能であるが，本研究では後者を用いた。

測位システムでは，端末位置を任意の時間間隔で連続的に解析可能で，リアルタイムに位置管理が可能である。また，位置情報は管理位置ごとにデータベースにまとめられ，無線LAN端末ごとに，それぞれの管理位置の滞在時間を自動的に集計できる。

3. トンネル内での無線LANの通信速度，通信遅延と同時測位の精度の検証実験

(1) 実験に用いたトンネルの概要

図-2に神戸ベルコントンネルの全体概要図を示す。その中で，陸側部のベルトコンベアトンネルの一部（図-3，

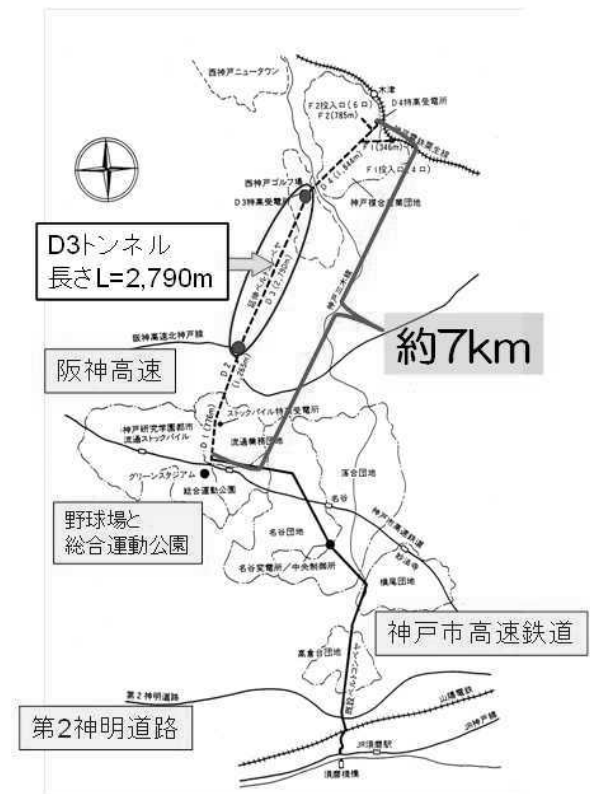


図-2 神戸ベルコントンネルの全体概要図

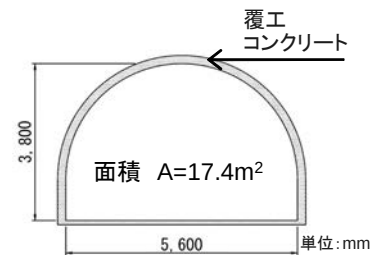


図-3 小断面トンネルの形状



写真-1 小断面トンネルの内観（NATM施工，二次覆工有）

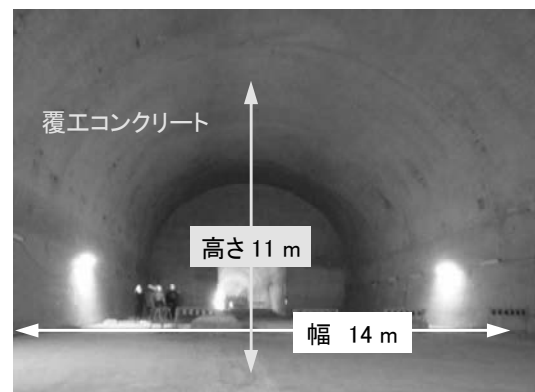


写真-2 大断面トンネルの内観（NATM施工，二次覆工有）

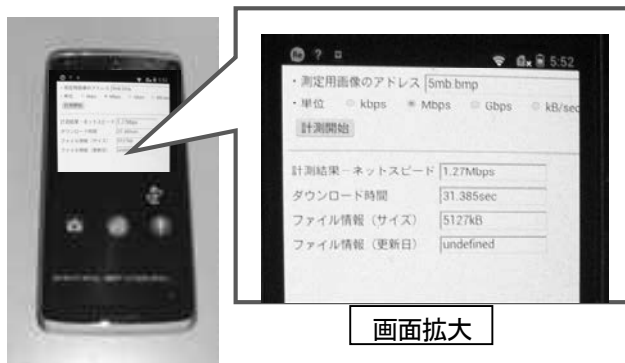


写真-3 無線 LAN 端末（通信速度の計測例）



写真-4 AP の外観

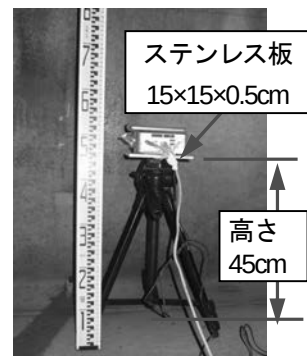


写真-5 AP の設置状況

写真-1に示す断面積が 17.4 m^2 の小断面トンネルで、D3トンネルのうちの北側約700 m区間）を用いて、無線LANの通信速度、通信遅延と同時測位の精度について検証した。加えて、トンネル断面の大きさが測位精度などに及ぼす影響を比較するために、写真-2に示す大断面トンネル（幅14 m、高さ11 m）においても同様の実験を実施した。実験時のトンネル内の温度は $17 \sim 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ で、相対湿度は85～95 %であった。ここで、通信速度とはデータ転送の速度で、通信遅延はデータ転送の遅れ（遅れて声が伝わるなど）である。



写真-6 トンネル内における計測状況

(2) 実験に用いた器機類

実験に用いた無線LAN端末は写真-3に、AP（大きさ： $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}$ ）は写真-4に示す。APは、LANケーブルで全てPCに繋がっている。また、写真-5に示すようにAPの設置高さは、カメラの三脚を用いてコンクリート基盤底面より上に45 cmの位置に統一した。また、APの下面には15 cm角のステンレス板（厚さ $t=5 \text{ mm}$ ）を、トンネル底板からの反射によるマルチパスの影響を低減するために設置した。実験は、CASEごとに無線LAN端末（写真-3）を所定の座標に設置し、その設置座標に対する測位座標（10分間程度の計測）のばらつきを計測した。写真-6は、測位システム（三角測量方式による座標管理）を用いた大断面トンネル内での計測状況を示す。また、写真-7には、トンネル内に無線LAN端末を複数台設置した場合の測位結果の表示例である。

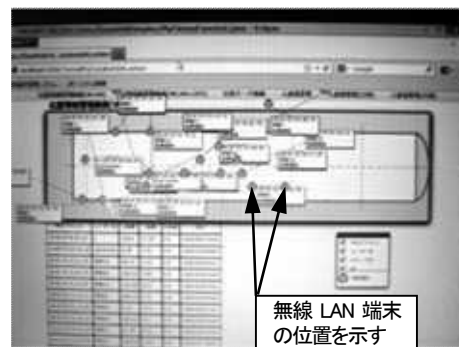


写真-7 トンネル内における測位結果の表示例

(3) 検討ケース

実験は、無線LANの通信速度、通信遅延と同時測位の精度について検証するために、トンネル断面の大きさ、APの配置方法、APの配置間隔および無線LAN端末の設置台数の違いが及ぼす影響を検証するために、表-1に示す計5ケースについて実施した。加えて、CASE6では、無線LAN端末を持って等速で60m区間を往復した際の測位精度（移動軌跡）についても実施した。なお、表-1の備考欄には、APの配置イメージなどを分かり易くするために簡単な図を加えた。

4. 実験結果および考察

以下には、前述した検討ケースごとの測位精度などについて示す。

(1) 通信速度および通信遅延（CASE1）

表-2に大断面トンネルと小断面トンネル内における無線LANの通信速度と通信遅延に関する測定結果（各10回測定した結果）の一覧を示す。

通信速度は、端末やケーブル等によって影響するものと考えられるが、本実験においては小断面トンネルでは平均9.7 Mbps（変動幅：8.2～10.8 Mbps）、小断面トンネ

表-1 無線 LAN の通信速度と同時測位の精度検証のための実験ケース一覧

検討ケース		AP配置方法 とその間隔	実験時の 区間長L (m)	無線LAN端末の 区間内への設 置台数N (台)	備考 (AP配置イメージ等)	
CASE1 と CASE2	大・小断面トンネルにおける通信速度と通信遅延および測位精度の比較	両側配置 10 m	60	1	大断面トンネル	
					小断面トンネル	
CASE3	AP配置方法による測位精度の比較	両側配置 100 m	700	15 (@50 m)	小断面トンネル	
		片側配置 100 m				
		千鳥配置 100 m				
CASE4	AP配置間隔による測位精度の比較	千鳥配置 100 m	700	15 (@50 m)	小断面トンネル	
		千鳥配置 50 m				
CASE5	無線LAN端末が集中した時の測位精度の比較	千鳥配列 50 m	700	15 (@50 m)	小断面トンネル	
				15(@50 m)と 10(100~200 m区間に集中的 に配置)		
CASE6	リアルタイムな測位精度の検証 (移動体軌跡)	両側配置 10 m	60	1 (無線LAN端末 を人間が持って 等速移動)	小断面トンネル	
		千鳥配置 10 m				

ルでは平均8.5 Mbps (変動幅：6.4~12.4 Mbps) でストレスも無く送受信できた。よって、通信速度は、小断面トンネルにおいても顕著なマルチパス等の影響はなかった。

また、通信遅延については、大断面トンネルでは平均45.3 msec (変動幅：34.8~58.3 msec) で、小断面トンネルでは平均44.2 msec (変動幅：34.4~56.7 msec) であった。通信遅延についても、トンネル断面の大きさの違いによる影響はほとんど見受けられないことが分かる。大断面および小断面トンネルにおける各々の最大通信遅延は、58.3 msecと56.7 msecであり、一般にIP電話として要求される通信遅延150 msec未満と基準を満足している。したがって、小断面トンネル内においても、IP電話としての性能を十分に満足しており、通信インフラとしての機能も有していることが確認された。

(2) トンネル断面の大きさが測位精度に及ぼす影響 (CASE2)

大断面と小断面トンネル内 (60m区間) において、APを両側に10 m間隔で配置した上で、無線LAN端末 (写真-3参照) を座標既知 (y=2.3 m, x=45 m. なお, x方向はトンネルの軸方向, y方向はトンネル軸直角方向である。) の位置に1台設置して測位した。

図-4(a)~(d)に大断面と小断面トンネルにおける測位結果を示す。なお、例えば、図に示す6秒平均とは、1秒毎の測位座標値の6秒間の平均値を示すと共に、測位10分間でのばらつき (最大値と最小値) および平均値を示している。以降の測位結果の表示は全て同様である。

大断面および小断面トンネル共に、測位座標のばらつきは、測位解析を行う時間が増す (6秒から60秒に増

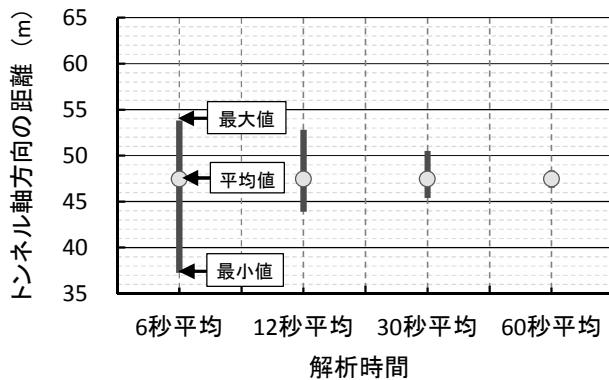
表-2 大断面トンネルと小断面トンネル内における通信速度と通信遅延の測定結果 (CASE1)

(a) 大断面トンネル

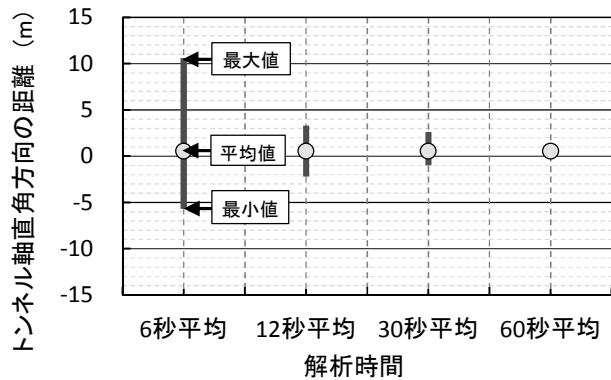
通信速度(Mbps)	10.8	10.4	11.1	10.4	9.8	8.2	8.4	9.1	10.6	8.8
通信遅延(ms)	34.8	54.3	39.7	51.4	49.8	58.3	45.7	38.7	42.4	38.1

(b) 小断面トンネル

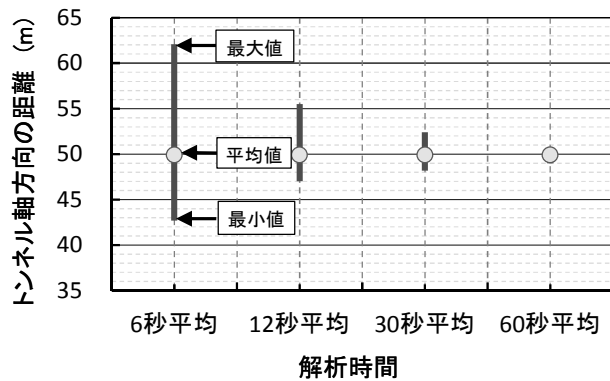
通信速度(Mbps)	12.8	7.9	8.4	8.6	8.8	7.2	9.2	8.2	7.2	6.4
通信遅延(ms)	56.7	23.1	51.3	55.5	45.3	48.0	44.8	47.4	35.6	34.4



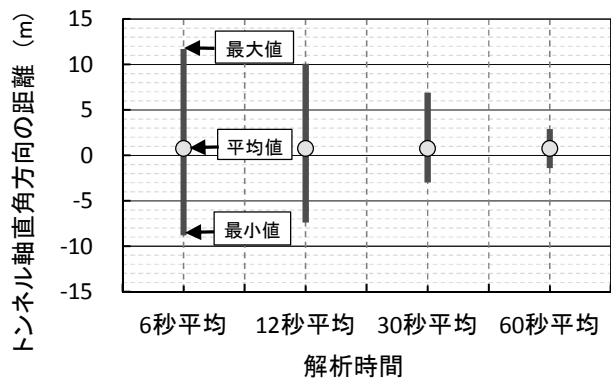
(a) 大断面トンネル (トンネル軸方向)



(b) 大断面トンネル (トンネル軸直角方向)



(c) 小断面トンネル (トンネル軸方向)



(d) 小断面トンネル (トンネル軸直角方向)

図-4 トンネル断面の大きさが測位精度に及ぼす影響 (CASE2: $y=2.3\text{m}$, $x=45\text{m}$ に設置時)

す)につれて、小さくなる傾向が見受けられる。測位解析を30秒平均にした場合の測位結果の平均値は、大断面トンネルではトンネル軸方向で+2.5 m程度、トンネル断面方向で+0.5 m程度、小断面トンネルではトンネル軸方向で+5.0 m程度、トンネル断面方向で+1.0 m程度であった。

以上の結果より、測位結果のばらつきは、大断面トンネルより小断面トンネルの方がいくぶん大きく、トンネル軸方向および軸直角方向ともに誤差 (x, y の既知座標値と測位値との差)が約2倍になっていることが分かる。しかし、トンネルの延長が数十キロにも及ぶILC施設の長距離トンネル内においては、小断面トンネルにおける

測位精度 (平均値)であれば、利用者の位置管理を行う上で大きな問題とはならないと考えられる。

(3) APの配置方法が測位精度に及ぼす影響 (CASE3)

長距離かつ小断面トンネル内 (700m区間) で、APの配置間隔を全て100 mに統一し、配置方法を両側配置、片側配置および千鳥配置の3種類変化させた上で、無線LAN端末 (写真-7参照) を50mピッチで15台設置し測位を行った。座標既知 ($y=2.3\text{m}$, $x=300.0\text{m}$) の位置に設置した1台の無線LAN端末に関する測位結果をAPの配置方法ごとに図-5(a)~(f)に示す。

測位解析を30秒平均にした場合の測位のばらつきは、

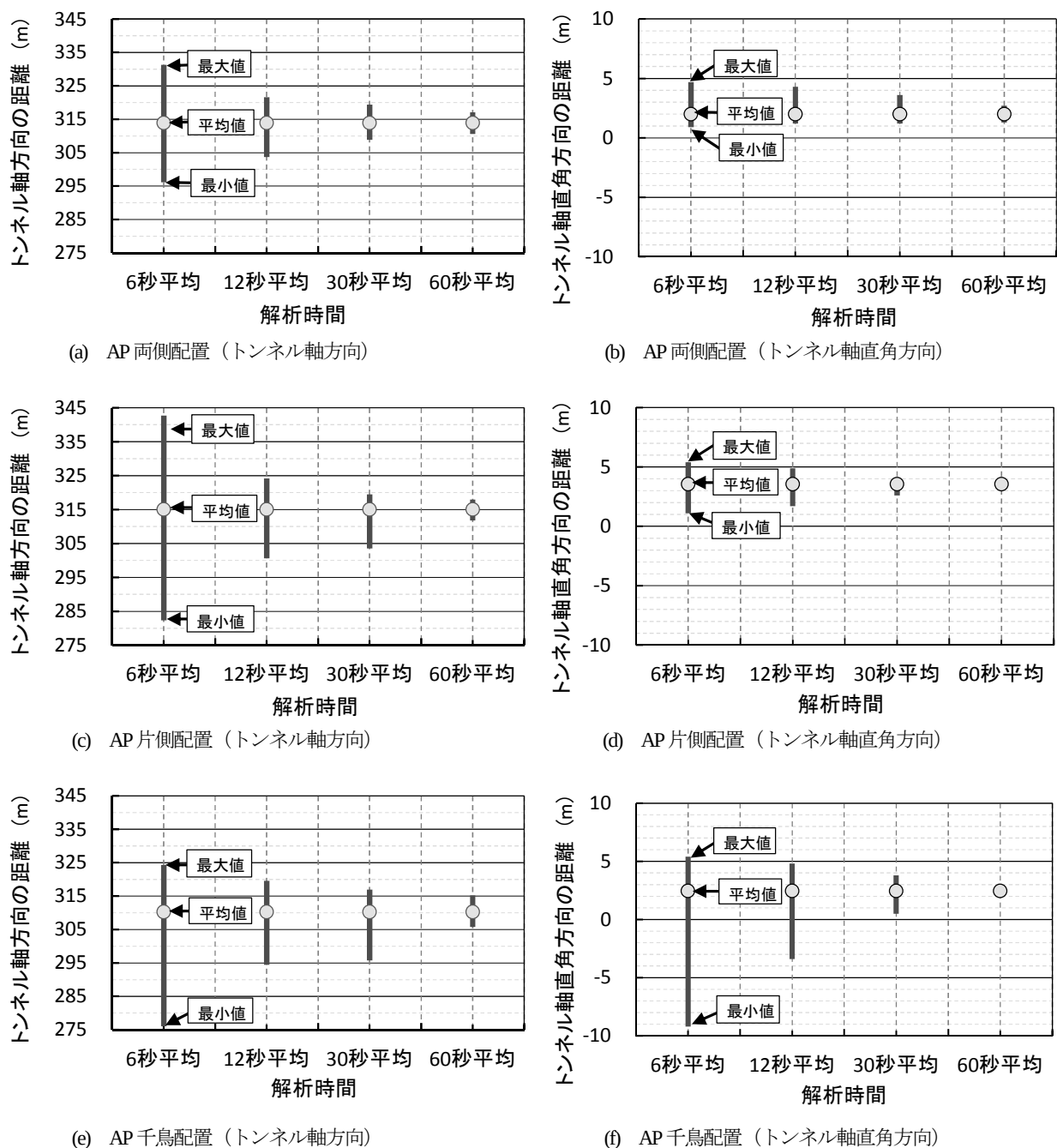


図-5 APの配置方法の違いが測位精度に及ぼす影響 (CASE3: APの配置間隔=100m, 設置座標は y=2.3m, x=300.0m)

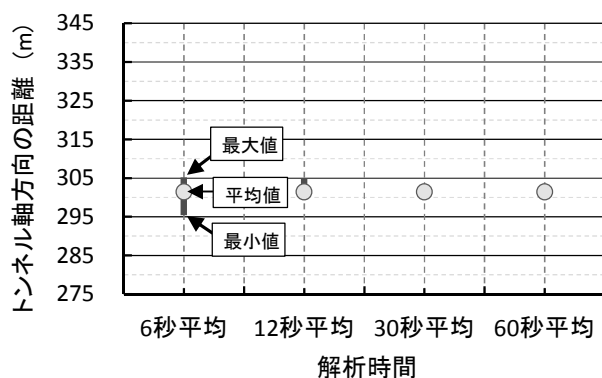
AP両側配置ではトンネル軸方向で319.4~308.9 m, トンネル軸直角方向は3.6~1.2 m程度, AP片側配置ではトンネル軸方向で319.5~303.5 m, トンネル軸直角方向は4.1~2.6 m程度, AP千鳥配置ではトンネル軸方向で316.9~295.8 m, トンネル軸直角方向は3.8~0.5 m程度であった。

測位結果のばらつきについては, AP両側配置がトンネル軸方向, 軸直角方向共に最も小さくなっている。また, 各測位結果の平均値を比較した場合には, AP両側配置ではトンネル軸方向で+13.9 m, トンネル断面方向で-0.3 m程度, AP千鳥配置ではトンネル軸方向で+10.3 m程度, トンネル断面方向で+0.15 m程度であるが, AP片側配置はトンネル軸方向で+15.0 m, トンネル断面方

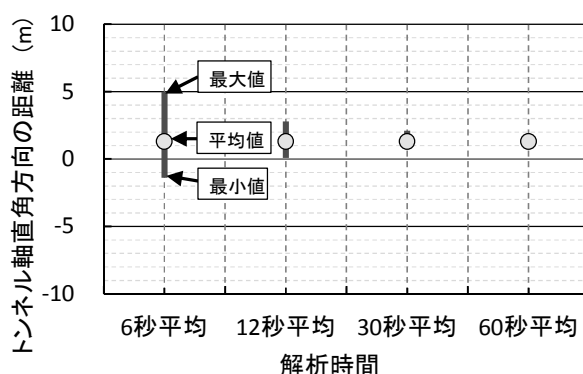
向で+1.25 m程度であり, 他のAP配置方法に比較して誤差が大きい。

以上の測位結果より, 例えば, トンネル軸方向の測位結果の平均値の誤差は, 千鳥配置 (+10.3 m) < 両側配置 (+13.9 m) < 片側配置 (+15.0 m) の順に大きくなる傾向を示した。AP片側配置の測位精度は, トンネル側面の片側だけにしかAPが配置されていないことにより, 他の配置方法に比較して測位精度がいくぶん悪い傾向を示したものと推察される。

一方で, 本実験ではAP両側配置はAP千鳥配置より測位精度が幾分悪くなっている。これより, APの設置台数が両側配置の半分である千鳥配置は効率良く測位精度

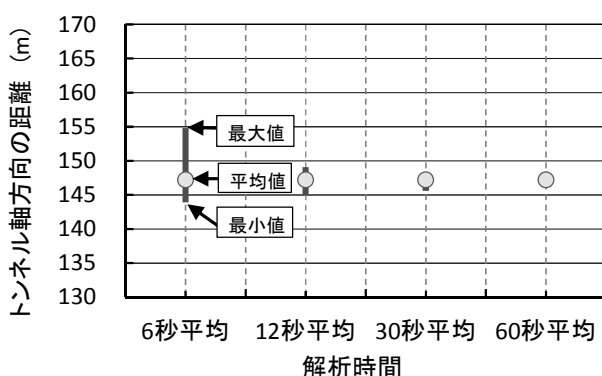


(a) AP配置間隔=50 m (トンネル軸方向)

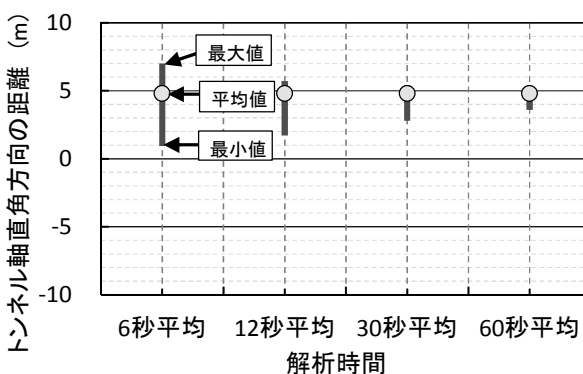


(b) AP配置間隔=50 m (トンネル軸直角方向)

図-6 APの配置間隔の違いが測位精度に及ぼす影響 (CASE 4: AP千鳥配置)



(a) AP配置間隔=50 m (トンネル軸方向)



(b) AP配置間隔=50 m (トンネル軸直角方向)

図-7 APの密集が測位精度に及ぼす影響 (CASE 5: AP10台を100~200m区間に追加設置. 計25台設置時)

表-3 リアルタイム (3秒平均) 測位による測位結果 (CASE 6)

No.	X座標 (m)	Y座標 (m)	時刻
①	66.600	8.910	14:39:24
②	59.840	7.100	14:39:26
③	52.540	9.180	14:39:29
④	47.225	10.560	14:39:32
⑤	44.795	2.695	14:39:35
...	...	...	...
⑮	2.585	3.010	14:40:07
⑯	-0.090	-1.400	14:40:10
⑰	0.275	-1.575	14:40:13
⑱	1.435	0.545	14:40:16
⑲	-0.955	3.935	14:40:19
⑳	-0.875	5.145	14:40:22
...	...	...	...
㉔	45.485	5.945	14:41:09
㉕	48.940	0.795	14:41:12
㉖	53.365	-4.605	14:41:15
㉗	55.490	-5.985	14:41:18
㉘	59.970	2.980	14:41:21
㉙	64.900	9.440	14:41:25

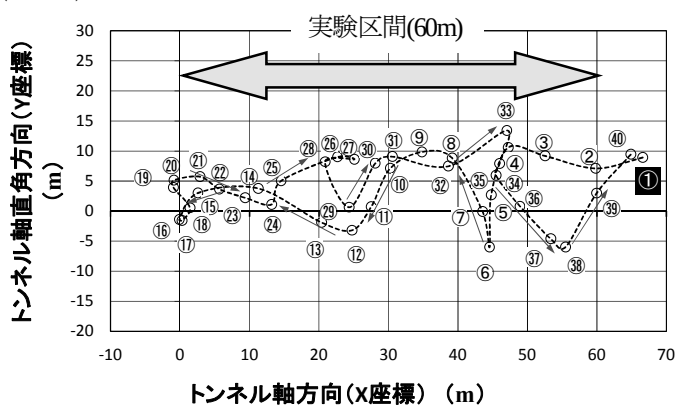


図-8 リアルタイム (3秒平均) 測位による利用者の移動軌跡 (CASE 6)

を向上させることが可能であると推察される。

(4) APの配置間隔が測位精度に及ぼす影響 (CASE 4)

長距離かつ小断面トンネル内 (700m区間) にAPの配置は千鳥配置, 間隔は50 mとした上で, 無線LAN端末 (写真-3参照) を50 m間隔で15台設置して, 本システムを用いて測位した。座標既知 ($y=2.3$ m, $x=300.0$ m) の位置に設置した1台の無線LAN端末に関する測位結果を図-6(a), (b)に示す。APの配置間隔が測位精度に及ぼす影響を把握するために, 前述の図-5(e), (f)に示すAPの配置が

千鳥配置の間隔が100 mの場合における座標既知 ($y=2.3$ m, $x=300.0$ m) の位置に設置した1台の無線LAN端末の測位結果と比較した。その結果, APの配置間隔を50 mにした場合, 測位解析が6秒平均でも測位結果のばらつきは, トンネル軸方向は305.2 ~ 295.5 m, トンネル軸直角方向は5.0 ~ -1.4 mになり, 大幅にばらつきを抑制することができた。また, 測位結果の誤差については, APの配置間隔50 mの場合は, 利用者の位置管理に重要となるトンネル軸方向の誤差は+1.4 mであり, APの配置間隔100 mのトンネル軸方向の誤差は+10.3 mである。以上

の測位結果より、APの配置間隔を100 mから50 mにすることで、測位精度を大幅に向上できることを確認できた（本実験では、測位誤差が約1/7になった）。

(5) 無線LAN端末の設置台数の違いが測位精度に及ぼす影響（CASE5）

無線LAN端末の設置台数の違いが測位精度に及ぼす影響を検証するために、CASE4の実験条件のもとでAP10台を100～200 m区間に追加設置し、座標既知（ $y=2.3$ m, $x=150.0$ m）の位置に設置した1台の無線LAN端末の測位を行った。図-7(a), (b)に測位結果を示す。測位結果のばらつきは、測位解析が6秒平均でもトンネル軸方向は154.8～143.9 m、トンネル軸直角方向は7.0～0.9 mであり、無線LAN端末が集中しない場合のCASE4のばらつきおよび測位精度共に顕著な差は見受けられなかった。

(6) リアルタイム測位による移動体の軌跡（CASE6）

無線LAN端末を持って1 m/secのほぼ等速で60 m区間を歩行して往復した場合の測位精度（移動軌跡）について検証した。従って、往復に要する時間は120秒となる。

表-3には、測位解析を3秒平均で実施した場合の測位結果を示す。また、図-8には、その測位結果を時系列の連続線で示した移動体の軌跡を示す（①→④）。移動体の軌跡を分かり易くするために図中に番号を付けて時系列を明示した。また、ばらつきながらも1 m/secの移動体が60 mの実験区間を往復していること、また1 m/secで60 mを往復するのに要する時間は120秒であるが、表-3から得られる往復時間（121秒）と一致しており、移動体を大まかに追跡できることが確認できた。しかし、移動速度1 m/secであることから、本実験のような実験区間60 mでは、リアルタイム測位の測位精度を評価することが難しいものと考えられる。このことから、リアルタイム測位の測位精度を検証するには実験区間を長くして実施することで、実構造物への適用性を適切に評価することができたものと考えられる。

5. まとめ

ILCを想定した既存の神戸ベルコントンネルを用いて、測位センサネットワークシステムによる位置管理システムの通信速度や同時測位の精度の検証等を行い以下の結論を得た。

(1) 大断面トンネルと小断面トンネル内で各々通信速度と通信遅延を計測したが顕著な差が無く、小断面トンネルでもマルチパスの影響はほとんど無いことを確認した。加えて、小断面トンネルでも通信速度は平均で8.5 Mbpsを確保されていると共に、通信遅延は

60 msec未満であった。このことから、通信インフラとしてIP電話の性能（一般的には通信遅延は150 msec未満）を十分満足していることを実証した。

(2) トンネル断面の大きさは、測位精度に影響を及ぼすものの、トンネルの延長が数十キロにも及ぶILC施設内においては、小断面トンネルにおける測位精度（平均値）であれば、利用者の位置管理を行う上で大きな問題とはならない。

(3) AP片側配置の測位精度は、トンネル側面の片側だけにしかAPが配置されていないことから、他の配置方法に比較して測位精度がいくぶん悪い。また、両側配置は測位結果のばらつきを小さくでき、千鳥配置は両側配置に比較して、AP台数が半分であるが効率良く測位精度を向上させることが可能である。

(4) APの配置間隔を100 mから50 mにすることで、測位精度を大幅に向上できる（本実験では、測位誤差が約1/7になった）。

(5) CASE4の実験条件の基で、AP10台を100～200 m区間に追加設置した場合でも、測位結果のばらつきおよび測位精度は本実験の設置台数の増加では顕著な差が見られず影響は無かった。

(6) 無線LAN端末を持って1 m/secのほぼ等速で60 m区間を歩行して往復した場合の移動軌跡を十分に測位できることを実証した。

以上より、地上で有効活用されている自動車のナビゲーションGPSの測位誤差は、 $\pm 10 \sim 15$ mと言われていることから、本システムによる測位精度は実用性・有用性があることを、実形式・実大規模の長距離かつ小断面トンネルを用いた実験で実証することができた。

謝辞：本実験は、神戸市みなと総局の方々並びに神戸市立工業高等専門学校都市工学科（現 復建調査設計）山本祐輔君に多大なご協力を頂いた。また、関西大学 田頭茂明先生並びに東北大学・岩手大学 吉岡正和先生には種々のアドバイスを頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 榊泰直 他：J-PARC LINAC 用高速インターロックシステムの設計, *Proceedings of 28th Linear Accelerator Meeting in Japan*, pp.467-469, 2003.
- 2) 川端康夫 他：加速器施設における測位センサネットワークに基づく放射線管理・防災システムの開発, 第11回日本加速器学会年会, 6P, 2013.
- 3) 川端康夫 他：測位センサネットワークによる加速器施設の防災・放射線管理のための位置管理システムの開発, 第12回日本加速器学会年会, 6P, 2014.
- 4) 伊藤誠悟, 河口信夫：アクセスポイントの選択を考慮したベイズ推定による無線LANハイブリッド位置推定手法とその応用, 電気学会論文誌 C, Vol.126, No.10, pp.1212-1220, 2006.