
スワリカブランド創造事業担当

2021年度活動サマリー・研究成果・業績リスト

スワリカブランド創造事業担当

(主担当)	(副担当)	(部門研究員)
松江英明 教授	小林誠司 特任教授	渡辺毅 特任准教授

スワリカブランド創造事業担当 活動サマリー

1 はじめに

「産学公連携・スワリカブランド創造事業」は、LPWA (Low Power Wide Area) 無線を使って地域課題を解決することを目標にし、本学、地元自治体（茅野市）と諏訪圏の企業が参加した事業である。今年度も引き続き地域課題の解決と活性化に取り組んだ。

1.1 取り組み内容

研究成果を地域活性化に繋げるため、開発した技術が地元企業から事業化されることを最大の成果と考え、地元企業への技術サポートと特許取得に力を入れている。また以下の4つの地域課題を解決すべく研究開発にも取り組んでいる。本報告では「水害」に関わる2テーマの進捗状況を述べる。

- 水害を防ぐ → LPWA 水位計システムの開発、GNSS 高精度位置検出手法の開発
- 農業生産性を上げる → 農業用センシングシステム（温度、湿度など）の開発
- 山岳遭難を防ぐ → 見守りセンシングシステムの開発
- 有害獣の被害を防ぐ → 鹿やイノシシなどの「括り罠」作動センサシステムの開発

1.2 無線通信技術「LPWA」の概要

無線通信技術「LPWA」は、データ量を低く抑え、その代償として長距離通信を実現する新しい無線通信技術である。データ量が少ないので、従来とは発想を変えた新領域に適用することになる。例えば、「広い農場に網の目のようにセンサを設置し、無線伝送したセンサデータを分析して農業生産性を上げる」といった用途に適している。通信距離が長いので、携帯電話が圏外となる山岳地でも使うことができる。

1.3 2021年度・新たに事業化された製品：SEAKER-L3



図1 横浜で行われた展示会（ポートショー 2022）に出展された海の見守り装置（SEAKER-L3）

ダイビングツアーでは、ツアー参加者が海中で行方不明になることがあり、海上に浮上した行方不明者の位置確認が必要になる。これまで海外から輸入した無線通信機が使われていたが、海面すれすれから発信される電波が遠方まで届かず、長距離・安定通信を実現する

LPWA 無線に興味を持たれていた。

2022年3月に沖縄県のクアドラプランニング社から「SEAKER-L3」という製品名で「海の見守り装置」が定価4万5千円で発売された。内部の電子回路は、スワリカブランド創造事業の成果を活用して諏訪圏企業が開発・製造している。

2 研究報告（1）河川水位モニタリングと土石流予測

スワリカブランド創造事業の水位計システムを引き継ぎ、2021年度末の時点でLPWA水位計を諏訪圏の48箇所で作働させている。このように多数の河川水位計を設置し、溪流や農業用水を含む水の流れをリアルタイムで観測されたことはなく、新たな可能性を秘めたデータが集まりつつある。

山からの激流が市街地を襲う土石流に関しては、明治時代から巨額予算が投下されて山中に砂防ダムが建設されているが、危険個所のうち2割しか設置完了していない。最近では砂防ダムがもたらす環境への影響も懸念され、土石流の予兆現象を捉えて住民に避難を促すソフト的解法が求められるようになってきている。

そこでLPWA水位計システムを使って、溪流などの水位予測を行なう「土石流予測システム」の開発を行ったので以降ではその進捗を報告する。予兆現象をできるだけ早く捉え、正確な警報を出すことを目標としている。

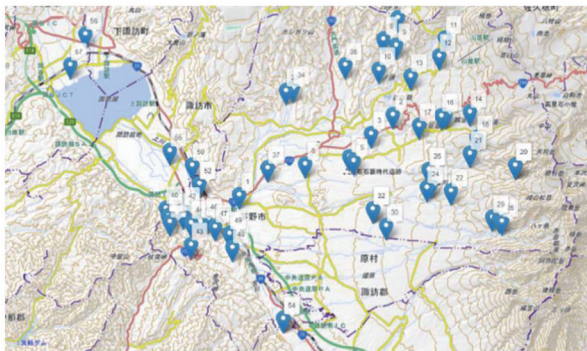


図2 LPWA水位計の設置運用場所（左）とLPWA水位計の外観（右）

2.1 土石流の現状

2021年9月5日夜、茅野市高部地区を流れる下馬沢川で土石流が発生し、下流の民家60棟以上に甚大な被害をもたらした。下の写真は土石流発生翌朝（9月6日）に撮影した市内の様子である。中央の写真では土石流に押し流された軽自動車が、右側の写真は、クレーンで県道に引き上げられた自動車が写っている。



図3 茅野市を襲った土石流の様子（翌朝の市内を本学担当者が撮影）

この土石流が発生した源流を辿ると下の写真の場所に行きつく。土石流発生前の写真(左)では、幅50cm程度の小川であった。発生後は川岸が大きくえぐり取られ、右側写真のように「峡谷」のような景観となった。



図4 9月5日の土石流発生地点に設置されていたLPWA水位計（左：災害前、右：災害後）

2.2 LPWA水位計がとらえた土石流の前兆

9月5日、土石流が発生した下馬沢川の上流約1.5kmの地点には、3本のLPWA水位計を設置していた。このLPWA水位計が捉えた土石流による水位変化を次図の青線で示す。

降雨レーダから得られた降雨量（緑色の線）は19時40分にピークとなり、同時刻に長野県から土砂災害警戒情報（レベル4）が発令されている。住民から土石流発生の電話通報があったのも同時刻である。

これに対してLPWA水位計は、警報が発せられる47分前の18時53分に水位の急上昇を報告している。この水位変化は雨量から推測されるモデル水位（オレンジ色）と大きく異なっていることもわかる。

さらに数十分後には水位が急激に下がり、その後水位ゼロとなっている。このようにLPWA水位計が異常な水位情報を検出していた。Web公開されていたので、この異常な水位変化を地元住民がリアルタイムで観測していた。また地元新聞（信濃毎日新聞）の記事として、このことが報じられている（2021年12月14日朝刊）。

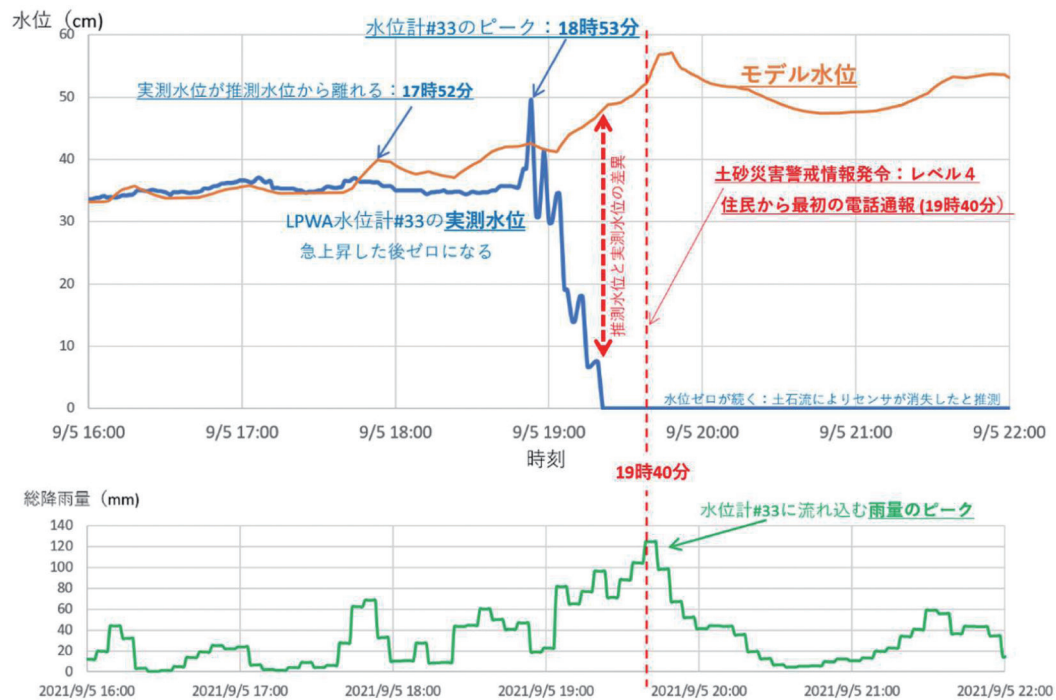


図5 山中に設置したLPWA水位計(#33)が捉えていた土石流上流の水位変化

商用電源を取ることができない山中、しかも携帯電話が圏外になるような場所に設置したLPWA水位計が、土石流による異常な水位変化を発生前に捉えていたのである。この情報を使って次章に説明する土石流予測アルゴリズムを開発・適用すれば、これまでより確度の高い土石流危険情報を発することができると考えられる。

2.3 これまでのセンサの課題

これまで水害予測に使われてきた3種類のセンサ情報には、それぞれ次に示すような課題がある。

2.3.1 降雨レーダ（高解像度ナウキャスト）の課題

気象庁から提供される降雨レーダ情報「高解像度ナウキャスト」は、日本国内をメッシュ間隔250mで網羅し、リアルタイム（5分間隔）の降雨状況をインターネット経由で得ることができる素晴らしいシステムである。

しかし提供されるレーダ降雨量は必ずしも正しくない。観測地点の手前に雨雲があるとレーダからの電波が遮られて降雨情報を誤ってしまうのである。下図は茅野市（チェルトの森）に設置された雨量計の計測値を赤色で、同じ場所のレーダ降雨量を青色でプロットしたグラフである。本来一致すべき2本のグラフが、時間帯によって大きくずれていることが判る。

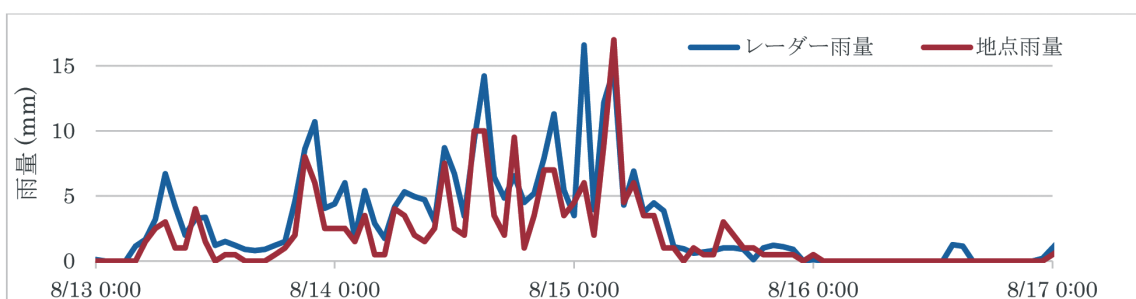


図6 レーダ雨量と、同一地点における雨量計による降雨量

2.3.2 雨量センサの課題

雨量センサは、雨雲レーダのような誤差を生じることなく降雨量を正確に測ることができる装置である。しかし雨量センサは、設置された場所の降雨量をピンポイントでしか計測できない。つまり溪流に流れ込む広い範囲の降雨全体を捉えることができない。また周囲に樹木があると、山林で降雨が遮られて正しい雨量が計測できない。

2.3.3 LPWA 水位センサの課題

本事業で設置した48本のLPWA水位センサでは、高精度（1mm分解能）の水位変化が安定して計測されている。しかし台風などの増水時に3つの原因で計測値に誤差が発生した。

1. 増水した川の流れてセンサの設置場所が移動し、計測値のバイアス変動する。
2. 流れてきた土砂にセンサが埋まってしまう。
3. 川の流れが変わり、水位が変わる。

2.4 センサ課題の解決方法

前章で説明したように、従来から使われている3種類のセンサ「降雨レーダ、雨量センサ、LPWA水位センサ」は、いずれも何等かの課題を抱えている。そこでこれら3種類のセンサを組み合わせ、クラウドで情報を統合することで、各センサの欠点を補い、より正確な土石流予測システムを構築することに挑戦している。

例えば、LPWA水位計を同一河川に多数設置しておけば、それらの計測値は全体的に上昇したり下降したりする筈である。もしも一つだけ、極端な、あるいは急激な水位変化を示すLPWA水位計があれば、その計測値をクラウド処理で判定し、排除することが出来る。この判定処理は、降雨レーダや雨量センサの計測値を加味することにより、よりの確に行うことができると考えられる。

2.5 開発中の土石流予測システム

本事業では、下図に示す2段階（2Step）構成の土石流予測システムを考えて開発中である。Step1では、四つのセンサ情報（LPWA水位センサから得られる**実測水位情報**、気象庁の雨雲レーダから得られる**レーダ降雨量**、各地に設置した雨量センサから得られるピンポイントの**雨量情報**、そして国土地理院から得られる**地形情報**）を合わせて、**水位モデル**を構築する。

Step2では、この水位モデルに気象庁から発表される**降雨予測データ**を入力して、山中を流れる溪流の水位を予測する。予測値と大きく異なる水位変化が観測されれば、それを土石流の予兆現象の一つとして捉えることができる。

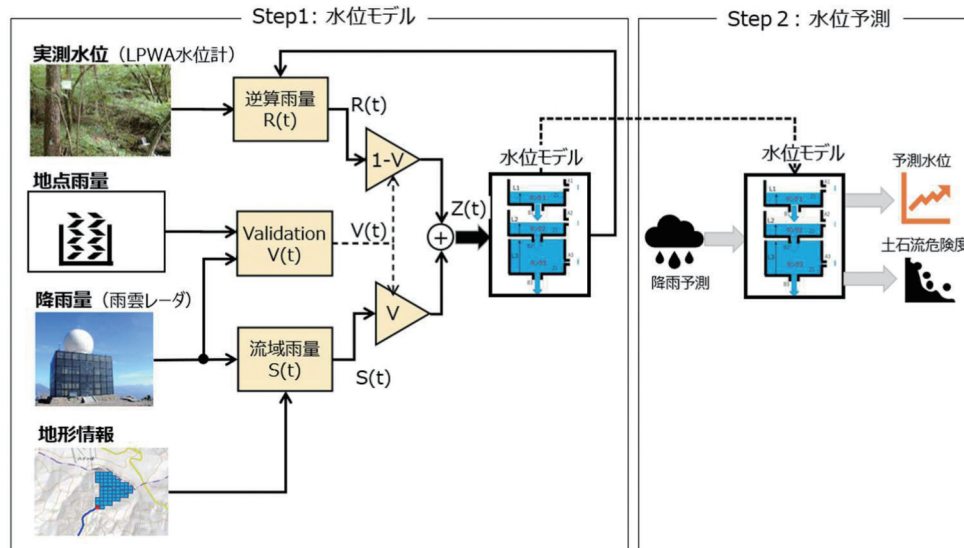


図7 土石流予測システムの全体構成

2.6 Step1: 水位モデル構築の状況

雨量から河川水位を求める手法として複数の方法が知られている。今回の検討では、主に「タンクモデル」を用いた。「タンクモデル」は、降雨が土壌などに浸み込んでから河川に流れ込む現象を、底面と側面に穴を開けたタンクとして扱う非線形モデルである。タンク底面からの流出を土壌等への浸透、側面からの流出を河川への流入と考える。

今回採用したタンクモデルでは、全部で9個の未知数を定めなければならない。このパラメタ探索のアルゴリズムを佐々木エンジニアが考案・試作して、3つの河川に関して適用した。

2.6.1 完成したモデル

茅野市内を流れる鳴岩川に関して、LPWA 水位センサから得た**実測水位**と、雨雲レーダから得られた降雨情報を使ってクラウドで計算した**モデル水位**の時間変化を下図に示す。

グラフ前半の1週間（8月13日～8月20日）を学習期間としてモデルを作成し、それ以降はモデルを変更せずに**実測水位**と**モデル水位**の比較を行っている。この結果、**モデル水位**は降雨による水位変化をほぼ捉えていることが解る。

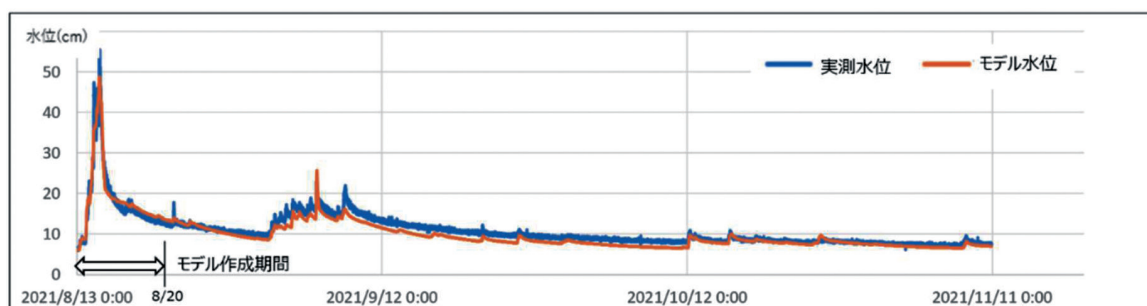


図8 3段タンク水位モデルにより求められたモデル水位と実測水位の比較（鳴岩川上流部）

このようなモデル化を、茅野市を流れる3つの異なる河川（鳴岩川、槻木川、柳川）の上流部に適用した。

これら3つのLPWA水位センサの計測値に対して求めたモデルパラメタを下図で比較する。場所によって地質や傾斜、森林の様子が異なり、これを反映してパラメタが大きく（桁違いに）異なっていることが解る。



	鳴岩川			槻木川			柳川		
	一段目	二段目	三段目	一段目	二段目	三段目	一段目	二段目	三段目
流出孔の高さ (mm)	Z1=35.75	Z2=691.2	Z3=10	Z1=9.9x10 ³	Z2=10	Z3=224	Z1=1.9x10 ³	Z2=87.8	Z3=10
流出係数 (1/hr)	A1 = 9.8x10 ⁻⁴	A2=0.041	A3= 3.5x10 ⁻⁴	A1 = 1.4x10 ⁻³	A2=0.0	A3= 1.3x10 ⁻²	A1 = 2.7x10 ⁻⁴	A2=0.016	A3= 1.4x10 ⁻⁴
浸透係数 (1/hr)	B1=0.14	B2=1.404	B3= 5.1x10 ⁻³	B1=0.09	B2= 4.9x10 ⁻³	B3=0.58	B1=0.12	B2=2.56	B3= 6.8x10 ⁻³

図9 3つの河川にモデル化を適用したときのパラメタ

2.7 来年度の実証実験予定

昨年度土石流が発生した茅野市高部地区では、大きな被害を受けたことから安全対策工事が行われ、砂防ダムも新設されて安全度が高くなっている。しかし、同じような地形・地質はその東側にも続いていて、2021年9月には小規模な土石流も発生している。

来年度は高部地区だけでなく、その東側の山にLPWA水位センサを8か所増設し、豪雨による渓流水位変化を捉え、水害予測システムの実証実験を行う予定である。

2.8 まとめ

携帯電話が圏外となるような山中を流れる渓流水位をリアルタイムでモニタすることは、低消費電力・長距離無線LPWAが登場するまで実現不可能であった。本検討では地元自治体（茅野市）のバックアップを得て、LPWA水位センサを諏訪地域に48本設置・運用して、広範囲に水位変化を捉えるシステムを構築した。世界初の実験であろう。

このシステムにより、昨年夏の土石流の兆候が検出され、また降雨レーダから提供される雨量を入力として、渓流水位を推測する水位モデルが構築された。水位モデルのパラメタは、河川によって大きく異なり、場所による地質の違いが反映されていると考えられる。

気象レーダは日本全国をカバーし、リアルタイムで降雨量を知ることができる有力な手段である。しかしその降雨量計測値は大きな誤差を含む時間帯があり、不十分である。気象レーダによる降雨量に加えて、LPWA水位センサの実測水量、雨量センサにより計測されたピンポイントの雨量等を組み合わせることで、より正確な水位モデルが構築でき、有効な水害予測システムが構築できると考えられる。

研究報告（2）超高精度GPS位置検出システムの開発

2.9 地域課題

山中で起きる土石流や崖崩れなど災害を検出するため、地面に張ったワイヤの伸びを検出

する地表伸縮計や、杭の傾きを検出する「杭」などが商用化されている。しかしワイヤは動物などにより誤動作する可能性があり、また杭の傾きだけでは斜面崩壊の前兆現象を捉えることができない。

人工衛星からの電波を受けて位置座標を特定する GPS (Global Positioning System) を使った位置検出が、崖崩れの前兆現象を捉えるセンサとして考えられる。しかしカーナビゲーション等に用いられる一般的な GPS 位置の精度は数十メートル程度であり、精度が足りない。「RTK-GPS」と呼ばれる超高精度位置検出手法であれば、**誤差数ミリメートル**の超高精度を実現できることが知られている。

2.9.1 市販の高精度 GPS (RTK-GPS) の問題点

RTK-GPS は、下図のように GPS 衛星からの電波を受信する「**基準局**」を設置し、この基準局からの補正データを使うことで超高精度位置計測を実現する方法である。しかし基準局との通信データ量が大きいため、**LPWA 無線**を適用することができず、携帯電話回線が圏外となる山中に受信機を設置して、土石流や崖崩れの前兆を捉えることができなかった。

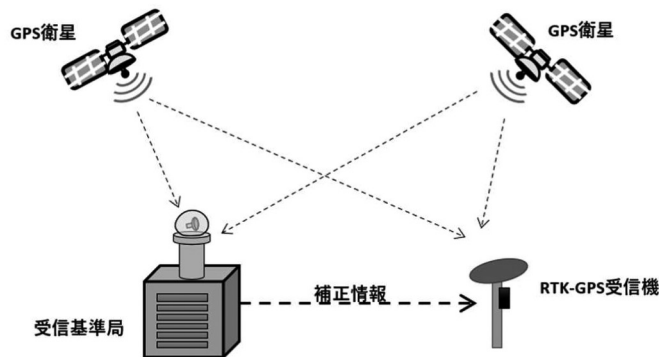


図10 位相検出型 GPS (RTK-GPS) の原理
(受信基準局から補正情報を高速データ通信で伝送する)

2.9.2 本学のアプローチ

そこで本学では LPWA 無線のように通信データ量が極めて少ない場合でも、高精度の GPS 位置検出が可能となる手法の開発に取り組んだ。2022 年 1 月にようやく「**LVS : Lattice Vector Search**」という方法に到達し、この方法を実験確認して特許出願と学会論文提出を完了させた。以下にこの概要を報告する。

2.9.3 従来法 (RTK-GPS) の問題点

従来の高精度測位法「RTK-GPS」は、次図（左）に示すように GPS 衛星からの電波を 2 つのアンテナ (A, B) で検出し搬送波の位相差 $\phi_{AB}(n)$ を求めて測位する。ここで位相差 $\phi_{AB}(n)$ は衛星から 2 つのアンテナへの距離差に対応していて、4 つの衛星からの電波を受信したとき ($M=4$) には下式で表すことができる。

$$\begin{aligned}\phi_{AB(1)} &= \frac{2\pi}{\lambda} \{RB(1) - RA(1)\} + 2\pi N(1) \\ \phi_{AB(2)} &= \frac{2\pi}{\lambda} \{RB(2) - RA(2)\} + 2\pi N(2) \\ \phi_{AB(3)} &= \frac{2\pi}{\lambda} \{RB(3) - RA(3)\} + 2\pi N(3) \\ \phi_{AB(4)} &= \frac{2\pi}{\lambda} \{RB(4) - RA(4)\} + 2\pi N(4)\end{aligned}$$

上式で $N(n)$ は整数バイアスと呼ばれる不確定値であって M 個存在する。従来法ではこれら M 個の整数バイアスと、アンテナ B の位置座標を合わせて $M+2$ 個の未知数を求めなければならなかった。このため衛星からの信号を途切れることなく連続観測しなければならず、高い通信レートが必要となっていた。

2.9.4 本学発の測位手法「LVS」

新測位手法「LVS」では、 M 個の衛星から測位衛星ペアを抽出して、測位衛星ペアからの電波が地球上に作り出す干渉縞を理論的に求める。光学の分野では格子ベクトル (Lattice Vector) で干渉縞を表すことから、本学発の測位手法を「Lattice Vector Search (LVS)」と名付けている。

「LVS」は、格子ベクトルと $k(n)$ 、仮決めした基線ベクトル \mathbf{P}' から干渉縞位相 $\Phi(n, \mathbf{P}')$ を下式で求め、実測した二重位相差 $\phi_{DD}(n)$ とを比較することで測位する方法である。

$$\Phi(n, \mathbf{P}') = \text{mod} \{ \mathbf{k}(n) \cdot \mathbf{P}', 2\pi \}$$

従来法で問題となっていた整数バイアスを求めないので、未知数が基線ベクトルだけとなる。少ない情報量で測位できるので、LPWA 無線を適用して山中で発生する土石流や崖崩れを遠方で監視することができる。

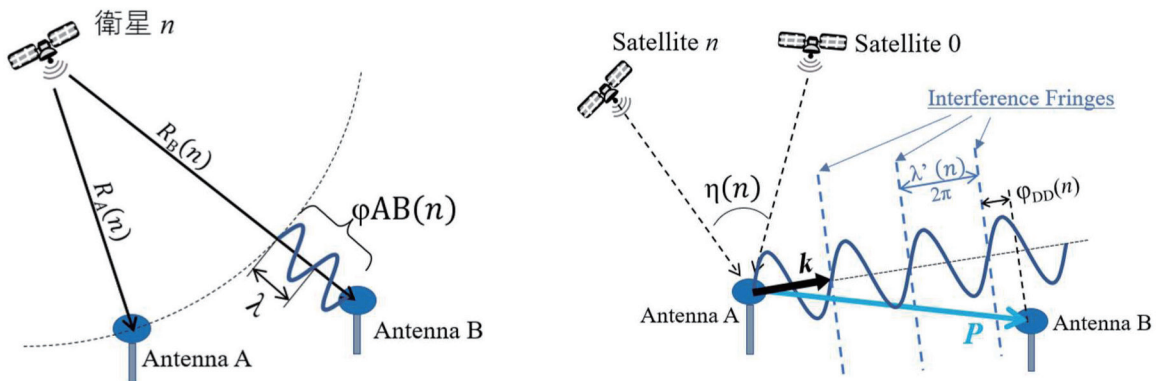


図 11 従来の高精度測位方法 (左: RTK-GPS) と、本学の測位方法 (右: LVS)

2.9.5 「LVS」の実験結果

下図 (左) に示すように本学連携研究センターの 2 階屋根に GPS アンテナ A と B を設置し、アンテナ A から B までの距離を GPS 衛星からの電波を使って高精度に計測することを試みた。

メジャーで測定したアンテナ A - B 間の距離 R は 1.6m であったのに対し、5 分間隔で 9 回測位した平均は 1.591m が得られ充分妥当な値が得られることを実験確認している。

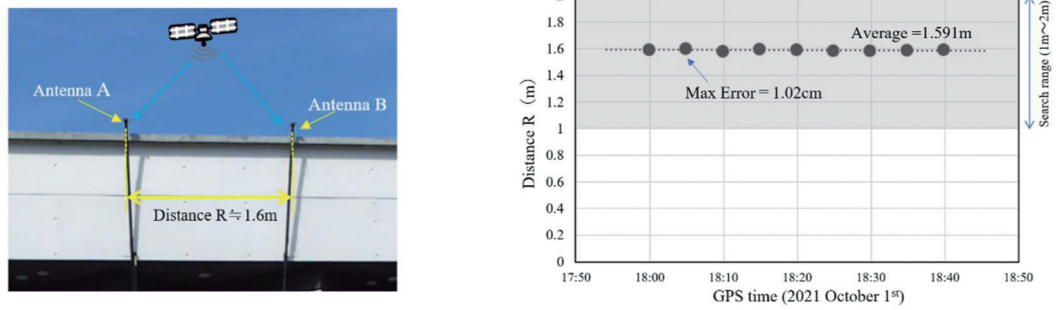


図 12 本学の測位手法「LVS」を用いた高精度測位実験の結果

2.10 本テーマの特許出願及び論文投稿

- 特願 2021 - 007561 相対位置検出システム (公立諏訪東京理科大学)
- 特願 2022 - 006781 相対位置検出システム (公立諏訪東京理科大学)
- “GNSS 搬送波位相を用いた新測位手法「LVS」” 測位航法学会論文投稿 2022 年 3 月