

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（FS研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職
	安原英明（やすはらひであき）		愛媛大学		教授
②研究 テーマ	名称	LPWA型無線ネットワークを用いた斜面災害監視システムの研究開発			
	政策テーマ	[主テーマ] テーマ1	公募	タイプII (FS実施)	
		[副テーマ] テーマ5	タイプ		
③研究経費（単位：万円） ※受託額を記入。	令和3年度				
	635.8				
④研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）				
	氏名	所属・役職			
	都築伸二	愛媛大学・教授			
	木下尚樹	愛媛大学・教授			
	岸本弘樹	株式会社ダイヤコンサルタント四国支店・支店長			
	杉山直起	株式会社ダイヤコンサルタント四国支店・地質防災課長			
⑤研究の目的・目標（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）					
<p>本申請では、従来技術よりも劇的に省人化できる斜面災害システムの開発を行う。具体的には、潜在的災害危険個所を高精度に判読する仕組み構築に加えて、IoT向け無線通信ネットワーク技術（低消費電力長距離型無線技術 Low Power Wide Area : LPWA）を用いて、四国域内に無線通信ネットワークを構築し、域内の管理斜面の変状を一括管理するプラットフォームの開発を実施する。</p> <p>本申請では、産官学の知恵を結集し、四国地域の斜面災害管理を劇的に省人化（コスト削減）するシステムを構築し、人的・物的資産を守る。</p>					

⑥ FS 研究の結果

(FS 研究の結果について、これまでの研究目標の達成状況とその根拠(データ等)を必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入。)

本申請のFS研究の内容は4項目((1) 既往の研究成果の整理、(2) 四国域内の変状管理斜面の抽出に関する検討、(3) LPWA基地局(受信地点)の設置場所選定に関する検討、(4) LPWAセンサデバイス開発に関する研究)であり、それぞれについて成果を記述する。

(1) 既往の研究成果の整理

【研究目標】LPWA技術を活用したモニタリングシステムに関する既往の研究成果を調査し、現状の課題を整理する。

【達成状況】

LPWA無線ネットワーク技術を用いたセンサ機器(例えば、傾斜センサ)の開発については近年活発化しており、少しずつ商品化されている(OKIPPA:西松建設、クリノポール:応用地質、スマくい:ABiT、無線傾斜センサ(LPWA):佐鳥電機など)。計測精度・分解能や計測頻度などの詳細は各社ばらつきがあるが、計測データの閲覧については、各社のクラウドサービスで閲覧可能で、警報メール機能等が標準あるいは別途装備されているものが多い。国内外の公開研究論文を調査すると、2019年頃からLPWAを搭載した斜面変状監視センサ(傾斜センサ、ひずみセンサ、水位センサなど)がいくつか報告されている(例えば、文献(i)-(iv))。LPWA技術を活用したモニタリングシステムは省力化・省人化できる技術であるので、今後も企業の参画が想定される。しかし、様々な企業が開発するLPWAセンサ機器で取得した計測データを一元的に管理できる仕組みはなく、今後の普及に向けての課題と考える。国土交通省四国地方整備局や愛媛県との協議でも、リスクの高い斜面の常時監視が一元的に行えるモニタリングシステムを求める強いニーズが確認されており、申請者が提案する一元化プラットフォームの構築は、ニーズに応えるユーザー利便性の高いシステムと言える。

<参考文献>

- (i) Park et al. (2019), A study on the slope failure monitoring of a model slope by the application of a displacement sensor. Journal of Sensors, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/7570517>.
- (ii) Butler et al. (2019), Efficient IoT-enabled Landslide Monitoring. IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Limerick, Ireland, 2019, pp. 171-176, doi: 10.1109/WF-IoT.2019.8767201.
- (iii) Gamperl et al. (2021), Internet of Things Geosensor Network for Cost-Effective Landslide Early Warning Systems. Sensors. <https://doi.org/10.3390/s21082609>.
- (iv) Putra et al. (2021), Development of slope deformation monitoring system based on tilt sensors with low-power wide area network technology and its application. Journal of Civil Structural Health Monitoring. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00494-9>.

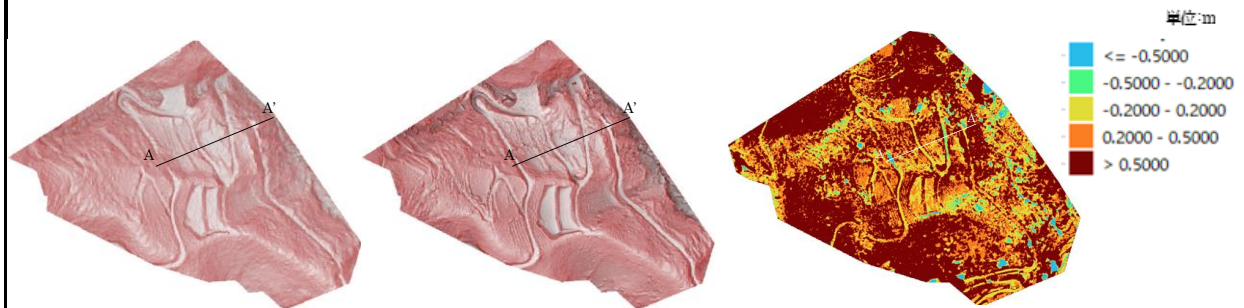
(2) 四国域内の変状管理斜面の抽出に関する検討

【研究目標】斜面管理の際の現場ニーズを調査するとともに、LPデータ等の詳細な数値地形データを処理した図から地形の細かな凹凸を判読し、地形を定量的に整理した結果と既往変状との関係を整理することにより潜在的災害危険個所を把握する。

【達成状況】

1) LP図による比較検証

令和2年7月豪雨の前後に作成されたLP図（平成30（2018）年（林野庁作成、伊予市提供）と令和3（2021）年（本研究作成））において、対象地において変形がどの場所で発生しているかを確認した（図1）。その結果、市道における変化量は $-0.2\sim+0.2\text{m}$ と小さく、林地は $+0.2\sim+0.5\text{m}$ と市道と比較して大きかった。これは、令和2年豪雨での地すべり活動量が小さかったためであり、林地は植生による誤差が市道と比較して大きかったためと判断する。



(a)LP図（平成30年） (b)LP図（令和3年） (c)変形性状（(a), (b)図の差分）

図1 LP図を用いた変形性状

次に、横断面図（図1のA-A'断面）で比較した結果を示す（図2）。平成30（2018）年を基準に見ると、地すべりブロック上部では沈降、中央部では隆起、下部では沈降していることが確認できた。つまり、時系列でLPデータを獲得できれば、詳細な地形変状評価ができることを確認した。

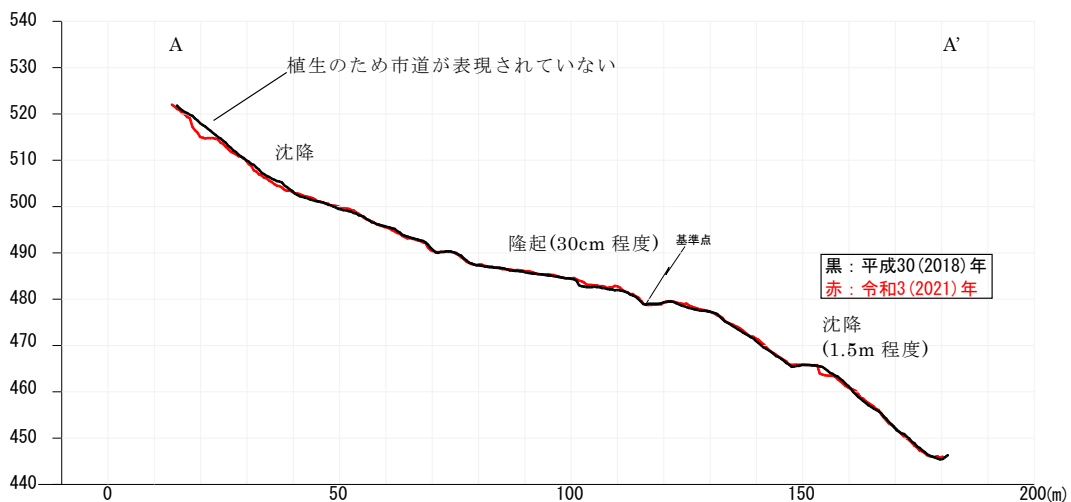
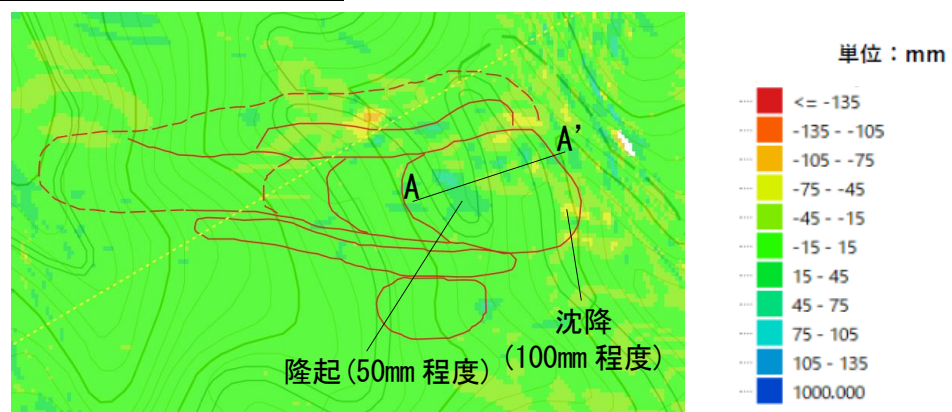


図2 横断面図を用いた変形性状の検討

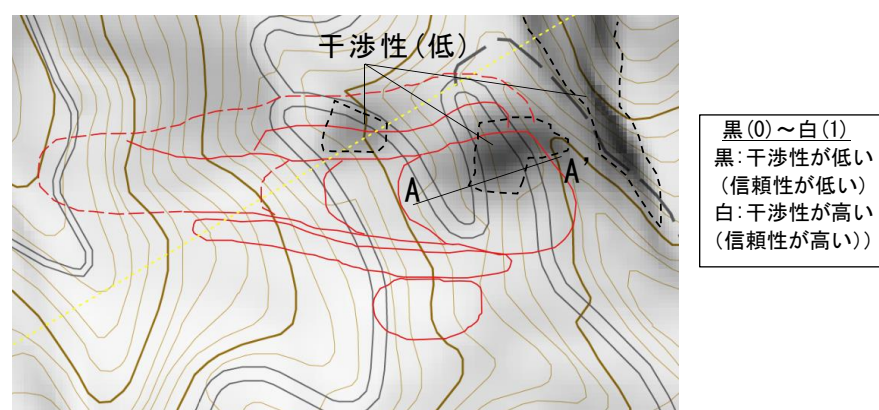
2) 干渉 SAR による検証

令和 2 年 7 月豪雨前後の SAR 衛星 (ALOS - 2) による差分干渉解析を行い、対象地のどの場所が干渉 (変状) しているかを調査した。干渉 SAR による地表面変位状況図を図 3a に示す。なお、図中の赤色実線で示している領域は、現地踏査により同定した地すべりブロックを示している。図より、A-A'断面を含む地すべりブロック中央部と下部に干渉している箇所がみられる。地すべりブロック左翼側 (図面上側) の変動が大きい場所は、コヒーレンス図 (図 3b) と合わせてみると、干渉性の低い箇所であることより除外すべきと考えるが、変状を捉えている可能性もあり更なる評価が必要である。一般に、干渉 SAR による解析では、平地における地下水くみ上げによる地盤沈下などの把握や、山岳地などでは 100m 以上の大規模な変化 (火山活動、地すべり) は把握可能と言われている。しかし、今回のように SAR を活用した小規模な地形変化の抽出は、SAR の電波照射方向や地形条件などにより精度の差が大きく、改善の余地があることが判明した。

本研究では、LP データおよび干渉 SAR による地形変状調査を実施したが、潜在的災害危険箇所を把握するまでには至らなかった一方、課題が明確となった。次年度以降は、AI (機械学習) を用いて数値地形データを解析し、潜在的危険箇所をスクリーニングする手法を検討する。合わせて、干渉 SAR の時系列解析や、衛星写真、変位状況図、コヒーレンス図、等高線図などの重ね合わせ評価を実施し、潜在的危険箇所抽出手法確立を目指す。



(a) 地表面変位状況図



(b) コヒーレンス図

図3 干渉SARによる地表面変状について

【語句説明】 コヒーレンス：干渉SAR実施の際、干渉性の度合いを示す値が“コヒーレンス”である。0～1の値を取り、1に近づくほど干渉性が良い (地表の変動が小さい)。

(3) LPWA基地局（受信地点）の設置場所選定に関する検討

【研究目標】

- ① LPWAの電波通信距離が数10kmであることを考慮し、仮想LPWA基地局を設定し、可視マップを作成することで、管理斜面が可視可能か判定する。
- ② モバイル型基地局を用いて電波通信テストを実施し、変状管理すべき四国域内の斜面に対して、どの位置にLPWA基地局を設定すべきか評価する。

【達成状況】

愛媛県伊予市中山町栗田地区の斜面を試験サイトに設定し、①可視マップ作成及び②電波通信テストを実施した。試験サイトとして選んだ斜面は、小崩落やはらみだしなどの変状を確認している斜面である。カシミール3Dという汎用ソフトを用いて作成した可視マップを図4に示す。図4のピンク色に着色されている領域は、変状管理斜面の中央地点から半径10km範囲で見通しができる領域（可視領域）を示している。LPWA基地局は見通しが良ければ10km以上の電波通信が可能であるため、この可視領域にLPWA基地局を設置すれば、管理斜面に設置したLPWAセンサから計測データを受信することが可能と考える。一方、LPWA基地局にはAC電源が必要あるが、可視領域内にはAC電源を獲得できる施設等が確認できなかった。そこで、可視領域外であるが直線距離で数100m離れた場所でAC電源を獲得できる地点にモバイル型基地局（LoRaWAN型）を設置し、電場通信テストを実施した（参照：図5の赤色三角が基地局設置場所）。LoRaWAN通信可能なGPSトラッカー2台を用いて、基地局から徒歩で管理斜面を含めた周辺領域を踏査した（図5）。図中の緑・青マークが通信確認地点を示している。受信電波強度を表すRSSI値を図中に示しているが、概ね-120dBmであり、受信確認地点については良好な受信電波強度を示している。一方、管理斜面内は全く電波を受信できなかったため、仮設定した基地局は適さないことが確認された。そこで、自前でAC電源を獲得するソーラー発電蓄電バッテリーシステムを採用することで、可視範囲の任意の地点に基地局を設置できる仕組みを導入することにした。そのソーラー発電蓄電バッテリーシステムを用いて評価した結果は次頁に示す。



図4 可視マップ

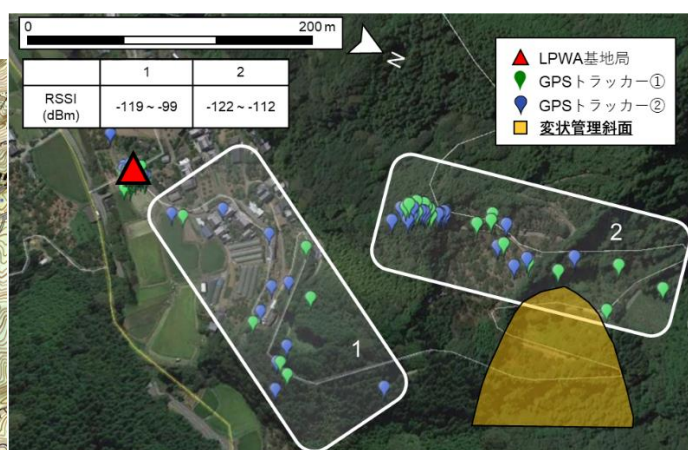


図5 電波通信テスト結果

(4) LPWAセンサデバイス開発に関する研究

【研究目標】現場ニーズを把握したうえで、傾斜角度、水圧、変位等を計測できるLPWAセンサリングデバイスを開発する。

【達成状況】

本研究では、LPWAの中でもSigfox規格を用いたセンサリングデバイスの試作機を開発した。試験サイトである栗田地区の状況としてLTE (NTT docomo) 圏内、Sigfox圏外であったため、ソーラー発電蓄電バッテリーシステムを用いてSigfox簡易基地局を構築した(図6※1参照)。LPWAセンサデバイスとして傾斜計(図6※2参照)と、水位計、伸縮計、雨量計、パイプ歪計の計測データを取り込むSigfox集約通信機(図6※3参照)を開発した。併せて、すべての収集データをWeb上で確認するインターフェイス(図6※4参照)についても構築した。

2021年12月現在、現場からの観測データはWeb上で問題なく確認ができている。本システムを導入することにより、土砂災害危険箇所が多くなる山間部などのLPWA圏外で、かつ、AC電源が確保できないような悪条件に対しても監視体制を構築可能となると考える。また、一元化プラットフォーム構築を想定し、データ書式にJSON (JavaScript Object Notation)を採用し、他システムにデータを取り込む際、比較的容易に連携させることが可能となる仕組みを取り入れている。

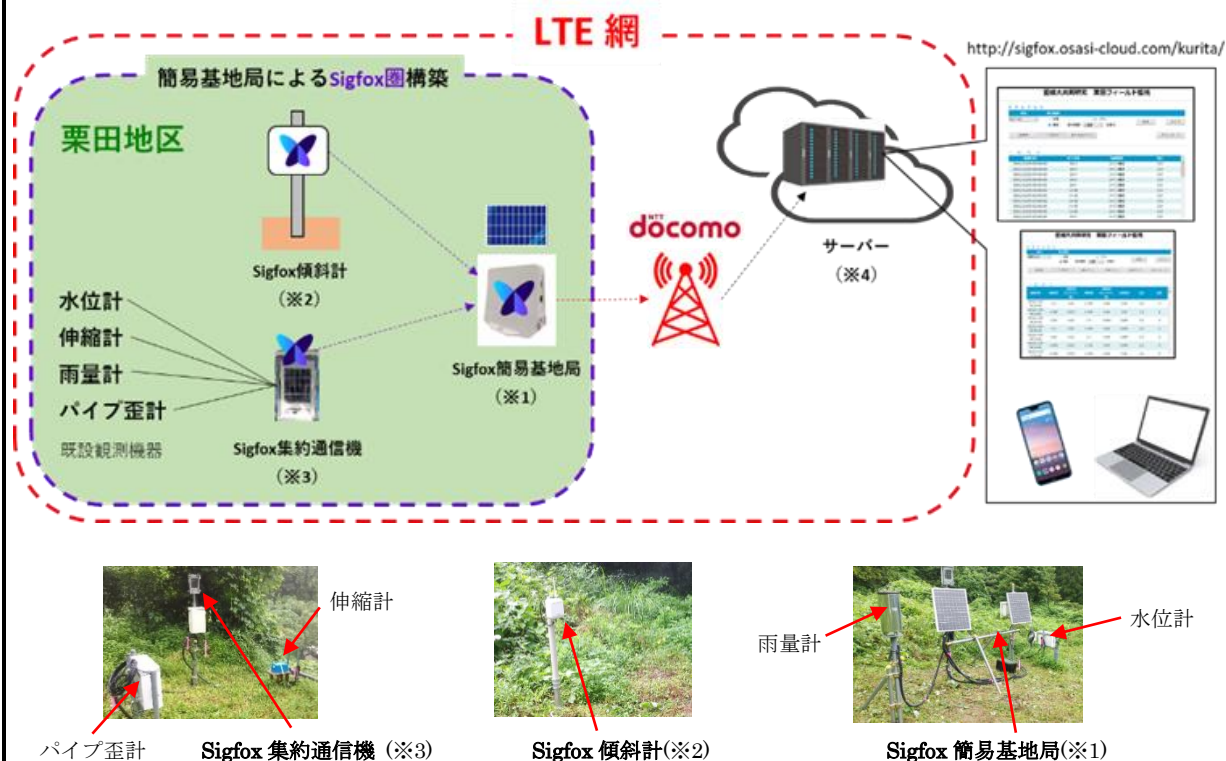


図6 開発したセンサリングシステム

【語句説明】JSON (JavaScript Object Notation) : Python、PHP、JavaScript、C++、Java など様々な言語でサポートされており、JSONを間に挟むことで各プログラミング言語間のデータの受け渡しが簡単にできる。

※【本格採用に向けた条件】として、「・潜在的災害危険個所を把握する方法および現場のニーズとの整合性や提案内容の新規性・有用性を明確にすること。」が示されている。この条件に対する回答を以下に纏めて記述する。

① 潜在的災害危険個所を把握する方法

本年度は、LPデータおよび干渉SARを用いた地形変状調査を実施したが、潜在的災害危険個所を把握するまでには至らなかった一方、課題が明確となった。次年度以降は、AI（機械学習）を用いて数値地形データを解析し、潜在的危険個所をスクリーニングする手法を検討する。合わせて、干渉SARの時系列解析や、衛星写真、変位状況図、コヒーレンス図、等高線図などの重ね合わせ評価を実施し、潜在的危険個所抽出手法確立を目指す。

② 現場のニーズとの整合性

国土交通省四国地方整備局や愛媛県との協議で、リスクの高い斜面の常時監視が一元的に行えるモニタリングシステムを求める強いニーズが確認されており、申請者が提案する一元化プラットフォームの構築は、ニーズに応えるユーザー利便性の高いシステムと言える。また、数日から数か月に1度の頻度で、実際に斜面に上って計測データを取得しに行っている現場があるが、それを同程度以下のコストで無線で飛ばす仕組みを求めるニーズも確認できた。本申請のLPWAセンサシステムは正にそのニーズに応える仕組みである。さらに、斜面災害発生後の二次災害防止のために即応性の高い監視システムが求められていることも確認できた。申請者のLPWAセンサシステムは、既存の有線システムよりも格段に施工性が高く、このニーズにも応える技術である。

③ 提案内容の新規性・有用性

上述したように、LPWA無線ネットワーク技術を用いたセンサ機器の開発については近年活発化しており、少しずつ商品化されている。LPWA技術を活用したモニタリングシステムは省力化・省人化できる技術（高い施工性、管理のしやすさ、低コスト）であるので、今後も企業の参画が想定される。しかし、様々な企業が開発するLPWAセンサ機器で取得した計測データを一元的に管理できる仕組みはなく、今後の普及に向けての課題と考える。申請者が提案する一元化プラットフォームは、ユーザーのニーズに合致したもので、上述の課題を解決できる新規性・有用性の極めて高いシステムと言える。

また、LPデータなどの詳細地形情報を用いた災害危険個所の抽出については、最近いくつか成果が出てきているが、結局は地形判読士が地形を判読し危険個所を人間の目で抽出している。本申請では、地形判読士の目をAI（機械学習）で代替できるシステムを構築するため、精度・信頼性の高いシステムが構築できれば非常に有用な仕組みとなる。

⑦本格研究の見通し

(F S 研究の結果を踏まえた本格研究における研究成果の見通し、今後の研究目標の達成見込み、成果の活用方法、手段、今後の展開等を記入。この際、提案書(当初計画)からの変更点があれば、分かるように工夫すること。)

当初計画では、FS研究で潜在的危険箇所を把握・抽出する手法を確立することを目指していた。LPデータを処理した詳細地形データ及び干渉SAR画像を用いて、潜在的危険箇所の抽出を試みたが、結局は地形判読士(技術者の知識)に依存することがわかり、評価手法を高度化させるだけでなく視点を変えた評価手法も必要と理解した。そこで本格採用期間では、AI(機械学習)によるスクリーニング手法を構築し、潜在的危険箇所を自動で判読する研究項目と、干渉SARを用いた評価手法を高度化する研究項目を追加した。

また、当初案では、計測データを閲覧できるインターフェイス開発を計画していたが、1企業の計測データを閲覧できる仕組みを作っても、将来の拡張性に欠けると判断した。そこで、様々な企業の機器の計測データを一元管理可能な“一元化プラットフォーム”を構築することとした。さらに、LPWAセンサデバイス開発については、当初案(令和3年度は1企業で開発)よりも多くの企業(令和4年度は4企業を予定)に参画してもらい、現場ニーズに応えるセンサ群を開発する。

一方、本申請の研究を実現化に向けて加速させるために、研究と並行して、LPWA技術を含めた土木DX関連の研究ネットワーク構築を目指すこととした。研究開発企業・大学と国・県が連携して平場で議論できる研究ネットワークの構築を試みる。具体的には、研究ワークショップ等を開催し、産官学が結集して議論する場(四国土木DX研究会(仮))を創る。国土交通省四国地方整備局、愛媛県、四国域内の地場の建設コンサルタント、中央の建設コンサルタント、計測機器メーカーなど、合わせて20程度の参加企業・団体を令和4年度の設定を目指して準備している。構築される研究ネットワークを最大限活用して、開発されるシステムの社会実装を加速させる。

FS研究の実施で今後の課題がより明確になり、実現(社会実装)に向けた研究目標が具体化された。研究組織の拡大も見込まれ、研究目標以上の達成も視野に入れた活動ができると確信している。

⑧特記事項

(本F S 研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入。)

FS研究を通して、本事業に参画を希望する企業・団体が増えた。国・県などのユーザーのニーズと企業のシーズをうまく結びつけるのが研究代表者の役目と考えるが、その道筋がかなり明確になった。愛媛大学には、社会基盤の維持管理のための開発支援及び人材育成を目的とした社会基盤i(アイ)センシングセンターがあるが、そのセンターからの全面支援も取り付けることができた。

【自己評価】上記の通り、当初案では、FS研究で潜在的危険箇所を把握・抽出する手法を確立することを目指していたが、達成できなかった。ただし、解決すべき課題がより明確になり、研究の目的・目標を達成できる見通しが立った。本格採用期間では、目標以上の成果を目論んでいる。