

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：30107

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K21027

研究課題名（和文）植物分子生物学と水理学の融合による河川流計測のための植物型センサロイドの開発

研究課題名（英文）Development of a plant-type sensoroid for measurement of river flow by integrating molecular biology and hydraulics

研究代表者

鈴木 洋之（SUZUKI, HIROYUKI）

北海学園大学・工学部・教授

研究者番号：70342491

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：近年頻発する河川災害の防御に必要な河道整備には過去の洪水時の実績流量や水位が求められるが、予算等の制約からこれらの水文量が観測されない小中規模の河川は多数存在する。一方で植物は外力刺激に応じたストレス応答を示すことが知られており、植物は過去の洪水の情報を生育・生理学・分子生物学的情報の形で保有すると考えられる。本研究は実験で植物が洪水による流水刺激を受けて生じるストレス応答を明らかにした。これにより、従前の物理原理に基づく計測技術と全く異なる生物学的原理に基づいて洪水流計測に植物をセンサーとして用いることのできる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動で高まる豪雨ポテンシャルに対応できる河川整備が求められる中で基礎データとなる流量や水位が観測されていない小中規模河川が多数存在する。本研究で目指す技術はこのような無観測河川の解消を実現する。これが本研究の社会的意義である。

また、本研究は従前とは全く異なる生育・分子生物学的情報を用いた計測原理に基づく河川洪水流の流れを計測する植物センサーを開発するものであり、制御工学理論を媒体として過去に全く例のない河川水工学と植物分子生物学の融合という新たな学問分野の開拓によってこれを実現するものである。この技術は従前の物理原理に基づく河川モニタリングの限界にブレークスルーをもたらす可能性を持つ。

研究成果の概要（英文）：It needs data of water level and discharge of past flood to decide a river disaster prevention plan. But these hydrological data is not measured at many rivers of small and medium sizes. Because the amount of budget and headcount of engineer for river management is not enough to make observation to obtain the hydrological data. So, new method that can measure a flood cheaply and easily is required. It knows that a plant shows stress response if a plant is given external physical force. For this reason, it is assumed that molecular biological information of a plant growing in a river channel have physical information of past flood like velocity, discharge and so on. This study clarified what kind of stress response occur by external force that is caused by the open channel flow. And this study could show that the possibilities to be able to use plant as a sensor to measure flood velocity, discharge by analysis of molecular biological data of plant.

研究分野：水理学

キーワード：洪水ストレス 冠水ストレス 洪水ピーク流量 AI 潜在空間表現 病害応答 サリチル酸 ジャスモン酸

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年頻発する極端降水による河川災害の対策には既存ダムの高高度運用手法の開発や河道掘削などによる河道断面拡大といった河道整備が必要である。このような整備計画の策定には過去の洪水の流量や水位といった河川水文データが不可欠となるが、国管理の直轄河川と異なり、多数の県管理河川では予算と人員の制約から河道整備を決める基本情報である水位・流量すら観測されていない実態がある。すなわち高額な計測機を都道府県や市町村の管理する全ての河川に設置することは財政的に難しく、また、多数の人員を要する流量観測を洪水時に全ての河川で実施するのは不可能と言ってよい。この課題の解決には高額な計測装置や多数の人員を必要としない安価で簡易な計測技術が必要となる。

この背景の中で [I.Katano K, Honda K, Suzuki N: Integration between ROS Regulatory Systems and Other Signals in the Regulation of Various Types of Heat Responses in Plants. Int J Mol Sci. 19(11), pii: E3370, 2018.] で示された「植物の記憶」という考えは河道内に繁茂する植生が過去に受けた洪水の水理学的情報を分子生物学的情報の形で保有する可能性を示すものであった。すなわち、河道内にある植生を洪水後に採取・分析すれば、その植物が受けた過去の洪水の流量などの水理量が簡便・安価に分かるという生物学的手法に基づく新しい計測原理による河川の現地観測の可能性を示している。このように洪水観測のセンサーとして植物を使うと言う本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

植物は外力刺激に応じたストレス応答を示すことが知られている。すなわち、河道内の植生は過去に受けた洪水の流量、流速、水位といった水理量情報を洪水波形などの非定常性や過去の洪水履歴を含めて生育・生理学・分子生物学的情報の形で保有しており、この情報を抽出すれば河道植生から過去に受けた洪水の水理量が推定できると考えられる。本研究は実験で植物が洪水による流水刺激を受けて生じるストレス応答を生育量と遺伝子の転写産物量の変化から明らかにすることを試みる。また、このような生育量や遺伝子の転写産物量から洪水の水理量を推定する手法として制御理論・情報理論に基づいて水理情報の入力に対するストレス応答をモデル化することを試みる。このように、本研究は水理学・植物分子生物学・制御工学という全く異なる専門分野の知識の融合による新たな研究分野を展開することで、従前の物理原理に基く計測技術と全く異なる生物学的原理による洪水流の計測を可能とするセンサー（植物型センサロイド）の開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究は全ゲノム情報が明らかであり、かつ、生育や刺激に対する応答の制御を司る遺伝子が他の植物種でも多数あるためにモデル植物とよばれるシロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) を対象に行う。ストレス負荷実験には培養土ポット（直径約 4.2cm、高さ約 4cm）で撒種から約 1 か月生育して葉径を大きくする栄養成長段階にあるシロイヌナズナ 10 サンプルを幅 50cm 長さ 10m の水平水路に図-1(a)のように配置して行った。通水時にはサンプルの頂部と水面がほぼ一致（培養土ポットの底面から水深 10cm）するように下流端の堰高を調整した。水理計測は図-1(b)に示す位置でポイントゲージによる水深と直径 1cm のプロペラ式流速計による表面流速 u_s と底部流速 u_b を計測した。さらにストレス負荷を与えないサンプルと培養土ポットの底面からの水深が 10cm となる静水中の沈水による刺激を与えたサンプルも用意した。本研究グループはこの方法で表-1 に示した 5 ケースの一定流量の流れの中に一定時間暴露するスト

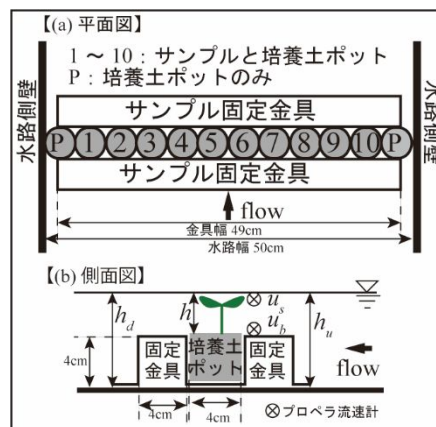


図-1 負荷実験の方法

表-1 負荷実験の水理条件

負荷流量 (L/s)	負荷無し	静水圧	2.0	2.7	4.5	6.3	7.9
設定流速 (cm/s)		0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	30.0

レス負荷実験により、流量に応じて生育量と遺伝子の転写産物量が変化することを示している [2. 鈴木洋之, 鈴木伸洋, 志垣俊介, Sim JOONGEUN, 阿部里菜, 新田大史, 山次亮太郎: 流れによるストレスで生じる植物の生育および分子生物学的応答に基づく水理量推定の可能性, 土木学会論文集 B1(水工学), 第 75 巻, 1 号 pp.130-137, 2019.]. そこで、本研究でははじめに洪水継続時間が生育に及ぼす影響を明らかにする目的で流量を表-1 の最大流量 7.9L/s に固定して負荷時間を 5 分, 10 分, 15 分と変化させた実験を実施すると共に、表-1 の条件で実験を実施して追加サンプルを作成した。これらのサンプルに対して、1) 葉径や茎長といった生育パラメータの計測および 2) AI 的アプローチによる生育データから流れを推定するモデルの構築を試みた。さらに 3) 洪水ストレスに対する植物の応答機構を明らかにすることを目的に表-1 の最大流量条件で作成したサンプルに対して RNA-Seq によるトランスクリプトーム解析と qRT-PCR 解析を行った。

4. 研究成果

(1) 負荷時間が生育に及ぼす影響

ピーク流量と洪水継続時間は洪水の特徴を表す重要な要素となる。過去の研究では負荷時間を固定して流量を変化させる実験によりピーク流量が生育に与える影響を明らかにした。本研究では洪水継続時間の影響を調べるために流量を過去の実験条件の最大流量条件で固定し、負荷時間を5分、10分、15分とする実験を行った。この実験では各負荷時間で通水によるストレスを与えたサンプルと静水中に冠水させてストレスを与えたサンプルと共に、負荷を一切与えないサンプルを作成した。サンプルはそれぞれのケースで10個作成している。負荷を与えてから3日毎に葉径と茎長を成長が終わるまで計測した。図-2と図-3にそれぞれ葉径と茎長について10サンプル平均で表した時系列変化を示す。

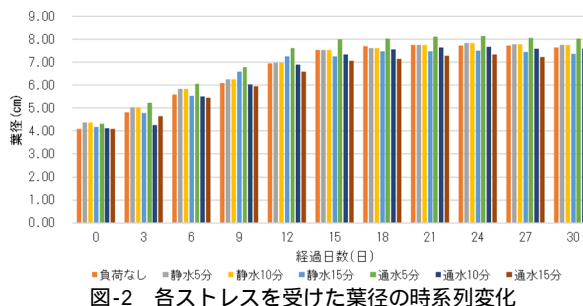


図-2 各ストレスを受けた葉径の時系列変化

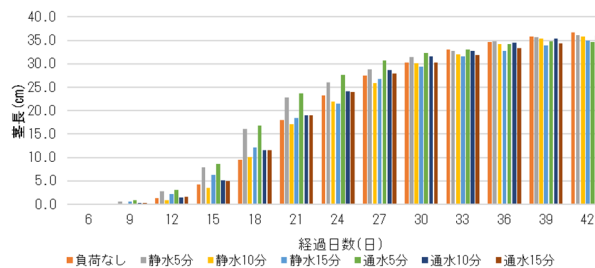
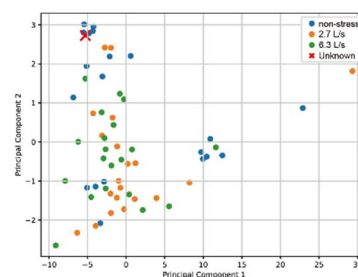


図-3 各ストレスを受けた茎長の時系列変化

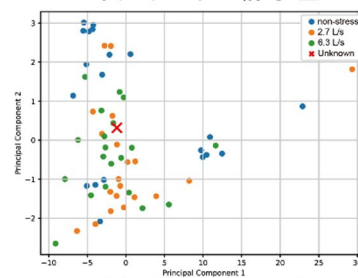
計測最終日の結果に注目すると茎長と通水時間に明瞭な関係は現れないが、葉径は通水時間の増加に伴って成長が抑制されている。ピーク流量の変化に対する応答と同様にストレスによる影響は葉径に明瞭に現れることが分かった。また、同じ負荷時間に注目すると負荷時間10分と15分では静水と通水で大きな差異が見られない。また、負荷時間5分では静水ストレスよりも通水ストレスを受けたサンプルの葉径が大きくなっており、通水と静水の影響をこの実験のみで分離して考えることは難しい。しかしながら、過去の実験で確認した流量の違いが葉径の成長に与える影響と比べると通水時間の影響は明らかに小さいものとなった。このことから、河道植生から過去に受けた洪水のピーク流量の情報を抽出できる可能性が示されたと考えている。今後は実際の植生が受ける複数の洪水を想定した異なる流量で複数回通水したときの応答を調べることで、洪水流の計測センサーとしての植物の特性を示す必要がある。

(2) 植物情報に基づく水理量推定法の構築

測定した水理量と植物生育の関係から未知の水理量を推定する手法を構築した。生育データにはストレスを与えてからの経過日数や葉径、茎長などの複数要素があるため、主成分分析を基盤として低次元の潜在空間の変数にエンコードした。今回は、水理量として流量を推定することを目的とするため、表-1の負荷なし、2.7、6.3 L/sのデータを用いて潜在空間の学習を行なった。また、各流量では10サンプル分の生育データがあるため、全てのデータを学習に用いた。学習した潜在空間に対して、未知の水理量の生育データを潜在空間上に投影した。未知の生育データとして、静水圧、7.9 L/sを入力した。その結果を図-4に示す。図-4の丸点の色は負荷なし、2.7、6.3 L/sのデータを表しており、x印は入力した未知データを表している。図から潜在空間上の近い位置に未知データが投影されていることから、おおよその水理量が簡単に推定できることが示された。現在、水理量として流量のみに焦点を当てているが、潜在空間で表現されている変数を元の空間にデコードすることで、水ストレスを受けた頻度や時間を推定できる可能性も考えられる。



未知データ：静水圧



未知データ：7.9L/s

図-4 未知データに対する推定結果

(3) 物理的流れを伴う洪水ストレスに対する植物の応答機構

本研究では植物科学の分野では全く注目されてこなかった、物理的流れを伴う洪水ストレスに対する植物の応答メカニズムの解析も行った。その結果、流れを伴う洪水ストレスに対する植物の応答が、物理的流れがない湛水ストレスに対するものとは異なることが明らかとなった。流れを伴う洪水ストレスにさらされた植物で発現が上昇する遺伝子には病害応答に関与するものが多く、このストレス応答に対する病害応答機構の関与が強く示された。また、病害応答への関与が既に知られている活性酸素生成酵素であるNADPHオキシダーゼ(RBOH)遺伝子やサリチル酸およびジャスモン酸生成に関与する遺伝子の発現上昇が湛水ストレスよりも流れを伴う洪水ストレス下で著しいこともわかった(図-5)。これらの結果から、植物は病害応答機構を利用した特異的なシグナルにより、流れを伴う洪水ストレスに対して応答すると考えられる。さらに、本研究では生育を制御する植物ホルモンであるオーキシンのシグナルに関与する遺伝子発現が流

れを伴う洪水ストレスにより低下することもわかった。これらの病害応答遺伝子の発現上昇並びにオーキシシグナル遺伝子の発現低下は、植物の葉径の減少とリンクしていることも統計学的に示されている。以上の結果から、葉径の減少は物理的な流れを伴う洪水ストレスに対する植物の応答の一つであると考えられる。この成果は現在、Plants誌に投稿され、審査中である。

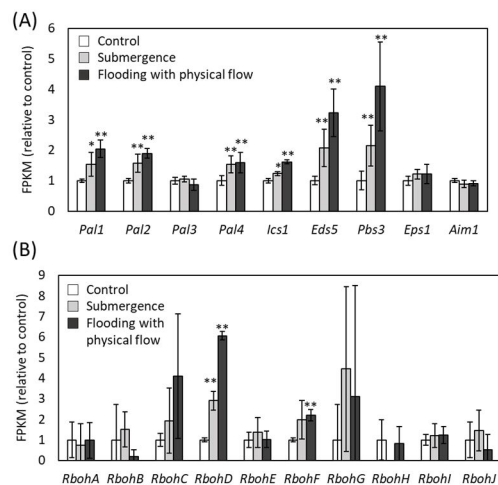


図-5 湛水および洪水ストレス下におけるサリチル酸合成遺伝子 (A) および活性酸素生成酵素遺伝子 (B) の発現

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Nobuhiro Suzuki, Momoko Kaji, Kazuma Katano, Hiroshi Nitta, Ryotaro Yamaji, Rio Shimizu, Shunsuke Shigaki, Hiroyuki Suzuki
2. 発表標題 Response of Arabidopsis thaliana to flooding with physical flow
3. 学会等名 The 33rd International Conference on Arabidopsis Research
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	鈴木 伸洋 (SUZUKI NOBUHIRO) (50735925)	上智大学・理工学部・准教授 (32621)	
研究分担者	志垣 俊介 (SHIGAKI SHUNSUKE) (50825289)	国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・助教 (62615)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------