

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450372

研究課題名(和文)作物体温と氷核形成温度の相対関係に基づいたGPS援用型広域霜害予測システムの開発

研究課題名(英文)Development of GPS-aided regional frost prediction system based on relation between crop temperature and ice nucleation temperature

研究代表者

森 牧人(MORI, MAKITO)

高知大学・教育研究部自然科学系農学部門・准教授

研究者番号：60325496

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、四国地域を対象にGPS可降水量と気象データを用いることにより降霜を予測するシステムが構築された。まず、茶を対象に、茶葉の氷核形成温度と葉の表面温度の関係が調べられ、氷核形成温度の季節変化が簡易式により簡単に表現された。次に、夜間の気温低下を表現するためにニュートンの冷却の法則が数学的に応用された。さらに、早朝の地上気温の理論値は半経験・理論的に手法により解析され、同気温と植生面温度の関係が調べられるとともに、降霜や霜による作物被害を予測するためのいくつかの基準が提案された。以上の知見を踏まえ、夕方におけるGPSと気温の情報のみから翌朝の霜害危険度を判定するマップが作成された。

研究成果の概要(英文)：Ice nucleation temperature of tea leaves (Tice) was investigated in relation to their surface temperature, giving rise to a simple formula to express the seasonal variation of Tice. Newton's law of cooling was applied to infer temperature decreases during the night. Results were extended to estimate the difference between air temperature and surface one using an empirical/theoretical approach. Several criteria were originally proposed to give scientific basis to the predict occurrence of frost or frost damages to the crops using both temperatures. Finally a frost-risk map in the targeted morning was drawn using the data of GPS-PWV and air temperature obtained on the last evening at each of GPS station and its neighboring station.

研究分野：農業気象学

キーワード：GPS GPS可降水量 氷核形成温度

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化が顕在化しつつある現在、農作物の凍霜害のリスクは世界的に逆に増える傾向にある。温暖な環境は作物の低温順化を妨げ、作物の耐凍性を逆に弱めることがその原因である。2010 年春の西日本の大規模な霜害は卑近な例である。霜害は古くから知られているが、その理解は現象論的であり、また、未だ霜害の発生に明瞭な量的定義がない。加えて、既存の天気予報は降霜を対象としているが、霜害を直接予報はしない。したがって、霜害は温暖化により掻き消される運命にある「過去の問題」では決してなく、その現状に対して科学的な理解と空間的な緻密な予報が要求される「現在の問題」でもある。また、温暖化適応策に含まれるべき「将来の問題」ともいえる。温暖化リスクの増える中、霜害の定義づけ・被害度指標により定量化された霜害予測技術の確立は、将来に向けて持続的な作物生産を維持するうえでの急務の課題と言ってよい。

2. 研究の目的

地球温暖化の顕在化しつつある現在、農作物は対凍性の喪失を通じて、逆に降霜被害を受けるリスクが高まっている。本研究では、晩秋から初春にかけて霜害を被りやすい茶を対象に、まず、作物の氷核形成温度と植物体温度に着目し、その大小関係が霜害の有無を規定するという立場のもと、以下のような目的を設定した。すなわち、研究の第一の目的は、作物体温（植生面温度）と氷核形成温度の相対関係について現地調査により明らかにすることである。次に、国内 GPS 観測網がアメダス観測網を補完可能な点にも着目し、環境要素の履歴値を入力可能な、気象 - GPS 観測網ベースの広域霜害予測システムを開発し、さらに、それを対象地域（四国）に適用することにより、同域の霜害被害の危険度を、霜害予測指標を用いて広域的に明らかにすることを最終目的とする。

3. 研究の方法

本研究では四国地域を主たる研究対象地域とする。同地域には国土地理院により高い空間密度で電子基準点と呼ばれる GPS 観測点が配置されているが、各測点測位データを解析することにより、各点の GPS 可降水量を算出した（図 1：上図）。また、同様に気象庁より展開されている気象観測ネットワーク AMeDAS（以下、適宜アメダス）の観測点で取得される気象データ（気温）についても使用した（図 1：下図）。なお、四国内の典型的な中山間地に位置する高知県農業技術センター茶業試験場（高知県吾川郡仁淀川町森地区、以下、適宜、茶業試験場）の気象観測点における自動気象観測システムのデータを併せて援用した。茶業試験場では、栽培されている茶葉を用いて作物体温と氷核形成温度の関係が現地試験により調べられた。以上

のデータを用いることにより、以下のような手順で研究がすすめられた。すなわち、1) GPS 可降水量をもとに下向き赤外放射量の推定可能性について事例的に検討、2) ニュートン冷却理論に基づいた夜間の気温低下量の理論的導出、3) 茶樹の植生面温度と気温の関係の定量化、4) GPS 情報を活用した植生面温度分布の広域予測、5) 同温度と氷核形成温度の季節変化の定式化と両温度の相対関係の定量化、6) 四国地域内の GPS 情報と気象情報に基づく霜害予測マップの作成、以上の 6 項目が実施された。

4. 研究成果

図 2 は研究対象地域内において典型的な中山間地に位置する GPS 電子基準点 IKEGAWA（以下、適宜、GPS 池川）における GPS 可降水量・気温・降水量の季節変化の一例を示す。期間は 2013 年 1 月 1 日～10 月 9 日である。図中の実線により示されるように、GPS 可降水量可降水量は 1 月から 4 月にかけて小刻みな増減を繰り返しながら 20～40 mm の範囲で推移した。その後、5 月下旬から 6 月中旬にかけて大きく増加し、8 月下旬まで 40～70 mm の範囲で変化した。8 月 21 日に極大値（72.7 mm）を迎えた後、激しく増減を繰り返しながらも徐々に減少した。また、可降水量の増加に同調して、その前後において降水（同図中棒線）があったことを確認できる。同期間中、気温（同図中点線）は明瞭な季節変化を見せながら推移したが、高知県四万十市のアメダス江川崎で日最高気温の日本記録（41.0℃）の更新された同年 8 月 12 日の前後数日間には可降水量がその前後に比べて低い値を示した。以上のように、GPS 観測点では、大気中の水蒸気量の指標となる可降水量の情報か

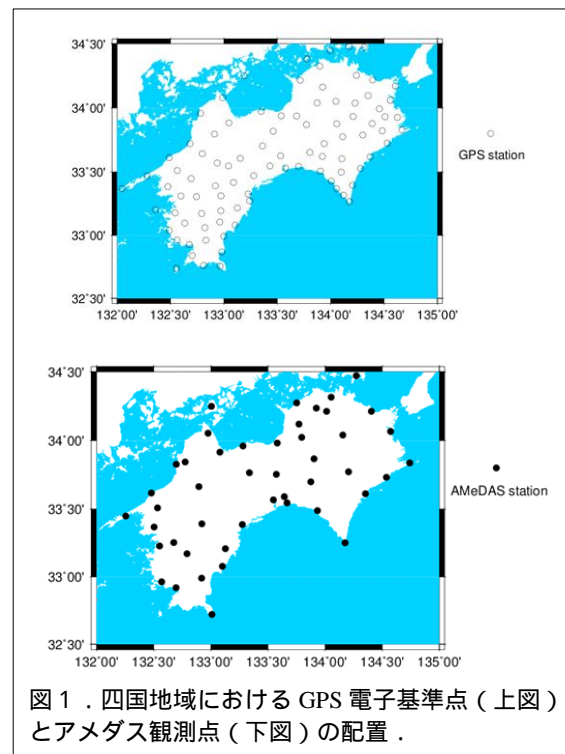


図 1. 四国地域における GPS 電子基準点（上図）とアメダス観測点（下図）の配置。

比較的短い時間インターバルで、なおかつ、高い空間密度で得られることが明らかとなった。

下向き長波放射量は霜害を引き起こす強い放射冷却現象発生を判断するための重要な指標のひとつである。しかし、GPS 電子基準点における同放射量を評価する場合には、アメダスなどの近傍の気象観測点の気温が必要であるが、一般にたとえ両者が近くに位置していても標高差が異なるのが普通であり、研究対象地域の四国地方の山間部は特にそれが顕著である。そこで、簡単な等温大気放射伝達モデルを考案し、GPS 池川の推定値を同モデルに入力することにより、茶業試験場における下向き長波放射量の推定を行った。同試験場における放射量の推定値と観測値の関係には多少のばらつきが見られるものの概ねよく一致した(図3)。今回検討した単層モデルにはいくつかの仮定が含まれるが、GPS 電子基準点から得られる可降水量データを利用することにより、その近傍の下向き長波放射量を比較的よい精度で推定できる可能性が示された。四国地域においてはGPS 電子基準点が山間部であっても比較的多く配置されており、局所的な低温環境が形成されやすい中山間地の晴天夜間の冷却量の解析の際にその利用は有効であることが示

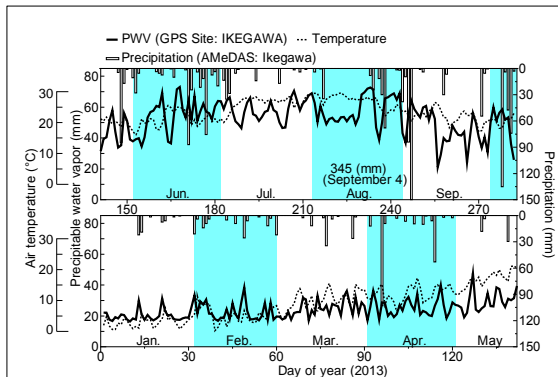


図2. 四国地域内の典型的な中山間地におけるGPS 可降水量・気温・降水量の季節変化の一例(対象点: GPS 電子基準点池川とアメダス池川; 期間 2013年1月1日~10月9日)。

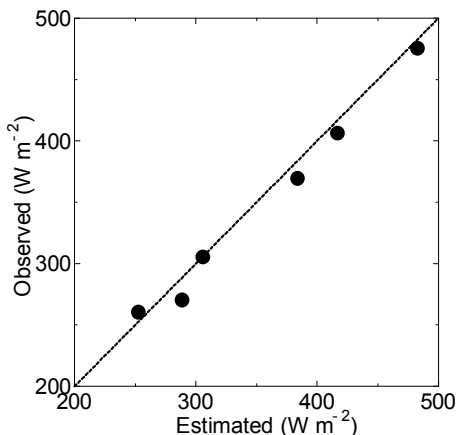


図3. 下向き長波放射量の計算値と観測値の関係。

唆される。

GPS 電子基準点は日常的に気象観測を行っているわけではないので、同点における気温とりわけ、夕方から翌朝にかけての夜間における気温低下量を評価することは困難を伴うことが多い。また、夜間の地表面温度の予報式は数多く提案されているが、気温そのものが予報されることは少ない。本研究では、静穏条件下における地上気温の夜間低下を理論的に予測・表現するために、ニュートンの冷却の法則(Newton's law of cooling)を応用する。同法則は、等温で様な媒質中の相対的に高温の物体の冷却を記述する一種の熱伝達方程式であり、両者の温度差がそれらの絶対温度に比べて小さい場合に適用可能である。すなわち、温度 T の植物体の冷却温度は係数 (>0) と天空放射温度 T_{rad} との差 $T-T_{rad}$ の積として表現される。数学的条件 $|T_{rad}-T_{set}| \ll |T_{rad}| < |T_{set}|$ (T_{set} : 日の入り時の気温)を確認後、最大可能冷却量 $T_{max} (=T_{set}-T_{rad})$ で無次元化された夜間の地上気温の低下量 T^* を無次元時間 t^* (時間を夜間の時間で除したもの)の関数として表した。 T^* には季節変化が認められたため、その差異は T_{set} の一次関数として表現することにより補正した。同関数は茶業試験場で観測された微気象項目の測定値を利用することにより導かれた。この t を乗じることにより減衰率 $\mu = \exp(-t^*)$ が得られるが、 $t=t$ における気温 $T(t)$ の理論値は μ と $(1-\mu)$ をそれぞれ因子とした T_{set} と T_{rad} の加重平均値として与えられるが導かれた。

図4は日の出の時刻における気温の計算値と観測値の関係の一例を示す。日の出の時刻は晴天下において、その夜間に最も気温の低い時間であり、つまり同時刻における気温はその夜間の最低気温を表す。高知・高松において最低気温の計算値と観測値には強い正の相関が窺える。また、ほとんどの日で計算値が観測値を僅かに下回った。一方で、久万・栲原における最低気温の計算値と観測値の間にも正の相関がみられ、その関係は概ね1:1である。以上のことから、夜間の最低気温に関しては、おおよそ推定が可能であることが事例的に示された。

霜害による植物体へのダメージを考える場合、気温のみならず植物体温それ自身を予報する必要がある。そこで、植物体とその近傍の気温について理論的に検討し、両者の関係について調べた。期間中、昼夜ともほぼ晴天に恵まれ、下向き赤外放射量の値もほぼ一定であった(図5a)。気温と植生面の表面温度(等価黒体温度)の関係についてみると、日中、後者は前者よりも小さいが、夜間はその関係が逆転し(図5b)、夕方はそれが5に達することもあるが、夜間はそれが2ないし3ほどで推移していることがわかる。夜間に限れば、理論値の絶対値は観測値を概ね模擬し、特に明け方にかけて両者はよりよく一致することが明らかである。このことは観

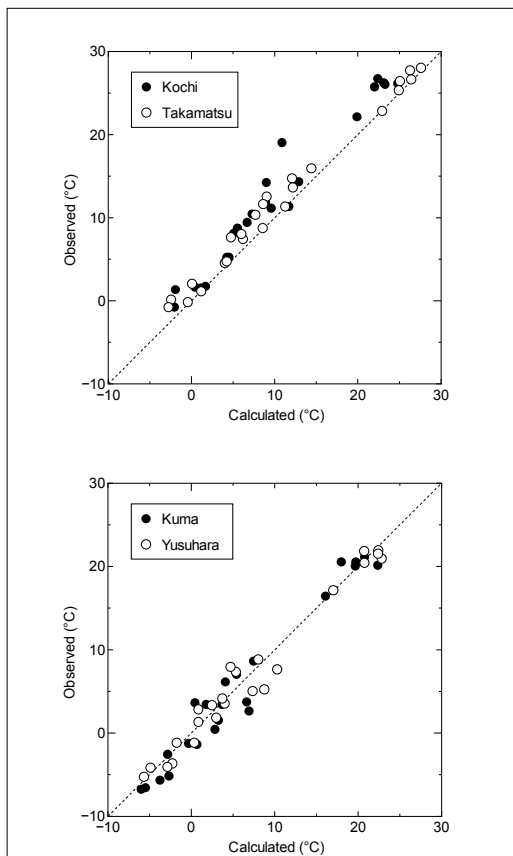


図4．ニュートン冷却理論により導かれた日の出時刻における気温の計算値と観測値の比較（上図：高知市・高松市，下図：久万高原町・梶原町）。

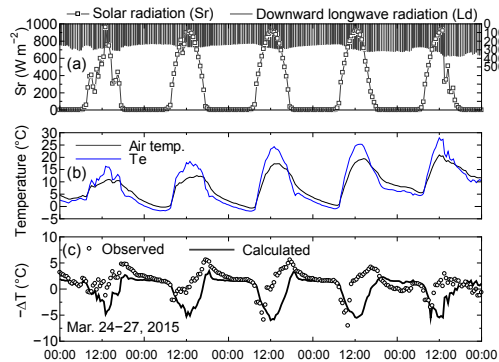


図5．茶業試験場における日射量・下向き赤外放射量(a)，気温と植生の等価黒体温度(b)および気温 - 植生等価黒体温度の理論値・観測値(c)の変化（2015年3月23～27日）。

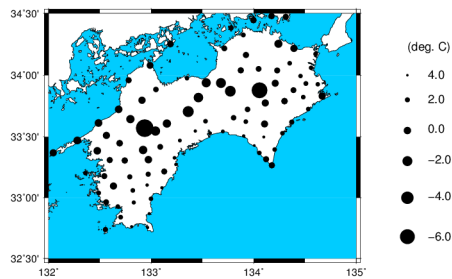


図6．四国地域内の各GPS電子基準点を対象に推定された植生面温度の広域分布（2013年4月13日）。

測結果が理論的にも十分に説明しうることを示唆するが(図5c)，ここでは簡単のため、植生面温度は一律、気温よりも3℃低いものとして扱った。

図6は、2013年4月13日における四国地域内の各GPS電子基準点を対象に推定された植生面温度の分布を表す。凡例は、4.0から2℃刻みで-6.0℃まで表示した。ただし、この結果は前日18時のGPS電子基準点におけるGPS可降水量とその近傍のアメダス観測点における気温のデータを用いることにより描かれた。土佐湾沿岸では植生面温度は2.0～4.0℃ほどであるが、瀬戸内観沿岸では同温度は若干下がる傾向にあることが窺える。内陸ではさらに温度が下がる傾向にあるが、特に、四国の中心域では著しく低下しており、-6℃近くまで低下しているところもある。この推定には、雲の影響などを考慮しておらず、限られた夜間の時間帯に、植生がどの程度冷えるかを示す潜在的指標であるが、気温以外の温度情報値を用いて植生温度を予測・推定可能なことが示された。

図7は2015年1月16日から12月22日にかけての茶葉の氷核形成温度の季節変化を表す。同図より、氷核形成温度は採取日ごとに大きく異なる値を示したが、全体をみると、明瞭な季節変化を示しているといえる。すなわち、図中の2次曲線で回帰されるように（相関係数 $|r|=0.75$ ）、氷核形成温度は、1月から季節の進行とともに低下し、8月頃を境に上昇に転じる傾向が認められる。ただし、最高値は2月15日の-2.1℃、最低値は5月21日の-5.7℃であり、これらの値は回帰曲線と比較しても突出しているが、回帰値からの差の絶対値は1.0℃ほどである。

図8中の実線(黒)は2015年2月から12月にかけてのGPS池川を対象にした植生面温度と茶業試験場で得られた氷核形成温度の季節変化を表す。また、同年において茶業試験場で得られた、氷核形成温度の回帰式(図7)を図中の実線(青)により併せて示した。植生面温度は、1月から4月上旬にかけて、氷核形成温度を下回り、栽培されている茶葉がしばしば霜害を被る可能性があったことが窺える。特に、春先は、そのような頻度が減る分、期間を空けて突発的に生じる可能性が示唆され、春先に遅霜に見舞われやすいことは、同図からもよく示されているといえる。同様な傾向は、11月から12月にかけても確認することができ、霜害に代表される霜害の発生しうる期間が5月から10月を除き、約6か月も続くことが明らかとなった。

図9は四国地域内のGPS可降水量(GPS電子基準点)と気温(アメダス)に基づき描かれた、霜害予測マップの事例を示す。ただし、2015年4月12日の18時のデータを基に翌13日の早朝における予測結果であり、図中の記号は、○：安全、△：注意、◇：警告、×：危険を意味する。予報記号の基準は、図7に

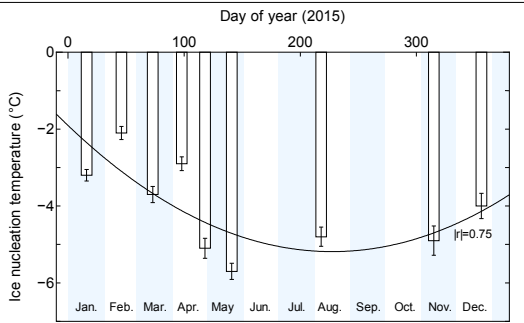


図7. 氷核形成温度の季節変化 (2015年1月16日~12月22日).

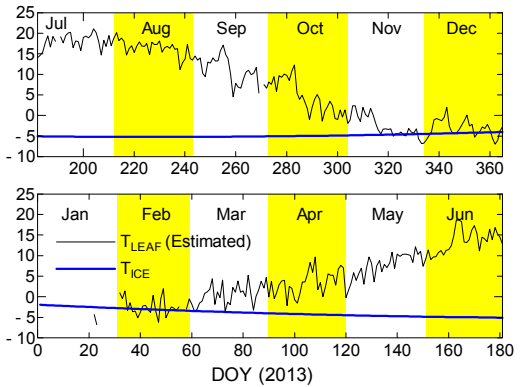


図8. GPS電子基準点IKEGAWAを対象にした植生面温度と茶業試験場で得られた氷核形成温度の季節変化 (2015年2月~12月).

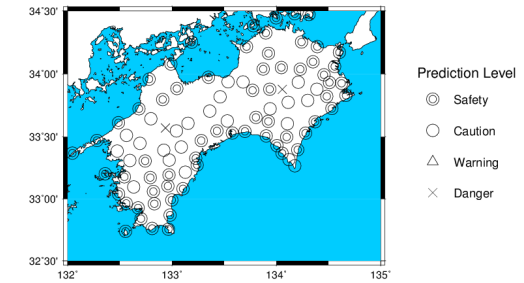


図9. 四国地域内のGPS情報と気象情報に基づき描かれた、霜害予測マップの事例 (○:安全, ○:注意, △:警告, x:危険). 2015年4月12日の18時のデータを基に翌13日の早朝の霜害発生の可能性を予測.

に基づき、茶業試験場で得られた茶葉に対する氷核形成温度の季節値を気温減率 (0.06/100m) で標高の関数として与えて得られた $T_{ice}(z)$ (z : 標高) とその臨界値 T_{ice_cri} 、植生面温度の予測値 T_{plant_min} を用いて、以下のような条件を設定して決定した。すなわち、 $T_{frost} = T_{ice}(z) - T_{plant_min}$ および $T_{ice} = T_{ice}(z) - T_{ice_cri}$ を用いて、1) $T_{frost} < 0$ & $T_{ice} > 0$: 安全, 2) $T_{frost} < 0$ & $T_{ice} < 0$: 注意, 3) $T_{frost} > 0$ & $T_{ice} < 0$: 警告, 4) $T_{frost} > 0$ & $T_{ice} > 0$: 危険とした。沿岸部には二重丸印が広く分布し、内陸 (中山間地) では丸印が多くなり、標高の高い地点ではx印が分布し

ている。同図は四国全域に茶葉が分布すると仮定して計算された仮想的なものではあるが、霜害の危険度の分布を定性的に示しているといえる。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計7件)
一色隆太郎・Garis Ivan・森牧人・能島知宏, 2013: Effect of flavonoids on freezing tolerance in plants and its possible application. 日本生物環境工学会 2013年高松大会, 2013年9月5日, 香川県高松市。

一色隆太郎・Garis Ivan・森牧人・能島知宏, 2013: 傾斜茶園における近接3地点間の茶樹耐凍性の比較解析. 日本農業気象学会中国四国支部大会. 2013年12月5日, 愛媛県松山市。

能島知宏・森牧人, 2013: GPS可降水量を用いた晴天日の長波放射環境に関する局地気象解析. 日本農業気象学会中国四国支部大会. 2013年12月5日, 愛媛県松山市。

能島知宏・森牧人, 2013: GPS可降水量を用いた晴天日における下向き長波放射量の推定. 日本気象学会関西支部第3回例会. 2013年12月20日, 香川県高松市。

一色隆太郎・森牧人・能島知宏・Garis Ivan, 2014: 傾斜茶園における近接3地点間での茶樹耐凍性の季節変化と比較解析. 日本農業気象学会 2014年全国大会. 2014年3月19日, 北海道札幌市。

能島知宏・森牧人・安武大輔, 2015: GPS可降水量を用いた四国地域における夜間冷却解析. 日本気象学会関西支部第2回例会. 2015年12月18日, 香川県高松市。

Haruka Nakamura, Makito Mori, Ryutaro Isshiki, Tomohiro Nojima, 2016: Seasonal changes in the freezing tolerance of the tea plant (*Camellia Sinensis* L. var *Yabukita*): an experimental study at tea garden in western Japan. International symposium on agricultural meteorology (ISAM2016). 2016年3月17日, 岡山県岡山市。

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 牧人 (MORI MAKITO)
高知大学教育研究部自然科学系・准教授
研究者番号：60325496

(2) 研究分担者

安武大輔 (YASUTAKE DAISUKE)
九州大学大学院農学研究院・准教授
研究者番号：90516113
西村安代 (NISHIMURA YASUYO)
高知大学教育研究部自然科学系・准教授
研究者番号：20435134

(3) 連携研究者

()

研究者番号：