

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24580344

研究課題名(和文) 土壌の物理性をもとにしたリンゴの開花日予測モデルの構築

研究課題名(英文) Developing a Model for Predicting the Blooming of Apples Based on the Physical Properties of Soil

研究代表者

加藤 幸 (KATO, Koh)

弘前大学・農学生命科学部・准教授

研究者番号：40302020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：青森県津軽地方のリンゴ園を対象とし、園地モニタリングをもとに、土壌の物理性とリンゴ(ふじ)開花日の関連性について検証した。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1)園地の地温は気温が-10℃を下回る厳冬期でも氷点下には達しないことを確認した。(2)気温にもとづく一般的な開花予測モデルが一般園でも有効であることを確認した。(3)変化傾向の予測が容易な64cm地温を利用した開花予測モデルを提案した。本モデルは、簡易な計測と線形近似から地温の10℃到達日を求めるもので現場での実用性が高い。(4)初冬期の降雪の形態が、翌春の融雪とこの時期の地温分布の形成に影響を及ぼすことを確認した。

研究成果の概要(英文)：We've carried out field monitoring in apple orchards in Aomori Prefecture to investigate the relationship between the physical properties of soil and the bloom date of Fuji apples. The main findings of the study were as follows: (1)During the winter, soil temperatures in orchards don't reach the freezing point, even when air temperatures fall below-10°C. (2)Prediction models depending on accumulated temperatures, which generally used, are effective in orchards that have been investigated. (3)Predicting the bloom date is achieved by measuring soil temperatures at 64 cm and estimating when the temperatures will reach 10°C based on the assumption that soil temperatures increase linearly. This method doesn't rely on sensors, but yields accurate bloom dates easily. As such, this method should prove to be highly practical in the field. (4)The date of the first snowfall and the beginning of snow continuously covering the ground affect soil temperatures and snow melting the following spring.

研究分野：地域環境システム学

キーワード：地温 リンゴ園 開花予測 降積雪

1. 研究開始当初の背景

リンゴなどの落葉果樹では、花芽形成と開花がその年の作柄に対して大きく影響する。青森県などの積雪寒冷地帯では、12月から3月後半まで園地が雪で閉ざされ、融雪を迎える3月末頃から本格的な作業が可能になる。融雪を迎える3月末から開花期の5月上旬までの期間は、霜害や病害虫が多発する。そのため、対策として薬剤散布が欠かせず、融雪後の早い段階で「開花日」を予測し、それをふまえた作業計画の立案が求められる。すでに、積算温量モデル(野呂ら 1986, 野呂 2000)を用いた「開花予測情報」が青森県産業術センターりんご研究所より生育情報として公開されているものの、生産現場レベルでは経験にもとづいた感性的な予測が中心となっている。

後継者不足が深刻となっている昨今、ベテラン農家の感性的な技術をデータから見える化し、技術継承に活かす意義は大きい。本研究では、園地の情報と農家の経験を組み合わせた現場レベルで実用性の高いリンゴの開花予測の可能性について検討した。

2. 研究の目的

センサーネットワークを利用した園地の気象・土壌環境の観測を実施しモニタリングデータを得た。その結果を生産現場の経験値と組み合わせ、現場での実用性を考慮したリンゴ開花予測モデルの構築を目標とした。

具体的な目的として以下を考えた。

①リンゴ園地の気象・土壌条件の把握

一般的な天気予報等の気象情報や試験場等の実験園の情報だけでなく、一般農家の園地で継続的にデータ収集し、地域的な特性の把握を目指した。

②リンゴ開花予測モデルの検証

最も一般的に利用されている積算温量モデルについて、一般園での適合性を検証する。

③地温を利用した予測モデルの構築

融雪期から開花期の気温は 10°C以上の幅で変動するため長期予報が難しい。そのため、気温にもとづいたモデルは過去の統計に依存し農家のニーズである融雪後の早い時期で予測することが難しい。そこで、この時期に比較的単調に線形的な変化を示す深部地温(地表から 64cm)を使った「地温モデル」を検討する。

④汎用性の高い開花予測モデルの構築

各農家が現場で利用しやすいモデルを検討する。基準深さの地温を簡易的に計測することで園地ごとと樹体ごとに開花時期が予測できれば農家にとって大きなメリットとなる。蕾の状態の目視から経験的に判定するベテラン農家の予測法との対比を行うことで、予測精度の向上を図り、生産現場で実用性の高い予測モデルの実現を目指す。

以上の目的で当初開始したが、研究過程で降積雪による園地の地温形成への影響が大きかった。そこで以下を追加した。
⑤降雪形態と積雪状況が春先の地温にもたらす影響の把握

初雪が遅くそのまま根雪となった 2014-2015 の冬期は過去 2 年間とは地温分布が異なる特徴となった。この状況が融雪や開花時期に及ぼす影響について検討する。

3. 研究の方法

青森県津軽地方のリンゴ園地のうち北津軽郡鶴田町の園地(Y園)を調査対象とし、平川市碓ヶ関(O園)、弘前市三和(K園)を開花時期の対照として利用した。中心となるY園の土壌は地表から約 80cm までが単層の黒ボク(黒褐色)であった。対象とするリンゴは青森県の主力品種である「ふじ」とした。

園地のリンゴ樹のうち IPM に使用する代表木の根元から約 1m の場所に土壌センサー(Decagon 5TE)を設置した。設置深さは、根の生育深度などを考慮し、地表より 4, 8, 16, 32, 64cm とした。また、園地の中心部に気象計(Davis VantagePro2)を設置した。ロガーに得られた日々の園地の画像データ、気象データおよび土壌データ(地温、土壌水分、Bulk EC)は、フィールドモニタリングシステム(FMS)(溝口 2012)を利用し、準リアルタイムでモニタリングした。同時に、定期的に園地に訪問し、園主に生育状況や作業の進捗状況を聞き取りした。

4. 研究成果

(1) 土壌の物理性とセンサーのキャリブレーション

Y園の土壌をサンプリングし、基礎的な物理性を確認した。結果を Table 1 に示した。また、加圧板法により水分特性曲線を得た。地表から 30cm 深の結果を Fig. 1 に示した。

Table 1 土壌の物理性

Depth (cm)	Soil Classification	Particle Density (g cm ⁻³)	Bulk Density (g cm ⁻³)	Water Content (m ³ m ⁻³)	Saturated Hydraulic Conductivity(cm s ⁻¹)	pH _{1:2.5}	EC _{1:5} (dS m ⁻¹)
0-20	SL	2.27	0.59	0.50	3.27×10 ⁻³	5.87	0.21
20-40	SL	2.14	0.52	0.68	1.05×10 ⁻⁴	5.55	0.13
40-60	SL	2.23	0.49	0.76	1.58×10 ⁻⁴	5.15	0.10

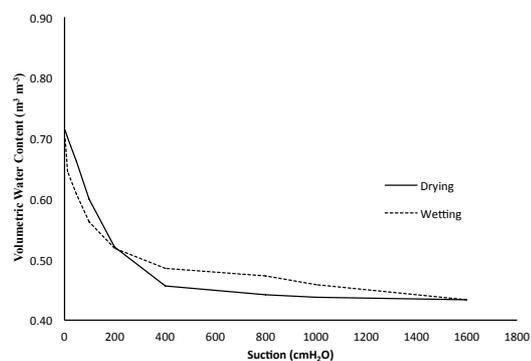


Fig. 1 水分特性曲線(30cm 深)

使用した土壌センサー(Decagon 5TE)について、Y 園の土壌をもとにキャリブレーションを実施した (Fig. 2)。一般的な Topp 式とは大きく異なっているが Mitsubishi 式(三石ら 2014)と近似していた。高水分域のキャリブレーションについてさらなる確認が必要であるが、本研究では、近似した傾向が得られた以下の Mitsubishi 式にもとづき比誘電率 (ϵ) と体積含水率 (θ) の関係を得た。

$$\theta = 5 \times 10^{-6} \epsilon^3 - 0.8 \times 10^{-3} \epsilon^2 + 0.0423 \times \epsilon - 0.0102$$

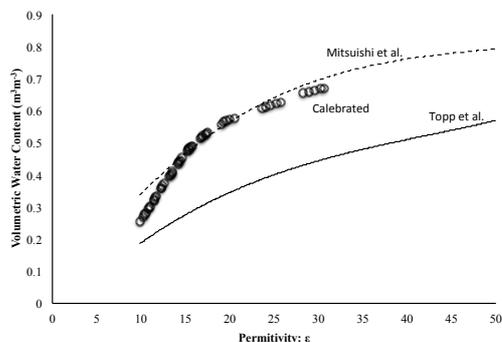


Fig. 2 センサーの校正曲線

(2) リンゴ園地の気温・地温・土壌水分量
調査した 3 年間の園地の気温 (Fig. 3) と地温 (Fig. 4)、体積含水率 (Fig. 5) を示した。

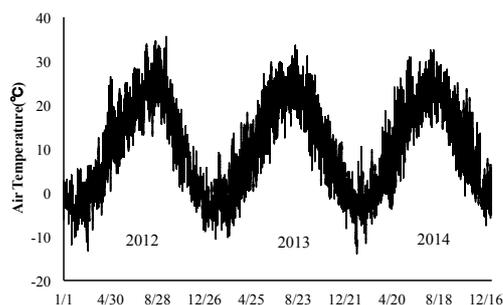


Fig. 3 園地の気温

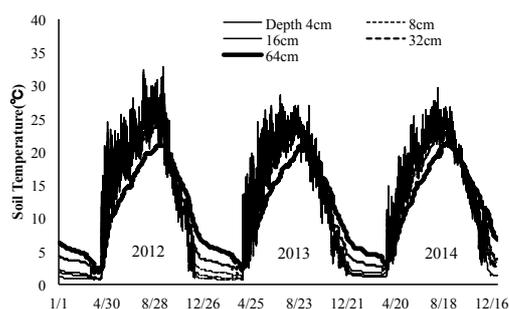


Fig. 4 園地の地温

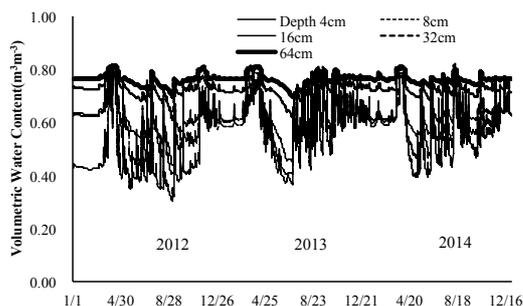


Fig. 5 園地の土壌水分量

気温は、 $-13.3^{\circ}\text{C} \sim 35.6^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化し、年較差が約 50°C あることが分かった。

地温は、気温が -10°C を下回る厳冬期でも 0°C を下回ることにはなかった。4 月上旬から 10 月中旬にかけては地表付近が深部よりも高く、10 月下旬から 3 月にかけてはその逆であった。12 月から 3 月にかけては積雪の保温効果により変動幅がきわめて小さくなることが確認された。地表付近では外気の影響により日周期変動が見られたが 32cm 以深ではほとんど見られなかった。特に 64cm では、年較差が約 20°C と小さいほか、3 月末の融雪期から開花期の 5 月中旬までが線形的な上昇傾向を示した。一般的農園地の地温は正弦関数で近似されることが多いものの、調査園地では積雪により地表の境界条件が変化するため、明らかに異なる特徴となった。

土壌水分量は体積含水率が $\theta = 0.3 \sim 0.8 (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$ の範囲で変化し、深部ほど水分量が多かった。地表付近ほど変化が大きく深部では小さかった。3~4 月上旬の融雪期と 7~8 月の夏場、10 月の秋雨期に水分量が増加した。一般的にいわれる梅雨期の 6 月は、この地域では雨が少ないことも有り、土壌が乾燥傾向にあった。

(3) 開花日と気温 (積算温量モデルの検証)

リンゴ (ふじ) の開花予測モデルのうち、もっとも一般的なのが積算温量モデル (野呂ら 1986, 野呂 2000) である。発芽日以降の有効温度 (ふじの場合、気温 $t - 3.75^{\circ}\text{C}$) を積算し、到達温度 T がある量 (ふじでは積算値 T が 197.1°C) に達した時点を開花日とするものである。青森県産業術センターりんご研究所では、生育情報としてこのモデルを利用し、到達温度の到達率と開花日予測情報を発表している。

Y 園で本モデルを検証したところ、Table 2 のように開花日は、2012、2013 年が 1 日の差が生じたものの、2014 年は一致した。実験園に限らず一般の園地でも高い精度を有することを確認できた。なお、開花日については協力農家の作業日誌にもとづいた。

Table 2 発芽・開花と開花予測日の比較

	2012	2013	2014
Germination	4/17	4/14	4/5
Blooming	5/10	5/20	5/11
Predicted Date	5/11	5/21	5/11
Range(day)	1	1	0

(4) 開花日と地温 (地温モデル)

積算温量モデルの信頼性の検証はできたものの、あくまでも開花後の検証結果である。気温は長期予報が難しいため、予測段階では平年値など過去の統計値に依存せざるを得ない。農家は融雪後のできるだけ早い段階で開花時期を予測し、剪定作業や薬剤散布作業などの計画を立案し作業を進めることを望んでいる。そのため、現場で簡便な方法から

得られる情報から簡易に予測できる開花予測方法へのニーズは大きい。

そこで本研究では地温に着目した。鎌田が示唆しているように地温と開花日の間には統計的な関連がある(鎌田 1992)。本研究で着目したのが 64cm 深の地温である。Fig. 6 は、本研究期間の開花期における Y 園の 64cm 深の地温である。図のように融雪期から開花期にかけて、この深さの地温はほぼ線形的な上昇傾向を示す。そのため、変化傾向の予測がしやすく、現場での指標として利便性が大きい。リンゴ開花時の地温を Table 3 に示した。対象の Y 園および参考として K 園、O 園における開花日とその日の 64cm 深における日平均地温を示した。開花日の地温は 9.7~10.5℃であった。

したがって、概ね 10℃を目標到達温度とし、Fig. 6 のような地温の上昇傾向をもとに到達日数を計算すれば、園地ごとや園地内の樹体ごとに開花時期の推定ができるといえる。Table 3 の実際の開花日と Fig. 6 の 10℃到達日と比較すると、この法則性がほぼ成り立っている。特に、2012 年は雪融けが遅かった一方で、発芽日から開花日までの日数が 24 日と通常約 2/3 の短い期間であった。気温の統計値からでは、この年の早い開花時期の予測は難しいものの、地温モデルから予測すれば、本格的な融雪開始時期にあたる 4/20 頃 (Fig. 6 の太線の変曲点) には、5/10 頃の開花予測が可能となる。

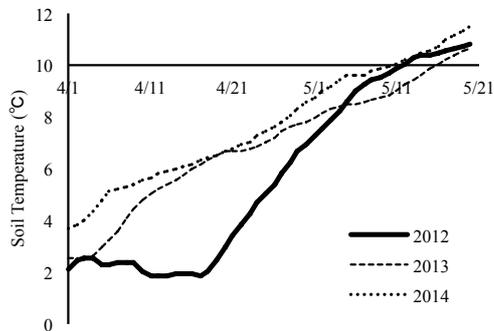


Fig. 6 Y 園での開花期の 64cm 深地温

Table 3 開花日における 64cm 深地温

	2012	2013	2014
Y-farm	9.7 (5/10)	10.4 (5/20)	9.9 (5/11)
K-farm	10.5 (5/11)	9.8 (5/21)	10.0 (5/8)
O-farm	-	9.7 (5/23)	10.2 (5/13)

(): Measured Date

この手法の利点は、土壌センサーなど高額で高機能な機器に必ずしも依存しない点にある。5TEに加え、堆肥の発酵温度の簡易計測に用いる棒状温度計(シンワ V-3 丸 T 型)を 64cm 深まで差し込み園地内の各所で計算した結果は Fig. 6 とほぼ同じ結果となった。

この結果は、必ずしも園地内に複数のセン

サーを埋設し継続的なモニタリングを行わなくとも、地温モデルを利用した簡単な計測から園地のリンゴ樹の開花予測が可能なることを意味する。

地温モデルによるリンゴ開花日の簡易予測手法についてまとめると次のようになる。

- ① 園地の融雪開始時期(地表付近の地温が日周期変動を開始する日が目安)から 64cm 深の地温に着目する。
- ② 64cm 深地温が上昇を開始したら上昇傾向を線形近似し温度の上昇傾向を予測する。
- ③ 近似直線が概ね 10℃に達する日数をもとめ、開花日までの予測所用日数とする。

もちろん、品種や地形的な影響が存在することは明らかであるが、生産現場における簡便な開花予測手法として、農家の経験値と組み合わせることで高い実用性が期待できる。

(5) 降雪形態と地温形成

融雪から開花時期の地温をもとに、リンゴの開花時期を予測する可能性について示唆することができた。しかし、その前段階にあたる積雪期の地温分布は、前年初冬の降雪形態や根雪にいたるまでの雪の降り方で違ってくる。

Table 4 に本研究中の園地での初雪日と根雪日を示した。例年、弘前周辺では 11 月中旬頃に初雪がある。その後の気温変化により、何度か降雪と消雪を繰り返し、12 月中旬ごろから根雪となる。しかし、2014-2015 の冬は初雪がそのまま根雪となった。11 月が温暖だったのに加え、初雪前日の 12/1 は気温が 13℃にも達した。一転して、初雪のあった 12/2 には 0.1℃に降下した。その後、Fig. 7 のように積雪量が増加した。2013/2/25 の 153cm がこの地域の最大積雪深であるが、2014-2015 の冬はそれを上回るペースで積雪が増加し、2015/2/15 には 140cm に達した。

Table 4 初雪日と根雪日

	2012-13	2013-14	2014-15
first snowfall	11/21	11/11	12/2
continuous snow cover	12/7	12/12	12/2

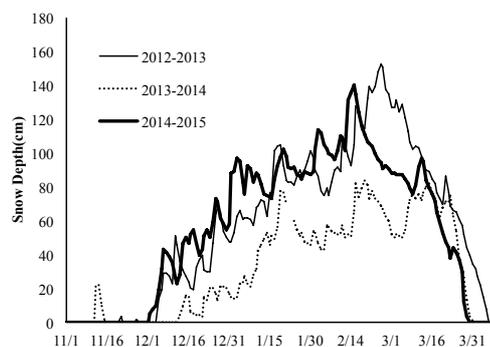


Fig. 7 積雪深の変化

温暖傾向だった2014年11月の後、12月以降急速に大量の積雪を生じたことで園地の地温分布は例年とことなる傾向を示した。

Fig. 8は、調査園地における1~3月の月平均地温の分布である。2013年と2014年の分布傾向は1~3月とも類似している。Fig. 6の積雪深を見ると、最大積雪深は2013年が153cm、2014年は84cmであった。したがって、積雪がある深さ以上になると、保温効果の差はそれほどなくなり、積雪深が地温分布に及ぼす影響は少なくなるといえる。

一方、2015年は、Fig. 8のようにほかの2年とは大きく異なることが分かる。8、16cm深の地温が1月の段階で、1~1.3℃高くなっている。この傾向は2月に入っても維持された。これは前述したように、短期間に大量の積雪を生じたことで、初冬の段階で冷たい外気や融雪水にさらされることなく、土壌が保温された結果と考えられる。32cm深より深い部分では3年間の傾向が一致しており、その影響が及んでいない。また、直接、積雪に接する地表付近(4cm深)にもその差は見られなかった。

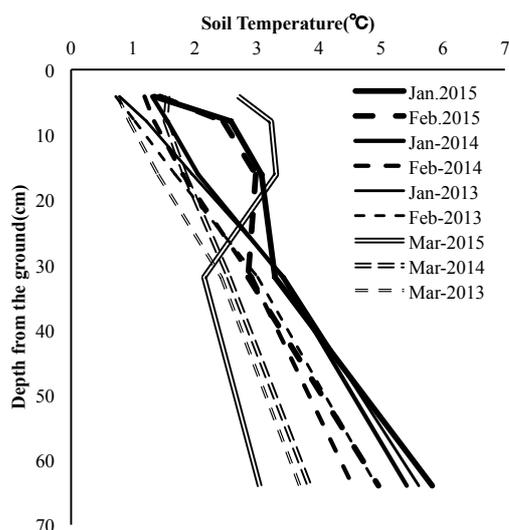


Fig. 8 1~3月の地温の鉛直分布

3月の地温は、さらに特徴的な傾向にあった。地表付近では、他の2年と比較し、最大で2.5℃高め的一方、32cm深より深部では逆に0.8~1.0℃低めの傾向にあった。これは、融雪水の浸透により相対的に高めにあった深部の地温が冷却された結果と考えられる。通常であれば融雪が本格化する3月末から4月初旬に見られる現象である。前年の降雪形態(温暖な状態に短期間で大量の降積雪を生じた)により、地表付近の地温が高いまま保温されたことで融雪が早期に開始した結果といえる。それにより、3/20時点で54cmだった積雪が、10日後の3/30にはゼロとなった。積雪量が多かったものの、地表付近の地温が高めに維持された結果、融雪が短期間で急速に進んだものと思われる。

4月以降の気温が高めに推移したこともあるが、このような地温分布の影響により、リンゴの生育も早まった。Y園では2015年は、発芽日が3/30で、5/1に開花した。平年値や過去3年と比較し10日以上早めの開花であった。本研究では、融雪期から開花期の地温がリンゴの開花日と関連しており、これをもとに開花予測できる可能性を示唆した。これに加え、融雪期の地温形成は、実際には前年の雪が積もる段階の状況が影響している可能性が大きい。今後、その関連を調査し、統計的な裏付けが得られれば、降積雪との関連から積雪下の地温分布を予測し、翌年の生育予測につなげられる可能性がある。

6) 今後の課題

Fig. 6のように、融雪期から開花期の64cm深の地温はある段階から線形的に上昇する。しかし、必ずしも直線そのものではない。これは、土壌水分が多い融雪直後と地表の雪が融けたあとでは熱伝導率が異なるためと思われる。Fig. 9に地表の雪が消えた後の2012年と2014年の開花期の土壌水分量(体積含水率)と地温上昇の関係を示した。土壌水分量の変化と地温上昇の変曲点に関連性が推察される。

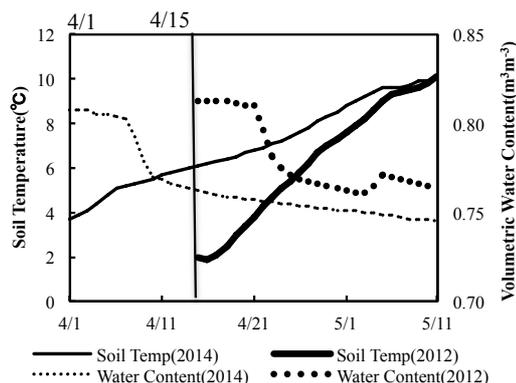


Fig. 9 融雪時の土壌水分と地温

今後、この部分の解明ができれば融雪時の土壌環境シミュレーションにつなげることができる。開花予測に限らず、園地の融雪メカニズム解明につながる可能性があり、その意義は大きい。そのため、現場レベルでの基礎データを積み重ねることが欠かせず、引き続き調査に取り組んで行く予定である。

<引用文献> (計 5件)

- ① 鎌田晶吉：リンゴの開花日に及ぼす気象要因の影響，園芸学雑誌，61(1)，17-24，1992
- ② 三石正一，溝口勝：静電容量型ECH₂O土壌水分センサーのキャリブレーション，土壌の物理性，126，63-70，2014
- ③ 溝口勝：フォールドモニタリングシステム，水土の知，80(9)，762，2012
- ④ 野呂昭司，尾原信実，工藤仁朗，斉藤貞昭，一戸治孝：発芽後の有効積算温度によるリンゴの開花日の予測，園芸学雑誌，90 54(4)，

405-415, 1986

⑤野呂昭司：開花結実期と環境条件，果樹園芸大百科 2 リンゴ，農文協，147-152, 2000

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 1 件)

①加藤幸，岸知彦，佐藤江里子，溝口勝：農家参加型モニタリングによるリンゴ栽培技術の継承，水土の知（農業農村工学会誌），80-9, 7-10, 2012

[学会発表] (計 14 件)

①加藤幸：降雪形態がリンゴ園地の地温分布に及ぼす影響，平成 27 年度農業農村工学会大会要旨 CD (予定)，2015

②加藤幸，緒方英彦，溝口勝：Winter Index (冬の厳しさ指数) を利用したリンゴ園の雪害と除排雪の評価，平成 26 年度農業農村工学会大会要旨 CD, 2014

③加藤幸，溝口勝：生産現場における伝統的天候予測方法の現状と課題，農業農村工学会東北支部大会第 57 回研究発表会講演要旨集，8-9, 2014

④佐藤瑞紀，加藤幸：弘前市における除排雪の実状と冬の厳しさ指数を利用したコスト予測，農業農村工学会東北支部大会第 57 回研究発表会講演要旨集，10-11, 2014

⑤加藤幸，伊東竜太，溝口勝：園地モニタリングによる転作ブドウ園の灌漑排水対策の検討，2014 年度土壤物理学学会大会講演要旨集，37-38, 2014

⑥加藤幸，伊藤哲，三石正一，溝口勝：地温を利用したリンゴ開花予測モデルの優位性とその実用，平成 25 年度農業農村工学会大会要旨 CD, 2013

⑦加藤幸，伊東竜太，溝口勝：転作樹園地における掛け流し灌漑による土壤環境の変化，2013 年度土壤物理学学会大会要旨集，71-72, 2013

⑧森内加葵，加藤幸，溝口勝：ICT を利用した CSA 活動支援モデルの構築，農業農村工学会東北支部大会第 56 回研究発表会講演要旨集，200-201, 2013

⑨加藤幸，伊藤哲，三石正一，溝口勝：生産現場におけるモニタリング技術の実践的利活用，農業情報学会 2013 年度年次大会講演要旨集，41-42, 2013

⑩加藤幸，伊藤哲，三石正一，溝口勝：園地情報をもとにした冬の厳しさの評価と農園管理の関連性，農業情報学会 2013 年度年次大会講演要旨集，102-103, 2013

⑪加藤幸，伊藤哲，三石正一，溝口勝：地温データを利用したリンゴ開花日予測と生産現場での利用，平成 24 年度農業農村工学会大会要旨 CD, 2012

⑫加藤幸，伊藤哲，三石正一，溝口勝：積

雪地帯におけるリンゴ園地の施肥方法とその検証，2012 年度土壤物理学学会大会講演要旨集，16-17, 2012

⑬加藤幸，伊藤哲，三石正一，溝口勝：リンゴ園地の気候変動と農家による適応策の可能性，農業情報学会 2012 年度年次大会講演要旨集，31-32, 2012

⑭加藤幸，伊藤哲，三石正一，溝口勝：積雪下のリンゴ園地の気象と土壤環境の変化，農業情報学会 2012 年度年次大会講演要旨集，103-104, 2012

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

加藤幸：農園地情報を利用したリンゴ栽培と技術継承の可能性，平成 24 年度弘前大学農学生命科学部附属生物共生教育研究センター公開講座要旨集，2012

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 幸 (かとう こう)

研究者番号：40302020

(2) 研究分担者

溝口 勝 (みぞぐち まさる)

研究者番号：00181917