

平成 22 年 6 月 3 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19580291

研究課題名(和文) リンゴ園における蒸発散量・土壌水分量の統合的推定手法の開発

研究課題名(英文) Development of the estimation method for evapotranspiration combined with soil water content in an apple orchard

研究代表者

伊藤 大雄 (ITO DAIYU)

弘前大学・農学生命科学部・准教授

研究者番号：00333716

研究成果の概要(和文): リンゴ園で微気象観測ならびに乱流計測を長期間実施し、複数の解析手法により蒸発散量を明らかにした。また、群落内貯熱量や融雪潜熱量の推定手法を考案するとともに、渦相関法における熱収支インバランス問題を追究し、得られた成果を蒸発散量の計算プロセスに反映させた。その結果、土壌水分推定法の開発には至らなかったが、月別の作物係数をもとにした蒸発散量の高精度推定を可能にした。更に衛星画像を利用した日射量推定法や、これを利用した蒸発散量推定法を考案し、蒸発散速度の広域的推定に展望を開いた。

研究成果の概要(英文): Long-term micrometeorological and turbulent flux observations were made in an apple orchard, and daily evapotranspiration was determined using three different methods. The estimation methods for canopy heat storage and snowmelt latent heat were also proposed and introduced in the calculation process of the evapotranspiration. As a result, precise estimation of evapotranspiration based on the monthly crop coefficient has become possible, although the estimation of soil water content remained unsolved. Furthermore, estimation methods for solar radiation and evapotranspiration using satellite data were proposed, which will lead to the wide area estimation of evapotranspiration rate.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：農業生産環境・蒸発散・土壌水分・微気象観測・水蒸気フラックス・渦相関法

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 露地で栽培されるリンゴ樹にとって、土壌水分は人為的に改変・制御できる数少な

い環境要素である。リンゴ園の蒸発散量や土壌水分状態を常時把握する手法を確立することは、リンゴ栽培技術の改善に直結する。

(2) 研究代表者(伊藤)と連携研究者(石田)は、リンゴ園にタワーを建て、必要な機材を揃えて、2005年より、限定的であるが蒸発散速度の計測を開始した。

(3) 蒸発散速度の観測手法は、機材の進歩とともに変遷し、現在では渦相関法が主流になっているが、渦相関法で測定された蒸発散量は過小評価されている可能性が高い。この問題は「熱収支インバランス問題」と呼ばれ、その実態解明と原因究明が緊急の課題となっている。

(4) 連携研究者(松島)は、人工衛星の様々な画像データから日射量、地表面温度、葉面積指数を推定し、これらを熱収支モデルに適用したところ、モンゴルの草原及び森林の潜熱フラックス(蒸発散速度)を高い精度で推定できた。この推定手法が青森県の果樹園に適用できれば、蒸発散速度の全県的な推定に道が開ける。

## 2. 研究の目的

(1) リンゴ園内に設けた微気象観測サイトにおいて、複数の手法(ボーエン比法、傾度法、渦相関法)によって蒸発散量を長期間連続計測し、その実態を正確に明らかにする。

(2) 上記観測サイトの熱収支を、群落内貯熱量や化学固定量、融雪潜熱量などの微小な項目まで計測して正確に評価することにより、ボーエン比法における蒸発散量計算精度を向上させるとともに、渦相関法における熱収支インバランスの実態を正確に見積もる。

(3) 熱収支インバランス問題の一因として不適切な測定高度が指摘されている。そこで、乱流計測機器を、境界層内の高度9m(通常観測に使用)に加えて粗度層内の高度7mにも設置することにより、乱流の鉛直構造を解析し、上記の疑問を直接検証する。

(4) 観測されたリンゴ園の蒸発散量を基準蒸発散量と比較して、作物係数(実蒸発散量/基準蒸発散量)を求め、その季節変動や、葉面積・土壌水分の影響を明らかにする。

(5) リンゴ園の蒸発散量を気象学的手法で推定するには、その場所の日射量が最も重要な気象要素となるが、気象庁による日射量観測は、青森県内では1カ所しか行われていない。そこで、人工衛星の画像データをもとに、青森県内の日射量分布の推定を試みる。

(6) 青森県内の日射量分布、気温・風速分布、地表面温度の分布をもとに、独自に開発した熱収支モデルを用いて、青森県内におけるリンゴ園の蒸発散量分布を試算する。

## 3. 研究の方法

(1) 【複数の手法による蒸発散速度観測】  
青森県藤崎町のリンゴ園内に建設した微

気象観測タワー(高さ9m)の最上部において日射量ならびに純放射量を、地下5cmにおいて地中熱流量を、地下1cmならびに3cmにおいて地温を計測した。また、高さ4.5m、5.5m、7.0mならびに9.0mにおいて、気温、湿度ならびに風速を計測した。これらの計測結果をもとに、ボーエン比法ならびに傾度法によって、蒸発散速度を約30分毎に算出した。なお、本研究開始前に得られた観測結果も、一部、蒸発散量の計算対象とした。

タワー最上部に超音波風速温度計と水蒸気変動計を設置し、0.1秒間隔で風速の3次元成分と水蒸気濃度を計測した。これらの乱流計測の結果をもとに、渦相関法によって、潜熱フラックス(蒸発散速度)を30分毎に算出した。

(2) 【群落内貯熱と融雪潜熱の評価】

生育期(2007年9月)と萌芽期(2008年4月)の2回にわたり、それぞれ約1ヶ月間、通常の観測に加えて群落内の高さ0.5m、1.5m、2.5mならびに3.5mでも気温と湿度を測定した。また、リンゴ樹の主幹8カ所に穴をあけて温度計を挿入し、樹幹温度を計測した。これらの計測結果をもとに、群落内の樹幹貯熱、葉貯熱、顕熱貯熱ならびに潜熱貯熱を計算した。

微気象観測サイトの近傍で実施されている積雪荷重の観測結果(1~3月)を3カ年分解した。無降水日の荷重減少量を融雪量とみなして、融雪のために使用される熱量(融雪潜熱)を計算した。

(3) 【熱収支インバランス問題の追究】

高さ9mの境界層内で乱流計測を行って得た顕熱フラックス $H$ と潜熱フラックス $LE$ 、微気象観測で得た純放射量 $Rn$ と地中熱流量 $G$ 、微気象観測をもとに推定した群落内貯熱量 $St$ から、熱収支充足率 $(H+LE)/(Rn-G-St)$ を計算し、これがどのような要因で変動するのか検討した。

高さ9mの境界層内に加え、高さ7mの粗度層内でも超音波風速温度計と水蒸気変動計を設置して乱流計測を行い、両高度の顕熱フラックスと潜熱フラックス(蒸発散速度)を比較した。

(4) 【作物係数の検討】

作物係数は、ボーエン比法、傾度法あるいは渦相関法によって計算された蒸発散量を、基準蒸発散量で除して1日毎に求めた。基準蒸発散量は、本研究の微気象観測サイトで得られた日射量、気温、湿度ならびに風速を用い、FA0のマニュアルに従って1日毎に算出した。

(5) 【日射量分布の推定】

我が国全域を30分毎に分解能1kmで撮影している気象観測衛星ひまわり6号の赤外線画像と可視画像(2008年4月~8月)を利用して、以下の手順で東北地域に対する日射強度の推定を試みた。また、推定結果が、気象

庁や本研究による地上観測の実測値とどの程度一致するか検討した。

赤外線画像から輝度温度を読み取り、これをもとにして、可降水量、水蒸気の日射吸収率、雲がない場合の日射強度の順に計算を進めた。計算に際し、大気混濁係数は定数と見なした。また、既往の文献を参考に、エアロゾルやオゾンによる吸収、レイリー散乱による減衰なども考慮した。

可視画像から反射率(アルベド)を読み取り、18%以下の場合には快晴とみなして求めた日射強度をそのまま採用した。

アルベドが18%を超える場合は、求めた日射強度に、雲の影響に関する係数を乗じて日射強度を決定した。この係数は、アルベドと輝度温度に応じて変わるが、地点や季節には依存しないものとし、地上観測の実測値に最もよく適合するよう経験的に決定した。

(6) 【蒸発散量分布の推定】

蒸発散量分布の推定は、松島が開発した独自の熱収支モデルを使用し、2008年5~10月の晴天日延べ35日について、青森県の果樹園地帯を対象に、1km四方毎に以下の手順で行った。また、得られた推定結果が本研究の微気象観測サイトでの実測値とどの程度一致するか検討した。

入力データの準備・・・日射量の5kmメッシュデータは、研究成果(5)に基づき、ひまわり6号の画像データを解析して得た。また気温ならびに風速の1kmメッシュデータは、アメダスの観測結果を補間(ダウンスケーリング)して得た。湿度は気象庁による最寄りの地上観測結果を参考に決定した。葉面積指数は文献調査により決定した。

上記のデータをモデルに入力し、地表面温度を1km四方毎に計算した。

一方、NASAの観測衛星MODISの赤外線画像を解析して地表面温度推定値の1kmメッシュデータを取得した。その際、本研究の微気象観測サイトにおける地表面温度の実測値を参考にしながら、慎重に大気補正を行った。

モデル内のパラメーター(蒸発効率やパルク輸送係数)を3km四方毎に調節しての計算を繰り返し、すべての地点で地表面温度の計算結果が衛星画像からの推定値によく一致するようにした。

3km四方毎に最適化されたパラメータを用い、改めて熱収支モデルを利用して蒸発散量を1km四方毎に計算した。

4. 研究成果

(1) 【複数の手法による蒸発散速度観測】

ボーエン比法により2005~2009年、傾度法により2005~2007年、渦相関法により2008~2009年の蒸発散量の計算を終了した。2008年以降のボーエン比法による計算には、

研究成果(2)を踏まえ、群落内貯熱を考慮した。また、渦相関法による計算では、研究成果(3)を踏まえ、摩擦速度に基いた熱収支充足率で補正した。成果の一例として、2008年の計算結果を図1-1に示す。本研究により、わが国ではほとんど報告事例のないリンゴ園の蒸発散量の実態が、5年間にわたり、複数の観測手法で明らかにされた。

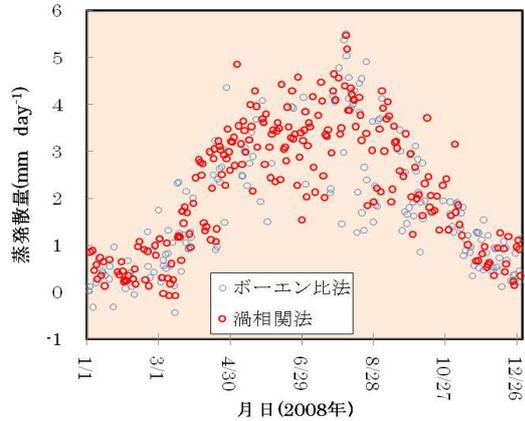


図1-1 蒸発散量の周年変化

2008年と2009年については、欠測日の蒸発散量を(基準蒸発散量)×(月別作物係数)により補完し、年間蒸発散量を計算した。作物係数は研究成果(4)に基づいた。年間蒸発散量はいずれの年次・手法でも703~749mmと良く一致し、観測や計算プロセスの信頼性が裏付けられた。但し、昼間の蒸発散量はボーエン比法で、夜間の蒸発散量は渦相関法で過大評価となるなど、昼夜別に見ると問題が残されていた(表1-1)。

表1-1 昼夜別・年次別年間蒸発散量 (単位: mm)

	昼間		夜間		合計	
	ボーエン比法	渦相関法	ボーエン比法	渦相関法	ボーエン比法	渦相関法
2008年	687	624	42	79	729	703
2009年	698	628	51	97	749	725

(2) 【群落内貯熱と融雪潜熱の評価】

群落内貯熱に最も大きく寄与するのは樹幹貯熱で、これに顕熱貯熱、潜熱貯熱が続いた。葉貯熱は生育期であっても無視できるレベルであった。上記の4つの貯熱を合計した群落内総貯熱量は、7時30分~9時頃に最大、18時頃に最小となる日変化を示し、その変化幅は日射量の多い日ほど、また生育期より萌芽期で大きかった(図2-1)。群落内貯熱を考慮することにより、渦相関法における熱収支のインバランスは日中で3%、夜間で16%改善すると見込まれた。群落内貯熱量の日変化は、群落上で観測された単位時間あ

たり気温変化量の日変化と極めて類似していた(図2-2)。したがって群落内貯熱量は、群落上の気温をもとに精度良く推定することが可能であった。

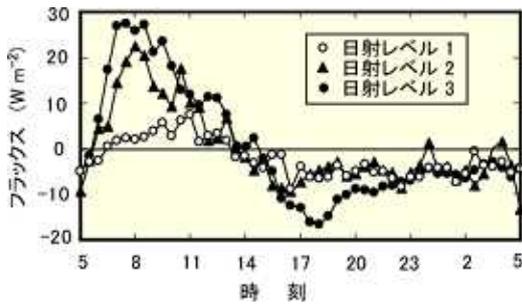


図 2-1 群落内総貯熱フラックスの日変化(生育期)

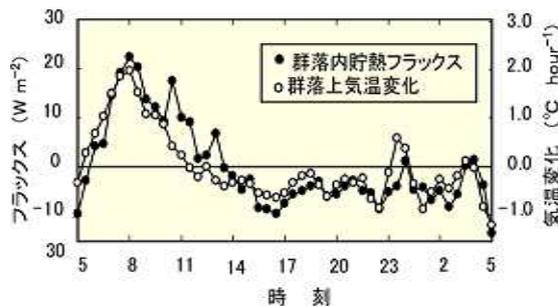


図 2-2 群落内総貯熱フラックスと群落上気温変化の関係

積雪荷重の減少量から融雪潜熱を見積もったところ、融雪潜熱は3月には  $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  を超える場合があるなど、融雪期のリンゴ園の熱収支に大きな影響を与えており、ボーエン比法による蒸発散量の計算や、渦相関法の熱収支充足率の計算に際して考慮することが不可欠であると判明した。融雪量は気温と日射量の両方に依存していた。様々な推定方法を試行した結果、0 を超える気温に対して1 当たり  $10 \text{ W m}^{-2}$ 、また  $164 \text{ W m}^{-2}$  を超える日射に対して  $1 \text{ W m}^{-2}$  当たり  $0.18 \text{ W m}^{-2}$  を融雪潜熱に割り当てる推定法が、1 日の融雪潜熱を最も良く推定した(図2-3)。

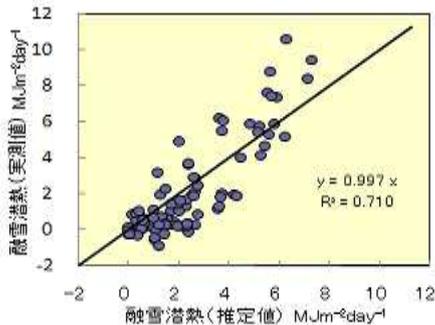


図 2-3 融雪潜熱量の推定値と実測値の関係

### (3) 【熱収支インバランス問題の追究】

渦相関法における昼間の熱収支充足率(群落内貯熱まで考慮)は、2008 年 5 ~ 10 月の場合、ほぼ 70 ~ 130% で推移し、測定値は熱収支を概ね充足していると考えられた(図3-1)。しかし年次によっては平均充足率が 100% に満たず、潜熱フラックス(蒸発散速度)の過小評価が懸念された。また、熱収支充足率は摩擦速度に依存しており、摩擦速度が小さい弱風の日には充足率が低下する傾向があり、蒸発散量の過小評価が起こっていると推測された。

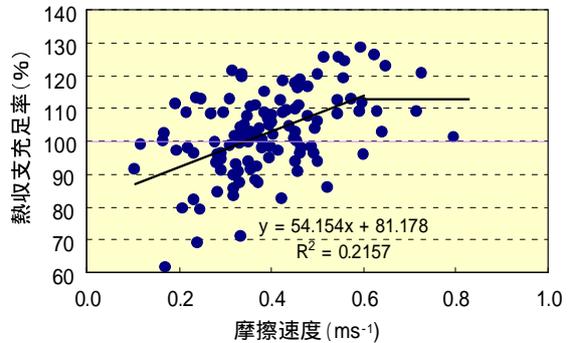


図 3-1 渦相関法における昼間の熱収支充足率(2008 年)

粗度層内の高度 7 m で観測された潜熱フラックス(蒸発散速度)は、高度 9 m の潜熱フラックスに比べて 37% も小さかった。高度 7 m の潜熱フラックスに Cava et al. (2008) の提案する補正を行ったところ、過小評価は若干改善したものの、補正後の値のばらつきが増大し、問題があった(図3-2)。また、高さ 7 m で観測された顕熱フラックスは、高さ 9 m と比較して 15 ~ 24% の過小評価にとどまり、顕熱と潜熱では過小評価の程度が異なっていた。以上より、やむを得ず粗度層内で観測を行う場合は、潜熱フラックス

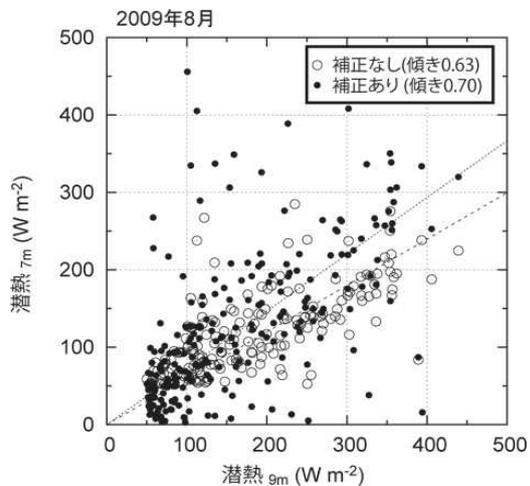


図 3-2 粗度層内(7 m)と境界層内(9 m)において渦相関法で観測された潜熱フラックスの比較

(蒸発散速度)の著しい過小評価をおこす可能性があり、しかも、熱収支充足率による簡単な補正や Cava et al.(2008)の補正では充分に対応できないことが示唆された。

#### (4) 【作物係数の検討】

算出された作物係数を、観測手法別に1ヶ月毎に平均し、図4-1に示した。生育期(4~11月)の作物係数は、年次間、観測手法間の違いが比較的小さく、明瞭な季節変化が認められた。すなわち作物係数は4月から10月頃まで経時的に増大し、10~11月は1.2程度で推移した後、12月になると減少した。本観測サイトのリンゴ樹は、4月に萌芽して7~8月に葉面積の増大を停止し、その後葉面積を維持して11~12月に落葉する。したがって、8月までの作物係数の経時的増大は葉面積指数の増大で説明できるが、8月以降の増大は、下草量の増大や果実肥大に伴う水需要の増大など、別の要因によると考えられた。なお、同一月内にみられる $\pm 0.2$ 程度の年次間差は、土壌水分量や水ストレスの年次間差を反映していると思われるが、本研究では土壌水分の測定が計画通りに実行できなかったため、今後の検討課題として残された。一方、休眠期(12~3月)の作物係数は、経時的に減少する傾向が示されたが、融雪潜熱などを考慮して計算したにもかかわらず、年次間、観測手法間で大きくばらついた。休眠期の蒸発散量は1日に1mm以下であることから、測定精度の問題が大きいと考えられた。

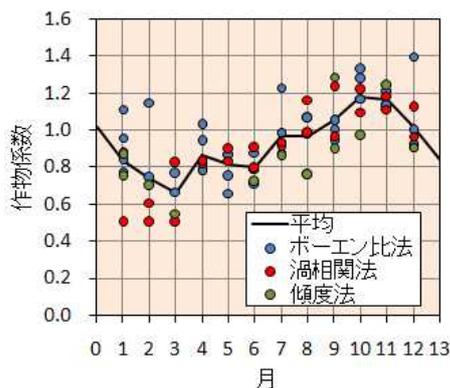


図4-1 リンゴ園の月別作物係数 (2005年~2009年)

#### (5) 【日射量分布の推定】

本研究の微気象観測サイトにおける日射強度の実測値と、衛星画像に基づく推定値の関係を図5-1に示した。推定値は実測値より7%程度小さかったが、両者の間に密接な比例関係が認められ、本推定法の有効性が示された。東北地域の他の7地点でも、実測値と推定値の間に密接な比例関係が認められた。全地点を通じた1日の積算日射量の推定誤

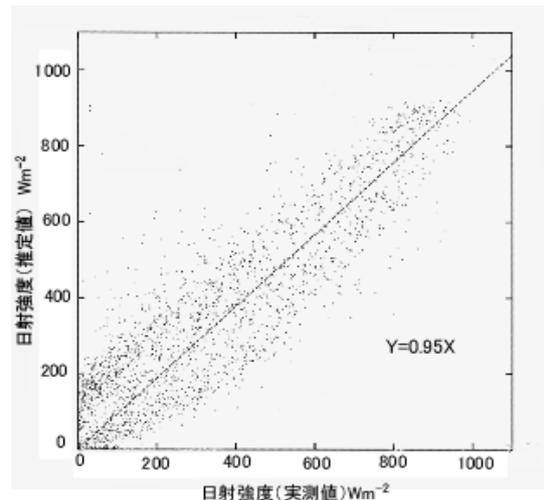


図5-1 日射強度推定値と実測値の関係

差(RMSE)は $2.8\text{MJm}^{-2}$ であった。図5-2には、衛星画像から推定した2008年6月の青森県の日射量分布を示した。同月、太平洋地域で相対的に日照時間が少なく観測されており、実態を反映した日射量分布図が得られたと考えられる。

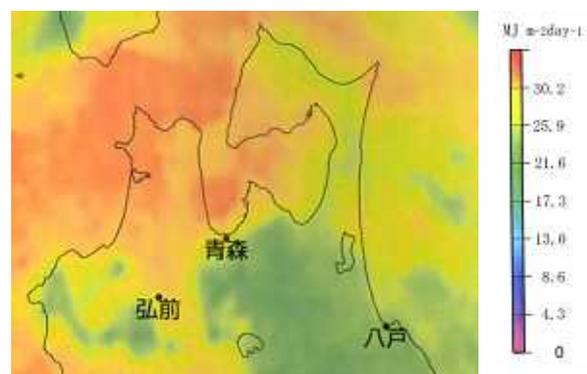


図5-2 衛星画像から推定した日射量分布 (2008年6月)

#### (6) 【蒸発散量分布の推定】

青森県の土地利用図から果樹園地帯を抽出し、2008年5~10月の晴天日35日について、該当地域の蒸発散量分布を、1km四方毎に図示することに成功した。一例として、5月の晴天日9日間における平均日蒸発散量の分布を図6-1に示す。このような果樹園の蒸発散量分布図は、我が国では過去に作成事例が見あらず、貴重な農業情報といえよう。次に、得られた計算結果の妥当性を検討するため、本研究の観測サイトがあるグリッドの日蒸発散量推定値と、観測サイトで過相関法ならびにボーエン比法により得た実蒸発散量を比較した(図6-2)。計算結果は35日間を通して過相関法実測値より33%、ボーエン比法実測値より24%高く、中には計算値が実

蒸発散量の2倍に達する日もあった。今後、日射量推定手法や地表面温度推定手法の更なる改良や、熱収支モデル自体の改良を通じて、一層の精度向上を図ることが望まれる。

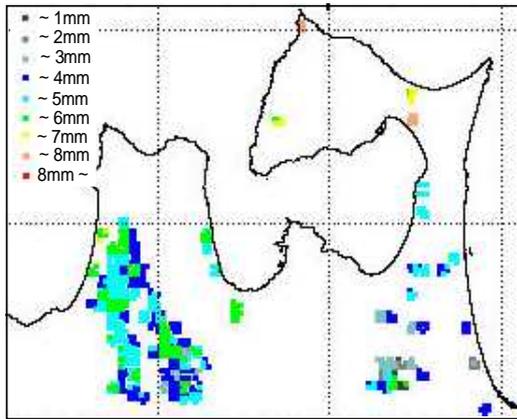


図 6-1 青森県果樹園地帯における蒸発散量の分布 (2008年5月、晴天日9日間の平均)

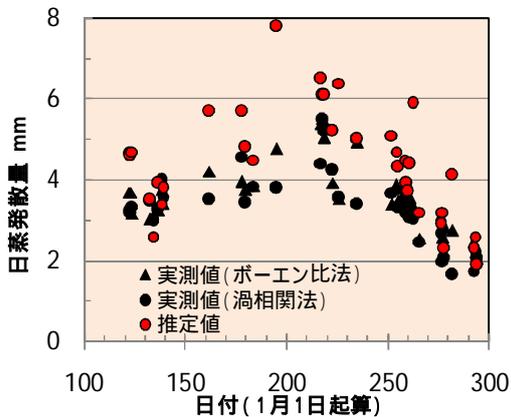


図 6-2 熱収支モデルによる蒸発散量の推定値と実測値の比較

### 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)

現在投稿中のもの1件あり

〔学会発表〕(計4件)

石田祐宣、伊藤大雄、松島大、植生上粗度層内で観測された顕熱フラックスの考察、日本気象学会 2009年度秋季大会、2009年。

伊藤大雄、石田祐宣、松島大、リンゴ園における群落内貯熱量並びに二酸化炭素貯留量、日本農業気象学会 2008年全国大会講演要旨集、2008年、42。

伊藤大雄、竹内貴広、石田祐宣、リンゴ園における傾度法とボーエン比法による蒸発散量の長期観測、農業環境工学関連学会 2007年合同大会講演要旨集、2007年、H42。

竹内貴広、石田祐宣、伊藤大雄、リンゴ園

における CO<sub>2</sub> フラックスの解析～渦相関法、傾度法、ボーエン比法の比較～、農業環境工学関連学会 2007年合同大会講演要旨集、2007年、H41。

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

伊藤 大雄 (ITO DAIYU)

弘前大学・農学生命科学部・准教授

研究者番号：00333716

#### (2) 研究分担者

該当なし

#### (3) 連携研究者

石田 祐宣 (ISHIDA SACHINOBU)

弘前大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：60292140

(H19：研究分担者)

松島 大 (MATSUSHIMA DAI)

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：50250668

(H19：研究分担者)