

平成 22 年度 卒業論文

エジプトナイルデルタにおける防風林の蒸散量の評価

筑波大学生命環境学群地球学類

地球環境学主専攻

200710811

清水達輝

2011 年 3 月

目次

目次	i
Abstract	ii
表目次	iv
写真目次	v
図目次	vi
本文	
1. はじめに	
1.1 エジプトの農業と水資源	1
1.2 防風林の研究	1
1.3 sapflow sensor の先行研究	2
2. 目的	3
3. 研究方法	
3.1 単木蒸散量の算出	3
3.2 観測方法	
3.2-1 樹液流速の観測	3
3.2-2 染色実験による辺材部の決定	4
3.2-3 気象観測	5
3.3 観測地点	6
3.4 Penman-Monteith 式による蒸散量の算出	6
3.5 防風林による蒸発抑制効果の推定	9
4. 結果	
4.1 辺材面積	10
4.2 樹液流速	10
4.3 単木蒸散量とそれに影響を与える因子	11
4.4 Penman-Monteith 式による蒸散量の推定	13
4.5 防風林による蒸発抑制効果の推定	14
5. 考察	
5.1 単木蒸散量と木の特性、気象データとの相関	15
5.2 Penman-Monteith 式から得た群落抵抗	16
5.3 実際の圃場における防風林の蒸発抑制効果の有無	16
6. 結論	16
謝辞	17
参考文献	17

エジプトナイルデルタにおける防風林の蒸散量の評価

清水達輝

要旨

エジプトナイルデルタにおいて防風林の樹液流速や辺材面積の現地観測を行うことで単木の実蒸散量の算出を行い、木の持つ主な特性や微気象データとの相関を調べた。これにより単木蒸散量は飽差や下向き短波放射と非常に高い相関があることが明らかとなったため、Penman-Monteith 式による蒸散量の算出を試みた。また植栽密度の異なる防風林ごとの防風特性を明らかにしている複数の先行研究を参考に、本研究で扱う防風林による風速抑制及び蒸発抑制量を概算しその効果を推定した。その結果、防風林自体の蒸散量が圃場の蒸発散のうちわずか 1.0%であったのに対し、蒸発抑制量は 22%～54%と多く、防風林による農地の蒸発抑制効果の存在を示唆した。また蒸発散抑制量と空隙率には二次式の関係があり、ピークは空隙率 40%程度であった。

キーワード：防風林, *Casuarina*, 樹液流測定, 蒸発抑制

Evaluation of windbreak trees' transpiration in Nile delta.

Tatsuki SHIMIZU

Abstract

Measurements of sapflow and sapwood area of windbreak trees (*Casuarina*) in Nile delta allowed determination of transpiration. Relation between tree transpiration and characteristics of sample trees such as DBH or height, and detailed meteorology was examined. It was found that a good correlation exists between transpiration and vapor pressure deficit and downward short-wave radiation. Thus Penman-Monteith equation was employed to estimate long-term transpiration. By applying results of previous studies on the performance of windbreak trees of various densities, an estimate was made on the effectiveness of windbreak tree for water saving in Nile delta farmland. The results shows that the transpiration of windbreak trees occupies only 1.0% of the total evapotranspiration of the farmland, whereas evaporation reduction by the introduction of windbreak trees could be as large as 22-54% of the total evapotranspiration. And the peak of evaporation reduction is measured with about 40% porosity.

Key Words : Windbreak trees, *Casuarina*, sapflow measurements, Evaporation reduction

表目次

表 1	防風林の模型の LAD と林帯幅 (鳥田ほか, 2002)	23
表 2	観測項目	24
表 3	富田農園内の <i>Casuarina</i> の DBH の度数分布表.....	29
表 4	各サンプルの主な特徴.....	30
表 5	一日ごとのキャリブレーションから得られた r_c	31
表 6	r_c に対する VPD, T , Rn の重回帰分析結果.....	32

写真目次

写真 1	サンプル 11 番に設置した sapflow sensor	33
写真 2	サンプル 6～3 番に設置した sapflow sensor	34
写真 3	サンプル 11 番	35
写真 4	サンプル 6 番	36
写真 5	サンプル 5 番	37
写真 6	サンプル 4 番	38
写真 7	サンプル 3 番	39
写真 8	染色液注入器（筑波大学陸域環境センター内アカマツ林での予備実験にて撮影. 現地でも全く同様の器具で実験を行った.）	40
写真 9	AWS	41

図目次

図 1	エジプトにおける利用可能な水資源の割合（北村ほか，1994 より作成）	42
図 2	水資源の利用用途の割合（Arab Republic of Egypt Ministry of Water Resources and Irrigation Planning Sector, 2005 より作成）	43
図 3	林帯幅と疎密度の異なる防風林の防風特性（鳥田ほか，2002）	44
図 4	空隙率の異なる防風林の防風特性（Wang and Takle, 1997, Cleugh, 1998）	45
図 5	防風林による蒸発抑制効果の模式図	46
図 6	樹幹断面の模式図	47
図 7	sapflow sensor 設置の模式図	48
図 8	観測地点とナイルデルタの地形図	49
図 9	富田農園にある <i>Casuarina</i> の DBH のヒストグラム	50
図 10	防風林による蒸発抑制効果の推定を行う圃場の模式図	51
図 11	染色実験結果	52
図 12	各サンプルの DBH, 樹高, 辺材幅	53
図 13	辺材幅と DBH, 辺材幅と高さ（樹高）の相関	54
図 14	各 sensor で観測した ΔT の時間変化	55
図 15	Sakha で観測した VPD と下向き短波放射の時間変化と，サンプル 11 番の辺材内側・外側の u の時間変化	56
図 16	サンプル 11 番の辺材中の u の分布	57
図 17	サンプル 6 番の辺材中の u の分布	58
図 18	サンプル 5 番の辺材中の u の分布	59
図 19	サンプル 4 番の辺材中の u の分布	60
図 20	サンプル 3 番の辺材中の u の分布	61
図 21	サンプル 11~3 番の辺材外側の u , 内側の u の時間変化	62
図 22	各サンプルの E_T (cm^3/h) の時間変化と VPD, $S\downarrow$ の時間変化	63
図 23	各サンプルの E_T (mm/h) の時間変化	64
図 24	E_T と DBH の相関	65
図 25	E_T と樹高の相関	66
図 26	E_T と樹冠投影面積の相関	67

図 27	サンプル 11 番の 8 / 3 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の 相関(上)と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	68
図 28	サンプル 6 番の 8 / 3 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相 関(上)と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	69
図 29	サンプル 5 番の 8 / 3 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相 関(上)と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	70
図 30	サンプル 4 番の 8 / 3 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相 関(上)と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	71
図 31	サンプル 3 番の 8 / 3 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相 関(上)と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	72
図 32	サンプル 11 番の 8 / 4 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相 関(上)と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	73
図 33	サンプル 6 番の 8 / 4 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相 関(上)と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	74
図 34	サンプル 5 番の 8 / 4 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相 関(上)と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	75
図 35	サンプル 4 番の 8 / 4 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相 関(上)と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	76
図 36	サンプル 3 番の 8 / 4 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相 関(上)と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	77
図 37	サンプル 11 番の 8 / 5 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相 関(上)と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	78
図 38	サンプル 6 番の 8 / 5 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相 関(上)と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	79

図 39	サンプル 5 番の 8 / 5 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	80
図 40	サンプル 4 番の 8 / 5 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	81
図 41	サンプル 3 番の 8 / 5 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	82
図 42	サンプル 11 番の 8 / 6 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	83
図 43	サンプル 6 番の 8 / 6 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	84
図 44	サンプル 5 番の 8 / 6 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	85
図 45	サンプル 4 番の 8 / 6 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	86
図 46	サンプル 3 番の 8 / 6 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	87
図 47	サンプル 11 番の 8 / 7 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	88
図 48	サンプル 6 番の 8 / 7 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	89
図 49	サンプル 5 番の 8 / 7 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	90
図 50	サンプル 4 番の 8 / 7 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	91

図 51	サンプル 3 番の 8 / 7 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	92
図 52	サンプル 11 番の 8 / 8 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	93
図 53	サンプル 6 番の 8 / 8 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	94
図 54	サンプル 5 番の 8 / 8 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	95
図 55	サンプル 4 番の 8 / 8 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	96
図 56	サンプル 3 番の 8 / 8 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	97
図 57	サンプル 11 番の 8 / 9 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	98
図 58	サンプル 6 番の 8 / 9 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	99
図 59	サンプル 5 番の 8 / 9 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	100
図 60	サンプル 4 番の 8 / 9 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	101
図 61	サンプル 3 番の 8 / 9 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	102
図 62	サンプル 11 番の 8 / 10 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	103

図 63	サンプル 6 番の 8 / 10 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	104
図 64	サンプル 5 番の 8 / 10 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	105
図 65	サンプル 4 番の 8 / 10 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	106
図 66	サンプル 3 番の 8 / 10 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	107
図 67	サンプル 11 番の 8 / 11 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関(上)と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	108
図 68	サンプル 6 番の 8 / 11 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	109
図 69	サンプル 5 番の 8 / 11 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	110
図 70	サンプル 4 番の 8 / 11 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	111
図 71	サンプル 3 番の 8 / 11 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	112
図 72	サンプル 11 番の 8 / 12 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関(上)と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関(下)	113
図 73	サンプル 6 番の 8 / 12 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	114
図 74	サンプル 5 番の 8 / 12 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	115

図 75	サンプル 4 番の 8 / 12 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	116
図 76	サンプル 3 番の 8 / 12 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	117
図 77	サンプル 11 番の 8 / 13 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	118
図 78	サンプル 6 番の 8 / 13 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	119
図 79	サンプル 5 番の 8 / 13 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	120
図 80	サンプル 4 番の 8 / 13 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	121
図 81	サンプル 3 番の 8 / 13 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S\downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)	122
図 82	実測期間中 $rc = 7.8$ (sec/cm) で一定であると仮定した時の ET と E_{pm} の相関 (8/3 と 8/5 は富田農園が Sakha に比べ非常に乾燥していると考えられることから, バラつきが大きかったのを除いた.)	123
図 83	実測期間中, 一定値 $rc = 7.8$ (sec/cm) を与えた時の, 実測期間中の E_{pm} と ET の時間変化	124
図 84	実測期間の 1 日ごとに行ったキャリブレーション結果	128
図 85	実測期間中の 1 日ごとにキャリブレーションを行った E_{pm} と実測値 ET の時間変化	129
図 86	逆算した rc と VPD の時間変化	130
図 87	逆算した rc (sec / cm) と VPD (hPa) の相関	131
図 88	逆算した rc (sec / cm) と Rn (W/m^2) の相関	132
図 89	逆算した rc (sec / cm) と T ($^{\circ}C$) の相関	133
図 90	VPD から得た rc によって算出した E_{pm} の日積算値の季節変化 (Sakha 圃場で栽培されていた作物であるトウモロコシの生育期間における E_{pm} の季節変化)	134

図 91	防風林からの距離と相対風速の分布（鳥田ほか，2002 より作成）	135
図 93	鳥田ほか（2002）の防風特性を当てはめた時の圃場の蒸発散量の割合	136
図 92	鳥田ほか（2002）の防風特性を適用した場合の圃場の蒸発散の日積算値	136
図 94	空隙率ごとの防風特性（Wang and Takle（1997），Cleugh（1998）より作成）	137
図 95	空隙率 73 %の防風林による蒸発抑制効果	138
図 96	Wang and Takle（1997），Cleugh（1998）の防風特性のうち空隙率 73 %の防風林による蒸発抑制効果	138
図 97	空隙率 62 %の防風林による蒸発抑制効果	139
図 98	Wang and Takle（1997），Cleugh（1998）の防風特性のうち空隙率 62 %の防風林による蒸発抑制効果	139
図 99	空隙率 50 %の防風林による蒸発抑制効果	140
図 100	Wang and Takle（1997），Cleugh（1998）の防風特性のうち空隙率 50 %の防風林による蒸発抑制効果	140
図 101	空隙率 36 %の防風林による蒸発抑制効果	141
図 102	Wang and Takle（1997），Cleugh（1998）の防風特性のうち空隙率 36 %の防風林による蒸発抑制効果	141
図 103	空隙率 10 %の防風林による蒸発抑制効果	142
図 104	Wang and Takle（1997），Cleugh（1998）の防風特性のうち空隙率 10 %の防風林による蒸発抑制効果	142
図 105	牛山ほか（2009）	145
図 106	空隙率 0 %の防風ネットの高度 0.5 h の防風特性.（牛山ほか（2009）より作成）	145
図 108	牛山ほか（2009）の防風特性を参考にした	146
図 107	空隙率 0 %の防風林による蒸発抑制効果	146
図 109	空隙率と蒸発散抑制量の関係（トウモロコシの生育期間中の蒸発散抑制量の積算値と空隙率の相関）	147

1. はじめに

1.1 エジプトの農業開発と水資源

アフリカ大陸北部にあるエジプト・アラブ共和国（通称エジプト）は典型的な乾燥気候下にあり、年平均降水量は地中海沿岸で約 200 mm、南部のアスワンにおいては 2 mm に過ぎない。また、エジプトにおける利用可能な水資源の割合（図 1）を見てみるとナイル川からの水源が全体の 90 %を占めている。したがって、ナイル川の水を中心とした灌漑を抜きにしては、エジプトの農業は存在し得ない（北村ほか，1994）。

水源をナイル川に頼っている状況の中、エジプトにおける近年の急激な人口増加に対応したさらなる農業開発の必要性に対して、エジプト政府は現在砂漠地域であるトシュカ地方で約 22.7 億 m^2 、シナイ半島で約 16.8 億 m^2 を農地に変える計画 NWRP (National Water Resources Plan for Egypt - 2005) に着手している (Arab Republic of Egypt Ministry of Water Resources and Irrigation Planning Sector, 2005)。この計画によると、現在の水資源のうち年間およそ 100 億 t の水がこれらの砂漠地域の開発によって消費されることになる。さらに 2017 年には灌漑地域は 1977 年から約 30 %増加し、砂漠地域への水資源の供給量は年間約 30 億 t 増加することが予想されている。このようにトシュカ地方やシナイ半島のような砂漠地域の農地化が進行し、水需要の顕著な増加が予想されるなか、現在の農地でいかに灌漑効率を高めて節水するかが国家としての大きな課題となっている (畑, 2008)。

現在のエジプトにおける水利用用途の割合の中で農業用水が占める割合は 95 %と非常に高いため (図 2)、農地における節水対策が砂漠地域への水資源の確保の方法として極めて重要であると言える。農地における節水対策のひとつとしてエジプト政府は 1997 年頃から、農地における蒸発量を減少させ、その分を砂漠地域に供給することで農地の拡大を図る計画を立ち上げた。具体的には、1997 年の段階で推定 385 億 t/年あった農地からの蒸発量を 2017 年までに 353 億 t/年程度まで減らし、減少分の約 32 億 t/年を砂漠地域に供給するというものである。現在の農地からの蒸発による水の損失はナイルデルタの水収支システムの中でも非常に多いことから、この農地における蒸発に対する節水対策はエジプト政府が掲げる計画の中でも非常に重要であると言える。

1.2 防風林の研究

農地における蒸発抑制対策として一般に用いられているものの一つに、防風林が挙げられる。防風林は農地に吹き込む風の風速を弱め、それにより蒸発を抑制する効果があることが定性的に知られている。防風林は風速を減少させると同時に、風速と比例関係にある蒸発量も同時に減少させるが、これはバルク式からも容易に理解できる。日本国内の農業においても防風林には農地の蒸発量を減少させる効果を始め、土壌の飛散を防いだり、風による作物へのダメージを防いだりする効果があることが、防風林の有無による作物の収量の差から明らかになっている (十勝支庁, 2002)。この防風林による防風効果や防風範囲を研究した先行研究は今までに数多くなされており、その例を以下に示す。

鳥田ほか（2002）が行った疎密度と林帯幅の異なる防風林の防風特性について、風洞実験で使用された葉面積密度 LAD (m^2/m^3) と林帯幅の異なる 6 種類の防風林の模型の概要を表 1 に、またその風洞実験から得られたそれぞれの防風林の模型が持つ林帯からの距離に対する相対風速の分布を図 3 に示した。この先行研究では葉面積指数 LAI (m^2/m^2) は単位林床面積当たりの葉面積の積算値であることから、その値を樹高で除することで単位空間当たりの葉面積が平均的に表現できるとし、それにより算出された値を LAD としている。つまり LAD が高いほどその防風林は密な防風林であると言える。LAD が最も高い樹木で構成される林帯幅 1 列の防風林では、防風林から風下に $6h$ (h : 樹高) の地点の相対風速は 60% にまで抑制され、さらに $12h$ 程度までが防風範囲となっていた。

また Wang and Takle (1997) と Cleugh (1998) の空隙率の異なる防風林の防風特性に関する研究では、図 4 のような結果を得ている。この結果を見ると、防風林の空隙率（防風施設に直角、水平方向から見た防風施設の全面積に対する空隙の割合（佐藤ほか, 2000））が高いほど防風範囲は狭くなり、最小相対風速は小さくなっている。また空隙率が低いほど防風範囲は広いが、最小相対風速は大きくなっている。

防風林の構造因子としては、空隙率、林帯幅、植樹密度、高さ、横断形状、樹木の鉛直構造などが考えられるが、それら構造因子と風速抑制効果の関係については未解明な部分が多い（佐藤ほか, 2000）。これらの先行研究から LAD や空隙率などの防風林の疎密度を表す値の大小による防風特性の違いが未解明なため、どの構造因子が蒸発抑制に最も効果的なのかは分かっていない。

本研究では、エジプトナイルデルタにおける防風林の単木蒸散量を求め、その防風林に上記の先行研究によって得られた防風林の空隙率と防風特性を当てはめることで農地の蒸発散の減少量を算出し、防風林自体の蒸散量と農地の蒸発散量、防風特性による蒸発散の抑制量の 3 要素を比較することで防風林による蒸発抑制効果を推定することとする。

1.3 sapflow sensor の先行研究

樹木の単木蒸散量の算出には樹木の樹液流速と辺材面積の値が必要となるが（単木蒸散量=樹液流速×辺材面積、詳しくは後述）、本研究では Granier 法（Granier, 1985）を基にした sapflow sensor によって樹液流速の観測を行った。樹液流速の測定に Granier 法を基にした sapflow sensor を用いた先行研究として、飯田ほか（2003）や藤山ほか（2005）などが挙げられる。飯田ほか（2003）ではアカマツを試験木として sapflow sensor によって樹液流速の長期観測を行うことの妥当性と問題点を明らかにしている。その結果、センサー間の温度差 (ΔT) は樹液流速 u の日変化及び季節変化を良好に反映していたが、算出過程で使用する ΔT_0 には ΔT の日最大値 ΔT_{MAX} を使用する必要があるとしている。

藤山ほか（2005）ではヒノキ林に対して sapflow sensor による樹液流速測定を行い、樹液流速及び蒸散量の個体差や微気象条件との関係について検討している。その結果、樹液流速の日変動パターンに関して個体差は認められなかったとしており、また単木蒸散量は

胸高直径 DBH と樹液流速の増加によって相乗的に増加することも明らかにしている。さらに林分蒸散量が飽差 VPD などの微気象条件に依存していることを示唆する結果も得ている。

2. 本研究の目的

本研究の最大の目的は、防風林の蒸発散抑制効果を定量的に推定することにある。防風林が圃場に吹き込む風の風速を弱めるという防風効果は、数多くの先行研究を見ても明らかであろう。しかし蒸発散抑制効果となると、防風林が存在する場合と存在しない場合の圃場蒸発散の違いの観測・推定や、防風林自体の蒸散量の観測・推定が必要になる。防風林が存在しない任意の圃場に防風林を植樹することで蒸発散を抑制しようとする時、防風林自体の蒸散量が抑制した蒸発量よりも多くなってしまえば植樹する意義がなくなってしまうためである (図 5)。また、圃場に植えられている作物への影響を評価するためにも、作物の生育期間中の防風林の蒸散量及び圃場の蒸発散の季節変化も明らかにする必要がある。

そこで本研究の目的を、防風林を構成する樹木の単木蒸散量を算出し林分蒸散量に拡大すること、またその蒸散量は異なる地点においても適用可能であるか、若しくは何かしらの補整が必要であるかを明らかにするために木の特性や微気象条件との相関を求めること、さらにはそれらを踏まえた上で防風林に圃場の蒸発散を抑制する効果があるかどうかを推定することとする。

3. 研究方法

3.1 単木蒸散量の算出

飯田ほか (2003) や藤山ほか (2005) などの sapflow sensor を用いた蒸散量の観測を行った先行研究などでは、単木蒸散量 E_T は

$$E_T = u \times A \quad (1)$$

で与えられる。ここでの u は樹木の樹液流速 (cm/h) であり、 A は樹液流速の観測高度における辺材面積 (cm³) である。樹幹の断面は外側から樹皮、内樹皮、辺材、心材と大きく 4 つに分けられる (図 6)。このうち樹液流が存在するのは辺材だけであるため、その断面積と樹液流速の積により単位時間当たりに樹幹断面を通過する水の体積 (=蒸散量) を求める。本研究では樹冠における樹液の貯留効果は認められなかったため、このような式が成り立つものとした。

また本研究では、エジプトナイルデルタにおける防風林の蒸散量の算出を行うため、当該地域で一般的に防風林として利用されている *Casuarina* (和名：モクマオウ科トキワギョウリュウ) を試験木として選定した。この樹種は常緑広葉樹であるが、その鱗片状の葉は

肉眼では確認出来ないほど極めて小さい。また植物学的には散孔材という種類に分類され、辺材中で心材に近くなるほど樹液流速が小さくなるという特徴を持つ。この特徴を踏まえることは本研究を行う上で、蒸散量の算出の際に誤差を含まないようにする点で非常に重要なものであると言える。なぜなら、辺材中で樹液流速が一定であるとする蒸散量を過大評価してしまう可能性が非常に高いためである。

3.2 観測方法

3.2-1 樹液流速の観測

本研究での樹液流速 u は sapflow sensor (UP 社製, CUP-SPF-M 型) によって観測を行った。sapflow sensor は 2 本 1 対のセンサーから成り、片方のセンサーにはヒーターが内蔵されており、もう片方にはセンサーのみが内蔵されている。観測では、ヒーター内蔵センサーを上部に、もう片方のセンサーを下部に 15 cm 程度離して鉛直線上に樹幹に設置する (図 7)。ヒーターからは常時一定量の熱量が放出されており、 u が存在する日中は樹液の移流効果によりセンサー間の温度差 ΔT (°C) は小さくなり、 u がほとんど存在しない夜間は ΔT が大きくなる。Granier 法はこの ΔT の時間変化を利用して u を評価する (飯田ほか, 2003)。

本研究ではこの熱トレーサーを利用した Granier 法によって u の算出を行った。Granier (1985) と Granier *et al.* (1996) によれば、 u は次式

$$u = 1.19 \times 10^{-4} \times K^{1.231} \quad (2)$$

$$K = \frac{\Delta T_0 - \Delta T}{\Delta T} \quad (3)$$

で与えられる。ここで飯田ほか (2003) より ΔT_0 は日最大値 ΔT_{MAX} である。Granier *et al.* (1996) によれば、(2) 式は野外における観測でも問題なく利用できることが確認されている (飯田ほか, 2003)。

センサーの設置について記述すると、まず *Casuarina* の地上約 1.2 m の高度の樹幹に電動ドリルで約 15 cm 離して鉛直方向に 2 つ直径 2.2 mm ほどの穴を開け、その穴にアルミチューブを挿入し、アルミチューブ内にセンサーを挿入した。センサーと樹幹をテロスタット (シール用粘土) で固定し、センサーが完全に隠れるように放射除けを設置した。さらに合計 6 対のセンサーをロガー (CS 社製, C-CR1000-4M-XT) に接続し ΔT の 10 分間の平均値を記録した。

3.1 項でも述べたように、*Casuarina* という樹種は樹幹内部の辺材部で心材部近傍の内側と樹皮近傍の外側で u の速さが一定ではないという特性を持つ。佐藤ほか (2010) の染色実験の結果からも、コナラは辺材深さ (樹皮から心材方向への水平深さ) が深くなるほど染色液の上昇 (つまり樹液流速) が鈍くなるとある。樹皮付近の u は心材付近の u に比べて

非常に速い特性があるので、この特性に対して Granier 法を適用する際には辺材部における u の分布を明らかにしてからセンサーを設置しないと、つまり通常通り樹皮付近の u のみの観測では u を過大評価してしまうことになる。この u の過大評価によって単木蒸散量に大きな誤差を及ぼす可能性が高いため、試験木 5 サンプルのうち 1 サンプル(サンプル NO. 11) に対して辺材部の樹皮から水平心材方向に 2 深度でセンサーを設置し、辺材の内側と外側それぞれの u を観測した。また他の 4 サンプルでも u が No.11 と同様の分布をしているものとしてこの u の分布特性を適用した。サンプルの決定法については 3.3 項に記述する。

3.2-2 染色実験による辺材部の決定

単木蒸散量の算出に必要なデータの一つ、辺材面積を明らかにするため試験木 5 サンプルに対して染色実験を行った。樹幹の内部は樹液流が存在する辺材と樹液流が存在しない心材に大別でき、この辺材の断面積を辺材面積という。通常辺材の幅や分布は目視で確認することができないが、その面積は蒸散量の算出に直接的に影響を与え、かつ個体差がある。よってこの辺材面積をなるべく精度良く測定することが、算出された蒸散量の信頼性を向上させることに繋がる。

そこで u を観測する前に試験木に対して染色実験を行った。東京大学の愛知演習林で染色実験を行った佐藤ほか (2010) によれば、酸性フクシンから作成した染色液を入れた染色液注入器をコナラ 1 個体に対して取り付け、夏の午前中 105 分間の染色液の上昇高さと辺材深さを調べた結果、辺材深さに関わらず染色液の上昇は認められたが、その上昇速さには辺材の樹皮側(外側)と心材側(内側)で顕著な違いが見られ、辺材深さが深くなるほど染色液の上昇は鈍くなるとしている。この研究ではコナラの樹幹の高度 30 cm ほどの高さに染色液を注入して 105 分間放置した後、対象の 1 個体をチェーンソーで伐倒し、染色液注入位置から樹冠方向に 10 cm 間隔で輪切りにしてその断面を確認し、染色部分の測定を行っている。

また、瀧澤ほか (1996) でも染色実験を行っているが、酸性フクシン染色液を使用している点や放置時間が大体 60 ~102 分程度である点、伐倒した樹幹を 5, 10, 20 cm のいずれかの間隔で輪切りにして染色部分の測定を行っているなどの点で佐藤ほか (2010) と同様の実験を行っている。

本研究では試験木として *Casuarina* を現地の農家の方に提供して頂いているため、極力樹体に負荷をかけないように観測を行わなければならない。また、なるべく実蒸散量に近い測定値を得るために染色実験を行ったのと同じの樹体で u の観測を行うべきという考えから、染色実験において試験木の伐倒を行わない代わりに成長錐を使用して辺材のコアサンプルを採取し、そのコアサンプルから辺材を決定することとした。染色液を注入して 100 分ほど放置する時点までは先行研究と同様の手順であるが、sapflow sensor 設置高度が 1.3 m であることを考慮してその高度における辺材面積が実測出来るよう染色液注入高さを地上 1.0 m にした点や、染色液を注入して放置した後、染色液注入位置から鉛直方向に 5 cm 置

きに成長錐によるコアサンプリングを行った点は本研究での独自の手法である。また本研究では、染色液注入位置付近では樹体への直接的な浸透効果によって樹皮付近まで染色されていた為、辺材部は染色部分が鉛直方向に安定する注入位置からの高度（約 10 cm 以上）より鉛直上部のデータを辺材幅の真値とした。また染色実験後に sapflow sensor を設置することを考慮し、樹幹の北側で日射があまり当たらない樹幹で測定を行った。

3.2-3 気象観測

本研究で使用する気象データは Sakha 圃場における AWS (Automatic Weather Station) によって連続観測しているものを使用した。使用したデータは顕熱フラックス、潜熱フラックス、気温、気圧、風速、相対湿度、下向き短波放射である。観測機器は温湿度センサーによって気温と相対湿度、4 成分放射収支計によって上向き短波放射、上向き長波放射、下向き短波放射、下向き長波放射を、超音波風速温度計によって風速を、気圧計によって気圧を観測している。また気温、空気密度、風速鉛直成分、比湿などの実測値から渦相関法 (eddy correlation method) によって顕熱フラックス、潜熱フラックスを算出している (観測項目については、詳しくは表 2 に示す)。

また富田農園における気象データの取得方法として、風向と湿度のデータのみ Wadi El Natroon にあるエジプト気象庁の観測データを HP : Weather Underground (URL: <http://nihongo.wunderground.com>) から得た。各観測地点を図 8 に示す。図中の W.N は Wadi El Natroon の略称である。

3.3 観測地点

樹液流速及び辺材面積の観測・測定は N30° 30' 11.7, E30° 48' 06.41,, 標高 16 m のナイルデルタ南西部に位置する富田農園 (El Birigat) で行った (図 8)。ここでは *Casuarina* がマンゴー畑の防風林として使用されており、AC 電源の安定的な供給も可能であったため観測地点とした。本研究の試験木として 12 サンプルから成る 1 つの防風林を選定し、このうちの 5 サンプルに対してセンサーの取り付けや染色実験を行った。

富田農園で 112 本の *Casuarina* の DBH を計測しその度数分布とヒストグラム (図 9) を求めた結果、DBH で 5 つの階級に分けることができたのでその 5 つの階級を代表する 5 本のサンプル (No. 11, No. 6, No. 5, No. 4, No.3) を試験木として選定した (表 3)。このとき DBH が 0–15 cm の範囲に含まれる樹木 (表中の※) は、植えたばかりの木であるため樹幹が細すぎて sapflow sensor の取り付けが不可能であったため今回は省いた。また、表 4 に示した各試験木の特徴と各試験木の単木蒸散量との相関を求めた。

気象観測については N31° 05' 54.2, E30° 55' 24.2 にあるナイルデルタ北部の Sakha 圃場にて行った (図 8)。観測期間中の圃場における作物はトウモロコシであり、その植生の高さは平均で約 1.3 m ほどに成長していた。気象データを使用した Sakha の圃場では現地の慣行灌漑である畝間灌漑が行われており、ナイルデルタ内の一般的な農地を良く代表してい

た.

3.4 Penman-Monteith 式による蒸散量の算出

Penman-Monteith 式 (Monteith, 1965) は有効エネルギー, 気温, 水蒸気圧から蒸散量を推定する式である. 本研究ではこの式によって防風林の蒸散量の算出を行っている. Penman-Monteith 式は次式

$$L_e E_{pm} = \frac{\Delta(R_n - G) + \gamma L_e E_A}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (4)$$

で与えられる. ここで $L_e E_{pm}$ は潜熱フラックスであり, Δ は飽和水蒸気圧曲線の傾き, R_n は正味放射, G は地中熱流量, γ は乾湿計定数, L_e は蒸発潜熱, E_A は空気力学項, r_c は群落抵抗で r_a は空気力学的抵抗である. 求めた蒸散量は $L_e E_{pm}$ を L_e で除した E_{pm} である.

本研究では Sakha の気象データの中で H : 顕熱フラックス, IE : 潜熱フラックス, T : 気温, p : 気圧, v : 風速, r : 相対湿度の観測データを使用する. 蒸発潜熱 L_e は

$$L_e = a_1 + b_1 T \quad (5)$$

で与えられる. このとき, 定数 $a_1 = 2.50025 \times 10^6$, $b_1 = -2.365 \times 10^3$ とする (Fritschen and Gay, 1979). また飽和水蒸気圧曲線の傾き Δ は次式

$$\Delta = \frac{a_2 b_2 c_2}{(T + b_2)^2} \exp\left(\frac{a_2 T}{T + b_2}\right) \quad (6)$$

で与えられ, Bolton (1980) より定数を $a_2 = 17.67$, $b_2 = 243.5$, $c_2 = 6.112$ とする. また, 熱収支が閉じていると仮定すると

$$R_n - G = H + IE \quad (7)$$

である. さらに乾湿計定数 γ は次式

$$\gamma = \frac{c_p p}{0.622 L_e} \quad (8)$$

で与えられ, 定圧比熱 $c_p = 1005 \text{ J/kg K}$ とする. 空気力学項 E_A は次式

$$E_A = \rho \frac{0.622}{p} C_E \bar{v} \{e^*(\bar{T}) - \bar{e}\} \quad (9)$$

で与えられる. ここで空気密度 $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$ とする. 長期平均の可能蒸発量を求めるためにはこのような大まかな経験式で十分な計算値が得られるとされている (Brutsaert, 2008, 杉田ほか, 2009). バルク係数 C_E は中立条件を仮定して, 次式

$$C_E = \frac{k^2}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \ln\left(\frac{z}{z_{0v}}\right)} \quad (10)$$

で与えられる. 本研究では観測高度 z を $z = 3 \text{ m}$ とし, 植生地の運動量粗度 z_0 は Wieringa (1993) より

$$z_0 \approx \frac{h_0}{10} \quad (11)$$

と近似されているため, 本研究の防風林の平均樹高 $h_0 = 11.2 \text{ m}$ より $z_0 \approx 1.12 \text{ m}$ とした. また, 同論文から顕熱粗度 z_{0h} と水蒸気粗度 z_{0v} は次式

$$z_{0h} \approx z_{0v} \approx \frac{h_0}{100} \quad (12)$$

で一次近似的に求まるとしていることから, $z_{0h} \approx z_{0v} \approx 0.112 \text{ m}$ とした. カルマン定数 $k = 0.4$ であるから, (10) 式が求まる. また飽和水蒸気圧 $e^*(T)$ は次式

$$e^*(T) = c_2 \exp\left(\frac{a_2 T}{T + b_2}\right) \quad (13)$$

で与えられる. 相対湿度 r と水蒸気圧 e , 飽和水蒸気圧 e^* の関係は

$$r = \frac{e}{e^*} \quad (14)$$

であるため、水蒸気圧 e は相対湿度 r を用いて算出できる。これにより $e^*(\bar{T}) - \bar{e}$ を算出する。空気力学的抵抗 r_a は次式

$$r_a = \frac{1}{C_H v} \quad (15)$$

で与えられる。ここでバルク係数 C_H は次式

$$C_H = \frac{k^2}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \ln\left(\frac{z}{z_{0h}}\right)} \quad (16)$$

で与えられる。

以上より観測データから群落抵抗 r_c 以外の値は全て計算できる。左辺を富田農園において観測した 5 サンプルの蒸散量の平均値とすると Penman-Monteith 式での未知数は r_c のみとなるため、 r_c の時間変化が算出できる。これにより求めた r_c と、 r_c と相関が高いとされている気温、正味放射、飽差との重回帰分析を行うことで (表 7) キャリブレーションを行い、富田農園での観測期間 (2010/8/3~2010/8/13) 以外の、かつトウモロコシの生育期間内 (2010/6/24~2010/9/26) の r_c の値を求めた。この重回帰分析により求めた式は次式

$$r_c = 0.14VPD + 3.0 \times 10^{-3}R_n - 0.30T + 6.7 \quad (17)$$

である。トウモロコシの生育期間中の VPD, R_n , T は Sakha の AWS によって観測されているので、これらによりトウモロコシの生育期間中の r_c , ひいては蒸散量 E_{pm} の算出も可能となった。

この方法を取る前のキャリブレーションについて記述する。実測期間中 (2010/8/3 ~ 2010/8/13) において群落抵抗 r_c の値が一定であるとしてキャリブレーションを行った。その際、Penman-Monteith 式により得られた蒸散量 E_{pm} と実測値 E_T の時系列のうち、Wadi El Natroon における風向データ (Weather Underground : <http://nihongo.wunderground.com>) のうち 1 日を通して西風が吹いていることから富田農園が著しく乾燥していると思われる 8/3 と、VPD が異常に高く Sakha が非常に乾燥している 8/5 は省いた。

R_n は放射収支の（特に下向き短波放射）、 E_A は飽差 VPD の関数であるため、本研究の試験木の蒸散量をこの式から得る為には試験木の蒸散量の観測値がこれらの微気象条件と相関が良いことが求められる。藤山ほか（2005）では樹木の蒸散量は VPD と良い相関関係があるとされているが、本研究でもそのような相関関係が見られるかどうか検証する必要がある。

3.5 防風林による蒸発抑制効果の推定

本研究の最大の目的である防風林による蒸発散抑制効果の推定方法であるが、本研究では単木蒸散量の算出と Penman-Monteith 式に必要なデータの観測しか行っていない為、この推定方法はあくまで概算という形になる。防風林の蒸発散抑制効果を推定する上で実測値以外に必要なデータは、研究対象の防風林に近い防風林の防風特性である。このデータに関しては鳥田ほか（2002）や Wang and Takle（1997）、Cleugh（1998）の防風範囲や防風効果のデータを引用して、本研究の試験木により構成される防風林に当てはめて推定することとする。また空隙率 0%の防風特性に関しては、牛山ほか（2009）の防風ネットの実験結果を引用した。本研究の対象防風林は、目視で空隙率が低く、1列で密に植わっている特徴を持つ。鳥田ほか（2002）では防風林の列数と LAD がそれぞれ異なる組み合わせの防風林の模型を用いた風洞実験を行っているが、その中でも LAD が最も高く、1列の防風林模型の構成因子が本研究の対象防風林に最も近いと判断し、この防風特性を適用する。

また Wang and Takle（1997）、Cleugh（1998）では実在する防風林の構成因子を観測し、空隙率の違いごとに防風特性をシミュレーションしており、そのうちの空隙率が 10%、36%、50%、62%、73%である防風林の樹高の半分の高さ（0.5h）における防風特性全ての場合について蒸発散抑制効果の推定を行った。牛山ほか（2009）では、空隙率の異なる防風ネットについて風洞実験を行っており、この実験のなかで空隙率が 0%であるネットの 0.5h における防風特性の結果を本研究では引用した。

蒸発散抑制効果についての仮定として、富田農園にて蒸散量を観測した防風林が Sakha 圃場を樹冠が接する間隔で一周围んでおり、風向は圃場の長辺に植わっている防風林に対し直角で、その防風林の風下方向の防風特性は前述した先行研究の防風特性が当てはまるとした（図 10）。その場合の防風林の蒸散量 E_{pm} の合計値を圃場の面積で除した蒸散量

（mm/day）と、防風林が全く存在しない Sakha 圃場の蒸発散量の実測値（mm/day）、そして鳥田ほか（2002）と Wang and Takle（1997）、Cleugh（1998）、さらに牛山ほか（2009）の防風特性を適用した防風林が有ると仮定した場合の圃場の蒸発散量（mm/day）の 3 者を比較することで、防風林による蒸発散抑制効果の推定を行うものとする。防風林が全く存在しない圃場の蒸発散量は AWS の渦相関法によって得られた潜熱フラックスの実測値を蒸発潜熱で除すことで算出している。これは現在の圃場には防風林が全く存在していないためである。

またナイルデルタの畝間灌漑は圃場を約 220 m²に分割して行っており(北村ほか, 1994), 本研究における防風林による風速抑制, 及び蒸発抑制効果は 30600 m²の圃場で推定しているため, その効果はナイルデルタで一般的に十分適用可能である.

4. 結果

4.1 辺材面積

染色実験による辺材部決定の結果を図 11 に示す. 染色実験によって得られたコアサンプルの染まっている部分(辺材)の樹皮側の端を辺材の外端, 心材側の端を辺材の内端と呼ぶこととする. 各サンプルの辺材部の分布を示すグラフはいずれも横軸が辺材深さ, 縦軸が染色液注入位置からの鉛直方向の高度を意味しており, 2 系列はそれぞれ外端と内端を高度ごとにプロットしたものであることから, この 2 系列(点線と実線)に挟まれる部分が辺材であることを意味する.

この結果を見ると, 本研究で真値とする辺材は 11 番のサンプルでは 4 cm の幅を持っており, 樹皮から 3 cm の水平方向の深さまでは辺材ではなく樹液流が認められない事が分かる. つまりこの 4 cm の幅の辺材中を鉛直上方に樹液流が流れていることになる. よってセンサーの取り付けは染色液注入高度から 10 cm 上方の位置とし, ヒーター内蔵のセンサーはさらに 15 cm 上方の位置とした. また sapflow sensor は長さが 2 cm であるので, このサンプルの辺材では外端から 2 cm, 内端から 2 cm にセンサーを挿入することで辺材中の u の分布を正確に観測出来ることから, 11 番のサンプルには 2 対の sapflow sensor を設置した. このとき, 染色実験から得た辺材の分布がほとんど変わらない, かつ隣接する 2 対のセンサーが影響を及ぼし合わないようこの 2 対のセンサーは樹幹の外周 20 cm の距離を空けるなどの配慮をした. 染色実験により得られた 5 サンプルの辺材幅とそれぞれのサンプルの胸高直径 DBH, 高さのデータを図 12 に示す. このような結果が得られたことから, センサーの設置深度が判明した為, 樹皮と辺材の間の内樹皮を「のみ」と金槌で削って辺材をあらわにしてからセンサーを設置した.

また辺材幅と DBH, 高さの実測値との相関を図 13 に示す. この結果を見る限り樹木の外的特徴と辺材幅の間に相関はほとんど無く, 特に樹幹の太さを表す DBH と辺材幅に相関が見られなかったのは非常に特異な結果であり, 藤山ほか(2005)の結果とは一致しなかった. この結果から辺材幅は u の測定時には毎回染色実験などによって明らかにする必要があることが分かった.

4.2 樹液流速

サップフローセンサーによる ΔT の時間変化のグラフをサンプルごとに図 14 に示す.

sensor1-1 はサンプル 11 番の辺材の樹皮側(外側)の ΔT , sensor1-2 はサンプル 11 番の辺材の心材側(内側)の ΔT の時間変化を表している. 以下 sensor1-3 から sensor2-3 は各サンプルに一对ごとに設置され, そのサンプルの樹皮側の辺材の ΔT を観測している. 3.2-1

の方法に示した通り，この ΔT から u を算出する．以下に他のサンプルの ΔT の時間変化を示す．AC電源の停電により異常値が見られた時刻のデータは欠測として扱うこととする．

次に ΔT から算出したサンプル11番の u の時間変化を図15に示す．11番のみ sensor1-2による辺材内側の u の実測値があるが，ほかのサンプルは11番の辺材深さに対する u の分布を元に算出した．11番の u の分布特性から他のサンプルの辺材内側の u を算出する時，Sakhaの下向き短波放射が $S \downarrow \geq 300$ となる時間の u のデータ，つまり日中の蒸散が最も活発になる時間の u のみについて，実測期間8/3～8/14までのサンプルごとの日平均値 \bar{u} を辺材内側・外側ともに算出し，外側の u に対する内側の相対 u と辺材内端に対する相対辺材深さのプロファイルを作成して他の4サンプルについてもこのプロファイルが成り立つと仮定した．

実測値が辺材外側の u のみのサンプル6，5，4，3番の辺材内側の u は，11番の実測値から得られた辺材中の u の相対辺材深さと相対 u について成り立つ式の傾きと同じ値を持つ式に6，5，4，3番のサンプルの辺材外側の u の実測値を代入して各サンプルについて成り立つ式の切片を得た（図16～19）．直線と横軸から成る面積を相対深さの中間で2つに分けて辺材外側の面積と内側の面積比を得て，その比が外側の u と内側の u の比と同じであるとして内側の u を算出した．各サンプルの辺材外側と内側の u の時間変化を図21に示す．

どのサンプルについても辺材内側の u は辺材外側の u の半分程度になった．このように環孔材では辺材の外側と内側で u の速さが非常に異なる．この結果を踏まえずに単木蒸散量を算出していれば，辺材外側と内側の u の差と辺材外側の辺材面積の積の分だけ過大評価してしまうこととなり，それによって得られた単木蒸散量は信頼性の乏しいデータになってしまう．本研究ではこの辺材深さに対する u の減少を踏まえた上で各サンプルの単木蒸散量の算出を行った．

4.3 単木蒸散量とそれに影響を与える因子

4.2項に示した各サンプルの樹液流速分布の結果から，辺材外側の u と辺材外側の断面積，辺材内側の u と辺材内側の断面積の積でそれぞれ蒸散量を算出し，それらを合計することで1サンプルの単木蒸散量とした．式としては次式

$$E_T = u_i \times A_i + u_o \times A_o \quad (18)$$

である．ここで u_i は辺材内側の樹液流速， A_i は内側の辺材面積， u_o は辺材外側の樹液流速， A_o は外側の辺材面積である．辺材の断面積のうち辺材幅の中間で内側と外側に分け，それぞれについて上の式を適用した．この計算から得られた E_T は単位時間当りの蒸散として気孔から排出された水の体積（ cm^3/h ）であり，その時間変化のグラフを図22に示した．

この値を樹冠投影面積 A_c （ m^2 ）で除して単位の換算を行って得られたのが E_T （ mm/h ）で

ある。その算出過程を式 (18) に示す。

$$E_T \left(\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right) = \left[E_T \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{h}} \right) \div \{ A_c \times 10^4 \left(\text{cm}^2 \right) \} \right] \times 10 \left(\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right) \quad (19)$$

またその計算により得られた各サンプルの単木蒸散量の時間変化の結果が図 23 である。 E_T は 4 番を除く全てのサンプルで日の出時刻から日射量が増加するとともに増加し、正午ごろ日最大値をとって以降日射量の減少とともに緩やかに減少していく。4 番の E_T は日最大値をとるのが午後 2~3 時ごろと、他のサンプルに比べ時間差があった。また 3 番を除く全てのサンプルで夜間の E_T はほぼ 0 となった。3 番は夜間の日射が 0 になって以降も少量の蒸散が存在した。本研究で得られたこのような E_T の日変化パターンは 4 番と 3 番の一部の例外を除いて、藤山ほか (2005) や熊谷ほか (2005) の結果とも整合性が良い。

また E_T に影響を与える因子の解明のため、サンプルごとの E_T とその試験木サンプルが持つ主な特性である DBH、樹高、樹冠投影面積との相関、また Sakha で観測した気象データのうち E_T に直接影響を与えると考えられる VPD と $S \downarrow$ との相関を求めた。木の特性との相関では E_T の 10 日間の積算値、気象データとの相関では E_T の日変化と気象データの日変化の相関を求めた。まず、木の主な特性 (DBH、樹高、樹冠投影面積) との相関を図 24 ~ 図 26 に示す。

まず E_T と DBH との相関の結果である図 24 を見てみると、決定係数が $R^2 = 0.07$ と非常に小さく、相関は見られなかった。本研究では辺材幅が DBH と相関がなかったことから、 E_T が DBH と相関が低いことも予測できたが、飯田ほか (2006) では辺材面積が断面積に占める割合と DBH には相関があるとしており、藤山ほか (2005) でも辺材幅と DBH の間には高い相関があり ($R^2 = 0.78$)、晴天日の E_T は DBH が大きいほど大きくなるという結果を導き出しており、本研究の結果はこれらの先行研究とは一致しなかった。

E_T と樹高 h_0 の相関 (図 25) を見てみると、決定係数が $R^2 = 0.46$ と小さく相関は見られなかった。また樹冠投影面積 A_c との相関 (図 26) でも、決定係数は $R^2 = 0.14$ と非常に小さく E_T と A_c の間の相関があるとは言えない結果であった。 E_T と木の主な特性の間には、相関を表すグラフを見ても分かる通り明確な相関はなかった。つまり E_T に影響を与える因子は樹木の外的特徴にはないことが分かる。

次にサンプルごとの E_T の日変化と $S \downarrow$ の日変化の相関、またサンプルごとの E_T の日変化と VPD の日変化の相関を日をおって図 27 ~ 図 82 に示す。

サンプルごとの E_T の日変化と $S \downarrow$ の日変化の相関を見てみると、サンプル 11, 6, 5, 4, 3 番の 5 本について 8/3~8/13 の 10 日間の計 50 の相関図の中で、決定係数は $0.37 \leq R^2 \leq 0.97$ の範囲にあり、50 データの平均値は $\overline{R^2} = 0.87$ であることから、 E_T と $S \downarrow$ の日変化の間には非常に高い相関があることが分かる。同様に、 E_T と VPD のそれぞれの日変化の相関の結果を見ると 50 データ中で R^2 の範囲は $0.68 \leq R^2 \leq 0.98$ であり、 $\overline{R^2} = 0.94$ であったため非

常に相関が高かった。この E_T と VPD の間の相関の高さは藤山ほか (2005) の結果とも一致している。

4.4 Penman-Monteith 式による蒸散量の推定

4.3 項に示した単木蒸散量 E_T とそれに影響を与える因子の結果から、 E_T は微気象条件 (VPD, $S\downarrow$) と非常に良い相関にあり、それらに大きく影響を受けていることが分かったため、Penman-Monteith 式による蒸散量の算出が可能であると判断した。

そこでまず E_T の実測期間中で E_{pm} の式中の r_c を一定として行った Penman-Monteith 式のキャリブレーション結果を図 83 に示す。 E_T と E_{pm} が最も近い値になったのは、 $r_c = 7.8$ (sec/cm)の時であった。しかし、この r_c により得られた E_{pm} と E_T の時系列の間にはバラつきが非常に大きく (図 84)、キャリブレーションの際に 8/3 と 8/5 を省いた場合でも、その決定係数はあまり高くならなかった。この結果を見ると 8/3 と 8/5 はやはり両蒸散量の時系列に大きな差が見られる。このように、群落抵抗 r_c を実測期間中で一定値として与えると、Penman-Monteith 式から得た E_{pm} と実測した E_T の日変化は実測期間全てで一致するわけではなかった。

Tan and Black (1976) によれば、群落抵抗 r_c は樹冠が乾いている場合には葉の生理的な環境応答特性によって複雑に変化するとある。また Stewart and Bruin (1984) は *Thetford* のスコットマツ林において群落コンダクタンスは日射量、飽差、土壌の水分欠損に影響されることを示している。Lindroth (1985) も同様に、スコットマツ林において群落コンダクタンスの季節変化の調査を行い、日射量と飽差によってその大部分が説明されることを示した。これらの先行研究から r_c には少なくとも日変化が存在すると考えられるため、本研究では観測期間中において 1 日ごとに異なる r_c を与え、 E_T に対する E_{pm} のキャリブレーションを行った。その結果、実測期間中の各日の E_T と E_{pm} の相関は 10 日間の全体で見れば非常に良い相関となった (図 85)。また表 5 を見ると、 r_c は実測期間中 $2.9 \leq r_c \leq 8.8$ の幅を持って変化しており、日によって大きく異なっていることが分かった。しかしこの日ごとのキャリブレーションでも E_T と E_{pm} が完全に一致するには至らなかった (図 86)。

本研究ではさらに (4) 式を r_c についての式

$$r_c = \frac{\Delta(R_n - G) + \gamma L_e E_A}{\gamma L_e E_{pm}} r_a - \frac{\Delta r_a}{\gamma} - r_a \quad (20)$$

で表し、 r_c に時間変化が存在するとしてその値を逆算した。これにより r_c の時間変化が図 86 のように得られた。 r_c の時間変化の特徴としては、夜間の値がほとんどの日で非常に小さなマイナスの値をとる。これは夜間に気孔抵抗が非常に小さくなっていることを意味している。VPD の増加と共に徐々に r_c が増加していき、VPD のピークの直前に r_c もピークをとるという結果になった。これは乾燥気候下において、少なくともこの樹種は蒸散によって水

分を余計に逃がさないために VPD がピークをとる前に気孔を閉じているということが考えられる。 E_T の実測期間外の r_c を求めるため、 r_c に影響を与えうる気象因子との相関を調べた。 杉田 (1987) によれば、 r_c に影響を与える気象因子として VPD, T , R_n , CO_2 , u の 5 つが挙げられる。 これらの気象因子と r_c の時間変化について重回帰分析を行うことで回帰式を得、その式に各気象データの実測値を代入することで実測期間外の r_c の値を算出して E_{pm} の算出を行った。 また本研究では、これらの気象データは Sakha に設置された AWS の観測データを使用しているが、 CO_2 のデータは年間を通して異常値が多いため E_T の算出には使用できなかった。 さらに、 u と r_c の間には相関がほとんど見られなかったため、 図 87 ~89 に示すように本研究における r_c の算出は VPD, T , R_n のデータの重回帰分析によって行うこととする。 その結果、 r_c は次式

$$r_c = 0.14VPD + 3.0 \times 10^{-3} R_n - 0.3T + 6.69 \quad (21)$$

$$R^2 = 0.73$$

により得られた。 以上より VPD, T , R_n によって得られた r_c から算出した圃場のトウモロコシの生育期間中の防風林の蒸散量 E_{pm} の日積算値の季節変化を図 90 に示す。 E_{pm} の日積算値が急激に上昇している日は、灌漑が行われた日である。

4.5 防風林による蒸発抑制効果の推定

本研究の最大の目的に対する結果であるが、まず鳥田ほか (2002) の防風特性を当てはめた結果を示す。 鳥田ほか (2002) の防風林のモデルの中で本研究の対象防風林に最も近いモデルの防風特性のグラフから図 91 を作成した。

この防風特性は防風林からの距離 (樹高 h の倍数表示) に対して、防風効果を受けない風速に対する相対風速をプロットしたものである。 本研究での防風林の平均樹高は $h=11.2$ m である。 鳥田ほかのグラフから読み取った値をプロットして防風特性のグラフを改めて作成し、そのグラフの近似曲線を得た。 この近似曲線から、 u は h の関数 ($u = f(h)$) で与えられる。 またバルク式

$$L_e E = \rho L_e C_E \bar{u} (\bar{q}_s - \bar{q}) \quad (22)$$

より、蒸発散量は風速 \bar{u} の関数であることから、その風速の減衰割合を圃場の蒸発散量の減衰率としてそのまま適応し、減衰した蒸発量を求める。 それらを足し合わせることで抑制後の蒸発散量を算出。 式としては次式

$$E' = \int_0^{15.18} f(h)dh \cdot E \quad (23)$$

で抑制後の蒸発散量 E' を求めた。積分範囲が 0 ~15.18 であるのは、Sakha 圃場の防風林からの距離が 0 ~170 m であり、平均樹高が $h = 11.2$ m であることから、 $170 \div 11.2 \approx 15.18$ であるためである。この値を抑制無しの蒸発散量から引くことで、蒸発散抑制量を算出した。以上の計算を鳥田ほか (2002) に当てはめた結果が図 92 である。この図には防風林による蒸発抑制量と抑制後の蒸発散量、防風林自体の蒸散量の季節変化を示してある。また同期間におけるこれらの積算値の割合を示したものが図 93 である。

この結果を見ると、防風林自体の蒸散量は防風林によって抑制された蒸発量の減少分と比べ、 10^{-2} mm/day のオーダーで小さいことが分かる。積算値にすると防風林自体の蒸散量は全体の蒸発散量の内の 0.29 %、蒸発量の減少分の割合は全体の 23.77 % となっている。これはつまり、防風林によって圃場の蒸散量は 0.29 % 増加するが、圃場の蒸発量の 23.77 % を減少させる効果があるということを示している。つまりこの推定では防風林による蒸発抑制効果は大いに存在するという結果になった。

次に Wang and Takle (1997) による防風林の空隙率と防風特性についての研究で得られた結果の内、空隙率の異なる 5 種類の防風特性全てについてその蒸発散抑制効果の推定を行った。まず Wang and Takle (1997) で得られた空隙率と防風特性の関係から作成したそれぞれの空隙率を持つ 5 種類の防風林の防風特性を図 94 に示す。空隙率ごとの近似曲線の式は次のようになった。

$$73 \% : y = -0.60 \times 10^{-3} x^5 + 2.63 \times 10^{-2} x^4 - 0.41 x^3 + 2.97 x^2 - 8.86 x + 79.55 \quad (24)$$

$$62 \% : y = -0.12 \times 10^{-2} x^5 + 4.58 \times 10^{-2} x^4 - 0.67 x^3 + 4.80 x^2 - 15.55 x + 73.55$$

$$50 \% : y = 0.60 \times 10^{-2} x^4 - 0.25 x^3 + 3.74 x^2 - 19.11 x + 67.01$$

$$36 \% : y = 0.19 \times 10^{-2} x^5 - 6.53 \times 10^{-2} x^4 + 0.60 x^3 + 0.51 x^2 - 18.29 x + 59.37$$

$$10 \% : y = 1.82 \times 10^{-2} x^4 - 0.65 x^3 + 7.22 x^2 - 19.53 x + 13.53$$

防風林による蒸発抑制効果の推定は前述の鳥田ほか（2002）による推定と同様の手順で行うものとする。この Wang and Takle（1987）、Cleugh（1988）の防風特性を当てはめた結果得られた圃場の蒸発散量、防風林自体の蒸散量、蒸発散抑制量 3 系列の日積算値の季節変化と、その蒸発散量の割合が空隙率ごとに図 95 ～図 104 に示してある。

Wang and Takle（1987）、Cleugh（1988）の防風特性を当てはめた結果、空隙率と蒸発散抑制量の間には図 105 のような関係があり、空隙率が低いほど蒸発散抑制効果は大きくなるが、空隙率が 36 % から 10 % に減少したとき蒸発散抑制量は減少した。このことから、蒸発散抑制量と空隙率には二次式で表される関係があり、そのピークは空隙率 30～40% 程度であることがあきらかとなった。この結果は、防風林の造成・管理に関する論文である小澤ほか（2003）とも一致した。

5. 考察

5.1 単木蒸散量と木の特性、気象データとの相関

結果の相関図を見ても明らかだが、単木蒸散量と木の持つ主な特性（DBH、樹冠投影面積、樹高）の相関は非常に低くなっている。この結果は先行研究である飯田ほか（2006）や藤山ほか（2003）の結果とは一致しなかった。その理由として、飯田ほか（2006）では試験木を針葉樹であるアカマツ、藤山ほか（2003）でも針葉樹であるヒノキを試験木としており、どちらも本研究の試験木である広葉樹の *Casuarina* とはそもそも性質が大きく異なる。具体的な性質の違いとしてはアカマツやヒノキは針葉樹であり、ヒノキに関しては森川（1974）が行ったヒートパルス法による辺材深さ別の u の測定により辺材深さに関わらず辺材中で u は一様であるという結果や、瀧澤ほか（1996）が行った染色実験によるヒノキの u は古い年輪に至るまでほぼ一定であるという結果から、これらの針葉樹は辺材深さに関わらず一定の u が存在しているという特徴を持つ。一方、本研究の試験木 *Casuarina* は広葉樹であり、辺材深さ方向の u の減衰が観測されている。このような辺材と u の関係の違いにより、*Casuarina* では u が大きな影響を与えている E_T と、 u が一様でない DBH の間にある相関関係は針葉樹に比べ非常に複雑なため、相関結果に先行研究との明白な違いが生じたと考えられるのである。このような樹種の違いが本研究の結果と先行研究の結果の不一致をもたらしているのであろうと推察する。

一方で気象データ（VPD、下向き短波放射 $S\downarrow$ ）との相関は極めて高い。エジプトのような極端な乾燥気候の中では、蒸散量は個々の木が持つ特性よりも微気象条件に大きく影響を受けている可能性があることが考えられる。またこの結果は藤山ほか（2003）の結果とも一致していた。

5.2 Penman-Monteith 式から得た群落抵抗

本研究で Penman-Monteith 式のキャリブレーションの際に得られた群落抵抗 r_c は 372

(sec/m) であるが、足立ほか (1995) では 10 ~140 (sec/m)、馬場 (2001) では 66 ~ 166 (sec/m) となっており、これらの先行研究に比べ非常に大きい値となっている。この理由として、 r_c は次式

$$r_c = \frac{r_{st}}{LAI} \quad (25)$$

で与えられることから、*Casuarina* の持つ気孔抵抗 r_{st} と LAI の特徴が日本国内の樹種とは大きく異なっていることが考えられる。*Casuarina* は一見針葉樹のようにも見えるが、緑色の細かい針葉のようなものは実は枝の一部であり、葉はその枝の節にある非常に小さい突起である。この非常に小さい葉のために LAI が非常に小さいという事実がある。また現地は日本に比べ極端に乾燥している地域なので、蒸散の際の余分な水分の放出を防ぐため r_{st} が非常に大きい事が考えられる。この2つの理由から相乗的に r_c が大きくなったことが推測出来る。

5.3 防風林の蒸発抑制効果の有無

防風林による蒸発抑制効果の推定結果を見てみると、防風林自体の蒸散量は防風林によって抑制された蒸発量にくらべ 10^{-2}mm/day のスケールで小さいという結果になっている。このことから、防風林の植樹によって抑制した蒸発量よりも防風林自体の蒸散量が大きくなってしまふ可能性はほぼ無いということが分かった。つまり、防風林による蒸発抑制効果が存在する可能性がこの結果から見出された。

しかし、富田農園での防風林の防風特性を定量的に観測したわけではなく先行研究の別の樹種の防風林の防風特性を当てはめており、蒸発量が風速と比例関係にあることから風速の減衰率をそのまま蒸発量の減衰率に当てはめているため、この結果は概算の域を出ない。実際には風速の減衰によって比湿や気温のデータにも変化が出てくるはずなので、一概に蒸発抑制量を風速の減衰から算出することは適切ではない。

これらの事実から本研究で得られた結果がそのまま正しいというわけではないが、風速の減衰による他のデータの変化を考慮したとしても蒸発抑制量より 10^{-2}mm/day のスケールで小さい防風林の蒸散量が、蒸発抑制量を上回ることは考えにくい。したがって、本研究の概算の結果からも防風林による蒸発抑制効果が存在する可能性は大いに考えられると言える。

6. 結論

本研究ではエジプトナイルデルタにおける防風林による蒸発抑制効果の推定を、防風林自体の蒸散量を評価し、防風林の有無による圃場の蒸発量の変化を観察することによって行った。防風林の単木蒸散量 E_T の算出には、まず染色実験による辺材面積 A の決定を行い、

それにより sapflow sensor の設置辺材深さを決定して樹液流速 u の観測を行った。このとき、本研究での試験木 *Casuarina* は環孔材であり、辺材深さによって樹液流速が異なるという特性に留意した。辺材 2 深度の樹液流速の測定により、予想通り辺材深さが深くなるほど樹液流速は小さくなるという結果が得られた。

また単木蒸散量と試験木の主な外的特徴（DBH、樹高、樹冠投影面積）の相関を求めた結果、決定係数は非常に低く、両者に相関は見られなかった。一方、単木蒸散量と微気象条件（VPD、下向き短波放射）の相関を求めた結果、単木蒸散量はそのいずれとも相関が高かった。このことからエジプトナイルデルタではその特異な乾燥気候から、単木蒸散量は樹木の持つ外的特徴よりもむしろ微気象条件によって大きく影響を受けていることが考えられる。

単木蒸散量が微気象条件と相関が高いという結果から、Penman-Monteith 式による蒸散量の季節変化の算出を試みた結果、群落抵抗は $r_c = 7.85 \text{ s/m}$ と非常に大きくなったものの、実測期間において 8/3 と 8/5 を除いてよく一致しており、ナイルデルタに西風が吹くことによって富田農園が急激に乾燥し、Sakha と富田農園の VPD が特に大きくなる限り、Penman-Monteith 式による蒸散量の算出は問題なく行えるという結論を得た。

鳥田ほか（2003）や Wang and Takle（1987）、Cleugh（1988）、牛山ほか（2009）の防風林の密閉度や空隙率による防風特性の変化の結果を本研究対象の防風林に適用することで圃場の蒸発抑制量を概算し、防風林自体の蒸散量の季節変化を Penman-Monteith 式で、圃場の蒸発量を渦相関法で算出することで、圃場における防風林の有無による蒸発散量の割合を算出して防風林による蒸発抑制効果の推定を行うと同時に、防風林の空隙率の違いによる蒸発抑制量に対する応答の変化を観察した。その結果、防風林自体の蒸散量は抑制された蒸発量よりも 10^{-2} のスケールで小さく、その抑制効果が認められた。また空隙率の違いによる蒸発抑制量への応答の違いも見られ、空隙率と蒸発散抑制量の間には二次式の関係が存在し、そのピークは空隙率 40%程度であることも分かった。

本研究で得られた *Casuarina* の単木蒸散量と木の特性（DBH、樹高、樹冠投影面積）との相関はほとんど見られなかった。この結果は先行研究、飯田ほか（2006）や藤山ほか（2003）とは異なっているが、その理由として本研究での試験木は *Casuarina* という広葉樹（散孔材）であるのに対して、両先行研究はどちらも針葉樹であるアカマツとヒノキを試験木としている。広葉樹（特に散孔材）の辺材中に存在する樹液流速は辺材深さが深くなるにしたがって減衰するという特徴があるが、針葉樹では辺材中を一様な速さの樹液流速が流れている。これにより針葉樹では DBH 等の樹木の規模を表す特徴と樹液流速の分布に明確な相関があるが、広葉樹では樹液流速の辺材中の分布が不規則なためこういった木の特徴との相関は低くなる。したがって、単木蒸散量と木の特徴の相関も低くなったと考えられる。またこのことから、針葉樹と広葉樹の樹種の違いによって結果が異なるということが分かった。

Sakha 圃場の気象データから算出した E_{pm} と実測値 E_T のキャリブレーションを実測期間中

r_c が一定であるとして行った場合、 $r_c = 4.9 \text{ sec/m}$ となった。しかし、実測期間中の E_{pm} と E_T の時間変化はほとんど一致せず、 E_{pm} が E_T を表現できているとは言えなかった。Tan and Black (1976) によれば、群落抵抗 r_c は樹冠が乾いている場合には葉の生理的な環境応答特性によって複雑に変化するとある。また Stewart and Bruin (1984) は *Thetfort* 林において群落コンダクタンスは日射量、飽差、土壌の水分欠損に影響されることを示している。Lindroth (1985) も同様に、スコットマツ林において群落コンダクタンスの季節変化の調査を行い、日射量と飽差によってその大部分が説明されることを示した。これらの先行研究から r_c には少なくとも日変化が存在すると考えられるため、本研究では実測期間中 1 日ごとに r_c のキャリブレーションを行った結果、 E_{pm} と E_T の時間変化は良く一致した。また日によって r_c の値は $1.65 \leq r_c \leq 8.7$ の広い範囲でバラついていたため、このバラつきと VPD, $S \downarrow$, 雲量の相関を取ってみたが、それらに相関はなかった。

防風林の蒸発抑制効果の概算を Sakha 圃場において行った結果、防風林自体の蒸散量はそれによる蒸発抑制量に比べ 10^{-2} mm/day のスケールで小さかったため、防風林の植林によって圃場の蒸発散量が増加するという懸念は解消された。これにより防風林による農地の蒸発抑制効果の存在が推定されたとと言える。

謝辞

本研究を行うにあたって、筑波大学生命環境科学研究科の諸先生方を始め、単木蒸散量の算出に関する様々な助言を賜りました森林総合研究所水保全研究室の飯田真一さん、現地での代理観測を長期にわたり行って下さいましたカイロ大学の Dr. Rushdi、筑波大学生命環境科学研究科国際地縁技術開発科学専攻の星野亜季さんには多くのご指導と助言をいただきました。また現地での実地観測をはじめ、本研究を進める上で杉田研究室の方々、SATREPS (Science and Technology Research partnership for Sustainable Development) Research Project (supported by JST-JICA) の諸先生方には大変お力添えを頂きました。以上の方々に心から御礼申し上げます。

参考文献

- 飯田真一・小林義和・田中 正 (2003) : Granier 法を用いた樹液流速の長期連続測定. 水文・水資源学会誌 16, 13 – 22.
- 飯田真一・中谷 壮・田中 正 (2006) : 山地源流域の落葉広葉樹林における樹液流速測定に基づく林分蒸散量の評価. 水文・水資源学会誌 19, 7 – 16.
- 藤山洋介・廣瀬茂樹・大槻恭一・小川滋 (2005) : Granier 法による樹液流測定に基づくヒノキ林における蒸散量の推定 —御手洗水試験流域における観測例—. 九州大学演習林報告 86, 15 – 31.
- 熊谷朝臣 (2007) : 幹の中を流れる水から森林の蒸散を考える. 森林水文学, 森林水文学編集委員会編, 森北出版 110-130.
- 佐藤貴紀・田中延亮・井上淳・澤田春雄・渡部賢・鈴木雅一 (2010) : 愛知演習林のコナラを対象にした樹液流の染色実験の報告. 東京大学農学部演習林報告 49, 29 – 41.
- 瀧澤英紀・窪田順平・塚本良則 (1996) : 樹幹断面における樹液流速分布. 日本森林学会誌 78, 190 – 194.
- 福田敬広 (2010) : ナイルデルタの農地における蒸発散量の評価. 筑波大学第一学群自然科学類卒業論文.
- 杉田倫明・田中正 (2009) : 「水文科学」. 共立出版, 34 – 37.
- 鳥田宏行・根元征樹 (2002) : 防風林の疎密度と林帯幅に関する風洞実験. 日本森林学会誌 84, 85 – 90.
- 佐藤隆光・浦野慎一・武田知己 (2000) : 幅と密度の異なった防風林における風速分布の観測. 日本農業気象学会誌 56, 25 – 30.
- Helfer, F., Zhang, H., Lemckert, C. (2009) : Evaporation Reduction by Windbreaks: Overview, Modelling and Efficiency. Urban Water Security Research Alliance Technical Report No. 16.
- Garratt, J.R. (1992) : 「The atmospheric boundary layer」. Cambridge University Press, 90 – 93.

- Kumagai, T., Aoki, S., Otsuki, K., Usami, Y. (2009) : Impact of stem water storage on diurnal estimates of whole-tree transpiration and canopy conductance from sap flow measurements in Japanese cedar and Japanese cypress trees. *Hydrological Processes* 23, 2335 – 2344.
- Kumagai, T., Tateishi, M., Shimizu, T., Otsuki, K. (2008) : Transpiration and canopy conductance at two slope positions in a Japanese cedar forest watershed. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 1444 – 1455.
- 小林義和・田中正 (2001) : TDR 法による樹幹貯留水分の測定. *水文・水資源学会誌* 14, 207 – 216.
- Ping, L., Laurent, U., Ping, Z. (2004) : Granier's Thermal Dissipation Probe (TDP) Method for Measuring Sap Flow in Trees: Theory and Practice. *Acta Botanica Sinica* 46, 631 – 646.
- 北村義信・渡辺紹裕・新保義剛 (1994) : エジプトの水資源と灌漑排水. *農業工学研究所技報* 189, 75 – 99.
- Griffiths, J.F. (1972) : Climates of Africa. *World Survey of Climatology* 10, 1 – 35.
- Iida, S., Tanaka, T. (2010) : Effect of the span length of Granier-type thermal dissipation probes on sap flux density measurements. *Annals of Forest Science* 67, 1 – 10.
- 服部重昭・玉井幸治・阿部敏夫 (1993) : ヒノキ林における土壌水分と飽差が蒸発散に及ぼす影響. *日本森林学会誌* 75, 216 – 224.
- 飯田真一・清水晃・壁谷直記・延廣竜彦・玉井幸治・清水貴範 (2010) : 筑波森林水文試験地のスギ林分における樹幹流量の個体間差. *関東森林研究* 61, 207 – 210.
- Dr. Mahmoud, A.Z. (2005) : Water for the Future –National Water Resources Plan- . Ministry of Water Resources and Irrigation Planning Sector.. 1 – 61
- 牛山朋来・井上聡・芝池博幸 (2009) : 数値シミュレーションへの適用を目的とした風洞実験と数値実験による防風ネットの防風特性調査. *農業気象学会誌* 65, 273-281
- 小澤創・武井利之・川口知穂 (2003) : 防風林等の造成・管理技術の確立. *福島県林業研究センター研究報告* 36, 1-10

表 1 防風林の模型の LAD と林帯幅 (鳥田ほか, 2002)

	LAD	林帯幅 (cm)	列数
密 3 列	74.4	13.5	3
密 1 列	74.4	4.5	1
中 3 列	52.2	13.5	3
中 1 列	52.2	4.5	1
疎 3 列	37.8	13.5	3
疎 1 列	37.8	4.5	1

表 2 観測項目

観測項目	測器	観測高度	サンプリング時刻	平均化時間	ロガー出力時刻
sapflow sensor センサー 間の 温度差値 ΔT [°C]	sapflow sensor (CPU-SPF-M)	1.3m	毎 30 秒	前 10 分	毎時 0, 10, 20, 30, 40, 50 分
気温 T [°C], 相対湿度 r [%]	温湿度センサー (CVS-HMP-155D)	0.5, 1.0, 3.0 m	毎 10 秒	前 30 分	毎時 0, 30 分
下向き短波放射 S_{\downarrow} [W/m ²]	4 成分放射収支計 (CHF-NR01)	4.20 m	毎 10 秒	前 30 分	毎時 0, 30 分
風速 u [m/s]	超音波風速計 (CPR-R3-50)	5.78 m	毎 10 Hz	前 30 分	毎時 0, 30 分
気圧 p [hPa]	気圧計 (CVS-PTB210)	5.78 m	毎 10 Hz	前 30 分	毎時 0, 30 分
地中熱流量 G [W/m ²]	地中熱流板 (CHF-HFP-01)	-0.03 m	毎 10 秒	前 30 分	毎時 0, 30 分
二酸化炭素濃度 ρ_c [mmol/m ³]	CO ₂ /H ₂ O 変動計 (C-CS7500)	5.78 m	毎 10 Hz	前 30 分	毎時 0, 30 分

表 3 富田農園内の *Casuarina* の DBH と樹高 h の観測値

サンプル番号	DBH (cm)	樹高 h (m)
1	71.34	12.3
2	78.34	15.2
3	40.45	11.2
4	45.54	8.6
5	56.37	12.8
6	45.86	12.6
7	40.76	10
8	49.36	15.6
9	26.75	10.8
10	40.45	10.8
11	57.96	12
12	28.98	9.4
13	41.40	11
14	51.27	11
15	31.85	9.6
16	50.00	17
17	43.31	16
18	52.55	16
19	54.14	19
20	48.73	
21	33.76	18
22	40.76	14
23	34.39	16
24	36.31	17.6
25	48.73	17.4
26	50.64	20
27	54.46	14.4
28	57.64	18.4
29	5.10	4.8
30	3.50	4.4
31	4.46	

サンプル番号	DBH (cm)	樹高 h (m)
32	4.46	4.6
33	5.73	6.7
34	5.41	5
35	67.52	18
36	81.85	19
37	44.27	12
38	3.82	4
39	2.55	2.5
40	21.34	31
41	55.10	20
42	51.91	19.6
43	32.17	14
44	27.71	10
45	45.22	14
46	3.50	3
47	50.32	13
48	63.06	20
49	58.60	19
50	55.73	17.5
51	6.05	5
52	13.69	11
53	30.25	13.4
54	6.37	6.6
55	20.06	11
56	13.69	11
57	14.01	6
58	29.62	14
59	17.83	12.4
60	12.10	10
61	15.92	12
62	7.96	8.5
63	16.88	13

サンプル番号	DBH (cm)	樹高 h (m)
64	28.66	12.5
65	9.87	11
66	14.65	12
67	11.78	10
68	14.65	15.9
69	19.11	15.2
70	28.34	15.6
71	13.69	12.2
72	6.69	6.8
73	14.65	10.4
74	12.42	11.8
75	19.75	15.8
76	8.92	10.6
77	21.97	12.6
78	4.78	5
79	16.24	14.9
80	18.15	12.8
81	9.55	8.4
82	12.10	16.2
83	16.56	13.6
84	14.97	14.4
85	24.84	19.4
86	3.82	3.4
87	21.66	19
88	12.10	7
89	13.69	10
90	7.64	6.8
91	17.52	11.8
92	14.33	11.2
93	22.61	11.1
94	15.61	9.3
95	14.65	8.1

サンプル番号	DBH (cm)	樹高 h (m)
96	4.14	3.4
97	23.89	11.2
98	26.43	10.1
99	23.57	12.3
100	31.21	10.5
101	33.76	10.4
102	24.20	13.2
103	23.25	9.3
104	4.78	4.8
105	33.44	11
106	15.92	10.2
107	3.50	3.5

表 4 富田農園内の *Casuarina* の DBH の度数分布表

DBH (cm)	個数 (本)	各試験木が該当する階級
0-15	38	※
15-30	29	←6 番
30-45	17	←3 番
45-60	21	←11 番
60-75	4	←5 番
75-	3	←4 番
計	112	

※は DBH が小さい植樹間もない木だったため sapflow sensor の設置が不可能であった。

表 5 各サンプルの主な特徴

サンプル番号	11 番	6 番	5 番	4 番	3 番
DBH (cm)	51.6	27.8	67.6	82.8	43.4
樹高 (m)	12.9	9.8	16	6.3	11
樹冠投影面積 (m ²)	53.5	8	43.8	76.5	24

表 6 一日ごとのキャリブレーションから得られた r_c

	r_c (sec/cm)
8/3	2.9
8/4	4
8/5	8.7
8/6	4.6
8/7	3.8
8/8	4.7
8/9	4.5
8/10	5
8/11	8.1
8/12	8.5
8/13	8.8

表 7 r_e に対する VPD, T , Rn の重回帰分析結果

回帰統計	
重相関 R	0.85
重決定 R ²	0.73
補正 R ²	0.73
標準誤差	0.51
観測数	196

分散分析表

	自由度	変動	分散	観測された分散比
回帰	3	134	45	173
残差	192	50	0.26	
合計	195	183		

	係数	標準誤差	t
切片	6.7	1.3	5.3
VPD	0.14	1.6×10^{-2}	8.7
Rn	3.0×10^{-3}	2.0×10^{-4}	15.0
T	-0.30	5.0×10^{-2}	-6.1

(26)



写真 1 サンプル 11 番に設置した sapflow sensor



写真 2 サンプル 6~3 番に設置した sapflow sensor



写真 3 サンプル 11 番



写真 4 サンプル 6 番



写真 5 サンプル 5 番



写真 6 サンプル 4 番



写真 7 サンプル 3 番



写真 8 染色液注入器（筑波大学陸域環境センター内
アカマツ林での予備実験にて撮影. 現地でも全く同様の
器具で実験を行った.）



写真 9 AWS

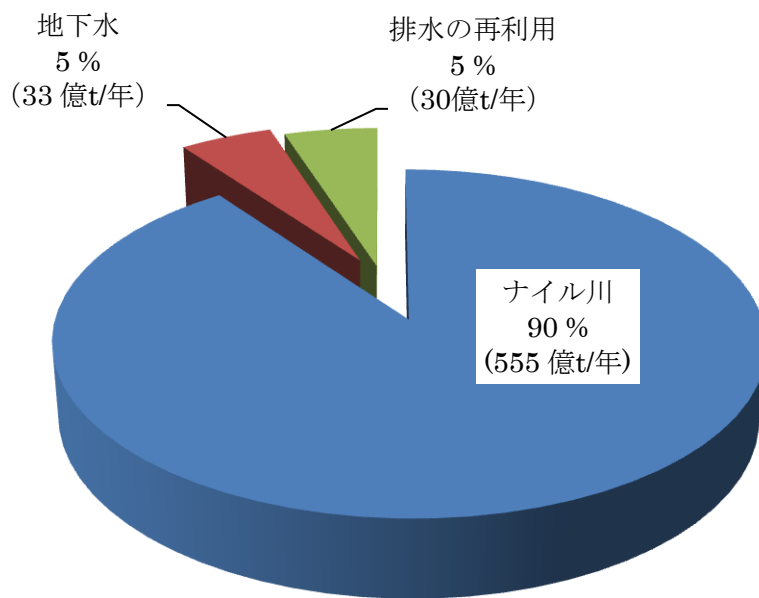


図 1 エジプトにおける利用可能な水資源の割合 (北村ほか, 1994 より作成)

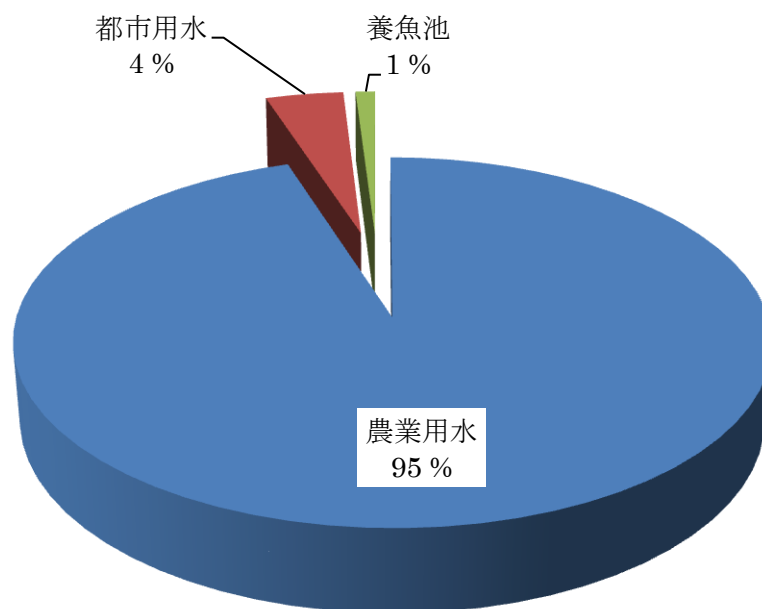


図 2 水資源の利用用途の割合 (Arab Republic of Egypt Ministry of Water Resources and Irrigation Planning Sector, 2005 より作成)

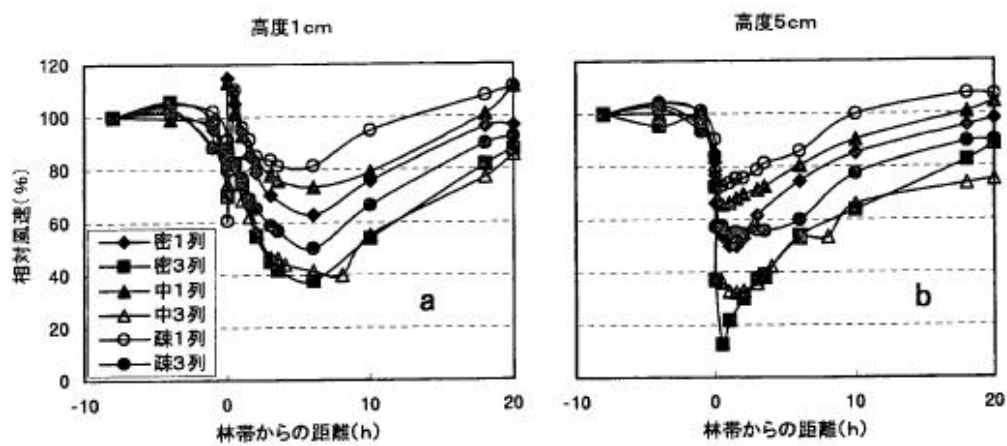


図 3 林帯幅と疎密度の異なる防風林の防風特性 (鳥田ほか, 2002)

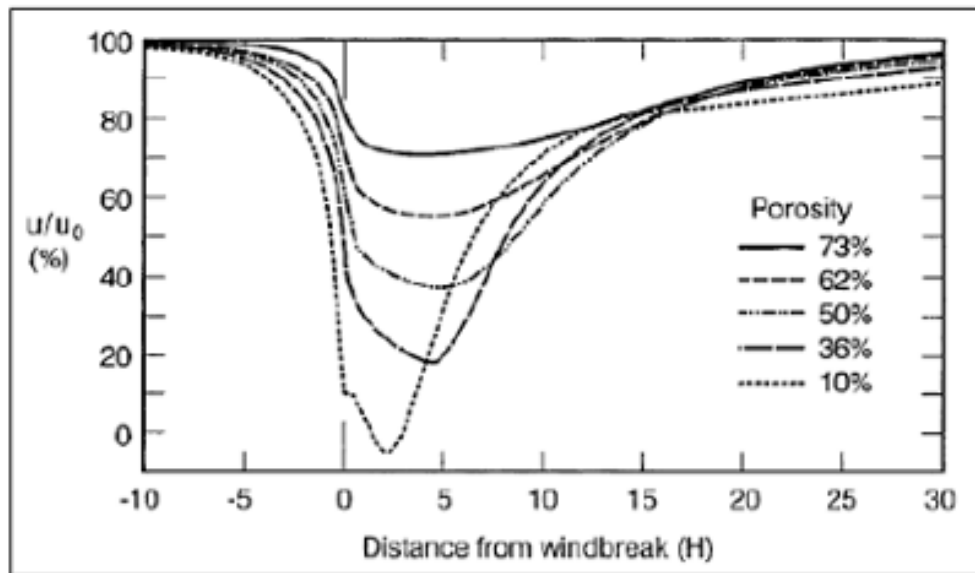


図 4 空隙率の異なる防風林の防風特性 (Wang and Takle, 1997, Cleugh, 1998)

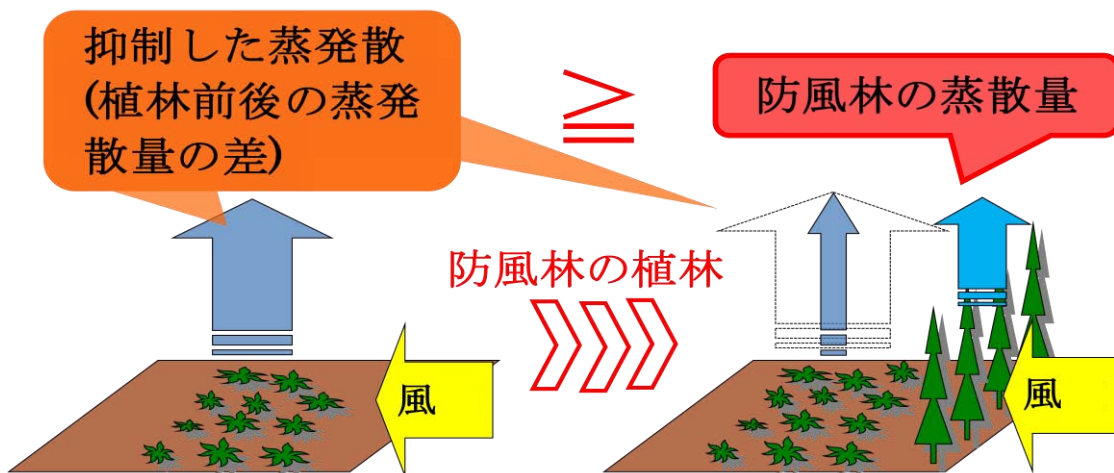


図 5 防風林による蒸発抑制効果の模式図

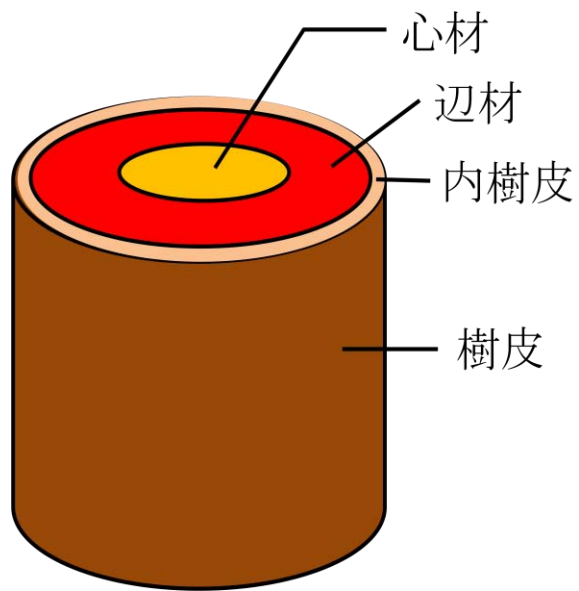


図 6 樹幹断面の模式図

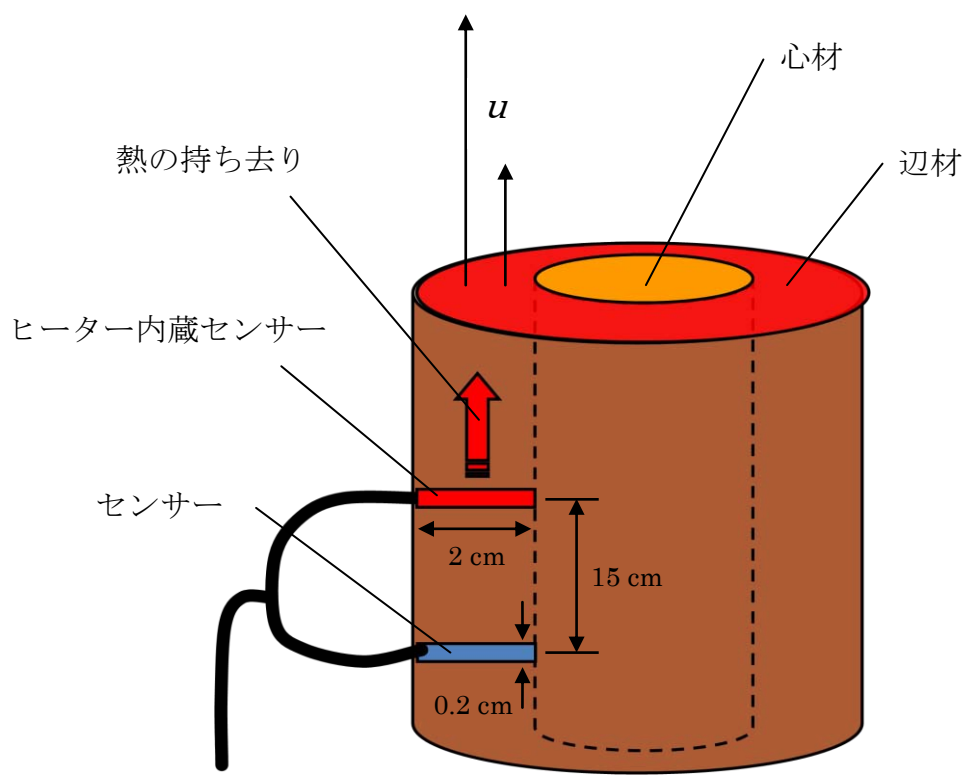
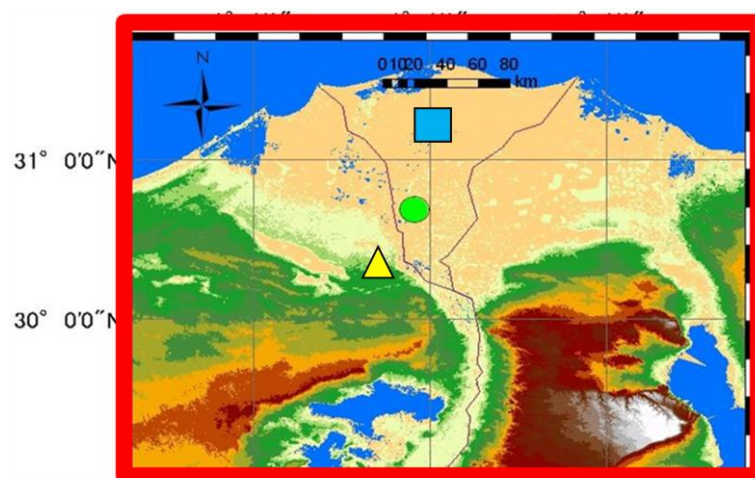


図 7 sapflow sensor 設置の模式図



凡例: 標高 (m)

富田農園	600 - 700	100 - 150
Sakha	500 - 600	50 - 100
W. N.	400 - 500	30 - 50
1000 - 1300	300 - 400	10 - 30
900 - 1000	250 - 300	1 - 10
800 - 900	200 - 250	-221 - 1
700 - 800	150 - 200	

図 8 観測地点とナイルデルタの地形図
(凡例 W. N. は Wadi El Natroon の略称)

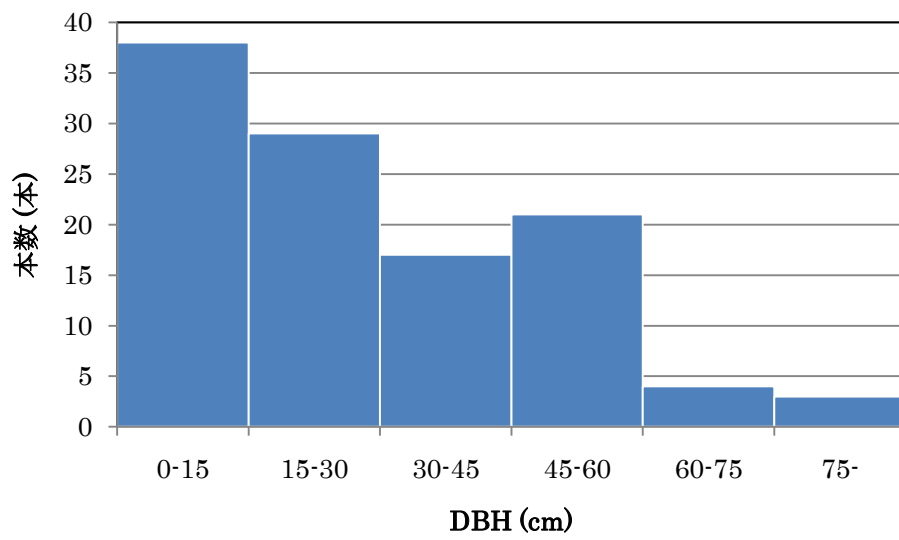


図 9 富田農園にある *Casuarina* の DBH のヒストグラム

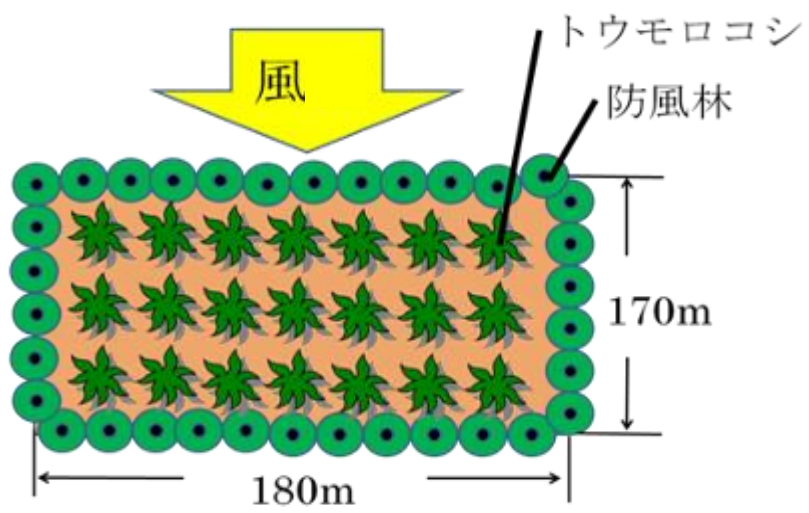


図 10 防風林による蒸発抑制効果の推定を行う圃場の模式図

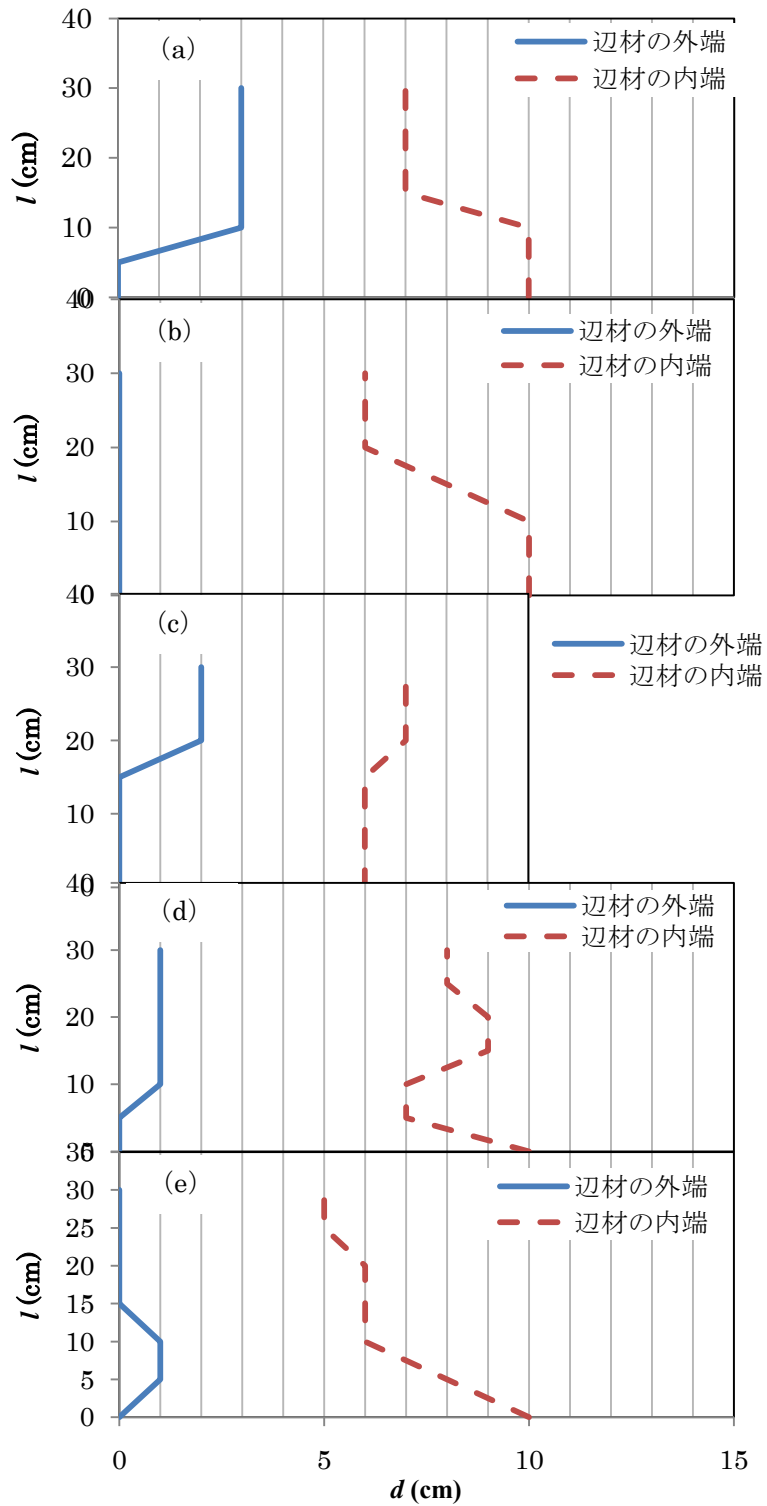


図 11 染色実験結果

横軸 d : 樹皮からの水平深さ (cm), 縦軸 l : 染色液注入位置からの鉛直方向の距離 (cm)

(a) 11番 (b) 6番 (c) 5番 (d) 4番 (e) 3番

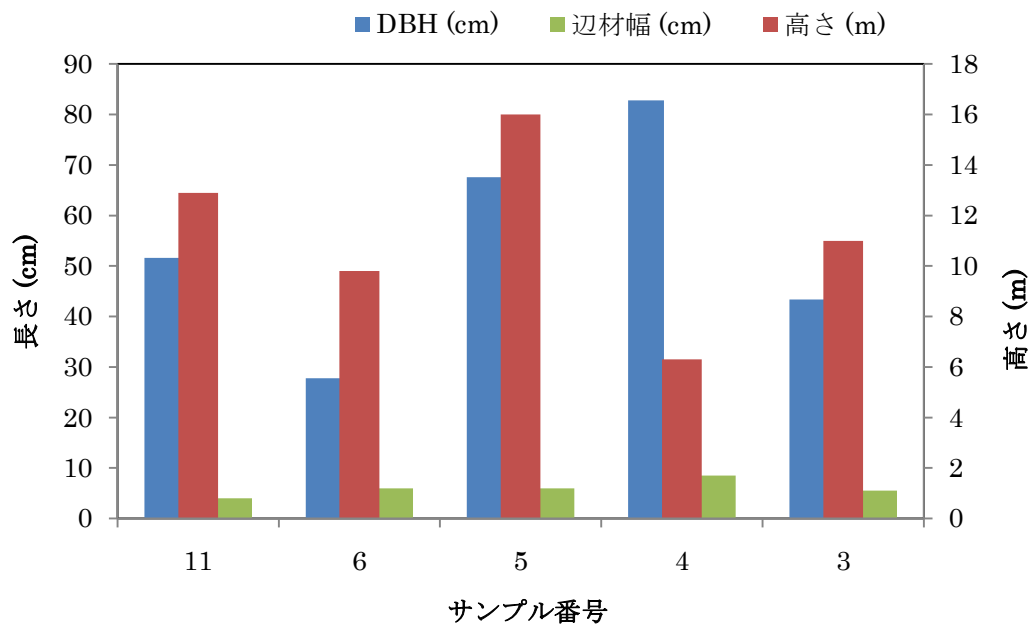


図 12 各サンプルの DBH, 樹高, 辺材幅
 DBH, 辺材幅は左縦軸 (cm), 高さ (樹高) は右縦軸 (cm)

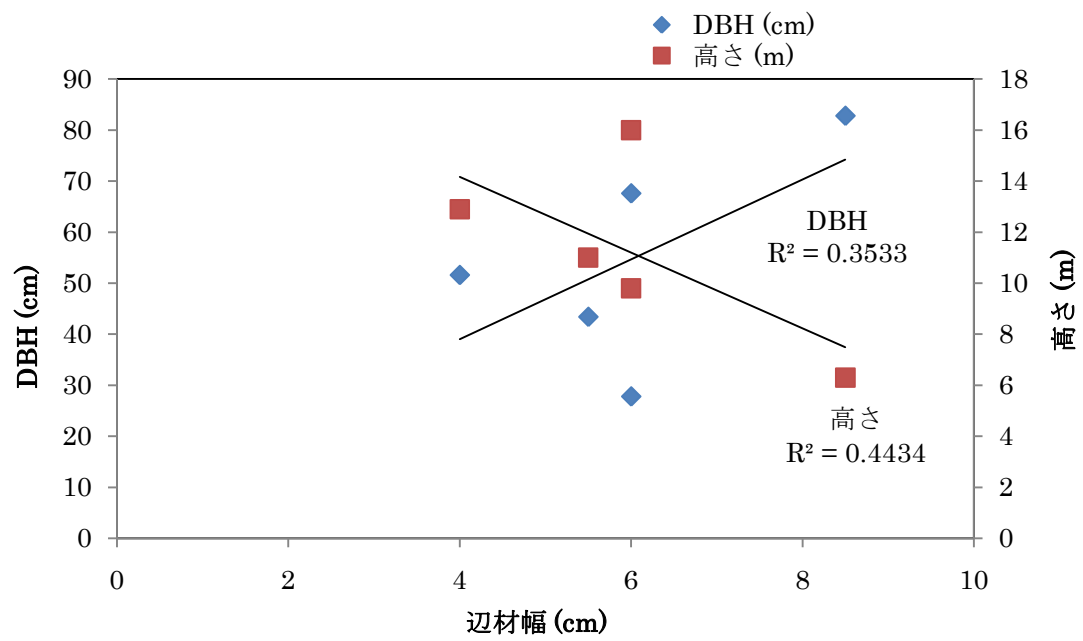


図 13 辺材幅と DBH, 辺材幅と高さ (樹高) の相関 (DBH は左縦軸 (cm), 高さ (樹高) は右縦軸 (m))

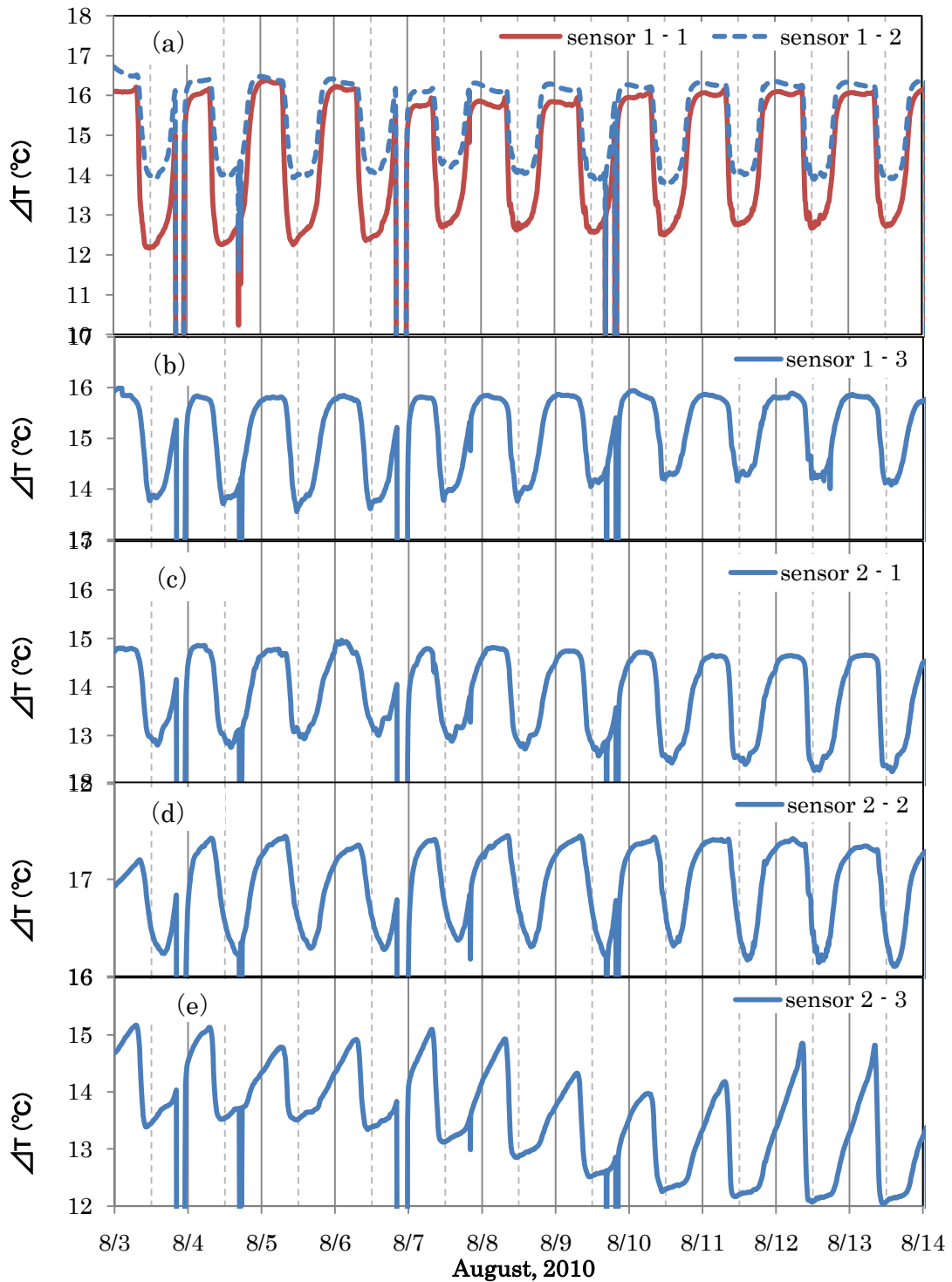


図 14 各 sensor で観測した ΔT の時間変化

11 番にのみ辺材深さが異なる 2 対の sensor を設置 (sensor 1 - 1 は辺材の外側, sensor 1 - 2 は辺材の内側. 他のサンプルには 1 対の sensor のみ設置.).

(a) 11 番 (b) 6 番 (c) 5 番 (d) 4 番 (e) 3 番

横軸の実線は 0 時, 点線は 12 時を示す.

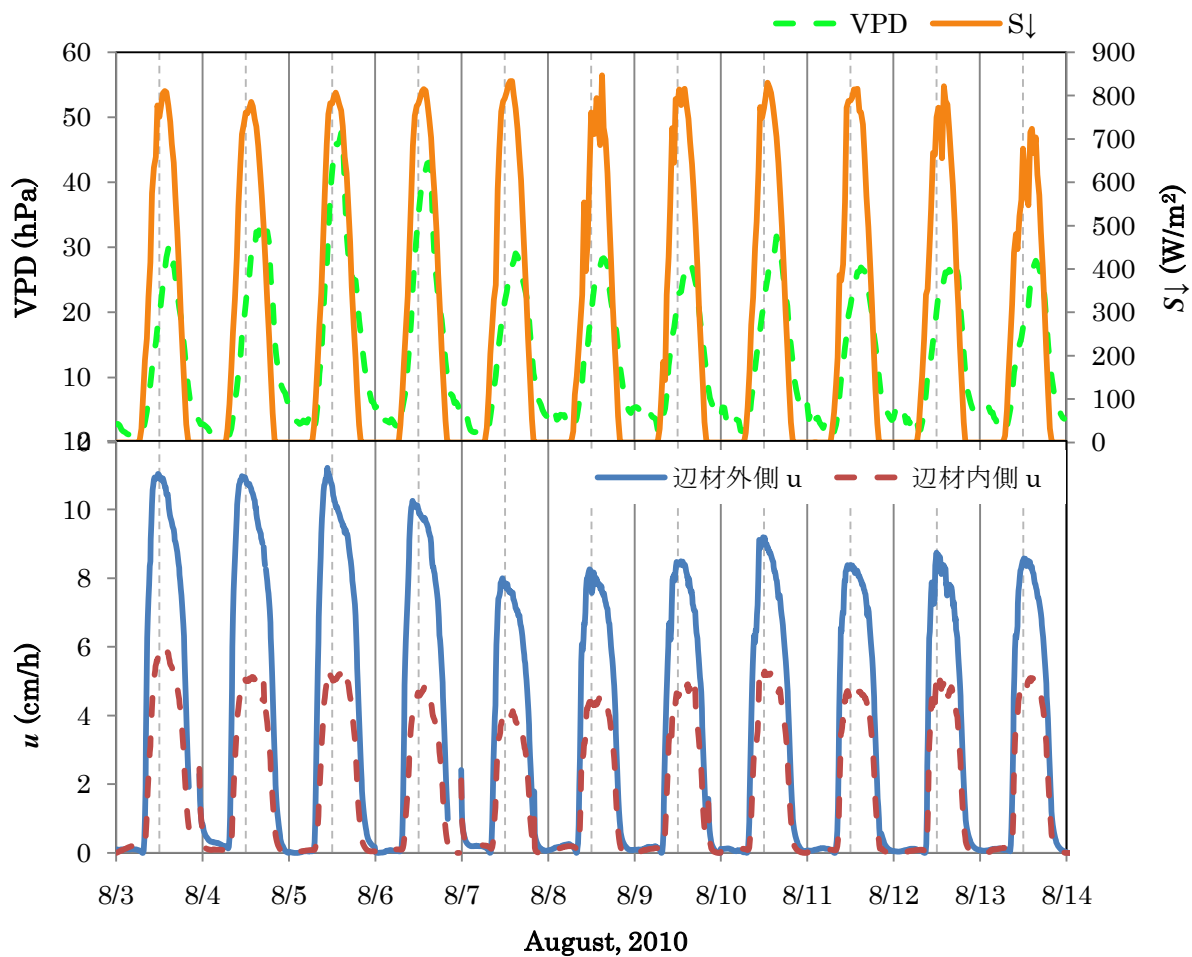


図 15 Sakha で観測した VPD と下向き短波放射の時間変化と、サンプル 11 番の辺材内側・外側の u の時間変化 (実線が目盛線は 0 時, 点線は 12 時を示す.)

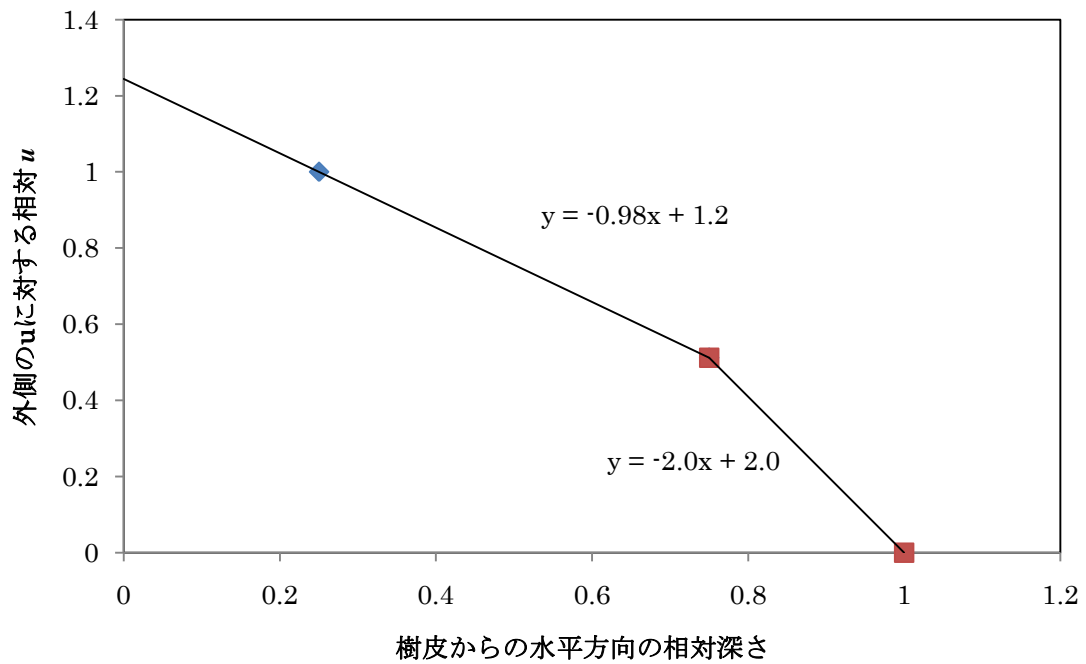


図 16 サンプル 11 番の辺材中の u の分布

横軸：樹皮を 0, 辺材の内端を 1 とした樹皮からの水平方向の相対深さ

縦軸：外側の sensor 1-1 から得られた u を 1 とした辺材中の相対 u

(3つのプロットは左から sensor 1-1 の u の実測値, sensor 1-2 の u の実測値, 辺材内端の $u = 0$ を相対化した値)

2 式の直線は 3 点を結んだもので, 相対 u と相対深さの関係式

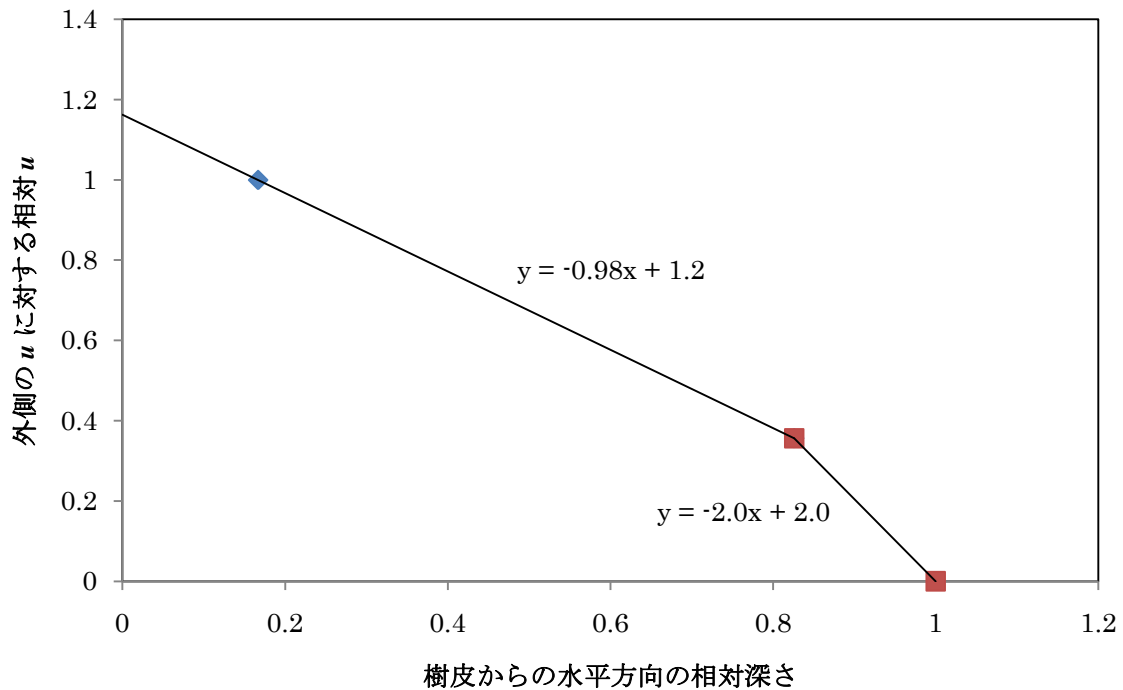


図 17 サンプル 6 番の辺材中の u の分布

軸は 11 番と同様.

実測値は辺材外側の u (3 プロットが一番左の点) のみで, その u を 1 として 11 番で得た 2 直線に代入し, その交点から外側の u の実測値に対する辺材内側の相対 u を求めた. 左側の直線は 11 番のものと同じの傾きを与え, 右側の直線は傾き・切片

ともに

11 番と同一.

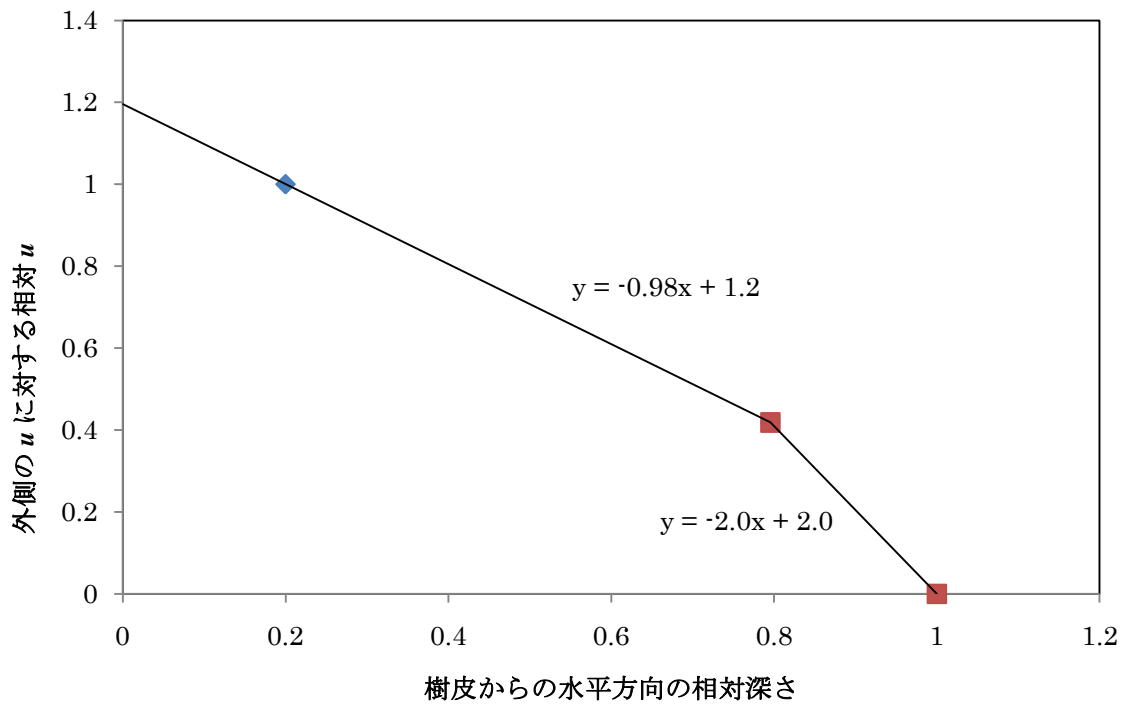


図 18 サンプル 5 番の辺材中の u の分布

軸は 11 番と同様.

実測値は辺材外側の u (3 プロットが一番左の点) のみで, その u を 1 として 11 番で得た 2 直線に代入し, その交点から外側の u の実測値に対する辺材内側の相対 u を求めた. 左側の直線は 11 番のものと同じの傾きを与え, 右側の直線は傾き・切片

ともに

11 番と同一.

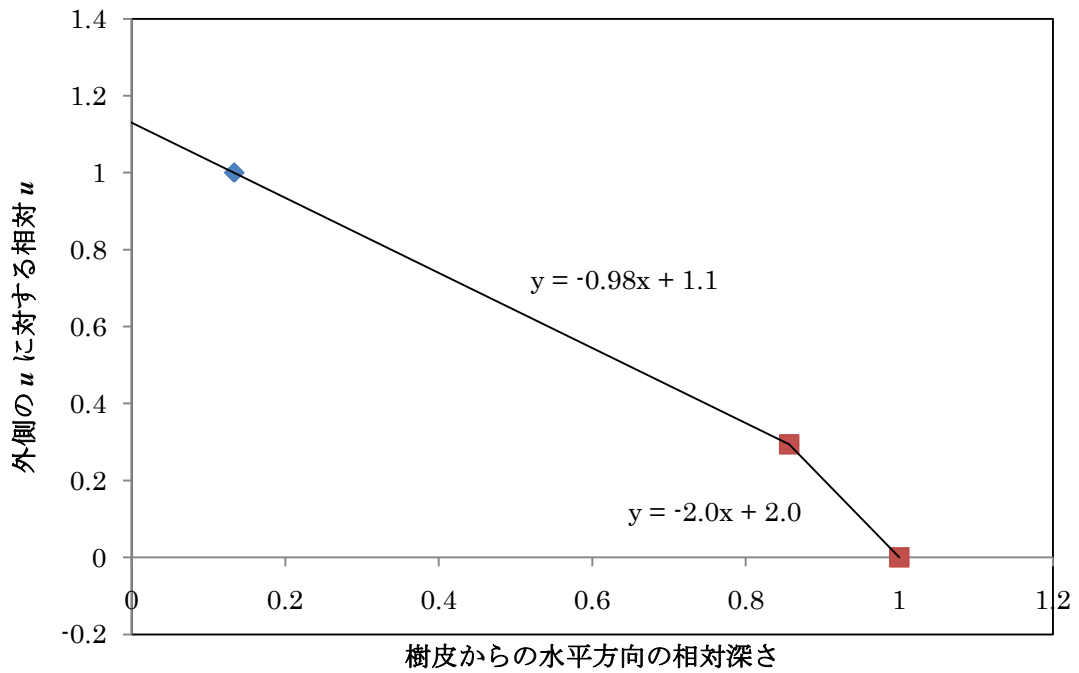


図 19 サンプル 4 番の辺材中の u の分布

軸は 11 番と同様.

実測値は辺材外側の u (3 プロットが一番左の点) のみで, その u を 1 として 11 番で得た 2 直線に代入し, その交点から外側の u の実測値に対する辺材内側の相対 u を求めた. 左側の直線は 11 番のものと同じの傾きを与え, 右側の直線は傾き・切片

ともに

11 番と同一.

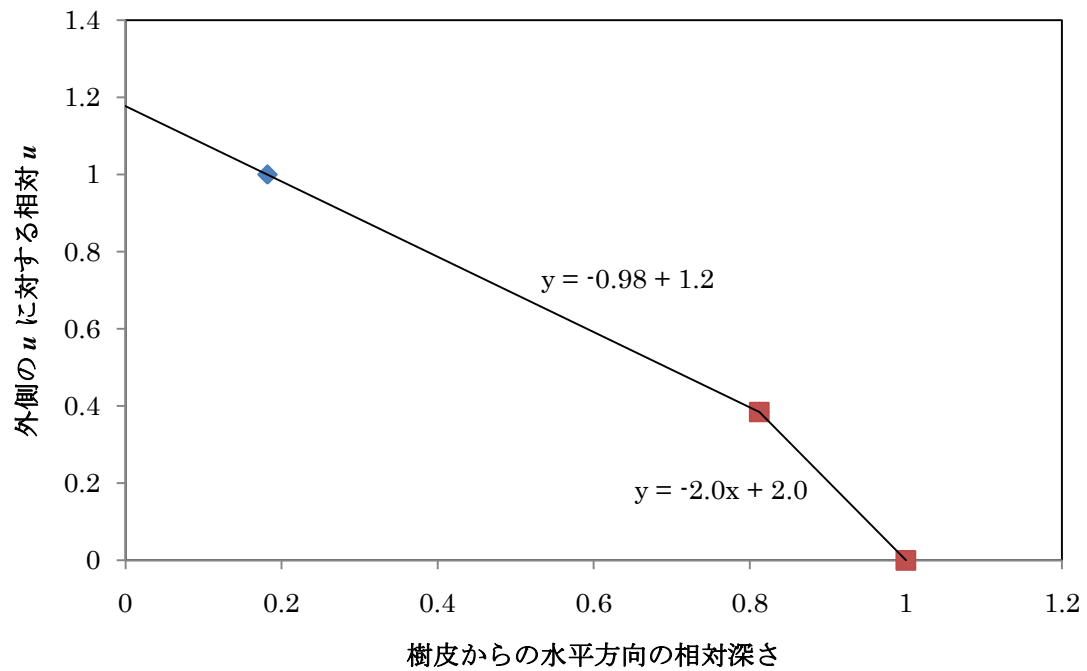


図 20 サンプル 3 番の辺材中の u の分布

軸は 11 番と同様.

実測値は辺材外側の u (3 プロットが一番左の点) のみで, その u を 1 として 11 番で得た 2 直線に代入し, その交点から外側の u の実測値に対する辺材内側の相対 u を求めた. 左側の直線は 11 番のものと同じの傾きを与え, 右側の直線は傾き・切片

ともに

11 番と同一.

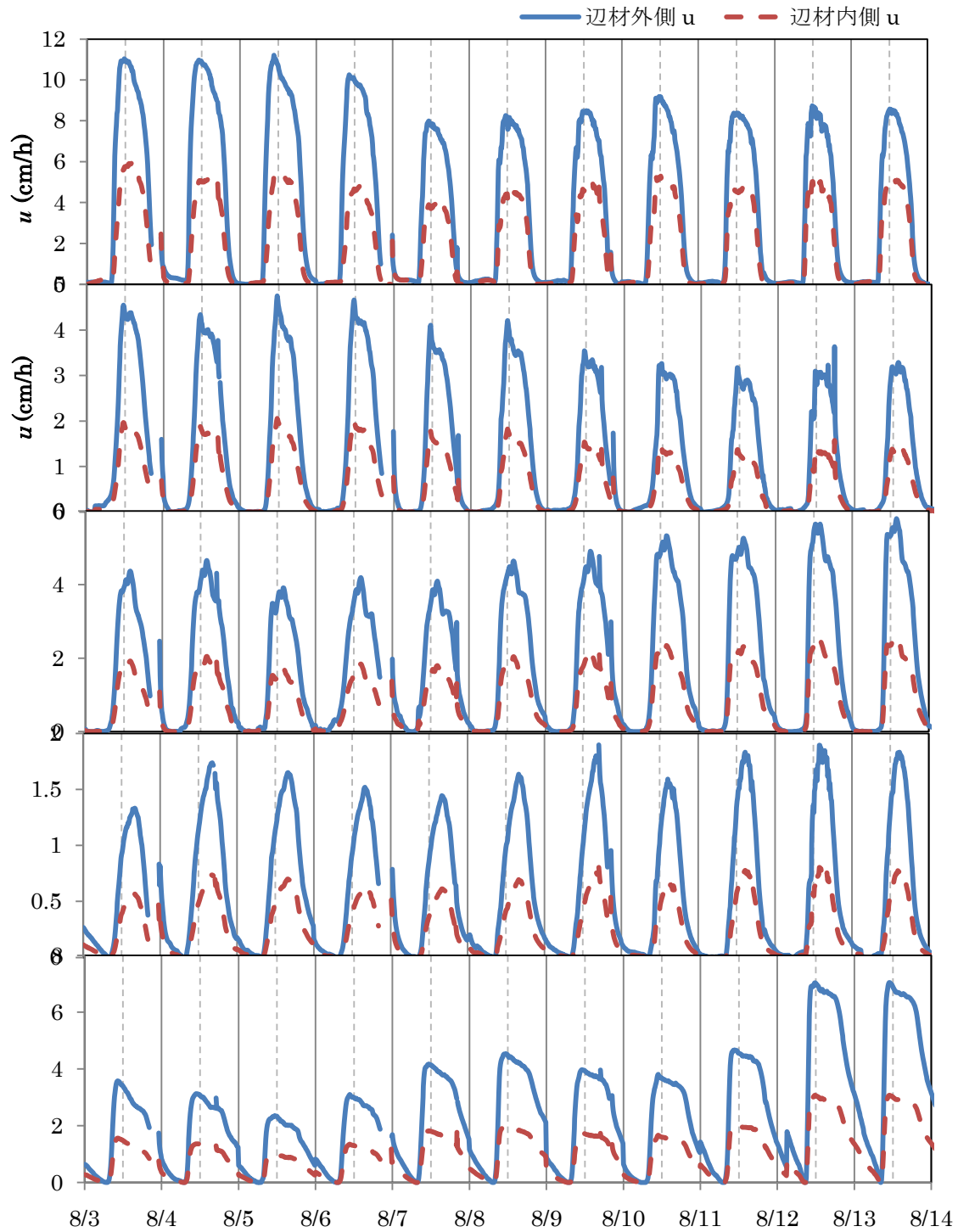


図 21 サンプル 11～3 番の辺材外側の u ，内側の u の時間変化

図 18～21 で 2 直線と横軸に囲まれる面積を相対深さ 0.5 で分けたときの面積比が
外側相対 u と内側相対 u の比であるとしてサンプル 6～3 の内側 u を算出。

横軸の実線は 0 時，点線は 12 時を示す。

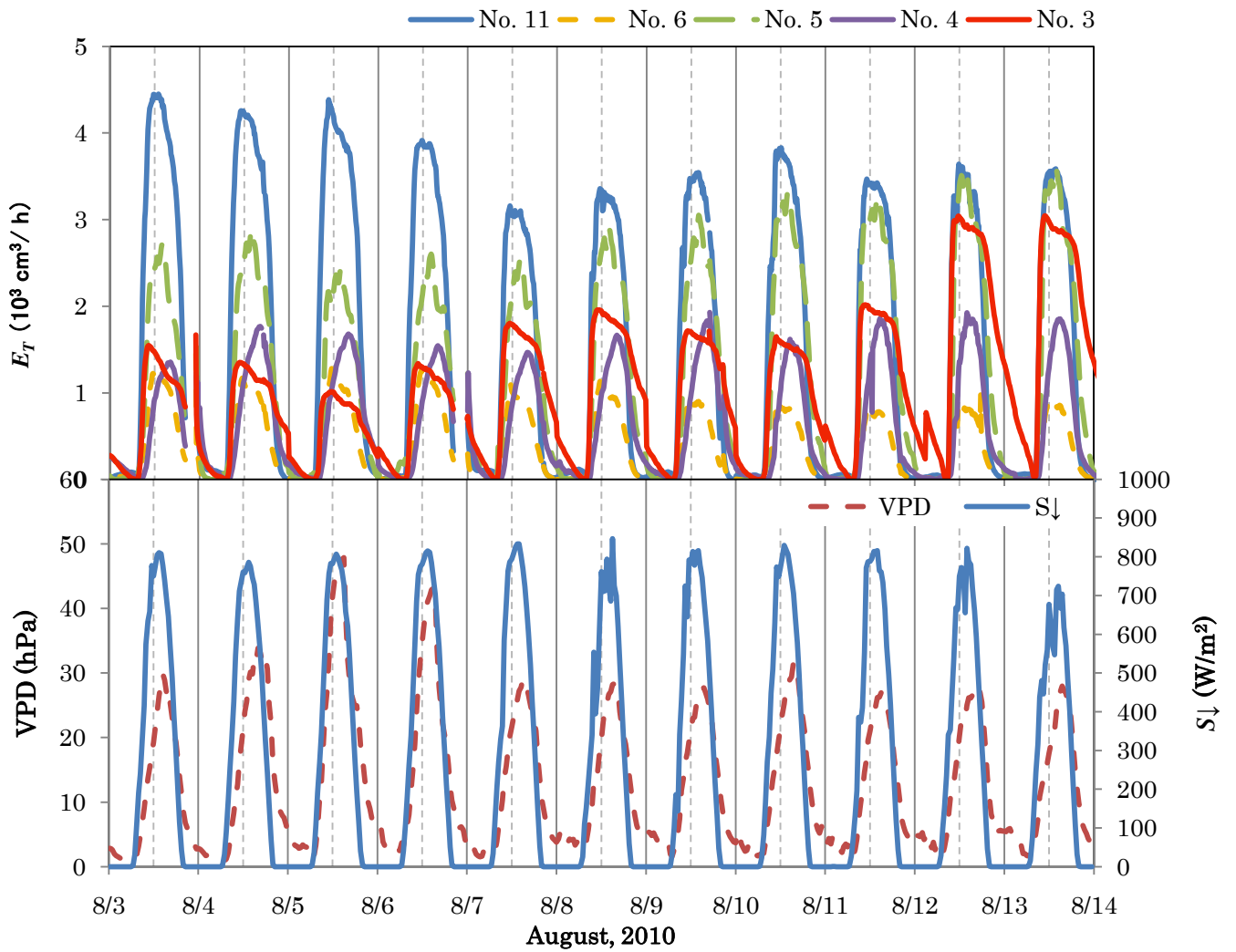


図 22 各サンプルの E_T (cm^3/h) の時間変化と VPD, $S\downarrow$ の時間変化

横軸の実線は 0 時, 点線は 12 時を示す.

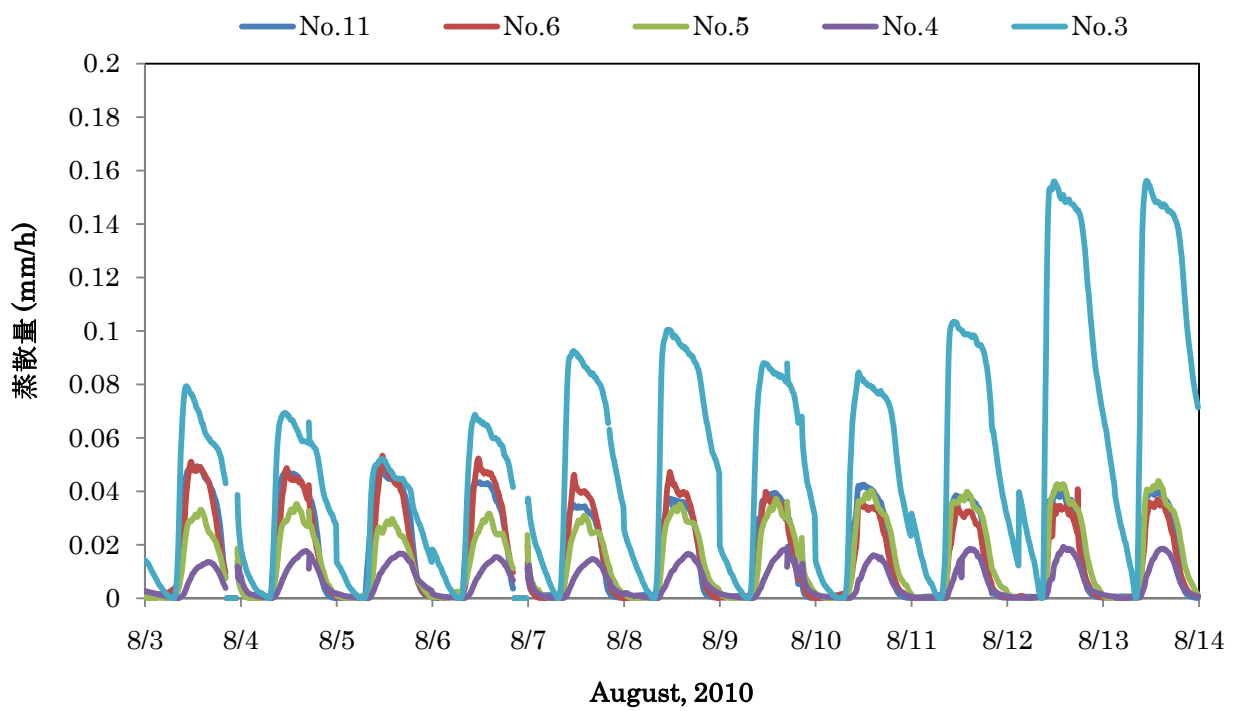


図 23 各サンプルの E_T (mm/h) の時間変化

横軸の実線は 0 時，点線は 12 時を示す。

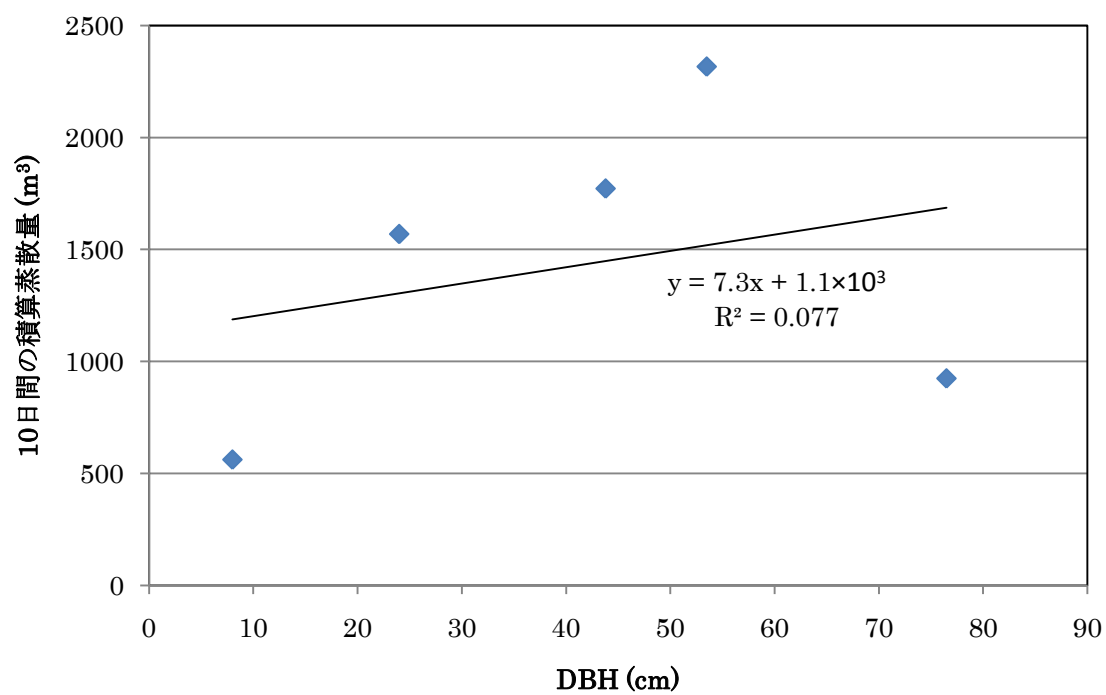


図 24 E_T と DBH の相関

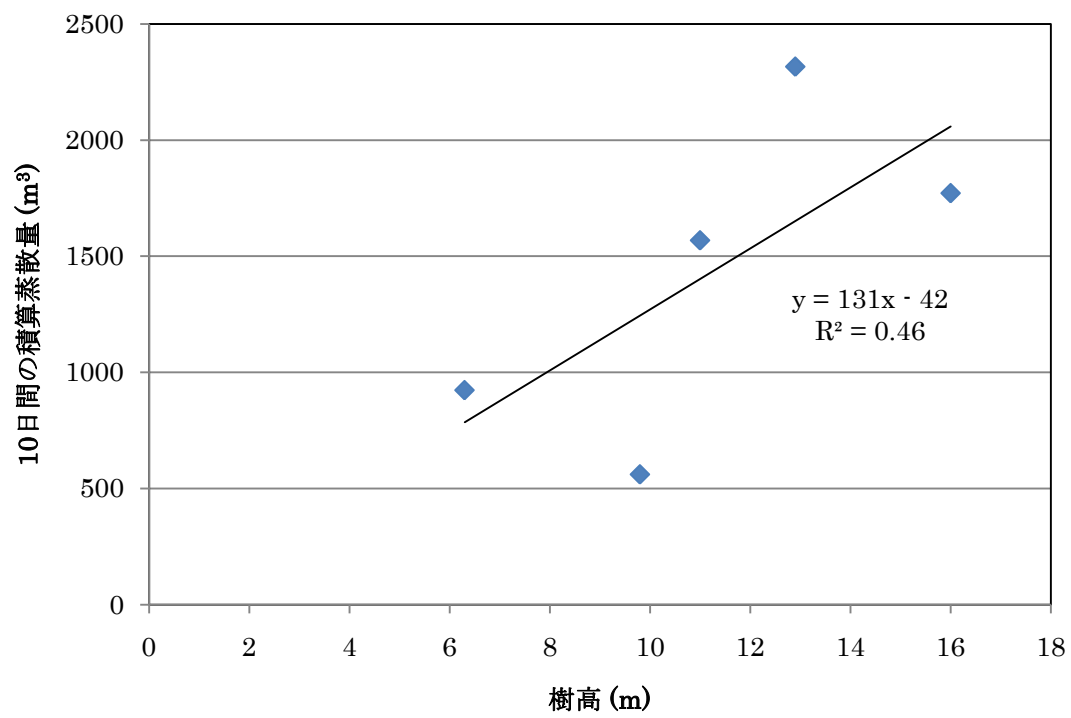


図 25 E_T と樹高の相関

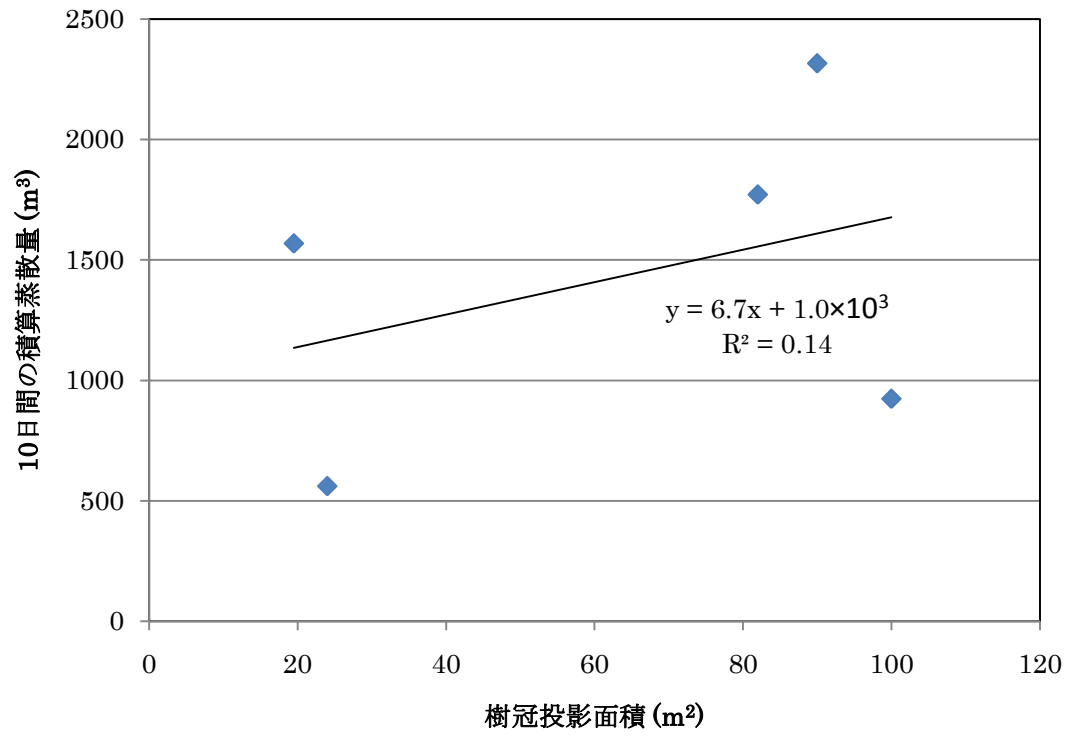


図 26 E_T と樹冠投影面積の相関

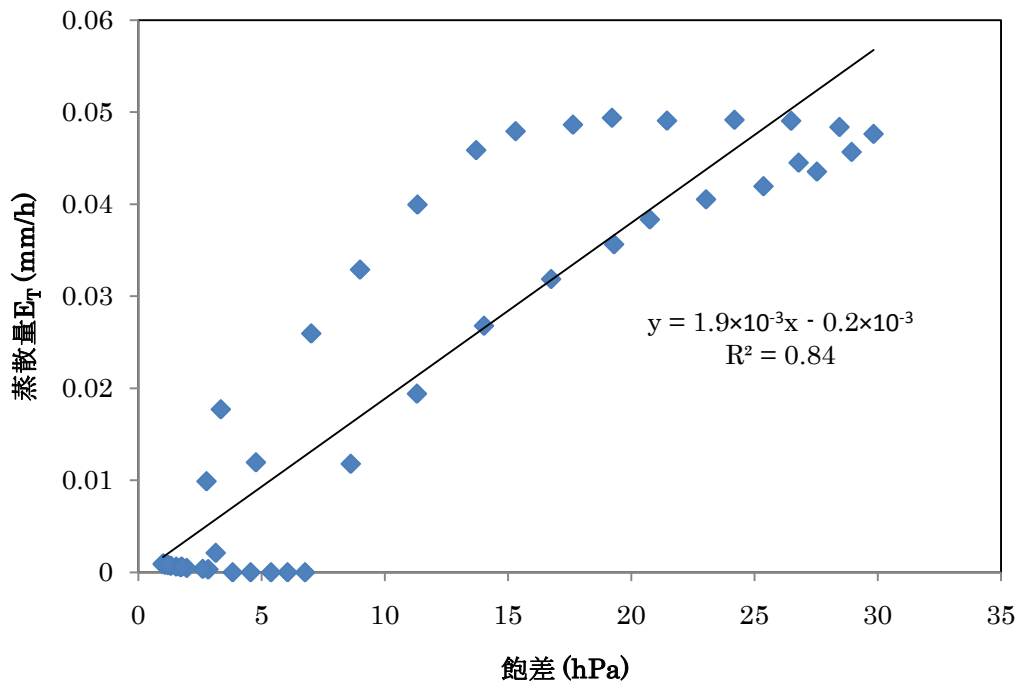
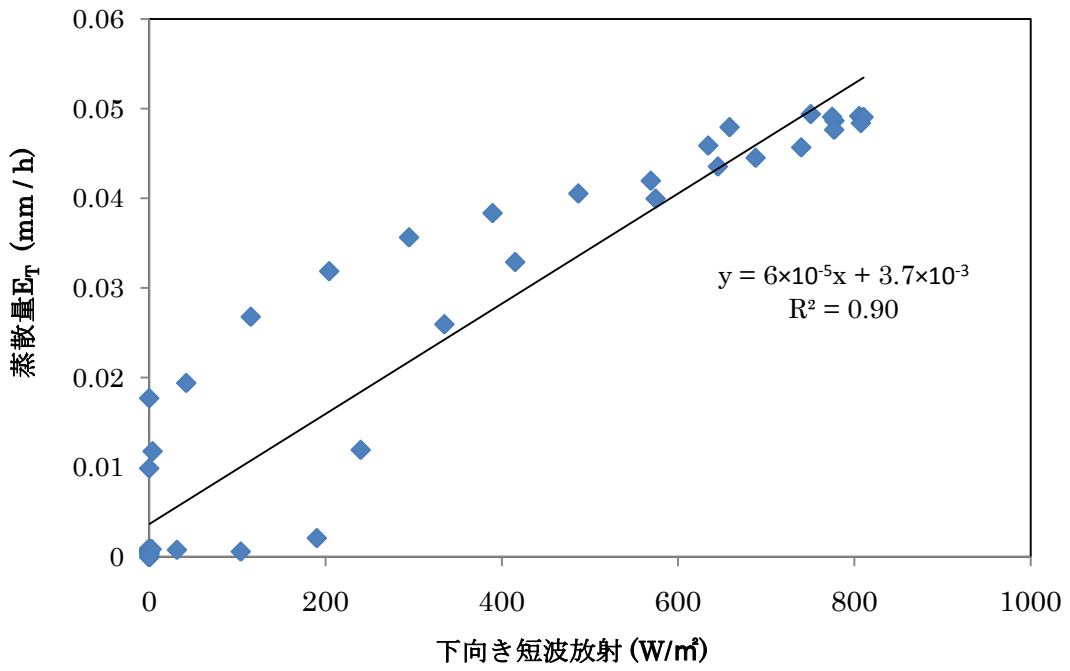


図 27 サンプル 11 番の 8 / 3 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

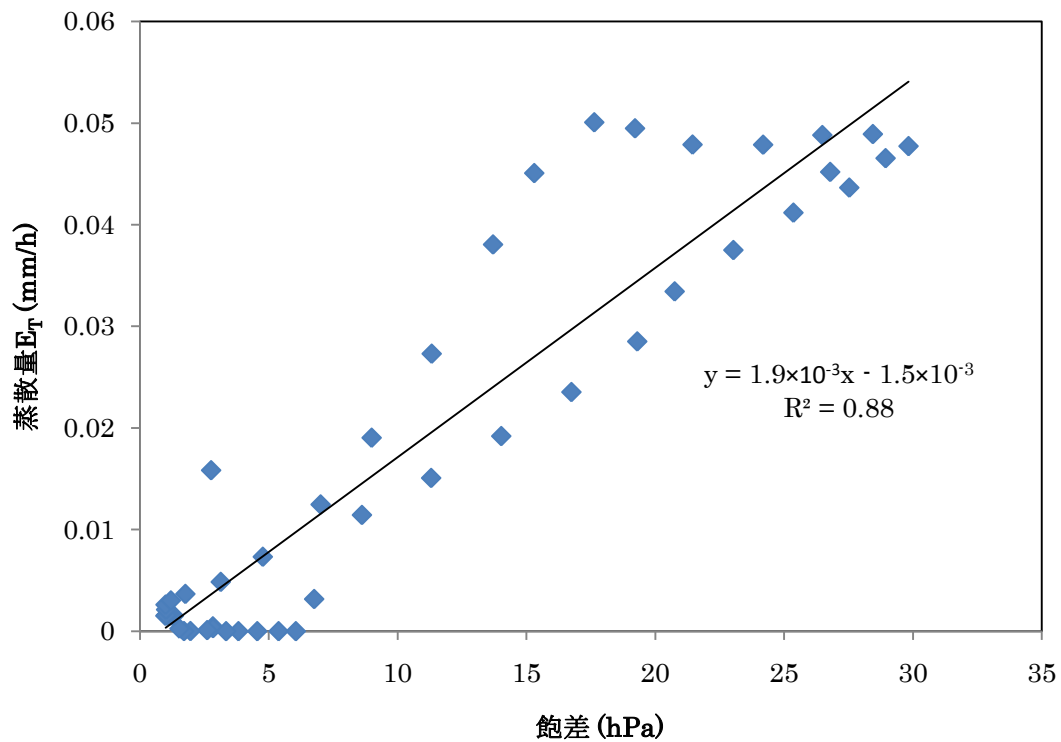
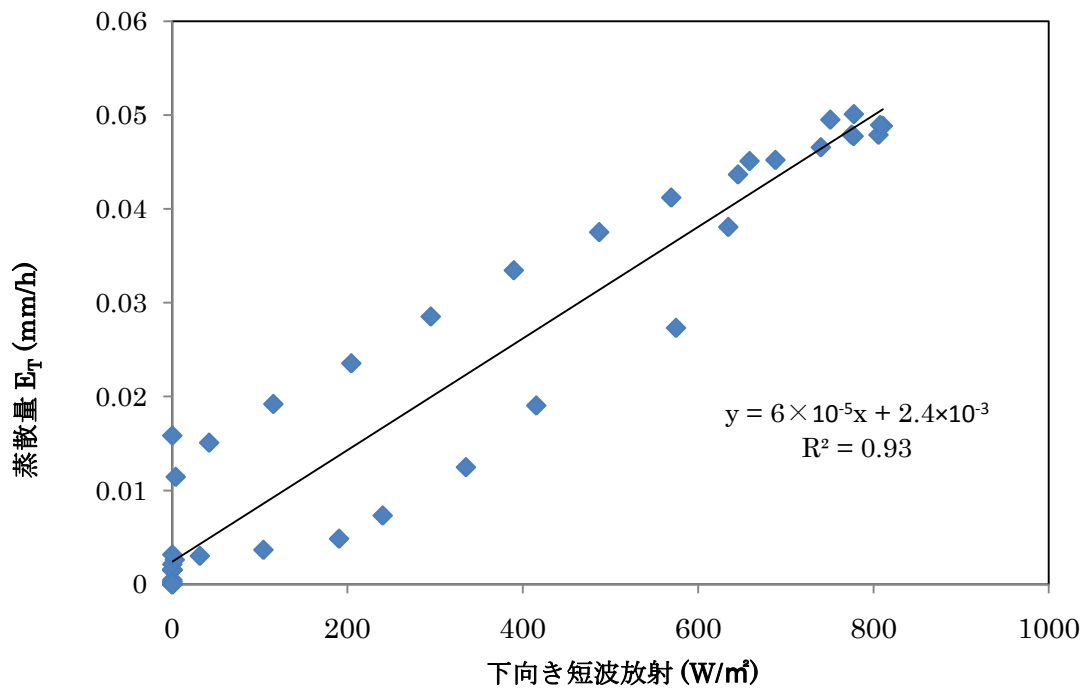


図 28 サンプル 6 番の 8/3 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

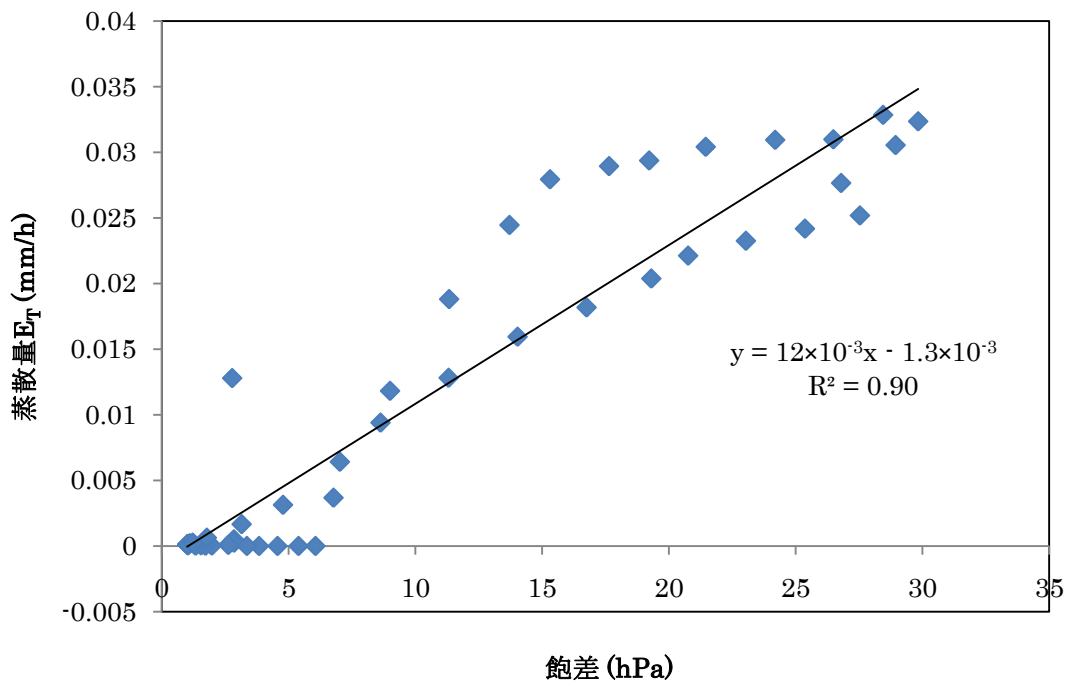
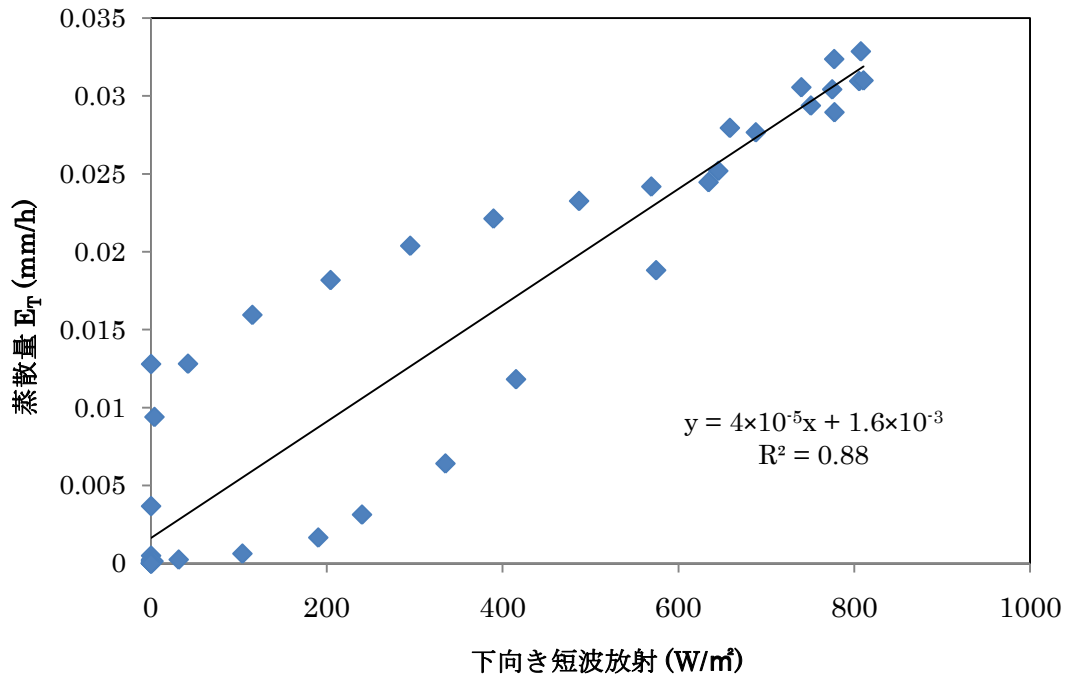


図 29 サンプル 5 番の 8/3 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

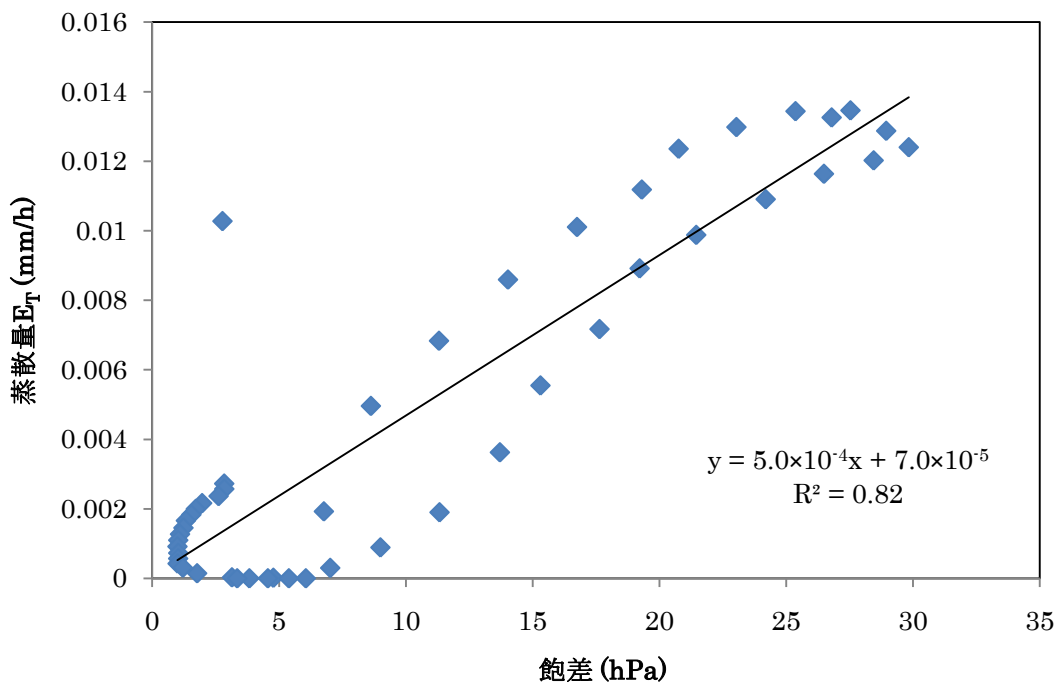
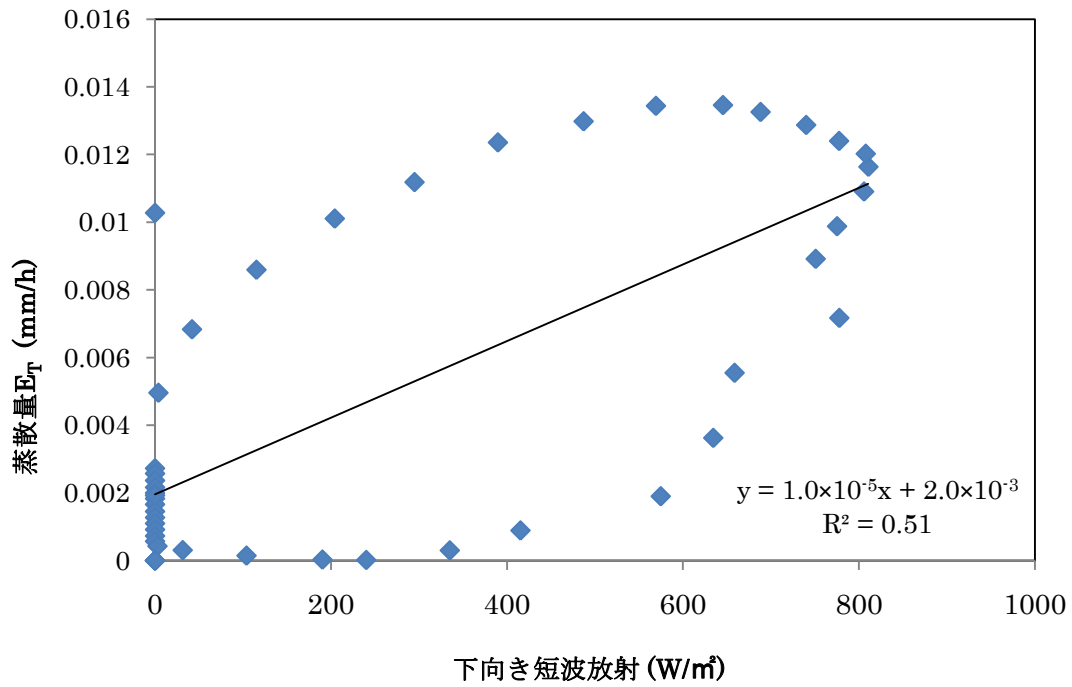


図 30 サンプル 4 番の 8/3 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

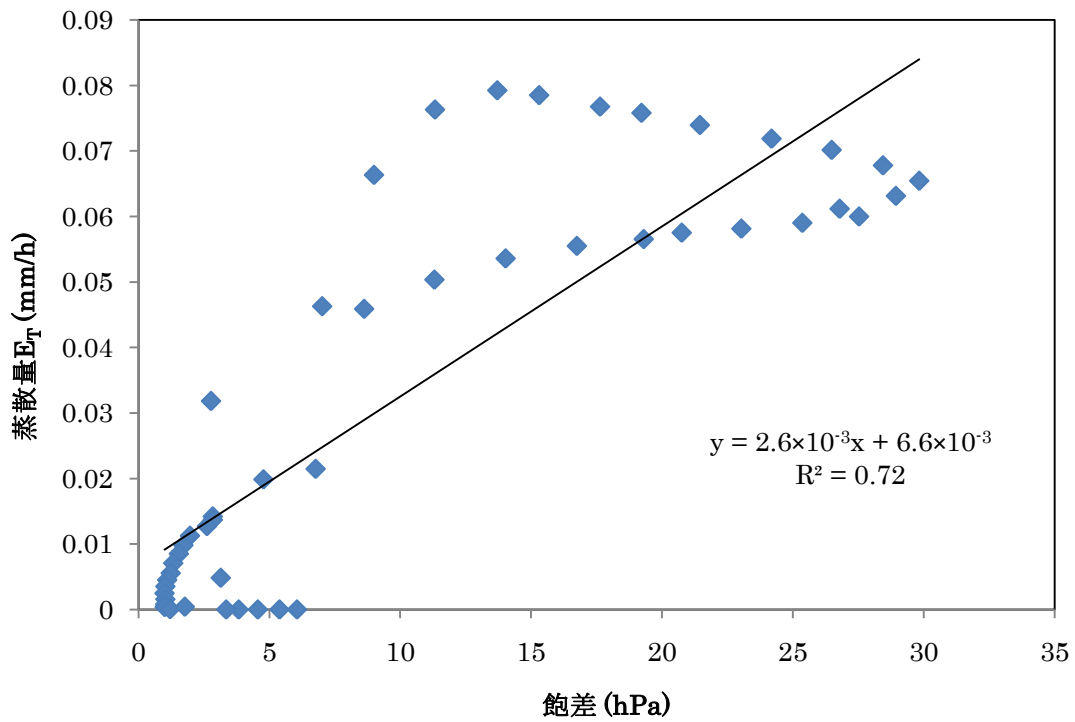
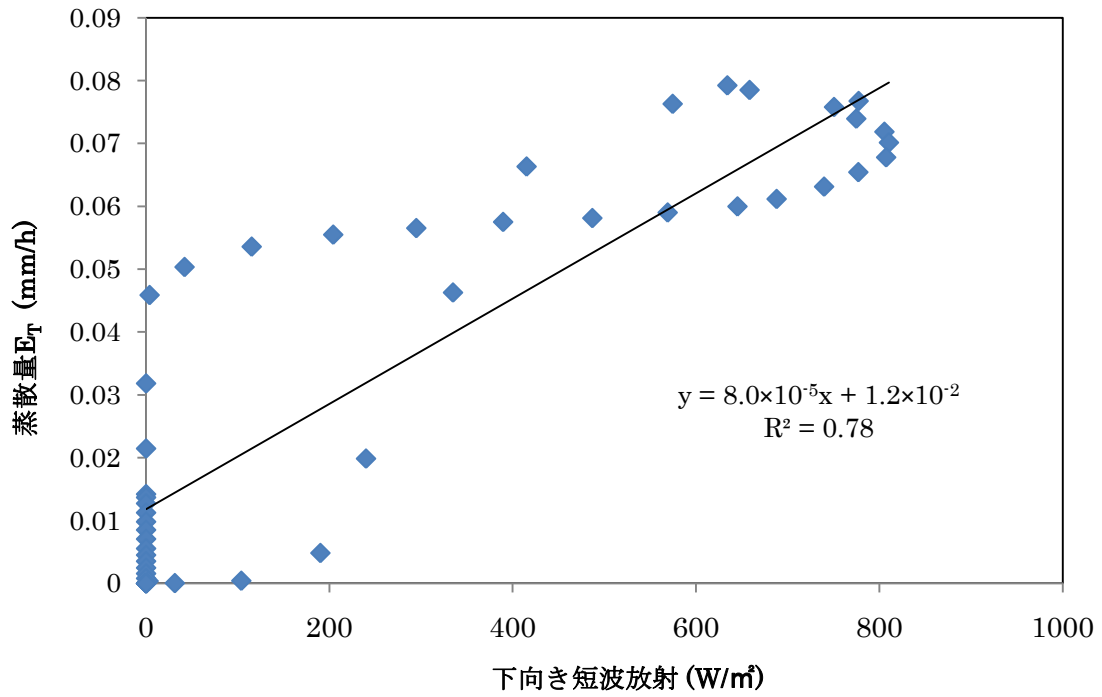


図 31 サンプル 3 番の 8 3 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

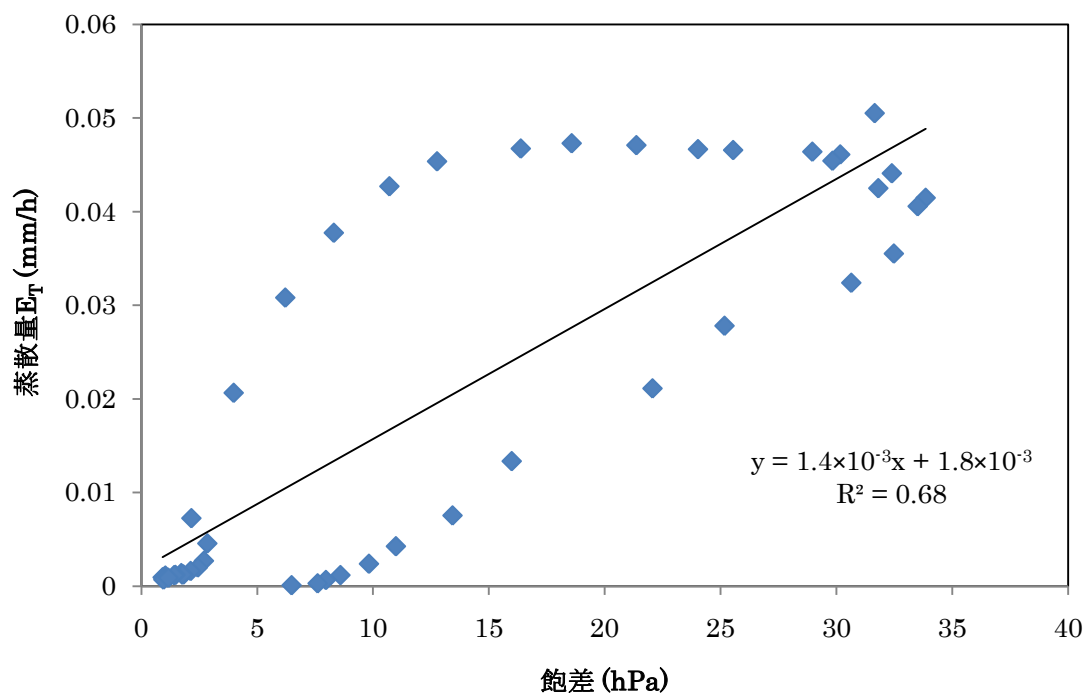
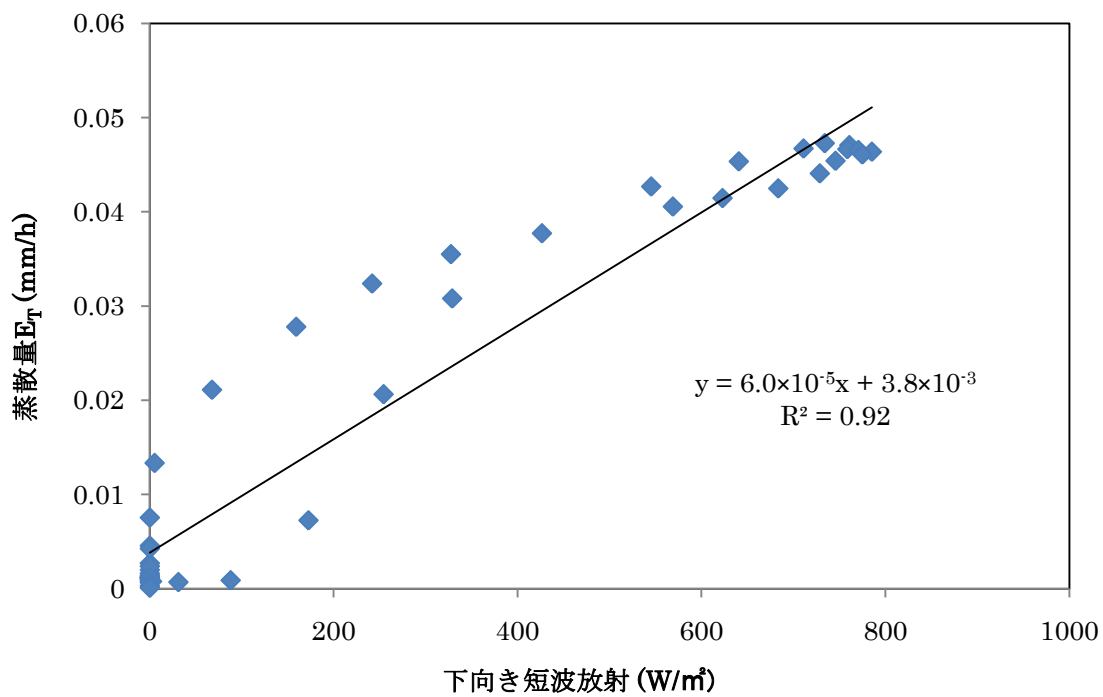


図 32 サンプル 11 番の 8/4 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

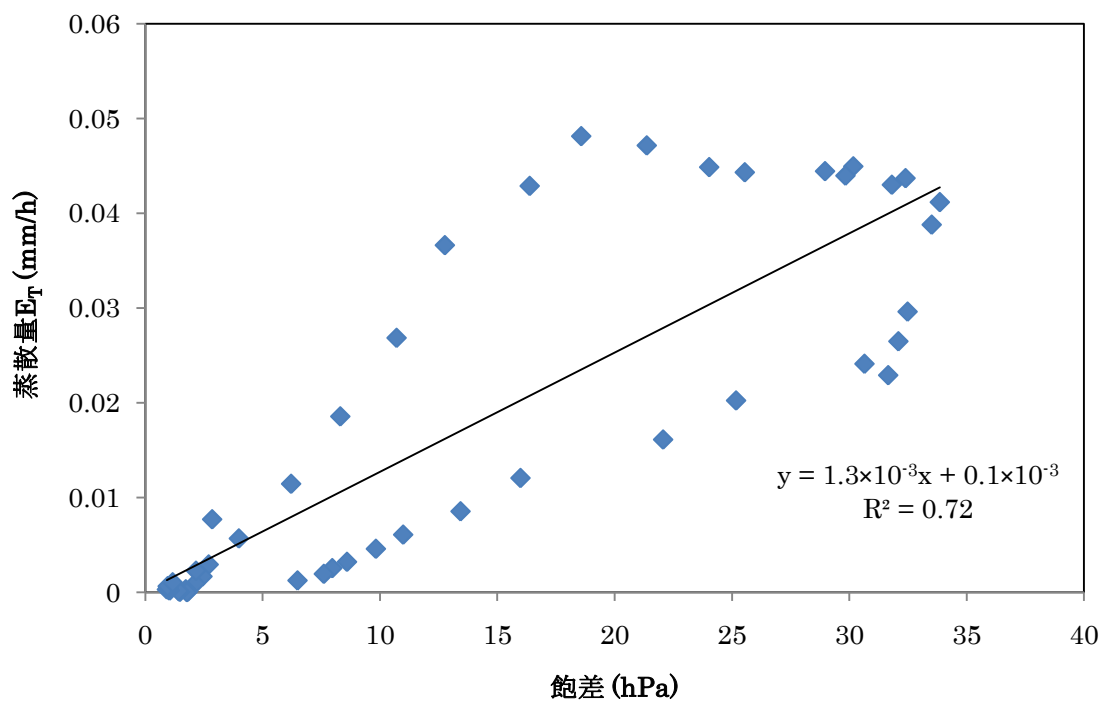
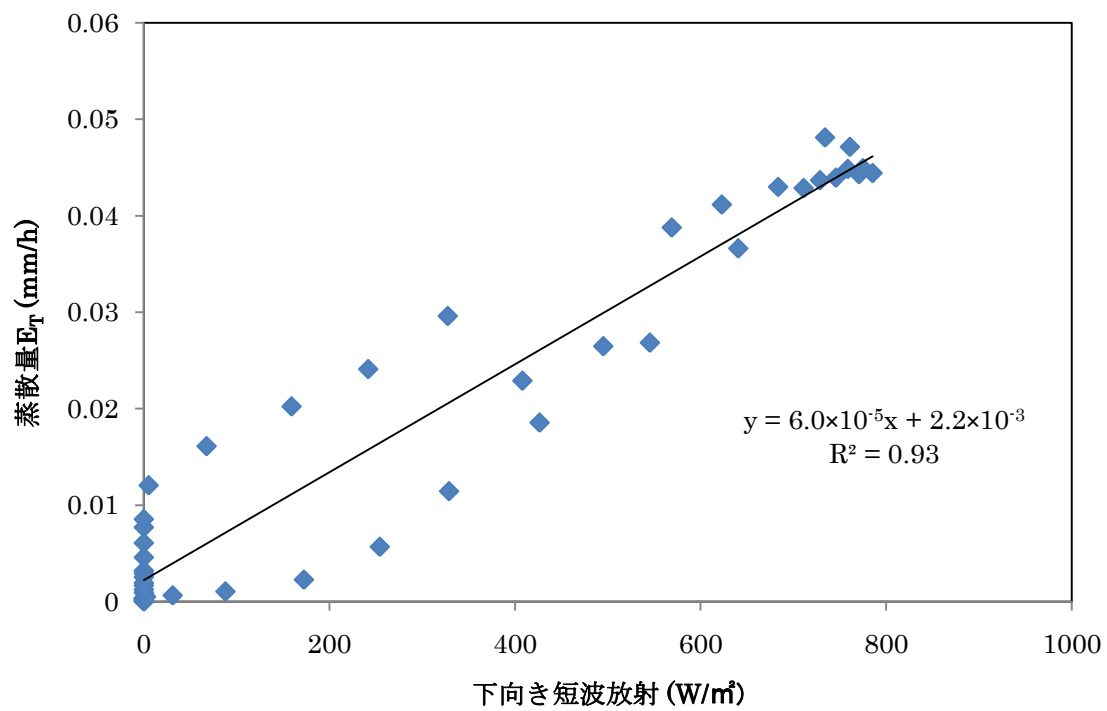


図 33 サンプル 6 番の 8/4 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

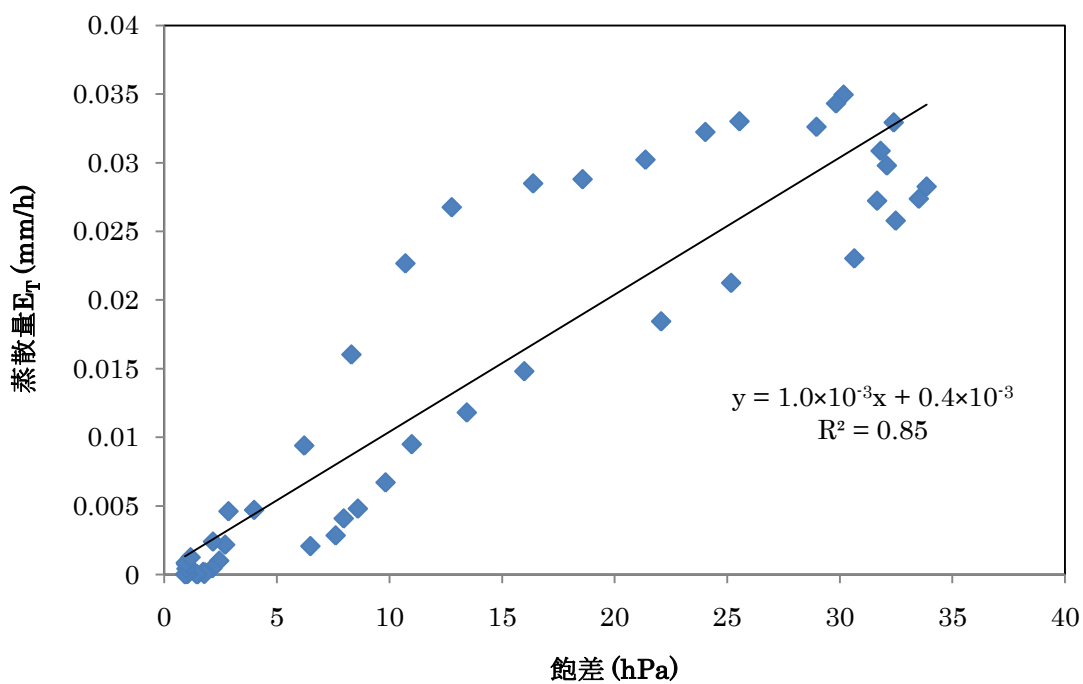
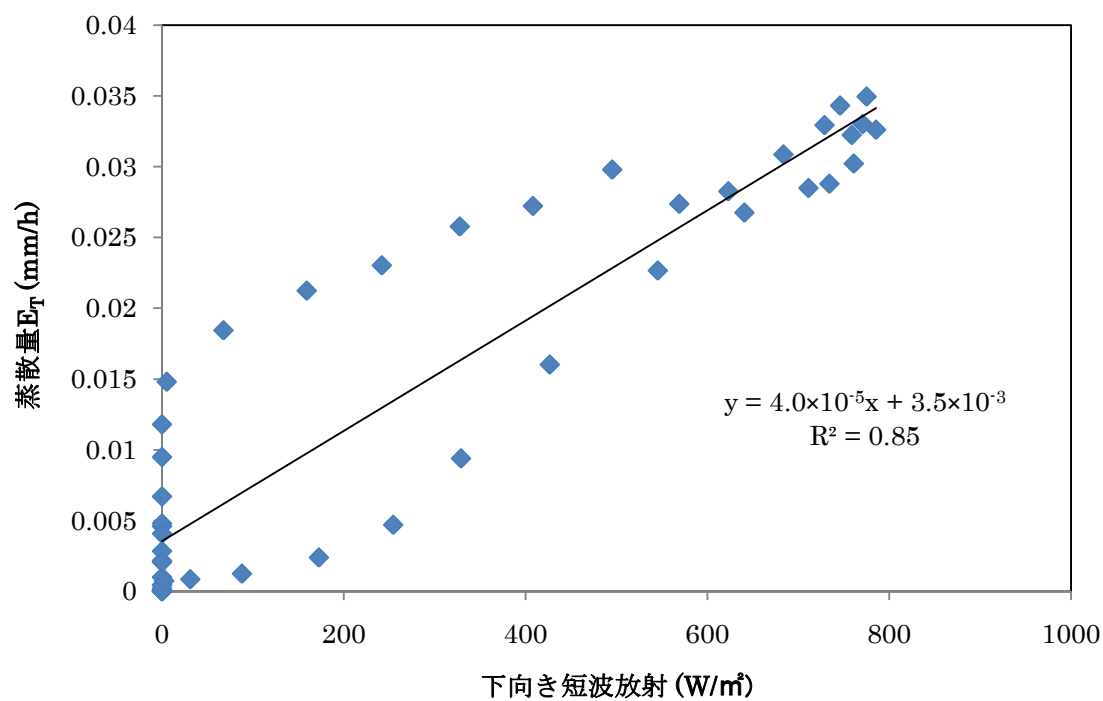


図 34 サンプル 5 番の 8/4 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

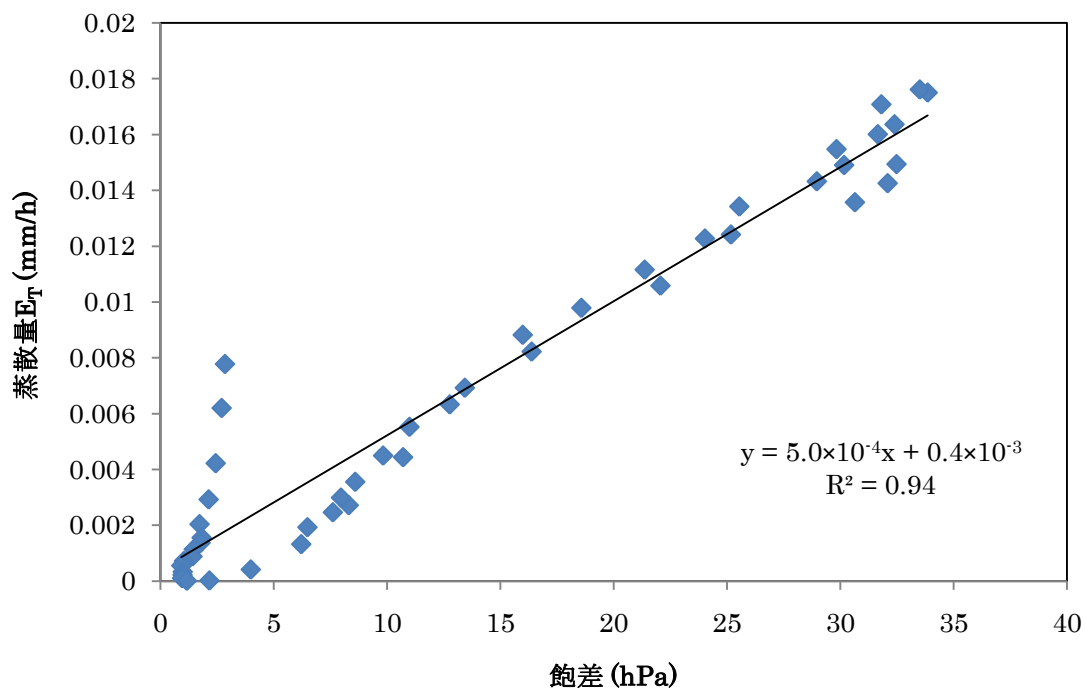
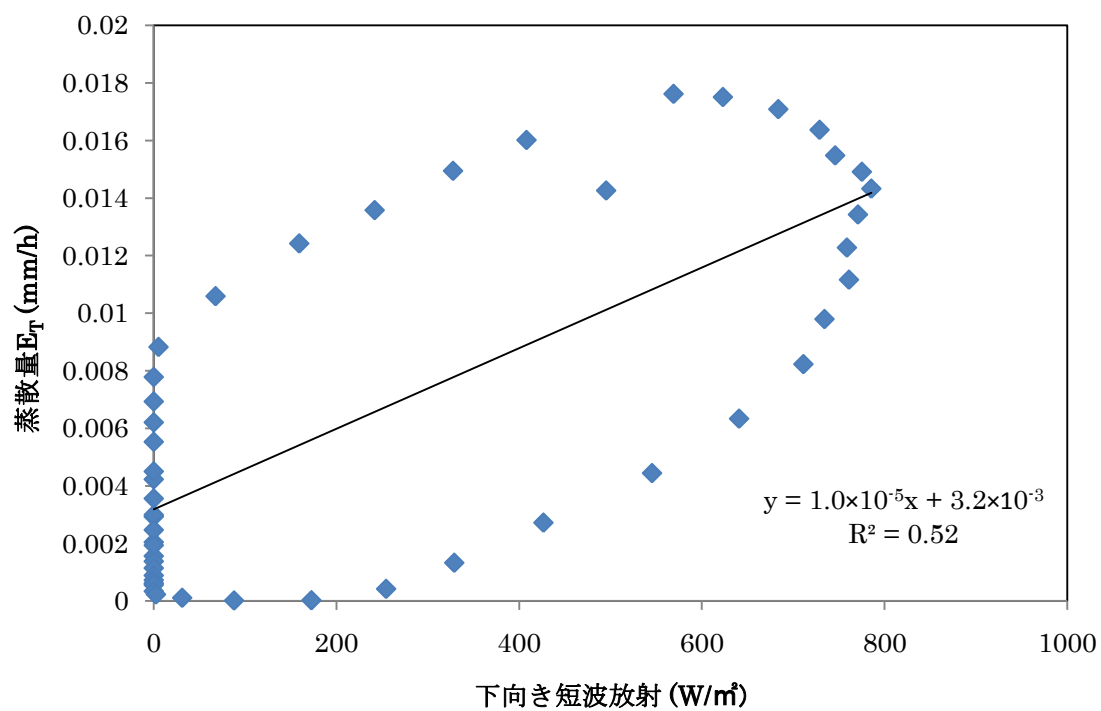


図 35 サンプル 4 番の 8/4 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

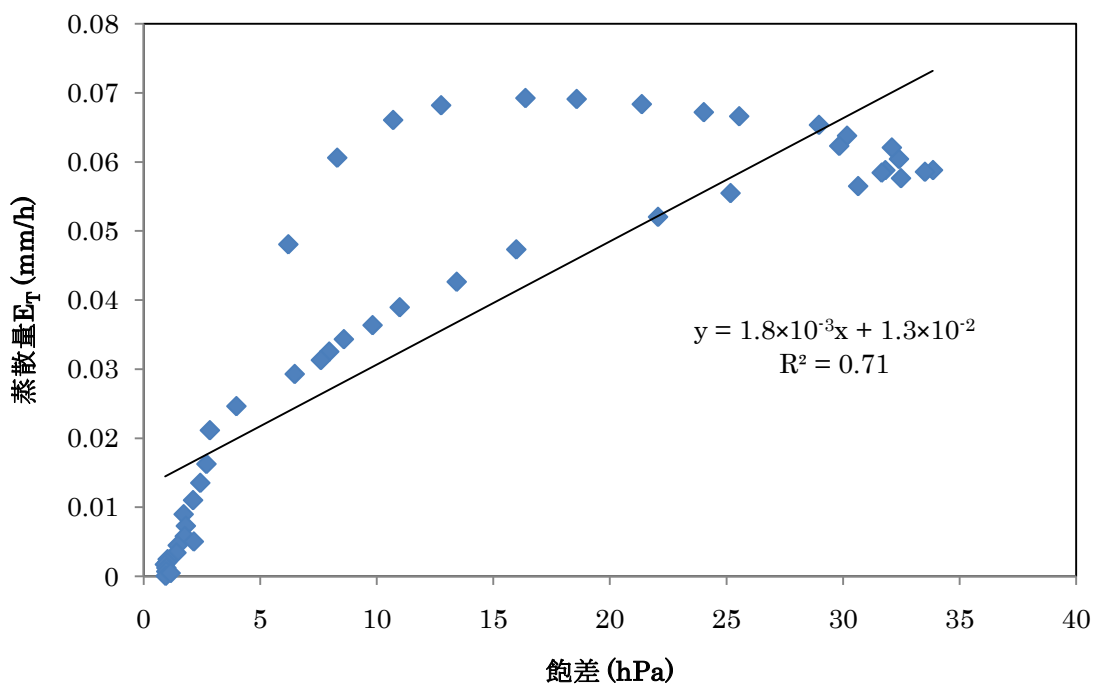
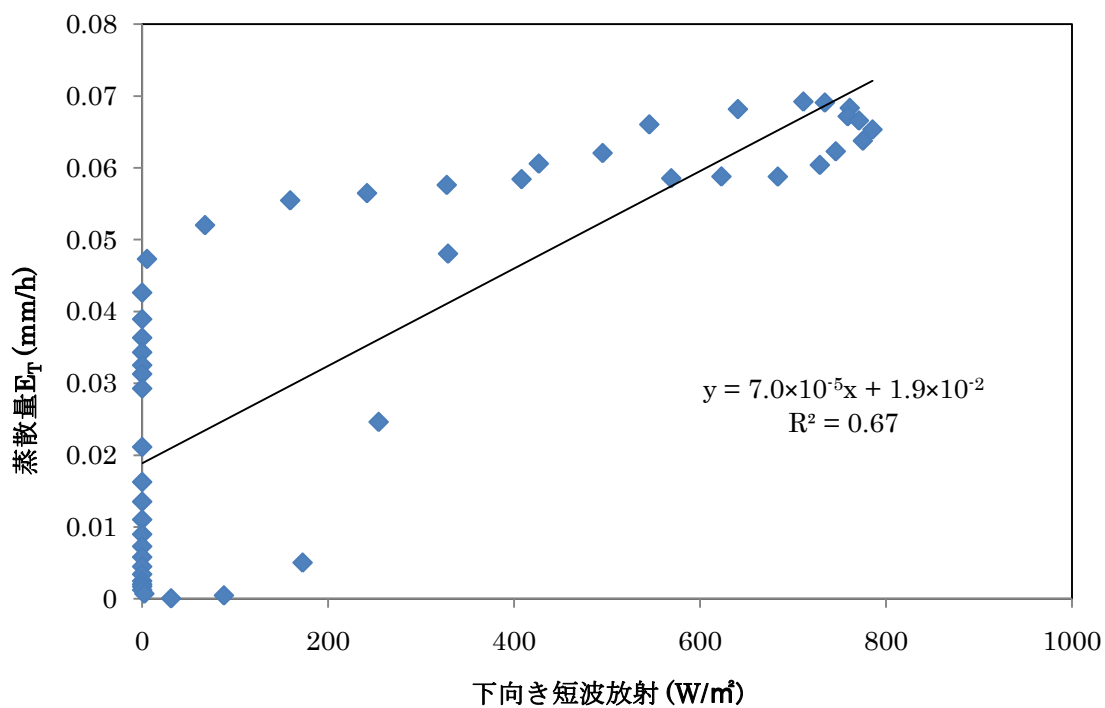


図 36 サンプル 3 番の 8/4 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

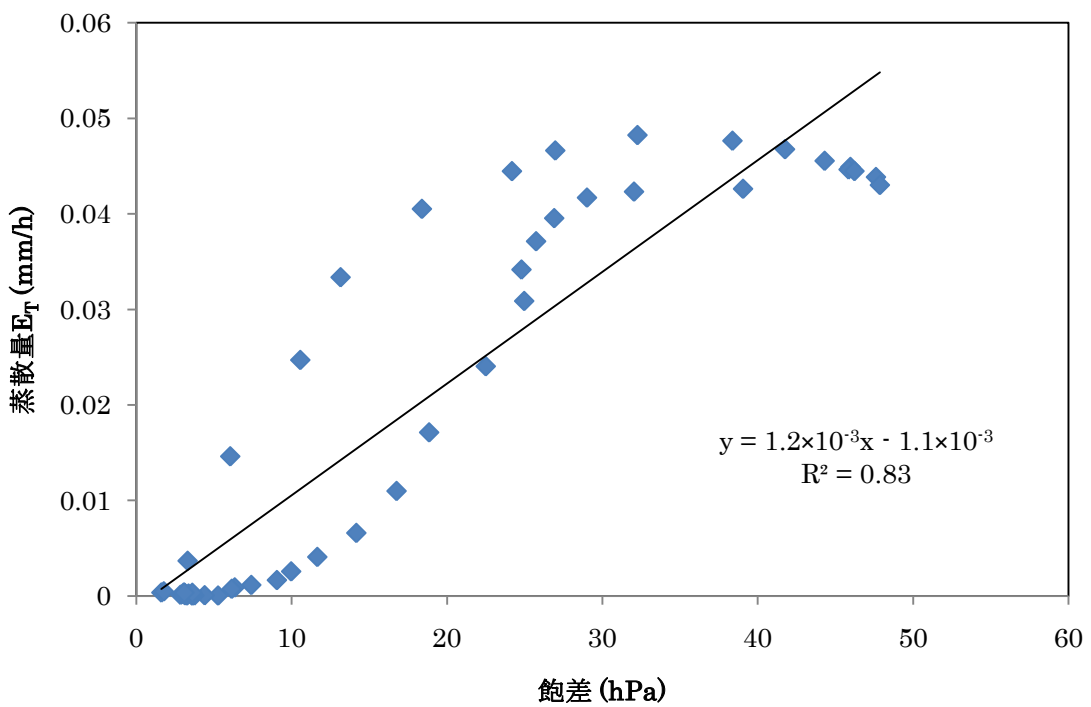
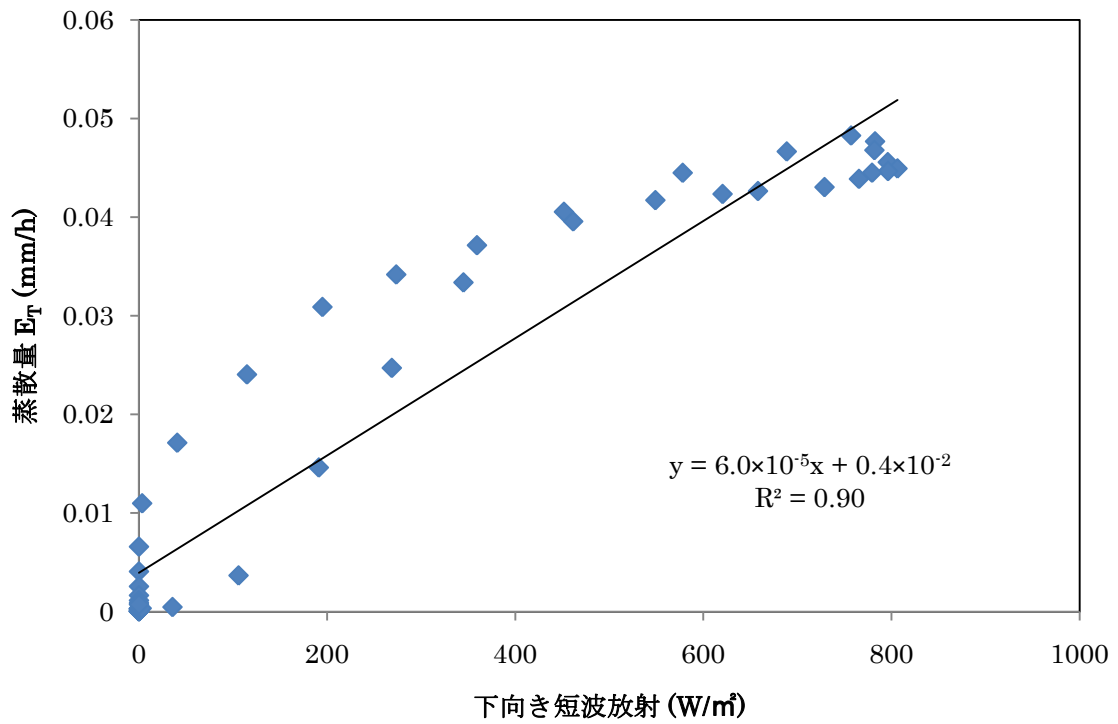


図 37 サンプル 11 番の 8/5 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

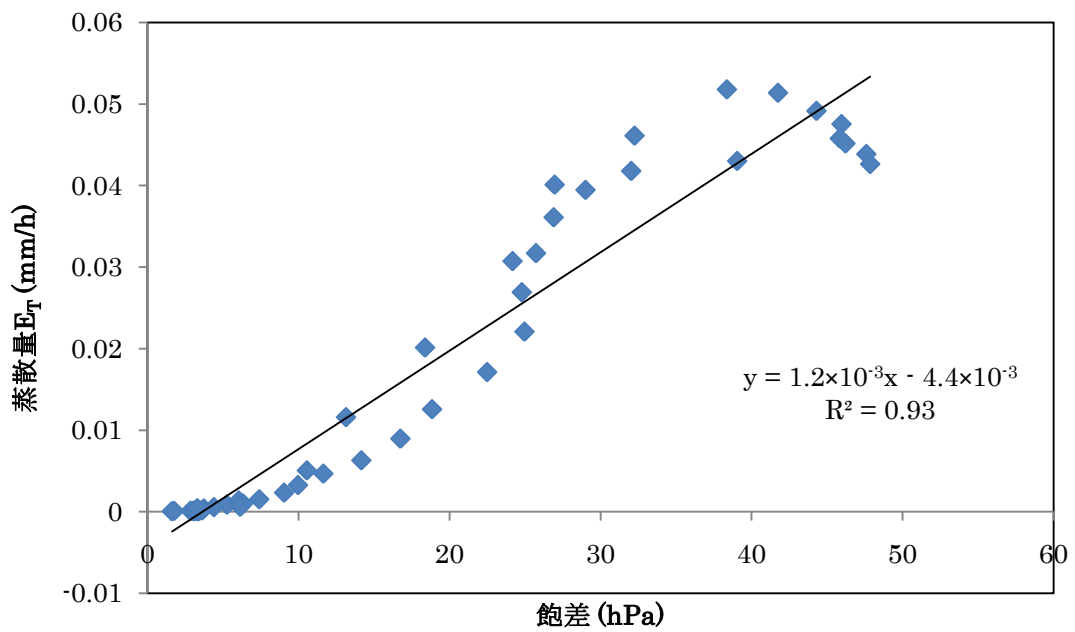
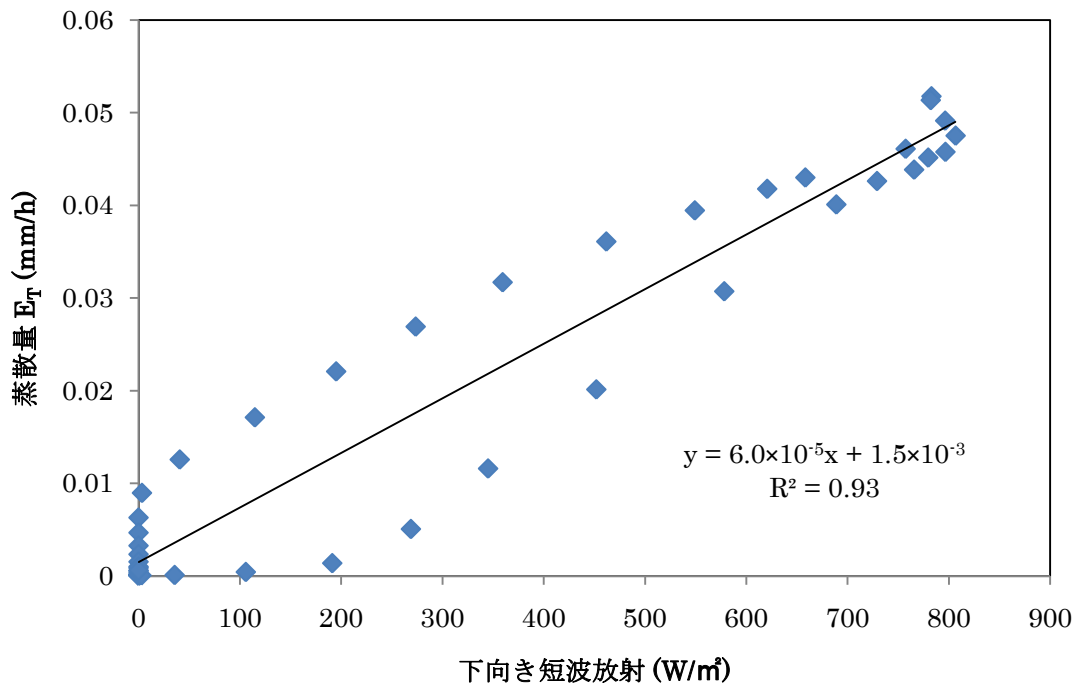


図 38 サンプル 6 番の 8/5 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

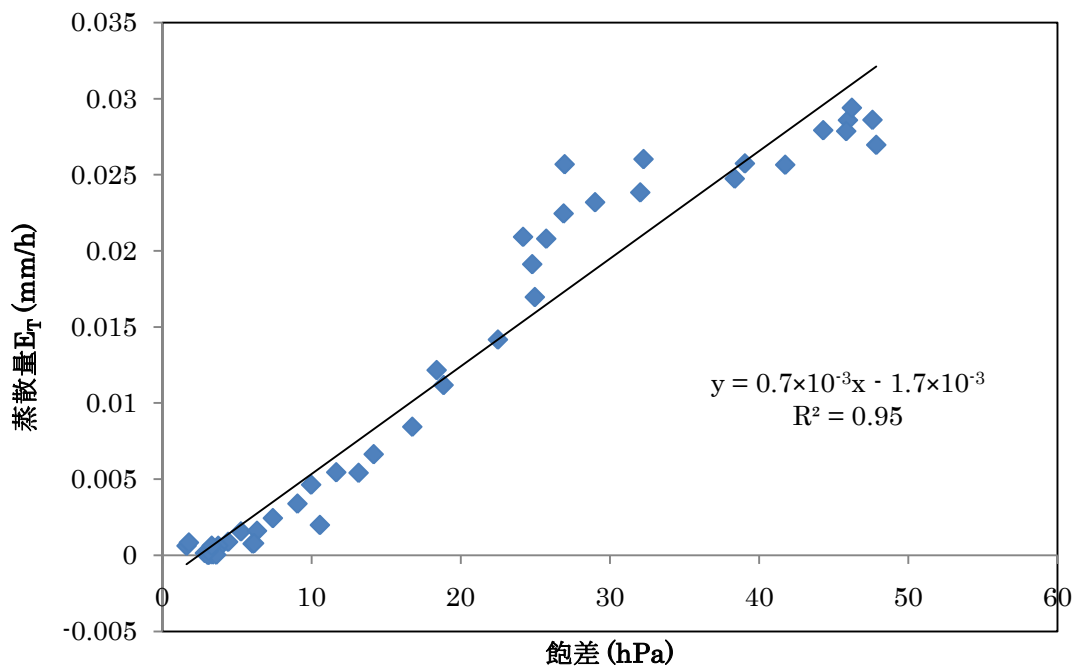
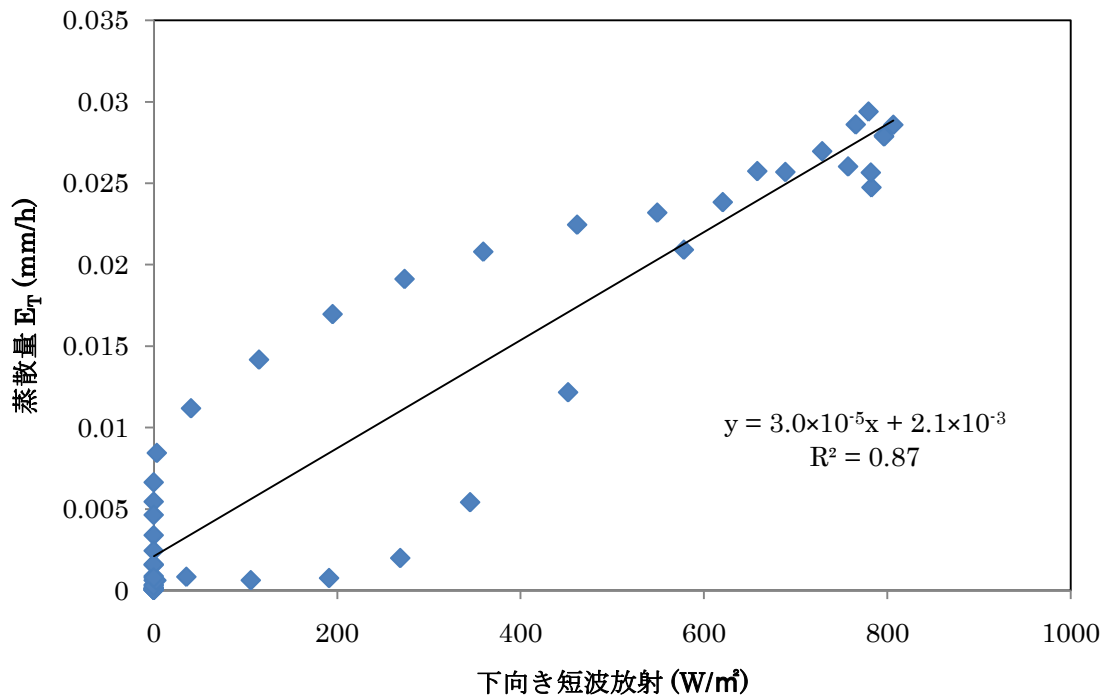


図 39 サンプル 5 番の 8/5 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

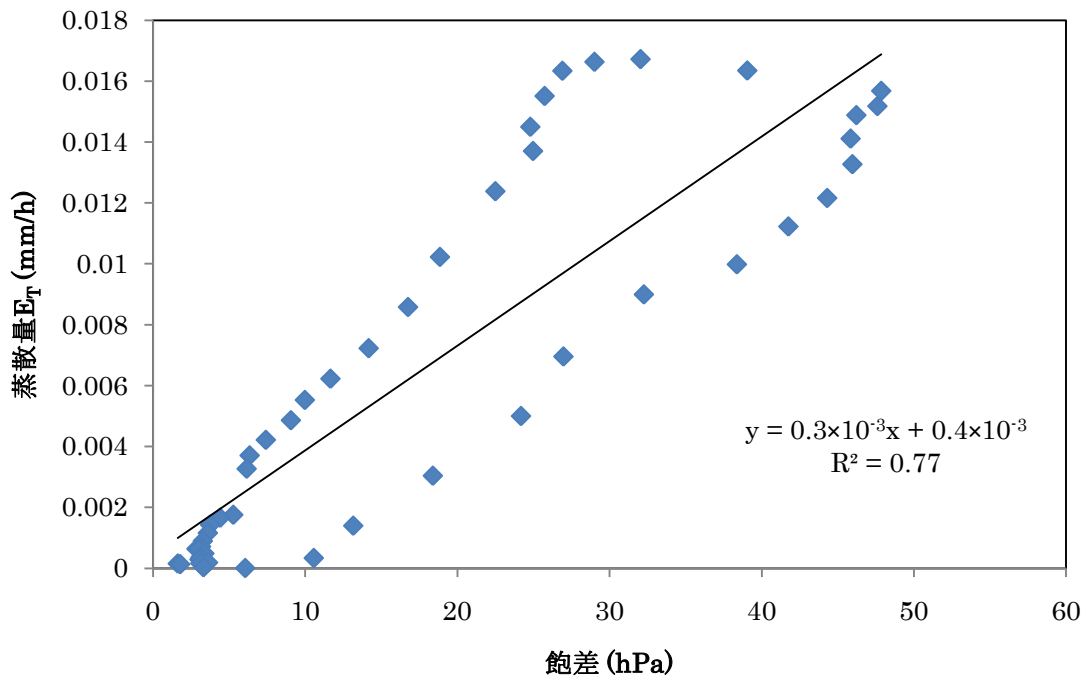
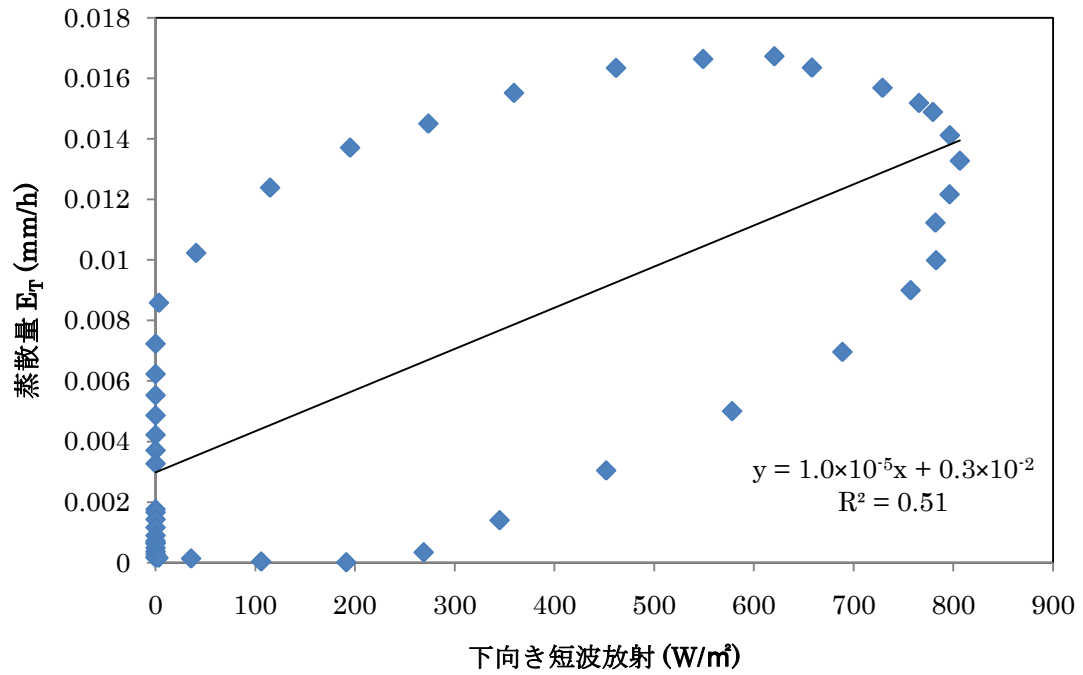


図 40 サンプル 4 番の 8 / 5 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

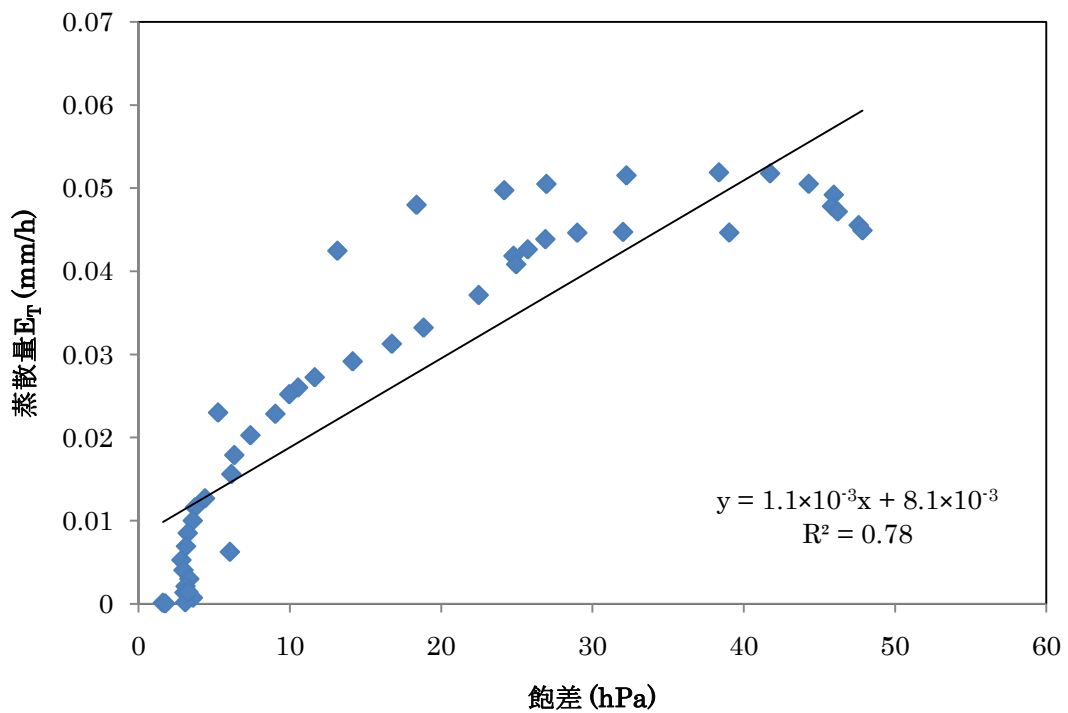
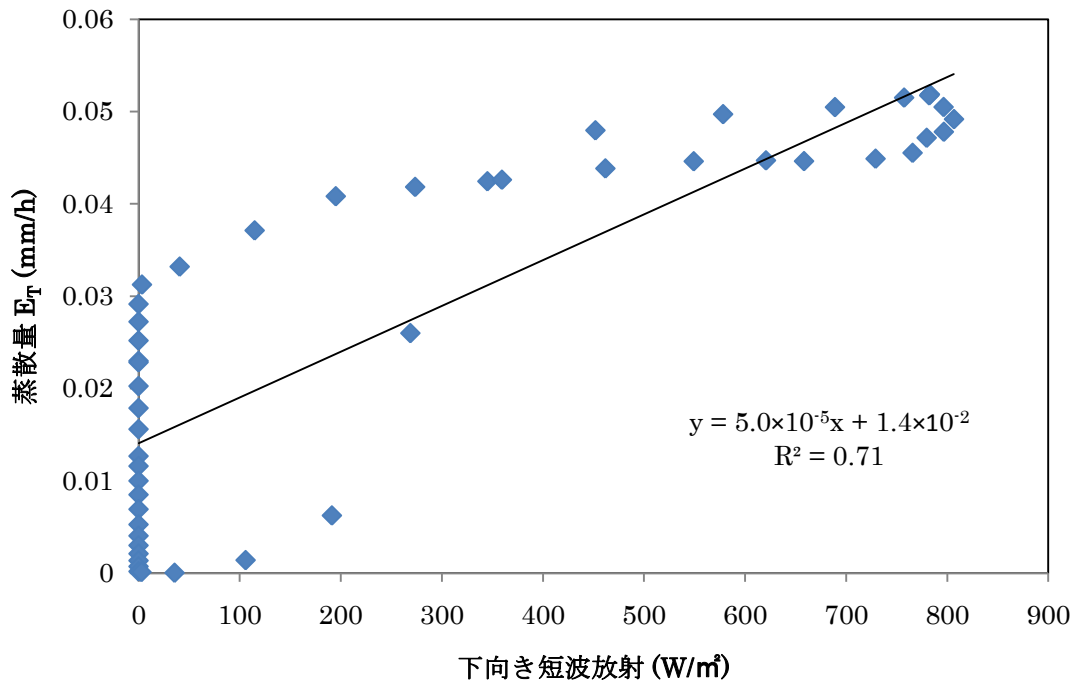


図 41 サンプル 3 番の 8/5 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

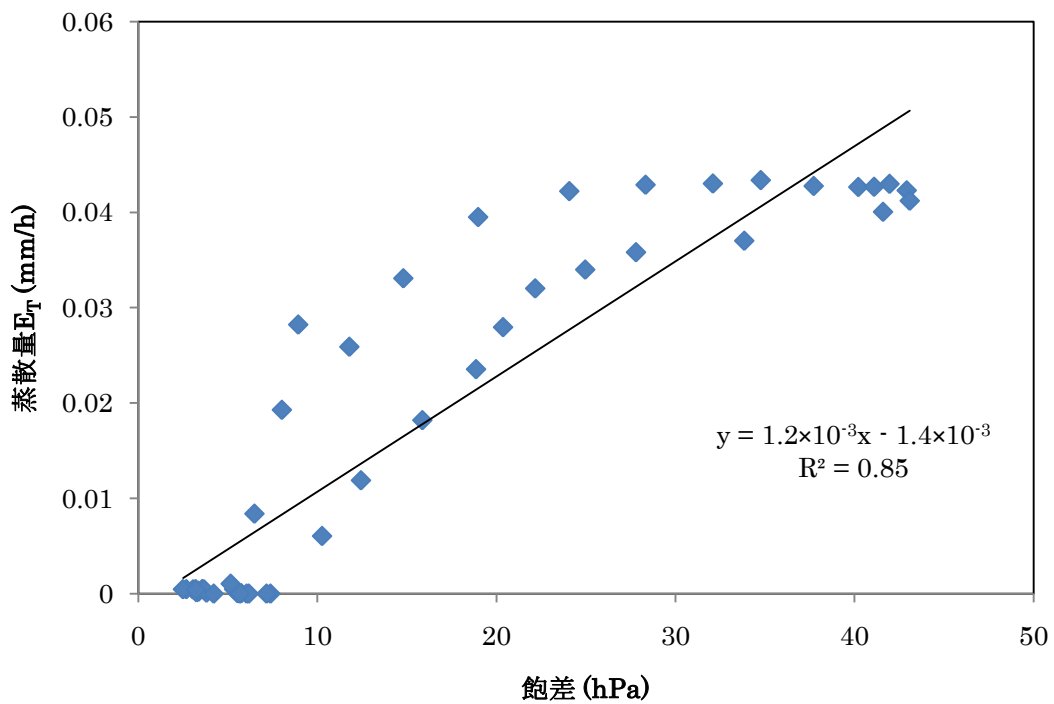
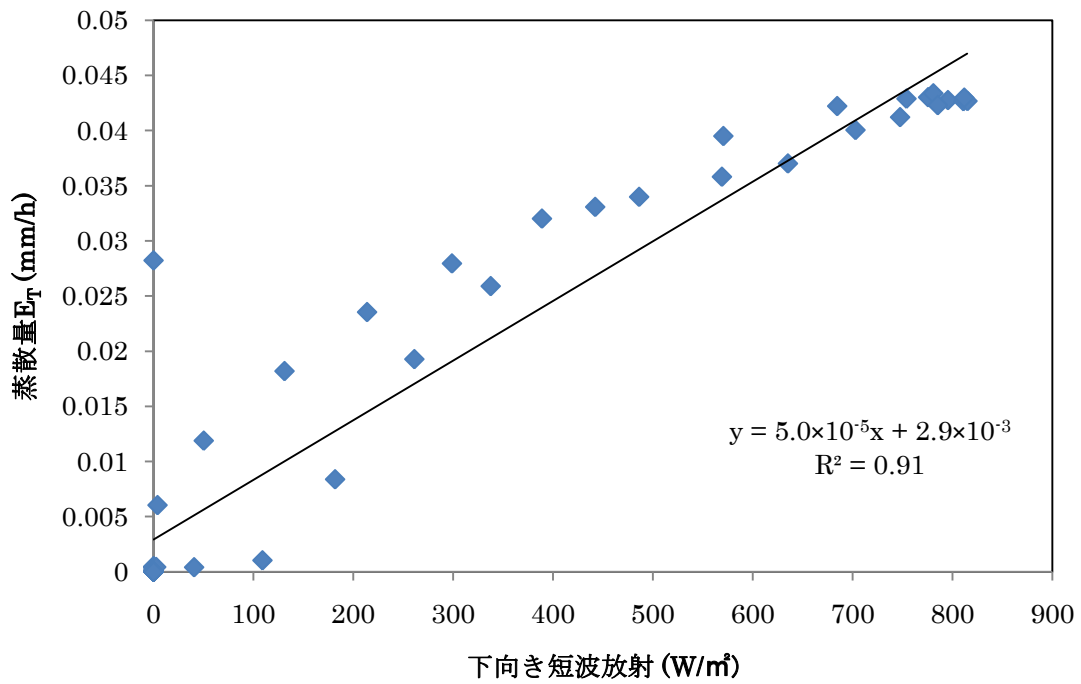


図 42 サンプル 11 番の 8/6 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

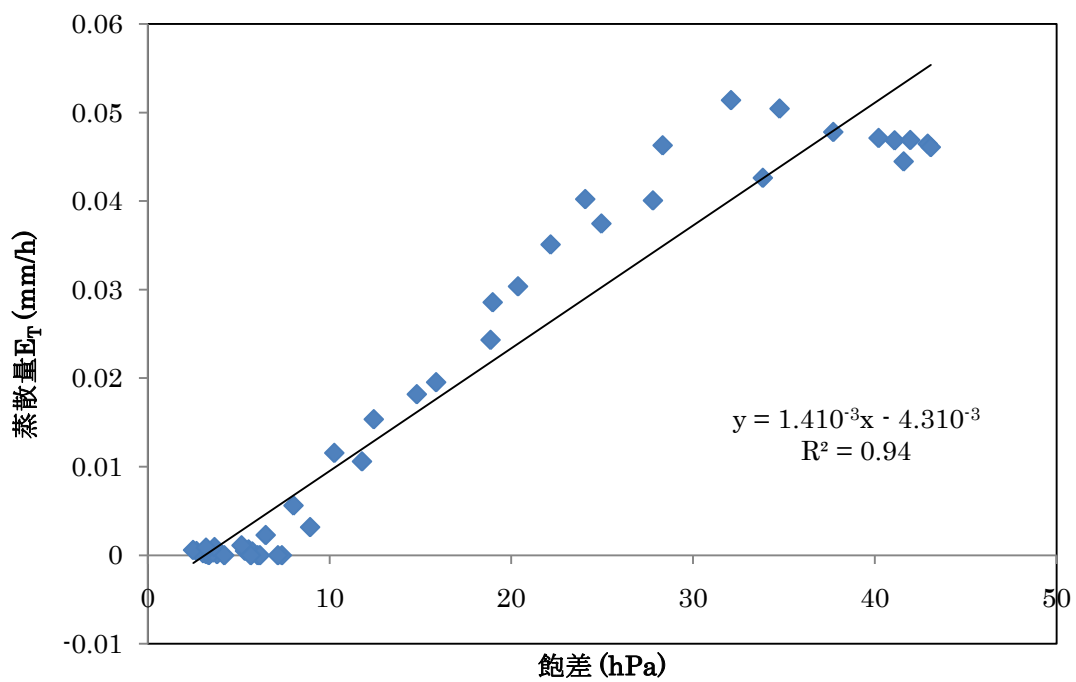
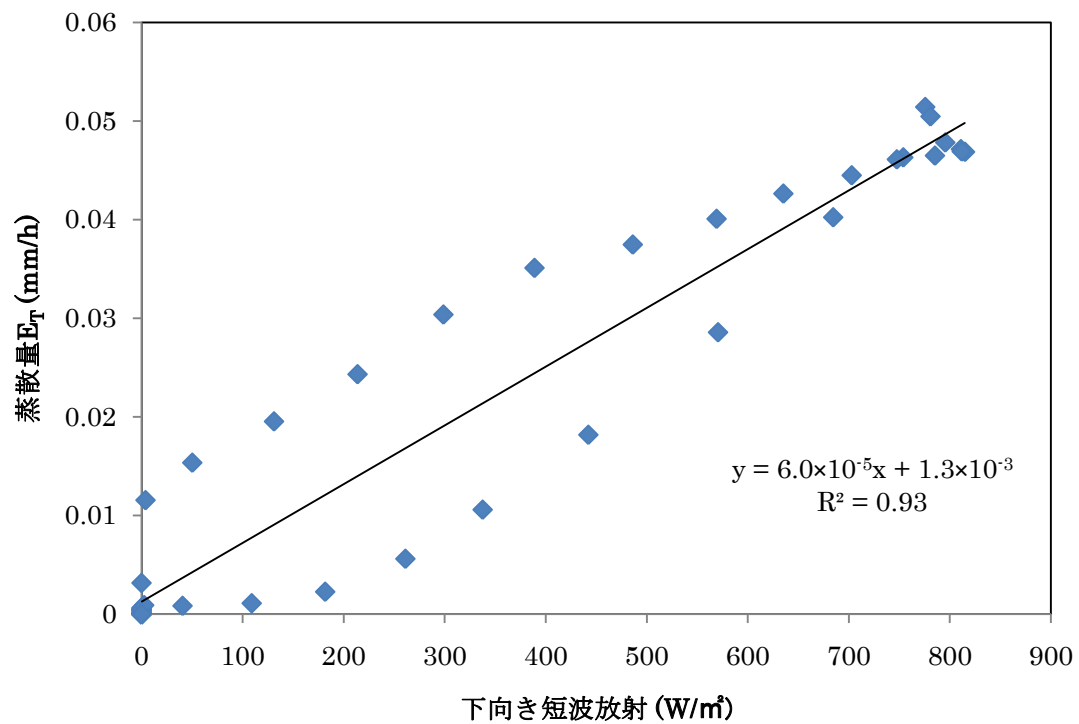


図 43 サンプル 6 番の 8/6 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

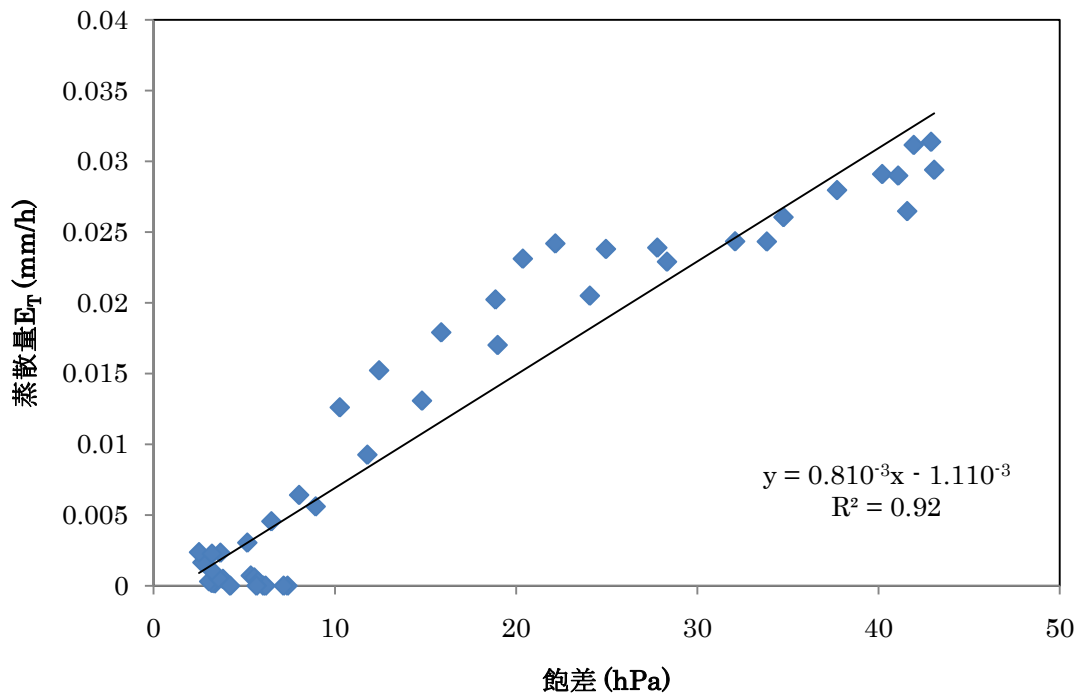
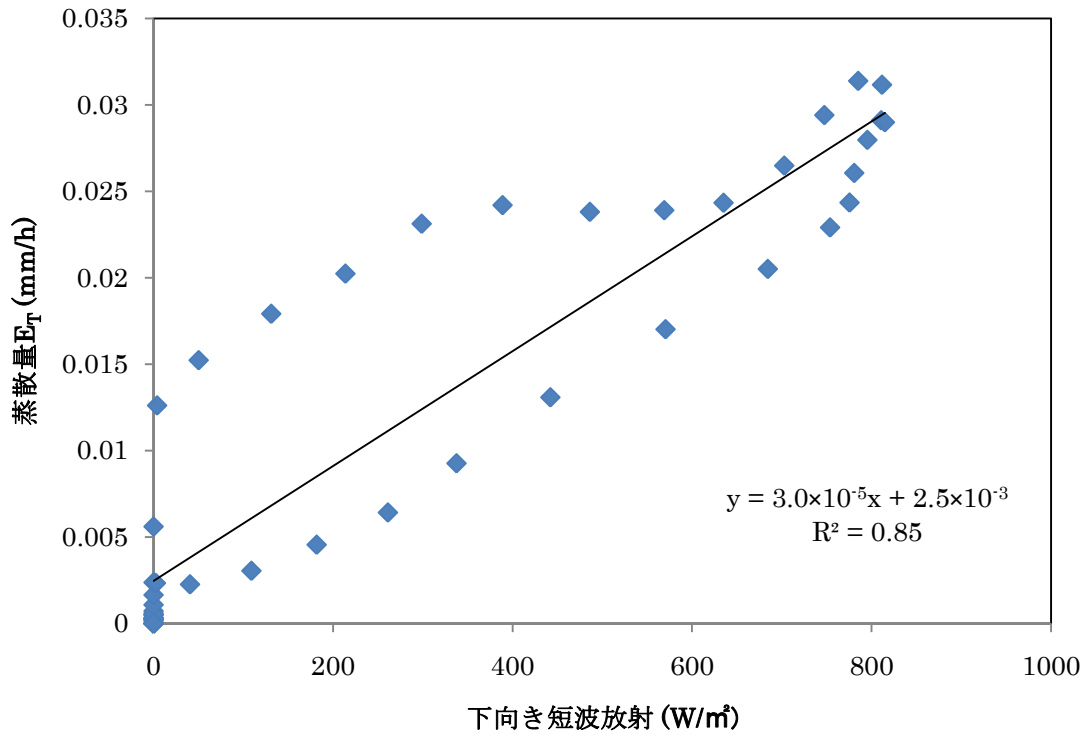


図 44 サンプル 5 番の 8/6 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

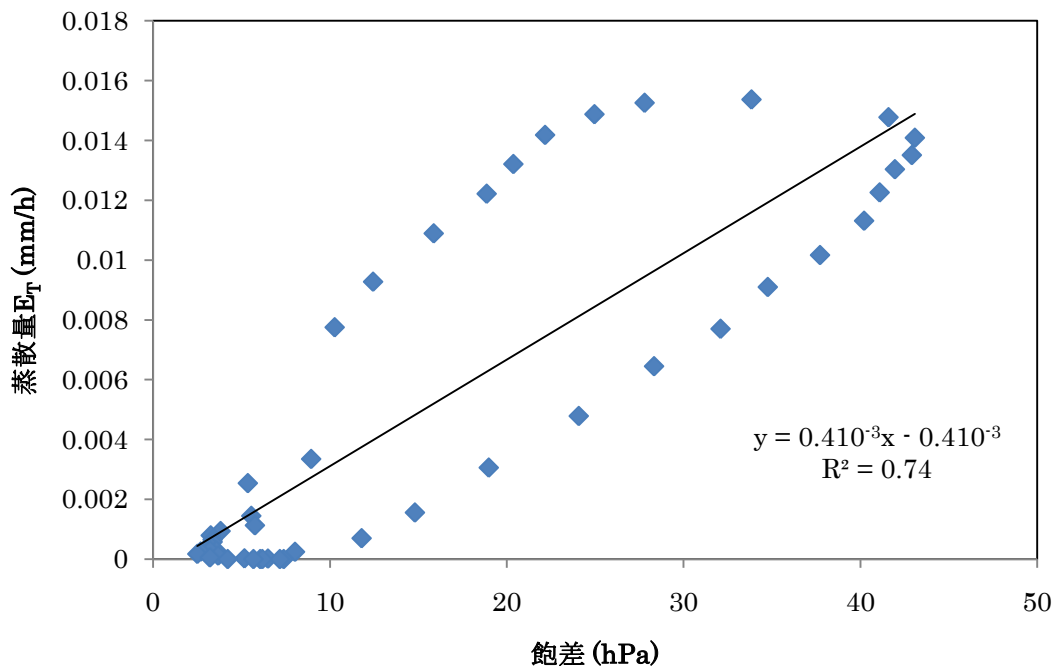
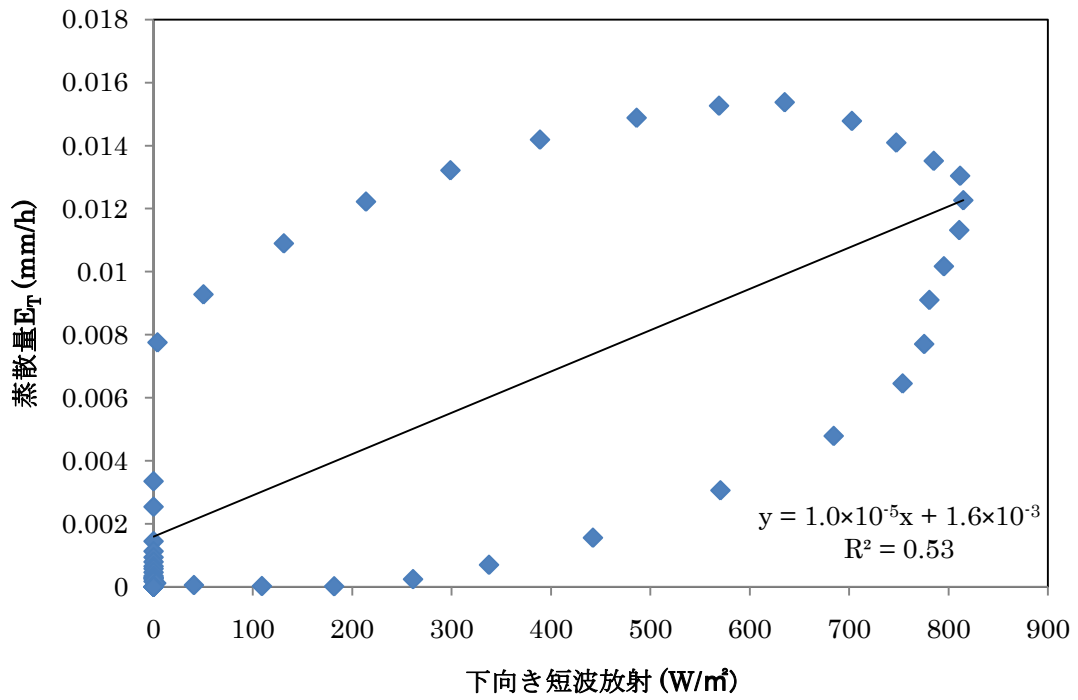


図 45 サンプル 4 番の 8/6 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

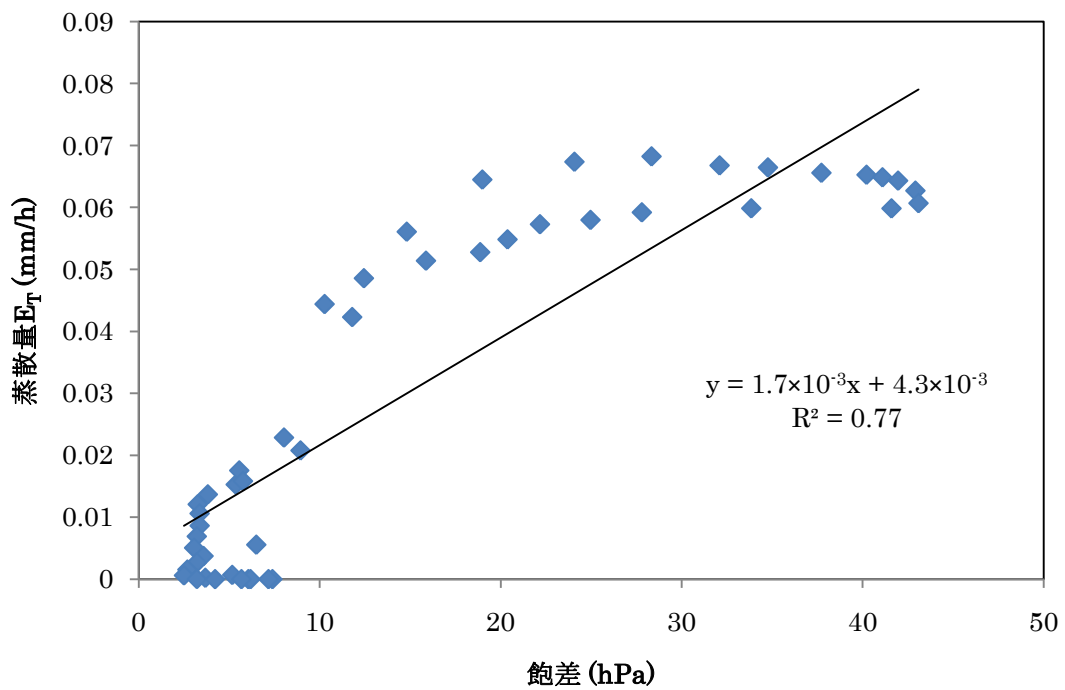
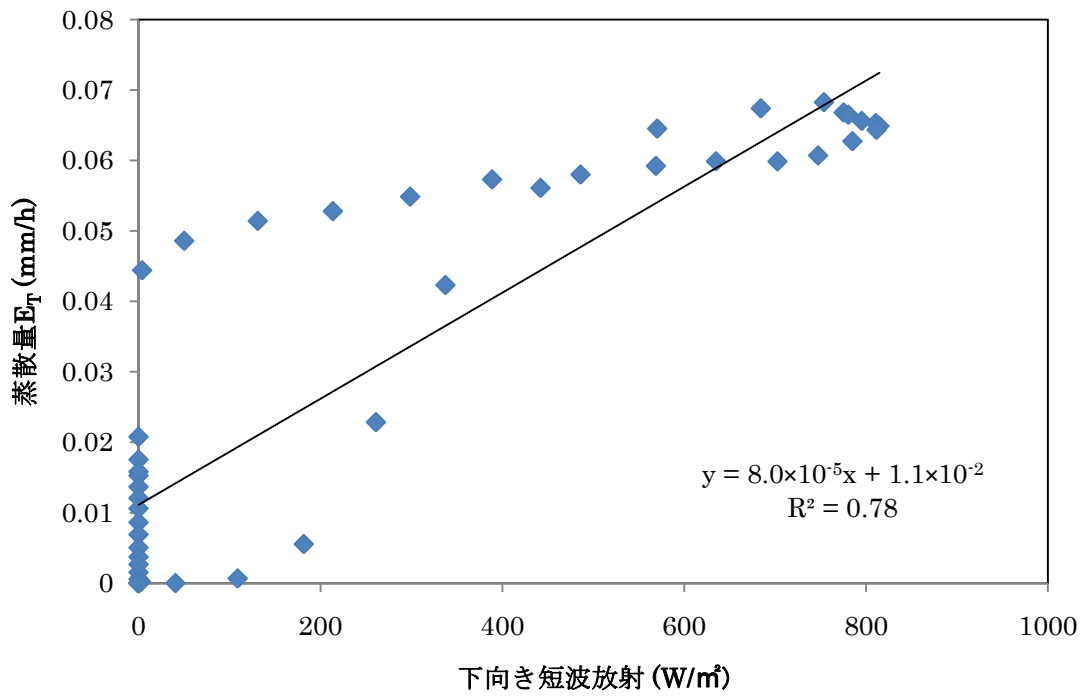


図 46 サンプル 3 番の 8 / 6 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

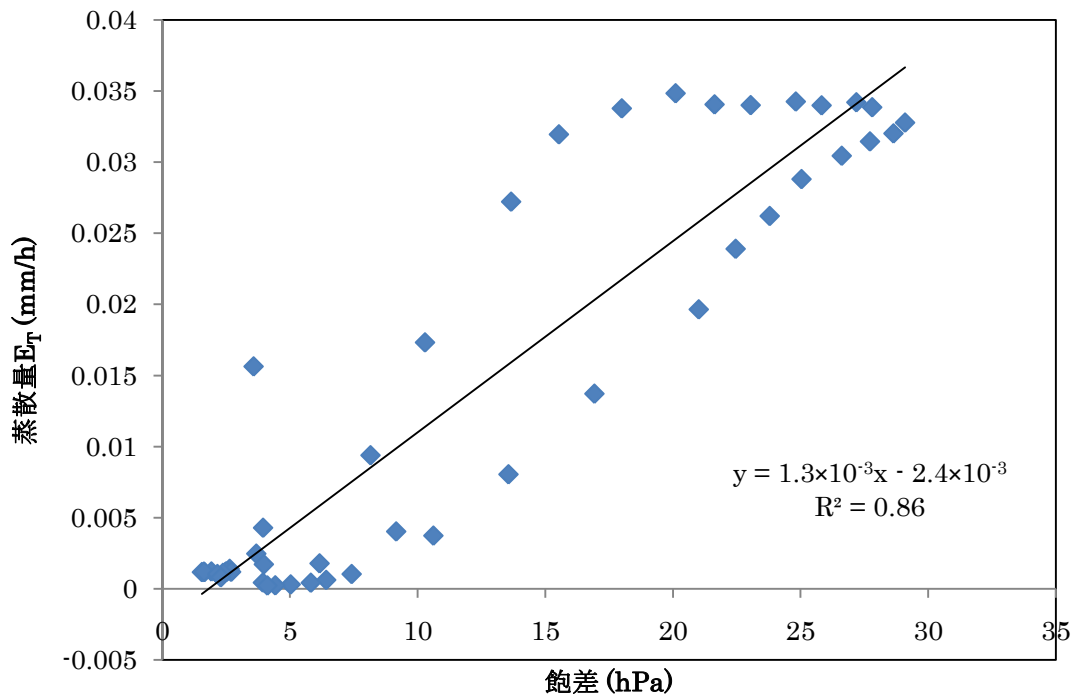
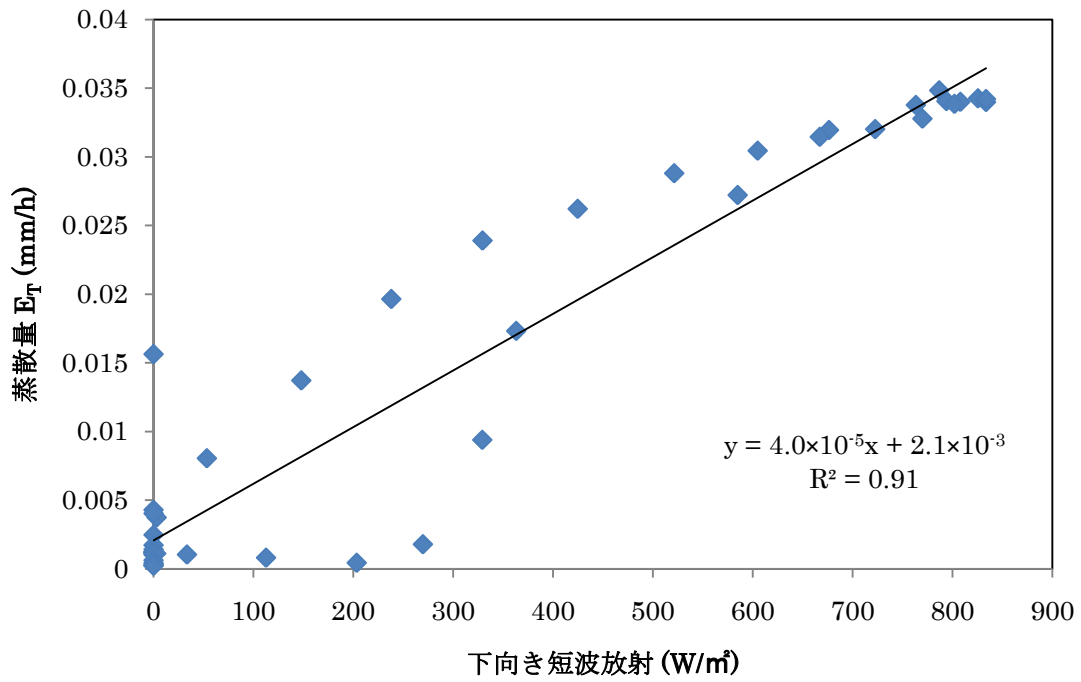


図 47 サンプル 11 番の 8/7 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

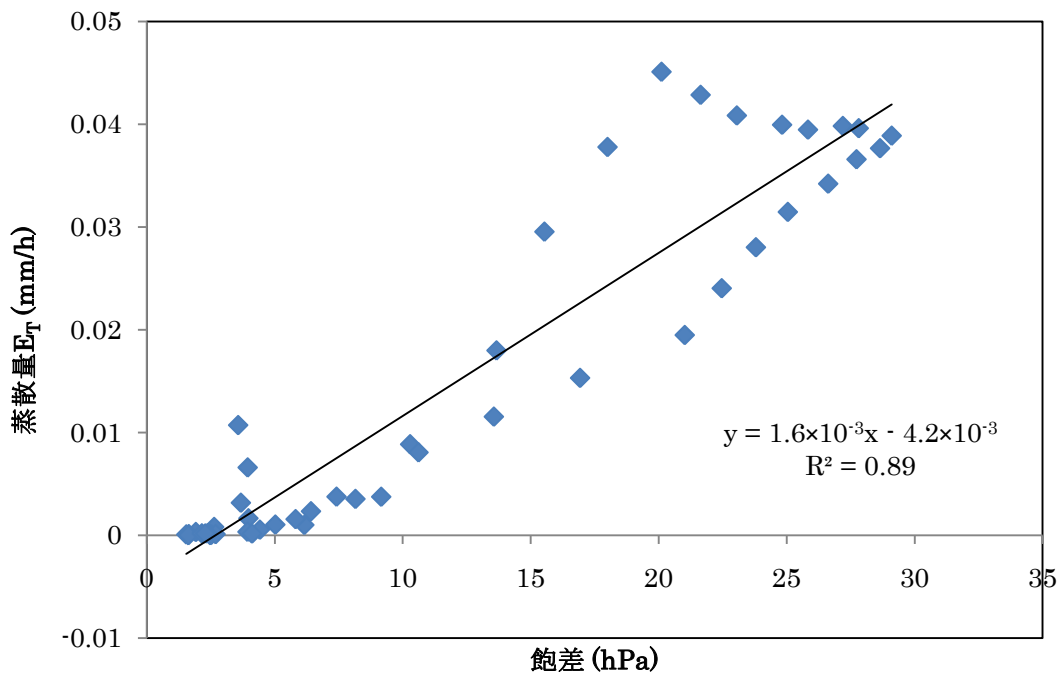
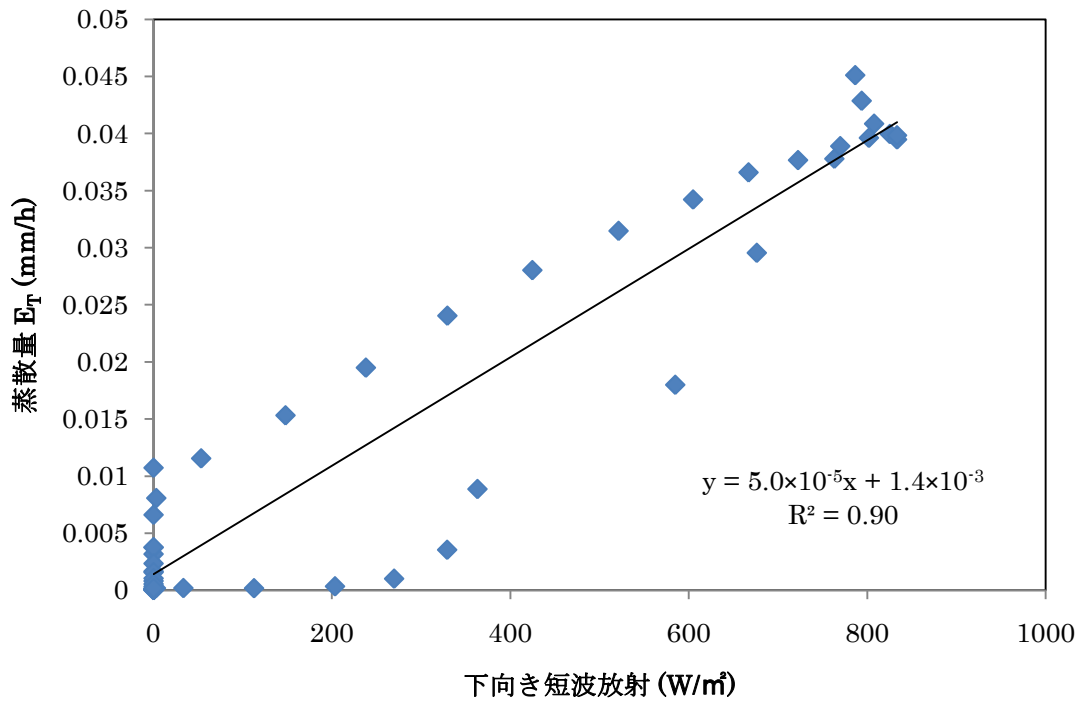


図 48 サンプル 6 番の 8/7 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

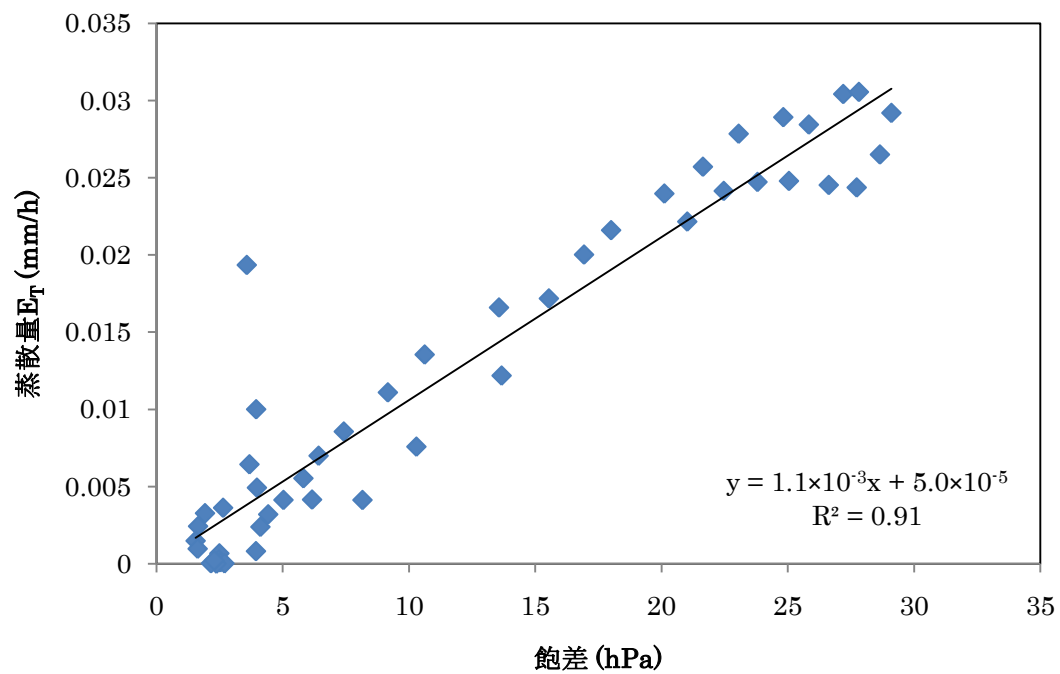
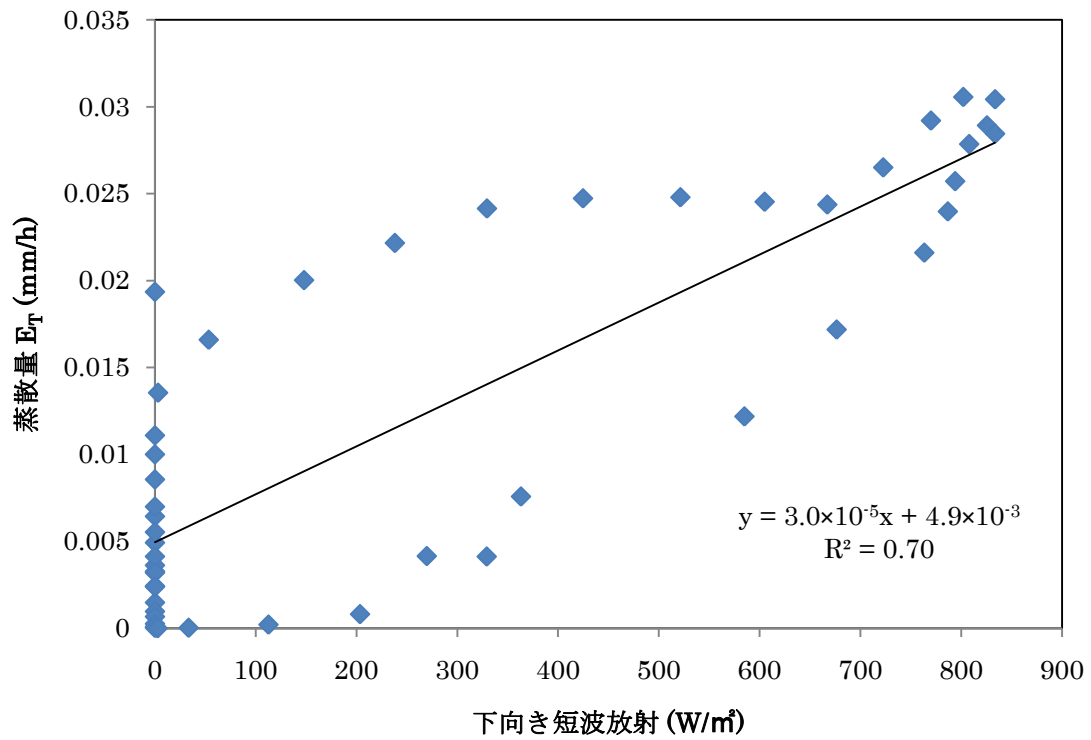


図 49 サンプル 5 番の 8/7 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

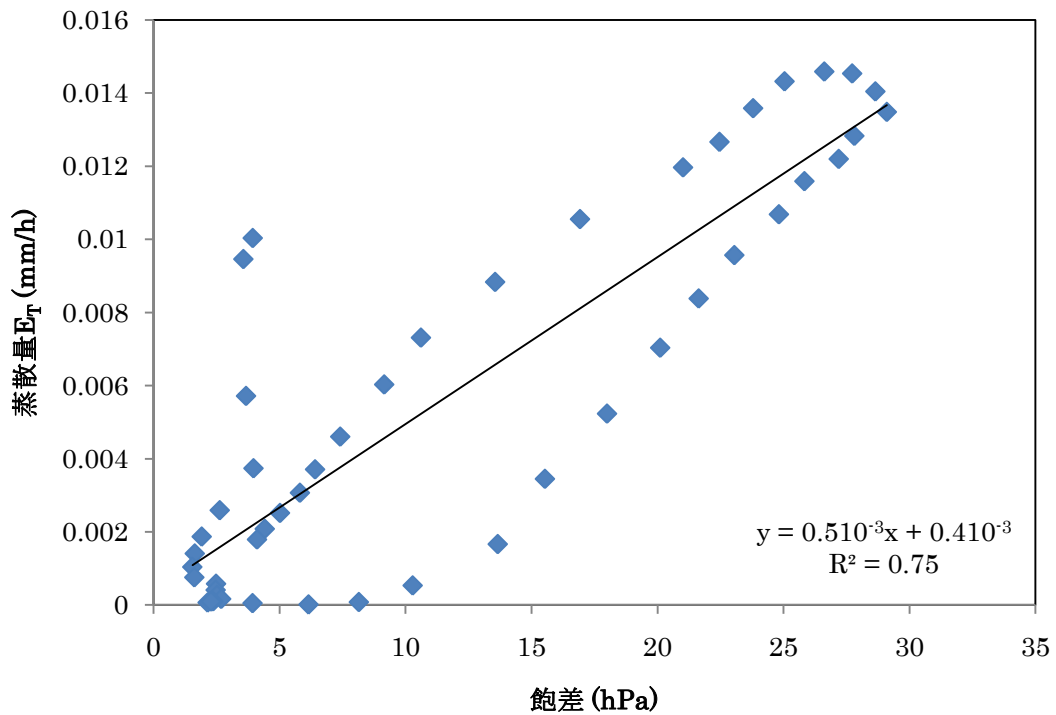
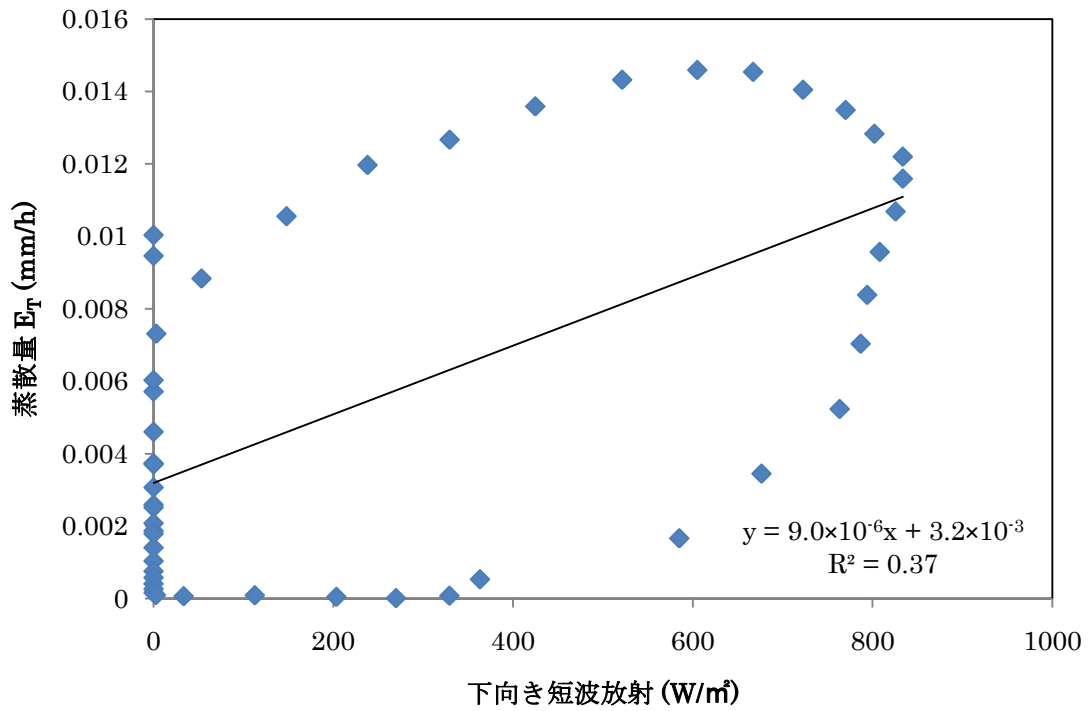


図 50 サンプル 4 番の 8/7 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

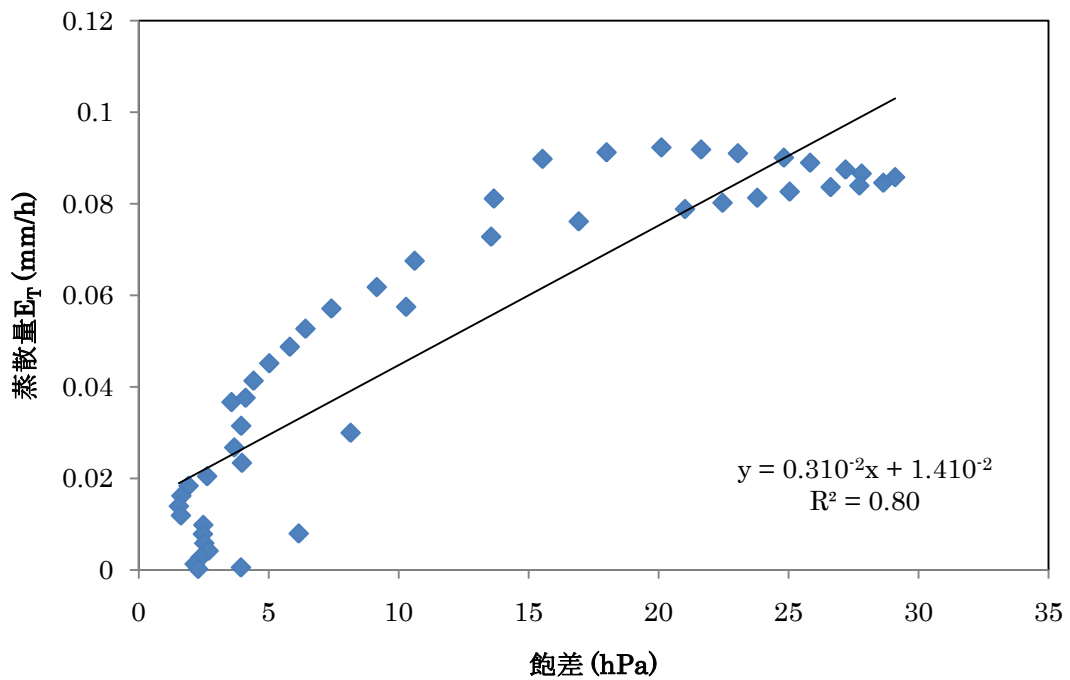
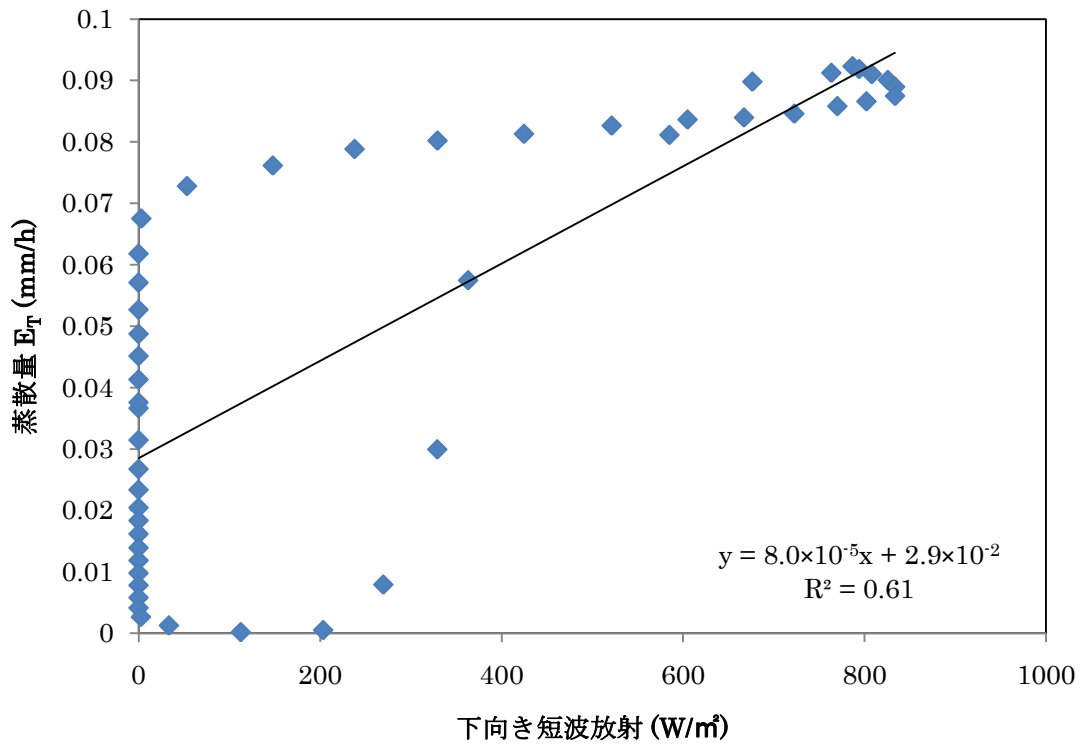


図 51 サンプル 3 番の 8/7 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

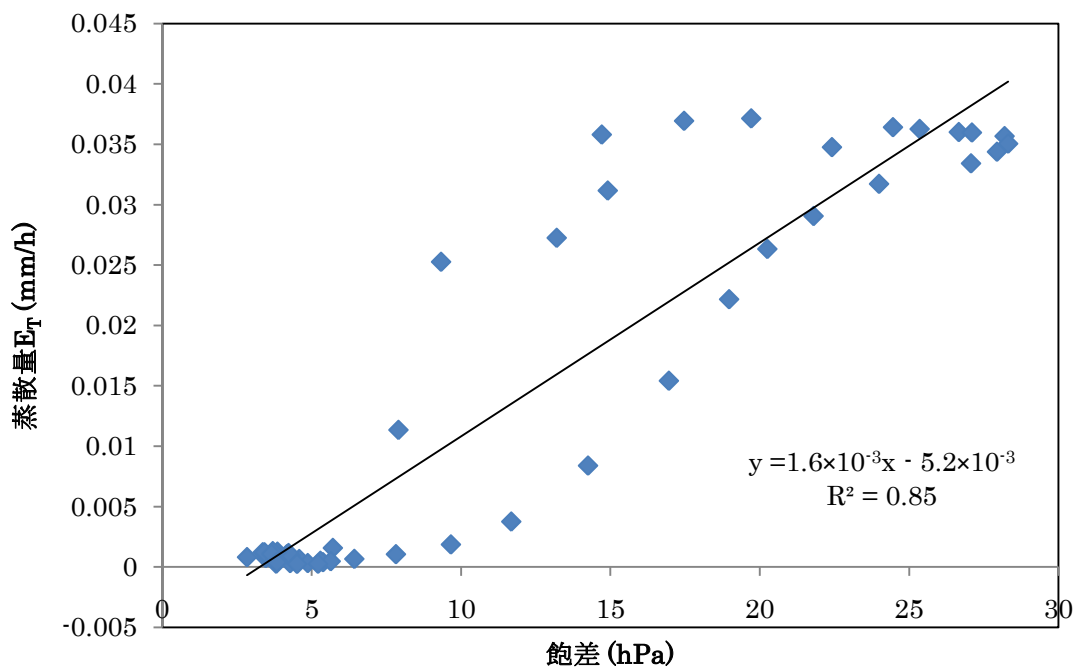
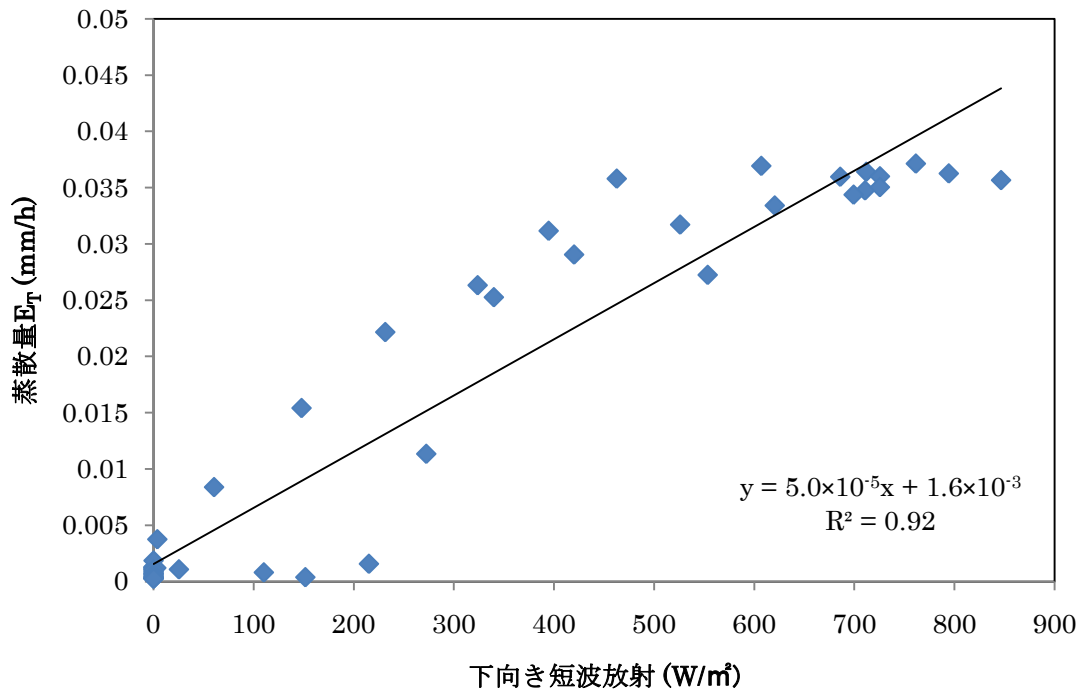


図 52 サンプル 11 番の 8/8 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

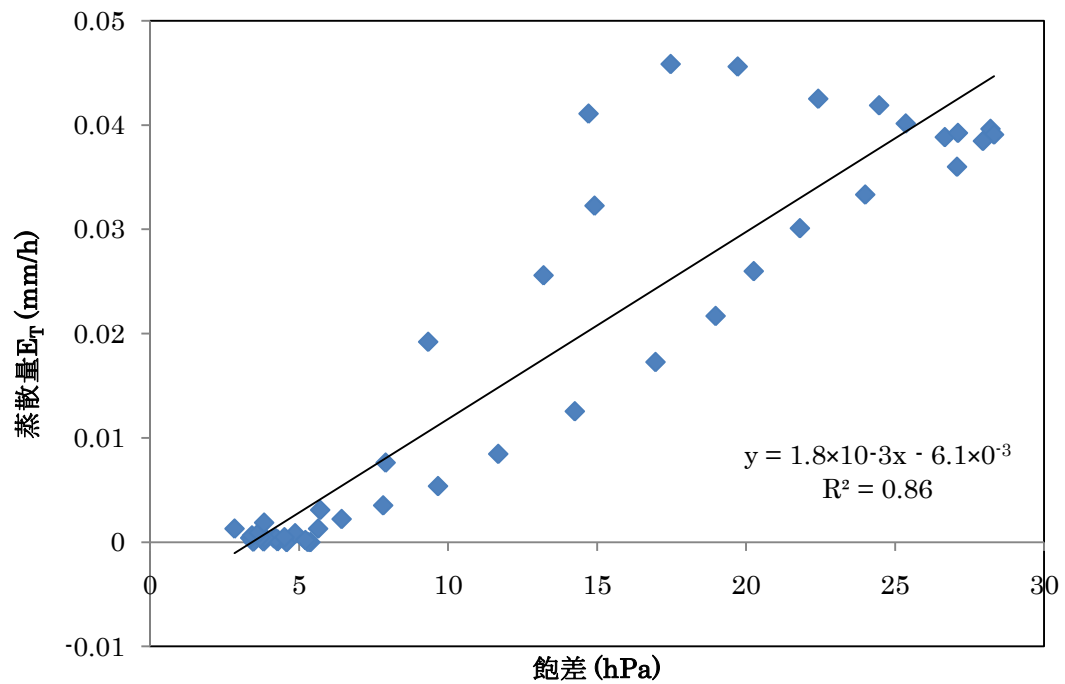
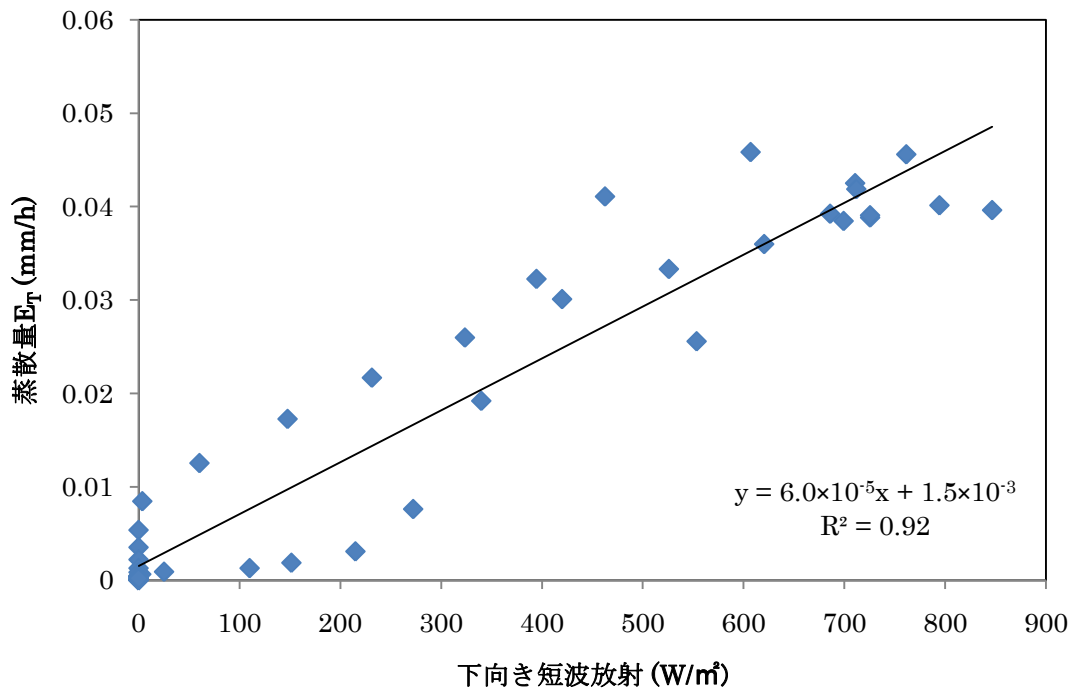


図 53 サンプル 6 番の 8 / 8 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

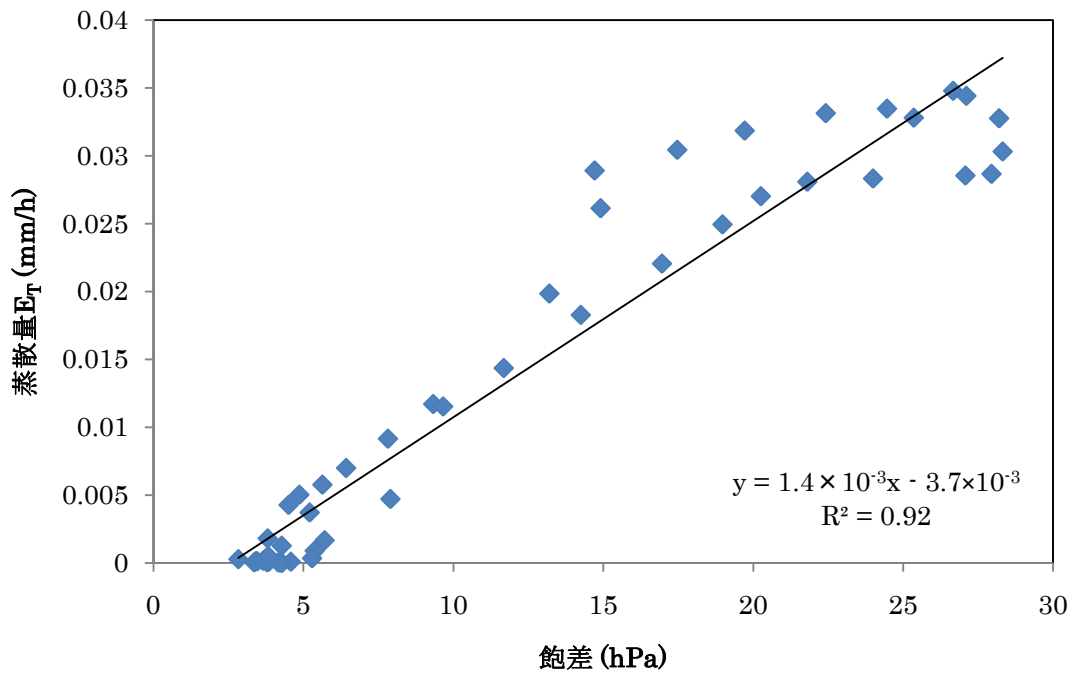
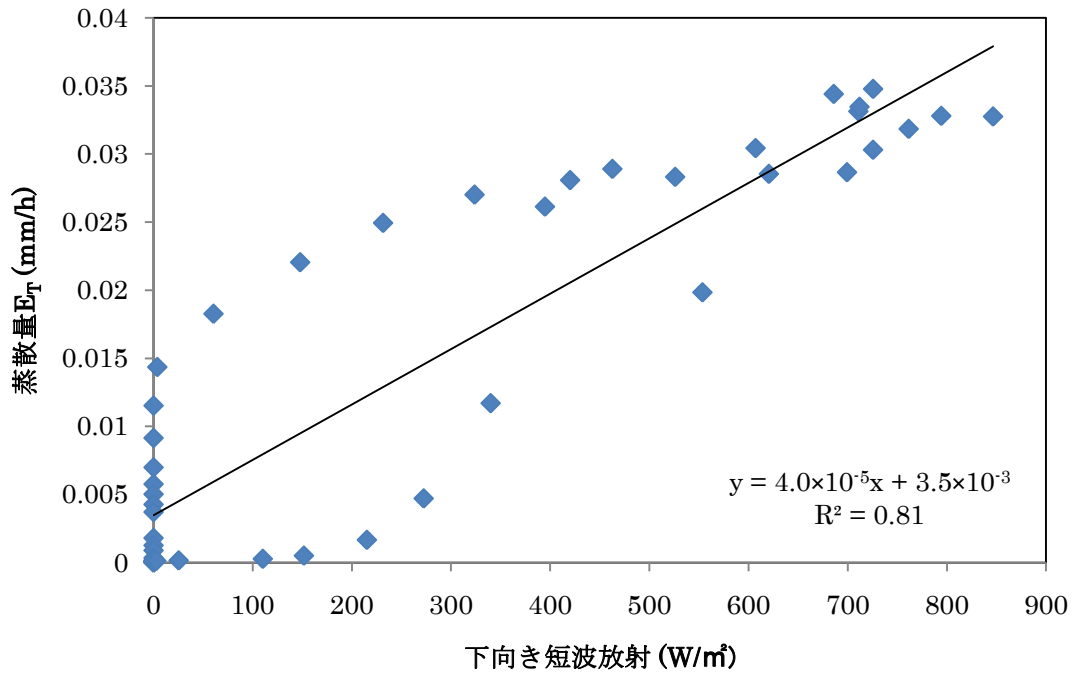


図 54 サンプル 5 番の 8/8 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

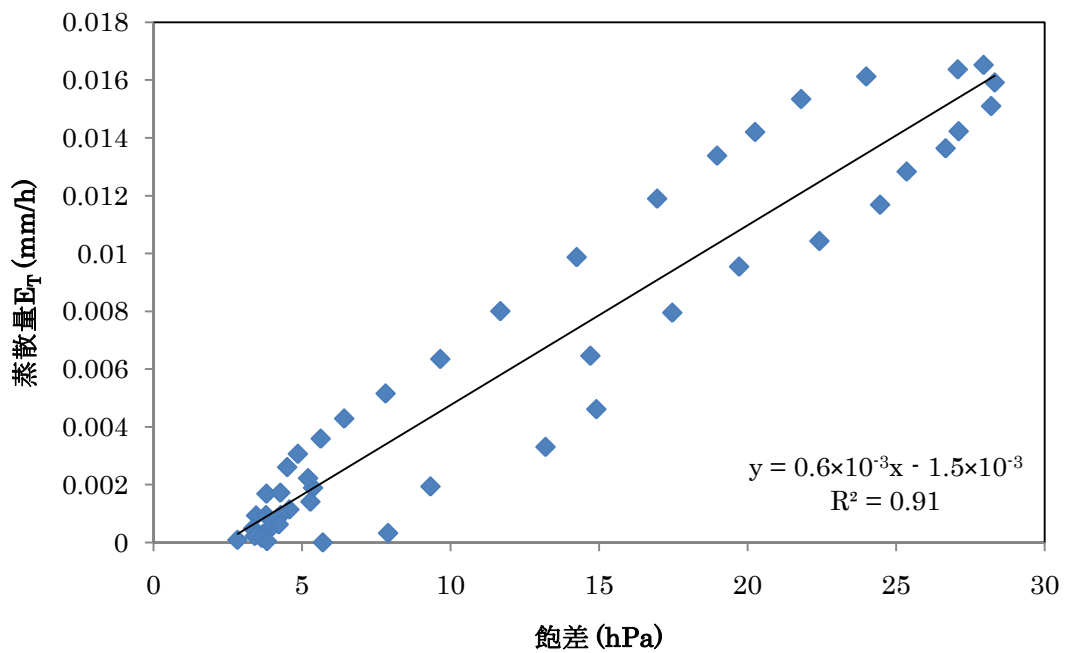
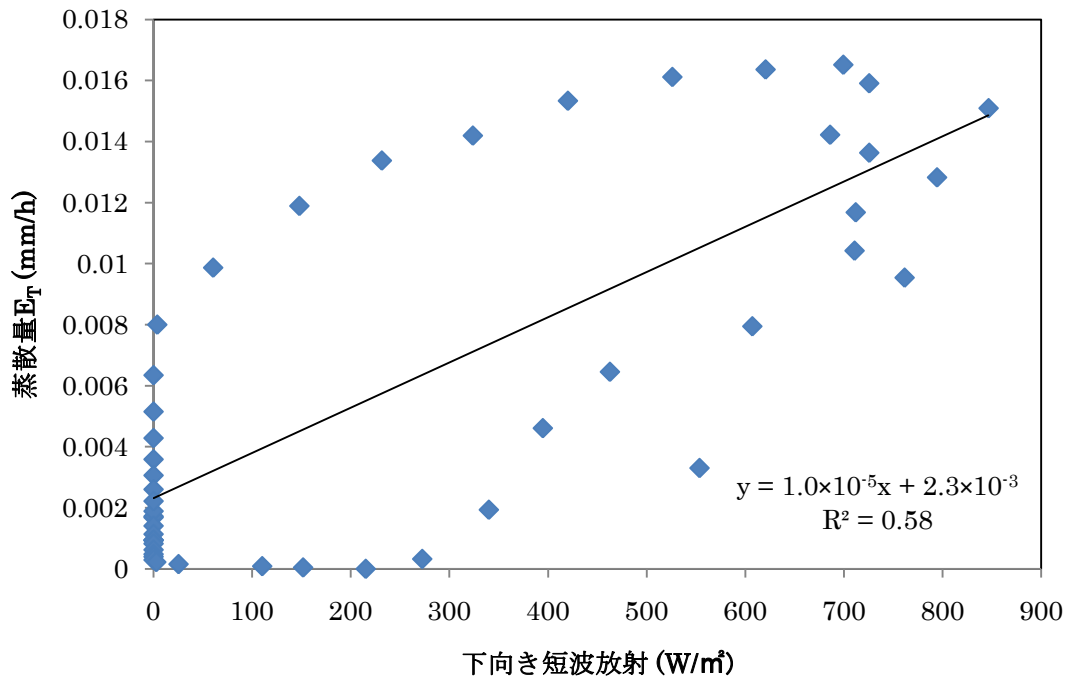


図 55 サンプル 4 番の 8 / 8 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

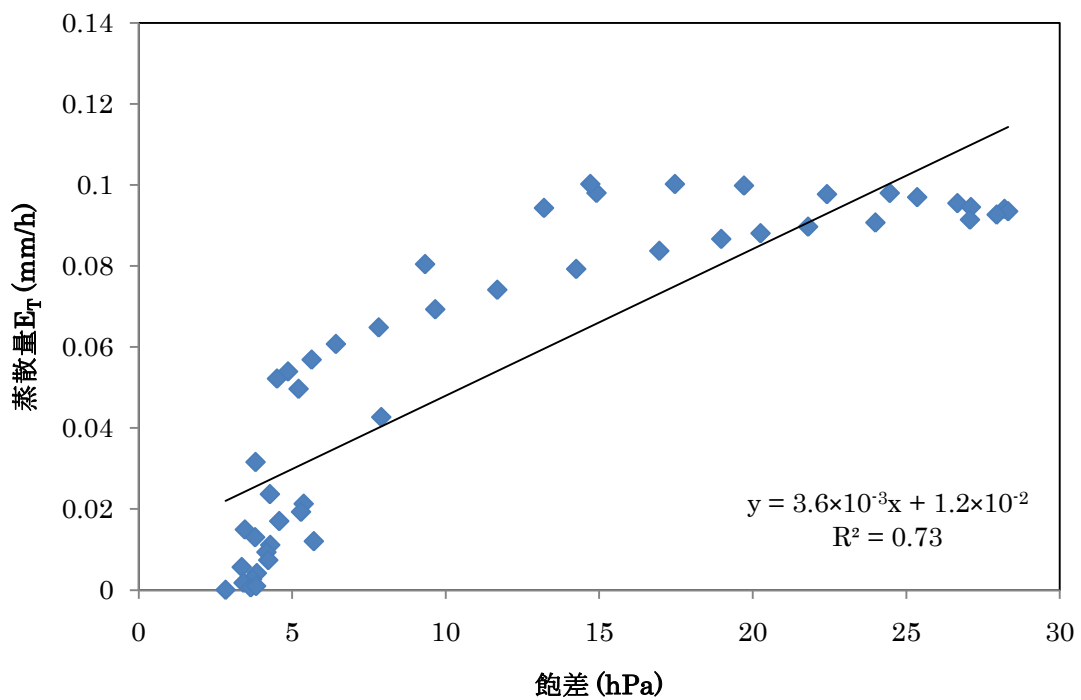
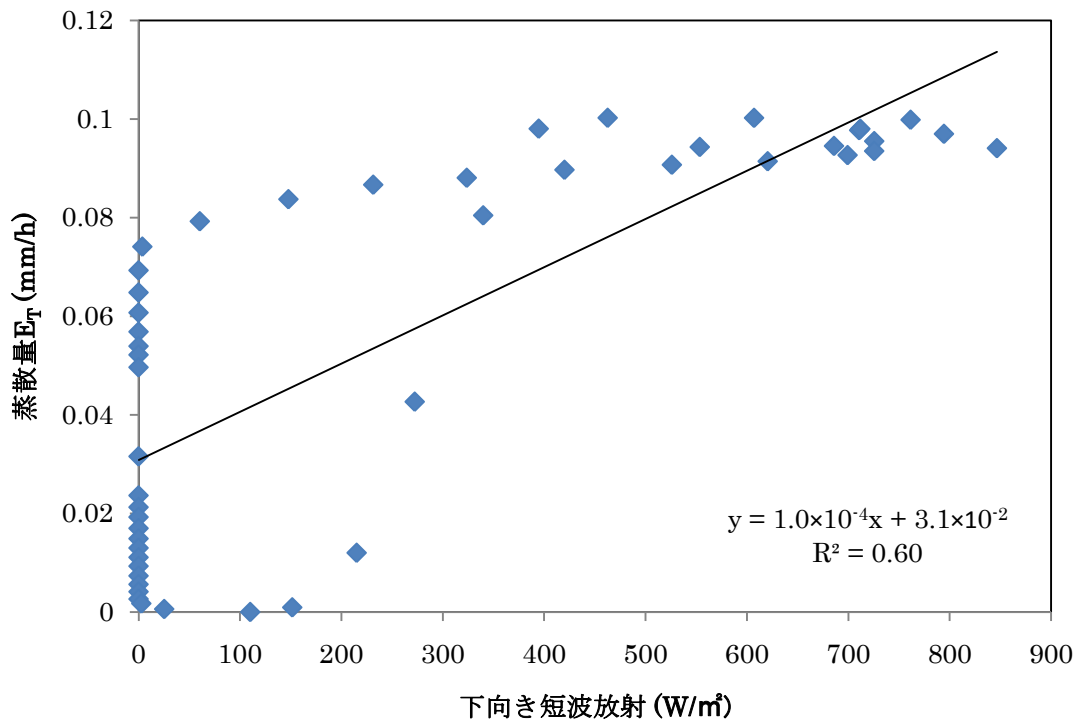


図 56 サンプル 3 番の 8/8 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

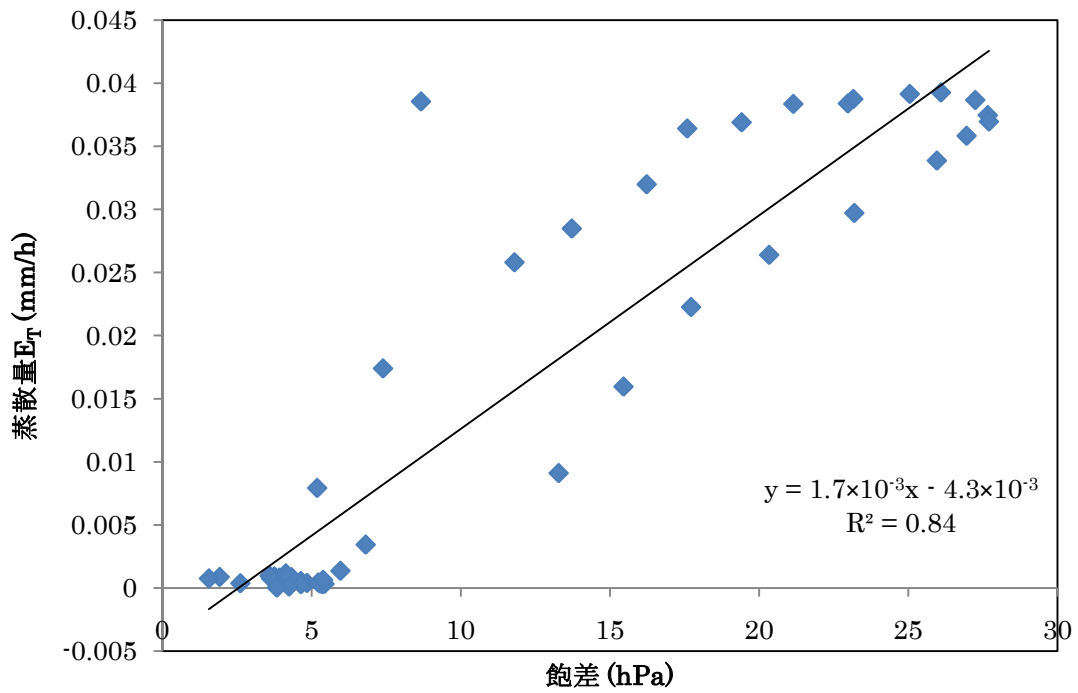
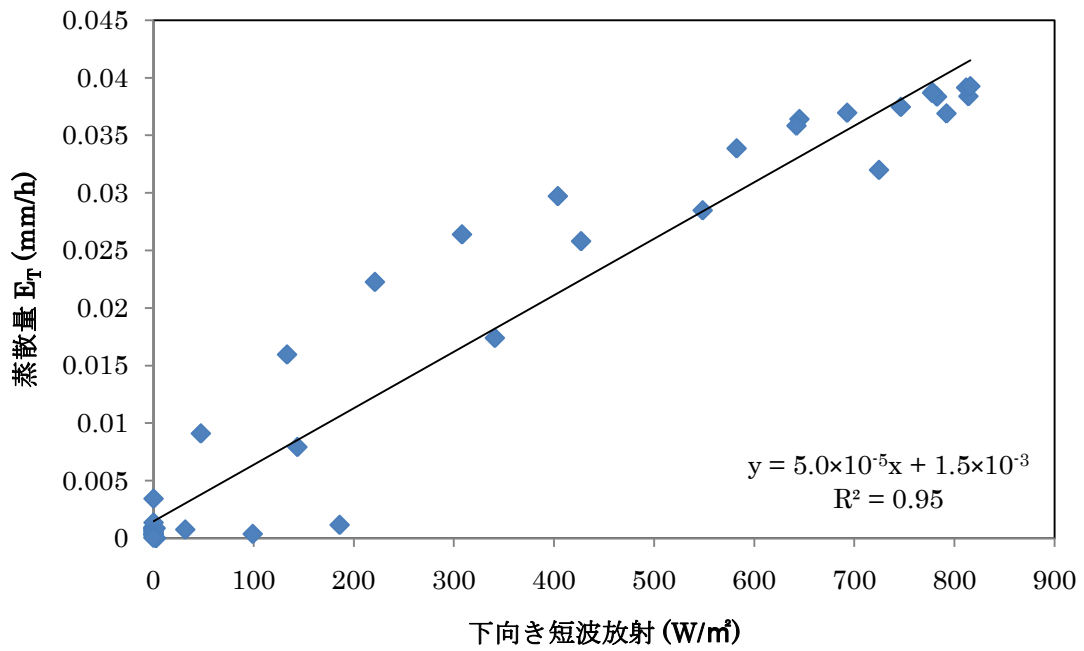


図 57 サンプル 11 番の 8/9 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

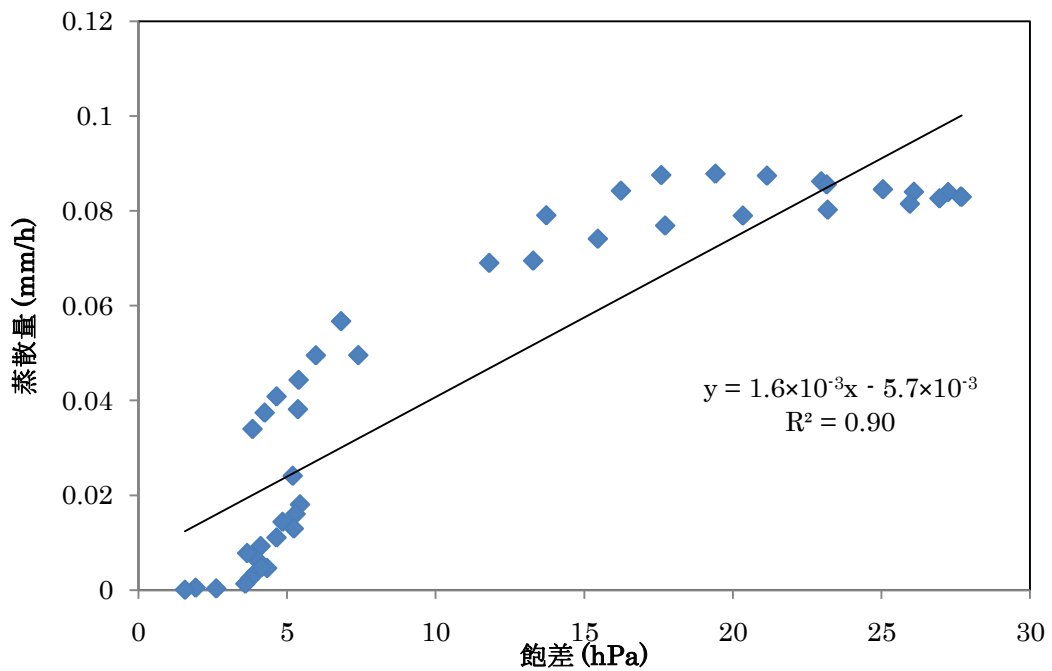
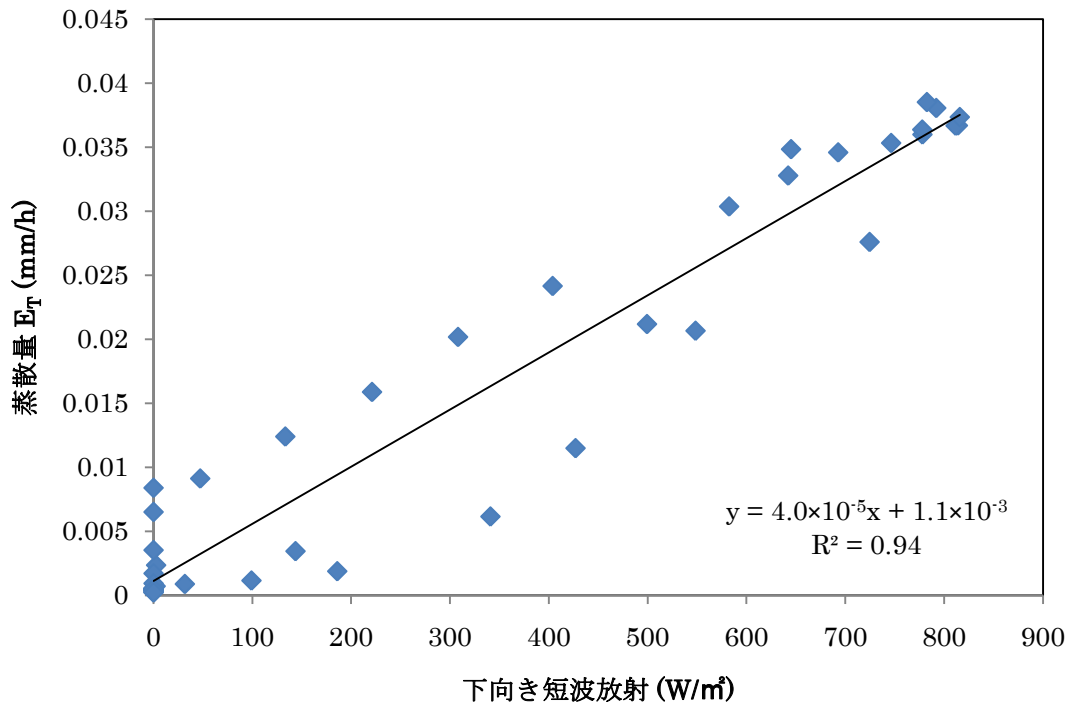


図 58 サンプル 6 番の 8/9 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

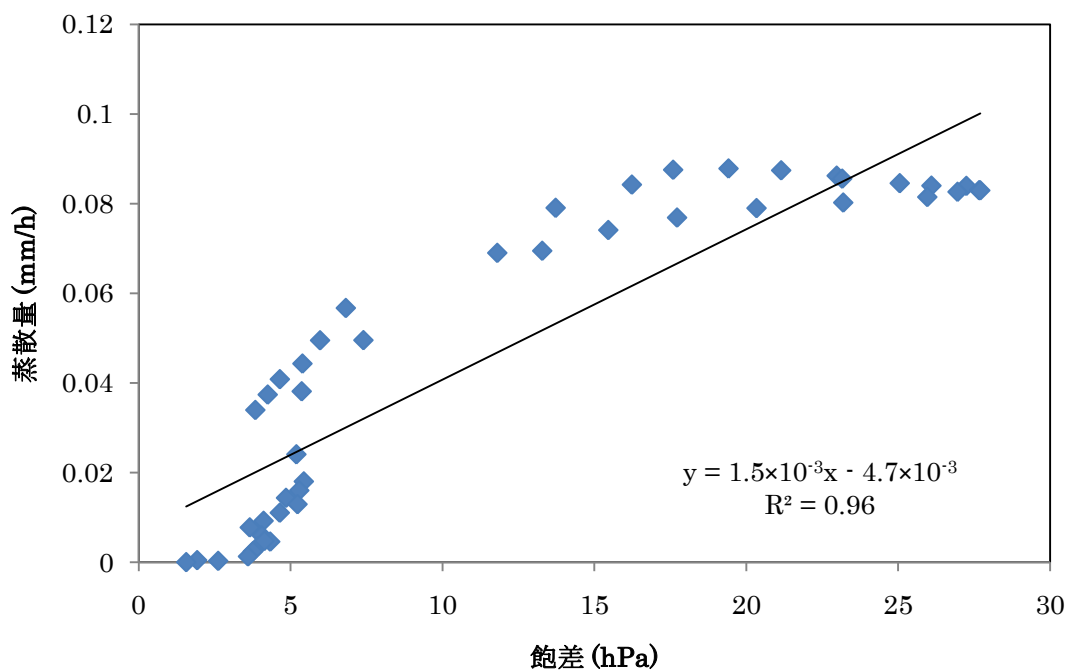
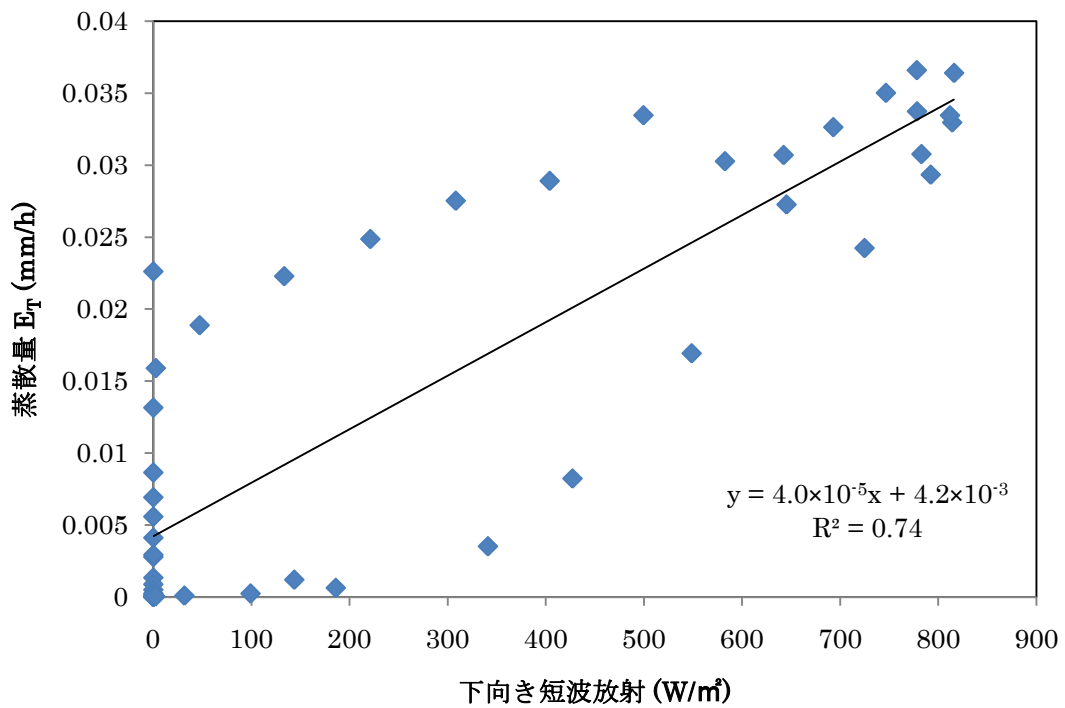


図 59 サンプル 5 番の 8/9 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

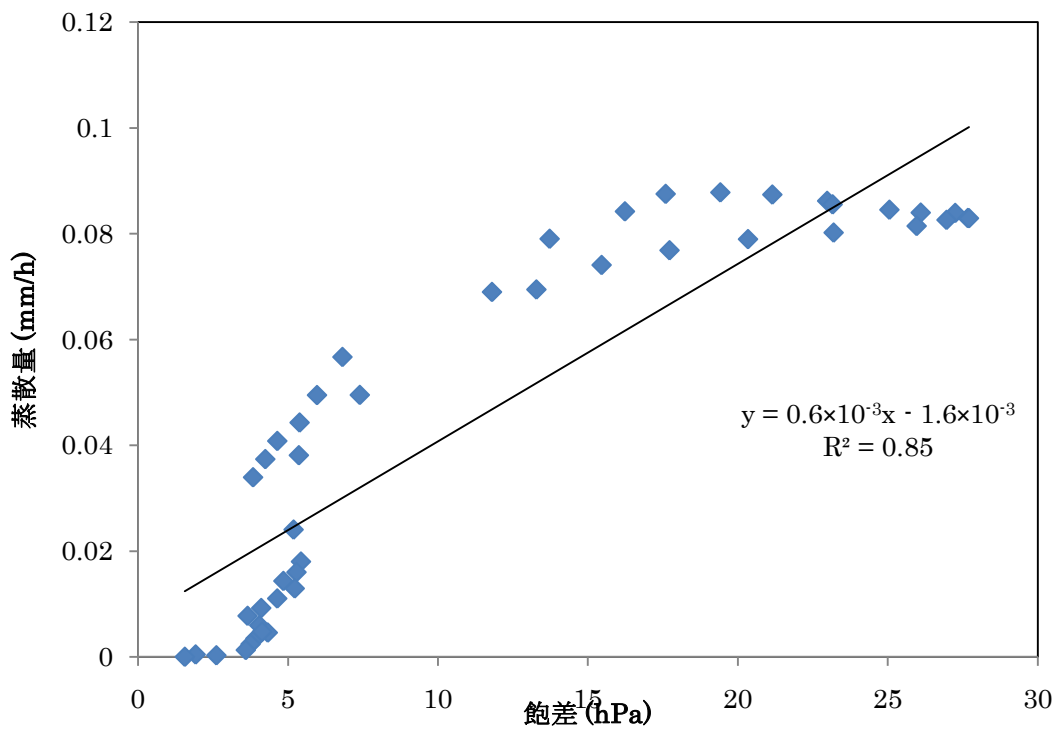
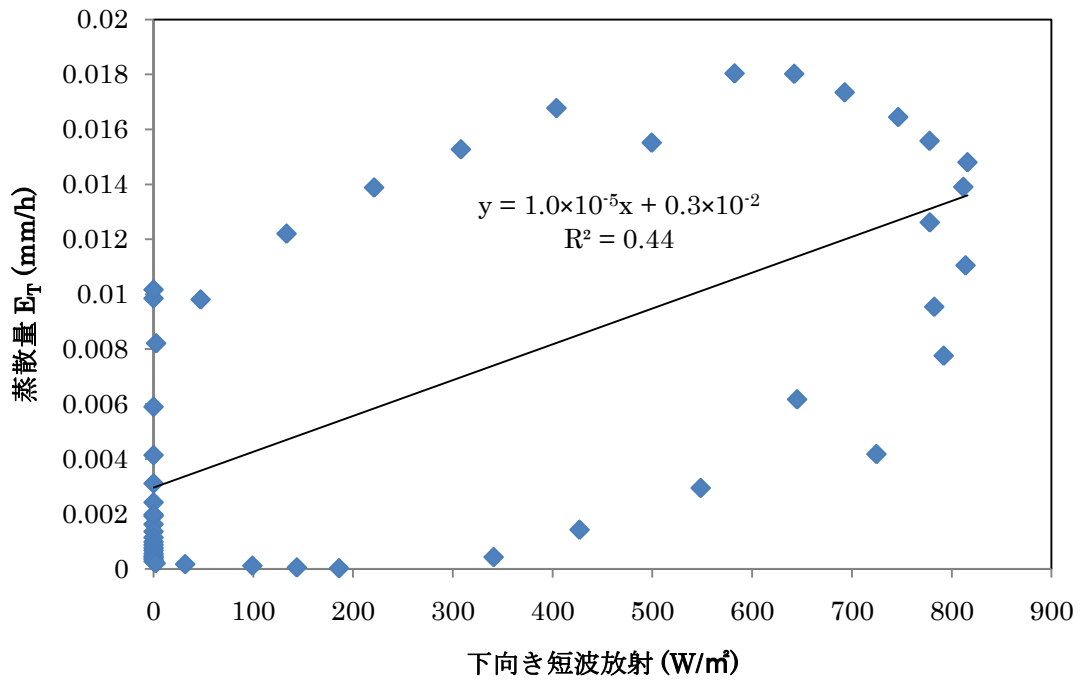


図 60 サンプル 4 番の 8/9 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

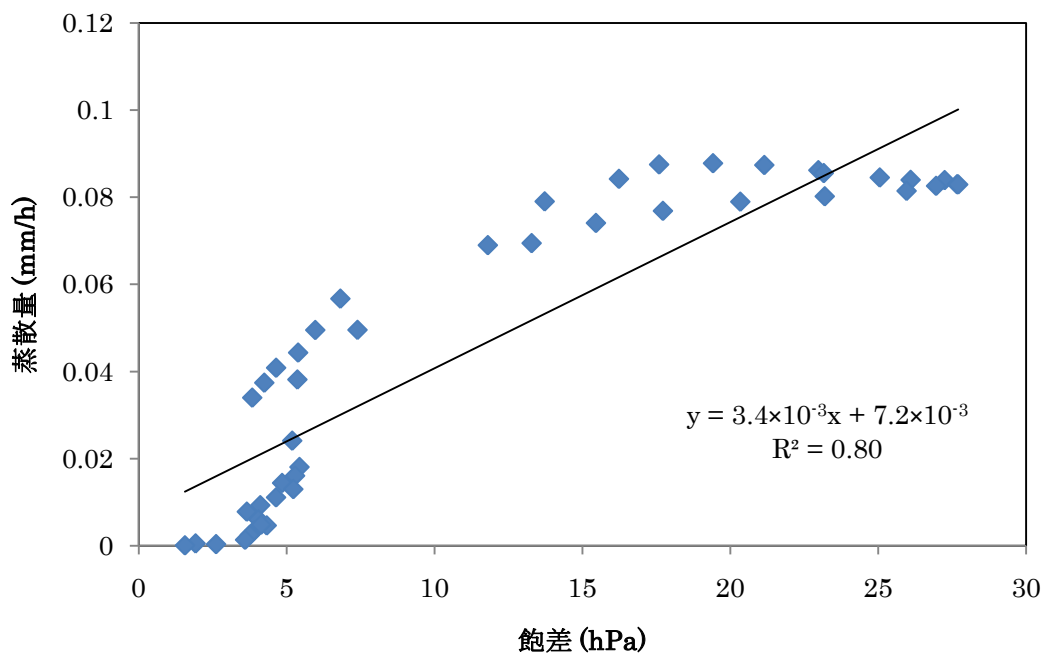
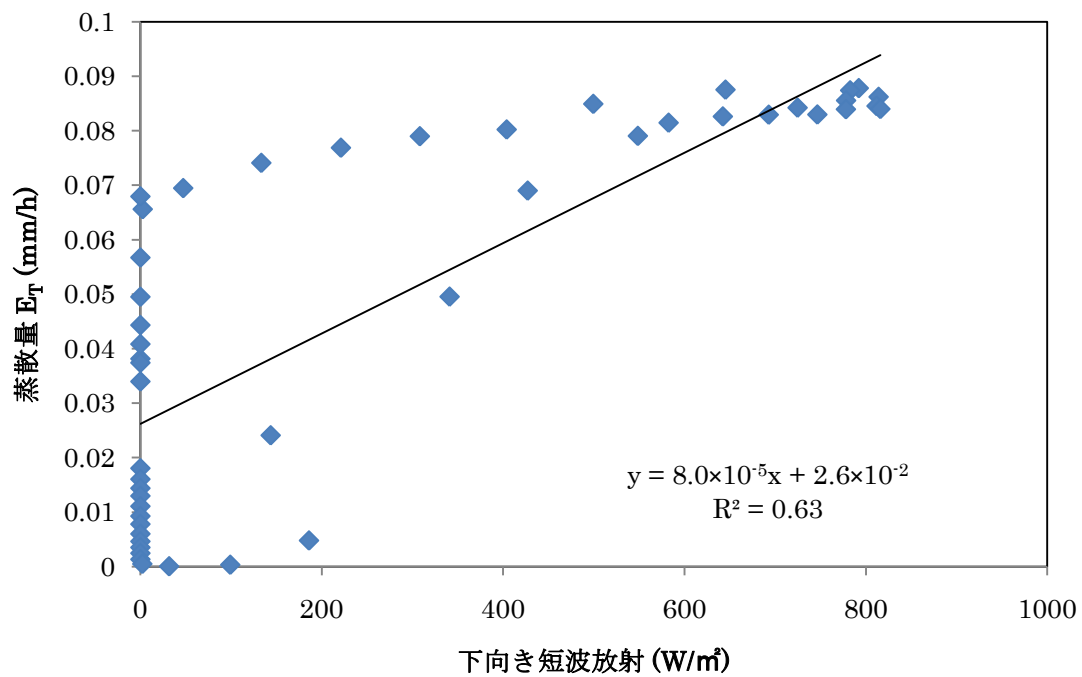


図 61 サンプル 3 番の 8/9 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

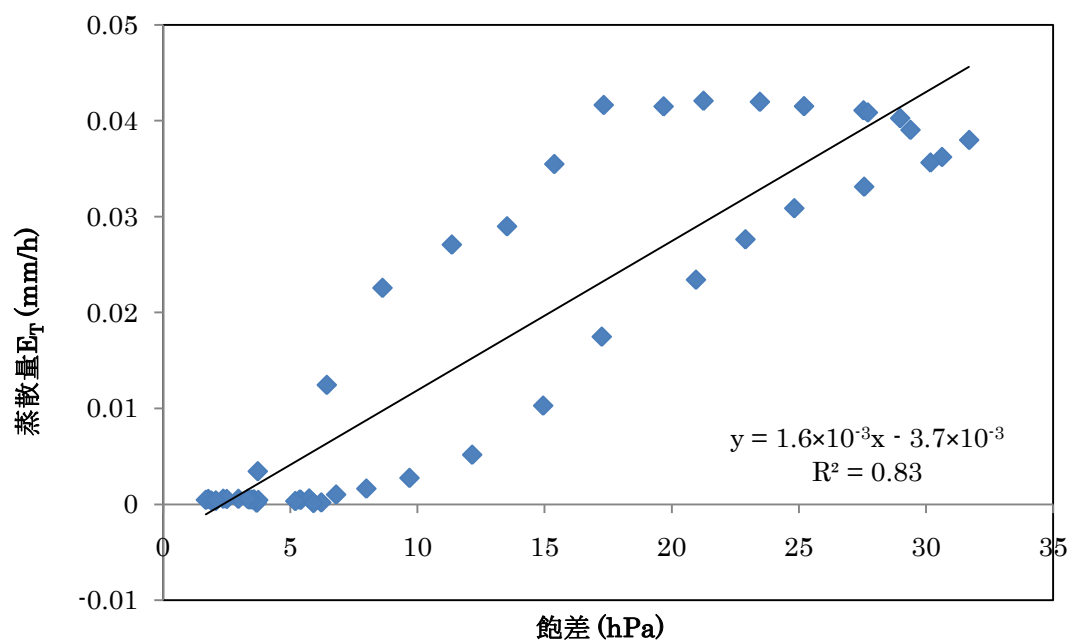
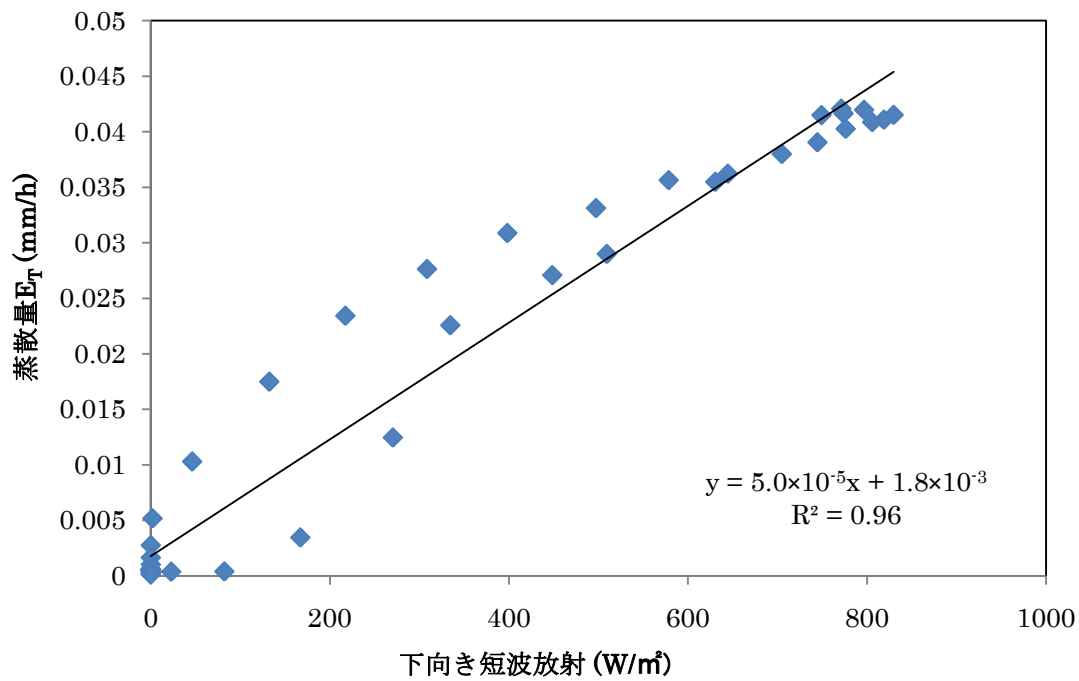


図 62 サンプル 11 番の 8 / 10 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

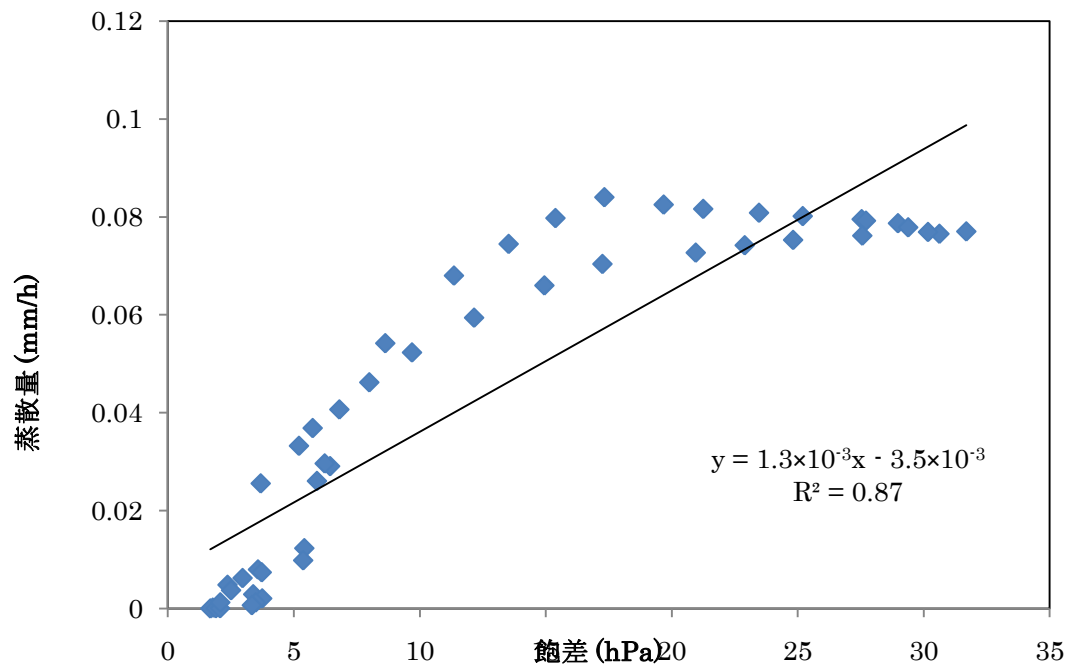
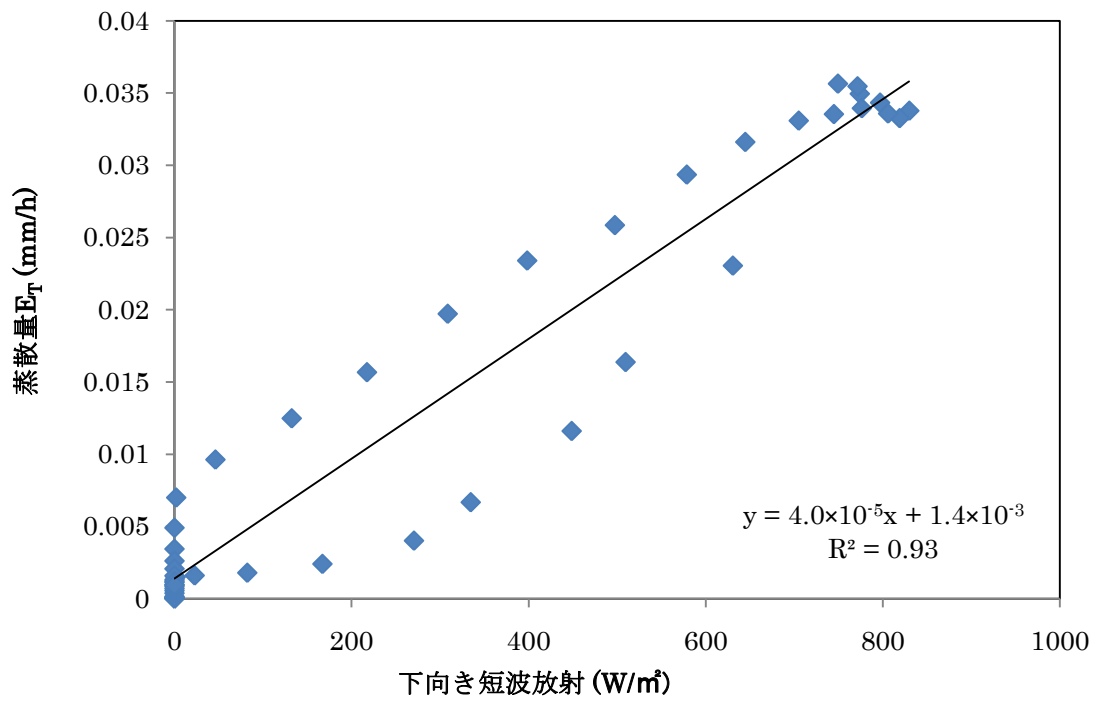


図 63 サンプル 6 番の 8 / 10 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

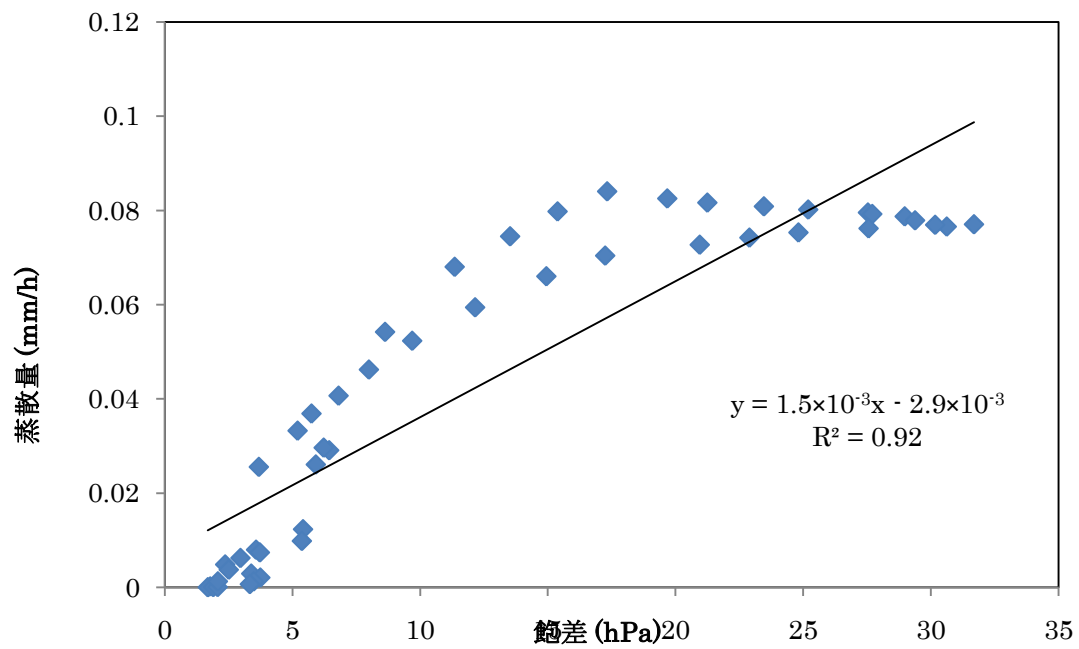
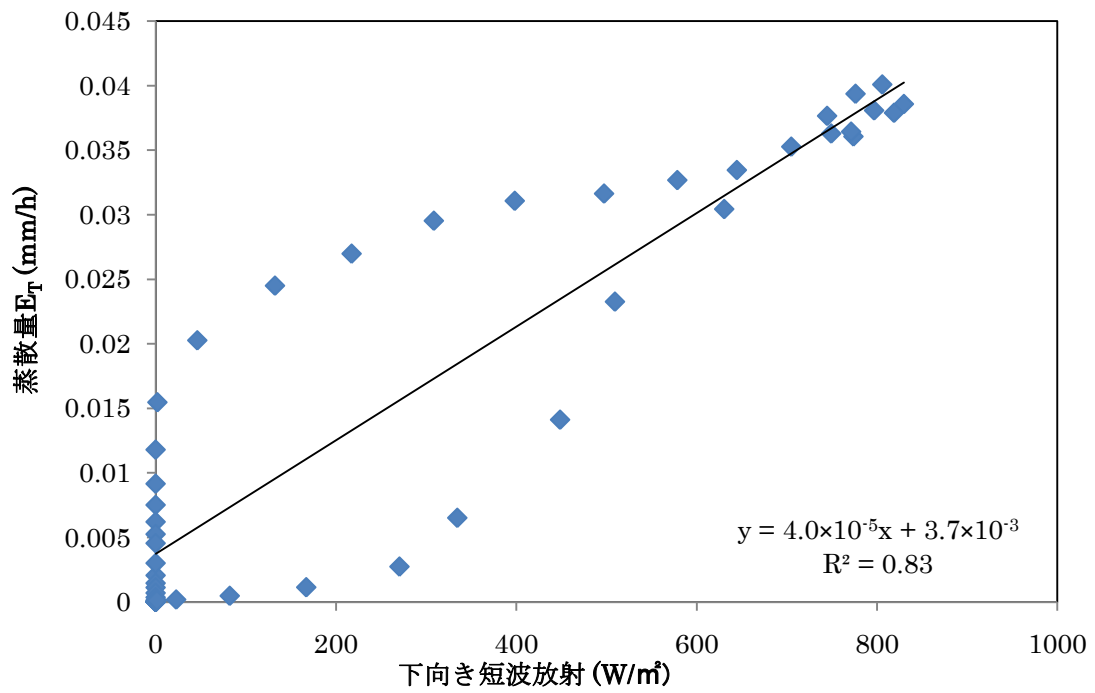


図 64 サンプル 5 番の 8 / 10 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

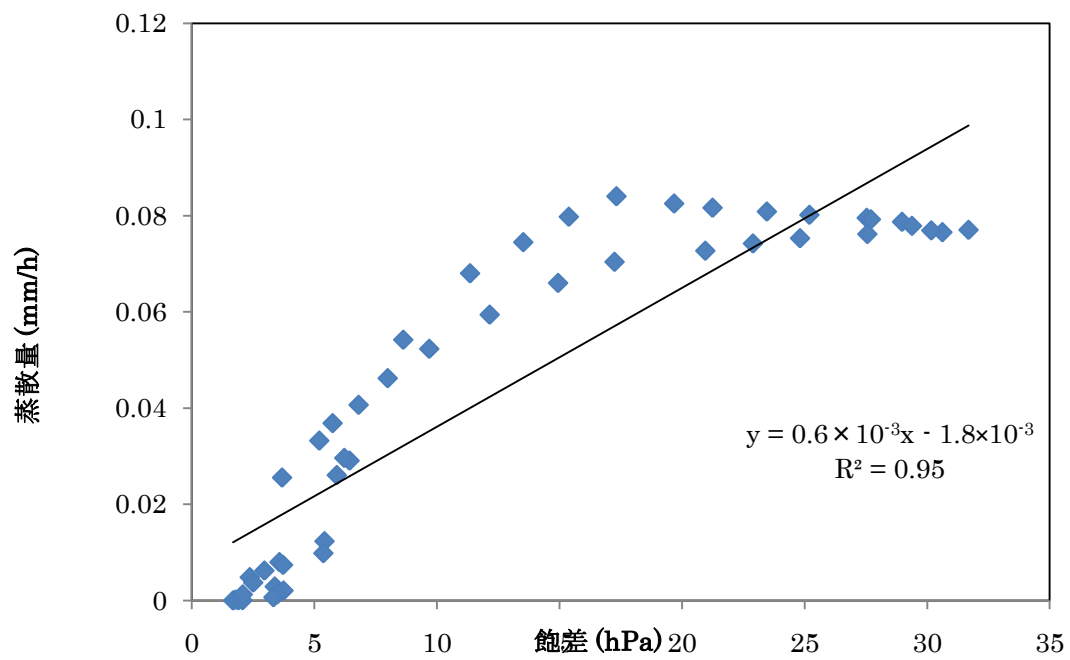
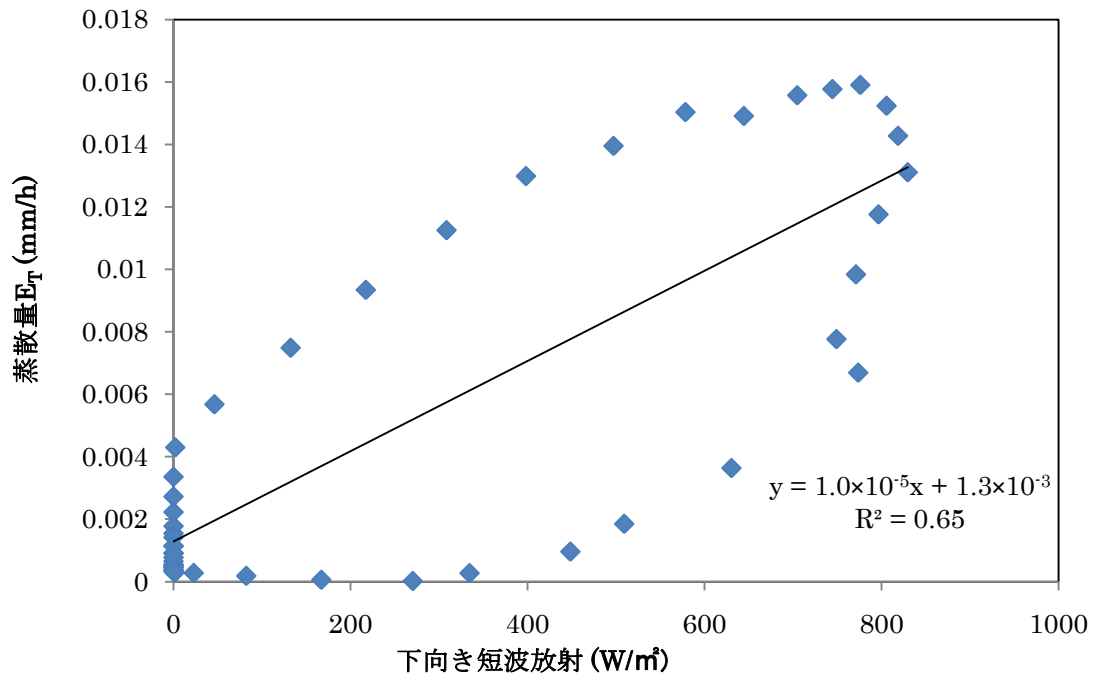


図 65 サンプル 4 番の 8 / 10 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

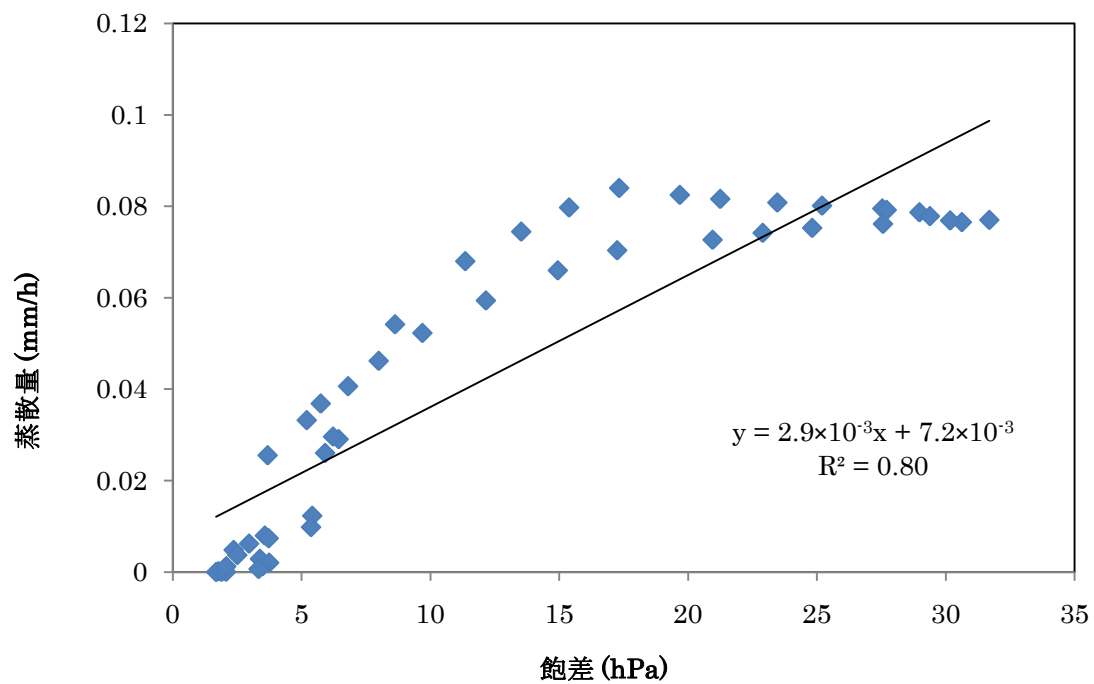
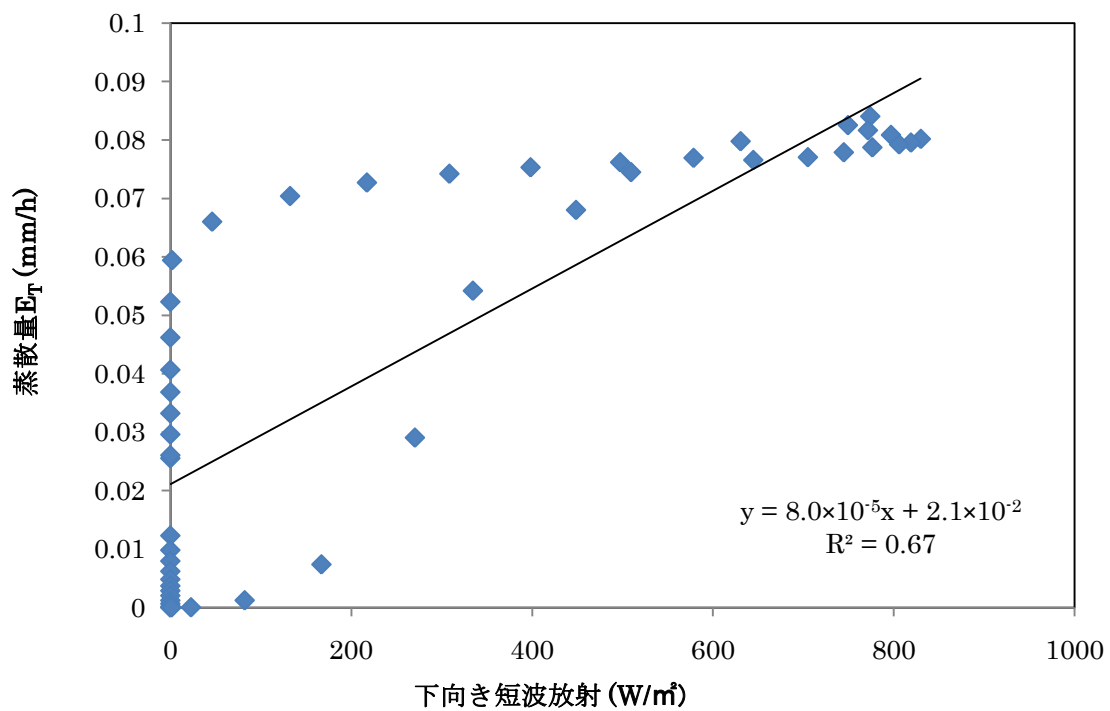


図 66 サンプル 3 番の 8 / 10 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

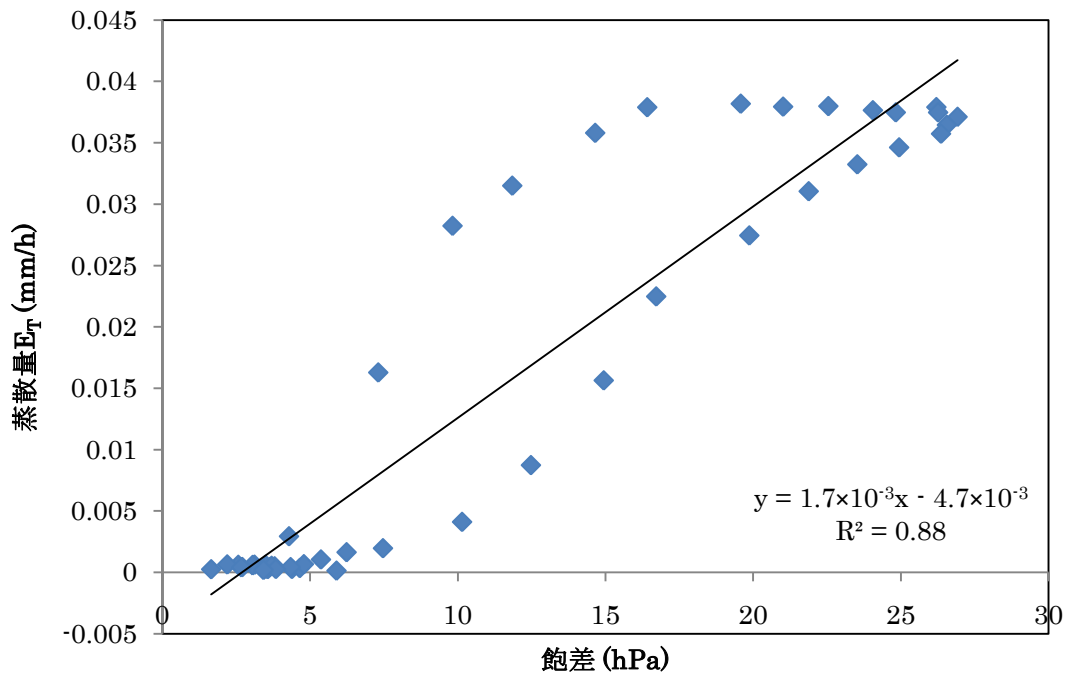
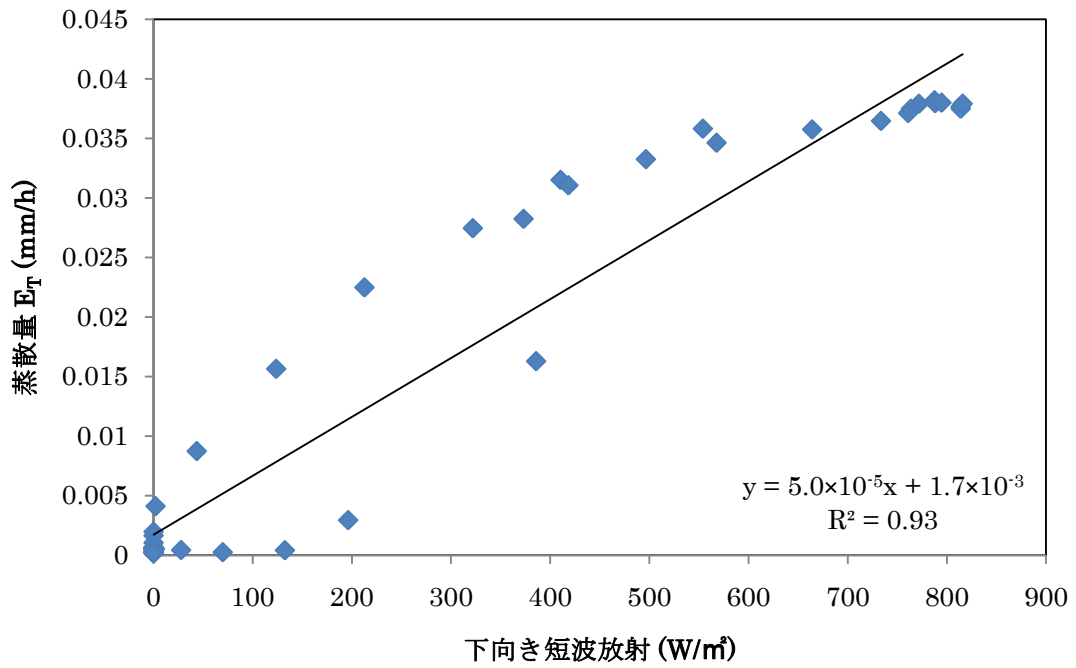


図 67 サンプル 11 番の 8 / 11 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

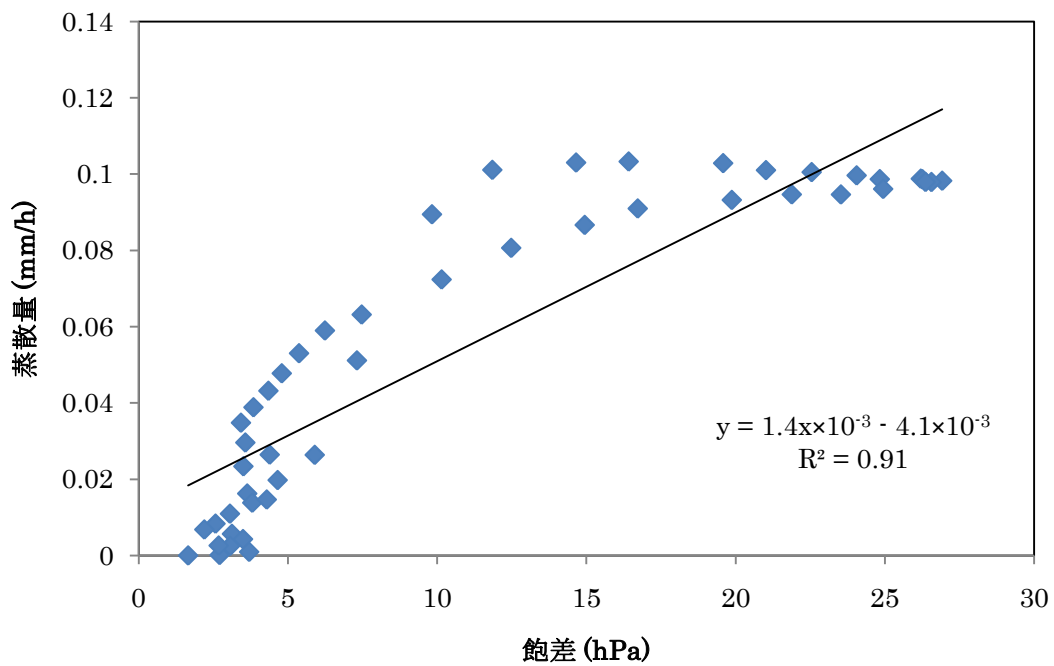
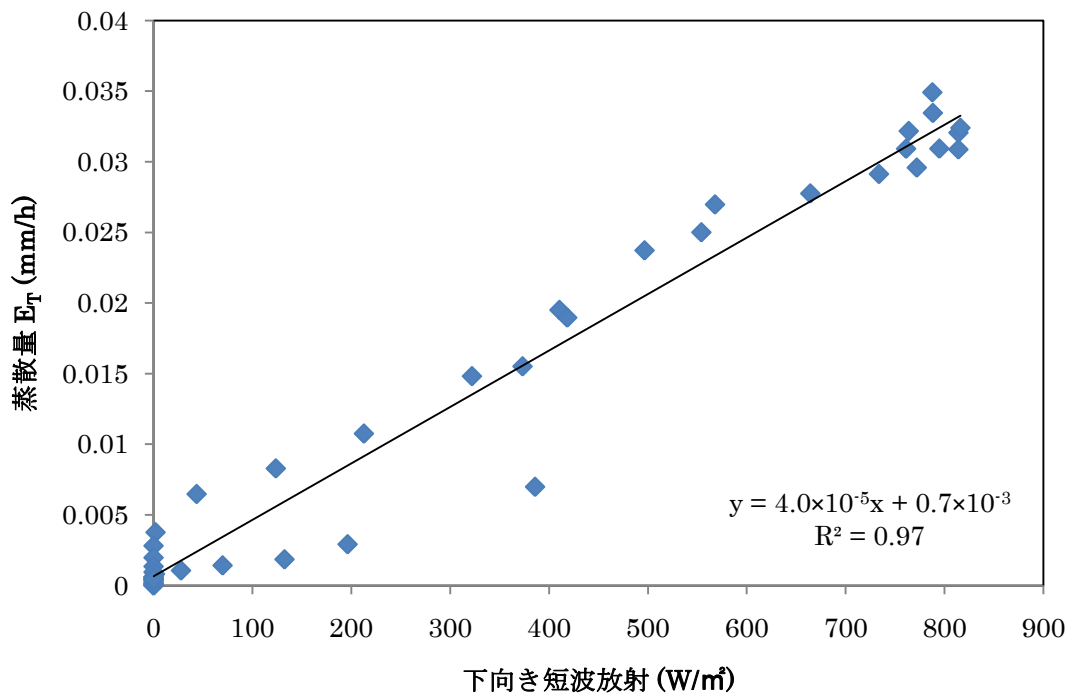


図 68 サンプル 6 番の 8/11 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

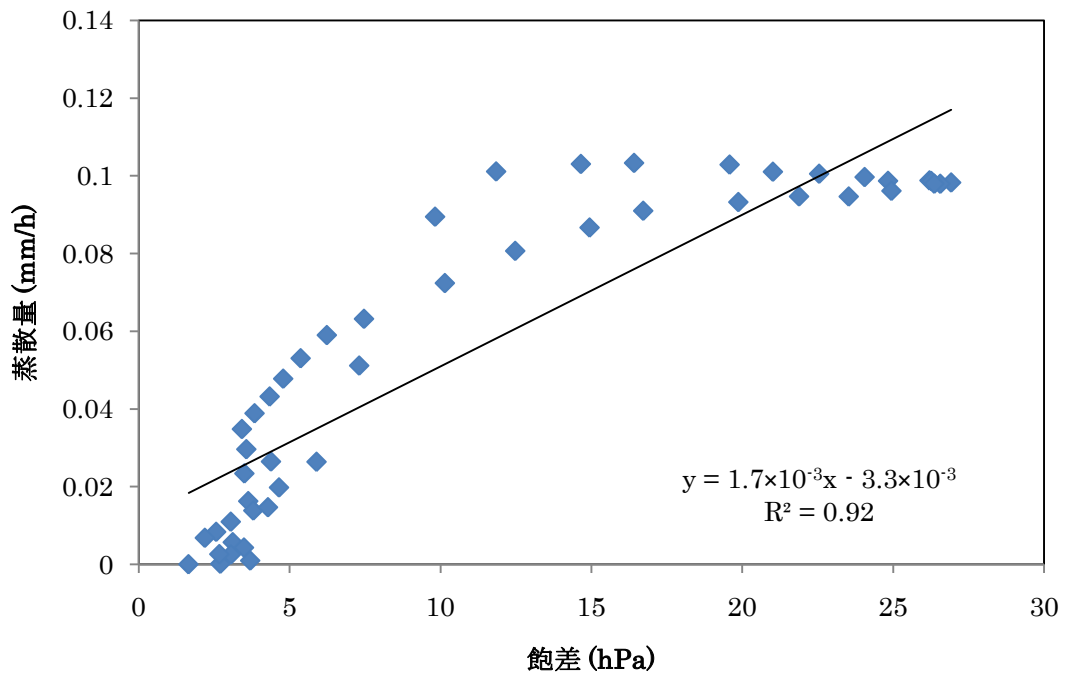
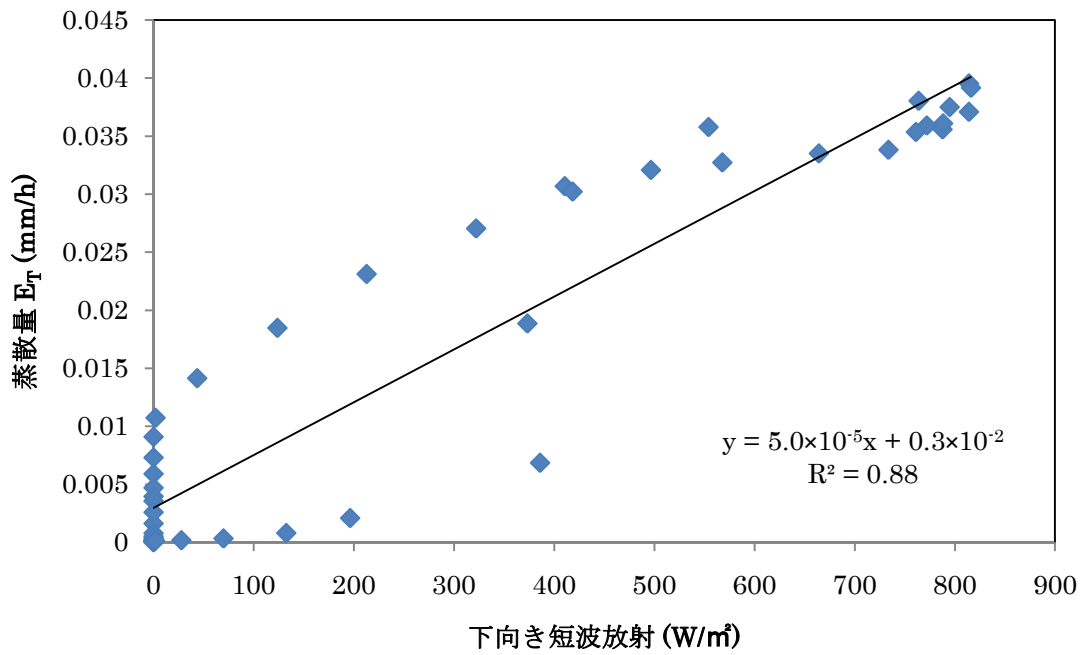


図 69 サンプル 5 番の 8 / 11 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

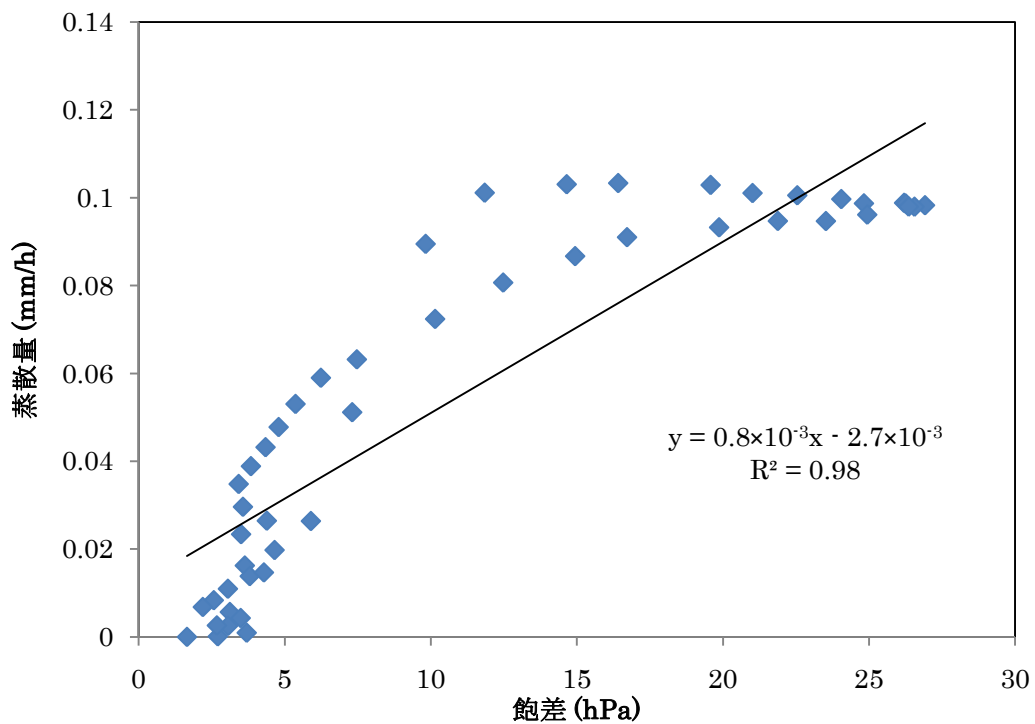
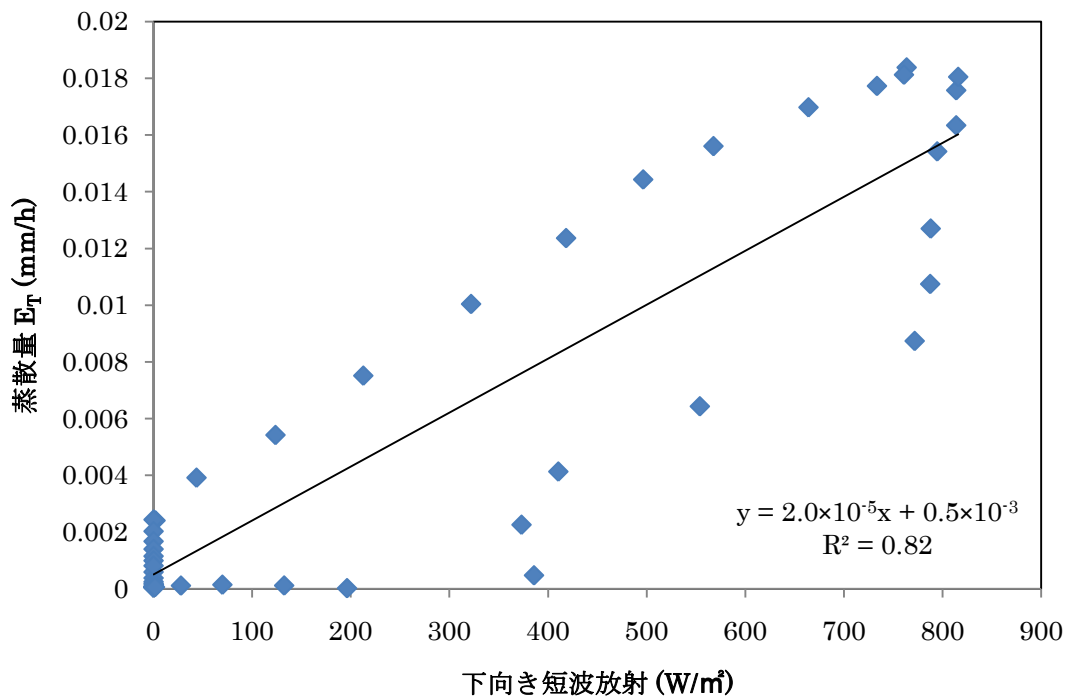


図 70 サンプル 4 番の 8 / 11 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

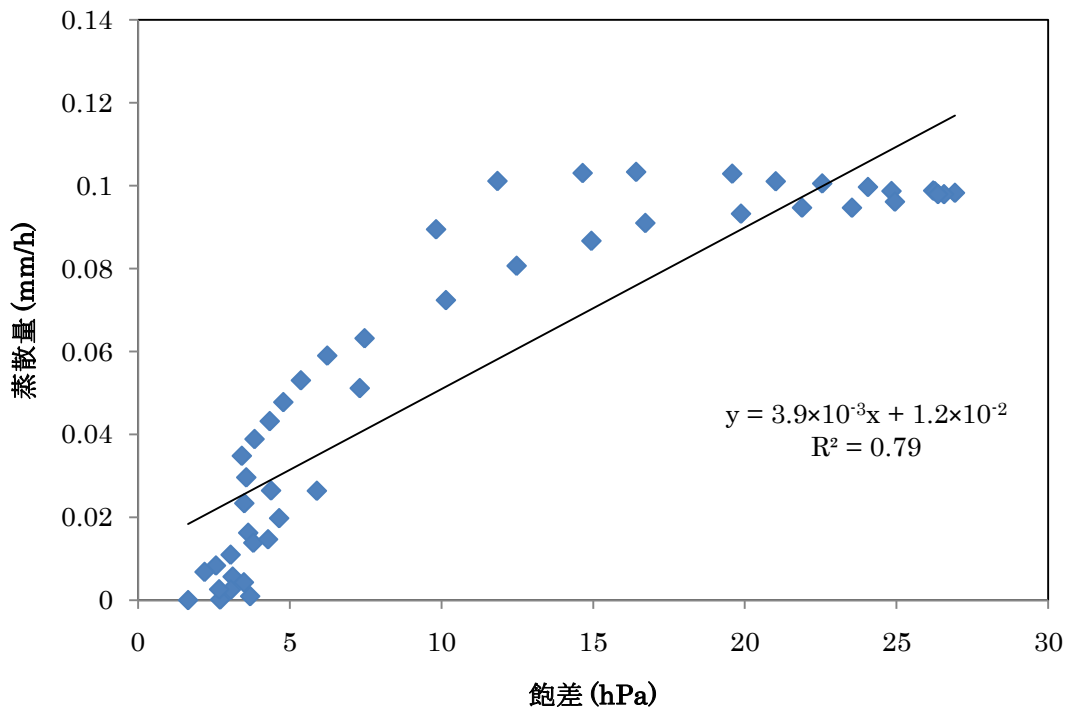
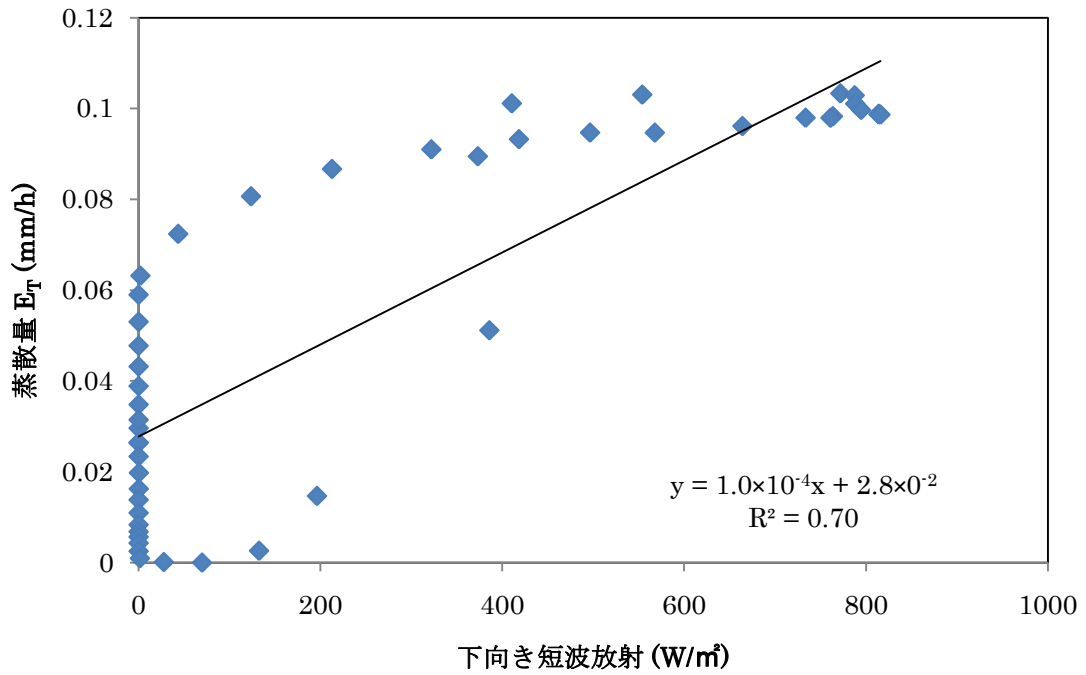


図 71 サンプル 3 番の 8 / 11 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

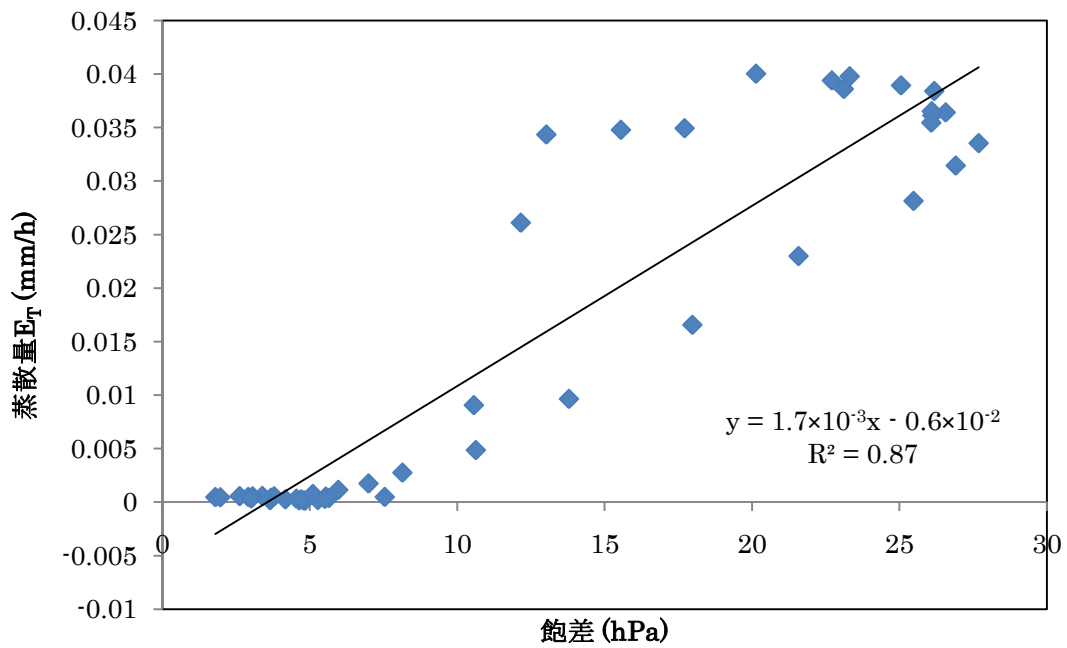
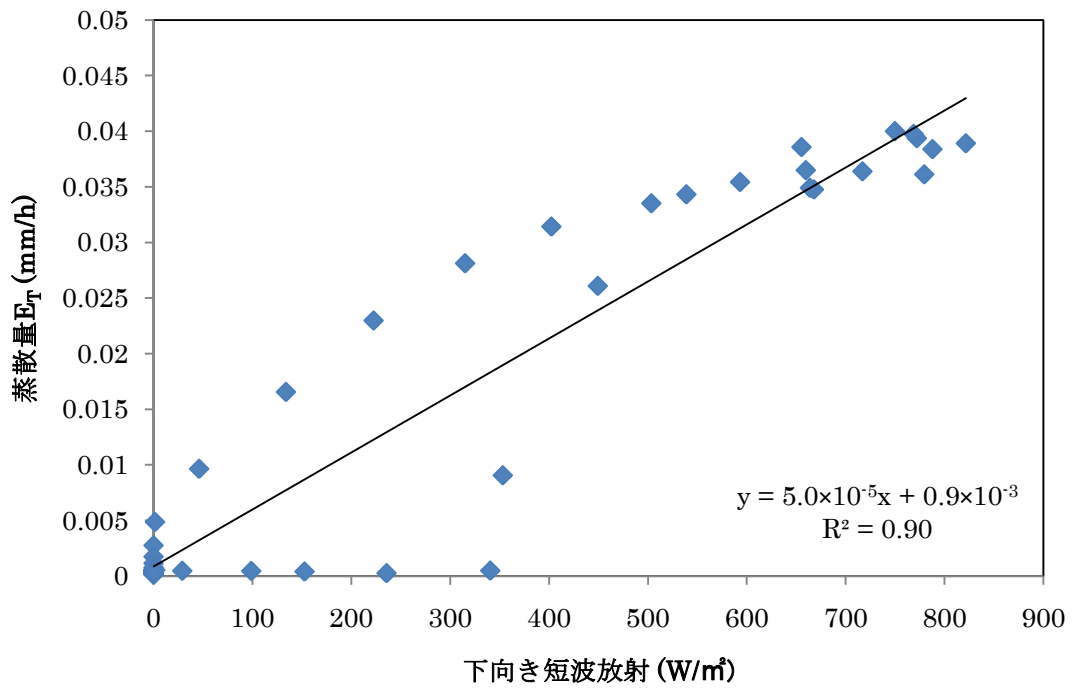


図 72 サンプル 11 番の 8 / 12 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

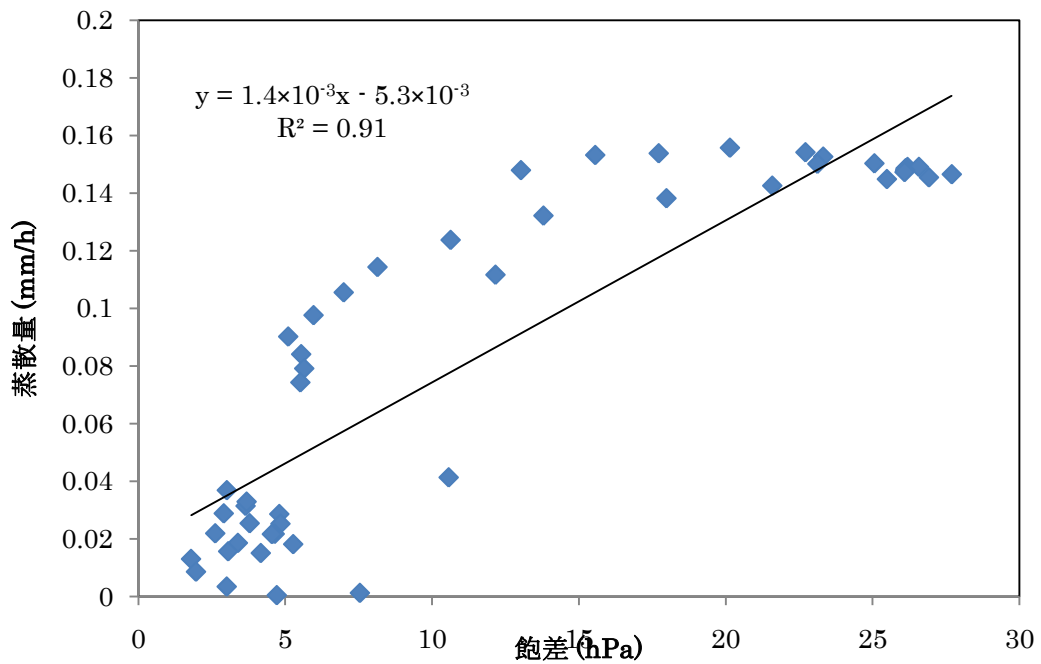
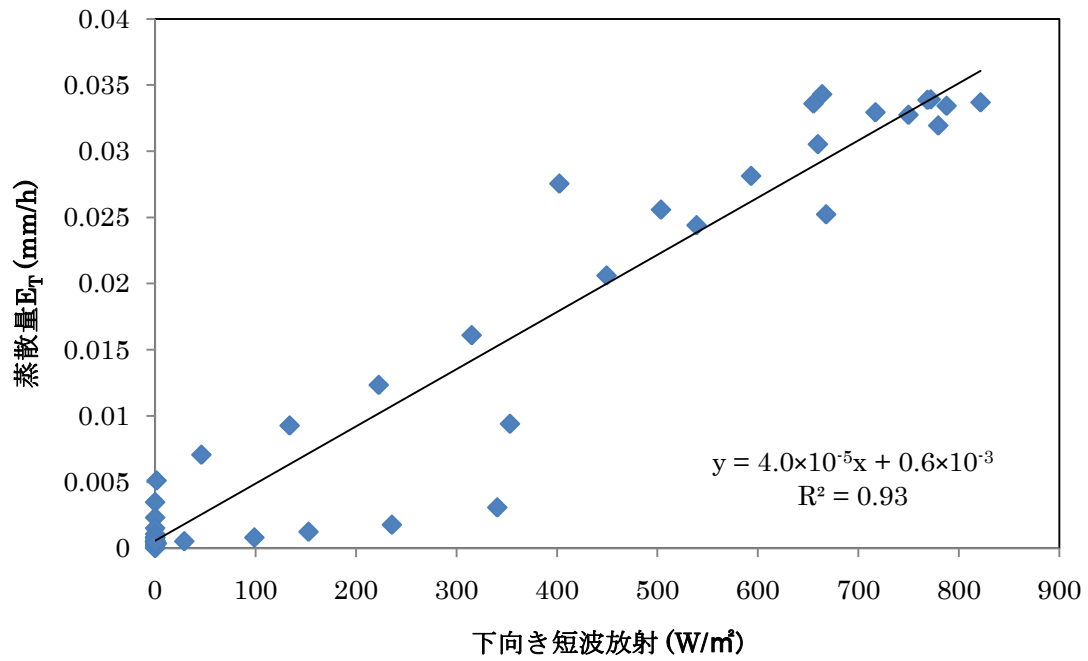


図 73 サンプル 6 番の 8 / 12 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

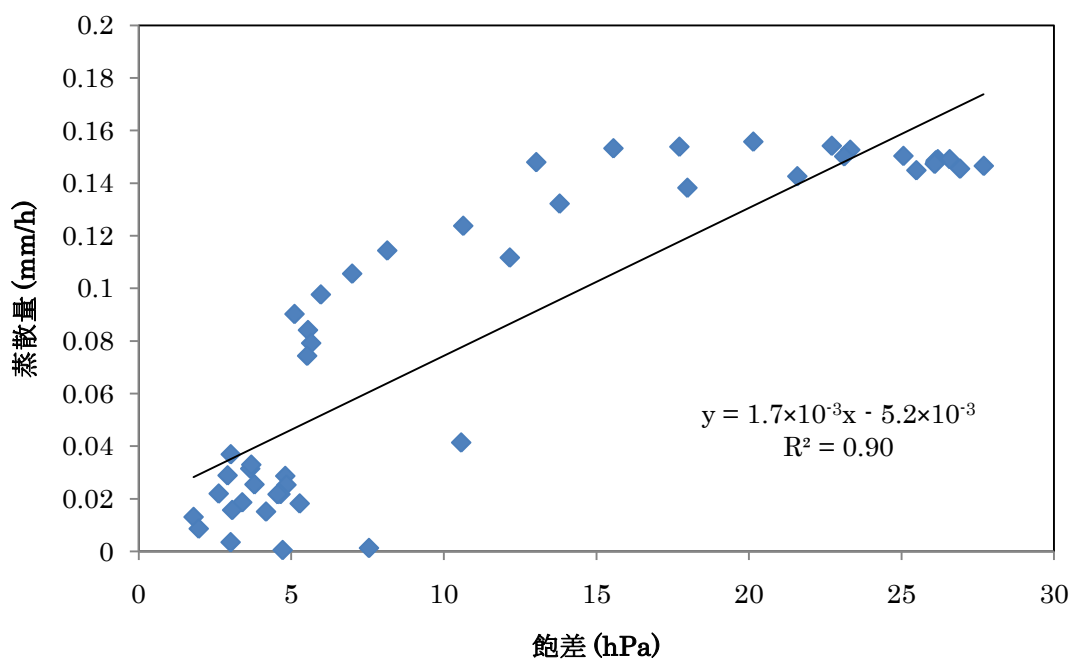
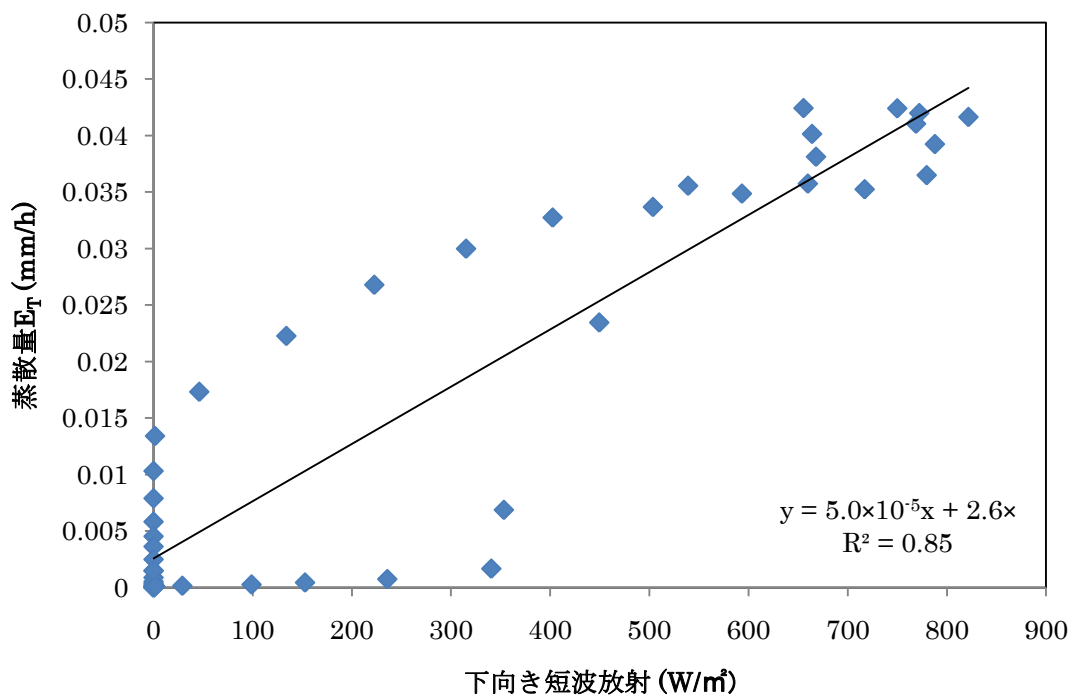


図 74 サンプル 5 番の 8/12 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

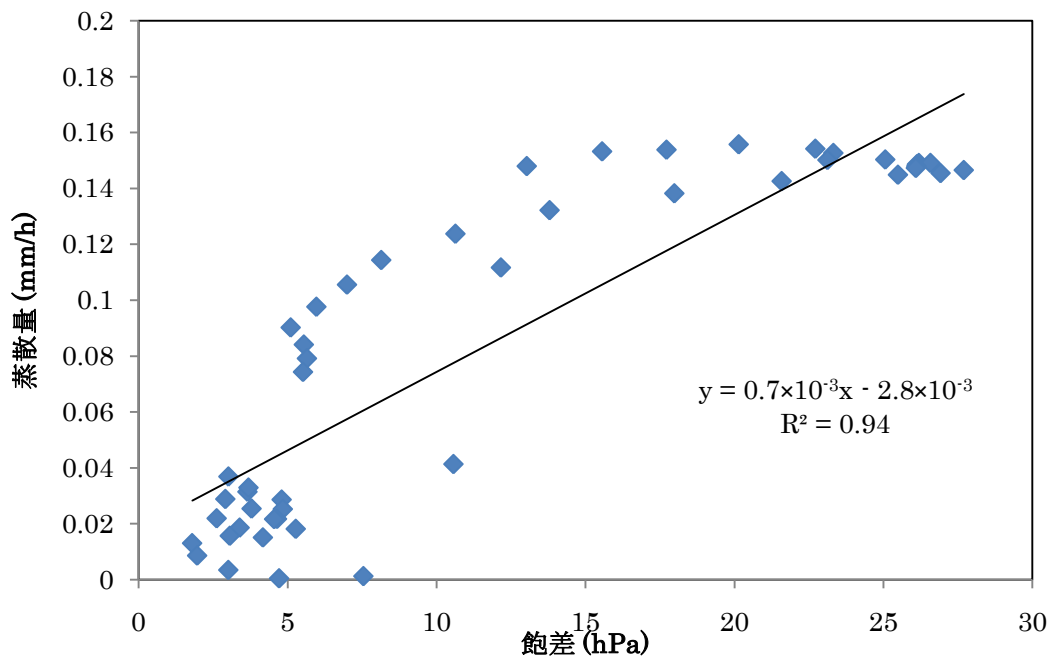
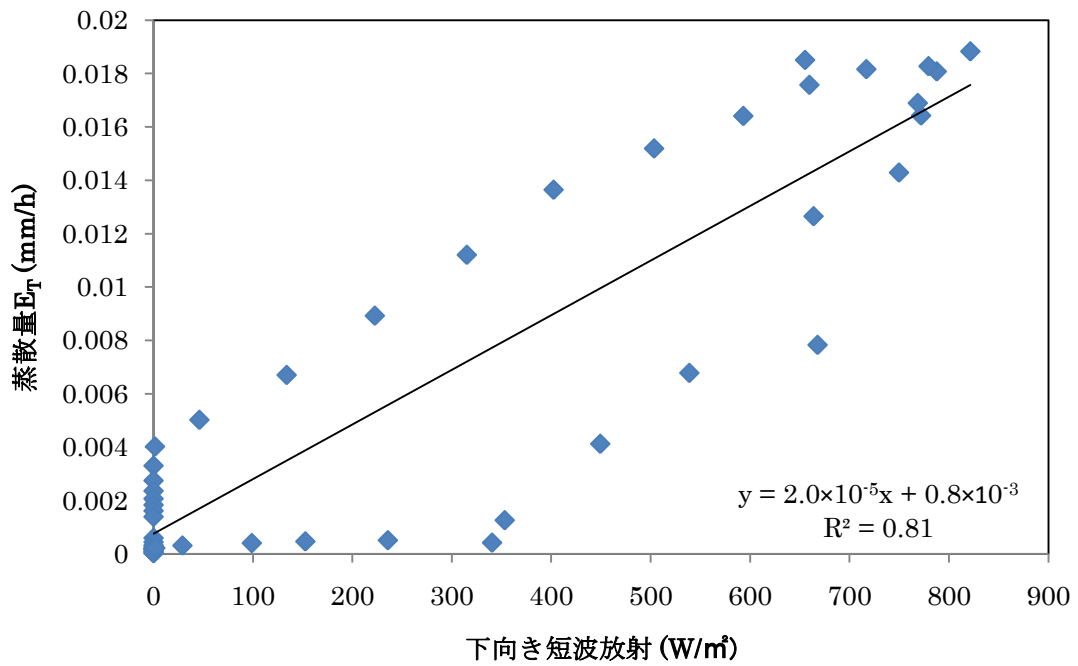


図 75 サンプル 4 番の 8/12 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

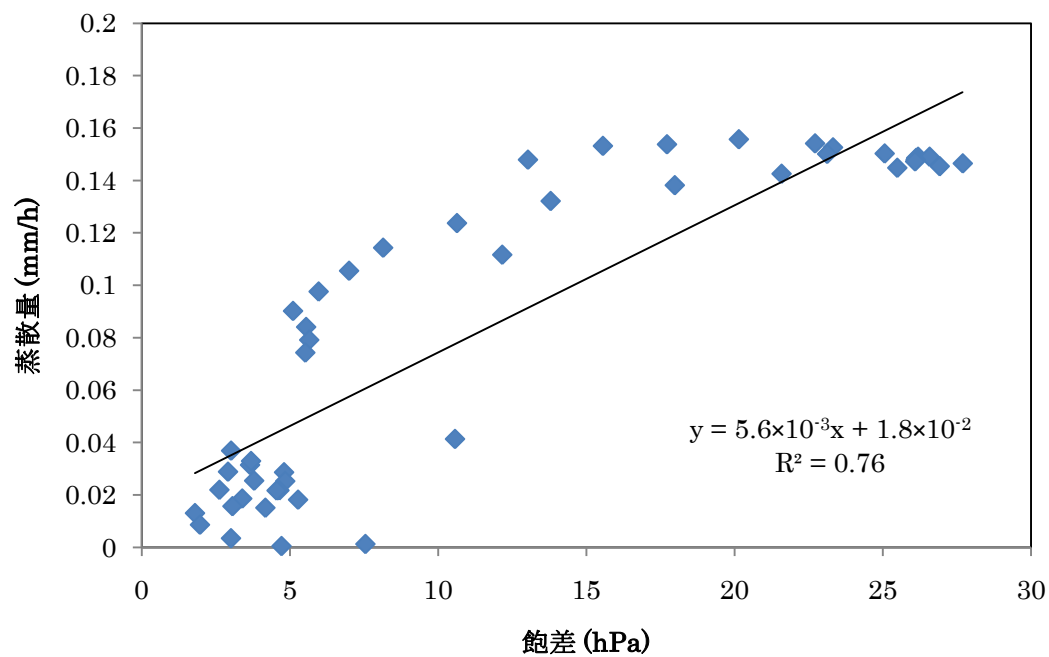
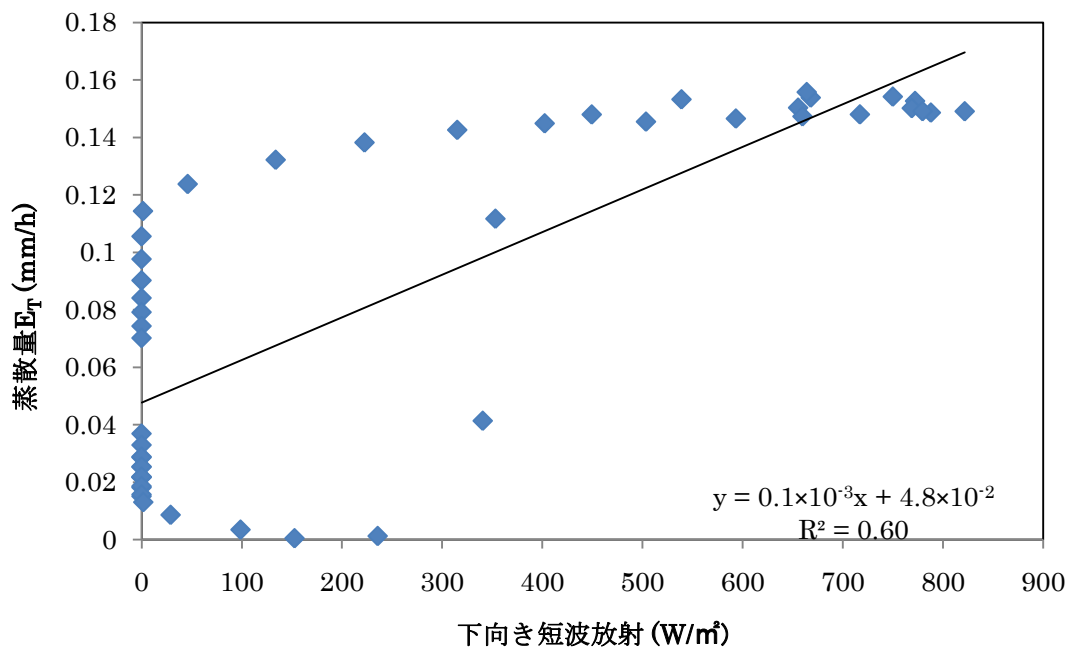


図 76 サンプル 3 番の 8/12 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

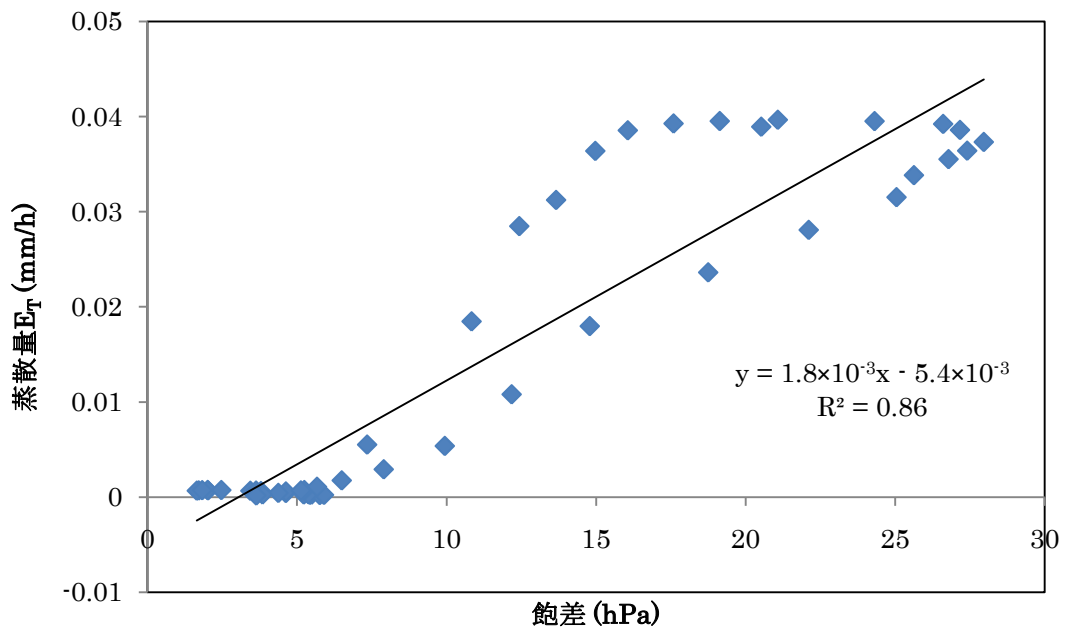
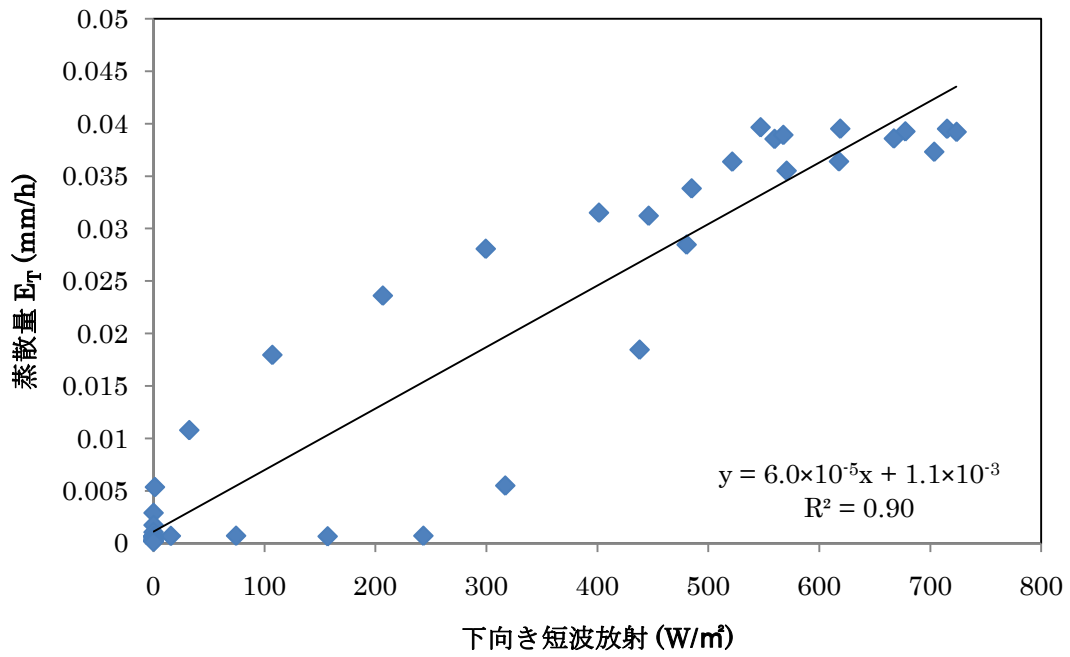


図 77 サンプル 11 番の 8/13 における E_T の日変化と下向き短波放射 $S \downarrow$ の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 11 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

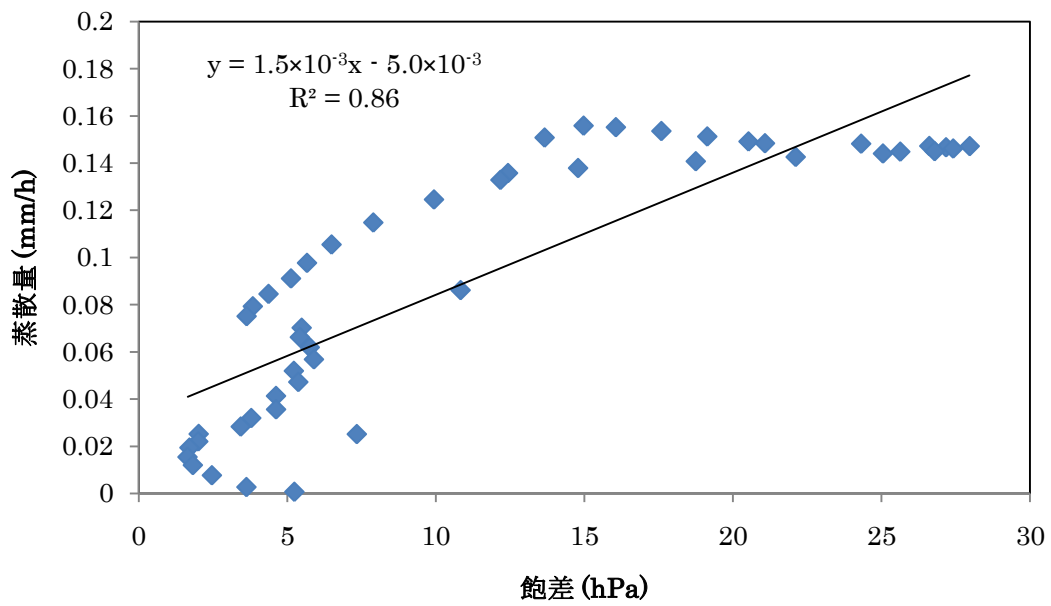
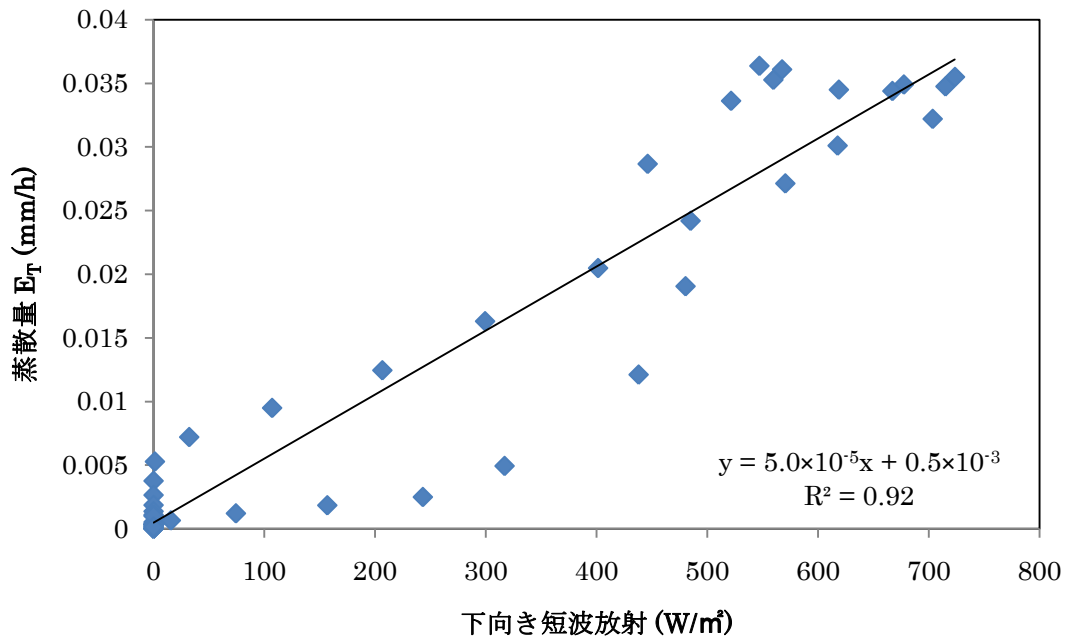


図 78 サンプル 6 番の 8/13 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 6 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

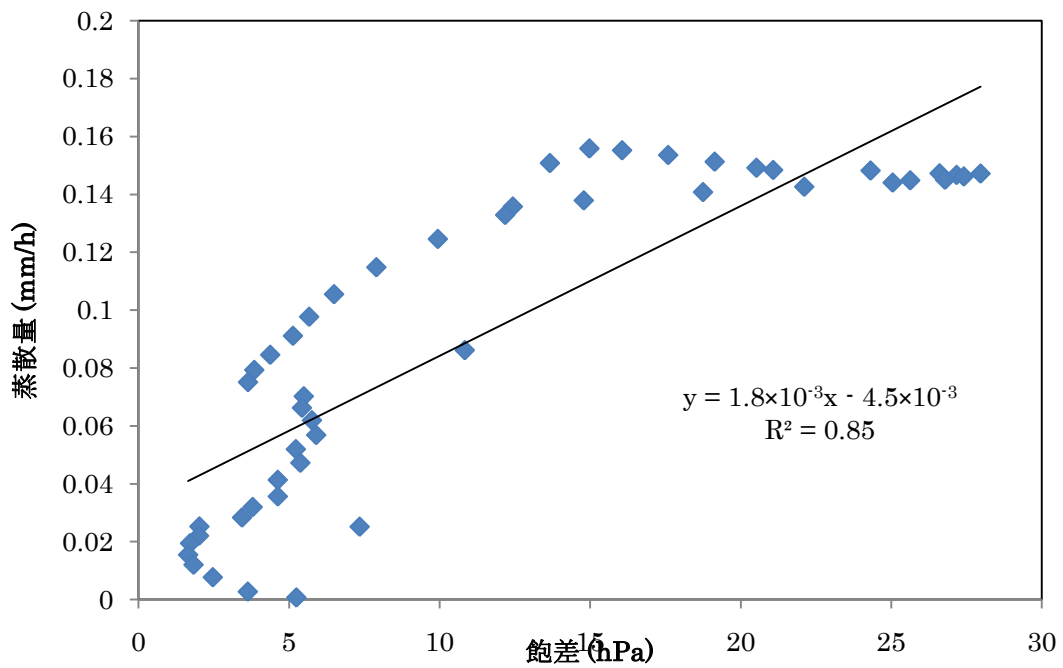
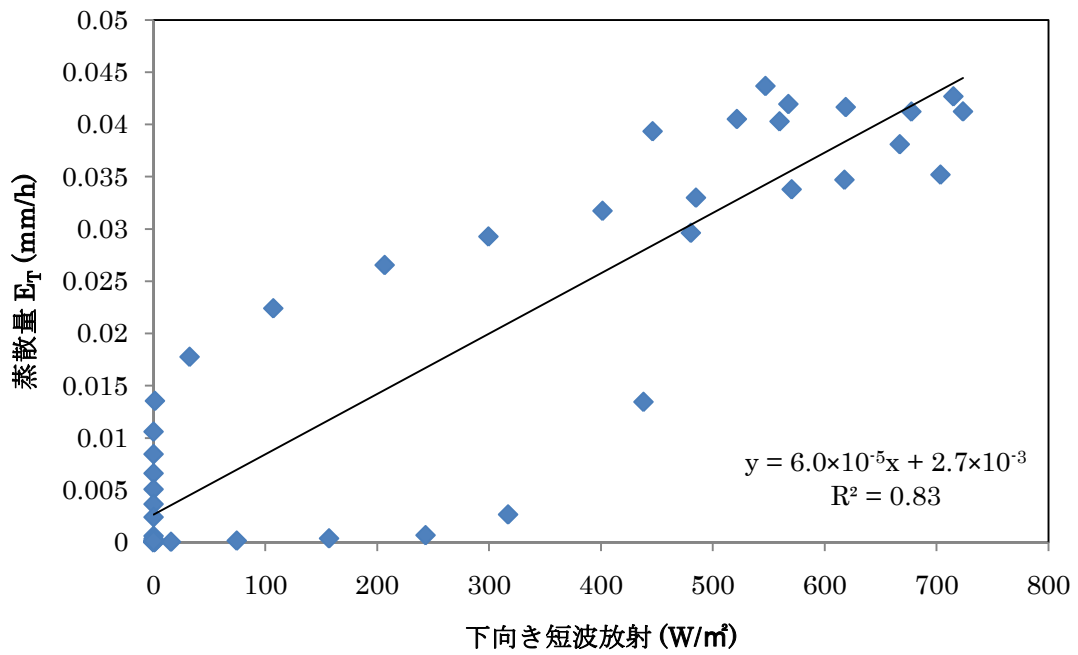


図 79 サンプル 5 番の 8/13 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 5 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

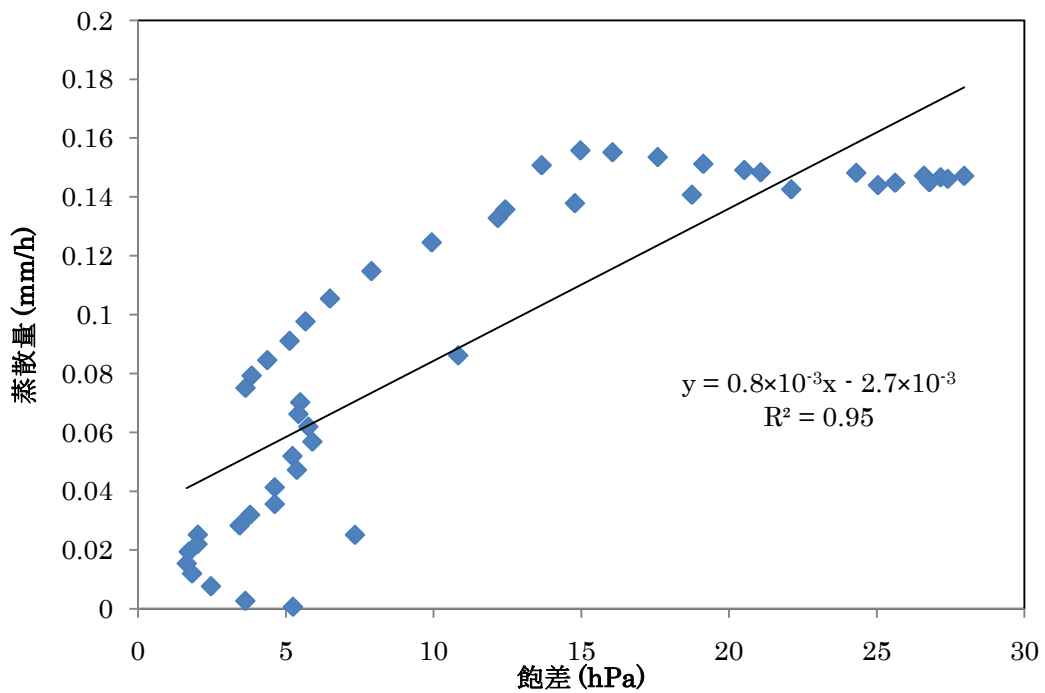
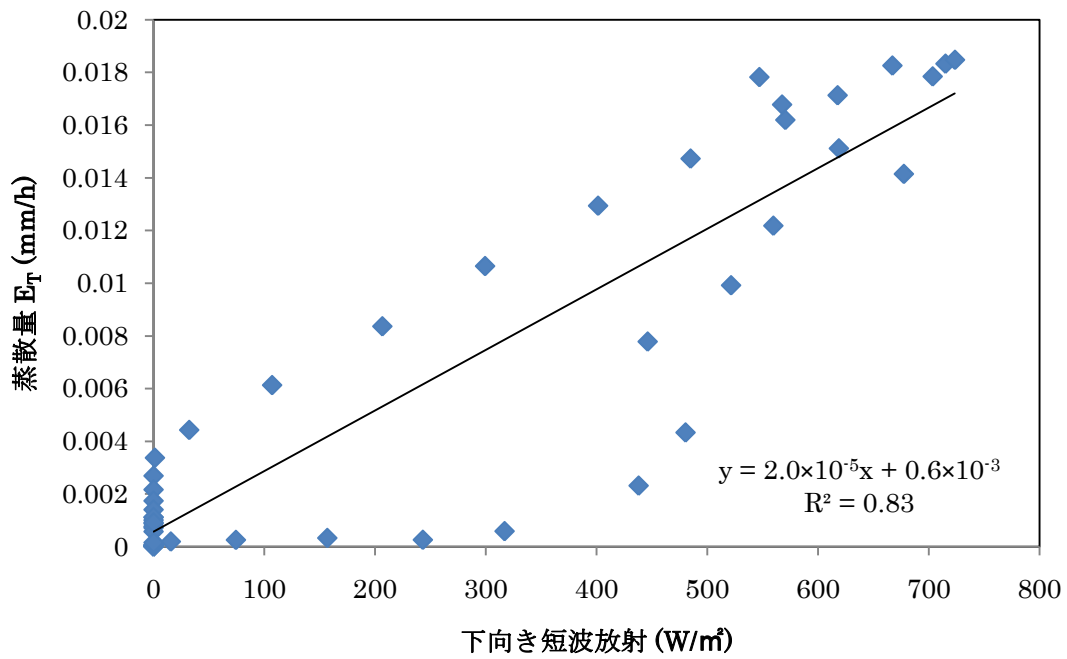


図 80 サンプル 4 番の 8/13 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 4 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

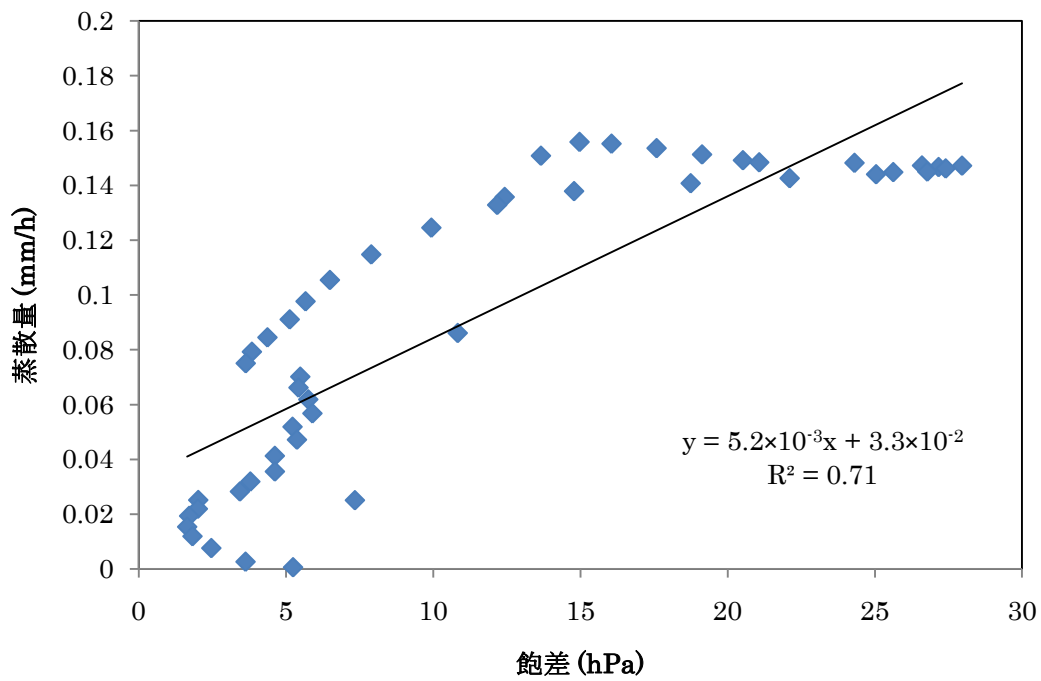
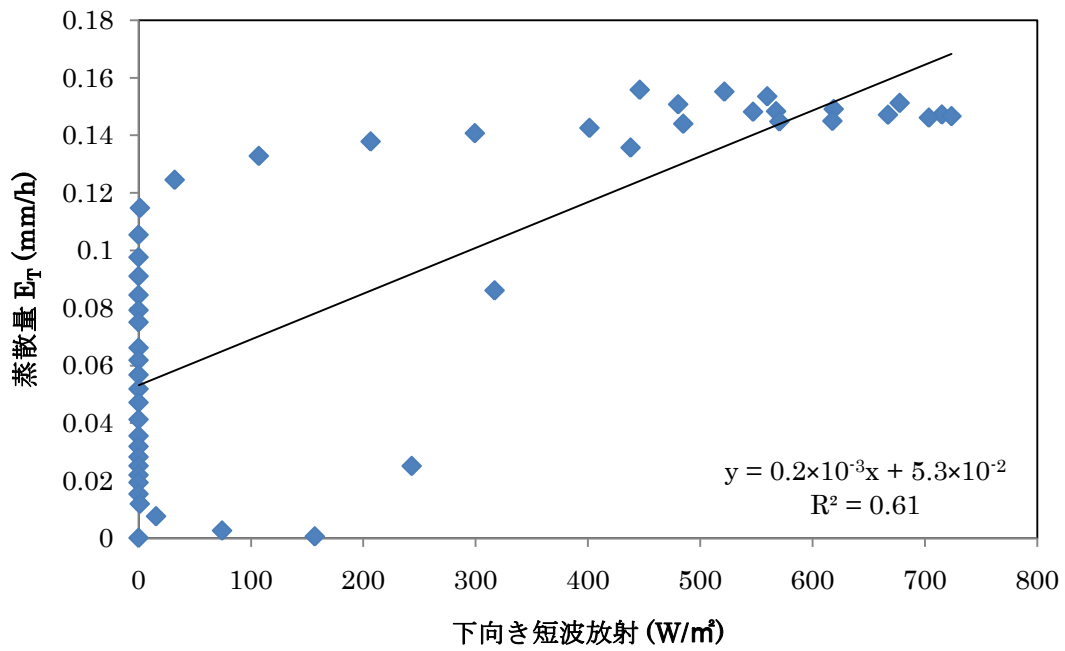


図 81 サンプル 3 番の 8 / 13 における E_T の日変化と下向き短波放射 S_{\downarrow} の日変化の相関 (上) と同日のサンプル 3 番の E_T の日変化と飽差 VPD の日変化の相関 (下)

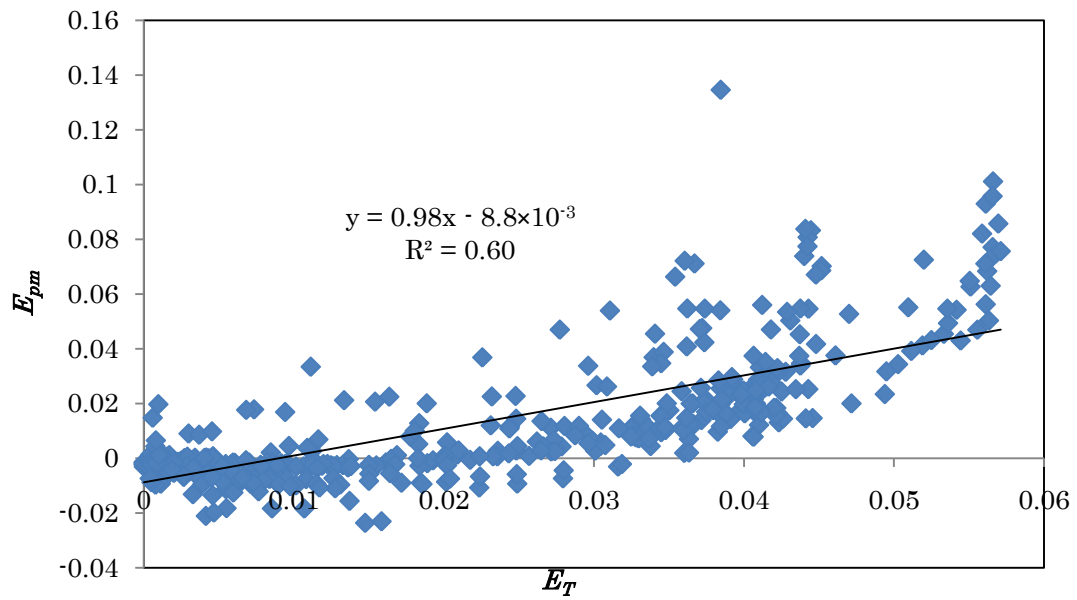


図 82 実測期間中 $r_c = 7.8$ (sec/cm) で一定であると仮定した時の E_T と E_{pm} の相関
(8/3 と 8/5 は富田農園が Sakha に比べ非常に乾燥していると考えられることから、バラつきが大きかったので除いた.)

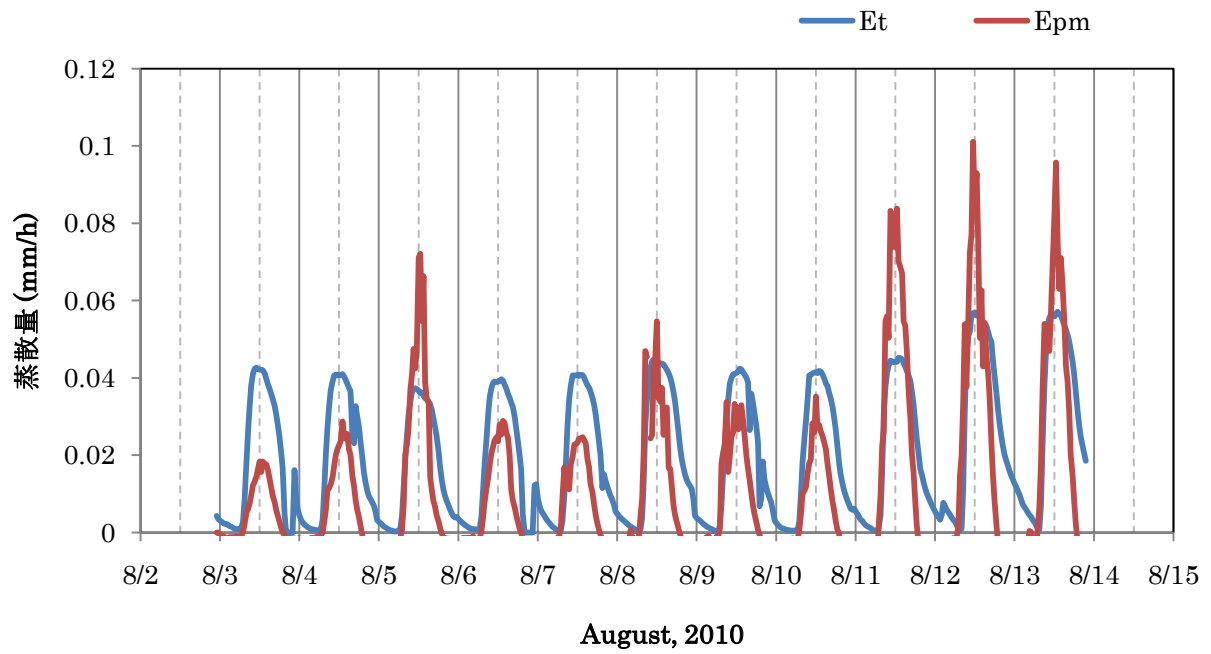
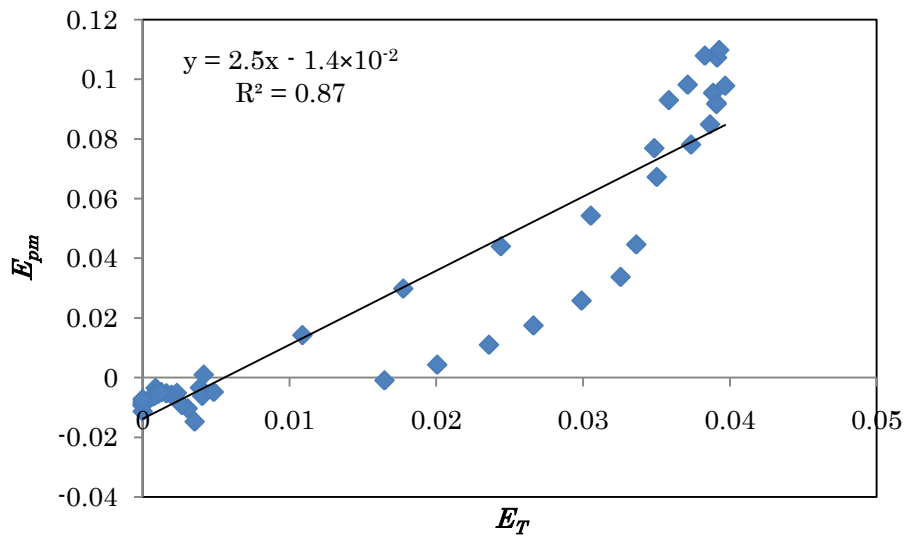
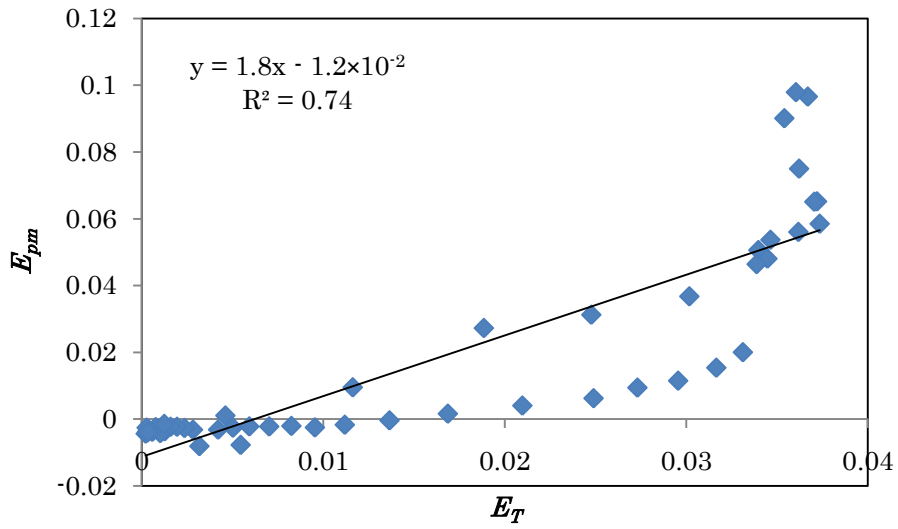
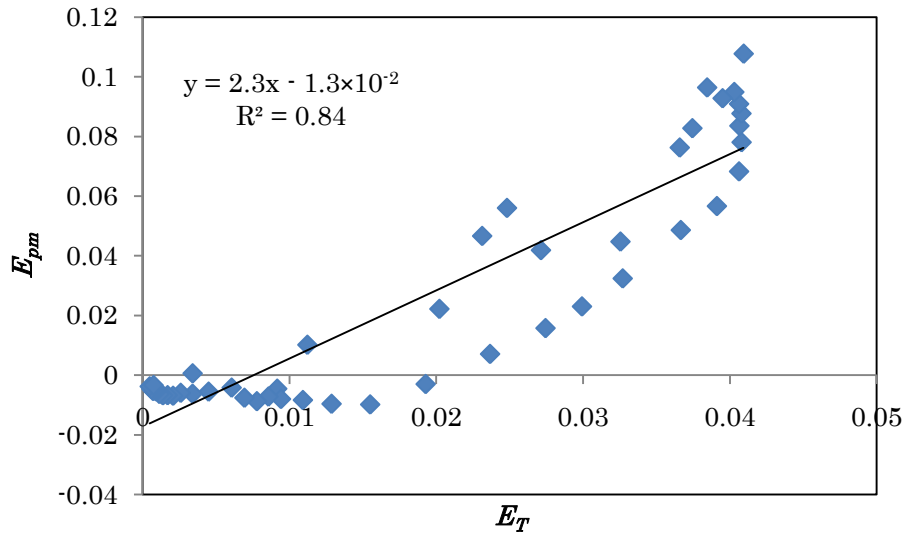
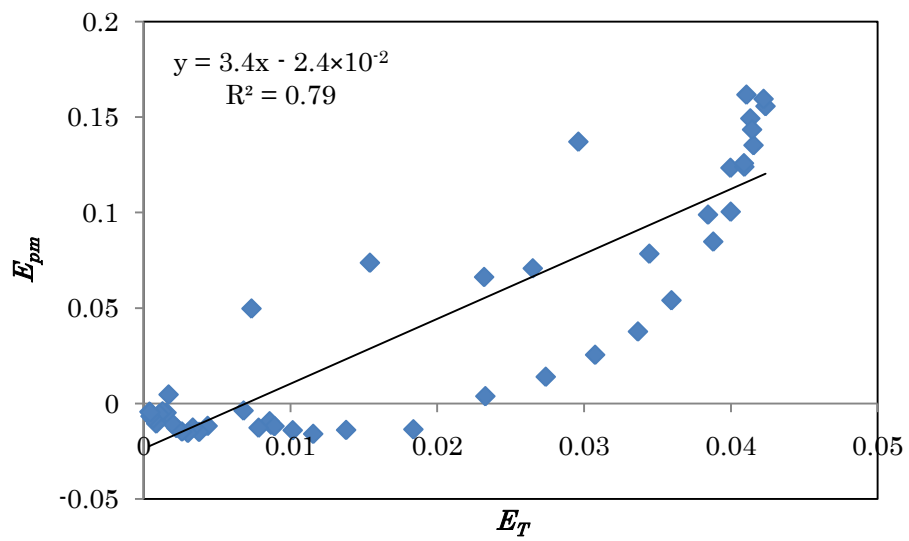
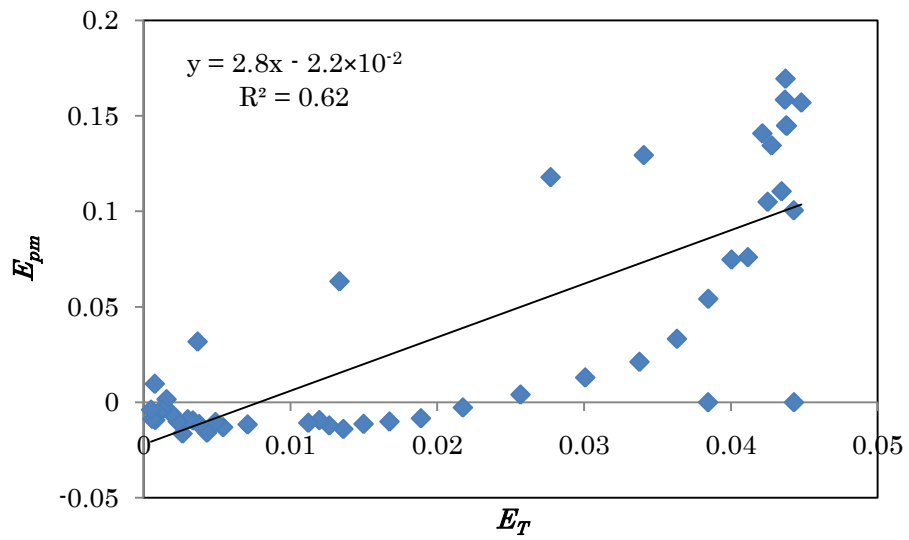
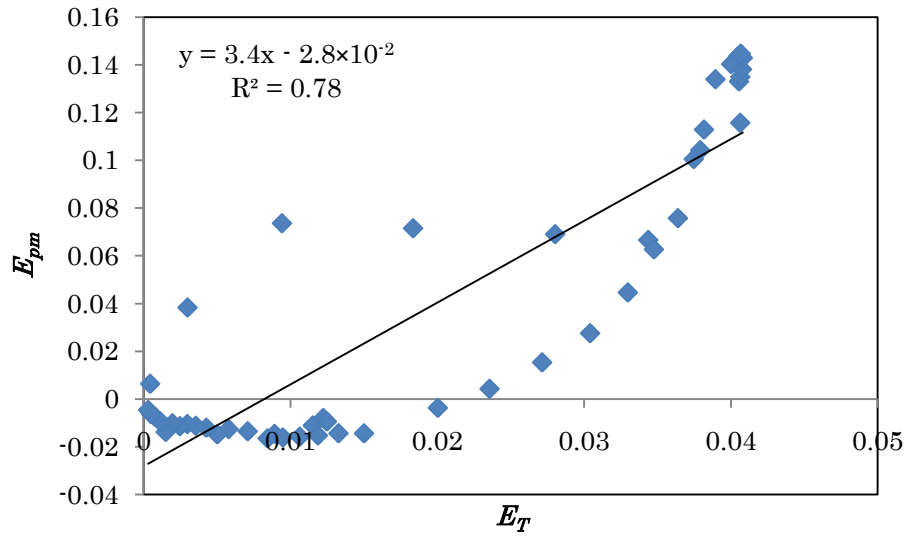
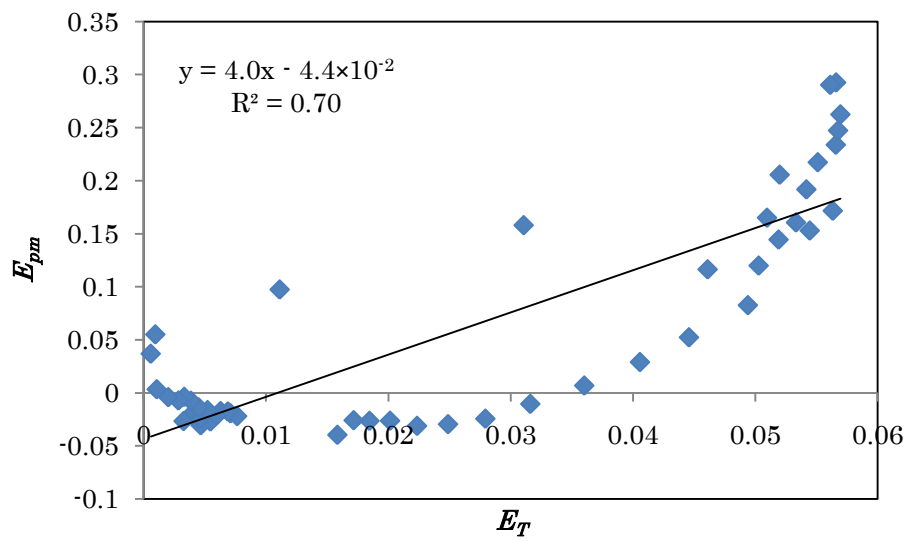
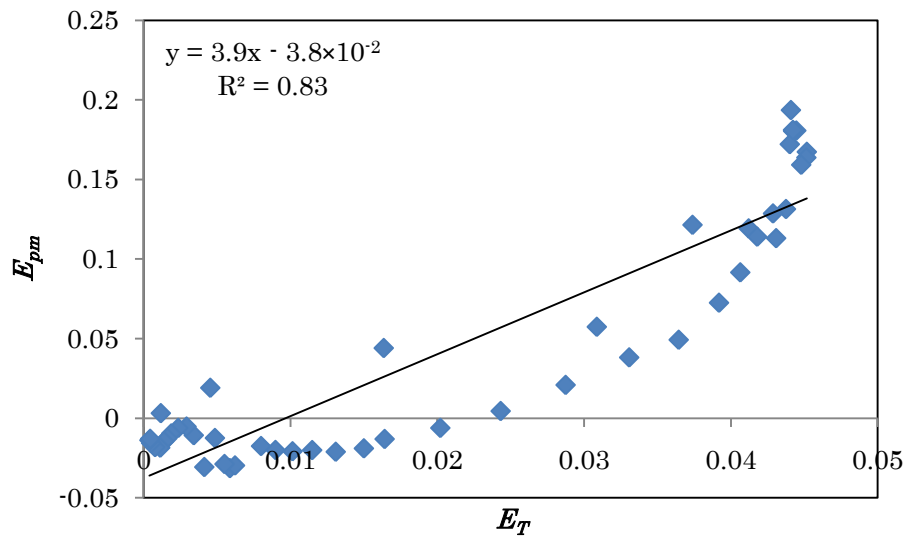
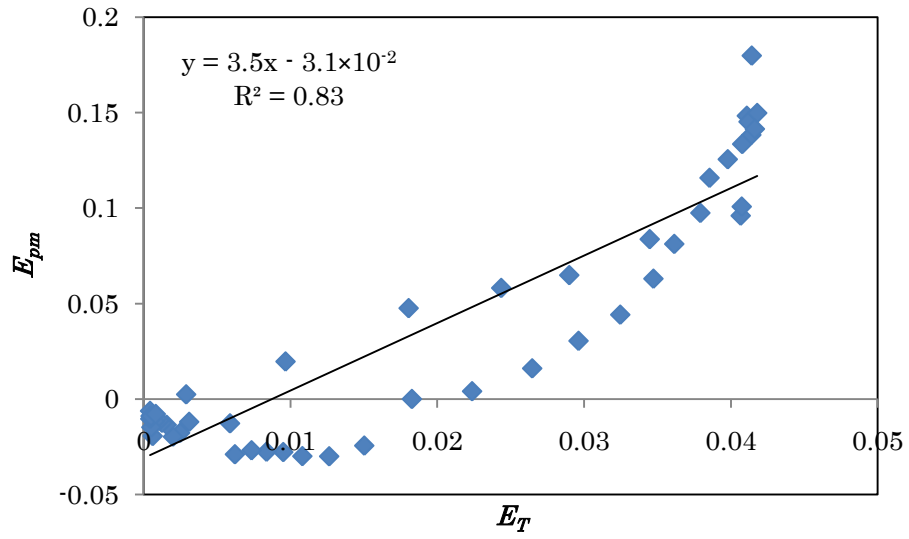


図 83 実測期間中、一定値 $r_c = 7.8$ (sec/cm) を与えた時の、実測期間中の E_{pm} と E_T の時間変化

横軸の実線は 0 時，点線は 12 時を示す。







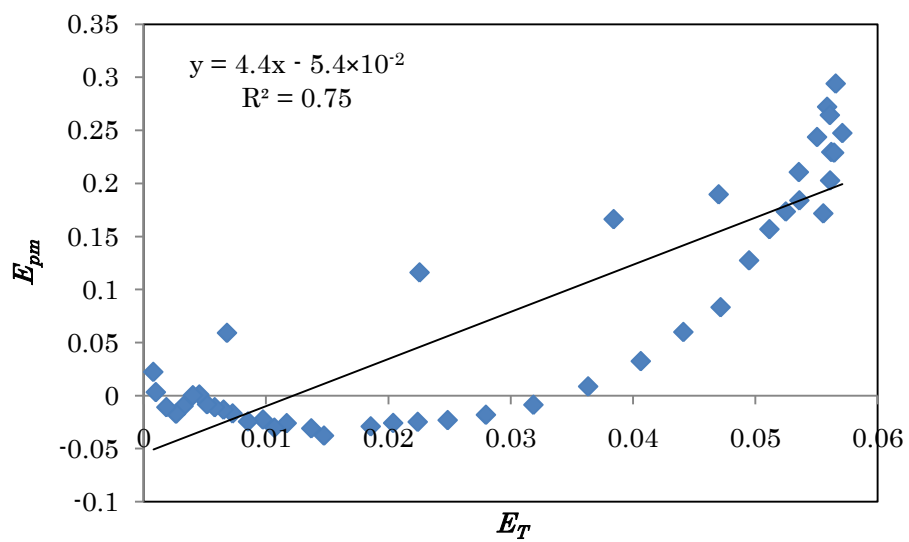


図 84 実測期間の 1 日ごとに行ったキャリブレーション結果
(上から順に 8/3 ~13 の結果.)

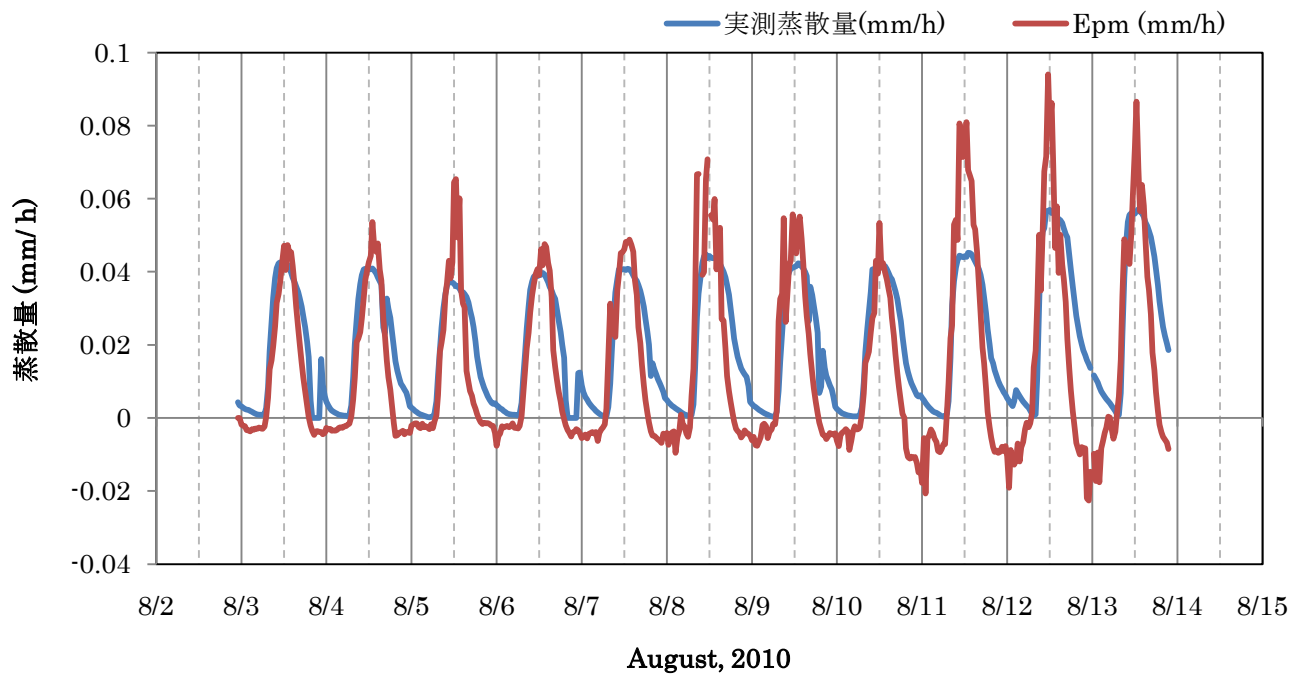


図 85 実測期間中の 1 日ごとにキャリブレーションを行った E_{pm} と実測値 E_T の時間変化

横軸の実線は 0 時，点線は 12 時を示す。

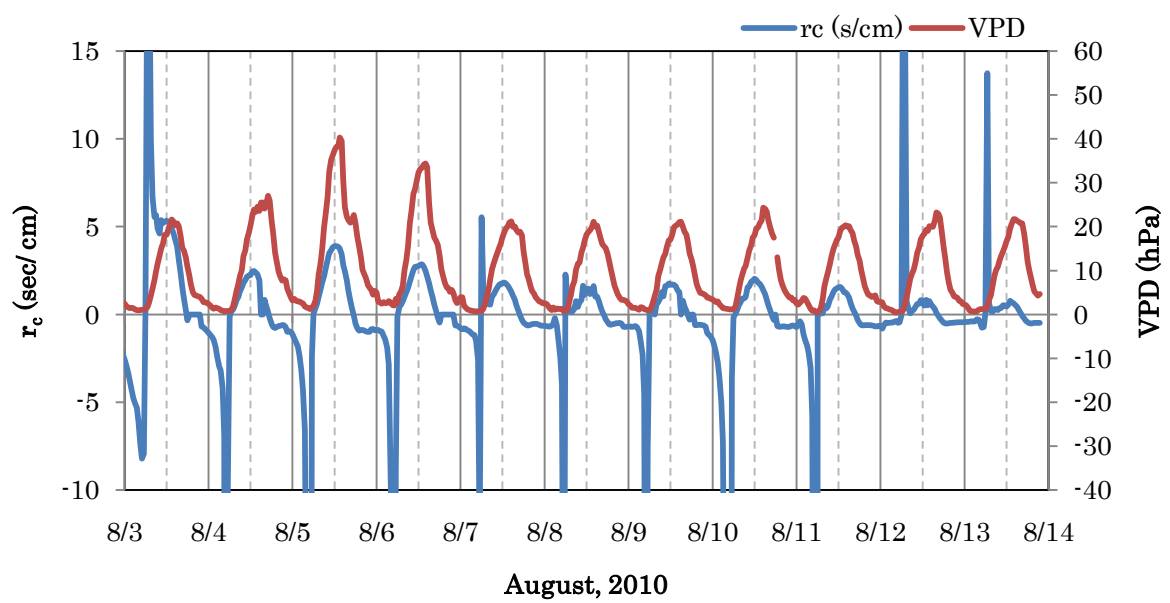


図 86 逆算した r_c と VPD の時間変化
 横軸の実線は 0 時，点線は 12 時を示す。

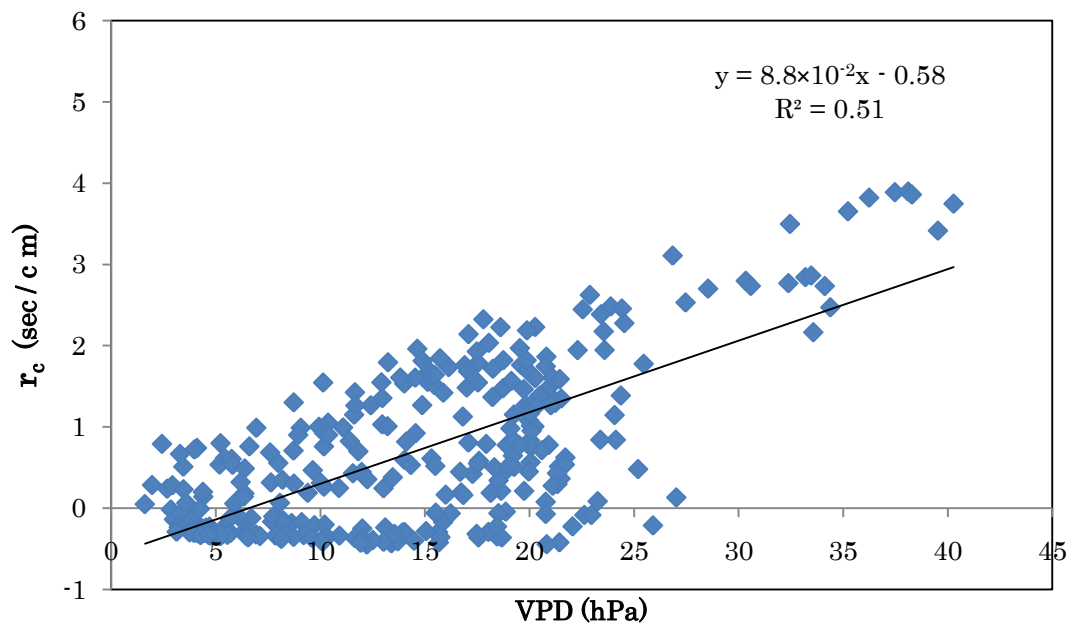


図 87 逆算した r_c (sec/cm) と VPD (hPa) の相関

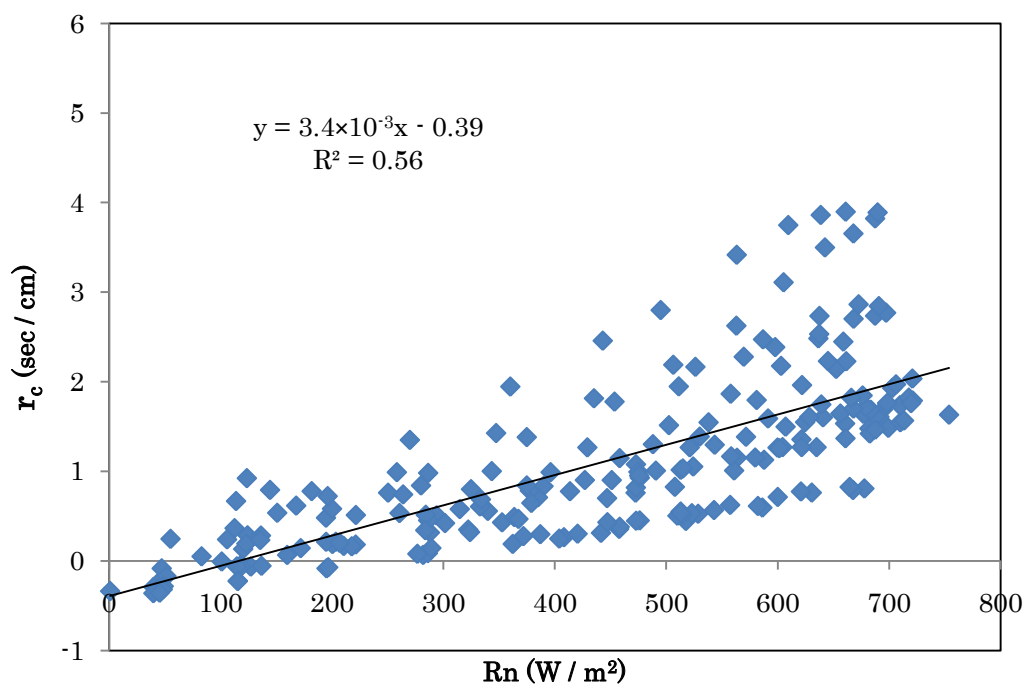


図 88 逆算した $r_c(sec/cm)$ と $R_n(W/m^2)$ の相関

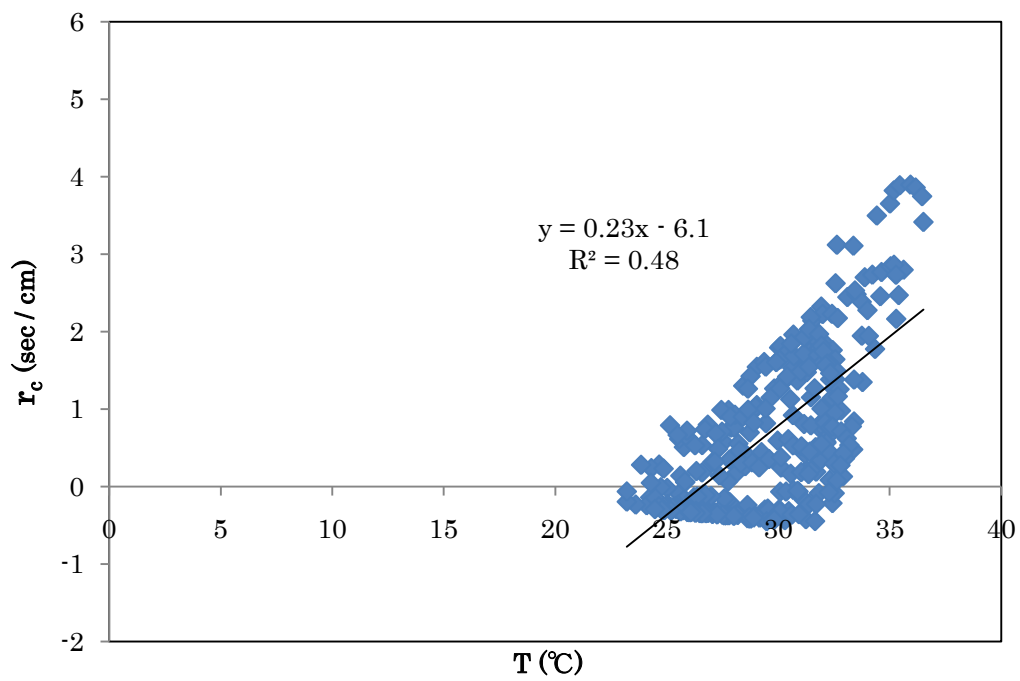


図 89 逆算した $r_c(\text{sec/cm})$ と $T(^{\circ}\text{C})$ の相関

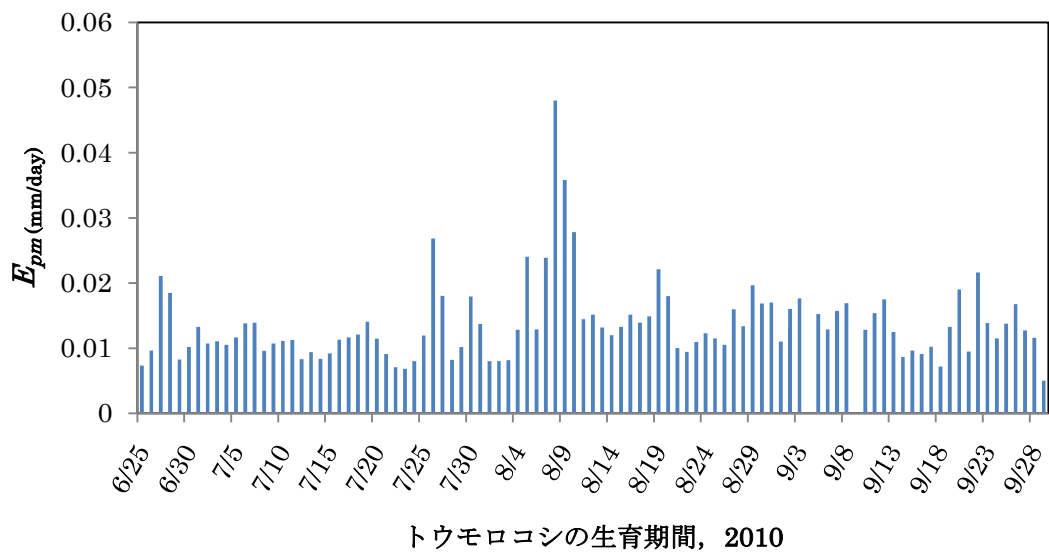


図 90 VPD から得た r_c によって算出した E_{pm} の日積算値の季節変化 (Sakha 圃場で栽培されていた作物であるトウモロコシの生育期間における E_{pm} の季節変化)

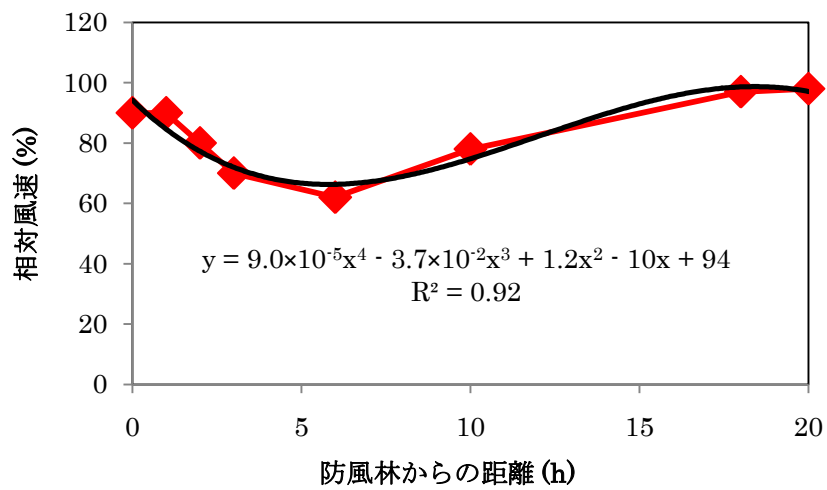


図 91 防風林からの距離と相対風速の分布 (鳥田ほか, 2002 より作成)

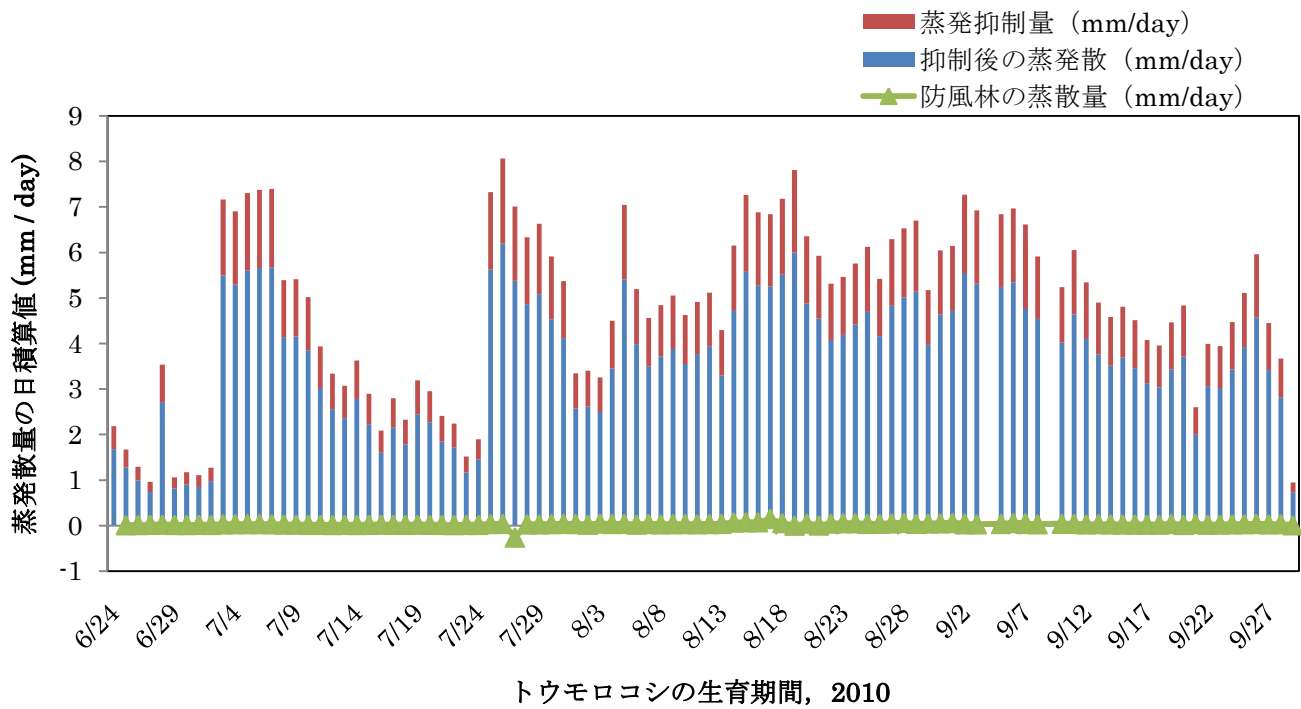


図 92 鳥田ほか (2002) の防風特性を適用した場合の圃場の蒸発散の日積算値

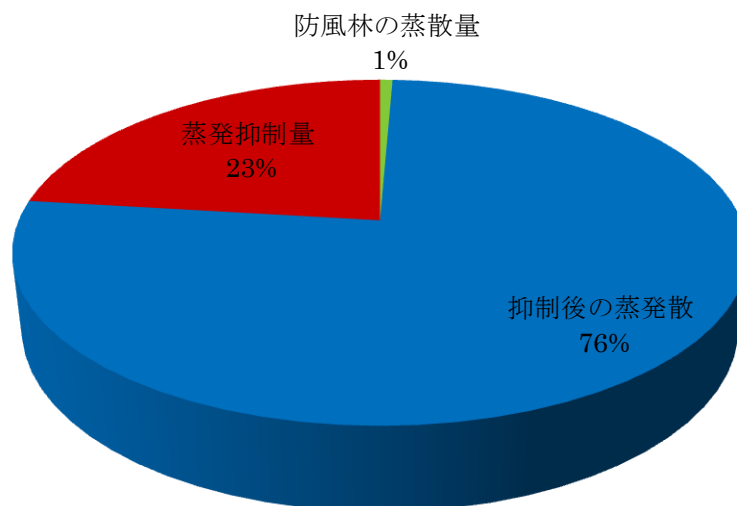


図 93 鳥田ほか (2002) の防風特性を当てはめた時の圃場の蒸発散量の割合

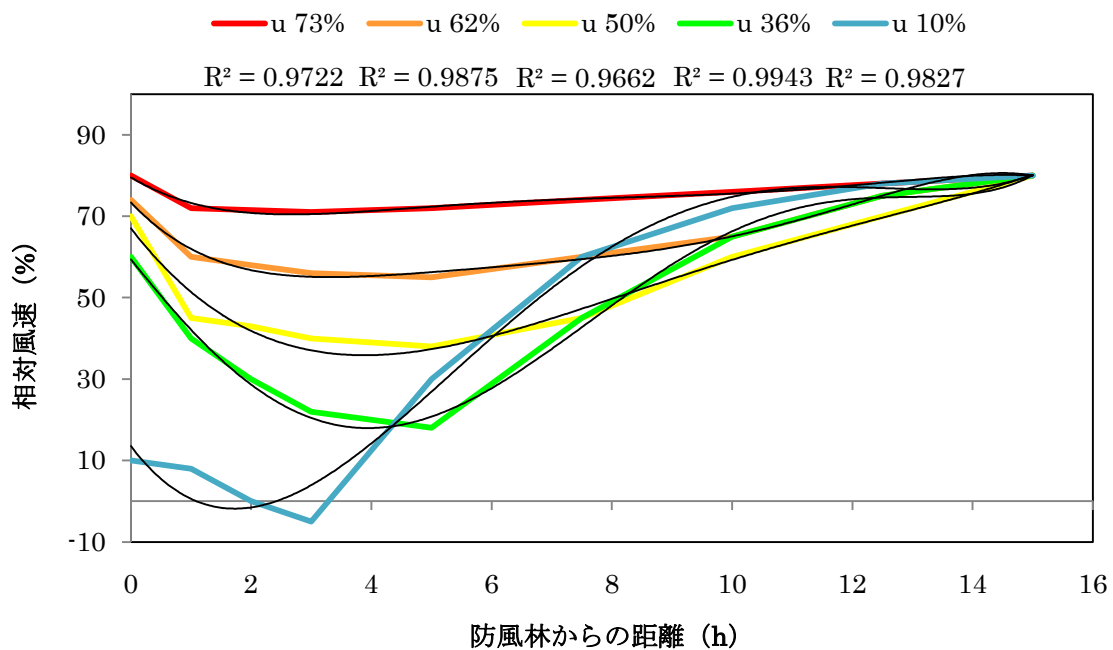


図 94 空隙率ごとの防風特性 (Wang and Takle (1997), Cleugh (1998) より作成)
空隙率ごとの近似曲線の式は

$$73 \% : y = -0.60 \times 10^{-3} x^5 + 2.63 \times 10^{-2} x^4 - 0.41 x^3 + 2.97 x^2 - 8.86 x + 79.55$$

$$62 \% : y = -0.12 \times 10^{-2} x^5 + 4.58 \times 10^{-2} x^4 - 0.67 x^3 + 4.80 x^2 - 15.55 x + 73.55$$

$$50 \% : y = 0.60 \times 10^{-2} x^4 - 0.25 x^3 + 3.74 x^2 - 19.11 x + 67.01$$

$$36 \% : y = 0.19 \times 10^{-2} x^5 - 6.53 \times 10^{-2} x^4 + 0.60 x^3 + 0.51 x^2 - 18.29 x + 59.37$$

$$10 \% : y = 1.82 \times 10^{-2} x^4 - 0.65 x^3 + 7.22 x^2 - 19.53 x + 13.53$$

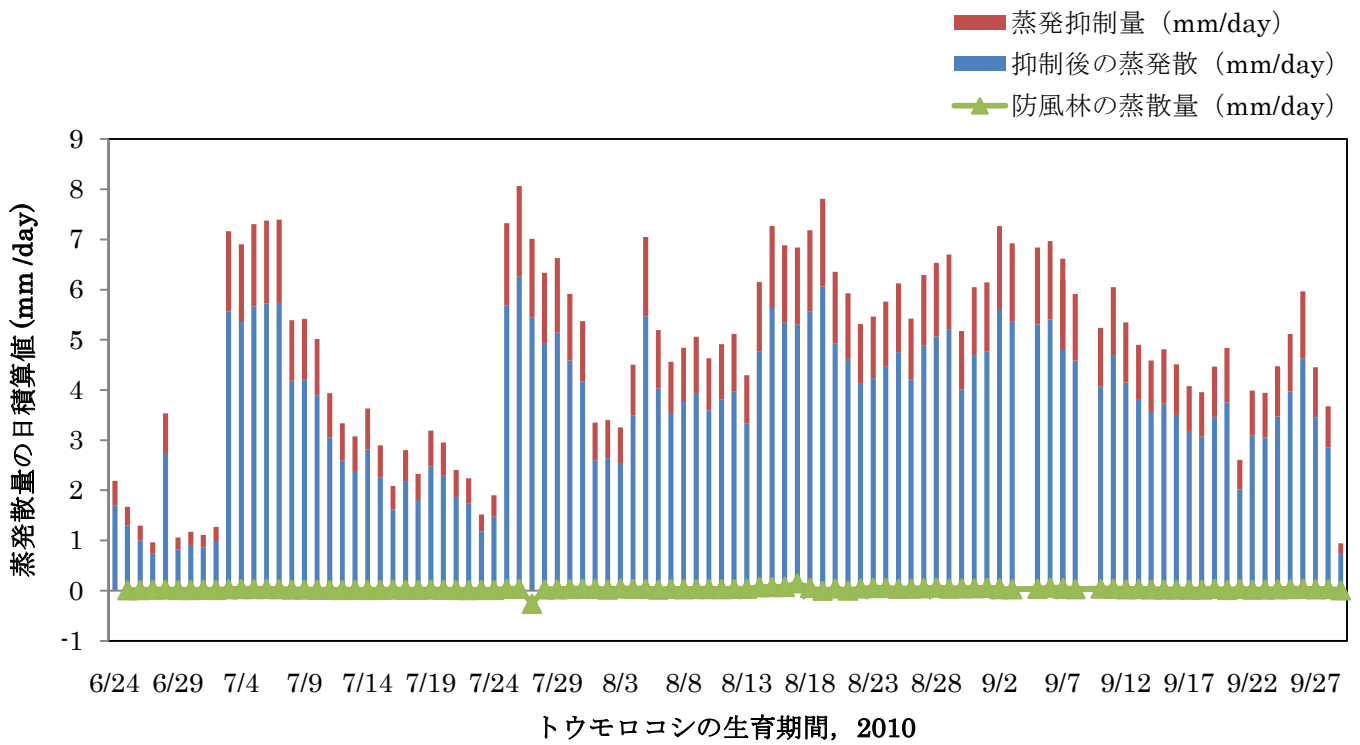


図 95 空隙率 73%の防風林による蒸発抑制効果

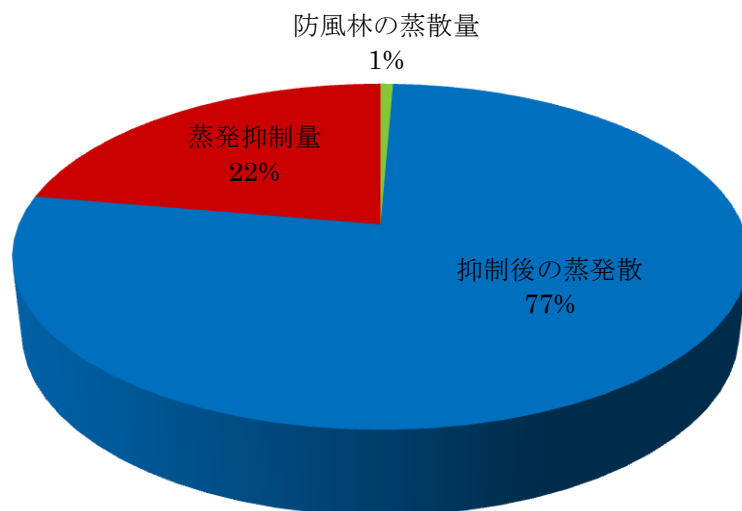


図 96 Wang and Takle (1997), Cleugh (1998) の防風特性のうち空隙率 73%の防風林による蒸発抑制効果

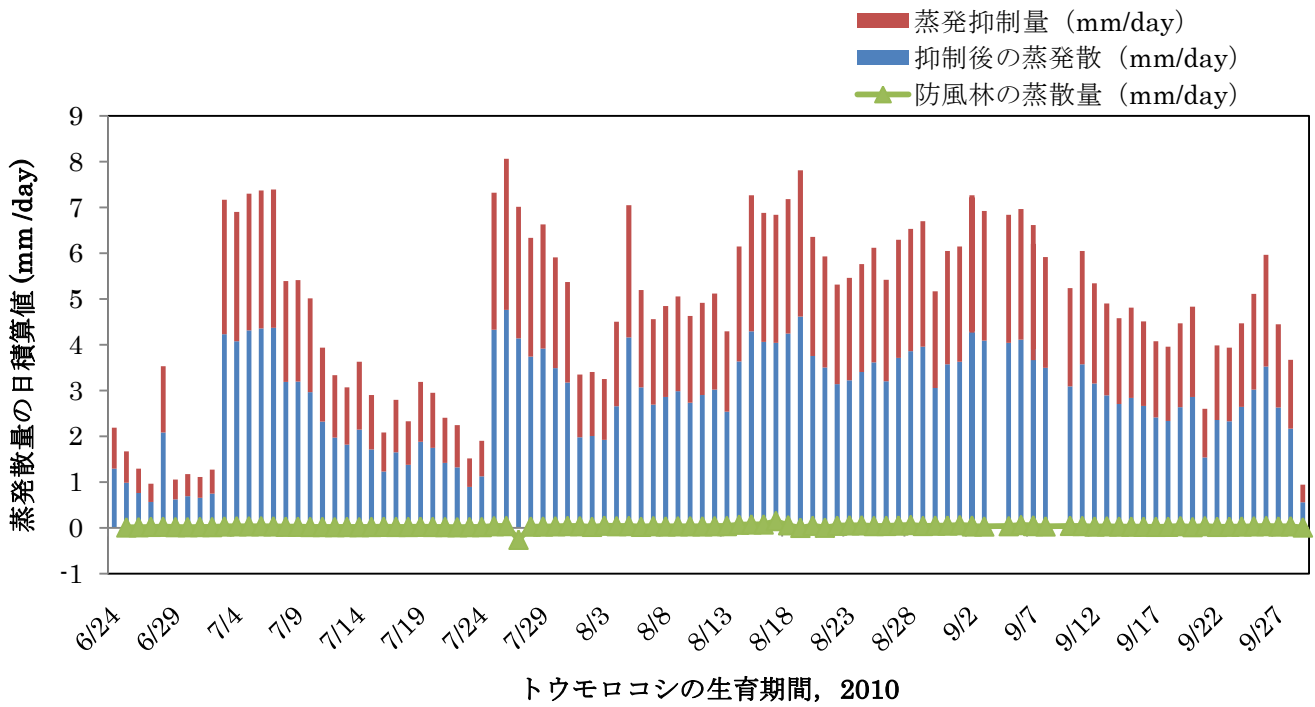


図 97 空隙率 62%の防風林による蒸発抑制効果

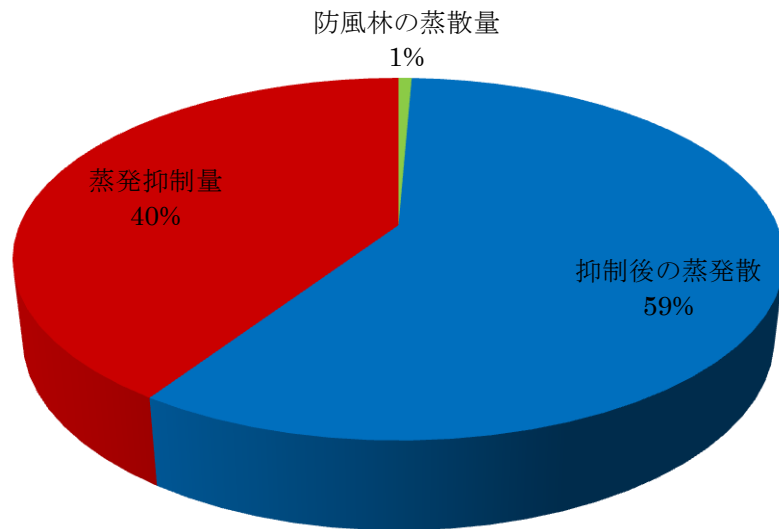


図 98 Wang and Takle (1997), Cleugh (1998) の防風特性のうち空隙率 62%の防風林による蒸発抑制効果

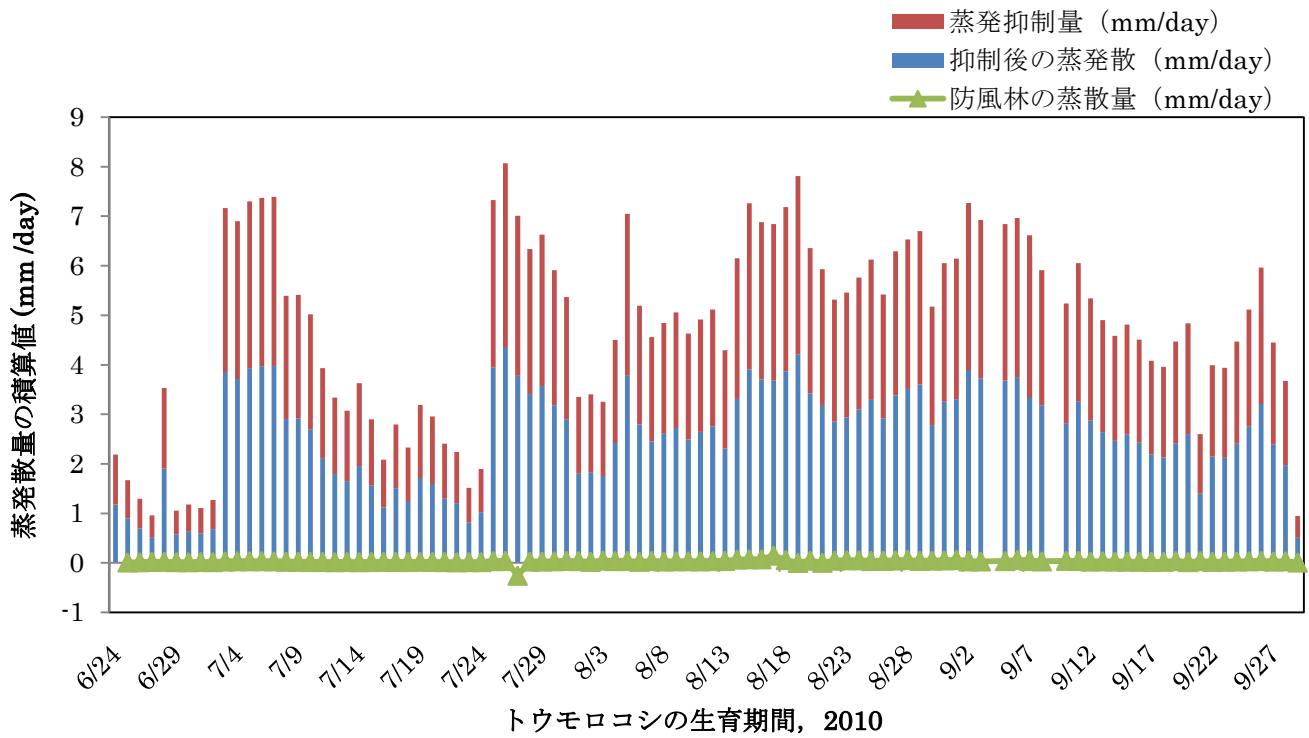


図 99 空隙率 50 %の防風林による蒸発抑制効果

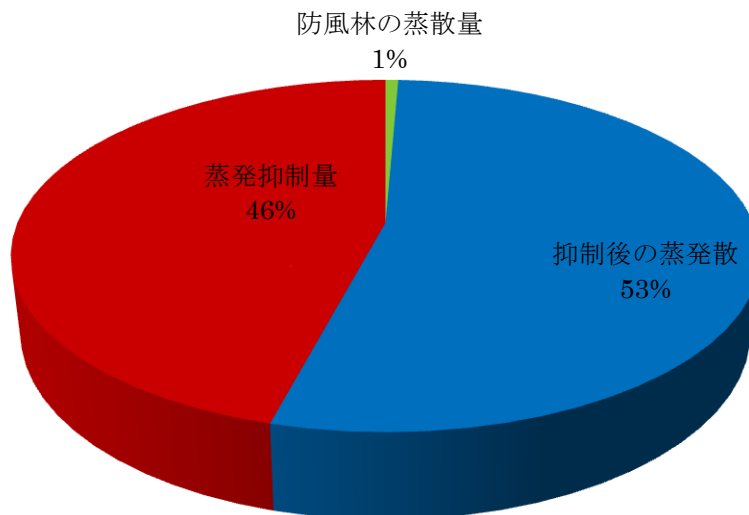


図 100 Wang and Takle (1997), Cleugh (1998) の防風特性のうち空隙率 50 %の防風林による蒸発抑制効果

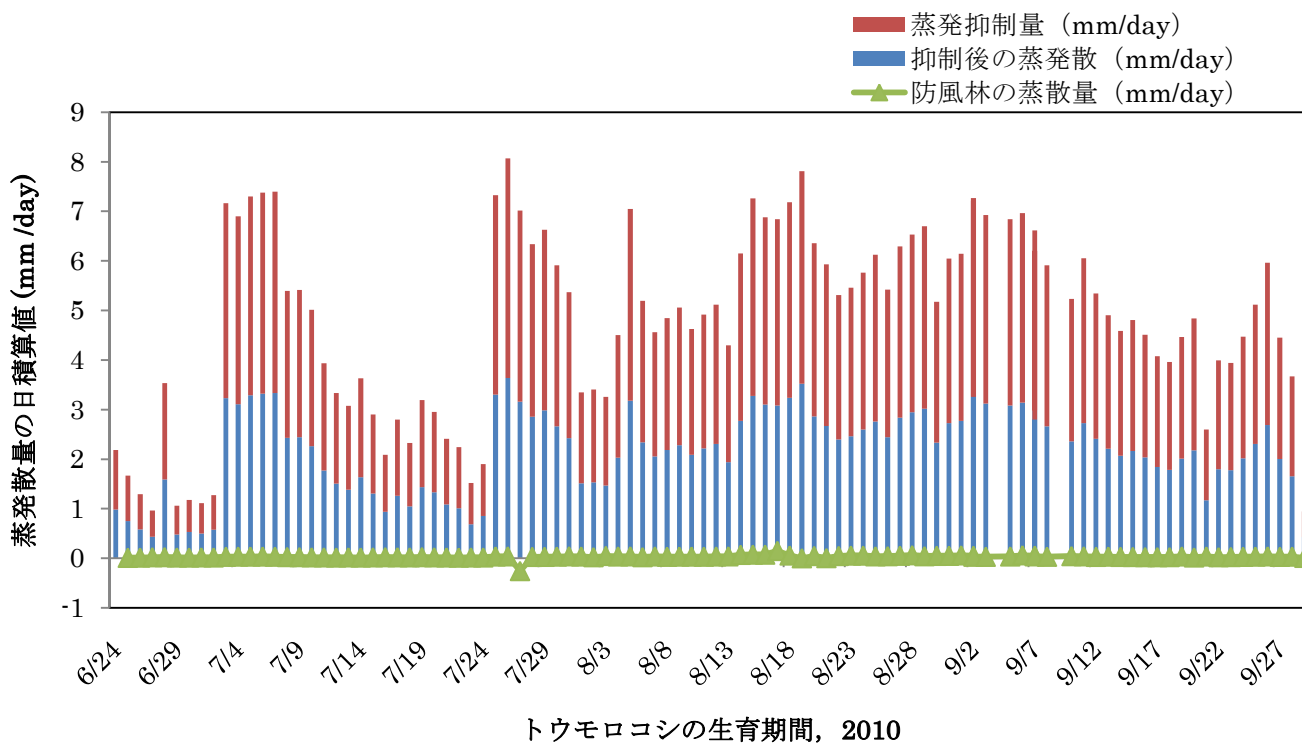


図 101 空隙率 36%の防風林による蒸発抑制効果

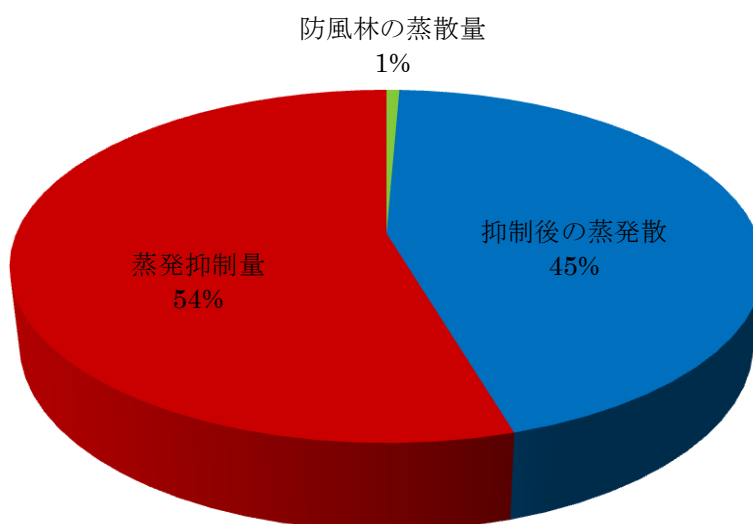


図 102 Wang and Takle (1997), Cleugh (1998) の防風特性のうち空隙率 36%の防風林による蒸発抑制効果

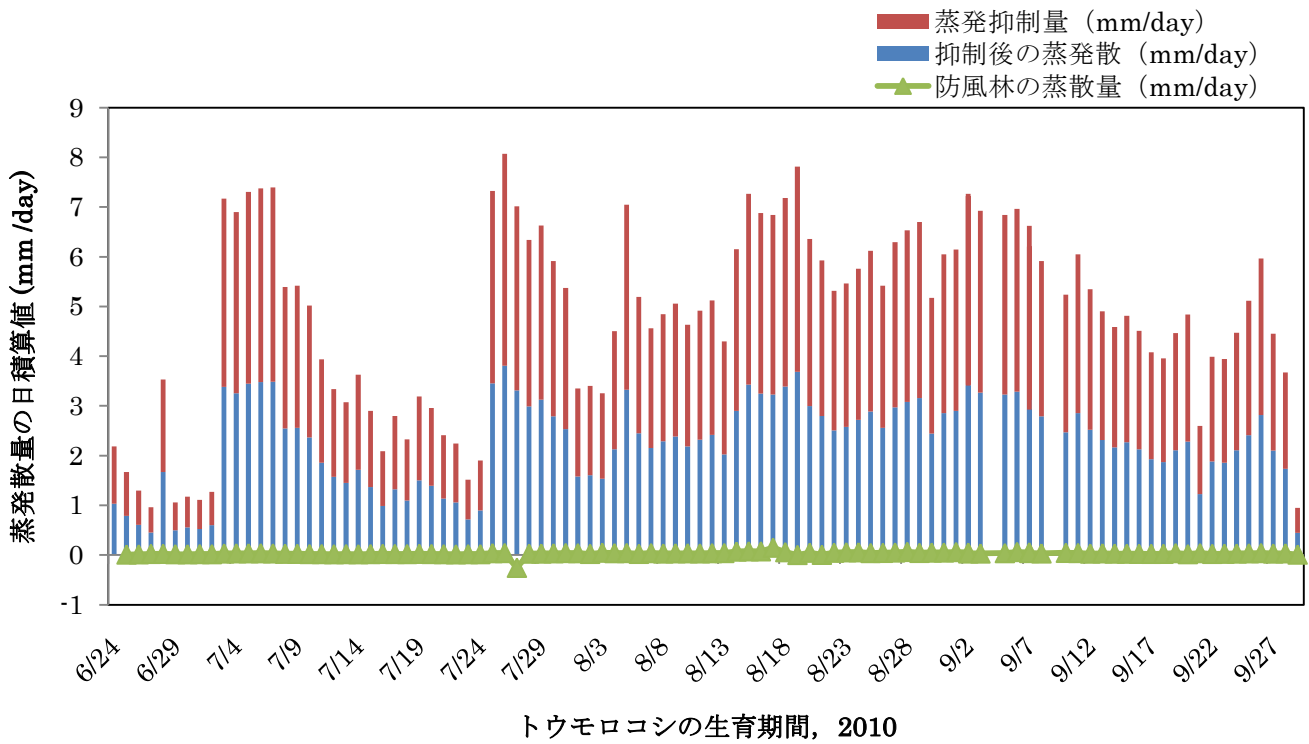


図 103 空隙率 10%の防風林による蒸発抑制効果

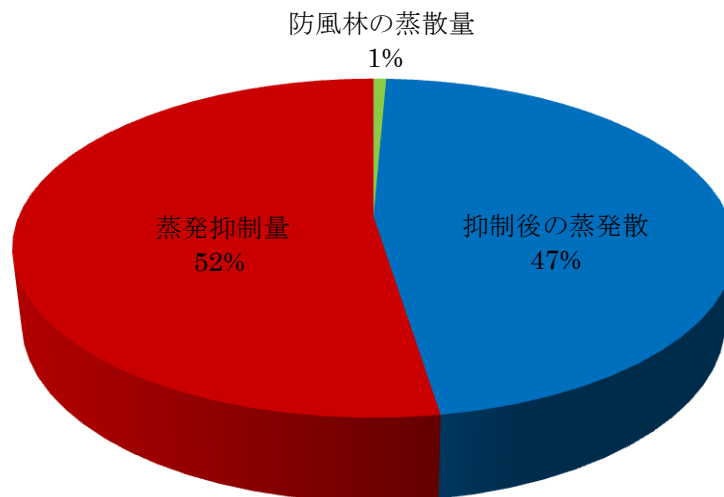


図 104 Wang and Takle (1997), Cleugh (1998) の防風特性のうち空隙率 10%の防風林による蒸発抑制効果

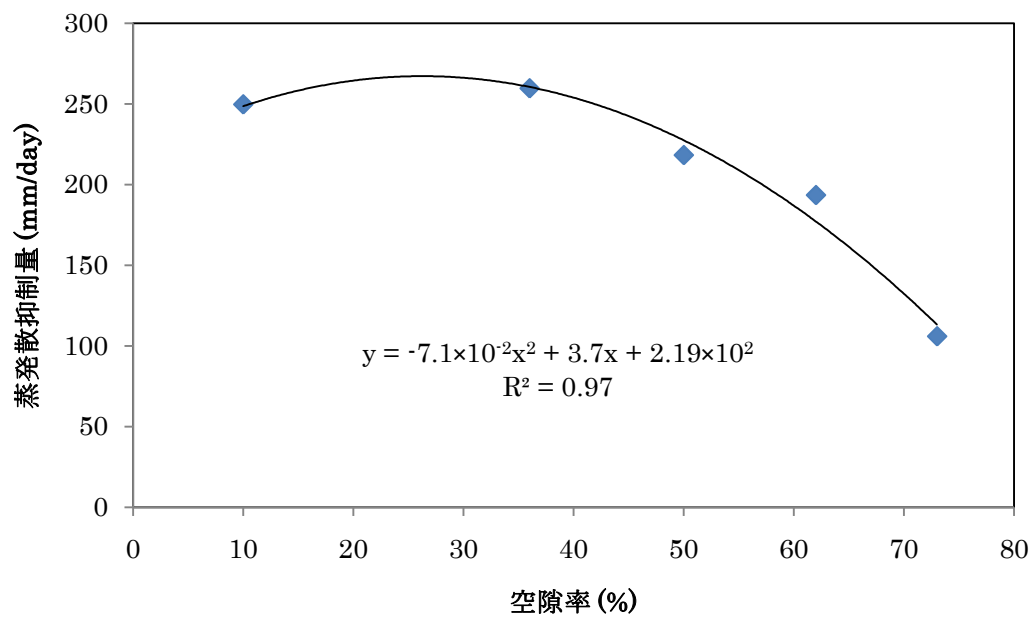


図 105 空隙率と蒸発散抑制量の関係 (トウモロコシの生育期間中の蒸発散抑制量の積算値と空隙率の相関)

《付録》

空隙率が 0%の場合についても、同様の数値実験を行った。牛山ほか(2009)では、空隙率の異なる防風ネットの防風特性を明らかにしており、相対風速のプロファイルは図 106 のように得られている。このうち空隙率が 0%の防風ネットの防風特性を引用し、図 106 の値を読み取って空隙率 0%の防風特性を抜き出し(図 107)、その近似曲線を得た。図 107 の相対風速のプロファイルをもとに同様の解析を行った結果、圃場の蒸発散は図 108 のような時系列変化を示し、その期間中の積算値の割合は図 109 のように得られた。この蒸発散抑制量と空隙率の関係を Wang and Takle (1997), Cleugh (1998) で得られた結果に追加すると、図 110 のような関係が得られた。これを見ると、空隙率と蒸発散抑制量の間には $y = -7.8 \times 10^{-2} x^2 + 4.4x + 204$ で表される上に凸の二次式で与えられる関係があり、その決定係数は $R^2 = 0.97$ と非常に高くなった。このことから、Wang and Takle (1997), Cleugh (1998) で得られた空隙率と蒸発散抑制量の関係は牛山ほか (2009) から得られた関係とも一致し、得られた空隙率 0%における蒸発散抑制量はこの近似曲線に良く一致した。また蒸発散抑制量は空隙率が 30~40%付近で最大となり、この結果は小澤ほか (2003) の「最大の防風効果が得られる空隙率は 40%であることが知られている」という内容にも一致した。これらの事実から、蒸発散抑制量は防風林の空隙率に大きく影響を受け、そのピークは空隙率 30~40%程度であることが確認できた。

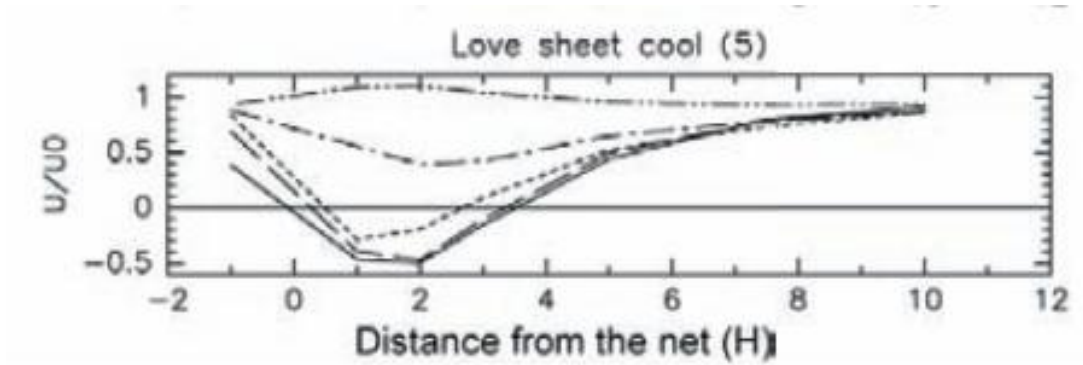


図 106 牛山ほか (2009)

空隙率 0%の防風ネット (高さ $H=30\text{cm}$) の防風特性. 実線が高度 5cm, 長破線が 15cm, 短破線が 30cm, 点破線が 40cm, 二点破線が 60cm.

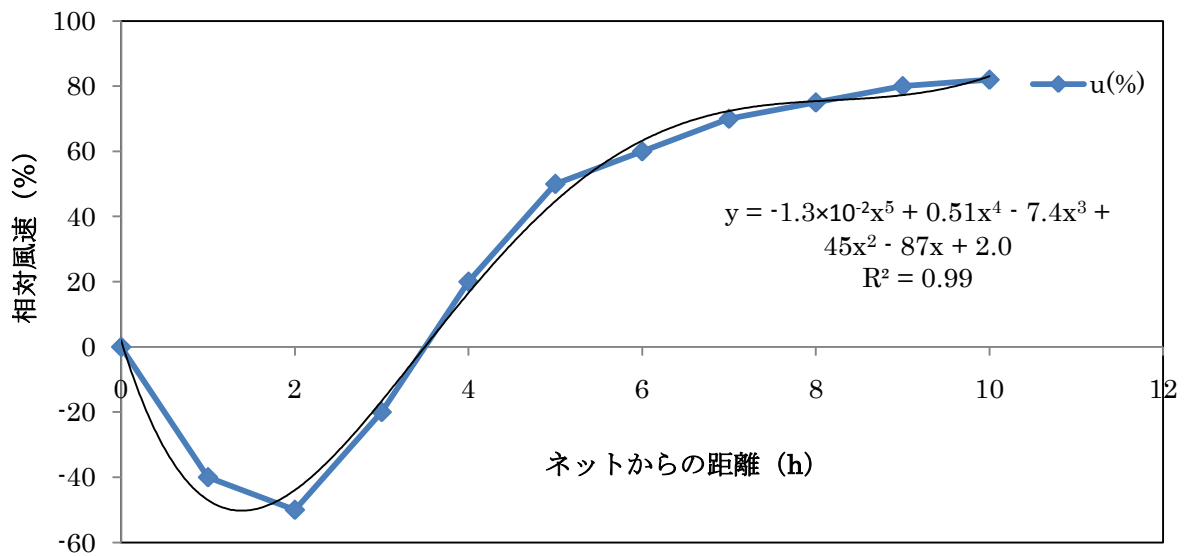


図 107 空隙率 0%の防風ネットの高度 $0.5h$ の防風特性. (牛山ほか (2009) より作成)

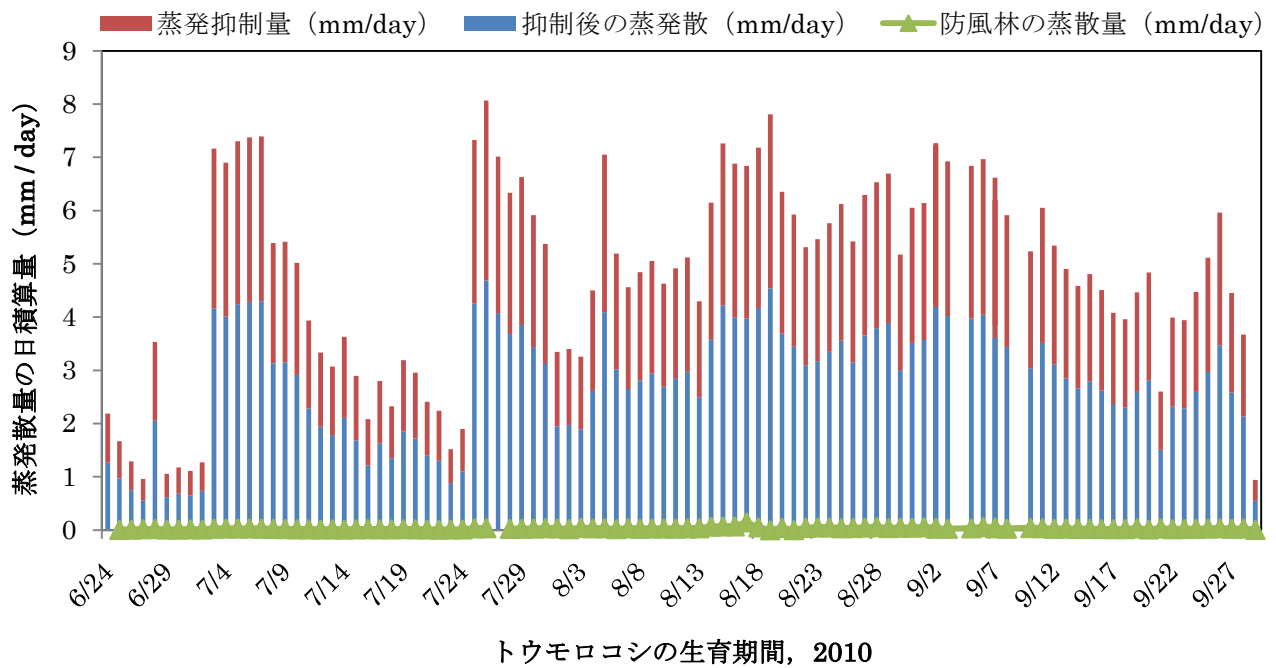


図 108 空隙率 0 %の防風林による蒸発抑制効果

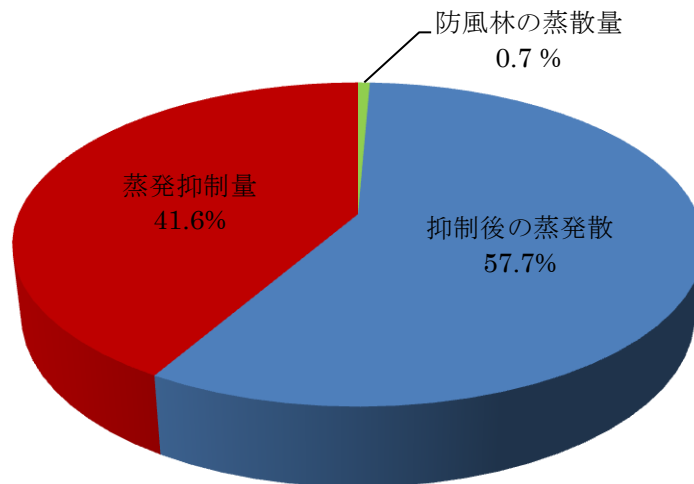


図 109 牛山ほか (2009) の防風特性を参考にした空隙率 0 %の防風林による蒸発抑制効果

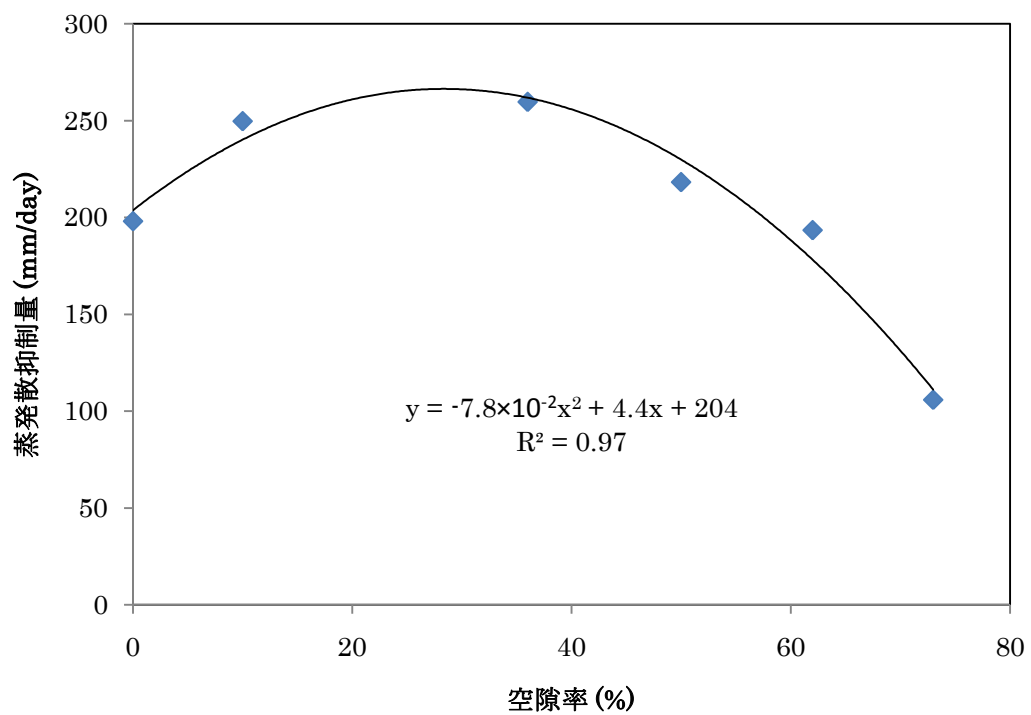


図 110 空隙率と蒸発散抑制量の関係(トウモロコシの生育期間中の蒸発散抑制量の積算値と空隙率の相関)