

2015 年度 修士論文

水稻栽培における営農型太陽光発電の実証と  
モデルシミュレーション

東京大学大学院 新領域創成科学研究科  
環境システム学専攻

47-146688 本間 優

指導教員 吉田 好邦 教授

2016 年 2 月 23 日提出

## 目次

<b>1</b>	<b>序論</b> .....	<b>1</b>
1.1	日本のエネルギー事情 .....	1
1.2	再生可能エネルギーの導入状況.....	2
1.3	農地での再生可能エネルギー利用の可能性.....	3
1.4	営農型太陽光発電の概要.....	3
1.5	営農型太陽光発電の先行研究 .....	6
1.5.1	海外での先行研究.....	6
1.5.2	日本での先行研究.....	11
1.6	営農型太陽光発電の課題.....	16
1.7	農作物耐陰性の研究状況.....	18
1.7.1	光飽和点 .....	18
1.7.2	遮光実験 .....	21
1.7.3	アグロフォレストリー.....	22
1.7.4	まとめ.....	24
1.8	研究の目的 .....	25
1.9	本論文の構成.....	26
1.10	参考文献.....	27
<b>2</b>	<b>水稻生育状況のモデル化</b> .....	<b>31</b>
2.1	水稻栽培の概略 .....	31
2.1.1	移植日の栽培管理.....	31
2.1.2	有効分けつ期の栽培管理 .....	32
2.1.3	出穂日前後の栽培管理.....	32
2.1.4	収穫日前後の栽培管理.....	32
2.2	水稻生育に影響を与える因子 .....	33
2.2.1	気象要因 .....	35
2.2.1.1	気温 .....	35
2.2.1.2	全天日射量.....	36
2.2.1.3	気象災害 .....	43
2.2.2	人為要因 .....	44
2.2.2.1	灌漑 .....	44
2.2.2.2	施肥 .....	45
2.2.2.3	品種 .....	49
2.2.3	まとめ.....	49

2.3	水稻生育ステージ予測モデル .....	50
2.3.1	統計予測モデル.....	50
2.3.2	DVI モデル .....	51
2.3.3	水稻生育ステージ予測モデルの課題.....	52
2.4	水稻収量予測モデル.....	52
2.4.1	統計予測モデル.....	52
2.4.2	成長動態に基づく予測モデル.....	53
2.4.3	水稻収量予測モデルの課題 .....	54
2.5	水稻品質予測モデル.....	55
2.5.1	統計予測モデル.....	55
2.5.2	水稻品質予測モデルの課題 .....	56
2.6	まとめ.....	56
2.7	参考文献.....	57
<b>3</b>	<b>実証試験.....</b>	<b>61</b>
3.1	実証試験場の概要 .....	61
3.2	気象計測.....	62
3.2.1	計測する気象要素.....	62
3.2.2	計測機器と各種設定 .....	62
3.2.3	計測期間 .....	64
3.3	気象データ解析.....	64
3.3.1	日射量データ分析.....	64
3.3.2	気温データ分析.....	68
3.4	気象データの修正 .....	70
3.4.1	気象データ補完.....	70
3.4.1.1	気温データの補完手法.....	70
3.4.1.2	日射量データの補完手法 .....	71
3.4.2	気象データの修正結果.....	71
3.4.2.1	気温データの修正結果.....	71
3.4.2.2	日射量データの修正結果 .....	74
3.5	水稻生育データ解析.....	74
3.5.1	水稻生育調査の概要 .....	74
3.5.2	水稻生育データの分析結果 .....	75
3.6	水稻外観形質分析 .....	78
3.6.1	水稻外観形質分析の概要.....	78
3.6.2	水稻外観形質分析の結果.....	80
3.7	まとめ.....	82

3.8	参考文献	83
<b>4</b>	<b>水稻生育モデルの修正・開発</b>	<b>84</b>
4.1	SIMRIW の構造	84
4.2	SIMRIW の課題	97
4.3	DVI モデルの修正	98
4.4	収穫指数モデルの修正	104
4.5	技術係数の修正	107
4.6	水稻品質予測モデルの開発	109
4.6.1	水稻品質の定義	109
4.6.2	水稻品質の予測式	111
4.7	まとめ	113
4.8	参考文献	114
<b>5</b>	<b>営農型太陽光発電のシミュレーション</b>	<b>115</b>
5.1	可照時間予測式の立式	115
5.2	投影率・遮光率変換曲線	118
5.2.1	投影率と遮光率の関係性	118
5.2.2	投影率・遮光率変換曲線の立式	118
5.3	太陽光発電量予測モデル	119
5.4	年経費率の設定手法	121
5.5	水稻収入予測モデル	122
5.6	営農型太陽光発電の各種設定	123
5.7	シミュレーション結果	124
5.7.1	収量減少ならびに品質劣化の検証	124
5.7.2	地球温暖化による影響の検討	125
5.7.3	移植日早期化の検討	126
5.7.4	遮光時期の差異による収量減少量の検証	127
5.7.5	栽培面積の多寡による経済性	129
5.7.6	買取価格の変動効果	130
5.7.7	太陽光パネル設置角度の変更効果	133
5.8	まとめ	135
5.9	参考文献	136
<b>6</b>	<b>結論</b>	<b>138</b>
6.1	結論	138
6.2	本研究の課題	139

6.2.1	実証実験の課題.....	139
6.2.2	立式したモデルの課題.....	139
6.3	今後の展望.....	140
6.3.1	遮光実験.....	140
6.3.2	モデル構築.....	140
6.3.3	その他.....	141
6.4	参考文献.....	142
	<b>謝辞.....</b>	<b>145</b>
	<b>付録.....</b>	<b>147</b>
	付録 A.....	147
	参考文献.....	149
	付録 B.....	151
	参考文献.....	168
	付録 C.....	173

## 図表

Figure 1.1	東日本大震災前から震災後までの電源構成の推移	1
Figure 1.2	フランスの営農型太陽光発電設備	5
Figure 1.3	日本の営農型太陽光発電設備	5
Figure 1.4	光飽和点のイメージ	19
Figure 1.5	各波長領域での照度重み付け係数並びにクロロフィル光吸収量のイメージ	21
Figure 1.6	アグロフォレストリーの写真	23
Figure 1.7	バナナの栽培可能限界	24
Figure 1.8	本研究で使用した実証試験場の風景（5月）	25
Figure 1.9	本研究で使用した実証試験場の風景（7月）	26
Figure 2.1	一般的な水稲栽培スケジール	31
Figure 2.2	2004~2009年までに各府県で公表された栄養成長期間の平均値	33
Figure 2.3	2004~2009年までに各府県で公表された生殖成長期間の平均値	33
Figure 2.4	2004~2009年までに各府県で公表された水稲品質データのヒストグラム	34
Figure 2.5	2004~2009年までに各府県で公表された水稲収量の平均値	34
Figure 2.6	日本における水稲・陸稲収量の時系列データ	44
Figure 2.7	農業・化学肥料の消費と水稲10aあたり収量の年次変化	45
Figure 2.8	水稲収量と化学肥料使用量の時系列データ	46
Figure 2.9	各国耕地1haあたりの施肥量（リン+カリウム+窒素）の時系列推移	47
Figure 2.10	全球スケールにおける水田1haへの窒素施用量	47
Figure 2.11	全球スケールにおける水田1haへのリン施用量	48
Figure 2.12	全球スケールにおける水田1haへのカリウム施用量	48
Figure 2.13	47都道府県で公表された2012年度の 統計データを用いて算出した気候登熟指数	53
Figure 2.14	SIMRIWの構造	55
Figure 3.1	酒々井実証サイトの風景	61
Figure 3.2	実証試験場の俯瞰イメージ	62
Figure 3.3	気象観測装置の内観（左下：温度計，右上：日射計）	63
Figure 3.4	酒々井実証サイトに設置した気象観測装置	63
Figure 3.5	計測装置（Unit1-Unit8）ならびに銚子市で計測された 平均日積算日射量[MJ/m <sup>2</sup> ]	65
Figure 3.6	太陽光パネル下における年平均全天日射量の推定値	66
Figure 3.7	酒々井実証サイトで用いた日射計が測定可能な光の波長領域（黄色）， ならびに気象台で計測に用いている日射計が測定可能な光の波長領域（青色）	67
Figure 3.8	日射計が計測可能な波長領域のエネルギー積分値	67

Figure 3.9	各測定地点で計測した気温データのヒストグラム	68
Figure 3.10	対照区と佐倉市で計測された気温時系列データ	69
Figure 3.11	対照区と佐倉市で計測された気温データのヒストグラム	69
Figure 3.12	気温データの修正手法のイメージ	70
Figure 3.13	日射量データの修正手法のイメージ	71
Figure 3.14	最低気温の実測値と推定値の散布図	72
Figure 3.15	最高気温の実測値と推定値の散布図	73
Figure 3.16	平均気温の実測値と推定値の散布図	73
Figure 3.17	日積算日射量の実測値と推定値の散布図	74
Figure 3.18	有効分げつ期の積算日射量と穂数の散布図	76
Figure 3.19	登熟期の積算日射量と穂重の散布図	77
Figure 3.20	移植日から収穫日までの積算日射量と籾重の散布図	77
Figure 3.21	死米発生割合と全天日射量の散布図	81
Figure 3.22	未熟米発生割合と全天日射量の散布図	81
Figure 3.23	水稻収量の構成要素と日照条件の関係	82
Figure 3.24	異なる施肥条件（窒素分）と遮光条件で栽培した水稻の分げつ発生数	83
Figure 4.1	SIMRIW の構造 (Figure2.13 の再掲)	84
Figure 4.2	2013 年の気象データから算出した DVI	88
Figure 4.3	2013 年の気象データから算出した LAI	91
Figure 4.4	2013 年の気象データから算出したバイオマス生産量	91
Figure 4.5	1980~2013 年の気象データから算出した収穫指数	94
Figure 4.6	SIMRIW のフローチャート	96
Figure 4.7	SIMRIW の推定値	97
Figure 4.8	SIMRIW の修正点 (赤矢印)	98
Figure 4.9	移植から出穂まで遮光条件下に置いた水稻の出穂遅延期間データの合成図	101
Figure 4.10	出穂から収穫まで遮光条件下に置いた水稻の登熟遅延期間データの合成図	101
Figure 4.11	各遮光率に対応したパラメータ $\alpha$ の散布図	102
Figure 4.12	各遮光率に対応したパラメータ $\beta$ の散布図	103
Figure 4.13	有効分げつ期の積算日射量と穂数の散布図 (Figure3.18 の再掲)	105
Figure 4.14	登熟期の積算日射量と一穂重の散布図 (Figure3.19 の再掲)	106
Figure 4.15	水稻収量と化学肥料使用量の時系列データ (Figure2.7 の再掲)	107
Figure 4.16	SIMRIW による収量推定値 ( $\tau = \text{一定値}$ )	108
Figure 4.17	SIMRIW による収量予測値 ( $\tau = 1$ 次式)	109
Figure 4.18	死米発生割合と全天日射量の散布図 (Figure3.21 の再掲)	112
Figure 4.19	未熟米発生割合と全天日射量の散布図 (Figure3.22 の再掲)	113
Figure 5.1	可照時間の予測値	117

Figure 5.2	可照時間の予測値と実測値の時系列データ	117
Figure 5.3	投影率・遮光率変換曲線	119
Figure 5.4	水稲作付面積別の単位面積あたりの生産費用	123
Figure 5.5	太陽光パネルの土地に占める割合（投影率）に対応した水稲収量	124
Figure 5.6	太陽光パネルの土地に占める割合（投影率）に対応した水稲品質	125
Figure 5.7	収量推定値の1980-1984年の平均値と2011-2014年の平均値	126
Figure 5.8	移植日を早期化させた場合の収量推定値	127
Figure 5.9	遮光時期を変化させた際の収量推定値	128
Figure 5.10	減収量の構成割合	128
Figure 5.11	営農型太陽光発電(1ha)のキャッシュフロー	129
Figure 5.12	営農型太陽光発電(15ha)のキャッシュフロー	130
Figure 5.13	売電価格が20[円/kWh]の場合のキャッシュフロー	131
Figure 5.14	売電価格が24[円/kWh]の場合のキャッシュフロー	131
Figure 5.15	投影率20%地点における各月のキャッシュフロー	132
Figure 5.16	投影率30%地点における各月のキャッシュフロー	132
Figure 5.17	栽培期間にパネル設置角度を90[°]に変更した場合の キャッシュフロー	133
Figure 5.18	栽培初期にパネル設置角度を90[°]に変更した場合の キャッシュフロー	134
Table1.1	固定価格買取制度前後の再生可能エネルギー導入量	2
Table1.2	日本で使用されている農地の区分，営農条件，ならびに農地転用許可方針	4
Table1.3	農林水産省が公表した農地一時転用許可の申請基準	4
Table1.4	農業委員会に提出する営農状況報告書の記載内容	6
Table1.5	営農型太陽光発電の土地利用効率	7
Table1.6	営農型太陽光発電の研究課題（海外の先行研究）	11
Table1.7	営農型太陽光発電の研究課題（日本の先行研究）	16
Table1.8	営農型太陽光発電の研究課題	17
Table1.9	野菜の光飽和点	19
Table2.1	各生育段階の限界温度	36
Table2.2	生育初期の水稲で実施された遮光実験の概要	37
Table2.3	生育初期の水稲で実施された遮光実験の結果	38
Table2.4	生育後期の水稲で実施された遮光実験の概要(1)	39
Table2.5	生育後期の水稲で実施された遮光実験の概要(2)	40
Table2.6	生育後期の水稲で実施された遮光実験の結果(1)	41



Table2.7	生育後期の水稻で実施された遮光実験の結果(2)	42
Table2.8	多収米品種の粗玄米重ならびに用途	49
Table2.9	各生育ステージ到達までに必要な有効積算温度	51
Table3.1	計測した全天日射量・気温データの欠損期間	64
Table3.2	計測した日最高気温と佐倉市で計測された日最高気温間の回帰分析結果	71
Table3.3	計測した日最低気温と佐倉市で計測された日最低気温間の回帰分析結果	72
Table3.4	計測した日最低気温, 日最高気温と日平均気温間の回帰分析結果	72
Table3.5	日積算日射量と銚子市で計測された日積算日射量の回帰分析結果	74
Table3.6	1回目(7/26)の水稻生育調査の結果	75
Table3.7	2回目(9/1)の水稻生育調査の結果	76
Table3.8	米粒重量計測の結果	76
Table3.9	米粒外観品質の検査項目の定義(1)	78
Table3.10	米粒外観品質の検査項目の定義(2)	79
Table3.11	米粒外観形質分析の結果	80
Table4.1	SIMRIWで使用する固有パラメータの概要	85
Table4.2	SIMRIWで使用する固有パラメータ	86
Table4.3	SIMRIWで算出した出穂遅延期間	99
Table4.4	SIMRIWで算出した登熟遅延期間	100
Table4.5	SIMRIWで算出した収穫遅延期間	103
Table4.6	水稻品質の定義	110
Table4.4	改定した水稻品質の定義	111
Table5.1	月ごとの傾斜補正係数	121

## 付録

TableA.1	野菜類の光飽和点	147
TableA.2	果樹類の光飽和点	148
TableA.3	穀物類の光飽和点	148
TableA.4	その他の光飽和点	149
TableB.1	多年生農作物にて実施した遮光実験の概要(1)	151
TableB.2	多年生農作物にて実施した遮光実験の結果(1)	152
TableB.3	多年生農作物にて実施した遮光実験の概要(2)	153
TableB.4	多年生農作物にて実施した遮光実験の結果(2)	154
TableB.5	多年生農作物にて実施した遮光実験の概要(3)	155
TableB.6	多年生農作物にて実施した遮光実験の結果(3)	155
TableB.7	1年生農作物にて実施した遮光実験の概要(1)	156
TableB.8	1年生農作物にて実施した遮光実験の結果(1)	157
TableB.9	1年生農作物にて実施した遮光実験の概要(2)	158
TableB.10	1年生農作物にて実施した遮光実験の結果(2)	159
TableB.11	1年生農作物にて実施した遮光実験の概要(3)	160
TableB.12	1年生農作物にて実施した遮光実験の結果(3)	161
TableB.13	1年生農作物にて実施した遮光実験の概要(4)	162
TableB.14	1年生農作物にて実施した遮光実験の結果(4)	163
TableB.15	1年生農作物にて実施した遮光実験の概要(5)	164
TableB.16	1年生農作物にて実施した遮光実験の結果(5)	164
TableB.17	薬用作物で実施した遮光実験の概要(1)	165
TableB.18	薬用作物で実施した遮光実験の結果(1)	166
TableB.19	薬用作物で実施した遮光実験の概要(2)	167
TableB.20	薬用作物で実施した遮光実験の結果(2)	167
TableC.1	米粒外観形質分析の結果(1)	173
TableC.2	米粒外観形質分析の結果(2)	174

# 1 序論

## 1.1 日本のエネルギー事情

2011年3月に発生した東日本大震災は、原子力発電のリスクを顕在化させた。東日本大震災後、日本のエネルギー事情が変わりつつある。Figure1.1を見ると、電源構成を占める原子力発電の割合が減少し、化石燃料の割合と再生可能エネルギーの割合が増加している。原子力発電所稼働の際に必要な耐震性能などの審査基準をクリアすることが出来ていないために、2016年2月現在も原子力発電所はほぼ稼働していない状況にある。

運転停止中の原子力発電を代替する形で使用されている天然ガス使用量は年々増加しており、2014年度には全電源構成の50%弱を占めるようになった。天然ガス輸入量の急増は過度な貿易赤字を生み出し、外貨を流出させるのみならず、化石燃料をふんだんに使用することにより、日本国全体のCO<sub>2</sub>排出量を増加させている。

以上のような背景から、国外へ外貨を流出させ、気候変動問題を引き起こす主要因として認識されている化石燃料への過度な依存体制が見直されている。そして再生可能エネルギーの普及や省エネルギー機器の開発といった、いわゆる「クリーン」なエネルギーの普及が望まれている。

とりわけ東日本大震災以降、化石燃料に頼らないエネルギー源の普及が喫緊の課題として認識されている。2015年7月に経済産業省が公表した資料によると、2030年度に達成すべき目標として掲げられた電源構成の内、再生可能エネルギーが占める割合を20%以上に設定するなど、再生可能エネルギーを化石燃料に変わる、次世代を担うエネルギーとして位置づけている<sup>[1,2]</sup>。

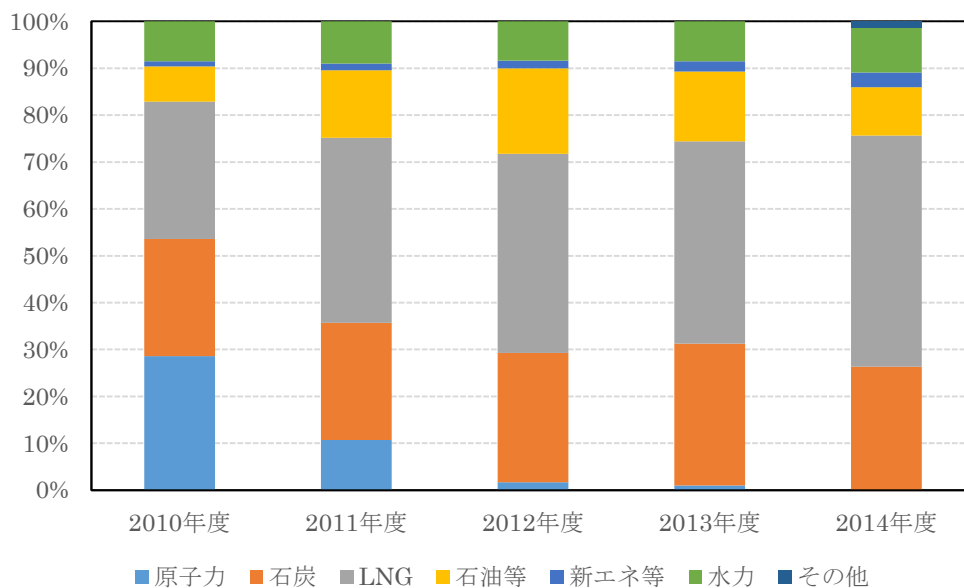


Figure1.1： 東日本大震災前から震災後までの電源構成の推移

(出典) 友川<sup>[1,1]</sup>

## 1.2 再生可能エネルギーの導入状況

東日本大震災翌年の 2012 年，再生可能エネルギーの導入を促進するために「固定価格買取制度」が導入された。「固定価格買取制度」とは再生可能エネルギーの普及を促す取り組みの 1 つであり，再生可能エネルギーとして定義されている電力（太陽光，風力，小水力，地熱，バイオマス）全てを，一定価格で一定期間，電力会社が買い取るように義務付けた制度である。

Table1.1 は経済産業省が公表した，固定価格買取制度以前と以後の再生可能エネルギー累積導入量についての表である。この資料によると，固定価格買取制度が実施された 2012 年度より再生可能エネルギー導入量が急激に増加しており，実施後 3 年で約 1000 万 kW の再生可能エネルギーが導入されたことがわかる。とりわけ設置が容易で初期投資が小さい非住宅用の太陽光発電設備の普及が著しく，新規増設分の 75%弱を占めている。住宅用の太陽光発電導入量も含めると，太陽光発電のみで再生可能エネルギー導入量の 98%弱を占めている。

再生可能エネルギー累積導入量の中でも特に太陽光発電の普及量が大きい理由として，地理的な偏在が小さく，設置が容易であることがあげられる。風力発電は北海道と東北地方に導入ポテンシャルが大きく，地熱発電は東日本，そして九州地方に多く分布している<sup>[1.4]</sup><sup>[1.5]</sup>。また木材を対象にしたバイオマス発電についても紀伊半島や四国地方，九州地方における導入ポテンシャルが大きい<sup>[1.6]</sup>。このように風力発電，バイオマス発電，地熱発電などは導入できる地域に偏りが生じており，初期投資も大きいことから，大量導入が困難である。

一方，太陽光発電は北海道における導入ポテンシャルは大きいが地理的な偏在は少なく，日本中で太陽光発電設備を導入することが可能である<sup>[1.7]</sup>。また設置も極めて容易であり，1kW あたり 30 万円ほどで施工を依頼できるため，一般家庭においても導入が可能である。このように太陽光発電に適した土地の地理的偏在が少なく，設置が容易であり，小規模でも経済的に利益が見込まれるため，住宅用・非住宅用の太陽光発電設備の導入が行われてきた。

Table1.1： 固定価格買取制度前後の再生可能エネルギー導入量

	H24 年 4 月までの再生可能エネルギー累積導入量	H24 年 4 月から H26 年 4 月までの再生可能エネルギー累積導入量
太陽光(住宅)	約 470 万 kW	約 221 万 kW
太陽光(非住宅)	約 90 万 kW	約 736 万 kW
風力	約 260 万 kW	約 11 万 kW
中小水力	約 960 万 kW	約 1 万 kW
地熱	約 50 万 kW	約 0 万 kW
バイオマス	約 230 万 kW	約 9 万 kW
合計	約 2060 万 kW	約 977 万 kW

(出典) 経済産業省，再生可能エネルギー発電設備の導入状況を公表します<sup>[1.3]</sup>

### 1.3 農地での再生可能エネルギー利用の可能性

農地法による規制から、農業以外の用途での農地の使用が禁止されてきた。しかし 2013 年に一部、農地法の改正が行われたため、農業以外の用途での農地の使用、つまり再生可能エネルギーの導入が可能となった。そのため今後は再生可能エネルギー導入量増加の展望として、農地を対象にした、非住宅用太陽光発電を普及してゆくことが望ましいと考えられる。日本の国土面積の 10%以上を占めている農地を有効活用することは、国土の保全という観点からも意義深い。

現在までに検討されている、農地を利用した再生可能エネルギー導入手法は、バイオエタノール生産、バイオマス発電、太陽光発電（恒久的な農地転用を伴う）、農業と発電を並行して行う営農型太陽光発電の 4 通りである。しかし植物が吸収する単位面積あたりの太陽エネルギーの変換効率は、植物では約 3%と低い一方、商業用に販売されている太陽光パネルでは約 15%と高い<sup>[1.8]</sup>。そして日本は温帯気候帯に位置しており多毛作が困難であるため、年間を通して安定したバイオマス量を供給することが困難である。そのためバイオエタノール生産・バイオマス発電に関して、日本は極めて不利な条件下にある。

以上の理由から、農地に太陽光パネルを設置する発電手法は、バイオエタノール生産やバイオマス発電と比較するならば、効率的にエネルギー生産を行うことが可能である。その中でも、発電に加えて食料生産も同時に行うことで副次的な効果を得ることができる、営農型太陽光発電の有用性は大きいと考えられる。ゆえに恒久的な農地転用を伴う太陽光発電設備の導入ではなく、発電と農業を並行して行う発電方式である営農型太陽光発電が近年注目を浴びている。

### 1.4 営農型太陽光発電の概要

2013 年 4 月 1 日に農林水産省により公表された通知により、農地で限定的ながら、再生可能エネルギーを導入することが可能となった<sup>[1.9]</sup>。ゆえに本論文では暫定的に、農地に上記の営農型発電設備を備えた設備群を「営農型太陽光発電」と呼ぶ。日本では一般的にはソーラーシェアリングと呼称されているが、英名は Dupraz et al.<sup>[1.10]</sup>で Agrivoltaic systems と呼称されており、Beck et al.<sup>[1.11]</sup>で Agro-photovoltaics と呼称されているため、これらと区別する。欧米ではこれらの名称が一般的である。

農振第 2657 号の冒頭に記載されているよう、営農型太陽光発電では「農地に支柱（簡易な構造で用意に撤去できるものに限る。）を立てて、営農を継続しながら上部空間に太陽光発電設備等の発電設備を設置する」場合のみを一時的な農地転用として許可している。

Table1.2：日本で使用されている農地の区分，営農条件，ならびに農地転用許可方針

区分	営農条件，市街地化の状況	許可方針
農用地区域内農地	農業振興地域整備計画で農用地区域と定められている農地	原則不許可（農振法・土地収用法対象事業に基づく例外あり）
甲種農地	特に良好な営農条件を備えている農地（8年以内に市街化調整区域内の土地改良事業等の対象となった農地等）	
第1種農地	良好な営農条件を備えている農地（10ha以上の規模の一団の農地／土地改良事業等の対象となった農地等）	
第2種農地	市街地化が見込まれる農地（鉄道の駅が500m以内にある等），ならびに生産性の低い小集団の農地	一部許可（周辺の他の土地に立地することができない等）
第3種農地	市街地の区域又は市街地化の傾向が著しい区域にある農地（鉄道の駅が300m以内にある等）	原則許可

（出典）農林水産省，農地転用許可制度<sup>[1.12]</sup>

日本の農地は5種類に区分されており，営農型太陽光発電の場合，一時的な農地転用許可は第1種農地，第2種農地，第3種農地，農用地区域内農地，甲種農地の全てが対象となる。ゆえに農地転用申請が許可されるのならば，日本全国の農地で営農型太陽光発電設備を設置することが可能である。これはTable1.2の許可方針が示すよう，営農型太陽光発電が農振法に基づく例外扱いとなるため，第1種農地，農用地区域内農地，甲種農地という農地転用が原則不許可な農地に対しても，営農型太陽光発電設備の設置が可能なたためである。しかし，営農型太陽光発電を目的とした一時的な農地転用申請者は，設置にあたり，Table1.3の，4点の基準を満たすことが求められる。

Table1.3：農林水産省が公表した農地一時転用許可の申請基準

農地一時転用許可の申請基準	
①	一時転用許可は3年間であること
②	簡易な構造，撤去可能な支柱を用いること
③	営農が適切に，継続的に行われること
④	太陽光パネルを撤去する際に必要な資金，信用を保持していること

（出典）農林水産省，支柱を立てて営農を継続する太陽光発電設備等についての農地転用許可制度上の取扱いについて<sup>[1.13]</sup>

農地の一時転用許可期間が3年間であるゆえ、設置者は3年毎に再申請を行う必要がある。またコンクリートや木材を利用した頑健な建築物を利用することができない。そのため、日本では単管パイプを利用した設計を行っているケースが多く、海外で設置されている営農型太陽光発電システムと比較して脆弱な構造となっている。比較のために、フランスに実証試験場として設置された設備と、日本で設置されている設備の写真を Figure1.2, Figure1.3 に示す。フランスの実証試験場はコンクリートの土台上に木材を利用した頑健な構造物を設置しているのに対し、日本では単管パイプを組み合わせた設計で、フランスの例に比べると脆弱であることがわかる(著者撮影)。



Figure1.2 : フランスの営農型太陽光発電設備  
(出典) Resilience.org<sup>[1.14]</sup>



Figure1.3 : 日本の営農型太陽光発電設備

また設置者は農業が継続的に行われている事実を証明するため、毎年、営農状況を農業委員会に報告することが義務付けられている。「営農が適切に、継続的に行われること」に関する年次報告内容は、農林水産省が決定した内容、具体的には Table1.4 の 4 点が含まれる。

これら 4 点を各地域の農業委員会に報告し、継続か撤去かについての判断を仰ぐ必要がある。その際、もし収量が 2 割以上減少しているのにも関わらず、何らかの対応措置を講じない場合には、営農型太陽光発電設備の撤去が求められる。このように、農業委員会が減収などの理由から太陽光パネルの取り外しを命じた際、撤去がスムーズに進むよう、営農型太陽光発電設備の設置者は Table1.3 に指示されているように、事前に営農型太陽光発電設備の撤去能力を保持している点について証明する必要がある。

以上述べてきた 4 点の認可基準を満たした申請者が、農業委員会からの許可を受け、営農型太陽光発電設備を設置できる。そして毎年農業委員会に対して報告される営農状況についての経過報告から、農業委員会が継続の有無について判断を下し、営農型太陽光発電設備の設置者に対して、その判断結果を報知するのである。以上が 2013 年に公示された農振法で規定され、2016 年 2 月に至るまで行われている、営農型太陽光発電の申請から撤去に至るまでの概略である。次節では、海外・日本で研究された営農型太陽光発電の研究事例をそれぞれ紹介し、研究の課題、今後の展望について考察を加えてゆく。

Table1.4：農業委員会に提出する営農状況報告書の記載内容

営農状況報告書の記載内容
① 営農を継続して実施していること
② 収量が同年の地域の平均値と比較して 2 割以上減少していないこと
③ 農作物の品質に著しい劣化が生じていないこと
④ 農作業に必要な機械等を、設置前と同様に利用できていること

(出典) 農林水産省、支柱を立てて営農を継続する太陽光発電設備等  
 についての農地転用許可制度上の取扱いについて<sup>[1.13]</sup>

## 1.5 営農型太陽光発電の先行研究

### 1.5.1 海外での先行研究

営農型太陽光発電が注目され始めた時期が 2010 年以降であるため、海外での先行研究は極めて少ない。2016 年 2 月現在では、大規模な実証試験場を設置して実証研究を行い、その結果を論文として公表している研究グループが、フランスに 1 団体存在するのみである。このように、欧州で僅かであるが知見が蓄積されている。

まずはこれら先行研究の概要を述べてゆく。そして論文に記載されている新知見、ならびに記述内容から推察できる研究課題について記述し、最後に得られた知見を統合することにより、現状の課題と今後の展望について考察を行う。



- ① C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, Y. Ferard ; Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes, *Renewable Energy*, 36 (2011), pp. 2725-2732.

Dupraz et al.<sup>[1.10]</sup>は、気象データから農作物の収量を予測する作物モデル (STICS : Multidisciplinary Simulator for Standard Crops) と、上部空間に構造物を仮定して、その構造物下の日射量分布を予測することができる全天日射量遮断モデル、そして発電量予測モデルという 3 種類のモデルを組み合わせ、土地利用効率 (LER : Land Equivalent Ratio) の観点からシミュレーションを行っている。この土地利用効率とは、土地を効率よく使用しているか否かを判断する指標である。ここでは、一定面積の土地を完全に活用して太陽光発電を行う際の発電量と営農型太陽光発電システムの発電量の比を太陽光パネルの「比較収量」と定義し、同様に栽培した農作物の「比較収量」を算出して、両者を合計した数値を算出している。Dupraz et al.<sup>[1.10]</sup>で算出された土地利用効率の論文値を Table1.5 に引用する。Table1.5 の結果から、遮光率 50% の営農型太陽光発電設備は、同容量のメガソーラー発電設備と比較して、64%ほど効率よく土地を利用できていることがわかる。

このように「土地利用効率」は土地の有効活用の程度を表現する有益な指標である一方、比較収量を評価軸として利用しているため経済性が未評価であり、実際の導入可能性を十分に検討できていない。また作物モデル(STICS)の信頼性が低く、太陽光パネル下での微気象変化 (全天日射量, 湿度, 風速, 地温など) や降雨量分布の偏在が作物モデルで考慮されていない。このように経済性について検討が不十分である点, 加えて遮光条件下における農作物の品質劣化が作物モデルへ反映されていない点が, 研究課題として言及されている。

Table1.5 : 営農型太陽光発電の土地利用効率

営農型太陽光発電の土地利用効率 (Land Equivalent Ratio)			
	太陽光パネル	農作物	LER
	比較収量	比較収量	
単一栽培・発電システム	1	1	1
営農型太陽光発電 (遮光率 50%)	1	0.64	1.64
営農型太陽光発電 (遮光率 25%)	0.52	0.8	1.32

(出典) Dupraz et al.<sup>[1.10]</sup>

- ② **M. Beck, G. Bopp, A. Goetzberger, T. Obergfell, C. Reise, S. Schindele ; Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic-Optimization of Orientation and Harvest, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2012, pp. 4096-4100.**

Beck et al.<sup>[1.11]</sup>は全天日射量遮断モデルを構築し、太陽光パネルの下で栽培された農作物の収量についてシミュレーションを行うことで、先の Dupraz et al.<sup>[1.10]</sup>と同様に土地利用効率を算出している。また全天日射量遮断モデルから、太陽光パネル下に入射する全天日射量の空間的な分布を推定している。

シミュレーションの結果、南北方向に太陽光パネルを設置すると発電量は増加するが、太陽光パネル下の全天日射量が強く減少するために、減収が生じるという結果が得られている。同様に、東西方向に太陽光パネルを設置すると発電量が減少するが、太陽光パネル下の全天日射量が減少しにくく、農作物の収量にはそれほど影響を及ぼさない、と論文で述べられている。

太陽方位が高い夏季では、日陰が営農型太陽光発電設備直下に長時間生じるため、入射する全天日射量が著しく減少する。逆に太陽方位の低い冬季では日陰が生じる時間が短いため、太陽光パネル下の全天日射量は減少しにくい。ゆえに営農型太陽光発電では、夏季の農作物栽培が冬季の農作物栽培に比べて不利な条件下にある点についても指摘されている。

この研究では、Dupraz et al.<sup>[1.10]</sup>と同様に土地利用効率を用いた評価を行っているが、経済性についての検討が行われていない点を課題として認識しており、営農型太陽光発電の経済性について考慮した研究が必要であると論文で述べている。また、熱帯・亜熱帯地方において栽培されているバナナ、コーヒー、茶などの農作物は耐陰性が強く、アグロフォレストリーで盛んに選好されている農作物であるため、営農型太陽光発電に適した農作物である可能性が高いという点についても指摘している（アグロフォレストリーの記述については 1.7.3 を参照）。

- ③ **H. Marrou, L. Guilioni, L. Dufour, C. Dupraz, J. Wery ; Microclimate under agrivoltaic systems: is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?, Agricultural and Forest Meteorology, 177 (2013), pp. 117-132.**

Marrou et al.<sup>[1.15]</sup>は、営農型太陽光発電設備下でレタス・ドラム小麦・キュウリを栽培し、実証試験を行うと同時に、太陽光パネル下の微気象（全天日射量、気温、葉温、地温、風速、水蒸気圧）を計測している。その結果、全天日射量と地温、葉温以外の気象要素（気温、風速、水蒸気圧）には営農型太陽光発電設備の影響が生じていないことを明らかにした。以下では、確実に影響が生じると論文で想定されていた全天日射量の言及はせず、新たな知

見である地温、葉温に生じた影響を詳細に述べる。

小麦栽培区の地下 5cm と 25cm の 2 点を計測した結果、地下 5cm の計測地点では 1.8~1.9℃ほど地温が減少し、地下 25cm の計測地点では 2.1~2.3℃ほど地温が減少していた。つまり営農型太陽光発電設備を導入することにより、深部土壌温度が低下するということを明らかにしている。

葉温を計測した結果、気温に比べて夜間で 2℃ほど高く、昼間で 3℃ほど低くなっていた。この点については、昼間は太陽光パネルにより農作物への直射日光が減少するため、そして夜間は営農型太陽光発電設備から土壌への熱伝達が発生するためと Marrou et al.<sup>[1.15]</sup>で推測されている。論文中では、夜間の葉温増加は呼吸量を増加させ、昼間の葉温低下は蒸散量を減少させる可能性が高いという仮説を提起している。

このように上部空間に太陽光パネルを設置することによる農作物への遮光条件は、全天日射量を減少させるのみならず、地温と葉温も低下させる。そして日中の葉温低下と夜間の葉温上昇は、夜間の呼吸量増加と昼間の蒸散量減少をもたらす可能性が高い点が言及されている。

結論として、太陽光パネル下で栽培された農作物が受光可能な全天日射量の減少に加えて、地温と葉温の変動が植物体へ与える包括的な影響（生育状況や収量、品質など）について検討することが必要と、論文中では指摘されている。

④ **H. Marrou, L. Dufour, J. Wery ; How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system? , Agricultural and Forest Meteorology, 50 (2013), pp. 38-51.**

Marrou et al.<sup>[1.16]</sup>は、遮光条件が葉温の減少を引き起こすという、先の Marrou et al.<sup>[1.15]</sup>の結果を踏まえ、遮光条件が農作物の蒸発散量を変化させる点を検証している。対象作物はレタスとキュウリであり、気象計測の結果、太陽光パネル下の有効積算日射量は、太陽光パネル外の 50~70%であった。

Marrou et al.<sup>[1.16]</sup>は植物の蒸発散ならびに水収支を立式し、生育に必要な灌漑水の使用量を計算した結果、営農型太陽光発電設備下では、収穫時までに 14~29%の灌漑用水が節約可能という結果を提示している。

また論文中では、太陽光パネルの遮光条件が、土壌からの水分蒸発量を減少させるという結果についても言及されている。そのため、営農型太陽光発電設備下で土壌の被覆が大きい農作物（例えばカボチャなど）を栽培することは、被覆が少ない農作物（例えばレタスなど）と比較して、水の有効利用が可能である。この結果は立式した計算式から導出された推論であるため、今後は営農型太陽光発電設備下で土壌被覆率の大きい農作物を栽培し、水利用量の観点から更なる検証を行う必要があることが論文中で述べられている。

以上のように、遮光条件の水節約性についての議論は、水の有効活用にのみ焦点があてられている。一方、論文中では太陽光パネルの設置による降水パターンの変化には言及していない。また太陽光パネルに付着する水滴の蒸発による、農作物が利用可能な降水量の減少についても検討していない。

⑤ **H. Marrou, J. Wery, L. Dufour, C. Dupraz ; Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels, European Journal of Agronomy, 44 (2013), pp. 54-66.**

Marrou et al.<sup>[1.17]</sup>は、2 パターンの営農型太陽光発電設備（強遮光区、弱遮光区）の下で、4 品種のレタスを栽培し、遮光条件がレタスの重量、形態へ与える影響を検討している。レタスが選定された理由は、耐陰性に優れた農作物であると一般的に知られているためである。実験の結果、品種差によるためか、遮光条件でのレタスの収量が品種ごとに異なっていた。このように遮光条件が収量に及ぼす影響は、農作物の種類に加えて、品種差により支配される可能性がある点が指摘されている。

また論文中では、遮光条件は全天日射量を効率よく取り込むための、植物側の適応能力の発現を促したという点も指摘されている。遮光条件下では、レタス葉の厚さが減少しており、葉面積が増加していたのである。この変化は、遮光条件下で効率的に全天日射量を取り込むための、植物側の適応と、論文中で指摘されている。このように、遮光条件はレタスの形態変化を促し、収量や品質に強い影響を与えていた。

以上から、遮光条件による収量評価に加えて、品質劣化の可能性についても考慮して、営農型太陽光発電設備下で栽培する農作物の選定、ならびに品種の選定を行う必要がある点が指摘されている。

⑥ **M Dinesh, Harshavardhan, Joshua M. Pearce ; The potential of agrivoltaic systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54 (2016), pp. 299-308.**

Dineshet et al.<sup>[1.18]</sup>はアメリカ合衆国のカンザス州を対象区域として、Dupraz et al.<sup>[1.10]</sup>の手法に基づいたシミュレーションによる農作物の収量評価を実施している。対象作物はレタスである。春季と夏季の2回シミュレーションを実施した結果、春季の気象条件で遮光率50%の営農型太陽光発電設備では、レタスの収量が21%減少し、遮光率25%の場合では、収量が1%減少していた。同様のシミュレーションを夏季の気象条件で実施した結果、遮光率50%では収量が42%減少し、遮光率25%では収量が19%減少していた。

この結果から、春季や秋季という太陽高度が低く影が生じにくい時期は、太陽光パネル

下の遮光条件が弱まるため、農作物の高収量が確保できると論文中では言及されている。この点についての指摘は、Beck et al.<sup>[1.11]</sup>と同様である。

また Dineshet et al.<sup>[1.18]</sup>は経済性についてのシミュレーションを実施している。仮にアメリカ合衆国のレタス農家に営農型太陽光発電設備を導入した場合、40~70GWの発電設備が導入できることが論文中で指摘されている。

以上の結果を踏まえ、発電した電力を利用し、太陽光パネル表面の汚れを洗浄する機器類を実装した営農型太陽光発電設備を乾燥地帯（例えばインドなど）に導入することによる発電量増加の可能性について指摘している。また同様に、発電した電力を用いて灌漑システムを最適化しつつ、太陽光パネルの設置角度を自動制御することにより、灌漑水の使用量を最小化しつつ、発電量と収量の最大化を達成することが有用であるという点も論文中で指摘されている。

---

以上が2016年2月までに海外で公表された先行研究の概略である。論文を横断的に概観すると、Table1.6の5点が未検討であった。これらは先行研究を整理することで明らかになった、今後の研究課題である。

次節では海外で公表された論文と同様、日本の先行研究について概略を述べ、先行研究から得られた知見をまとめてゆく。

Table1.6： 営農型太陽光発電の研究課題（海外の先行研究）

海外の先行研究から推察できる研究課題
① 作物モデルの信頼性向上
② 遮光条件下における農作物の実証実験
③ 遮光条件を課すことによる農作物の形態学的・生理学的評価
④ 地温・葉温の増減が収量・品質へ与える影響の包括的な検討
⑤ 農地での降水パターン変化の検討

### 1.5.2 日本での先行研究

日本の営農型太陽光発電における研究蓄積も、海外同様に少ない。その数少ない研究事例は、2013年の農地法改正以降に公表されている。そのため、非実証系の論文が多くを占めており、日本の先行研究は海外のものとは比べて、多くは収量計測や微気象計測を対象として

いない。

本節では 2016 年 2 月までに公表された非実証系の先行研究，ならびに実証系の先行研究の概要を記述し，最後に得られた知見を統合することにより，現状の課題と今後の展望を考察する。

① 馬上 丈司；農山漁村再生可能エネルギー法とソーラーシェアリング型太陽光発電事業による国内農業活性化への展望，千葉大学人文社会科学研究所，29 (2014)，pp.41-56.

馬上<sup>[1.19]</sup>は，日本国内における営農型太陽光発電の現状について丹念に情報をまとめた結果，現状の課題は制度的制約と農作物耐陰性の知見不足という，2 点に集約されることを指摘している。

1 点目の制度的制約とは，具体的には制度内容により発生する 2 つのリスクー事業継続リスク，自然災害リスクーである。前者の事業継続リスクは，毎年営農状況を報告し，継続条件（収量が 80%以上かつ品質劣化が少ない）を満たさなければ営農型太陽光発電設備を撤去しなければいけないという，事業継続性についてのリスクである。また後者の自然災害リスクは，自然災害に対する営農型太陽光発電設備の脆弱性である。農振第 2657 号の記述では，農地に設置できる営農型太陽光発電設備は簡易な支柱に限られているため，コンクリートや木材を利用した頑健な建築物を利用することができない。ゆえに現状は，単管パイプや簡易な支柱を利用した設計のケースが多く，台風や地震といった自然災害に対して脆弱にならざるを得ない状況に置かれている。この点が自然災害リスクとして認識されている。

2 点目の農作物耐陰性の知見不足とは，この場合，遮光条件と農作物生育の関係性についての知見が蓄積されていない状況を意味している。現状では，農作物の耐陰性について定量的に把握することが不可能であるため，営農型太陽光発電設備を設置した際の見通し（収量が 8 割以上担保されるか）を立てることができない。

② 北風 亮，小野田 真二，廣瀬 勝之，大平 佳男；ソーラーシェアリングの知見・課題の整理と事業化モデル構築に関する研究～南相馬市を含む先進地域の取組みを事例に～，生協総研賞・第 11 回助成事業論文報告会，2015，pp. 105-121.

北風ら<sup>[1.20]</sup>は，一般社団法人ソーラーシェアリング協会が実施したアンケート調査の内容を基に，設置者の規模，事業費，農地転用許可までに費やした期間などの項目を参照しながら，営農型太陽光発電の現状について詳細に記述している。

全国の営農型太陽光発電実施者を対象としたアンケート調査で回答があった 24 件から，現在栽培されている農作物は大豆，茶，サカキ，アスパラガス，水稲，落花生，柑橘類，ス

イカなど様々な種類、品種が存在していた。またこれら農作物を栽培するに至った農作物の基準は存在していなかった。これは農作物の耐陰性を調査する目的で農作物の選定が行われているためである。つまり、遮光条件に適した農作物を見出すという、設置者の試行錯誤が続いている状況を表していると論文中では指摘されている。

また農地転用許可を得るまでに費やした期間は1ヶ月~12ヶ月と非常に多岐にわたっており、現状では、設置認可の判断は全て農業委員会の意向に左右されている。農地の一時転用認可に必要な期間が異なっていることから推察できるよう、判断にあたって明確な基準が存在していない点が課題と指摘されている。

### ③ 菊池 佐智子, 奥水 肇; 電力量と芝草の成長解析によるソーラーシェアリングの環境条件, ランドスケープ研究 77 (2014), pp. 669-672.

菊池ら<sup>[1.21]</sup>は、面積4m×4mの試験区に、高さ0.3mになるよう太陽光パネルを設置し、太陽光パネル下に芝生を生育させることで、太陽光パネルの設置が芝生鮮度に与える影響、そして芝生の存在が発電に与える影響について検討している。

取得したデータを解析した結果、芝生区では芝の蒸散効果により太陽光パネルの裏面温度が低下し、太陽光パネルの電力量が増加する可能性が高いことが示唆された。植物の蒸発散が顕熱フラックスを減少させることで太陽光パネル周囲の気温を低下させ、太陽光パネルの発電量増加に寄与した可能性が高いと指摘されている。

しかし本修士論文の著者である本間が推測するに、畑地や田地を対象とした営農型太陽光発電の場合は、農機具の使用に備え、高さ3m以上に太陽光パネルを設置するため、農作物の蒸発散が、発電量の増加に寄与しない可能性が高い。そのため、農作物の栽培が太陽光パネルに及ぼす影響については、今後さらなる研究蓄積が必要と考えられる。

### ④ 中山 弘, 大門 信也; 南相馬市における「ソーラーシェアリング」のとりくみ: 震災からの歩みを中心に, サステイナビリティ研究, 4 (2014), pp. 17-25.

中山ら<sup>[1.22]</sup>は、福島県南相馬市で設立された一般社団法人「えこえね南相馬研究機関」の設立に至った経緯、そして組織運営上の課題について言及している。

組織運営上の課題は、営農型太陽光発電の事業形態が農林水産省の見解に依存していること、そして農業委員会の承認が困難であるという2点である。前者は、農林水産省により農地法面・畦畔といった農地周辺部での発電が認められていないため、事業形態が制限されているという事例が挙げられている。例えば2016年2月時点では、農林水産省の見解により、畦畔に追尾型太陽光パネルを設置する、農地周辺部の法面を利用して太陽光発電を実施

する、といった事業を実施することが出来ない。後者は農地転用申請を農業委員会に提出した後、農業委員会の承認を得るまでが不確実な長期間に渡り、事業計画がスケジュール通りに進まない可能性が高いことを意味している。これは北風ら<sup>[1.20]</sup>で指摘されている内容と同様である。

⑤ 齋藤 経史, 大橋 弘; 稲作生産調整に関するシミュレーション分析: 転作およびソーラーシェアリングに関する政策効果, 経済産業研究所ディスカッションペーパー, 2015, pp.1-84.

齋藤ら<sup>[1.23]</sup>は、稲作生産調整を行った際のシミュレーション、具体的には需給均衡分析を行っている。生産調整に関わる政策を採用した際に生じる効果を検証しており、政策シナリオの1つとして、一定割合（全体の5%）の非稲作農家（畑、果樹園など）が営農型太陽光発電設備を導入した場合に、稲作農家に与える影響をシミュレーションで算出している。

論文中では、営農型太陽光発電という経済的なインセンティブを与えられた農業者は稲作面積を増加させることが指摘されている。また水稲作付面積の拡大は、水稲の単位面積あたりの生産費用および米価を低下させる。ここから営農型太陽光発電のような農地の利用形態を問わない、設置した農家の収入底上げに関する政策の有用性が提示されている。

しかし本修士論文の著者である本間が推測するに、日本全国を対象にした水稲の需給均衡分析を行うにあたって、2点の仮定-「電力の完全買取」・「収量の非減少性」-を設定していることが課題と思われる。前者は需給均衡分析の結果、営農型太陽光発電により得られた年間発電量が、日本全体で347億kWh存在するのだが、その全てを電力会社が買い取ることが可能という仮定をおいているのである。実際には太陽光発電が持つ供給不安定性のため、この規模の発電量は電力供給面から見て現実的ではない。後者は、営農型太陽光発電が遮光条件を人為的に設け、農作物が利用可能な全天日射量を減少させるため、減収と品質劣化による買取価格の下落が生じると考えられる。これら作物学的知見が需給均衡モデルに組み込まれていないため、営農型太陽光発電で実施されているシミュレーションに限り言及するならば、シミュレーション結果が現実から大きく乖離している可能性が高い。

⑥ 谷 晃, 管 敬, 坂見 拓也; 営農継続型太陽光発電におけるイネの生育と微気象環境, 2015 年生態工学会年次大会発表論文集, (2015), pp. 43-44.

谷ら<sup>[1.24]</sup>は2014年度に、静岡県内2ヶ所の水田(A, B)で実施された営農型太陽光発電設備下の微気象、ならびに水稲の生育状況を検討している。実験の詳細を記すと、微気象は光合成有効光量子密度(PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density)を半導体センサー



で、気温は T 字型熱電対を利用して計測している。収量調査は太陽光パネル下および太陽光パネル外の水稲を 3~4 ヶ所から、20 サンプル収集している。水田 A の面積は 983.1m<sup>2</sup> であり、太陽光パネルの投影率は 30% である。また水田 B の面積は 900m<sup>2</sup> であり、太陽光パネルの投影率は 34% である。太陽光パネルは単結晶シリコン性のパネルを使用しており、水田の上空にまばらに設置されている。

計測した微気象を分析した結果、太陽光パネル下の積算 PPFD は、太陽光パネル外の対照区と比較して 37~40% 少なかった。またサーマルカメラを利用して計測した植物群落の表面温度は、太陽光パネル下が対照区と比較して 3~4℃ ほど低かった。水稲の収量調査では、積算 PPFD が有意に 40% ほど少なかったのにも関わらず、精玄米重が対照区の 83~88% であった。比較的高収量が確保できた要因として散乱光の影響を述べており、散乱光を確保する重要性について指摘している。

⑦ **Tani, A., Shiina, S., Nakashima, K., Hayashi, M ; Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels, Journal of Agricultural Meteorology, 70 (2014) , pp. 139-149.**

谷ら<sup>[1,25]</sup>は温室上部に太陽光パネルを設置し、太陽光パネルの有無がレタスの生育に及ぼす影響について検討している。通常の太陽光パネルを設置した「遮光区」、太陽光パネルを設置しない「対照区」、太陽光パネルの設置に加え、散乱光を増加させる農業ハウス用外張りフィルムを糊着した「遮光・散乱光フィルム区」の 3 地点で、乾物量や成長速度を評価している。

3 地点での乾物量や成長速度を比較した結果、「遮光区<遮光・散乱フィルム区<対照区」の順に生育状況が改善した。この点については、フィルムの糊着により増幅された散乱光が植物群落下層部へ入射し、CO<sub>2</sub> の固定を促進させた可能性が大きいと、論文中で記述されている。以上から、温室の日照条件を改善する案として、散乱光を増加させるフィルムを利用することの有用性が提起されている。

本修士論文の著者である本間が推測するに、散乱光を増幅させるという、農作物が利用可能な全天日射量を増加させる措置は、野外で農作物を栽培する営農型太陽光発電にも適用可能な取り組みと考えられる。安価で長期的な効果が見込めることから、営農型太陽光発電に採用した場合の有用性は大きいと考えられる。

Table1.7：営農型太陽光発電の研究課題（日本の先行研究）

日本の先行研究から推察できる研究課題
① 農作物耐陰データの蓄積
② 太陽光パネル裏面温度の計測
③ 電力供給面を考慮した営農型太陽光発電の導入ポテンシャル評価.
④ 農業委員会の判断の拠り所となる基準，理論的裏付けの提示
⑤ 自然災害に対する構造物の脆弱性評価
⑥ 農林水産省が公表した見解の検討
⑦ 散乱光を増加させるフィルムを導入することによる収量・品質評価

以上が 2016 年 2 月までに日本で公表されている，営農型太陽光発電について検討した論文の概略である．これら論文を横断的に外観した結果，Table1.7 で示す 7 点の研究課題が存在していた．これら研究課題は，前節で指摘した海外の先行研究の課題とある程度重複していた．本節では，2016 年 2 月までに日本で公表された先行研究の概要を記述し，営農型太陽光発電の現状，研究課題，今後の展望について整理した．次節では前節並び本節で考察した内容を総合し，営農型太陽光発電の課題と研究の展望について検討する．

## 1.6 営農型太陽光発電の課題

前節と前々節では，海外・日本で公表された先行研究をまとめ，それぞれに指摘されている課題を整理した．重複している研究課題を集約した結果，8 点の研究課題を特定することができた．Table1.8 に営農型太陽光発電の研究課題を示す．

Table1.8：営農型太陽光発電の研究課題

海外・日本の先行研究から推察できる研究課題
① 作物モデルの低信頼性
② 品種差まで考慮した農作物耐陰性－気象条件と収量・品質の関係性－の評価。
③ 太陽光パネル設置による微気象変化（気温，葉温，地温，湿度，降水量，土壌含水量，全天日射量など）の計測
④ 農作物の有無が太陽光パネルへ与える影響（パネル表面・裏面温度の低下，発電量の増加，パネル劣化促進）の評価
⑤ 農林水産省が公表した見解（畦畔・法面での発電不可，限定された構造物の形状，収量・品質の基準）の検討
⑥ 農業委員会の判断の拠り所となる基準，理論的根拠の提示
⑦ 地理的差異を考慮した営農型太陽光発電ポテンシャルの推定
⑧ 散乱光を増加させるフィルムを導入することによる収量・品質への影響評価

これら 8 点の課題は，太陽光パネル下で栽培された農作物の収量・品質データ，ならびに微気象データの蓄積不足に起因している。

例えば，農作物耐陰性についての定量的な知見が十分に蓄積されていないために，遮光条件の影響を反映することのできる，高精度の作物モデルが開発されていない。そして遮光条件を考慮することができる高精度の作物モデルが開発されていないために，営農型太陽光発電設備を設置した場合の収量・品質予測が困難であり，営農型太陽光発電ポテンシャルの推定が実施できない状況にある。

また農作物耐陰性の基礎データが不足しているため，現状では，太陽光パネル下の収量・品質について見通しが立たない。そのために，農林水産省が制定した法的基準に科学的根拠が欠けている。例えば，営農型太陽光発電設備が単管パイプ（容易に撤去可能）などを利用した簡易な設置のみに義務づけられている点について考えてみる。これは設備の設置後，農作物の減収が「想定以上」に生じる場合を想定しているからこそ，その「想定以上」の減収に備え，設備の撤去が容易である，単管パイプでの設置に義務づけていると考えられる。ゆえに農作物耐陰性データが充実すれば，コンクリートや木材を利用した頑健な構造物の設置が許可される可能性もある。

加えて，農林水産省が農業委員会に対して設置認可基準を提示していないのは，遮光条件と収量・品質の関係性が不明瞭であるためであると推察できる。設置認可基準を制定できな

いために、農地一時転用許可の判断基準を含めて、農業委員会に全て委任していると考えられる。営農型太陽光発電設備の設置認可基準が存在しないため、農業委員会が容易に農地一時転用認可の判断を下すことができず、設置認可までに長期間を費やすという現状が生まれている。ゆえに農作物耐陰性の基礎的知見が充実するならば、農業委員会が判断の拠り所とすべき認可基準を制定し、設置認可上の課題を解決することができる。

このように現状の研究課題について検討してゆくと、営農型太陽光発電の研究課題は1点に集約される。つまり、太陽光パネルを設置することにより生じる遮光条件と微気象変化が、収量・品質に与える影響についての研究蓄積が不十分な点が、営農型太陽光発電の本質的な研究課題である。例えば水稲のライフサイクル全体を通した遮光条件が収量・品質に与える影響についての研究は、原田ら<sup>[1.26]</sup>と内田ら<sup>[1.27]</sup>で一部検討されているのみである。多くの農作物（コムギやトウモロコシなど）で、遮光は生育上必要な措置ではないので、遮光条件下における収量・品質の挙動について研究する必要性が薄く、農作物耐陰性の基礎的なデータ蓄積が行われてこなかったのであろう。以上の理由から、遮光条件を不可避的に生じさせる営農型太陽光発電を普及させてゆくためには、遮光条件と収量・品質の関係性についての、基礎的な知見を拡充していかねばならない。

次節では、現状で得られるかぎり収集した農作物耐陰性（光飽和点、遮光実験、アグロフォレストリー）の学術的な知見をまとめ（穀物は別途、第2章で説明）、本節で述べた農作物耐陰性の研究蓄積不足を裏付けてゆく。

## 1.7 農作物耐陰性の研究状況

### 1.7.1 光飽和点

光条件と植物生育状況の関係性については、一般的に光飽和点を言及することが多い。光飽和点とは、ある一定以上の光量では植物の光合成速度が飽和するという、植物生理学の知見である。Figure1.4 からわかるよう、光量増加に伴い、光合成速度の飽和が早期に生じる植物を「強耐陰性」と定義し、逆に飽和しにくい植物を「弱耐陰性」と定義している。言い換えると、強耐陰性の農作物は弱光でも十分に生育量が保たれるため、光量を増加させても生育量は増加しない。弱耐陰性の農作物は、光を与えれば与えるほど生育量が増加する。

Table1.9 は複数の文献から引用してきた農作物の光飽和点である。表からわかるように、ミョウガやレタスは耐陰性が強く、スイカやトマトは耐陰性が弱い。これは光飽和点の違いを表す例であろう。Table1.9 以外の農作物について計測した光飽和点は、先行研究の概要をまとめた論文末の「付録A」を参照されたい。

さて、光条件と植物生育量の指標としての光飽和点であるが、営農型太陽光発電の根拠として使用するには、3点の問題がある。

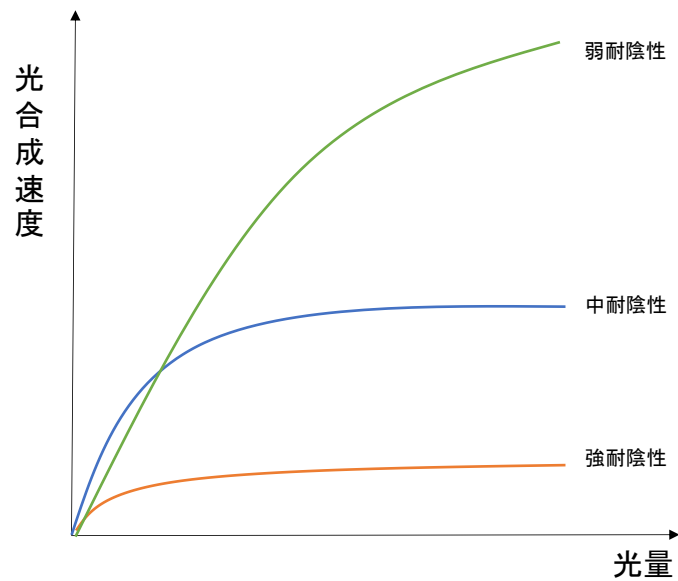


Figure1.4 : 光飽和点のイメージ

Table1.9 : 野菜の光飽和点

野菜の種類	光飽和点 [klx]	参考文献
サトイモ	80	農業技術大系 野菜編 10 <sup>[1.28]</sup>
スイカ	80	農業技術大系 野菜編 2 <sup>[1.29]</sup>
トマト	70	有機土壌協会 有機栽培技術の手引〔果菜類編〕 <sup>[1.30]</sup>
キュウリ	40-60	農業技術大系 野菜編 1 <sup>[1.31]</sup>
セルリー	45	農業技術大系 野菜編 6 <sup>[1.32]</sup>
エンドウ	40	農業技術大系 野菜編 10 <sup>[1.28]</sup>
キャベツ	40	有機土壌協会 有機栽培技術の手引〔葉菜類等編〕 <sup>[1.33]</sup>
ハクサイ	40	巽ら <sup>[1.34]</sup>
ナス	40	農業技術大系 野菜編 5 <sup>[1.35]</sup>
トウガラシ	30	巽ら <sup>[1.34]</sup>
インゲンマメ	25	農業技術大系 野菜編 10 <sup>[1.28]</sup>
レタス	25	農業技術大系 野菜編 6 <sup>[1.32]</sup>
ミツバ	20	巽ら <sup>[1.34]</sup>
ミョウガ	20	巽ら <sup>[1.34]</sup>
フキ	20	巽ら <sup>[1.34]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

1 点目は、光飽和点が光条件とバイオマス量の関係性について検討した研究成果であり、光条件と収量の関係性について検討した研究ではないという点である。ここで述べるバイオマス量の定義は、「可食部と非可食部を含めた総重量」であって、収量の定義は「可食部と非可食部を含めた総重量の内、可食部が占める重量」である。この定義からわかるように、バイオマス量の増減は必ずしも、それに伴った収量の増減を意味しない。

光飽和点の対象は光条件と収量の関係性ではなく、光条件とバイオマス量の関係性である。ゆえに農作物の収量・品質を最終評価基準とする営農型太陽光発電では、光飽和点の適用は難しいと考えられる。

2 点目は、光飽和点が時系列で変化する植物の光感応性を検討出来ていないという点である。農作物は栄養生長期、花芽形成期、生殖生長期で異なる光感応性を示す。例えばコンニャクの各生育段階における光飽和点を算出した三浦ら<sup>[1.36]</sup>を参照すると、開葉直後の光飽和点は 20klx、開葉から 1 ヶ月後以降、2 ヶ月未満では 40~50klx、開葉から 2 ヶ月以降は 20klx であった。このように光飽和点の値は各生育段階で異なっている。そのため営農型太陽光発電では、光感応性の時系列変化の一部のみを抜き出し、定量化した光飽和点ではなく、それぞれの生育段階における光条件と農作物の生育状況について検討した研究成果を参考としなければいけない。

3 点目は、光量計測で使用する単位が統一されていない点である。植物の光合成は、クロロフィルが吸収できる 400 nm から 700 nm までの波長領域の、単位面積・単位時間あたりに降り注ぐ光子の数、すなわち光合成有効光量子束密度 (PPFD : Photosynthetic Photon Flux Density) に起因している。ゆえに光飽和点は、PPFD が計測可能な PPFD 計を利用して計測すべきである。しかし Table1.9 からわかるように、現状では光飽和点の計測で、PPFD の代わりに用いられている単位は照度 (lx) である。

照度とは、ヒトが明るいと感じる緑色の波長領域 (550nm) を多めに見積もるという比視感度曲線を利用し、補正することで算出された値である。言い換えると、照度では植物の生育に必要な波長領域 (400 nm から 700 nm) が少なく見積もられている。この点についてのイメージが Figure1.5 である。以上の理由から、照度で植物に対する影響を判断することは非常に難しい。仮に照度を利用して光飽和点を計測したとしても、太陽光と照度は変換が困難であるため、照度を利用して得られた植物の生育状況と光量の関係式、つまり光飽和点の信頼性が野外では担保できない恐れがある。

以上 3 点の理由から、営農型太陽光発電では「光飽和点」という農作物耐陰性の研究蓄積を利用することは困難である。次節では農作物の遮光実験についての研究成果を紹介し、営農型太陽光発電の理論的基礎となる、農作物耐陰性の知見についての検討を引き続き行う。

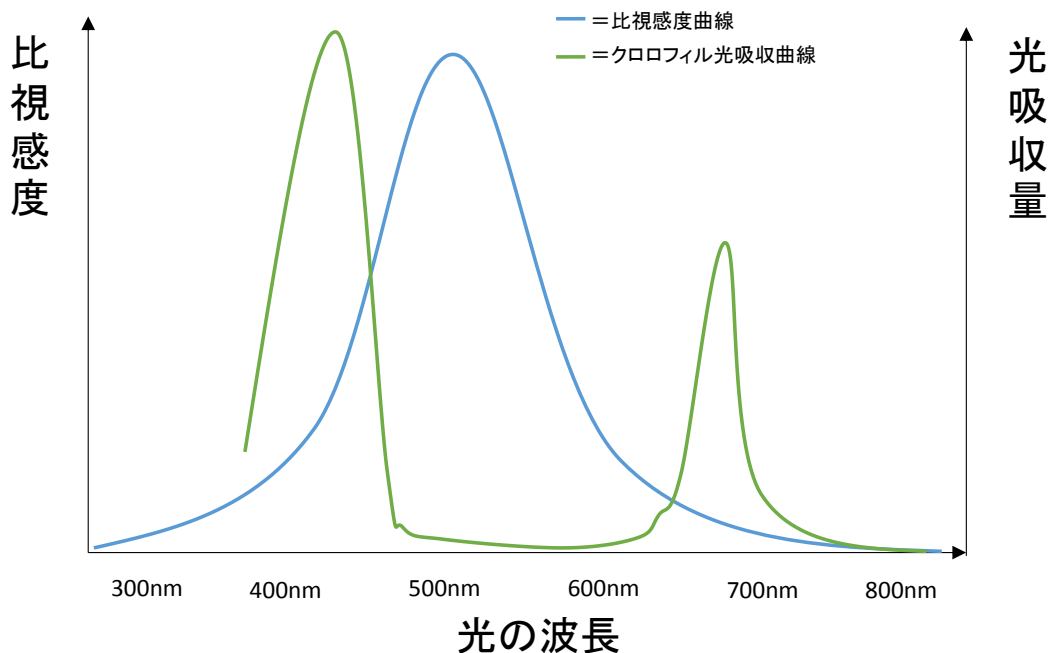


Figure1.5：各波長領域での照度重み付け係数  
並びにクロロフィル光吸収量のイメージ

### 1.7.2 遮光実験

遮光実験を行い、日照条件と農作物の生育状況について検討した研究を紹介する。遮光条件と農作物の収量・品質を、遮光実験を実施することにより検討した先行論文を収集し、多年生農作物と1年生農作物、薬用作物の3パターンに分類した。多年生農作物、1年生農作物、薬用作物のそれぞれで実施された遮光実験の概要と結果は、論文末の「付録B」に掲載するので参照されたい。

付録Bから、多くの農作物（多年生農作物・1年生農作物・薬用作物を問わない）で実施された遮光実験は、一時的な遮光条件下で行われていることがわかる。その中でも生育初期、もしくは生育後期に一時的な遮光条件を生じさせ、収量の変動や品質劣化、含有成分の増減について検討した先行研究が多数を占めている。このように、非常に限られた条件下でのみ、農作物耐陰性の実証研究が行われてきた。

ゆえに1年間を通じて遮光条件を作り出す営農型太陽光発電では、これらの知見を利用することが難しい。遮光条件は、栄養成長期、花芽形成期、生殖成長期というライフサイクル全体の生育に、それぞれ異なる影響を与える可能性が考えられるためである。

また多年生農作物では、前年に実施した遮光実験が、翌年の収量・品質に影響をあたえる可能性も指摘されている<sup>[1.37][1.38]</sup>。ゆえに、複数年にわたる遮光条件を前提条件とする営農

型太陽光発電では、一時的に、多年生農作物で実施した遮光実験の知見を利用することが困難である。

以上から、遮光実験により明らかにされた農作物耐陰性の知見の大部分は、営農型太陽光発電ではそのまま利用することが難しいことが明らかになった。

次節では視点を海外に移し、恒常的な遮光条件の下で農作物の栽培を行うアグロフォレストリーの調査結果を紹介する。アグロフォレストリーの研究蓄積を、営農型太陽光発電に活用する手段を模索してゆく。

### 1.7.3 アグロフォレストリー

アグロフォレストリーとは、まず多年生樹木を植栽し、その樹木の下部に1年生農作物を栽培させる手法である。この手法では多年生樹木、1年生農作物の両方から農作物を収穫できる。温帯地方では実証実験として導入され始めているが、現状では主に熱帯・亜熱帯地域で広く普及している。栽培する1年生農作物はコーヒー、茶、ココナッツ、コショウなどであり、多年生樹木もゴムやポプラなど、それぞれ多岐に渡る。

アグロフォレストリーの写真が Figure1.6 である。Figure1.6 はフランスで実施されている小麦とポプラによるアグロフォレストリーの実証試験場である。このように、アグロフォレストリーでは樹木による遮光条件が恒常的に生じる。ゆえにアグロフォレストリーに適した農作物は、営農型太陽光発電に適した、耐陰性の強い農作物である可能性が高い。

しかし熱帯・亜熱帯地方と温帯地方とでは、緯度や経度などの違いから気象条件が大きく異なる。そのため、緯度が異なる地域間では、農作物の日長感応性や温度感応性といった植物生理的な作用に差異が生じている。ゆえに、熱帯地方で栽培されている農作物を温帯地方に属する日本で栽培するのは非常に困難である。例えば、Figure1.7 の Simmons 線からわかるように、沖縄県で栽培されているバナナを東北地方で栽培することは非常に困難である。このように、低緯度地域から高緯度地域への農作物の移植は難しい。逆もまた然りである。





Figure1.6 : アグロフォレストリーの写真  
(出典) E. Malézieux et al.<sup>[1.39]</sup>.

以上の理由から、アグロフォレストリーに代表される強耐陰性の農作物は 카카오, コーヒー, コショウなど数多く存在するが、温帯地方である日本ではこれらの作物を栽培することは難しいと考えられる。

熱帯地方で栽培されている強耐陰性の農作物をそのまま熱帯・亜熱帯地方で栽培し、多年生農作物の代替として太陽光パネルを設置する。このように、熱帯・亜熱帯地方で営農型太陽光発電を実施するのならば現実的である。しかし、熱帯地方で栽培されている強耐陰性の農作物を日本で栽培し、かつ営農型太陽光発電設備を導入するという状況は現実的ではないと言えよう。以上の理由から、熱帯・亜熱帯地方で蓄積されたアグロフォレストリーの知見を、温帯地方に属する日本の営農型太陽光発電に役立てることは難しいと考えられる。

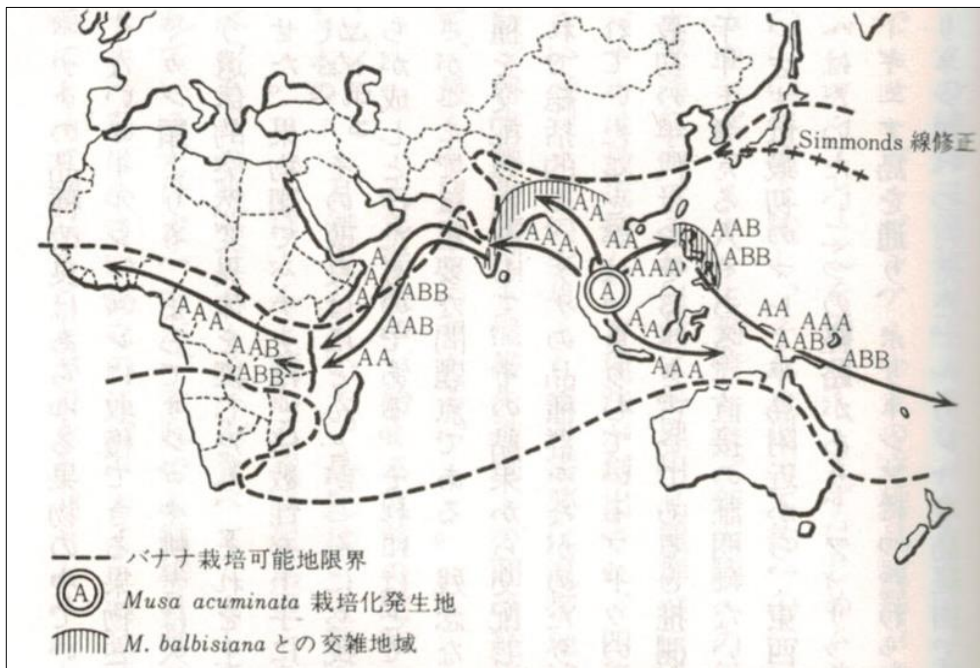


Figure1.7 : バナナの栽培可能限界

(出典) 中尾<sup>[1.40]</sup>

#### 1.7.4 まとめ

1.7.1 で記述したように、光飽和点は耐陰性の強弱を判断する極めて有用な指標であるが、営農型太陽光発電の場合については、既に述べた課題がある限り有用な指標とはなりえない。同様に 1.7.2 では、従来の遮光実験は、一時的な遮光条件のみを対象とした研究が多いため、通年の遮光条件を想定している営農型太陽光発電にとってそのまま直接的に有効な知見になりえない。また 1.7.3 で記述したよう、アグロフォレストリーで栽培されている農作物は、低緯度地帯である熱帯・亜熱帯地方の気象条件に適しており、日本では栽培が困難である作物が多い。ゆえに温帯地方に属する日本では、アグロフォレストリーでの研究蓄積を活用することが難しい。

このように、農作物耐陰性の知見は幅広く存在するが、営農型太陽光発電で直接的に活用できる研究蓄積はほとんど存在しないことが示された。営農型太陽光発電の導入を拡大してゆくためには、1.6 で指摘した農作物耐陰性の基礎的な知見を充実してゆくことが求められる。

## 1.8 研究の目的

以上の背景から、本研究では2つの目的を設定する。

第1の目的は、遮光条件下での水稻の生育を実地で計測し、水稻生育に関する基礎データの拡充を図ると共に、気候条件の下で水稻の収量・品質を推定するモデルを、計測結果を反映することにより開発することである。Figure1.8とFigure1.9は、千葉県酒々井町の実証サイトで撮影した、2015年5月と7月時点における風景である。数多く存在する農作物の中で、水稻を実証試験の対象作物とした理由が3点存在するため、以下に述べる。

第1の理由は、水稻栽培時に灌漑用水を引き入れることで、湛水状態を維持したまま生育が行えるためである。栽培時に湛水するため、1.6で述べた課題の1つである、営農型太陽光発電設備がもたらす微気象変化、具体的には地温低下ならびに土壤への降水パターンの偏在が生じにくいと仮定できる。第2の理由は、稲が多年生植物ではなく1年生植物であるため、1.7.2で指摘した、前年の遮光条件が翌年の収量・品質に影響を生じないと考えられるためである。第3の理由は、水稻栽培面積が国土の約5%（245万haほど）を占めているため、水稻生育データの蓄積と営農型太陽光発電への実装が、実社会に与えるインパクトが大きいと考えられるためである。以上3点の理由から、本研究では水稻を実証試験での対象作物として選定した。



Figure1.8 : 本研究で使用した実証試験場の風景（5月）

（出典）株式会社スマートブルー，千葉県大塚様，稲作ソーラーシェアリング完工！[1.41]



Figure1.9 : 本研究で使用した実証試験場の風景（7月）

第2の目的は、開発するモデルを用いて営農型太陽光発電のシミュレーションを実施し、遮光条件下での収量増減や品質劣化を検討することで、農林水産省が公表している見解の妥当性を検討することである。例えば「収量8割以上で、著しい品質劣化が生じていない」という農林水産省が公表した設置継続条件についての見解を検証することで、設置者の経済的なリスクを減らすことができる。このように設置希望者の経済的に不確実なリスクを軽減させることで、営農型太陽光発電の普及に寄与できると考えられる。言い換えるならば、営農型太陽光発電の法整備に理論的根拠を与えることが、本研究の第2の目的である。

### 1.9 本論文の構成

第1章では序論として、日本のエネルギー事情、営農型太陽光発電の先行研究、ならびに農作物耐陰性の先行研究の概略についてまとめ、今後の研究課題ならびに研究展望について考察した。

第2章では本研究の対象農作物である水稻の基礎知識を共有し、水稻気象感応性の知見を集約すると共に、これまでに開発されてきた水稻収量・品質予測モデルの説明を行う。これは、本研究の目的である水稻耐陰性データの拡充を図るためには、前提条件として水稻栽培の基礎知識ならびに気象感応性の知見を共有する必要があるためである。同様に水稻収量・品質予測モデルの開発を行うためには、現在までに開発されてきた水稻収量・品質モデルの構造や問題点について検討する必要がある。

第 3 章では千葉県酒々井町で実施した実証試験の概要を紹介し、実証試験で得られた気象データ、水稻生育データ、水稻外観品質データの解析を行う。第 3 章で水稻耐陰性と計測した各気象要素の関係性について検討を行い、第 4 章で実施する水稻生育モデル改良のための知見を導出する。

第 4 章では本研究で使用する水稻生育モデルに、第 3 章の実証試験で得られた水稻耐陰性の知見を組み合わせ、水稻生育モデルを改良する。営農型太陽光発電のシミュレーションを実施するために必要な水稻生育モデルの各種設定も第 4 章で行う。

第 5 章では、まず全天日射量から太陽光パネルの発電量を推定する発電量予測モデルの解説を行う。その後、第 4 章で改良した水稻生育モデルと、発電量予測モデルを結合させることで、営農型太陽光発電のシミュレーションを実施する。

第 6 章では第 1 章から第 5 章までの内容から得られる知見を総合し、結論を述べる。その後、本研究の課題と今後の展望について考察し、本研究の締めくくりとする。

#### 1.10 参考文献

- [1.1] 友川 晃太;2015 年度の電源構成について —震災以降,2014 年度上期の発電電力量を踏まえて—, 日本エネルギー経済研究所, 2015,  
<http://eneken.iecej.or.jp/data/5938.pdf>
- [1.2] 経済産業省;長期エネルギー需給見通し骨子(案), 2015,  
[http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/mitoshi/008/pdf/008\\_07.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/008/pdf/008_07.pdf)
- [1.3] 経済産業省;再生可能エネルギー発電設備の導入状況を公表します, 2014,  
<http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140617003/20140617003.html>
- [1.4] 環境省;再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書 第 4 章 風力発電の賦存量および導入ポテンシャル, 2011,  
<http://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/chpt4.pdf>
- [1.5] 環境省;再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書 第 6 章 地熱発電の賦存量および導入ポテンシャル, 2011,  
<http://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/chpt6.pdf>
- [1.6] T. Kinoshita, T. Ohki, Y. Yamagata; Woody biomass supply potential for thermal power plants in Japan, *Applied Energy*, 87 (2010), pp. 2923–2927.
- [1.7] 環境省;再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書 第 3 章 太陽光発電の導入ポテンシャル, 2011,  
<http://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/chpt3.pdf>

- [1.8] Heaton EA, Flavell RB, Mascia PN, Thomas SR, Dohleman FG, Long SP ;  
Herbaceous energy crop development: recent progress and future prospects,  
Current Opinion in Biotechnology, 19 (), pp. 202–209.
- [1.9] 農林水産省; 支柱を立てて営農を継続する太陽光発電設備等についての農地転用許可  
制度上の取扱いについて, 2014,  
<http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/noukei/pdf/130401-01.pdf>
- [1.10] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, Y. Ferard ; Combining solar  
photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic  
schemes, Renewable Energy, 36 (2011), pp. 2725–2732.
- [1.11] M. Beck, G. Bopp, A. Goetzberger, T. Oberfell, C. Reise, S. Schindele ; Combining PV  
and Food Crops to Agrophotovoltaic – Optimization of Orientation and Harvest, 27th  
European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2012, pp. 4096–4100.
- [1.12] 農林水産省; 農地転用許可制度,  
[http://www.maff.go.jp/j/nousin/noukei/totiriyo/t\\_tenyoy/](http://www.maff.go.jp/j/nousin/noukei/totiriyo/t_tenyoy/)
- [1.13] 農林水産省; 支柱を立てて営農を継続する太陽光発電設備等についての農地転用許可  
制度上の取扱いについて,  
<http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/noukei/130401.html>
- [1.14] Resilience.org; Agrivoltism, 2014,  
<http://www.resilience.org/stories/2014-07-17/agrivoltism>
- [1.15] H. Marrou, L. Guillioni, L. Dufour, C. Dupraz, J. Wery ; Microclimate under agrivoltaic  
systems: is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?, Agricultural  
and Forest Meteorology, 177 (2013), pp. 117–132.
- [1.16] H. Marrou, L. Dufour, J. Wery ; How does a shelter of solar panels influence water flows in  
a soil–crop system?, Agricultural and Forest Meteorology, 50 (2013), pp. 38–51.
- [1.17] H. Marrou, J. Wery, L. Dufour, C. Dupraz ; Productivity and radiation use efficiency of  
lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels, European Journal of  
Agronomy, 44 (2013), pp. 54–66.
- [1.18] M Dinesh, Harshavardhan, and Joshua M. Pearce ; The potential of agrivoltaic systems,  
Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54 (2016), pp. 299–308.
- [1.19] 馬上 文司; 農山漁村再生可能エネルギー法とソーラーシェアリング型太陽光発電事業  
による国内農業活性化への展望, 千葉大学人文社会科学研究 , 29 (2014), pp.41–56.
- [1.20] 北風 亮, 小野田 真二, 廣瀬 勝之, 大平 佳男; ソーラーシェアリングの知見・課題の  
整理と事業化モデル構築に関する研究～南相馬市を含む先進地域の取組みを事例に  
～, 生協総研賞・第11回助成事業論文報告会, 2015, pp. 105–121.
- [1.21] 菊池 佐智子, 輿水 肇; 電力量と芝草の成長解析によるソーラーシェアリングの環境条  
件, ランドスケープ研究 77(2014), pp. 669–672.

- [1.22] 中山 弘, 大門 信也;南相馬市における「ソーラーシェアリング」のとりくみ : 震災からの歩みを中心に, サステナビリティ研究, 4(2014), pp. 17-25.
- [1.23] 齋藤 経史, 大橋 弘;稲作生産調整に関するシミュレーション分析: 転作およびソーラーシェアリングに関する政策効果, 経済産業研究所ディスカッションペーパー, 2015, pp.1-84.
- [1.24] 谷 晃, 管 敬, 坂見 拓也;営農継続型太陽光発電におけるイネの生育と微気象環境, 2015 年生態工学会年次大会発表論文集, (2015), pp. 43-44.
- [1.25] Tani A, Shiina S, Nakashima K, Hayashi M;Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels, Journal of Agricultural Meteorology, 70(2014), pp. 139-149.
- [1.26] 原田 皓二, 鐘江 寛;構築物の日陰による日照時間の減少が水稻の生育に及ぼす影響, 日本作物学会九州支部会報, 49(1982), pp. 33-36.
- [1.27] 内田 敏夫, 和田 士郎, 井上 浩一郎;構築物の投影が水稻の生育収量に及ぼす影響, 山口県農業試験場研究報告, 35(1983), p1-11.
- [1.28] 農文協; 農業技術大系 野菜編 10
- [1.29] 農文協; 農業技術大系 野菜編 2
- [1.30] 有機土壌協会;有機栽培技術の手引〔果菜類編〕,  
[http://www.japan-soil.net/report/h25tebiki\\_03.pdf](http://www.japan-soil.net/report/h25tebiki_03.pdf)
- [1.31] 農文協; 農業技術大系 野菜編 1
- [1.32] 農文協; 農業技術大系 野菜編 6
- [1.33] 有機土壌協会;有機栽培技術の手引〔葉菜類編〕,  
[http://www.japan-soil.net/report/h22tebiki\\_03.pdf](http://www.japan-soil.net/report/h22tebiki_03.pdf)
- [1.34] 巽 穰;そ菜の光合成に関する研究-1-光の強さとそ菜幼植物の同化特性, 園芸試験場報告 A 平塚, 8(1969), pp. 127-140.
- [1.35] 農文協; 農業技術大系 野菜編 5
- [1.36] 三浦 邦夫, 長田 明夫;Effect of shading on photosynthesis, respiration, leaf area and corm weight in konjak plants. (Amorphophallus konjac K. Koch), 日本作物学会紀事, 50(1981), pp. 553-559.
- [1.37] 松浦 克彦, 荒木 斉;遮光がイチジク“柵井ドフィン”の樹体生長,着果,収量および果実品質に及ぼす影響, 兵庫県農業技術センター研究報告 農業編, 43(1995), pp. 21-26.
- [1.38] 松浦 克彦, 荒木 斉;イチジク“柵井ドフィン”に対する前年の遮光が本年の生育,着果,果実品質および収量に及ぼす影響, 兵庫県農業技術センター研究報告 農業編, 44(1996), pp. 61-64.
- [1.39] E. Malézieux, Y. Crozat, C. Dupraz, M. Laurans, D. Makowski, H. Ozier-Lafontaine, B. Rapidel, S. de Tourdonnet, M. Valantin-Morison; Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models: a review, Agronomy for Sustainable Development, 29(2009), pp. 43-62.

- [1.40] 中尾佐助;栽培植物と農耕の起源, 岩波新書 青版 G-103, 1966, pp. 25.
- [1.41] 株式会社スマートブルー;千葉県大塚様,稲作ソーラーシェアリング完工!, 2015,  
<http://smartblue.jp/2015/05/>



## 2 水稲生育状況のモデル化

### 2.1 水稲栽培の概略

水稲生育状況のモデル化について考察するためには、その前提として水稲の生理学的知見や、水稲の栽培手法を知らなければならない。ゆえに本節では水稲栽培手法や基礎知識について記述する。なお稲作の流れについて直感的な理解を得るために、水稲生育状況についてまとめた Figure2.1 を紹介する。本節で述べる水稲栽培手法は、水稲栽培の基礎知識<sup>[2.1]</sup>を参考にした。また陸稲は作付面積がきわめて少なく、稲作の主流ではないため、本節では説明を省略する。

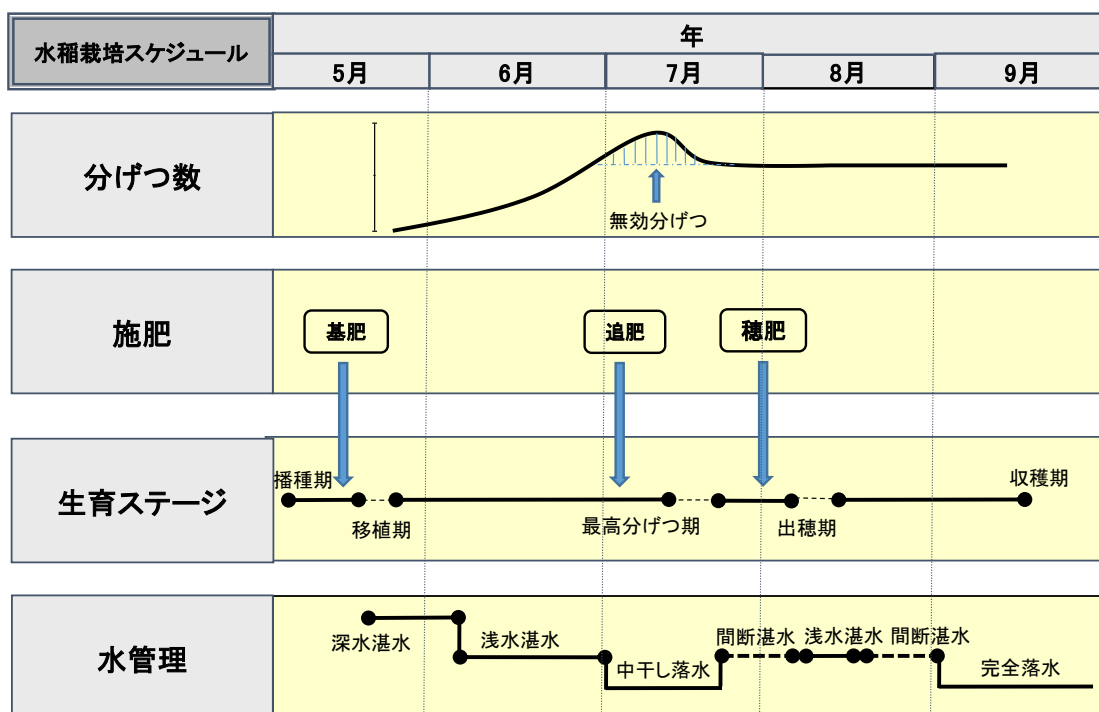


Figure2.1：一般的な水稲栽培スケジュール

(出典) 農林水産省，水稲栽培方針<sup>[2.2]</sup>

#### 2.1.1 移植日の栽培管理

水稲栽培では、塩水選（比重の軽い籾を取り除く作業）を行った種籾（種としてまく目的で保存しておく籾）を育苗箱で生育させ、稚苗にまで生育させた後に、田植え機により水田に移植する。

移植後の稲は根が土壌に根付いていなく、低温や病気に対して非常に弱い。そのため深水管理を行うことで夜間の低温を避け、稚苗の根を活着させる。活着後は水深を 2cm ほどの浅水に切り替え浅水処理を施すことで、水温及び地温の上昇を図り、発根を促進させる。

活着した稚苗は生育を続け、やがて稲の根本から新芽が伸びて枝分かれが生じるが、この分岐した茎を「分げつ」という。分げつとは、稲の根元付近から新芽が伸びて枝分かれする水稲の生育現象であり、分げつが行われる時期を「有効分げつ期」、分げつが最も盛んに行われる時期を「最高分げつ期」という。最高分げつ期に入るまでは、浅水のまま湛水状態を継続する。

### 2.1.2 有効分げつ期の栽培管理

有効分げつ期に発生した茎の内、栄養条件等が良好な茎だけが「穂」になるため、有効分げつ期の栽培管理はきわめて重要である。それは、過剰な分げつや過繁茂は受光態勢を悪化させ、下葉枯れを進めて根の活力を低下させることで無効分げつ（分げつ後、穂まで成長しない茎）を増加させるためである。

ゆえに無効分げつを抑制するために、目標とする分げつ数の80%を確保した後、有効分げつ期の後期には水田を乾かす「中干し」を行い、無効分げつ数を最小化させる措置をとる。中干しを行うことにより稲の窒素吸収を抑制し、一時的な地温上昇を生じさせることで、無効分げつの発生が抑制できるためである。中干しは出穂日の1ヶ月前までに行い、中干し後は湛水・落水状態を数日単位で繰り返す間断湛水を行う。

### 2.1.3 出穂日前後の栽培管理

出穂前後の栽培管理は穂肥と水管理が主になる。穂肥とは出穂前に実施する施肥であり、穂数決定の阻害要因の1つである栄養不足を解消するための栽培管理である。なお穂肥の施用日は品種により違いがあるが、一般的には出穂日（稲から穂の出る時期）20日前と10日前の、計2回実施する。出穂後の登熟期間（葉茎で蓄えた栄養を穂に送り、穂実を充実させる期間。一般的に出穂日から40日前後）は栄養分を水に溶解して穂に運ぶため、非常に多くの水分を必要とする。そのため出穂直後の10日は浅水管理を行う。その後は間断湛水を行い、十分な水分量を維持する。

### 2.1.4 収穫日前後の栽培管理

登熟後半の栽培管理は水管理に尽きる。玄米は登熟前期に長さを伸ばし、登熟後期に厚みを増やす特性があるため、早期に完全落水すると米の厚みが薄く、品質劣化が著しい米となる。ゆえに完全落水の時期を見誤らないよう、落水の時期を見計らいつつ、出穂後約30日後あたりから水を完全に落水させ、収穫に備える。収穫後は籾水分が高いため、乾燥させることで籾の変質を防ぎ、良質の籾を保存する。

以上が移植から収穫までの水稲栽培管理になる。

## 2.2 水稻生育に影響を与える因子

前節で述べた水稻栽培管理を実施することにより，栽培管理を行わない場合と比較してかなりの高収量を確保できる．このように水稻栽培手法は一般化されている一方で，栽培品種は同一でも都道府県別で出穂日と収穫日が異なり，なおかつ収量・品質には大きな差が生じて

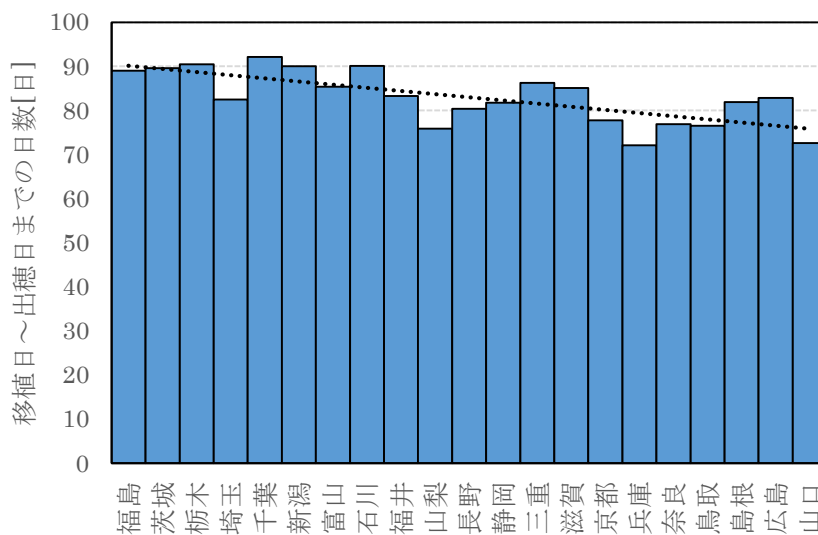


Figure2.2 : 2004~2009年までに各府県で公表された  
 栄養成長期間の平均値  
 (出典) 農林水産省, 作物統計<sup>[2.3]</sup>

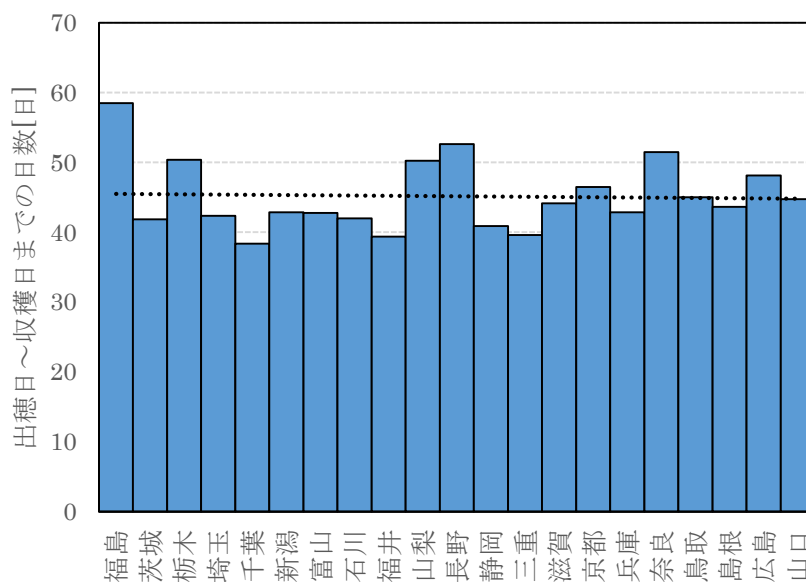


Figure2.3 : 2004~2009年までに各府県で公表された  
 生殖成長期間の平均値  
 (出典) 農林水産省, 作物統計<sup>[2.3]</sup>

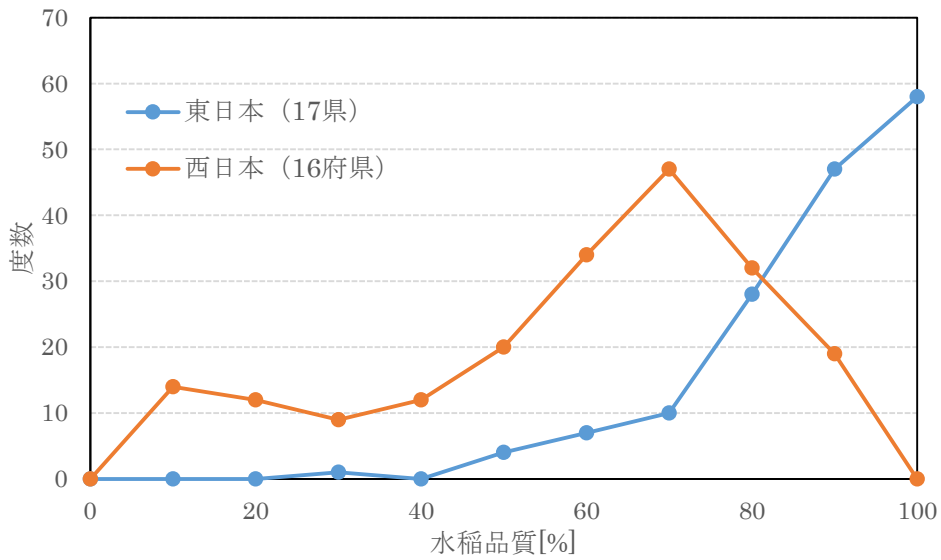


Figure2.4 : 2004~2009年までに各府県で公表された  
水稲品質データのヒストグラム  
(出典) 農林水産省, 米の検査結果<sup>[2.4]</sup>

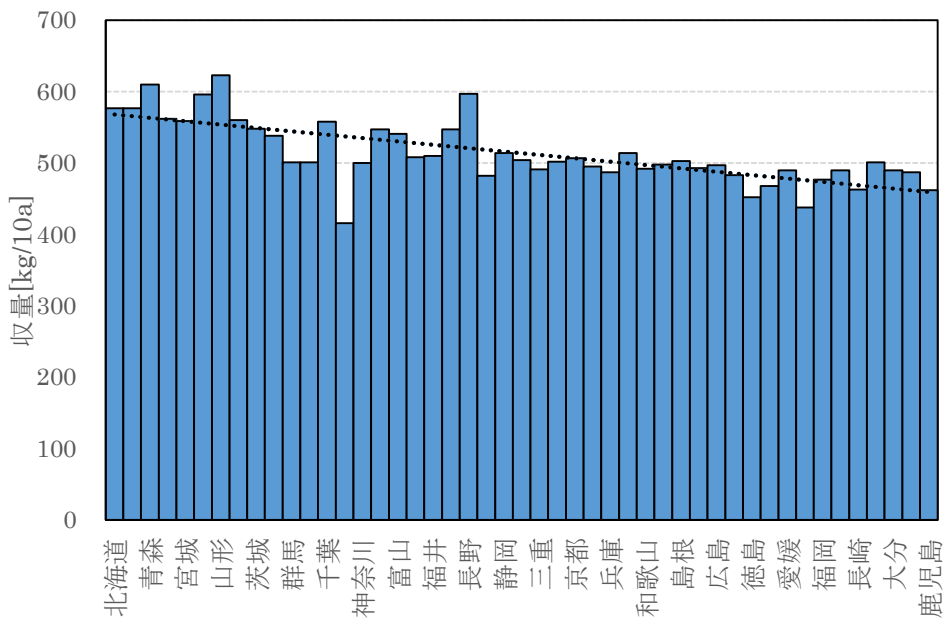


Figure2.5 : 2004~2009年までに各府県で公表された  
水稲収量の平均値  
(出典) 農林水産省, 作物統計<sup>[2.3]</sup>

いる一例えば東北地方では高品質米の割合が多く、西南地方では高品質米の割合が少ない。各地域の移植日から出穂日までに費やした総日数の平均値を Figure2.2, 出穂日から収穫日までに費やした総日数の平均値を Figure2.3 に示す。また東日本で収穫された水稲の品質

と西日本で収穫された水稲品質のヒストグラムを Figure2.4 に示す。これら水稲の品種はコシヒカリである。

Figure2.2, Figure2.3, Figure2.4 から、コシヒカリという同一品種を栽培しているにも関わらず、水稲の生育状況や品質が栽培地点で変化するということがわかる。2015 年に公表された水稲収量の、各県ごとの数値である Figure2.5 から、日本の西南地方は東北地方と比較して、収量が少ないことがわかる。

可能性として考えられる要因は、緯度と経度により決定される気候の差異、そして土地による栽培手法の違いである。前者の気候の差異を「気象要因」と総称する。気象要因による農業被害は、例えば冷害、高温障害、日照障害による減収や品質劣化が考えられる。また後者の栽培手法の差異を「人為要因」と総称する。人為要因は灌漑、栽培品種、施肥などが考えられ、これらマネジメントの差異が、収量の多寡や品質の良否に影響を与えうる。このように、気象要因と人為要因により、水稲の生育状況、収量の多寡、品質の良否が説明できると考えられる。以上から本節では、前節で説明した水稲栽培管理を踏まえた上で、水稲生育を支配し、収量・品質に影響を及ぼす気象要因と人為要因について考察を加える。

## 2.2.1 気象要因

本節で説明する収量を左右する気象要因は、温度、全天日射量、そして気象災害である。湿度や風速、水蒸気圧といった気象要因は収量への影響が小さいと考えられるため、本節では対象範囲とはしない。

### 2.2.1.1 気温

気温と水稲生育状況について検討した研究は数多い。以下では、過去に検討されてきた水稲の気温感応性についての知見を記述してゆく。

水稲の栄養生長期では、稲の生育は温度に対して比例関係を示し、適温以上であればあるほど、発育・成長が早くなる。このため前節で掲載した Figure2.2 からわかるよう、西南地方では移植日から出穂日までの日数が東北地方と比較して少ないのである。また Table2.1 からわかるように、出芽から分けつまでの栄養生長期では、水稲が生育可能な高温と低温の差、つまり限界温度の幅が極めて大きい。そのため、霜がおりない限りは生育を続ける。

一方、幼穂形成から登熟までの生殖生長期は限界温度の幅が狭く、高低温に対して非常に脆弱である。例えば、幼穂形成から登熟までの生殖生長期に襲撃する高温条件は、減収や品質劣化を生じさせる。この高温条件が引き起こす現象は、一般的に高温障害と呼称されている。稲が開花時に高温にさらされると、水稲の葯が開かなくなり、結果として受粉が不安定になるのである。この稔実不稔により生じる減収が、高温障害の主な被害である。また出穂後の高温状態が継続すると、乳白米発生率と蛋白質含有率の上昇による品質劣化が生じ

Table2.1 : 各生育段階の限界温度

生育段階	限界温度(°C)		
	低温	高温	適温
発芽	10	45	20~35
出芽と苗立	12~13	35	25~35
出根	16	35	25~28
葉伸長	7~12	45	31
分けつ	9~16	33	25~31
幼穂形成	15	—	—
開花	22	35	30~33
登熟	12~18	30	20~25

(出典) Yoshida [2.5]

ることが知られている。

逆に水稻生育期間の極端な低温条件は低温障害、いわゆる冷害を引き起こす。冷害には遅延型冷害と障害型冷害が存在する。前者の遅延型冷害は、栄養成長期の低温条件により生じる出穂遅延のため、登熟期が秋冷にさしかかることにより引き起こされる被害である。遅延型冷害の主な被害は登熟不全である。この遅延性冷害の存在は、水稻のライフステージ決定に気温が及ぼす影響の大きさを示唆している。後者の障害型冷害は、幼穂形成と開花という低温部の限界温度が 15°C から 20°C と極めて高い時期に、一時的な冷温が来襲することにより引き起こされる。障害型冷害の主な被害は、稔実不稔が原因で生じる減収である。高温障害の場合と同様に、開花時に低温にさらされると、水稻の葯が開かなくなり、結果として受粉が不安定になるのである。また出穂後に低温状態が継続すると登熟が進まず、米粒外観形質の悪化による品質劣化も発生する。

以上述べてきたように、低高温が稲の生育に及ぼす影響は、栄養生長期と花芽形成期、そして生殖成長期で異なる。生育の後半になると気温条件が水稻収量・品質に与える影響は大きくなる。まとめると、出穂以降の極端な高温・低温条件は稔実不稔を引き起こすため、登熟期に生育可能な稔数を減少させる。加えて、生育後期の高温・低温条件は登熟が阻害するため、水稻品質を劣化させる。

### 2.2.1.2 全天日射量

全天日射量が根から葉を含めた重量である「バイオマス量」を決定している点については一般的に知られている。一方、全天日射量の収量への影響が、水稻の生育段階に応じて異なる点については明らかではない。これは、気温条件と水稻生育状況についての緻密な研究蓄積が存在しているのに対し、日照条件と水稻生育状況については研究蓄積が乏しく、統一し

た見解が定まっていないためである。ゆえに、以下では日照条件と水稻生育状況について実証実験を実施した先行論文を収集し、生育初期と生育後期の遮光実験の結果から得られる知見を整理する。まずは生育初期の遮光実験の結果から紹介する。生育初期に実施された遮光実験の概略をまとめた表が Table2.2, 2.3 である。

水稻生育初期に日射計などの計測機器を設置し、気象データを計測した結果、最高分げつ期前後の全天日射量と、水稻の穂数が高い正の相関を示していた<sup>[2.11][2.12]</sup>。この他にも生育初期に遮光実験を実施した結果、分げつ数の多寡が全天日射量に起因している点が明らかにされている<sup>[2.6][2.10]</sup>。またビルや高架橋といった構築物下で栽培された水稻では、穂数が減少することが複数の先行研究で確認されている<sup>[2.13][2.15]</sup>。以上から、有効分げつ期の遮光条件は、分げつ発生数の抑制により水稻の穂数を減少させ、減収に寄与する可能性が大きいと考えられる。

また、施用した窒素量の増加に伴い、分げつ数が増加することが知られている。有効分げつ期に異なる遮光条件、異なる窒素施用量を組み合わせる実施された遮光実験によると、無遮光区では窒素施用量の増加に従い、分げつ発生数も増加したが、遮光条件が強まるにつれ

Table2.2 : 生育初期の水稻で実施された遮光実験の概要

品種	遮光日時	遮光率	参考文献
・ ミホニシキ	・ 1961 年 活着後 10, 20, 30 日	0% (対照区), 50%, 80%, 95%	清水ら <sup>[2.6]</sup>
・ 日本晴	・ 1995/6/16~収穫 * 3 種類の異なる窒素施用量処理を実施	0% (対照区), 50%, 95%	玉置ら <sup>[2.7]</sup>
・ 日本晴	・ 1995/6/16~収穫 * 3 種類の異なる窒素施用量処理を実施	0% (対照区), 50%	玉置ら <sup>[2.8]</sup>
・ 日本晴	・ 1995/6/16~8/15 * 無機・有機という、2 種類の異なる窒素施用量処理を実施	0% (対照区), 50%	玉置ら <sup>[2.9]</sup>
・ 吉備の花	・ 1995/5/30~6/15, 6/27 ・ 1996/5/30~6/24, 7/3	0% (対照区), 50%, 80%, 95%	中野ら <sup>[2.10]</sup>

(出典) Table に記載した先行研究

Table2.3 : 生育初期の水稻で実施された遮光実験の結果

品種	出穂への影響	分けつ数	その他特筆事項	参考文献
・ミホニシキ	—	遮光により分けつ発生数減少	2次分けつの抑制発生	清水ら <sup>[2.6]</sup>
・日本晴	—	高窒素施肥量時では、各遮光率に対応して分けつ数 43.0, 12.2, -. 中窒素施肥量時では、各遮光率に対応して分けつ数 25.7, 10.5, -.	強遮光条件では、窒素量の影響減少	玉置ら <sup>[2.7]</sup>
・日本晴	出穂遅延	高窒素施肥量時では、各遮光率に対応して分けつ数 32.7, 9.6 中窒素施肥量時では、各遮光率に対応して分けつ数 19.7, 9.1	強遮光条件では、窒素量の影響減少	玉置ら <sup>[2.8]</sup>
・日本晴	—	有機肥料時では、各遮光率に対応して分けつ数 33.3, 11.1. 無機肥料時では、各遮光率に対応して分けつ数 43.2, 8.3.	遮光条件時は、有機肥料の優位性が生じる	玉置ら <sup>[2.9]</sup>
・吉備の花	出穂遅延	遮光により分けつ発生数減少	生育初期の遮光により一穂数減少	中野ら <sup>[2.10]</sup>

(出典) Table に記載した先行研究

て分けつ発生量は減少し、窒素量の影響が小さくなった<sup>[2.7][2.8]</sup>。つまり、無遮光条件下では窒素施肥量が分けつ発生数の制限要因であるのに対し、遮光条件下では、光合成による同化産物量が分けつ発生数の制限要因である可能性が大きいと考えられる。以上の理由から、営農型太陽光発電設備の遮光条件による分けつ発生数の減少を抑制する方策として、施肥量の増加は効果的ではない可能性がある。今後、詳細な検討が望まれる。

また分けつ期の遮光実験が出穂遅延を引き起こすことが指摘されている<sup>[2.7][2.8]</sup>。遮光条件が生じるビルや高架橋などの構築物下で栽培した水稻でも、出穂遅延が生じることが確認されている<sup>[2.13]-[2.15]</sup>。ゆえに生育初期の過度の遮光条件は出穂遅延を生じさせ、遅延型冷害を引き起こす可能性が高いと考えられる。また生育初期の過度の遮光条件が有効分けつ期間の延長をもたらす点についても先行研究で確認されているため、日照条件の悪化による生育不良が生じる可能性が高いと考えられる<sup>[2.10]</sup>。

次節で生育後期、特に出穂日の前後に遮光実験を実施した研究を紹介する。生育後期に実施した遮光実験の概略と結果をまとめた表が Table2.4, 2.5, 2.6, 2.7 である。



Table2.4 : 生育後期の水稻で実施された遮光実験の概要(1)

品種	遮光期間	遮光率	参考文献
・ コシヒカリ	・ 1964 年 : 穂揃期から 1 ヶ月間	0% (対照区), 25%, 50%	鈴木ら <sup>[2.16]</sup>
・ 新雪 ・ 越後早生 ・ 振興	・ 1976 年 : 出穂日~収穫日	0% (対照区), 60%	徐ら <sup>[2.17]</sup>
・ ササニシキ	・ 1986 年 : 穂揃期~11 月上旬	0% (対照区), 18%, 22%, 52%	斉藤 <sup>[2.18]</sup>
・ コシヒカリ	・ 1986 年 : 7/17~8/10 (出穂後 4 日)	0% (対照区), 22%	真脇ら <sup>[2.19]</sup>
・ コシヒカリ ・ 日本晴	・ 1990 年 : 出穂日から 10 日間隔で, 収穫日まで遮光	0% (対照区), 70%	松江ら <sup>[2.20]</sup>
・ ササニシキ	・ 1994-5 年 : 幼穂形成期~穂揃期	0% (対照区), 36%, 55%, 70%	藤井ら <sup>[2.21]</sup>
・ コシヒカリ	・ 2004 年 : 7/17 から 16 日間	0% (対照区), 65%	本田ら <sup>[2.22]</sup>
・ コシヒカリ ・ ひとめぼれ ・ イクヒカリ	・ 2004 年 : 穂揃い後の 28 日間	0% (対照区), 60%	若松ら <sup>[2.23]</sup>
・ ゆめみづほ	・ 2003, 4 年 : 出穂前後の各 20 日間	0% (対照区), 76~78%	小谷ら <sup>[2.24]</sup>

(出典) Table に記載した先行研究

Table2.5：生育後期の水稻で実施された遮光実験の概要(2)

品種	遮光期間	遮光率	参考文献
・大地の星 ・おぼろづき ・きらら 397 ・ななつぼし	・ 2007 年：出穂前 4 週間，出穂後 2 週間	0%（対照区）， 19%（出穂前）， 68%（出穂後）	梶原ら <sup>[2. 25]</sup>
・ななつぼし	・ 止葉抽出始めから出穂始めまでの 12 日間	0%（対照区）， 70%	後藤ら <sup>[2. 26]</sup>
・コシヒカリ	・ 穂揃期～登熟期	0%（対照区）， 70%	岩澤ら <sup>[2. 27]</sup>
・コシヒカリ	・ 2008 年：出穂日から 30 日間	0%（対照区）， 50%，80%	田中ら <sup>[2. 28]</sup>
・コシヒカリ	・ 2011 年：出穂日 30 日前から 10 日間 出穂日 20 日前から 10 日間 出穂日 10 日前から 10 日間	0%（対照区）， 50%，65%	高田ら <sup>[2. 29]</sup>
・コシヒカリ	・ 2008 年：出穂日～収穫日	0%（対照区）， 70%	梅本ら <sup>[2. 30]</sup>
・日本晴 ・ヒノヒカリ	・ 2009-10 年：出穂日以降	0%（対照区）， 50%	石突ら <sup>[2. 31]</sup>
・ふさおとめ ・コシヒカリ ・初星 ・おきにいり	・ 2013 年：穂揃い後 20 日間	0%（対照区）， 65%	坂田ら <sup>[2. 32]</sup>
・ 21 品種	・ 出穂日から 30 日間	0%（対照区）， 15~20%	坂井ら <sup>[2. 33]</sup>

(出典) Table に記載した先行研究

Table2.6：生育後期の水稻で実施された遮光実験の結果（1）

品種	収量	品質	その他特筆事項	参考文献
・コシヒカリ	精玄米重の減少	1000粒重の減少	—	鈴木ら <sup>[2.16]</sup>
・新雪 ・越後早生 ・振興	玄米1粒重の減少	蛋白質含量の増加による 品質劣化	品種間差あり	徐ら <sup>[2.17]</sup>
・ササニシキ	登熟歩合、1000粒重の 減少	不完全米の発生増加	遮光による早期発育停止粒 の増加	斉藤 <sup>[2.18]</sup>
・コシヒカリ	各遮光率に対応して、 精玄米重 663[g/m <sup>2</sup> ], 604[g/m <sup>2</sup> ],	—	出穂前16~17日の遮光条件 が穎花数、1000粒重を決定	真脇ら <sup>[2.19]</sup>
・コシヒカリ ・日本晴	1000粒重の減少による 収量減	外観品質の劣化、 蛋白質含量の増加	出穂日直後の遮光影響が大 きい	松江ら <sup>[2.20]</sup>
・ササニシキ	各遮光率に対応して、 精玄米重 539[kg/10a], 473[kg/10a], 421[kg/10a], 257[kg/10a]	蛋白質含量の増加による 品質劣化	穎果数の著しい減少	藤井ら <sup>[2.21]</sup>
・コシヒカリ	—	乳白粒の増加	追肥によるSPAD値の増加	本田ら <sup>[2.22]</sup>
・コシヒカリ ・ひとめぼれ ・イクヒカリ	全品種の精玄米重が 減少	登熟歩合、1000粒重の減少、 蛋白質含量の増加	登熟期間の長期化	若松ら <sup>[2.23]</sup>
・ゆめみづほ	精玄米重は対照区 601[kg/10a], 出穂前 276[kg/10a], 出穂後 384[kg/10a]	蛋白質含量の増加による 品質劣化	出穂前の遮光で1穂粒数、 出穂後は登熟歩合が減少	小谷ら <sup>[2.24]</sup>

(出典) Table に記載した先行研究

Table2.7 : 生育後期の水稻で実施された遮光実験の結果(2)

品種	収量	品質	その他特筆事項	参考文献
・大地の星 ・おぼろづき ・きらら 397 ・ななつぼし	4 品種の平均値. 各遮 光率に対応して精玄米 520[g/m <sup>2</sup> ], 522[g/m <sup>2</sup> ], 462[g/m <sup>2</sup> ]	蛋白質含量の増加による 品質劣化	品種間差あり	梶原ら [2. 25]
・ななつぼし	—	登熟歩合, 稔実歩合の減少, 胴割米の増加	遮光による籾殻 形成・伸長の抑制	後藤ら [2. 26]
・コシヒカリ	—	乳白米の多発	細胞内が低密度構造化	岩澤ら [2. 27]
・コシヒカリ	—	登熟歩合, 1000 粒重の減少, 不完全米の増加	登熟期間の長期化	田中ら [2. 28]
・コシヒカリ	遮光により 1 穂あたり の籾数が減少	1000 粒重の減少, 粒形の悪化	遮光による稈長成長の 抑制	高田ら [2. 29]
・コシヒカリ	—	乳白米, 青未熟米, 死米の増加	デンプン粒の成長不足 による白濁化	梅本ら [2. 30]
・日本晴 ・ヒノヒカリ	登熟歩合減少による, 精玄米重の減少	食味の悪化ならびに 外観品質の劣化	品種間差あり	石突ら [2. 31]
・ふさおとめ ・コシヒカリ ・初星 ・おきにいり	4 品種の平均値. 各遮 光率に対応して 精玄米重 441[g/ 株], 301[g/株]	登熟歩合の減少, 1000 粒重の減少, 不完全米の発生	品種間差あり	坂田ら [2. 32]
・21 品種	—	白未熟米発生比率の増加	高温寡照耐性の品種間 差を確認	坂井ら [2. 33]

(出典) Table に記載した先行研究

先行研究から、水稻を出穂日直前に遮光することで、穎花発生が抑制されることによる粒数の減少が生じていた。また出穂後に遮光することで登熟歩合の減少が生じ、加えて 1000 粒重も減少していた。以上から、遮光条件は一穂重の減少を生じさせ、減収をもたらす可能性が大きいと考えられる。

減収に加えて、遮光条件により不完全米が多発し、水稻品質の劣化が生じていた。また遮光条件を課すことにより、米粒に含まれる蛋白質含量が増加していた。蛋白質含量の増加は食味を悪化させることが知られている。以上から、出穂日前後の遮光処理は米粒外観品質の劣化、蛋白質含量の増加をもたらす、品質劣化と食味の悪化をもたらす可能性が高いと考えられる。

まとめると、出穂日前後の過度の遮光条件は減収の原因になるばかりでなく、著しい品質劣化と食味の悪化を引き起こす可能性が高い。以上が全天日射量と水稻生育状況の関係性について、2016 年 2 月時点で明らかにされている知見である。より詳細な検討、ならびに通年での遮光実験の研究蓄積は今後の課題である。

### 2.2.1.3 気象災害

気象災害は、収量・品質に大きな影響を及ぼす。以下では、台風と水害による影響を述べる。

台風の発生は強風害と潮風害をもたらす。前者の強風害とは、強風がもたらす水稻への物理的な影響である。出穂日に台風が襲来すると、稔実不稔や発育停止粒が発生して収量を減少させる<sup>[2.34]</sup>。また台風襲来が出穂後 10 日以内の場合は、蛋白質含量を増加させることにより食味の悪化を引き起こす<sup>[2.34]</sup>。後者の潮風害とは、海水中に含まれる塩分が台風により水稻穂部に付着し、減収をもたらす被害である。潮風害の再現実験では、海塩が付着する時期が出穂後に近いほど、減収ならびに品質劣化が生じる可能性が高まるという点が明らかにされている<sup>[2.35]</sup>。以上から、出穂日前後の台風襲来は収量・品質に大きく影響を与えるということがわかる。

水害による冠水は、減収と品質劣化を引き起こす。例えば 1995 年、2006 年に新潟県で発生した水害後に計測した水稻生育状況の検討結果によれば、冠水日数が長いほど減収と品質劣化が生じていた<sup>[2.36][2.37]</sup>。そして模擬試験場を設置して、各水稻生育ステージにおける冠水条件がもたらす影響を検討した研究では、穂ばらみ期が最も冠水に対して脆弱であり、その後に出穂日、分けつ期、登熟期の順で被害が大きくなることが指摘されている<sup>[2.38]</sup>。このように、台風や洪水という気象災害は、収量のみならず品質にも影響を与えることが明らかにされている。

## 2.2.2 人為要因

収量・品質に影響を及ぼす人為要因は、灌漑、施肥、品種の3要因である。

### 2.2.2.1 灌漑

稲の栽培方式は灌漑の有無により、水稲と陸稲に分類できる。水稲は水田に湛水する、緻密な水管理を伴う稲の栽培手法であるのに対し、陸稲は畑作と同様、湛水をせずに稲を栽培する手法である。作付面積を比較すると、2014年度における水稲作付面積が157万3000haであるのに対し、陸稲作付面積はわずか1410haである。このように、現状では水稲作付面積が大きい。水稲栽培が一般的である理由は3点存在する。1点目は連作障害がないこと、2点目は雑草防除が容易であること、3点目は収量が少ないことである。

陸稲栽培は連作障害を発生させることが一般的に知られている。水稲栽培では湛水下の嫌気条件と落水下の好気条件が交互に入れ替わる一方、陸稲栽培では好気条件が一貫して保たれる。ゆえに陸稲栽培では糸状菌や線虫などの好気性微生物が堆積し、連作障害を引き起こすことが指摘されている<sup>[2.39]</sup>。陸稲の連作障害は、水稲栽培に比べて安定的な米穀生産を困難にする。また陸稲は頻繁な雑草防除を必要とするため、水稲と比較して栽培管理が困難である。以上の理由から、灌漑により湛水状態を確保する水稲栽培が普及してきた。また水稲栽培に適した新品種の開発が盛んに行われてきたため、Figure2.6 からわかるように、陸稲収量と比較して水稲収量が極めて多いことも、水稲栽培をより一般的にしている。

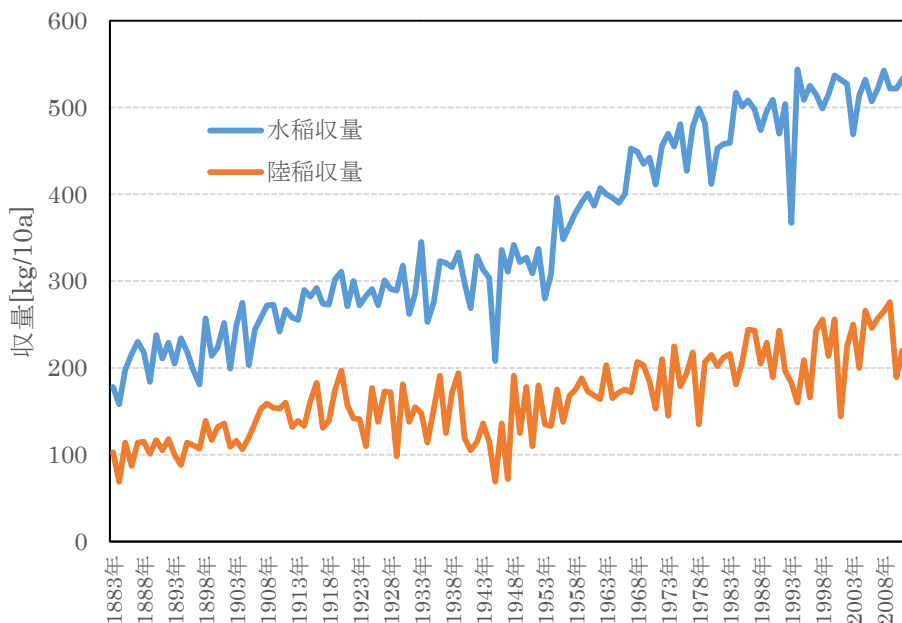


Figure2.6 : 日本における水稲・陸稲収量の時系列データ

(出典) FAOSTAT<sup>[2.40]</sup>

### 2.2.2.2 施肥

農作物の生育に欠かせない、3大必須元素である窒素，リン，カリウムなどの成分を含んだ肥料を農地へ施用するマネージメントを「施肥」という。施肥は農作物の収量を増加させ、品質を向上させる上で極めて重要とされており，近代の農業生産にとっては欠かせないマネージメントである。とりわけ1906年に合成手法が確立した，ハーバー・ボッシュ法による寄与が大きい。窒素固定手法が確立したことで農地への窒素供給が始まり，収量の激増をもたらした。20世紀の終わりには，人口の約40%が化学合成肥料から生産された食糧により生活が維持されているという試算結果が算出されていることから，化学肥料がもたらした影響は極めて大きいことがわかる<sup>[2.41]</sup>。

明治初期から昭和50年代までの化学肥料投入量と水稲収量を表したFigure2.7，そして1961年から2002年までの化学肥料投入量と水稲収量を表したFigure2.8を見ると，1900年前後には10aあたり200kg強であった水稲収量が，1980年前後には10aあたり500kg弱まで，約2.5倍近く増加していることがわかる。このように，施肥による収量の増加は著しい。

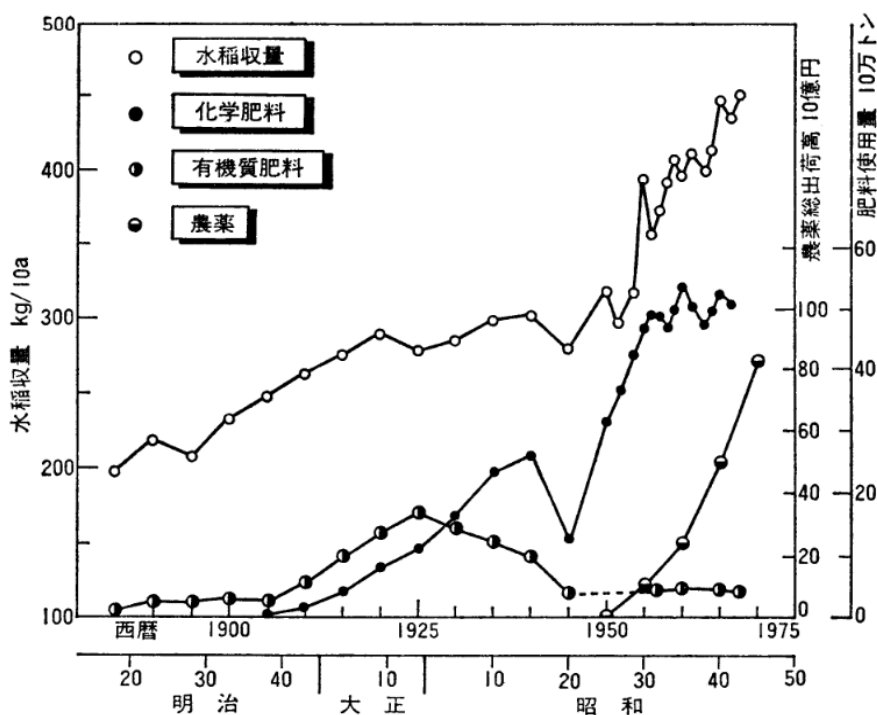


Figure2.7：農業・化学肥料の消費と水稲10aあたり収量の年次変化

(出典)「21世紀の食糧・農業」<sup>[2.42]</sup>

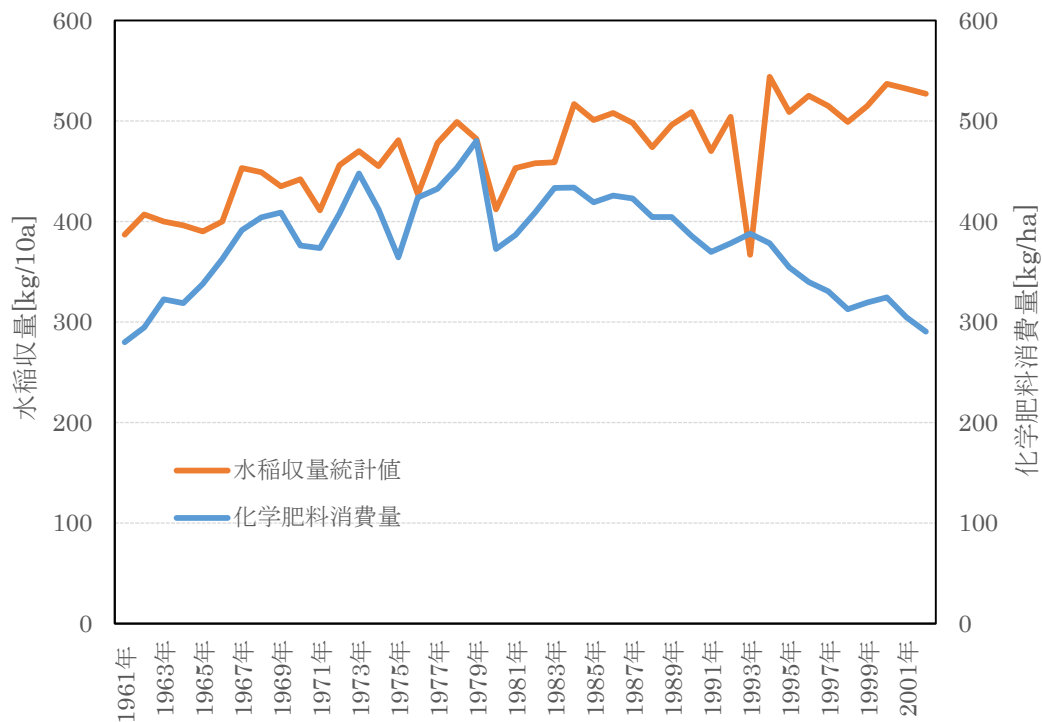


Figure2.8 : 水稲収量と化学肥料使用量の時系列データ

(出典) FAOSTAT [2.40]

国際連合食糧農業機関の統計データから算出した、コメ生産量上位 8 カ国における、耕地 1ha あたりの施肥量の時系列データである Figure2.9 を見ると、コメが主要穀物であるアジア諸国の中でも特に発展途上国では、施肥が十分に行われていないことがわかる。

また 3 大肥料と言われる、窒素、カリウム、リンの 1ha あたりの施肥量を空間的に表現している Figure2.10~Figure2.12 を見ると、インドや中国では施肥量の地理的差異が大きい一方、日本ではこの地理的差異が小さい。つまり農地へのマネージメントが比較的均一であることが示唆されている。

以上をまとめると、発展途上国では自然要因と比較して、施肥という人為要因により水稲収量が左右されていることがわかる。一方、日本では 1980 年を境に施肥量が減少しているにも関わらず収量が増加していることから、人為要因の影響が小さく、収量は自然要因により左右されている可能性が大きいと考えられる。



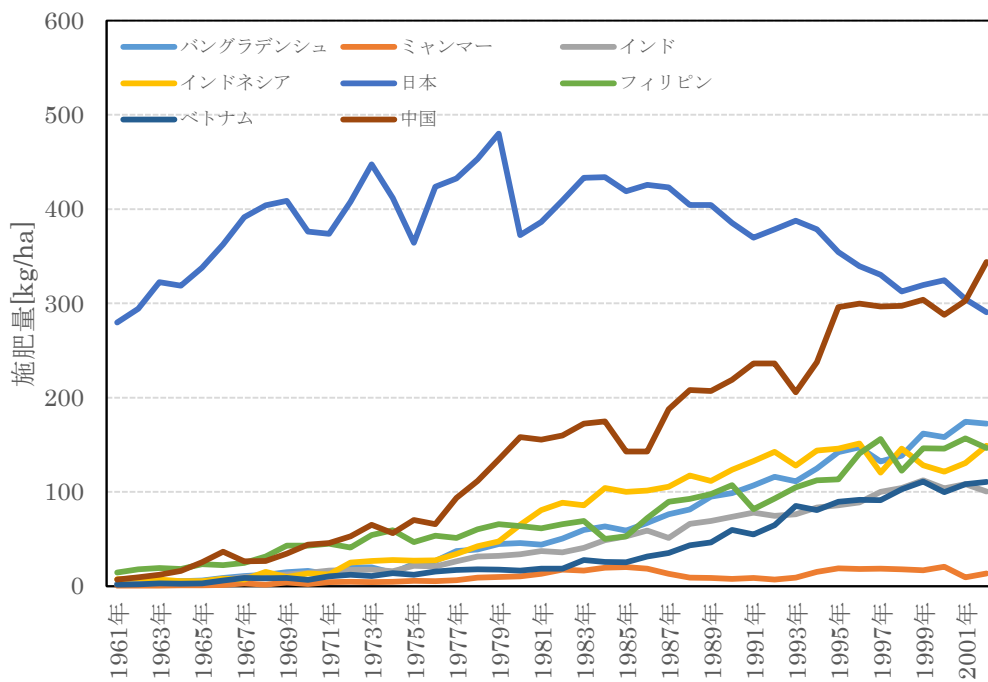


Figure2.9 : 各国耕地 1ha あたりの施肥量（リン+カリウム+窒素）の時系列推移  
 (出典) FAOSTAT [2.40]

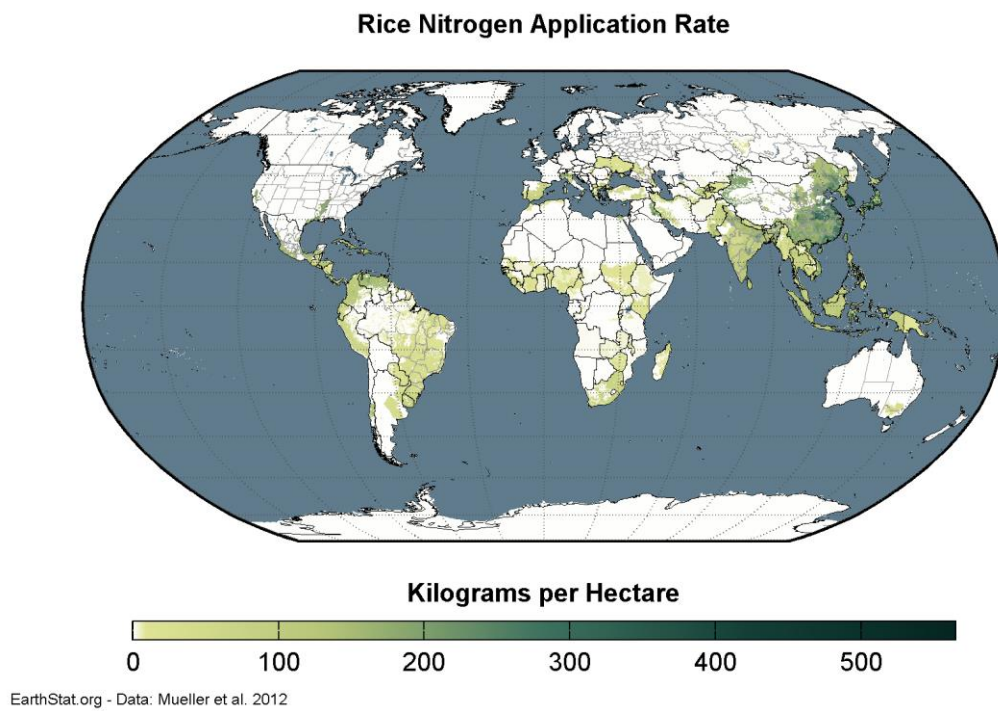
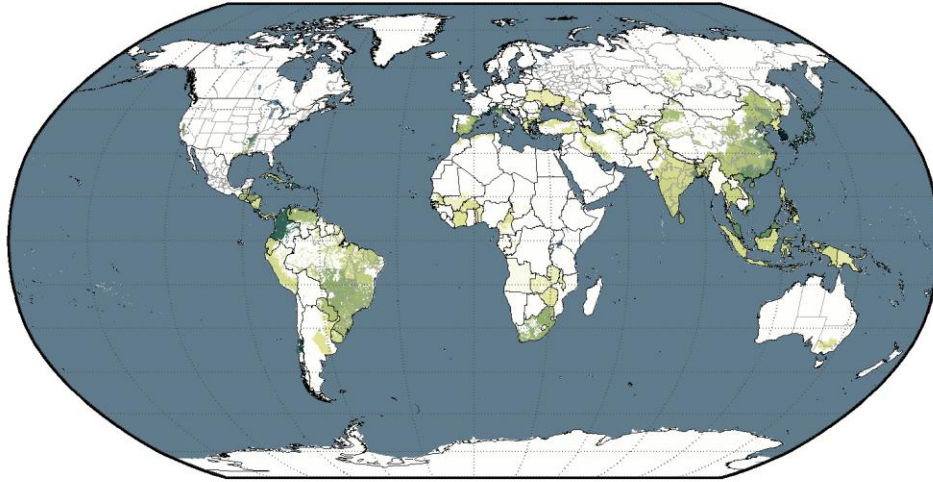


Figure2.10 : 全球スケールにおける水田 1ha への窒素施用量  
 (出典) Mueller et al. [2.43]

### Rice Potassium Application Rate



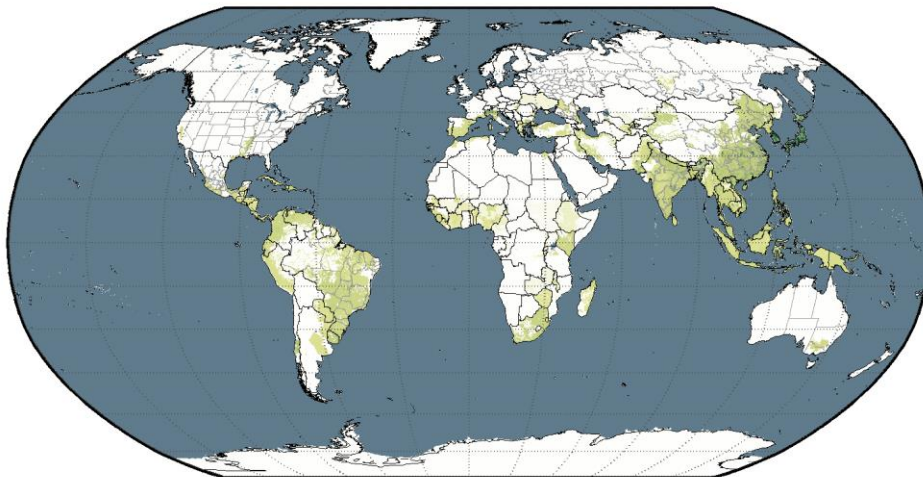
Kilograms per Hectare



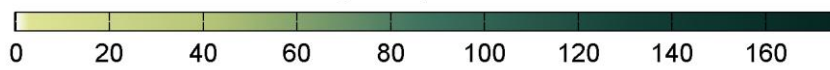
EarthStat.org - Data: Mueller et al. 2012

Figure2.11 : 全球スケールにおける水田 1ha へのリン施用量  
(出典) Mueller et al. [2.43]

### Rice Phosphorus Application Rate



Kilograms per Hectare



EarthStat.org - Data: Mueller et al. 2012

Figure2.12 : 全球スケールにおける水田 1ha へのカリウム施用量  
(出典) Mueller et al. [2.43]

### 2.2.2.3 品種

水稲収量は品種により左右される。品種改良の結果、収量の増加が図られてきた。近年では Table2.8 の多収米品種が開発されており、今後の普及が望まれている。日本平均の水稲収量が 10a あたり約 530kg であることを踏まえると、多収米品種を栽培することにより 30~40%ほどの収量増加が見込める。食味が悪いために飼料用米として栽培されているが、今後も改善が進めば、現行栽培されている品種に置き換わる可能性もある。

Table2.8：多収米品種の粗玄米重ならびに用途

品種	粗玄米重 [kg/10a]	用途
きたあおば	825	飼料用米
ふ系 211 号	758	飼料用米
べこごのみ	686	飼料用米
ふくひびき	703	飼料用米
べこあおば	732	飼料用米
クサユタカ	729	飼料用米
夢あおば	722	飼料用米
北陸 193 号	780	飼料用米
モミロマン	823	飼料用米
クサホナミ	669	飼料用米
クサノホシ	670	飼料用米
タカナリ	758	飼料用米
ホシアオバ	694	飼料用米
西海 203 号	725	飼料用米

(出典) 農林水産省，新しい多収米品種  
—加工用米及び飼料用米等，新規需要米の生産に向けて— [2.44].

### 2.2.3 まとめ

水稲収量は本節で述べた気象要因と人為要因により大きく影響を受けている。

気象要因は歴史的に被害が大きかった冷害，そして地球温暖化により今後の被害拡大が見込まれる高温障害についての研究蓄積が豊富である。また水害，風害といった気象災害についての研究蓄積が豊富である。一方，全天日射量と水稲生育状況について通年で検討した研究蓄積は乏しく，統一した見解が未だ存在しない状況にある。これは全天日射量の増減が水稲生育に及ぼす影響を検討する必要性が薄かったためであり，日照条件と水稲生育間の

研究蓄積は今後の課題である。

人為要因の場合、日本では水稲栽培手法の均一化、ならびに施肥量の減少が進行していることから、人為要因が収量・品質に及ぼす寄与が比較的小さいと考えられる。ゆえに、日本の収量・品質は、気象要因に大きく依存していると考えられる。

以上の背景から、施肥や灌漑という栽培条件を所与として、歴史的に被害が大きかった冷害、そして地球温暖化により今後被害が増加すると考えられている高温障害といった、「気温と水稲栽培」の基礎研究が盛んに行われてきた。そして、これらの基礎研究から、水稲生育ステージ予測、収量予測、品質予測を行うための各種作物モデルが開発されてきた。次節では、まず水稲生育ステージ予測モデルの概要とその課題、次に全天日射量を説明変数に組み込んだ収量・品質予測モデルの解説を行い、営農型太陽光発電のシミュレーションに有用と考えられる作物モデルの選定を行う。

## 2.3 水稲生育ステージ予測モデル

移植から出穂、収穫という水稲の生育ステージは、Figure2.2 と Figure2.3 からわかるように、気象要素により大きく影響を受ける。本節では現在生育ステージの予測に用いられている統計予測モデル、ならびに DVI(発育指数 : Development Index)モデルの解説を行う。

### 2.3.1 統計予測モデル

平均気温から無効気温を差し引き、移植日から出穂日までの有効気温を合計した有効積算気温を算出することで、移植から出穂・収穫に至るまでに必要な日数を予測する試みが行われてきた。ここで無効気温とは、「水稲生育に最低限必要な温度の閾値」として定義されており、約 10°C と先行研究では推定されている<sup>[2.45][2.46]</sup>。例えば、各品種の水稲生育ステージを決定する有効積算気温は、Table2.9 のように推定されている。

Table2.9 : 各生育ステージ到達までに必要な有効積算温度

品種	無効温度[°C]		有効積算温度[°C]	
	移植~収穫	移植~出穂	移植~出穂	出穂~収穫
越路早生	10.5	764	-	-
ササニシキ	10.9	838	-	-
トヨニシキ	10.8	862	-	-
日本晴	10.7	852	-	-
農林 18 号	11.1	934	-	-
かけはし	10	-	-	522
むつほまれ	10	-	-	534
つがるロマン	10	-	-	528
あきたこまち	10	-	-	526
じょうでき	10	-	-	531
ゆめさんさ	10	-	-	511
どまんなか	10	-	-	524
おきにいり	10	-	-	537
ひとめぼれ	10	-	-	523
ササニシキ	10	-	-	525
はえぬき	10	-	-	546
コシニカリ	10	-	-	517

(出典) 神田ら<sup>[2.45]</sup> , 江幡ら<sup>[2.46]</sup>

しかし、有効積算気温による水稻ライフステージ予測には、稲の日長感応性が反映されていないという課題が残る。水稻は短日植物であり、可照時間の長短により生育段階が決定されるという生理学的特性があるため、可照時間の影響を反映できていない点は、有効積算気温を用いた水稻ライフステージ予測の課題である。ゆえに次節で説明する DVI モデルでは、気温に加えて可照時間が説明変数として組み込まれている。

### 2.3.2 DVI モデル

前節に記述したように、有効積算気温を用いた統計予測では、可照時間の長短ならびに品種の差異による影響が十分に表現できていない。そのため、気温に加えて可照時間を説明変数に組み込んだ、各品種の水稻生育ステージ予測モデルである DVI(発育指数:Development Index)モデルが開発された。

DVI とは、気温と可照時間の関数から 1 日ごとの発育速度である DVR (発育速度 :

Development Ratio) を推定し、この DVR を積算して算出した指標である。DVI モデルでは、DVI が 0 の日を移植日、DVI が 1 を達した日を出穂日、DVI が 2 に達した日を収穫日と定義している。DVI モデルの詳細については、本論文の 4.1 を参照されたい。

予測誤差が 2 日以内と非常に当てはまりが良いことが知られているため、現状では DVI モデルによる水稲ライフステージ予測が一般的である。

### 2.3.3 水稲生育ステージ予測モデルの課題

水稲生育ステージを予測するモデルには統計予測モデルと DVI モデルが存在しており、そのなかでも特に、気温と可照時間を説明変数として構成された DVI モデルの精度が高い。DVI モデルでは、温度条件がもたらす水稲生育ステージへの影響と、水稲の日長感性が正確に再現できている。

しかし、DVI モデルには全天日射量の影響が考慮されていない点に懸念が残る。2.2.1.2 で記述したように、遮光条件は水稲の生育不良による出穂遅延、ならびに登熟遅延を引き起こすためである。従来は、遮光条件下で水稲を栽培させるという環境が想定されていなかったため、水稲生育ステージに日照条件の影響を考慮する必要性が薄かった。

しかし人為的な遮光条件を前提とする営農型太陽光発電では、全天日射量の多寡が水稲生育条件に及ぼす影響を、正確に把握する必要がある。そのため、DVI モデルに全天日射量を説明変数として組み込んだ、より精密な水稲生育ステージ予測モデルを構築する必要がある。

## 2.4 水稲収量予測モデル

### 2.4.1 統計予測モデル

水稲の移植日、出穂日、収穫日を基に、統計的に水稲収量を予測するモデルが複数開発されている。例えば村田<sup>[2.47]</sup>は、出穂日から収穫日までの気象要素（8月~9月の日平均気温と日平均全天日射量）に水稲収量が支配されると仮定して、各都道府県の水稲収量を被説明変数とした統計予測モデルを開発し、この手法を「気候登熟指数」と呼称している。Figure 2.13 は村田<sup>[2.47]</sup>を踏襲し、2012年の気象データを利用して算出した気候登熟指数の推定値である。結果から考察するに、水稲生育に最適な 22°C から 25°C の平均気温を頂点として、頂点外の極端な低温および高温条件では収量が減少することが示唆される。

脇山ら<sup>[2.48]</sup>は、村田<sup>[2.47]</sup>で提起されたモデル式を踏襲し、モデル式の一部を修正して、衛星データを利用した収量予測を実施している。これらの統計予測モデルに代表されるように、全天日射量を変数として収量を推定する統計予測モデルは、出穂日以降の気象条件を説明変数としたモデルが主流である。またモデルの構成上、全天日射量と収量が線形関係であり、人為的に全天日射量を減少させた場合の信頼性が担保できない。使用している気象データも出穂日から収穫日までと断片的であり、水稻の各生育ステージの気象感应性の違いを正確に再現できていないため、その精度や適用範囲は限定的であると考えられる。

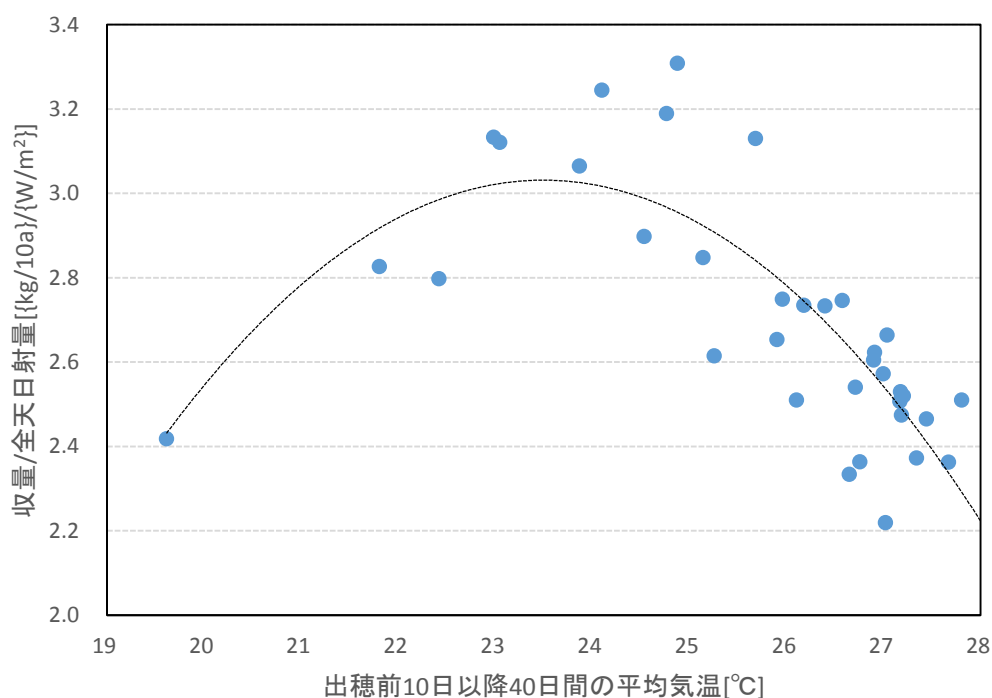


Figure2.13： 47都道府県で公表された2012年度の統計データを用いて算出した気候登熟指数  
(出典) 農林水産省, 作物統計<sup>[2.3]</sup>

## 2.4.2 成長動態に基づく予測モデル

水稻は気象条件に対し、各生育ステージ（栄養成長期、花芽形成期、生殖成長期）でそれぞれ異なる応答を示す。ゆえに前節で述べたような統計予測モデルは、見かけの当てはまりは良いが、正確に水稻生育状況を再現できていない。モデル式を構築するまでの仮定に、モデルの精度が依存してしまう。そのため水稻の成長動態を各日の気象データから再現する、つまり水稻の生育状況を模倣することで収量を予測するプロセスモデルが近年開発されている。

SIMRIW (Simulation Model for Rice-Weather Relations) はその代表的なモデルである。SIMRIW は、各日の気象データから水稻の成長動態を模倣することで収量を予測するプロセスモデルであり、京都大学の堀江教授らの研究グループにより実施された実証試験の結果を基に開発された<sup>[2.49]</sup>。SIMRIW は水稻の生理学的知見を結集した、収量予測分野では代表的かつ著名なモデルである。

このモデルは 2.3.2 で記述した、移植日から出穂日、収穫日という水稻の各生育段階を予測する DVI モデル、葉面積および光合成による同化産物を予測するバイオマス生産モデル、登熟量や稔実の程度について予測する収穫指数モデルという、3 種類のサブモデルを組み合わせることで構成されている。DVI モデルは日平均気温[°C/日]と可照時間[h/日]、バイオマス生産モデルは日全天日射量[MJ/m<sup>2</sup>/日]、収穫指数モデルは日平均気温[°C/日]と日最高気温[°C/日]が説明変数として与えられている。SIMRIW の詳細については、4.1 で記述する。

Figure2.14 は環境省の資料<sup>[50]</sup>を改変して作成した、SIMRIW の収量推定に至るまでのフローである。計算機を利用し、Figure2.14 に従って各日の気象データから逐次的に計算することで、水稻収量を推定することができる。

### 2.4.3 水稻収量予測モデルの課題

収量予測の分野では、「統計予測モデル」、「成長動態に基づく予測モデル」という 2 種類のモデルが開発されてきた。前者の課題を 3 点、後者の課題を 1 点取り上げる。

統計予測モデルに存在する第 1 の課題は、前節で指摘したよう水稻生育期間の一部のみ、気象データを利用している点である。第 2 の課題は、各生育ステージ（栄養成長期、花芽形成期、生殖生長期）で異なる気象感応性を、モデル上で再現できていない点である。第 3 の課題は、統計処理を施しているために、各地域固有の気象条件、地理的特性、栽培体系などが織り込まれており、モデルが適用可能な地域以外への適用が極めて困難という点が挙げられる。

成長動態に基づく予測モデルに存在する課題は、気温感応性に偏ったモデル開発が行われており、全天日射量が水稻生育へ及ぼす影響を正確に再現できていない点である。例えば SIMRIW のサブモデルであるバイオマス生産モデルには、全天日射量が説明変数として与えられているが、DVI モデルならびに収穫指数モデルでは、全天日射量が説明変数として与えられていない。

2.2.1.2 で明らかにしたように、栄養成長期の遮光条件は出穂遅延を生じさせる。同様に、生殖成長期の遮光条件は、稔実不稔による減収ならびに品質劣化を引き起こす。ゆえに、DVI モデルと収穫指数モデルという 2 つのサブモデルで、全天日射量の影響を正確に再現できていない点が、SIMRIW の課題として指摘されている<sup>[2.51]</sup>。



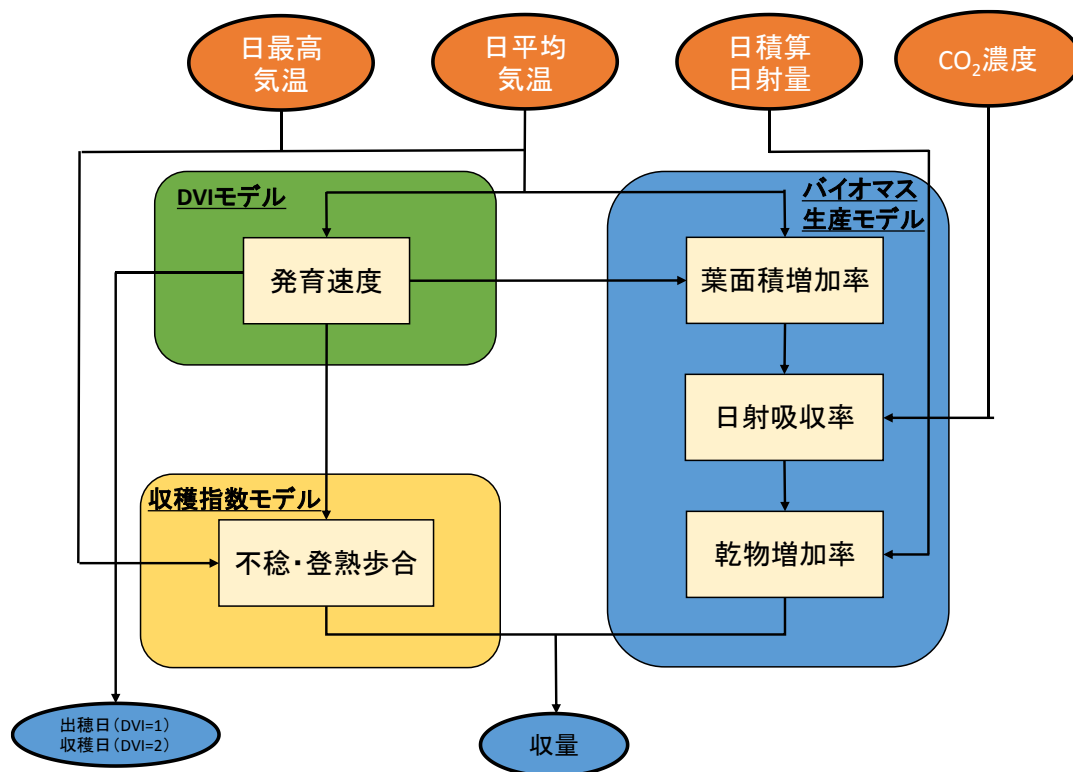


Figure2.14 : SIMRIW の構造

(出典) 温暖化影響総合予測プロジェクト報告書,  
『地球温暖化「日本への影響-最新の科学的知見-』 [2.50].

## 2.5 水稻品質予測モデル

### 2.5.1 統計予測モデル

気象データを基に水稻品質を予測するモデルの開発はあまり行われていない、現在までに開発されたモデルは、以下で紹介するモデルである。

岡田ら<sup>[2.52][2.53]</sup>では、出穂後 40 日間の積算日射量と平均日最低気温を説明変数とし、九州地方の各県で公表されている水稻品質を被説明変数とした統計予測モデルを開発している。水稻品質は登熟期間中、非線形に気候条件に対して応答し、気候要因では説明できない大きな変動が存在しているため、ベイズ推定によりパラメータを推定し、事前確率の不確実性の定量化を行っている。

河津ら<sup>[2.54]</sup>では出穂日後 10 日から 30 日までの平均日最低気温と平均日全天日射量を説明変数として、各県の 1 等米比率を非説明変数とした統計予測モデルを開発している。このモデルで使用している変数は有意であるものの、決定係数はきわめて小さい。

## 2.5.2 水稲品質予測モデルの課題

現行の水稲品質予測モデルは、3点の課題が存在する。

1点目の課題は、水稲生育期間の一部のみ気象データを利用しているため、各生育ステージで異なる水稲の気象感応性を再現できていない点である。2点目の課題は、水稲品質を気象条件から予測するモデルは統計予測モデルがわずかに存在しているのみで、水稲の成長動態を模倣することで逐次的に水稲品質を予測するプロセスモデルが開発されていない点である<sup>[2.52]-[2.54]</sup>。3点目の課題は、現行の水稲品質予測モデルでは、各種不良米の発生割合や、その発生確率を検討できていない点である。水稲品質は未熟米、被害米、着色米、胴割米といった各種不良米の重量が、精米重量に占める割合で決定されるため、水稲品質を正確に推定するためにも、これら各種不良米の発生確率を検討したモデルを構築する必要があると考えられる。

## 2.6 まとめ

水稲と気象感応性について詳細な検討は行われてはきたものの、依然不明な点が多い。これは時々の時勢に応じて必要な、水稲の生理機構を明らかにするための研究が行われてきたためである。例えば過去から連綿と続く夏季の冷害や、将来の地球温暖化に対応するための水稲の高温障害についての研究、食糧問題を解決するため収量増加に焦点を当てた品種改良研究などである。

つまり水稲の気象感応性の関わる知見、ならびに普及している水稲栽培手法は、水稲というブラックボックスに対して、時勢を反映した最適栽培手法を、手探りで模索してきた歴史を表しているのである。ゆえに、気温ではなく全天日射量の感応性について焦点を当て、収量増加ではなく収量減少について詳細に検討を行う研究が行われてこなかったのだと考えられる。水稲栽培手法は、日本の気象環境、慣行の問題意識の下で最適化されているために、モデル上で気象環境を変化させた場合の感度についての信頼性を担保できない。

過去に開発されてきた水稲生育予測モデルも同様である。人為的に遮光条件を作り出し、その下で水稲栽培を行うという状況下では、今まで慣行的に用いられてきた水稲栽培手法や水稲の気象感応性についての研究結果を外挿的に適用することはできない。

以上の理由から、営農型太陽光発電の研究では、実証試験場で水稲生育状況についての基礎データの蓄積を図ると共に、遮光条件における収量・品質を正確に再現できるようなプロセスモデルの開発を並行して行う必要がある。全天日射量を説明変数とした、水稲の非連続性や複雑な応答機構まで考慮した水稲生育モデルの開発が今後の課題である。またモデル開発に加えて、遮光条件下で、水稲収量を最大化させる栽培技術（水管理、施肥など）の検討を行う必要もある。

## 2.7 参考文献

- [2.1] JA にいがた南部営農センター 村上農業普及指導センター; 水稲栽培の基礎知識,  
[http://www.vill.sekikawa.niigata.jp/info/norinkanko/umai-kome/maisutajuku-text/iwafune-maisutajuku-text\\_p1-37.pdf](http://www.vill.sekikawa.niigata.jp/info/norinkanko/umai-kome/maisutajuku-text/iwafune-maisutajuku-text_p1-37.pdf)
- [2.2] 農林水産省; 水稲栽培方針 気象災害対策,  
[http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen\\_type/h\\_sehi\\_kizyun/pdf/04180113kishou.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/04180113kishou.pdf)
- [2.3] 農林水産省; 作物統計,  
<http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/>
- [2.4] 農林水産省; 米の検査結果,  
<http://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/>
- [2.5] S. Yoshida,; Fundamentals of rice crop science, IRRI, (1981), pp. 1-279.
- [2.6] 清水 強, 関口 貞介, 盛田 英夫, 須崎 睦夫; 主要作物の収量予測に関する研究 : VIII 水稲の分けつ発生に対する日射の影響, 日本作物学会紀事, 31(1962), pp. 141-144.
- [2.7] 玉置 雅彦, 山本 由徳; 遮光および施用窒素量が水稲の出葉速度と分けつ発生に及ぼす影響 : とくに出葉転換点に着目して, 日本作物学会紀事, 66(1997), pp. 29-34.
- [2.8] 玉置 雅彦, 田代 亨, 山本 由徳; 遮光および施用窒素量が水稲の生育, 収量構成要素および白米の理化学特性に及ぼす影響, 日本作物学会紀事, 66(1997), pp. 708-709.
- [2.9] 玉置 雅彦, 猪谷 富雄, 山本 由徳; 異なる光条件下における有機質肥料と無機質肥料が水稲の生育に及ぼす影響, 日本作物学会紀事, 68(1999), pp. 16-20.
- [2.10] 中野 尚夫; 生育初期の遮光が水稲の生育および収量構成要素に及ぼす影響, 日本作物学会紀事, 69(2000), pp. 182-188.
- [2.11] 北川 壽, 松村 修, 下坪 訓次, 波多江 政光; 暖地水稲の収量成立に及ぼす気象環境条件の影響 : 第 1 報 稈数成立と気温, 日射量の関係, 日本作物学会九州支部会報, 55(1988), pp. 49-52.
- [2.12] 山内 雄策, 平井 康丸, 山川 武夫, 井上 英二, 岡安 崇史, 光岡 宗司; 水稲の穂数予測重回帰モデル, 日本作物学会紀事, 81(2012), pp. 56-57.
- [2.13] 内田 敏夫, 和田 士郎, 井上 浩一郎; 構築物の投影が水稲の生育収量に及ぼす影響, 山口県農業試験場研究報告, 35(1983), pp.1-11.
- [2.14] 原田 皓二, 鐘江 寛; 構築物の日陰による日照時間の減少が水稲の生育に及ぼす影響, 日本作物学会九州支部会報, 49(1982), pp.33-36.
- [2.15] 黒田 晃, 畑中 博英, 小谷 俊之, 金田 哲郎; 鉄道高架橋による日照阻害が水稲に及ぼす影響, 北陸作物学会報, 42(2007), pp.39-43.
- [2.16] 鈴木 裕, 川原崎 裕司, 村山 登; 登熟期の気温と遮光が米とその澱粉の性状に及ぼす影響について, 日本農芸化学会誌, 40(1966), pp. 1-7.

- [2.17] 徐 錫元, 茶村 修吾; 玄米の蛋白質・燐・カリウム含有率の品質間差異, およびそれらに及ぼす登熟期間の気温としゃ光の影響, 日本作物學會紀事, 49(1980), pp. 199-204.
- [2.18] 齋藤 満保; 登熟期の遮光程度が水稻の収量と玄米品質に及ぼす影響, 日本作物学会東北支部会報, 30(1987), pp. 48-49.
- [2.19] 間脇 正博, 森田 茂紀, 菅 徹也, 岩田 忠寿, 山崎 耕宇; 幼穂形成期から出穂期にかけての遮光処理が水稻の根系の形成および収量に及ぼす影響: 第1報 根長密度に着目した場合, 日本作物學會紀事, 59(1990), pp. 89-94.
- [2.20] 松江 勇次, 古野 久美, 吉田 智彦; 北部九州産米の食味に関する研究 第3報 登熟中期以降の遮光処理が米の食味および理化学的特性に及ぼす影響, 日本作物学会紀事, 61(1992), pp. 218-222.
- [2.21] 藤井 弘志, 安藤 豊, 松田 裕之, 柴田 康志, 森 静香, 小南 力, 長谷川 愿; 追肥時期および遮光処理による穎花生産効率の変化とそれが精米中のタンパク質含有率に及ぼす影響, 日本土壤肥料學雜誌, 69(1998), pp. 463-469.
- [2.22] 本田 真紀, 坂田 雅正, 宮崎 彰, 山本 由徳, 吉田 徹志; 登熟期間中の遮光および温度条件が水稻コシヒカリの白未熟粒発生および玄米粒重に及ぼす影響, 日本作物学会四国支部会報, 41(2004), pp. 24-25.
- [2.23] 若松 謙一, 田中 明男, 上藺 一郎, 佐々木 修; 水稻の暖地早期栽培における登熟期間の遮光処理が収量, 品質, 食味に及ぼす影響, 日本作物学会九州支部会報, 72(2006), pp. 19-21.
- [2.24] 小谷 俊之, 松村 洋一, 黒田 晃; 出穂前後の遮光処理が水稻品種「ゆめみづほ」の収量および品質に及ぼす影響, 石川県農業総合研究センター研究報告, 27(2006), pp. 1-9.
- [2.25] 梶原 靖久, 田中 一生, 清水 博之, 田子 旭彦, 岩間 和人; 北海道で最近育成された水稻良食味系統「北海 302 号」の収量およびタンパク質含有率に及ぼす遮光および窒素追肥処理の影響, 日本作物学会講演会要旨集, 226(2008), pp. 66.
- [2.26] 後藤 英次, 熊谷 聡; 低温および遮光が寒地水稻品種「ななつぼし」の胴切粒発生に及ぼす影響(栽培), 日本作物學會紀事, 78(2009), pp. 35-42.
- [2.27] 岩澤 紀生, 梅本 貴之, 平塚 真遊, 新田 洋司, 松田 智明, 近藤 始彦, 高温および寡照条件下で発生した乳白米の構造的特徴, 日本作物学会講演会要旨集, 227(2009), pp. 330.
- [2.28] 田中 明男, 若松 謙一, 大内田 真; 暖地早期水稻における日照不足が玄米品質に及ぼす影響, 日本作物学会九州支部会報, 76(2010), pp. 9-11.
- [2.29] 高田 聖, 坂田 雅正, 宮崎 彰, 山本 由徳; 出穂期以前の遮光時期が水稻品種「コシヒカリ」の玄米品質に及ぼす影響, 日本作物学会四国支部会報, 48(2011), pp. 6-7.
- [2.30] 梅本 貴之, 岩澤 紀生, 近藤 始彦; 登熟期の高温および遮光処理で発生した水稻玄米のリング型乳白粒の層別デンプン特性, 日本作物学会講演会要旨集, 231(2011), pp. 446-446.

- [2.31] 石突 裕樹, 菊川 裕幸, 齊藤 邦行; 遮光と高温処理が水稲玄米の粒厚分布・外観品質・食味に及ぼす影響—2009年と2010年の比較—, 日本作物学会紀事, 82(2013), pp. 242–251.
- [2.32] 坂田 雅正, 高田 聖, 西森 基貴; 登熟期の高温および遮光条件が玄米品質に及ぼす影響とその品種間差, 日本作物学会四国支部会報, 50(2013), pp. 40–41.
- [2.33] 坂井 真, 田村 克徳, 森田 敏, 片岡 知守, 田村 泰章; 早植えと遮光フィルム被覆処理を併用したイネの高温寡照耐性の評価法の開発, 育種学研究, 17(2015), pp. 105–114.
- [2.34] 宮崎 真行, 内川 修, 田中 浩平; 福岡県における2004年の台風襲来による水稲の被害解析, 日本作物学会九州支部会報, 72(2003), pp. 1–3.
- [2.35] 板谷越 重人, 金井 政人; 出穂後の海水散布が水稲の品質・収量に及ぼす影響, 北陸作物学会報, 44(2009), pp. 5–7.
- [2.36] 水沢 誠一, 阿部 徳文, 仲山 和久, 萩野 孝司, 東 聡志, 金高 正典, 奈良 悦子; 7.13 新潟豪雨による冠水および土砂流入が水稲の生育・収量に及ぼした影響, 41 (2006), pp. 149–161.
- [2.37] 井上 浩一郎, 井尻 敏文, 内田 敏夫; 昭和58年7月豪雨時の水害が水稲の生育収量に及ぼす影響, 山口県農業試験場研究報告, 38(1986), pp.1–6.
- [2.38] 皆川 裕樹, 増本 隆夫, 堀川 直紀, 吉田 武郎, 工藤 亮治, 北川 巖, 瑞慶村 知佳; 水稲減収尺度の策定のための実水田圃場内に清水・濁水区を設けた模擬冠水試験 : 試験手法の提案と生育概況調査, 農村工学研究所技報, 214(2013), pp. 111–121.
- [2.39] 西尾 道德; 陸稲の連作障害の原因をめぐって, 化学と生物, 14(1976), pp. 718–721.
- [2.40] FAOSTAT;  
<http://faostat3.fao.org/home/E>
- [2.41] Jan Willem Erisman, Mark A. Sutton, James Galloway, Zbigniew Klimont, Wilfried Winiwarte; How a century of ammonia synthesis changed the world, *Nature Geoscience*, 1.10 (2008), pp. 636–639.
- [2.42] 奥野 忠一編; 21世紀の食糧・農業, 東京大学出版会, 1975, pp. 134.  
<http://ebsa.ism.ac.jp/ebooks/ebook/633?tid=60>
- [2.43] Nathaniel D. Mueller, James S. Gerber, Matt Johnston, Deepak K. Ray, Navin Ramankutty, Jonathan A. Foley; Closing yield gaps through nutrient and water management, *Nature* 490, 7419 (2012), pp. 254–257.
- [2.44] 農林水産省; 新しい多収米品種—加工用米及び飼料用米等, 新規需要米の生産に向けて—,  
[http://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/tasyumai/t\\_manual/pdf/panph.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/tasyumai/t_manual/pdf/panph.pdf)
- [2.45] 神田 英司, 鳥越 洋一, 小林 隆; 有効積算気温を用いた簡易モデルの穂の発育ステージ予測への適用, 日本作物学会紀事, 71(2002), pp.394–402.

- [2.46] 江幡 守衛;有効積算温度とイネの生長 第1報 有効下限温度の実験的算出法とイネの栄養生長への応用, 日本作物学会紀事, 59(1990), pp. 225-232.
- [2.47] 村田 吉男;わが国の水稲収量の地域性に及ぼす日射と温度の影響について, 日本作物学会紀事, 33(1964), pp. 59-63.
- [2.48] 脇山 恭行, 井上 君夫, 中園 江;水稲の登熟期における衛星データおよびアメダスデータをを用いた収量予測法, 農業気象, 59(2003), pp. 277-286.
- [2.49] T. Horie;The rice crop simulation model SIMRIW and its testing, Modelling the Impact of Climate Change on Rice in Asia, 1995, pp. 51-66.
- [2.50] 環境省;温暖化影響総合予測プロジェクト報告書 『地球温暖化「日本への影響—最新の科学的知見—』, 2008,  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=9770>
- [2.51] 横沢 正幸, 飯泉 仁之直, 岡田 将誌;気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価, 地球環境, 14(2009), pp. 199-206.
- [2.52] 岡田 将誌, 飯泉 仁之直, 林 陽生, 横沢 正幸;水稲品質の近年の低下傾向に関する気候学的考察, 農業気象, 65(2009), pp. 327-337.
- [2.53] M. Okada, T. Iizumi, Y. Hayashi, M. Yokozawa;Modeling the multiple effects of temperature and radiation on rice quality, Environmental Research Letters, 6.3 (2011), pp. 1-8.
- [2.54] 河津 俊作, 本間 香貴, 堀江 武, 白岩 立彦;近年の日本における稲作気象の変化とその水稲収量・外観品質への影響, 日本作物学会紀事, 76(2007), pp. 423-432.

### 3 実証試験

#### 3.1 実証試験場の概要

千葉県酒々井町農家の大塚洋一氏に依頼し、氏が設置した営農型太陽光発電の実証サイトで、2015年に実証実験を実施した。Figure3.1は実施サイトの風景である。また上空から実証試験場を俯瞰した実証試験場のイメージがFigure3.2である。まず支柱について説明を加えると、実証サイトで使用している支柱の素材はアルミニウム製の杭が16本、支え8本の計24本であり、支柱1本の面積は $0.01\text{m}^2$ である。パワーコンディショナは田淵電機株式会社製のEPC-A-S55P-Hを2台設置している。

株式会社カナディアンソーラー製の太陽光パネル（外形寸法： $1638\times 826\times 40\text{mm}$ ）を方位10度として48枚設置しており、システム容量は11kWである。太陽光パネル1枚の面積は約 $1.35\text{m}^2$ であるため、48枚設置した際に土地に占める面積は $65\text{m}^2$ である。また支え8本の面積は $4.2\text{m}^2$ である。営農型太陽光発電設備が土地に占める面積はFigure3.2から $224.7\text{m}^2$ であるため、太陽光パネルと支柱の面積が営農型太陽光発電設備全体の面積に占める割合（投影率）は31%となる。



Figure3.1：酒々井実証サイトの風景

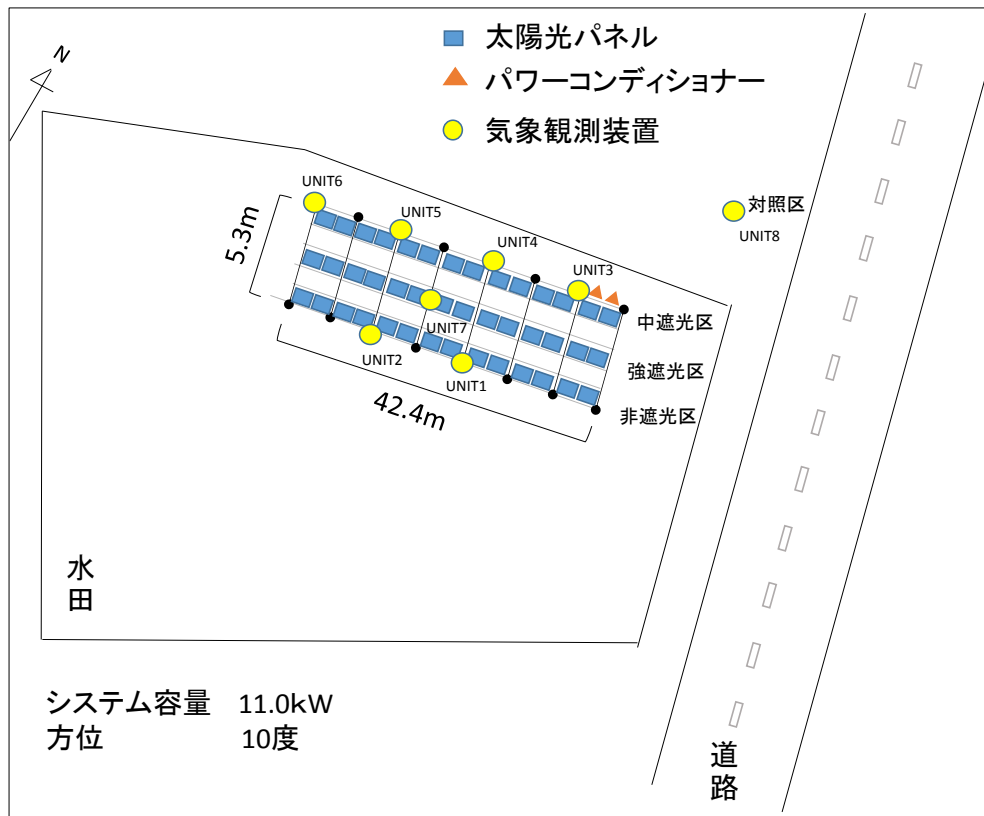


Figure3.2 : 実証試験場の俯瞰イメージ

## 3.2 気象計測

### 3.2.1 計測する気象要素

計測する気象要素は全天日射量[MJ/m<sup>2</sup>]ならびに気温[°C]である。これら気象要素を選んだ理由は、水稲の収量・品質に与える影響が大きいと考えられるためである。降水量・風速・湿度・地温・水蒸気圧などの気象要素は水稲生育に与える影響が少ないと考えられるため、本研究では計測しなかった。

### 3.2.2 計測機器と各種設定

日射計は株式会社佐藤商事の「ソーラーパワーメーター：SPM-SD」を使用した。日射計の種類は、光電素子(フォトダイオード)型である。温度計は株式会社ティアンドディの「小型データロガー：TR-51」を使用した。これら計測機器を設置する際に必要な収納ボックスの設計は、株式会社スマートブルーに依頼した。計測間隔は温度計、日射計ともに300秒である。株式会社スマートブルーが設計した収納ボックス（気象観測装置）の内観が



Figure3.3である。Figure3.2のよう、気象観測装置は8台設置し、合計8ヶ所にてデータ収集を行った。実証サイトに気象観測装置を設置した風景がFigure3.4である。温度センサーを装置内に設置する場合は装置に熱がこもり、気温計測に影響を与えると判断したため、温度センサーは気象観測装置外に接続している。



Figure3.3 : 気象観測装置の内観（左下：温度計，右上：日射計）



Figure3.4 : 酒々井実証サイトに設置した気象観測装置

### 3.2.3 計測期間

計測期間は2015年7月1日~2015年9月1日である。計測期間中、日射計でバッテリー切れが生じたために、全天日射量データの欠損が生じた。また移植日が2015年5月2日であるため、移植日から計測開始日まで、約2ヶ月間のデータが欠損している。8ヶ所の計測機器（Unit1~Unit8）のデータ欠損区間をまとめた表がTable3.1である。

実証試験場の移植日は2015年5月2日であり、収穫日は2015年9月14日であるため、データ分析を行う際には、5月2日から9月14日までの連続的な気象データが必要である。そのため、実証試験場で計測した気象データの欠損値を補間する必要がある。補完手法は3.4で紹介する。

Table3.1 : 計測した全天日射量・気温データの欠損期間

全天日射量	Unit1	Unit2	Unit3	Unit4	Unit5	Unit6	Unit7	Unit8
5/1~7/1	×	×	×	×	×	×	×	×
7/2~7/21	○	○	○	○	○	○	○	○
7/21~8/1	×	×	×	×	×	×	×	×
8/1~8/21	○	○	○	○	○	○	×	○
8/21~8/31	×	×	×	×	×	×	×	×
気温	Unit1	Unit2	Unit3	Unit4	Unit5	Unit6	Unit7	Unit8
5/1~7/1	×	×	×	×	×	×	×	×
7/2~7/21	○	○	○	○	○	○	○	○
7/21~8/1	○	○	○	○	○	○	○	○
8/1~8/21	○	○	○	○	○	○	○	○
8/21~8/31	○	○	○	○	○	○	○	○

○ : データ有り

× : データ欠損

## 3.3 気象データ解析

### 3.3.1 日射量データ分析

Figure3.2に8機の気象観測装置（Unit1~8）の設置場所を描画している。太陽光パネルの南側に設置した2機（Unit1, 2）を「非遮光区」、北側に設置した4機（Unit3, 4, 5, 6）を「中遮光区」、パネル直下の1機（Unit7）を「強遮光区」、設備外に設置した1機（Unit8）を「対照区」とする。以下で使用する用語は上記に準じる。

各計測地点における全天日射量の計測結果がFigure3.5である。対照区で計測された全天日射量の2015年7月1日~2015年9月1日までの平均値を100%とすると、非遮光

区は 92~94%，中遮光区は 53~69%，強遮光区は 41%であった。

非遮光区が遮光条件を形成しないのにも関わらず，対照区と比較して全天日射量が約 10%減少した理由として，散乱日射量の存在が考えられる。対照区は周囲に構造物が存在せず，日射計のセンサー周囲全てから散乱日射量を受光できていた。一方，非遮光区では上空に太陽光パネルが存在していたため，その分センサーが受光可能な散乱日射量が減少したのだと考えられる。

中遮光区は遮光条件が生じ，散乱日射量に加えて直達日射量も減少する区間であるため，非遮光区と比較して全天日射量が多く減少していた。センサーの位置による遮光条件の変化から，中遮光区に設置した計測機器（Unit3，4，5，6）の計測データにバラツキが生じているものの，平均して約 40%の全天日射量が減少していた。

強遮光区は直達日射量，散乱日射量ともに減少が著しかったためか，中遮光区より強い遮光条件が形成されていた。こちらは対照区と比較して約 60%の全天日射量が減少しており，中遮光区と比較しても 20%ほど全天日射量が減少していた。

Dupraz et al.<sup>[3.1]</sup>は太陽光パネルの配置に偏りが存在しないと仮定した場合の，太陽光パネル下の全天日射量の分布を予測している。分布の予測値である Figure3.6 を見ると，太陽光パネルの下では全天日射量が最大で 50%ほど減少しているため，本実験の結果と，ある程度の整合性がとれている。Figure3.6 が全天日射量の年平均値という点を考慮すると，太陽高度が高く，全天日射量が多い夏季の遮光条件では，50%以上の全天日射量が減少する可

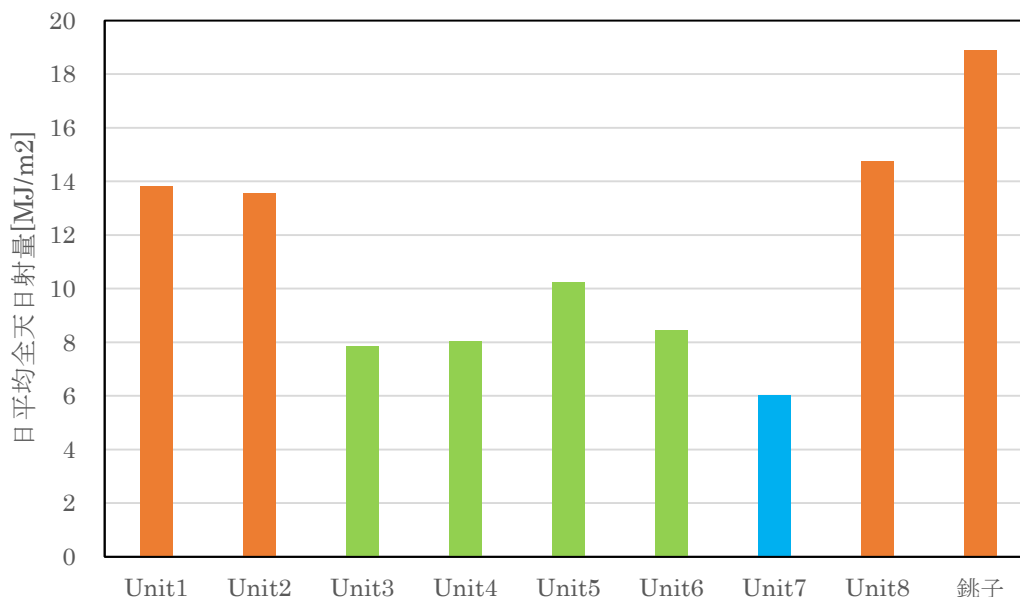


Figure3.5 : 計測装置 (Unit1-Unit8) ならびに銚子市で計測された平均日積算日射量[MJ/m<sup>2</sup>]

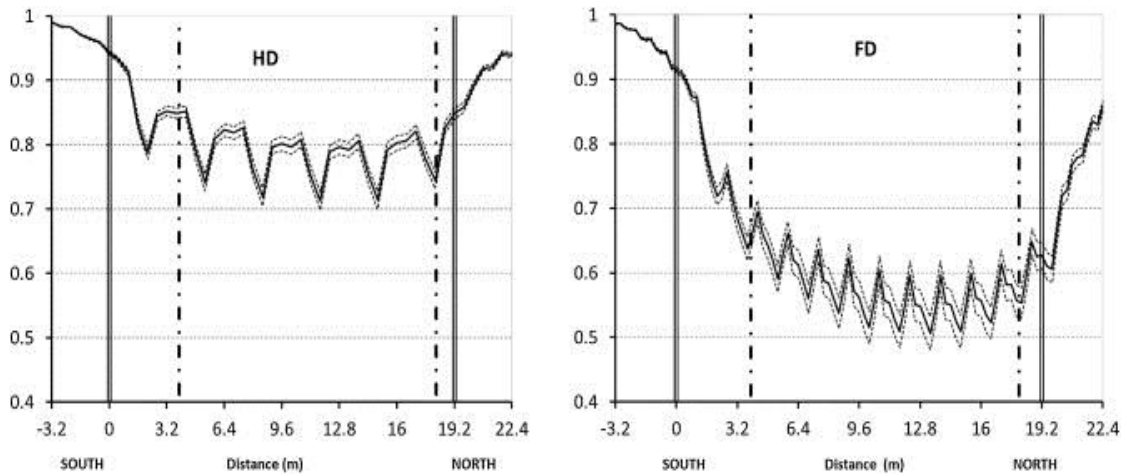


Figure3.6 : 太陽光パネル下における年平均全天日射量の推定値

\*農地への投影率 25%(HD)と 50%(FD)の推定値。縦軸はパネル外の全天日射量を 1 とした際の日射量減少比率，黒垂直 2 重線は設備の支柱の両端，黒ドット垂直線は農作物の計測地点を表す。

(出典) Dupraz et al.<sup>[3.1]</sup>

能性も考えられる。

しかし Figure3.5 から、同時期に気象台で計測された千葉県銚子市の全天日射量と、酒々井町実証サイトで計測した対照区の全天日射量を比較すると、同条件にも関わらず全天日射量が 22%ほど少なかった。これは本研究で使用した日射計が計測できる光の波長範囲が 400nm~1100nm であるのに対し、気象台で使用されている日射計が計測できる光の波長範囲が 300nm~3000nm と広く、広範囲の波長に渡り、全天日射量を計測できていたためと考えられる。Figure3.7 は酒々井実証サイトで使用した日射計が測定可能な光の波長領域、ならびに気象台で使用されている日射計が計測可能な光の波長領域を視覚化したグラフである。また各日射計が計測可能な波長領域のエネルギー積分値である Figure3.8 から、本研究で使用した日射計では、日射量が 26%ほど低く計測されることがわかる。

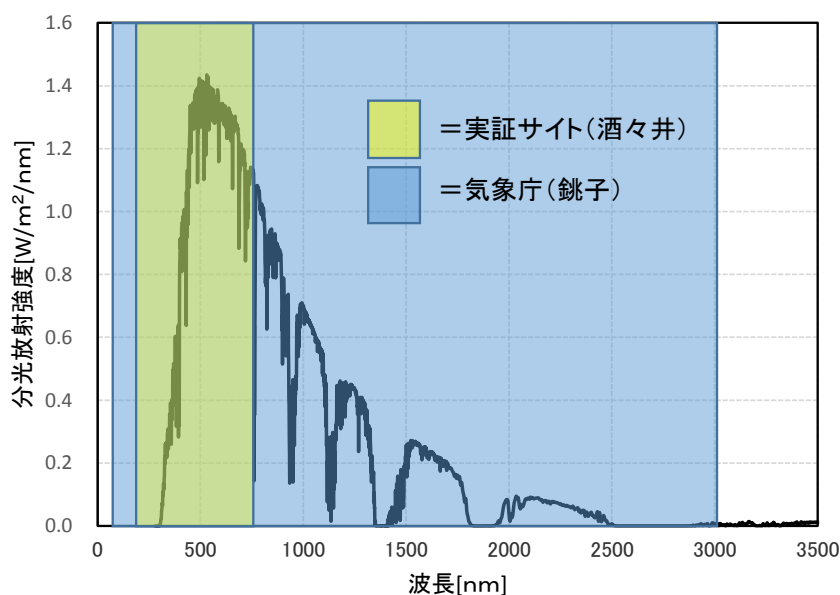


Figure3.7 : 酒々井実証サイトで用いた日射計が測定可能な光の波長領域（黄色），なら  
びに気象台で計測に用いている日射計が測定可能な光の波長領域（青色）

（出典）Reference Solar Spectral Irradiance:Air Mass 1.5<sup>[3.2]</sup>

水稻生育状況のモデルシミュレーションで使用する各日の全天日射量データは，気象庁  
から得られる時系列データを前提としているため，日射計が計測可能な光の波長領域の違  
いから生じるエネルギー量の多寡は修正する必要がある．全天日射量データ欠損値の補完，  
ならびに計測可能な光の波長領域の違いから生じるエネルギー量の修正は 3.4 で行う．

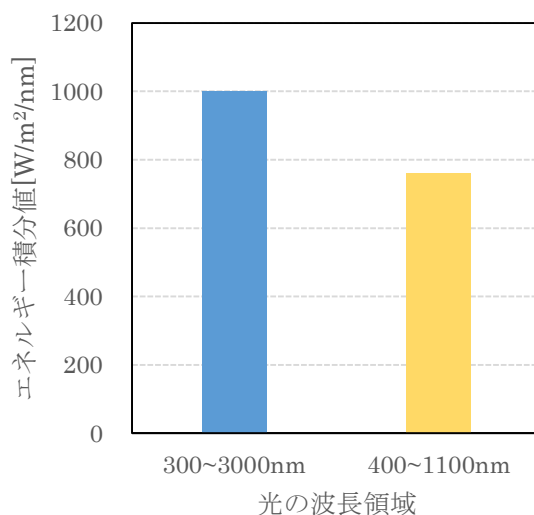


Figure3.8 : 日射計が計測可能な波長領域のエネルギー積分値

（出典）Reference Solar Spectral Irradiance:Air Mass 1.5<sup>[3.2]</sup>

### 3.3.2 気温データ分析

計測した気温データのヒストグラムが Figure3.9 である。このグラフを見ると、測定地点による顕著な気温の違いは確認できなかった。しかし、対照区ならびに非遮光区では、39℃以上の高温が頻繁に計測されていた。35℃以上の気温が酒々井実証サイトで頻繁に計測されるのは現実的ではない。酒々井町に一番近い气象台である佐倉市で同時期に計測された時系列気温データを比較した Figure3.10 を見ると、酒々井実証サイトでの計測データは気温の振幅が大きく、高低温に強く計測されていることがわかる。また対照区と佐倉市で計測された気温データのヒストグラムである Figure3.11 から、実証試験では 39℃以上の最高気温が頻繁に計測されていた。

酒々井実証サイトでは、昼間は、気象観測装置の外装ならびに設置柱が直射日光で高温状態となっていた。そのため、外装からの輻射熱が温度センサーに影響を与えたのだと考えられる。同様に夜間の低温が柱温を低下させたため、午前中では気温が低く計測されていたのだと考えられる。

気温データは Table3.1 で示したように欠損が存在するため、欠損期間のデータ補完ならびに最高・最低気温の補正を行う必要がある。気温データ欠損値の補完、ならびに最高・最低気温の補正は次節で行う。

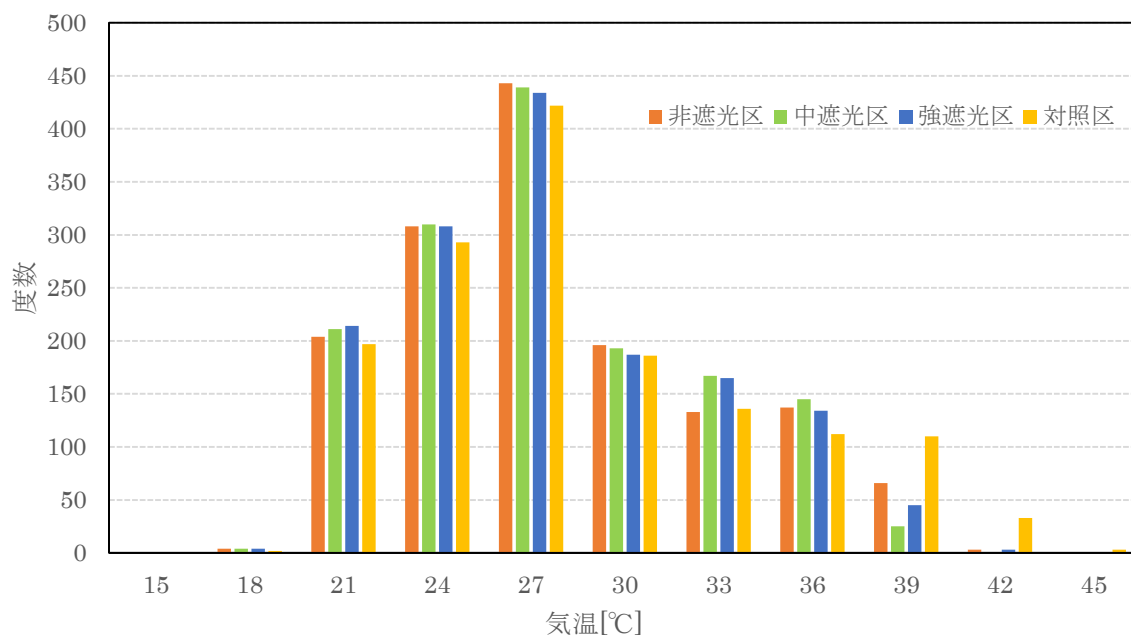


Figure3.9：各測定地点で計測した気温データのヒストグラム

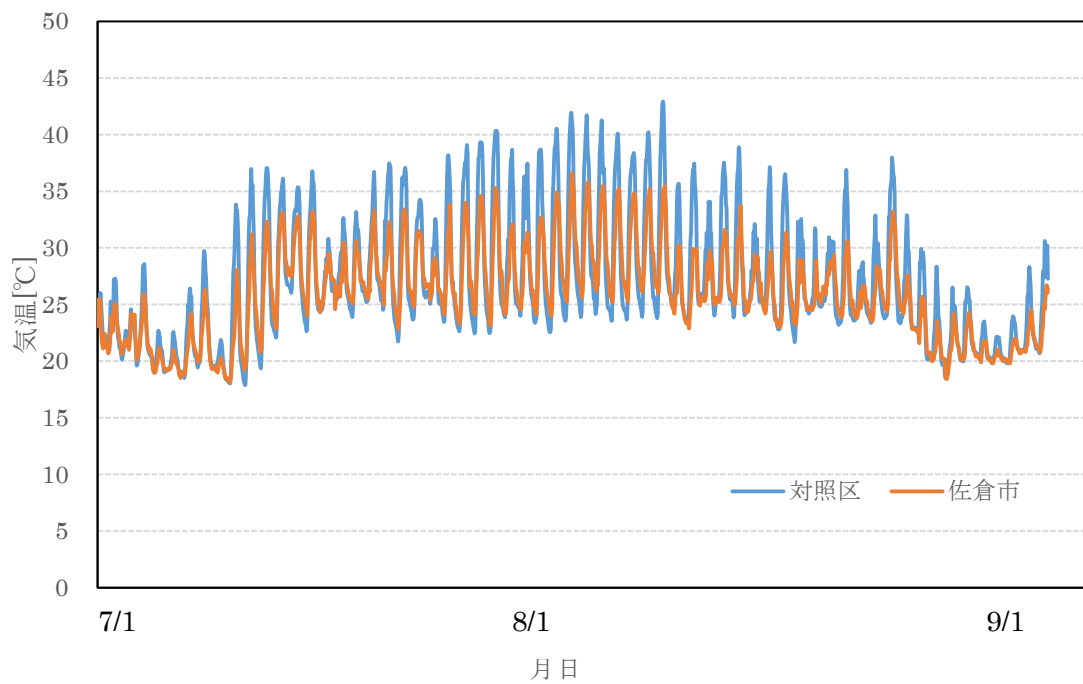


Figure3.10 : 対照区と佐倉市で計測された気温時系列データ  
 (出典) 気象庁<sup>[3.3]</sup>

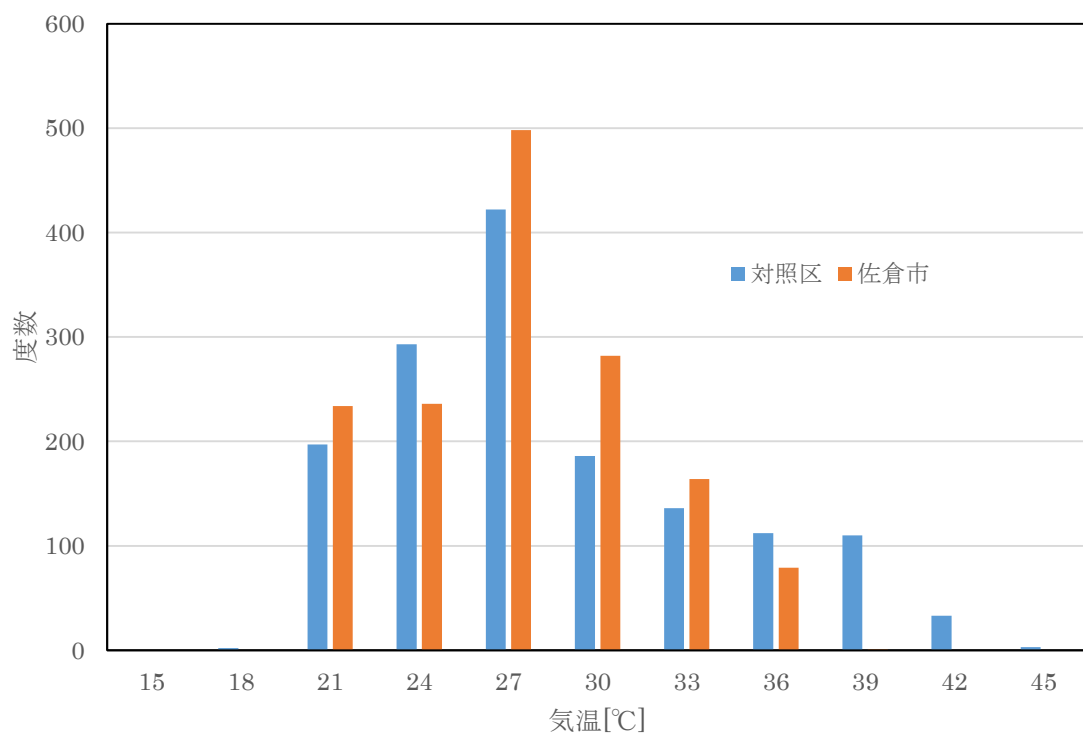


Figure3.11 : 対照区と佐倉市で計測された気温データのヒストグラム

### 3.4 気象データの修正

#### 3.4.1 気象データ補完

本節では、気温時系列データ・全天日射量時系列データの欠損を補完する。また日射計が計測可能な光の波長領域の違いから生じる全天日射量データへの影響を修正し、気温データの過分な日最高・最低気温の影響を修正する。

##### 3.4.1.1 気温データの補完手法

実証試験で計測した気温データと、酒々井町に最も近い佐倉市の気象台で計測された気温データは近似できると仮定し、以下の手法に準じて気温データの補完、補正を行った。

まずは酒々井町で計測した気温時系列データから日最低気温を抽出し、抽出した日最低気温と佐倉市の気象台で計測された日最低気温間で回帰分析を実施する。この関係式を用いることで、佐倉市の気温時系列データを参考にした連続的な最低気温のデータを入手することができる。日最高気温の場合も同様の手順を踏襲する。

また日平均気温の場合は、酒々井町で計測した気温時系列データから日最低気温、日最高気温、日平均気温を抽出し、これら要素間で回帰分析を実施する。計測した日最高気温と日最低気温を重み付けして日平均気温を求めることで、日平均気温の欠損値を補完することができる。

気温データ修正のイメージを Figure3.12 に示す。

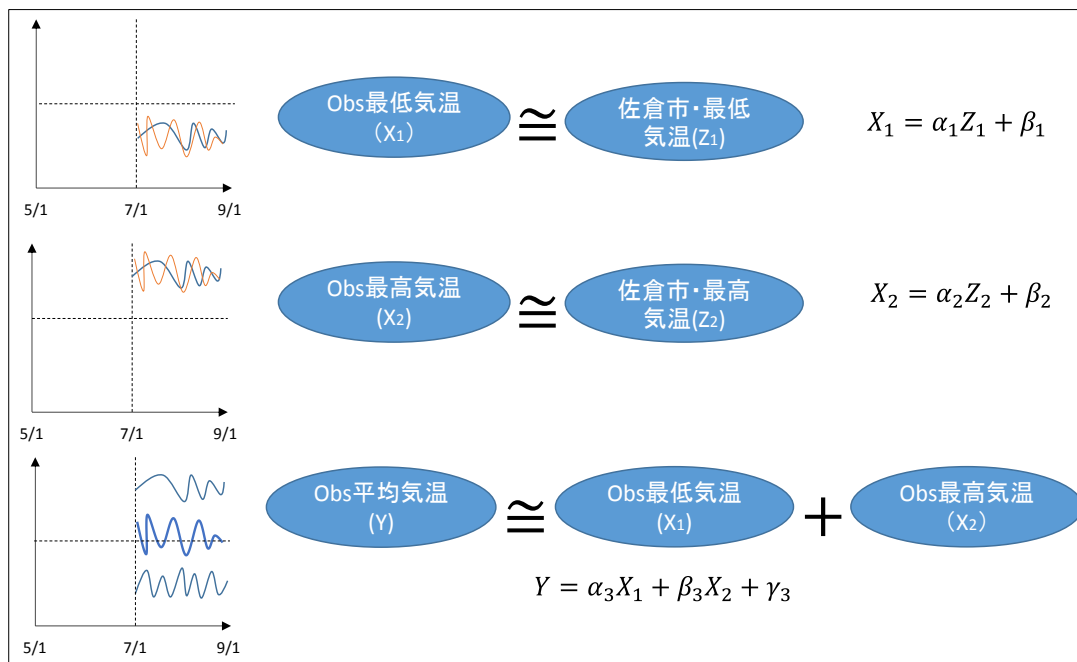


Figure3.12 : 気温データの修正手法のイメージ



### 3.4.1.2 日射量データの補完手法

前節と同様に、酒々井町で計測した全天日射量データと、酒々井町に最も近い銚子市の気象台で計測された全天日射量データは近似できると仮定する。

酒々井町で計測した全天日射量時系列データを日積算日射量へと変換し、銚子市の気象台で計測された日積算日射量との間で回帰分析を実施する。回帰分析の結果を用いることで欠損値を補完することができる。

日射量データ修正のイメージを Figure3.13 に示す。

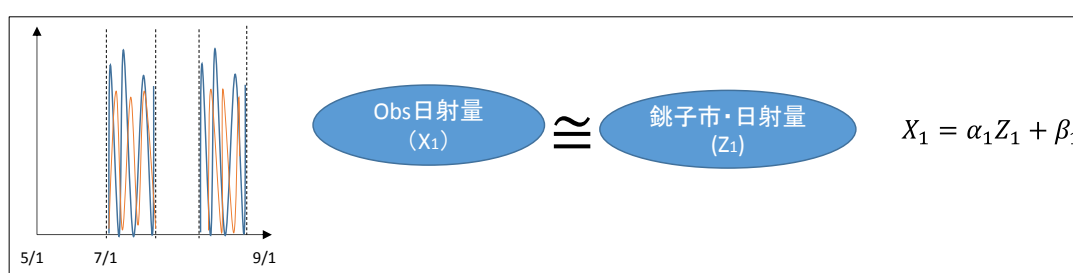


Figure3.13 : 日射量データの修正手法のイメージ

## 3.4.2 気象データの修正結果

### 3.4.2.1 気温データの修正結果

Figure3.12 の手法に従い、気温データ間の回帰分析を実施した結果が、Table3.2~3.4 である。そしてこれらパラメータを利用した日最低・日平均・日最高気温の推定結果と実測値の散布図が、Figure3.14~3.16 である。

Table3.2 : 計測した日最高気温と佐倉市で計測された日最高気温間の回帰分析結果

最高気温			
	パラメータ	t 値	R <sup>2</sup>
$\alpha_1$	1.13	38.60	0.96
$\beta_1$	-1.13	-1.46	

Table3.3 : 計測した日最低気温と佐倉市で計測された日最低気温間の回帰分析結果

最低気温			
	パラメータ	t 値	R <sup>2</sup>
$\alpha 2$	0.84	28.89	0.93
$\beta 2$	2.93	4.42	

Table3.4 : 計測した日最低気温, 日最高気温と日平均気温間の回帰分析結果

平均気温			
	パラメータ	t 値	R <sup>2</sup>
$\alpha 3$	0.66	31.84	0.93
$\beta 3$	0.38	43.01	
$\gamma 3$	0.65	-1.67	

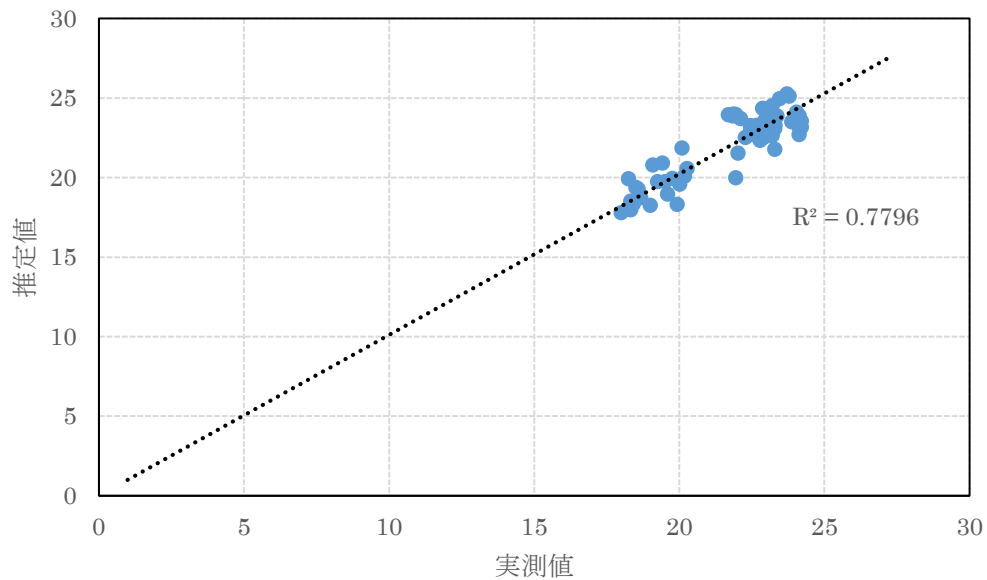


Figure3.14 : 最低気温の実測値と推定値の散布図

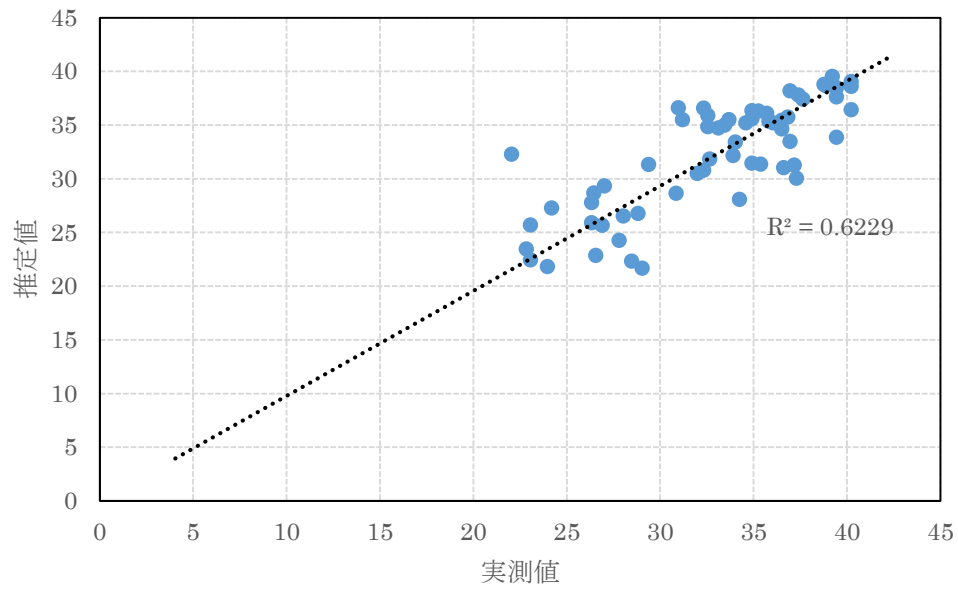


Figure3.15 : 最高気温の実測値と推定値の散布図

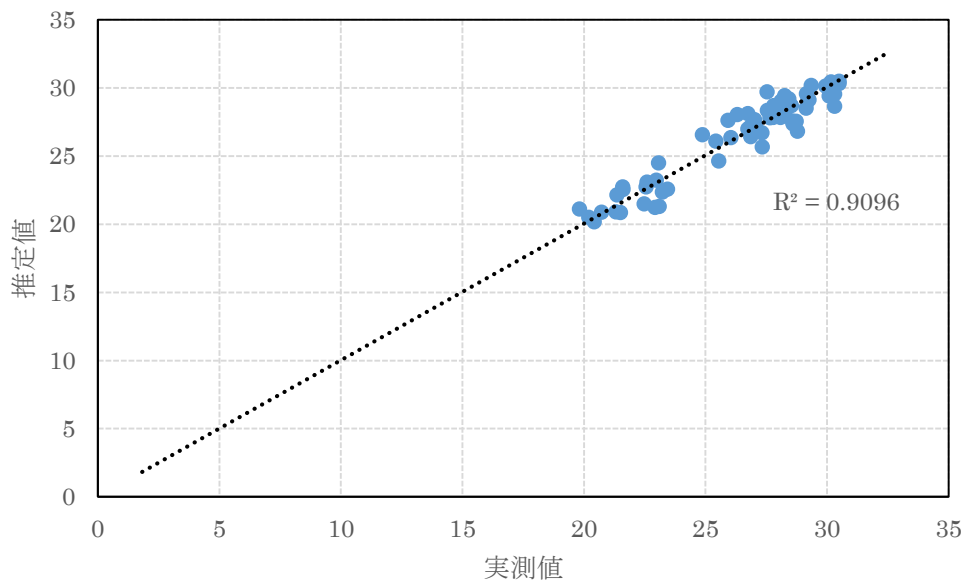


Figure3.16 : 平均気温の実測値と推定値の散布図

推定値の精度は比較的良好のため、今後はこの推定値を連続的な気温データとして使用する。

### 3.4.2.2 日射量データの修正結果

Figure3.13 の手法に従い，回帰分析を実施した結果が，Table3.5 である．そしてこれらパラメータを利用した日積算日射量の推定結果と実測値の散布図が，Figure3.17 である

Table3.5 : 日積算日射量と銚子市で計測された日積算日射量の回帰分析結果

日積算日射量			
	パラメータ	t 値	R <sup>2</sup>
$\alpha 1$	0.70	8.79	0.67
$\beta 1$	1.50	0.92	

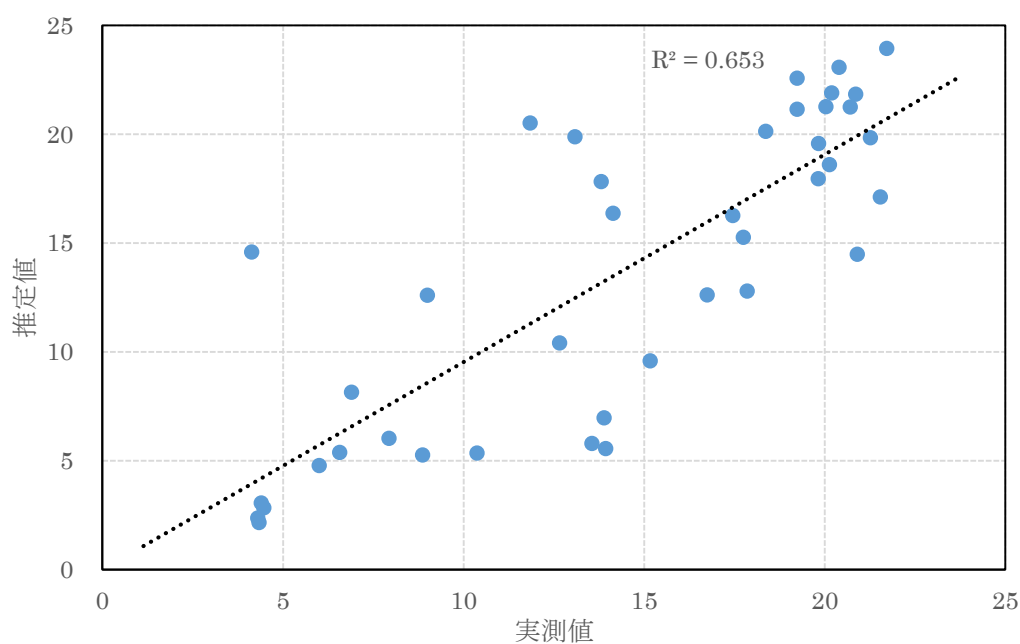


Figure3.17 : 日積算日射量の実測値と推定値の散布図

## 3.5 水稻生育データ解析

### 3.5.1 水稻生育調査の概要

水稻生育調査を 2015 年 7 月 26 日，ならびに 2015 年 9 月 1 日に，計 2 回実施した．

1 回目の調査では，調査項目は草丈，SPAD 値（葉緑素含量を示す値），穂数，出穂茎数の 4 項目である．なお第 1 回調査時（7/26）は出穂期間であったため，出穂茎数を調査項目

に加えた。1回目の調査時には、標本は太陽光パネル設置区間の非遮光区と中遮光区の2地区で各5サンプルずつ、計10サンプルにて調査を行った。

2回目の調査では、調査項目は草丈、SPAD値、穂数の3項目である。非遮光区と中遮光区、強遮光区の3地点で調査を実施した。サンプル数は非遮光区と中遮光区で各12サンプル、強遮光区で10サンプルの計34サンプルである。これら34サンプルは、後に米粒重量計測ならびに米粒外観品質分析を行うため、その場で刈り取った。また2回目の調査では穂数の標本数を増やすため、上記の調査に加えて無作為に選定した50サンプルにて穂数の追加調査を実施した。そのため2回目の調査では、穂数の標本数が84サンプル存在している。

### 3.5.2 水稻生育データの分析結果

水稻生育調査の結果をTable3.6とTable3.7に示す。1回目の調査では、遮光区・無遮光区間で草丈とSPAD値、穂数に有意な差が確認できなかった。一方、遮光区では出穂茎数が有意に少なかった。これは遮光条件により、出穂遅延が発生していることを示唆している。2回目の調査では、1回目の調査と同様に、草丈に有意な差が生じていなかった。しかし穂数とSPAD値に有意な差が確認でき、特に穂数が顕著に減少していた。これは生育初

Table3.6 : 1回目 (7/26) の水稻生育調査の結果

	全体 (n=10)		中遮光区 (n=5)		非遮光区 (n=5)		** p<0.01
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	* p<0.05 n.s. 有意差なし
草丈[cm/株]	113.9	4.0	113.8	2.2	114.0	1.7	n.s.
穂数[本/株]	25.0	5.5	27.4	1.2	22.6	3.3	n.s.
SPAD 値	41.2	4.2	39.9	2.2	42.5	1.8	n.s.
出穂茎数[本/株]	5.0	4.6	8.2	2.0	1.8	1.1	**

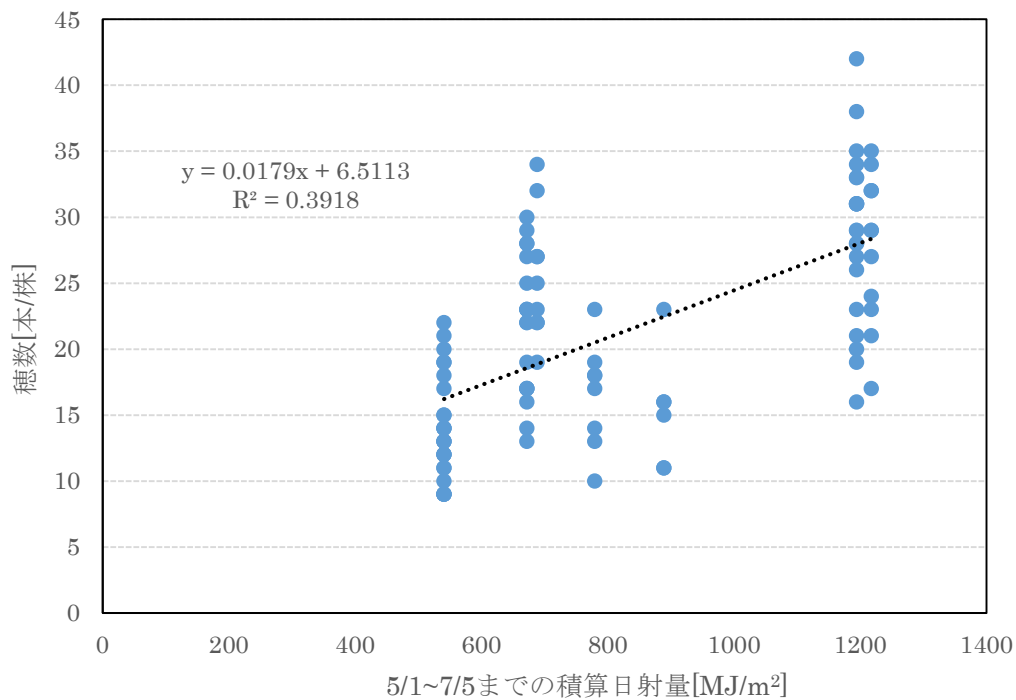
Table3.7 : 2 回目 (9/1) の水稻生育調査の結果

	全体 (n=34)		中遮光区 (n=12)		非遮光区 (n=12)		強遮光区 (n=10)		** p<0.01
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	* p<0.05
草丈[cm/株]	118.0	6.3	120.6	1.8	118.3	0.6	114.5	1.8	n.s.
穂数[本/株]	22.3	7.7	22.5	1.4	28.3	0.8	14.8	1.4	**
SPAD 値	36.3	2.8	38.1	1.8	35.2	0.8	35.4	1.6	*

Table3.8 : 米粒重量計測の結果

	全体 (n=34)		中遮光区 (n=12)		非遮光区 (n=12)		強遮光区 (n=10)		** p<0.01
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	* p<0.05
一穂重[g/穂]	2.2	0.4	2.3	0.4	2.4	0.3	1.9	0.3	*
籾重[g/株]	50.0	19.5	53.3	15.6	68.0	11.2	28.8	9.1	**

期の遮光処理が分げつ発生数を抑制し、最終的には穂数を減少させるという、既往の研究結果とも一致している。計 2 回実施した生育調査から、遮光条件は草丈と葉色には影響を及



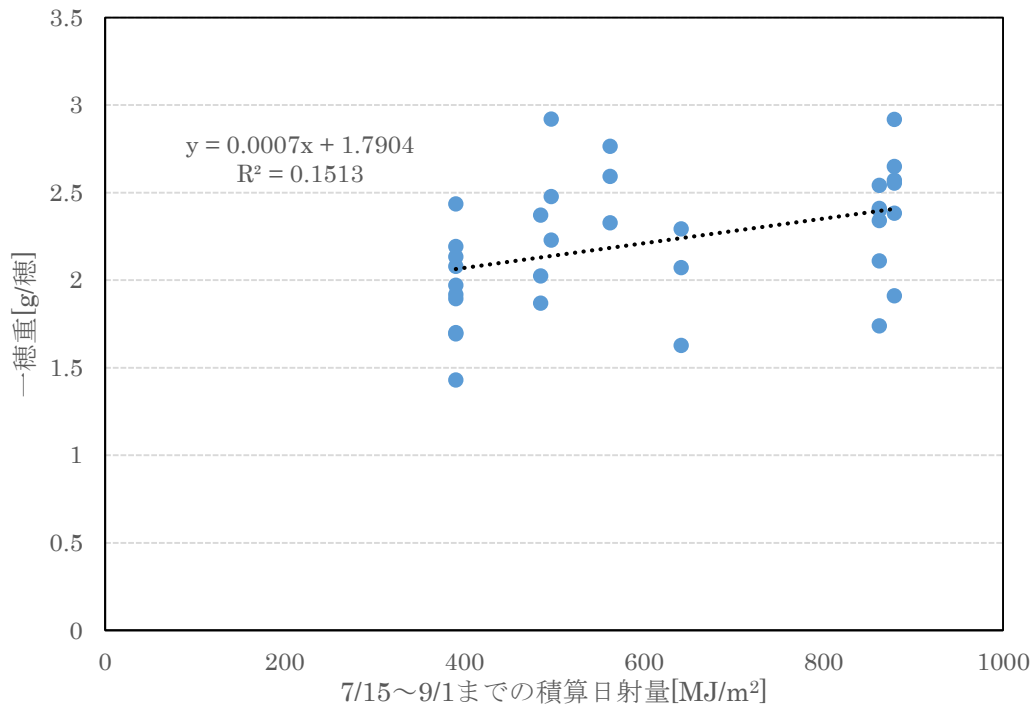


Figure3.19 : 登熟期の積算日射量と穂重の散布図

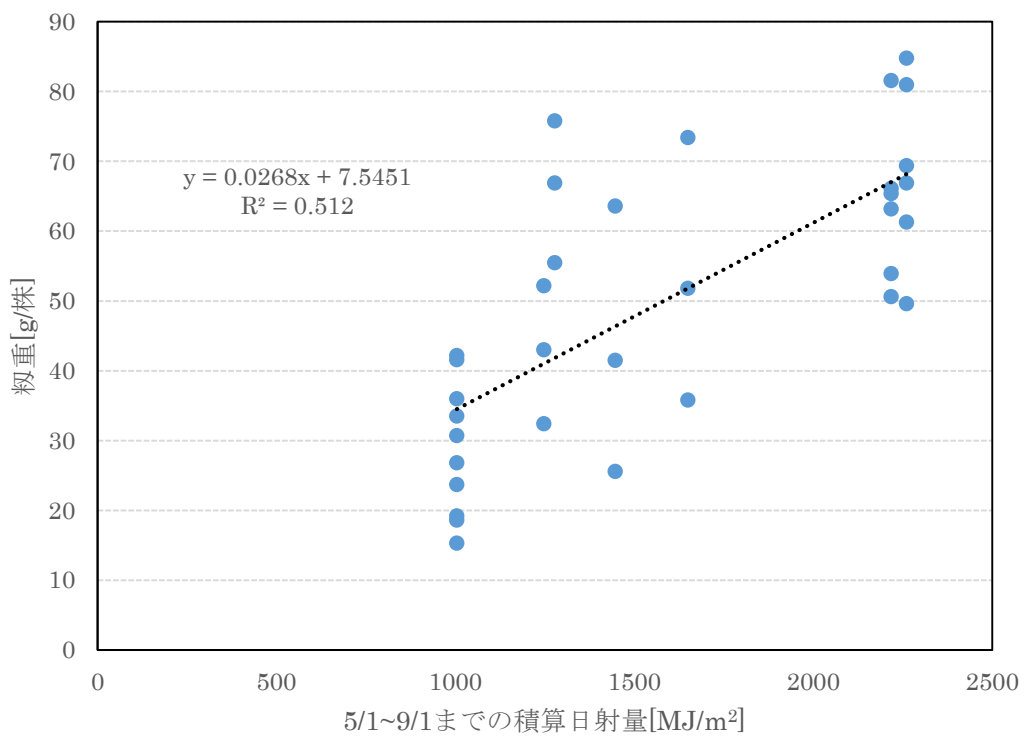


Figure3.20 : 移植日から収穫日までの積算日射量と粒重の散布図

ぼさないものの、出穂遅延を引き起こし、収穫時の穂数を減少させることが示唆された。

2 回目の生育調査時に収集した 34 検体で実施した米粒重量調査の結果が Table3.8 である。1 株あたりの籾重ならびに一穂重が、遮光により有意に減少していた。この結果から、遮光条件による減収が生じることが示された。

次に、標本の収集地点の最近地点である気象観測装置と各標本を対応づけ、気象要素と水稻生育データ間で回帰分析を実施した。気温データで解析を実施した結果、統計的な有意差が確認できなかったが、穂数、一穂重、籾重は全天日射量との間に有意な相関関係が存在していた。全天日射量と水稻生育データの散布図が Figure3.18~3.20 である。これらグラフの傾きの t 値は統計的に有意であった。

### 3.6 水稻外觀形質分析

#### 3.6.1 水稻外觀形質分析の概要

米買取価格の判断基準は米外觀形質であるため、遮光条件を課すことにより、米粒外觀形質に変化が生じているか否かを調査する必要がある。そこで、2 回目 (9/1) の水稻生育調査

Table3.9 : 米粒外觀品質の検査項目の定義(1)

調査項目(1)	詳細項目	定義
整粒米	整粒	被害粒, 死米, 未熟粒, 異種穀粒及び異物を除いた粒
胴割米	胴割粒	粒平面に亀裂がすっきり通っている粒
未熟米	乳白粒	胚乳部の横断面に白色不透明な部分がリング状となっている粒
	基部未熟粒	基部の白色不透明な部分の大きさが, その粒長の 5 分の 1 以上の粒
	腹白未熟粒	腹部の白色不透明な部分の大きさが, その粒長の 3 分の 2 以上でかつ, 粒幅の 3 分の 1 以上の粒
	青未熟粒	粒表面に葉緑素が残り緑色を呈している粒
	その他未熟粒	乳白粒, 心白粒, 青未熟粒, 基部未熟粒, 腹白未熟粒, 背白粒以外の成熟していない粒
着色米	全面着色粒	着色の濃淡に係わらず, 着色が粒表面にある粒
	部分着色粒	着色の濃淡に係わらず, 着色が粒の一部にある粒で, 着色の大きさが直径 1mm 以上ある粒
	赤粒	粒表面の一部に赤条等が残り, 赤条等の長さの合計がその粒の長さの 2 倍以上の粒

(出典) 農林水産省, 玄米の検査規格<sup>[3.4]</sup>



Table3.10 : 米粒外観品質の検査項目の定義(2)

調査項目(2)	詳細項目	定義
被害米	砕粒	砕けた粒
	発芽粒	発根又は発芽している粒
	芽腐れ粒	胚又は胚乳部が腐敗した粒
	茶粒	粒表面が茶褐色を呈する粒
	斑点粒	通常のとう精によって、着色が除かれないもののうち、着色の大きさが、直径 1 ミリメートル未満の粒
	虫害粒	虫により食害された粒
	病害粒	菌、ウイルス等により損傷を受けた粒
	奇形粒	胚乳部に切れ込みがある粒、厚みがなくねじれている粒、無胚芽粒の合計値
	その他被害粒	上記以外の被害米
死米	青死粒	粒の大部分が粉状質の粒で光沢のないもののうち緑色の粒
	白死粒	粒の大部分が粉状質の粒で光沢のないもののうち白色の粒

(出典) 農林水産省，玄米の検査規格<sup>[3.4]</sup>

で採取したサンプルの外観形質分析を株式会社サタケに依頼した。採取したサンプルは 34 検体，株式会社サタケが提供している「米総合分析サービス」の米粒外観形質分析を利用した。各検査項目の定義が農林水産省により定められているため，Table3.9 と Table3.10 で紹介する。

### 3.6.2 水稲外観形質分析の結果

株式会社サタケに依頼した 34 検体の分析結果を「付録 C」に掲載する。これら分析結果に統計的な処理を施した表が Table3.11 である。米粒外観形質分析の結果、太陽光パネル区では不完全米（死米、乳白米、青未熟米）の有意な増加が確認できた。一方、胴割米や着色米は太陽光パネル区での増減が確認できなかつたため、これらは全天日射量の多寡に影響されない可能性が高い。

遮光条件により有意な品質劣化を示した死米と未熟米（乳白米、基部未熟米、青未熟米）と計測した全天日射量データ間で回帰分析を行った。Figure3.21 が 100g 中の玄米重量に占める死米重量の割合と 7/15~9/1 までの積算日射量の散布図、Figure3.22 が 100 g 中の玄

Table3.11：米粒外観形質分析の結果

調査項目	詳細項目	平均値 (g/全精米重)			** p<0.01
		中遮光区 (n=12)	非遮光区 (n=12)	強遮光区 (n=10)	* p<0.05 n.s. 有意差なし
整粒米	整粒	71.7	66.8	65.4	*
胴割米	胴割粒	0.1	0.0	0.1	n.s.
未熟米	乳白粒	3.7	6.3	9.1	**
	基部未熟粒	4.1	1.6	2.5	**
	腹白未熟粒	1.2	0.9	1.0	n.s.
	青未熟粒	1.2	3.7	1.6	**
	その他未熟粒	14.9	15.5	12.6	n.s.
着色米	全面着色粒	—	—	—	—
	部分着色粒	0.5	0.6	0.3	n.s.
	赤粒	—	—	—	—
被害米	碎粒	0.2	0.4	0.5	**
	発芽粒	—	—	—	—
	芽腐れ粒	—	—	—	—
	茶粒	0.6	0.2	0.1	*
	斑点粒	—	—	—	—
	虫害粒	—	—	—	—
	病害粒	—	—	—	—
	奇形粒	1.1	0.8	1.4	*
その他被害粒	—	—	—	—	
死米	青死粒	0.5	2.7	4.9	**
	白死粒	0.4	0.6	1.3	**

米重量に占める全天日射量の影響を受ける未熟米重量(基部未熟米, 青未熟枚, 乳白米)の割合と 7/15~9/1 までの積算日射量の散布図である. これらグラフの傾きの t 値は, 統計的に有意であった.

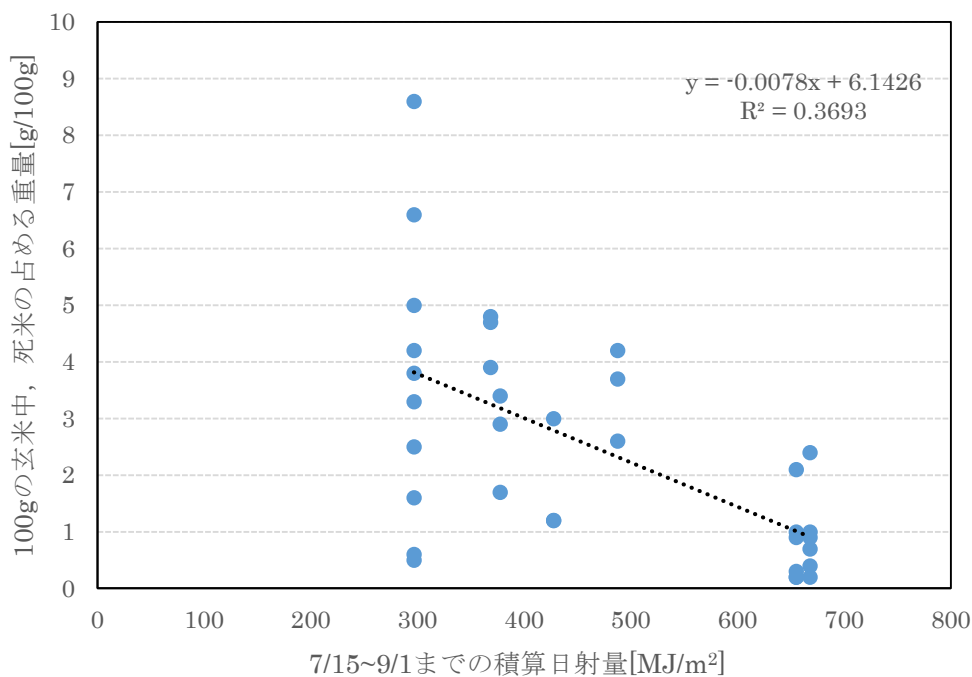


Figure3.21 : 死米発生割合と全天日射量の散布図

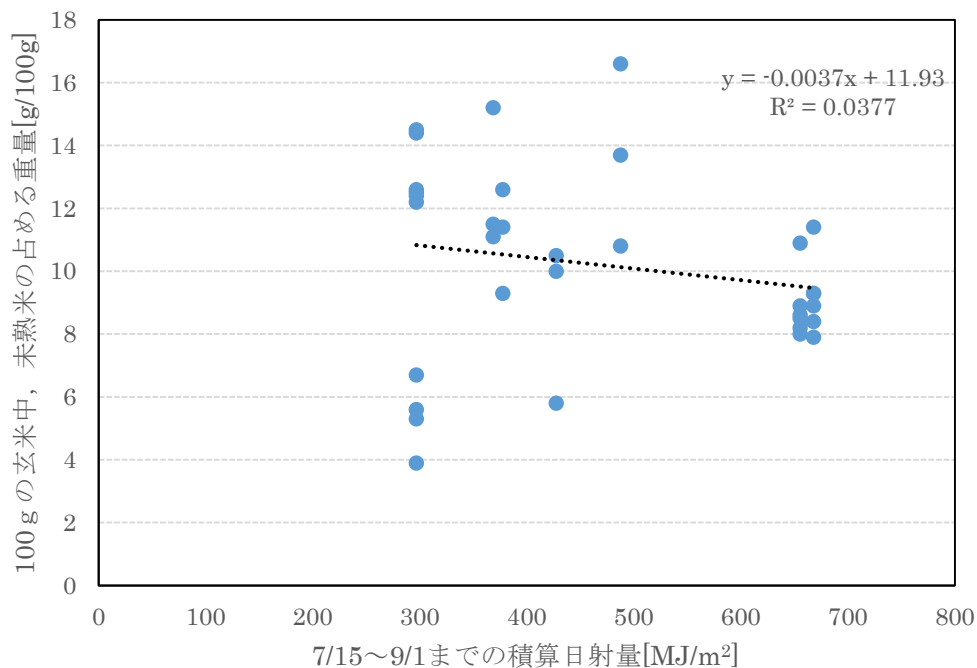


Figure3.22 : 未熟米発生割合と全天日射量の散布図

### 3.7 まとめ

太陽光パネル下の遮光条件が形成されている環境で成長した水稲は減収に加えて、不完全米（死米、乳白米、青未熟米）の有意な増加による品質劣化が生じていた。穂数の減少による減収への寄与が大きいと、水稲栽培における営農型太陽光発電では、穂数が決定される有効分げつ期の日照条件を改善するような措置が必要と考えられる。

また 2.2.1.2 で紹介した遮光実験の先行研究から得られた知見を統合して作成した、収量の構成要因と日照条件の関係を表す Figure3.24 から、1 穂粒数や 1000 粒重、登熟歩合という穂数以外の収量構成要素は、生育中期と後期に決定されることがわかる。水稲品質も同様に生育中期と後期に決定される。そのため、収量ならびに品質確保のためには、生育初期と同様に、生育中期、生育後期の日照条件を改善するような措置が必要である。日照条件の改善策には谷ら<sup>3.5)</sup>の提案による散乱光の利用、または太陽光パネルの設置角度の変更、太陽光パネルの設置高度の上昇、などがあげられる。

水稲は施肥条件と日照条件に応じて、収穫時の穂数が決定されるという点が指摘されている。玉置ら<sup>3.6)</sup>の実証試験で得られた結果が、Figure3.24 である。施肥条件と遮光条件を組み合わせ水稲を栽培し、実証試験を実施して得られた結果であるが、十分に検討できているとは言い難い。ゆえに今後の課題として、通年の遮光条件に異なる施肥条件を組み合わせた実証研究を実施する必要がある。また遮光条件により有効分げつ期間の延長が生じるが、この有効分げつ期間の延長に対応した中干しタイミングの決定と水管理手法の改善は行われていない<sup>3.7)</sup>。ゆえに、異なる遮光条件に応じた最適な栽培手法、水管理手法の開発も必要となる。

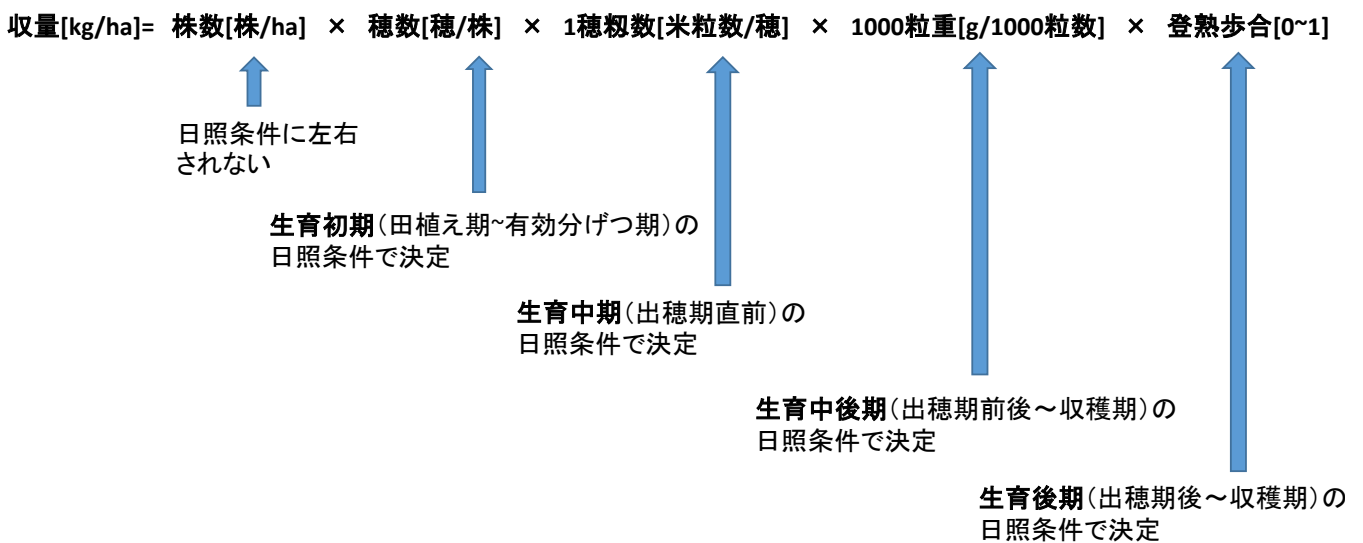


Figure3.24 : 水稲収量の構成要素と日照条件の関係

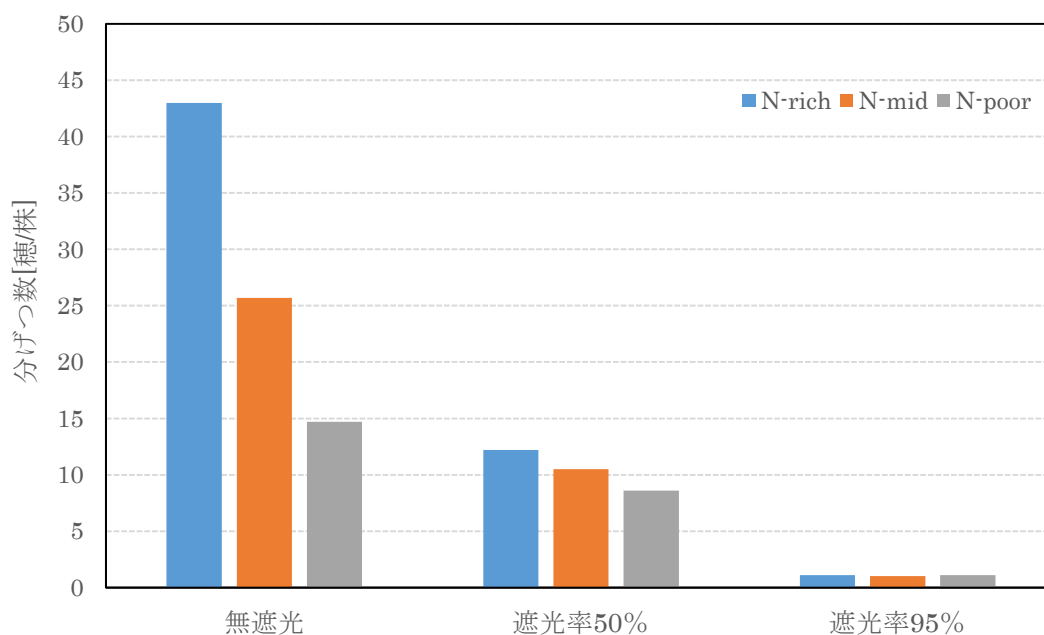


Figure3.24：異なる施肥条件（窒素分）と遮光条件で栽培した  
 水稻の分げつ発生数  
 （出典）玉置ら<sup>[3.6]</sup>

### 3.8 参考文献

- [3.1] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, Y. Ferard; Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes, *Renewable Energy*, 36 (2011), pp. 2725–2732.
- [3.2] Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5;  
<http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>
- [3.3] 気象庁; 過去の気象データ・ダウンロード,  
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>
- [3.4] 農林水産省; 玄米の検査規格,  
[http://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/k\\_kikaku/](http://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/k_kikaku/)
- [3.5] 谷 晃, 管 敬, 坂見 拓也; 営農継続型太陽光発電におけるイネの生育と微気象環境, 2015 年生態工学会年次大会発表論文集, (2015), pp. 43–44.
- [3.6] 玉置 雅彦, 山本 由徳; 遮光および施用窒素量が水稻の出葉速度と分げつ発生に及ぼす影響：とくに出葉転換点に着目して, *日本作物學會紀事*, 66(1997), pp. 29–34.
- [3.7] 中野 尚夫; 生育初期の遮光が水稻の生育および収量構成要素に及ぼす影響, *日本作物學會紀事*, 69(2000), pp. 182–188.

## 4 水稲生育モデルの修正・開発

### 4.1 SIMRIW の構造

本研究では、第2章で紹介した、各日の気象データから水稲の生育過程を模倣し、各日の気象データから逐次的に計算することで水稲収量を推定するプロセスモデルであるSIMRIW(Simulation Model for Rice-Weather Relations)を使用する。SIMRIWは移植日から出穂日、そして収穫日という水稲の各生育段階を予測するDVIモデル、葉面積および光合成による同化産物を予測するバイオマス生産モデル、登熟量や稔実の程度について予測する収穫指数モデルという、3種類のサブモデルを組み合わせることで構築されている。DVIモデルは日平均気温[°C/日]と可照時間[h/日]、バイオマス生産モデルは日全天日射量[MJ/m<sup>2</sup>/日]、収穫指数モデルは日平均気温[°C/日]と日最高気温[°C/日]が説明変数として与えられている。補助資料として第2章に記載したSIMRIWの計算プロセスの模式図をここで再掲する。

Table4.1はSIMRIWで使用するパラメータの概要である。この表は田中ら[4.1]に掲載されていた図表を参考とし、一部改変したものである。SIMRIWで使用する固有パラメータは堀江ら[4.2][4.3]が算出した数値を本研究では利用する。Table4.2が水稲の品種ごとの固有パラメータである。以降では、SIMRIWの計算式を記述する。

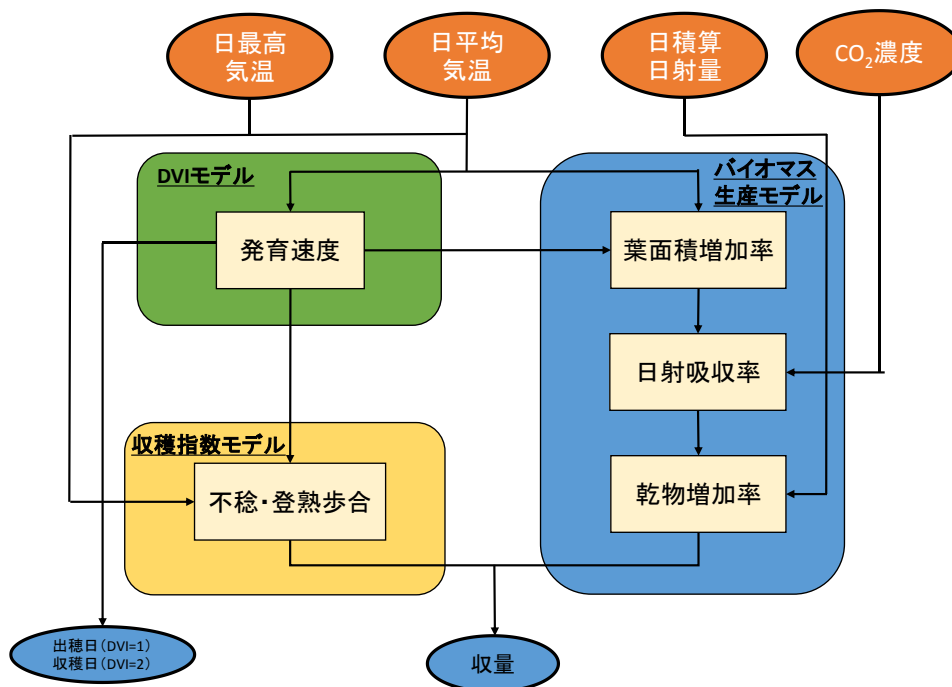


Figure4.1 : SIMRIW の構造 (Figure2.13 の再掲)

Table4.1 : SIMRIW で使用する固有パラメータの概要

パラメータ名		パラメータの内容	
$G_v$	生物季節学に関する パラメータ(DVR 計算用)	移植~出穂 ( $0 < DVI < 1$ )	出穂までの最小日数
$A_t$			温度係数
$T_h$			DVR が最適温度における半分となる温度
$B_L$			日長係数
$L_c$			限界日長
$DVI^*$			日長感受性を生じるときの DVI
$T_{cr}$	出穂~収穫 ( $1 \leq DVI < 2$ )		実験による定数
$G_r$			登熟までの最小日数
$K_r$			実験による定数
$k$	乾物重生産に関するパラメータ		葉の吸光係数
$C$			CO <sub>2</sub> が 330ppm のときの 日射変換係数
$B$			実験による定数
$t$			実験による定数
$R_m$			実験による定数
$K_c$			実験による定数
$H_m$	最大収量インデックス		ジャポニカ米か インディカ米 により異なる
$CTR$	出穂~収穫 ( $1 < DVI \leq 2$ ) のときの生育限界温度		
$A$	葉面積計算のためのパラメータ		理想条件でのLAI 最大成長率
$K_f$			実験による定数
$\delta$			実験による定数
$F_{as}$			気温が非限定時のLAI 漸近値
$T_{cr}$			LAI 成長に必要な最低温度
$c$			実験による定数
$r_f$			植生反射定数
$r_0$			地表面反射係数
$m$			散乱係数
$T^*$			低温による小穂不稔に関するパラメータ( $0.75 < DVI < 1.2$ )
$K_h$			
$\gamma_0$			
$K_q$			
$C_{cool}$			
			品種によらず 同じ値

(出典) 田中ら[4.1]

Table4.2 : SIMRIW で使用する固有パラメータ

パラメータ名	コシヒカリ	ササニシキ	イシカリ	日本晴	ミズホ
$G$	51.3	51	51.03	59.6	59.9
$At$	0.365	0.51	0.29	0.361	0.408
$T_h$	17.8	17.1	17.6	18.47	17.9
$BL$	0.566	0.53	0.66	0.558	0.607
$Lc$	16	15.96	23.55	16.2	15.66
$DVI^*$	0.23	0.25	1	0.39	0
$Tcr$	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
$Gr$	30.7	30.7	30.7	30.7	30.7
$Kr$	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071
$k$	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
$C$	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95
$B$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
$t$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$R_m$	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54
$Kc$	1787	1787	1787	1787	1787
$H_m$	0.38	0.4	0.42	0.36	0.34
$CTR$	11	11	10	11	11
$A$	0.247	0.247	0.255	0.247	0.247
$K_f$	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
$\delta$	0.723	0.723	0.723	0.723	0.723
$F_{as}$	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
$T_{cr}$	11.5	11.5	10.2	11.5	11.5
$c$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$r_f$	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
$r_0$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$m$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
$T^*$	22	22	22	22	22
$K_h$	5.57	5.57	5.57	5.57	5.57
$\gamma_0$	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
$K_q$	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054
$C_{cool}$	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56

(出典) 堀江ら<sup>[4.2]</sup>, 堀江ら<sup>[4.3]</sup>



## DVI モデル

発育指数 (*DVI: Development Index*) は日別の発育速度 (*DVR: Development Ratio* [day<sup>-1</sup>]) の積分で与えられる. *DVR* は日平均気温[°C/日]と可照時間[h/日]の関数である.

$$DVI = \sum_{j=0}^i DVR_j \quad (4.1)$$

$$DVR = \frac{1}{G_v(1 + \exp[-A_t(T - T_h)])} \quad ; DVI < DVI^* \quad (4.2)$$

$$DVR = \frac{1 - \exp[B_L(L - L_c)]}{G_v(1 + \exp[-A_t(T - T_h)])} \quad ; DVI^* \leq DVI < 1, L < L_c \quad (4.3)$$

$$DVR = 0 \quad ; DVI^* \leq DVI < 1, L > L_c \quad (4.4)$$

$$DVR = \frac{1 - \exp[-k_r(T - T_{cr})]}{G_r} \quad ; 1 \leq DVI < 2 \quad (4.5)$$

ここで使用されているパラメータ ( $G, A_t, T_h, DVI^*, B_L, L_c, A_t, k_r, T_{cr}, G_r, K_r$ )は水稻の品種ごとに異なる. これらは実証試験を行うことにより推定するパラメータである.

なお  $G_v$  は, CO<sub>2</sub> 濃度により変化する移植日から出穂日までの最小日数であり, 次式で表される.

$$G_v = G[1 - \alpha(C_a - 350)] \quad (4.6)$$

(4.6)式は大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇に伴い, 出穂までの生育期間が短縮される水稻の生理学的特徴を表している.  $\alpha$  は CO<sub>2</sub> 濃度の感受性を表すパラメータであり, 本研究では横沢ら<sup>[4.4]</sup>を参考として,  $\alpha$  の数値を  $1.14 \times 10^{-4}$  とする. 2013 年度の茨城県の気象条件で再現した, DVI モデルの算出値が Figure4.2 である. 品種はコシヒカリ, 移植した稚苗の DVI 初期値を 0.2 とし, 移植日を 5 月 5 日と設定した.

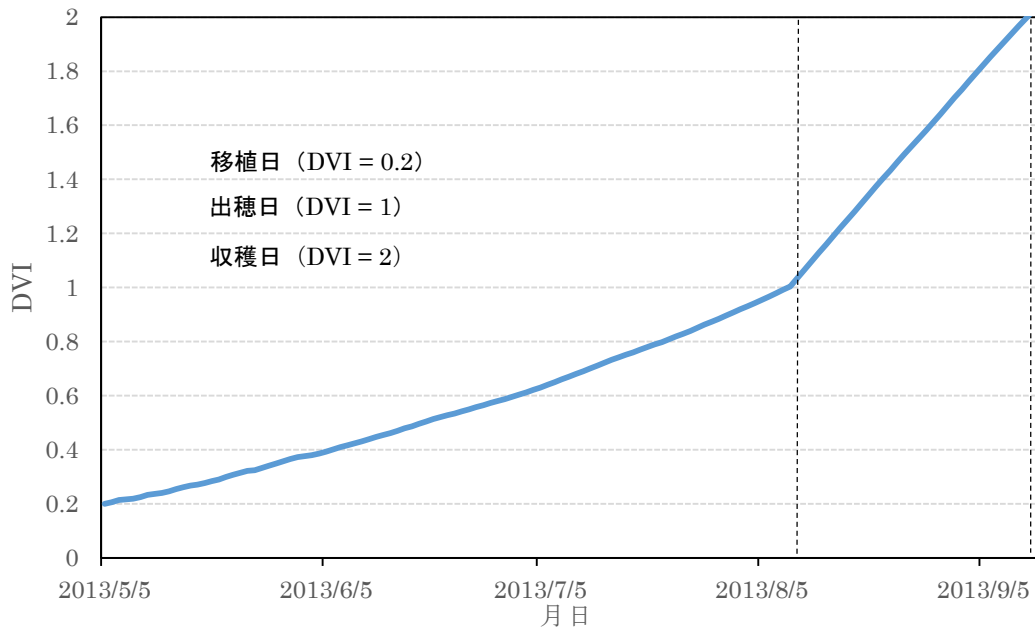


Figure4.2 : 2013 年の気象データから算出した DVI

### バイオマス生産モデル

水稻の根を含めた乾燥重量 ( $DW$ : *Dry Matter* [t/ha]) は, 日別のバイオマス量の増分  $DW_j$  [g/m<sup>2</sup>/day] を積算して得られる.

$$DW = \sum_{j=0}^i DW_j \quad (4.7)$$

$$DW_j = S_s C_s \quad (4.8)$$

$S_s$  は稲の葉群で吸収された日射エネルギー [MJ/m<sup>2</sup>] であり,  $C_s$  は光・乾物変換係数 [g/MJ/m<sup>2</sup>] を表す.

$$S_s = S_0(1 - S - r) \quad (4.9)$$

$S_0$ は日積算日射量 [MJ/m<sup>2</sup>/day],  $r$ ならびに  $S$ は, 葉の反射率[0~1]を表す.

$$S = (1 - r_0) \exp[-kF(1 - m)] \quad (4.10)$$

$$r = r_f - (r_f - r_0) \exp\left(-\frac{F}{2}\right) \quad (4.11)$$

$r_0$  は地表面の反射率[0~1],  $m$  は散乱係数[0~1],  $k$  は葉の吸光係数[0~1],  $F$  は単位面積あたりの葉面積と単位面積の比率である葉面積指数 (LAI : Leaf Area Index [m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]),  $r_f$ は土壌が完全に植物群落に覆われている場合の光の反射率[0~1]を表す.

葉面積指数  $F$ は次式で与えられる.

$$F = \sum_{j=0}^i F_j \quad (4.12)$$

$$F_j = A \cdot a \cdot b \quad ; 0 \leq DVI < 1 \quad (4.13)$$

$$F_j = -F_j \cdot [1 - c] \cdot DVR_j \quad ; 1 \leq DVI < 2 \quad (4.14)$$

葉面積指数の計算式には, 葉面積が移植日から出穂日まで( $0 \leq DVI < 1$ )は増加し, 出穂日から収穫日まで( $1 \leq DVI < 2$ )は減少するという水稻の生理学的知見が反映されている.  $C$  は実験により推定される定数である.

$$a = 1 - \exp[-K_f(T - T_{cf})] \quad (4.15)$$

ここで  $K_f$ は実験により推定される定数,  $T_{cf}$ は LAI 成長に最低限必要な温度を表す定数である.

$$b = 1 - \left[\frac{F_j}{F_{as}}\right]^\delta \quad (4.16)$$

$F_{as}$ は気温が非限定時の LAI 漸近値,  $\delta$ は実験による定数である.

(4.8)式の光・乾物変換係数  $C_s$  は, 大気中の  $\text{CO}_2$  濃度により変化する.

$$C_s = C_0 \left[ 1 + \frac{R_m(C_a - 330)}{C_a - 330 + K_c} \right] \quad (4.17)$$

$R_m$  および  $K_c$  は経験定数,  $C_a$  は大気中の  $\text{CO}_2$  濃度 [ppm],  $C_0$  は生育ステージに依存した係数である.  $C_0$ は出穂日( $0 < \text{DVI} < 1$ )までは一定値を取り, 登熟期( $1 \leq \text{DVI} < 2$ )は収穫日に近づくに従い減少する.

$$C_0 = C \quad ; \quad 0 < \text{DVI} < 1 \quad (4.18)$$

$$C_0 = \frac{C(1 + B)}{1 + B \exp \beta} \quad ; \quad 1 \leq \text{DVI} < 2 \quad (4.19)$$

$$\beta = \frac{\text{DVI} - 1}{t} \quad (4.20)$$

$C$ ,  $B$ ,  $t$  は実験により得られる定数である.

2013 年度の茨城県の気象条件で再現した LAI モデルおよびバイオマス生産モデルの推定値が Figure4.3 と Figure4.4 である. 品種はコシヒカリ, 移植した稚苗の LAI 初期値を 0.08, 乾物量初期値を 18[kg/10a]とし, 移植日は 5 月 5 日と設定した.

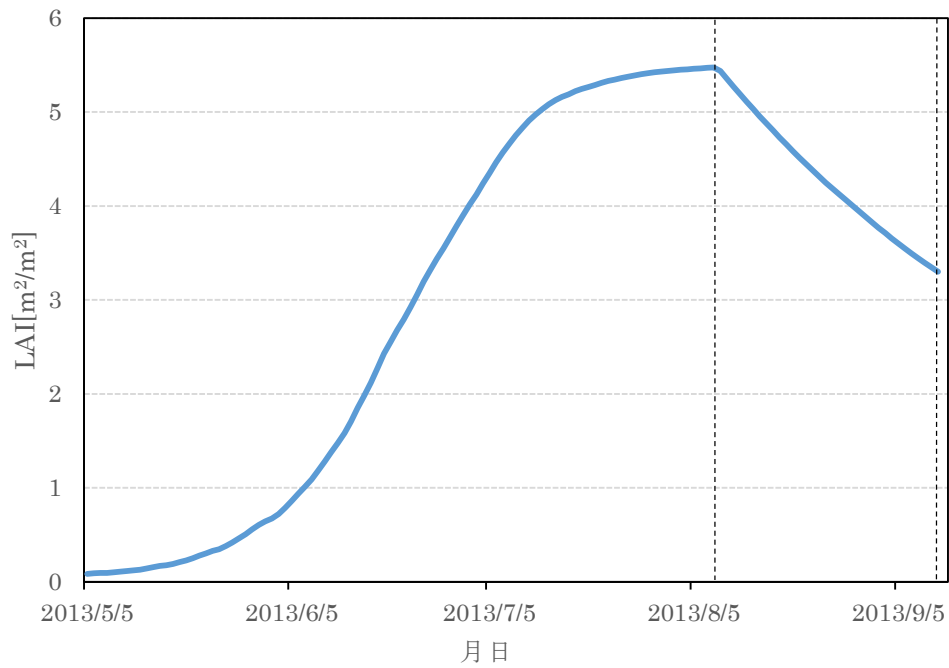


Figure4.3 : 2013年の気象データから算出した LAI

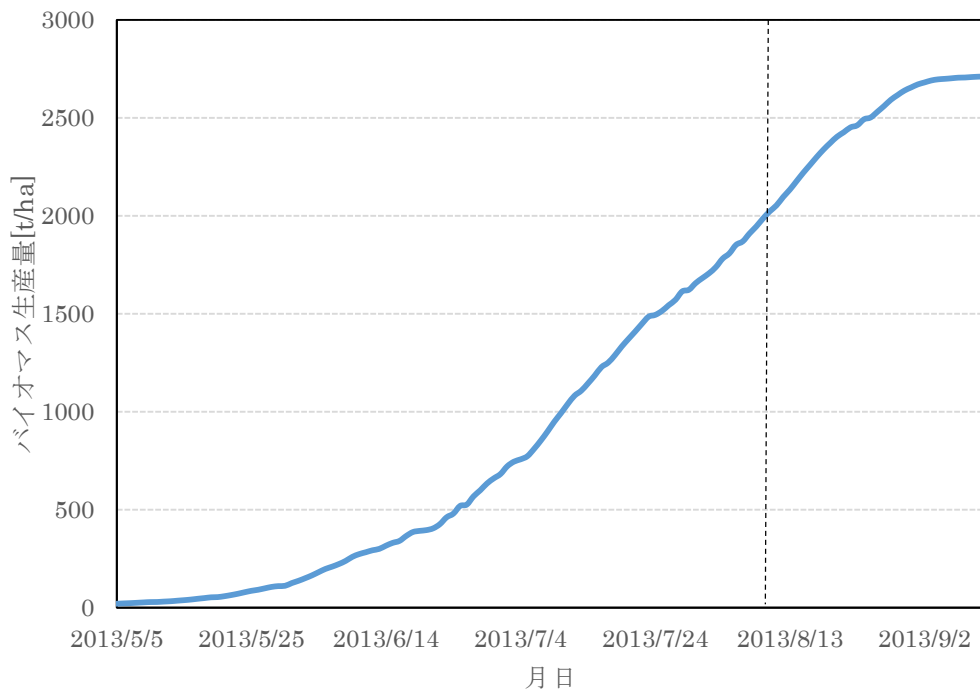


Figure4.4 : 2013年の気象データから算出したバイオマス生産量

## 収穫指数モデル

子実形成過程における低温条件，あるいは高温条件により，水稻の最終収量が決定される．この高低温による減収効果は収穫指数(*HI* : *Harvest Index*)を用いて表現できる．低温による減収効果を  $h_c$ ，高温による減収効果を  $h_h$  として，収穫指数  $h$  はどちらかの最小値を採用する．

$$h = \min(h_c, h_h) \quad (4.21)$$

低温による減収効果は次式で表現する．

$$h_c = h_m \gamma (1 - \gamma_c) \quad (4.22)$$

$h_m$  は水稻の品種により遺伝的に決定される収穫係数の最大値， $\gamma$  は生育遅延により生じる不稔率， $\gamma_c$  は低温条件により引き起こされる不稔率である．

$$\gamma = 1 - \exp(-K_h(DVI_j - 1.22)) \quad (4.23)$$

$K_h$  は実験により得られる定数である．

$$\gamma_c = \gamma_0 - K_q Q^{C_{cool}} \quad (4.24)$$

$C_{cool}$  は気温に対する不稔率応答の曲率を表し， $Q$  は低温の程度を表す冷却指数 [°C] である． $K_q, \gamma_0$  は実験により得られる定数である．

$$Q = \sum_{j=0}^i (T^* - T_j) \quad ; 0.75 < DVI < 1.2 \quad (4.25)$$

$T^*$  は最低気温の閾値を表している．ここでは，低温障害が閾値以下の平均気温の積算値により決定されるという，Cooling-Degree Days の考え方<sup>[4.5]</sup>が採用されている．

高温による影響は以下の式で表現される.

$$h_h = h_m \gamma (1 - \gamma_h) \quad (4.26)$$

$h_m$  は水稻の品種により決定される収穫係数の最大値,  $\gamma$  は生育遅延により生じる不稔率,  $\gamma_h$  は高温条件による不稔率である.

$$\gamma = 1 - \exp(-K_h(DVI_j - 1.22)) \quad (4.27)$$

(4.27) 式は低温障害の算出時に利用した, (4.23)式と同じ式である.

$$\gamma_h = \frac{1}{\{1 + \exp[-0.853(T_M - 36.6)]\}} \quad ; 0.96 < DVI < 1.22 \quad (4.28)$$

$T_M$ は開花時 ( $0.96 < DVI < 1.22$ ) の平均日最高気温である. 開花時の高温条件は稔実不稔を引き起し, 減収を生じさせるため, 開花時の平均最高気温の増加に従い, 不稔率を増加させる (4.28) 式が用いられている<sup>[4.6]</sup>.

例えば, 1980年~2014年までの茨城県の気象データを利用して算出した収穫指数  $h$  の推定値が Figure 4.5 である. モデルで定義されている開花期前後 ( $0.75 < DVI < 1.22$ ) の時期に高低温が計測された 1995年, 2007年, 2010年は, 収穫指数が減少していることがわかる. 収穫指数は, バイオマス量に占める籾の割合を表しているため, この3ヶ年は高低温による減収が生じたことになる.

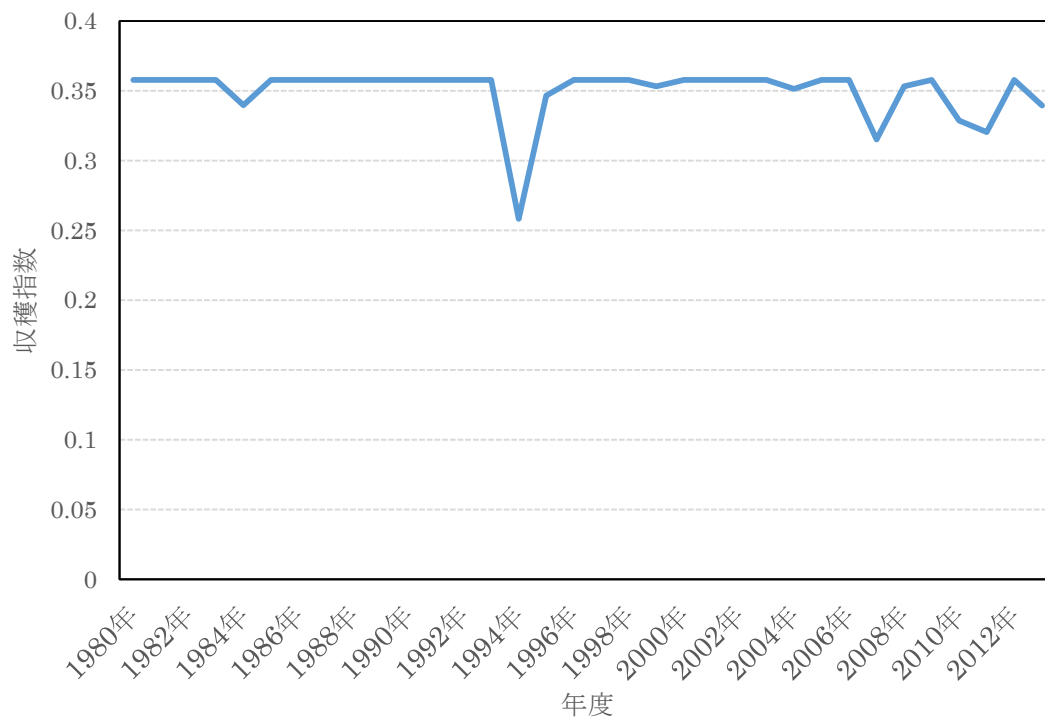


Figure4.5 : 1980~2013 年の気象データから算出した收穫指数

### 最終収量の計算

DVI モデル，バイオマス生産モデル，收穫指数モデルという 3 種のサブモデルを各日の気象データから逐次的に計算することで，收穫時のバイオマス量  $DW$  [t/ha]，そしてバイオマス量の内，粃が占める割合である收穫指数  $h$  [0~1]を得ることができる。

理論的には，バイオマス量に收穫部の割合である收穫指数を乗じることで，水稻の収量を予測できる。しかしこの収量は完全な栽培条件を想定した「潜在収量」であり，気象要素以外の要因（虫害や雑草害など）による減収効果が反映されていない。

そこで統計値を「実収量」，SIMRIW の予測値を「潜在収量」として，両者の比率である技術係数 ( $\tau$ ) を算出する。



$$\tau = Y^* / (DW \cdot h) \quad (4.29)$$

$Y^*$  は各都道府県で公表されている水稲の単位面積あたりの収量である。実収量と潜在収量の比率を計算することで、両者の比率として定義される技術係数( $\tau$ )が算出できる。そして、(4.29)式により得られた技術係数を外生的に与えることにより、SIMRIW では収量が (4.30) 式のように算出できる。

$$Y = \tau \cdot h \cdot DW \quad (4.30)$$

$Y$ は水稲収量の予測値[t/ha],  $h$  は収穫指数[0~1],  $DW$ はバイオマス量[t/ha],  $\tau$ は技術係数[0~1]である。以上の計算手法に従い、日別の気温、全天日射量時系列データを用い、計算機で逐次的に計算することで、水稲収量を推定することができる。Figure4.6 は SIMRIW を計算機に実装し、シミュレーションを行う際のフローチャートである。

この手順に従い算出した水稲収量の推定値が Figure4.7 である。ここでは、1980年~2014年までの茨城県の気象データを利用している。品種はコシヒカリ、DVI 初期値を 0.2, 移植した稚苗の LAI 初期値を 0.08, 乾物量初期値を 18[kg/10a], 技術係数を 0.65, 移植日は 5月 5日と設定した。

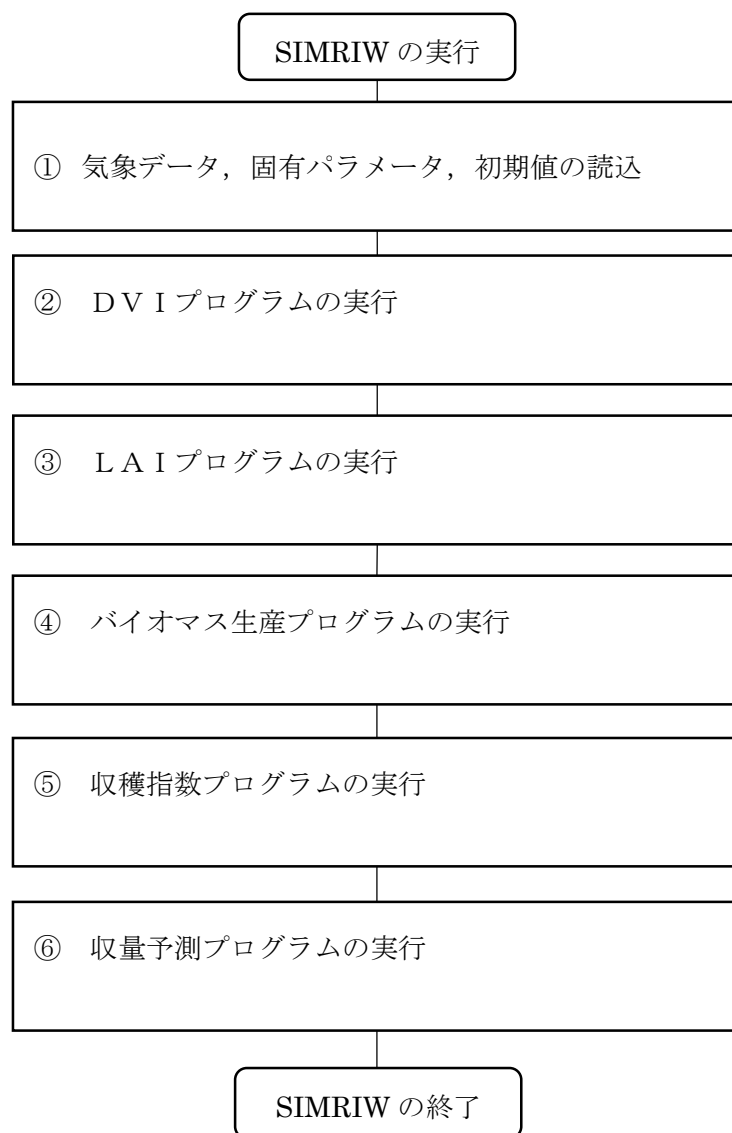


Figure4.6 : SIMRIW のフローチャート

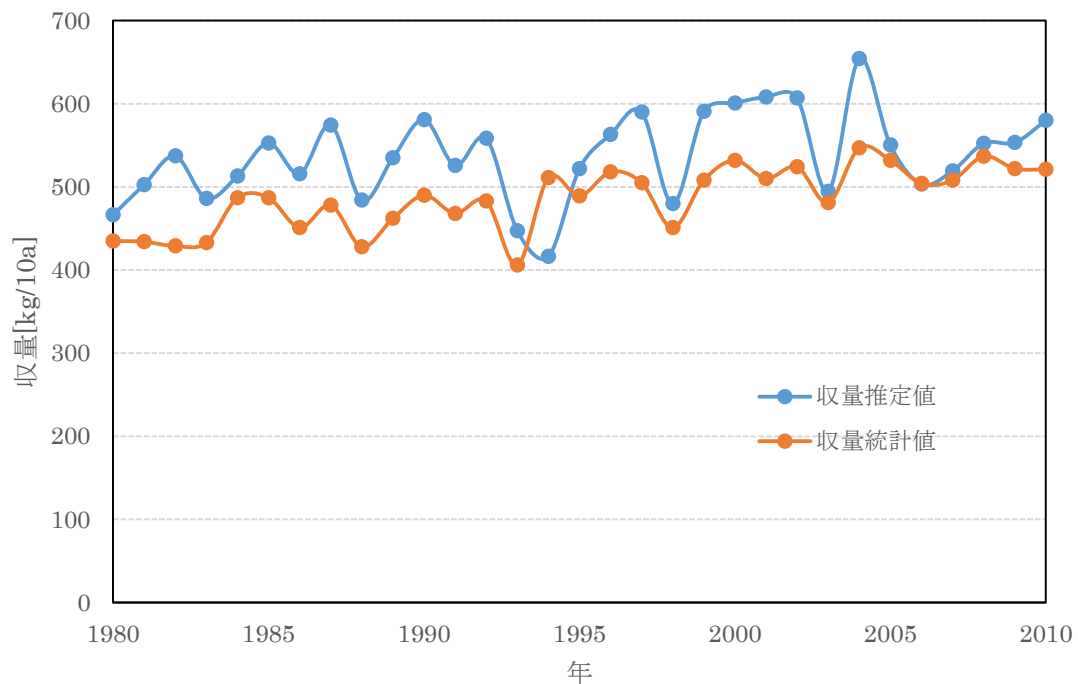


Figure4.7 : SIMRIW の推定値

以上が SIMRIW の計算式，ならびに計算機に実装する手順の概略，そして SIMRIW の推定結果である。

#### 4.2 SIMRIW の課題

SIMRIW は比較的精度よく水稻収量を予測できるプロセスモデルである一方，3 点の課題も存在している．1 点目は，DVI モデルが日平均気温のみで説明されていることである．生育初期の日照条件が出穂日の遅早に関係しているため，人為的に遮光条件を生じさせる営農型太陽光発電のシミュレーションに SIMRIW を利用するためには，既存の DVI 計算式の説明変数に，全天日射量の項を加える必要がある．2 点目は，収穫指数モデルが日平均気温と日最高気温という，気温の変数のみで説明されていることである．第 3 章で明らかにしたように，生育初期の遮光条件は穂数と一穂重に減少させ，収量を減少させる．また生育後期の遮光条件も粒数と 1000 粒重の減少をもたらし，収量を減少させる．ゆえに収穫指数モデルに遮光条件による穂数，一穂重の減少を，別途組み込む必要がある．上記 2 点の課題は，Figure4.8 の赤矢印として表現することができる．黒矢印が既存の計算プロセスであり，赤矢印が本研究で新たに付け加え，SIMRIW に修正を加える計算プロセスである．3 点目は，技術係数が外生的に一定値を与えられている点である．一定値を与えるため，年々精

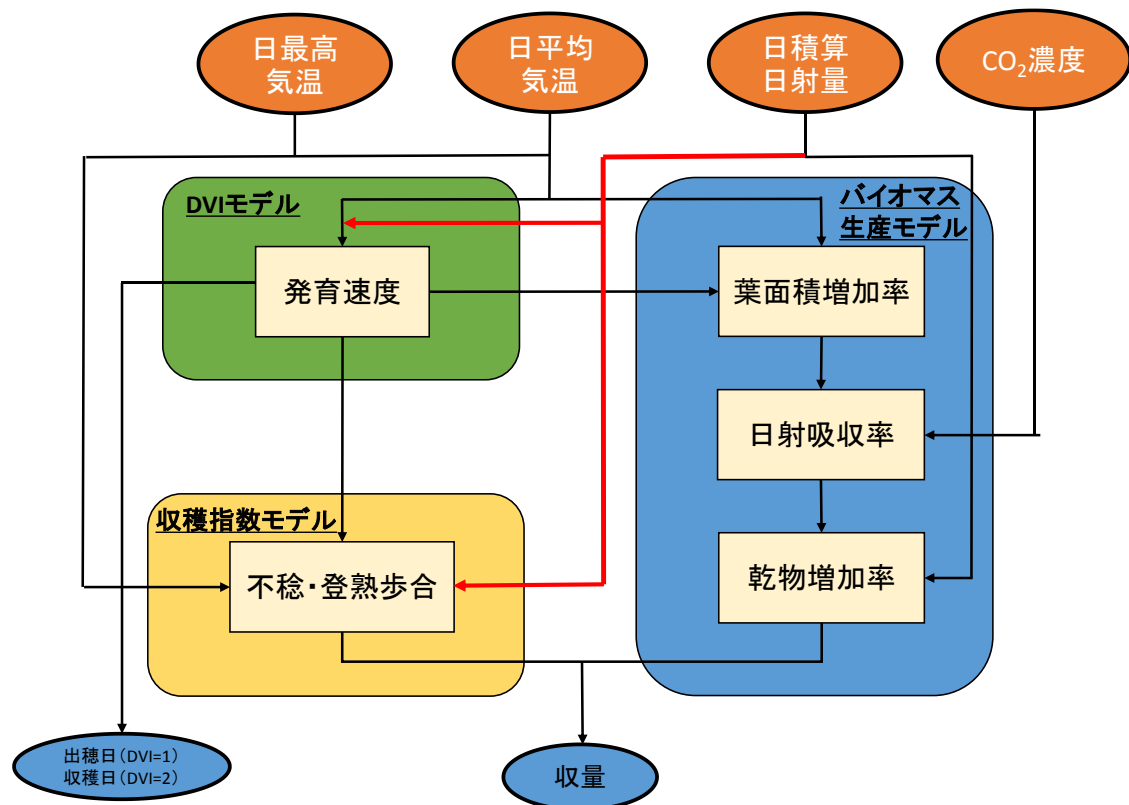


Figure4.8 : SIMRIW の修正点 (赤矢印)

緻化されている施肥体系や防除体系、肥料の発達や除草剤の発達、農機具の発達による脱粒数の減少などが反映されていない。ゆえに技術係数を定数ではなく、時間により変化する1次式に設定することで、上記の技術的な増収効果をモデルに反映することができる。

次節では、本節で記述した3点の課題を具体的に修正する方法について記述する。

### 4.3 DVIモデルの修正

移植日から出穂日までの遮光条件は、生育不良による出穂遅延を引き起こす。そして出穂日から収穫日までの遮光条件は登熟遅延を生じさせ、最終的に収穫日の遅延を生じさせる。ゆえにDVIモデルに全天日射量の影響を加えることで、太陽光パネルの遮光条件による出穂遅延と登熟遅延を、SIMRIWに反映させることができる。

具体的には、遮光率で決定される遮光パラメータ  $\alpha(0\sim1)$  と  $\beta(0\sim1)$  を、DVR計算式の分母に乗じることで遮光状態を再現する。DVIが1に達した日付を出穂日、2に達した日付を収穫日と決定することがDVIモデルでは定義されているため、計算式の分子に任意のパラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$  を乗じることで、出穂遅延と登熟遅延が表現することができる。

既存の(4.1)~(4.5)式に変更を加え、新たに(4.31)~(4.35)式を立式した。

$$DVI = \sum_{j=0}^i DVR_j \quad (4.31)$$

$$DVR = \frac{\alpha}{G_v(1 + \exp[-A_t(T - T_h)])} \quad ; DVI < DVI^* \quad (4.32)$$

$$DVR = \frac{\alpha(1 - \exp[B_L(L - L_c)])}{G_v(1 + \exp[-A_t(T - T_h)])} \quad ; DVI^* \leq DVI < 1, L < L_c \quad (4.33)$$

$$DVR = 0 \quad ; DVI^* \leq DVI < 1, L > L_c \quad (4.34)$$

$$DVR = \frac{\beta(1 - \exp[-k_r(T - T_{cr})])}{G_r} \quad ; 1 \leq DVI < 2 \quad (4.35)$$

品種をコシヒカリ，DVI 初期値を 0.2，移植した稚苗の LAI 初期値を 0.08，乾物量初期値を 18[kg/10a]，技術係数を 0.65，移植日を 5 月 5 日と設定し，2015 年度に茨城県つくば市で計測された気象データを利用して，SIMRIW で  $\alpha$ ， $\beta$  の感度分析を実施した結果が Table4.3 と Table4.4 である．

Table4.3 : SIMRIW で算出した出穂遅延期間

パラメータ $\alpha$	出穂日 (DVI=1)	出穂遅延期間[日]
0.9	2015/8/24	7
0.91	2015/8/23	6
0.92	2015/8/22	5
0.93	2015/8/22	5
0.94	2015/8/21	4
0.95	2015/8/20	3
0.96	2015/8/20	3
0.97	2015/8/19	2
0.98	2015/8/18	1
0.99	2015/8/17	0
1	2015/8/17	0

Table4.4 : SIMRIW で算出した登熟遅延期間

パラメータ $\beta$	収穫日 (DVI=2)	登熟遅延期間[日]
0.87	2015/9/29	6
0.88	2015/9/28	5
0.89	2015/9/28	5
0.9	2015/9/27	4
0.91	2015/9/27	4
0.92	2015/9/26	3
0.93	2015/9/26	3
0.94	2015/9/25	2
0.95	2015/9/25	2
0.96	2015/9/24	1
0.97	2015/9/24	1
0.98	2015/9/24	1
0.99	2015/9/23	0
1.00	2015/9/23	0

Table4.3 と Table4.4 は、パラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$  の数値を 1.00 から 0.01 ずつ減少させた場合の、出穂日と収穫日の日付を表している。ここではパラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$  の数値を 1.00 に設定した際の日付から、パラメータの数値を変更した場合の日付の差を「出穂遅延期間」、また「登熟遅延期間」と定義している。

しかし「出穂・登熟遅延期間」は、パラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$  の数値に対応した出穂・登熟遅延期間であり、実際の遮光条件に対応した遅延期間を表していない。そのためパラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$  の数値に対応する、遮光条件の強度を算出する必要がある。本節では、遮光条件を定量的に表現するため、遮光条件の強度を「遮光率」という概念で表記する。ここでは「遮光率」を、「非遮光時に計測された全天日射量と、遮光時に計測された全天日射量の比率」として定義する。

移植日から収穫日まで、水稻のライフサイクル全体を遮光条件下に置いた場合の出穂遅延期間、登熟遅延期間はわずかだが、先行研究から入手できる。またこれら先行研究から、遮光条件の強弱を表す遮光率も計算できる。

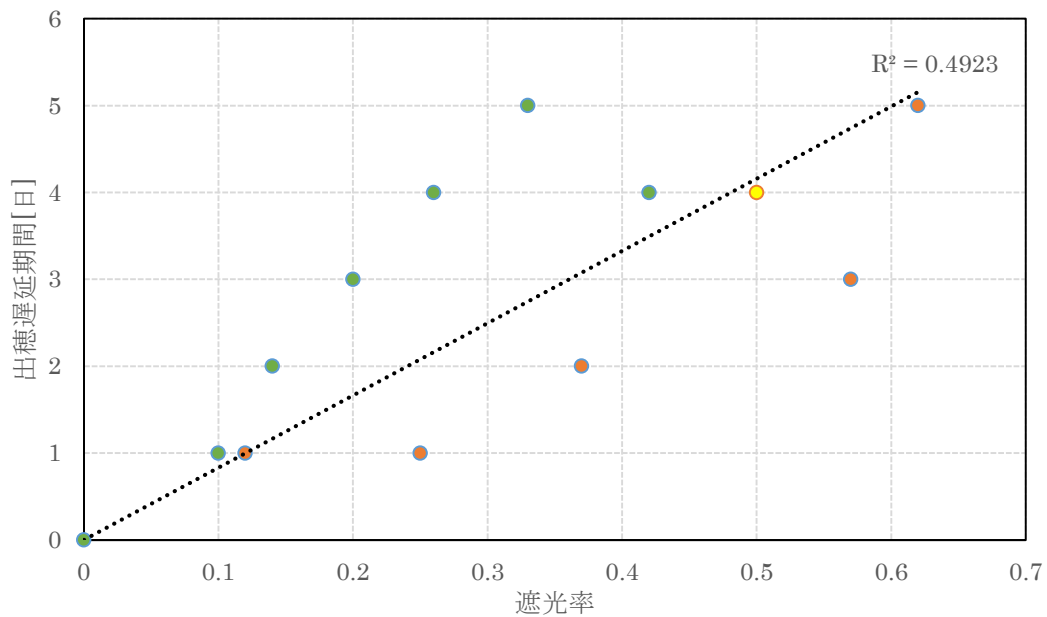


Figure4.9：移植から出穂まで遮光条件下に置いた  
 水稻の出穂遅延期間データの合成図  
 (緑；原田ら<sup>[4.7]</sup>, 赤；内田ら<sup>[4.8]</sup>, 黄；玉置ら<sup>[4.9]</sup>)  
 (出典) 原田ら<sup>[4.7]</sup>, 内田ら<sup>[4.8]</sup>, 玉置ら<sup>[4.9]</sup>

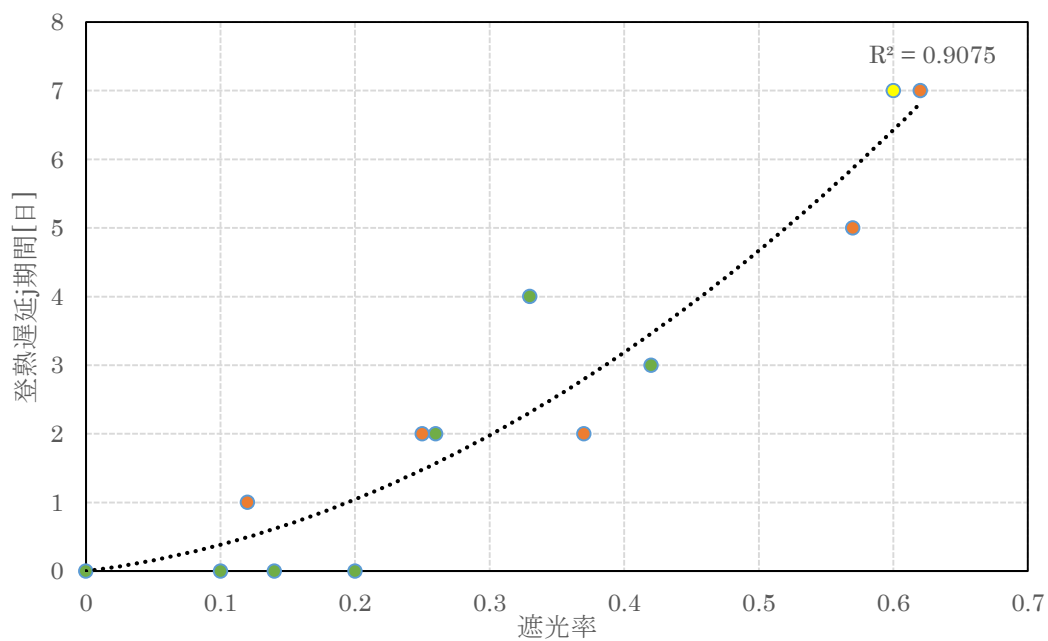


Figure4.10：出穂から収穫まで遮光条件下に置いた  
 水稻の登熟遅延期間データの合成図  
 (緑；原田ら<sup>[4.7]</sup>, 赤；内田ら<sup>[4.8]</sup>, 黄；若松ら<sup>[4.10]</sup>)

ここでは、先行研究から得られた出穂・登熟遅延期間の数値データと、それぞれに対応し

ている遮光率を合成することで、遮光率と出穂・登熟遅延期間の関係式を導出する。遮光率と出穂・登熟遅延期間の散布図が Figure4.9 と Figure4.10 である。Figure4.9 では、緑色のマーカーが原田ら<sup>[4.7]</sup>、赤色のマーカーが内田ら<sup>[4.8]</sup>、黄色のマーカーが玉置ら<sup>[4.9]</sup>の結果である。Figure4.10 では、緑色のマーカーが原田ら<sup>[4.7]</sup>、赤色のマーカーが内田ら<sup>[4.8]</sup>、黄色のマーカーが若松ら<sup>[4.10]</sup>の結果である。

ここで、Table4.3 と Figure4.9, Table4.4 と Figure4.10 を対応付け、グラフを重ね合わせると、任意の遮光率に対応したパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$  が得られる。つまり、遮光条件の強弱に対応したパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$  の数値データを取得することができる。Figure4.11 と Figure4.12 が、任意の遮光率とパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$  の散布図である。

Figure4.11 と Figure4.12 から、任意の遮光率に対応したパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$  の数値を得ることができた。これら任意の遮光率からパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$  を導出する際に用いる計算式が、(4.36) 式と (4.37) 式である。

$$\alpha = 1 - 0.1236z \tag{4.36}$$

$$\beta = 1 - (0.1751z^2 + 0.1212z) \tag{4.37}$$

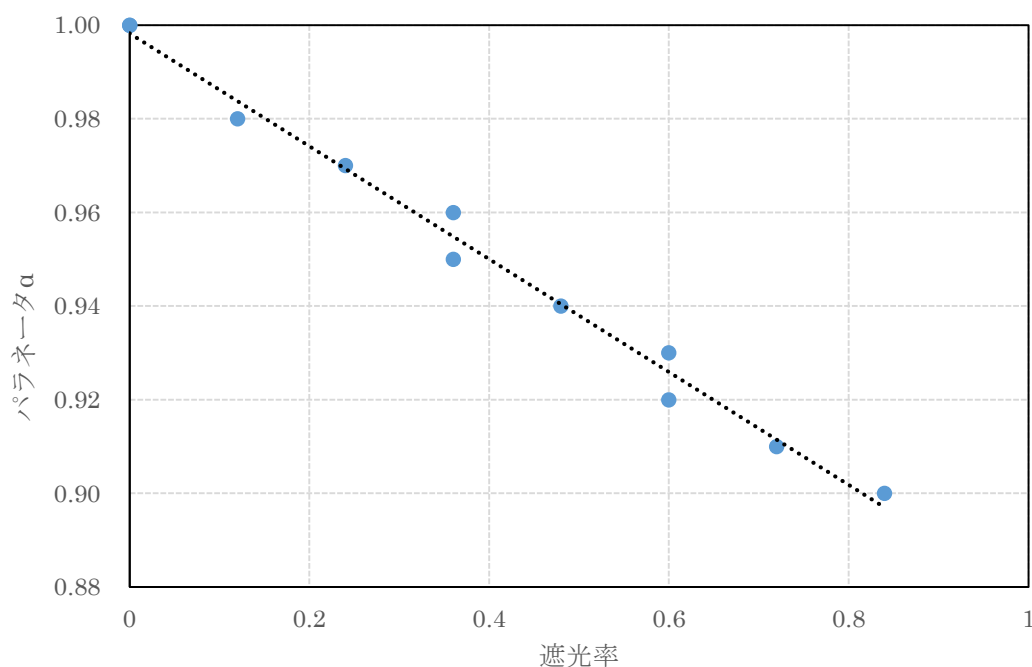


Figure4.11 : 各遮光率に対応したパラメータ  $\alpha$  の散布図



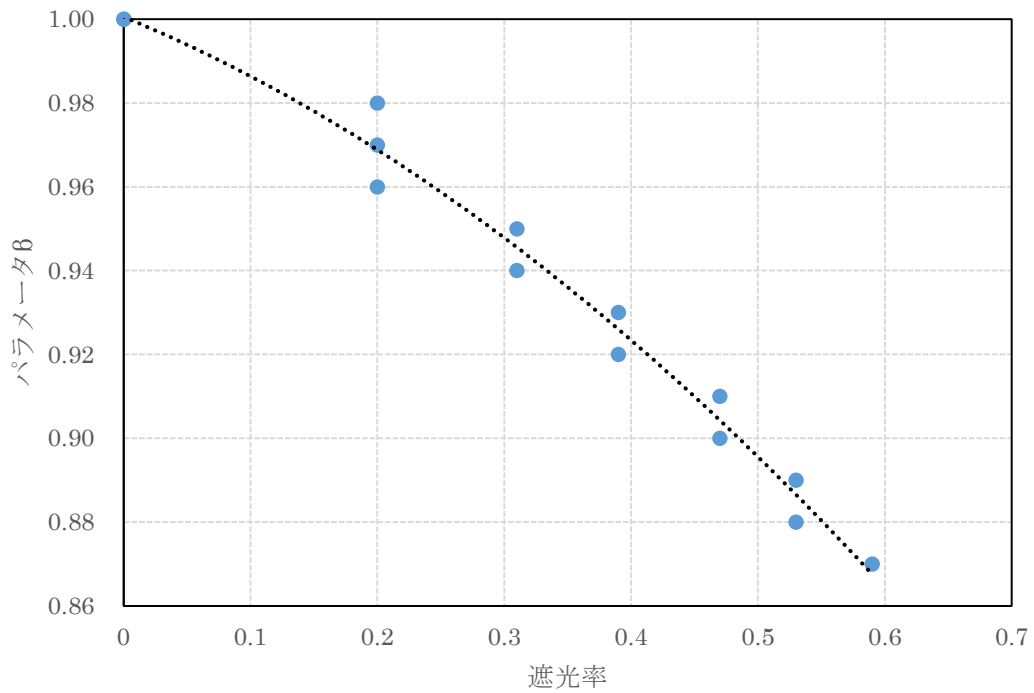


Figure4.12 : 各遮光率に対応したパラメータ  $\beta$  の散布図

ここで  $Z$  は、非遮光時に計測された全天日射量と、遮光時に計測された全天日射量の比率である遮光率[0~1]である。SIMRIW にパラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$  を導出する (4.36) 式と (4.37) 式を実装し、遮光率の感度分析を実施することで、遮光条件により生じる収穫日の遅延期間

Table4.5 : SIMRIW で算出した収穫遅延期間

遮光率	収穫日の推定遅延期間[日]
0.5	11
0.45	10
0.4	9
0.35	8
0.3	7
0.25	6
0.2	5
0.12	4
0.1	3
0.05	2
0	0

を推定した。任意の遮光率で決定される収穫日の推定遅延期間が Table4.5 である。

表から、30%の遮光条件(遮光率 0.3)で 7 日間の収穫遅延、50%の遮光条件(遮光率 0.5)で 10 日間強の収穫遅延が発生することがわかる。酒々井町で実証試験を実施した際も、遮光条件による稲の生育不良が発生したため、太陽光パネル下のみ 10 日間程度、収穫日を遅延させた。そのため、Table4.5 に代表されるモデルの推定値は妥当と考えられる。

#### 4.4 収穫指数モデルの修正

(4.21) ~ (4.28) 式の収穫指数モデルは、出穂日前後の高低温による稔実不稔をモデル化している。一方、遮光条件による穂数ならびに一穂重、籾重の減少はモデルに組み込まれていない。収穫指数モデルでは、全天日射量の影響を過小評価している点が先行研究で指摘されているため、営農型太陽光発電のシミュレーションで SIMRIW を用いる際には、この点を改善する必要がある[4.4]。

以上の理由から、本節では (4.21) ~ (4.28)式で推定する低害と高温障害に加えて、遮光条件を課すことによる「寡照障害」をモデル化し、立式する。具体的には、第 3 章の実証試験における実証データを利用して(4.38) ~ (4.44)式を立式し、算出したパラメータを新たに「寡照障害パラメータ」として収穫指数モデルに乗じることで、遮光条件による寡照障害をモデル化する。

$$IR_{ears} = 0.0268 \times SR \times z + 7.5451 \quad ; 0 < DVI < 0.75 \quad (4.38)$$

$$NIR_{ears} = 0.0268 \times SR + 7.5451 \quad ; 0 < DVI < 0.75 \quad (4.39)$$

(4.38), (4.39)式は酒々井実証試験で得られた結果である。これらは、再掲する Figure4.13 の結果である。 $IR_{ears}$ は遮光時の穂数であり、 $NIR_{ears}$ は非遮光時の穂数である。 $SR$ は移植日から有効分げつ期 ( $0 < DVI < 0.75$ ) までの積算日射量[MJ/m<sup>2</sup>]であり、 $Z$ は遮光率[0~1]である。

$$N_{ears} = IR_{ears} / NIR_{ears} \quad (4.40)$$

遮光時の穂数と非遮光時の穂数の比率( $N_{ears}$ )を、「穂数パラメータ」と定義する。

$$IR_{HeadWeight} = 0.0007 \times SR \times z + 1.7904 \quad ; 0.96 < DVI < 2.0 \quad (4.41)$$

$$NIR_{HeadWeight} = 0.0007 \times SR + 1.7904 \quad ; 0.96 < DVI < 2.0 \quad (4.42)$$

(4.41), (4.42)式は酒々井実証試験で得られた結果である。これらは、再掲する Figure4.14 の結果である。

$IR_{HeadWeight}$  は遮光時の一穂重であり， $NIR_{HeadWeight}$  は非遮光時の一穂重である。 $SR$  は穂揃期から収穫日 ( $0.96 < DVI < 2$ ) までの積算日射量 [ $MJ/m^2$ ] であり， $Z$  は遮光率 [0~1] である。

$$N_{Headweight} = \frac{IR_{HeadWeight}}{NIR_{HeadWeight}} \quad (4.43)$$

遮光時の一穂重と非遮光時の一穂重の比率 ( $N_{HeadWeight}$ ) を，「一穂重パラメータ」と定義する。

$$IR = N_{ears} \times N_{headweight} \quad (4.44)$$

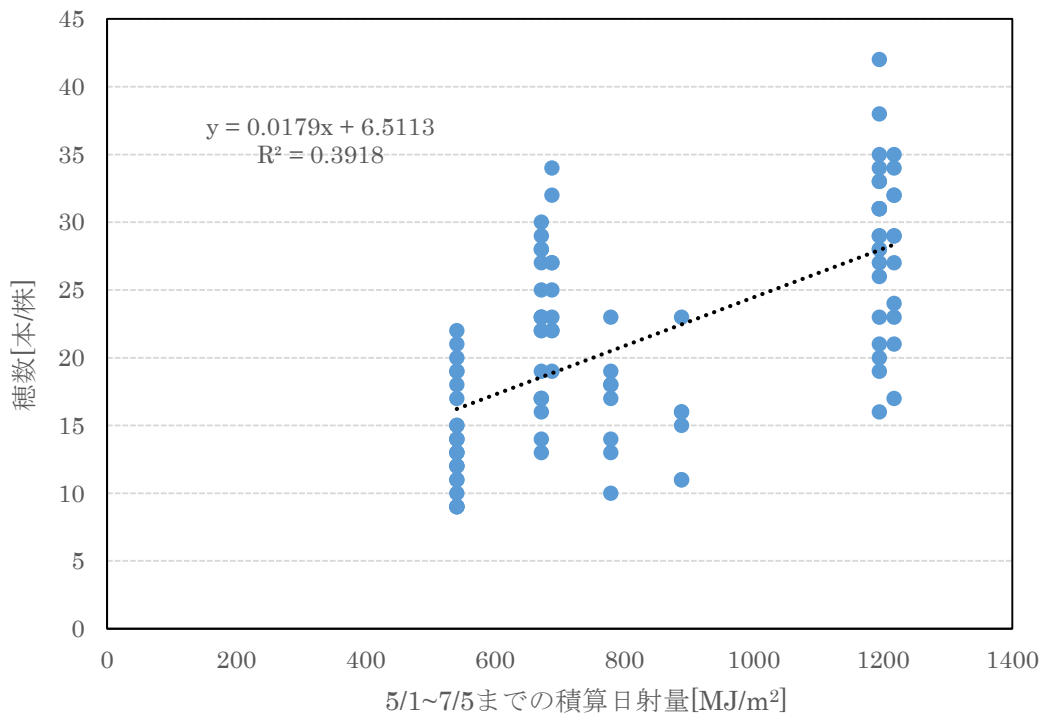


Figure4.13 : 有効分げつ期の積算日射量と穂数の散布図 (Figure3.18 の再掲)

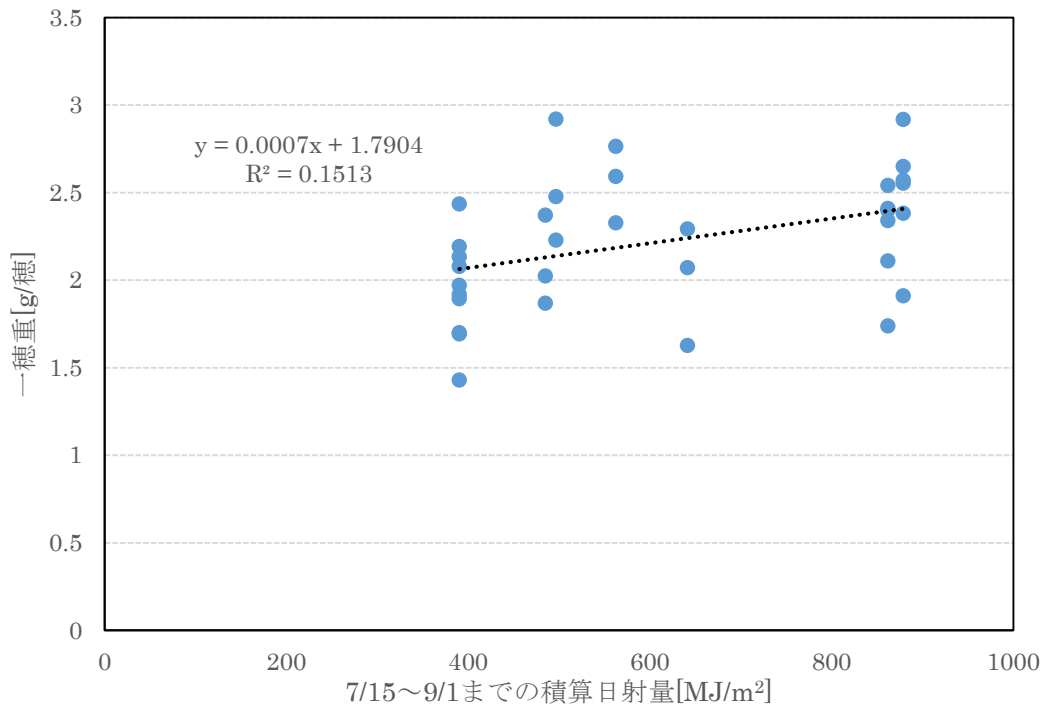


Figure4.14 : 登熟期の積算日射量と一穂重の散布図 (Figure3.19 の再掲)

(4.44) 式のように「穂数パラメータ ( $N_{ears}$ )」と「一穂重パラメータ ( $N_{HeadWeight}$ )」を乗じることで、ライフサイクル全体を通した遮光条件による減収率である「寡照障害パラメータ ( $IR$ )」を算出することができる。営農型太陽光発電による寡照障害は、以上の手法を踏襲することにより計算できる。(4.45) 式で、出穂日前後の高低温に加え、遮光条件の影響も考慮した収穫指数  $h^*$  を算出する。

$$h^* = \min(h_c, h_h) \times IR \quad (4.45)$$

ここでは低温による減収効果を  $h_c$ 、高温による減収効果を  $h_h$  として、どちらかの最小値を算出する。そして遮光条件を課すことによる減収効果である寡照障害パラメータ ( $IR$ ) を乗じることで、出穂日前後の高低温による稔実不稔に加えて、遮光条件による減収効果も考慮した収穫指数  $h^*$  を推定することができる。

#### 4.5 技術係数の修正

SIMRIW では、4.1 の (29) 式で推定した数値が、技術係数として与えられている。しかし外生的に一定の数値を与えるため、SIMRIW の変数である全天日射量と気温では説明ができない近年の収量増加（施肥体系の精緻化、肥料の改良、除草体系の精緻化、除草剤の改良、農機具の改良などに起因）を反映できていない。再掲する Figure4.15 からわかるよう、近年は単位面積あたりの農地への施肥量が減少しているにもかかわらず、全体として水稲収量は増加する傾向にある。この収量増加は、施肥体系の精緻化、肥料の改良、除草体系の精緻化、除草剤の改良、農機具の改良などの技術的な要因から生じていると考えられる。そのため、技術係数  $\tau$  は潜在収量と実収量の比率に加えて、農業技術体系の精密化を組み込んだ値として再設定する必要がある。

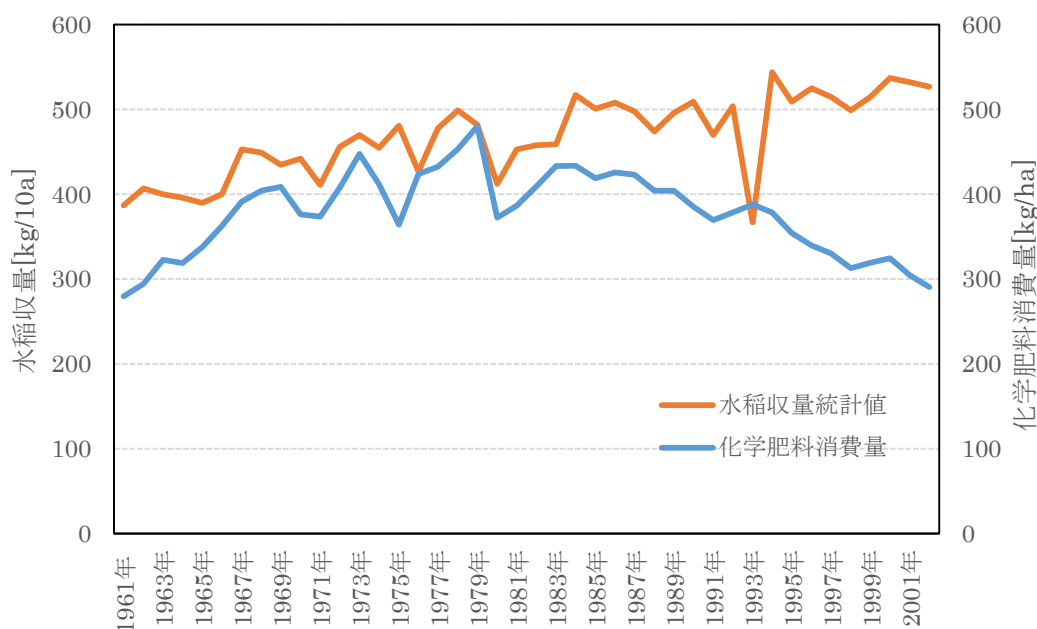


Figure4.15 : 水稲収量と化学肥料使用量の時系列データ (Figure2.7 の再掲)

(出典) FAOSTAT [38]

そこで Iizumi et al.[4.11]を参考にし、実収量に最も近似できる技術係数 ( $\tau^{***}$ ) を、最小二乗法を用いることで推定する。Figure4.16 は、最小二乗法を用いて推定した、最も実収量に近似している技術係数 ( $\tau^*$ ) を設定したときの、水稲収量の推定値  $Y^*$  である。

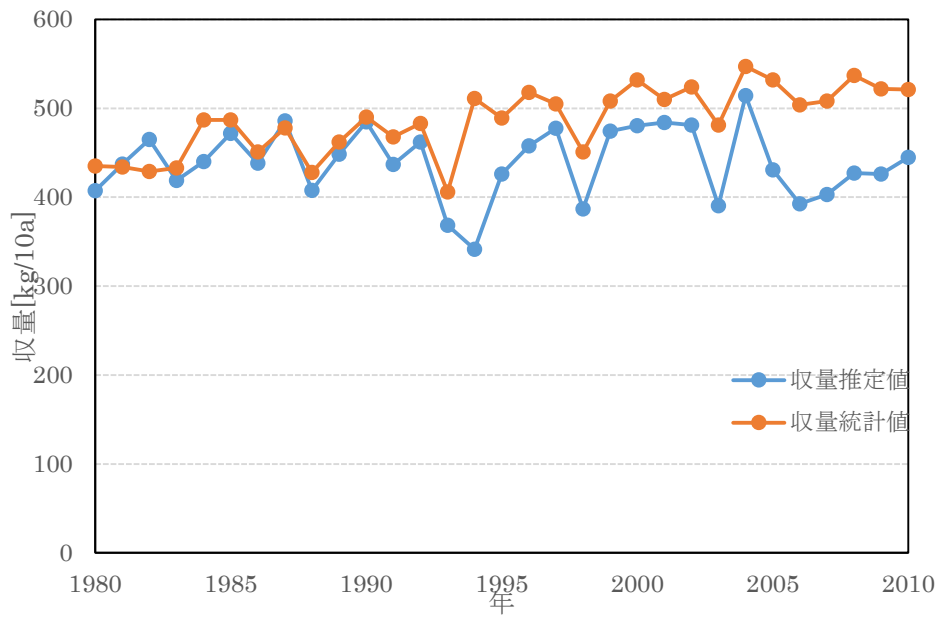


Figure4.16 : SIMRIW による収量推定値 ( $\tau = \text{一定値}$ )

次に最小二乗法を用いて推定した技術係数( $\tau^*$ )と、その収量予測値  $Y^*$  を利用し、2014 年度の実収量  $Y^{**}$  に対応する技術係数( $\tau^{**}$ ) を算出する。

$$\tau^{**} = \frac{[\tau^* \cdot Y^*]}{Y^*} \tag{4.46}$$

(4.46) 式を立式することで、2014 年度の技術係数( $\tau^{**}$ ) が推定できる。そして  $\tau^*$  と  $\tau^{**}$  の間の比率を求めることで、1980 年から 2014 年までの、各年に対応した技術係数( $\tau^{***}$ ) の 1 次式を算出することができる。

$$\tau^{***} = 0.0033x - 6.1 \tag{4.47}$$

(4.47) 式は、西暦の年次を説明変数 ( $x$ ) として推定した、各年の技術係数 ( $\tau^{***}$ ) である。時間の 1 次式となっているため、長期的な将来予測には使用できない。しかし過去の統計値に準じた数値を与えているため、統計値との推定誤差は小さく、モデルの当てはまりは良くなる。

技術係数を (4.47) 式に従い、モデルに与えた場合の水稲収量の推定値が Figure4.17 である。Figure4.16 の RMSE が 64.8[kg/10a] に対し、Figure4.17 の RMSE は 35.7[kg/10a] と、モデルの推定精度が向上できている。

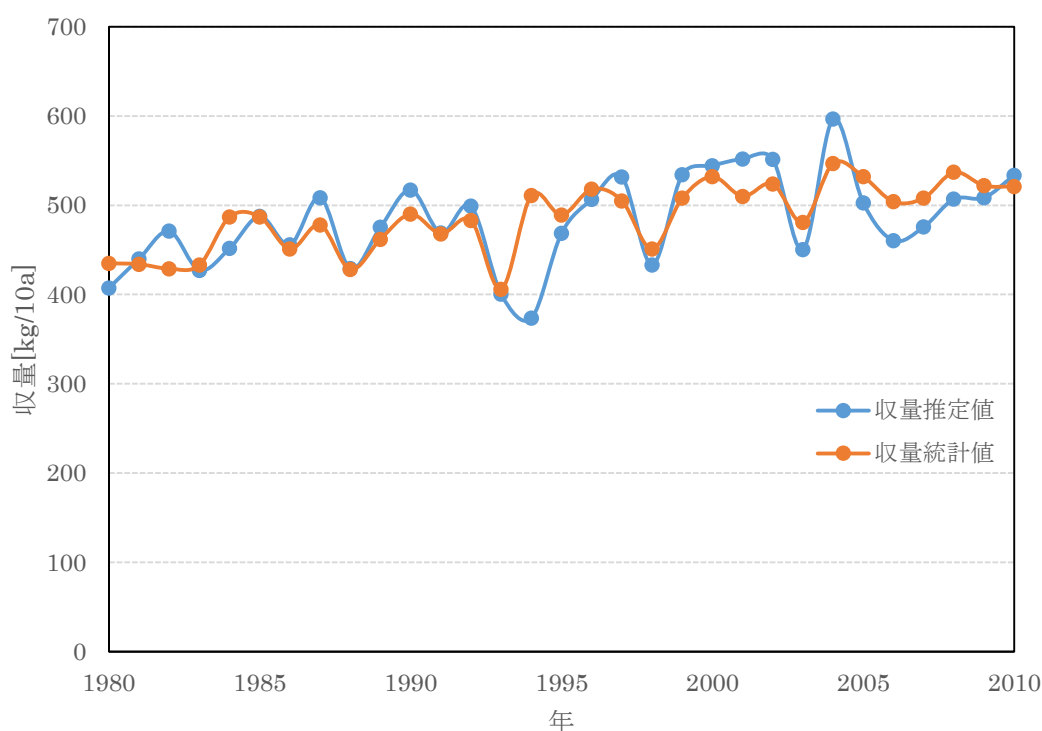


Figure4.17 : SIMRIW による収量予測値 ( $\tau = 1$  次式)

## 4.6 水稲品質予測モデルの開発

### 4.6.1 水稲品質の定義

本節では水稲の品質を予測するモデルの開発を行う。水稲品質予測モデルは河津ら<sup>[4.12]</sup>、岡田ら<sup>[4.13][4.14]</sup>により検討されており、出穂日から収穫日までの平均気温と積算日射量で水稲品質を決定されると仮定してモデルを構築している。本研究で開発する水稲品質予測モ

デルは、これらの論文に記載された手法を参考とする。

Table4.6 は農林水産省により公表されている水稲品質の定義である。無作為に選定した米粒標本が Table4.6 に適合するかを確かめることで、収穫した水稲の品質は、1 等米, 2 等米, 3 等米, 規格外米と分類される。

Table4.6 : 水稲品質の定義

平均値 (g/100g)	最低限度			最高限度					
	整粒	水分	①~⑥ の合計	被害粒, 死米, 着色粒, 異種穀粒及び異物					
				①	②	異種雑穀			⑥
				死米	着色粒	もみ	麦	もみ及び麦を 除いたもの	異物
1 等	70	15	15	7	0.1	0.3	0.1	0.3	0.2
2 等	60	15	20	10	0.3	0.5	0.3	0.5	0.4
3 等	45	15	30	20	0.7	1	0.7	1	0.6
規格外	1 等から 3 等までのそれぞれの品位に適合しない玄米であって, 異種穀粒及び異物を 50%以上混入していないもの								
*整粒は, 100 から③, ④, ⑤, 未熟米を差し引いた値									

(出典) 農林水産省, 玄米の検査規格<sup>[4.15]</sup>

しかし上記の定義は異種雑穀や水分含量などの項目を含んでいるため、このままでは本研究の水稲品質予測に用いることができない。ゆえに以下の仮定を設ける。

1. 除草剤の使用回数が防除体系に準じている
2. 殺虫剤の使用回数が防虫体系に準じている
3. 収穫した籾の水分管理が行き届いている

除草剤が最適に使用されていると仮定することで、異種雑穀が混入していないと想定できる。また殺虫剤も防除体系に準じて使用されていると仮定することで、着色米の混入を防ぐことができる。そして収穫した籾の水分管理が行き届いていると仮定することで、水分含量を 15%以下と想定することもできる。以上 3 点の仮定を設けることで、農林水産省が公表している水稲品質の基準を Figure4.7 のように変更することができる。本研究で推定する水稲品質の予測値は、Figure4.7 の定義に準じる。



Table4.7：改定した水稲品質の定義

平均値 (g/100g)	最低限度		最高限度		
			被害粒, 死米, 着色粒		
			①	②	③
	整粒	①~③の合計	死米	着色粒	被害米
1等	70	15	7	-	-
2等	60	20	10	-	-
3等	45	30	20	-	-
規格外	1等から3等までのそれぞれの品位に適合しない玄米				
	*整粒は, 100 から未熟米と①~③の合計値を差し引いた値				

(出典) 農林水産省, 玄米の検査規格<sup>[4.15]</sup>

#### 4.6.2 水稲品質の予測式

先行研究では水稲品質が温度と全天日射量の重回帰式として推定されているが, 本研究では全天日射量の単回帰式として推定する. これは, 太陽光パネルの内外で気温差がほとんど確認できなかったためである. そのため温度が一定の条件で, 全天日射量を減少させた場合の品質劣化を立式する. 整粒歩合の推定式を(4.48)式に示す.

$$Q = (100 - [IM + B] - D - E - M) \quad (4.48)$$

$Q$  は水稲の整粒歩合[g/100g]であり,  $[IM+B]$  は水稲米粒 100g 中に占める未熟米の割合[g/100g]である. (4.48)式の $[IM+B]$ で,  $IM$ は遮光条件により生じる不完全米(乳白米, 基部未熟米)の推定値であり,  $B$ は遮光条件による影響が生じないと考えられる不完全米(腹白未熟米, その他未熟米)の実測値である. 水稲品質は施肥, 気温, 灌漑, 品種といった複数の要因から決定されるため, 今回の実証試験の結果のみからは断定はできないのだが, 本研究では暫定的に実証研究のデータを用いる.  $D$ は遮光条件による影響を受ける死米の推

定値， $E$ は被害米の実測値， $M$ は着色米の実測値である．ここで， $E$ と $M$ は遮光条件による影響が確認できなかったため，実測値を利用している．

$$D = -0.0078 \times SR + 6.1426 \quad ; 0.96 < DVI < 2 \quad (4.49)$$

$$IM = -0.0037 \times SR + 11.93 \quad ; 0.96 < DVI < 2 \quad (4.50)$$

(4.49), (4.50)式は酒々井実証試験で得られた結果である．これらは，再掲する Figure4.18 と Figure4.19 の結果である．

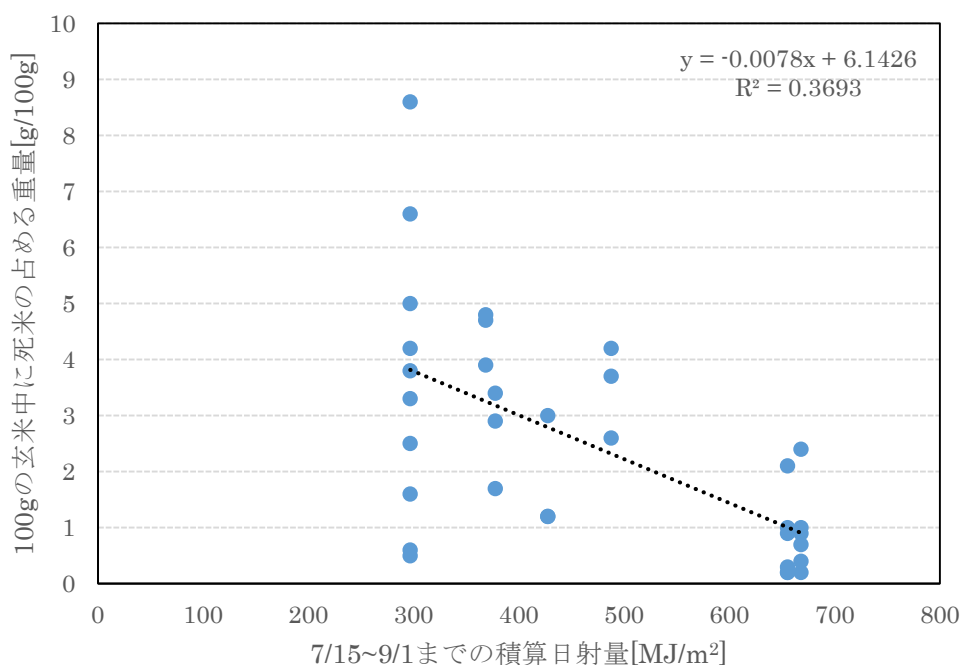


Figure4.18 : 死米発生割合と全天日射量の散布図 (Figure3.21 の再掲)

$SR$ は穂揃期から収穫日( $0.96 < DVI < 2$ )までの積算日射量である．全天日射量の時期が登熟期に限定されているのは，未熟米と死米は，穂揃期から収穫日までの気象条件により決定されるという，先行研究の仮定を踏まえているためである．本研究で  $B$ ,  $E$  は実証試験の結果に準じ，それぞれ 14.8, 0.5 と設定した．なお  $M$  は実証試験の結果が 1.6 であったが，シミュレーションの仮定にもとづいて 1.0 と設定している．

(4.49), (4.50)式で算出した数値を(4.48)式の入力データとすることで，整粒歩合を求める

ことができる。そして、推定した整粒歩合を Table4.7 の規定に参照して、1 等米から規格外米に振り分けることで、水稻品質を決定することができる。

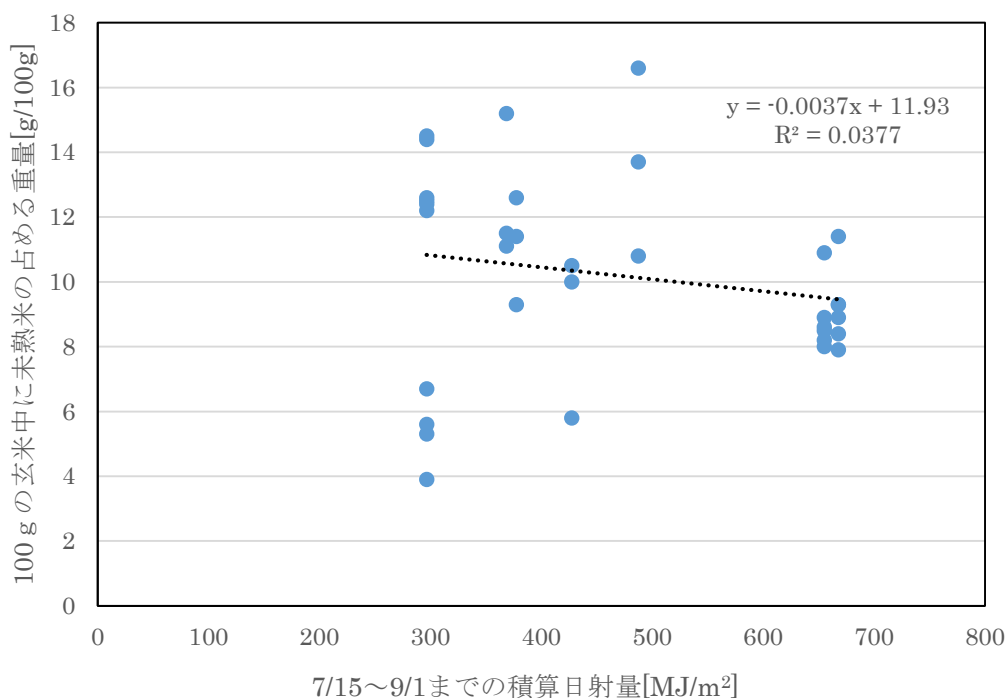


Figure4.19 : 未熟米発生割合と全天日射量の散布図 (Figure3.22 の再掲)

#### 4.7 まとめ

本章では最初に SIMRIW の構造式を紹介し、SIMRIW に内包されている 3 点の課題について言及した。そしてこれら課題を改善するために、SIMRIW の修正式を新たに提案した。具体的には、DVI モデルの構造式にパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$  を付加し、収穫指数モデルに「寡照障害パラメータ」を導入した。また技術係数を外生的な一定値ではなく、年ごとに増加する比率として与えることで、より精度の高い予測を実現した。SIMRIW にこれら 3 点の改善を加えることにより、遮光条件を課すことによる減収効果を、より精密に再現できた。

また実証試験で得られた結果を利用して、水稻品質を予測するモデルを提案した。九州地方の気象データを用いて統計的に品質を予測する岡田モデル<sup>[4.10][4.11]</sup>は、関東地方での適用が難しいため、次章で実施するシミュレーションでは、本章で開発したモデルを使用する。

#### 4.8 参考文献

- [4.1] 田中 慶, 木浦 卓治, 杉村 昌彦, 二宮 正士, 溝口 勝; SIMRIWを利用した水稲栽培可能性予測支援ツール, 農業情報研究, 1(2011), pp. 1-12.
- [4.2] T. Horie; The rice crop simulation model SIMRIW and its testing, Modelling the Impact of Climate Change on Rice in Asia, 1995, pp. 51-66.
- [4.3] 堀江 武, 桜谷 哲夫; イネの生産の気象的評価・予測法に関する研究-1-個体群の吸収日射量と乾物生産の関係, 農業気象, 4(1980), p331-342.
- [4.4] 横沢 正幸, 飯泉 仁之直, 岡田 将誌; 気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価, 地球環境, 14 (2009), pp. 199-206.
- [4.5] 内島 立郎; 冷温条件と水稲の不稔発生との関係についての一考察, 農業気象, 4 (1976), pp. 199-202.
- [4.6] T. Horie; Predicting the Effects of Climatic Variation and Elevated CO2 on Rice Yield in Japan, 農業気象, 48(1993), pp. 567-574.
- [4.7] 原田 皓二, 鐘江 寛; 構築物の日陰による日照時間の減少が水稲の生育に及ぼす影響, 日本作物学会九州支部会報, 49(1982), pp.33-36.
- [4.8] 内田 敏夫, 和田 士郎, 井上 浩一郎; 構築物の投影が水稲の生育収量に及ぼす影響, 山口県農業試験場研究報告, 35(1983), pp.1-11.
- [4.9] 玉置 雅彦, 田代 亨, 山本 由徳; 遮光および施用窒素量が水稲の生育, 収量構成要素および白米の理化学特性に及ぼす影響, 日本作物學會紀事, 66(1997), pp. 708-709.
- [4.10] 若松 謙一, 田中 明男, 上藺 一郎, 佐々木 修; 水稲の暖地早期栽培における登熟期間の遮光処理が収量,品質,食味に及ぼす影響, 日本作物学会九州支部会報, 72 (2006), pp. 19-21.
- [4.11] T. Iizumi, M. Yokozawa, M. Nishimori; Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach, Agricultural and forest meteorology, 149.2 (2009), pp. 333-348.
- [4.12] 河津 俊作, 本間 香貴, 堀江 武, 白岩 立彦; 近年の日本における稲作気象の変化とその水稲収量・外観品質への影響, 日本作物學會紀事, 76(2007), pp. 423-432.
- [4.13] 岡田 将誌, 飯泉 仁之直, 林 陽生, 横沢 正幸; 水稲品質の近年の低下傾向に関する気候学的考察, 農業気象, 65(2009), pp. 327-337.
- [4.14] M. Okada, T. Iizumi, Y. Hayashi, M. Yokozawa; Modeling the multiple effects of temperature and radiation on rice quality, Environmental Research Letters, 6.3 (2011), pp. 1-8.
- [4.15] 農林水産省; 玄米の検査規格,  
[http://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/k\\_kikaku/index.html](http://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/k_kikaku/index.html)

## 5 営農型太陽光発電のシミュレーション

### 5.1 可照時間予測式の立式

SIMRIW の計算には各日の可照時間[h/日]が必要であるため、本節では緯度が $\phi$ [ $^{\circ}$ ]、経度が $\lambda$ [ $^{\circ}$ ]の地点における可照時間を推定する。計算式は好井<sup>[5.1]</sup>の計算式ならびに立正大学地球環境科学部環境システム学科の中川清隆教授のHP<sup>[5.2]</sup>を参考にした。

観測地点はつくば気象台であるため、緯度 $\phi$ は北緯 36 度 34 分、経度 $\lambda$ は東経140 度 75 分である<sup>[5.3]</sup>。また、標準時間  $ST$ [h]は日本における標準時間であり、日本の標準子午線の経度 $\lambda_0$ は東経 135 度である。

太陽高度  $h$  [ $^{\circ}$ ]は、太陽赤緯を $\delta$ [rad]、時角を $a$ [rad]とすると、(5.1) 式と表せる。

$$\sin h = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos a \quad (5.1)$$

日の出時刻及び日の入り時刻においては太陽高度が  $0$ [ $^{\circ}$ ]となるので、(5.1)式において  $h=0$  を代入すると、(5.2) 式が算出できる

$$\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos a_i = 0, \quad i = 1, 2 \quad (5.2)$$

$a_1$ は日の出時刻の時角[rad]であり、 $a_2$ は日の入り時刻の時角[rad]である。時角を求めるために(5.2)式を変形すると、(5.3)～(5.4)式が得られる

$$a_1 = -\cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi) \quad (5.3)$$

$$a_2 = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi) \quad (5.4)$$

(5.3)～(5.4)式で必要となる太陽赤緯  $\delta$ 、並びに均時差  $Eq$  は、立正大学地球環境科学部環境システム学科の中川清隆教授のHP<sup>[5.2]</sup>から引用した。均時差  $Eq$  は、地球の公転速度が一定でないことにより生じる、正午と南中時刻のずれを補正する角度である。

$$\delta = 0.006918 - 0.39991\cos\theta_t + 0.070257\sin\theta_t - 0.006758\cos 2\theta_t + 0.000907\sin 2\theta_t \quad (5.5)$$

$$Eq = 0.000075 + 0.001868\cos\theta_t - 0.032077\sin\theta_t - 0.01462\cos 2\theta_t - 0.04085\sin 2\theta_t \quad (5.6)$$

観測地点における標準時間を  $ST$ [h]、標準子午線の経度を $\lambda_0$ [ $^{\circ}$ ]とすると、(5.7) 式が得

られる.

$$a = \frac{2\pi(ST - 12)}{24} + \frac{2\pi(\lambda - \lambda_0)}{360} + Eq \quad (5.7)$$

これらと(5.7)式より, 日の出時刻 $t_1$ 及び日の入り時刻 $t_2$ は, (5.8)~(5.9)式になる.

$$t_1 = 12 - \left\{ (\lambda - \lambda_0) \times \frac{2\pi}{360} + Eq + a_i \right\} \times \frac{24}{2\pi} \quad (5.8)$$

$$t_2 = 12 - \left\{ (\lambda - \lambda_0) \times \frac{2\pi}{360} + Eq - a_i \right\} \times \frac{24}{2\pi} \quad (5.9)$$

可照時間 $N_0[h]$ は, 日の出時刻と日の入り時刻の差であり, (5.10)式で表せる.

$$N_0 = t_2 - t_1 \quad (5.10)$$

以上が, 好井<sup>[5.1]</sup>が中川<sup>[5.2]</sup>と川浦<sup>[5.4]</sup>を参考にして立式した可照時間の予測式である. (5.1)~(5.10) 式を4年間 (D=1~1461) 計算した結果が Figure5.1 である. 計算機に実装する際は, 好井<sup>[5.1]</sup>が構築したプログラムを参考にした.

また推定結果の妥当性を図るため, 気象台で実測されている可照時間と比較した. Figure5.2 は気象台で計測された実測値<sup>[5.5]</sup>と, 本研究で使用する可照時間予測モデルの推定値の時系列データである. 推定・実測データがほぼ重なり合っていることから, 好井<sup>[5.1]</sup>が用いているモデルの信頼度は高い.

可照時間は緯度と経度により物理的に定まるため, 翌年度の数值は昨年度の数值とほぼ同値である. ゆえに, 年ごとに計算される可照時間の微々な変動は, SIMRIW の計算にほとんど影響を与えない. 以上の理由から, 複数年のシミュレーションを実施する場合にも, 可照時間の変動は水稻生育に影響を与えないと仮定して, 翌年度以降も, モデルで計算した可照時間をそのまま用いる.

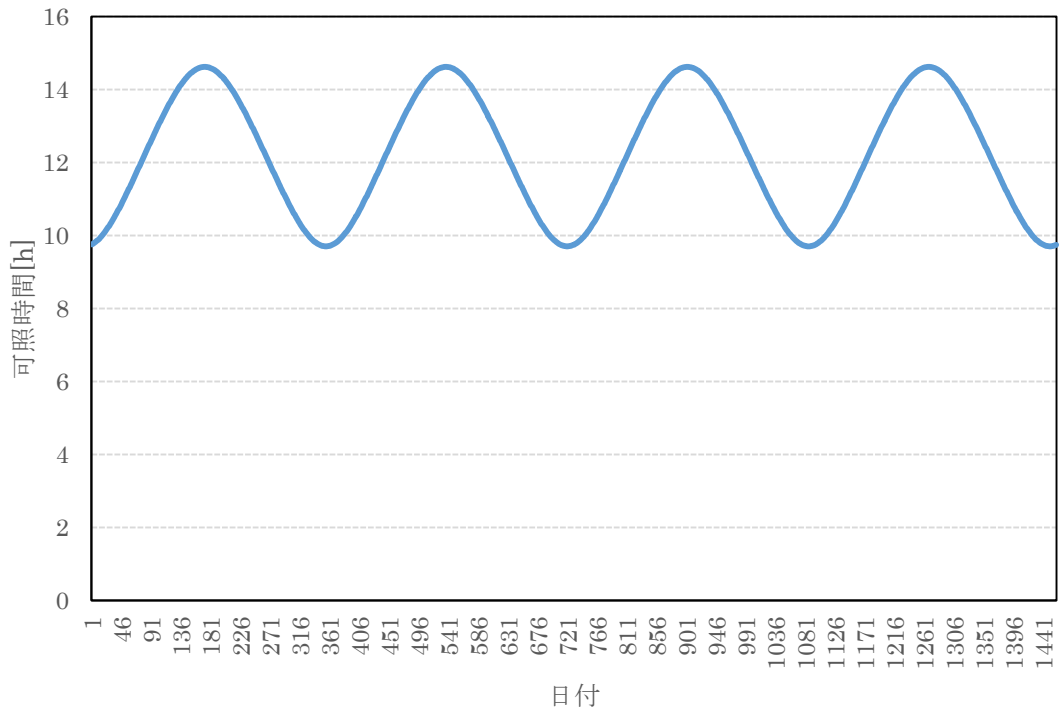


Figure5.1：日照時間の予測値

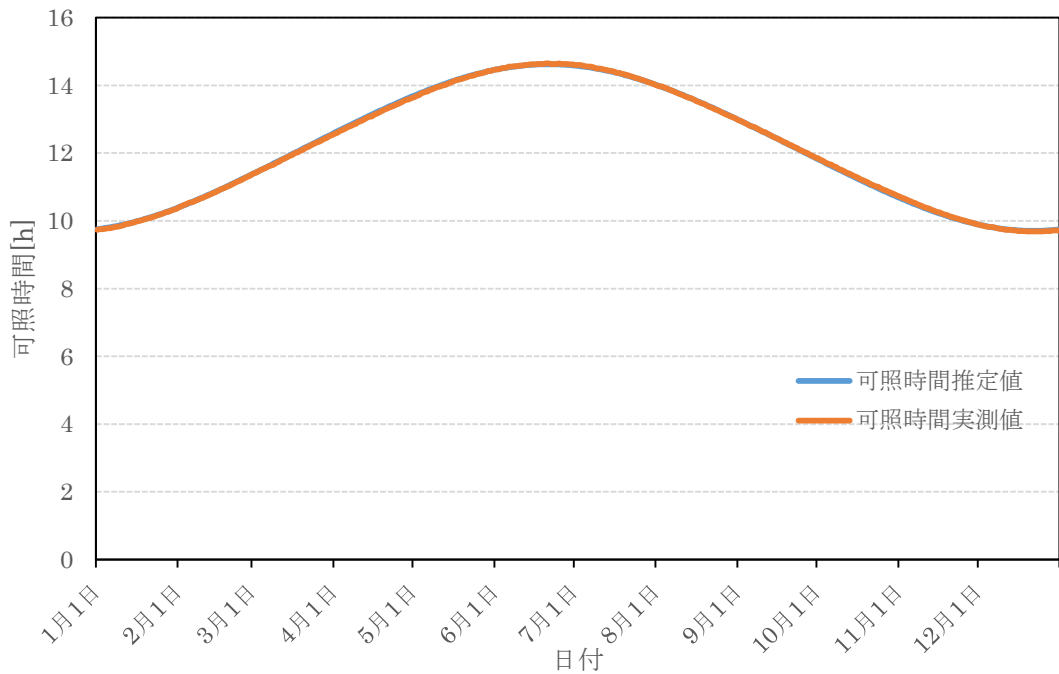


Figure5.2：日照時間の予測値と実測値の時系列データ  
 (出典) 国立天文台, “暦計算室—こよみの計算” [5.5]

## 5.2 投影率・遮光率変換曲線

### 5.2.1 投影率と遮光率の関係性

遮光率とは、「非遮光時に計測された全天日射量と、遮光時に計測された全天日射量の比率」として定義される。そのため、例えば遮光率が30%という状態は、通常よりも3割ほど、農作物が全天日射量を受光できていないという状況を表す。第4章で記述したように、SIMRIWでは、農作物が遮光条件下で受光可能な全天日射量の割合を定量化するために、遮光率をパラメータとして与える必要がある。

しかし営農型太陽光発電では、遮光率という概念の適用は難しい。これは太陽光パネルの設置面積が営農型太陽光発電設備の設置面積全体に占める割合として定義される「投影率」が、先に説明した「遮光率」と一致しないためである。

言い換えれば、35%の投影率である営農型太陽光発電設備を設置したとして、その設備下の遮光率が35%にはなりにくい。例えば、本研究で実施した実証試験で全天日射量を計測した結果、31%の投影率では、平均で約38%の全天日射量が減少していた。この結果から、遮光率は太陽光パネルの投影面積のみならず、散乱日射量の存在や構造物の形状、パネルの設置角度、設置高度などの要因に影響を受けていることが示唆される。

以上の理由から、太陽光パネルの「投影率」を与えることにより、受光可能な日射量の割合を表す「遮光率」が決定できるような関係式を導入する必要がある。本研究では、この関係式を「投影率・遮光率変換曲線」と呼称する。

### 5.2.2 投影率・遮光率変換曲線の立式

実証試験の結果から、31%の投影率では、平均で約38%の全天日射量が減少していた。つまり言い換えると、31%の投影率である営農型太陽光発電設備下で栽培された農作物は、非遮光時（投影率0%）に受光可能な全天日射量を100%とした場合と比較して、62%の全天日射量が受光可能である。

また、仮に投影率を100%とした場合（太陽光パネルが最大限の密度で設置されている）においても、営農型太陽光発電設備の水平面から入射する散乱日射量が存在するため、営農型太陽光発電設備下では、一定程度の全天日射量が確保できると考えられる。この太陽光パネル下で受光可能な散乱日射量は、太陽光パネルの高度や角度、太陽光パネルの設置面積などの各種要因で変化するため、厳密な値は不明である。そのため、本研究では暫定的な値を用いる。本研究では、この暫定的な「一定程度の全天日射量」を、NEDO日射量データベース閲覧システム<sup>[5,6]</sup>を参考にして、非遮光時の20%と仮定する。つまり言い換えると、本研究では、太陽光パネルを最大限の密度で設置した場合においても、太陽光パネル下で栽培されている農作物は、非遮光時の20%ほどの全天日射量が受光できることを想定している。

そして、これら3点のプロットを結ぶ曲線を「投影率・遮光率変換曲線」と呼称し、太陽光パネルの密度を表す「投影率」と、遮光条件の強弱を表す「遮光率」を変換する式として



立式する.

遮光率と投影率の散布図が Figure5.3 である. 本研究では, 図中の 3 点のプロットを結ぶ曲線を「投影率・遮光率変換曲線」と定義し, 投影率と遮光率を変換する基準とする.

$$Z = 1 - (0.5246x^2 - 1.3246x + 1) \quad (5.11)$$

(5.11)式で「投影率・遮光率変換曲線」を立式した. ここで X は, 「太陽光パネルの設置面積が営農型太陽光発電設備の設置面積に占める割合」として定義される投影率[0~1]であり, Z は「非遮光時に計測された全天日射量と遮光時に計測された全天日射量の割合」として定義される遮光率[0~1]である.

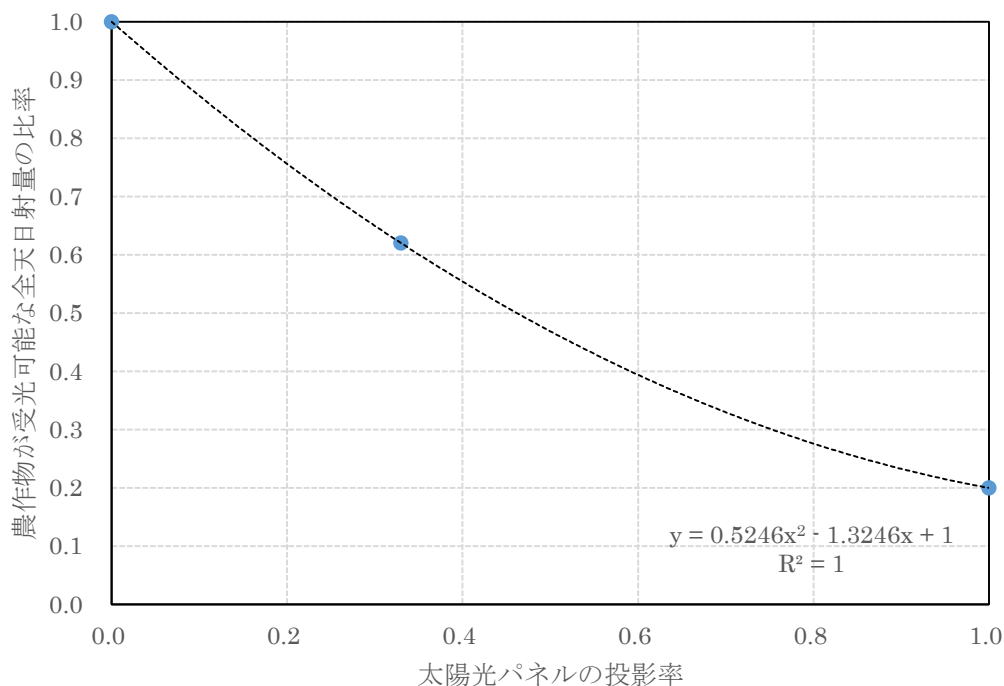


Figure5.3 : 投影率・遮光率変換曲線

### 5.3 太陽光発電量予測モデル

太陽光パネルを設置した際の発電量, ならびに売電収入の推定式を立式する. 以下の推定式は好井<sup>[5.1]</sup>が提案したモデルを参考に行っている.

i 年目の売電収入は, (5.12)式で計算できる.

$$\text{売電収入}_i = \text{発電量}_i \times \text{売電価格} \times \text{消費税率} - \text{コスト}_i \quad (5.12)$$

固定価格買取制度では、太陽光発電設備の売電を開始した年度の売電価格が20年間適用される。また、10kW以上の設備で発電された電力には、売電の際に消費税が付加される<sup>[5.7]</sup>。消費税率は、2016年1月現在の数値である1.08を用いる。

発電量は好井<sup>[5.1]</sup>と京セラの計算式<sup>[5.8]</sup>を一部参考にし、(5.13)式で計算する。

$$\begin{aligned} \text{発電量}_i = & \text{全天日射量}_i \times \text{傾斜補正係数} \times \text{温度補正係数} \\ & \times \text{設置方式による温度上昇への影響係数} \times \text{その他損失係数} \\ & \times \text{パワーコンディショナの変換効率} \times \text{設置容量} \times \text{受光率} \\ & \times \text{抑制係数} \times \text{劣化係数}_i \end{aligned} \quad (5.13)$$

以下で各係数の値の設定について説明を行う。

全天日射量はパネルを水平0[°]に設置した場合の日射量であるため、斜めに設置する際は角度に応じて傾斜補正係数を乗じる。NEDO<sup>[5.9]</sup>には、全国の主要地点において、パネルの受ける全天日射量を様々な設置方位と設置角度において測定した、月ごとの日平均日射量の結果が記載されている。東京の1~12月における水平面0[°]と太陽光パネルの設置角度30[°]、太陽光パネルの設置角度90[°]の傾斜補正係数を計算した結果が、Table5.1である。

温度補正係数は、パネルの表面温度の上昇による発電効率の低下を考慮したものであり、12~3月が0.9、4~5月及び10~11月が0.85、6~9月が0.8と設定した。

設置方式には陸屋根設置、傾斜屋根設置があるが、営農型太陽光発電の設置方式はメガソーラー発電等の陸屋根設置と同様とし、その係数は1.02となる。その他損失とは、受光面の汚れや、配線、逆流防止ダイオード等による損失であり、その係数は0.95とする。パワーコンディショナは、パネルにおいて発電された直流の電気を交流に変換する機器であり、型によりその変換効率は異なるが、本研究では0.95とする。

抑制係数は、電力システムの安定のため、電力会社が再生可能エネルギーの受け入れを制御できる出力抑制である。本研究では、抑制係数を0.95と設定する。劣化係数は、太陽光パネルが20年で約5%劣化すると想定する。

パネルの近くに高い木や建造物やある場合、影の影響による損失を考慮する必要があるが、本研究では設置場所を農地と想定しているため、周囲に構築物が存在しない開けた土地を想定し、太陽光パネルの受光率を1.00と設定した。以上の計算式及び値の設定を元に、(5.12)式から*i*年目の売電収入が求められる。

Table5.1 : 月ごとの傾斜補正係数

	0[° ]	30[° ]	90[° ]	斜面補正係数 30[° ]	斜面補正係数 90[° ]
1月	2.40	3.67	3.64	1.529	1.517
2月	2.85	3.73	3.12	1.309	1.095
3月	3.59	4.14	2.83	1.153	0.788
4月	4.02	4.12	2.23	1.025	0.555
5月	4.60	4.39	1.98	0.954	0.430
6月	4.05	3.77	1.76	0.931	0.435
7月	3.98	3.74	1.74	0.940	0.437
8月	4.26	4.22	2.07	0.991	0.486
9月	3.20	3.39	2.08	1.059	0.650
10月	2.76	3.32	2.51	1.203	0.909
11月	2.23	3.10	2.84	1.390	1.274
12月	2.12	3.29	3.31	1.552	1.561

#### 5.4 年経費率の設定手法

太陽光発電のコストには、大きく分けて初期費用と維持費用がある。それらの値は経済産業省資源エネルギー庁により毎年見積もられており、それらに応じて売電価格が決定される。初期費用にはシステム費用、土地造成費用、接続費用が含まれる。システム費用は太陽光パネルを含むシステム自体の費用である。

2013年の2月に公表された資源エネルギー庁の報告<sup>[5.10]</sup>によると、4件の営農型太陽光発電について、平均のシステム費用は30.5万円/kWであった。また、北風ら<sup>[5.11]</sup>のアンケート調査では、投融資代全てを算入して、24件の営農型太陽光発電の平均費用が33.4万円/kWであった。これらの差分をとると、約3.0万円/kWの費用が、土地造成費用と接続費用で計上されていると考えられる。この値は、一般的なメガソーラー発電と比較して高価である。ここから、土地に杭を打ち込む営農型太陽光発電では、土地造成費用が多めに見積もられていることがわかる。以上から、営農型太陽光発電設備を導入する際の土地造成費用や電力系統との接続費用は、3.0万円/kWとする。また営農型太陽光発電設備のシステム費用は30.5万円/kWとする。北風ら<sup>[5.11]</sup>のアンケート結果から、営農型太陽光発電設備の場合は、システム費用に規模の経済が働いていないことが示唆されている。そのため本シミュレーションでは、システム費用のスケールメリットは考慮しないものとする。

本研究では、初期費用を銀行から利子付きで借り入れ、1年ごとに返済することを想定した。返済の際の金利は、通常は返済期間が長期であるほど高くなる傾向にある。本研究では、返済期間として20年を想定することにし、金利は3%とした。返済方式には元利均等返済と元金均等返済の2つが存在する。元利均等返済は毎年の返済額が一定となる方式で、

元金均等返済方式は元金分の返済額は毎年固定であり、これに利息分が上乘せされる方式である。本研究では好井<sup>[5.1]</sup>を参考にして、前者の元利均等返済による返済とした。元金均等返済方式に比べて最終的に支払う利子が大きくなるが、毎年の負担を一定にできるというメリットがある。ここで初期費用を1、毎年の支払額を $y$ とすると、 $y$ は年経費率と呼ばれ、初期費用の利息を含めた全返済額のうち1年の支払額の割合を表す。借入金利を $r$ 、 $k$ 年後の支払残高を $S_k$ とすると、 $k+1$ 年後の支払額のうち利息分は $rS_k$ であるため、(5.14)式が成り立つ。 $n$ 年後に完済するならば $S_0$ であり、(5.14)の漸化式を計算すると、(5.15)式を得る

$$S_{k+1} = (1+r)S_k - y \quad (5.14)$$

$$y = \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} \quad (5.15)$$

本研究では、営農型太陽光発電設備を設置するために融資を受ける場合の返済期間が、20年間かつ金利3%の場合を想定する。ここで、(5.15)で求めた年経費率 $y$ を初期費用に掛けることで、各年の経費を求めることができる。

## 5.5 水稲収入予測モデル

$i$ 年度の水稲収入は(5.16)式で立式できる。

$$\text{水稲収入}_i = \text{収量}_i \times \text{買取価格} \times \text{消費税率} - \text{コスト}_i \quad (5.16)$$

ここで収量 $i$ はSIMRIWの推定結果であり、各年の全天日射量、気温、可照時間から計算される。また買取価格は品質により決定される。買取価格はJA全農が公表している基準価格を参考にした<sup>[5.12]</sup>。公表されている基準価格は1等米の価格とし、2等米は1等米の80%の買取価格、3等米は1等米の60%の買取価格、規格外米は1等米の40%の買取価格と設定した。低品質米の価格設定では、米穀データバンクの公表値を参考にして<sup>[5.13]</sup>。消費税率は2016年2月現在の数値である1.08を用いる。

コスト $i$ の算出には農林水産省が公表している水稲生産費データを利用する<sup>[5.14]</sup>。水稲生産費用は「物材費用」と「労働費用」、「その他費用」という3種類から成り立っている。Figure5.4が平成25年度に公表された水稲作付面積別の生産費用である。

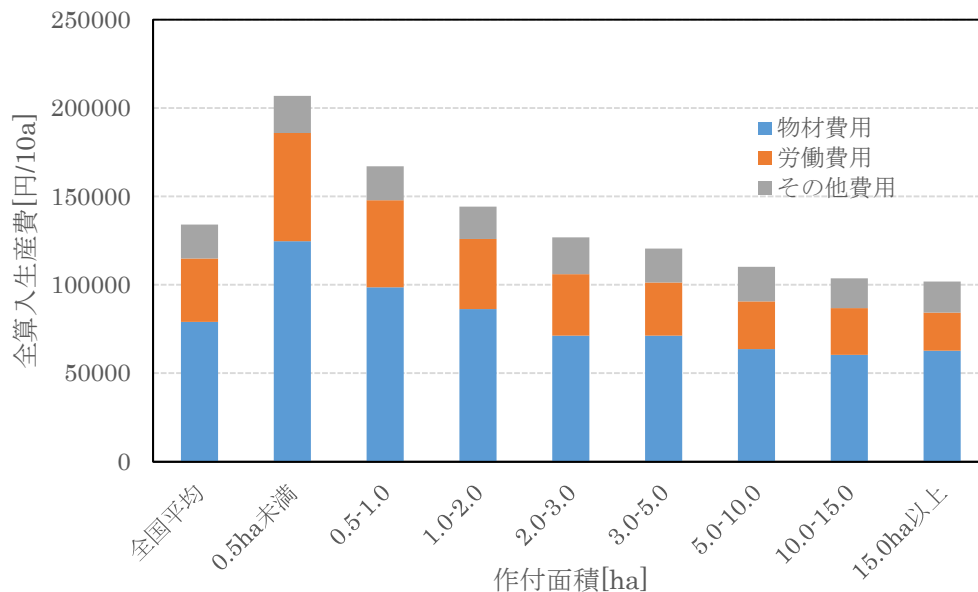


Figure5.4 : 水稲作付面積別の単位面積あたりの生産費用  
 (出典) 農林水産省, 平成 25 年度産 米生産費<sup>[5.14]</sup>

物材費用と労働費は栽培面積により決定されるため、本研究では設定した栽培面積に必要な物材費用と労働費、その他費用に Figure5.4 の数値を用いる。

前節の太陽光発電量予測モデル、ならびに本節の水稲収入予測モデルを組み合わせること、営農型太陽光発電の経済性が検討できる。

## 5.6 営農型太陽光発電の各種設定

本研究のシミュレーションでは、営農型太陽光発電の設置状況を以下のように仮定した。

太陽光発電設備の高度は、農機具の使用が妨げられない高さである 3m と想定する。また発電量の最大化を図るため、方位 0<sup>°</sup> ] として、太陽光パネルの設置角度は 30<sup>°</sup> ] と設定した。太陽光パネルの寿命は 20 年とし、パネルの劣化や汚れといった各種パラメータは 5.3 のように想定した。

水稲の栽培品種はコシヒカリとする。SIMRIW の初期入力データである DVI の初期値は 0.2、バイオマス量の初期値は 18[kg/10a]、LAI の初期値は 0.08 とし、移植日は 5 月 5 日 と設定した。また、SIMRIW の計算に必要なパラメータの各種初期値は、堀江ら<sup>[5.15]</sup>に準じた数値 (Table4.2) を設定した。

## 5.7 シミュレーション結果

### 5.7.1 収量減少ならびに品質劣化の検証

「太陽光パネルの設置面積が営農型太陽光発電設備の設置面積に占める割合」として定義される投影率を設定することで、営農型太陽光型発電における遮光条件の強弱が決定する。シミュレーションにより推定した、各投影率に応じた水稻の減収量を表したグラフがFigure5.5である。ここでは1980~2014年までの、34年間予測した各年の収量推定値の平均値と標準偏差を描画している。

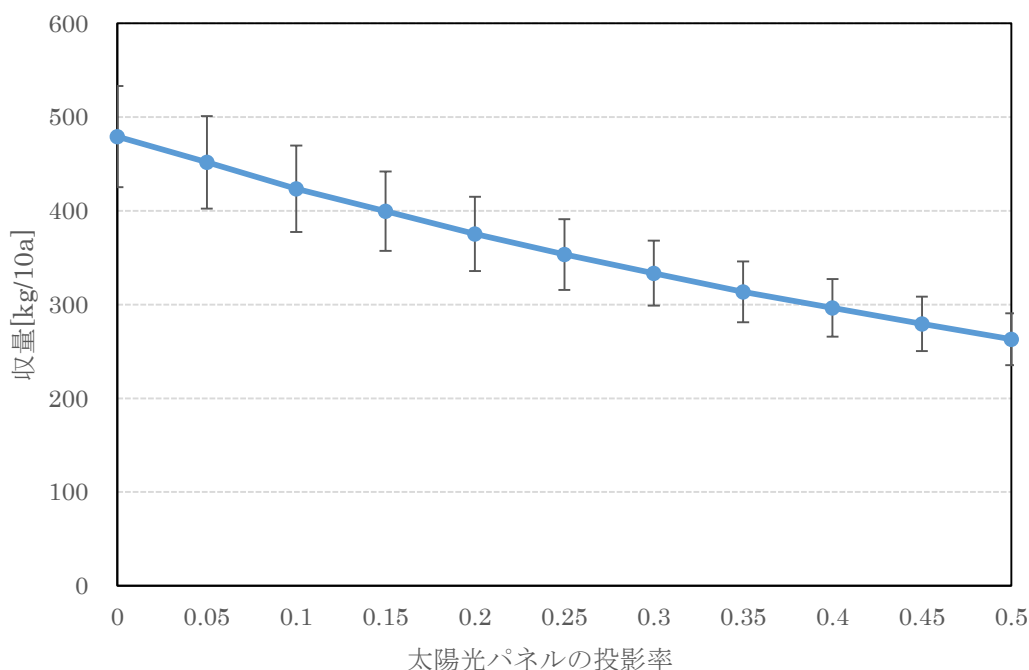


Figure5.5 : 太陽光パネルの土地に占める割合（投影率）  
に対応した水稻収量

シミュレーションの結果、約20%の投影率で20%ほど収量が減少していた。農林水産省が公表している見解では、営農型太陽光発電の継続条件が「収量8割以上で、著しい品質劣化が生じていない」と規定されている。そのため、営農型太陽光発電設備下の水稻栽培は、収量の観点からは、太陽光パネルの投影率20%前後が適当と考えられる。

またシミュレーションにより推定した、各投影率に応じた水稻品質を表したグラフがFigure5.6である。ここでも同様に、1980~2014年までの34年間予測した各年の水稻品質推定値の平均と標準偏差を描画している。水稻品質は不完全米（未熟米、死米）が増加することにより整粒歩合が減少しているものの、整粒歩合が70%以上確保されていた。ゆえに本シミュレーション結果からは、遮光条件を課すことにより水稻品質は落ちるものの、全て1等米と判断される。

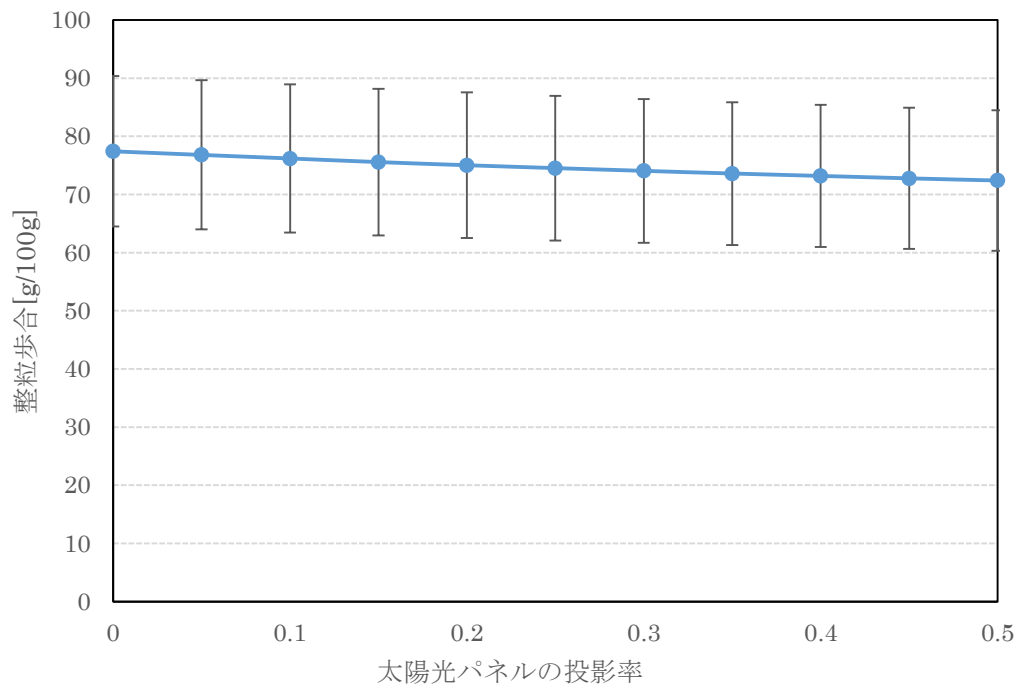


Figure5.6 : 太陽光パネルの土地に占める割合（投影率）  
に対応した水稲品質

しかし、水稲品質は全天日射量の単回帰式で推定しているため、気温の影響が考慮できていない。水稲品質は気象条件に加え、施肥量や土壌条件、品種といった多くの要因から決定されているため、本シミュレーションは暫定的な推定値である点に留意する必要がある。

### 5.7.2 地球温暖化による影響の検討

次に、地球温暖化の影響により近年計測されている夏季の高温化の影響を検討するため、1980-1982 年度という過去 3 年間の気象データを利用したシミュレーション結果と、2012~2014 年度という直近 3 年間の気象データを利用したシミュレーション結果を比較した。

Figure5.7 は、各時期による減収量の比較結果を表している。2012~2014 年の気象条件からは、約 15%の投影率で 20%ほどの減収が生じていた。一方、1980~1982 年の推定結果は、減収量が 2012~2014 年の推定結果よりも少なかった。このように、遮光条件による減収量は、近年になるに従い増加する傾向が確認できた。この収量の著しい減少は、遮光条件による出穂遅延により、8 月 10 日前後の夏季の高温期と出穂日が重複しているために生じている。換言すると、出穂日の高温条件が水稲の稔実不稔を引き起こし、収量を減少させているのである。今後も地球温暖化の影響から、日本では夏季の高温が微増していくことが予想されているため、遮光条件による出穂日と夏季の高温期の重複を避けることが必要にな

る<sup>[5.16]</sup>。具体的な改善策としては、移植日の早期化が挙げられる。移植日を早期化させることで、遮光条件により生じる出穂遅延を回避することができると考えられる。

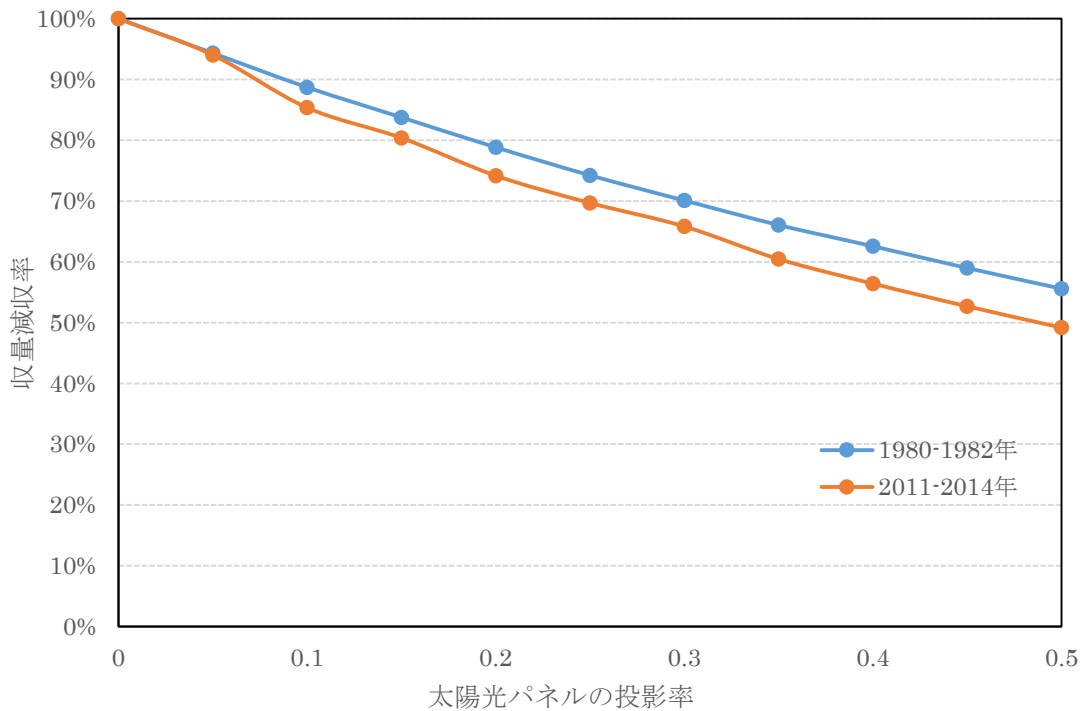


Figure5.7 : 収量推定値の 1980-1984 年の平均値と 2011-2014 年の平均値

### 5.7.3 移植日早期化の検討

本節では、営農型太陽光発電設備の下で水稲を栽培する場合の、移植日の最適な時期について検討を行う。5.6 で設定した移植日（5月5日）は、出穂遅延により出穂日が夏季の高温期と重複する可能性がある。そのため移植日を基準日（5月5日）より前に10日間ずらし（4月25日）、移植日を早期化させた状態でシミュレーションを実施した。なお、シミュレーションでは、代表年として、2014年度の気象データを利用した。

移植日を基準日より前に設定した場合のシミュレーション結果が Figure5.8 である。縦軸は非遮光時の水稲水稲を100%とした場合の、水稲収量の減少率を表している。ここで、同じ投影率間の収量を比較すると、早期に移植した水稲ほど収量の減少率が少ないことがわかる。これは移植日を前倒しすることにより、高温不稔が回避でき、減収を抑制することができたためである。ゆえに営農型太陽光発電下で水稲を栽培する場合は、高温障害の影響を避けるためにも、移植日を早期化させる取り組みが有効であると考えられる。



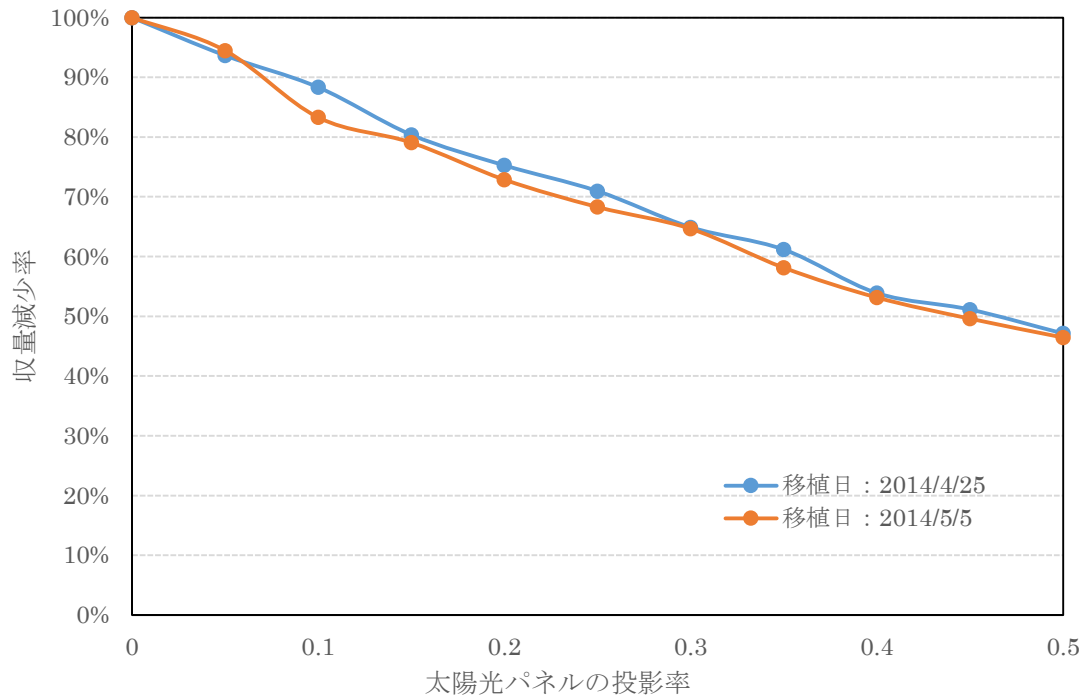


Figure5.8：移植日を早期化させた場合の収量推定値

#### 5.7.4 遮光時期の差異による収量減少量の検証

生育前期の遮光条件 ( $0 < DVI < 0.75$ ) により穂数が決定し、生育後期の遮光条件 ( $0.96 \leq DVI < 2$ ) により一穂重が決定される。収量は穂数と一穂重を乗じることで算出できるため (Figure3.24 を参照)、遮光時期をずらしてシミュレーションを実施することにより、遮光時期による減収効果について詳細に検討することができる。

ゆえに本節では、遮光時期をずらして水稻栽培を実施した場合の水稻収量を推定する。なお、遮光時期以外の水稻生育期間は、完全に全天日射量が受光できると仮定する。ここでは、3 ケース (ケース 1：生育後期の遮光条件 ( $0.96 \leq DVI < 2$ ), ケース 2：生育初期の遮光条件 ( $0 < DVI < 0.75$ ), ケース 3：全生育期間の遮光条件 ( $0 < DVI < 2$ )) を設定して、シミュレーションを実施した。Figure5.9 はシミュレーションの結果である。

シミュレーションの結果、水稻の減収量は、遮光を実施する時期に大きく依存していた。Figure5.9 から、生育前期の遮光条件による減収への寄与度が極めて大きいことがわかる。また、遮光条件による水稻収量への影響は、穂数と一穂重への影響とに、要因分解して考えることができる。そこで、遮光条件による穂数ならびに一穂重への影響が、減収量全体に占める割合を算出した。結果が Figure5.10 である。

シミュレーションの結果から、水稻の減収量は、穂数の減少により 84%ほど占められて

いることが明らかになった。穂数は生育前期に決定されているため、この結果から生育前期の日照条件を改善することが重要と考えられる。

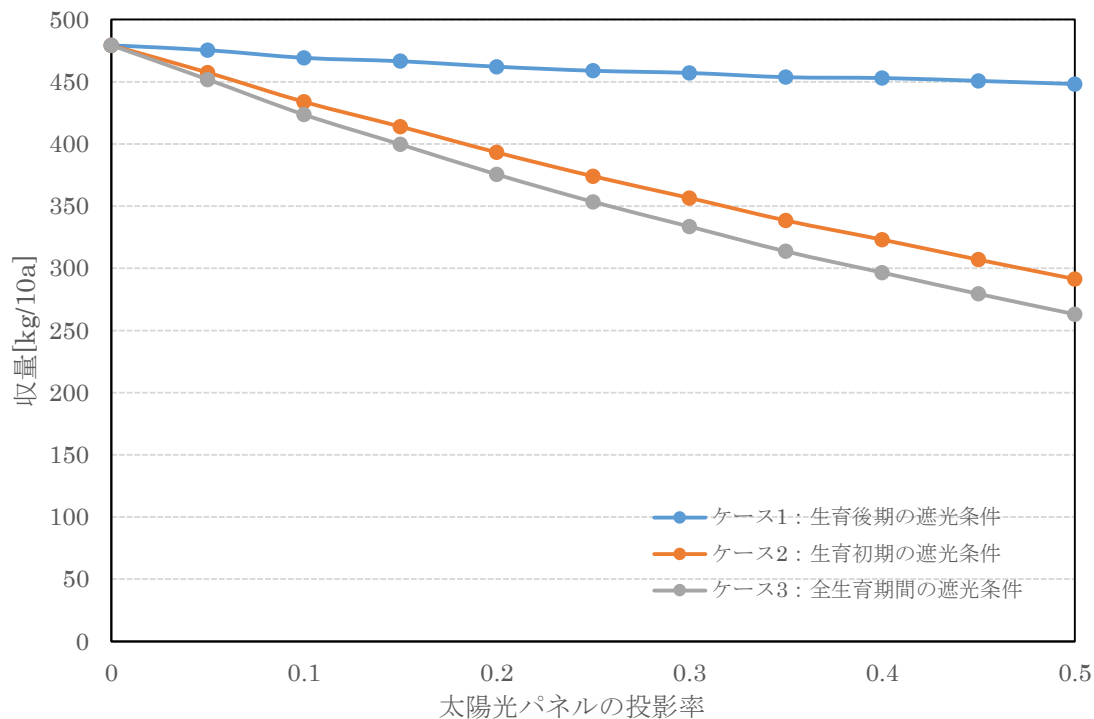


Figure5.9 : 遮光時期を変化させた際の収量推定値

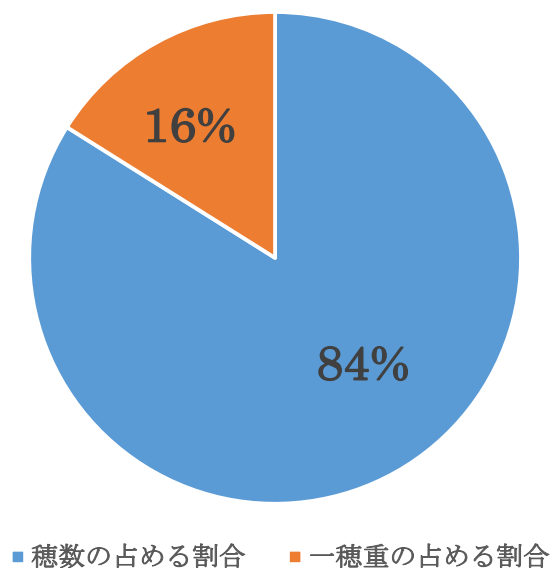


Figure5.10 : 減収量の構成割合

### 5.7.5 栽培面積の多寡による経済性

規模の経済性による影響を検討するため、栽培面積を増加させた場合のシミュレーションを実施した。ここでは栽培面積を2ケース（ケース1：栽培面積1ha、ケース2：栽培面積15ha）を設定し、各ケースの経済性について検討した。移植日は5月5日とし、売電収入と水稲収入は、5.4と5.5に記載した手法で計算した。ケース1の推定結果がFigure5.11、ケース2の推定結果がFigure5.12である。

Figure5.11では水稲栽培面積が1haと狭小であり、コストが高いため、収入のほとんどは売電収入に依存している。例えば投影率40%の場合、売電収入が毎年200万円ほどの利益である一方、水稲収入は50万円ほどの赤字となっている。

栽培面積を1haから15haに拡大した結果がFigure5.12である。水稲栽培には強力なスケールメリットが働くため、水稲栽培面積が大きい場合では、投影率を増加させても利益が確保できた。合計収入も、投影率が約35%までであるならば、営農型太陽光発電が優位という結果が得られた。栽培面積が15haの場合では、投影率40%前後から水稲の減収により、水稲栽培自体が赤字化するという結果が得られた。

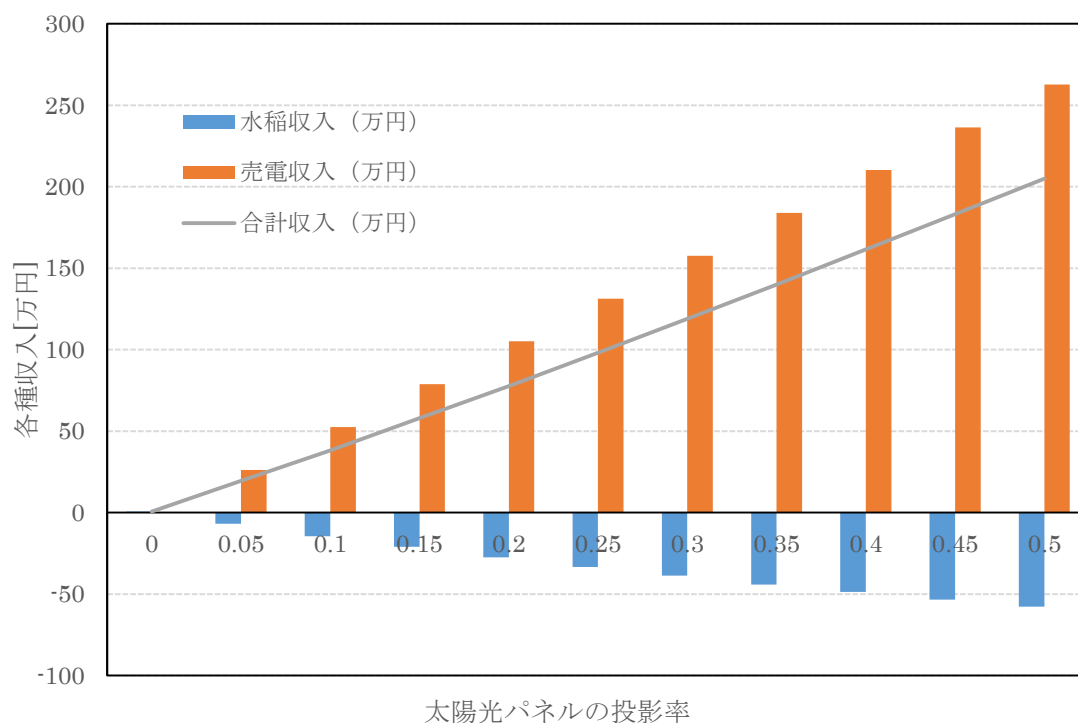


Figure5.11 : 営農型太陽光発電(1ha)のキャッシュフロー

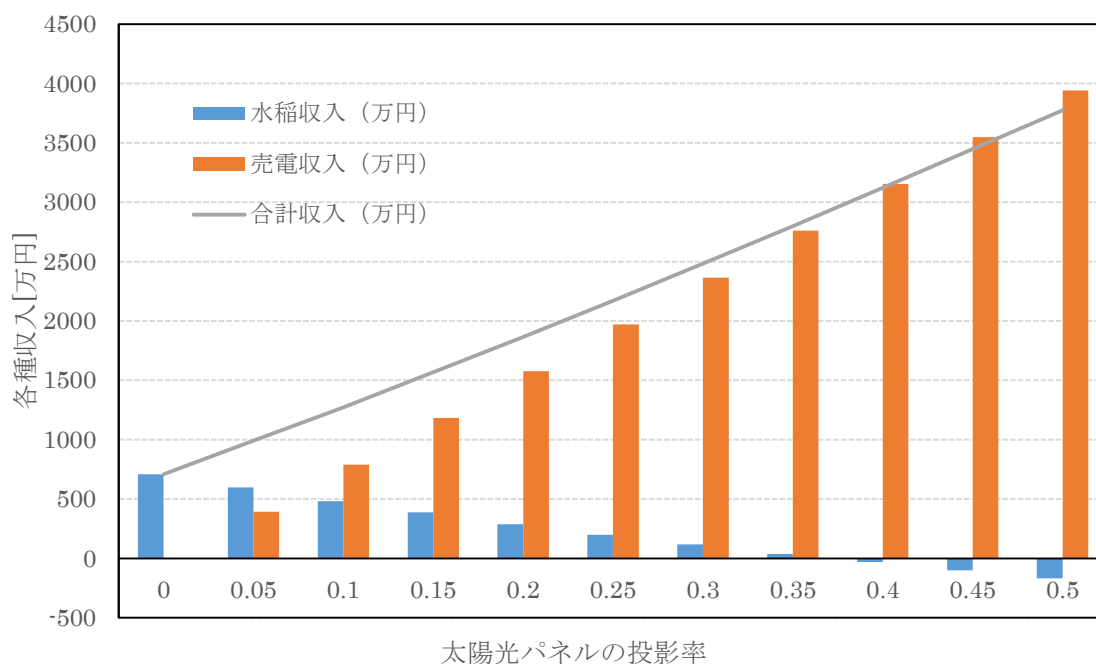


Figure5.12 : 営農型太陽光発電(15ha)のキャッシュフロー

### 5.7.6 買取価格の変動効果

前節では、売電価格が27円/kWhの場合の営農型太陽光発電の経済性について検討した。2016年2月現在で売電価格は27円/kWhであるが、将来的には太陽光発電設備の増加に従い、価格が下落してゆくと考えられる。そのため、本節では栽培面積が15haの場合に、売電価格を変動させた場合の経済性について検討する。売電価格を20円/kWhの各種収入がFigure5.13、24円/kWhに設定した場合の各種収入がFigure5.14である。

Figure5.13 から、仮に営農型太陽光発電設備のシステム費用が現在と変わらずに、売電価格が20円/kWhに下がった場合、合計収入は慢性的な赤字になった。水稻栽培の利益により投影率10%までなら利益が見込めるが、それ以上の投影率では経済的に成立しない。これは現状のシステム費用が割高であり、コストが慢性的に高い状況にあるためである。

Figure5.14 は、売電価格が24円/kWhの場合のシミュレーション結果である。売電収入は減少するが、水稻栽培により一定の利益が見込めるため、両者の利益を合計した合計収入が投影率35~40%の間で最大化されるという結果になった。

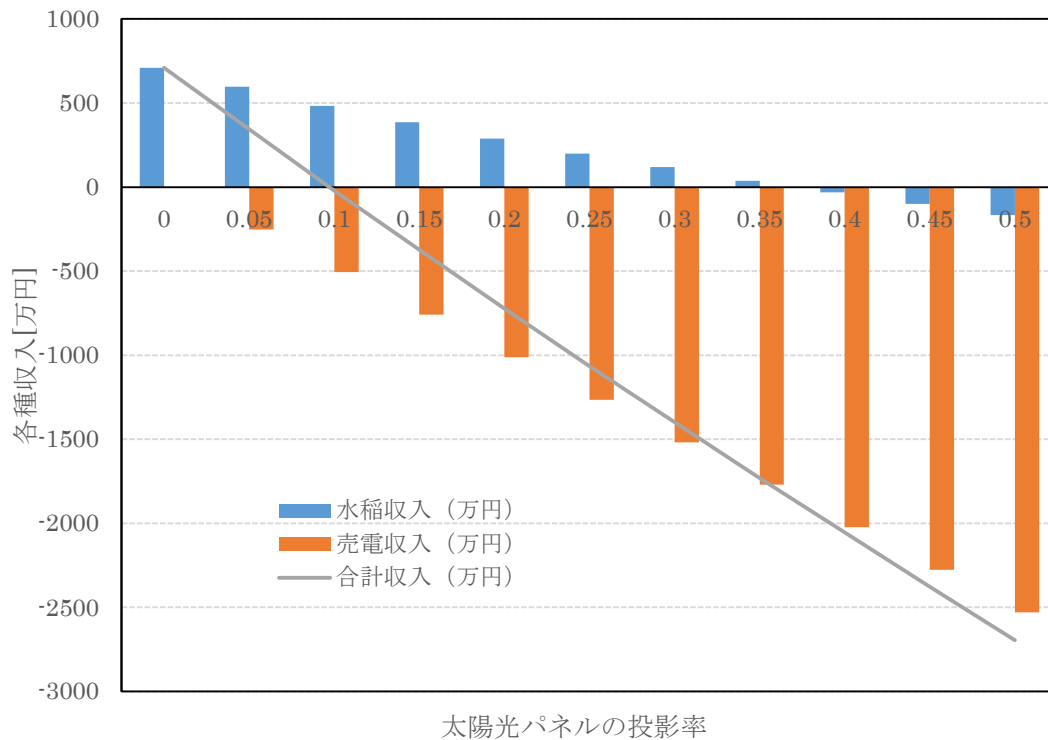


Figure5.13 : 売電価格が 20[円/kWh]の場合のキャッシュフロー

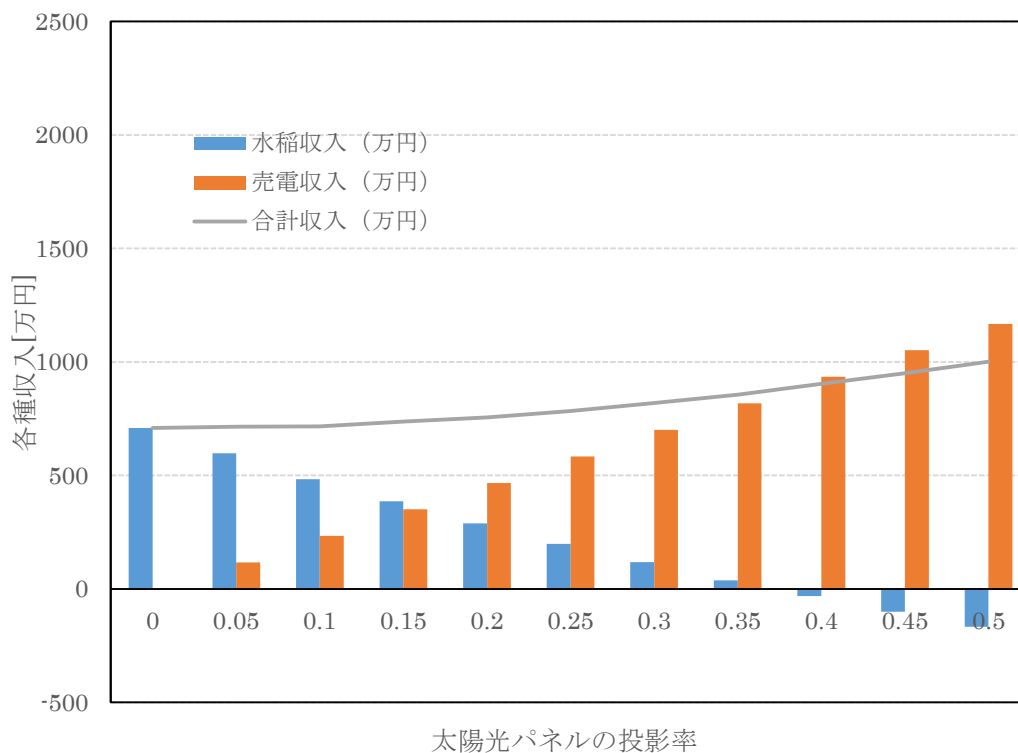


Figure5.14 : 売電価格が 24[円/kWh]の場合のキャッシュフロー

次に、Figure5.14 の各投影率における各月のキャッシュフローを計算する。投影率 20% 地点の各月における、キャッシュフローを計算した結果が Figure5.15、投影率 30%地点の各月におけるキャッシュフローが Figure5.16 である。ここでは水稻の収穫物が、収穫後の 10 月にまとめて買い取られることを想定している。水稻の収穫は年に一度であるため、天候により収入が左右されるリスクが極めて大きい。しかしグラフからわかるように、売電収

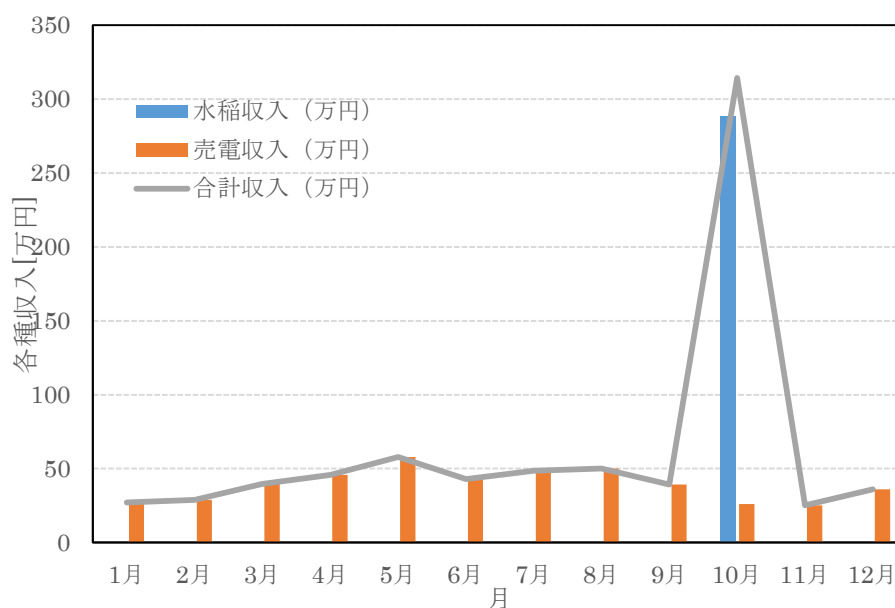


Figure5.15 : 投影率 20%地点における各月のキャッシュフロー

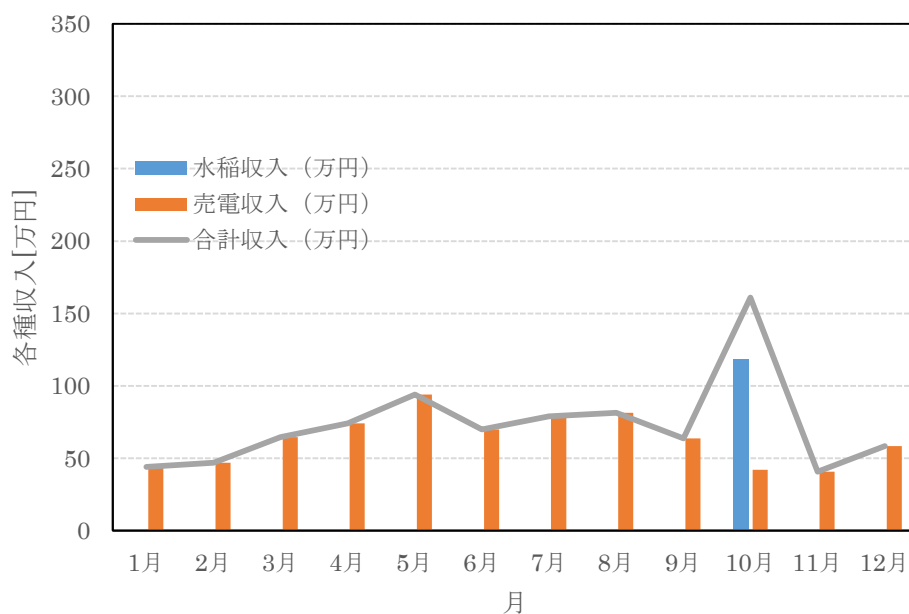


Figure5.16 : 投影率 30%地点における各月のキャッシュフロー

入は毎月得られるため、農業経営におけるリスクが軽減できている。ここから、経営安定化のためにも、営農型太陽光発電の導入は有用と考えられる。

### 5.7.7 太陽光パネル設置角度の変更効果

水稲生育期間中に太陽光パネルの設置角度を  $30^{\circ}$  から、より高傾斜の設置角度(例えば  $90^{\circ}$  )へ変更することにより、日陰を減らすことで、高収量を確保することが可能と考えられている。そのため、ハンドルを設置することで、太陽光パネルの設置角度が変更できるような、営農型太陽光発電設備の導入が検討されている。

以上の背景から、仮に水稲栽培期間 ( $0 < DVI < 2$  : 5月~9月)は太陽光パネルの設置角度を  $90^{\circ}$  (地面に対して垂直)として、非水稲栽培期間(10月~4月)は太陽光パネルの設置角度を  $30^{\circ}$  とした場合の減収量をシミュレーションにより検討する。また、パネル設置角度を上記のように変更した場合のキャッシュフローを算出することで、経済的に成立する可能性について検討する。ここでは、太陽光パネルを  $90^{\circ}$  (地面に対して垂直)に設置した場合の投影率を、カナディアンソーラー社製の太陽光パネル面積から計算して、 $30^{\circ}$  に太陽光パネルを設置した場合の  $1/4$  とした。シミュレーションの結果が Figure5.17 である。

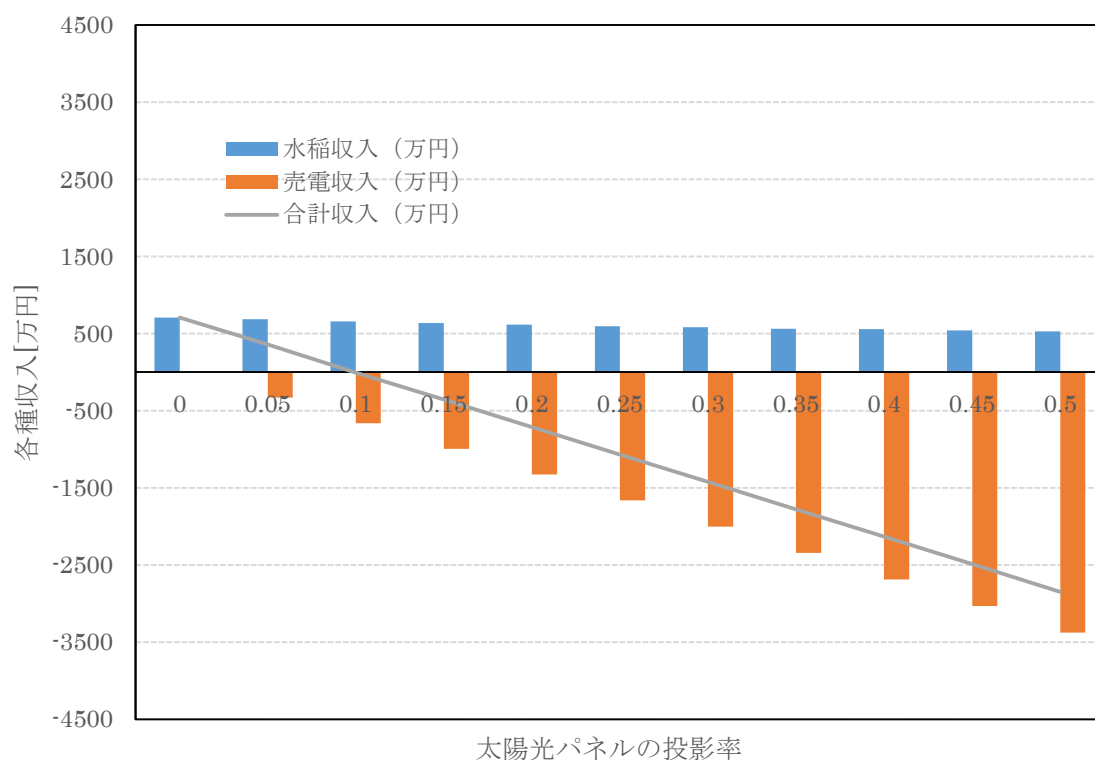


Figure5.17 : 栽培期間にパネル設置角度を  $90^{\circ}$  に変更した場合の  
キャッシュフロー

Figure5.17 から、水稲栽培期間全てに渡り、太陽光パネルの設置角度を  $90^{\circ}$  ]とし、非水稲栽培期間に設置角度を  $30^{\circ}$  ]とすると、1年間の発電量が30%ほど減少し、売電収入がマイナスになった。合計収入の赤字となった。ゆえに、太陽光パネルを水稲生育期に変化させるという取り組みは、経済的には成立しない可能性が大きい。

次に栽培期間の初期 ( $0 < DVI < 0.75$  : 5月~7月) は営農型太陽光発電の設置角度を  $90^{\circ}$  ] (地面に対して垂直) とし、水稲栽培の後期 ( $0.75 \leq DVI < 2$  : 8月~9月), ならびに非水稲栽培期間 (10月~4月) は太陽光パネルの設置角度を  $30^{\circ}$  ]として、同様のシミュレーションを実施した。シミュレーションの結果が Figure5.18 である。

シミュレーションの結果、太陽光パネルの設置角度を、水稲栽培の前期に  $30^{\circ}$  ] から  $90^{\circ}$  ]へと変更することにより、発電量が20%ほど減少していた。これは Table5.1 からわかるように、最も太陽高度が高い時期に設置角度を  $90^{\circ}$  ]に変更することにより、傾斜補正係数の数値が著しく減少しているためである。そのため、売電収入は Figure5.17 と同様に赤字であり、経済的に成立しない可能性が示唆される。

一方、投影率50%の場合にも関わらず水稲収量の減少率は20%弱であり、収量の確保という観点からは、パネル設置角度を変更することの優位性が示された。

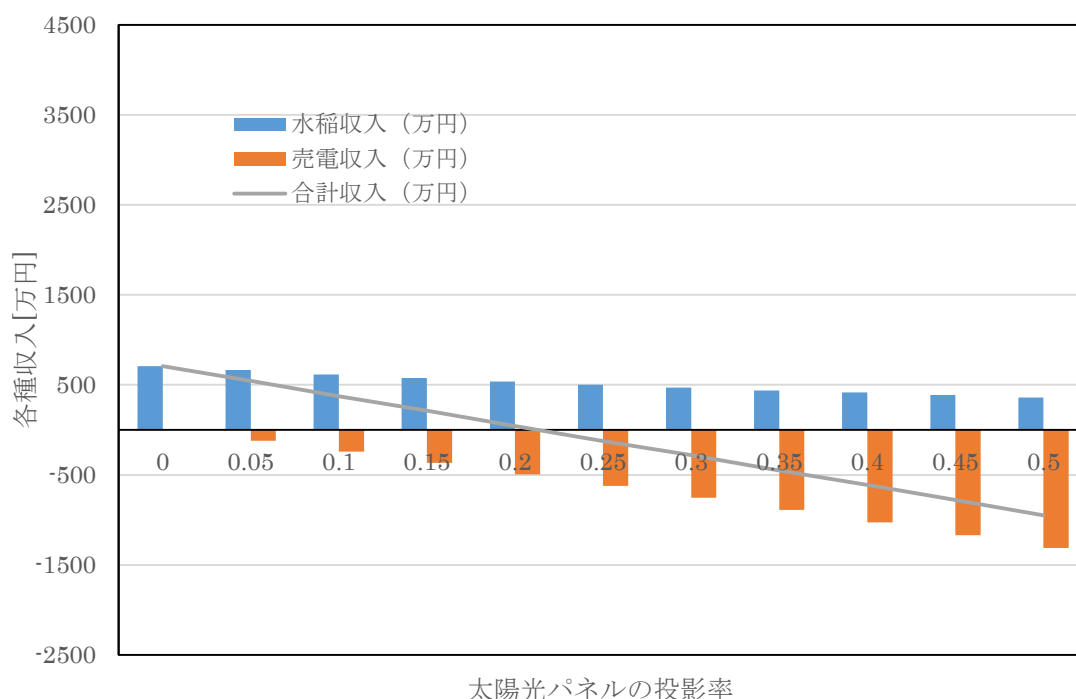


Figure5.18 : 栽培初期にパネル設置角度を  $90^{\circ}$  ]に変更した場合のキャッシュフロー



## 5.8 まとめ

本章で実施したシミュレーションから、6点の知見が得られた。

1点目は、投影率が20%の場合に水稲収量が20%ほど減少するという、水稲収量と遮光条件についての定量的な関係性である。現状の営農型太陽光発電設備の投影率は30~40%であるので、水稲を栽培する場合には、遮光条件が過度であると考えられる。

2点目は、出穂日が夏季の高温条件と重複することにより生じる減収、つまり高温障害の可能性である。慣行の水稲栽培では出穂日の最高気温が28~30℃ほどになるよう、逆算して移植日が決定されている。しかし、営農型太陽光発電設備下では生育不良による出穂遅延により、出穂日の最高気温が32~36℃ほどに上昇してしまう。このため高温障害が発生しやすくなる。ゆえに営農型太陽光発電で水稲を栽培対象とする場合には、慣行の移植日より早期に移植すべきと考えられる。

3点目は遮光による減収量の80%以上が、穂数の減少により生じていたことである。遮光による一穂重の減少は減収量全体の20%以下であったため、収量を確保するためにも移植日から最高分けつ期までの、生育初期の日照条件を改善する必要がある。具体的には、太陽光パネルの裏面に鏡やフィルムを塗布する、太陽光パネルの設置高度を上昇させる、設置角度を変更する、などの散乱光を利用する取り組みが、改善策の選択肢として考えられる。

4点目は栽培面積を拡大することによる、経済的な優位性である。水稲栽培はスケールメリットがきわめて大きいため、広範囲に渡り営農型太陽光発電設備を導入することにより、高い経済性を確保できる。

5点目は売電価格の低下による売電収入の減少が、水稲収入により補完できることである。現状の売電価格(27円/kWh)では売電収入がきわめて大きく、水稲収入との間に大きな隔たりが生じている。ゆえに営農型太陽光発電の有効性が提示しにくい。しかし売電価格が24円/kWhまで下落すると、水稲収入と売電収入がお互いを補完するように働くため、営農型太陽光発電を設置した際の優位性が示される。加えて売電収入が通年を通して得られるため、水稲栽培に特有の気象災害によるリスクを軽減できる。

6点目は、水稲の栽培期間は太陽光パネルの設置角度を90[°]にするという、水稲が受光可能な全天日射量を確保する取り組みの検討結果が挙げられる。この取り組みを実施することで20~30%ほど発電量が減少するため、合計収入は赤字になり、経済的な優位性は確認できなかった。これは償却期間20年間、金利3%という設定にから算出した年経費率を利用しているため、コストが通常よりも増加しているためと考えられる。本研究のコスト設定から売電収入は赤字ではあるものの、仮に融資を受けず自己資金のみでパネルを設定する、償却期間を短縮化するなどの措置をとるならば、収量を確保しつつ、黒字化させることも可能であると考えられる。またパネル設置角度を変更することにより、収量は大幅に確保できていたため、収量の確保という観点からは、有効な取り組みであると考えられる。

## 5.9 参考文献

- [5.1] 好井宏明;時系列分析を用いたメガソーラーにおける天候デリバティブの評価, 東京大学修士論文, (2015), pp. 1-102.
- [5.2] 中川清隆;太陽方位, 高度, 大気外日射量の計算,  
[http://es.ris.ac.jp/~nakagawa/met\\_cal/solar.html](http://es.ris.ac.jp/~nakagawa/met_cal/solar.html)
- [5.3] 気象庁;過去のデータ検索ー茨城県,  
[http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/select/prefecture.php?prec\\_no=40&block\\_no=&year=&month=&day=&view=](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/select/prefecture.php?prec_no=40&block_no=&year=&month=&day=&view=)
- [5.4] 川浦真吾;天候トレンドの統計学的分析に基づく太陽光発電と天候デリバティブの天候リスクに関する研究, 東京大学修士論文, (2011), pp. 1-234.
- [5.5] 国立天文台;暦計算室ーこよみの計算,  
<http://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/koyomix.cgi>
- [5.6] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO);日射量データベース閲覧システム, 佐倉市,  
<http://app0.infoc.nedo.go.jp/metpv/metpv.html>
- [5.7] 経済産業省;再生可能エネルギーの仮定価格買取精度ガイドブック 2015 年度版,  
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/data/kaitori/2015\\_fit.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/data/kaitori/2015_fit.pdf)
- [5.8] 京セラ株式会社ホームページ;発電電力量の解説,  
<http://www.kyocera.co.jp/solar/pvh/about/simuinfor/>
- [5.9] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO);太陽光発電フィールドテスト事業に関するガイドライン,  
<http://www.nedo.go.jp/content/100110086.pdf>
- [5.10] 資源エネルギー庁;最近の太陽光発電市場の動向及び前回のご指摘事項について,  
[http://www.meti.go.jp/committee/chotatsu\\_kakaku/pdf/013\\_02\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/chotatsu_kakaku/pdf/013_02_00.pdf)
- [5.11] 北風 亮, 小野田 真二, 廣瀬 勝之, 大平 佳男;ソーラーシェアリングの知見・課題の整理と事業化モデル構築に関する研究～南相馬市を含む先進地域の取組みを事例に～, 生協総研賞・第 11 回助成事業論文報告会, 2015, pp. 105-121.
- [5.12] 農業共同組合新聞;27 年産米 米流通最前線】価格変動のリスク対応へ 取引市場の整備を,  
<http://www.jacom.or.jp/kome/closeup/2015/150831-27958.php>
- [5.13] 米穀データバンク;集荷価格一覧,  
[http://www.japan-rice.com/cargo\\_booking\\_price.html](http://www.japan-rice.com/cargo_booking_price.html)
- [5.14] 農林水産省;平成年度産 米生産費,  
[http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/seisanhi\\_nousan/pdf/seisanhi\\_kome\\_13.pdf](http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/seisanhi_nousan/pdf/seisanhi_kome_13.pdf)

- [5.15] T. Horie; The rice crop simulation model SIMRIW and its testing, *Modelling the Impact of Climate Change on Rice in Asia*, 1995, pp. 51–66.
- [5.16] 気象庁; IPCC 第五次評価報告書 第一部作業部会報告書 政策立案者向け要約,  
[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc\\_ar5\\_wg1\\_spm\\_jpn.pdf](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf)

## 6 結論

### 6.1 結論

本研究では水稻を対象とした営農型太陽光発電の実証試験を行い、実証試験の結果を基に営農型太陽光発電のシミュレーションを実施した。実証試験とシミュレーションからいくつかの知見が得られた。まずは実証試験から得られた知見について記述する。

1点目は、遮光条件では水稻生育状況に差異が生じることである。草丈や SPAD 値は、遮光条件による影響を受けていなかった。一方、穂数ならびに一穂重、籾重の著しい減少が確認できた。また遮光区では、出穂日の出穂茎数が有意に少なく、出穂遅延も確認された。以上から、水稻の生育が、遮光条件による影響を強く受けることが明らかになった。2点目は、水稻の品質劣化についてである。遮光条件による品質劣化ならびに食味値の低下については、一時的な遮光実験結果から明らかにされていたが、本研究ではライフサイクル全体の遮光条件でも、同様の結果が生じることを確認した。

次にシミュレーション結果から得られた知見について記述する。1点目は、遮光条件による品質劣化と減収の、定量的な関係性である。シミュレーションを実施し、遮光条件による減収について検討した結果から、水稻を栽培作物とする場合には、20%程度の投影率が妥当と考えられる。2点目は、水稻移植日の早期化が、収量を確保するために有効なことである。地球温暖化によりほぼ確実に生じると予測されている夏季の高温化に、遮光条件による出穂遅延が加えると、水稻の高温障害が発生するリスクが高まる。ゆえに営農型太陽光発電で水稻を栽培対象とする際には、遮光条件の強弱に応じて、移植日を早期化させる方策が有効と考えられる。3点目は、水稻生育初期では特に、日照条件を改善する必要があることである。シミュレーションの結果から、減収量の80%以上は、生育初期の遮光条件に起因していた。そのため、太陽光パネルの高度を高くする、設置角度を変更する、パネル裏面に鏡やフィルムを塗布する、等の改善策を講じることにより、生育初期の日照条件を改善するべきと考えられる。4点目は、栽培面積を拡大することによる規模の優位性である。シミュレーションから、水稻栽培面積を拡大することによる経済的な優位性が検証できた。そのため、より広範囲に渡って、営農型太陽光発電設備を導入してゆくべきと考えられる。しかし、現状では、営農型太陽光発電は黎明期のため、システム費用に規模の優位性が働いていない。そのため、営農型太陽光発電の普及を促進することで、営農型太陽光発電設備のシステム費用を低下させてゆくことが必要と考えられる。5点目は、太陽光パネル設置角度の変更についてである。収量を確保するという観点からは、水稻栽培期間にパネルの設置角度を90[°]に変更することは効果的であった。しかしパネル設置角度を変更することにより、発電量が30%ほど減少するため、経済的に成立しなくなることが確認できた。ゆえに太陽光パネルの設置角度を変更することは現実的には難しいと考えられる。

これら、実証試験とシミュレーションから得られた7点の知見が、本研究の結論である。

## 6.2 本研究の課題

### 6.2.1 実証実験の課題

実証試験では、主に4点の課題が指摘できる。

1点目は日射計の問題である。本実証試験場で使用した日射計はフォトダイオードを利用した光電式の日射計であるため、計測可能な光の波長範囲が限られていた。より正確な計測を実施するためにも、熱電対式の日射計を利用すべきである<sup>[6.1]</sup>。また光合成は光化学反応であるため、エネルギーベースの全天日射量に加えて、光量子量であるPPFDを計測する必要がある<sup>[6.2]</sup>。遮光条件下におけるPPFDと全天日射量の関係について検討するためにも、全天日射量とPPFDを同時に計測することが望ましい<sup>[6.3]</sup>。2点目は施肥量の定量化である。本実証試験では有機肥料を使用したため、厳密な無機栄養分の定量化が行えなかった。施肥による水稻の生育促進効果と、遮光による生育抑制効果の関係性について検証するためにも、今後は、水稻生育状況と肥料分の定量的な関係性について検討する必要がある。3点目は水稻生育調査の観測項目についてである。本研究では穂数、SPAD値、草丈、出穂茎数という4項目を調査項目とした。しかし、穂数の減少について深く検討するためにも、各時期における分けつ発生数を緻密に調査する必要がある。また生育の各段階での草丈、SPAD値を高頻度に計測することにより、時系列で変化する水稻生育状況についてより深く検討することができる。このように、調査項目や調査時期、調査頻度などの再設定が必要である。4点目は成分分析についてである。本研究では蛋白質含量などの成分調査、ならびに食味検査を実施しなかった。しかし、一時的な遮光条件を課すことでも、水稻米粒の各種成分が変化することが先行研究では明らかにされている。ゆえに、成分含有量ならびに食味(粘り、硬さ、粒径などで決定)は、通年の遮光条件を課す場合においても変化すると考えられる。以上の理由から、食味の決定要因である各種項目や、含有成分の分析を実施する必要がある。

### 6.2.2 立式したモデルの課題

モデル構築に関しては、2点の課題が存在する。1点目は、品質予測モデルの精緻化である。本研究では計測した温度データに有意な差異が確認できなかったため、品質予測モデルは全天日射量の単回帰式とした。しかし、気温と全天日射量間の非線形な関係が水稻品質に生じることが明らかにされているため、品質予測モデルの改良が必要である<sup>[6.4]・[6.6]</sup>。具体的には、各種気象要素(気温、日射量、土壌条件など)を説明変数とした、重回帰式などの構築が有用と考えられる。このように、水稻品質と気温、全天日射量の関係についての詳細な検討が望まれる。2点目は、SIMRIWで使用するパラメータの検討である。SIMRIW固有パラメータは、圃場実験により得られたパラメータであるため、圃場実験を実施した地域内での当てはまりは良いが、日本全国に拡大しにくいという欠点を抱えている<sup>[6.7]</sup>。ゆえにIizumi et al<sup>[6.8]</sup>の手法を参考にして、日本全国に適用可能なパラメータの推定を行う必要がある。

### 6.3 今後の展望

遮光実験，モデル構築，その他の順に，今後の展望を述べる．

#### 6.3.1 遮光実験

遮光実験に関しては，4点の展望が考えられる．

1点目は，水稻以外での作物で遮光実験を実施することである．「付録 B」に掲載した遮光実験の結果から，遮光条件による減収に，作物ごとに著しい差が確認できる．そのため，営農型太陽光発電に適した，耐陰性の強い農作物の選定を行う必要がある．例えばワサビやコンニャク，サトイモでは先行研究の結果から，遮光条件による減収が比較的少ないと考えられる<sup>[6.9][6.10][6.11]</sup>．また青菜やイッポンワラビのような農作物では，先行研究から，遮光条件を課すことによる収量増加の可能性が考えられる<sup>[6.12][6.13][6.14]</sup>．薬用作物もオウレンやスイートバジル，カギカズラ，ウコンなどの薬用作物において，遮光条件を課すことによる収量増加の可能性が，いくつかの先行研究から示唆されている<sup>[6.15][6.16][6.17][6.18]</sup>．2点目は，多年生農作物で遮光実験を実施することである．こちら「付録 B」から，前年の遮光条件が，翌年以降の収量や品質に影響を与える可能性が示唆されている<sup>[6.19][6.20]</sup>．そのため，この点についても検討が必要である．3点目は，遮光条件による成分変化の検討である．例えば，ホウレンソウでは遮光条件を課すことにより，葉茎内に，特定の有害成分が蓄積される可能性がある<sup>[6.21][6.22][6.23][6.24]</sup>．また遮光条件を課すことにより，ミカンやナシ，リンゴといった果実の糖度や酸味値も変化する<sup>[6.25][6.26][6.27]</sup>．水稻でも蛋白質含量の増加による食味値の低下が引き起こされる可能性がある．ゆえに収量や外観品質といった項目に加えて，含有成分についても詳細な分析を実施することが必要である．4点目は，光飽和点の再検討である．光飽和点の先行研究の多くには，1.7.1で指摘した3点の課題が存在しているため，各農作物と各品種について，各生育ステージにおける光飽和点の値を，新たに推定する必要がある．その際は，光量の単位を全天日射量 $[MJ/m^2]$ やPPFDとし，営農型太陽光発電に直接利用可能な形式で計測する必要がある．

#### 6.3.2 モデル構築

モデル構築では2点の展望が考えられる．

1点目は，気象予測モデルの構築である．本研究の5章で実施した営農型太陽光発電の各種シミュレーションでは，気温データと全天日射量データは気象台で計測され，公表されている数値データを利用した．しかし営農型太陽光発電のリスク評価を行うためにも，各地域の全天日射量と気温を予測するモデルの開発が望まれる．例えば好井<sup>[6.28]</sup>や Tee<sup>[6.29]</sup>などで用いられている自己回帰分析の手法を用いることで，精度の高い気象予測モデルが開発できると考えられる．2点目は，太陽光パネルを設置した圃場の日射量分布を正確に再現可能

なモデルを開発することである。緯度や経度、太陽光パネルを設置した際の高度、太陽光パネルの密度により、太陽光パネル下で受光可能な直達日射量や散乱日射量は変化する。影の位置や長さ、影が生じる時間も変化するため、太陽光パネル下と太陽光パネル外の日射量はモザイク状に分布すると考えられる。ここでは、Dupraz et al.<sup>[6.30]</sup>や古材<sup>[6.31][6.34][6.35][6.36]</sup>、ならびに古材ら<sup>[6.32][6.33]</sup>で実施されている手法を参考にすることで、太陽光パネル下の全天日射量を予測するモデルが開発できると考えられる。

### 6.3.3 その他

その他には、7点の展望が考えられる。

1点目は、太陽光パネル裏面に鏡やフィルムを塗布し、散乱光を増幅させる実証試験である。植物群落内に散乱光が入射することによる生育促進効果が、古材ら<sup>[6.33]</sup>と谷ら<sup>[6.37]</sup>により提案されている。このように、日照条件の改善には、散乱光を利用する仕組みの開発が有用と考えられる。2点目は、降水パターンの変化と土壌水分量についての検討である。太陽光パネルを設置することで、農作物が有効利用な土壌水分量に変化する可能性が指摘されているため、この点についても検討が必要である<sup>[6.38]</sup>。3点目は、異なる施肥量と遮光条件を組み合わせる実施する生育実験である。肥料は農作物の生育を促進し、遮光は生育を抑制する。そのため、どちらの効果が卓越しているのかを検討することには意義があるが、先行研究が不足している状況にある<sup>[6.39][6.40][6.41]</sup>。そのため、施肥量と遮光条件の関係性についても詳細に検討する必要がある。4点目は、異なる灌漑スケジュールによる水稻生育状況の評価である。遮光条件による出穂遅延から、最適な中落ちの時期が変わる可能性がある。そのため、遮光条件に応じた最適な栽培手法を開発する必要がある。5点目は、遮光条件による農作物の葉温、植物群落温度の計測である。営農型太陽光発電では、直達日射量を遮るがゆえに、葉温が低下することが指摘されている<sup>[6.42]</sup>。また植物群落温度に変化が生じる点も指摘されている<sup>[6.43]</sup>。そのため、もし夏季の遮光条件を課すことにより葉温の上昇を抑制することができるならば、営農型太陽光発電では、水稻の高温障害による減収効果を最小化させることが可能になる。6点目は、GISを用いた営農型太陽光発電の最適地の推定である。農地は傾斜地では栽培費用が高くなるため、栽培に適していない。また傾斜地は中山間地である可能性が高いため、電力の大需要地（東京や大阪といった都市部）から距離が離れている可能性がある。ゆえに、平地で栽培されている水田面積の地理的な推定と、電力の大需要地と農地間の距離などの関係性を考慮した、営農型太陽光発電の最適設置地点ならびに最適導入量の推定を行う必要がある。7点目は、営農型太陽光発電設備の対風性、耐震性の評価である。営農型太陽光発電設備の脆弱性がリスクとして受け止められているため、頑健な構造の提案や、柱材料、安全なパネル高度の提案が必要である<sup>[6.44]</sup>。

#### 6.4 参考文献

- [6.1] 岡田益己;日射量・光強度の正しい測り方, 生物と気象, 14(2014), pp. A1 - 3.
- [6.2] 高見晋一;生態環境としての光の計測, 生物と気象, 11(2011), pp. A1 - 7.
- [6.3] 細川 桂子, Pongsa-Anutin Teerasak, 鈴木 晴雄;農業用被覆資材下における日射量,照度,光合成有効光量子束密度の透過特性, 香川大学農学部学術報告, 115(2010), pp. 19-24.
- [6.4] 岡田 将誌 飯泉 仁之直, 林 陽生, 横沢 正幸;水稻品質の近年の低下傾向に関する気候学的考察, 農業気象, 65(2009), pp. 327-337.
- [6.5] M.Okada, T. Iizumi, Y. Hayashi, M. Yokozawa; Modeling the multiple effects of temperature and radiation on rice quality, Environmental Research Letters, 6.3 (2011), pp. 1-8.
- [6.6] 河津 俊作, 本間 香貴, 堀江 武, 白岩 立彦;近年の日本における稲作気象の変化とその水稻収量・外観品質への影響, 日本作物學會紀事, 76(2007), pp. 423-432.
- [6.7] T. Iizumi, M. Yokozawa, M. Nishimori; Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach, Agricultural and forest meteorology, 149.2 (2009), pp. 333-348.
- [6.8] 横沢 正幸, 飯泉 仁之直, 岡田 将誌;気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価, 地球環境, 14(2009), pp. 199-206.
- [6.9] 宮澤 洋一, 中島 由郎;ワサビの畑地栽培における遮光及びポリマルチの効果, 長野県野菜花き試験場報告, 6(1991), pp. 31-37.
- [6.10] 三浦 邦夫, 和田 義春, 渡辺 和之;コンニャクにおける地下部器官の乾物蓄積に対する光合成産物生産の影響, 日本作物学会紀事, 71(2002), pp. 24-27.
- [6.11] 小元 敬男, 上和田 勉;サトイモを用いた遮光実験(3): 盛夏の一時遮光と生育収量との関係, 日本作物學會紀事, 53(1984), pp. 66-67.
- [6.12] 加藤 栄美, 石山 新治;'山形青菜'の遮光処理による抽苔遅延と増収効果, 東北農業研究, 62(2009), pp. 149-150.
- [6.13] 加藤 栄美, 石山 新治;'山形青菜'の遮光処理による初夏~初秋継続出荷技術, 東北農業研究, 63(2010), pp. 135-136.
- [6.14] 石山 久悦, 大木 淳;イッポンワラビの促成栽培方法, 東北農業研究, 59(2006), pp. 215-216.
- [6.15] 柴田 敏郎, 畠山 好雄, 姉帯 正樹, 金島 弘恭;北海道北部地方におけるオウレンの無遮光栽培について, 生薬学雑誌, 46(1992), pp. 310-316.
- [6.16] 野口 有里紗, 市村 匡史;環境要因がスイートバジルおよびスペアミントの生育,開花,精油濃度並びに精油成分に及ぼす影響, 園芸学研究, 3(2004), pp. 67-70.



- [6.17] 川添 禎浩, 小林 茂樹, 水上 元, 大橋 裕;カギカズラの栽培と育種(第3報): カギカズラの生長,カギ収量およびアルカロイド含量におよぼす遮光率の影響, 生薬学雑誌, 43 (1989), pp. 104-108.
- [6.18] 赤嶺 光, 石嶺 行男, 村山 盛一;ウコン (*Curcuma longa* L.) の特性と栽培技術に関する研究: 第2報 遮光処理がウコンの生育・収量に及ぼす影響, 琉球大学農学部学術報告, 42(1995), pp. 133-137.
- [6.19] 松浦 克彦, 荒木 斉;遮光がイチジク“柵井ドフィン”の樹体生長,着果,収量および果実品質に及ぼす影響, 兵庫県農業技術センター研究報告 農業編, 43(1995), pp. 21-26.
- [6.20] 松浦 克彦, 荒木 斉;イチジク“柵井ドフィン”に対する前年の遮光が本年の生育,着果,果実品質および収量に及ぼす影響, 兵庫県農業技術センター研究報告 農業編, 44(1996), pp. 61-64.
- [6.21] 吉田 祐子, 浜本 浩, 福永 亜矢子, 藤原 隆広, 熊倉 裕史;遮光栽培したホウレンソウにおけるアスコルビン酸含量の遮光除去後の変動. 園芸学研究, 7(2008), pp. 399-405.
- [6.22] 鯨 幸夫, 石黒 弘三;ホウレンソウの鉄含量に及ぼす栽培条件の影響, 日本栄養・食糧学会誌, 37(1984), pp. 245-250.
- [6.23] 鯨 幸夫, 石黒 弘三;ホウレンソウのL-アスコルビン酸含量に及ぼす栽培条件の影響, 日本栄養・食糧学会誌, 37(1984), pp. 239-244.
- [6.24] 中本 洋, 黒島 学, 塩沢 耕二;ホウレンソウのシュウ酸,硝酸,ビタミン C に及ぼす遮光,気温,かん水,堆肥施用の影響, 北海道立農業試験場集報, 75(1998), pp. 25-30.
- [6.25] 佐久間 文雄, 杉浦 俊彦, 桧山 博也;ニホンナシ‘幸水’の生育・収量・果実品質並びに花芽着生に及ぼす遮光処理の影響, 茨城県農業総合センター園芸研究所研究報告, 8 (2000), pp. 1-6.
- [6.26] 泉 秀実, 伊東 卓爾, 吉田 保治;栽培中の光条件がウンシュウミカンの葉と果皮中のアスコルビン酸含量と分布および果実品質に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 61(1992), pp. 7-15.
- [6.27] 近藤 悟;リンゴ果実の各種糖類及びアスコルビン酸含量に及ぼす環境要因の影響, 日本食品工業学会誌, 39(1992), pp. 1112-1118.
- [6.28] 好井宏明;時系列分析を用いたメガソーラーにおける天候デリバティブの評価, 東京大学修士論文, (2015), pp. 1-102.
- [6.29] K. Tee;2変量のストキャスティック・ボラティリティモデルによる岩手県内都市の気温シミュレーション, 総合政策, 1(2014), pp. 53-72.
- [6.30] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, Y. Ferard;Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes, *Renewable Energy*, 36 (2011), pp. 2725-2732.
- [6.31] 古在 豊樹;温室内の日射量に関する研究-1-, 農業気象, 3(1970), 123-130.

- [6.32] 古在 豊樹, 杉 二郎; 温室内の日射量に関する研究(2), 農業気象, 27(1972), pp.105-115.
- [6.33] 古在 豊樹, 杉 二郎; 温室内の日射量に関する研究(3):反射鏡の利用, 農業気象, 28(1972), pp. 79-88.
- [6.34] 古在 豊樹; 温室の光透過に関する数値実験-1-, 農業気象, 3(1973), pp. 179-187.
- [6.35] 古在 豊樹; 温室の光透過に関する数値実験-2-, 農業気象, 4(1974), pp. 239-248.
- [6.36] 古在 豊樹; 単棟温室内の直達日射量を求めるための電算機プログラム, 農業気象, 31(1975), pp. 89-94.
- [6.37] Tani A, Shiina S, Nakashima K, Hayashi M; Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels, *Journal of Agricultural Meteorology*, 70 (2014), pp. 139-149.
- [6.38] H. Marrou, L. Dufour, J. Wery; How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system?, *Agricultural and Forest Meteorology*, 50 (2013), pp. 38-51.
- [6.39] 玉置 雅彦, 山本 由徳; 遮光および施用窒素量が水稻の出葉速度と分げつ発生に及ぼす影響 : とくに出葉転換点に着目して, *日本作物學會紀事*, 66(1997), pp. 29-34.
- [6.40] 玉置 雅彦, 田代 亨, 山本 由徳; 遮光および施用窒素量が水稻の生育, 収量構成要素および白米の理化学特性に及ぼす影響, *日本作物學會紀事*, 66(1997), pp. 708-709.
- [6.41] 玉置 雅彦, 猪谷 富雄, 山本 由徳; 異なる光条件下における有機質肥料と無機質肥料が水稻の生育に及ぼす影響, *日本作物学会紀事*, 68(1999), pp. 16-20.
- [6.42] H. Marrou, L. Guillioni, L. Dufour, C. Dupraz, J. Wery; Microclimate under agrivoltaic systems: is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?, *Agricultural and Forest Meteorology*, 177 (2013), pp. 117-132.
- [6.43] 谷 晃, 管 敬, 坂見 拓也; 営農継続型太陽光発電におけるイネの生育と微気象環境, 2015 年生態工学会年次大会発表論文集, (2015), pp. 43-44.
- [6.44] 馬上 文司; 農山漁村再生可能エネルギー法とソーラーシェアリング型太陽光発電事業による国内農業活性化への展望, *千葉大学人文社会科学研究*, (29)2014, pp. 41-56.

## 謝辞

2年間という短い大学院生活でありましたが、非常に多くの方々から御教示を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、指導教官である吉田好邦教授には、言葉に尽くせないほどの御協力を頂きました。研究構想を練る段階から、実証研究、シミュレーション、考察に至るまで、非常に多くの御助言を頂きました。またゼミ発表の際には的確なアドバイスを下さるのみならず、指針が見えなくなった際には、方針を力強く示して下さいました。私が自信を失いかけている時には、叱咤激励し、鼓舞して下さいました。専攻長として御多忙の中、私達学生が自主的に研究を進めることのできる環境を整えて下さいました。

迷いながらも、主体的に研究に打ち込むことが出来た2年間は、私の生涯の財産です。温かく見守ってくださった吉田教授には、心より感謝しております。

副査の愛知正温講師には、面談や打ち合わせで大変お世話になりました。研究の展望を深く考察することができたのは、研究内容についての的確なアドバイスを下さった愛知講師の御助力によるものが大きいです。この場を借りて感謝申し上げます。

一般社団法人有機資源協会主幹の土肥哲哉様には、実証試験での調査から学会発表に至るまで、非常にお世話になりました。実証試験の素人である私に、調査手法ならびに解析手法について、多くのアドバイスを下さりました。農学のプロフェッショナルである土肥様が実証試験に方向性を示して下さいたからこそ、本論文の第3章を完成させることができました。また学会発表でのポスター発表の際にも、初めて参加する学会ということで右往左往していた私に声を掛けていただき、励まして下さいました。緊張せずに、無事にポスター発表を終えることができたのは、土肥様の温かい心遣いがあったからこそです。心より、感謝しております。

株式会社スマートブルーの方々には、酒々井町農家の大塚洋一様を紹介して下さいました。また、気象データを計測するための収納ボックスを作成して下さいました。実証試験ならびに気象計測が実施できたのは、スマートブルー社の方々の御厚意によります。御多忙の中、多大な御助力を頂いたこと、深く感謝しております。

千葉県酒々井町農家の大塚洋一様の御厚意ならびに御協力により、実証試験を実施することができました。農場を貸して下さいるのみならず、計測機器の取り付けから水稻の生育管理まで、多くの御助力を下さりました。大塚様の御厚意があったからこそ、本研究を完成させることが出来ました。この場を借りて、感謝いたします。

営農型太陽光発電研究の先駆者である静岡県立大学の谷晃准教授には、貴重なアドバイスを多く頂きました。谷教授の深奥なる学術知識に基づいた、貴重な御助言により、新たな研究の展望を描くことができました。重ねて、御礼申し上げます。

吉田研究室の先輩方にも感謝しております。博士過程の小澤暁人さんには、研究のアドバイスを頂くのみならず、研究者として、真摯に研究に取り組む姿勢を見せて頂きました。小澤さんからの絶え間ない刺激が、今でも、私の成長する原動力であり続けています。

先輩である好井宏明さん、加藤正朗さんのおふたりは、修士課程に入学してまもない私を暖かく迎え入れて下さり、かつ研究室に馴染むきっかけを作って下さいました。またゼミ発表の際には、的確かつ斬新な視点から研究のアドバイスを頂きました。先輩方の視点や物事の見方を参考にすることで、私自身、成長できたと強く感じています。この場を借りて感謝いたします。

吉田研究室と井原研究室の同級生である久賀潤也さん、原明宏さん、古里亮太さん、小林勇介くん、邵沁夫くん、畑智也くん、橋本侑樹くん達がいたからこそ、充実した院生生活を送ることができました。皆さんと過ごした2年間は私の宝物です。今後の皆さんの、多方面での御活躍を祈っております。

学部時代の恩師である茨城大学農学部地域環境科学科の木下嗣基准教授に、この場を借りて感謝申し上げます。学部時代に、木下准教授が研究者としての背中を見せて下さったからこそ、迷いながらも芯がぶれずに、大学院で研究に邁進することができました。また研究に対して右も左もわからなかった私に対して、熱心に指導して下さいったからこそ、今の私があるのだとも確信しております。本当に、ありがとうございました。

私の学生生活を支えてくれた祖父母と両親、兄姉、親類に感謝します。帰省した際に感じる祖父母、両親、兄姉の愛情、両親の経済的な援助、愛猫達との温かな時間は、私を常に支えてくれました。本当に感謝しております。今後もよろしくお願い致します。

最後に、私を育ててくれた全ての環境に感謝します。私を育ててくれた人々や、生まれ育った関川村の雄大な自然が存在しなかったら、確実に、今の私は存在していません。近所での川遊び、魚とり、森の散策、昆虫採集、あけび採り、山菜採り、海遊びなどの、昔に体験した全ての経験が、今の私を構成しているのだと、強く感じています。

本研究に協力して頂いた全ての皆様、そして私を育ててくれた全ての環境に感謝して、謝辞に替えさせていただきます。

付録  
付録 A

TableA.1：野菜類の光飽和点

野菜の種類	光飽和点 [klx]	参考文献
サトイモ	80	農業技術大系 野菜編 10 <sup>[A.1]</sup>
スイカ	80	農業技術大系 野菜編 2 <sup>[A.2]</sup>
トマト	70	有機土壌協会 有機栽培技術の手引〔果菜類編〕 <sup>[A.3]</sup>
落花生	60	中沢ら <sup>[A.4]</sup>
落花生	40	農業技術大系 野菜編 6 <sup>[A.5]</sup>
キュウリ	40-60	農業技術大系 野菜編 1 <sup>[A.6]</sup>
メロン	55	巽ら <sup>[A.7]</sup>
カブ	55	農業技術大系 野菜編 7 <sup>[A.8]</sup>
ダイコン	50	農業技術大系 野菜編 9 <sup>[A.9]</sup>
ソラマメ	40-50	農業技術大系 野菜編 10 <sup>[A.1]</sup>
アスパラガス	40-50	稲垣ら <sup>[A.10]</sup>
セルリー	30-50	農業技術大系 野菜編 6 <sup>[A.5]</sup>
インゲンマメ	20-50	農業技術大系 野菜編 10 <sup>[A.1]</sup>
コンニャク	20-50	三浦ら <sup>[A.11]</sup>
てん菜	45	宮岡 <sup>[A.12]</sup>
カボチャ	45	巽ら <sup>[A.7]</sup>
セルリー	45	花田ら <sup>[A.13]</sup>
ナス	40	農業技術大系 野菜編 5 <sup>[A.14]</sup>
エンドウ	40	農業技術大系 野菜編 10 <sup>[A.1]</sup>
キャベツ	40	有機栽培技術の手引〔葉菜類編〕 <sup>[A.15]</sup>
トウガラシ	30	巽ら <sup>[A.7]</sup>
レタス	25	農業技術大系 野菜編 6 <sup>[A.5]</sup>
ハウレンソウ	20-25	農業技術大系 野菜編 7 <sup>[A.8]</sup>
ミツバ	20	巽ら <sup>[A.7]</sup>
ミョウガ	20	巽ら <sup>[A.7]</sup>
フキ	20	巽ら <sup>[A.7]</sup>
ハクサイ	40	巽ら <sup>[A.7]</sup>
イチゴ	40	農業技術大系 野菜編 3 <sup>[A.16]</sup>
ピーマン	30	農業技術大系 野菜編 5 <sup>[14]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableA.2：果樹類の光飽和点

果樹の種類	光飽和点 [klx]	参考文献
パイナップル	30-50	城間 <sup>[A.17]</sup>
カンキツ	30-40	岩崎ら <sup>[A.18]</sup>
モモ	40	天野ら <sup>[A.19]</sup>
イチジク	40	天野ら <sup>[A.19]</sup>
カキ	40	天野ら <sup>[A.19]</sup>
クリ	40	天野ら <sup>[A.19]</sup>
ブドウ	30	天野ら <sup>[A.19]</sup>
茶	20	原田ら <sup>[A.20]</sup>
クワ	15-20	田崎ら <sup>[A.21]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableA.3：穀物類の光飽和点

穀物の種類	光飽和点 [klx]	参考文献
水稻	50	農業技術大系 作物編 1 <sup>[A.22]</sup>
コムギ	25	村田 <sup>[A.23]</sup>
トウモロコシ	60-?	戸苺 <sup>[A.24]</sup>
ジャガイモ	25	津野ら <sup>[A.25]</sup>
サツマイモ	30	農業技術大系 作物編 2 <sup>[A.26]</sup>
オオムギ	30-40	Akita et al. <sup>[A.27]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableA.4： その他の光飽和点

その他	光飽和点 [klx]	参考文献
タバコ	30	村田 <sup>[A.28]</sup>
セントポーリア	8-12	青木ら <sup>[A.29]</sup>
イタリアンライグラス	25	宮地 <sup>[A.30]</sup>
ダリアグラス	60	宮地 <sup>[A.30]</sup>
ペレニアルライグラス	20	宮地 <sup>[A.30]</sup>
ヒマワリ	40-50	宮地 <sup>[A.31]</sup>
カエデ	40-51	宮地 <sup>[A.31]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

## 参考文献

- [A.1] 農文協；農業技術大系 野菜編 10
- [A.2] 農文協；農業技術大系 野菜編 2
- [A.3] 有機土壌協会；有機栽培技術の手引〔果菜類編〕，  
[http://www.japan-soil.net/report/h25tebiki\\_02.pdf](http://www.japan-soil.net/report/h25tebiki_02.pdf)
- [A.4] 中沢 文男；落花生品種の光合成と光の強さとの関係，明治大学農学部研究報告，73  
(1986)，pp. 71-75.
- [A.5] 農文協；農業技術大系 野菜編 6
- [A.6] 農文協；農業技術大系 野菜編 1
- [A.7] 巽 穰；そ菜の光合成に関する研究-1-光の強さとそ菜幼植物の同化特性，園芸試験場  
報告 A 平塚，8(1969)，pp. 127-140.
- [A.8] 農文協；農業技術大系 野菜編 7
- [A.9] 農文協；農業技術大系 野菜編 9
- [A.10] 稲垣 昇，津田 和久，前川 進，寺分 元一；アスパラガスの光合成に及ぼす光強度，  
CO<sub>2</sub> 濃度及び温度の影響，園芸学会雑誌，58(1989)，pp. 369-376.
- [A.11] 三浦 邦夫，長田 明夫；Effect of shading on photosynthesis, respiration, leaf area and  
corm weight in konjak plants. (Amorphophallus konjac K. Koch)，日本作物学会紀事，50  
(1981)，pp. 553-559.
- [A.12] 宮岡 一雄；てん菜における光合成と光の強さとの関係について，明治大学科学技術研究  
所紀要，6(1967)，pp. 229-247.

- [A.13] 花田 勝美, 竹下 繁, 鳥飼 芳秀;セルリーの生育とハウスの照度について, 九州大学農学部農場研究資料, 14(1992), pp. 28-31.
- [A.14] 農文協; 農業技術大系 野菜編 5
- [A.15] 有機土壌協会;有機栽培技術の手引〔葉菜類編〕,  
[http://www.japan-soil.net/report/h22tebiki\\_03.pdf](http://www.japan-soil.net/report/h22tebiki_03.pdf)
- [A.16] 農文協; 農業技術大系 野菜編 3
- [A.17] 城間 理夫;沖縄におけるパインアップル栽培と日射量について, 農業気象, 1(1977), pp. 1-6.
- [A.18] 岩崎 直人, 大垣 智昭;カンキツの種・品種における光合成特性と温度・光条件, 園芸学会雑誌, 54(1985), pp. 315-322.
- [A.19] 天野勝司;果樹の光合成作用に関する研究(第1報)環境条件が光合成速度に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 41(1972), pp. 144-150.
- [A.20] 原田 重雄, 加納 照崇, 酒井 慎介;茶の炭素同化作用に関する研究(第5報):成木茶園の同化作用(2), 茶業研究報告, 18(1961), pp. 1-10.
- [A.21] 田崎 忠良, 牛島 忠広;栽培グワのクロロフィル含量と炭酸同化能力特に光条件不足下の両者の関係について, 日本蚕糸学雑誌, 29(1960), pp. 327-333.
- [A.22] 農文協; 農業技術大系 作物編 1
- [A.23] 村田吉男;作物の光合成と生態-生物生産の技術と応用-, 農山漁村文化協会, (1976), pp. 66.
- [A.24] 戸苅 義次;作物の光合成と物質生産, 養賢堂, (1971), pp. 458.
- [A.25] 津野 幸人;馬鈴薯の光合成作用に関する二,三の特性, 鳥取大学農学部研究報告, (1977), pp. 89-95.
- [A.26] 農文協; 農業技術大系 作物編 2
- [A.27] 秋田 重誠, 宮坂 昭, 村田 吉男;光合成の種間差に関する研究:第1報 主要な環境要因の変化に対する光合成の反応および維管束鞘の形態からみた種間差について, 日本作物學會紀事, 38(1969), pp. 507-524.
- [A.28] 村田吉男;作物の光合成と生態-生物生産の技術と応用-, 農山漁村文化協会, (1976), pp. 65.
- [A.29] 青木 孝一, 平城 好明, 遠藤 宗男;温度及び光環境がセントポーリアの生育に及ぼす影響, 千葉県農業試験場研究報告, 27(1986), pp. 43-51.
- [A.30] 宮地 重遠, 吉田 吉男;光合成と物質生産:植物による太陽エネルギーの利用, 養賢堂, (1980), pp. 370.
- [A.31] 宮地 重遠, 吉田 吉男;光合成と物質生産:植物による太陽エネルギーの利用, 養賢堂, (1980), pp. 111.



付録 B

TableB.1 : 多年生農作物にて実施した遮光実験の概要 (1)

多年生作物(1)	品種	遮光日時	遮光率	参考文献
イチジク	・榊井ドーフィン	・1992/6/3~1993/2/1	0%(対照区), 15%, 40%, 75%	松浦ら <sup>[B.1][B.2]</sup>
サルナシ	・Ananasnaya	・1998/6/14~1998/8/14 ・1998/6/14~1998/9/16 ・1998/9/10~1998/11/16 *1999 年は遮光せずに収穫	0%(対照区), 45%	T.Chantalak et al. <sup>[B.3]</sup>
クリ	・石槌	・1990/8/16 から 0, 15, 35, 55 日間. 4 区画を遮光	0%(対照区), 50%, 80%	原ら <sup>[B.4]</sup>
カキ	・富有	・1986/5/27~7/下旬	0%(対照区), 50%	北島ら <sup>[B.5]</sup>
カキ	・刀根早生	・2004/3/29~3 週間, 3 週間 ~6 週間, 6 週間~9 週間	0%(対照区), 45%	今川ら <sup>[B.6]</sup>
ウメ	・南高	・2010/5/20~6/28	0%(対照区), 90%	大江ら <sup>[B.7]</sup>
ニホンナシ	・幸水	・1996/5/18~8/29	0%(対照区), 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%	佐久間ら <sup>[B.8]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.2：多年生農作物にて実施した遮光実験の結果(1)

多年生作物(1)	収量	品質	その他特筆事項	参考文献
イチジク	各遮光率に対応して, 1[kg/本], 0.9[kg/本], 0.6[kg/本], 0.3[kg/本]	遮光率増加に 伴い, 着色不 良増加	翌年, 強遮光区で減 収と成熟遅延発生	松浦ら <sup>[B.1][B.2]</sup>
サルナシ	20%の乾物重減少. 1998年収 量は微減.	変化なし	翌年, 遮光区で花数 減少.	T.Chantalak et al. <sup>[B.3]</sup>
クリ	各遮光率に対応した 55 日後, 子葉乾物量(可食部)は 32[g/ 穂], 18.4[g/穂], 7.4[g/穂]	高遮光区で子 葉空隙大. 澱 粉含量の低下	高遮光区で早期落 果増加	原ら <sup>[B.4]</sup>
カキ	—	—	高遮光区で早期落 果増加	北島ら <sup>[B.5]</sup>
カキ	*花芽数と収量は正の相関あり (相関係数=0.716)	—	花芽数が著しく減少	今川ら <sup>[B.6]</sup>
ウメ	果実重の減少なし	芳香成分含量 ならびに 機能性成分含 量の減少	完熟落下期の遅延 発生	大江ら <sup>[B.7]</sup>
ニホンナシ	各遮光率に対応して, 2.72[t /10a], 2.45[t/10a], 2.08[t/10a], 1.86[t/10a], 1.66[t /10a], 1.10[t/10a], 0.82[t/10a]	遮光率増加に 伴い, 糖度減 少, 硬度増加	高遮光区で早期落 果増加	佐久間ら <sup>[B.8]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.3 : 多年生農作物にて実施した遮光実験の概要(2)

多年生作物(2)	品種	遮光日時	遮光率	参考文献
ウンシュウミカン	・宮本早生	・1989/7/19~10/19	0%(対照区), 50%, 80%, 95%	泉ら <sup>[B.9]</sup>
ウンシュウミカン	・杉山温州	・1969/4/7~7/下旬	0%(対照区), 35%, 60%, 82%	小野ら <sup>[B.10]</sup>
ポンカン	・マンダリンオレンジ	・1996/5/17~6/6(開花期) ・1996/6/10~7/4(生理落果期) ・1996/7/7~7/31(果実生育期)	0%(対照区), 55~ ~60%, 70~75%	マターら <sup>[B.11]</sup>
トウガラシ	・ノッカ(品種1) ・ダボクガン (品種2)	・1991/4/30~7/16	0%(対照区), 25%, 50% *加えて2パターンの施肥 管理を実施	鄭ら <sup>[B.12]</sup>
リンゴ	・千秋	・満開日から145日間	0%(対照区), 51%	近藤ら <sup>[B.13]</sup>
リンゴ	・ふじ	・1991~1992年の2年間	0%(対照区), 47%, 66%, 86%, 95%	浅野ら <sup>[B.14]</sup>
ワサビ	—	・1987~1989年の3年間	60%, 70%, 80%, 90%	宮澤ら <sup>[B.15]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.4：多年生農作物にて実施した遮光実験の結果(2)

多年生作物(2)	収量	品質	その他特筆事項	参考文献
ウンシュウミカン	各遮光率に対応して, 81.8[g/個], 73.5[g/個], 48.5[g/個], 46.2[g/個]	糖度減少, 機能性成分含量減少による果実品質の低下	光計測に照度を利用	泉ら <sup>[B.9]</sup>
ウンシュウミカン	—	着花率, 着色度, 糖度の減少確認	品種により光合成速度が異なる点を確認	小野ら <sup>[B.10]</sup>
ポンカン	果実生育期の遮光で果実重が減少	果実サイズの小型化, 酸含有量増加による品質劣化	開花期の遮光による結実率の低下	マターら <sup>[B.11]</sup>
トウガラシ <sup>1)</sup>	・品種1の収量 647.5[g/plant], 360[g/plant], 313.4[g/plant]	—	施肥条件と遮光条件下の収量についての関係性を言及	鄭ら <sup>[B.12]</sup>
リンゴ	各遮光率に対応して, 266.4[g/個], 219[g/個]	糖分, 機能性成分含量の減少が著しい	特になし	近藤ら <sup>[B.13]</sup>
リンゴ	—	—	樹木重, 根重成長量の抑制を確認	浅野ら <sup>[B.14]</sup>
ワサビ	三年生株の根重 49.4[kg/a], 48[kg/a], 40.8[kg/a], 35.3[kg/a]	—	特になし	宮澤ら <sup>[B.15]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.5 : 多年生農作物にて実施した遮光実験の概要(3)

多年生作物(3)	品種	遮光日時	遮光率	参考文献
モモ	・日川白鳳	・2004/4/21~6/28	0%(対照区), 10%	オングソら <sup>[B.16]</sup>
モモ	・高陽白桃	・1957/5/7~9/7 前後	0%(対照区), 約15%, 約95%	木村ら <sup>[B.17]</sup>
チュモリヤ	・Big Sister	・1996/4/17~収穫	36%, 76%, 90%	樋口ら <sup>[B.18]</sup>
ブドウ	・マスカット オブアレキサンドリア	・1995/8/21~8/29, 9/2~9/15	0%(対照区), 約70%	朝岡ら <sup>[B.19]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.6 : 多年生農作物にて実施した遮光実験の結果(3)

多年生作物(3)	収量	品質	その他特筆事項	参考文献
モモ	各遮光率に対応して, 2.76[kg/木], 1.9[kg/木]	—	特になし	オングソら <sup>[B.16]</sup>
モモ	—	—	樹木成長量の抑制を確認	木村ら <sup>[B.17]</sup>
チュモリヤ	各遮光率に対応して, 618.7[g/個], 528.9[g/個], 496.3[g/個]	糖度減少ならびに 酸性度上昇による 品質劣化	開花遅延発生	樋口ら <sup>[B.18]</sup>
ブドウ	—	—	「遮光区」に比べ, 「遮光+多湿」区で品質劣化大	朝岡ら <sup>[B.19]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.7 : 1 年生農作物にて実施した遮光実験の概要 (1)

1 年生作物(1)	品種	遮光日時	遮光率	参考文献
タカナ	・山形青菜	・2007 年 3,5,7 月~収穫 ・2008 年 3,5,7 月~収穫	0%(対照区), 39%, 51%, 60%	加藤ら <sup>[B.20][ B.21]</sup>
スイカ	・citrullus lanatus thunb(品種 1) ・Baoguan Xinklan (品種 2)	・1994/6/20~収穫	0%(対照区), 50% *加えて温度管理 (33°C, 38°C)を実施	カンサら <sup>[B.22]</sup>
キュウリ	・ときわ光 3 号 P 型	・1978/8 月(開花)~収穫	0%(対照区), 60%, 77%, 87%	金浜ら <sup>[B.23]</sup>
パプリカ	・スピリット	・2005/5/23~10/下旬	0%(対照区), 40%, 60%	吉田ら <sup>[B.24]</sup>
ダイコ	・若駒(品種 1) ・夏みの早生 3 号 (品種 2)	・1984/9/17~11/12	0%(対照区), 51%	石井ら <sup>[B.25]</sup>
ナス	・AE-P03(品種 1) ・筑陽(品種 2)	・2002/12/1~6/30	0%(対照区), 30%, 60%,	古賀ら <sup>[B.26]</sup>
ナス	・新橋真	・1964/3/20~60 日間 ・1966/4/14~60 日間 ・1967/5/21~60 日間	0%(対照区), 25%, 50%, 75%	斉藤ら <sup>[B.27]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.8 : 1 年生農作物にて実施した遮光実験の結果 (1)

1 年生作物(1)	収量	品質	その他特筆事項	参考文献
タカナ	各遮光率に対応して, 143[kg/a], 218[kg/a], 316[kg/a], 333[kg/a]	—	日射不足による抽苔 遅延が発生し, 収量 が激増.	加藤ら <sup>[B.20][ B.21]</sup>
スイカ	品種 1 では 33°C の場合, 各遮光率に 対応して, 6.6[kg/個], 4.2[kg/個]. 品種 2 では 5.3[kg/個], 3.7[kg/個]	糖度含有量に 差はなし	収量・品質への影響 は品種差が大きい	カンサら <sup>[B.22]</sup>
キュウリ	各遮光率に対応して, 30.5[個/本], 20.5[[個/本]], 15.5[個/ 本], 12.2[個/本]	曲がり果発生	登熟遅延が発生	金浜ら <sup>[B.23]</sup>
パプリカ	各遮光率に対応して, 約 400[kg/a], 約 300[kg/a], 約 130[kg/a]	平均商品果重 の減少による 品質劣化	光飽和点は極めて小 さい(600~800 $\mu$ mol/m <sup>2</sup> /s)にも関わ らず, 遮光の影響が 強く生じた	吉田ら <sup>[B.24]</sup>
ダイコ	・各遮光率に対応して, 品種 1 の根重 1315[ $gf$ /本], 878[ $gf$ /本] ・各遮光率に対応して, 品種 2 の根重 712[ $gf$ /本], 326[ $gf$ /本]	糖分含量, 機 能性成分含量 の減少なし	根重, および機能性 成分含量は品種間 差異が大	石井ら <sup>[B.25]</sup>
ナス	・各遮光率に対応して, 品種 1 の収量 15[kg/m <sup>2</sup> ], 11.2[kg/m <sup>2</sup> ], 8.3[kg/m <sup>2</sup> ] ・各遮光率に対応して, 品種 2 の収量 17.0[kg/m <sup>2</sup> ], 11.1[kg/m <sup>2</sup> ], 8.3[kg/m <sup>2</sup> ]	—	開花数ならびに結実 率の減少を確認	古賀ら <sup>[B.26]</sup>
ナス	—	—	花芽形成期の遅延, 苗生育不良を確認	斉藤ら <sup>[B.27]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.9 : 1 年生農作物にて実施した遮光実験の概要 (2)

1 年生作物(2)	品種	遮光日時	遮光率	参考文献
サツマイモ	・農林 1 号	・8/23~9/7 *実験実施年度不記載	0%(対照区), 33%, 66%	西川ら <sup>[B.28]</sup>
コンニャク	・在来種	・1978/5/28~収穫	0%(対照区), 25%, 50%, 60%, 70%	三浦ら <sup>[B.29]</sup>
コンニャク	—	・1982/6/25~10/23	0%(対照区), 50%, 70%	稲葉ら <sup>[B.30][B.31]</sup>
コンニャク	・はるなくろ	・1987/5/20~9/16	0%(対照区), 50%, 75%, 85%	三浦ら <sup>[B.32]</sup>
サトイモ	・石川早生	・1980/6/17~9/14	0%(対照区), 50%, 90%	小元ら <sup>[B.33]</sup>
サトイモ	・石川早生	・1983/7/30~8/30	0%(対照区), 10%, 50%	小元ら <sup>[B.34]</sup>
実エンドウ	・きしゅうすい	・2003/9/25~収穫	0%(対照区), 23%	川西ら <sup>[B.35]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献



TableB.10 : 1 年生農作物にて実施した遮光実験の結果 (2)

1 年生作物(2)	収量	品質	その他特筆事項	参考文献
サツマイモ	乾物量減少 *数値の記載なし	—	1/3 の遮光を 33%の遮光度, 2/3 の遮光を 66%の遮光度と仮定	西川ら <sup>[B.28]</sup>
コンニャク	各遮光率に対応して, 球茎 乾物量 20.8[g/plant], 28.5[g/plant]35.3[g/plant], 34.4[g/plant], 29.9[g/plant]	—	低葉温, 葉面積の確保, 高光合成・低呼吸の 3 要因が収量増加要因と推定	三浦ら <sup>[B.29]</sup>
コンニャク	各遮光率に対応して, 芋重 約 150[g], 約[180g], 約 220[g] *分母の単位記載なし	遮光に伴う細胞 間隙の増加	遮光により葉面積増加	稲葉ら <sup>[B.30][B.31]</sup>
コンニャク	各遮光率に対応して, 地下 部重 5.48[g/plant], 5.52[g/plant], 4.68[g/plant], 4.25[g/plant]	—	遮光下での葉面積拡大が 収量減少の抑制をもたら すと指摘	三浦ら <sup>[B.32]</sup>
サトイモ	各遮光率に対応して, 収量 1731[g/株], 945[g/plant], 48[g/plant]	遮光に従い, 1 個あたりのサト イモ重が減少す る	サトイモが耐陰性に強いと いう風説を否定している	小元ら <sup>[B.33]</sup>
サトイモ	各遮光率に対応して, 収量 1901[g/株], 2124[g/株], 1844[g/株]	—	夏季の一時的な遮光は収 量増加に寄与	小元ら <sup>[B.34]</sup>
実エンドウ	—	遮光に従い, 不 良莢発生割合 上昇	収穫日の遅延発生	川西ら <sup>[B.35]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.11 : 1 年生農作物にて実施した遮光実験の概要 (3)

1 年生作物(3)	品種	遮光日時	遮光率	参考文献
落花生	・千葉半立	・1970/6/12(出芽)~20 日間, 40 日間, 60 日間	0%(対照区), 40%, 60%, 75%	小野ら <sup>[B.36]</sup>
落花生	・千葉 41 号	・播種後 13 日~53 日間 *年度は不明	0%(対照区), 40%, 60%, 80%	前田ら <sup>[B.37]</sup>
なたね	・チサヤナタネ	・1 期: 1968/4/15(出芽)~29 日 ・2 期: 1968/4/29~5/13 ・3 期: 1968/5/13~5/27 ・4 期: 1968/5/27~6/10	0%(対照区), 14.5% (1 期), 14.5%(2 期), 14.5%(3 期), 14.5%(4 期)	杉山ら <sup>[B.38]</sup>
れんこん	・漁山紅蓮	・1975/4/16~収穫	0%(対照区), 70%, 80%	長島ら <sup>[B.39]</sup>
ほうれん草	・アクティブ	・1968/5/17~30 ・1968/6/21~7/6 ・1968/7/13~24 ・1968/7/8~30	45%, 60%, 70%, 85%	吉田ら <sup>[B.40]</sup>
ほうれん草	・ビロフレー	・1982/10/14~11/24(収穫)	0%(対照区), 68~75%	鯨ら <sup>[B.41][ B.42]</sup>
ほうれん草	・トニック ・晩抽ジュリアス	・1996/6/28~収穫 ・1996/7/30~収穫	0%(対照区), 30%, 50%	中本ら <sup>[B.43]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.12 : 1 年生農作物にて実施した遮光実験の結果 (3)

1 年生作物(3)	収量	品質	その他特筆事項	参考文献
落花生	遮光日数 60 日間では, 各遮光率に対応して, むき実収量 93.4[g/pot], 84.5[g/pot], 61.8[g/pot], 39.8[g/pot]	—	・開花始期, 終期の遅延 ・開花数・結実数の減少	小野ら <sup>[B.36]</sup>
落花生	—	—	・開花数の減少 ・草丈の増加	前田ら <sup>[B.37]</sup>
なたね	各遮光率に対応して, 子実重 37.2[g/plant], 35.0[g/plant], 21.2[g/plant], 34.3[g/plant], 36.4[g/plant]	—	・日射量に対する感応性は, 栽培時期で異なる	杉山ら <sup>[B.38]</sup>
れんこん	—	—	遮光条件と葉の形態について 検討している	長島ら <sup>[B.39]</sup>
ほうれん草	各遮光率に対応して, 子実重 24.5[g/plant], 15.3[g/plant], 13.3[g/plant], 6.4[g/plant]	—	遮光条件で減少した機能性成 分(アスコルビン酸)は, 遮光除 去後に回復する	吉田ら <sup>[B.40]</sup>
ほうれん草	各遮光率に対応して, 乾物量 0.352[g/plant], 0.210[g/plant]	—	遮光に伴い鉄含有量上昇, アス コルビン酸量減少	鯨ら <sup>[B.41][ B.42]</sup>
ほうれん草	乾物量減少 *数値の記載なし	糖度, シュ ウ酸, ビタ ミン C 含 有量減少	硝酸含有量増加のため遮光の 危険性大	中本ら <sup>[B.43]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.13 : 1 年生農作物にて実施した遮光実験の概要 (4)

1 年生作物(4)	品種	遮光日時	遮光率	参考文献
甜菜	6 種類の品種を栽培 *全ての平均値を代表値として算出	・生育前期: 1972/6/2~7/21 ・生育中期: 1972/7/26~9/6 ・生育後期: 1972/9/10~10/20	0% (対照区), 35%	宮浦ら <sup>[B.44]</sup>
甜菜	記載なし	・1968/5/下旬~10/中旬 20 日間 ずつ ・1968/6/下旬~10/中旬 20 日間 ずつ ・1968/7/下旬~10/中旬 20 日間 ずつ ・1968/7/下旬~10/中旬 20 日間 ずつ	0% (対照区), 70%	野村ら <sup>[B.45]</sup>
イッポンワラビ	・makino	・2004/4/22~11/17	0% (対照区), 40%, 60%	石山ら <sup>[B.46]</sup>
タマネギ	・貝塚早生	・1969/6/1~20	0% (対照区), 25%, 60%, 80%	寺分 <sup>[B.47]</sup>
ジャガイモ	・メークイン ・デジマ	・各期間, 5 日間ずつ実施 I 期: 萌芽から塊茎形成期 II 期: 塊茎形成期から塊茎発達期 III 期: 塊茎発達期から登熟期	0% (対照区), 48%, 76%	ゴシュラ <sup>[B.48]</sup>
サトウキビ	・Nc310	・1983/7/1~8/31, 9/1~10/31, 11/1~12/31 ・1984/7/1~8/31, 9/1~10/31, 11/1~12/31	0% (対照区), 25%, 65%	宮平ら <sup>[B.49]</sup>
ミョウガ	・陣田早生	・圃場 1: 1995/7/24~9/30 ・圃場 2: 1995/7/17~9/30	0% (対照区), 70%	小泉ら <sup>[B.50]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.14 : 1 年生農作物にて実施した遮光実験の結果 (4)

1 年生作物(4)	収量	品質	その他特筆事項	参考文献
甜菜	全ての品種で生育前期, 生育中期の遮光は根重を減少させた. しかし遮光後日数を経過した場合, 根重は回復し, 対照区と遮光区の根重差は縮小する	生育中期までの遮光による糖分含有量低下	品質によって個体差が生じている	宮浦ら <sup>[B.44]</sup>
甜菜	5 月下旬~6 月中旬までの収穫 r 等に対する遮光影響は小さい. しかし 7~8 月の場合は極めて大きい.	—	*グラフから目視にて推量	野村ら <sup>[B.45]</sup>
イッポンワラビ	各遮光率に対応して, 立茎重 24[本/株], 25.1[本/株], 36.9[本/株]	—	・根塊育成による遮光条件が, その後の収量を左右する	石山ら <sup>[B.46]</sup>
タマネギ	各遮光率に対応して, 球径 20.9[mm/球], 18.9[mm/球], 11.2[mm/球], 5.77[mm/球]	—	重量計測が不実施であるが, 球径で代用可能と仮定	寺分 <sup>[B.47]</sup>
ジャガイモ	全遮光区間, 品種, 栽植密度の収量平均値の減少率は, 各遮光率に対応して, 0%, 19%, 30%	—	品種間差あり	ゴシュラ <sup>[B.48]</sup>
サトウキビ	・生育旺盛な 7-8 月では, 各遮光率に対応して蔗茎重, 3018[g/pot], 2160[g/pot], 355[g/pot] ・11-12 月では, 各遮光率に対応して蔗茎重, 3018[g/pot], 3000[g/pot], 3105[g/pot]	糖度減少	遮光に従い分けつ数減少	宮平ら <sup>[B.49]</sup>
ミョウガ	圃場 1: 各遮光率に対応して, 収量 300[kg/10a], 210[kg/10a] 圃場 2: 各遮光率に対応して, 収量 756[kg/10a], 235[kg/10a]	ミョウガ花蕾が細くなり, 軟白化	・地温減少による病害虫防除効果を確認 ・現地農家の栽培に依存	小泉ら <sup>[B.50]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.15 : 1 年生農作物にて実施した遮光実験の概要 (5)

1 年生作物(5)	品種	遮光日時	遮光率	参考文献
メロン	・プリンス	・1975/6/2~7/4	0%(対照区), 50%	松田 <sup>[B.51]</sup>
メロン	・アンデス ・ラスター	・1996/5/2~収穫	0%(対照区), 45%	西澤ら <sup>[B.52]</sup>
メロン	・アンデス	・1998 年に栽培し, 着花後 35~54 日の 15 日間遮光	0%(対照区), 70%	相川ら <sup>[B.53]</sup>
小豆	・ベニダイナゴン	・1986/6/25~9/16	0%(対照区), 70%	池主ら <sup>[B.54]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.16 : 1 年生農作物にて実施した遮光実験の結果 (5)

1 年生作物(5)	収量	品質	その他特筆事項	参考文献
メロン	各遮光率に対応して, 果実重 513[g/球], 363[g/球]	果肉色の悪 化, 香量の 減少	時期による遮光影響に 違いについて言及	松田 <sup>[B.51]</sup>
メロン	—	硬度減少, エチレン量 増加	品種間差あり	西澤ら <sup>[B.52]</sup>
メロン	—	エチレン生 成量増加	特になし	相川ら <sup>[B.53]</sup>
小豆	各遮光率に対応して, 子実重 27.3[g/pot], 13.0[g/pot]	—	黒寒冷紗 No600, 2 枚の 遮光率を 70%と仮定し た	池主ら <sup>[B.54]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.17 : 薬用作物で実施した遮光実験の概要 (1)

薬用作物(1)	品種	遮光日時	遮光率	参考文献
トリカブト	—	・1975/5/18~7/15 2週間間隔	60%	上村ら <sup>[B.55]</sup>
トリカブト	—	・1974/11/21~ *収穫日に言及なし	0%(対照区), 40%, 50%, 67%, 70%, 84%	上村ら <sup>[B.56]</sup>
オタネニンジン	—	記載なし	45%, 90%,	野村ら <sup>[B.57]</sup>
ヘラオオバコ	・Ceres Tonic(品 種 1) ・Grasslands Lancelot(品種 2)	・2000/5/22~6/6	0%(対照区), 72%	田村ら <sup>[B.58]</sup>
オオレン	—	・1984年5月~10月	0%(対照区), 45-49%	柴田ら <sup>[B.59]</sup>
ジャーマンカモミール	・Matricaria recutita L.	・1997/4/8~7/17	0%(対照区), 25%, 50%, 75%	野口ら <sup>[B.60]</sup>
スイートバジル	・Ocimum basilicum L.	・2002/3/14~6/14	0%(対照区), 25%, 50%	野口ら <sup>[B.61]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.18 : 薬用作物で実施した遮光実験の結果 (1)

薬用作物(1)	収量	品質	その他特筆事項	参考文献
トリカブト	—	草丈, 花穂長の伸長	・早期の遮光により花芽形成遅延 ・生育ステージの光感性が違う点に言及	上村ら <sup>[B.55]</sup>
トリカブト	—	遮光により異変葉数減少	早期の遮光により花芽形成遅延	上村ら <sup>[B.56]</sup>
オタネニンジン	各遮光率に対応して, 根重約 10.5[g/本], 約 5.5[g/本]	—	播種から収穫までに 4-6 年を要する作物のため, 遮光は生育期間の短縮に寄与すると推察	野村ら <sup>[B.57]</sup>
ヘラオオバコ	・品種 1 は, 各遮光率に対応して全重 3.3[g/plant], 1.7[g/plant] ・品種 2 は, 各遮光率に対応して全重 3.5[g/plant], 約 1.6[g/plant]	機能性成分の減少	品種間差あり	田村ら <sup>[B.58]</sup>
オオレン	各遮光率に対応して, 根重 6.8[g/plant], 7.8[g/plant]	機能性分量に変化なし	遮光措置が必要な農作物であるため, 遮光は省力化につながる	柴田ら <sup>[B.59]</sup>
ジャーマンカモミール	各遮光率に対応して, 草丈 37.9[cm/plant], 47.6[cm/plant], 29.7[cm/plant], 15.8[cm/plant]	—	遮光による開花遅延, 出蕾遅延が発生	野口ら <sup>[B.60]</sup>
スイートバジル	各遮光率に対応して, 生体重 57.2[g/plant], 58.4[g/plant], 66.6[g/plant]	精油濃度 0.50[ml/kg], 0.54[ml/kg], 0.31[ml/kg],	精油主要成分は, 増加した成分と減少した成分が存在	野口ら <sup>[B.61]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献



TableB.19 : 薬用作物で実施した遮光実験の概要 (2)

薬用作物(2)	品種	遮光日時	遮光率	参考文献
スペアミント	・Mentha spicata L.	・2002/3/14~6/14	0% (対照区), 25%, 50%	野口ら <sup>[B.61]</sup>
ドクダミ	・原生種	・1994/3/22~8/18	0% (対照区), 43%, 63%	酒井ら <sup>[B.62]</sup>
カギカズラ	・原生種	・1982/12/24~ ・1986/1/7	20%, 40%, 60%, 80%	川添ら <sup>[B.63]</sup>
ウコン	—	・1994/6/15~10/10	0% (対照区), 22%, 30%, 43%	赤嶺ら <sup>[B.64]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

TableB.20 : 薬用作物で実施した遮光実験の結果 (2)

薬用作物(2)	収量	品質	その他特筆事項	参考文献
スペアミント	各遮光率に対応して, 生体重 133.3[g/plant], 100.3[g/plant], 113.7[g/plant]	精油濃度 3.79[ml/kg], 4.35[ml/kg], 3.15[ml/kg],	精油主要成分は, 増 加した成分と減少した 成分が存在	野口ら <sup>[B.61]</sup>
ドクダミ	各遮光率に対応して, 収量約 300[g/m <sup>2</sup> ], 約 500[g/m <sup>2</sup> ], 約 290[g/m <sup>2</sup> ]	遮光に伴い機 能性成分含有 量減少	ドクダミの生薬としての 利用に遮光は適当と 推察	酒井ら <sup>[B.62]</sup>
カギカズラ	各遮光率に対応して, カギ収量約 67[g/plant], 110[g/plant], 60[g/plant], 20[g/plant]	遮光につれア ルカロイド含 有量増加	アルカロイドは鎮痛作 用から有用とされてい る.	川添ら <sup>[B.63]</sup>
ウコン	各遮光率に対応して, 根乾物重 9.7[g/plant], 21.4[g/plant], 22.5[g/plant], 23.8[g/plant]	—	遮光に伴い分けつ数 減少	赤嶺ら <sup>[B.64]</sup>

(出典) Table に記載した参考文献

## 参考文献

- [B.1] 松浦 克彦, 荒木 斉; 遮光がイチジク“柵井ドフィン”の樹体生長, 着果, 収量および果実品質に及ぼす影響, 兵庫県農業技術センター研究報告 農業編, 43(1995), pp. 21-26.
- [B.2] 松浦 克彦, 荒木 斉; イチジク“柵井ドフィン”に対する前年の遮光が本年の生育, 着果, 果実品質および収量に及ぼす影響, 兵庫県農業技術センター研究報告 農業編, 44(1996), pp. 61-64.
- [B.3] T. Chantalak, B. Strik; Influence of time of overhead shading on yield, fruit quality, and subsequent flowering of hardy kiwifruit, *Actinidia arguta*, *New Zealand journal of crop and horticultural science*, 32.2 (2004), pp. 235-241.
- [B.4] 原 弘道, 松田 智明, 月橋 輝男; 発育後期の遮光処理がクワ果実の発育とアミロプラストの発達におよぼす影響, 園芸学会雑誌, 63(1994), pp. 257-266.
- [B.5] 北島 宣, 松本 辰也, 石田 雅士, 傍島 善次; 遮光及び無遮光下におけるカキ樹の結果枝乾物蓄積量と生理落果との関係, 園芸学会雑誌, 59(1990), pp. 75-81.
- [B.6] 今川 順一, 杉村 輝彦, 望岡 亮介; 日照時間が促成栽培のカキ'刀根早生'の花芽分化に及ぼす影響, 農業生産技術管理学会誌, 14(2007), pp. 21-24.
- [B.7] 大江 孝明, 岡室 美絵子, 櫻井 直樹, 土田 靖久, 山崎 哲弘, 奥井 弥生, 石原 紀恵, 城村 徳明; ウメ'南高'における光条件の違いが梅酒の香気, 苦みおよび機能性成分に及ぼす影響 園芸学研究, 13 (2014), pp. 343-347.
- [B.8] 佐久間 文雄, 杉浦 俊彦, 桧山 博也; ニホンナシ'幸水'の生育・収量・果実品質並びに花芽着生に及ぼす遮光処理の影響, 茨城県農業総合センター園芸研究所研究報告, 8 (2000), pp. 1-6.
- [B.9] 泉 秀実, 伊東 卓爾, 吉田 保治; 栽培中の光条件がウンシュウミカンの葉と果皮中のアスコルビン酸含量と分布および果実品質に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 61(1992), pp. 7-15.
- [B.10] 小野 祐幸, 岩垣 功; ウンシュウミカンの遮光処理が生産構造に及ぼす影響, 果樹試験場報告 D 口之津, 9(1987), pp. 13-24.
- [B.11] マター メベロ, 富永 茂人; Effects of Shading Stage and Level on Fruit Set and Development, Leaf Carbohydrates and Photosynthesis in Ponkan (*Citrus reticulata* Blanco), 熱帯農業, 42(1998), pp. 103-110.
- [B.12] 鄭 顕福, 伊東 正, 丸尾 達; 遮光と培養液の  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  比が NFT 栽培トウガラシの生育・収量に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 63(1994), pp. 371-377.
- [B.13] 近藤 悟; リンゴ果実の各種糖類及びアスコルビン酸含量に及ぼす環境要因の影響, 日本食品工業学会誌, 39(1992), pp. 1112-1118.

- [B.14] 浅田 武典, 小笠原 理高; リンゴ幼木の生長に及ぼす遮光の影響, 園芸学会雑誌, 67 (1998), pp. 655-659.
- [B.15] 宮澤 洋一, 中島 由郎; ワサビの畑地栽培における遮光及びポリマルチの効果, 長野県野菜花き試験場報告, 6(1991), pp. 31-37.
- [B.16] オングソ ジャスタス M, 水谷 房雄, フセイン A. B. M. シャリフ, エリ-シェリフ アリ R ; 遮光率の低い白色寒冷紗がモモ樹の枝の生長と果実品質に及ぼす効果, 農業生産技術管理学会誌, 13(2006), pp. 21-27.
- [B.17] 木村 光雄, 傍島 善次, 国村 昇, 小森 弘士; 遮光が桃樹の生育, 光合成及び葉の内部構造に及ぼす影響, 京都府立大学学術報告, 12(1960), pp. 19-25.
- [B.18] 樋口 浩和, 米本 仁巳, 宇都宮 直樹, 桜谷 哲夫; Shading Responses of Cherimoya Leaf Chlorophyll Content, Leaf Morphology, Shoot Growth, Leaf Gas Exchange and Fruit Production under Plastic House Conditions, 生物環境調節, 39(2001), pp. 255-265.
- [B.19] 朝岡 克拓, 今井 俊治, 岡本 五郎, 平野 健; ブドウ'マスカット・オブ・アレキサンドリア'の裂果発生に及ぼす樹体の遮光, 多湿処理の影響, 岡山大学農学部学術報告, 86(1997), pp. 51-54.
- [B.20] 加藤 栄美, 石山 新治; '山形青菜'の遮光処理による抽苔遅延と増収効果, 東北農業研究, 62(2009), pp. 149-150.
- [B.21] 加藤 栄美, 石山 新治; '山形青菜'の遮光処理による初夏~初秋継続出荷技術, 東北農業研究, 63(2010), pp. 135-136.
- [B.22] カンサ ジョージ オデュロ, 丸尾 達, 篠原 温, 伊東 正; スイカの光合成特性, 収量および果実品質に及ぼす光強度と気温の影響, 熱帯農業, 40(199), pp. 118-122.
- [B.23] 金浜 耕基, 斎藤 隆; キュウリの曲がり果発生に及ぼす葉数, 着果数及び遮光の影響, 園芸学会雑誌, 54(1985), pp. 216-221.
- [B.24] 吉田 千恵, 漆山 喜信, 岩崎 泰永; パプリカの夏秋どり栽培における遮光が果実生産におよぼす影響, 農業および園芸, 11(2006), pp. 1195-1197.
- [B.25] 石井 現相, 西條 了康; 栽培条件がダイコンの全糖及びビタミン C 含量,  $\beta$ -アマラーゼ活性に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 55(1987), pp. 468-475.
- [B.26] 古賀 武, 井上 恵子, 林田 達也; 遮光処理が単為結果性ナス系統 'AE-P03' の開花・結実および果実肥大に及ぼす影響, 九州農業研究, 66(2004), pp. 194-194.
- [B.27] 斎藤 隆; ナスの開花・結実に関する研究 (第 4 報): 苗の生育ならびに花芽形成に対する日長と光の強さの影響, 生物環境調節, 13(1975), pp. 141-150.
- [B.28] 西川 満, 栗原 広志, 平井 源一; 遮光処理が甘藷の乾物蓄積に及ぼす影響, 日本作物学会紀事, 31(1962), pp. 221.

- [B.29] 三浦 邦夫, 長田 明夫; Effect of shading on photosynthesis, respiration, leaf area and corm weight in konjak plants. (*Amorphophallus konjac* K. Koch), 日本作物学会紀事, 50 (1981), pp. 553-559.
- [B.30] 稲葉 健五, 長南 信雄; コンニャクの生育と形態に関する研究 : 第1報 芋重と葉緑体構造に及ぼす遮光処理の影響, 日本作物学会紀事, 51(1982), pp. 167-168.
- [B.31] 稲葉 健五; コンニャクの生育と形態に関する研究 : 第2報 葉身の形態に及ぼす遮光処理の影響, 日本作物学会紀事, 52(1983), pp. 81-82.
- [B.32] 三浦 邦夫, 和田 義春, 渡辺 和之; コンニャクにおける地下部器官の乾物蓄積に対する光合成産物生産の影響, 日本作物学会紀事, 71(2002), pp. 24-27.
- [B.33] 小元 敬男, 上和田 勉; サトイモの生育に及ぼす遮光の影響-序-, 農業気象, 1(1982), pp. 55-58.
- [B.34] 小元 敬男, 上和田 勉; サトイモを用いた遮光実験(3): 盛夏の一時遮光と生育収量との関係, 日本作物学会紀事, 53(1984), pp. 66-67.
- [B.35] 川西 孝秀, 神藤 宏, 福嶋 総子, 佐藤 卓, 三原 弘光, 西森 裕夫, 東 卓弥; 実エンドウ栽培における子実肥大不良葉の発生要因の解明 第1報 遮光, 昼夜温が莢および胚珠の発達に及ぼす影響, 園芸学研究, 9 (2010), pp. 1347-2658.
- [B.36] 小野 良孝, 尾崎 蕉; 生育初期の遮光処理が落花生の生育収量におよぼす影響, 日本作物学会紀事, 40(1971), pp. 480-485.
- [B.37] 前田 幸二, 前田 和美; 落花生品種の草型に関する生育解析的研究 : XII. 遮光処理がほふく性品種個体の生長と草型に及ぼす影響, 日本作物学会紀事, 47(197), pp. 175-176.
- [B.38] 杉山 信太郎, 斉藤 正志; なたねの多収性に関する研究 : 第1報 成熟期間中の遮光処理試験, 日本作物学会東北支部会報, 12(1970), pp. 49-50.
- [B.39] 長島 時子; れんこんの主茎第1節に形成される葉について: とくにその葉の生育に及ぼす遮光および施肥量の影響, 園芸学会雑誌, 46(1977), pp. 201-210.
- [B.40] 吉田 祐子, 浜本 浩, 福永 亜矢子, 藤原 隆広, 熊倉 裕史; 遮光栽培したハウレンソウにおけるアスコルビン酸含量の遮光除去後の変動, 園芸学研究, 7(2008), pp. 399-405.
- [B.41] 鯨 幸夫, 石黒 弘三; ハウレンソウの鉄含量に及ぼす栽培条件の影響, 日本栄養・食糧学会誌, 37(1984), pp. 245-250.
- [B.42] 鯨 幸夫, 石黒 弘三; ハウレンソウのL-アスコルビン酸含量に及ぼす栽培条件の影響, 日本栄養・食糧学会誌, 37(1984), pp. 239-244.
- [B.43] 中本 洋, 黒島 学, 塩沢 耕二; ハウレンソウのシュウ酸, 硝酸, ビタミン C に及ぼす遮光, 気温, かん水, 堆肥施用の影響, 北海道立農業試験場集報, 75(1998), pp. 25-30.
- [B.44] 宮浦 邦晃, 細川 定治; 遮光処理がてん菜品種の葉部および根部の生育, 糖分蓄積におよぼす影響, 日本作物学会紀事, 42(1973), pp. 72-78.

- [B.45] 野村 信史, 南山 豊, 白井 滋久; てん菜の収量並びに根中糖分に及ぼす遮光処理の影響, 日本作物學會紀事, 52(1983), pp. 63-64.
- [B.46] 石山 久悦, 大木 淳; イッポンワラビの促成栽培方法, 東北農業研究, 59(2006), pp. 215-216.
- [B.47] 寺分 元一; りん茎形成に関する光要因, 園芸学会雑誌, 40(1971), pp. 17-22.
- [B.48] ゴシユ S. C, 浅沼 興一郎, 楠谷 彰人, 豊田 正範; Effects of Shading on Dry Matter Production, Yield and Nitrate Reductase Activity of Potato under Two Levels of Spacing, 生物環境調節, 40(2002), pp. 259-268.
- [B.49] 宮平 永憲, 神谷 寿幸; サトウキビの生育, 収量および成熟に及ぼす遮光の影響, 沖縄県農業試験場研究報告, 12(1987), pp. 1-7.
- [B.50] 小泉 文晴, 横田 学, 白石 俊昌, 岩田 直記; ミヨウガ根茎腐敗病の薬剤防除と遮光処理効果, 関東東山病害虫研究会年報, 43(1996), pp. 99-101.
- [B.51] 松田 照男; マクワ型メロンの生理障害果発生に及ぼす遮光の影響, 茨城大学農学部学術報告, 31(1983), pp. 13-24.
- [B.52] 西澤 隆, 伊藤 亜由美, 元村 佳恵, 伊藤 政憲, 富樫 政博; 遮光処理がネットメロン (Cucumis melo L. 'アンデス'および'ラスター')の果実品質に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 69(2000), pp. 563-569.
- [B.53] 相川 敏之, 西沢 隆, 伊藤 政憲, 富樫 政博, 山崎 紀子; 遮光処理がメロン果実のエチレン生成と「水浸状果」の発症に及ぼす影響, 園芸学研究, 6(2007), pp. 283-287.
- [B.54] 池主 俊昭, 星野 四郎; 小豆の結実に及ぼす環境要因の影響: 第一報 結実期間の温度及び遮光処理と収量・品質, 日本作物學會紀事, 56(1987), pp. 283-284.
- [B.55] 上村 勇美, 花岡 喜重, 佐藤 三郎; 遮光開始期がトリカブトの生育・開花に及ぼす影響, 群馬県園芸試験場報告, 11(1983), pp. 65-66.
- [B.56] 上村 勇美, 花岡 喜重, 佐藤 三郎; 数種の遮光資材による遮光程度の差違がトリカブトの生育・開花に及ぼす影響, 群馬県園芸試験場報告, 11(1983), pp. 62-64.
- [B.57] 野島 博, 柴崎 修平; 17 年生オタネニンジンの栽培における遮光率の違いが生育に及ぼす影響, 日本作物学会関東支部会報, 27(2012), pp. 44-45.
- [B.58] 田村 良文; ヘラオオバコ(Plantago lanceolata L.)の機能性成分蓄積に及ぼす生育季節, 気象と栽培要因の影響ならびに遺伝的変異, 独立行政法人農業技術研究機構東北農業研究センター研究報告, 100(2002), pp. 75-92.
- [B.59] 柴田 敏郎, 畠山 好雄, 姉帯 正樹, 金島 弘恭; 北海道北部地方におけるオウレンの無遮光栽培について, 生薬学雑誌, 46(1992), pp. 310-316.
- [B.60] 野口 有里紗, 富高 弥一平; ジャーマンカモミールの開花に及ぼす日長, 温度及び光強度の影響と花芽分化過程, 東京農業大学農学集報, 47(2003), pp. 268-273.

- [B.61] 野口 有里紗, 市村 匡史;環境要因がスイートバジルおよびスペアミントの生育,開花,精油濃度並びに精油成分に及ぼす影響, 園芸学研究, 3(2004), pp. 67-70.
- [B.62] 酒井 英二, 柴田 敏郎, 川村 智子, 久田 陽一, 野呂 征男, 吉田 将士, 田中 俊弘;ジュウヤクの生薬学的研究(2): 遮光条件下で栽培したドクダミの生育およびフラボノイド配糖体含量, 生薬学雑誌, 50(1996), pp. 45-48.
- [B.63] 川添 禎浩, 小林 茂樹, 水上 元, 大橋 裕;カギカズラの栽培と育種(第3報): カギカズラの生長,カギ収量およびアルカロイド含量におよぼす遮光率の影響, 生薬学雑誌, 43(1989), pp. 104-108.
- [B.64] 赤嶺 光, 石嶺 行男, 村山 盛一;ウコン (*Curcuma longa* L.) の特性と栽培技術に関する研究: 第2報 遮光処理がウコンの生育・収量に及ぼす影響, 琉球大学農学部学術報告, 42(1995), pp. 133-137.

付録 C

TableC.1: 米粒外觀形質分析の結果 (1)

検体名	分類項目																							
	整粒		胴割粒				未熟粒				着色粒				被害粒								死米	
	重量比/%	割合	乳白粒	基部緑腐粒	胚白黄腐粒	胚米黄腐粒	その他黄腐粒	全黄腐粒	部分黄腐粒	赤米	碎粒	発芽粒	折ぐされ粒	茶米	短点粒	虫害粒	病害粒	畸形粒	その他黄腐粒	青死米	白死米	重量比/%	割合	
1	76.3	0.1	3.5	3.6	0.9	2.2	10.7	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.4		
2	80.2	0.0	2.5	4.4	0.7	1.5	8.3	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.4		
3	69.9	0.1	4.1	4.0	2.0	1.2	16.6	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2		
4	71.7	0.1	2.9	5.4	1.3	0.6	14.4	0.0	1.4	0.0	0.2	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1		
5	73.1	0.0	4.1	2.2	0.9	1.6	13.1	0.0	0.7	0.0	0.4	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	0.3		
6	66.5	0.0	7.3	3.5	1.3	0.6	16.8	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.6	0.6		
7	71.3	0.2	5.0	1.3	1.1	1.7	15.3	0.0	1.1	0.0	0.1	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.4	0.4		
8	74.7	0.0	2.1	5.8	0.7	0.7	14.1	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1		
9	70.3	0.0	4.1	3.4	0.6	1.0	15.5	0.0	0.8	0.0	0.4	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	1.0	1.0		
10	68.2	0.0	3.0	4.7	1.0	3.2	17.8	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1		
11	71.0	0.0	2.2	5.7	1.4	0.3	17.6	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1		
12	67.0	0.1	4.0	4.8	2.0	0.1	18.5	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.5		
13	70.1	0.0	5.6	1.9	0.8	3.0	16.1	0.0	0.2	0.0	0.5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0		
14	76.2	0.0	2.3	1.3	0.3	2.2	15.4	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0		
15	65.7	0.2	5.9	1.8	1.5	2.3	17.2	0.0	0.9	0.0	0.3	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.5	0.5		
16	60.5	0.0	6.2	1.3	0.6	3.3	21.8	0.0	0.9	0.0	0.3	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.2	0.2		
17	61.1	0.0	6.4	1.3	1.0	6.0	18.4	0.0	1.2	0.0	0.5	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.3	0.3		

TableC.2: 米粒外觀形質分析の結果 (2)

検体名	分類項目																					
	整粒		胴割粒				未熟粒				着色粒				被害粒						死米	
	重量比/%	胴割粒重量比/%	乳白粒重量比/%	高脚未熟粒重量比/%	黄白未熟粒重量比/%	青未熟粒重量比/%	その他未熟粒重量比/%	赤米重量比/%	部分着色粒重量比/%	全着色粒重量比/%	砕粒重量比/%	発芽粒重量比/%	芽くされ粒重量比/%	茶米重量比/%	斑点粒重量比/%	虫害粒重量比/%	病害粒重量比/%	奇形粒重量比/%	その他被害粒重量比/%	青死米重量比/%	白死米重量比/%	
																						重量比/%
18	59.6	0.0	8.0	0.4	0.7	8.2	15.5	0.0	0.9	0.0	1.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	4.0	0.2	
19	73.8	0.0	5.3	0.9	0.4	3.1	13.5	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	1.6	0.1	
20	70.5	0.1	6.0	1.9	1.2	3.5	12.0	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	2.2	0.7	
21	62.6	0.1	7.1	2.6	1.1	2.9	18.3	0.0	0.8	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	2.0	1.4	
22	66.1	0.0	6.7	1.3	1.2	3.1	14.8	0.0	0.8	0.0	0.7	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	3.1	0.8	
23	67.0	0.1	7.0	1.6	1.1	2.9	14.2	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	3.8	0.9	
24	68.3	0.0	8.5	2.7	1.1	4.0	8.9	0.0	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	3.4	1.4	
25	70.5	0.0	7.4	3.1	0.6	2.0	11.0	0.0	0.2	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	2.8	0.5	
26	67.8	0.2	8.3	2.2	1.5	1.7	13.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	3.0	1.2	
27	62.1	0.0	11.4	2.4	1.2	0.7	13.4	0.0	0.3	0.0	0.7	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	4.9	1.7	
28	65.9	0.0	7.7	2.1	1.4	2.8	13.2	0.0	0.4	0.0	0.6	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	3.8	1.2	
29	60.5	0.1	10.8	2.7	0.1	0.9	12.6	0.0	0.7	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	7.7	0.9	
30	74.0	0.0	7.8	2.8	0.7	1.8	7.6	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	3.1	0.7	
31	81.3	0.0	4.9	0.8	0.4	1.0	6.9	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	2.1	0.4	
32	81.8	0.0	3.4	1.1	0.8	0.8	8.9	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	1.0	0.6	
33	83.3	0.0	2.9	2.0	0.7	0.7	8.9	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.3	0.2	
34	84.4	0.0	0.6	2.2	0.5	1.1	8.4	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.3	0.3	