

東京大学新領域創成科学研究科
環境システム学専攻

平成 28 年度

修士論文

水稻の営農型太陽光発電が生育に与える影響に関する研究

2017 年 2 月 21 日提出
指導教員 吉田 好邦 教授

原浦晃多

目次

1	序論.....	1
	1.1 研究の背景.....	1
	.....	1
1.2	水稻栽培.....	5
1.2.1	水稻栽培の基礎知識.....	5
1.2.2	水稻栽培に影響を与える要因.....	6
1.2.3	水稻生育ステージ予測モデルについて.....	8
1.3	研究の目的.....	11
1.4	本文の構成.....	12
	1.5 参考文献.....	13
	.....	13
2	実証実験の計測結果.....	14
	2.1 実証試験場の概要.....	14
	.....	14
	2.2 気象データの計測.....	15
	.....	15
2.2.1	計測する気象要素.....	15
2.2.2	計測機器と各種設定.....	15
2.2.3	計測期間.....	17
	2.3 気象データの計測結果.....	17
	.....	17
2.3.1	日射量データの解析.....	17
2.3.2	気温データ分析.....	18
	2.4 水稻生育データの解析.....	19
	.....	19
2.4.1	水稻生育調査の概要.....	19
2.4.2	水稻生育データの分析結果.....	20
	2.5 水稻品質分析.....	25
	.....	25
2.5.1	水稻外觀形質分析の概要.....	25
2.5.2	水稻外觀形質分析の結果.....	27
2.5.3	水稻成分分析.....	32
	2.6 まとめ.....	36
	.....	36
	2.7 参考文献.....	

.....	37
3 営農型太陽光シミュレーション.....	38
3.1 SIMRIW と遮光条件.....	38
3.2 SIMRIW の概要.....	38
3.3 SIMRIW の修正.....	41
3.4 水稻の収量予測シミュレーション	45
3.5 営農型発電のシミュレーション	48
3.5.1 各種設定.....	48
3.5.2 営農型太陽光発電の経済性の検討.....	49
3.5.2.1 遮光率変動に対する経済性.....	49
3.5.2.2 買い取り価格の変動効果.....	51
3.5.2.3 設備費用の変動の影響.....	53
3.6 参考文献.....	60
4 結論.....	61
謝辞.....	62

1 序論

1.1 研究の背景

2015 年 12 月 12 日パリで開催された第 21 回気候変動枠組条約締約国会議(COP21)にてパリ協定が採択された。世界の平均気温は年々上昇傾向で、2100 年には 4.8℃上昇するとまで言われている。パリ協定はこのような地球温暖化のための対策としての新しい国際ルールである。地球温暖化の原因である温室効果ガスとして知られている二酸化炭素は、世界の人口増加、経済成長に伴って年々増加している。世界の主要排出国をはじめとする参加国は二酸化炭素の削減目標を立て、5 年ごとに見直し国連に報告する流れとなっている。

パリ協定が予想以上に早いタイミングで発効にまで至った理由として、世界の二酸化炭素排出の 4 割以上を占めるアメリカと中国がそろって協定を締結した動きがあった。その背景には、アメリカは「シェールガス」という、二酸化炭素の排出が比較的少ないエネルギーが見つかり、中国に関しては、PM2.5 などの環境汚染を受けて低炭素燃料が必要となったという事情があったが、近年風力発電や太陽光発電などの、再生可能エネルギーの技術がビジネスとして成立し始めたことも大きな追い風となった。再生可能エネルギーとは、「エネルギー源として永続的に利用することができると認められる」ものとして、太陽光、風力、水力、地熱、太陽熱、大気中の熱、その他自然界に存する熱、バイオマスが規定されている。再生可能エネルギーは、資源が枯渇せず繰り返し使え、発電時や熱利用時に地球温暖化の原因となる二酸化炭素をほとんど排出しないクリーンなエネルギーとして知られている。

我が国においても再生可能エネルギーの導入は注目を集めている。日本のエネルギー供給は、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料がその 8 割以上を占めており、そのほとんどを海外からの輸入に頼っている。一方で、新興国の経済発展などを背景として世界的なエネルギー需要は増加傾向にあり、また化石燃料の市場価格が乱高下するなどしてエネルギー市場は不安定化している。このような状況の中、日本はエネルギーを安定的かつ適切に供給するため、資源の枯渇のおそれが少なく環境負荷も少ない太陽光やバイオマスといった再生可能エネルギーの導入を積極的に行っている。Figure1.1 は 2015 年 9 月の日本における発電実績を示している。2011 年の東日本大震災以降原子力発電によるエネルギー供給が急激に減少し、化石燃料によるエネルギー供給で補う一方で、再生可能エネルギーによる発電割合は 5.5%まで拡大してきている。また導入されている再生可能エネルギーの中でも、導入割合は太陽光発電が圧倒的に大きい。この背景として、太陽光発電設備において地理的な偏在が少ないことや初期投資が比較的安価で設置が容易である点が挙げられる。

2012 年 7 月から 2014 年 11 月までの間に新たに導入された再生可能エネルギーの割合を太陽光発電設備とその他設備（風力、地熱、バイオマス）を比較した形で Figure1.2 に掲載する。

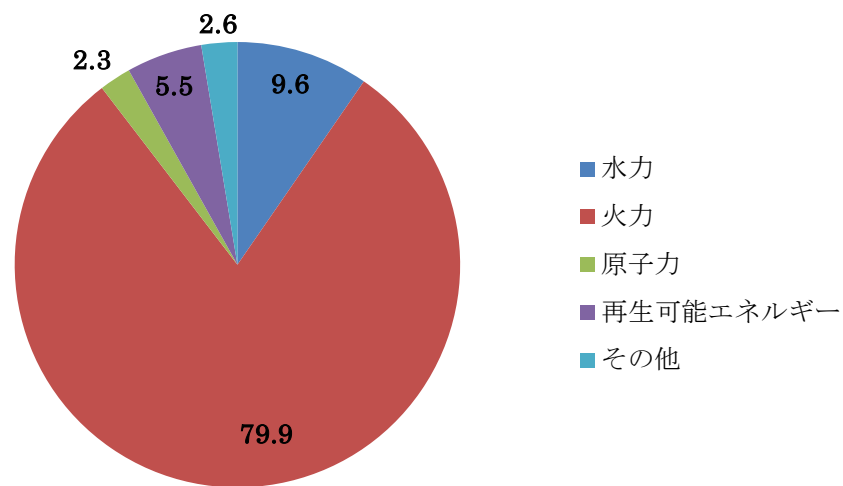


Figure1.1：2015 年 9 月日本での発電実績
(経済産業省資源エネルギー庁各種統計「発電実績」から作成^[1.1])

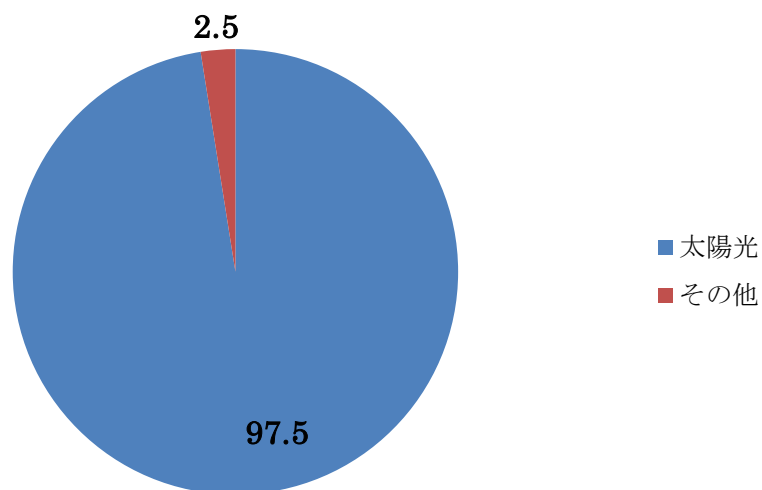


Figure1.2：2012 年 7 月から 2014 年 11 月までの導入
(出典) 経済産業省. 再生可能エネルギー各電源の導入の動向について^[1.2]

以上のような状況の中で農地法の改正が行われたことによって農地の利用法の新たな可

能性が生まれた。農地法の規制により従来では農業以外の用途での農地の使用は禁止されてきた。しかし 2013 年に農地法の一部が改正されたことにより、農業以外の用途での農地の使用が可能となり^[1.3]、今後は農地を対象にした再生可能エネルギーの導入が期待されている。日本の国土面積の 10%は農地であるため、農地を有効活用することはエネルギーの地産地消に大きく関係する。また農業従事者は Figure1.3 のように年々減少傾向にある。新しい農地の利用法による農業の活性化は非常に意義深いものである。

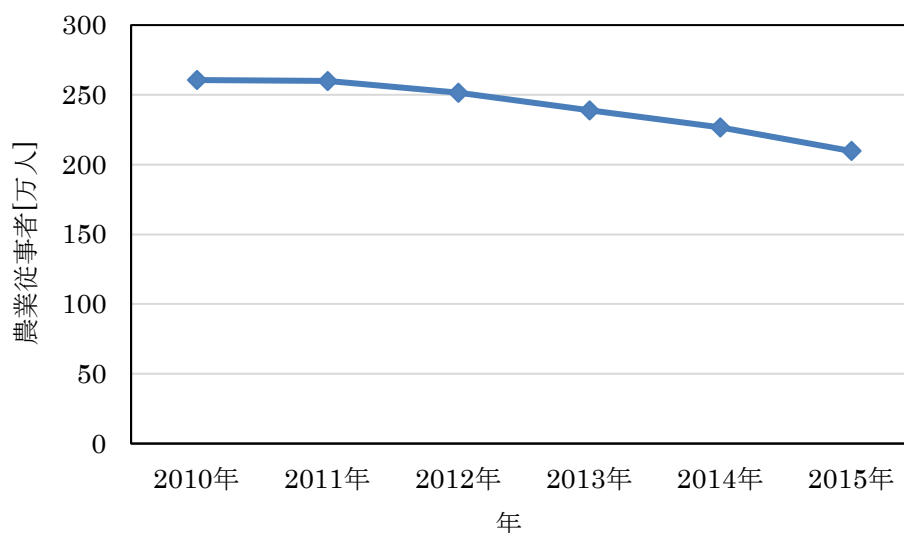


Figure1.3：農業従事者数の推移
(農林水産省:農業労働力に関する統計から作成^[1.4])

現在までに検討されてきた農地における再生可能エネルギーの導入手法を大きく分類すると、バイオエタノール生産、バイオマス発電、恒久的な農地転用を伴う太陽光発電、農業と発電を並行して行う営農型太陽光発電がある。単位面積あたりの太陽光エネルギーの変換効率は、植物では約 3%と低い一方で、太陽光パネルでは約 15%と高い^[1.5]。そこで、発電に加えて食料生産を同時に行うことのできる営農型太陽光発電は有用性が大きいと考えられる。営農型太陽光発電では、圃場での農機の使用に差しさわりのないように太陽光パネルおよび支柱を設置し、発電と同時にパネルの下で農作物の栽培を行う。

しかし営農型太陽光発電には以下の課題が存在している。農林水産省は営農型発電について、これをしない場合と比べて収量 8 割以上で、著しい品質劣化が生じていないという設置継続条件を課しており、条件を満たすことができない場合には、発電設備を撤去することを求めている^[1.3]。現状では、遮光条件下で生育させた農作物の成長動態についての研究の蓄積不足から、生育状況についての見通しを立てることが困難な状況にあり、遮光条件下で生育する農作物の収量の不確実性が太陽光パネルの設置希望者の潜在的なリスクとして

存在しているのが現状である。実際に営農型太陽光発電について行われた研究を概観すると、日本ではいまだ実証系の研究蓄積が乏しい。疑似的に遮光条件を設けることにより生じる農作物への被害を検討した先行研究は存在するが、通年での遮光実験を実施した先行研究はほとんど存在しないのが現状である。このように、直接的な遮光に対する農作物耐陰性の定量的な知見は現状では不足している。

近年営農型太陽光発電が注目を集めているが、これには植物生理学的な観点からの根拠がある。一般的に植物の生育において「光飽和点」という概念がある。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ものである。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」、逆に飽和しにくい植物を「弱耐陰性」と定義している。これはつまり、強耐陰性の農作物は光量が制限されても十分に生育量が保たれ、弱耐陰性の農作物は光を与えるほど生育量が増加するということである。

そのため営農型太陽光発電の多くは、サカキ、サトイモ、イチジクなどの強耐陰性の農作物を採用して行う傾向がある^[1.6]。営農型太陽光発電の導入を促進させるためにも、農作物耐陰性の基礎的な知見を蓄積することが重要である。本研究は水稻を対象とした営農型太陽光発電に関するものであるので次節で水稻の栽培方法や生育過程、水稻生育に影響を与えうる因子などに関する基礎知識の共有を行う。

1.2 水稻栽培

1.2.1 水稻栽培の基礎知識

水稻を対象とした研究である以上、前提として水稻の生理学的知見や、水稻の栽培手法を知らなければならない。ゆえに本節では水稻栽培手法や基礎知識について述べる。稲作の流れについて直感的な理解を得るために、水稻生育状況についてまとめた Figure1.4 を紹介する。本節で述べる水稻栽培手法は、水稻栽培の基礎知識^[1.7]を参考にした。

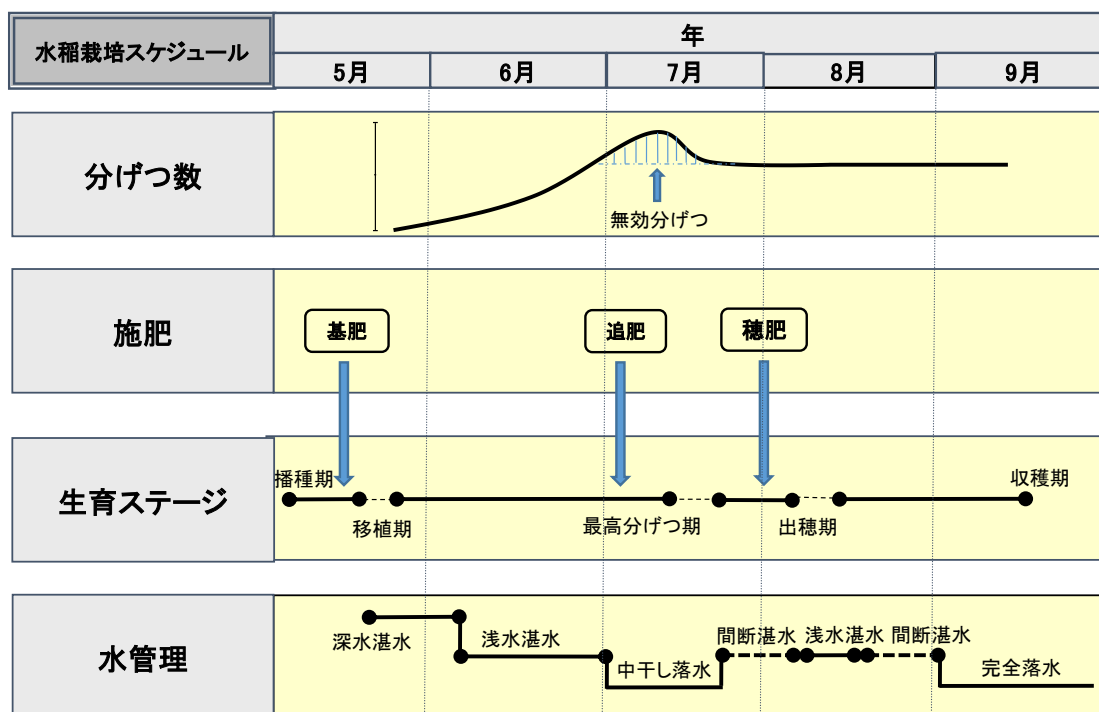


Figure1.4： 一般的な水稻栽培スケジュール

(出典) 農林水産省，水稻栽培方針^[1.8]

水稻栽培では、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壤に根付いていなく、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て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稻の生育現象であり、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」と呼ぶのが一般的である。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。

水稻の生育過程において移植日の次のステージは「有効分げつ期」である。以下で有効分

げつ期の栽培管理方法について述べる。

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」になることが知られているため、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。

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。

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。

以上のように水稻の生育過程の各期間においてそのメカニズムや栽培管理方法は異なる。

1.2.2 水稻栽培に影響を与える要因

本節では本間^[1.9]に基づいて水稻栽培に影響を与える要因についてまとめる。

まず、気温の影響である。水稻の栄養生長期では、稲の生育は温度に対して比例関係を示し、適温以上であるほど、発育・成長が早くなることが知られている。また Table1.1 からわかるように、発芽から分げつまでの生育段階では水稻が生長可能な限界温度の幅が極めて大きい。

Table1.1：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
分げつ	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 [1.10]

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、影響としては高温障害と冷害がある。幼穂形成から登熟までの生殖生長期の高温条件は、減収や品質劣化を生じさせる。

冷害には遅延型冷害と障害型冷害が存在する。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。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、主な被害は、稔実不稔が原因で生じる減収である。また出穂後に低温状態が継続すると登熟が進まず、米粒外觀形質の悪化による品質劣化も発生する。

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。

次に、全天日射量の影響である。全天日射量の収量への影響は気温感応性のように水稻の生育段階に応じてどのように異なるかということに関しては詳細にはいまだ明らかではない。気温感応性に比べて、日照条件と水稻生育状況の関係に関する研究はいまだ基礎的なデータの蓄積が乏しい。

以上をまとめると、水稻収量は気象要因と人為要因により影響を受けている。水稻の気温感応性については、歴史的に被害が大きかった冷害、地球温暖化により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。一方で、全天日射量と水稻の生育状況についての実証研究によるデータの蓄積は乏しく、いまだ統一した見解が存在しないという現状があり、日照条件と水稻の生育状況に関する研究蓄積は今後の課題である。人為要因に関し

ては日本では水稻栽培手法の均一化、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。

これまで基礎研究は「気温と水稻栽培」というものが盛んに行われてきており、それらの基礎研究をもとにこれまで、水稻生育ステージ予測、収量予測、品質予測を行うために各種作物モデルの開発が行われてきた。次節では、まず水稻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。

1.2.3 水稻生育ステージ予測モデルについて

移植から出穂、収穫という水稻の生育ステージは、前節からわかるように、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 DVI(発育指数: Development Index)モデル、収量の予測モデルについての先行研究について述べる。

生育ステージの予測には、有効積算気温を用いた統計予測も行われるが、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 モデルによる水稻ライフステージ予測が一般的である。

しかし、この段階の 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。従来は、遮光条件下で水稻を栽培させるという環境が想定されていなかったため、水稻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。

しかし遮光条件下で水稻生育を行うこと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稻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、より精密な水稻生育ステージ予測モデルを構築する必要がある。

次に、収量の予測モデルについて述べる。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^[1.11]。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、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/m²/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。

Figure1.6 は環境省の資料^[1.12]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、Figure1.6 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。

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 種類のモデルがこれまでに開発されてきた。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、現段階では 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。

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 つのサブモデルにおいて、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。

本間^[1.9]は、実証実験によって得られた日射量と水稻の生育状況の関係性を SIMRIW のモデルに組みこんでシミュレーションを行うことによって、既往研究における SIMRIW の課題の解決を試みた。しかし、実証データはいまだ少なく、本間^[1.9]も 2015 年の 1 年間のみのデータしかモデルに反映させていない。日射量と水稻の生育状況の関係を示す実証データの蓄積は今後必要であると言える。

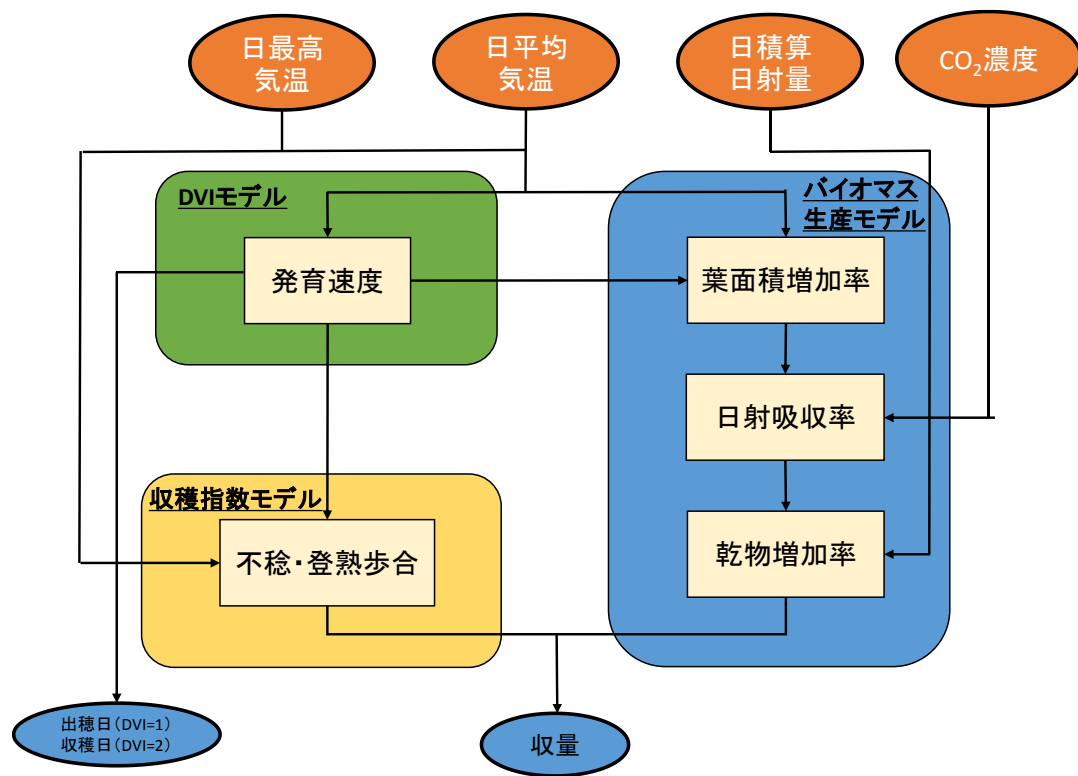


Figure1.5 : SIMRIW の構造

(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-」』^[1.12]

1.3 研究の目的

以上のような背景から本研究では大きく 2 つの目的を設定する。

第 1 に、遮光条件下での水稻の栽培を行うことによる水稻生育に関する基礎データの拡充である。前節でも述べたように、実証実験の結果を SIMRIW のモデルに反映させた事例は少ない。今後も実証実験によって、水稻生育に関する基礎データの蓄積することは重要であるので本研究の目的とする。Figure1.6 は、本研究の実証サイトとなった千葉県酒々井町の農場と太陽光発電設備の様子である。また本研究において水稻を実証実験の対象作物として採用した理由として、水稻の営農型太陽光発電が再生可能エネルギーの普及に与えるインパクトが大きいことが挙げられる。水稻の作付面積は国土の約 4%(160 万 ha)を占めており、その作付面積の 1%で太陽光発電設備を導入すると、その規模は日本で 2014 年時点の段階で存在する太陽光発電設備量にほぼ相当し、エネルギー利用の観点からも有用性が高い。また水稻生育はモデル化が比較的容易であることが挙げられる。水稻は栽培時に湛水状態を維持したまま生育するので、太陽光発電設備がもたらす微気象変化、具体的には地温の変化や土壌への降水パターンの偏在がモデルへ与える影響が比較的に小さいことが挙げられる。加えて稲が多年生植物ではなく 1 年生植物であるため、前年の遮光条件により翌年の収量・品質に影響を与えないということがモデル化でのメリットとなる。



Figure1.6：本研究で使用した実証試験場の風景
(大塚洋一氏提供)

第2の目的は、遮光条件下での水稻の生育調査の結果を、気象条件の下で水稻の収量・品質を推定するモデルに反映させ修正したうえで、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によって、太陽光発電設備設置希望者の抱える潜在的で不確定なリスクを取り除くこと、またその検討結果から経済性を考察することによって再生可能エネルギー普及に適切な制度の提案である。

1.4 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、再生可能エネルギーにおける太陽光発電普及の重要性、水稻に関する基礎知識、先行研究の紹介、ならびに今後の研究課題や研究展望について述べた。

第2章では千葉県酒々井町で実施した実証実験の概要を紹介し、実証実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、水稻成分データの解析を行う。第2章で水稻生育の各ステージにおける気象要素との関係性について検討を行い、第3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3章では、第2章で得られた知見から水稻生育モデルの改良を行う。また、得られたモデルを基に営農型太陽光発電のシミュレーションを実施する。このシミュレーションでは、遮光条件下での水稻の収量の増減ならびに売上、太陽光発電設備による売電による売上を算出し、営農型太陽光発電全体としての経済性に関しても検討する。

第4章では、第1章から第3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を行い本研究の締めくくりとする。

1.5 参考文献

- [1.1] 経済産業省 エネルギー資源庁 各種統計
<http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/analysis/>
- [1.2] 再生可能エネルギー各電源の 導入の動向について
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/004/pdf/004_06.pdf
- [1.3] 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>
- [1.4] 農林水産省 農業労働力に関する統計
<http://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html>
- [1.5] 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.
- [1.6] 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科, 29(2014), 41-56
- [1.7] 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 ; 水稻栽培の基礎知識,
http://www.vill.sekikawa.niigata.jp/info/norinkanko/umai-kome/maisutajuku-text/iwafune-maisutajuku-text_p1-37.pdf
- [1.8] 農林水産省; 水稻栽培方針 気象災害対策,
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/04180113kishou.pdf
- [1.9] 本間優 ; 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,
東京大学修士論文, 2015
- [1.10] S. Yoshida; Fundamentals of rice crop science, IRRI, (1981), pp. 1–279
- [1.11] 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.
- [1.12] 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 実証実験の計測結果

2.1 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、営農型太陽光発電の実証サイトで、2015年に続き今年2016年も実証実験を実施した。Figure2.1は実証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Figure2.2である。昨年の実証実験では非遮光区(UNIT1,UNIT2)、中遮光区(UNIT3,UNIT4,UNIT5,UNIT6)、強遮光区(UNIT7)、対照区(UNIT8)という割合で計測機器を設置していたが、今年の実証実験では中遮光区の最も東側に設置してあった計測機器を非遮光区の最も西側に移動させて計測を実施した。実証サイトで使用している支柱の素材は杭が16本、支え8本の計24本であり、支柱1本あたりの面積は 0.01m^2 である。パワーコンディショナは田淵電機株式会社の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 1.35m^2 であるため、48枚設置した際に土地に占める面積は 65m^2 である。また支え8本の面積は 4.2m^2 である。圃場の面積が 224.7m^2 であるため本実証サイトにおいて太陽光パネルおよび支柱の面が営農型太陽光発電設備全体に占める割合は31%となっている。

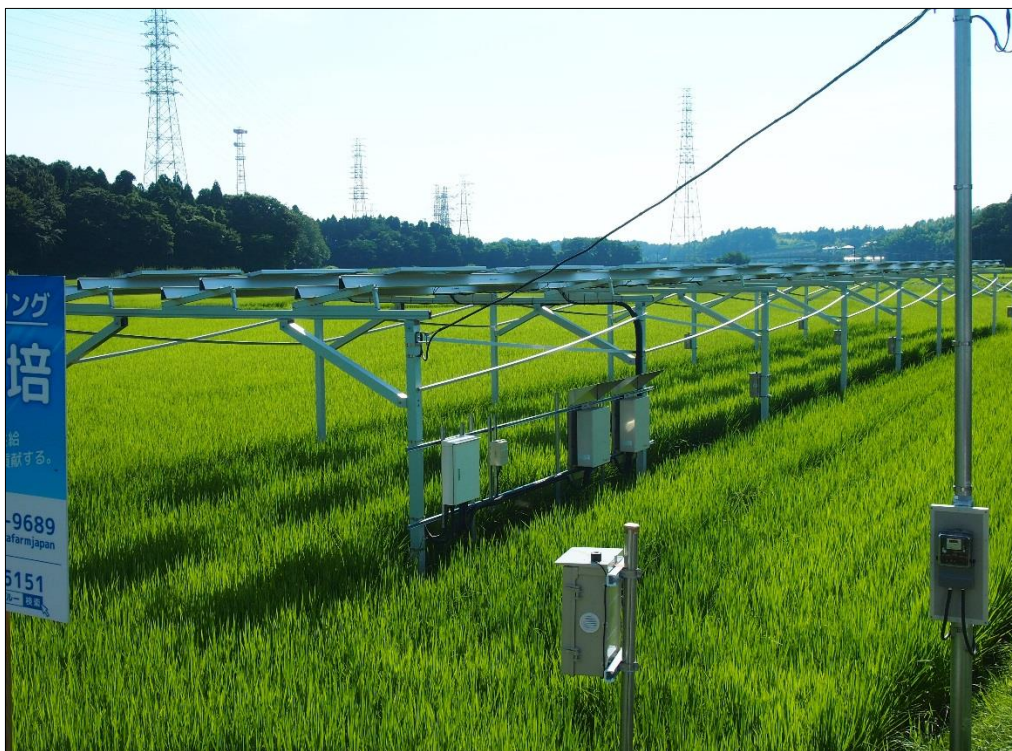


Figure2.1：酒々井実証サイトの風景

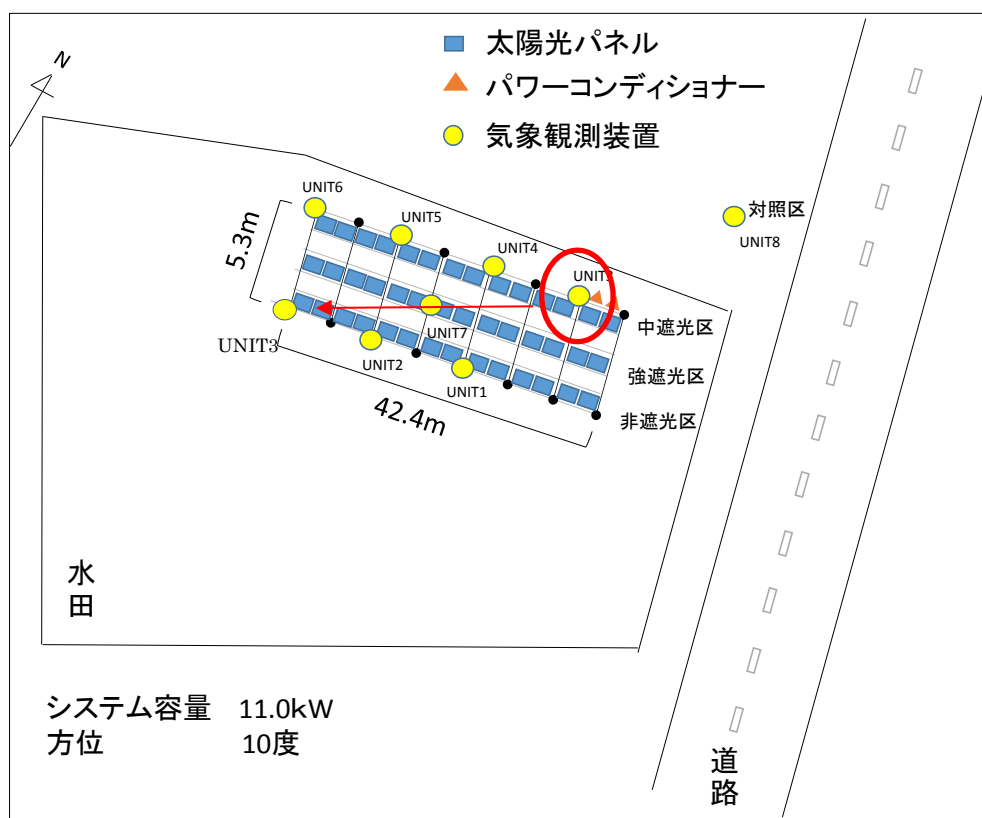


Figure2.2：実証試験場の俯瞰イメージ

2.2 気象データの計測

2.2.1 計測する気象要素

本実験で計測する気象要素は全天日射量[MJ/m^2]ならびに気温[$^{\circ}\text{C}$]である。これらの気象要素を選んだ理由は、水稻の収量・品質に与える影響が大きいことや 1.2 で述べたように日照条件と水稻の生育状況の関係については研究データの蓄積が乏しいため、新たなデータの収集自体に意義があるといった背景がある。

2.2.2 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

Figure2.3である。気象観測装置は8台設置し、合計8カ所にてデータの収集を行った。その際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、気象観測に影響を与える可能性があるため温度センサーは気象観測装置外に接続している。また、装置付近にある金属製の支柱からの熱の伝達を防ぐために Figure2.4 のようにアルミホイルの紙コップでセンサーを覆うように設置し、支柱からの熱の影響を受けないようにした。



Figure2.3：気象観測装置の内観



Figure2.4：温度センサーに取り付けた放射除け

2.2.3 計測期間

計測期間は 2016 年 7 月 25 日～2016 年 9 月 6 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。

2.3 気象データの計測結果

2.3.1 日射量データの解析

Figure2.2 に、本研究で使用了 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 3 機を「非遮光区」、北側に設置した 3 機を「中遮光区」、パネル直下の 1 機を「強遮光区」、設備外に設置した 1 機を「対象区」とする。

各計測地点における全天日射量の計測結果が Figure2.5 である。UNIT4 の計測機器に関してはデータの欠損が生じた。対象区で計測された日全天日射量の 2016 年 7 月 1 日～9 月 30 日までの平均値を 100%とすると、非遮光区は 82%～100%、中遮光区は 63%～74%、強遮光区は 49%～54%であった。これらの値は前年に観測した時よりも大きな値となっている。

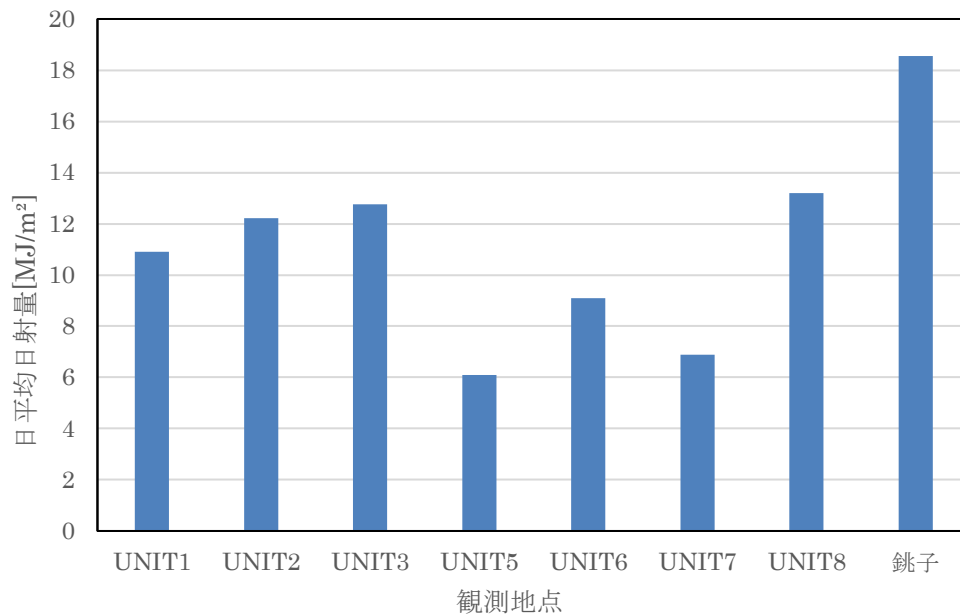


Figure2.5： 計測装置ならびに銚子市で観測された
平均日積算日射量[MJ/m²]

積算日射量を求める際に、計測結果が欠損していた期間があったため、同時期に気象台で観測された千葉県銚子市の全天日射量と日照時間、実証サイトがある酒々井に近い場所である佐倉市の日照時間を元にデータを補完した。実証サイト近くの佐倉市における日射量のデータは気象台などでの観測データが存在しなかったため、実証サイトでデータが取れている期間である 7 月 26 日～8 月 1 日、9 月 1 日～9 月 8 日の期間内のデータと同時期における千葉県銚子市、千葉県佐倉市のデータを比較し、日射量と日照時間に十分な相関があり、銚子と佐倉が同様な天候の場合 2 地点の日射量の比率は日照時間の比率に比例すると仮定した。データの補完を行うために用いた回帰分析のグラフを **Figure2.6** に示す。この関係式から欠損していた部分の対照区の日射量を算出してデータを補完した。

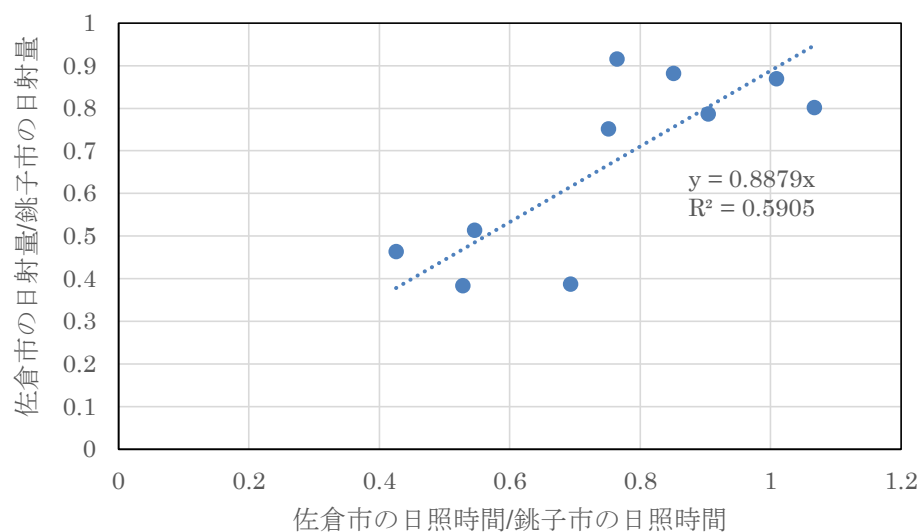


Figure2.6 積算日射量補完のための回帰分析

2.3.2 気温データ分析

計測した気温データのヒストグラムが Figure2.7 である。この結果を見ると、測定地点の遮光条件による気温データの差異はあまり見られない。気温条件が大きく異なるような地域間では水稻の収穫量にも顕著な差が生じることが知られているが、今回計測した気温条件の差は遮光条件の影響と比べると、収量に与える影響が比較的少ないと考えられる。したがって、本研究におけるシミュレーションに関しては気温条件の影響は特に考慮していない。

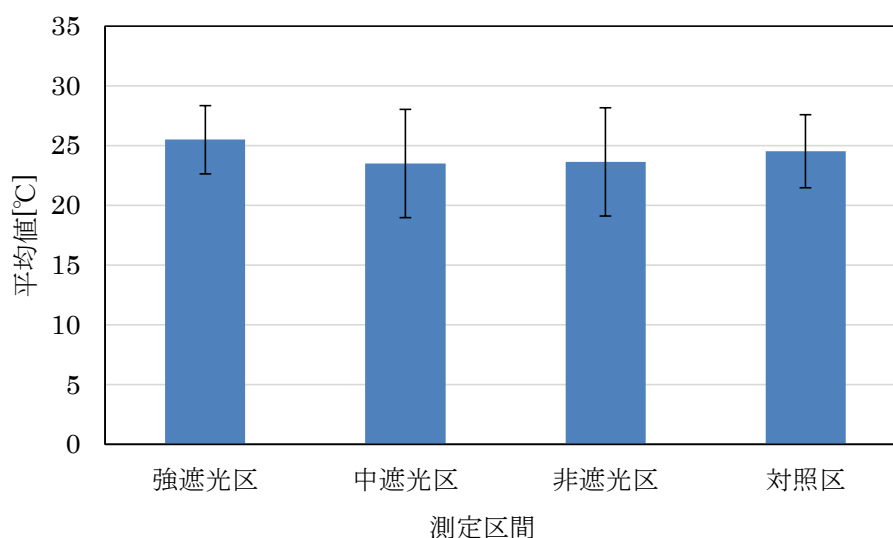


Figure2.7 各測定地点で計測した気温データ

2.4 水稻生育データの解析

2.4.1 水稻生育調査の概要

水稻生育調査を 2016 年 7 月 25 日、ならびに 2016 年 8 月 31 日に、計 2 回実施した。

1 回目の生育調査における調査項目は草丈、SPAD 値(葉緑素含量を示す値)、分けつ数の 3 項目である。SPAD 値は、1 株あたり健全な上位葉を 3 葉選び、SPAD-502Plus(コニカミノルタ)を用いて葉の中央部で 1 回計測し、計 3 回の計測の平均値を用いた。の 2 回目の調査は収穫と同じ日に実施したため既に出穂が完了していたので穂数を項目として加えた 4 項目に関して調査を実施した。1 回目、2 回目の調査とも非遮光区、中遮光区、強遮光区の 3 地点で各 9 サンプルずつ、計 27 サンプルの調査を行った。

2.4.2 水稻生育データの分析結果

水稻生育調査の結果を Table2.1 と Table2.2 に示す。

Table2.1 : 1 回目 (7/25) の水稻生育調査の結果

	全体 (n=10)		強遮光区(n=9)		中遮光区 (n=9)		非遮光区(n=9)		** p<0.01
									* p<0.05
	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	n.s. 有意差なし
草丈[cm/株]	107.2	5.2	109.5	5.5	107.1	6.1	104.9	3.2	n.s.
分けつ[本]	23.8	5.2	21.6	3.5	20.6	3.4	29.3	3.8	**
SPAD 値	36.3	2.4	36.3	2.2	37.3	2.3	35.2	2.4	n.s.

1 回目の調査では遮光条件の違いによる、草丈と SPAD 値に有意な差は見られなかった。一方で、分けつ数に関しては遮光が強くなるほど少なくなるという有意な差が生じていた。

2 回目の調査では草丈、分けつ、SPAD 値に関しては有意な差は見られなかったが、穂数に関しては遮光条件に対する有意な差が生じた。昨年の生育調査では、同様に穂数に関して有意差が認められたうえに SPAD 値に関しても有意な差が見られた。

Table2.2 : 2 回目 (8/31) の水稻生育調査の結果

	全体 (n=27)		中遮光区 (n=9)		非遮光区(n=9)		強遮光区 (n=9)		** p<0.01
									* p<0.05
	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	n.s. 有意差なし
草丈[cm/株]	117.4	5.1	115.8	4.8	116.2	3.1	120.2	5.9	n.s.
穂数[本/株]	16.6	4.93	15.6	4.3	19.8	4.8	14.3	3.9	*
分けつ[本]	19.2	5.2	17.2	5.1	20.4	5.3	20	4.6	n.s.

Table2.3 : 昨年 2 回目 (9/1) の水稻生育調査の結果(本間^[2.1])

	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
									* p<0.05
	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	n.s. 有意差なし
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	*

また以下 Figure2.8～Figure2.13 に示すのは気象データ測定期間すべての積算日射量と草丈、SPAD 値、分げつ数、有効分げつ数の関係をグラフにしたものである。有効分げつ数は「穂数/分げつ数」で定義している。

昨年の調査結果と共通しているのは日射量に対する穂数の有意差が見られた点である。昨年の生育調査では穂数の調査を行っていないこともあり穂数に関して確認した有意差の理由を生育初期の遮光条件が分げつ数を抑制し、最終的な穂数の減少につながるからだとしている。今年の 2 回目の生育調査の結果では最終的には分げつ数に関しては有意差が見られなかったということと先行研究の知見を考慮すると、生育初期の遮光条件が最終的な有効分げつ数に直接的に影響を及ぼしその結果穂数を減少させるものだと考えられる。

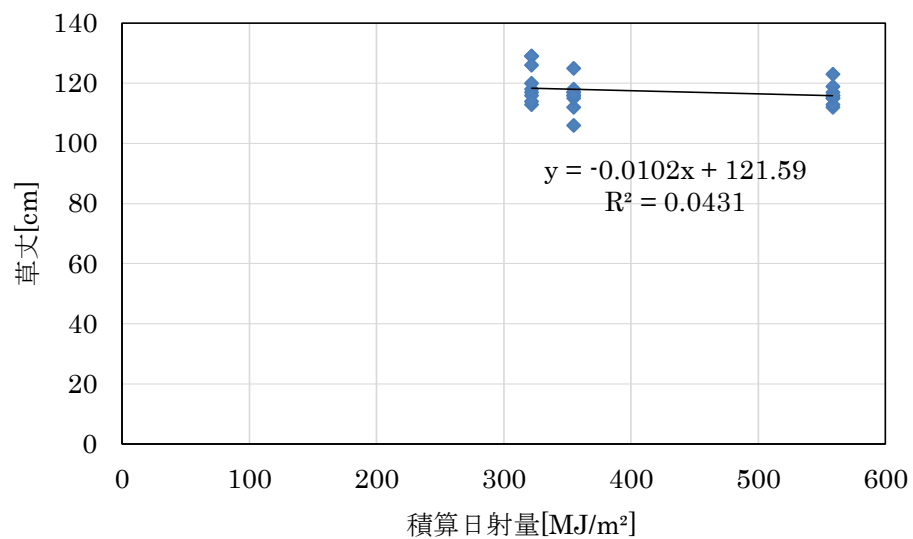


Figure2.8 積算日射量と草丈の関係

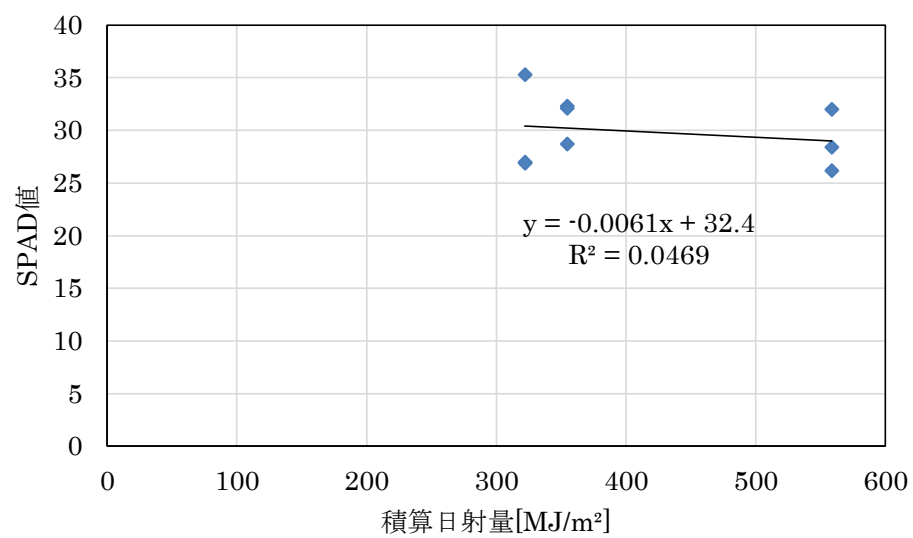


Figure2.9 積算日射量と SPAD 値の関係

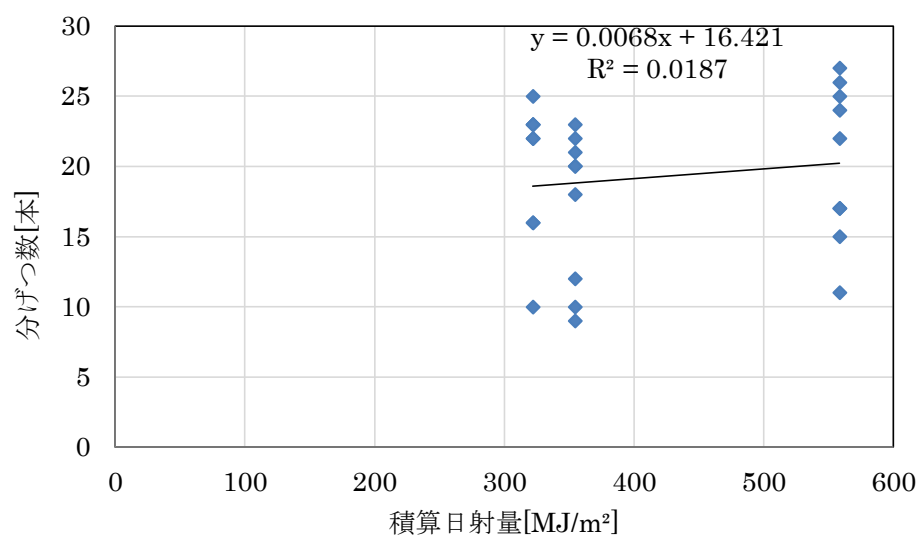


Figure2.10 積算日射量と分げつ数の関係

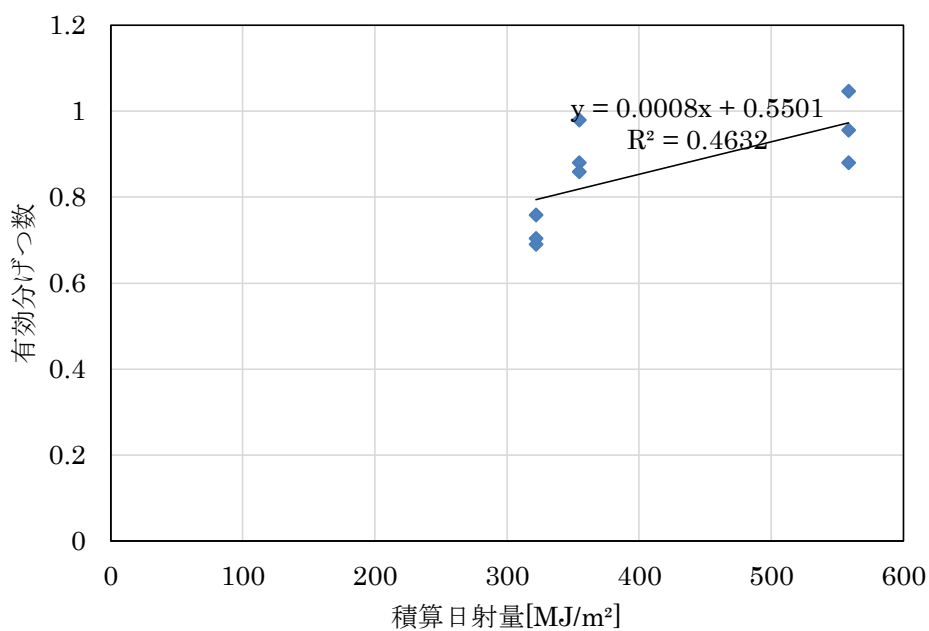


Figure2.11 積算日射量と有効分げつ数の関係

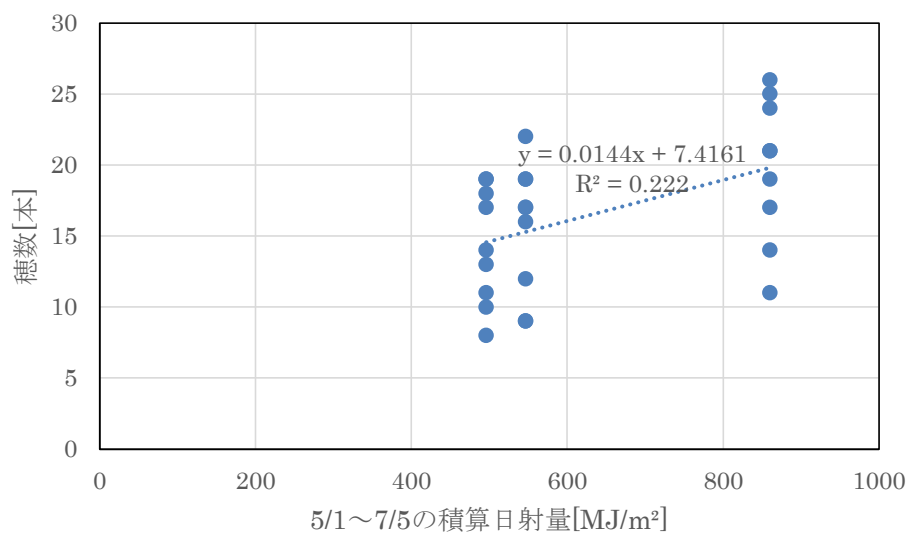


Figure2.12 移植日から登熟期までの積算日射量と穂数の関係

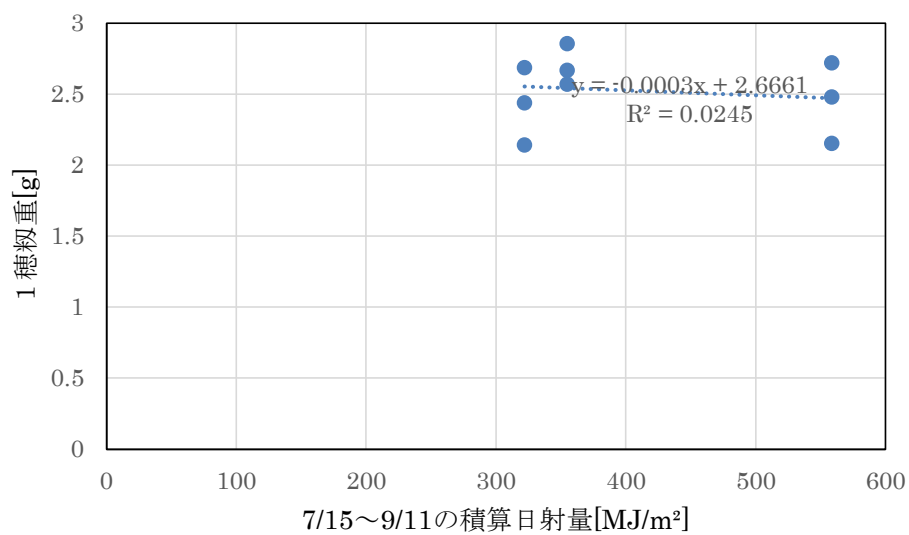


Figure2.13 登熟期からの積算日射量と穂数の関係

2.5 水稻品質分析

2.5.1 水稻外觀形質分析の概要

米の買取り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(8/31)の水稻生育調査で採取したサンプルの外觀形質分析を静岡製機株式会社に依頼した。同社が提供している「米総合分析サービス」の米粒外觀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、Table2.4とTable2.5で紹介する。

Table2.4：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^[2.2]

Table2.5：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^[2.2]

2.5.2 水稻外觀形質分析の結果

静岡製機株式会社に依頼した外觀形質分析の結果を Table2.6 に掲載する。また、Table2.6,Table2.7 において、サンプルを採取した場所を Figure2.14 のように定義して分析を依頼した。

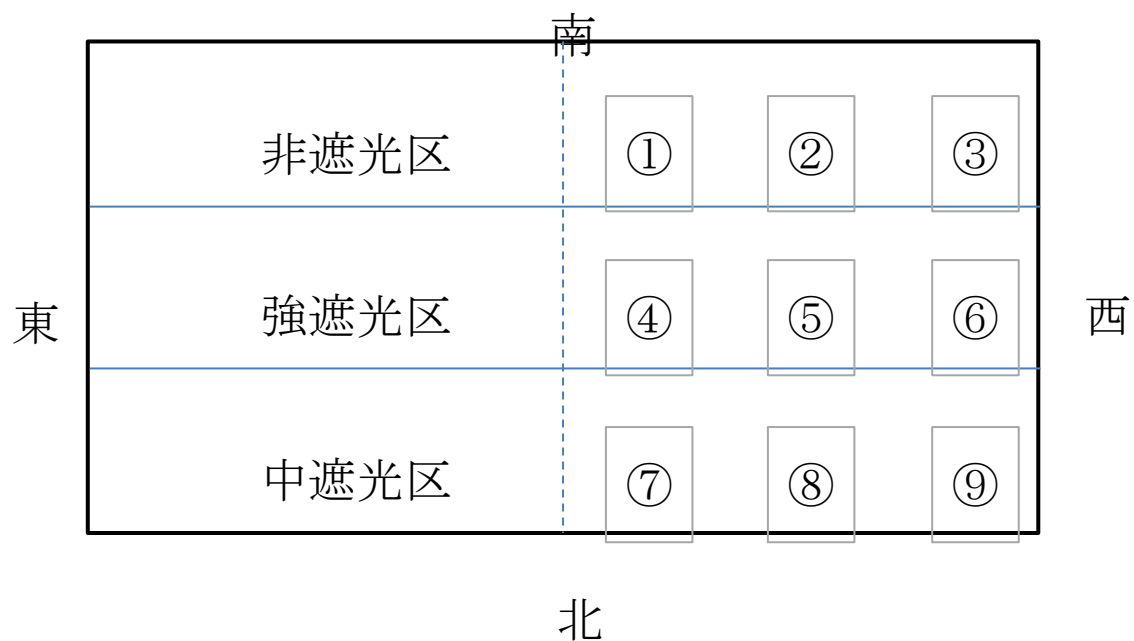


Figure2.14: サンプルの採取区分番号と遮光条件

Table2.6 米粒外觀形質分析結果

遮光	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
	非遮光	非遮光	非遮光	強遮光	強遮光	強遮光	中遮光	中遮光	中遮光
整粒[%]	67.7	64.5	65.1	31.9	29.3	51.7	63.4	54.7	62.7
整粒ランク	3	3	3	1	1	2	3	2	3
活青粒[%]	14	13.1	6.2	11.7	10.1	18.4	9.6	10.3	10
他整粒[%]	53.7	51.4	58.9	20.2	19.2	33.3	53.8	44.5	52.7
未熟粒[%]	29.4	30.8	31.1	57.3	63.1	45	32.2	39.9	33
未熟粒ランク	1	1	1	1	1	1	1	1	1
乳白粒[%]	2.6	1.2	0.9	1.1	0.9	0.8	2	2.2	2.2
青未熟[%]	11	16.1	13.7	47.8	50.9	34.6	15.5	24.3	16.9
基部[%]	2.4	1.2	0.9	0.9	1.2	1.1	1.9	2	0.6
腹白[%]	1.4	1.4	1.2	2.2	3	1	1.6	1.8	1.6
他未熟計[%]	12.1	10.9	14.4	5.4	7.1	7.6	11.2	9.6	11.7
やせ[%]	0.1	0.3	0.8	1	0.6	0.3	0.8	0.5	0.7
ねじれ[%]	1.4	0.4	1.8	0.5	0.5	0.2	1.2	0.4	0.8
粒揃い[%]	1	1.1	1.3	0.3	0.7	1.2	1.3	0.9	1
薄茶系[%]	0.6	0.2	0.8	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1
他未熟[%]	9.1	8.9	9.9	3.4	5	5.8	7.7	7.5	9.1
被害粒[%]	0.5	1.1	0.5	0.5	1	0.7	1	0.5	0.8

被害粒 ランク	5	5	5	5	5	5	5	5	5
発芽粒 [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
胴割粒 [%]	0	0.1	0	0	0.3	0.1	0.1	0	0.1
胴割粒 ランク	5	5	5	5	5	5	5	5	5
横一条 [%]	0	0	0	0	0.2	0.1	0	0	0
横二条 [%]	0	0.1	0	0	0.1	0	0.1	0	0.1
奇形粒 [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
茶米[%]	0	0	0.3	0	0.1	0.1	0	0.1	0
碎粒[%]	0.4	0.5	0.2	0.4	0.4	0.3	0.5	0.3	0.6
碎粒ラン ク	5	5	5	5	5	5	5	5	5
斑点粒 [%]	0.2	0.5	0.1	0.1	0.3	0.3	0.4	0.2	0.1
死米[%]	1.8	3.5	2.5	10.3	6.4	2.5	3.2	4.6	3
死米ラン ク	5	5	5	2	4	5	5	5	5
青死米 [%]	1.4	2.9	1.9	10.1	5.9	2.3	2.9	4.2	2.5
白死米 [%]	0.4	0.6	0.6	0.2	0.5	0.3	0.4	0.4	0.5
着色粒 [%]	0.6	0.1	0.8	0	0.2	0.1	0.2	0.3	0.5
着色粒 ランク	2	4	1	5	3	4	3	3	2
全面着 [%]	0	0	0.1	0	0	0	0	0.1	0
部分着 [%]	0.6	0.1	0.7	0	0.2	0.1	0.2	0.2	0.5
赤米[%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0

その他	32.4	35.4	35	68.1	70.5	48.3	36.5	45.4	37.2
[%]									
他被害	0.2	0.5	0.4	0.1	0.4	0.4	0.4	0.3	0.1
[%]									
外観格付	C	B	D	D	D	C	B	C	C
総合評価	C	B	D	D	D	C	B	C	C
ES測定粒数	1064	1054	1052	1052	1042	1062	1047	1043	1064

分析の結果から死米と未熟米(乳白米、基部未熟米、青未熟米)、それらの発生による整粒歩合は日射量に関して有意な差が確認できた。死米、未熟米は一般に売るために流通させることができないものである、農場における水稻栽培による収益に直接関わる。そこで死米、未熟米の発生割合と全天日射量データの関係に関して回帰分析を行った。Figure2.15 が 100g 中の玄米重量に占める死米重量の割合と 7/25～9/6 までの積算日射量の散布図、Figure2.16 が 100g の玄米重量に占める未熟米(乳白米、基部未熟米、青未熟米)の割合と 7/25～9/6 までの積算日射量の散布図である。また、死米、未熟米の遮光条件による有意な品質劣化は昨年の調査結果でも確認できているので Figure2.17 Figure2.18 に掲載する。

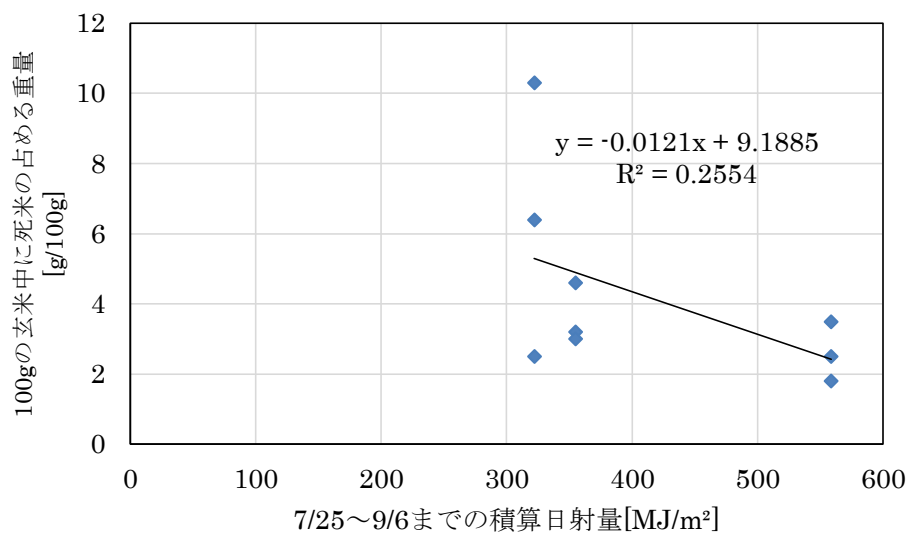


Figure2.15 死米発生割合と全天日射量の散布図

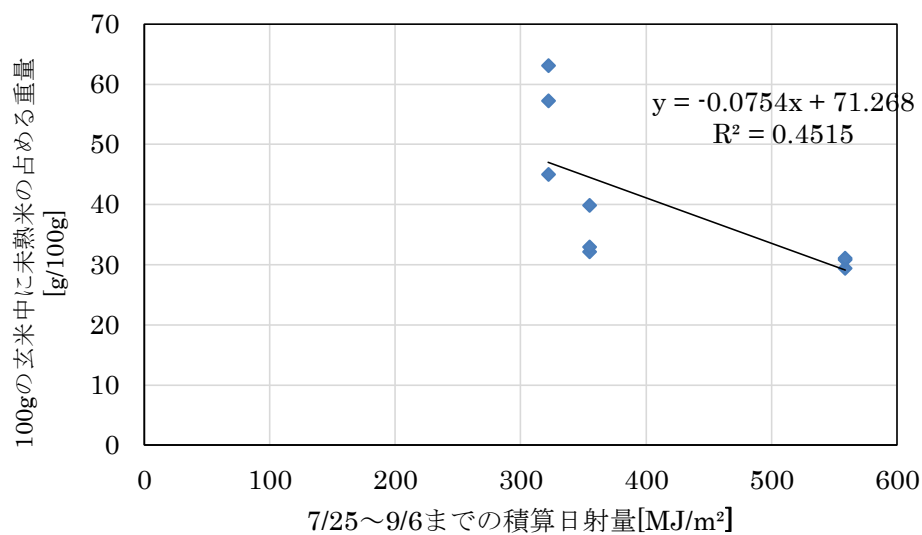


Figure2.16 未熟米発生割合と全天日射量の散布図

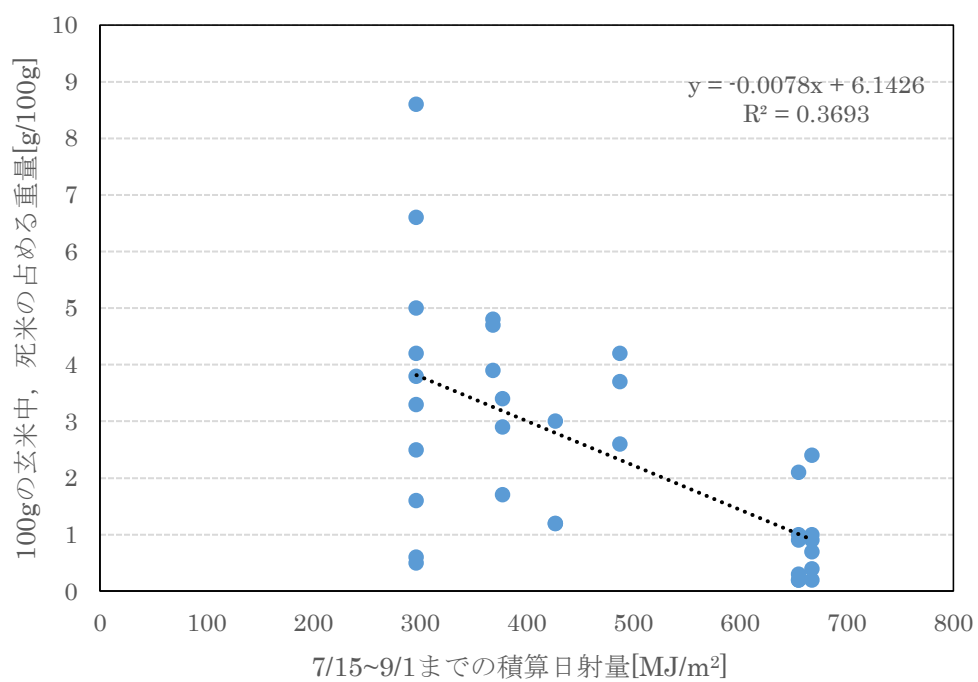


Figure2.17 昨年度死米発生割合と全天日射量の散布図
(本間^[2.1])

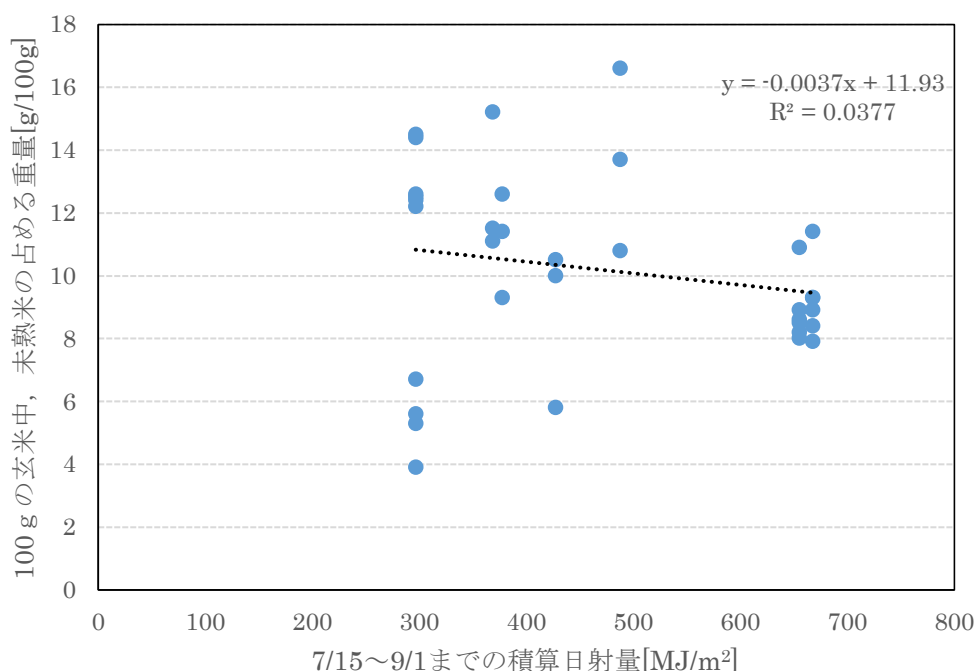


Figure2.18 昨年度未熟米発生割合と全天日射量の散布図
(本間^[2.1])

2.5.2 水稻成分分析

2.5.1 で米の買取価格は外観形質によって評価されると述べたが、外観形質のみが確保され一定以上の価格での販売が可能となったとしても、その米が人々においしいと認知され継続的に買ってもらえるかどうかは全くの別問題である。外観形質分析によって一定以上の流通価格が担保できるとしても、農業従事者は生産した米が食味の面でもしっかりした品質を確保できて人々に買ってもらえるような見通しが立たないことには本質的な解決には至らない。そこで本研究では、静岡製機株式会社に成分分析も依頼した。米の品質は外観形質以外にも水分の含有量や脂肪酸の含有量でも定められている。水分に関して農林水産省は農作物規格規程における 1 等米の基準を水分含有量 15%以下としている^[2.3]。またタンパク質の含有量が過度に多くなれば、「粘り」を低下させ「硬さ」が増加することによって全体的な食味が大きく低下することが分かっている^[2.4]。近年開発された「ゆめぴりか」は、高級ブランド米として注目を集めており、北海道では北海道庁や農業団体等で構成する「北海道米の新たなブランド形成協議会」が設立され、「北海道米の新たなブランド形成協議会」は米の品質管理、ブランド販売における暫定品質基準としてタンパク質の含有量を考慮している^[2.5]。

以上のような背景もあり、米の品質分析において成分分析は重要な項目であることがわかる。Table2.7 に今回静岡製機株式会社に依頼した成分分析の結果を掲載する。

Table2.7 米粒成分分析結果

遮光	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
	非遮光	非遮光	非遮光	強遮光	強遮光	強遮光	中遮光	中遮光	中遮光
水分	11.4	11.5	11.5	11.4	11.3	11.4	10.8	11.3	11.7
水分ラ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ンク									
タンパ	6.5	6.5	6.5	8.3	8	7	8.9	7.1	7.3
ク									
タンパ	4	4	4	2	3	4	2	3	3
クラ									
ンク									
アミロ	16	16.5	16	15.8	15.9	15.8	—	15.5	16.3
ース									
アミロ	4	4	4	4	4	4	—	4	4
ースラ									
ンク									
脂肪	12	10	11	17	17	12	15	13	12
酸度									
脂肪	4	4	4	3	3	4	4	4	4
酸度ラ									
ンク									
スコア	81	83	81	68	70	77	—	76	76
スコア									
ランク	4	4	4	2	3	3	—	3	3
食味									
格付	S	S	S	B	A	S	B	A	A

成分分析の結果、水分の含有量に関しては遮光条件に対して有意な差が見られなかった。また今回依頼したサンプルは農林水産省の定める 1 等米の基準を満たす結果となった。一方でタンパク質に関しては、遮光条件に対して有意な差が見られた。

以下、Figure2.19 から Figure2.21 に日射量と水分含有量、タンパク質含有量、成分分析の結果の総合点数に値するスコアの関係を表したグラフを掲載する。

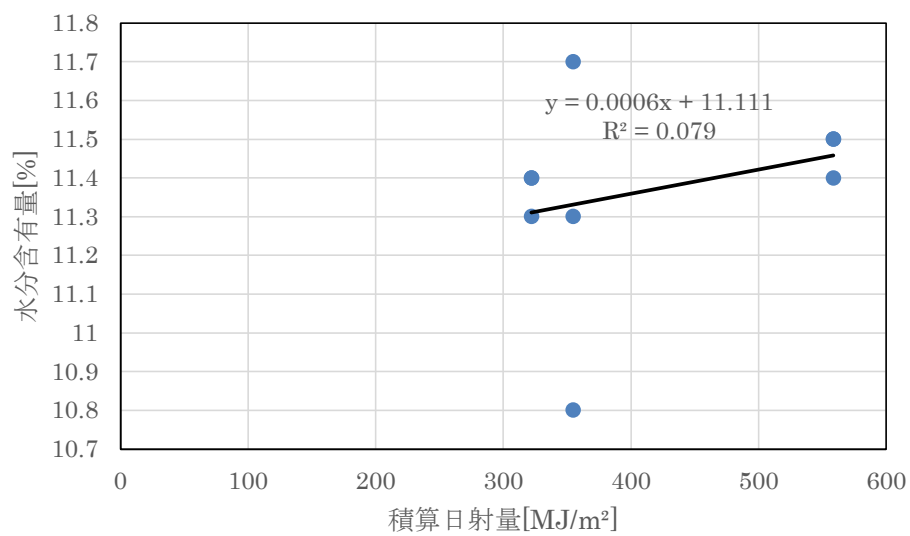


Figure2.19：日射量と米の水分含有量の関係

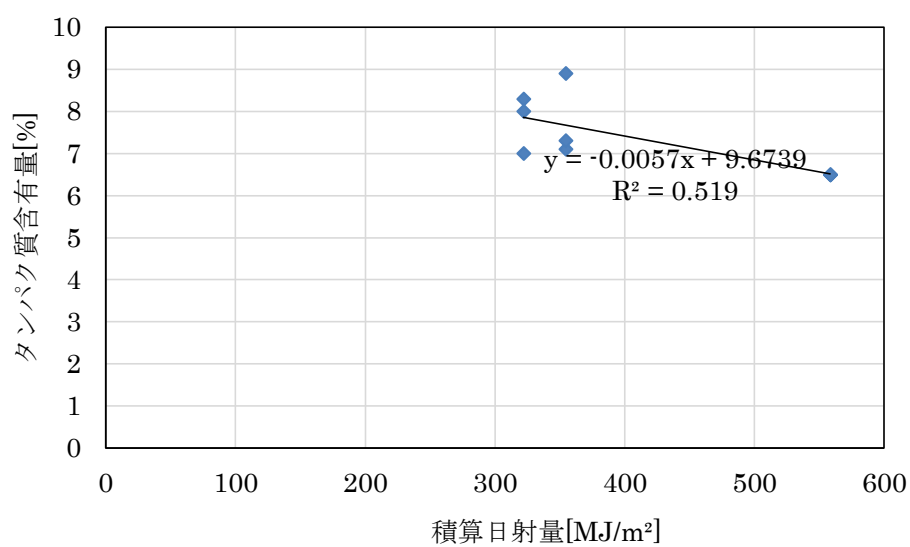


Figure2.20：日射量と米のタンパク質含有量の関係

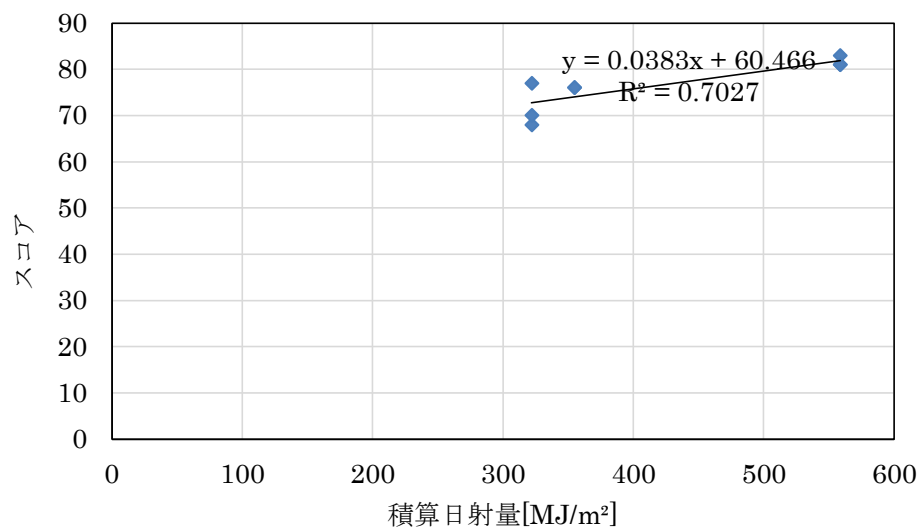


Figure2.21：日射量と米のスコアの関係

2.6 まとめ

太陽光パネル下の遮光条件のもとで成長した水稻は、減収に加えて不完全米(死米、未熟米等)の増加による有意な品質の劣化も生じていた。また、成分に関しても、食味を決定づける要因であるタンパク質の含有量に関しても遮光による有意な品質劣化が生じていた。減収に関しては穂数の減少の寄与が大きいため、水稻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ことが重要であると考えられる。

また本間^[2.1]は Figure2.22 のように収量の構成要因と日照条件の関係を表している。Figure2.22 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。また、水稻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と考えられる。

日照条件の改善策には谷ら^[2.6]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。

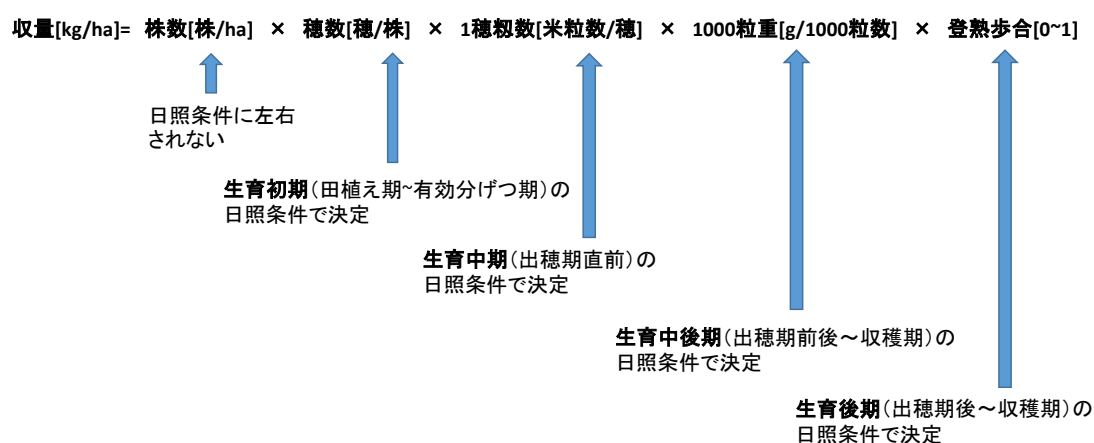


Figure2.22：水稻収量の構成要素と日照条件の関係(本間^[2.1])

この収量の定義から、収量予測において生育調査で得たデータのうち穂数や 1 穂粒重の日射量に対する変化を高い精度で掴むことができれば、全体の収量予測の精度も高くなることがわかる。

生育初期の積算日射量と穂数の関係を回帰分析した散布図 Figure2.19、Figure2.20 は、これらの日射量との関係式が次章で紹介する SIMRIW のモデルの改良に関係する。

Figure2.19 から、生育初期の積算日射量に対する穂数には有意な差が見られた。一方で、Figure2.20 で示されるように、生育中後期の積算日射量と 1 穂粒重の間には有意な関係性は見られなかった。

2.7 参考文献

- [2.1] 本間 優；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,2015
- [2.2] 農林水産省;玄米の検査規格,
http://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/kome/k_kikaku/
- [2.3] 農林水産省;米をめぐる参考資料
<http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/syokuryo/161128/attach/pdf/index-10.pdf>
- [2.4] 山形県農林水産部
<http://www.pref.yamagata.jp/ou/norinsuisan/>
- [2.5] 農林水産省;主要食糧の安定供給
<http://www.maff.go.jp/hokkaido/kikaku/zyousei/pdf/zenbun2.pdf>
- [2.6] 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.

3 営農型太陽光発電シミュレーション

3.1 SIMRIW と遮光条件

本章では太陽光パネルによる遮光環境下での生育結果を、水稻の作物モデルに適用し、栽培のシミュレーションを行うことで遮光による影響を評価する。作物モデルは Horie^[3.1]が開発し、水稻栽培のシミュレーションに広く用いられているモデル SIMRIW(Simulation Model for Rice-Weather Relation)を利用する。SIMRIW では、日々の気象データから水稻生育状況を逐次的に模倣することで、水稻収量を推定する。移植日から出穂日、収穫日という水稻の各生育ステージを DVI という指標で予測しながら、光合成による同化産物の重量を予測する。しかし SIMRIW は水稻生育を予測する代表的なモデルとしてよく知られているが、遮光の影響を前提としているモデルではないため、遮光による減収効果を再現できないという問題がある。遮光が水稻の各生育ステージに与える影響に関しては出穂・収穫日の遅延、1 株あたりの穂数の減少、1 穂あたりの稔実粒重の減少の 3 点が挙げられるが、これらに関して前章で算出したような実証データをもとにモデル式を一部補正する必要がある。3.2 および 3.3 で SIMRIW の概要および SIMRIW の補正に関して述べた後 3.4 以降で実際にシミュレーションを実行する。

3.2 SIMRIW の概要

本節では本間^[3.2]を引用して、SIMRIW の概要を述べる。収穫までの水稻の日々の生育段階を发育指数 DVI(Development Index)という指標で表現する。DVI は DVI=0 を種子の発芽日として、DVI=1 となる日を出穂日、DVI=2 を収穫日とみなし、移植日から i 日目の DVI は式(1)のように各日 j の发育速度 DVR(Development Ratio)の積算によって与えられる。DVR は式(2)～(5)で示されるように日平均気温 $T[^\circ\text{C}]$ と可照時間 $L[\text{h/day}]$ の関数で、生育の段階によって異なるモデルになっている。式(2)～(5)での各パラメータ ($G_v, A_t, T_h, DVI^*, B_L, L_c, k_r, T_{cr}, G_r$)は水稻の品種に依存する^[3.3]。

$$DVI(i) = \sum_{j=0}^i DVR(j) \quad (1)$$

$$DVR(j) = \frac{1}{G_v(1 + \exp[-A_t(T(j) - T_h)])} \quad ; DVI(i) < DVI^* \quad (2)$$

$$DVR(j) = \frac{1 - \exp[B_L(L(j) - L_c)]}{G_v(1 + \exp[-A_t(T(j) - T_h)])} \quad ; DVI^* \leq DVI(i) < 1 \quad (3)$$

$$DVR(j) = 0 \quad ; \quad L(j) < L_c \quad ; \quad DVI^* \leq DVI(i) < 1, \quad (4)$$

$$L(j) > L_c$$

$$DVR(j) = \frac{1 - \exp[-k_r(T(j) - T_{cr})]}{G_r} \quad ; \quad DVI(i) < DVI^* \quad (5)$$

各式のパラメータは以下の通りである。

- G_v : 発芽から出穂までに最低限必要な日数[day⁻¹]
- $A_t k_r$: 気温に対する感受性を示す定数[°C⁻¹]
- $T_h T_{cr}$: 気温の閾値を示す定数[°C]
- DVI^* : 水稻が日長感応性を持つ時期の境界の生育指数
- B_L : 可照時間に対する感受性を示す定数[h⁻¹day]
- L_c : 日長の閾値を示す定数[h]
- G_r : 登熟期の最低限必要な日数[day⁻¹]

次に DVI の各段階でのバイオマスの生産重量を算出するモデルについて述べる。水稻の根を含めた乾燥重量 DW(Dry Matter Weight)[g m⁻²]は式(6)、(7)のように日別のバイオマス量の増分 ΔDW [g m⁻² day⁻¹]を積算して得られる。

$$DW(i) = \sum_{j=0}^i \Delta DW(j) \quad (6)$$

$$\Delta DW(j) = Ss(j) Cs \quad (7)$$

ここで Ss は稲の葉群で吸収された日射エネルギー[MJ m⁻² day⁻¹]であり、式(8)のように生育日数 j により決定する。また Cs は光・乾物変換係数[g MJ⁻¹]である。

$$Ss(j) = S_0(j)(1 - S(j) - r(j)) \quad (8)$$

S_0 は日積算日射量[$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]、 r ならびに S は、葉面の反射量を表し、ともに単位面積あたりの葉面積の関数である。葉面積の計算式は省略するが、式(1)で与えられる $DVI(i)$ の関数となっており、葉面積が出穂日まで($0 \leq DVI < 1$)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知見が反映されている。

水稻の最終収量は子実形成過程における低温条件、あるいは高温条件にも依存する。すなわち、式(6)で推定されたバイオマス量のうち、粳が占める割合に相当する収穫指数 $h[0 \sim 1]$ を式(9)のように推定する。低温による減収の効果を h_c 、高温による減収の効果を h_H として、収穫指数 h はそれらの最小値を採用する。 h_c ならびに h_H はそれぞれ式(10),(11)のようになる。

$$h = \min(h_c, h_H) \quad (9)$$

$$h_c = h_m \gamma (1 - \gamma_c) \quad (10)$$

$$h_H = h_m (1 - \gamma_H) \quad (11)$$

ここで h_m は水稻の品種で決定される収穫指数の最大値である。また、 $1 - \gamma_c$ は低温条件により引き起こされる不稔率を表す。低温障害の度合い γ_c が出穂前後の時期($0.75 < DVI < 1.2$)における閾値以下の平均気温の積算地により決まるとい **Cooling Degree Days** の概念^[3,4]を用いたモデル化がされている。 $1 - \gamma_H$ は高温条件による不稔率を表し、開花前後の時期($0.96 < DVI < 1.22$)における平均日最高気温が閾値を超えると不稔率が大きくなる形になっている^[3,5]。 γ は低温下での受精不良による不稔率で、実際の収穫時における DVI の値が理想値($DVI=2$)と離れるほど不稔率が大きくなる形になっている。

以上より、収穫日 i のバイオマス量 $DW(i)$ に収穫指数 h を乗じることで水稻の収量の予測が可能となる。しかしここで予測した収量は完全な栽培条件を想定した場合の潜在的な収量であり、気象要素以外の要素（虫害や雑草害など）による減収効果は反映されていない。実収量と潜在収量との比率を表すパラメータである係数 τ を外生的に与えることによって、最終収量 Y を式(12)のように算出する。

$$Y = \tau \cdot h \cdot DW \quad (12)$$

3.3 SIMRIW の修正

移植日から出穂日までの遮光は、水稻の生育不良による出穂遅延を引き起こす。また出穂日から収穫日までの遮光は登熟遅延を引き起こすため、最終的には収穫日の遅延を生じさせる。本研究で実施するシミュレーションは、これらの減少をモデル内に反映させたうえで、3.2 で紹介したモデルに補正パラメータを乗じる。具体的には、移植日から出穂日までの遮光の影響を反映させるために、式(2)、(3)の分子に補正パラメータ α を、出穂日から収穫日までの遮光の影響を反映させるためには式(5)の分子に補正パラメータ β を乗じる。そうすることによって、出穂遅延および登熟遅延を式(13)～(15)のようにあらわす。

$$DVR(j) = \frac{\alpha}{G_v(1 + \exp[-A_t(T(j) - T_h)])} \quad ; DVI(i) < DVI^* \quad (13)$$

$$DVR(j) = \frac{\alpha(1 - \exp[B_L(L(j) - L_c)])}{G_v(1 + \exp[-A_t(T(j) - T_h)])} \quad ; DVI^* \leq DVI(i) < 1 \quad (14)$$

$$, L(j) < L_c$$

$$DVR(j) = \frac{\beta(1 - \exp[-k_r(T(j) - T_{cr})])}{G_r} \quad ; DVI(i) < DVI^* \quad (15)$$

移植日から収穫日まで、水稻の遮光影響による出穂遅延および登熟遅延に関する計測事例はわずかだが、先行研究から得たデータを Figure3.1、Figure3.2 を掲載する [3.6][3.7][3.8]。これらのデータを用いて、パラメータ α と β を式(16)、(17)のように定式化した。ここで z は遮光率で、非遮光時の全天日射量に対する、遮光によって減少した全天日射量の比率とする。

$$\alpha = 1 - 0.1236 z \quad (16)$$

$$\beta = 1 - (0.1751z^2 + 0.1212z) \quad (17)$$

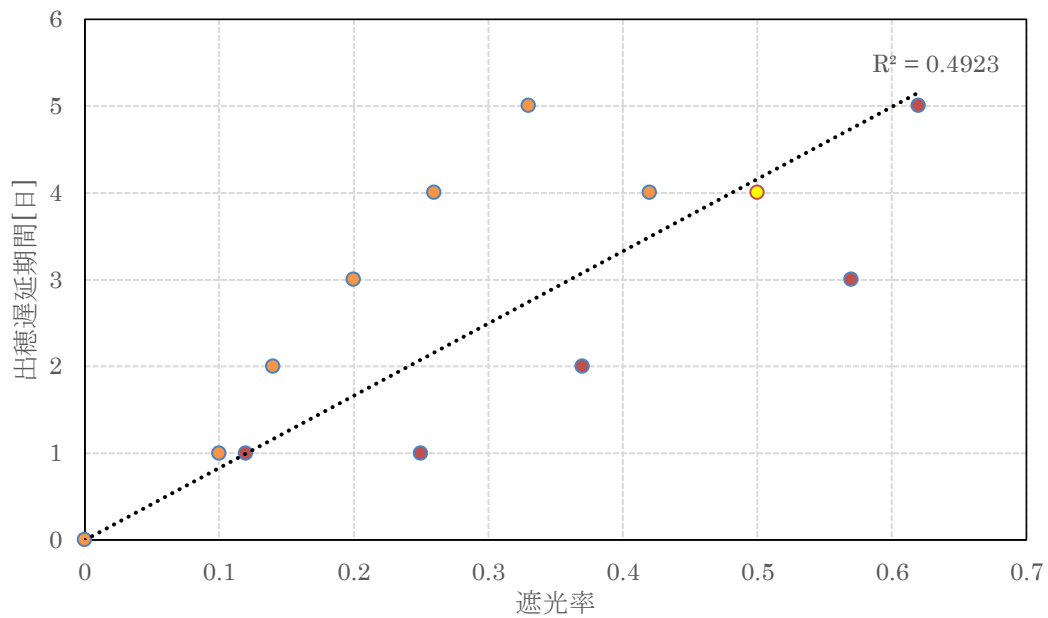


Figure3.1：移植から出穂まで遮光条件下に置いた
 水稻の出穂遅延期間データの合成図
 (緑；原田ら^[3.6], 赤；内田ら^[3.7], 黄；玉置ら^[3.8])
 (出典) 原田ら^[3.6], 内田ら^[3.7], 玉置ら^[3.8]

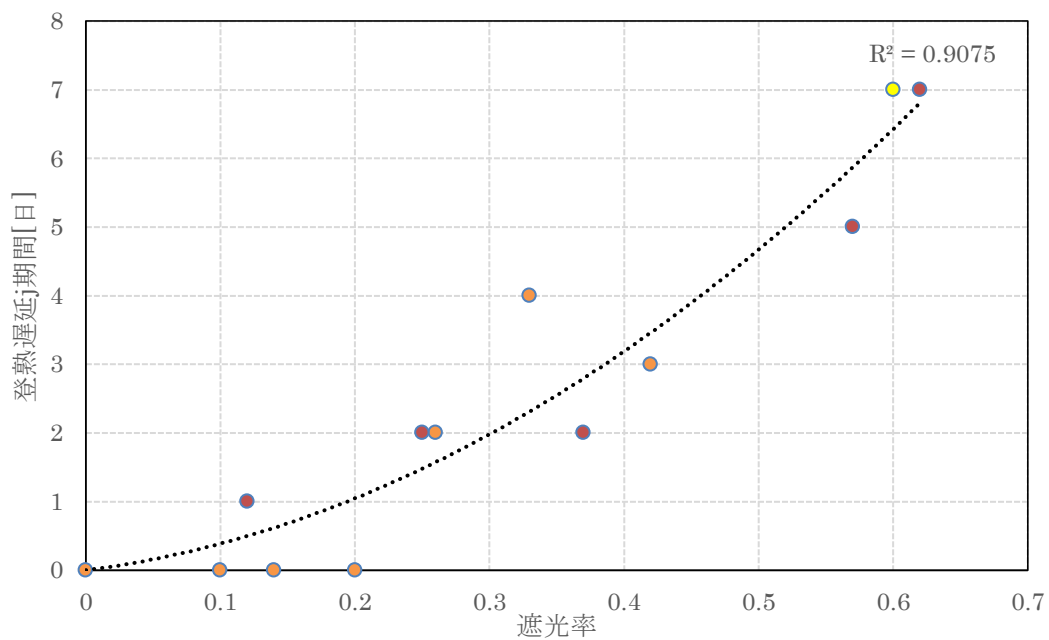


Figure3.2：出穂から収穫まで遮光条件下に置いた
 水稻の登熟遅延期間データの合成図
 (緑；原田ら^[3.6], 赤；内田ら^[3.7], 黄；若松ら^[3.8])

次に水稻の生育の各ステージにおける遮光の影響をモデルに反映させる手法について述

べる。

遮光による生育不良による分けつ発生の抑制が生じ、水稻の穂数が減少する。 SR を発芽から有効分けつ期($0 < DVI < 0.75$)までの積算日射量 $[MJ\ m^{-2}]$ とし、前章の実証実験の結果で得られた1株あたりの茎数 N_{eras} とあわせてプロットした結果がFigure3.3である。遮光下では、積算日射量が遮光率 z に応じて減少するため、茎数を式(18)のように推定する。式(19)は式(18)を用いて、遮光なしの茎数に対する遮光率 z での茎数の比を求めたものである。式(19)の $n_{eras}(z)$ を補正係数として、SIMRIWで得られた収量に乗じることで、遮光による収量の減少を表現する。

$$N_{ears}(z) = 0.0144 \cdot SR \cdot (1 - z) + 7.4161 \quad (18)$$

$$n_{ears}(z) = N_{ears}(z)/N_{ears}(0) \quad (19)$$

次に、遮光下での捨実不稔や登熟不良に起因する1穂あたり稈実粒重の減少を再現するための補正について述べる。 SR を穂揃期から収穫日($0.96 < DVI < 2.0$)までの積算日射量 $[MJ\ m^{-2}]$ とし、前章で得られた1穂あたりの稈実粒重 W_{ears} とあわせてプロットした結果がFigure3.4である。遮光下での1穂あたり稈実粒重を同様に式(20)のように推定する。式(21)は遮光なしの1穂あたり稈実粒重に対する遮光率 z での1穂あたり稈実粒重を求めたものである。

$$W_{ears}(z) = -0.0003 \cdot SR \cdot (1 - z) + 2.6661 \quad (20)$$

$$w_{ears}(z) = W_{ears}(z)/W_{ears}(0) \quad (21)$$

式(19)の穂数、式(21)の1穂あたり稈実粒重の補正係数を考慮し、式(12)を補正する形で、遮光率 z での収量 $Y(z)$ を式(22)のように表す。

$$Y(z) = \tau \cdot h \cdot DW \cdot n_{ears}(z) \cdot w_{ears}(z) \quad (22)$$

以上の補正を加えたモデルを用いて、移植日から収穫日までの各日の気象データから逐次的に生育過程を再現することで、水稻収穫時($DVI=2$)の収量を算出することができる。

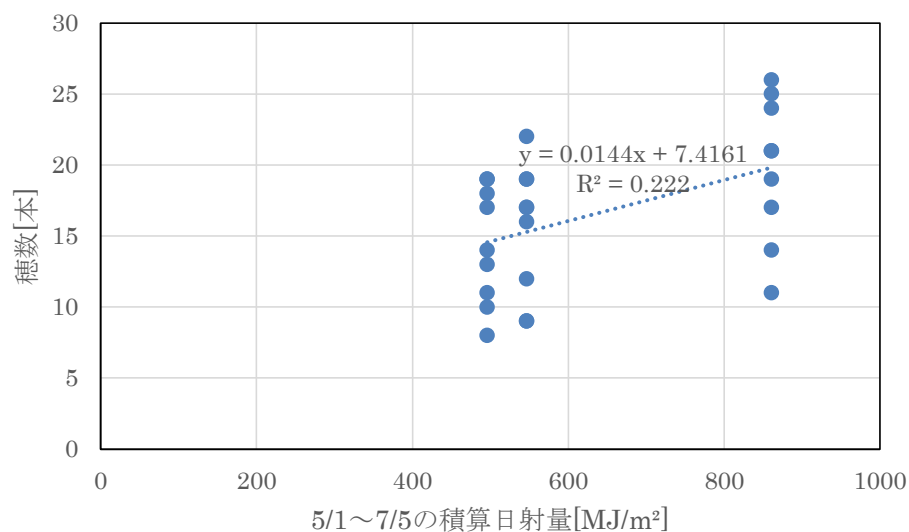


Figure3.3： 本調査での有効分げつ期の積算日射量と茎数

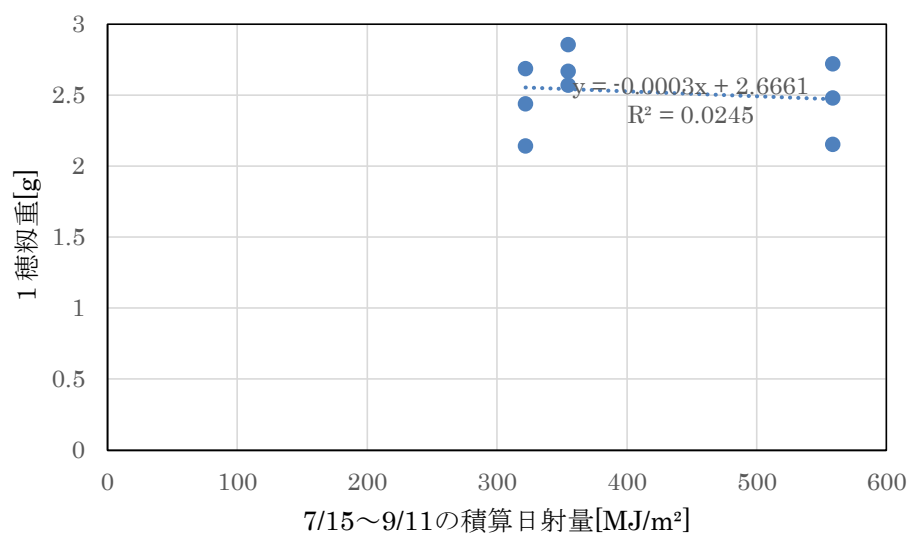


Figure3.4： 本調査での登熟期の積算日射量と 1穂あたり稔実実重

3.4 水稻の収量予測シミュレーション

3.4.1 日射量に対する減収ならびに品質劣化の検証

前節のように実証実験の結果をシミュレーションモデルに反映させ実行した結果について述べる。この節では、「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」として定義されるパネルの投影率と、それに対する水稻の収量および整粒歩合の関係について示す。

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 Figure3.5 である。ここでは 1980 年から 2013 年までの 34 年間に予測した各年の収量推定値と標準偏差を描画している。また、同様のシミュレーションを昨年までのデータを行った結果を Figure3.6 に掲載する。

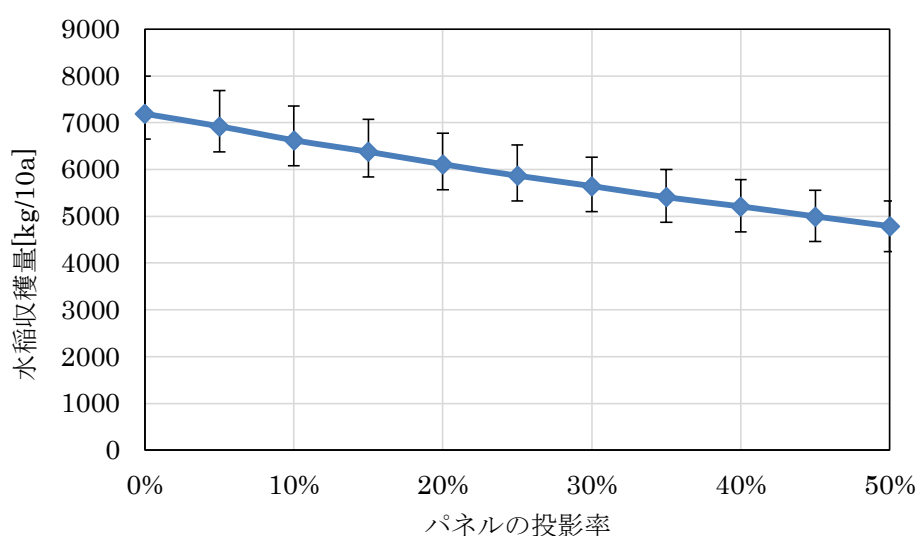


Figure3.5：太陽光パネルの投影率に対する水稻収量

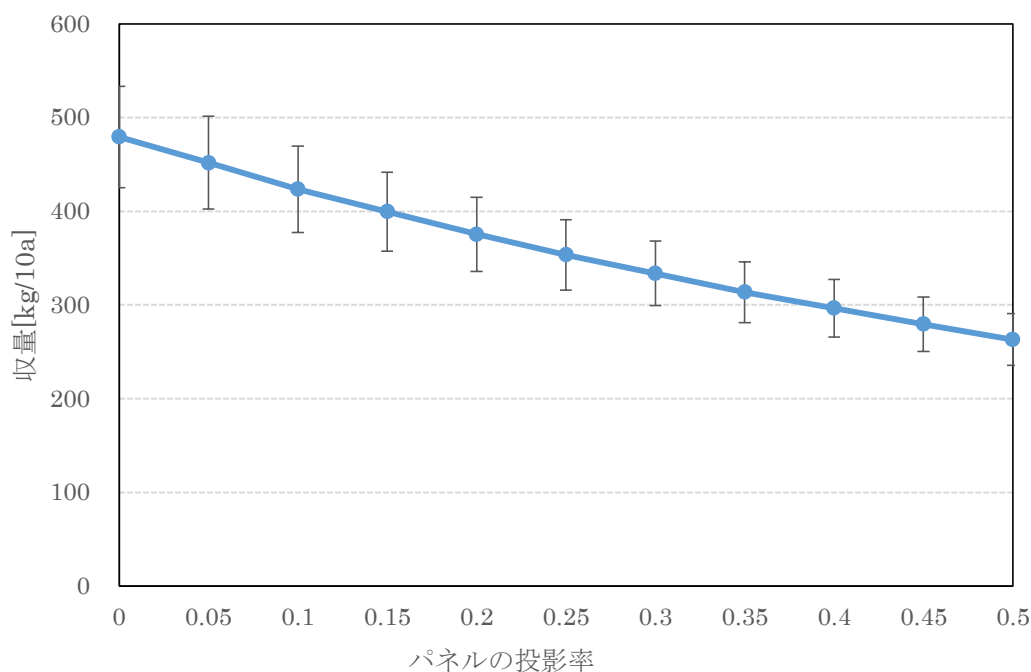


Figure3.6： 太陽光パネルの投影率に対する水稻収量（昨年のモデル）
（出典）本間^[3.9]

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は「営農型太陽光発電設備設置前と比較して収量が 8 割以上であり、かつ著しい品質の劣化が生じていない」と規定されている。昨年の結果では、約 20%の投影率で収量が 20%ほど減少していた。一方、今年のシミュレーション結果では、25%の投影率でも収量 8 割以上を確保できていた。今年の結果から検討するならば、水稻を対象とした営農型太陽光発電において、投影率 25%の設備を設置したとしても収量の観点では農林水産省の定めた規定はクリアできると言える。

またシミュレーションにより推定した、各投影率に応じた整粒歩合を表したグラフが **Figure3.7** である。ここでも同様に 1980 年から 2013 年までの 34 年間について予測した各年の整粒歩合推定値の平均と標準偏差を描画している。

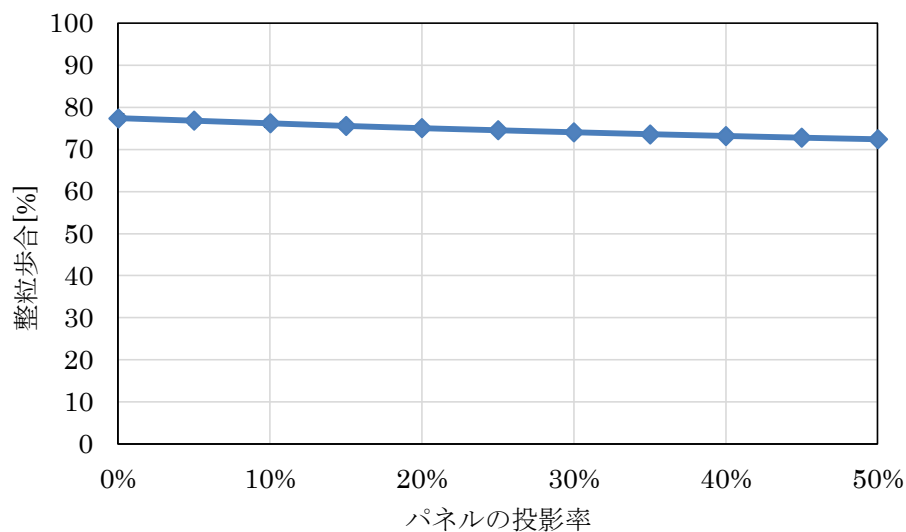


Figure3.7：太陽光パネルの投影率に対する整粒歩合

整粒歩合は水稻の品質を評価する際に非常に重要な要素である。農林水産省は整粒歩合 70%以上のもののみを 1 等米として認めると公表している。シミュレーション結果では、投影率に応じて整粒歩合は徐々に減少していくものの、遮光率 50%の条件でも 1 等米の条件である整粒歩合 70%という条件はクリアしていた。しかし、整粒歩合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を反映できていない。水稻品質は、全天日射量以外にも施肥や土壌条件など他にも様々な要因によって決定されるため、本シミュレーションは暫定的な推定値であることに留意する必要がある。

3.5 営農型発電のシミュレーション

3.5.1 各種設定

太陽光発電の発電量のモデルに関しては、式(23)のように与える。

$$P = \frac{R}{G} \cdot C \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \quad (23)$$

P [kW]：発電出力

R [kW m⁻²]：傾斜面日射量

G [kW m⁻²]：日射強度(=1.0)

C [kW]：発電設備容量

a_1 [-]：温度補正係数

a_2 [-]：パワコン運転効率

a_3 [-]：その他のシステム損失係数

本シミュレーションでは、太陽光発電の高さは、農機具の使用を妨げない 3m と想定し、太陽光パネルが偏りなく設置されていると想定した。また発電量の最大化を図るために方位は 0°]として、太陽光パネルの設置角度は 30°]と設定する。各種パラメータは好井^[3.10]と北風^[3.11]らを参考にし Table3.1 のように仮定した。

水稻の栽培品種はコシヒカリとする。SIMRIW の初期入力データとして、移植日は 5 月 5 日と設定し DVI の初期日(移植日)を 0.2、バイオマス量の初期値は 10a あたり 18[kg]とする。また、SIMRIW の計算に必要な固有パラメータの各種初期値は Horie^[3.1]と各種資料^{[3.10][3.11]}に基づいて設定した。地域は茨城県つくば市とし、気象庁が公表している各日の気象データ（日最低気温、日平均気温、日最高気温、日平均全天日射量、日照時間）を 1980 年から 2013 年までの 34 年間分利用した。また、耐用年数や、設備費用、売電価格に関しては、シミュレーションを実施するにあたって固定せずに値を変えて各々のパターンでの結果を算出した。

Table3.1 太陽光発電に関するパラメータ

耐用年数[年]	20
傾斜角[°]	30
方位角[°]	0
温度損失率[%]	
12-3 月	10
4-5 月	15
6-9 月	20
10-11 月	15
パワコン運転損失[%]	5
システム損失[%]	14
kW あたりのパネル面積[m ² kW ⁻¹]	8
費用関係	
設備費用[万円 kW ⁻¹]	33.4
売電価格[円 kWh ⁻¹]	21
金利[%]	3

3.5.2 営農型太陽光発電の経済性の検討

本シミュレーションでは、営農型太陽光発電における水稻栽培と売電による総合的な経済性について検討する。ここでは水稻の栽培面積は 15ha と仮定してシミュレーションを行う。営農型太陽光発電全体の収益性を考えるにあたって、収入となる要素としては、水稻売上および売電売上が存在する。また支出としては、水稻栽培に関する支出と太陽光発電に関する支出が存在する。本シミュレーションでは、主に太陽光発電に関する支出額および売上の変化に対する営農型太陽光発電全体の収益性の検討に焦点を当てた。つまり Table3.1 における耐用年数、設備費用、売電価格の変動とそれに伴う営農型太陽光発電全体の収益を検討する。

3.5.2.1 遮光率変動に対する経済性

作付面積 15ha を仮定し、1 等米の買取価格を 60kg あたり 1.5 万円、生産費用を 10a あたり 12.5 万円、また太陽光発電に関する設定を Table3.1 のように設定している。売電単価は 21 円/kWh と設定した。Figure3.8 に売上額の経済性を示す。また、総売上額の 34 年間

での変動係数(標準偏差/平均値)を Figure3.9 に示す。

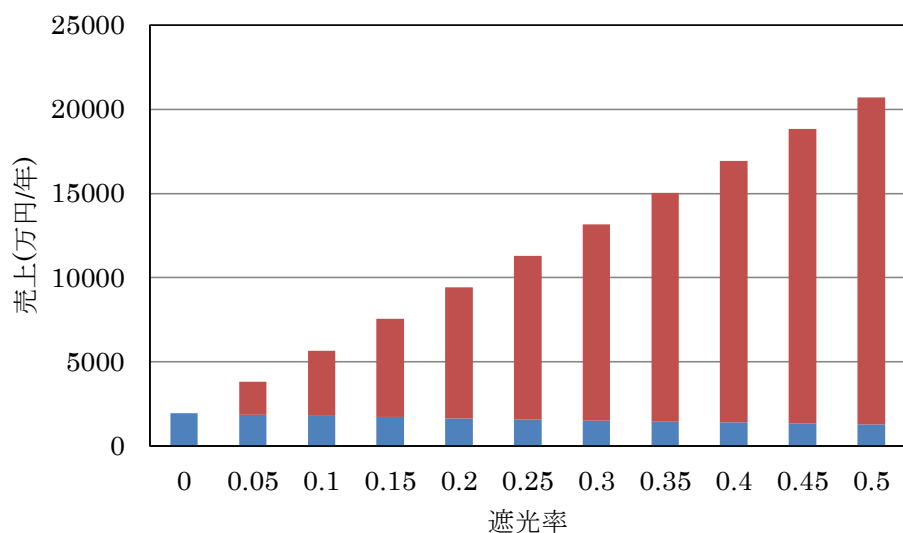


Figure3.8 : 15ha の作付面積での売上の推定値

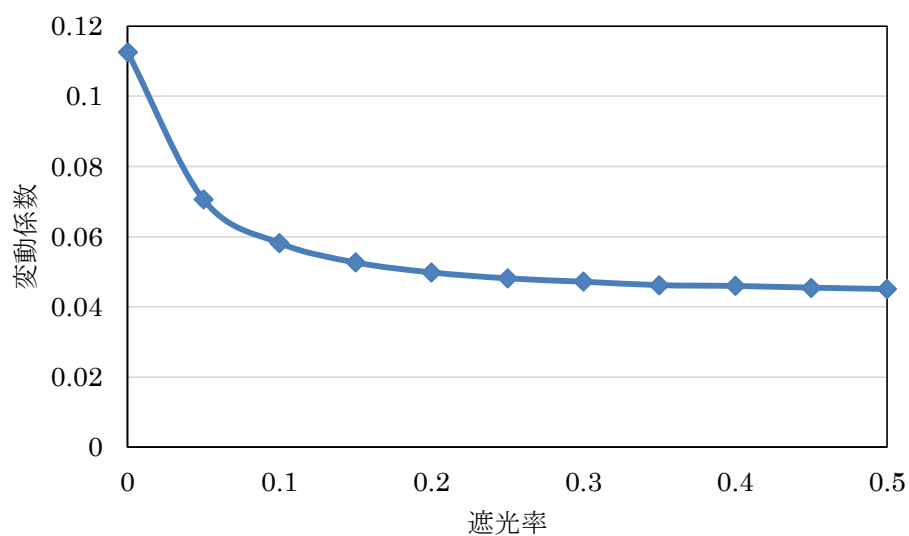


Figure3.9 : 15ha の作付面積での総売上の変動係数

パネルの増加とともに売電収入が増加するが、総売上額の変動係数は徐々に減少する。これは水稻収量[kg/年]の変動係数に比べて発電量[kWh/年]の変動係数が小さく、売電売上の不確実性がより小さいためである。

3.5.2.2 買い取り価格の変動効果

太陽光発電における売電価格は、年々低下している。2014 年時点では 32 円/kWh で取引されていたが、2017 年は 21 円/kWh で取引されることが最近発表された。

Figure3.10 は売電価格の推移を表したグラフである^[3.12]。売電価格は年々大きく変化している要素であるため、営農型太陽光発電全体の収益性を検討するためには、買い取り価格の変動効果は是非シミュレーションによって求めておきたいところである。

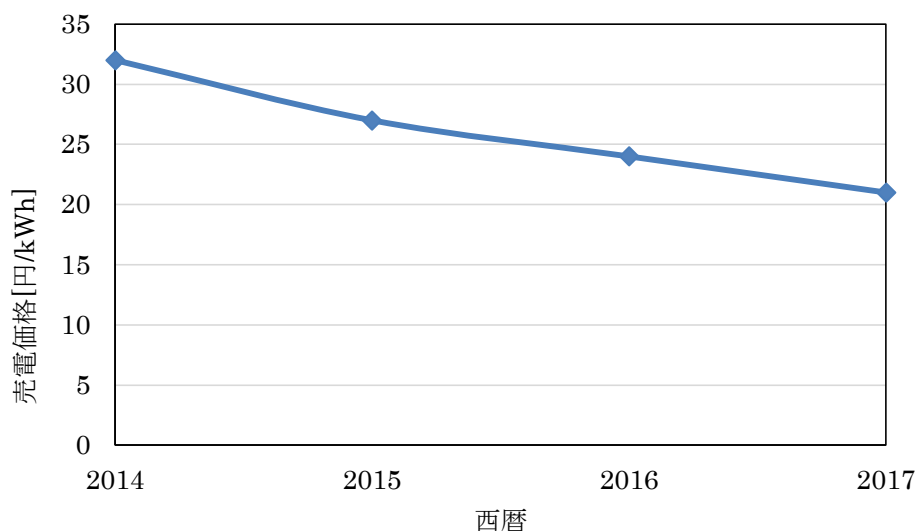


Figure3.10: 2014~2017 売電価格の推移
(経済産業省 エネルギー資源庁^[3.12])

次に、売上額から栽培費用や発電設備の年間償却費を差し引いた年間の収益を Figure3.11 に示す。太陽光パネルを設置せず発電を行わない場合(遮光率 0)に加えて、遮光率 20%で売電価格が 21 円/kWh の場合、24 円/kWh の場合、27 円/kWh の場合について描画した。

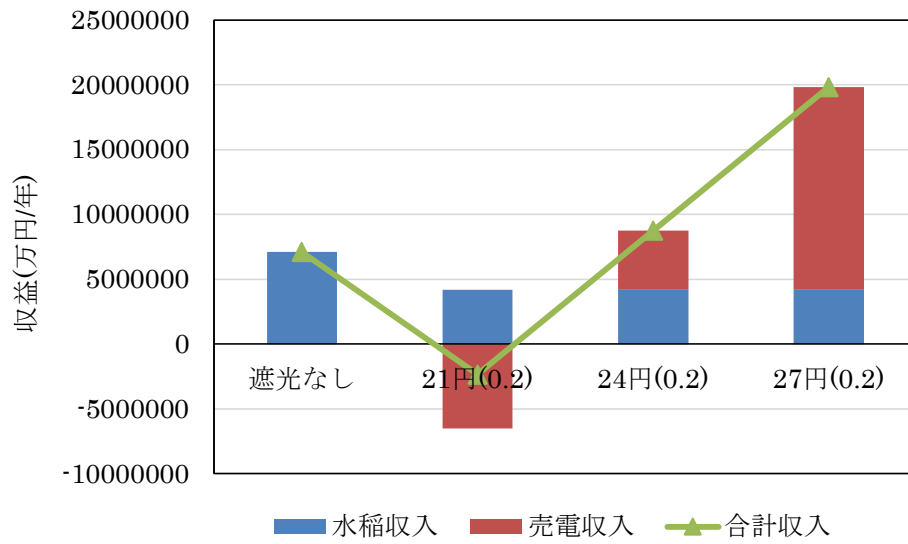


Figure3.11： 売電価格の変動に対する収益の変化

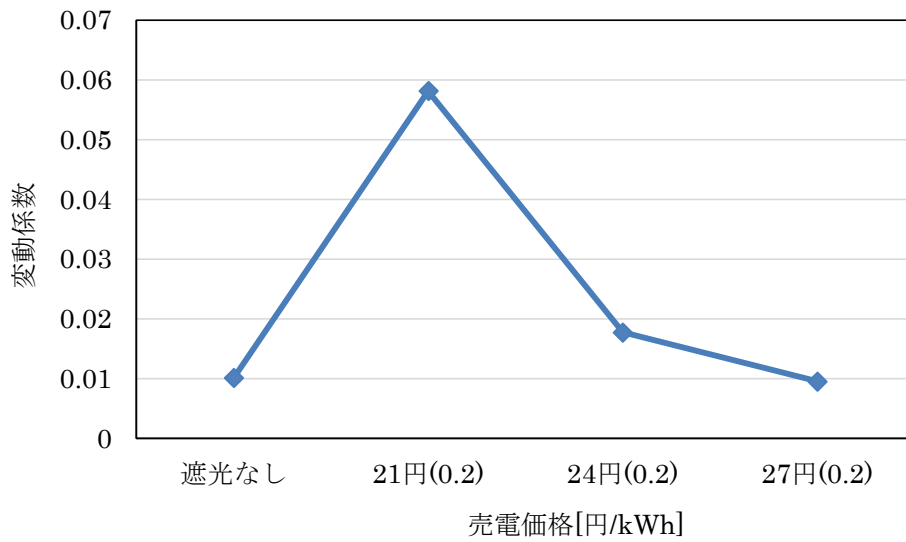


Figure3.12： 収益の売電価格に対する感度

Figure3.9 から読み取れるように、太陽光発電を導入しない場合に比べて太陽光発電設備

導入後は水稲収益が減少する。また売電価格が 21 円/kWh の場合は太陽光発電設備を導入すると赤字になるという結果になった。売電価格が 24 円/kWh, 27 円/kWh と高くなるにつれて、営農型太陽光発電設備全体の収益は増加していく。一方で変動係数は異なる変化を示す。例えば売電価格が 21 円/kWh の場合、発電設備の導入および発電規模の増加に伴って売上と費用の双方が増加することによって、標準偏差は増加する一方で、収益の平均値の変化の絶対値は変わらないからである。変動係数はデータ群の不確実性に大きく関わる。例えば、売電価 27 円/kWh の場合、合計収益は売電価格の収益に大きく影響を受けるものの、変動係数が小さく安定した収益が望めるような条件だと言える。このように、売電価格は営農型発電の期待収益に関係するだけでなく、営農型発電全体の収益の不確実性にも大きな影響を与える要素になっている。

3.5.2.3 設備費用の変動の影響

前節では売電価格の変動に対する営農型太陽光発電全体の収益の感度について述べたが、合計収益を決定する要素には売電価格以外にも設備費用や太陽光パネルの寿命などコスト面に関わる要素が挙げられる。本節では、これらの要素の変動が営農型太陽光発電設備全体の収益に与える影響について考察する。

Figure3.13 は売電価格が 21 円/kWh で設備費用が 33.4[万円 kW⁻¹]の場合の各遮光率に対する収益の変動を描画したものである。この条件の場合、太陽光発電設備の規模が大きくなるほど収益は減少する。Figure3.14 は売電価格が 21 円/kWh で設備費用が 30[万円 kW⁻¹]の場合の各遮光率に対する収益の変動を描画したものである。設備費用が 30[万円 kW⁻¹]に下がってもなお営農型太陽光発電全体の収益性は、発電設備を設置する前に比べて悪化するという結果になった。

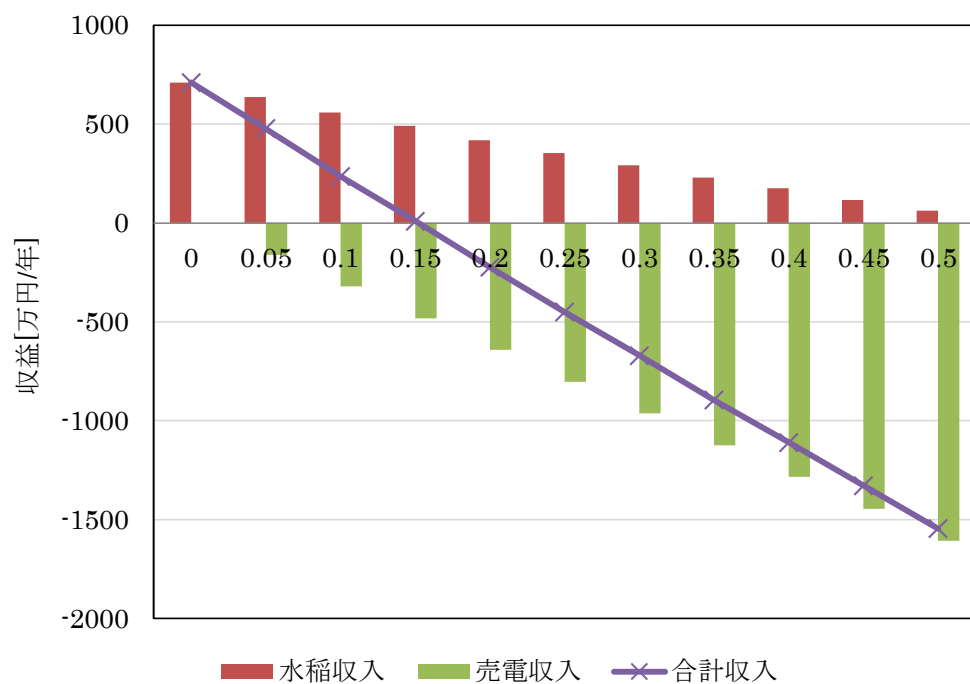


Figure3.13：遮光率に対する年間収益の推定値
(売電価格 21 円[円/kWh],設備費用 33.4[万円 kW⁻¹])

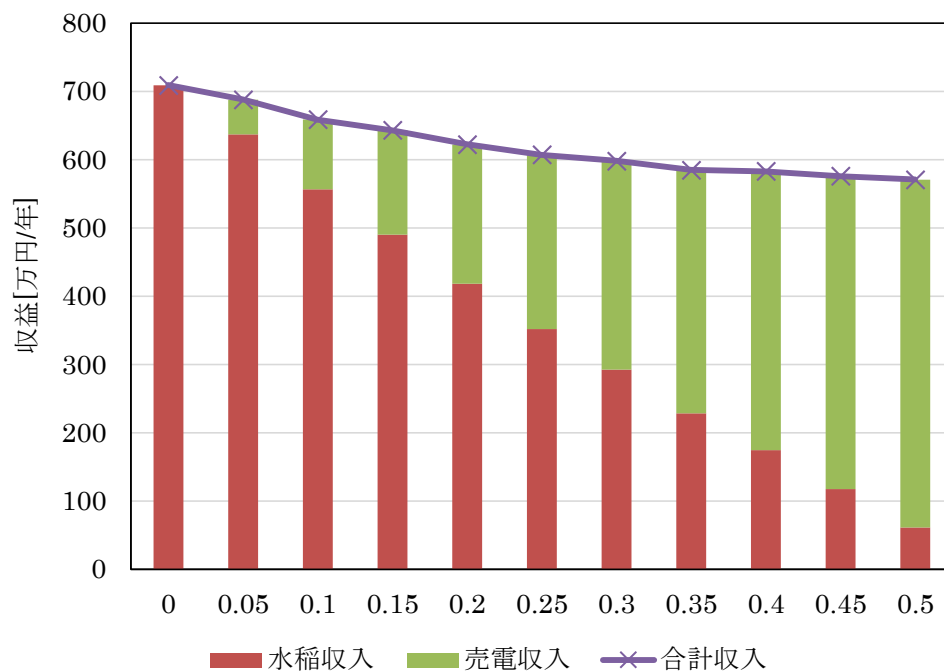


Figure3.14：遮光率に対する年間収益の推定値
(売電価格 21 円[円/kWh],設備費用 30[万円 kW⁻¹])

次に、発電設備の耐用年数の変動が設備全体の収益に与える影響について考察する。

Figure3.15 は売電価格 21 円[円/kWh]，耐用年数 20[年]，設備費用 33.4[万円 kW⁻¹]の場合における各遮光率に対する収益の変動を描画したものである。

Figure3.16 は売電価格 21 円[円/kWh]，耐用年数 25[年]，設備費用 33.4[万円 kW⁻¹] の場合における各遮光率に対する収益の変動を描画したものである。

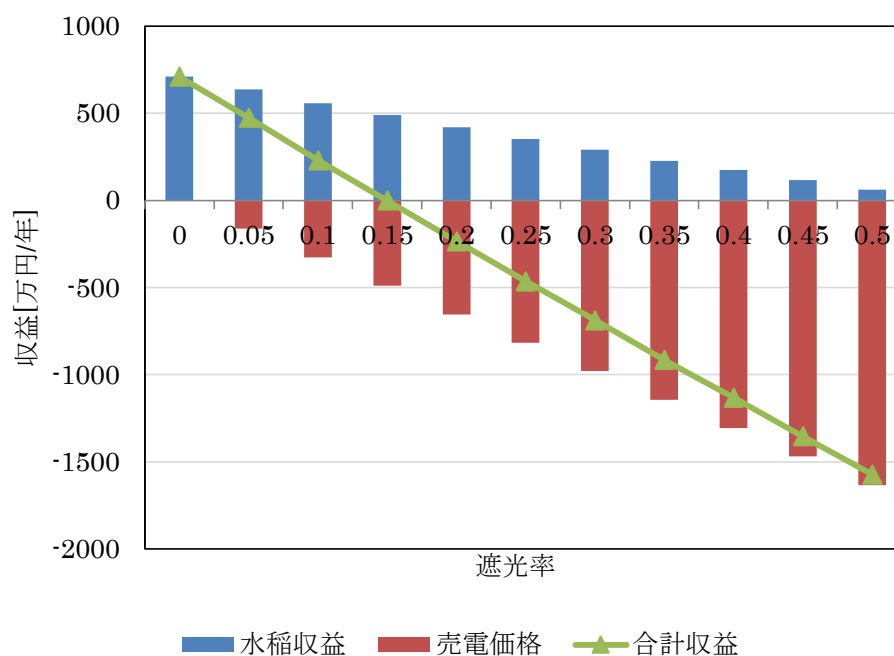


Figure3.15： 遮光率に対する年間収益の推定値
(売電価格 21 円[円/kWh],耐用年数 20[年],設備費用 33.4[万円 kW⁻¹])

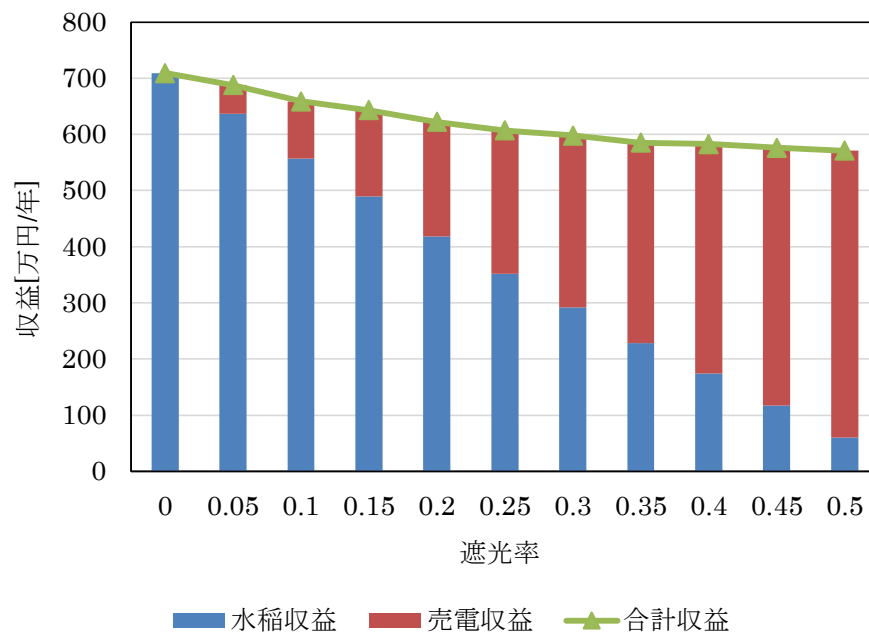


Figure3.16：遮光率に対する年間収益の推定値
(売電価格 21 円[円/kWh],耐用年数 25[年],設備費用 33.4[万円 kW⁻¹])

以上のから、売電価格が 21 円/kWh の場合では、パネルの価格の低下や、パネルの耐用年数の改善だけでは営農型太陽光発電全体の経済性は低下するという結果が算出された。

以下に、売電価格が 24 円/kWh でパネル価格 33.4[万円 kW⁻¹], 30[万円 kW⁻¹]の場合の収益性ならびに売電価格が 27 円/kWh でパネル価格 33.4[万円 kW⁻¹], 30[万円 kW⁻¹]の場合の収益性を Figure3.17 から Figure3.20 に示す。

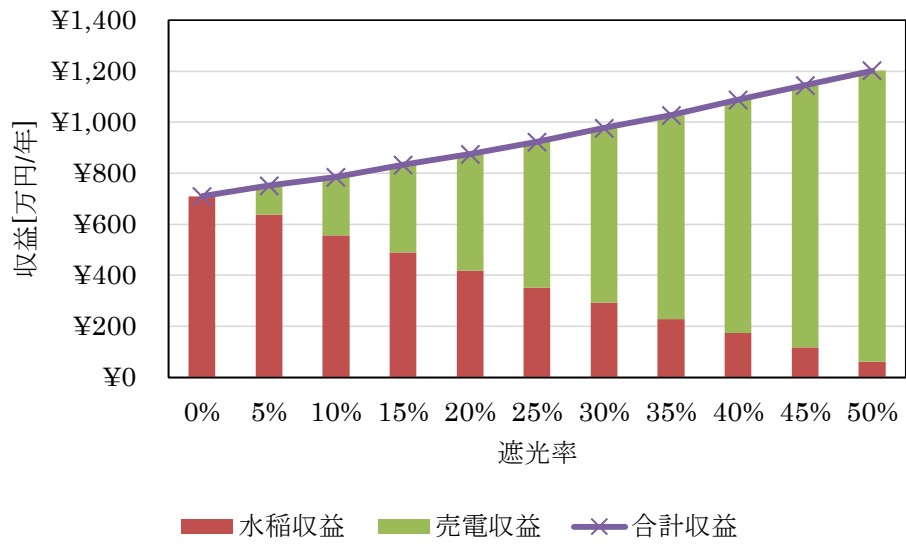


Figure3.17: 遮光率に対する年間収益の推定値
(売電価格 24 円[円/kWh],耐用年数 20[年],設備費用 33.4[万円 kW⁻¹])

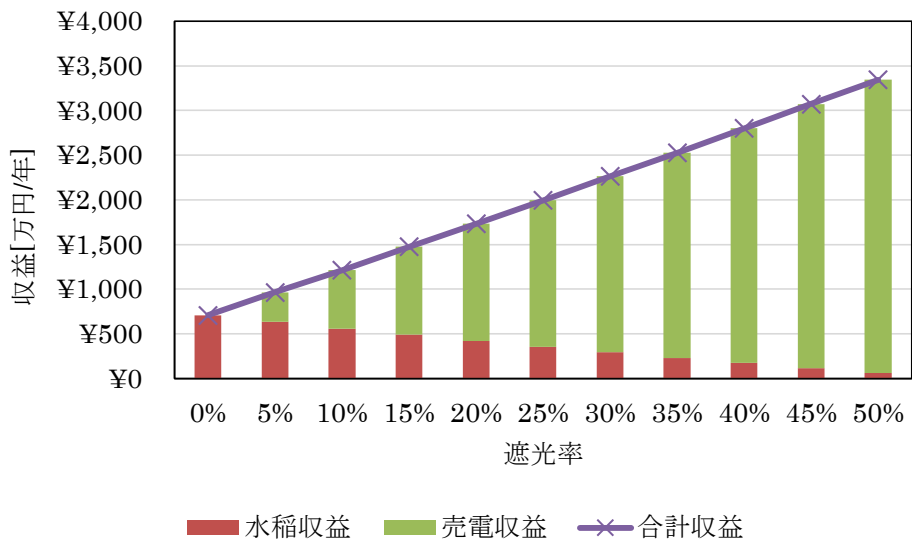


Figure3.18: 遮光率に対する年間収益の推定値
(売電価格 24 円[円/kWh],耐用年数 20[年],設備費用 30[万円 kW⁻¹])

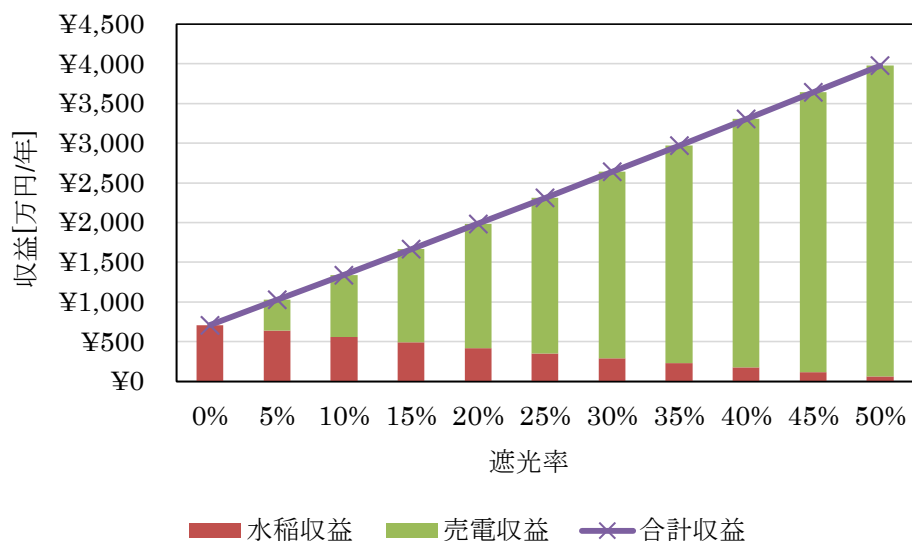


Figure3.19：遮光率に対する年間収益の推定値
(売電価格 27 円[円/kWh],耐用年数 20[年,]設備費用 33.4[万円 kW⁻¹])

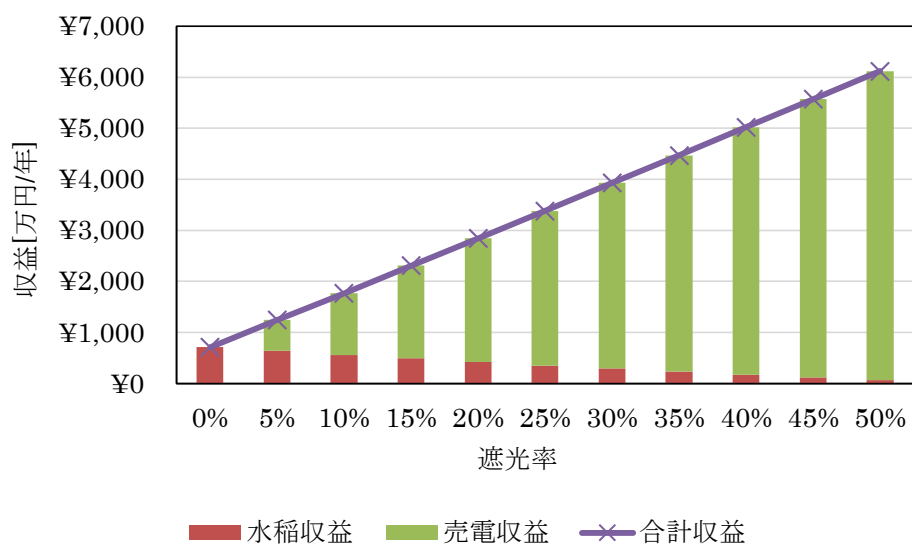


Figure3.20：遮光率に対する年間収益の推定値
(売電価格 27 円[円/kWh],耐用年数 20[年,]設備費用 30[万円 kW⁻¹])

売電価格が 21 円/kWh の場合、太陽光発電設備を設置することによって営農型太陽光発電

全体の収益は減少傾向にあったが、売電価格が 24 円/kWh、27 円/kWh と増加すれば、売電収益は増加し、全体としても大きな収益が見込めることが分かった。これまで、売電価格は発電設備費用の減少に比例して低下傾向にある。太陽光発電設備を製造しているメーカーの技術力向上につれて設備費用は今後も減少することが考えられ、一方で 2017 年 4 月には固定価格買取制度が改正されることにより売電価格が下がることが考えられる。営農型太陽光発電の普及を考える際には、少なくとも経済的な側面でデメリットを生じさせないために、設備費用に見合った買取価格の設定が重要であると考えられる。

3.6 参考文献

- [3.1] T.Horie ; The rice crop simulation model SIMRIW and its testing ,Modeling the Impact of Climate Change on Rice in Asia, 1995, 51-66
- [3.2] 本間優, 土肥哲哉, 吉田好邦 ; 水稻栽培における営農型太陽光発電の実証とシミュレーション, エネルギー・資源, Vol.37, No.6, 23-31(2016)
- [3.3] 堀江武, 井上直人, 大西政夫, 中川博視, 松井勤 ; 水稻の生育・生産過程の動的予測モデルの開発, 平成6年度科学研究費補助金(一般研究A)研究成果報告書(1995)
- [3.4] 内島 郎 ; 冷温条件と水稻の不稔発生との関係についての考察, 農業気象 4(1976), 199-202.
- [3.5] T.Horie ; Predicting the Effects of Climatic Variation and Elevated CO₂ on Rice Yield in Japan, 農業気象, 48(1993), 567-574
- [3.6] 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.
- [3.7] 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), pp.1-11.
- [3.8] 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, 日本作物学会紀事, 66 (1997), pp. 708-709.
- [3.9] 本間優 ; 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, 2015, 東京大学修士論文
- [3.10] 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), 1-102
- [3.11] 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り組みを事例に～, 生協総研賞・第11回助成事業論文報告会, 2015, 105-121.
- [3.12] 経済産業省 エネルギー資源庁
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/kakaku.html

4 結論

本研究では、水稻を対象とし営農型太陽光発電の実証実験を行うことによって、日射量と水稻生育状況の関係性を示すデータの蓄積を行い、その結果をシミュレーションモデルに反映させることによって営農型太陽光発電における水稻の収量の変化ならびに営農型太陽光発電全体における収益性の検討を行った。実証実験とシミュレーションの結果からそれぞれいくつかの知見が得られた。まずは実証実験から得られた知見について述べる。

水稻生育調査では、遮光条件によって水稻生育状況に影響が出ることが明らかになった。草丈や SPAD 値は遮光条件による影響をあまり受けなかった。一方、生育初期の遮光条件が穂数に大きく影響を与えることがわかった。また本間[?]の実験結果では、生育中後期における遮光条件が 1 穂粒重に影響を与えていたが、本研究における生育調査の結果、生育中後期の遮光条件と 1 穂粒重の間には相関は見られなかった。

次に遮光条件と収穫された水稻品質の関係性について得られた知見について述べる。外觀形質分析の結果から、日射量と水稻の外觀形質の間に相関関係があることが明らかになった。水稻の売価に関わる整粒歩合に影響を与える死米と未熟米は遮光率の増加に伴って増加傾向を示した。また、本研究では遮光条件に対する水稻の成分分析も実施した。水稻の品質評価に影響を与える、水分とタンパク質の含有量と遮光条件の間には相関関係が確認できた。

次にシミュレーションの結果から得られた知見について述べる。1 点目は、遮光条件による品質劣化ならびに減収の関係性である。遮光に伴い収量は減少するが、遮光率が 25% の条件での場合でも非遮光の場合の収量と比較して 8 割以上を確保できた。また品質についてのシミュレーションの結果、遮光率の増加に伴って、整粒歩合は有意に減少するという結果が得られた。しかし農林水産省の定めた 1 等米の条件である整粒歩合 70% は確保できるという結果が得られた。

2 点目は営農型太陽光発電全体の経済性評価について述べる。シミュレーションの結果、営農型太陽光発電全体の収益性は売電価格ならびに設備費用に大きく依存することがわかった。売電価格が 21 円/kWh の場合、設備費用を現在より安い 30 万/kW に設定しても全体としての収益は見込めなかった。一方で、売電価格を 24 円/kWh、27 円/kWh に設定した場合は、設備費用が 33.4 万円/kW と設定されていても収益が見込めるという結果が得られた。また、売電価格の変動は収益の増減のみでなく、収益の不確実性にも影響を与えることが示唆された。

謝辞

2年間の大学院生活ならびに研究活動におきまして、非常に多くの方々から御教示を頂きましたので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色々な面でご協力を頂きました。学部時代今とは全く異なる分野の専攻に所属していた私が、大学院で環境システム学分野の修士論文の執筆を完了することができたのは吉田教授のおかげです。大学院での研究の進め方に始まり、実証研究、シミュレーション、考察に至るまで、お忙しい中丁寧にご指導頂きました。また私が精神的に辛い時には、叱咤激励し鼓舞してくださり、私の迷いを取り払って下さいました。自発的に研究に取り組むことの大切さや面白さに教えていただき、研究活動を通して知識のみならずその他様々なことを学びました。研究活動を通して学んだことを深く心に刻み社会人になっても、吉田教授に教わったことを思い出し戦えると自信を持てました。2年間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、面談の際に大変お世話になりました。研究内容についての的確な考察やアドバイスをご教示いただき大変参考になりました。愛知講師には、物事を広い視野を持って俯瞰的に捉えることの大切さについて教えていただきました。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、実証試験において非常にお世話になりました。実証試験に関して素人である私に、調査手法や解析手法についてアドバイスをいただきました。農学に精通している土肥様が実証試験の方向性を示してくださったからこそ本論文の第2章を完成させることが出来ました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

株式会社スマートブルーの方々には、酒々井農家の大塚洋一様の紹介ならびに気象データを計測するための収納ボックスの作成に関しまして大変なご協力を頂きました。実証実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。ここに深く感謝申し上げます。

千葉県酒々井町農家の大塚洋一様のご協力により、実証試験を実施することが出来ました。農場の使用のみならず、計測機器の取り付けから水稻の生育管理まで、多くの御協力をくださいました。大塚様の御厚意のおかげで、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申し上げます。

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、貴重な学術知識

を教示いただき、実証試験の準備に関してもご協力いただきました。先行研究の少ない分野で行った本研究に取り組むにあたって非常にためになりました。ここに御礼申し上げます。

静岡製機株式会社の方々には、収穫した水稻の品質分析に関して大変ご協力をしていただきました。営農型太陽光発電の実証実験によって生育した水稻の品質を細かく分析していただき、本分野での新たな知見の蓄積が可能になりました。この場を借りて感謝申し上げます。

東京大学工学部システム創成学科の吉野航太君にも感謝しております。吉野君は、実証実験の準備や生育調査、気象データの観測など肉体的に労力を要する部分で大変な御協力を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

井原研究室の田代太一君、前田健太郎君、草間蓮君に感謝しております。研究に関するアドバイスなども含め、大学院生活の息抜きを彼らとできたことによって、この 2 年間を乗り越えられました。本当にありがとうございました。