

博士論文

中山間・傾斜地域における日照環境評価
手法の高度化

平成 25 年 3 月

佐藤恵一

目次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 既往の研究成果	5
2.1 日射量の推定方法.....	6
2.2 盆地霧.....	11
2.3 気温変化の近似.....	13
第 3 章 斜面上における直達日射の遮蔽状況のモデル解析	16
3.1 背景と目的.....	17
3.2 方法.....	18
3.2.1 遮蔽物の横方向への拡がりの影響.....	21
3.2.2 斜面の傾斜角の影響.....	21
3.2.3 遮蔽物の高さの影響.....	21
3.2.4 斜面方位の影響.....	21
3.2.5 季節変化の影響.....	22
3.2.6 分散して配置された遮蔽物体の配置間隔や高さの影響.....	22
3.3 結果.....	
3.3.1 遮蔽物の東西方向への拡がりの影響.....	23
3.3.2 斜面の傾斜角の影響.....	23
3.3.3 遮蔽物の高さの影響.....	24
3.3.4 斜面方位の影響.....	24
3.3.5 季節変化の影響.....	25
3.3.6 周辺 4 箇所に樹林域が存在する農地の日射環境.....	25
3.4 考察.....	35
3.5 結論.....	38
第 4 章 樹林域周辺農地における日照条件の評価手法の開発	40
4.1 背景と目的.....	41
4.2 方法.....	41
4.2.1 解析対象地点周辺の地理および地形の状況.....	42
4.2.2 利用した標高データと数値地籍情報.....	42
4.2.3 水田域メッシュの標高補正について.....	43
4.2.4 農地に隣接する林縁部メッシュの標高推定.....	43

4.2.5	微地形や樹林域の影響を考慮した日陰領域の推定.....	44
4.2.6	写真画像を用いた日陰領域面積の計算.....	45
4.2.7	日陰領域の面積推定誤差の発生要因の解析.....	46
4.2.8	遮蔽される直達日射量の分布状況の シミュレーション計算.....	47
4.2.9	樹木伐採を仮定した場合の日陰領域分布変化の シミュレーション.....	47
4.3	結果.....	52
4.3.1	日陰領域の推定結果と誤差の発生要因.....	52
4.3.2	遮蔽される直達日射量の分布状況の シミュレーション結果.....	54
4.3.3	樹木伐採を仮定した場合の日陰領域分布変化の シミュレーション結果.....	55
4.4	考察.....	62
4.5	結論.....	63
第 5 章	盆地霧による日射の遮蔽がおこる地域の抽出手法の開発.....	64
5.1	背景と目的.....	65
5.2	方法.....	66
5.2.1	解析に用いた気温の近似手法.....	66
5.2.2	解析対象地域と利用した気象データ.....	67
	1) 解析対象地域.....	68
	2) 解析に用いた気温データ.....	68
	3) 霧発生の判別に用いた視程データ.....	68
5.2.3	α 値の計算に必要なデータ個数について.....	69
5.2.4	α 値と霧発生日数との関係.....	70
5.2.5	α 値と霧の発生時間数との関係.....	70
5.2.6	α 値に基づく霧発生地域の抽出.....	71
5.3	結果.....	71
5.3.1	気温変化の近似に必要なデータ数.....	71
5.3.2	霧発生日数と α 値の関係.....	72
5.3.3	霧の発生時間数が α 値に及ぼす影響.....	73
5.3.4	霧の発生日数が時別日照時間に及ぼす影響.....	74
5.3.5	α に基づく霧発生域の抽出.....	75
5.4	考察.....	84
5.5	結論.....	85

第 6 章 総合考察	87
6.1 本研究成果の特徴.....	88
6.2 日射環境評価研究における本研究の意義.....	88
6.3 中山間・傾斜地農業における本研究の 研究成果の活用.....	89
6.4 今後の課題.....	91
摘要	93
謝辞	98
引用文献	100

第 1 章

緒言

島国である日本の置かれている地形・地理条件は、アメリカや中国等の大陸国家とは大きく異なり、国土の大半が森林に覆われた山岳地域である。また、もともと面積の少ない平野部に住宅地や工場が密集している。このため、広大な農地を大型機械によって効率的に管理する企業的農業経営には適さないというハンディを抱えている。しかしながら、そうしたハンディを有する一方で、森林域に接する里山や傾斜地域の棚田等の夏季でも冷涼で自然環境が豊かな農地が多数存在するという利点も有している。とりわけ、中国・四国地域には中山間・傾斜地域が広く分布しており、中国・四国地域の経営耕地面積のうち中山間地域に位置する農地が6割を占めている。

中国地域については、中国山地を脊梁として、その北側と南側に標高500～700m程度の山々が日本海や瀬戸内海沿岸部に至るまで数多く分布し、それらの合間に盆地や川沿いの谷等が分布する地理条件となっている。山々の多くは、山裾より上は大部分が樹林に覆われ、集落や農地は山裾・盆地・谷部等に多く存在する。一方、四国地域については、標高1,500mを超える山々が連なる四国山地と平野部の間に傾斜地域が広く分布し、標高700m前後の場所にまで棚田や果樹園が広がっている。四国の傾斜地域は中国中山間地域とは対照的に、高標高で傾斜勾配が急峻な

場所においても農業生産が行われている点に特徴がある。これらの地形条件に加えて、太平洋、瀬戸内海、日本海の影響を受ける多様な気象条件が存在することから、地理的・気候的な多様性に恵まれており、他の地域にはみられない気象条件を活用した特産品の開発や地域ブランド化が期待されている。このため、従来の水田作中心の経営から周年作物栽培への転換が進んでおり、中山間・傾斜地域への周年栽培用の園芸施設の導入が進み、標高の高い高冷地を活用した花きのリレー栽培や山上げ育苗等の気象資源を活かした栽培の成功事例も生まれている。

しかしながら、平野部における周年栽培では生じない問題が発生し、解決が困難となっている事例もある。そうした問題のうち、気象要因に関係するものとして、冬場の日射環境の悪化の問題がある。秋冬季の中山間・傾斜地域における日射環境では、①樹林域による遮蔽、②盆地霧の多発という、夏場の農業生産では顕在化しない要因が日射環境に大きな影響を及ぼす。中国中山間地には、三次盆地に代表される秋季に高頻度で霧が発生する盆地が多いため、広い範囲の農地が霧による日射の遮蔽を受ける。また、四国傾斜地では、斜面上にパッチ上に分布する樹林域が多く存在するため、北斜面上では、冬場には日中を通じて日陰状態が継続する農地が点在している。中国中山間地、四国傾斜地の両地域と

もに、秋冬季における日射環境が悪化する要因を負っている。

秋冬季におけるハウス栽培では、低日射はハウス内の気温条件と光合成効率の双方に対して影響を及ぼし、栽培管理にマイナスの影響を及ぼす。日照条件の悪い農地群に関しても有効な栽培管理を維持していくためには、まず、劣悪な条件下にある農地について日照条件悪化の程度を評価し、解決策を提示する必要がある。しかしながら、夏場の水田作の収量予測モデルへの入力を前提に構築されてきた日射環境評価手法は存在するものの、秋冬季に生じる問題の解析を可能するための方法論は十分に整備されていない状況にある。

そこで、本論文では、①樹林域による日射の遮蔽、②盆地霧による日射の遮蔽という秋冬季の日射環境を評価する上で重要となる要因について新たな評価手法の構築を目的とする。樹林域による日射の遮蔽に関しては、3DモデルとGISを用いて樹林域による直達日射の遮蔽量を農地一筆単位で評価可能にする手法を開発する。盆地霧による日射の遮蔽に関しては、秋季に盆地霧の影響を受ける地点の抽出手法を開発する。

第 2 章

既往の研究成果

2.1 日射量の推定方法

日射は、直達日射と散乱日射に区別して評価することが可能である。直達日射は太陽方向から直線的に地表面に入射する成分であり、散乱日射は大気層で散乱された日射が天空の半球面の全方向から地表面に入射する成分である。これらの各成分のエネルギーは、水平面全天日射量(IG)、法線面直達日射量(Ib)、水平面散乱日射量(Id)として測定される場合が多い。これらの各成分と太陽高度(h)の間には、 $IG = Ib \sin h + Id$ の関係が成立している。

気象学・農業気象学分野においては、日照環境評価に関する既往の研究の多くが、水平面全天日射量の分布図の作成を目的として展開されてきた。水平面全天日射量の気候学的推定法については多様な推定法が存在するが、清野・内嶋(1988)は、①日照時間を用いた推定法、②雲量を用いた推定法、③複数の要素を組み合わせた推定法の三つのタイプに分類した上で、それぞれについて代表的な手法を紹介している。①日照時間を用いた推定法については、月平均日照率と大気外水平面日射量と経験定数を用いて推定する。この経験定数については、代表的な値として Black *et al.*(1954), Glover and McCulloch(1958), 吉田・篠木(1978), 氷高・小林(1985)等による値が紹介されているが、本論文が対象としている研究

領域では、吉田・篠木(1978)の値が用いられることが多い。大気外水平面日射量の値については、Lunde(1980)がアメリカ暖房冷凍空調学会における研究結果をベースに、太陽定数と年初からの日数で計算する方法を示しており、農業環境工学分野では Lunde(1980)による式が用いられることが多い。②雲量を用いる推定法については、Black *et al.*(1954)による推定式等が紹介されている。③複数の要素を組み合わせた推定法として、Kondo(1967)による南中時の天頂角や水蒸気圧を用いた推定式がある。これらの気候学的な視点からのアプローチとは別に、建築工学分野での応用問題に日射量データを利用する立場から、二宮ら(1989)は AMeDAS 日照データを用いて、時別の水平面全天日射量を推定する手法を開発し、 $0.28\text{MJ}/(\text{m}^2\text{h})$ という誤差での変換が可能であることを示している。

一方、法線面直達日射量、水平面散乱日射量に関しても、そのエネルギーを推定する手法の研究は多数行われており、①大気圏外の法線面日射量や大気透過率の値を用いて両成分を推定する手法、②観測した水平面全天日射量を直達成分と散乱成分に分離する手法、③全天・散乱日射量の計測による直達・散乱成分比の算出手法等が開発されている。①については、農業環境工学分野においては Bouguer 式を用いて直達日射量を求め、快晴時の散乱日射量については Berlage(1928)の式を用いて計算する

場合が多い。しかしながら、これらの式の推定精度が低いため、建築工学分野では②に関する研究が多数行われている。日本建築学会は代表的な手法として、Perez *et al.*(1987), Erbs *et al.*(1982), 永田・沢田(1978), 宇田川・木村(1978), 渡辺ら (1983)による直散分離モデルを紹介している。これらのモデルでは、水平面全天日射量を入力して、法線面直達日射量と水平面散乱日射量を算出する。③に関しては、農業気象学の分野においても1978年から10年間行われたグリーンエネルギー計画研究(農林水産省)において全国的な観測が集中的に行われ、現在でも多用されるデータとなっている。中国・四国地域に関しては、氷高・小林(1985)および木村・中西(1985)が計測した値が利用されている。この計画の観測機器や観測項目については、内嶋(1985)により取り纏められている。グリーンエネルギー計画研究における散乱日射量の測定においては、英弘精機製の調節式遮光バンド(MB-11)が用いられ、バンドの補正係数は英弘精機により計算値が提供された。しかしながら、この補正係数は周囲に遮蔽物の無い平野部での測定結果を前提とした値であり、周辺の天空率が極めて低い、遮蔽の著しい地域の補正係数については英弘精機による補正係数算出に関するサポートは行われていない。このため、周辺が遮蔽された地域における散乱日射量の実測には、補正係数の計算式導出の理論的基盤となっている

Drummond(1956)の研究結果に基づいて、周辺遮蔽を考慮した補正係数の算出が必要な状況にあるが、この点については未解決の問題となっている。

直達日射は、複雑地形地域においては地形による遮蔽の影響を受ける。複雑地形による日射の遮蔽については、国土数値情報のメッシュ標高データの公開以降、周辺地形による日射遮蔽を推定する手法が開発されてきた。清野・内嶋(1985)は 1km メッシュ標高値を用いて、阿蘇カルデラ地域における地形による遮蔽状態を計算している。この計算では半径 20km 内の最大仰角が計算されている。方位については 45° 毎の間隔で周辺仰角が計算され、また、各方位間については線形を仮定した補間によって仰角計算が行われている。上原ら(1989)も同様の手法で遮蔽効果を計算している。正務ら(1988)は、東西方位のそれぞれの最大仰角の和を日射障害度と定義して、直達日射の地形遮蔽効果を推定している。この計算では、東西方位各 80 メッシュ内における最大の仰角を求めており、その方位を季節によって変化させ、季節毎の日射障害度としている。黒瀬ら(1991)は、平坦地域と複雑地形地域の遮蔽条件を比較するため、それぞれ 1/2.5 万地形図内の領域について、周辺地形による遮蔽効果を比較している。この結果から、計算対象メッシュから半径

10km 以内の 250m メッシュ地形情報を用いた遮蔽計算で十分な遮蔽効果の計算が可能であることを示し、250m メッシュ標高情報を用いて、72 方位について遮蔽状況を計算している。林・黒瀬(1997)は、木村・中西(1985)が測定・算出した直達成分比および散乱成分比の値、および、吉田・篠木(1978)が示した経験定数を用いて、日照時間と全天日射量の変換式に基づいて、四国の久万地域における全天日射量の分布図を作成した。1990 年代後半以降は、より細密な地形データの普及が始まり、黒瀬ら(1999)は、50m メッシュを用いて日射量分布図を作成した。Blennow and Persson(1998)は、GIS ソフト ANUDEM で作成した標高データ(2m メッシュ)を用いてリモートセンシングデータからの植生データと土壌の分類データをマッピングして、局地的な霜の発生状況の評価に活用することを試みている。佐藤ら(1997)は、GIS の 5m メッシュを用いて複雑地形地域の地形を考慮した可照時間分布図を作成した。

傾斜地域においては、可照時間を支配する要素は樹林域である場合が多い。しかしながら、従来の研究では地形による日射の遮蔽を扱ったものが多く、形状が複雑な樹体による日射遮蔽を評価する方法論は確立されていない。このため、地形による遮蔽と樹林域による遮蔽を区別して日射遮蔽の評価を行い、樹林域による遮蔽の影響の大きさを定量的に把握する研究

が必要とされている。

2.2 盆地霧

盆地霧の発生する地域では、古くから、その発生日数や発生状況を気候学的に解析する研究が行われてきた。代表的な研究報告として、水越・奥(1974)による三重県の上野盆地の霧に関する報告、小気候団体研究会(1994)による岐阜県恵那盆地の霧に関する報告がある。この他にも、全国各地における解析事例が大阪管区气象台報告第 16 号や気象庁研究時報に多く掲載されている。中国・四国地域では、黒瀬ら(1998)が大洲盆地について、深石(1992)が大洲盆地や長浜について、宮田(1994)は三次盆地について、片山ら(2003)は高梁盆地について、藤井ら(1999)は久世について、Sato *et al.*(2005)は本山について、霧発生に関する研究結果を報告している。しかしながら、これらの各地域に発生する霧の諸特性について総合的に、かつ、統一的な指標を用いて比較した研究は存在しない。

霧発生に伴う日射の遮蔽については、卜蔵(1990)がヤマセ卓越条件下で発生する霧や層雲による日射の減衰を観測し、霧層内の雨水量と日射の減衰量との関係性を指摘している。井上(1992)も霧を伴うやませの侵入時における霧の厚さや霧水量と日射の減衰率の関係を明らかにしている。また、

Tonna(1989)は谷霧や放射霧等の霧粒の粒径分布を計算し,霧による光散乱特性との関係を論じている。黒瀬ら(1998)は大洲盆地で発生する盆地霧について,盆地底部と盆地斜面上での日射量を比較し,霧によって遮蔽される日射量を明らかにしている。宮田(1994)は三次市に位置する広島県立林業技術センターにおける日射量データを用いて,他地域と比較して三次の全天日射量値が低い事実を指摘している。

モデルによる霧の解析については,流体力学の式を用いた機構論的なメカニズムの解明研究と,熱・水分収支式に基づいて発生予測を行うためのモデルに大別できる。前者については, Ohta and Tanaka(1986)による1次元境界層モデルによる放射霧の発生・消散に関する解析結果や,大野木・柴田(1986)による移流霧に関する定常・2次元モデルによる解析結果が報告されている。宮田(1994)は Ohta and Tanaka(1986)によって示された解析結果について,三次盆地で観測した霧の動態との比較を行い, Ohta and Tanaka(1986)のモデルのみでは三次における霧の動態を十分に説明できないことを指摘している。三次の霧に関しては,大橋ら(2004)が水蒸気輸送モデルを用いて三次盆地内に集積される水蒸気の供給源を明らかにしている。霧の発生を予測するモデルについては, Meyer and Lala(1990)による,放射霧の発生予測式に基づくモデルが報告されている。このモデルでは,

飽和状態に達するまでの時間を，熱・水分収支モデルと熱力学式を組み合わせせて推定する。

中山間・傾斜地域には霧が多発する地点が多数存在するが，従来の研究では霧が日射に与える影響の測定について個別の地点での研究が主体となっている。このため，多数の地点を対象に，統一の指標を用いて霧による日射の遮蔽を評価する手法の開発が求められている。

2.3 気温変化の近似

霧発生が気温変化に及ぼす影響については，気候学的アプローチによる研究の多くで観測事例が報告されている。なかでも，宮田(1994)による研究では，気温の時間変化量の地点別の日変化が解析されており，三次における気温変化の特徴抽出に成功している。宮田(1994)は三次における気温の立ち上がりが他地点と比較して遅いこと，夜間の冷え込みが他地点と比較して緩やかな事実を指摘している。しかしながら，宮田(1994)による解析は，こうした気温変化の定性的な解析にとどまっている。宮田(1994)による発見をより定量的な解析に発展させるためには，近似等の手法を用いて，気温変化の特徴を定量的に抽出する手法の利用が不可欠である。

気温変化の特徴を近似等の手法により抽出・評価する手法はわが国でも

古くから開発されてきた。羽生(1962)は気温日較差係数というパラメータを定義して、気温変化の型を区分し、温度階層別の気温出現時間を効率的に算出する方法を提案している。和田(1980)は二項よりなる sine 曲線を用いて気温の日変化を表現し、温度階層別気温出現時間を効率的に求める手法を提案している。これらの研究が行われた時代以降、パーソナルコンピュータ上の表計算ソフトの普及によって、温度階層別の気温出現時間の算出が容易になり、こうした近似に関する研究へのニーズが縮小し、以後の農業気象分野における気温近似に関する研究には目立った進展はみられない。一方、海外においては、農業分野での実用を想定した気温近似に関する研究は現在まで数多く行われている。特に、現実の気象変動に認められる stochastic な特性を正確にシミュレート可能な気温ジェネレーターの作成に関する研究例は多数存在する。このような確率的気象ジェネレーターは各種モデルへの入力値として日毎の最高・最低気温や積算日射量等の値について、仮想的なテストデータを作成する。作成された乱数的な気象データは、それらの平均値等の統計量が現実に観測されたデータの平均値等の統計量と一致するように作成されている。確率的な処理を行うアルゴリズムには多様な手法が用いられている。Jordan *et al.*(1975)はモンテカルロ法を組み込んでランダム性を表現可能な気温ジェネレーターを開発

している。Hansen and Driscoll(1997)は暖房・冷房負荷の評価への活用を目的として、また、Nicks and Harp(1980)や Richardson(1981)は水文収支モデルへの入力データを与える目的でマルコフ連鎖を用いた確率的気象ジェネレーターを開発している。こうした確率的気象ジェネレーター開発以外に、気温データの内挿を目的とする研究も行われてきた。これは、国土の広大な米国では、日最高・最低気温データのみが存在し、時別値が存在しない観測点が多いという事情も存在する。Reicosky *et al.*(1989)は大豆の生育モデルへの入力データとして用いる時別気温データ(近似値)を作成するための近似式として5種のモデルを選び、作成した近似値と実測データの間の誤差を評価している。気温の日変化データの近似に関しては、Fernández(1992)による気温の上昇過程と下降過程に対応する2つの独立した正弦曲線による近似手法のように、正弦曲線やフーリエ展開による解析が用いられる場合が多い。また、Sadler(1997)のように気温の日変化の日較差や時間軸を正規化し、 β 分布を用いて気温変化の近似を行う等、正規化手法の導入も試みられている。

これらの気温近似手法に関する研究成果を霧発生による気温上昇の時間遅れの評価に導入することで、蓄積された多量の気温データを用いて霧発生が気温に及ぼす影響を抽出する事が可能になるものと考えられる。

第 3 章

斜面上における直達日射の遮蔽状況のモデル解析

3.1 背景と目的

国土地理院は日本の地形，土地利用等に関する情報を国土数値情報として提供しており，標高に関しては 50m メッシュ標高が整備されている。この標高データを用いて地形を再現し，日射の遮蔽について扱った研究は多数存在する。既存モデルの中で代表的な林・黒瀬(1997)による研究成果で用いられているモデルは棚田で栽培される稲の収量予測モデルへの入力値として有効であるが，地形による日射の遮蔽しか扱っていない。地物とりわけ樹林域による日射の遮蔽を扱った研究は少ない。特に，四国傾斜地の農地周辺では小さな樹林域がパッチ状に分布している場所が多いため，そうした場所を想定した解析も必要である(写真 3-1)。

そこで，本章では斜面上の樹林域を想定した 3 次元モデルを用いて，斜面上における直達日射(太陽方向から直線的に地表面に入射する日射成分)の遮蔽量を解析する。斜面日射量に関する研究は建築工学等の分野で多数行われているが，本章の解析は直達日射量の遮蔽要因が斜面方位，傾斜角，地形や樹林域等の遮蔽物の存在，その形状や分布状態のいずれに強く支配されているのかを明らかにする点にその特徴がある。また，本章の 3D モデルの解析対象域は最大で 150m×150m の斜面上領域であり，林・黒瀬(1997)らが作成した日射量分布マップの最小ピクセルである 1 個

の 250m メッシュ内に包含されるサイズである。林・黒瀬(1997)らの解析では、1 個の 250m メッシュ内に存在し得る日射量分布較差は全く問題にされていない。林・黒瀬(1997)らの解析例に従って、1 個の 250m メッシュ内では、周辺地形(斜面自体)に起因する日射量分布較差は極めて小さいものと仮定し、本章で作成する 3D モデルでは斜面自体による直達日射の遮蔽についての検討は省略する。なお、本研究中の本文および図中では MJ/(day・m²)を MJ で略記する(1MJ=238.9kcal)。

四国傾斜地において、地形や樹林域の分布状況が異なる複数の斜面上で遮蔽バンドを用いた散乱日射量(大気層で散乱され天空の全方向から地表面に入射する日射成分)の測定を行い、天空率との関係について解析を行った結果から、樹林域による散乱日射量の遮蔽評価については検証可能な解析が困難であると判断した。このため、散乱日射量の遮蔽に関する解析は行わなかった。直達日射の遮蔽モデルが日陰領域分布の検証を通じて間接的には検証可能である一方で、散乱日射量の推定値についてはアルベドによる誤差の問題、遮蔽バンド利用の妥当性等の問題により検証が困難である。

3.2 方法

斜面上に存在する遮蔽物を幾何学的に最も単純化したモデルを用いて、斜面の方位・傾斜、遮蔽物の形状や配置によって遮蔽される直達日射量の分布がどのように変化するかを解析した。

図 3-1(a),(b)に遮蔽物の形状・配置と座標系の概要を示す。図 3-1(a)のモデルでは単一の遮蔽物による遮蔽について解析し、図 3-1(b)のモデルでは複数の遮蔽物が分散して存在する場合の遮蔽について解析する。図 3-1(a),(b)の両モデルでは、図に示した斜面上の各格子点上に影が生じているかどうかを判定し、影になっている時刻について遮蔽される直達日射量を評価した。図 3-1(a),(b)に示すように、斜面上に等間隔の格子点群を設定した。これらの格子点群の位置を指定するため、図 3-1(a),(b)に示すような 2次元の XY 座標系を設定し、この XY 座標系で陰の領域の分布を特定した。計算対象とした領域は、図 3-1(a)については X 軸上の $0 \leq X \leq 100\text{m}$ の範囲、図 3-1(b)については XY 平面上の $0 \leq X \leq 200\text{m}$, $0 \leq Y \leq 200\text{m}$ の範囲を計算領域とした。なお、遮蔽の有無の計算には z 軸方向の解析も必要なので、この XY 座標系とは別に通常の xyz 座標系も設定して、XY 座標系上の $(X,Y,0)$ を通常の xyz 座標系上の (x',y',z') で表現して遮蔽の有無を判定している。具体的な判別方法は、XY 平面上の格子点と太陽方向を結んだ直線と xyz 座標系上の $x=0$ 平面の交点が図 3-1(a)に

示す長方形(幅 W ×高さ ht)の内側にあるかを計算して、内側にある場合は遮蔽され、外側にある場合は遮蔽されていないと判定した。太陽の軌道に沿って太陽の方向を変えながら直達日射が遮蔽されている時刻を特定し、遮蔽される直達日射量を積算した。直達日射量の値は近似値を用いた。この近似では蔵田・岡田(1984)が作成したプログラムを参考として、Bouguer 式、Lunde(1980)の式および Berlage(1928)の式を用いて、太陽軌道が秋分と冬至のほぼ中間の軌道を通る 11 月中旬の代表事例として 1999 年 11 月 10 日を選び、高知地方気象台における全天日射量の日変化と一致するような直達日射量の日変化を求めた。本章での解析結果は、次章の高知県土佐町における解析の結果を考察する上で重要となる。このため、土佐町に最も近い気象官署である高知地方気象台における全天日射量の観測データを用いてシミュレーションを行った。大気透過率を $P=0.75$ とし、11 月 10 日の土佐町における太陽軌道を仮定した場合、1999 年 11 月 10 日の土佐町における水平面直達日射積算量は 11.2MJ と算定された。

このモデル斜面上で遮蔽物の形状や斜面の傾斜角を変化させ、陰となる領域、遮蔽される直達日射量を算出した。なお、解析では、水平面直達日射量を計算した。

3.2.1 遮蔽物の横方向への拡がりの影響

遮蔽物の横方向への拡がりが直達日射の遮蔽に及ぼす影響を明らかにするため、板状遮蔽物の幅を 10m, 20m, 50m, 100m と変化させて、図 3-1(a)に示した XY 座標系の X 軸上の点, (1, 0), (2, 0), ~ (100, 0) 上で遮蔽される直達日射量を計算した。ただし、遮蔽物の高さは 15m, 斜面の傾斜角は 20° とした。

3.2.2 斜面の傾斜角の影響

斜面の傾斜角が直達日射の遮蔽に及ぼす影響を明らかにするため、斜面の傾斜角を 5° , 10° , 20° , 30° とし、X 軸上の点, (1, 0), (2, 0), ~ (100, 0) 上において遮蔽される直達日射量を計算した。ただし、遮蔽物の幅は 20m, 遮蔽物の高さは 15m とした。

3.2.3 遮蔽物の高さの影響

遮蔽物の高さが直達日射の遮蔽に及ぼす影響を明らかにするため、遮蔽物の高さを 10m, 15m, 20m, 25m とし、X 軸上の点, (1, 0), (2, 0), ~ (100, 0) 上において遮蔽される直達日射量を計算した。ただし、遮蔽物の幅は 20m, 斜面の傾斜角は 20° とした。

3.2.4 斜面方位の影響

斜面方位の違いが直達日射の遮蔽に及ぼす影響を明らかにするため、

斜面の方位を北東(西)斜面(45deg), 東(西)斜面, 南斜面に変えた場合に, X 軸上の点, (1, 0), (2, 0), ~ (100, 0)上において遮蔽される直達日射量を計算した。ただし, 遮蔽物の幅は 20m, 斜面の傾斜角は 20° とした。

3.2.5 季節変化の影響

季節による太陽軌道の違いが直達日射の遮蔽に及ぼす影響を明らかにするため, 夏至, 春(秋)分, 冬至について, (1, 0), (2, 0), ~ (100, 0)上において遮蔽される直達日射量を計算した。なお, Bouguer 式, Lunde(1980)の式および Berlage(1928)の式による全天日射量の推定値が, 高知地方気象台における快晴・晴天日のうち 2009 年 6 月 24 日, 1999 年 3 月 22 日, 2000 年 12 月 22 日における全天日射量の変化と一致するような直達日射量の日変化を仮定した。この仮定により, 高知県土佐町における水平面直達日射積算量は夏至 21.4MJ, 春分 17.9MJ, 冬至 8.9MJ と仮定された。遮蔽物の幅は 20m, 遮蔽物の高さは 15m, 斜面の傾斜角は 20° , 斜面方位は北斜面とした。

3.2.6 分散して配置された遮蔽物体の配置間隔や高さの影響

図 3-1(b)に示した形状の 4 個の遮蔽物体の間隔を変えて, 遮蔽される直達日射量の分布を計算した。また, 斜面上の全域について遮蔽される直達日射量の総和を計算し, その値が物体間の間隔によってどのように

変化するのかを解析した。また、遮蔽物の高さが直達日射の遮蔽に及ぼす影響を明らかにするため、遮蔽物の高さが 15m と 20m の場合に分けて計算した。

3.3 結果

3.3.1 遮蔽物の東西方向への拡がりの影響

遮蔽物の幅と直達日射の遮蔽量の関係を図 3-2 に示す。遮蔽物の直下では約 11MJ の直達日射が遮蔽され、遮蔽物からの距離が増大するに従って遮蔽量が減少した。減少割合が遮蔽物の東西方向の長さに大きく左右されていることがわかる。また、遮蔽物からの距離が 60m 以上の場所では、直達日射の遮蔽が 0 になり、その変化は不連続である。この不連続な変化が生じる地点は、南中時に遮蔽物上辺の影が射影される地点に相当する。南中以降の太陽高度の低下とともに影は東方向に移動し、X 軸を覆う影の長さは次第に短くなるため、この不連続点より下方では遮蔽物の影領域となる状態は生じない。このため、この地点より下方の X 軸上では、遮蔽物によって遮蔽される直達日射量は 0 となる。

3.3.2 斜面の傾斜角の影響

斜面の傾斜角と直達日射の遮蔽量との関係を図 3-3 に示す。傾斜が 30°

の斜面では、遮蔽物の下方 100m の地点まで遮蔽されるが、傾斜が 5° の場合は、遮蔽物の下方 30m までしか遮蔽されず、30m 以上離れた地点での遮蔽は 0 となる。すなわち、北斜面では傾斜が急な斜面ほど斜面の下方の遠距離まで直達日射の遮蔽領域が広がる。

3.3.3 遮蔽物の高さの影響

遮蔽物の高さ と直達日射の遮蔽量との関係を図 3-4 に示す。遮蔽物からの距離が約 40m の地点までは、遮蔽物の高さにかかわらず遮蔽される日射量の X 軸上の分布は全く同じ軌跡を描いて減衰した。遮蔽物の高さが高くなっても、遮蔽物の直下の場所では遮断される直達日射量の値は変化せず、直達日射量が遮蔽される領域が斜面の下方方向に拡大する。

3.3.4 斜面方位の影響

斜面方位 と直達日射の遮蔽量との関係を図 3-5 に示す。北東(西)斜面については図 3-2, 図 3-3, 図 3-4 に認められた X 軸上における遮蔽量の不連続な変化が消失し、斜面下方 100m まで連続的に遮蔽が少なくなっている。これは、北東(西)斜面上では遮蔽物の陰が X 軸に沿った方向に最も長く伸びる時間が南中時ではなく、太陽高度の低い時間帯となるためである。一方、北斜面については、遮蔽物の直下から約 60m より下の領域では遮蔽物の影が生じない。このため遮蔽物によって遮蔽される直達

日射は 0 となり, この領域に関しては北東(西)斜面の方が北斜面よりも遮蔽物によって遮蔽される直達日射量は大きくなる。東(西)斜面については, 日の出(日没)時には遮蔽物の影は斜面上方の $X < 0$ の領域に生じ, $X \geq 0$ の領域については南中前後の時間帯に遮蔽物の直下に短い影が生じるため, 図 3-5 に示すような分布となる。南斜面については, 秋分～春分の季節は斜面上方の $X < 0$ の領域のみに影が生じるため, $X \geq 0$ の領域では遮蔽物によって遮蔽される直達日射量は 0 となる。

3.3.5 季節変化の影響

季節による太陽軌道の違いが直達日射の遮蔽に及ぼす影響を図 3-6 に示す。太陽高度の低い冬至には, 遮蔽される領域が斜面下端まで到達する。一方, 夏至には, 直達日射の遮蔽は遮蔽物の直下の領域に限定されている。

3.3.6 周辺 4 箇所に樹林域が存在する農地の日射環境

分散して配置された遮蔽物体の配置間隔や高さが直達日射の遮蔽に及ぼす影響を図 3-7 に示す。斜面上全体で積算した遮蔽量と物体間の距離 d の間の関係を図 3-8 に示す。遮蔽物体間の距離が 20m の場合には, 距離が 10m の場合に比較して, 四個の遮蔽物体に囲まれた中央部分では遮蔽量が低下するものの, 斜面全体を平均した遮蔽量が増加する。



写真 3-1. パッチ状に分布する樹林域と園芸ハウス

高知県土佐町，北東向き斜面

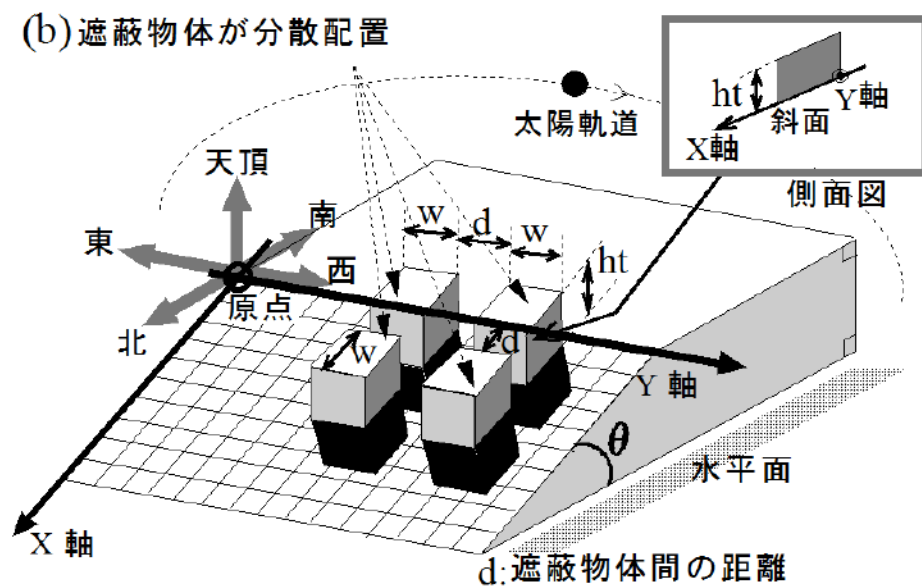
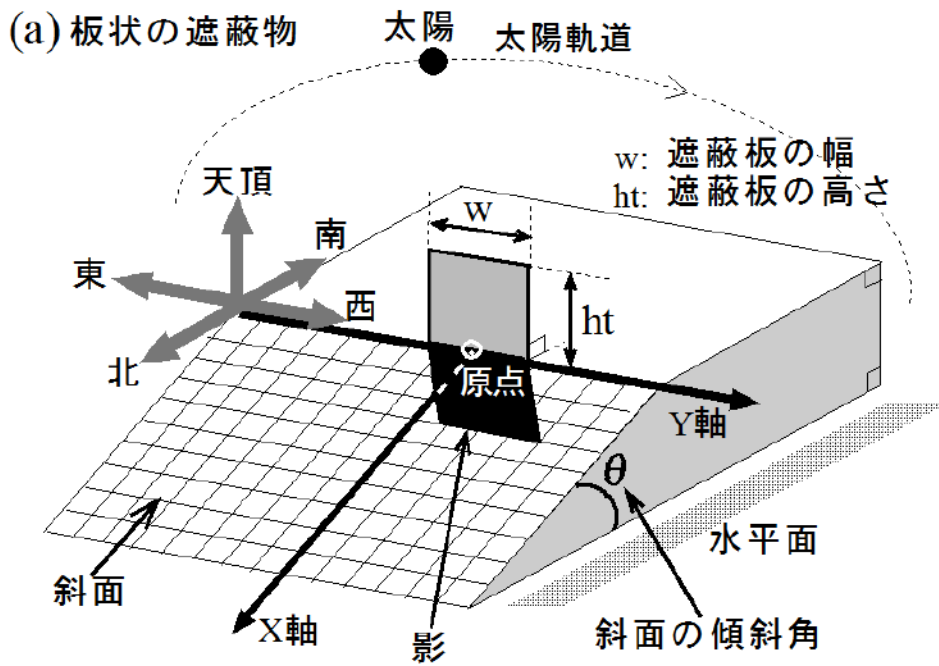


図 3-1. 斜面上の遮蔽物による直達日射の遮蔽量を推定するモデル

(a)板状の遮蔽物 (b)分散配置した立体状の遮蔽物

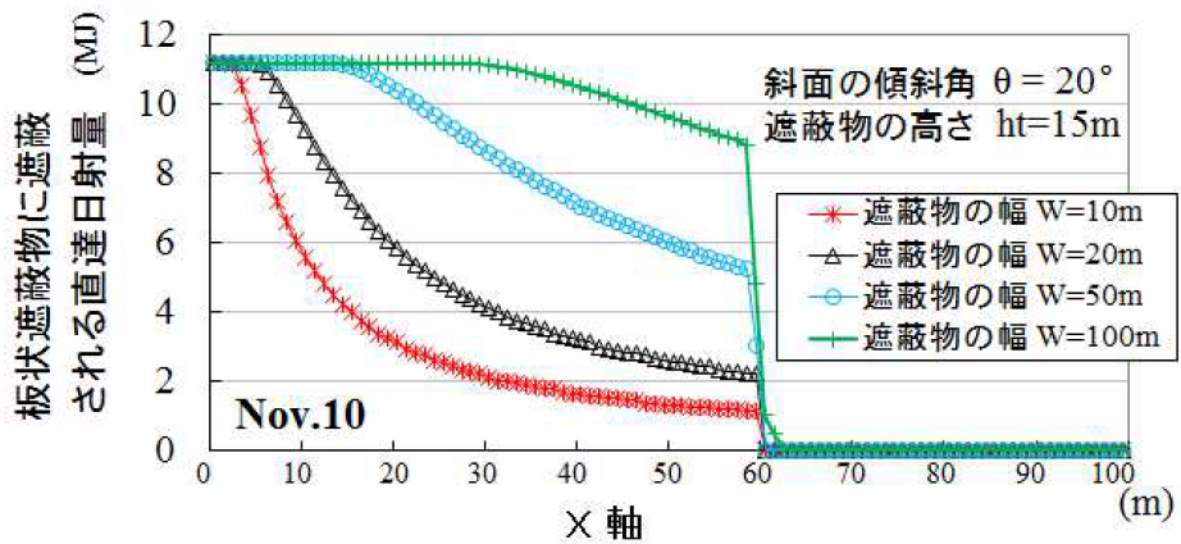


図 3-2. 遮蔽物の幅と遮蔽される直達日射量との関係

斜面上に X 軸設定，遮蔽物は X=0 の位置に存在，斜面下端は X=100

1999 年 11 月 10 日の高知地方気象台での日射量観測値を仮定

遮蔽の無い場所での水平面直達日射量の積算値は 11.2MJ

北斜面を仮定

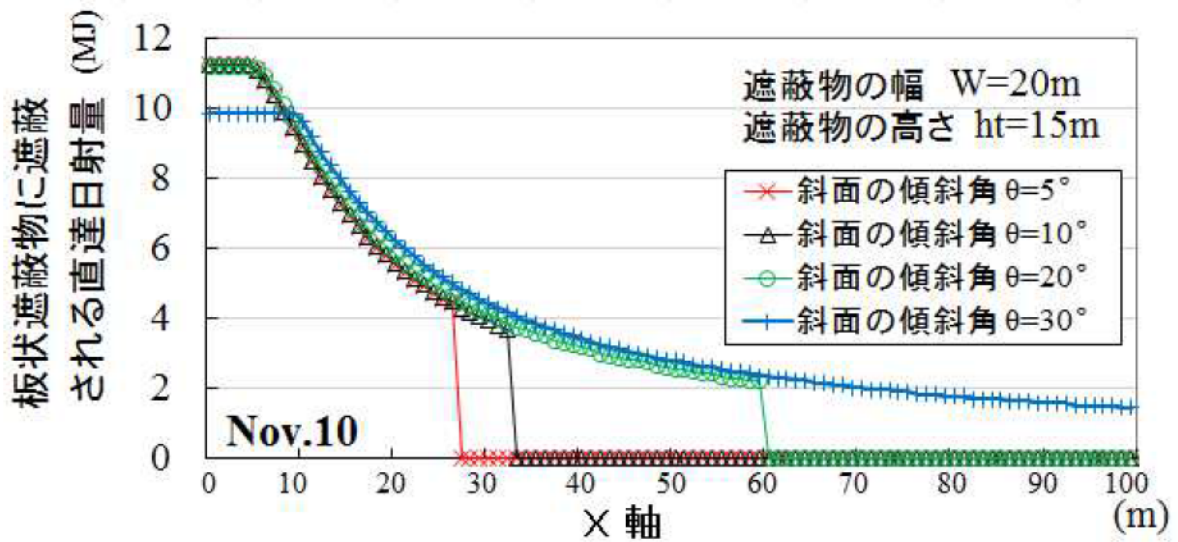


図 3-3. 斜面の傾斜角と遮蔽される直達日射量との関係

斜面上に X 軸設定，遮蔽物は X=0 の位置に存在，斜面下端は X=100

1999 年 11 月 10 日の高知地方気象台での日射量観測値を仮定

遮蔽の無い場所での水平面直達日射量の積算値は 11.2MJ

北斜面を仮定

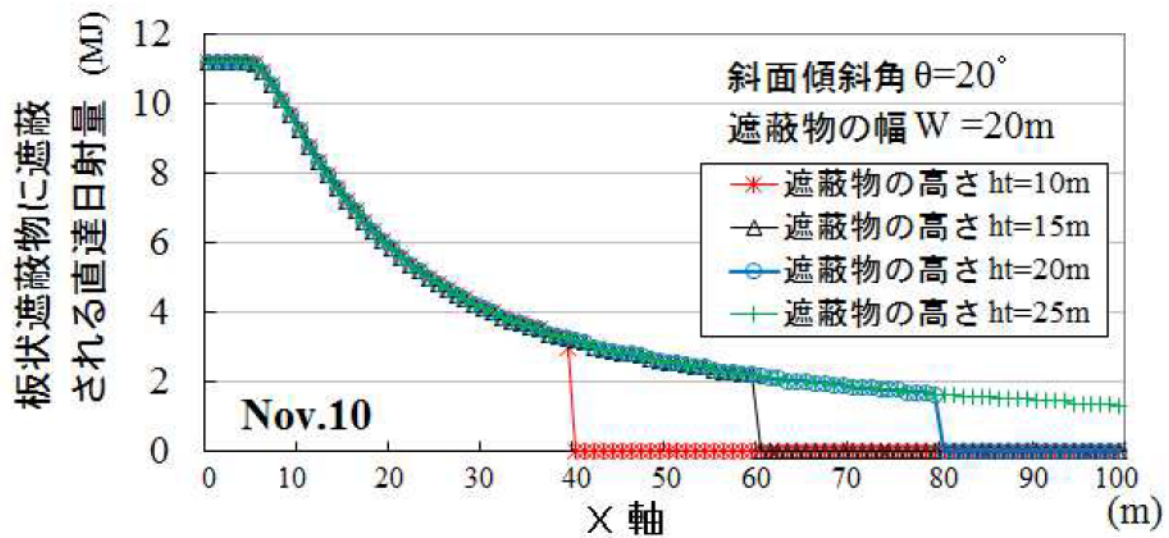


図 3-4. 遮蔽物の高さで遮蔽物によって遮蔽される直達日射量との関係

斜面上に X 軸設定，遮蔽物は X=0 の位置に存在，斜面下端は X=100

1999 年 11 月 10 日の高知地方気象台での日射量観測値を仮定

遮蔽の無い場所での水平面直達日射量の積算値は 11.2MJ

北斜面を仮定

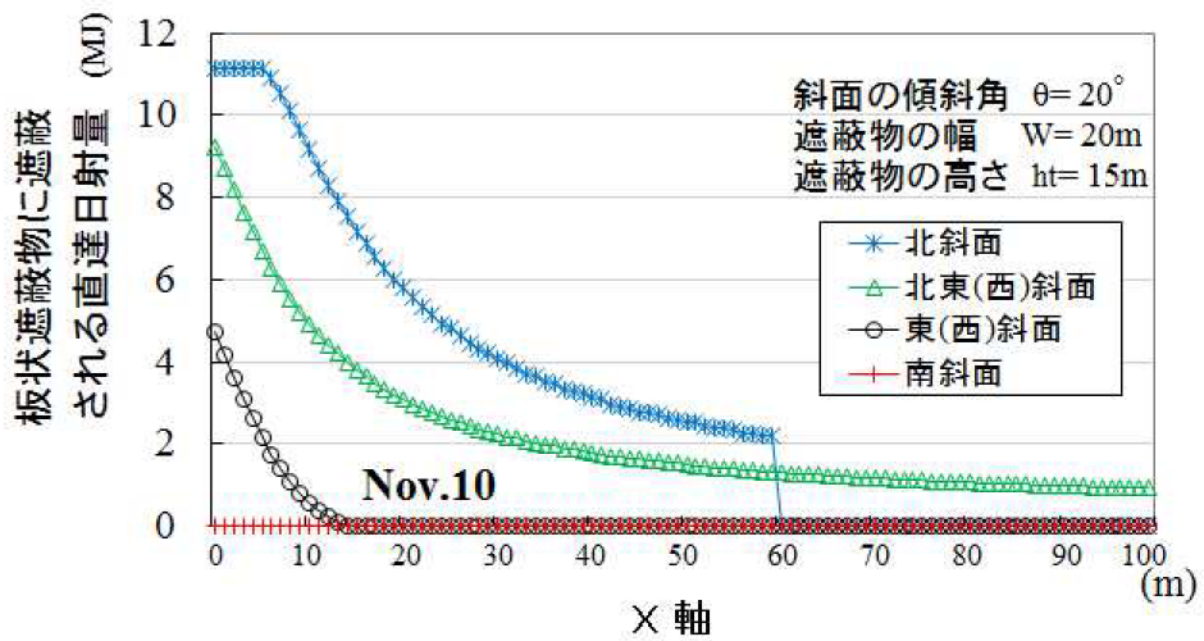


図 3-5. 斜面方位と遮蔽される直達日射量との関係

斜面上に X 軸設定，地物は X=0 の位置に存在，斜面下端は X=100

1999 年 11 月 10 日の高知地方気象台での日射量観測値を仮定

遮蔽の無い場所での水平面直達日射量の積算値は 11.2MJ

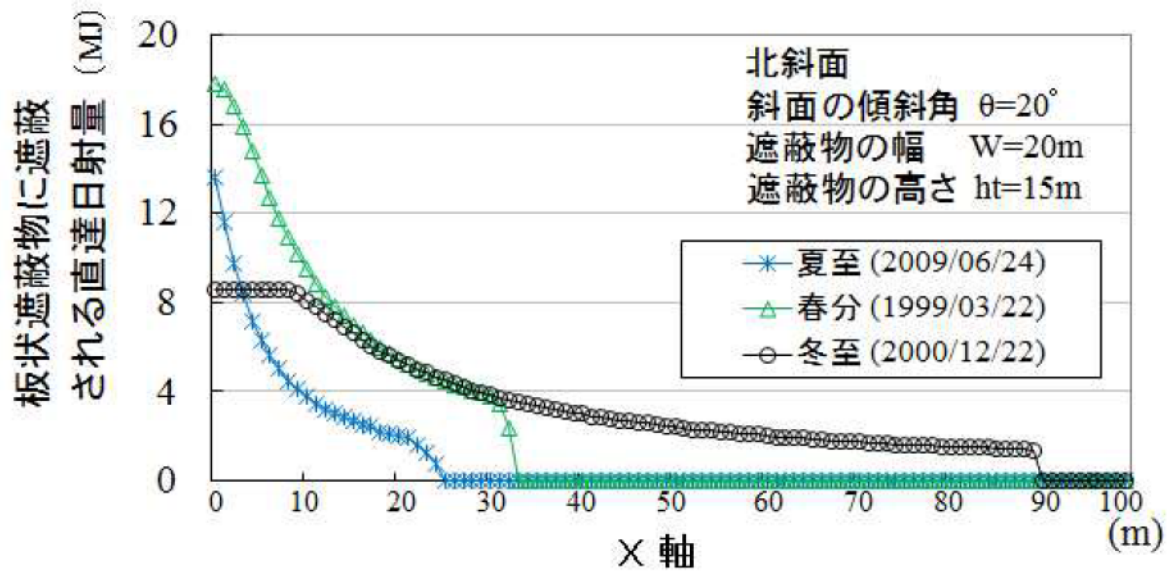


図 3-6. 季節と遮蔽される直達日射量との関係

斜面上に X 軸設定，地物は X=0 の位置に存在，斜面下端は X=100

遮蔽の無い場所での水平面直達日射量の積算値は夏至：21.4MJ，

冬至：8.9MJ，春分：17.9MJ

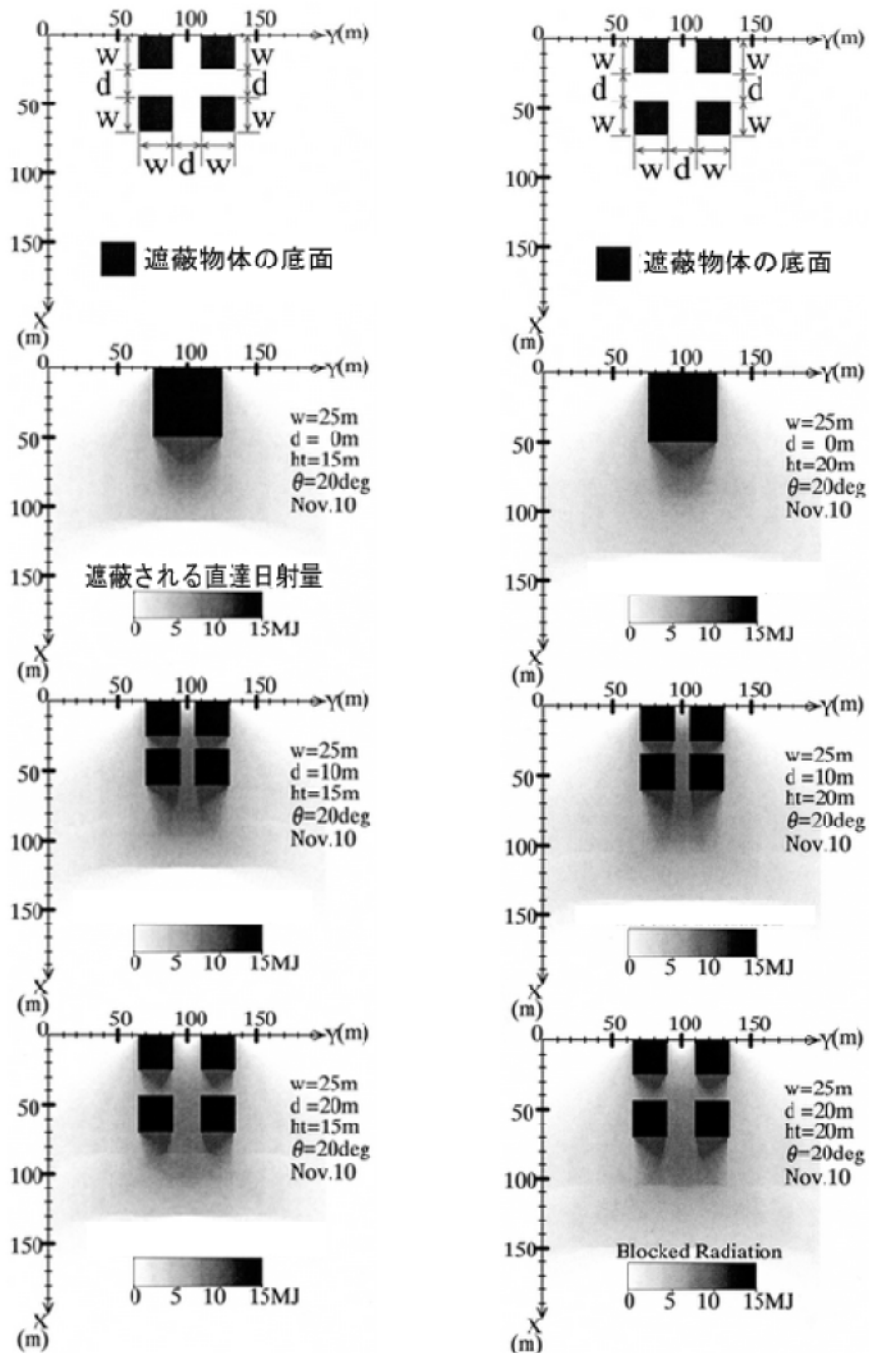


図 3-7. 北斜面上のパッチ状遮蔽物によって遮蔽される直達日射量

左側-遮蔽物体の高さ 15m, 右側-遮蔽物体の高さ 20m

1999 年 11 月 10 日の高知地方気象台での日射量観測値を仮定

遮蔽の無い場所での水平面直達日射量の積算値は 11.2MJ

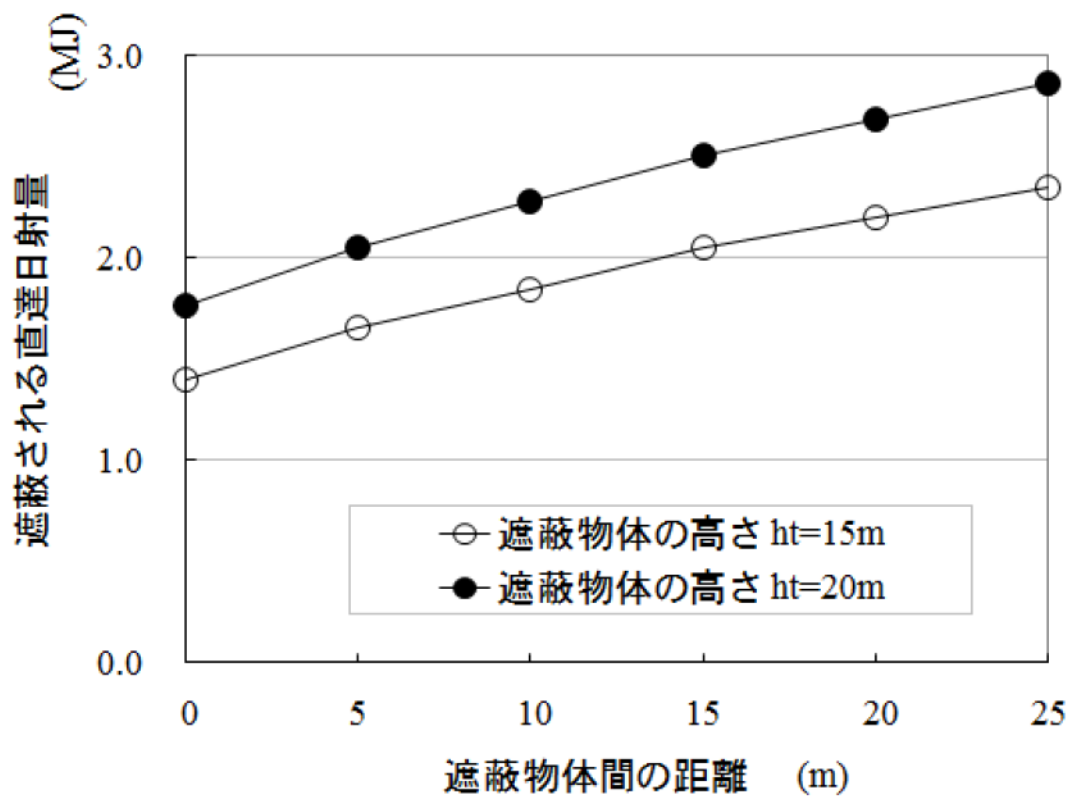


図 3-8. 北斜面上のパッチ状遮蔽物の間隔および高さが直達日射の遮蔽に及ぼす影響

1999年11月10日の高知地方気象台での日射量観測値を仮定

遮蔽の無い場所での水平面直達日射量の積算値は 11.2MJ

3.4 考察

斜面上の日射量分布モデルについては、農業気象学分野や建築工学分野において既に多くのモデルが開発されている。農業気象学分野に関しては、山田・岩切(1985)が、周囲のアルベドや斜面の傾斜角が小さい場合には水平面の日射量から斜面日射量が計算可能であることを示し、水平面全天日射量と直達日射量について、斜面上の値との比を斜面方位別、月別(3月～11月)、斜面の傾斜角別に示している。この解析結果では、秋季の北斜面上において斜面日射量が最も低下することが示されている。しかしながら、山田・岩切(1985)のモデルはシンプルな斜面を仮定しているものの、地物による遮蔽の影響は全く考慮されていない。これに対して本章では、斜面や地物の形状についてシンプルな斜面を仮定することにより、地物の影響を明らかにしている点で、山田・岩切(1985)のモデルをさらに進化させたモデルであるといえる。

ただし、地物の日照環境に影響に及ぼす影響に関しては、建築工学分野で先進的な研究が行われている。特に、周辺建築物による日射遮蔽の評価が熱設計に重要となる建築工学では、Perezら(1987)が天空の放射輝度分布を考慮した斜面日射量推定手法を開発しており、建築工学での熱設計に利用されている。建築の熱設計では、冬至における日影曲線を作成した上で

適切な隣棟間隔が決定され、日照条件が最も悪化する季節の日照条件が重要な設計基準となっている。一方、農業気象学分野においては、棚田での夏場の水田作を想定した斜面の日射量分布評価は行われてきたが、秋冬季については、建築工学分野における日影曲線の活用と同等のアプローチを農地周辺の地物に適用する試みは行われていない。このため、本章で示した手法は、農業気象学分野における秋冬季日射環境問題のモデル解析では先駆事例として位置づけられるものと考えられる。この3Dモデルによる解析結果と、実在する傾斜地農地の実態(高知県の嶺北地域、第4章の解析対象地域)を比較しつつ考察した結果、以下に示す知見が得られた。

北斜面上に位置する樹林域の下方では、遮蔽される直達日射量は、樹林域の直下で最大となり、斜面の下方方向へ樹林域から離れるに従って指数関数的に減少する。その減少曲線の形状は、樹林域の東西方向の幅に強く支配される。南中時に斜面下方に生じている影が途切れる地点で、遮蔽される直達日射量の大きさは不連続的に0となる。樹林域の直下から、直達日射の遮蔽が0となる地点までの距離は、樹高、斜面の傾斜および季節によって変化する。このような変化が生じるのは、樹林域の影が生じる領域と生じない領域が幾何学的に明瞭に区分されるためである。北斜面で傾斜角が 20° 以上の急傾斜地の上部に樹高が15mの樹林域が東

西方向に広く分布している場合、秋冬季には遮蔽の著しい領域が下方 50m 以上の場所にまで達する。高知県嶺北地域に実在する多くの斜面農地を事例として考えた場合、50m という距離内には複数の小面積農地が存在し得る。高知県嶺北地域の北斜面においては、樹林域直下に小面積農地が分布する場所は多数存在する。そのような農地では、東西方向に幅のある樹林域の存在が、秋冬季の日射条件を著しく悪化させる要因となる。現時点では、そうした農地の多くでは夏季に水田作が行われているため、問題が顕在化する事例は少ないものの、今後、高収益化を目的とする周年ハウス栽培の導入が進んだ場合、樹林域による日射の遮蔽問題が顕在化するものと予想される。図 3.2 の事例では、下方に約 60m の距離を隔てた地点より下では遮蔽の影響を受けないものの、傾斜が急な斜面については、この距離が増大する(図 3-3)。傾斜角が 30° の場合には、樹林域の 100m 下方まで遮蔽が著しい領域が拡大する。このことは、急傾斜地においては、斜面上部の樹林域の拡がりや高さが下方にまで影響を及ぼしていることを意味する。こうした遮蔽の影響を受けている農地を所有する営農者の中には、樹林域の生長による遮蔽の増大を懸念している営農者も存在する。しかしながら、図 3-4 から明らかなように、樹木の生長に伴う遮蔽状態の変化は、樹林域直下の農地には大きな変化を

及ぼさず、影響の及ぶ領域が下方に拡大するという特徴を持つ。従って、現時点で遮蔽状況下にある農地が遮蔽要因となる樹林の生長によって更に悪化することはない。ただし、他の場所に位置する別の樹林域の影が樹木の生長によって下方に伸びて、遮蔽状況が悪化する可能性は存在する。このような、遮蔽される直達日射量の分布特性は、北斜面に関する特性であり、斜面方位が北東や北西方向にずれている場合にはその特性が変化する(図 3-5)。図 3-5 に示した結果は、農地と樹林域が複雑に入り組んでいる斜面の日照条件を考える上で、斜面方位の正確な把握が重要であることを意味している。

また、図 3-7、図 3-8 に示した結果から、北向き斜面上に細かく分散して存在するパッチ状の樹林域は、同じ面積の樹林域が一箇所に集中している樹林域より斜面全体としての日照環境を劣化させていることがわかった。

3.5 結論

樹林域が斜面上の直達日射環境に及ぼしている影響をモデルによる解析で明らかにした。斜面の上方に分布する樹林域の形状や分布状況が、斜面下方の遮蔽される直達日射量の分布に大きな影響を与えていること

を明らかにした。特に、秋冬季の北斜面において樹林域の影響が著しく、特に、幅の広い樹林域が直達日射環境を著しく悪化させることがわかった。樹林の生長とともに直達日射が遮蔽される領域は斜面下方に拡大するが、樹林域の直下の遮蔽状況には大きな変化は生じない。

パッチ状に分布する樹林域に関しては、樹林域の配置間隔が広いほど、斜面全体の遮蔽される直達日射量は増加することが明らかとなった。斜面上に小さな樹林域が多数分布するような場所は、同じ面積の樹林域が1ヶ所に固まって存在する場合よりも、斜面全体の直達日射環境が劣化する。

第 4 章

樹林域周辺農地における日照条件の評価 手法の開発

4.1 背景と目的

農業生産と日射は密接に関わっている。中山間・傾斜地域の農地では農地周辺の地物によって日射が遮蔽され、生産性が低下する場合がある。しかしながら、その実態について、農地一筆単位で遮蔽状況を定量的に解析・検証する研究はこれまで行われていない。とりわけ、多くの傾斜地農地の日射条件を悪化させている斜面上の樹林域が日射条件悪化に及ぼす影響については解析されてこなかった。そこで、本章では日射条件が劣悪な農地を多数抱える花き農家を対象として、GIS (Geographic Information System 地理情報システムの略称)と数値地籍情報を用いた事例ベースの解析を行い、傾斜地域に分布する樹林域が農地の日射条件に及ぼす影響を評価する手法を提示する。

4.2 方法

地形や周辺樹林により日射が遮蔽されている農家を解析対象として選定した。写真 4-1 に、この農家の花き栽培ハウスの冬期の日陰分布状況を例示した。この農家が所有するハウスの多くで、秋冬季には、周辺の樹林域によってハウス内の広い領域で直達日射が遮断され、栽培が不可能となる。この農家の位置する場所の周辺域について、解析に必要な基

本データを GIS 上に整備した。その後、GIS の標高データと数値地籍情報データを用いて農地周辺の日陰領域分布を推定するプログラムを作成・実行し推定結果を検証した。以下に、その概要を述べる。

4.2.1 解析対象地点周辺の地理および地形の状況

推定・検証を行う農地として高知県の嶺北地域（図 4-1(A)）内に位置する溜井地区（図 4-1(B)の黒枠部分、(C)地形図、(D)航空写真）の北～北東向き斜面上の農地 F1（図 4-1 (E) の白矢印で示した農地）を選んだ。農地 F1 が属する場所の傾斜角は約 12° である。この農地は溜井地区内でも高標高（約 600m）に位置しており、農地の南側には樹林域が分布している。溜井地区内では樹林域が複雑に入り組んで分布しているため（図 4-1(D)）、農地 F1 と同様の条件下にある農地が多く存在する。

4.2.2 利用した標高データと数値地籍情報

日陰領域の分布推定を行うため、GIS で作成した 5m メッシュ標高値と数値地籍情報を用い、図 4-2 に示す処理を加えて水田や樹林域の存在を考慮した標高値データを作成した。なお、数値地籍情報とは、都道府県又は市町村が実施主体となって、国土庁（現国土交通省）が定めた仕様に基づき、地籍簿及び地籍図を数値情

報化したデータである。本研究では旧四国農業試験場研究技術情報科が作成・整備した5mメッシュ標高値(1メッシュの東西幅5.8m×南北幅4.6m)および数値地籍情報データを利用した(藤田ら,2001)。

4.2.3 水田域メッシュの標高補正について

棚田が広がる傾斜地では太陽高度が低い時間に水田法面によって生じる陰が拡がるため、日陰領域の推定では水田法面についても考慮する必要がある。しかし、藤田ら(2001)が作成・整備した標高値は水田の存在を考慮していないため、法面による遮蔽を推定できない。そこで、数値地籍情報を利用して、水田一筆内の標高を水田の中心点と同じ値とする補正を行うことで法面を表現した。

4.2.4 農地に隣接する林縁部メッシュの標高推定

樹林域メッシュについては、水田に関する標高補正と同様の処理方法を用いて標高補正を行った。数値地籍上の地目が山林・保安林として登録されている領域に該当する5mメッシュを補正の対象とした。補正のため、対象とする樹林域の一部で樹高の測定を行った。樹高測定を行った領域Sを図4-1(E)上に白いメッシュ

で示した。領域 S はスギおよびヒノキの混合林となっている。この領域に存在する樹木（31 本）の樹高をレーザー距離計とクリノメータを用いて実測した。なお、検証地点とした農地（図 4-1(E) の F1)では、年間を通して、太陽高度が最も高い時間帯には樹林域の林縁部によって直達日射が遮蔽される。

林縁部領域については、測定した樹木が含まれる 5m メッシュを、航空写真と方位磁針を用いた現地調査により特定し、そのメッシュの標高値に樹高の測定値を加えた。一つの 5m メッシュ内に樹高が異なる樹木が複数存在する場合は、高い方の樹高を加えた。林縁部領域には樹高が 16m と 18m の樹木が多く、また、16m と 18m の樹木が隣接して存在している場所が多い。このため、18m が付加されるメッシュが多い結果となった。領域 S 以外の樹林域については、林縁部領域内で測定した樹高の平均値（18m）を付与した。

4.2.5 微地形や樹林域の影響を考慮した日陰領域の推定

日陰領域の推定では、対象域周辺の地形や樹林域によって形成される仰角分布と毎分の太陽位置を比較して、遮蔽の有無を推定した。具体的には、推定対象地域内の全 5m メッシュについて、

各メッシュを視点として、周辺の地形により形成される仰角を周辺 72 方位（5°間隔）について計算した。この計算では、黒瀬ら（1991）の計算方法に従って半径 10km 圏内に存在する全ての地形について数値地図 250mメッシュ標高および 5m メッシュ標高値（補正後の値）を用いて仰角分布を求めた。次に、各 5m メッシュから見た周辺仰角と太陽位置を比較して日陰領域分布を推定した。具体的には、解析対象時刻における太陽方位と太陽高度を特定し、各 5m メッシュから見た周辺仰角より低い位置に太陽が位置する場合には当該メッシュが日陰になっていると判断した。全ての日陰状態メッシュを抽出して日陰領域分布図とした。なお、太陽赤緯の算出には Lunde(1980)の式を用いた。

4.2.6 写真画像を用いた日陰領域面積の計算

推定した日陰領域の検証を行うため、農地 F1（図 4-1(E)）上の日陰分布を正午～日没にデジタルカメラを用いて多方向から撮影した。秋から冬に移行する時期の例として 11 月 8 日、太陽高度が最も低い冬至期の例として 12 月 28 日を選んだ。各日に撮影した写真画像から日陰領域の境界線が明瞭で、同時刻（12 時 50 分）に撮影された画像を検証に用いた。なお、12 時 50 分における陰領域の南方向への伸長状況は南中時とは大

きくは異なる。

次に、数値地籍情報上に記録された農地 F1 (図 4-1(E)) の筆界座標データを 3 次元画像処理ソフトに読み込んだ。読み込んだ筆界座標データを 3D カメラ機能により視点、焦点距離等を調節して表示 (図 4-2 右上) し、現地で撮影した写真 (図 4-2 左下) と重ねつつ、日陰領域の境界線をトレースした (図 4-3 下)。図 4-3 (上) に示した日陰の境界線の座標データを GIS に読み込んで日陰領域の面積を計算した。

4.2.7 日陰領域の面積推定誤差の発生要因の解析

推定した日陰領域の面積と写真画像から算出した面積との比較結果に含まれる推定誤差の発生要因を明らかにするため、図 4-4 上に□で示したメッシュ R を検証点として、クリノメータを用いて周辺仰角分布を測定し、計算による推定値と比較した。周辺仰角分布の測定では、太陽の南中方位に基づいて真南方向を特定し、さらに、方位磁針と LaserAce 300 (Timbertech 社製のレーザー測距儀) のデジタルコンパス機能を用いて、5° 間隔で方位を特定し、視準スコープで特定した稜線や樹冠部の仰角をクリノメータで測定した。仰角分布の推定値と実測値を比較して、仰角の方位別の誤差と R 地点における日陰分布の推定誤差の関係について幾何学的に検証した。

4.2.8 遮蔽される直達日射量の分布状況のシミュレーション計算

樹林域の影響を補正済みの 5m メッシュ標高値を用いて、3 章の 3.2 節において計算した日(1999 年 11 月 10 日)の日射変化を用いて、農地 F1(図 4-1(E))周辺において遮蔽される直達日射量の分布を計算した。なお、この計算では地形による遮蔽と樹林域による遮蔽を区別して行い、両者を比較した。

4.2.9 樹木伐採を仮定した場合の日陰領域分布変化のシミュレーション

樹林域の影響を補正済みの 5m メッシュ標高値を用いて、特定の領域内についてのみ、樹高の値を付加しないで地形のみによる標高値とした場合の遮蔽状況をシミュレーション計算した。すなわち、樹木伐採による日陰領域の減少効果を試算した。解析領域として、図 4-9 上の領域 R1 を選び、時期として冬至を選んだ。



写真 4-1. 直達日射が著しく遮蔽される花き農家ハウス

(A)西側から撮影, (B)内部-南半分

2001年12月9日 12:00~12:30 撮影 高知県土佐町

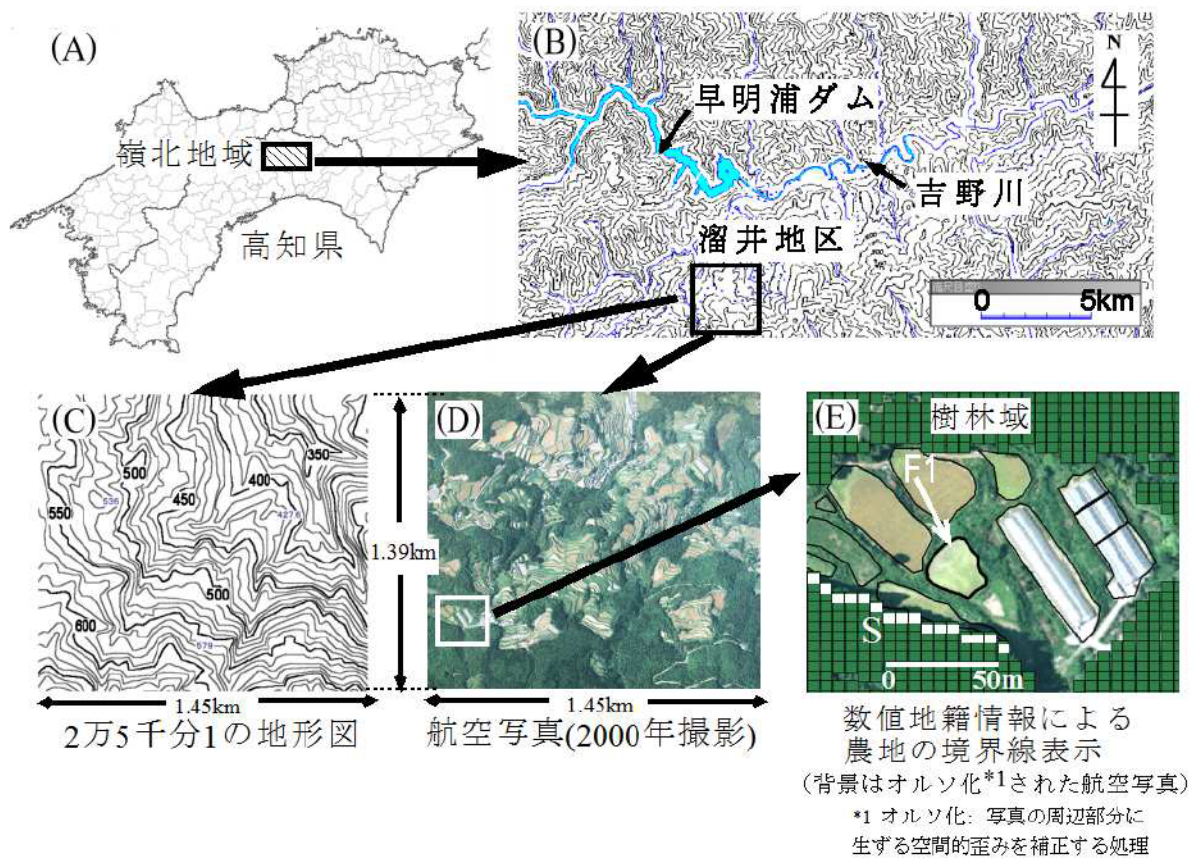


図 4-1. 解析対象とした農地の場所と周辺の地形及び地理状況

F1 は日陰領域分布の推定結果を検証した農地



図 4-2. 次元 CG モデリングソフトによる写真画像の解析

11月8日 12:50 撮影画像を解析

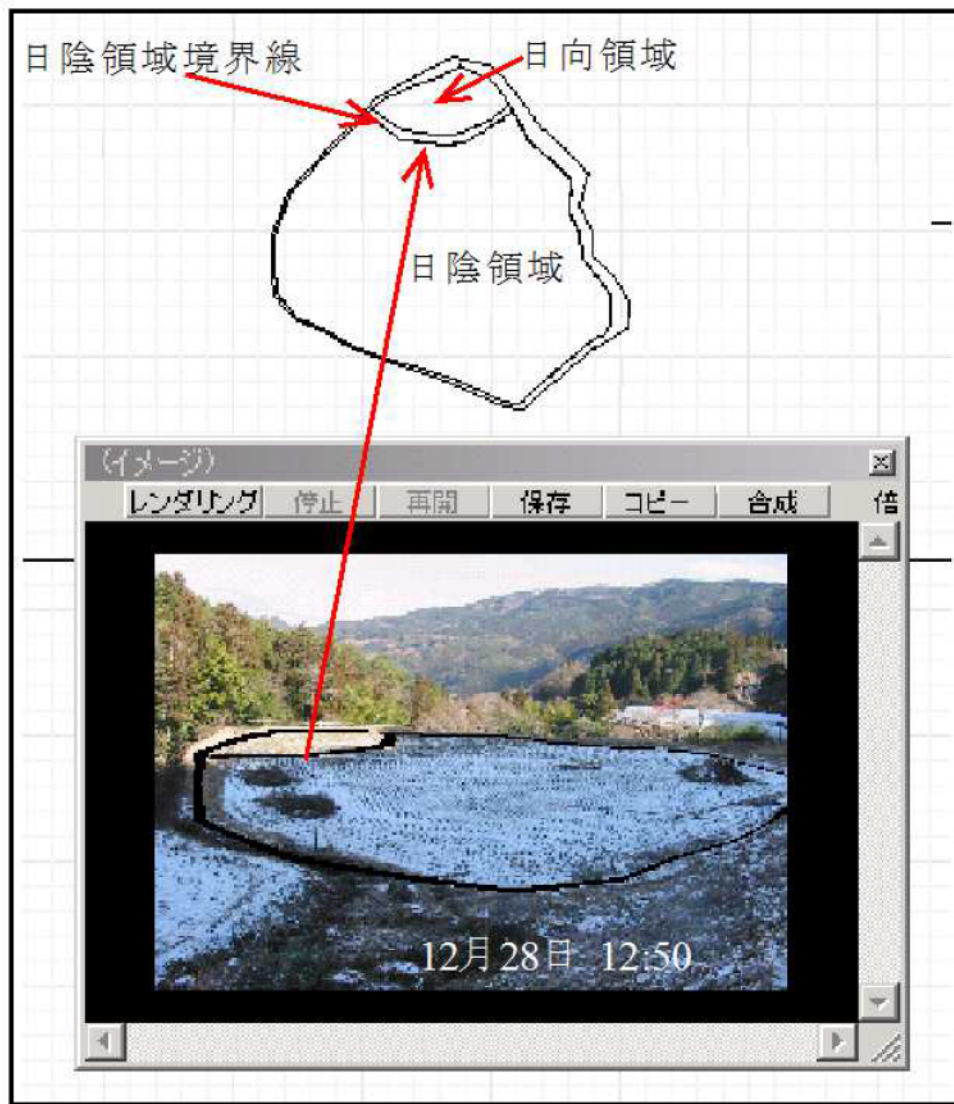


図 4-3. 12月28日撮影画像の解析結果

4.3 結果

4.3.1 日陰領域の推定結果と誤差の発生要因

日陰領域の推定結果を検証した。推定した日陰領域の分布と写真画像から読み取った日陰領域の境界線(図(4-3(上)))とを GIS 上で重ねた(図 4-4)。11月8日の結果を図 4-4 (A)に、12月28日の結果を図 4-4 (B)に示した。それぞれ、12時50分における日陰領域の分布図である。

図 4-4 では、樹林域の存在とは無関係に(地形のみによって)遮蔽されるメッシュを×で表示している。図 4-4 中に存在する×の多くは法面によって生じる日陰である。一方、樹林域の存在を仮定した場合にのみ遮蔽されるメッシュについてはグレーで表示した。この農地では太陽の南中高度が最も低い季節(図 4-4 (B))にあっても、地形の効果のみによる日陰領域が少ない。この農地における日陰領域は主として樹林域による遮蔽によって形成されている。グレーで示した領域のエッジは、写真画像から求めた日陰領域の境界線と一致する部分もあるが、2メッシュ程度ずれている部分も存在する。

農地 F1 全体の面積(500 m²)のうち、日陰と判定された面積は 213 m²(11月8日)、414 m²(12月28日)であった。日陰面積は、遮蔽されるメッシュ個数から求めた。また、農地をはみ出す部分については 0.5 個のメッシ

ユとして概算した一方、写真画像から求めた日陰領域の面積は 284 m²(11月 8 日), 459 m²(12 月 28 日)であった。推定誤差はそれぞれ-71 m²(11 月 8 日), -45 m²(12 月 28 日)となり、日陰領域を過小評価していた。5m メッシュ 1 個の面積が約 26.6 m²であることから、推定値にはメッシュ 2~3 個に相当する誤差が含まれていた。

周辺仰角分布の推定値と実測値および太陽軌道を図 4-5 に示した。推定値と実測値はおおむね一致しているが、南方向の実測値については推定値より最大で約 6° 高い値を示していた。この差が生じる理由について、現地での測量結果に基づいて解析した結果、樹林域や農地のベクターマップを 5m メッシュデータに変換する過程(ベクターラスタ変換)で生じるずれが原因であった。検証点 R は図 4-6 上の点 P1 に位置する樹木によって遮蔽されるが、点 P1 は 5m メッシュマップ上では農地(グレーで示す領域)に属するメッシュ内に存在し、樹林は存在しないと仮定されてしまう。また、点 P1 が属するメッシュ内には水平な田面と斜面が共に存在し、樹木の根元部は田面より 3~5m 高い場所に位置している。このため、これらのデータから計算される仰角と実際の仰角は異なる値を示す結果となる。ベクターラスタ変換による同様のずれは、点 P2, P3 にも存在し、これらも推定誤差の発生要因となっている。以上の検証結果

から、樹林域や農地の筆界をベクターラスター変換して 5m メッシュ化する過程が、本研究で開発した手法の精度に関する重要な制限要因となっていることがわかった。この地域には 2~3 個の 5m メッシュで表現されるようなサイズの農地も存在する。そのような農地が多数分布するような地域については、より細密なメッシュの利用が必要である。しかし、本研究における検証領域に関しては、開発した手法を用いることにより、農地における直達日射の遮蔽状況を①農地の全てが遮蔽される、②農地の一部が遮蔽される、③全く遮蔽されない等に分類することは可能であると判断した。

4.3.2 遮蔽される直達日射量の分布状況のシミュレーション結果

第 3 章で用いた遮蔽される直達日射量を計算する方法を図 4-1(E)の領域に適用し、遮蔽される直達日射量の分布図を作成した結果を図 4-7 に示した。さらに、図 4-7 上に示した S1~S2 の直線上に存在する各メッシュにおける遮蔽量を図 4-8 に遮蔽要因別に示した。地点 S1 からの距離が 0~20m の領域では、樹林域に起因する遮蔽の比率が高く、また、10MJ 程度の直達日射が遮蔽されていた。直達日射がほとんど遮蔽されるような場所にも農地は存在している(図 4-7 上の S1 地点)。第 3 章において、仮想的な遮蔽物体を仮定し、遮蔽物の直下で 10MJ 程度の遮蔽が生じる

事を予想した。本章での解析結果は、実際の傾斜地域において秋冬季に水平面直達日射量の 90%程度が遮蔽される農地が存在するという予想が立証された。

4.3.3 樹木伐採を仮定した場合の陰領域分布変化のシミュレーション結果

図 4-9 に、農地 F1, F2 周辺の樹林域の一部(領域 R1)を伐採した場合の日陰領域のシミュレーション結果を示す。農地 F1 については日陰領域が減少するが、農地 F2 については伐採後も遮蔽が生じると予想された。伐採を仮定する領域 R1 を変化させることで、最小限の伐採で農地 F1 上の日陰領域が無くなるように R1 の分布域を調整できれば、効率的な伐採計画の立案が可能となる。

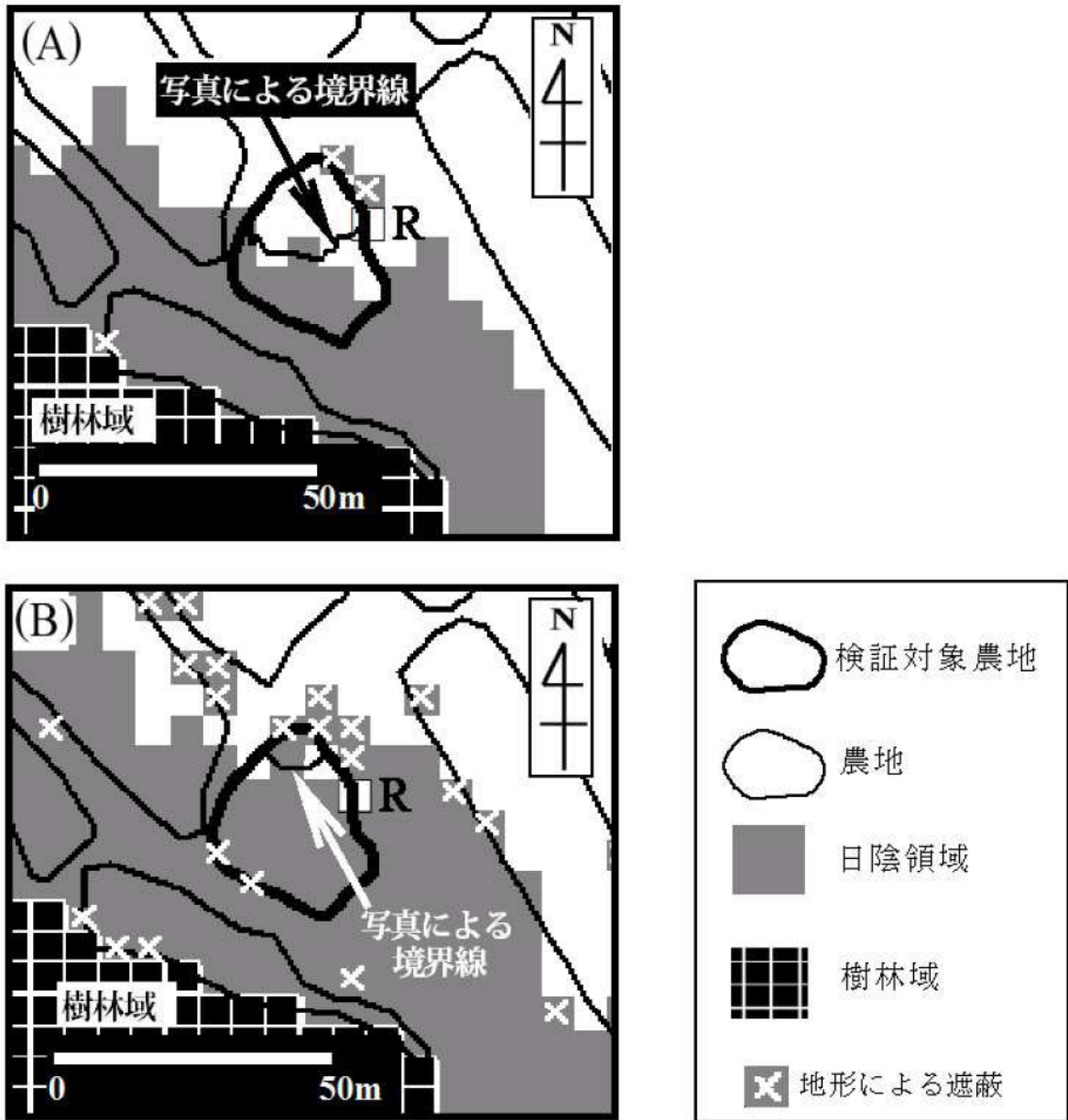


図 4-4. 日陰領域の推定結果の検証

(A) 11月8日 12:50 (B) 12月28日 12:50

R は仰角分布の検証を行った地点

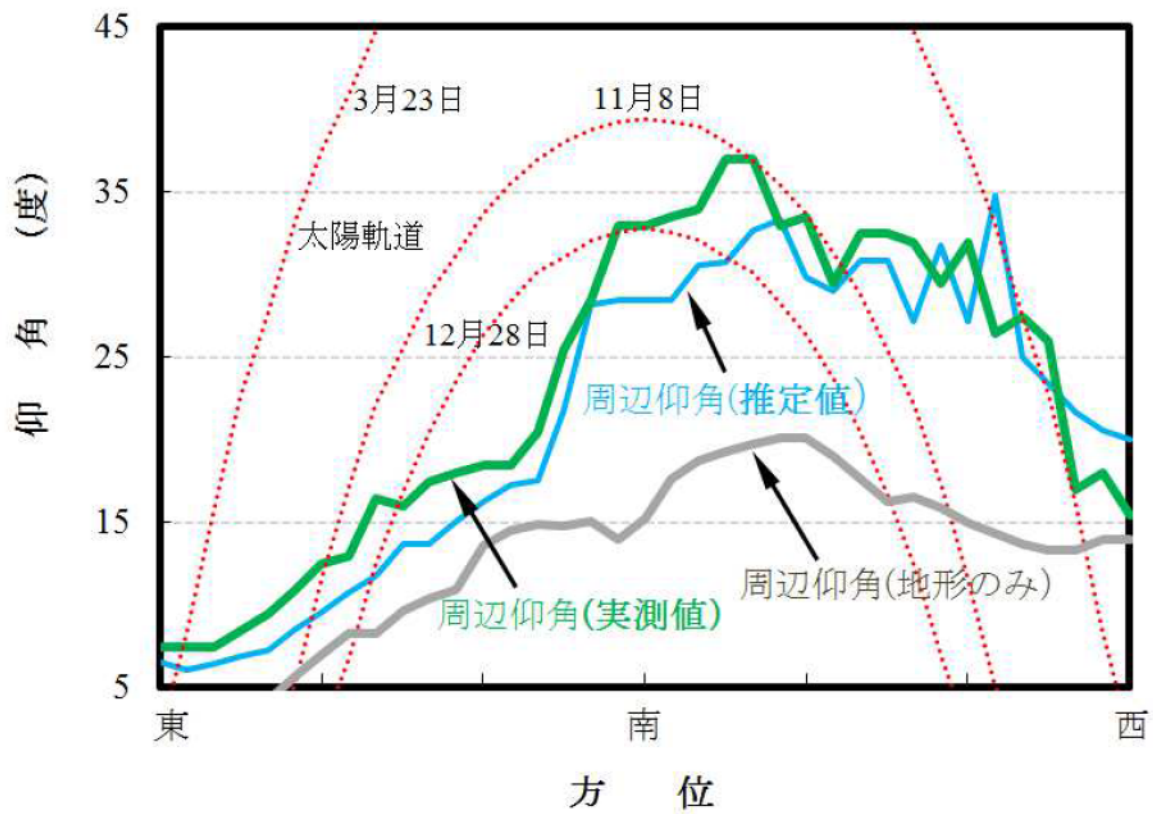


図 4-5. 周辺仰角の方位別分布と太陽軌道 (R 地点)

図 4-4 の R 地点における推定値と実測値

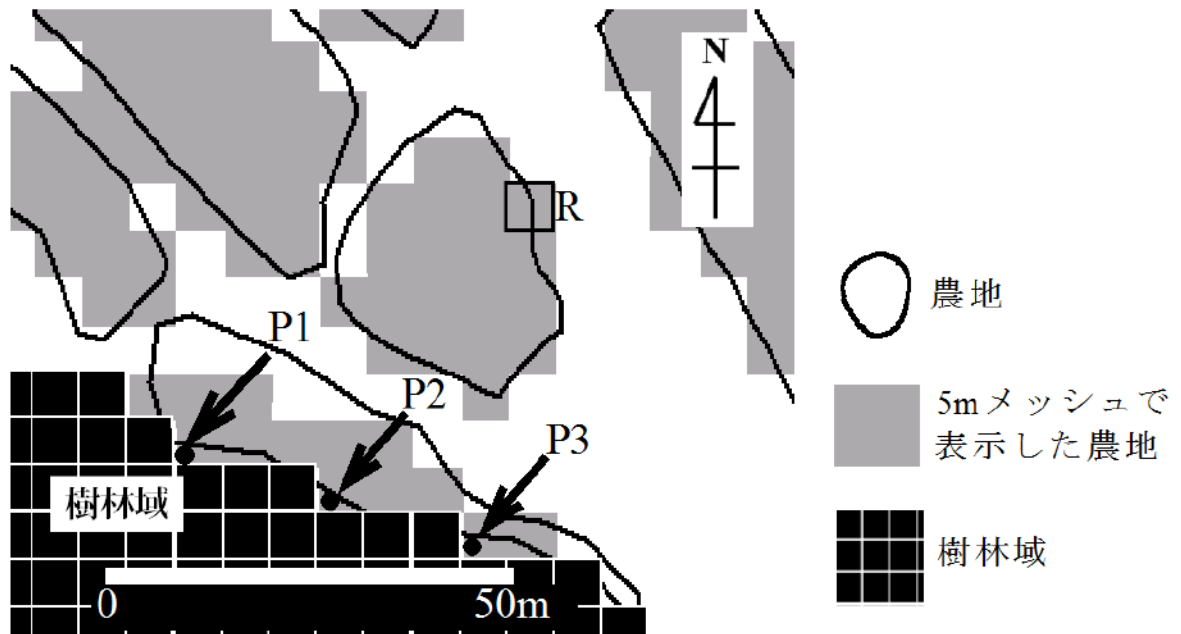


図 4-6. 実際の農地と 5m メッシュ化した農地との境界線の違い

P1,P2,P3 は誤差の原因となっている樹木の位置

R は仰角分布の検証を行った地点

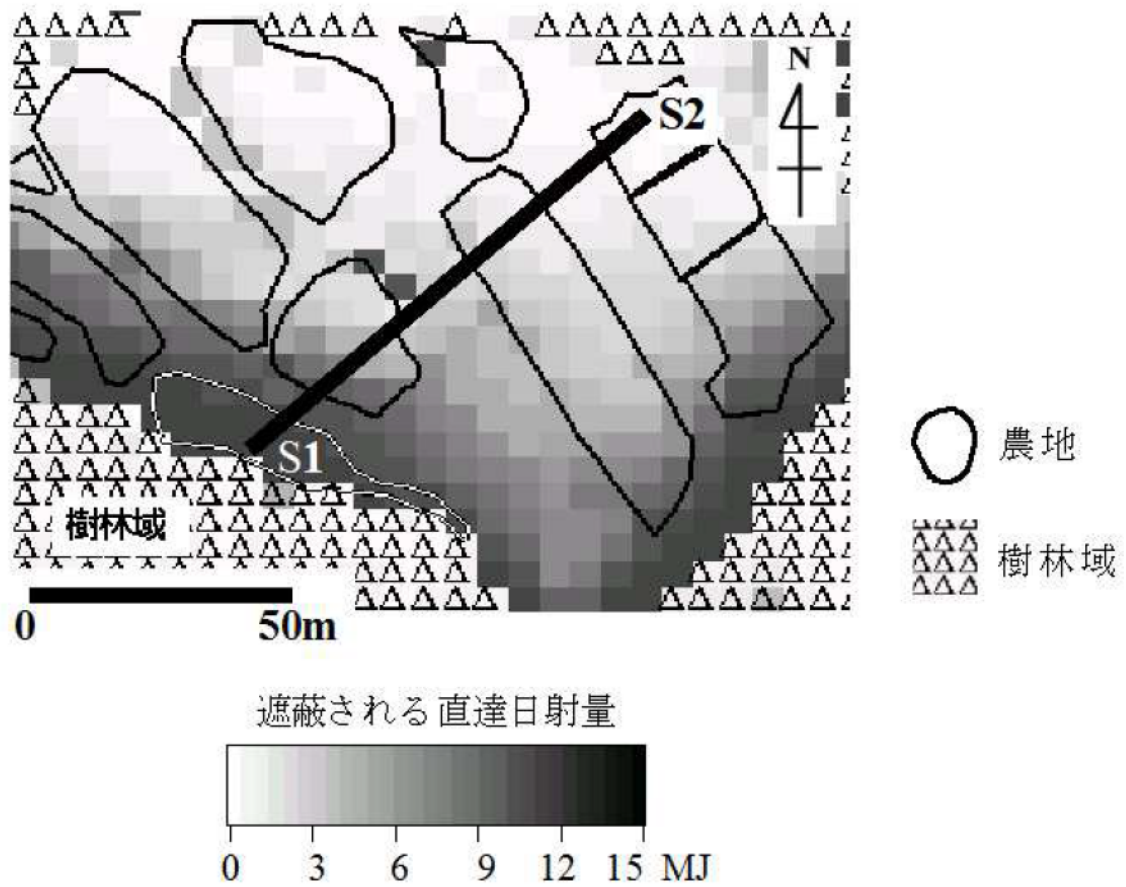


図 4-7. 遮蔽される直達日射量の分布推定マップ

1999年11月10日での計算値

線 S1-S2 は図 4-8 を参照

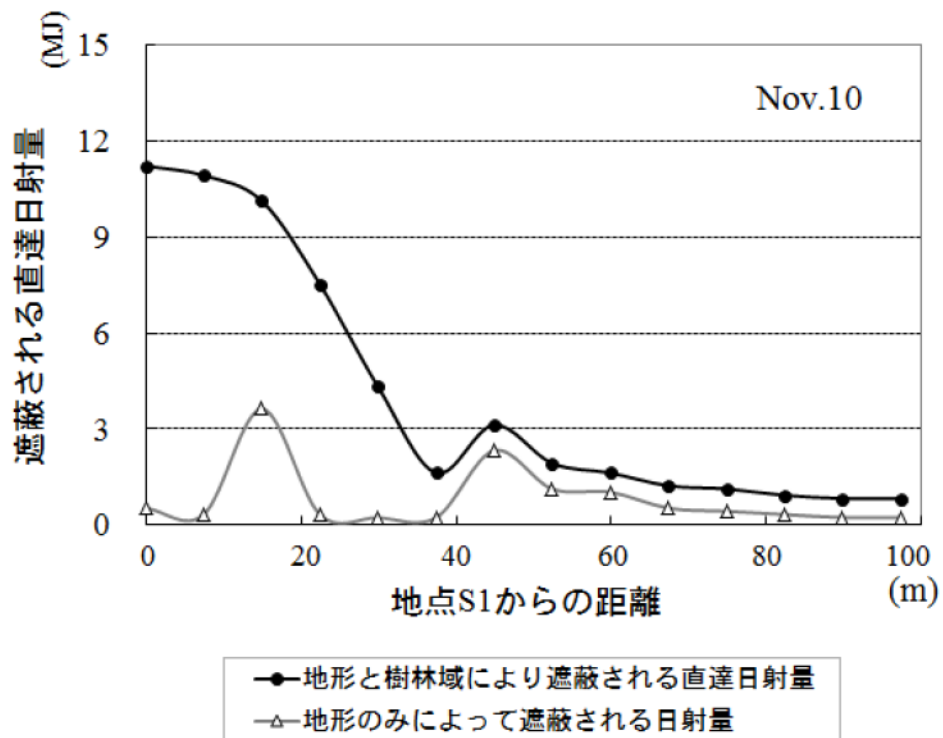


図 4-8. 遮蔽される直達日射量の分布

1999 年 11 月 10 日での計算値

図 4-7 の S1-S2 線上の遮蔽量

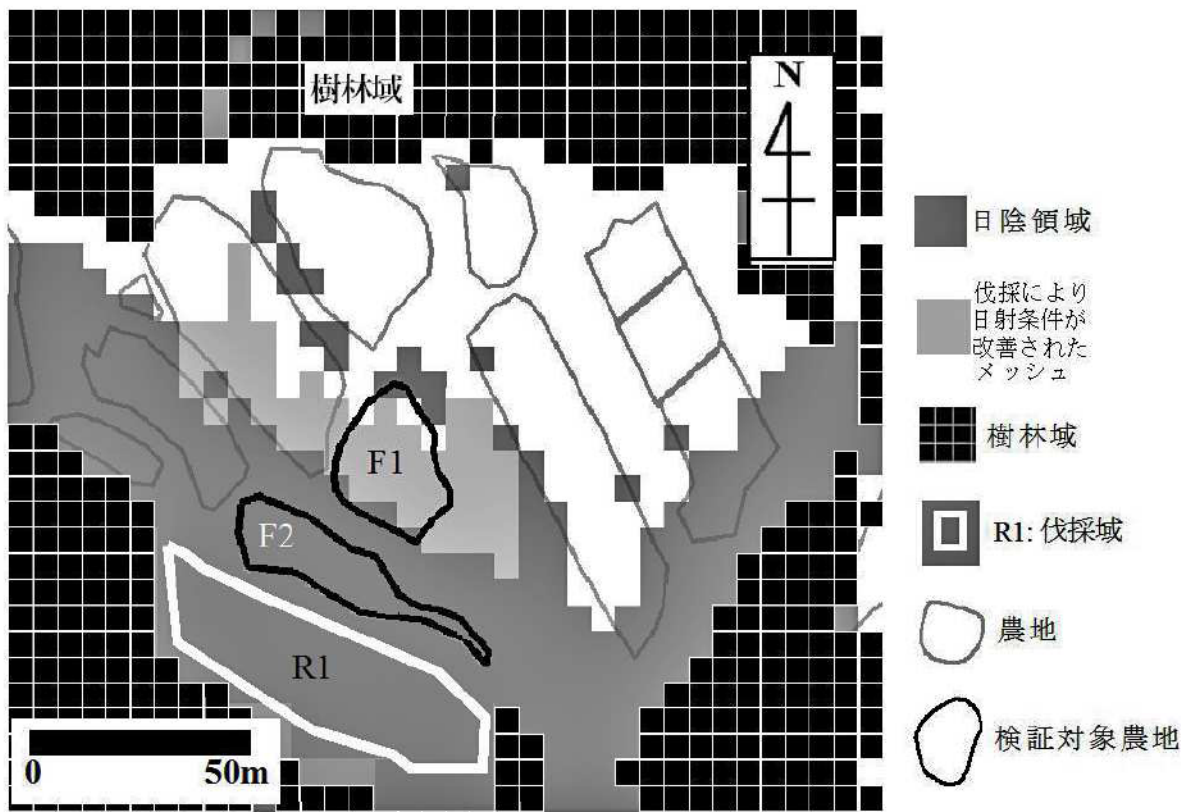


図 4-9. 樹林域の伐採効果のシミュレーション

12月28日 12:50 における計算値

4.4 考察

GIS を農業分野で活用する試みはこれまで多数行われてきた。しかしながら中山間・傾斜地域における農業生産に関して GIS が活用された事例は少ない。藤田ら(2001)は、中山間・傾斜地域における遊休農地の分布状況等を既存の紙媒体上の情報から GIS データベース上の情報に変換して公開した。藤田ら(2001)の試みは当時としては先進的であったが、既存の情報の提供形態を革新したものの、新たな付加価値を有する情報の出力には成功していない。これに対して本章の解析結果は、5m メッシュ標高値や数値地籍情報等のオリジナルデータのみからは得られない日照環境マップ情報の提供を可能にした点でオリジナリティがあると考えられる。

ただし、日射量分布マップについては、国土数値情報の 50m メッシュを用いて黒瀬ら(1999)が開発した日射環境分布マップ等が既に開発されている。50m メッシュ日射量分布図は、マップと農地との対応関係が明瞭ではないという問題点が、自治体の農業試験研究機関から指摘されていた。本研究を開始した理由の一つに現場で使えるマップ作成への要望が背景として存在する。このため、本章で提案した解析手法では GIS で作成した 5m メッシュを用いて、農地一筆単位での日射環境評価を可能

とした。作成した日照環境分布図と農地一筆との対応関係が明示的になった結果、各農地における日射量の測定結果と既存の 50m メッシュ日射環境分布マップの推定値の間に大きな誤差が存在することが明らかとなった。

この誤差について本章では、農地における日陰領域の分布推定の実測結果に基づいて、誤差の大部分が樹林域の存在により発生していることを明らかにした。

4.5 結論

本章では、北向き斜面上の農地において、周辺の地形及び樹林域によって直達日射が遮蔽される領域を 5m メッシュ標高値と数値地籍情報を用いて推定する手法を開発した。開発した手法を用いて、高知県の中山間地域に位置する傾斜地農地上で樹林域に近接した農地に入射する直達日射を遮蔽する要因を明らかにした。この結果、日陰領域の大部分が農地に接する樹林域によって形成されていることがわかった。そうした農地については、樹林域の伐採が有効な改善策となることをシミュレーション結果として提示した。

第 5 章

盆地霧による日射の遮蔽がおこる地域の 抽出手法の開発

5.1 背景と目的

日射が遮蔽される要因に関しては、第3章や第4章で検討した樹林域等の地物の他に、気象的な要因による遮蔽が存在する。特に、中山間・傾斜地域においては秋季に霧が頻繁に発生する地域があり、霧による日射の遮蔽を無視できない。その影響を評価するためには、まず、霧が発生する地域を正確に特定する必要がある。しかしながら、個別の地域における霧発生域や発生状況を解析した研究報告は数多いものの、地域全体として統一的な基準で霧の発生場所や発生状況についてメッシュを用いて評価した研究事例はない。三次や大洲等の一部の AMeDAS 観測点の日照時間データには、霧による顕著な日照時間の明瞭な減衰が認められるが、その他の観測点については、朝の日照時間の短縮が雲と霧のいずれによって生じているのか不明である。雲による遮蔽である場合は、既存の日照時間-日射量変換手法を用いて AMeDAS 日照時間からの日射量推定が可能と考えられるが、霧による遮蔽については既存の日照時間-日射量変換手法をそのまま適用すべきではないと予想される。このため、中山間・傾斜地域における日射量分布マップ作成に際しては、まず霧の発生域を明らかにする必要があるが、霧の発生域の抽出方法は、例えば宮田(1994)のように盆地地形の地域を抽出する等の方法しか存在しな

った。そこで、本研究では気温変化の特徴から霧が発生する地域を抽出する手法を検討した。霧が発生すると日の出後の気温上昇が抑制され、霧の消散とともに気温が急上昇する。この特徴的な気温上昇過程を定量的に抽出して、霧発生の有無や発生状況を推定・評価する手法を検討した。

5.2 方法

5.2.1 解析に用いた気温の近似手法

霧が発生している日は、日の出後の気温上昇が遅れる。この遅れを数値化するためには、気温上昇の時間遅れが直接的に近似式中に時間の単位で表現されるような関数を用いて気温上昇過程を近似する必要がある。そこで、S字型関数の代表例であり、統計力学分野で最も基礎的な関数である Fermi-Dirac 分布関数(1式)を用いて、正規化された時別平均値における気温上昇を近似した。この関数では式の中に時間遅れの値が α というパラメータで直接表現されている。

$$f(t) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta \times (t - \alpha))} \quad (1)$$

ここで、 t は時刻、 α は時間遅れ要素、 β は気温上昇の集中度を意味する。この S 字型関数を用いることによって、時別平均気温の上昇過程の良好な近似が可能となり、霧発生の影響評価が可能になる。この関数は変数 t の増加に伴い関数値が 0 から単調に増加し、1 に漸近する(図 5-1)。

図 5-1 では、 α 、 β の差が明瞭となるようにした 4 通りの場合について形状を示した。この関数を用いることにより、気温上昇の遅れを二つのタイプに分類することが可能となる。第一のタイプは、気温上昇が開始する時刻の単純な「時間遅れ」によるもので、その大きさは係数 α で表現される。第二のタイプは、ゆっくりとした時間分散的な気温上昇に起因する遅れである。この大きさは係数 β で表現される。

α の値が単位(時刻)を有する値であるのに対して、 β は「正規化された気温上昇過程における上昇の傾斜に比例する値」を意味する。正規化しているため、 β の大小は気温の上昇速度($^{\circ}\text{C}/\text{Hour}$)とは一致しないため、具体的に観測可能な α 値と比較して直観的な理解が難しい。 β の値が小さい観測点でも日較差が大きい場合は、気温上昇速度は大きくなる。本研究では、 α の値が霧発生と何らかの関係を有していると考え、 α の値を中心に解析を進めた。

5.2.2 解析対象地域と利用した気象データ

1)解析対象地域

解析対象として、中国、四国の各地域内に設置された AMeDAS 観測点を選択した。また、本章の解析では、近畿地域に関する解析も対象域に加えた。解析対象地域内には霧どころとして知られる地域が多く存在し、そうした霧発生地域に含まれる津山盆地や豊岡盆地では視程値の観測も行われている。過去に霧の観測・解析が行われた場所として、三次(宮田, 1994), 大洲(深石, 1992), (黒瀬ら, 1998), 高梁(片山ら, 2003), 長浜(深石, 1992), 久世(藤井ら, 1999), 本山(Sato *et al.*, 2005)等の地域が存在する。

2)解析に用いた気温データ

気象庁による「地域気象観測所一覧」を参考として、近畿・中国・四国地域内の 152AMeDAS 観測点を解析対象として選んだ。解析対象期間は 1980 年～2006 年であり、時別の気温データを用いて解析を行った。なお、豊岡や津山における視程値に関する解析では、2007 年～2011 年の気温データも利用した。

3)霧発生の判別に用いた視程データ

霧は水平視程が 1km 未満の状態として定義されており、視程値データが存在する観測点については、数値に基づいて霧発生の識別が可能であ

る。本研究の解析対象地域内に位置し秋季に盆地霧が多発する地域の中で視程値データが存在するのは豊岡(兵庫県), 津山(岡山県)の2観測点のみである。両地点ともに, 1989年以降のデータが入手可能である。ただし, 両観測点とも2002年(津山), 2006年(豊岡)以前は, 9時, 15時, (一部の期間は21時)における視程値データのみが入手可能であるため, 1989-2001年(津山), 1989-2005年(豊岡)の期間については, 霧発生日数の解析では, 午前9時における視程値が1km未満の日を霧発生日とした。

5.2.3 α 値の計算に必要なデータ個数について

日単位の気温変化は, 気温の上昇過程が滑らかではなく, そうした日についてはS字型関数ではうまく近似できない。しかしながら, 多数の日変化データを時別平均化することで, S字型関数で良好な近似が可能となる。このため, 時別平均化に必要なデータ個数の見積りが重要となる。時別平均値の作成に用いるデータ数が少ない場合には, 特異な気温上昇過程を示す日のデータが含まれることにより, α 値がその特異的データに強く支配される確率が高くなる。この点について, 具体的事例に基づいて検証を行うため, 過去の27年分の気温データで構成される母集団から, ランダムにデータを x 個だけ抽出・平均化して α を計算する作業を繰り返して, どの程度分散するかを解析した。平均化に用いるデー

データ数を増やすことにより、 α の標準偏差が小さくなることを、ランダムサンプリングによって確認し、本研究における適切な解析を可能にするデータ個数を明らかにした。

5.2.4 α 値と霧発生日数との関係

豊岡，津山の各観測点について，年次別に霧発生日数と α 値の関係を調べた。解析には1989年～2011年の23年分のデータを使用した。午前9時の視程値が1km未満の日を霧発生日として年次別にカウントし，11月の霧発生日数と α 値の関係を解析した。

霧発生日数の違いが日照時間に及ぼす影響を明らかにするため，津山観測点における11月の霧発生日数が最も多い1990年と最も少ない2002年を選んで，時刻別の日照時間を比較した。1990年の霧発生日数は15日であり，2002年は2日である。

5.2.5 α 値と霧の発生時間数との関係

津山観測点における時別の視程値の変化と α 値の関係を解析した。2002年～2011年の11月の300日分の時別視程値データと時別気温データのうち，視程値に欠測値が含まれていない285日分のデータを用いた。時別視程値データを用いて，午前6時～12時の間に視程値が1km未満となる時間数をカウントして，その時間数の多少により8組のグループに

分け、各グループの特別気温データ群に対する α 値を求めて比較した。

5.2.6 α 値に基づく霧発生地域の抽出

霧の多発する月として 10 月と 11 月を選んだ。1980 年～2006 年の 27 年間の気温データから、10 月と 11 月の中旬の 10 日間を抽出して、270 個(10days×27year)のデータから α 値を計算した。

過去に霧の観測・解析が行われ、研究報告書がある地域を霧の発生地域とした。解析対象地域に含まれる 152 箇所の AMeDAS 観測点について α 値を計算し、霧の発生地域との関係を解析した。

5.3 結果

5.3.1 気温変化の近似に必要なデータ数

特別平均気温の算出に用いるデータ個数を変えつつ、ランダムサンプリングによる α 値の算出を繰り返した結果、 α の変動幅は用いるデータ個数の増加とともに小さくなり、一定の値に収束した。30 個程度の気温データを用いることにより、 α の標準偏差は 0.2 以内(12 分以内)に収束した。この変動幅は、サンプルされたデータに特異的な気温変化を示す日が多く含まれている場合に増大しやすい。特異的な気温変化を示す日は、気温の特別平均値の波形を歪め、 α 値に大きな影響を与えやすいが、

30 個のデータを用いることで、1 個の特異データの影響度は $1/30$ に低下する。年次間で月別に α 値の比較を行う場合、利用可能なデータ数は 30(又は 31)個/年が上限となるが、30 個程度でも α 値の月別年次間比較は可能だと考える。なお、本研究では、 α 値の地域性や季節性に関する解析では 270 個のデータ(27 年分)を用いており、三次における α の変動幅(標準偏差)は 0.1(6 分)以下である。この変動幅は、本研究の主たる解析目的である霧発生域の抽出においては、三次(11 月の $\alpha=10.97$)と全観測点の平均値(11 月の $\alpha=9.52$)の差である 1.45(1 時間 27 分)よりはるかに小さいため、 α 値の地域性に関する解析は可能であると判断した。また、 β の変動幅についても、 α の場合と同じ程度のデータ数で収束した。

5.3.2 霧発生日数と α 値の関係

豊岡、津山の両観測点について、年次別の霧発生日数と α 値との関係を図 5-2 に示す。両地点について、霧発生日数と α 値に相関関係が認められ、霧発生日数の多い年ほど α 値が大きくなった。この結果は、年によって α の値は変動し、変動の主要因が霧の発生日数であることを示唆している。ただし、霧の発生日数が同じでも、豊岡と津山では α の値に 0.3 程度(18 分程度)の差が認められる。この差の原因として豊岡と津山の地形条件や気象条件の違いが考えられるが、原因の特定には至っていない。

い。

5.3.3 霧の発生時間数が α 値に及ぼす影響

表 5-1 に、午前 6 時～12 時における霧の発生時間数を基準としたグルーピングによる α 値の変化を示す。表 5-1 から、 α 値や β 値に関して以下の 3 つの事実が明らかとなった。

①午前 5 時以前を含めて霧が全く発生しない日の α 値は 9.77 で、他の霧発生日のグループの α 値より明らかに小さい。また、午前 6 時～12 時の間の霧発生時間数が増加すると霧の消散時刻も遅くなり、霧発生時間数の増加に伴って α 値が増加する。これらの結果は、 α 値に基づいて霧発生域を抽出する上で重要であるが、その一方で前節の結果から霧発生日数の大小も α 値を変化させることが明らかとなっている。 α 値を基準として霧の発生域を抽出するという視点では、霧の発生日数と発生後の継続時間という二つのファクターが分離できていないことを意味しており、両要因を区別する方法は現時点では未解決である。

②午前 6 時～12 時の間に霧が発生しない日について、午前 5 時以前の霧発生の有無により、さらに二つのグループ、A.霧が前日午後以降全く発生しない日、B.午前 6 時～12 時の間に霧が発生しないが午前 5 時以前に少なくとも 1 時間は発生した日の 2 グループに分類した場合、両グルー

ブ間の α 値の差は小さい。この結果は、霧が日の出前に消散するような場所にある観測点については、 α 値では抽出が難しいことを意味している。

③各グループ間の β 値の差は小さい。解析対象地域において、 β 値の最小地点と最大地点のレンジが 0.89~1.66 であるのに対して、表 5-1 に示した各グループ間の β 値の差は 0.16 以下である。

以上の 3 つの結果のうち、①および②の結果は、午前 6 時~12 時の間に作用する何らかの機構が α 値の増大に関係していることを示している。具体的には、霧による日の出後の直達日射の遮蔽が、霧発生地域における気温上昇の遅れの要因になっているものと考えられる。

5.3.4 霧の発生日数が特別日照時間に及ぼす影響

霧の発生日数が特別日照時間に及ぼす影響の典型的事例を図 5-3(a)に示した。図 5-3(a)では、津山観測点において霧の発生が多かった 1990 年と少なかった 2002 年について、11 月の日照時間の特別平均値を比較している。この両年について 11 月の特別平均気温を計算し、 α 値を算出した結果を図 5-3(b)に示した。霧の発生が多い 1990 年は、夜間に発生した霧が日の出後も消散せず、霧による日射の減衰により午前中の日照時間を短くしている。また、霧の発生によって日の出後の気温上昇が抑制され、

大きい α 値として評価されている。

5.3.5 α に基づく霧発生域の抽出

S 字型関数による近似によって得られた各観測点の α について、各観測点における 11 月の日の出時刻との時間差 $\alpha \cdot Ts$ を計算し、 $\alpha \cdot Ts$ の大きい順に整理して 10 箇所(上位, 下位)を示した結果を表 5-2 に示す。霧どころとして知られる三次や大洲の $\alpha \cdot Ts$ が特に大きく、上位に霧発生地域で知られる地域の観測点が多い。図 5-4 に 11 月の $\alpha \cdot Ts$ の地域分布図を示す。図 5-4 中に●で示した、特に大きな α ($\alpha \cdot Ts > 4.0$)を示した観測点は、三次、大洲である。また、*で示した、大きな α ($\alpha \cdot Ts > 3.5$)を示した観測点は、庄原、高梁、久世、津山、奈義、豊岡、上北山、風屋、木頭、本山、長浜、江川崎、広瀬、川本、加計の 15 観測点である。

これらの観測点のうち、豊岡および津山については秋季に霧が多発していることが視程データから確認できる。また、三次、大洲、庄原、高梁、久世、本山、長浜、加計が位置する地域については、2 章の 2.2 節に記した既存の研究報告で霧発生について解析が行われており、霧の発生域と考える。これらの地点を抽出できたことから、 α に基づく霧発生域の抽出手法では、 $\alpha \cdot Ts > 3.5$ という条件で霧発生域を抽出できる可能性がある。また、図 5-4 中に*で示した観測点のうち、既存の研究報告で

は調査されていない，奈義，上北山，風屋，木頭，江川崎，広瀬，川本についても霧が発生している可能性は高いと考えられる。

β 値については，三次，大洲，高梁，長浜，久世のような霧発生地域とそれ以外の地域に， α のような顕著な差は認められなかった。このため，霧の影響を受ける地域の抽出は α の値に基づいて行った。

本章の 5.3.2～5.3.5 節に示した結果から，表 5-2 に示した 10 月または 11 月の α 値が大きな観測点は霧が発生することにより午前中の日射が減衰させられ，その結果として日の出後の気温上昇が抑制されたと考えられる。すなわち，霧によって日照条件が悪化する地域を α 値に基づいて抽出できる可能性があるものと考えられる。

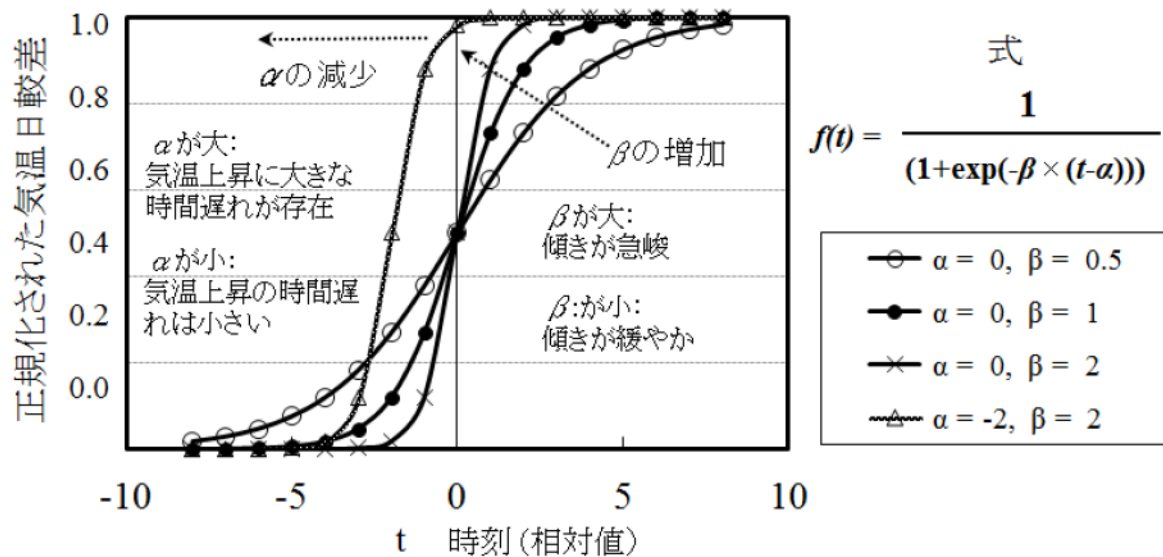


図 5-1. 近似曲線の分布形状

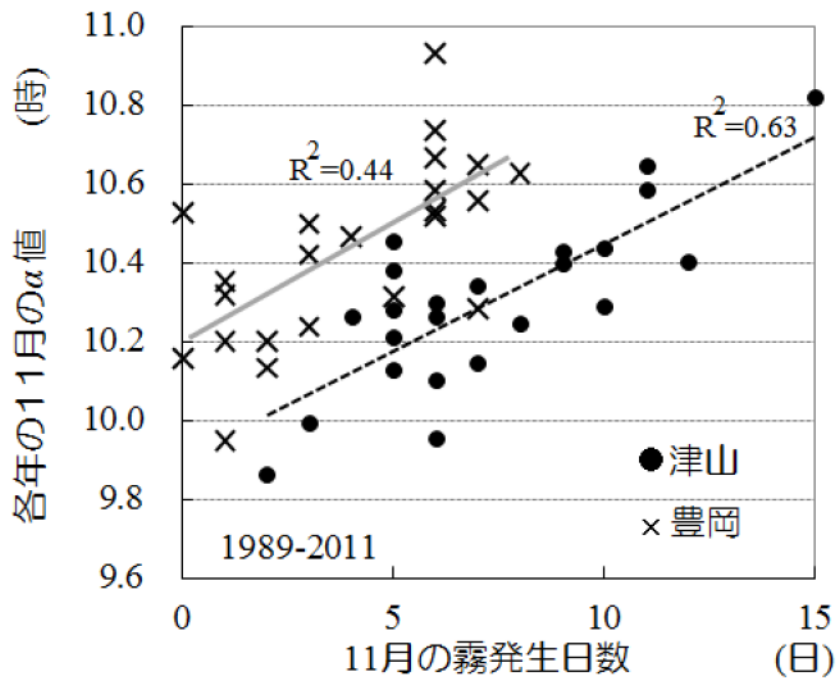


図 5-2. 霧の発生日数と α 値の関係

30 日分のデータから α 値を算出

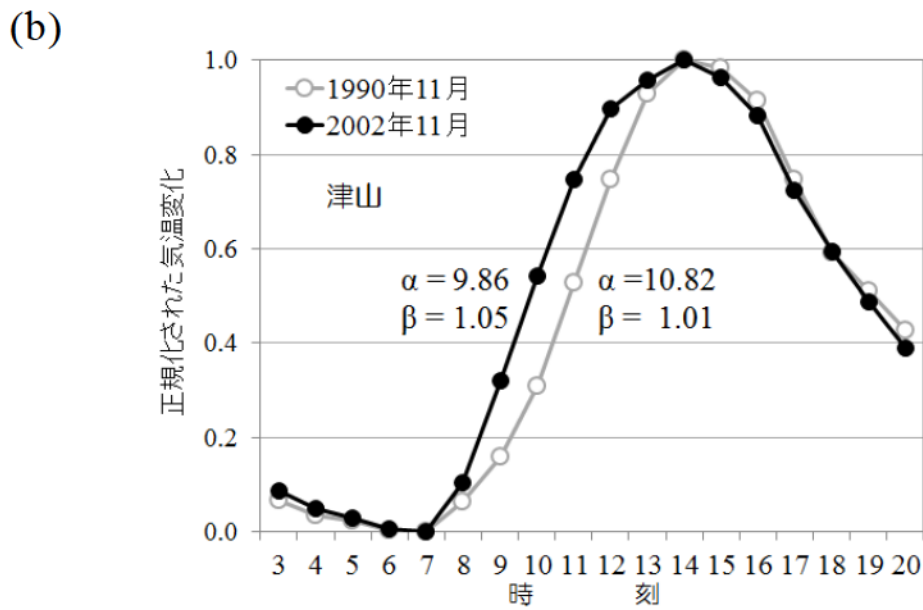
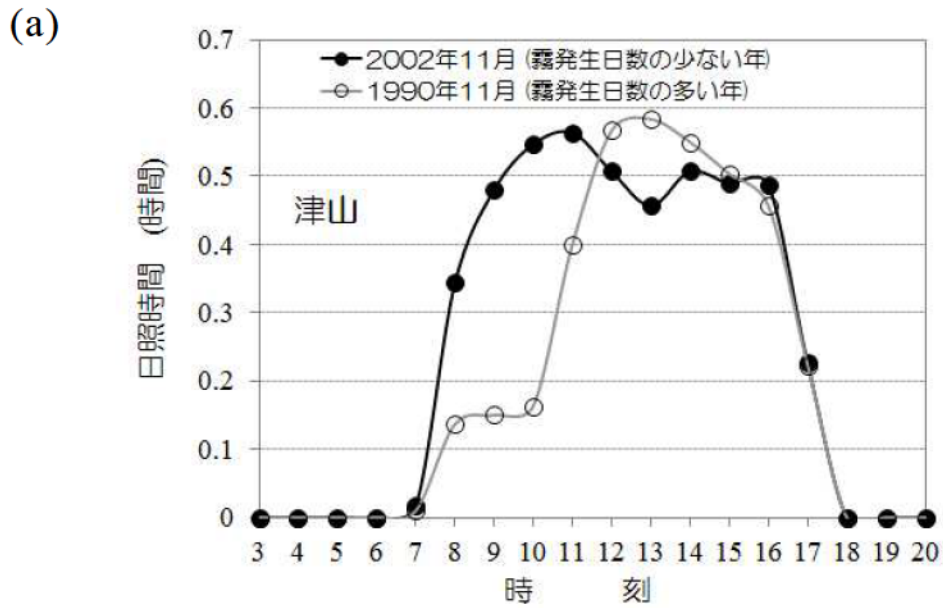


図 5-3. 霧発生日数の違いが日照時間や気温の時別変化に及ぼす影響

(a)時別平均日照時間への影響 (b) 時別平均気温への影響

30 日分のデータから計算

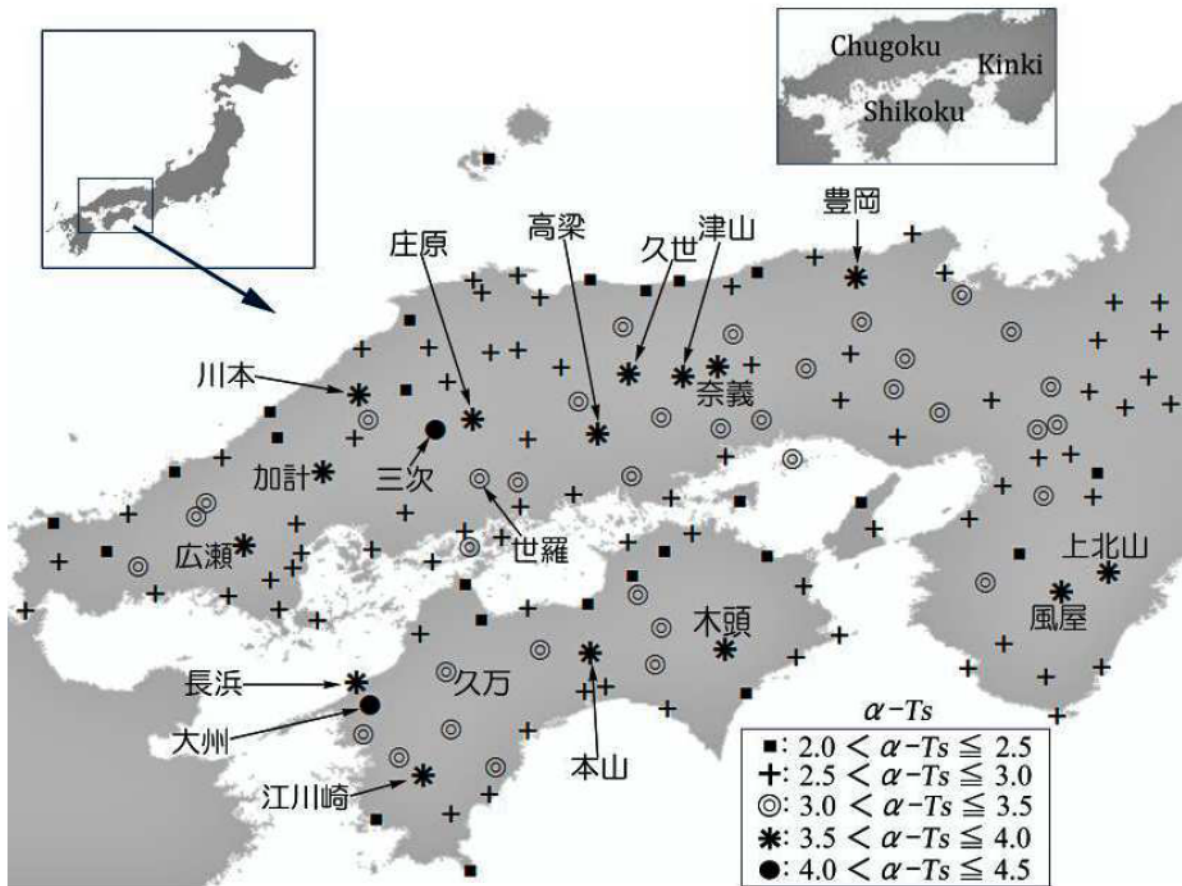


図 5-4. α 値の地域分布(日の出時刻で補正済み)

T_s : 日の出時刻

11 月, 1980-2006

270 日分のデータから α 値を算出



図 5-5. 三次周辺における気温観測点の分布(公的機関)

約 25km×約 25km の範囲

表 5-1. 津山における霧の発生時間数別のグルーピングと各グループの α 値, β 値

6:00-12:00の間で視程値が1km未満になる時間数(時間)	各グループのサンプル日数	霧の消散時刻*1(各グループを構成する各日の消散時刻のうち最多の消散時刻)	各グループの α 値	各グループの β 値
0*3	148	—	9.77	1.06
0*4	17	4 and 6	9.84	1.15
1	26	7	10.15	1.09
2	23	9	10.53	1.09
3	24	9	10.47	1.22
4	33	10	11.00	1.21
5	13	11	11.58	1.12
6	1	12	—*2	—*2

*1: 霧の消散時刻: 視程値が1未満である時間群のうち最も遅い時刻+1として定義した

*2: サンプル日数が少ないため精度の高い近似が困難

*3: 前日午後を含めて霧が全く発生しなかった日

*4: 前日午後～05:00には霧が発生し、6:00-1200には霧が発生しなかった日

表 5-2. 秋季における α の上位・下位 10 観測点 (1980-2006)

10月		11月	
観測点名	$\alpha-T_s$	観測点名	$\alpha-T_s$
三次	4.29	三次	4.30
大洲	4.03	大洲	4.15
高梁	3.95	高梁	3.95
庄原	3.83	長浜	3.91
久世	3.82	豊岡	3.90
豊岡	3.79	庄原	3.82
本山	3.79	本山	3.81
風屋	3.78	津山	3.77
上北山	3.72	江川崎	3.73
長浜	3.71	広瀬	3.62
弥栄	2.45	引田	2.32
高野山	2.44	今治	2.31
内海	2.44	郡家	2.30
岩井	2.43	清水*1	2.29
青谷	2.41	須佐	2.28
浜田	2.39	丹原	2.26
宍喰	2.36	内海	2.20
須佐	2.30	高野山	2.16
下市	2.10	下市	2.14
海士	2.05	海士	2.10
平均	2.99	平均	2.91

*1: 清水 (高知県)

270 日分のデータから作成

5.4 考察

本章では、気温データの変化特性を解析することにより霧発生地域に位置する AMeDAS 観測点を抽出する手法を提案した。霧発生が AMeDAS 気温に及ぼす影響については、宮田(1994)が広島県内の 4 観測点(広島, 三次, 東広島, 高野)について比較し、霧発生により日の出後の気温立ち上がりが遅れることを指摘している。しかしながら、宮田(1994)の解析では広島県内の霧発生地域を抽出するために地形データを用いて盆地地形のみを抽出しているため、盆地地形を示す場所以外の霧発生域が抽出・解析されていない。佐藤(2003)が明らかにしているように、台地状の地形を示す世羅地域においては秋季に霧が多発する。地形に基づく霧発生域の抽出は有効であるものの限界も存在すると考えられる。この点で本章で提案した手法では、図 5-4 に示されるように、世羅における α 値が比較的大きいことも示されており、地形以外の抽出基準の提供に成功していると考えられる。

また、深石(1992)は愛媛県内の大洲盆地および久万盆地に発生する霧について解析し、両者について霧発生日数や継続時間の長期観測結果を明らかにしている。しかしながら、両者の観測期間が異なるため、霧発生日数や継続時間等の相対的な差について明らかにされていない。この点で本章で提案した手法では、図 5-4 に示されるように、大洲と久万に存在する α

値の差を定量的に示すことに成功している。大洲と久万の間に存在する α 値の差が霧発生日数と継続時間のいずれの差に起因するものかは不明であるが、両地点間の霧の発生特性を比較する上で、霧発生日数と継続時間をまとめた α 値のような基準値の存在は有効であると考えられる。

α 値は、気温データのみから計算可能であるため、気温観測が行われている公的機関等に蓄積されたデータを活用し、面的に密な霧発生域の推定も可能になると考えられる。図 5-5 には、三次付近における気温観測点の分布状況を示す。これらの観測点で蓄積されたデータを用いて霧発生の有無を推定することにより、三次における霧発生域の面的な分布を明らかにすることが可能となる。

5.5 結論

本章では、AMeDAS 気温を特別に平均化して作成した気温の特別平年値の上昇過程を正規化して S 字型関数で近似し、近似係数 α 、 β のうち α 値の大小に基づいて、霧発生の有無を判別する手法を提案した。霧の発生日数が多いほど α 値が大きくなり、また、霧発生時間が長いほど α 値が大きくなった。11 月の α 値が特に大きな値を示す観測点の多くは、霧発生域として知られる場所に位置する観測点であった。霧発生日数の

多い年には、午前中の日照時間が短縮する一方、気温から算出した α 値は増加することを示した。

第 6 章

総合考察

6.1 本研究成果の特徴

本研究は、気象学的に未解明な霧の問題に対する解明研究と、既存の地形情報処理手法の改良研究が複合した内容となっている。また、その研究成果も、学術的意義を有する成果と、中山間・傾斜地農業に貢献可能な成果が混在している。本章では学術的意義と農業への貢献を分けて整理して、学術的意義については 6.2 節、農業への貢献については 6.3 節に分けて総合的に考察する。最後に、6.4 節において、本研究が提示した手法をさらにブラッシュアップするために必要な問題点について整理する。

6.2 日射環境評価研究における本研究の意義

地表に到達する日射量は大きく、①大気上端に入射する日射量、②大気中での日射の散乱・減衰、③地形・地物による日射の遮蔽の 3 ステップで決定される。①の大気上端に入射する日射量は季節と緯度により決定され、計算から求めることができる。②は雲や霧、水蒸気などによる日射の散乱・減衰が関係する。③は周辺の山や建物、樹林などによる日射の遮蔽である。太陽光が地表に到達するまでの①から③のステップの中で、②の霧の影響、③の樹林による日射の遮蔽は農耕地の日射環境を

評価する上で重要であるが、研究が遅れていた。本研究では、霧および樹林の影響について研究を行った。

②の霧については、日の出後の気温上昇の遅れを定量的に算出することにより、霧が頻繁に発生している地点の抽出を行った。日照時間や日射量のデータではなく、気温を使って霧の発生地域を抽出する試みはこれまでになく、学術的に意義があると考ええる。また、従来の研究は霧が発生する地域毎に、個別の研究として行われてきた。その結果、霧が発生する地域間での比較は行われてこなかった。本研究では、近畿、中国、四国地域において霧が発生する地点を統一的な基準で抽出しており、霧の影響を地域間で比較することが可能となった。霧の研究に関して新しい解析方法を提示することができたと考ええる。

③の樹林の影響については、樹林による日射の遮蔽量を評価する手法が提示できた。この研究成果は中山間・傾斜地域に位置する農地の日射環境を評価する上で重要な成果と考える。

6.3 中山間・傾斜地農業における本研究の研究成果の活用

第4章での解析は、傾斜地に立地する花き農家を対象とした事例的解析であった。しかしながら、その手法は、同様の日照問題を抱える農業現場

への適用が可能な技術と位置づけられる。例えば、第4章で解析対象とした花き農家は先進的な栽培技術を有しており、経営規模拡大を志向している。しかしながら、周辺樹林域の生長に伴い、ハウス内で栽培可能な面積が次第に狭まりつつある。一方、同じ地域内には、日照条件の良い遊休農地も複数存在する。本研究成果を活用することにより、日照条件の良い遊休農地を提示し、ハウスの移設を提案するなどの活用方法が考えられる。

第5章での解析から、AMeDAS観測点以外の公共機関により測定・蓄積された気温データを用いることで、霧発生域の面的分布をさらに高密度で推定できる可能性がある。霧発生域の面的分布を明らかにできれば、霧を活用した特産物の栽培適地を新たに抽出することも可能となる。霧を活用した特産物として、三次盆地産の貴腐ぶどうや丹波篠山盆地産の霧芋がある。とりわけ、貴腐ぶどうに関しては、霧の発生期間の微妙な差違が品質を左右するとされ、三次盆地内でも栽培可能な圃場が限定されている。三次盆地内の霧発生特性の分布を明らかにすることができれば、同等の霧発生条件下にある農地を抽出し、産地拡大を図ることも可能になると考える。

霧発生に関しては農業生産への負の側面も存在する。イチゴの栽培では、霧発生時にはハウスの開閉に制約が生じるため、ハウス開閉による

気温管理が困難となる時間帯が生じる。また、視界が低下するため自動車を使った輸送作業等が困難となる。しかしながら、霧の発生域をより詳細に特定することにより、このような負の側面についても有効な対策を講じることも可能になると考えられる。

6.4 今後の課題

現在、多くの自治体や試験研究機関で GIS が導入されている。さらに、自治体でデジタル化された地籍情報にアクセスすることが可能である。このことから、第 4 章で示した手法は実用性が高いと考える。ただし、GIS による解析を個別の農家が行うのは困難であることから、自治体や試験研究機関のサポートが必要である。

第 4 章の解析結果から、樹林域による直達日射遮蔽量の推定結果の精度を高めるには、解析に用いる基盤データの精度が重要であることがわかった。具体的には、①メッシュ標高データ、②数値地籍情報、③樹林域内の樹高分布データの分解能や精度が推定精度を支配する。とりわけ、③が最も重要なデータとなる。①と②のデータは、国土数値情報の 10m メッシュ標高値や GIS 地籍データ整備事業による地籍電子化等が進められつつある。しかし、③のデータは簡易に利用することができず、本論文で提案

した手法の実用性を制約している。この点に関しては、森林基本図や森林簿等の利用により、解決が図られる可能性がある。

第5章での解析を通じて、霧発生が推定される地点を抽出できた。しかしながら、霧による日射の減衰量の評価までは至っていない。今後、霧のかかる場所とかからない場所とで観測を行い、データを蓄積していく必要がある。また、霧による日射の減衰は霧発生日数や消散までの時間だけではなく、霧の厚さや濃さにも左右される。今後、視点を広げて霧の解析を行う必要がある。

霧の農業利用に関しては、成功事例、失敗事例から学ぶことも重要である。霧を活用して農作物の高付加価値化に成功した事例として、篠山盆地の丹波黒、大井川流域の静岡茶、愛媛県大洲盆地の秋冬どり白菜等があげられる。逆に、霧が発生する地域に新規作物を導入したが失敗した事例もあると思われる。このような事例を収集し、事例から学ぶアプローチが必要と考える。

摘要

第 1 章では、まず、日本の置かれた地形・地理的条件を踏まえた上で中山間・傾斜地域での農業生産が目指すべき方向性について述べた。さらに、中山間傾斜地域が広く分布する中国・四国地域の地形・地理条件について概括し、この地域の地理条件・気候条件が有する多様性を活用すれば、中山間・傾斜地域における特産品の開発と地域ブランド化に大きく貢献できる可能性について指摘した。しかしながら現状では、解決を要する問題が多く、その一つとして樹林域や盆地霧による日射の遮蔽が山間部のハウス周年栽培の栽培管理に負の影響を及ぼしている問題について指摘した。しかし、従来の日射環境評価手法では、それらの問題が考慮されていない点を指摘した。本論文の意義は、そうした未着手の問題のうち樹林域や霧による日射の遮蔽に関して、新たな解析手法を提示することにある。

第 2 章では、中山間・傾斜地域における日射環境の評価を行う際に必要となる基盤的な手法や技術が開発された経緯に関して、

重要な既往研究についてレビューをした。まず、日射量の推定方法に関する既往の関連研究成果をレビューし、既存研究では樹林域による日射の遮蔽が解析されていないことを指摘した。次に、盆地霧に関する既往の関連研究成果をレビューし、従来の研究が個別の霧発生地点の解析にとどまり、霧発生域全体を共通的な指標で解析した事例がないことを指摘した。次に、霧による日射の遮蔽の評価では、気温変化の近似手法の活用が必要であることを記述し、気温変化を近似する手法に関して既往の関連研究成果をレビューした。

第3章では、斜面上部に位置する樹林域の存在が、斜面下方の農地に入射する直達日射の遮蔽に及ぼす影響について、シンプルな3Dモデルを用いて解析した。解析結果から、北斜面に関しては、樹林域の東西方向への分布幅が斜面下方における直達日射の遮蔽量に大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。また、斜面上部に位置する樹林域の生長によって樹高が高くなった場合、直達日射が遮蔽される領域が斜面下方に拡大するものの、樹林域の直下において遮蔽される直達日射量の大きさは変化しないこと

を示した。さらに，斜面方位や季節変化の影響も明らかにし，斜面上にパッチ上に分布する樹林域の形状や配置が周辺領域での直達日射遮蔽量の分布状況に及ぼしている影響を明らかにした。

第4章では，秋冬季に樹林域による遮蔽の影響を強く受ける花き農家を解析対象事例として，GISの5mメッシュ標高データと数値地籍情報を用いて，地形による遮蔽の影響と樹林域による遮蔽の影響を区別して評価する方法を提案した。利用したデータの加工方法や処理アルゴリズムについて説明し，農地上に形成される日陰領域の分布状況をモデルによって推定し，検証を行った。検証結果に含まれる誤差について，その発生要因を調査し，誤差の発生要因が利用した地形データの分解能の限界に起因することを明らかにした。また，第3章において開発したモデルによる解析手法を花き農家周辺の樹林域と農地に適用して，樹林域によって遮蔽されている直達日射量と地形によって遮蔽されている直達日射量を区別して明らかにした。この解析結果に基づいて，樹林域による日射の遮蔽が著しい領域においても営農が行われていることを示した。

第 5 章では、S 字型関数を用いて、正規化された時別気温平年値の最低気温から最高気温までの上昇パターンを近似し、2 つの係数 α 、 β で上昇特性を評価することにより、AMeDAS 観測点における霧発生の有無の判別を可能にする手法を開発した。まず、この近似手法で用いるパラメータの意味について述べ、必要とされるデータの個数について検討した。次に、霧発生日数と α 値の関係を、津山および豊岡における視程値に基づいて明らかにし、霧の発生時間の長さとの関係を明らかにした。さらに、霧発生活でよく知られた場所に位置する AMeDAS 観測点におけるパラメータ α の値が特に大きいことを、近畿、中国、四国地域内の 152 の AMeDAS 観測点における α 値の比較結果に基づいて指摘した。

第 6 章では、本研究の学術的意義、中山間・傾斜地域における農業への貢献、残された問題を示した。太陽光が地表に到達する段階別に日射環境を決定する要因を整理した上で、研究が遅れていた霧および樹林域による遮蔽の評価に関して、本研究で提示した解析手法が新規性を有しており、中山間・傾斜地域に位置する

農地の日射環境を評価する上で極めて重要な手法であることを指摘した。次に，中山間・傾斜地農業における本研究成果の活用について想定される利用場面について具体例を述べた。最後に，未解決の問題点の今後の展望について述べた。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり，黒瀬義孝博士(近畿中国四国農業研究センター兼広島大学大学院生物圏科学研究科)には終始ご指導および暖かな励ましを賜った。佐久川 弘教授(広島大学大学院生物圏科学研究科)，正岡淑邦教授(広島大学大学院生物圏科学研究科)，山内 稔博士(近畿中国四国農業研究センター兼広島大学大学院生物圏科学研究科)，三浦一芸博士(近畿中国四国農業研究センター兼広島大学大学院生物圏科学研究科)には本稿のご校閲を頂き，有益なご教示を頂いた，ここに謝意を表します。

本博士論文における日射関連研究の多くは，旧四国農業試験場気象資源研究室長 菅谷博氏(現・北海道農業研究センター)のご指導のもと行われ，日射観測手法全般について多くの貴重な御助言をいただいた。また，散乱日射量の観測では，旧四国農業試験場気象資源研究室研究員 佐々木華織氏(現・中央農業総合研究センター)の多大な御協力を得た。旧四国農業試験場研究技術情報科の藤田晴啓博士(現・東洋大学)，畑中健一郎氏(現・長野県環境保全研究所)には，本研究の成立に不可欠な GIS データをご提供いただいた。旧中国農業試験場気象資源研究室長の大原源二博士には，GIS の気象資源評価への活用方策に関して，貴重な御助言をいただいた。

近畿中国四国農業研究センターの長崎祐司博士，川嶋浩樹氏には，傾斜地域における日射量分布マップ活用の方向性について，貴重な御助言をいただいた。近畿中国四国農業研究センターの高橋英博氏には，GIS全般に関する的確な御助言をいただいた。ここに記して深甚の謝意を表します。

引用文献

- Berlage, H., (1928) Zur Theorie der Beleuchtung einer horizontalen Fläche durch Tageslicht. *Meteorologische Zeitschrift*, **Mai**, 174-180.
- Black, J.N., Bonython, C.W., and Prescott, J.A., (1954) Solar radiation and the duration of sunshine. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **80**, 231-235.
- Blennow, K., and Persson, P., (1998) Modelling local-scale frost variations using mobile temperature measurements with a GIS. *Agric. For. Meteorol.*, **89**, 59-71.
- ト蔵建治 (1990) やませ卓越条件下における山地の気温,日射特性. 農業気象, **45**, 235-242.
- Drummond, A. J., (1956) On the measurement of Sky Radiation. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, **7**, 413-436.
- Erbs, D.G., Klein, S.A., and Duffie, J.A., (1982) Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation. *Solar Energy*, **28**, 293-302.
- Fernández, C. J., (1992) Simulation of normal annual and diurnal temperature oscillations in non-mountainous mainland United States. *Agron. J.*, **84**, 244-251.

藤井清香・中村みゆき・佐橋謙 (1999) 中国山地に同時に発生した霧の性状.

日本気象学会関西支部例会要旨集, **88**, 3-6.

藤田晴啓・上野健太・谷口 彰・畑中健一郎・武部 隆・西原勝雄 (2001) 農

業分野での GIS 開発と空間データ共用に向けて. システム農学, **17**, 59-66.

深石一夫 (1992) 愛媛の気候. 愛媛県文化振興財団, 松山, pp. 87-106.

Glover, J., and McCulloch, J.S.G., (1958) The empirical relation between solar

radiation and hours of sunshine. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **84**, 172-175.

Hansen, J.E., and Driscoll, D.M., (1977) A Mathematical Model for the

Generation of Hourly Temperatures. *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 935-948.

羽生寿郎 (1962) 本邦における夏季の気温日変化の型(農業気候に関する研

究 第 6 報). 農業気象, **18**, 105-108.

林 陽生・黒瀬義孝 (1997) 中山間農業地域における 250m メッシュ日射環

境の分布の特徴. 地理学評論, Ser.A, **70**, 307-320.

氷高信雄・小林好子 (1985) 中国地域における直達・散乱太陽放射の季節

的・地理的变化. グリーンエネルギー計画成果シリーズ I 系 No.4 太陽放射

エネルギーの季節的・地理的变化. 農林水産技術会議事務局, 東京, pp.

95-108.

井上君夫 (1992) 霧を伴うやませの気象特性. 天気, **39**, 459-467.

Jordan, K.A., Takakura, T., Buffington, D.E., and Boyd, L.L., (1975) Modeling Air Temperature for Plant and Animal Simulation. *J. Agric. Meteorol.*, **31**, 125-134.

片山秀昭・上甲 実・塚本 修 (2003) 岡山県高梁市における盆地霧の動態と温湿度分布. 日本気象学会関西支部例会要旨集, **101**, 40-43.

気 象 庁 (2011) 地 域 気 象 観 測 所 一 覧 .
<<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/>>に掲載, 35-49.

木村 悟・中西松太郎 (1985) 四国地域における直達・散乱太陽放射の季節的・地理的变化. グリーンエネルギー計画成果シリーズ I 系 No.4 太陽放射エネルギーの季節的・地理的变化. 農林水産技術会議事務局, 東京, pp.112-123.

Kondo, J., (1967) Analysis of solar radiation and downward long wave radiation date in Japan. *Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser.5. Geophys*, **18**, 91-124.

蔵田憲次・岡田益己 (1984) 環境工学入門. サイエンスハウス, 東京, 156 pp.

黒瀬義孝・深石一夫・林陽生・大場和彦 (1998) 愛媛県大洲盆地に発生する盆地霧の気候学的な特徴. 農業気象, **54**, 13-21.

黒瀬義孝・林 陽生・真木太一 (1991) 複雑地形地域における日射環境の把握. 四国農業試験場報告, **54**, 147-159.

黒瀬義孝・長田健二・大場和彦・丸山篤志 (1999) 数値地図 50m メッシュを用いたポテンシャルな日射量分布の推定. 農業気象, **55**, 315-322.

Lunde, P.J., (1980) Solar Thermal Engineering. John Wiley & Sons, New York, 612 pp.

正務 章・篠木誓一・桂 幸一 (1988) 日射エネルギー資源のメッシュデータ作成－任意未観測地点における月別日射エネルギーの算定式の作成と応用－. グリーンエナジー計画成果シリーズ I 系 No.8 自然エネルギー資源量の推定法. 農林水産技術会議事務局, 東京, pp. 30-40.

Meyer, M.B., and Lala, G.G., (1990) Climatological Aspects of Radiation Fog Occurrence at Albany, New York. *J. Clim.*, **3**, 577-586.

宮田賢二 (1994) 三次盆地の霧の研究. 溪水社, 広島, 255 pp.

水越允治・奥 友親 (1974) 上野盆地における局地気候学的研究. 地理学評論, **47**, 313-325.

永田忠彦・沢田康二 (1978) 晴天空による水平面散乱日射の式の試案. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系 **53**, 519-520.

Nicks, A.D., and Harp, J.F., (1980) Stochastic Generation of Temperature and Solar Radiation Data. *J. Hydrol.*, **48**, 1-17.

二宮 秀與・赤坂 裕・須貝 高・黒木荘一郎 (1989) AMeDAS のデータを用

いた時刻別日射量の推定法. 空気調和・衛生工学会論文集, **39**, 13-23.

大橋唯太・寺尾 徹・宮田賢二・田中正昭・堀口光章・林 泰一 (2004) 局地循環による水蒸気輸送と盆地霧発生に関連性—広島県三次盆地を対象とした数値実験—. 天気, **51**, 509-523.

Ohta, S., and Tanaka, M., (1986) A Numerical Study of the Formation and Dissipation of Radiation Fogs. *J. Meteorol. Soc., Jpn.* **64**(1), 65-77.

大阪管区气象台, (1998) 霧の発生機構把握のための研究. 大阪管区气象台特別調査報告, **16**, 7-228.

大野木和敏・柴田清孝 (1986) 移流霧の数値実験 -定常・2次元モデル-. 気象庁研究時報, **38**, 9-27.

Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R. and Menicucci, D., (1987) A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces. Description Performance Validation. *Solar Energy*, **39**, 221-231.

Reicosky, D.C., Winkelman, L.J., Baker, J.M., and Baker, D.G., (1989) Accuracy of Hourly Air Temperatures Calculated from Daily Minima and Maxima. *Agric. For. Meteorol.*, **46**, 193-209.

Richardson, C.W., (1981) Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation. *Water Resour. Res.*, **17**, 182-190.

Sadler, E. J., and Schroll, R. E., (1997) An empirical model of diurnal temperature patterns. *Agron. J.*, **89**, 542-548.

Sato, K., Takahashi, H., and Sugaya, H., (2005) Reduced accuracy of AMeDAS-derived temperature estimates in mountainous and hilly areas. *Proceedings of International Conference on Research Highlights and Vanguard Technology on Environmental Engineering in Agricultural Systems, Joint Meeting on Environmental Engineering in Agriculture 2005*, 279–282.

佐藤恵一・菅谷 博・藤田晴啓 (1997) 微地形データの利用による日射環境の評価精度の改善. 四国農業研究成果情報, pp.64-65.

佐藤恵一 (2003) 霧発生地域の AMeDAS 日照値に関する解析. 中国四国の農業気象, **16**, 42-43.

清野 豁・内嶋善兵衛 (1985) 複雑地形地 (阿蘇カルデラ) における太陽放射資源量の評価. 農業気象, **41**, 247-255.

清野 豁・内嶋善兵衛 (1988) メッシュ地形情報を用いた複雑地形地域における太陽放射資源量の評価手法. グリーンエネルギー計画成果シリーズ I 系 No.8 自然エネルギー資源量の推定法. 農林水産技術会議事務局, 東京, pp.2-18.

小気候団体研究会 (1994) 恵那地方の盆地霧の特性について. 天気, **41**,

23-35.

Tonna, G., (1989) Physical and Optical properties of Fog at 74 Wavelengths from 0.35 to 90 μ m within a Sample of 239 Spectra. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **67**, 1-9.

上原由子・清野 豁・原田昭彦 (1989) 広島県における日照時間及び日射量のメッシュ化について. *農業気象*, **45**, 159-163.

内嶋善兵衛 (1985) 研究の目的と観測法. グリーンエネルギー計画成果シリーズ I 系 No.4 太陽放射エネルギーの季節的・地理的变化. 農林水産技術会議, 東京, pp.2-15.

宇田川光弘・木村建一 (1978) 水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定. *日本建築学会論文報告集*, **267**, 83-90.

和田道宏 (1980) 気温の日変化に関する研究 (I. 日変化のモデル). *農業気象*, **36**, 19-24.

渡辺俊行・浦野良美・林徹夫 (1983) 水平面全天日射量の直散分離と傾斜面日射量の推定. *日本建築学会論文報告書*, **330**, 96-108.

山田一茂・岩切 敏 (1985) 北陸地方における直達・散乱太陽放射の季節的・地理的变化. グリーンエネルギー計画成果シリーズ I 系 No.4 太陽放射エネルギーの季節的・地理的变化. 農林水産技術会議, 東京, pp.75-94.

吉田作松・篠木誓一 (1978) 日本における月平均全天日射量およびその

年々の変動度マップの作成. 天気, 25, 61-75.