

水稲・小麦の二毛作畑における熱収支・CO₂濃度の季節変化[#]

篠崎直樹^{*}

キーワード：二毛作畑、熱収支、CO₂濃度、微気象、葉面積指数 (L. A. I.)、季節変化、日変化

1. 研究概要と目的

従来、耕地における微気象、熱収支の研究は数多く行われ、水稲田においても、多くの研究者によってその特徴が明らかになっている。しかし、これらは単一の作物群落や、ある特定の時期についての研究が多く、異なる作物で、その成長過程（季節変化）ごとの熱収支研究多くない。特に、本研究対象である二毛作畑のような、1年で2種類の作物を異なる時期に栽培している耕地の研究は、ほとんど見当たらない。

関東地方特有の小麦・水稲の二毛作畑は、それぞれの栽培期間で耕作形態と地表面の状態が異なり、特に水稲期には地表面は水面となる。このため、小麦と水稲の成長過程における微気象および熱収支の変化は、季節的な気候の違い、および作土上の水の有無により異なる様相を呈していると考えられる。その中で、植被の成長・繁茂に伴う日射の遮断や群落内外の空気の流れ、水管理による人為的要素が、耕地全体と植被層における熱収支に大きな変化をもたらしている。植被層の上面と下面の熱交換の動態を知ることは、群落内の微気象研究で重要な課題でもある。水稲田の熱収支研究は第2次大戦後発展し、岩切（1962、1964）、市村（1961）、中山ほか（1965）が水稲の繁茂と関連させ、熱収支の季節変化を明らかにした。

近年では耕作地での二酸化炭素（CO₂）やメタン（CH₄）等の観測も数多く行われている（岸田ほか2001）。特に、作物群落内外でのCO₂環境は、作物自身の光合成活動や土壌呼吸量などに密接に関係している。また、これらが、生産量にも影響していることから、群落内外のCO₂の分布と濃度変化の特徴が明らかになっている（内嶋ほか、1967）。しかし、作物の生育期間を通した群落内外でのCO₂濃度の観測は決して多くはない。よって、耕作期間の中で異なる地表面状態を有する二毛作畑にお

いて、季節的なCO₂濃度の変化を知ることは重要であると考えられる。

本研究では、小麦・水稲の二毛作畑において、各々の作物の生育期間を通した微気象・熱収支およびCO₂濃度の季節的变化と日変化を捉える。具体的には、作物の成長に伴う植被層上面の微気象の変化と熱収支およびCO₂濃度と蒸発散との関係について検討する。

2. 調査地概要と観測方法

1) 実験地

埼玉県熊谷市近郊の大里郡大里町の水稲・小麦の二毛作畑で観測を行った。対象圃場は、1区画9.4a、灌漑水として地下水を利用している（第1図）。

2) 観測期間

小麦：3月中旬～6月中下旬（植高10cm～刈り取りまで）

水稲：6月下旬～10月中旬（田植後～刈り取りまで）

それぞれ月1回のペースでの観測を行った。具体的な観測日は天候に左右されることになるが、晴天の日を選び観測をした。第2図にこの地方における小麦・水稲の二毛作における栽培期間を示した。

3) 観測日

観測時間としては、気温や日射等をデータロガーなどによる自動観測で24時間、目視あるいは手観測を当日の3時から18時までの太陽が出ている時間帯で行った。自動観測は、前日の夕方15時から16時頃から開始して、観測日当日の18時までとした。

4) 観測場所・測器の配置

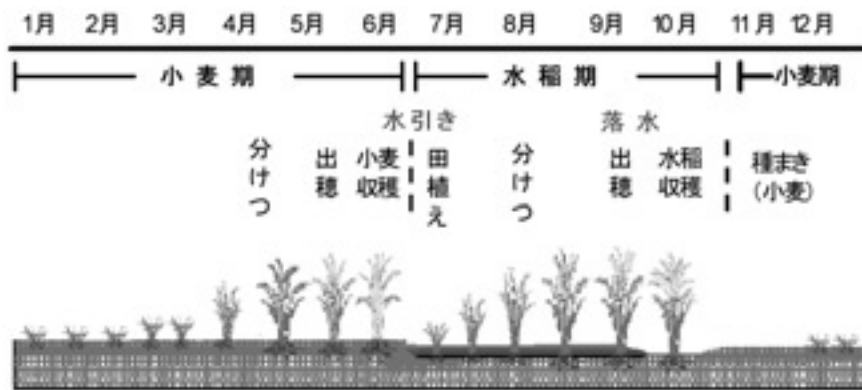
圃場での具体的な観測場所については、日射を遮らな

^{*} 立正大学大学院地球環境科学研究科学生

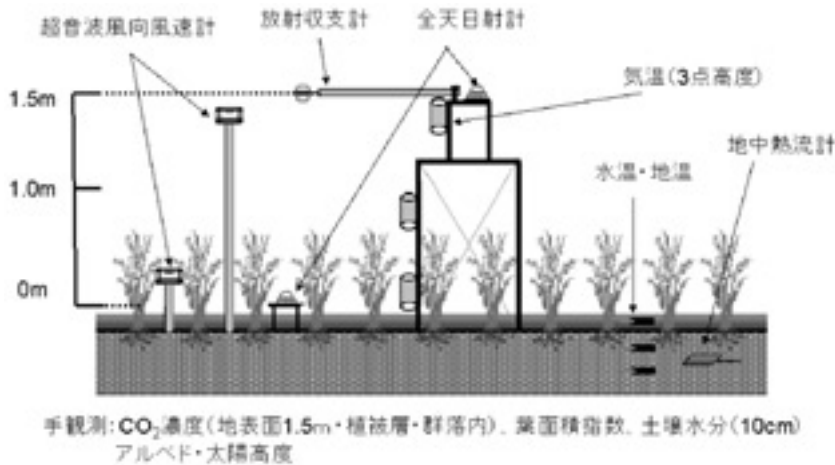
[#] 平成16年度立正大学大学院地球環境科学研究科オープンリサーチセンター業績



第1図 研究対象地



第2図 熊谷市付近における水稲・小麦二毛作畑の栽培期間



第3図 微気象観測における測器の設置

い所で、水口と水尻の中間地点で畦から1.0～1.5m ほど中に入った場所とした（Penman and Long 1959）。

観測地点における測定器の配置については、アングル材を四柱状に組み、高さ1.5mほどのタワーを作り、日射計や気温計を高度別に取りつけた。タワーを定点観測の中心とし、その周りで手観測である、反射率、のCO₂

濃度、土壌水分を観測した。（第3図）

5) 観測項目

小麦畑・水稲田における微気象の観測項目以下に示す。

- 1) 気温、水蒸気圧、湿度：地表面より1.5m（以下1.5m 気温と記す）、植被層面、群落内の3 高度

- 2) 水温：定点観測地点 1 地点
- 3) 地温：作土層の 1、5、10、20、30、40、50cm の 7 深度
- 4) 全天日射量：地表面より1.5m、群落内の 2 点
- 5) 反射率（アルベド）：定点観測地点 1 地点
- 6) 風速・風向：地表面より1.5m（以下1.5m 風速と記す）、植被層面、群落内の 3 高度
- 7) 正味放射量：地表面より1.5m
- 8) 地中熱流量：作土層の 5 cm、10cm の 2 深度
- 9) 太陽高度・雲量：定点観測地点 1 地点
- 10) 葉面積指数 (L. A. I.)：観測毎に 3 ~ 5 株を採取し室内で測定
- 11) CO₂濃度：地表面より1.5m、植被層、群落内の 3 点で採取し室内で測定
- 12) 土壌水分：深さ10cm

以下、観測項目別に使用した測器を記す。

自動観測

日射量：Solar mini および EPR 記録計 2 台

正味放射量：Net LITE 放射収支計およびデータロガー 1 台

気温、湿度：HOBO データロガー 3 台

水温、地温：KADEC UN および U-II データロガー 6 点式 1 台、1 点式 2 台

地中熱流量：地中熱流計 2 台

風速、風向：GPWS (wind sonic) 超音波風速計 2 台

手動観測

反射率：手持ち反射計 1 台、デジタルマルチメーター 1 台

土壌水分：TDR 土壌水分測定器 1 台

葉面積指数：自動面積計 1 台

CO₂濃度：採取アルミパック
分析CO₂/H₂O アナライザー 1 台

太陽高度：高度計

雲量（天候）：目視

アスマン乾湿計による乾湿球温度

ピラム風速計による風向・風速

3. 熱収支の解析方法

1) バルク法

本研究ではバルク係数を用いて、基準高度と地表面風速・気温・水蒸気量のデータをもとに、顕熱・潜熱フラックスを求めた（新井2004）。

バルク係数 C_D

$$C_D = \frac{u_*^2}{u^2} \quad (1)$$

$$u_* = \frac{\kappa \cdot u}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)} \quad (2)$$

u_* ：摩擦速度 m^2s^{-1} 、 u ：測定高度の風速 (ms^{-1})、 κ ：カルマン定数 (0.4)、 z ：測定高度 (m)、 z_0 ：粗度高度 (m)、 d ：地表面修正量 (m)

粗度高度 (z_0) は、地表面の摩擦により無風になる高度である。植被がある場合に導入される地表面修正量 (d) は、風速垂直分布のプロットが対数分布上で直線になるように調整（差引）された値である。

2) 正味放射量（放射収支量） R_n

地表面上（水面上・植被層面上）における正味放射量の計算は次式による（岩切1964）。

$$R_n = (1-\alpha)I - (1-cn_2) \{ \sigma T_a^4 (1-a-b\sqrt{e}) \} \quad (3)$$

ここで、 α ：アルベド、 I ：全天日射量（群落外日射量）、 c ：雲量係数 (0.66)、 n ：雲量0.1単位、 T_a ：気温 (K)、 a ：0.51、 b ：0.066、 e ：水蒸気圧 hPa、 σ ：ステファンボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}$)、 $(1-\alpha)I$ ：吸収日射量である。

一般的に長波放射の推定には、Angstrom、Brunt、Elsasser の 3 式が挙げられるが（新井・西沢1974）、その適応性については多くの議論がある。しかし、その中でも Brunt の式を用いている研究が多く、水蒸気圧が 2 から 40hPa の間で、誤差10%以内で適用できると考えられている。よって、本研究では水稲植被上面における正味放射量の推定に Brunt の式を用いた。

2) 顕熱フラックス (H)

$$H = C_p \rho_a C_D u (T_s - T_a) \quad (4)$$

3) 潜熱フラックス (LE)

$$LE = L \rho_a C_D u (q_s - q_a) \quad (5)$$

ここで、 $T_a \cdot q_a$ ：風速高度における気温と比湿 (S は地表面または下方の値)、 C_p ：空気の定圧比熱 ($1004 J kg^{-1} K^{-1}$)、 L ：蒸発の潜熱 ($2.45 \times 10^6 J kg^{-1}$)、 ρ_a ：空気の密度 (約 $1.2 kg m^{-3}$) である。

表1 植被の繁茂に伴う群落内への日射量到達率の季節変化

日付	群落内への日射量到達率 (%)	L. A. I.
3月14日	55.4	2.4
4月22日	21.8	4.6
7月3日	99.4	2.1
8月7日	40.6	4.6
8月21日	22.8	6.2
9月19日	11.2	5.6

(2004年)

表2 小麦・水稲における植被状態と土壌水分の季節変化

作物	日付	植被丈 (cm)	植被状態	土壌水分 (%)
小麦	3月14日	20	分けつ期	16.9
小麦	4月22日	80	出穂期	15.1
水稲	7月3日	25	分けつ期	飽和
水稲	8月7日	50	分けつ期	飽和
水稲	8月21日	85	出穂期	飽和
水稲	9月19日	85	登熟期	飽和

(2004年)

4) 地中フラックス (G)

$$G = C_s Z_s \left(\frac{T_{s2} - T_{s1}}{t_2 - t_1} \right) \quad (6)$$

C_s : 土壌の容積熱容量 (Jm⁻³K⁻¹)、Z_s : 深さ、T_{s2} は t₂ 時における地温、T_{s1} は t₁ 時における地温 (t₂ > t₁) である。地温の観測は30分間隔で行ったが、用いたのは毎時平均の値である。

土壌の容積熱容量 C_s は、有機質土壌において約 2.4J m⁻³K⁻¹、水田土壌においては約2.7J m⁻³K⁻¹の値がえられている（農業技術協会1997）。

6) 水体貯熱量 (W)

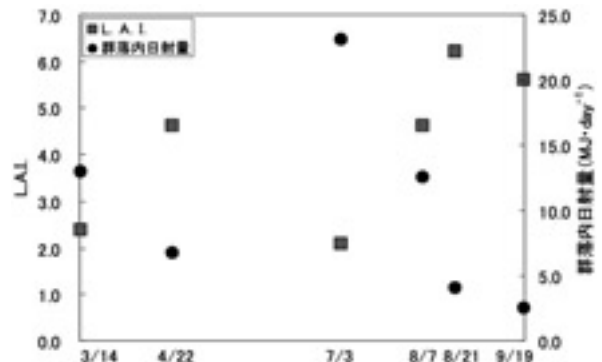
$$W = C_w Z_w \left(\frac{T_{w2} - T_{w1}}{t_2 - t_1} \right) \quad (7)$$

C_w : 水の熱容量 (4.18 × 106J m⁻³K⁻¹)、Z_w : 水深 (m)、T_{w2} は t₂ 時における水温、T_{w1} は t₁ 時における水温 (t₂ > t₁) である（農業技術協会1997）。

4. 結果および考察

4. 1 小麦・水稲植被の成長に伴う微気象の変化

作物の成長に伴う植被の繁茂は、植被層およびその上下層における気温、水温、地温、風速、群落内日射量、

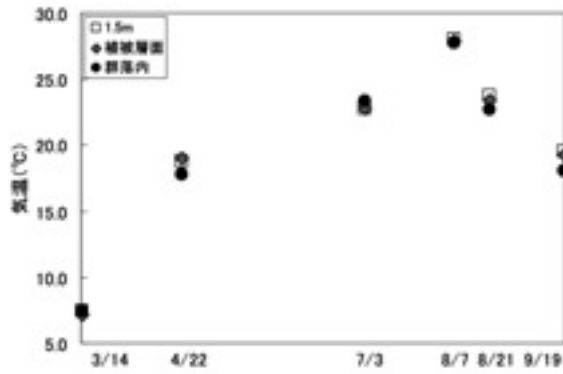


第4図 小麦畑・水稲田における L. A. I と群落内日射量の季節変化 (2004年)

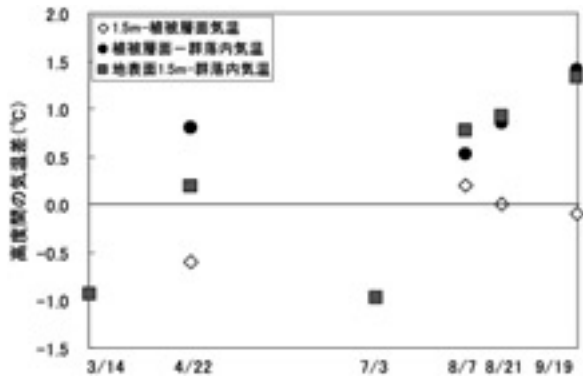
植被面のアルベドなどに影響する。そのため、各々の観測項目と植被の繁茂を表す葉面積指数 (L. A. I.) との関係を検討する。特に、群落内日射量の変化は、植被の繁茂に直接影響することから、表1に群落内日射量の減衰を到達率 (群落内日射量 / 群落外 (全天) 日射量) を示した。第4図には、L. A. I. と群落内日射量の季節変化を示した。また、表2には、各観測日における作物の植被状態と土壌水分を示した。

1) 植被の成長による高度別気温の変化

第5図は高度別気温の季節変化である。小麦期4月22日および水稲期8月7日以降において、植被の繁茂による日射の遮蔽によって、群落内気温の低下がみられた。さらに高度間の気温差を詳細にするため、第6図には、



第5図 小麦畑・水稲田における高度別気温の季節変化 (2004年)

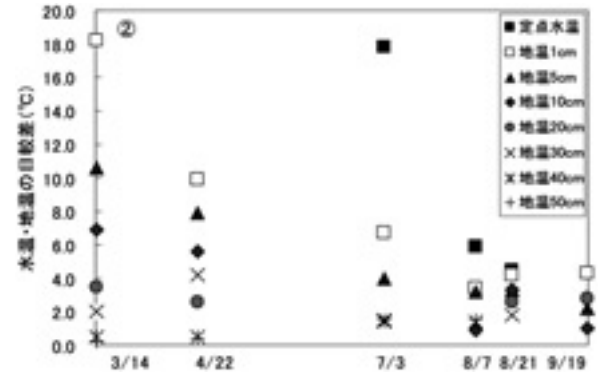
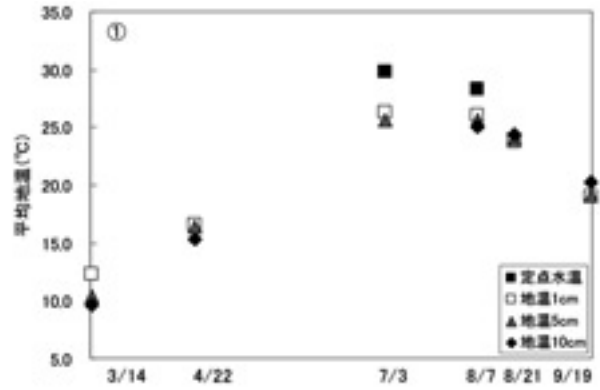


第6図 小麦畑・水稲田における高度間気温差の季節変化 (2004年)

3高度間の気温差、つまり、[1.5m 気温 - 植被層面気温]、[植被層面気温 - 群落内気温]、[1.5m 気温 - 群落内気温]と L. A. I. の季節変化の関係を表した。平均化時間としては、植被の繁茂による気温の影響を知るために、日射 (群落内日射量) が得られている時間帯である。4時または5時から17時または18時の間の平均化とした。

同図の小麦期3月14日および水稲期7月3日は、植被が未発達であることから、植被層面気温は使用しておらず、[1.5m 気温 - 群落内気温]のみである。図において、[1.5m 気温 - 群落内気温]の変化が、L. A. I.の変化に対応して推移している。小麦期3月14日および水稲期7月3日においては、これが負の値を示したことは、植被の未発達が地表面への日射の到達を促し、1.5m 気温よりも地表面付近の気温を上昇させたものと考えられる。L. A. I.の増加に伴い、気温差も正の値で増加することから、植被の繁茂が群落内気温の低下に影響していることは明らかである。

これらから、植被が繁茂した状態における3高度間の気温差は、群落内外の [1.5m 気温 - 群落内気温] が最も大きく、次いで [植被層面気温 - 群落内気温] であり、最も気温差が小さいのは [地表面1.5m 気温 - 植被層面



第7図 小麦畑・水稲田における地温の季節変化 (2004年)

平均値の季節変化 日較差の季節変化

気温] であることがわかる。植被が繁茂すると、[1.5m 気温 - 群落内気温] および [植被層面気温 - 群落内気温] の気温差は増加する。これは、水稲期7月3日を除くすべての観測日で認められた。[1.5m 気温 - 植被層面気温] の気温差は水稲期において次第に減少し、この時には、9月19日では負の値を示した。また、[植被層面気温 - 群落内気温] の気温差が、[1.5m 気温 - 群落内気温] を若干上回った。これは、小麦期4月22日においても顕著に現れている。これらを考慮すると、この現象は植被層面気温の上昇が要因になっていると考えられる。植被層面気温が上昇する原因としては、繁茂した植被が地表面の役割を果たし、植被層面付近の気温を上昇させると言われているが、実際には、植被からの蒸散作用の低下と気孔の閉塞による葉温の上昇なども影響しているとされている (伊藤ほか1984)。

2) 植被の成長による水温・地温の変化

地温・水温の変化には、植被の繁茂およびそれに伴う群落内日射量の減少が直接影響している (市村ほか1965)。

第7 - 図は、日較差が比較的大きい深さ1cm、5cm、10cmの平均地温と平均水温の季節変化である。平均化を行った時間は群落内日射量の影響も考慮し、4

時または5時から17時または18時の間である。その結果、植被の繁茂に伴う地温の逆転は、小麦期においては観測回数不足のため明らかではないが、水稲期8月21日および9月19日においては、深さ10cm地温が1cm地温より高くなり、表面地温の低下が認められた。

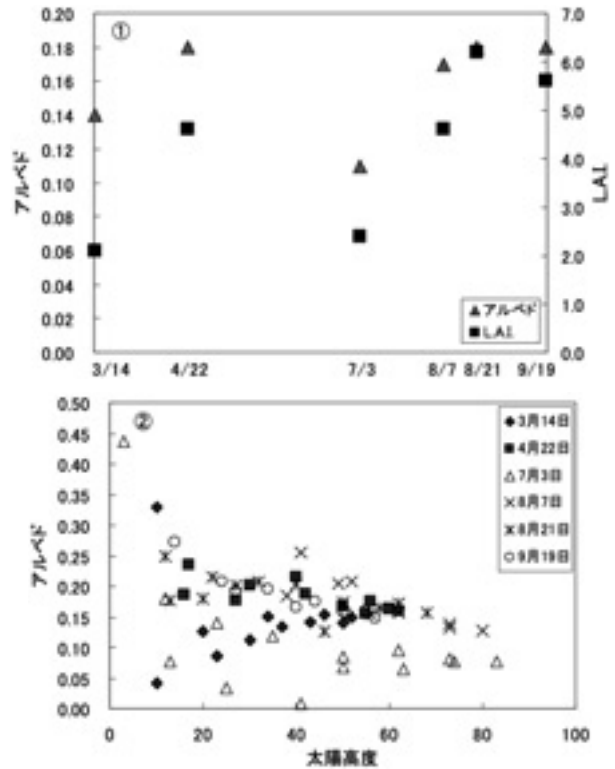
第7 - 図は、小麦期および水稲期を通して、耕作状態が変化しているのに関らず、深さ20cmと50cmの地温日較差が、それぞれ約3.0と約2.0、40cmと50cmではともに約0.7で推移しており、深度30cm以深では、日較差は季節的に変化しないことが示されている。一方で、深さ1cm、5cm、および水稲期7月3日以外の深さ10cmの地温日較差は、小麦期3月14日において、最大値となり、水稲期7月3日まで次第に低下した。以降、9月19日まで日較差はほぼ一定であった。

水温の日較差は7月3日が最大で、深さ1cmおよび5cmよりも大きく、8月7日および8月21日には急激に減少するが地温のそれよりも高い値を示した。このように、1cm～10cmの土層上層における地温の日較差は、季節的に小さくなる。小麦期と水稲期で異なる地表面状態（水の有無）であることを考慮すると、同じL. A. I.を示す時の各深度の地温日較差は、異なる値を示すことになる。小麦期3月14日と水稲期7月3日は、植被が未発達であり、小麦期4月22日と水稲期8月7日は、植被が繁茂した状態であったが、これら2組の地温の日較差は大きく異なっており、共に小麦期の方の日較差が大きい。この原因は、地表面の水の有無と土壤水分の違いが影響している。よって、小麦畑と水稲畑における貯熱量（地中フラックス+水体貯熱量）は、それぞれ大きく異なることが示唆される。

3) 植被の成長によるアルベドとL. A. I. の変化

第8 - 図に各観測日における日平均のアルベドとL. A. I. の季節変化を示す。小麦期および水稲期の両方において、植被の繁茂に伴うアルベドの増加が見てとれる。L. A. I. が4.6以上になると、小麦期・水稲期ともにアルベドは0.17～0.18の値を示す。蒸発散研究グループ(1967a, b)は、水稲畑のアルベドの季節変化について、分けつ期初期の7月に0.10、最大繁茂期の8月に0.22、刈取期の9月から10月に0.18という結果を得ている。今回の水稲期8月と9月におけるアルベドはこれと近いといえる。

第8 - 図に各観測日におけるアルベドと太陽高度の関係を示した。植被が未発達であるため、殆ど水面であった水稲期7月3日では、太陽高度が50°以上になるとア



第8図 小麦畑・水稲畑におけるアルベドの季節変化（2004年）

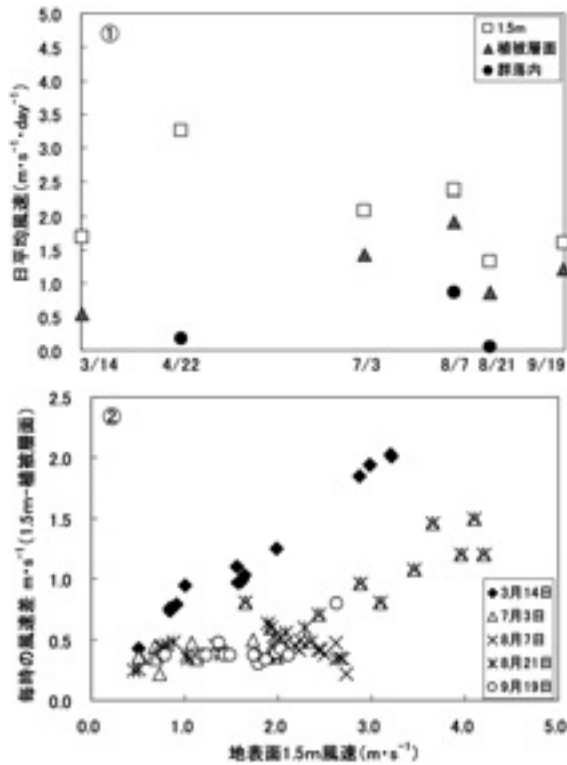
- ・ 平均値の季節変化とL. A. I. との関係
- ・ 太陽高度との関係

ルベドは、従来から示されている値に近い0.08に接近してくるが（蒸発散研究グループ1967a, b）、太陽高度が20°以下になるとアルベドは急激に増加し0.45の値になる。裸地に近い小麦期3月14日では、太陽高度30°以上でアルベドは0.15に近い値を示す。一方、植被が繁茂したその他の小麦期および水稲期では、太陽高度40°～50°で、アルベドが0.18の値に近づいてくる。太陽高度が低くなると0.20の値に近づく。植被が繁茂することにより、太陽高度の高い時間帯のアルベドは増加し、逆に太陽高度が低い時間帯では減少する傾向を示した。

4) 植被の成長による高度別風速の影響

風速は、日変化および日々変化をすることから、各観測日毎の特徴は見られない。しかし、第9 - 図の高度別風速の季節変化では、植被が繁茂した観測日、すなわち小麦期4月22日、水稲期8月7日および21日において、群落内風速の急激な減少がみられた。ところが、群落内風速は、1.5m風速の影響は受けず、大きな日変化は見られず、風速は0.4ms⁻¹前後であった。

一方で、1.5mと植被層面間の風速差は、1.5m風速と植被によって、ある特徴が示唆された。第9 - 図には、[1.5m - 植被層面]の風速差と1.5m風速の関係を示し



第9図 小麦畑・水稲田における風速の季節変化 (2004年)

- ・ 高度別日平均風速の季節変化
- ・ 「毎時の地表面1.5mの高さの風速 - 植被層面風速」の差と地表面より1.5m (1.5m 風速) 風速の関係

た。その結果、L. A. I. が2.0程度の植被が未発達な小麦期3月14日においては、1.5m 風速が増加するのに伴い、風速差も指数関数的に増加する傾向が示された。

水稲期7月3日でも同様の傾向が示されたが、その範囲は1.5m 風速が約 2.0ms^{-1} 以上で、風速差は小麦期のそれと比べ約2分の1である。植被が繁茂する、水稲期8月7日、同21日、9月19日では、1.5m 風速が約 $0.5\sim 2.6\text{ms}^{-1}$ の範囲で、風速差が $0.4\sim 0.6\text{ms}^{-1}$ 程度に密集しており、1.5m 風速が 2.6ms^{-1} 以上になると、風速差は水稲期7月3日のそれと同じ値を示した。植被が繁茂すると、低風速域において植被層面風速は1.5m 風速とほぼ平行した変化で推移するが、風速 2.6ms^{-1} 以上になると植被層による摩擦の影響により風速差が指数関数的に増加すると推察される。

4. 2 小麦畑・水稲田における熱収支および貯熱比、蒸発散量の変化

1) 熱収支の変化

パルク法による熱収支解析においては、上方高度として地表面より1.5m のデータを用いた。下面のデータは

各観測日において異なり、小麦期3月14日および水稲期7月3日においては、深さ1cm 地温あるいは水温を用いた。L. A. I. が4.0以上の観測日においては、植被層面を地表面とみなしそのデータを使用した。熱収支の日変化の計算は、熱源である正味放射量 (R_n) の算出において、(3)式の、アルベドが毎時の手観測によって行われていたことから、3時から18時の間とした。

第10図に、小麦畑・水稲田の熱収支の日変化を示した。小麦畑においては、潜熱フラックスは非常に小さく、日中においてはマイナスを示したことから、蒸発散よりはむしろ凝結が生じていたと考えられる。また、地中フラックスが最も多く、午前中に急激な上昇を示した (3月14日の例では)。地中フラックスは正味放射量の約40%であるが、潜熱・顕熱の約3倍であり、地温の上昇に寄与していた。

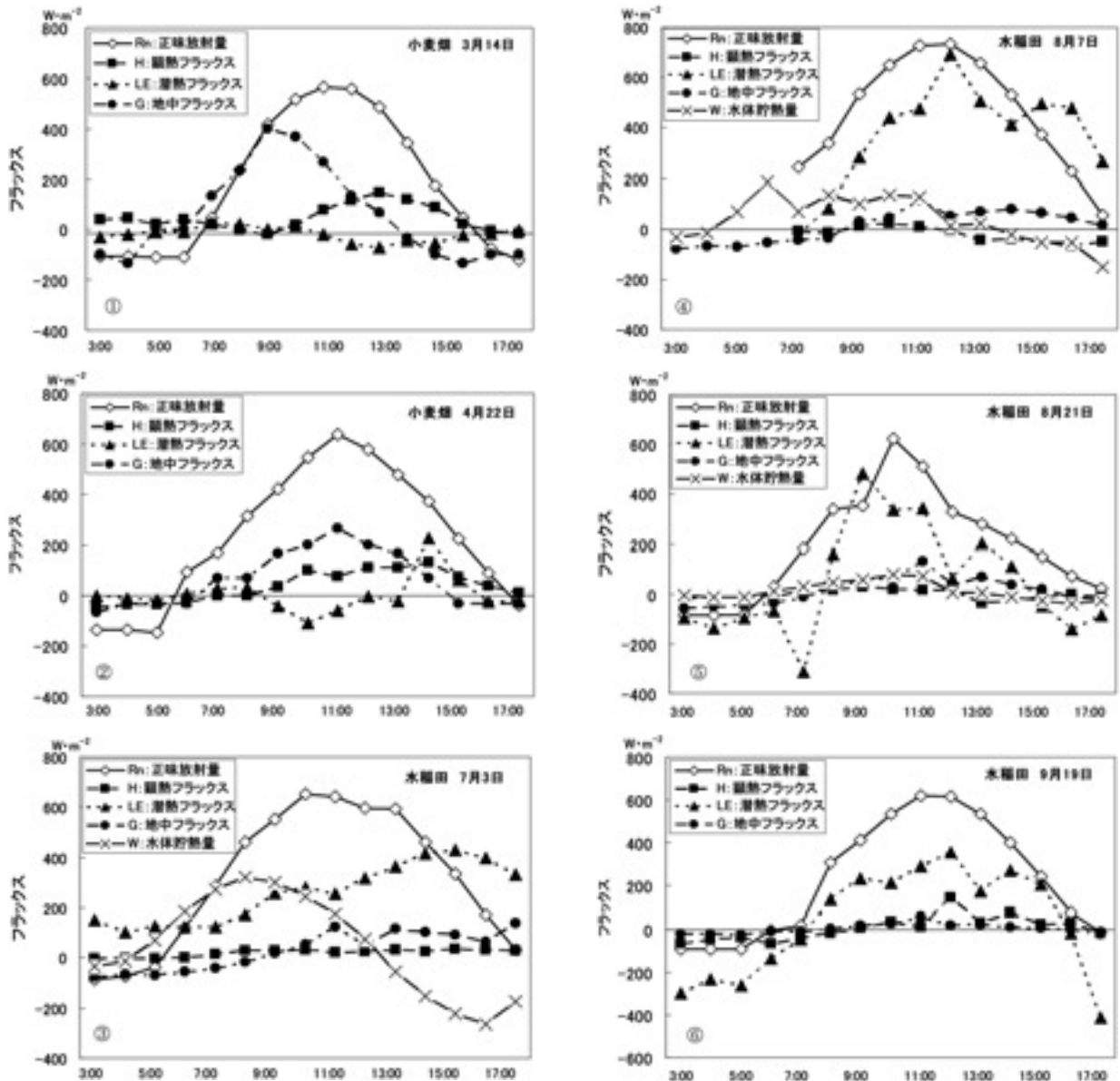
水稲田では、潜熱フラックスが水稲の全生育期間を通して非常に大きく、正味放射量の60~80%であり、蒸発散が盛んに生じていることを示している。しかし、成熟期以降、朝に凝結が生じたことから、日蒸発散量としては若干減少した。水稲田の地中フラックスは、L. A. I. が小麦畑のそれと同じ時期で比べると約2分の1で、植被が繁茂するに従いさらに減少した。

水体貯熱量は植被が未発達で水面へ日射が到達している7月3日の午前において大きな値を示したが、以降、植被が繁茂するに従い次第に減少した。水稲田では、貯熱量 (地中フラックス + 水体貯熱量) は小麦畑の値に比べて小さく、日変化 (振幅) も小さくなっていることから、土壌水分が大きく影響していると推察された。また、8月7日の一部の時間帯において、潜熱フラックスが正味放射量を上回り、不足分の熱量は、水体貯熱量および気層からの顕熱フラックスにより供給されていると考えられた (福岡ほか1990)。

2) 貯熱比の変化

小麦畑・水稲田の土層における貯熱量は、地表面を覆う水の有無と作物の成長に伴う地表面への日射の遮蔽により、大きく影響される。気温が低い季節で作物の成長に必要な温度が十分得られない小麦期においては、日射から得られる地中貯熱量が重要になっていると考えられる。

貯熱比とは、水体貯熱量 W と地中フラックス G を合計した貯熱量を正味放射量 R_n との比 $(W+G)/R_n$ で表したものである。これは植被の形成に伴う水層・地層の熱状態に及ぼす影響を知る上で重要な意義をもっている。

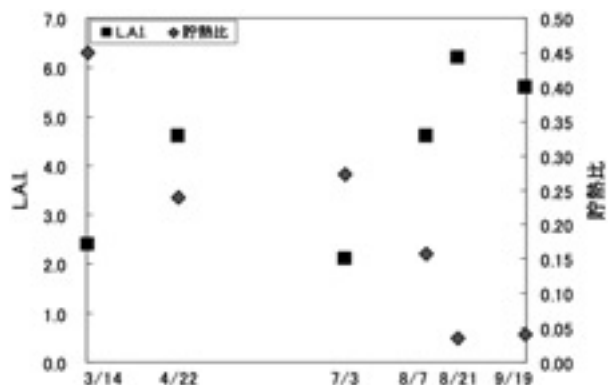


第10図 小麦畑・水稲田にける熱収支の日変化 (2004年)

・小麦期 3月14日 ・小麦期 2月44日 ・水稲期 7月3日 ・水稲期 8月7日
 ・水稲期 8月21日 ・水稲期 9月19日

るとされ (岩切1964)、季節的に変化する。しかし、植被下の正味放射量の値が推定できなかったために、植被層上面の値を用いた。第11図には、L. A. I. と貯熱比の季節変化の関係を示した。貯熱比は、各観測日において3時~17時の毎時の値を平均したものである。また、小麦期および水稲期 9月19日においては湛水がないために、地中フラックスのみである。

第11図より、小麦期 3月14日において貯熱比が0.45と最も大きく、植被の未発達 (L. A. I. = 2.4) によって、群落内に日射がよく透過しており、受熱 (貯熱) 状態であることを表している。これは、第4図および第10図からも示唆される。しかし、ほぼ同じ L. A. I. = 2.1 であっ



第11図 小麦畑・水稲田における貯熱比と L. A. I. の季節変化 (2004年)

表3 小麦畑・水稲田における日蒸発散量と日平均蒸発散量の季節変化

日付	日蒸発散量 (mm day ⁻¹)	日平均蒸発散量 (mm h ⁻¹)
3月14日	- 0.34 (0.07)	- 0.02
4月22日	- 0.27	- 0.02
7月3日	5.74	0.38
8月7日	4.97	0.45
8月21日	1.25 (3.44)	0.08
9月19日	1.43 (4.43)	0.10

(2004年)

() 内は蒸発散量のみで凝結を含まない

た水稲期7月3日においては、貯熱比が0.27と約半分程度に減少した。この原因は2つ要因が考えられる。第一の要因として、7月3日午後において潜熱フラックスの不足分に対して、水体貯熱量 (W) からの熱の供給が生じていたと考えられる。このため、日貯熱量 ($G+W$) は減少し、結果的に貯熱比も減少したと考えられる。第二の要因として、水稲田では、灌漑水により、土壌水分が飽和状態また水温日較差が小さいことから、土層における熱流量および熱貯留量が小さくなることあげられる(第10図参照)。一方、小麦畑では土壌水分が少ないために熱容量が低下し温度変化が大きくなり、比較的熱流量および熱貯留量が、水稲田に比べて大きくなる。この特徴が、小麦期4月22日と水稲期8月7日で見られる。両観測日において植被の繁茂を表す L. A. I. は同じ4.6であったが、小麦期4月22日に貯熱比は0.24と水稲期8月7日に0.16を示し、乾燥土壌である小麦畑が高い値となった。

異なる土壌水分およびその変化による、貯熱比および貯熱量の変化は、Joseph ほか (2002) によっても示されている。この特性を利用して、耕作地において作物を栽培する1つの形態が、本研究の小麦畑・水稲田の二毛作地である。つまり、冬季～春季における関東地方特有の少ない降雨によって、乾燥土壌となる小麦畑においては、地温を冬小麦の栽培に利用しているものと解釈できる。

水稲期間全体の貯熱比は、季節の進行に伴い減少する傾向が見られる。このような、同じ地表面の状態において、貯熱比が変化する要因としては、植被による日射量の減衰の影響だけではなく、風速による気層内の熱伝達の変化が影響していると考えられる。特に、灌漑期の水稲田では、土壌水分が常に飽和して不変であることから、日射と風速の両者の関係が考えられる。

3) 蒸発散量の変化

表3に、小麦畑・水稲田における日蒸発散量を示した。蒸発散量 (E_T) は潜熱フラックスを使用して(8)式から推定した。表において、負の値は凝結を示す。また、日蒸発散量の合計時間は水稲期8月7日(7時から17時)を除き3時から17時であるが、これには朝方において凝結が生じている時間も含まれていることから、潜熱フラックスが正の値を示す時間帯、つまり実際の蒸発散量が生じたときの値も併記した。

$$E_T = LE/\rho_w L \quad (\text{mm h}^{-1}) \quad (8)$$

$$L = 2500.8 - 2.3668 T_w \quad (\text{Jg}^{-1}) \quad (9)$$

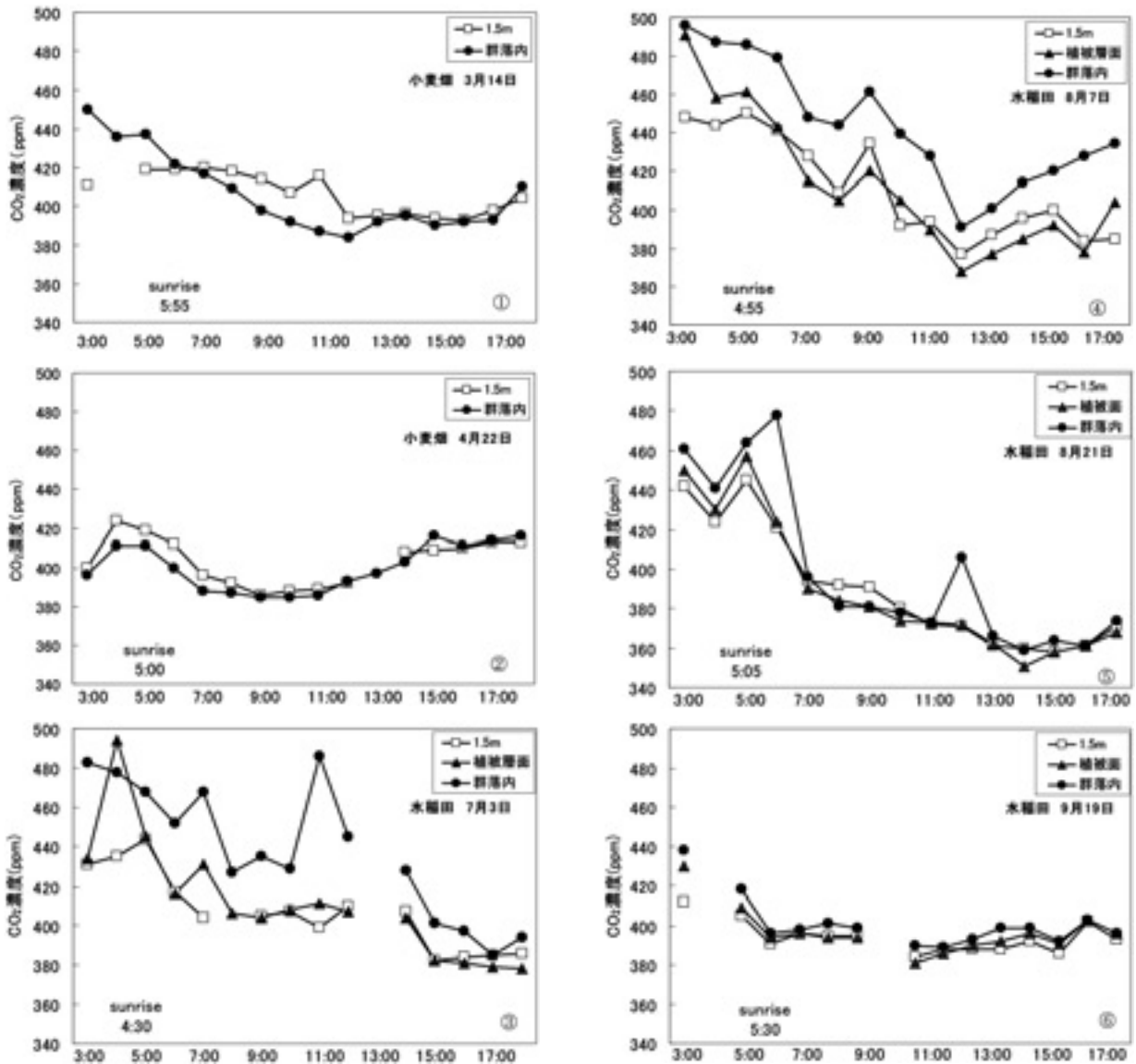
ここで T_w は水温、 L は蒸発の潜熱、 ρ_w は水の密度とする。 E_T は mm で表わされるが、ここでは1時間おきの積算値 (mm h^{-1}) として求めた。

表3より、乾燥土壌である小麦期3月14日と4月22日は、蒸発散が負の値を示したことから、一日を通して凝結が生じていたことが推測される。水稲期に入ると日蒸発散量は増加するが、水稲期8月21日および9月19日においては E_T が急激に減少していることから、朝方の短時間において凝結が生じ、日蒸発散量としては減少していると推察される。蒸発散研究グループ (1967a, b) が埼玉県鴻巣で行った熱収支法による蒸発散量の推定によると、1時間平均を基に7月は2.77mm/day、8月は3.76mm/day、9月は2.43mm/day が得られている。これらの結果と、本研究で得た値を単純に比較することはできないが、本研究の9月における蒸発散量は問題があると考えられる。

4. 3 CO₂濃度および蒸発散量との関係

1) 高度別 CO₂濃度の変化

CO₂の観測時間は、3時から17時または18時で、測器の不具合のため一部の期間(小麦期)と時間に欠測が生



第12図 小麦畑・水稲田における高度別 CO₂濃度の季節変化 (2004年)

・小麦期 3月14日 ・小麦期 4月22日 ・水稲期 7月3日 ・水稲期 8月7日
 ・水稲期 8月21日 ・水稲期 9月19日

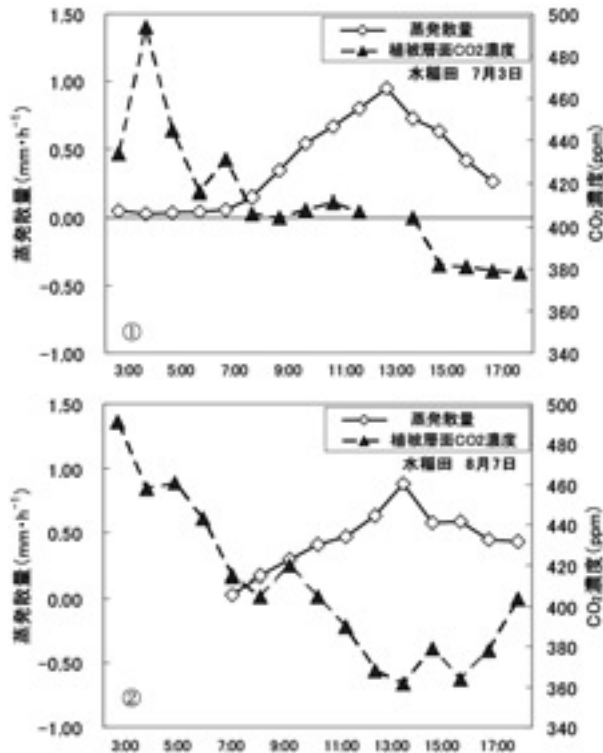
じた。

第12図に、小麦畑・水稲田の高度別 CO₂濃度の日変化を示した。小麦畑および水稲田のすべての観測日において、日の出後、各高度共に CO₂濃度の急激な減少が生じた。しかし水稲期では、水稲が成熟するに従いその減少は小さくなる傾向を示した。小麦期においては、3月14日の早朝を除いて、群落内と1.5mの CO₂濃度差は、常に小さく推移していた。水稲期に入ると、その傾向は一転し、水稲生育期間全体で群落内 CO₂濃度は、1.5mおよび植被層面よりも高い値で推移したことから、土壌からの CO₂濃度の放出が活発であることが考えられる。

2) 蒸発散量と植被層 CO₂濃度の日変化

植被層 CO₂濃度の変化、特に濃度の減少が、蒸発散量の変化に関係していると考えられることから、以下の検討を試みた。これは、蒸散量が気孔開度および気孔抵抗と直接関係しているとされ (伊藤ほか1984)、気孔抵抗が CO₂濃度や光強度の外的要因によって支配されていることから (長谷場1973)、植被層 CO₂濃度の変化が、結果的に蒸発散量の変化に影響するという仮定をもとに行ったものである。CO₂濃度は日変化の振幅が大きいことから、日変化により検討した。

第13図に水稲期7月3日と8月7日の植被層 CO₂濃度と蒸発散量の日変化を示した。本研究では蒸発散量を潜熱フラックスから求めたことから、潜熱フラックスが推



第13図 水稲田における蒸発散量と
植被層 CO₂濃度の日変化

水稲期 7月3日 水稲期 8月7日

定できた時間帯においてのみ示した。13- 図および13- 図において、蒸発散量が午前から正午にかけて増加する傾向が見られるが、8月7日9時以降には蒸発散量の増加に伴いCO₂濃度が減少する傾向が顕著にみられた。一方、7月3日8時から14時においては、蒸発散量は増加しているが、植被層CO₂濃度はほぼ一定である。8月7日には水稲植被が繁茂していることを考慮すると、蒸散を含む蒸発散が多く生じていたことが考えられる。しかし、7月3日には植被が未発達であり、CO₂の吸収が弱く蒸散作用は少なく、一方で植被密度が少ないことにより、水温が上昇し水面蒸発が盛んになる。よって、合計値としての蒸発散量は増加しているが、その内訳は蒸発量が多いと推測された。

5. 結論

冬から春ないし初夏に小麦、夏から秋に水稲を栽培する方法は、関東地方特有の気候を生かし、作物生産を上げるうえで、実に合理的な耕作形態であることが熱収支解析からわかった。小麦期では気温が低く、生育に必要な温度が得られない部分を、乾燥した土壌と晴天日がもたらす地温上昇を利用している。関東地方の冬は降水量が少ないため、水分供給がなくても生育可能な小麦が栽

培されていることも指摘できる。冬小麦の栽培期間は全体で8ヶ月であるが、実質的な成長は4月から6までのわずかな期間である。水稲期間は4ヶ月と短い7月から10月にかけての気温上昇と日射量の増大を利用している。

本研究では、水稲・小麦の栽培期間を通した二毛作畑としての熱収支およびCO₂濃度、植被層上下面における微気象も含めて、季節変化を捉えた。これによって得られた結果は、単一の水稲田における従来の研究とほぼ同じではあったが、二毛作という一年を通して異なる作物の栽培形態により、季節的に大きく異なった熱収支の特性を得たことは、耕地の熱収支研究の中で、新しい見解が得られたものと考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、終始指導をいただいた新井 正教授、福岡義隆教授、実験用地をお貸し頂いた地球環境科学部事務室の上山豊明氏に深くお礼を申し上げます。

引用文献

- 新井 正 (2004) : 『地域分析のための熱・水収支水文学』 古今書院.
- 新井正・西沢利栄 (1974) : 『水温論』 共立出版 32 - 39, 280 - 291.
- 福岡義隆・張一平・鳥居淳 (1990) : 水田と畑における熱収支の違い. 農業気象学会 中国・四国支部会誌 No.3.
- 市村一男 (1961) : 水田用水に関する研究 水田の熱収支と稲作の関係について, 農電研究所所報 No. 2, 1 - 56.
- 市村一男・山本雄二郎・中山敬一 (1965) : 水稲植被が水田の水温日較差に及ぼす影響. 農業気象 Vol. 20, 155 - 159.
- 伊藤代次郎・長谷場徹也 (1984) : 水稲の葉温・蒸散に及ぼす短波放射と風速の影響. 農業気象 Vol. 40, 21 - 28.
- 岩切 敏 (1964) : 水稲植被の繁茂にとまなう水面熱収支特性の変化について. 農業気象 Vol. 19, 89 - 96.
- 蒸発散研究グループ (1967a) : 水田の放射状態について. 農業気象 Vol. 22, 97 - 102.
- 蒸発散研究グループ (1967b) : 水田の蒸発散. 農業気象 Vol. 22, 149 - 157.
- 岸田 巧・岩田 徹・三浦健志・大滝英治・西村勝利・樋口宣寿・大藤明克・原園芳信・宮田 明 (2001) : 水田灌漑水中の二酸化炭素濃度の日変化に影響を与える要因. 農業気象 Vol. 57, 117 - 126.
- 中山敬一・市村一男・山本雄二郎・松田松二 (1965) : 水田の気象環境. 農電研究所所報 No.6, 1 - 34.
- 農業技術協会 (1997) : 新訂『農業気象の測器と測定法』 日本農業気象学会編
- Penman, H. L. and I. F. Long (1959) : Weather in wheat: an

essay in micro-meteorology. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society Vol. 86, 16 - 46.
Santanello, J. A. Jr. and M. K. Friedel (2003) : Diurnal covariation in soil heat flux and net radiation. Journal of Applied Meteorology Vol. 42, 851 - 862.

内嶋善兵衛・宇田川武俊・堀江武・小林勝次（1967）：作物群落内におけるエネルギーとガス交換に関する研究(1) トウモロコシ群落内の炭酸ガス環境 . 農業気象 Vol. 23, 99 - 108.

Seasonal and Diurnal Change of Micro-climate in a Double Cropping Field of Rice and Winter Wheat

Naoki SHINOZAKI

Graduate student of Geo-environmental Science, Rissho University

Double cropping of rice and winter wheat has been a common cultivating practice in the Kanto District. The purpose of this study is to clarify the micro-climate of the double crop farm land throughout the year, including heat balance and carbon dioxide. The observation was made in a farm land at Osato Town, Saitama Prefecture.

Air temperature was measured at three heights of 1.5m above the ground surface, top layer of the plant canopy and near the ground or water surface in the plant cover. Wind velocity, solar radiation, vapor pressure and carbon dioxide were mainly measured at two heights at 1.5m and in the plant cover. Ground temperature, water temperature, albedo of the plant cover or earth's surface and water content of the soil were also measured. Leaf Area Index (L. A. I.) for each growing stage was also decided.

Solar radiation in the plant cover is governed by the leaf density. Vertical temperature distribution, wind speed and the other climatic elements in and above the plant cover also largely depend on L. A.I. which changes according to the growth plant. Solar radiation in the plant cover dropped to 11% of the outside in the highly matured stage. Air and soil or ground temperatures in the plant cover become low relative to the surface layer and 1.5m layer in high L. A.I. condition of the matured stage. Daily range of temperatures under the plant cover also decreased under high L. A.I. Wind speed in the plant cover during the young stage varied with the wind speed outside, but it remained nearly constant in the matured stage.

Characteristics of the heat balance of rice paddy and wheat field are different. Wheat is planted during winter and spring under cold but dry and sunny climate. As soil in this season is dry with low thermal capacity, the daily soil temperature range is wide. Therefore, soil heat flux is dominant among the heat balance items and evaporation is almost lacking in the wheat field. In the rice paddy, planted during hot and rainy season, the daily variations of water and soil temperatures are reduced by high heat capacity of water and wet soil. Evaporation and transpiration are active in the rice field. During the young stage of rice plant, reduction of carbon dioxide in daytime over the field is not clear, because of low value of L. A.I. In the matured stage, the reduction due to active photosynthesis and transpiration becomes clear.

It may be said that wheat is cultivated using solar radiation and soil heat storage, and rice uses solar radiation, high temperature and much water. Traditional double cropping is adapted to the climate of this region.

Keywords: double cropping, heat balance, carbon dioxide, micro-climate, leaf area index, seasonal change, diurnal change