

C-062 東アジアの植生に対するオゾン濃度上昇のリスク評価と農作物への影響予測に関する研究

(2) オゾン沈着プロセスモデルの開発

国立大学法人 愛媛大学農学部

地域環境水文学研究室

大上博基

〈研究協力者〉	愛媛大学農学部農学研究科（平成19年度修了）	稲田健太
	愛媛大学農学部（平成19年度卒業）	本廣真吾
	愛媛大学連合農学研究科（平成18年度修了）	賀 斌
	中国科学院土壤科学研究所	ZHU Jianguo

平成18～20年度合計予算額 22,853 千円

（うち、平成20年度予算額 6,871 千円）

※上記の合計予算額には、間接経費 5,275千円を含む

[要旨] 本サブ課題では、中国江蘇省の農業地帯に設置した実験コムギ畑および水田で微気象観測と植物生理生態測定を行い、オゾン曝露量の影響を組み込んだ気孔コンダクタンス ( $g_s$ ) モデルを構築することにより、個葉におけるオゾンフラックスを推定するモデルを開発した。

冬コムギ1品種とイネ5品種の止葉について、気象条件、展葉後の日数(フェノロジー)と群落頂部における累積オゾンドウズ(AOT40)、時刻をパラメータとして、 $g_s$ をモデル化した。本モデルにより、AOT40が増加するにつれて $g_s$ が低下するプロセスが再現でき、そのプロセスが作物種とイネ品種間で異なることも明らかにできた。さらに、サブ課題(3)の化学輸送モデルで、この $g_s$ モデルを用いて東アジア地域における植生のオゾン沈着量を予測できるよう、群落上空のオゾン濃度から群落高さのオゾン濃度を推定するサブモデルを開発した。このモデルは、オゾン濃度の鉛直分布を対数分布で表現しており、粗度長がパラメータである。このモデルにより、群落高さのオゾン濃度を良好に再現できた。

次に、気象条件やAOT40の影響を組み込んだ品種別の止葉個葉光合成 ( $P$ ) モデルを開発した。その結果、オゾンの影響による $g_s$ の低下と $P$ の低下を関連付けることができ、AOT40が増加するにつれて $P$ が低下するプロセスとその影響の品種間差を明らかにすることができた。

$g_s$ モデルと $P$ モデルを用いて、止葉展開から収穫までの期間の止葉によるオゾン沈着積算量 (AFst6) とNPPを推定した。コムギでは従来、AFst6と減収の関係 (ドウス・レスポンス) から減収を予測する試みが進められてきた。しかし、本研究でイネ4品種を比べた結果では、NPPの低下率が最大であった品種SY63で、AFst6の増加率が最も小さかった。この結果から、オゾン沈着積算量から減収率を求める方法の問題点が明らかとなり、減収を予測できる新たな影響指標を検討する必要が指摘された。本研究結果からは、 $P$ モデルによる減収予測の有効性が期待できる。

[キーワード] コムギ、イネ、気孔コンダクタンス、オゾンフラックス、多層モデル

## 1. はじめに

オゾン濃度上昇が農作物の収量に及ぼす影響を明らかにするためには、葉の気孔を通してのオゾン沈着（オゾンフラックス）の積算量を予測することが不可欠である。その予測のために最も重要なのがオゾン曝露量（オゾンドウス）の影響を組み込んだ気孔コンダクタンス( $g_s$ )モデルであり、これまでも欧州や米国でいくつかの作物種について開発されてきた。しかし気孔の応答は、作物種はもちろん品種によって異なると考えられること、対象地域の気象条件と水分条件によって気孔応答に重要な影響を与える要因が異なることから、対象地域において主要作物種についてのモデルの開発が要求される。その上、オゾンドウスを組み込んだイネの $g_s$ モデルは、まだ開発されていない現状にある。そこで本サブ課題では、中国江蘇省の農業地帯に設置した実験コムギ畑および水田で微気象観測と植物生理生態測定を行い、種別品種別の $g_s$ モデルを構築することにより、個葉におけるオゾンフラックスを推定するモデルを開発した。

気孔を通してのオゾン沈着積算量をモデルで計算し、作物収穫後に判明する収量低下との関係（オゾンドウス・レスポンス）を明らかにすることが、本研究課題全体の目的のひとつであるが、本サブ課題ではオゾンドウスを組み込んだ個葉光合成モデルを開発し、オゾンフラックス積算量と純一次生産量(NPP)との関係も検討した。

## 2. 研究目的

従来の研究によると、高オゾン濃度がコムギやイネの収量に及ぼす影響は、とくに止葉におけるオゾン沈着量(オゾンフラックス)の蓄積と高い相関にあるとされている。本サブ課題では、中国江蘇省のコムギ・イネ2毛作地帯に設置した実験圃場で微気象観測と植物生理生態測定を行い、気象条件やオゾンドウスの影響を組み込んだ品種別の気孔コンダクタンス( $g_s$ )モデルを開発することを第一の目的とした。また、 $g_s$ モデルに組み込むべきサブモデルとして、群落頂部のオゾン濃度を推定するモデルと葉面に入射する光合成有効放射を推定するモデルの構築も行った。

次に、オゾン沈着量の蓄積による光合成速度の低下が予測できれば、オゾンドウスが収量低下に及ぼす影響をより直接的に予測する方法として有効であると考え、気象条件やオゾンドウスの影響を組み込んだ品種別の止葉個葉光合成( $P$ )モデルの開発を第二の目的とした。

第三に、 $g_s$ モデルと $P$ モデルを用いて、止葉によるオゾン沈着量積算量とNPPを品種別に推定することを目的とした。ここで推定されたオゾンフラックス積算量は、サブ課題(5)において減収量と関係付けられる。また、推定されるオゾン沈着量とNPPの関係を考察する。

## 3. 研究方法

観測は、中国江蘇省江都市郊外のコムギ・イネ2毛作地帯に設置された開放系オゾン暴露実験圃場(FACEサイト)で実施した。FACEサイト内には高オゾン濃度区(E-O3) 3箇所と非制御の外気オゾン濃度区(A-O3) 4箇所が設置された。E-O3では、FACE施設により直径14mの八角形状に設置したパイプからオゾンが放出され、A-O3のオゾン濃度の1.5倍(2008年は1.6倍)に制御された。オゾンの放出は2007年4月14日に開始された。A-O3の1箇所に気象観測システムを設置し、E-O3の1箇所に気象観測システムとオゾン濃度分布観測システムを設置した。また、FACE圃場から約1kmの耕作地域に、オゾン濃度非制御の自然状態でフラックスとオゾン濃度分布の観測を主体とする気象観測所がサブ課題(1)によって設置された(Fluxサイト)。

FACEサイトには数品種の冬コムギとイネが栽培されたが、本研究ではそれらのうちの主要品種；コムギは揚麦(Yang Mai)16号、イネは2007年に武育粳(Wu Jing)15号、2008年に武運粳(Wu Yun Jing) 21号、兩伏培九(Liang You Pei Jiu)、汕优 (Shan You) 63号、揚稻 (Yang Dao) 6号を研究の対象とした。Wu Jing 15とWu Yun Jing 21は日本型、Yang Dao 6はインド型のいずれも純系品種、Liang You Pei Jiuと Shan You 63は高収量を目的として開発されたハイブリッド品種である。

コムギ畑とイネ水田を対象としたすべての観測項目は表-1の通りである。

表-1 本研究に関連する観測項目

微気象項目	場所	測定高度など	測定方法・機器
微気象項目(自動測定による連続測定)*			
放射収支4項目	A-O3	3m	CNR1 (Kipp & Zonnen)
群落上の気温・湿度	A-O3	2.8, 1.45m	HMP45A (Visala)
群落内の気温・湿度	E-O3	1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.25m	CS215 (Campbell)と自作通風装置
Flux		1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.25m	CS215 (Campbell)と自作通風装置
水温・地温	全区	深度 0.02, 0.05, 0.10, 0.20m	T熱電対
地中熱フラックス	A-O3	深度 0.02m	HFT3 (Campbell)
風速	Flux	0.8, 0.6, 0.4 → 1.0, 0.5, 0.2m	HNA (East-30)
群落の放射温度	Flux**	0.8, 0.6, 0.4, 0.2m	FT-H30, FT-50 (Keyence)
O <sub>3</sub> とCO <sub>2</sub> 濃度***	E-O3	2.0, 1.2, 0.8, 0.6, 0.4, 0.25m	1150(Dylec),
Flux		2.72, 1.52, 0.9, 0.6, 0.3, 0.2m	LI-840 (Li-Cor)
土壌水分	A-O3	0.05, 0.1, 0.2 m	EC-5 & Em50 (Decagon)
Flux		0.05, 0.1, 0.2 m	ECHO & Em5 (Decagon)
微気象項目(手動測定)			
群落内下向き日射量	A&E-O3	群落内高度10cm間隔	PCM-200 (Prede)
群落の放射温度	A&E-O3	群落内高度10cm間隔	THI-500 (Tasco)
蒸発散量と株間蒸発量	A-O3	群落全体、土壌面・水面 水田	自作ライシメータ
植物生理生態関係			
個葉蒸散・光合成速度	全区	群落各層の葉	LI-6400 (Ki-Cor)
気孔コンダクタンス	全区	群落各層の葉	SC-1 (Decagon)
作物生育関係			
草丈(群落高)	全区		
LAI、PAI	全区	高度10cm間隔	LI-3050C, LI-3000C, LAI-2000 (Li-Cor)

\* 土壌水分以外の計測はCR23Xデータロガー (Campbell) により10秒インターバルで行われ10分毎にデータが保存された。土壌水分はEm5, Em5b, Em50データロガー (Decagon) により10~30分インターバルで測定された。

\*\* コムギ耕作時に測定。

\*\*\* ポンプユニット+ 電磁弁ユニット (日本アンス製) により、各高度の空気が2分間隔でサンプリングされた。測定システムは主としてサブ課題(1)によって管理された。

上記の観測以外にもサブ課題(1)により、Fluxサイトで渦相関法によるフラックス観測とA-O3と同様の微気象観測が行われた。

#### 4. 結果・考察

##### (1) コムギ

##### 1) A-O3とE-O3における植物体面積密度の比較

A-O3とE-O3で測定した植物体の部位別面積密度を表-2と図-1に示す。2007年の出穂開花期直前からオゾンの放出が開始されたため、ここには2008年の測定結果のみを示す。緑葉、黄緑葉、枯葉すべてのLAIは、6.83(A-O3)と6.89(E-O3)でほぼ同等であったが、緑葉だけのLAIは5.02(A-O3)と4.05(E-O3)で、E-O3における高オゾンの影響を受けた葉の老化が確認された。

表-2 コムギ(Yang Mai 16)の草丈と各種植物体面積指数

測定日と測定個体数：2008年4月21日(18-19個体)

場所	群落高(cm)	LAI (緑葉)	(黄葉)	(枯葉)	茎面積指数	穂面積指数	PAI	LAI2000
A-O3 (A10)	61.5	5.02	1.09	0.72	1.28	0.06	8.17	5.34
E-O3 (F13)	61.6	4.05	1.98	0.85	1.08	0.06	8.03	5.05

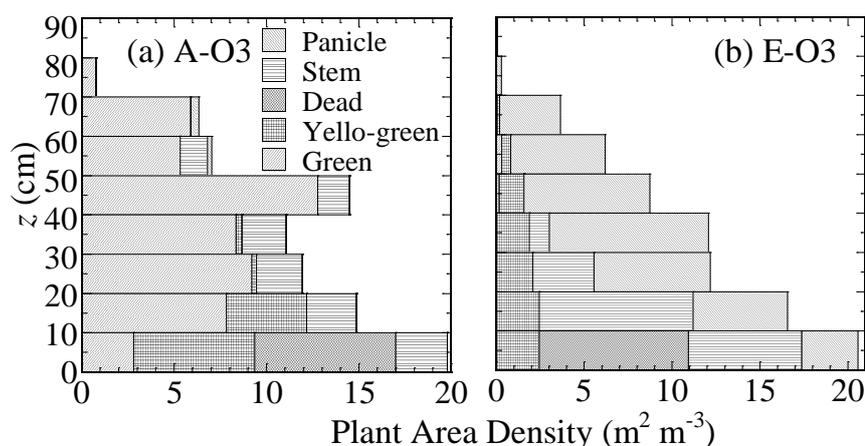


図-1 コムギ(Yang Mai 16)の植物体部位別面積密度の鉛直分布 (A-O3とE-O3、2008年4月21日)

## 2) 気孔コンダクタンス( $g_s$ )のモデル化

コムギの出穂開花期から収穫前までの約40日にわたり（2008年4月17、18、23日、5月3、12、23日；図-2に矢印で示す）、蒸散光合成測定装置(LI-6400)で止葉および第2～4葉の $g_s$ 測定を行った。測定期間における1時間平均オゾン濃度の経時変化とAOT40（40ppbを越える日中1時間平均オゾン濃度の積算値）を図-2に示す。AOT40を計算するためのオゾン濃度積算開始日は、Mapping manual (UNECE, 2004)に従い、開花日（4月29日）前270度日の4月10日とした。AOT40のオゾン濃度には、コムギ群落頂部付近における測定値( $[O_3]_{\text{canopy}}$ )を採用した。

$g_s$ のモデル化にあたり、 $g_s$ への影響要因として葉面に入射する $PAR_l$ 、 $AOT40_{\text{canopy}}$ 、4月10日からの日数(days)、一日の時刻(time)、葉温飽差 ( $VPD_{\text{leaf}}$ )、土壌水分 (SWC)、気温 ( $T_a$ ) を対象とした。経過日数はphenologyの影響を反映し、時刻は植物体内水分の変化を反映する要因と位置づけた。

$g_s$ モデルには、Emberson et al. (2000)も適用している下記のJarvis(1976) 型モデルを適用した。

$$g_s = g_{s_{\max}} f(PAR_l) f(AOT40_{\text{canopy}}) f(\text{phenology}) f(VPD_{\text{leaf}}) f(\text{SWC}) f(T_a) f(\text{time}) \quad (1a)$$

$$g_s = g_{s_{\min}} \quad (g_s \text{ by (1a)} \leq g_{s_{\min}}) \quad (1b)$$

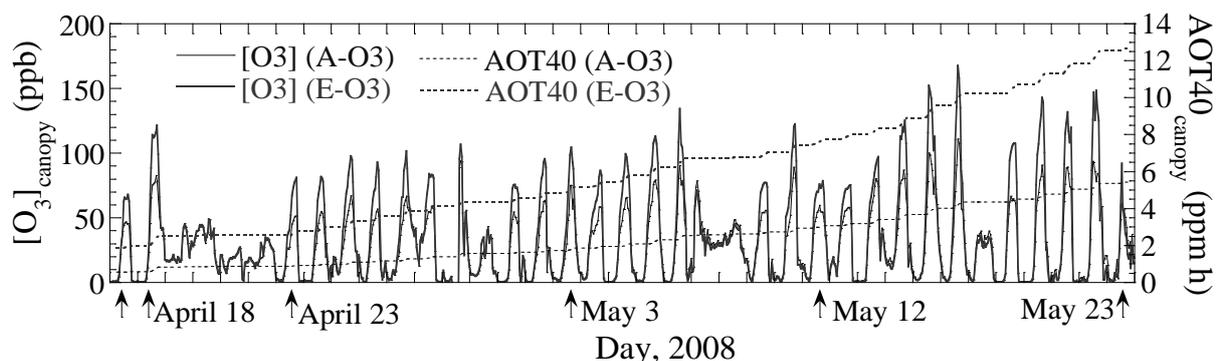


図-2 A-O3とE-O3における群落頂部付近のオゾン濃度; $[O_3]_{\text{canopy}}$  と AOT40 時間変化

$f(PAR_l)$ 、 $f(AOT40_{\text{canopy}})$ 、 $f(\text{phenology})$ 、 $f(VPD_{\text{leaf}})$ 、 $f(\text{SWC})$ 、 $f(T_a)$ 、 $f(\text{time})$ は、それぞれ上述の影響要因による相対関数( $0 \leq f \leq 1$ )である。測定された $g_s$ 値のうち、4月23日に $PAR_l = 2000$  ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )で測定された $0.777$  ( $\text{molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )が最大であったので、これを $g_{s_{\max}}$ とした。そして、このときに測定した $PAR_l = 0, 500, 1000, 1500$  ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )における $g_s$ 値を用いて $PAR_l$ と $g_s/g_{s_{\max}}$ の関係を図-3に示し、 $f(PAR_l)$ を図中の双曲線で表現した。また他の相対関数を1とし、 $PAR_l = 0$ のときの $g_s = 0.05544$  ( $\text{molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )を $g_{s_{\min}}$ とした。

$PAR_l = 2000$  ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )における $g_s/g_{s_{\max}}$ の実測値と各影響要因との単相関はそれぞれ、 $AOT40_{\text{canopy}}$ ; -0.51、経過日数(phenology); -0.45、時刻; -0.45、 $VPD_{\text{leaf}}$ ; 0.44、SWC; 0.25、 $T_a$ ; -0.24であった。これらの関係を考慮し、 $g_s$ の推定値が測定値を再現できるように、 $g_s$ に対する各相対関数のパラメータ化を試行錯誤で行った。なお、SWCと $T_a$ は制限関数として組み込まない方が $g_s$ を良く再現できたため、式(1a)の $f(\text{SWC})$ と $f(T_a)$ は1とした。

$$f(AOT40_{\text{canopy}}) = 1 \quad (AOT40_{\text{canopy}} \leq 1 \text{ ppm h})$$

$$= -0.03 (AOT40_{\text{canopy}} - 1) + 1 \quad (AOT40_{\text{canopy}} > 1 \text{ ppm h})$$

$$f(\text{phenology}) = 1 \quad (\text{days} < 31)$$

$$\begin{aligned}
 &= 1.7 \text{ Log} [(80 - \text{days})/12.646] && (\text{days} \geq 31) \\
 f(\text{VPD}_{\text{leaf}}) &= 1 && (\text{VPD}_{\text{leaf}} < 0.7 \text{ kPa}) \\
 &= -0.09 \text{ VPD}_{\text{leaf}} + 1.063 && (\text{VPD}_{\text{leaf}} \geq 0.7 \text{ kPa}) \\
 f(\text{time}) &= 1 && (\text{time}/24 \leq 0.45) \\
 &= -1.06 (\text{time}/24 - 0.45) + 1 && (\text{time}/24 > 0.45)
 \end{aligned}$$

モデルパラメータのうち $\text{VPD}_{\text{leaf}}$ は、大気飽差 $\text{VPD}_a$ とある程度の相関を有していたことに加え、本モデルにおける $g_s$ 推定に対する $\text{VPD}$ の貢献はあまり大きくないため、 $\text{VPD}_{\text{leaf}}$ の代わりに $\text{VPD}_a$ を適用できた。

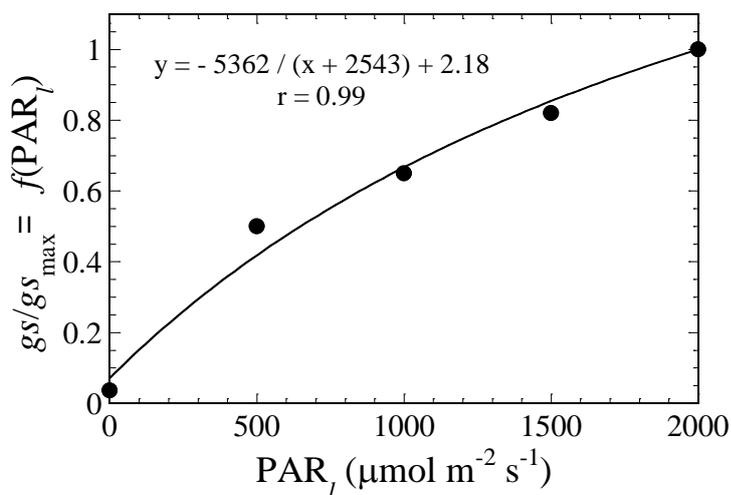


図-3  $g_s$ の測定値を用いての  $f(\text{PAR}_l)$ のパラメータ化

前記6日間において、A-O3とE-O3の両区で測定された $g_s$ とモデルの推定値を図-4に示す。止葉を対象として構築したモデルであるが、第2~4葉についても相当するAOT40とphenologyを入力することで、図に示すように $g_s$ を良好に再現できた。有意水準0.05で両者に有意差は無かった。本モデルにより、累積オゾン曝露量が増加するにつれて $g_s$ が低下するプロセスが再現できた。

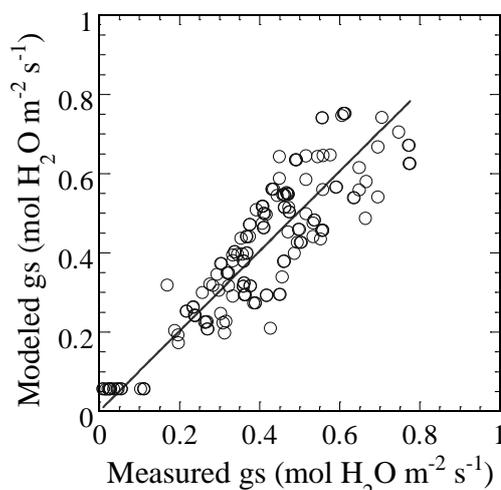


図-4 コムギ止葉、第2、3、4葉の $g_s$ の測定値(A-O3とE-O3で測定)とモデルによる推定値の比較

### 3) 群落頂部におけるオゾン濃度([O<sub>3</sub>]<sub>canopy</sub>)のモデル化

本モデルをサブ課題(3)が開発したTakigawa et al. (2007)のGlobal and Regional Chemistry-Transportモデル (CTM)とリンクさせ、CTMによって予測される上空の[O<sub>3</sub>]を用いてgsを予測するためには、[O<sub>3</sub>]<sub>canopy</sub>を基準高度zにおけるオゾン濃度[O<sub>3</sub>]<sub>z</sub>から予測するサブモデルを構築しておく必要がある。

そこで、群落上部におけるオゾン濃度の鉛直分布が対数分布をなすと仮定し、

$$[O_3]_{\text{canopy}} = [O_3]_z \ln[(z-d)/z_{0O_3}] / \ln[(z_h-d)/z_{0O_3}]$$

で[O<sub>3</sub>]<sub>canopy</sub>を推定することにした。ここで、基準高度は200 cmとし、z<sub>h</sub>は群落高、dは地面修正量(=0.6 z<sub>h</sub>)である。z<sub>0O<sub>3</sub></sub>はオゾン濃度分布に関する粗度長である。日中10時間における[O<sub>3</sub>]<sub>canopy</sub>測定値の平均を再現するように日ごとのz<sub>0O<sub>3</sub></sub>を決定し、気象条件、土壌水分、群落高、[O<sub>3</sub>]、経過日数などの相関を分析した結果、風速との相関(相関係数-0.7)が他と比べて特に高かった。そこで、z<sub>0O<sub>3</sub></sub>は高度320cmの風速(u)との線形回帰式；

$$\log(z_{0O_3}) = -1.2181 u - 3.6231$$

でモデル化した(図-5)。高度100cmにおけるオゾン濃度[O<sub>3</sub>]<sub>z100</sub>の推定値と測定値の比較を図-6に示す。モデルによる再現性が非常に高いことから、オゾン濃度の鉛直分布を対数分布とした仮定の妥当性が確認された。[O<sub>3</sub>]<sub>canopy</sub>の推定値と測定値の比較を図-7に示す。有意水準0.05で両者に有意差は無かった。このように、本モデルの有効性が確認できた。

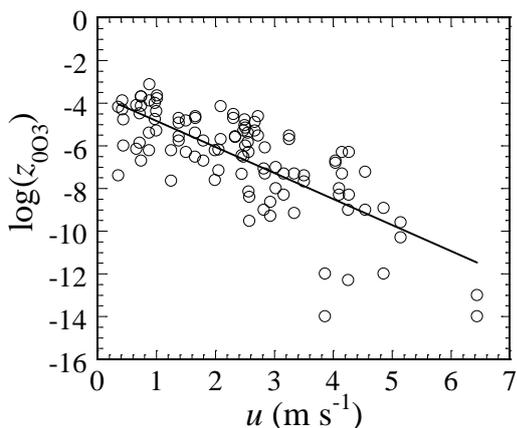


図-5 高度3.2mの風速uとlog(z<sub>0O<sub>3</sub></sub>)の関係  
(Fluxサイト、2008年4月1日～5月23日)

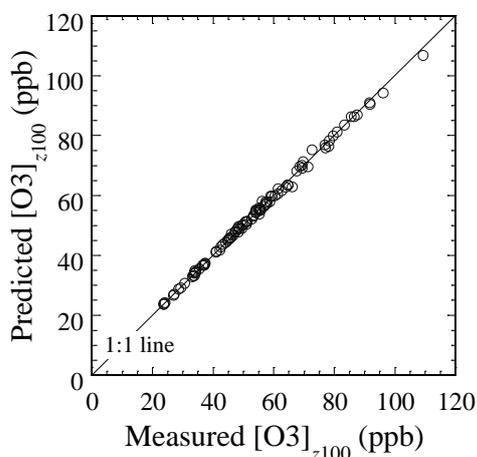


図-6 [O<sub>3</sub>]<sub>z100</sub>の測定値とモデルによる推定値の比較

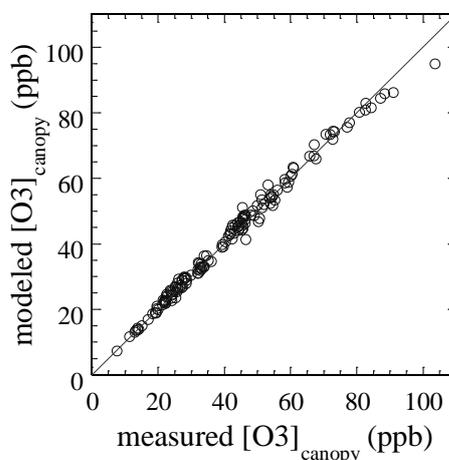


図-7 [O<sub>3</sub>]<sub>canopy</sub>の測定値とモデルによる推定値の比較

#### 4) 葉に入射する光合成放射(PAR<sub>l</sub>)のモデル化

本gsモデルは、gsと同時に測定されたPAR<sub>l</sub>を主要なパラメータとしている。しかし、PAR<sub>l</sub>は群落上部の全天PARと異なり、群落の構造（葉の傾きと重なり）、しかも止葉の存在する群落上部層だけでなく群落全体の構造によって変化する。そのため、gsモデルをサブ課題(3)に提供するためには、PAR<sub>l</sub>を推定するモデルが必要となる。

葉の陽側と陰側におけるPAR<sub>l</sub>は当然異なるが、LI-6400による測定方法を考慮すると、PAR<sub>l</sub>には陽側に入射するPARを当てることができる。群落内のある高度zにおけるPAR<sub>l</sub>は次のように表現できる(Oue, 2003a)。

$$PAR_l(z) = F_l(z) [PAR_{dir}^{\downarrow}(z) \sec\theta + df PAR_{dif}^{\downarrow}(z)],$$

ここでF<sub>l</sub>は葉の重なりと傾きを表すパラメータ、PAR<sub>dir</sub><sup>↓</sup>は下向き直達PAR、PAR<sub>dif</sub><sup>↓</sup>は下向き散乱PAR、θは天頂角、dfは散乱係数(= 1.66)である。群落頂部にある止葉の場合は、PAR<sub>dir</sub><sup>↓</sup>に全天直達PAR、PAR<sub>dif</sub><sup>↓</sup>に全天散乱PARを用いる。r<sub>dir</sub> (0 ≤ r<sub>dir</sub> ≤ 1)を全天PARに対する全天直達PARの割合とすると、PAR<sub>dir</sub><sup>↓</sup>にr<sub>dir</sub>PARを適用し、PAR<sub>dif</sub><sup>↓</sup>に(1 - r<sub>dir</sub>)PARを適用すれば、止葉のPAR<sub>l</sub>を得ることができる。

群落内部におけるPARと全短波放射の鉛直分布が相似であると近似すると、F<sub>l</sub>は次のような手順で決定できる。群落内部における植物体各部位による短波放射の透過、反射、吸収のプロセスを放射収支式に整理すると、次のような2ストリームモデル(Oue, 2001; 2003a; 2003b)で表現できる。

$$\begin{aligned} \frac{dSd^{\downarrow}(z)}{dz} &= [F_l(z) a_l(z) + (1 - r_s) F_s a_s(z) + F_p a_p(z)] \sec\theta Sd^{\downarrow}(z), \\ \frac{dSf^{\downarrow}(z)}{dz} &= [(1 - tf)F_l(z) a_l(z) + (1 - r_s) F_s a_s(z) + F_p a_p(z)] df Sf^{\downarrow}(z) - F_l(z) a_l(z) tf \sec\theta Sd^{\downarrow}(z) \\ &\quad - [r_l F_l(z) a_l(z) + r_p F_p a_p(z)] df Sf^{\downarrow}(z), \\ \frac{dSf^{\uparrow}(z)}{dz} &= - [(1 - tf)F_l(z) a_l(z) + (1 - r_s) F_s a_s(z) + F_p a_p(z)] df Sf^{\uparrow}(z) \\ &\quad + [r_l F_l(z) a_l(z) + r_p F_p a_p(z)] [df Sf^{\downarrow}(z) + \sec\theta Sd^{\downarrow}(z)], \end{aligned}$$

ここでSd<sup>↓</sup>とSf<sup>↓</sup>はそれぞれ下向きの直達および散乱短波放射、Sf<sup>↑</sup>は上向きの散乱短波放射、下添え字のl、s、pはそれぞれ葉、茎、穂を表す。aはそれらの片側面積密度、rはアルベド、tfは短波放射に対する透過率で0.1とした。F<sub>p</sub>は群落頂部のF<sub>l</sub>と等しいとした。植物体3部位のrは等しいとして、下部境界条件である土壌面のアルベドが0.05前後となるように最適化されたrは0.37前後であった。

このモデルを適用し、下向き短波放射；Sd<sup>↓</sup>(z)+Sf<sup>↓</sup>(z)の計算値が測定値を再現するようにF<sub>l</sub>(z)を決定した。パラメータ化に供したデータは4月20日14:30-15:30と17:00-17:30に測定され、r<sub>dir</sub>値は天候と全天日射量の測定値に基づきそれぞれ0.9と0.5とした。Sd<sup>↓</sup>(z)+Sf<sup>↓</sup>(z)の計算値と測定値を図-8に示す。このように測定値を再現するために得られたF<sub>l</sub>(z)のうち、止葉の存在するz = 0.6 - 0.8mのF<sub>l</sub>(z)は0.4 - 0.6であった。以上の結果から、コムギの止葉に関するF<sub>l</sub>は0.5程度としてよい。

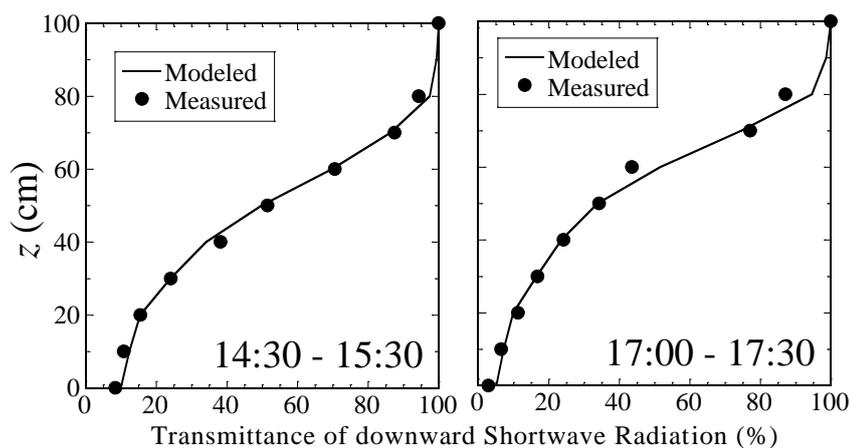


図-8 モデルで計算された下向き短波放射透過率の鉛直分布と測定値の比較 (A-03、2008年4月20日)

5) 個葉光合成(P)のモデル化

$P$ は $g_s$ に影響を受けるので、上記の6日間にLI-6400で $PAR_l = 2000$  ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )の人工光で測定した止葉の光合成速度； $P_{2000}$ について、 $g_{s2000}/g_{s2000\text{max}}$ と $P_{2000}/P_{2000\text{max}}$ の関係を図-9に示す。 $P_{2000\text{max}}$ は $P_{2000}$ の最大値(=  $34.8 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )である。両者の関係は、線形回帰式； $y = 1.0061 x - 0.0001$  ( $R = 0.923$ )で表現された。したがって、 $P_{2000}/P_{2000\text{max}}$ は $g_{s2000}/g_{s2000\text{max}} = f(\text{AOT40}_{\text{canopy}})f(\text{phenology})f(\text{VPD}_{\text{leaf}})f(\text{time})$ で代用できるため、 $P$ は次の式でモデル化できる。

$$P = P_{2000\text{max}} f_p(PAR_l) f(\text{AOT40}_{\text{canopy}}) f(\text{phenology}) f(\text{VPD}_{\text{leaf}}) f(\text{time})$$

ここで $f_p(PAR_l)$ は、個葉光合成に関する $PAR_l$ の相対関数であり、各 $PAR_l$ で測定された $P$ の最大値を $P_{2000\text{max}}$ で除した値を再現するように、次の非直角双曲線でパラメータ化された(図-10)。

$$f_p(PAR_l) = \{ m PAR_l + \Delta P_{PAR_l} - [(m PAR_l + \Delta P_{PAR_l})^2 - 4mn PAR_l \Delta P_{PAR_l}]^{0.5} \} / 2n + P_{PAR_l0} / P_{\text{max}}$$

$$\Delta P_{PAR_l} = (P_{PAR_l\text{max}} - P_{PAR_l0}) / P_{\text{max}}$$

ここで $P_{PAR_l\text{max}}$  (=  $49.7 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )は無有限大の $PAR_l$ におけるモデル $P$ 値、 $P_{PAR_l0}$  (=  $-3.58 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )は $PAR_l=0$ におけるモデル $P$ 値である。 $m$  (=  $0.0018282$ )は曲線の初期勾配、 $n$  (=  $0.1$ )は凸度である。

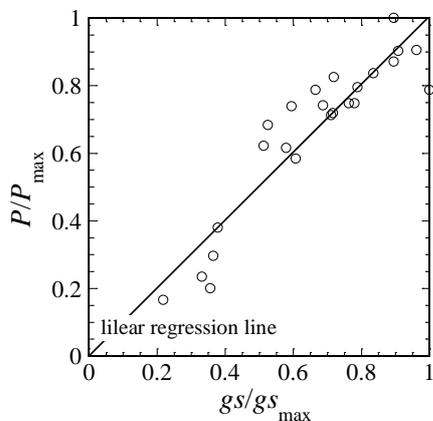


図-9  $PAR_l = 2000$  ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )における止葉の $g_s/g_{s\text{max}}$ と $P/P_{\text{max}}$ の関係 (2008年4月17、18、23日、5月3、12、23日)

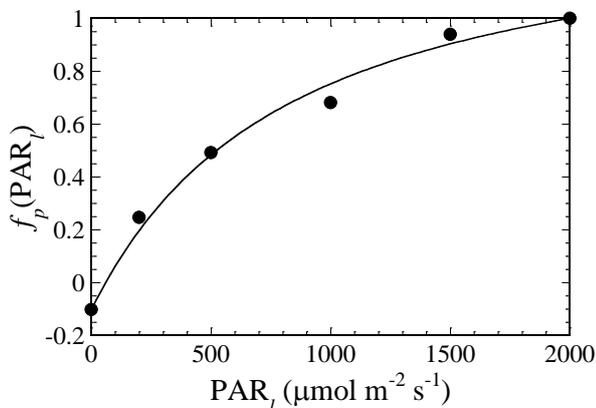


図-10  $f_p(PAR_l)$ のパラメータ化

つぎに、 $f(\text{AOT40}_{\text{canopy}}) f(\text{phenology}) f(\text{VPD}_{\text{leaf}}) f(\text{time})$ の値にかかわらず、 $\text{PAR}_l=0$ における計算 $P$ 値を $P_{\text{PAR}l0}$ にするために、次のような調整係数 $\alpha$ を考案し、総合的な相対関数 $\phi(\text{PAR}_l)$ をパラメータ化した(図-11)。

$$P = P_{\text{max}} \phi(\text{PAR}_l)$$

$$\phi(\text{PAR}_l) = \{m \text{PAR}_l + \Delta\phi_{\text{PAR}l} - [(m \text{PAR}_l + \Delta\phi_{\text{PAR}l})^2 - 4mn \text{PAR}_l \Delta\phi_{\text{PAR}l}]^{0.5}\} / 2n + P_{\text{PAR}l0} / P_{\text{max}}$$

$$\Delta\phi_{\text{PAR}l} = (\alpha P_{\text{PAR}l\text{max}} - P_{\text{PAR}l0}) / P_{\text{max}}$$

$$\alpha = 0.950 [f(\text{AOT40}_{\text{canopy}}) f(\text{phenology}) f(\text{VPD}_{\text{leaf}}) f(\text{time})]^{1.37} + 0.050$$

本モデルは止葉について開発されたが、図-12に示すように第2、3、4葉の $P$ も良好に再現された。有意水準0.05で両者に有意差は無かった。本モデルにより、累積オゾン曝露量が増加するにつれて $P$ が低下するプロセスが再現できた。

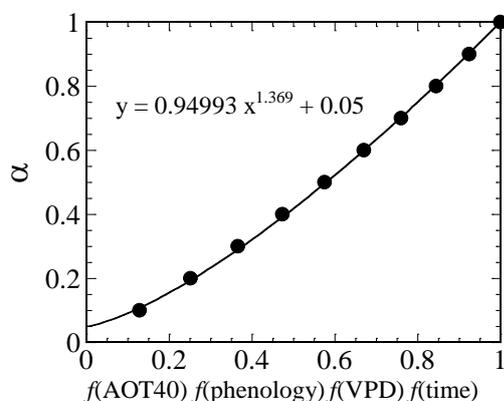


図-11  $\alpha$ のパラメータ化

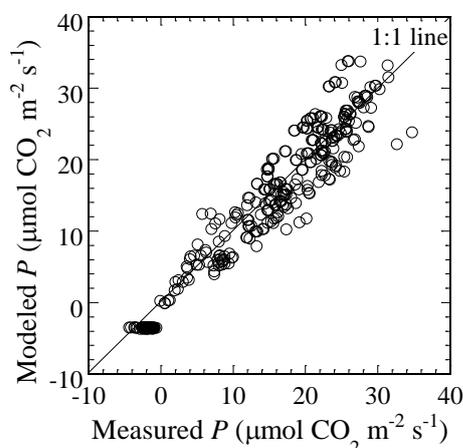


図-12 コムギ止葉、第2、3、4葉の $P$ 測定値(A-O3とE-O3で測定)とモデルによる推定値の比較

#### 6) モデルで計算した止葉の積算オゾン沈着量とNPPの比較

高度 $z$ における個葉のオゾン沈着量すなわちオゾンフラックス $F_{\text{O}_3}(z)$ は次式で与えられる。

$$F_{\text{O}_3}(z) = c_z(z) u(z) \{[\text{O}_3]_{\text{leaf}}(z) - [\text{O}_3](z)\},$$

ここで $u(z)$ は風速、 $[\text{O}_3]_{\text{leaf}}$ は $z$ における葉内オゾン濃度でゼロと仮定でき(Laisk et al., 1989)、 $[\text{O}_3](z)$ は大気オゾン濃度である。 $c_z(z)$ はオゾンの輸送係数であり次式で与えられる。

$$1 / c_z(z) = 1.4 / c_h + 1.68 u(z) / g_s(z).$$

ここで $c_h$ は熱の輸送係数、1.68は大気中における水蒸気拡散係数に対するオゾン拡散係数の比(Laisk et al., 1989)、1.4は境界層におけるその比である(Nussbaum and Fuhrer, 2000)。植物体における気孔以外の場所でのオゾン沈着は無視した。オゾン沈着量に関して欧州では、コムギやジャガイモに関するオゾンの危険レベルを予測する場合、 $-6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の閾値を超える $F_{\text{O}_3}$ の積算(AFst6)が推奨されている(UNECE, 2004)。本研究で開発した $g_s$ モデルと $P$ モデルを適用し、2008年の気象・大気条件で計算したA-O3とE-O3における止葉のAFst6とNPPを図-13に示す。

収穫直前のAFst6は、E-O3で $5.83 (\text{mmolO}_3 \text{ m}^{-2})$ 、A-O3で $3.76 (\text{mmolO}_3 \text{ m}^{-2})$ であった。高オゾン環境下でAFst6が56%高かったということになる。一方NPPは、E-O3で $17.9 (\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2})$ 、A-O3

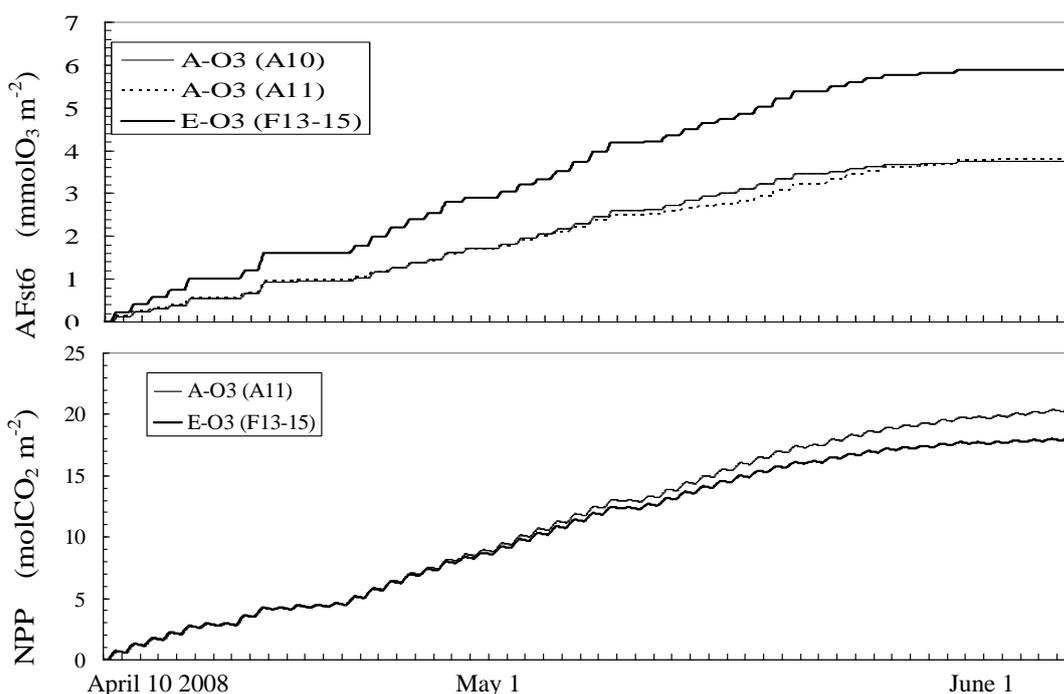


図-13 A-O3とE-O3におけるコムギ(Yang Mai 16)止葉のAFst6とNPP (2008年)

で  $20.4 \text{ (molCO}_2 \text{ m}^{-2})$ であった。高オゾン環境下で止葉 NPP が 12%低下したことになる。サブ課題 (5)の収量測定結果によれば、E-O3 での減収は約 20%であり、止葉の NPP 低下に加えて、止葉以外の葉の NPP 低下も収量に影響を及ぼしたと考えられる。また、 $-6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の閾値が必ずしも適切ではないとも考えられ、これらの点が今後の解明課題として残されている。

## (2) イネ

### 1) A-O3とE-O3における植物体面積密度の比較

A-O3とE-O3で測定したWJ15の部位別面積密度を表-3と図-14に示す。草丈は2007年8月2日に 73-75cm, 8月31日に106-109cmであり、出穂完了日は8月28日であった。LAIを両区で比較すると、緑葉はA-O3の方が大きく、赤斑葉と枯葉の合計はE-O3の方が大きかった。コムギと同様、E-O3における高オゾンの影響を受けた葉の老化が確認された。

表-3 イネ(Wu Jing 15)の草丈と各種植物体面積指数

場所	草丈(cm)	LAI (緑葉)	(黄葉)	(赤斑葉)	(枯葉)	茎面積指数	穂面積指数	PAI
2007年8月2日								
A-O3 (A10)	75.1	6.16	0.03	0.02	0.09	0.60	---	6.90
E-O3 (F13)	72.9	3.38	---	0.96	0.02	0.53	---	4.88
2007年8月31日								
A-O3 (A10)	108.6	7.46	0.44	0.15	0.21	1.21	0.28	9.75
E-O3 (F13)	106.0	6.06	0.10	0.41	0.18	1.01	0.27	8.03

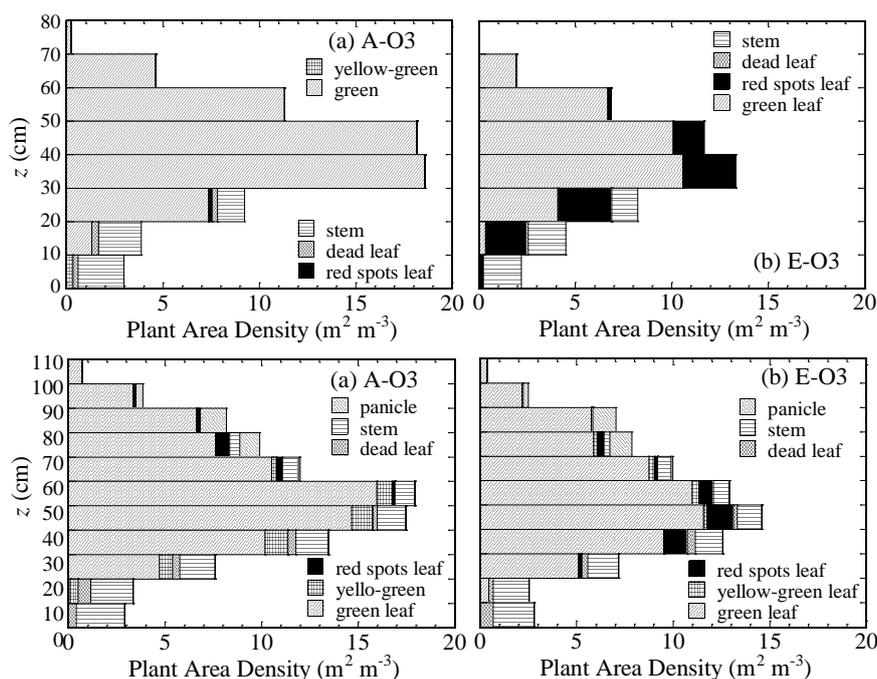


図-14 イネ(Wu Jing 15)の植物体部位別面積密度の鉛直分布 (A-O3とE-O3、2007年8月2日、31日)

## 2) 気孔コンダクタンス( $g_s$ )のモデル化

2008年に測定した4種のイネについて整理する。各品種の出穂開花日は、WYJ21が8月17日、LYPJが8月26日、SY63が8月15日(E-O3)と19日(A-O3)、YD6が8月25日であった。止葉はほぼその1週間前に出葉した。A-O3とE-O3両区におけるLI-6400を用いた止葉 $g_s$ の測定は、9月3、4、5、6、7、9、10、22日、10月1日に実施した。止葉の出葉後における1時間平均オゾン濃度の経時変化とAOT40を図-15に示す。AOT40を計算するためのオゾン濃度積算開始日は、各品種止葉の出葉日とした。 $g_s$ のモデル化にはコムギと同様に式(1a, b)を使用した。 $g_{s_{\max}}$ には、9月前半の測定日の中で高度250cmのVPD<sub>a</sub>が比較的lowかった9月7日にA-O3で測定された $g_s$ を適用した。

$$\begin{aligned}
 g_{s_{\max}} &= 0.52683 \text{ (molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}) & \text{WYJ21.} \\
 &= 0.58192 \text{ (molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}) & \text{LYPJ.} \\
 &= 0.56796 \text{ (molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}) & \text{SY63.} \\
 &= 0.54600 \text{ (molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}) & \text{YD6.}
 \end{aligned}$$

$g_{s_{\min}}$ には、それぞれ下記の値を適用した。

$$\begin{aligned}
 g_{s_{\min}} &= 0.02257 \text{ (molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}) & \text{WYJ21.} \\
 &= 0.04555 \text{ (molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}) & \text{LYPJ.} \\
 &= 0.04119 \text{ (molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}) & \text{SY63.} \\
 &= 0.02700 \text{ (molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}) & \text{YD6.}
 \end{aligned}$$

各相対関数は、モデルの $g_s$ が測定値に最も良く合うように、試行錯誤で下記のように決定した。

### a) WYJ21

$$f(\text{PAR}_l) = -1065 / (\text{PAR}_l + 795.87) + 1.381$$

$$f(\text{AOT40}_{\text{canopy}}) = 1$$

$$(\text{AOT40}_{\text{canopy}} \leq 0.92 \text{ ppm h})$$

$$\begin{aligned}
 &= -0.15 (\text{AOT40}_{\text{canopy}} - 0.92) + 1 && (\text{AOT40}_{\text{canopy}} > 0.92 \text{ ppm h}) \\
 f(\text{phenology}) &= 1 && (\text{days} < 30) \\
 &= 3.2 \text{ Log} [(85 - \text{days}) / 26.78321] && (\text{days} \geq 30) \\
 f(\text{VPD}_a) &= 1 && (\text{VPD}_a < 1.0 \text{ kPa}) \\
 &= -0.33 \text{ VPD}_a + 1.33 && (\text{VPD}_a \geq 1.0 \text{ kPa}) \\
 f(\text{time}) &= 1 && (\text{time}/24 < 0.45833) \\
 &= -1.8 (\text{time}/24 - 0.45833) + 1 && (\text{time}/24 \geq 0.45833)
 \end{aligned}$$

ここでdaysは、出穂開花7日前の止葉出葉日を0とするその後の日数である。

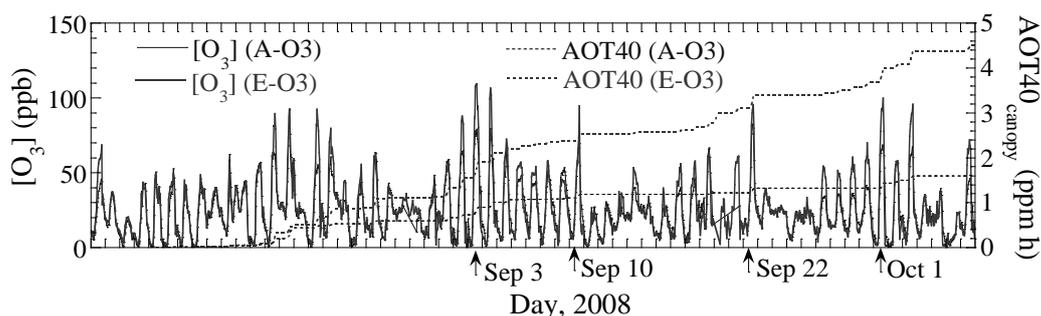


図-15 A-O3(Fluxサイト)の高度270cmとE-O3の高度150cmにおけるオゾン濃度; $[\text{O}_3]$ と群落頂部におけるオゾン濃度測定値で計算したWYJ21の $\text{AOT40}_{\text{canopy}}$ の時間変化(2008年8月8日～10月7日)

b) LYPJ

$$\begin{aligned}
 f(\text{PAR}_l) &= -1538 / (\text{PAR}_l + 1082.6) + 1.49893 \\
 f(\text{AOT40}_{\text{canopy}}) &= 1 && (\text{AOT40}_{\text{canopy}} \leq 1.80 \text{ ppm h}) \\
 &= -0.40 (\text{AOT40}_{\text{canopy}} - 1.80) + 1 && (\text{AOT40}_{\text{canopy}} > 1.80 \text{ ppm h}) \\
 f(\text{phenology}) &= 1 && (\text{days} < 21) \\
 &= 3.2 \text{ Log} [(80 - \text{days}) / 28.731] && (\text{days} \geq 21) \\
 f(\text{VPD}_a) &= 1 && (\text{VPD}_a < 1.0 \text{ kPa}) \\
 &= -0.25 \text{ VPD}_a + 1.25 && (\text{VPD}_a \geq 1.0 \text{ kPa}) \\
 f(\text{time}) &= 1 && (\text{time}/24 < 0.50) \\
 &= -1.4 (\text{time}/24 - 0.50) + 1 && (\text{time}/24 \geq 0.50)
 \end{aligned}$$

c) SY63

$$\begin{aligned}
 f(\text{PAR}_l) &= -1816.1 / (\text{PAR}_l + 1340.9) + 1.5436 \\
 f(\text{AOT40}_{\text{canopy}}) &= 1 && (\text{AOT40}_{\text{canopy}} \leq 1.70 \text{ ppm h}) \\
 &= -0.50 (\text{AOT40}_{\text{canopy}} - 1.70) + 1 && (\text{AOT40}_{\text{canopy}} > 1.70 \text{ ppm h}) \\
 f(\text{phenology}) &= 1 && (\text{days} < 26) \\
 &= -0.045 * (\text{days} - 26) + 1 && (\text{days} \geq 26) \\
 f(\text{VPD}_a) &= 1 && (0.716 < \text{VPD}_a < 2.38 \text{ kPa}) \\
 f(\text{time}) &= 1 && (\text{time}/24 < 0.60417) \\
 &= -3.5 (\text{time}/24 - 0.60417) + 1 && (\text{time}/24 \geq 0.60417)
 \end{aligned}$$

d) YD6

$$f(\text{PAR}_l) = -1274.0/(\text{PAR}_l + 918.48) + 1.43653$$

$$f(\text{AOT40}_{\text{canopy}}) = 1$$

$$= -0.44 (\text{AOT40}_{\text{canopy}} - 1.80) + 1$$

$$f(\text{phenology}) = 1$$

$$= 3.2 \text{ Log} [(80 - \text{days}) / 27.2702]$$

$$f(\text{VPD}_a) = 1$$

$$= -0.30 \text{ VPD}_a + 1.39$$

$$f(\text{time}) = 1$$

$$= -3.0 (\text{time}/24 - 0.54167) + 1$$

$$(\text{AOT40}_{\text{canopy}} \leq 1.80 \text{ ppm h})$$

$$(\text{AOT40}_{\text{canopy}} > 1.80 \text{ ppm h})$$

$$(\text{days} < 24)$$

$$(\text{days} \geq 24)$$

$$(\text{VPD}_a < 1.3 \text{ kPa})$$

$$(\text{VPD}_a \geq 1.3 \text{ kPa})$$

$$(\text{time}/24 < 0.54167)$$

$$(\text{time}/24 \geq 0.54167)$$

4品種の $f(\text{PAR}_l)$ を図-16に、イネ4品種とコムギ1品種(YM16)の $f(\text{AOT40}_{\text{canopy}})$ 、 $f(\text{phenology})$ 、 $f(\text{VPD}_a)$ 、 $f(\text{time})$ を図-17に示す。4品種の $f(\text{PAR}_l)$ にはほとんど差が無いことがわかる。一方、その他の相対関数にはコムギとの間の差だけでなく次のような品種間差があることがわかる。イネ4品種のうち、LYPJとYD6は $f(\text{time})$ 以外の相対関数に類似性が見られる。これに対してWYJ21とSY63の相対関数は互いに隔たりが大きい。品種ごとに止葉の $g_s$ に対する各要因の影響は次のように要約できる。SY63はVPDとtime(一日の時刻)の影響を全くまたはほとんど受けないが、phenologyとAOT40の影響を大きく受ける。そのため、出穂開花後2週間程度は $g_s$ の低下が現れないが、その後急激に $g_s$ が低下して老化が進展するという特徴が読み取れる。これは実際にFACE圃場における生育調査で確認された特徴と類似している。WYJ21はSY63と逆に、4品種の中ではphenologyとAOT40の影響が小さく、VPDの影響が比較的大きい。つまり、4品種の中でWYJ21は最もオゾン耐性が強く、SY63は最もオゾン耐性が弱いと評価できる。

前述の9日間においてA-O3とE-O3の両水田で測定された止葉の $g_s$ とモデルによる推定値を比較して図-18に示す。有意水準0.05で両者に有意差は無かった。本モデルにより、累積オゾン曝露量が増加するにつれて $g_s$ が低下するプロセスが再現できた。

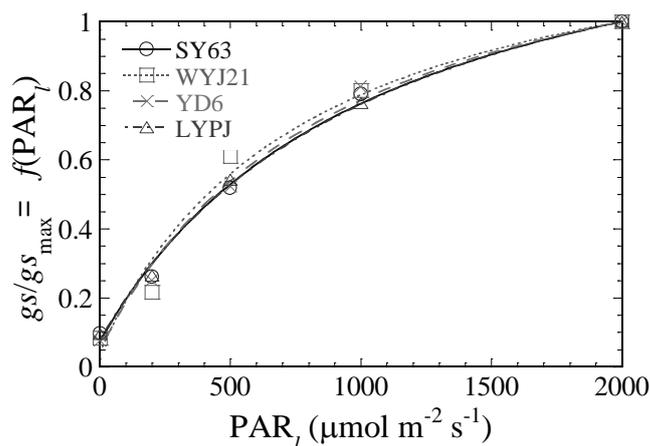


図-16  $g_s$ の測定値を用いての  $f(\text{PAR}_l)$ のパラメータ化

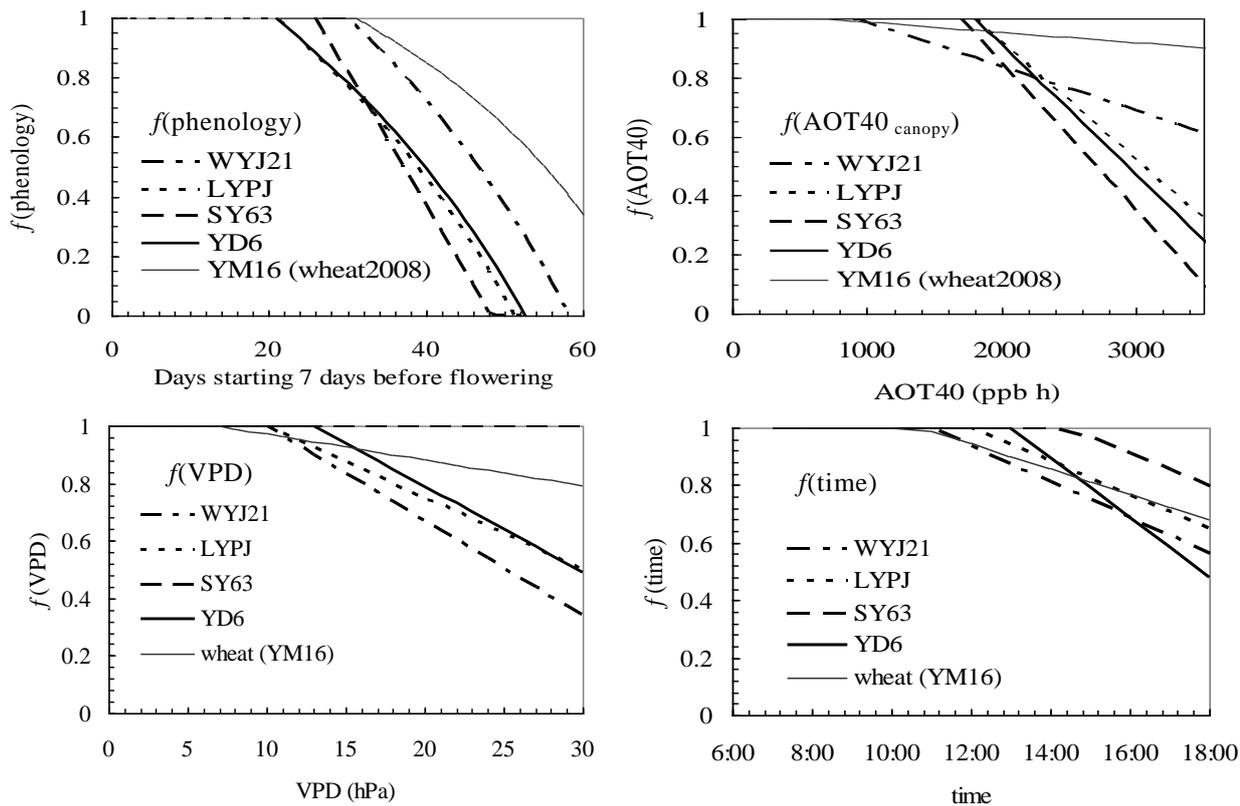


図-17 イネ4品種とコムギ1品種(YM16)の $f(\text{AOT40}_{\text{canopy}})$ 、 $f(\text{phenology})$ 、 $f(\text{VPD}_a)$ 、 $f(\text{time})$

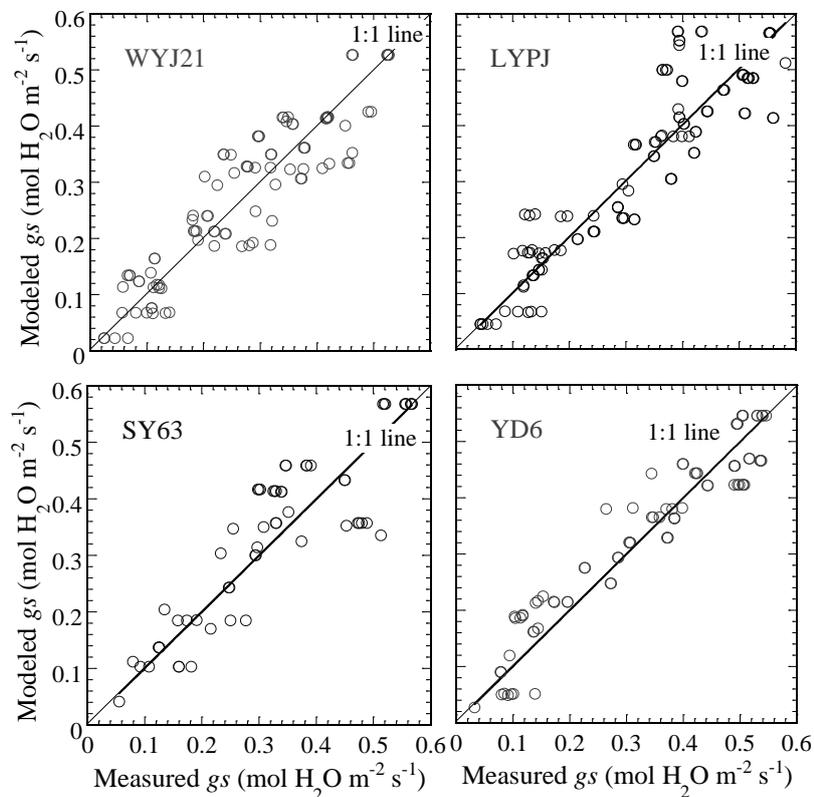


図-18 イネ止葉の $g_s$ の測定値(A-O3とE-O3で測定)とモデルによる推定値の比較

3) 群落頂部におけるオゾン濃度([O<sub>3</sub>]<sub>canopy</sub>)のモデル化

コムギと同様の方法で、[O<sub>3</sub>]<sub>canopy</sub>のモデル化を行った。モデル作成には、A-O3(Fluxサイト)で2007年8月8日～10月26日(WJ15)と2008年8月3日～10月7日(WYJ21)に測定された[O<sub>3</sub>]鉛直分布、気象条件、群落高を用いた。[O<sub>3</sub>]が対数鉛直分布をなすように各日のz<sub>003</sub>を決定し、コムギのz<sub>003</sub>と同様に各要因との相関を分析した結果、イネのz<sub>003</sub>も風速との相関が特に高かった。一方、葉齢とともにgsが低下すると、気孔を通してのオゾン沈着速度が低下し、[O<sub>3</sub>]に対する[O<sub>3</sub>]<sub>canopy</sub>の低下割合が縮小する。それにしたがってz<sub>003</sub>は低下すると推測できる。この考えから、z<sub>003</sub>は高度320cmの風速uとの線形回帰式；

$$\log(z_{003}) = a u + b$$

で表現し (図-19)、パラメータa および b を出葉後日数(days)でモデル化した (図-20)。

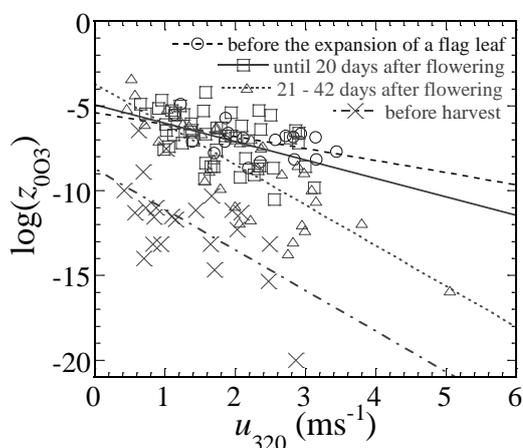


図-19 高度3.2mの風速uとlog(z<sub>003</sub>)の関係

(Fluxサイト、2007年8月8日～10月26日(WJ15)と2008年8月3日～10月7日(WYJ21))

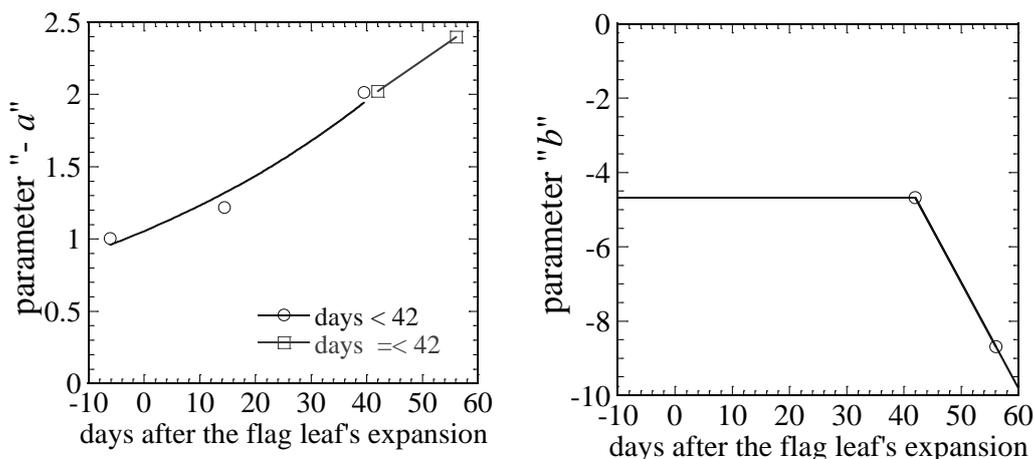


図-20 出葉後日数(days)によるaとbのモデル化

その結果、下記のモデルで $\log(z_{0O_3})$ が極めてよく再現できた。

$$a = -1.0541 \exp(0.0155 \text{ days}) \quad (\text{days} < 42)$$

$$a = -0.0266 \text{ days} - 0.9024 \quad (\text{days} \geq 42)$$

$$b = -4.6737 \quad (\text{days} < 42)$$

$$b = -0.2842 \text{ days} + 7.2631 \quad (\text{days} \geq 42)$$

高度150cmにおけるオゾン濃度 $[O_3]_{z=150}$ の推定値と測定値の比較を図-21に示す。モデルによる再現性が非常に高いことから、オゾン濃度の鉛直分布を対数分布とした仮定の妥当性が確認された。 $[O_3]_{\text{canopy}}$ の推定値と測定値の比較を図-22に示す。有意水準0.05で両者に有意差は無かった。このように、本モデルの有効性が確認できた。

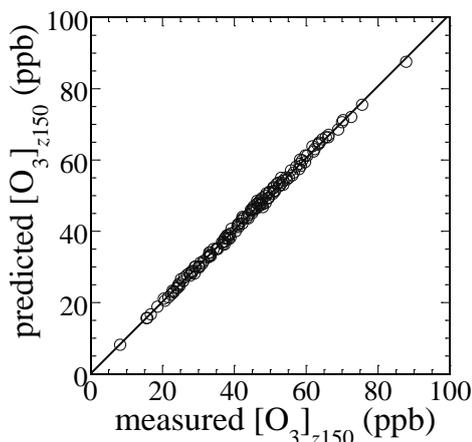


図-21  $[O_3]_{z=150}$ の測定値とモデルによる推定値の比較

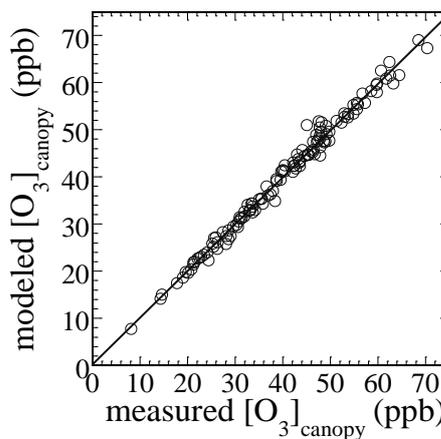


図-22  $[O_3]_{\text{canopy}}$ の測定値とモデルによる推定値の比較

#### 4) 葉に入射する光合成放射( $PAR_l$ )のモデル化

コムギ群落の $PAR_l$ モデルと同じモデルを適用し、下向き短波放射; $Sd^\downarrow(z)+Sf^\downarrow(z)$ の計算値が測定値を再現するように $F_l(z)$ を決定した。パラメータ化に供したデータは日中を通して快晴であった2008年9月7日に測定され、 $r_{dir}$ 値は7:00-8:00と16:00-17:00は0.3とし、それ以外の時間帯は1.0とした。 $Sd^\downarrow(z)+Sf^\downarrow(z)$ の計算値と測定値を図-23に示す。

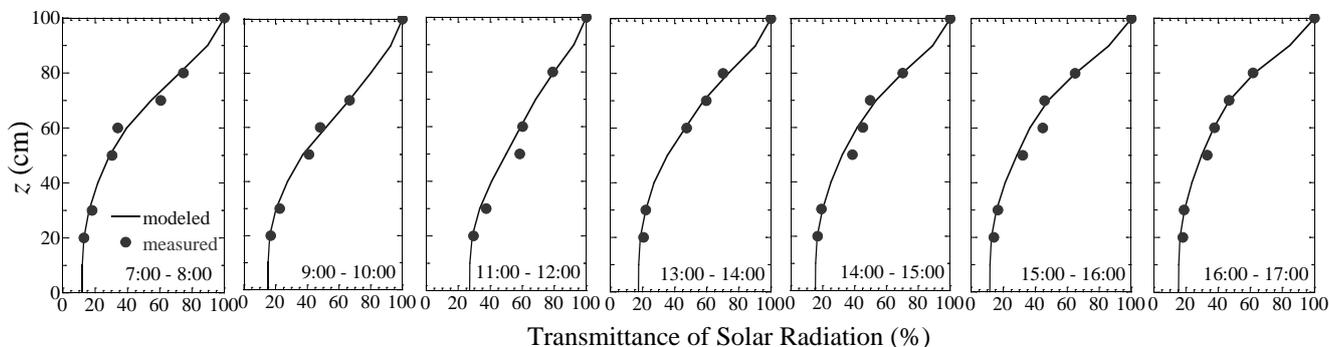


図-23 モデルで計算された下向き短波放射透過率の鉛直分布と測定値の比較(A-03、2008年9月7日)

このように測定値を再現するために得られた $F_l(z)$ の鉛直分布を図-24に示す。 $F_l$ は、葉の重なり(葉面積の分布)と葉の傾きを表現するパラメータであるが、この結果には葉の重なりがよく表されている。直達放射と散乱放射の成分に分けて放射収支を表現しているため、太陽高度に対する葉の傾きはこのモデルには反映されにくいと考えられる。群落の中部層と比較して上部層で $F_l$ が大きいのは、葉面積密度が小さく単位面積当たりの葉面が放射の遮断に貢献する割合が大きいためである。止葉の存在する $z = 0.7 - 0.9\text{m}$ の $F_l(z)$ は $0.3 - 0.6$ であった。以上の結果から、イネの止葉に関する $F_l$ もコムギと同様 $0.5$ 程度としてよい。

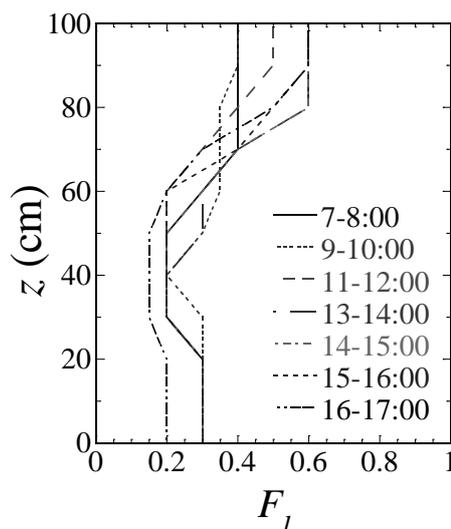


図-24  $F_l$ の鉛直分布 (A-03、2008年9月7日)

#### 5) 個葉光合成( $P$ )のモデル化

$P$ モデルもコムギと同様の手順で構築した。上記の9日間にLI-6400で $\text{PAR}_l = 2000$  ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )の人工光で測定した4品種の止葉の気孔コンダクタンス $g_{s2000}$ と光合成速度 $P_{2000}$ について、 $g_{s2000}/g_{s2000\text{max}}$ と $P_{2000}/P_{2000\text{max}}$ の関係を図-25に示す。 $P_{2000\text{max}}$ は、 $g_{s2000\text{max}}$ と同様、9月前半の測定日の中で高度250cmの $\text{VPD}_a$ が比較的低かった9月7日に、A-O3で、LI-6400の人工光を $\text{PAR}_l = 2000$  ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )に設定して得た $P$ の測定値であり、すべての測定 $P$ 値中の最大値である。 $P_{2000\text{max}}$ を表-4に整理する。

表-4 イネ4品種の $P$ モデルに適用した各パラメータ

	$P_{\text{max}}$	$P_{\text{PAR1max}}$	$P_{\text{PAR10}}$	$m$	$a$	$b$	
	( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) ( $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )						
WYJ21	23.41	1.266253 $P_{\text{max}}$	-0.04962 $P_{\text{max}}$	-1.1616	0.0023868	0.99963	1.1592
LYPJ	24.33	1.2496 $P_{\text{max}}$	-0.046841 $P_{\text{max}}$	-1.1396	0.0024991	0.99994	1.1495
SY63	20.88	1.2989 $P_{\text{max}}$	-0.088685 $P_{\text{max}}$	-1.8517	0.0023288	0.99880	1.1664
YD6	23.60	1.24735 $P_{\text{max}}$	-0.062357 $P_{\text{max}}$	-1.4716	0.0025844	0.99945	1.1444

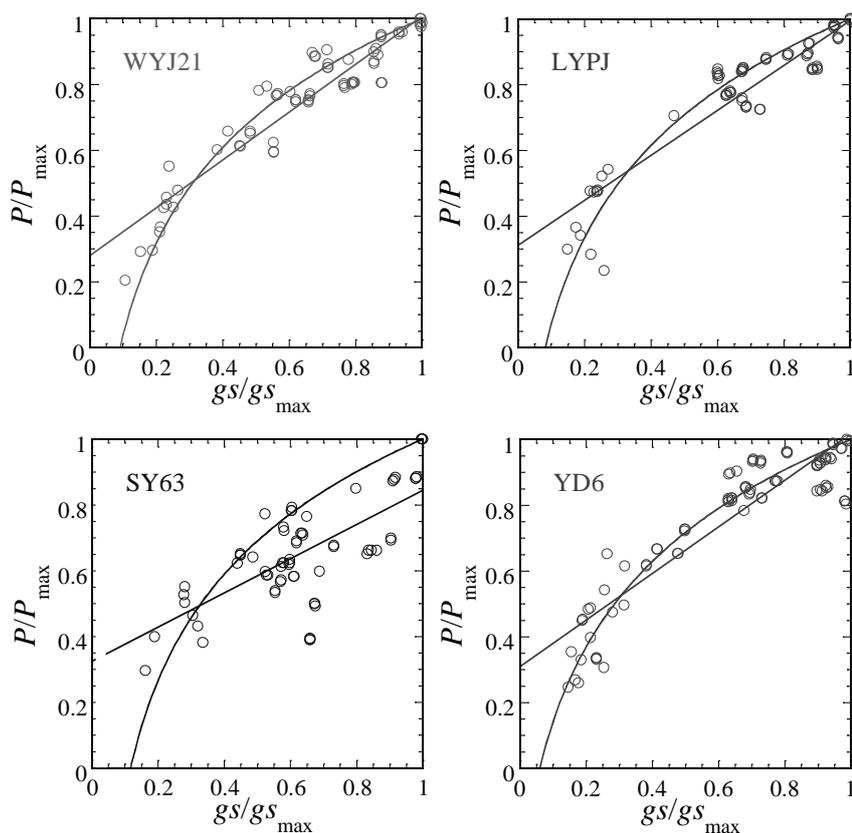


図-25 PAR<sub>l</sub> = 2000 (μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)における4品種のイネ止葉のgs<sub>2000</sub>/gs<sub>max</sub>とP<sub>2000</sub>/P<sub>max</sub>の関係  
(2008年9月3、4、5、6、7、9、10、22日、10月1日)

図-25に示すように、両者の関係はコムギの場合と異なり、原点を通る1:1の直線ではなく、gs<sub>2000</sub>/gs<sub>2000max</sub>=0のときにP<sub>2000</sub>/P<sub>2000max</sub>が特定のマイナス値、gs<sub>2000</sub>/gs<sub>2000max</sub>=1のときにP<sub>2000</sub>/P<sub>2000max</sub>=1を通る曲線（図中是对数を適用）で表現されることがわかった。しかし、たとえば対数で曲線関係を再現するとgs<sub>2000</sub>/gs<sub>2000max</sub>が0~0.3程度の領域でPの推定精度が低いので、図中に対数曲線とともに表した直線をモデルとして適用することにした（下式）。ここで、PAR<sub>l</sub> = 2000 (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)だからf<sub>P</sub>(PAR<sub>l</sub>)=1より、gs<sub>2000</sub>/gs<sub>2000max</sub> = f(AOT40<sub>canopy</sub>) f(phenology) f(VPD<sub>leaf</sub>) f(time)である。

$$\text{WYJ21} \quad P_{2000}/P_{2000\max} = 0.27832 + 0.72826 \text{ gs}_{2000}/\text{gs}_{2000\max}$$

$$\text{LYPJ} \quad P_{2000}/P_{2000\max} = 0.31131 + 0.68351 \text{ gs}_{2000}/\text{gs}_{2000\max}$$

$$\text{SY63} \quad P_{2000}/P_{2000\max} = 0.32363 + 0.52153 \text{ gs}_{2000}/\text{gs}_{2000\max}$$

$$\text{YD6} \quad P_{2000}/P_{2000\max} = 0.30938 + 0.70759 \text{ gs}_{2000}/\text{gs}_{2000\max}$$

以上のgs<sub>2000</sub>/gs<sub>2000max</sub>からP<sub>2000</sub>/P<sub>2000max</sub>への変換式を

$$P_{2000}/P_{2000\max} = \mu + \lambda \text{ gs}_{2000}/\text{gs}_{2000\max}$$

と書くことにする。すると、イネ4品種のPは次の式で表現できる。

$$P = P_{\max} f_P(\text{PAR}_l) [\mu + \lambda f(\text{AOT40}_{\text{canopy}}) f(\text{phenology}) f(\text{VPD}_{\text{leaf}}) f(\text{time})]$$

ここでf<sub>P</sub>(PAR<sub>l</sub>)は、個葉光合成に関するPAR<sub>l</sub>の相対関数であり、各PAR<sub>l</sub>で測定されたPの最大値をP<sub>max</sub>で除した値を再現するように、次の非直角双曲線でモデル化された(図-26)。

$$f_P(\text{PAR}_l) = \{m \text{ PAR}_l + \Delta P_{\text{PAR}_l} - [(m \text{ PAR}_l + \Delta P_{\text{PAR}_l})^2 - 4mn \text{ PAR}_l \Delta P_{\text{PAR}_l}]^{0.5}\} / 2n + P_{\text{PAR}_l0} / P_{\max}$$

$$\Delta P_{\text{PAR}l} = (P_{\text{PAR}l\text{max}} - P_{\text{PAR}l0}) / P_{\text{max}}$$

$P_{\text{PAR}l\text{max}}$ は無限大の $\text{PAR}l$ における $P$ 値、 $P_{\text{PAR}l0}$ は本モデルで $\text{PAR}l=0$ における $P$ 値すなわち $P$ の最小値である。 $m$ は曲線の初期勾配、 $n (= 0.1)$ は凸度である。

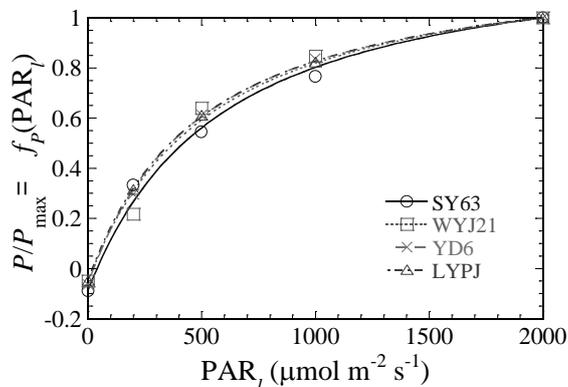


図-26  $f_p(\text{PAR}l)$ のパラメータ化

本モデルでは、 $f(\text{AOT40}_{\text{canopy}})f(\text{phenology})f(\text{VPD}_a)f(\text{time})$ の値にかかわらず、 $\text{PAR}l=0$ における計算 $P$ 値は $P$ の最小値 $P_{\text{PAR}l0}$ であるとする。しかし、 $f(\text{AOT40}_{\text{canopy}})f(\text{phenology})f(\text{VPD}_a)f(\text{time})=1$ でない場合、 $\text{PAR}l=0$ における計算 $P$ 値は $[\mu + \lambda f(\text{AOT40}_{\text{canopy}})f(\text{phenology})f(\text{VPD}_{\text{leaf}})f(\text{time})]$ が掛けられることによって、当然 $P_{\text{PAR}l0}$ と異なる値になる。また、 $\text{PAR}l=0$ 付近で $P$ 値はマイナス値になるため、 $gs$ モデルのように $\text{PAR}l=0$ における値だけを強制的にその最小値（ $P$ の場合は $P_{\text{PAR}l0}$ ）とするだけでは不都合が生じる。そこで、次のような調整係数 $\alpha$ を考案し、総合的な相対関数 $\phi(\text{PAR}l)$ をパラメータ化した。コムギの場合と同型であるが、 $\phi(\text{PAR}l)$ の式を再掲する。

$$P = P_{\text{max}} \phi(\text{PAR}l)$$

$$\phi(\text{PAR}l) = \{m \text{PAR}l + \Delta\phi_{\text{PAR}l} - [(m \text{PAR}l + \Delta\phi_{\text{PAR}l})^2 - 4mn \text{PAR}l \Delta\phi_{\text{PAR}l}]^{0.5}\} / 2n + P_{\text{PAR}l0} / P_{\text{max}}$$

$$\Delta\phi_{\text{PAR}l} = (\alpha P_{\text{PAR}l\text{max}} - P_{\text{PAR}l0}) / P_{\text{max}}$$

$\alpha$ は、コムギの場合と同型の次式とのようにパラメータ化された（パラメータの値は表-4）。

$$\alpha = a x^b + (1 - a)$$

$$x = f(\text{AOT40}_{\text{canopy}})f(\text{phenology})f(\text{VPD}_a)f(\text{time})$$

本モデルで計算された $P$ を測定値と比較して図-27に示す。有意水準0.05(SY63は0.01)で両者に有意差は無かった。本モデルにより、累積オゾン曝露量が増加するにつれて $P$ が低下するプロセスが再現できた。

#### 6) モデルで計算した止葉の積算オゾン沈着量とNPPの比較

コムギの場合と同様に、本研究で開発した $gs$ モデルと $P$ モデルを適用し、2008年の気象・大気条件で計算したA-O3とE-O3におけるイネ4品種の止葉のAFst6とNPPを図-28と図-29に示す。また、収穫直前のA-O3とE-O3におけるAFst6とNPPの計算結果を表-5に整理した。従来、高オゾンの影響によるAFst6の増加率と収量の低下率との関係（ドウス・レスポンス）から一定の関係を見出し、将来の収量低下を予測する試みが進められてきた。しかしながら、本研究で得られた結果を見ると、両者の関係は複雑である。たとえば、AFst6の増加率の小さいSY63でNPPの低

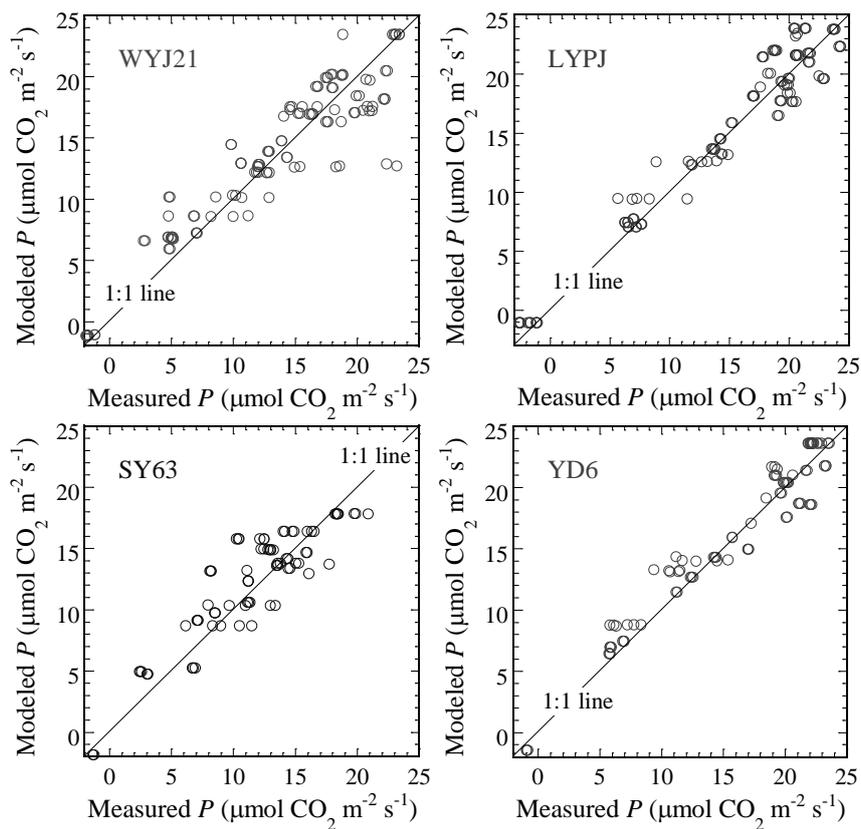


図-27 イネ止葉の $P$ の測定値(A-O3とE-O3で測定)とモデルによる推定値の比較

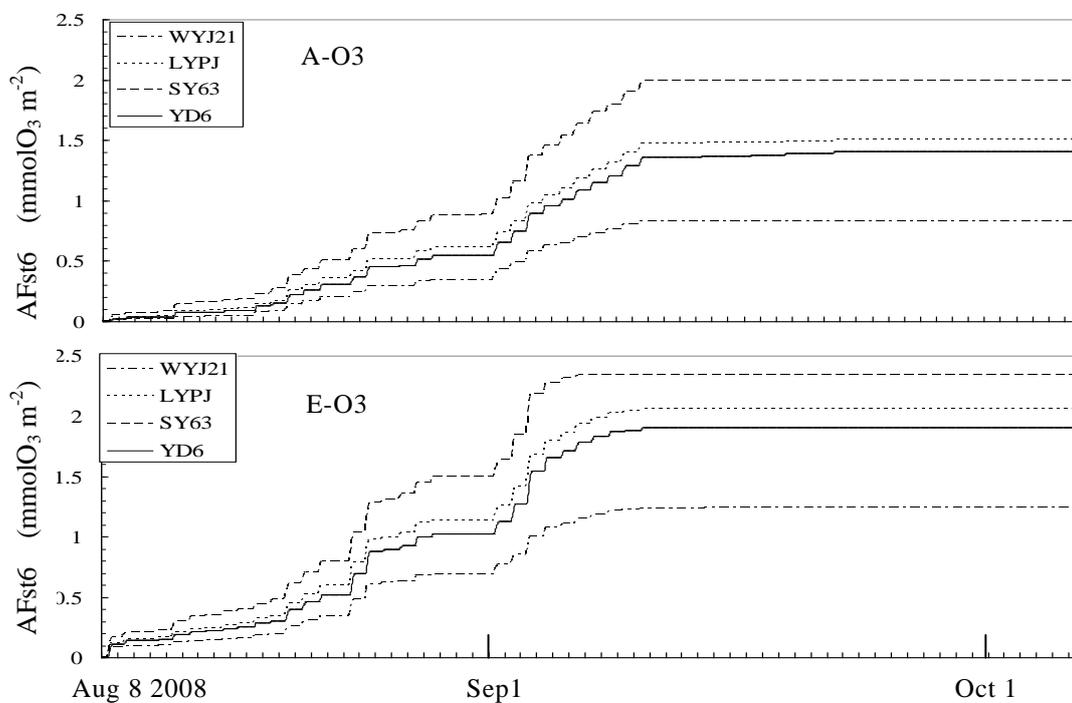


図-28 A-O3とE-O3におけるイネ4品種の止葉のAFst6(2008年)

下率が最大であったが、これは次の理由による。

累積した慢性的な高オゾンの影響により、気孔コンダクタンスは低下した。しかし、オゾン濃度が高いE-O3ではオゾン沈着量がA-O3よりも大きい。これが上記のドウス・レスポンスの理論ベースである。ところが本研究では、オゾン耐性の低いSY63に関しては、A-O3においても葉の老化が進み、オゾン沈着量が $-6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の閾値を越えるケースが少なくなった。またこれとは別に、E-O3では気孔コンダクタンスが低下した結果、A-O3と比較してオゾン沈着量の増加率が徐々に低下した。このように、オゾン濃度が高いとAFst6が増加しにくくなる。一方、光合成速度は、慢性的な高オゾン濃度の影響で気孔コンダクタンスが低下するとともに低下し、老化の促進も加わって、E-O3でNPPが低下した。

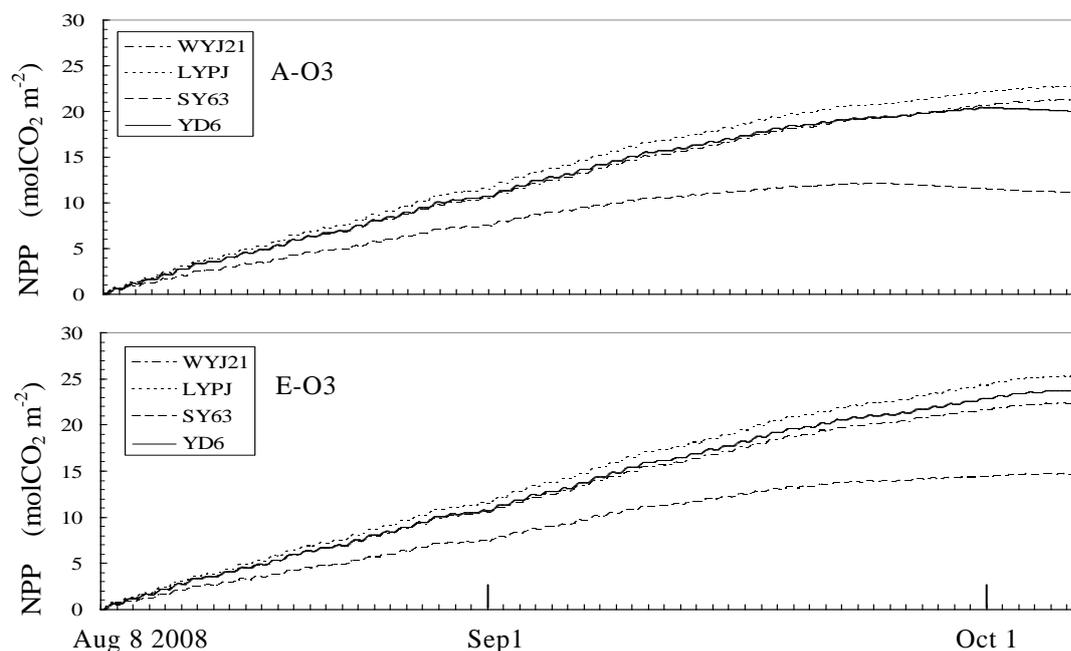


図-29 A-O3とE-O3におけるイネ4品種の止葉のNPP (2008年)

表-5 本モデルで推定されたA-O3とE-O3におけるイネ4品種のAFst6とNPP

	AFst6 (A-O3) (mmolO <sub>3</sub> m <sup>-2</sup> )	AFst6 (E-O3) (mmolO <sub>3</sub> m <sup>-2</sup> )	AFst6増加率 (%)	NPP (A-O3) (molCO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> )	NPP (E-O3) (molCO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> )	NPP低下率 (%)
WYJ21	0.83	1.24	49.08	22.45	21.35	4.89
LYPJ	1.50	2.06	37.19	25.46	22.83	10.32
SY63	1.99	2.34	17.37	14.72	10.92	25.83
YD6	1.41	1.90	35.40	23.92	19.99	16.43

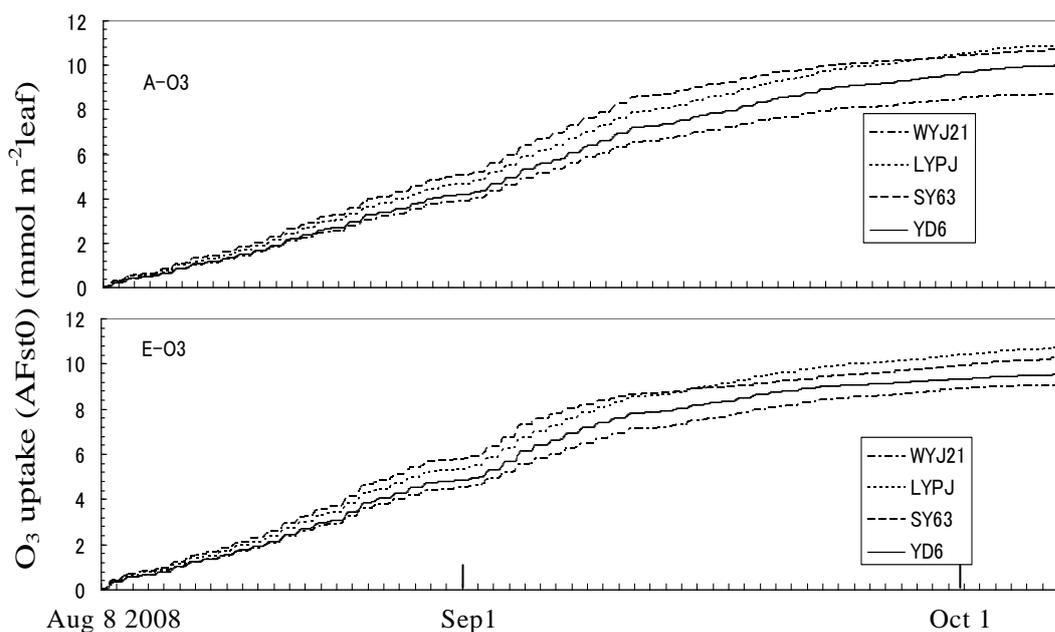


図-30 A-O3とE-O3におけるイネ4品種の止葉のオゾン沈着積算値(AFst0) (2008年)

最後に、2008年の気象・大気条件で計算したA-O3とE-O3におけるイネ4品種の止葉のオゾン沈着積算量(AFst0)を図-30に示す。この計算結果と図-29に示したNPPの低下の間には、次のような関係が見出せそうである。すなわちオゾンの影響による減収は、オゾン沈着量の積算値(AFst0やAFst6)とではなく、あるクリティカルなオゾン沈着量積算値に到達する日数と関連があると思われる。上述の第一の課題解明に向け、実際の収量データを蓄積し、今後このようなパラメータを検討することにした。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本サブ課題では、第一の目的として、中国江蘇省のコムギ・イネ二毛作地帯に設置した実験圃場で微気象観測と植物生理生態測定を行い、気象条件やオゾンドウスの影響を組み込んだ品種別の気孔コンダクタンス( $g_s$ )モデルを開発した。その結果、コムギとイネの違いに加えて、イネについては品種による気孔応答の違いが、モデル化によって表現された。とくに、累積オゾン曝露量(AOT40)が増加するにつれて $g_s$ が低下するプロセスが再現でき、その影響の品種間差が明らかにできた。オゾンドウスを組み込んだイネの $g_s$ モデルに関しては世界的にもまだデータが不十分な段階なので、本研究によって開発されたモデルは先駆的であると評価できる。また、コムギの $g_s$ モデルは欧州で減収予測に実用化されているが、気孔応答は品種、対象地域の気象条件と水分条件によって異なると考えられることから、東アジア地域のコムギの減収を予測するためには本モデルが適切である。また、 $g_s$ モデルに組み込むべきサブモデルとして、群落頂部のオゾン濃度を推定するモデルと葉面に入射する光合成有効放射を推定するモデルの構築も行った。これらのモデル化により、地域レベルのオゾンリスクの予測へ、本研究の $g_s$ モデルが拡張可能となった。

第二の目的として、気象条件やオゾンドウスの影響を組み込んだ品種別の止葉個葉光合成 ( $P$ ) モデルを開発した。その結果、オゾンドウスによる  $g_s$  の低下と  $P$  の低下を関連付けることができ、AOT40が増加するにつれて  $P$  が低下するプロセスとその影響の品種間差を明らかにすることができた。従来、オゾンによる減収は、本研究もそうであるが、気孔を通してのオゾン沈着（オゾンフラックス）の積算量と関連付ける試みがなされてきた。これに対して本研究で開発された  $P$  モデルは、オゾンによる減収をより直接的に予測する方法として期待できる。

第三の目的として、 $g_s$  モデルと  $P$  モデルを適用し、止葉によるオゾン沈着積算量 (AFst6) と NPP を品種別に推定した。コムギの場合は従来、高オゾンの影響による AFst6 の増加と減収との関係（ドウス・レスポンス）から一定の関係を見出し、将来の減収を予測する試みが進められてきた。しかしながら、本研究でイネ 4 品種について得られた結果からは、両者の関係に一定の関係が見出せず、AFst6 の増加率の小さい SY63 は NPP の低下率が最大であった。この結果から、オゾンによる減収にオゾン沈着積算量を関連付ける場合の問題点が抽出された。すなわち、減収を予測できるあらたなオゾン沈着量パラメータを検討する必要性が指摘された。また、この検討結果からも、 $P$  モデルによる減収予測の有効性が期待された。

## （2）地球環境政策への貢献

高オゾン濃度が作物収量を減少させるというシナリオの中で、科学的な見地からも政策の立場からも重要なのは、作物種および品種ごとのオゾンドウス・レスポンス関係である。すなわち、その地域の気象条件および水分条件で、栽培作物種はどのオゾン濃度レベルでどれだけの減収に至るか、について信頼できる予測をすることが求められる。本モデルはこの予測を目的として構築され、有効性をほぼ確認した。本研究により、大気環境汚染の状況下における強耐性品種の選択、オゾン前駆物質の排出規制、食料自給率増強の必要性等の根拠となる資料を提供できる。

## 6. 引用文献

- Emberson L.D., Ashmore M.R., Cambridge H.M., Simpson D., Tuovinen J.P. (2000). Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environ. Pollut.* 109, 403-413.
- Jarvis P.G. (1976). The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. Series B, Biology Sciences* 273, 593-610.
- Laisk A., Kull O., Moldau H. (1989). Ozone concentration in leaf intercellular air spaces is close to zero. *Plant Physiol.* 90, 1163-1167.
- Nussbaum S., Fuhrer J. (2000). Difference in ozone uptake in grassland species between open-top chambers and ambient air. *Environ. Pollut.* 109, 463-471.
- Oue H. (2001) Effects of vertical profiles of plant area density and stomatal resistance on the energy exchange processes within a rice canopy, *J. Meteorol. Soc. Japan* 79, 925-938.
- Oue H. (2003a). Evapotranspiration, photosynthesis and water use efficiency in a paddy field (II) – Prediction of energy balance and water use efficiency by numerical simulations based on a multilayer model –. *J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.* 16, 389-407 (in Japanese with English abstract).
- Oue H. (2003b). A simple radiation model for predicting micrometeorology, transpiration and photosynthesis of a single leaf within a plant canopy. *Proc. Small Scale Rad. Res. Soc. Agric.*

*Meteorol. Japan* 4, 17-26 (in Japanese).

Takigawa M., Niwano M., Akimoto H., Takahashi M. (2007). Development of a one-way nested global-regional air quality forecasting model. *SOLA* 3, 81-84.

UNECE (2004). Mapping critical levels for vegetation. Chapter 3 (ed. by Mills G.). In *Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends*. Umweltbundesamt, Berlin, pp. 1-52.

## 7. 国際共同研究等の状況

FACE実験施設における気象観測とコムギ・イネ群落内部と上部におけるオゾン濃度の分布観測を、中国科学院土壤研究所の朱建国教授らと実施。今後も同研究所との共同研究を実施予定。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

Oue H., Motohiro S., Inada K., Miyata A., Mano M., Kobayashi K., Zhu J. (2008). Evaluation of ozone uptake by the rice canopy with the multi-layer model. *Journal of Agricultural Meteorology*, 64, 223-232.

<その他誌上発表(査読なし)>

なし

### (2) 口頭発表(学会)

- 1) 大上博基, 賀斌, 稲田健太, 本廣真吾, 宮田明, 間野正美, 小林和彦 (2007). オゾン濃度の上昇が気孔コンダクタンスと光合成速度に及ぼす影響と群落におけるオゾンフラックスのモデル化. *農業環境工学関連学会2007年合同大会*, 府中.
- 2) 大上博基, 本廣真吾, 稲田健太, 宮田明, 間野正美, 小林和彦 (2007). 大気オゾン濃度の上昇がイネの気孔コンダクタンスに及ぼす影響とイネのオゾン吸収プロセスのモデリング. *日本農業気象学会中国・四国支部講演会*, 岡山.
- 3) 大上博基, 本廣真吾, 稲田健太, 宮田明, 間野正美, 小林和彦, 朱建国 (2008). 植生によるオゾン吸収プロセスのモデリングとオゾン吸収量の推定. *日本農業気象学会2008年全国大会*, 下関.
- 4) Oue H., Motohiro S., Inada K., Miyata A., Mano M., Kobayashi K., Zhu J. (2008). Evaluation of ozone uptake by vegetation with the multi-layer model. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 5) 宮田明, 大上博基, 朱建国, 小林和彦 (2008). コムギおよび水稲群落へのオゾン沈着速度の観測. *日本農業気象学会2008年全国大会*, 下関.
- 6) Miyata A., Mano M., Oue H., Zhu J., Kobayashi K. (2008). Diurnal and seasonal variations of Ozone fluxes over rice and wheat field in eastern China. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 7) Mano M., Miyata A., Oue H., Motohiro S., Kobayashi K., Zhu J. (2008). Carbon dioxide exchange

- over the double cropping field with winter-wheat and summer-rice in China. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 8) 大上博基, 本廣真吾, 稲田健太, 宮田明, 小林和彦, 朱建国 (2008). 大気オゾン濃度の上昇がイネの生育に及ぼす影響を予測するためのオゾン沈着モデル. *第63回農業農村工学会2008年中国四国支部講演会*, 広島.
- 9) 大上博基, Feng Z., Pang J., 小林和彦, 朱建国 (2008). オゾンドウスを考慮したコムギ止葉の気孔コンダクタンスのモデリング. *平成20年度日本農業気象学会中国・四国支部大会*, 福山.
- 10) Miyata A., Mano M., Oue H., Zhu J., Kobayashi K. (2009). Ozone deposition onto rice and wheat field in eastern China. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2009*. Koriyama, Japan.
- 11) Oue H., Feng Z., Pang J., Miyata A., Mano M., Kobayashi K., Zhu J. (2009). Modeling stomatal conductance and photosynthesis of a flag leaf of wheat under elevated O<sub>3</sub> concentration. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2009*. Koriyama, Japan.

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし