

多様な光環境下に生育するC₃芝群落とC₄芝群落の 光合成および生長/衰退モデル

松原 隆志 大塚 清敏
溝田 陽子

Multilayer Model for Photosynthesis and Growth/decline Model of C₃ and C₄ Turfgrass Fields under Various Light Conditions

Takashi Matsubara Kiyotoshi Otsuka
Yoko Mizota

Abstract

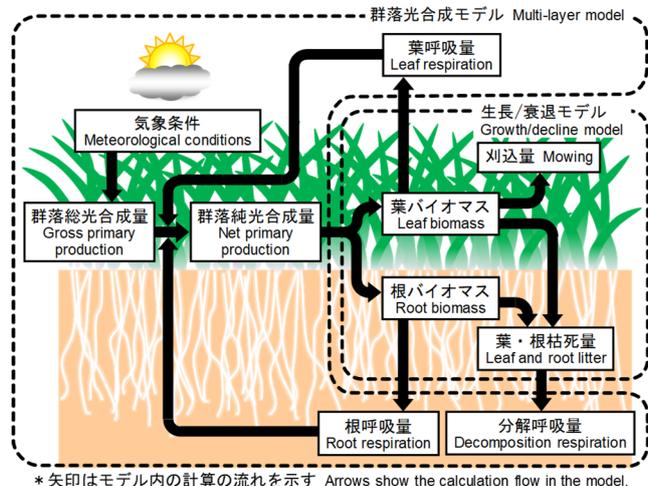
Since the 2002 FIFA world cup football was held in Japan and South Korea, many new stadiums with roofs have been constructed in Japan. The deterioration of football field turfgrass owing to the lack of light caused by shading has been observed. A prediction model based on the mechanisms of photosynthesis and growth/decline of C₃ (a cool-season grass)- and C₄ (a warm-season grass)-type turfgrasses was developed. Inputting the weather data on the turf grass field, such as the photosynthetic, respiration, and transpiration rates are predicted by the multilayer model for photosynthesis. Further, the leaf growth and root growth, etc. are estimated by the growth/decline model. An algorithm of a two-dimensional simulation for mapping the growth situations of turfgrass on a football field was also developed. Thus, this model can evaluate the growth and decline of turfgrass in various types of shaded stadiums before the stadium is built. If turfgrass does not grow efficiently in a constructed stadium, we can determine its cause and propose the most economical and effective countermeasures. Also, the best turfgrass management techniques can be selected using this model.

概要

サッカーの国際大会を開催するスタジアムには、観客席に屋根が備わっていることが条件となるため、低照度下でスポーツターフを育成する必要がある。本研究では、C₃植物で耐陰性が高いが耐暑性に劣る寒地型芝およびC₄植物で耐暑性が高いが耐陰性に劣る暖地型芝について、群落光合成-生長/衰退モデルを構築した。このモデルに芝群落上の気象データを入力すると、群落光合成モデルによって光合成速度、呼吸速度等が出力される。さらに生長/衰退モデルによって葉や根の生長量等が出力できる。このようにさまざまな気象条件における光合成および生長の過程が再現できた。そこで、本モデルをより実用的に応用するため、任意のスタジアム形状および立地の気象データを入力すれば、ピッチ上の芝の生育状態を面的に評価できるアルゴリズムを開発した。これにより、スタジアムの設計時に芝の生育可否の判定を行うことで、芝が良好に生育できる施設を計画できるようになった。また、既存のスタジアムで芝の生育不良が生じている場合でも、原因の特定とその解決策の提案が可能になった。さらに、スタジアム運用時の芝の管理法を評価して最善の計画を立てることが可能となった。

1. はじめに

サッカーの国際大会を開催するスタジアムには、観客席に屋根が備わっていることが条件となるため、低照度下でスポーツターフを育成するための技術が必要となってきた。このような場合、これまでには試験区で光と生育の関係または温度と生育の関係等を調査した結果を利用して判断をしてきたが、複数の環境要因の組み合わせでどのような結果になるかを予測するのは非常に困難であった。また、試験区を組んで確認するには多くの労力と時間を要した。本研究では、C₃植物で耐陰性は高いが耐暑性に劣る寒地型芝とC₄植物で耐暑性は高いが耐陰性に劣る暖地型芝を対象に、光、温度等の気象条件と光合成および生長/衰退との関係をモデル (Fig. 1) で明らか



* 矢印はモデル内の計算の流れを示す Arrows show the calculation flow in the model.

Fig. 1 群落光合成-生長/衰退モデル
Outline of the multilayer model of photosynthesis and the vegetation growth/decline model

にし、スタジアムの設計やスタジアム運用時の芝の管理評価への使用を目的としたプログラム「ターフシミュレータ[®]」の開発をめざした。日本のスタジアムのほとんどで、二つの芝の代表的な品種が主に使われており、本研究の成果は国内のほぼ全てのスタジアムに適用できる。上記モデルを構築するにあたり、芝の光合成と生長/衰退のメカニズム (小杉ら²⁾, 小杉ら³⁾, 松原ら⁶⁾, 松原ら⁷⁾ を基に、森林の群落光合成モデル (田中ら¹¹⁾, 田中ら¹⁰⁾, 高梨⁸⁾, 小杉ら⁵⁾) と生長/衰退モデル (渡辺ら¹³⁾) を統合したが、草本類である芝の光合成特性は季節で変動したり、光環境に馴化して変化したりすることが予想された。さらに、生長特性に関しては、生長量と光合成量が相互に影響しながら短期的に変動すると予想された。これらの現象は森林群落には見られないため、本研究では独自の測定とモデルの構築を目指した。もし、これらの仮説が確認され、草本類用のモデルが確立できれば、農業における最適な栽培法の検討にも利用できると考えた。

2. 試験材料と方法

2.1 試験区および測定内容

モデルはTable 1に示す芝圃場およびサッカースタジアム内の試験区 (北緯34°39', 東経134°10'; < 海拔20m) から得られるデータで検証を行った。圃場には600m²で遮光率が0%の試験区 (Plot A) および370m²で遮光率が40%の試験区 (Plot B) を設置した。スタジアム内 (9,279m²) には屋根の影響の小さい遮光率が52%の試験区 (Plot C) および屋根の影響の大きい遮光率が80%の試験区 (Plot D) を設置した (遮光率は対象となる場所

Table 1 試験区条件
Details of the four experimental sites.

Condition item	Test plots			
	Plot A	Plot B	Plot C	Plot D
Area (m ²)	600	370	A part of pitch in a stadium (9,279)	
Cumulative irradiance compaed to Plot A (%)	100	60	48	20
Installed timing for turf grass	April, 2004	April, 2004	Feb., 2005	Feb., 2006
Species of turfgrass	Kentucky bluegrass (<i>Poa pratensis</i> L.)			
Mowing height (mm)	30			
Vegetation base	1:1 blend of decomposed granite soil and sand			
Irrigation water	Management to prevent drought			
Fertilizer (g m ⁻²)	N:P:K = 30-40:20-30:35-45 Management to prevent nutrient stress			

における太陽光の年間積算日射をスタジアム外における太陽光の年間積算日射で除したものである)。設置した試験区のPlot A~Dに寒地型芝 (*Kentucky bluegrass*, *Poa pratensis* L.) を2004年4月 (Plot A, B), 2005年2月 (Plot C), 2006年2月 (Plot D) にそれぞれ定植し、Plot CとPlot Dに暖地型芝 (*Tifway*, *Cynodon dactylon* cv. *Tifway*) を2009年4月に定植した。その際、寒地型芝には真砂土と砂を1:1で混ぜたものを植栽基盤として使用し、暖地型芝には砂だけを植栽基盤として使用した。芝は、プロサッカーリーグ (J1) が使用するスタジアムを管理するグリーンキーパーに、プロサッカーレベルの芝になるように管理を依頼した。季節によって、最適な散水, 施肥, 刈込作業 (刈込高は、寒地型芝: 30mm, 暖地型芝: 20mm) を実施した。これらの芝を、2週間に1回、直径10.8cmのコアで芝の地上部および地下部のサンプルを3個ずつ採取して、それぞれのバイオマスと枯死量を測定し、同時に土地面積当たりの葉面積であるLAI (m²/m²: 葉面積指数) を葉面積計で測定した。その際、LAIとバイオマスからLMA (kg/m²: 比葉面積重) を算出した。また、刈り込み時には0.57m×2mの面積の刈込量を測定した。それぞれの試験区では、透明のアクリルで作製した10cm×10cm×20cmのチャンバー3組とガスアナライザーを使用し、群落の総光合成量 (GPP: gC/m²/day) と呼吸速度 (地下部を含む) の日変化を2週間に1回測定した (前者引く後者が純光合成量 (NPP: gC/m²/day))。また、ポータブル光合成蒸散測定装置を使用して、個葉の光合成-呼吸速度を測定した。測定は、春期, 梅雨期, 夏期, 秋期, 冬期に (暖地型芝は冬期を除く), 光特性, 温度特性, 日変化を、平均的な生育状態の個葉を試験区毎に3枚ずつ選定して実施した。それぞれの試験区には、微気象データの測定のために温湿度計, 光量子計, 地温計, 風速計を設置した。

2.2 使用したモデル

2.2.1 モデル全体の概要

モデルは群落光合成モデルと生長/衰退モデルからなる。群落光合成モデルは、芝群落上の微気象データと評価する芝の初期生育状態を入力すると、芝群落内の層別の気象データ, 葉温, 地温, 光合成量, 葉・根・分解の呼吸量が30分毎に算出できるようにした。群落高 h を鉛直方向に厚さ dz の層に分ける多層モデルとなっており、① 葉面および土壌面のレイノルズ応力・CO₂・H₂O・顕熱フラックスモデル, ② 個葉の光合成および気孔コンダクタンスモデル, ③ 群落内の放射伝達モデル, ④ 葉面および土壌面のエネルギー収支モデル, ⑤ 個葉の降雨・遮断および蒸散・蒸発モデル, ⑥ 呼吸モデルの6つのサブモデルからなる (田

中¹²⁾，小杉⁴⁾，小杉ら⁵⁾。ただし本研究は，既往の研究と以下3つの面で違いがある。まずCO₂，H₂O，気温については垂直方向に均一とし，大気拡散を評価する二次の乱流クロージャモデル（田中¹²⁾）は使用しなかった。次に気孔コンダクタンスは「Ballモデル」ではなく「Jarvisモデル」を使用した（詳細は2.2.2）。最後に，葉・根・分解呼吸は独自のサブモデルを使用し，分解呼吸のサブモデルの代わりに根・分解呼吸と根の生長呼吸を組み合わせ使用した（詳細は2.2.3）。なお本論文では，既往研究と違う部分のみを論じている。生長/衰退モデルは，群落光合成モデルによって計算された光合成産物NPPを入力し，葉と根のバイオマス，LAI，根と葉の枯死量，および刈込量を1日に1回算出した。生長/衰退モデルの中で，NPPの根と葉への分配が算定され（詳細は2.2.4），刈込速度と葉と根の枯死速度を算出しながら（詳細は2.2.5），葉と根のバイオマス，LAI，葉と根の枯死量を継続的に算定した（詳細は2.2.6）。葉と根のバイオマスは群落光合成モデルで翌日のNPPを計算するために利用した。葉と根の生長呼吸速度についても考慮した（詳細は2.2.3）。このようにして，芝の生長と衰退を長期的にシミュレーションすることで，光合成速度，葉と根のバイオマス，LAI等，芝の生長に関する多くの要素の季節変動を分析することが可能となった。

2.2.2 気孔コンダクタンス 気孔の開閉の指標となる気孔コンダクタンスは光と飽差の影響を受けるモデル（Jarvis¹⁾）を使用した。

$$g_{sw} = g_{swmax}f(Q)f(D) + g_{swmin} \quad (1)$$

ここで， g_{swmax} は最大気孔コンダクタンス（mol H₂O/m²/s）， $f(Q)$ と $f(D)$ はそれぞれ Q と D の関数で， g_{swmin} は最少気孔コンダクタンス（mol H₂O/m²/s）， Q は光量子束密度（μmol/m²/s）， D は飽差を示している（hPa）。 $f(Q)$ と $f(D)$ はLohammar方程式から得られる以下の式を用いる。

$$f(Q) = \frac{Q}{Q + \frac{g_{swmax}}{a}} \quad (2)$$

$$f(D) = \frac{1}{1 + \frac{D}{D_0}} \quad (3)$$

ここで， a は $Q=0$ の時の初期勾配， D_0 （hPa）は飽差に対する反応で g_s が半減する時の飽差の値を示す。

2.2.3 葉・根・分解呼吸（生長呼吸を含む） 葉の呼吸速度は群落光合成モデルのサブモデル②で層毎に葉の呼吸と生長呼吸（ R_{gr} ：μmol/m²/s）を積算して評価する。根の呼吸速度はアレニウス式を用いて温度に依存する根の呼吸と生長呼吸から決定した。

$$R_r = W_r \cdot R_{r25} \cdot \exp\left[\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_s}\right) \cdot \frac{\Delta H_a(R_r)}{RT_{ref}}\right] + R_{gr} \quad (4)$$

$$R_{dec} = (L_f + L_r) \cdot R_{dec25} \cdot \exp\left[\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_s}\right) \cdot \frac{\Delta H_a(R_{dec})}{RT_{ref}}\right] \quad (5)$$

ここで， R_r は根の呼吸速度（μmol/m²/s）， R_{gr} は根の生長呼吸速度（μmol/m²/s）， R_{dec} は分解呼吸速度（μmol/m²/s）， W_r および L_r ， L_f はそれぞれ単位面積当たりの根のバイオマス，および葉の枯死量と根の枯死量（kg/m²）， R_{r25} と R_{dec25} は基準値として25°Cにおける根呼吸速度と分解呼吸速度（μmol/kg/s）， ΔH_a は活性化エネルギー（J/mol）， T_s は土壌温度（K）， T_{ref} は25°C（298 K）を示す。また， ΔH_a （ R_r ）と ΔH_a （ R_{dec} ）はそれぞれ根呼吸および分解呼吸の活性化エネルギーを示している。

葉と根の生長呼吸速度（ R_{gr} ， R_{gr} ）は，相対生長速度（予測日前の数日間（ D_{cum} ：day）の生長量と予測日のバイオマス（ $W_{f(D_{cum}+1)}$ ， $W_{r(D_{cum}+1)}$ ）から求める。）および相対生長速度に対する25°Cでの生長呼吸速度（ R_{gr25} ， R_{gr25} ：μmol CO₂/m²/s），生長呼吸速度の活性化エネルギー（ ΔH_a ：J/mol）から求められた。

$$R_{gf} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{D_{cum}} \Delta W_{f(i)}}{W_{f(D_{cum}+1)}} \cdot R_{gr25} \cdot \exp\left[\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_c}\right) \cdot \frac{\Delta H_a(R_{gf})}{RT_{ref}}\right] & , \sum_{i=1}^{D_{cum}} \Delta W_{f(i)} > 0 \\ 0 & , \sum_{i=1}^{D_{cum}} \Delta W_{f(i)} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$R_{gr} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{D_{cum}} \Delta W_{r(i)}}{W_{r(D_{cum}+1)}} \cdot R_{gr25} \cdot \exp\left[\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_c}\right) \cdot \frac{\Delta H_a(R_{gr})}{RT_{ref}}\right] & , \sum_{i=1}^{D_{cum}} \Delta W_{r(i)} > 0 \\ 0 & , \sum_{i=1}^{D_{cum}} \Delta W_{r(i)} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

ここで， W_f と W_r は葉と根の単位面積当たりのバイオマス， $\Delta W_{f(i)}$ と $\Delta W_{r(i)}$ は*i*日前の葉と根のバイオマスの違い（kg/m²/day）， T_c と T_s は葉温と地温（K）， T_{ref} は25°C（298 K）， R_{gr} と R_{gr} は上記の方程式と気象データによって求めた。

2.2.4 NPPの分配 NPPは群落光合成モデルによって30分間隔で算出し，一日の値をすべて積算した。NPPは一日で生産されるバイオマス（ B ，kg/m²/day）をバイオマスとカーボンの比率（ f_c ）を使って換算した。葉に分配されるバイオマス（ B_f ，kg/m²/day）は，NPPが0を上回って葉が生長している時に葉に分配されるNPPの比率（ α_f ）と，NPPが0を下回って葉が衰退している時に葉に分配されるNPPの比率（ α_r ）で求めた。根に分配されるバイオマス（ B_r ，kg/m²/day）は（ $1-\alpha_f$ ）と（ $1-\alpha_r$ ）を使って求めた。ただし，LAI（m²/m²）がLAI_{max}を超えた時には全てのバイオマスは根に分配され，LAIがLAI_{min}を下回った時には全てのバイオマスが葉に分配されることとした。LAIはバイオマスとLMAから算出した。NPPは冬には主に根に分配されるため， α_f を過去4日間の気温の平均を

使って季節間の違いを区別した。 α_{f+} は変動しやすく、光条件にも左右された (Table 2)。

2.2.5 葉と根の刈込量と枯死速度 一日あたり刈込量 ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{day}$) は一回当たりの刈込量を刈込間隔 (D_{mow} : day) で除して求めた。LAIがLAIの下限值 (LAI_{ml} , m^2/m^2) を上回っている時には、1回あたりの刈込量は LAI_{ml} を超えた値である刈込率 (r_{mow}) によって決定した。LAIがLAIの下限值 (LAI_{ml} , m^2/m^2) を下回っている時には、1回あたりの刈込量は 0 として計算した。葉のバイオマスの枯死速度は、前日の葉のバイオマスとターンオーバー率 (λ_f) によって求めた。 λ_f は1日あたりの葉の枯死量 (葉のバイオマスに葉の寿命の逆数を乗じて求める) である。季節間の変動は、4日間の気温の平均を閾値に使用して区別し、サッカーの試合に使用することで受けるダメージも考慮した。根のバイオマスの枯死速度は、葉と同様に前日の根のバイオマスと根のターンオーバー率 (λ_r) によって求めた。 λ_r は λ_f と同様に季節間の違いと芝の使用状況によって使い分けた。

2.2.6 葉と根のバイオマス・LAI・葉と根の枯死量 葉の生長速度 (ΔW_f , $\text{kg}/\text{m}^2/\text{day}$) は葉に分配されるバイオマスから葉のバイオマスの枯死速度 (ΔL_f , $\text{kg}/\text{m}^2/\text{day}$) と刈込量を差し引いて求めた。根の生長速度 (ΔW_r , $\text{kg}/\text{m}^2/\text{day}$) は生長期間に根に分配されるバイオマスから根のバイオマスの枯死速度 (ΔL_r , $\text{kg}/\text{m}^2/\text{day}$) を差し引くことによって求めた。葉のバイオマス (W_f , kg/m^2) と根のバイオマス (W_r , kg/m^2) は前日の葉と根のバイオマスと葉と根の生長速度によって求めた。計算結果は翌日の群落光合成モデルの計算に使用した。LAIは前日のLAIとLAIの増加速度 (ΔLAI , $\text{m}^2/\text{m}^2/\text{day}$) によって計算されているが、LAIの増加速度は葉の生長速度と定期調査で得た各遮光率レベルにおけるLMAの平均的季節変動 (3年間平均) を使って計算した (Fig. 2)。

葉と根の枯死速度 ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{day}$) は衰退期間に葉と根に分配されるバイオマスのマイナス値と葉と根の枯死速度から求めた。葉の枯死量 (L_f , kg/m^2) は前日の葉の枯死量から葉の分解呼吸量を差し引き、さらに葉の枯死速度を加えて求めた。根の枯死量 (L_r , kg/m^2) も葉の枯死量と同様にして求めた。

2.3 パラメータの設定

2.3.1 群落光合成モデルに使用するパラメータ 芝群落光合成モデルのサブモデル (2.2.1を参照) に使用するパラメータについては、以下のように実測して決定した。② のサブモデルのパラメータについては、個葉をポータブル光合成-蒸散測定装置で測定して得られた温度カーブとライトカーブ (松原ら⁶⁾, 松原ら⁷⁾) から最適化

Table 2 変動パラメータ (寒地型芝)
Changing parameter for C₃ cool-season turfgrass

Parameter	Unit	Air temp.	Shade rate (r)			
			0 - 0.2 (Plot A)	0.2 - 0.4 (Plot B)	0.4 - 0.6 (Plot C)	0.6 - 1.0 (Plot D)
$V_{\text{cmax}25}$	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	<23°C	73.1	73.1	73.1	73.1
		>23°C	73.1	73.1	50.0	40.0
$1-f$	ratio		0.5	0.5	0.5	0.6
α_{f+}	ratio	<10°C	0	0	0	0
		>10°C	0.45	0.50	0.50	0.50
LAI_{ml}	m^2/m^2		2.5	2.0	2.0	1.5
λ_f	ratio	>20°C	0.011 (not used for football matches) 0.022 (used for football matches)			
		<20°C		∞		
λ_r	ratio	>23°C	0.0055 (not used for football matches) 0.011 (used for football matches)			
		<23°C		∞		
LMA	kg/m^2		See Fig. 2			

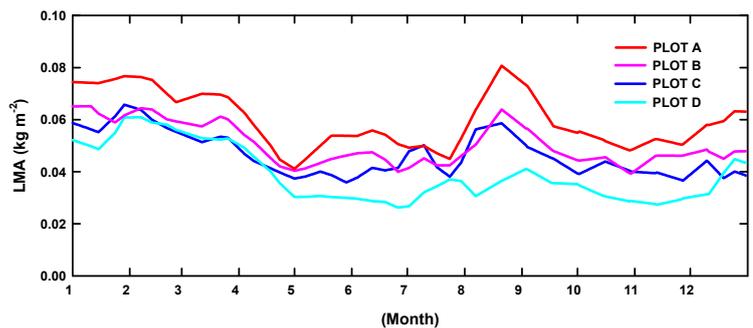


Fig. 2 LMAの季節変動 (寒地型芝)
Seasonal fluctuation of leaf dry mass per unit area
for four plots (C₃ cool-season turfgrass)

した。寒地型芝については2006年~2007年にPlot A~Dを、暖地型芝については2009年~2010年にPlot A, Bをそれぞれ測定した。根呼吸と分解呼吸のパラメータは試験区における測定結果を基にした (小杉ら²⁾)。③ のサブモデルについては、まず、群落の上端を地面から3cmとし、芝群落を垂直方向に12層に等分した。葉の傾きの角度は、それぞれの試験区で100枚の葉からデータを集め、1~4層と5~12層の平均と標準偏差で一般的な数値を推定した。LAIの垂直方向の構造は、3層に分けて採取した葉の重さとLMAから計算をした。日射の透過および反射の特徴と葉に到達する光量子束密度については、一般的な値から計算をした。日射の反射の特徴と地面に到達する光量子束密度についても同様に計算をした。⑤ のサブモデルの顕熱のバルク係数は、熱帯地方の雨季における顕熱フラックス (高梨ら⁹⁾) より決定した。

2.3.2 生長/衰退モデルのパラメータ 生長/衰退モデルのパラメータについては、葉と根のバイオマスおよびLAI、刈込量、葉と根の枯死量の季節変動を寒地型芝の4試験区、暖地型芝の2試験区において測定し、データと比較することで最適化した。予測値 (E_i) と実測値 (E_i') を比較するにあたり平均二乗偏差 (RMSD) を使用した。RMSDは以下のように計算した。

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (E_i - E_i')^2}{n}} \quad (8)$$

2.4 二次元化のアルゴリズム

群落光合成-生長/衰退モデルは、ピッチ上の各ポイントにおける葉と根のバイオマスの変動等を予測するための一次元モデルである。そこで、任意のスタジアム形状と立地の気象データを入力し、グリッドに分割したピッチ上の各格子点で光のデータとパラメータを得た。得られたデータとその他の気象データを使って一次元モデル計算を行い、二次元分布を得ることを可能とした。

2.4.1 各グリッドにおける日射の時系列データ マッピングのプロセスにおいて、各グリッドにおける直達光 ($S_b \downarrow$) および散乱光 ($S_d \downarrow$)、直達の光量子束密度 ($S_{PPFDb} \downarrow$)、散乱の光量子束密度 ($S_{PPFDd} \downarrow$)、下方への長波光 ($S_{PPFDd} \downarrow$) の値が必要となる。これらは30分間隔で準備をした。太陽放射は水平面全天日射の観測値を直達成分と散乱成分に分けて扱った。直達成分は、大気圏外における太陽放射フラックス (W/m^2 , 太陽定数) に対して、国内の気象庁観測点における直達日射量、大気圏内の通過空気量 (大気路程)、水蒸気量、雲量から経験的に求めた減衰率を乗じて求めた。散乱成分は、全天日射から直達成分を差し引いた残差として求めた。芝の表面とスタジアムの形状はいくつかの三角形の表面エレメントに分けた。それぞれの表面エレメントについて、その表面エレメントから見えている範囲の太陽および空、自身以外の表面のエレメントからの光のエネルギーフラックスを積算した。この過程で、表面エレメント間の相互の立体角および、表面エレメントの法線に対する各エレメント重心間を結ぶ直線の角度を考慮した。芝と建物からの反射は等方的であるとされた。光の多重反射は直達光を受ける面における反射について2回までとした。芝と建物表面のアルベドの代表的な最大値はコンクリートのスタンドや屋根で0.15、芝で0.25であり、2回反射より高次の反射の寄与は極めて小さいと考えられたためである。

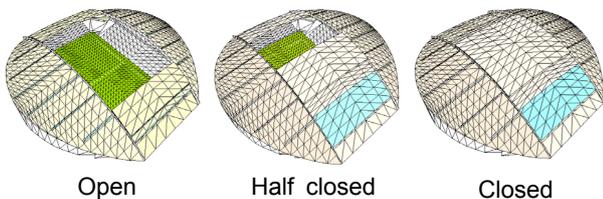


Fig. 3 開閉式スタジアムの屋根の開閉状態
Roof states of the retractable dome stadium

天候変化と屋根の開閉についても考慮した (Fig. 3)。屋根の開閉状態は年間の開閉記録を入力した。

2.4.2 各グリッドの遮効率によるパラメータの配分 遮光率によって分けられたパラメータをTable 2およびFig. 2に示す。それぞれのパラメータを、0-0.2, 0.21-0.4, 0.41-0.6, 0.61-1.0 の4段階の遮効率でクラス分けし、各パラメータ値を各クラスの下限值と上限値の中間の遮光率の値として、その間の値は直線補間して与えた。遮光率を r 、パラメータ値を F として、補間式を作成した。

3. 結果

3.1 変動パラメータによるモデルの精度

2006年から2007年の2年間にわたり、群落光合成モデルと生長/衰退モデルを使って寒地型芝の計算を行った。Fig. 4は、GPP ($gC/m^2/day$: 総光合成量, GPPから葉と根の呼吸量を引いたのがNPP), NPP, 葉・根・分解の呼吸量を、Table 1に示すPlot A~Dと一致した遮光率の4段階にクラス分けし、予測した結果を示したものである。Fig. 5~7は、同じく4段階で予測値と実測値を比較したもので、葉と根のバイオマス、LAI、刈込量、根の積算生長量、葉と根の枯死量について示す。ほとんどのパラメータは一つの数値に固定したが、 $V_{\text{max}25}$ ($\mu\text{mol}/m^2s$: 25°Cでの最大炭酸同化速度) および NPP割振については季節および光条件で、葉と根の回転率については季節や試合の使用状況でそれぞれ変動させた。LMAは季節条件のみ変動させ、 $1-f$ (ratio: 光利用効率)、刈込制限については光条件のみ変動させた (Table 2)。変動パラメータを用いることで、葉のバイオマス、根のバイオマス、LAI、刈込量、根の積算生長量、葉と根の枯死量のRMSDは、それぞれ0.034, 0.195, 0.748, 0.032, 0.098, 0.112となり、良い結果を得ることができた (各実測値の絶対最大値は、0.340, 2.220, 6.274, 0.173, 0.401, 0.608)。暖地型芝については、紙面の都合で十分に論ずることが出来ないが、寒地型芝と同様に予測値と実測値を比較した結果、RMSDがそれぞれ0.043, 0.130, 0.707, 0.047, 0.067, 0.145となった (各実測値の絶対最大値は、0.261, 1.065, 5.013, 0.354, 0.304, 0.925)。

3.2 GPP, NPP, および呼吸

2年の試験期間にわたって予測したPlot A~Dにおける寒地型芝のGPP, NPP, および呼吸速度の季節変動をFig. 4に示す。GPPとNPPは4月~7月の大きなピークと秋に小さなピークがある二峰性の季節変動が見られた。GPPとNPPは光環境が最も良い区で高くなった。最も暗いPlot Dの2006年の積算NPPは、低照度下における低いGPPと2006年2月に植えられた大きな根のバイオマスによって呼吸速度が速くなりマイナスとなった。葉・根・分解の呼吸速度は春、初夏、夏にそれぞれピークがあった。葉の呼吸量の増加は葉のバイオマスの増加と一致した。また、根と分解の呼吸の増加は地温に影響されていた。全

での呼吸量は、高い気温および地温になる最も明るい区で大きくなった。

3.3 葉と根のバイオマス

寒地型芝の葉と根のバイオマスについて、2年の試験期間にわたって予測したPlot A~Dの季節変動をFig. 5に示す。Plot A~Cでは、葉と根のバイオマスの両方が冬に低くなり、3月から5月に回復して5月にピークとなった後、夏の間は低下して、秋に再びわずかに回復した。Plot Dでは根のバイオマスの急激な低下が2006年に見られて2007年の最後まで続いた。これは、2006年2月に大きな根を持つ新しい芝を植えたためである。葉と根のバイオマスは最も明るい試験区で大きくなった。全バイオマスに対する根の比率も、最も明るい試験区で大きくなった。予測された葉と根のバイオマスの値は、最も明るい区で二峰性の季節変動、Plot Dで根のバイオマスの急激な低下、最も明るい区で大きくなるなど実測値の季節変動を再現していた。Plot BとPlot Cでは、予測した根のバイオマスが実測値よりわずかに大きくなった。

3.4 マッピング

二次元の単位面積当たりの葉と根のバイオマスを寒地型芝について2007年の気象データを基に群落光合成モデルおよび生長/衰退モデルで予測した結果をFig. 9およびFig. 10に示す。北側は図の右側で、白いラインはゴール

からの距離 (m) である。(サッカーのピッチ上の月間積算日射量 (Mj/m²) を二次元化したものをFig. 8に示す。) Plot Cはピッチの中央に位置し、Plot Dは左のサイドラインの中央に位置する。シミュレーションは、1月1日のピッチの芝がLAI : 2.5 m²/m²、根のバイオマス : 0.5 kg/m²として一様な生育状態からスタートさせた。それぞれの月の15日の状態を示している。葉と根のバイオマスは5月に最も有意の増加が見られ、6月に低下し、暗いPlot Dで有意の衰退をした。明るい区と暗い区の違いは時間が経つにつれて明らかとなった。6月に観察されたバイオマスの低下は8月に回復しなかった。これは気温と地温の上昇による呼吸の増加が原因であった (Fig. 4e-h)。10月以降は光が減少するにもかかわらず (Fig. 8), バイオマスはほぼ維持されていた。これは、気温と地温の低下によって呼吸量が低下したためであった。

4. 考察

寒地型芝の葉と根のバイオマスの実測値には、明るい試験区で二峰性の季節変動が見られ、最も明るい試験区の高い値を除けば、著者らのモデルによる予測値は全ての試験区を概ね再現していた (Fig. 5)。葉と根のバイオマスで見られる、大きな春の増加と夏の衰退は光環境に依存していた。生長と衰退を決定する光合成と呼吸は暗い場所より明るい場所で両方とも大きくなった (Fig. 4)。明

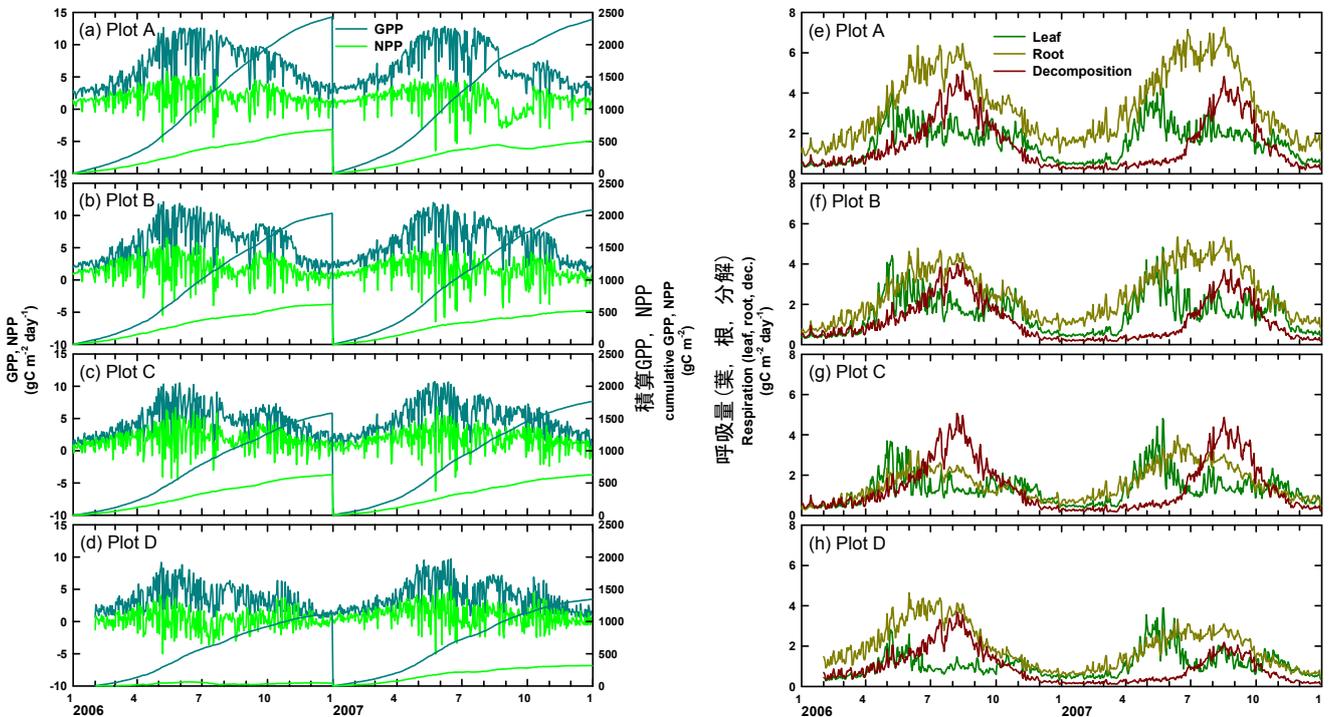


Fig. 4 群落光合成モデルと生長/衰退モデルで予測したPlot A~DのGPP, NPPおよび葉・根・分解の呼吸量の年変動 (寒地型芝) Estimated results for C₃ cool-season turfgrass using the multilayer model for gas exchange and the vegetation decline/growth model. Gross primary production (GPP), net primary production (NPP), and cumulative GPP and NPP are shown for (a) plot A – (d) plot D. Root respiration, decomposition respiration, leaf respiration, and growth respiration are shown for (e) plot A – (h) plot D.

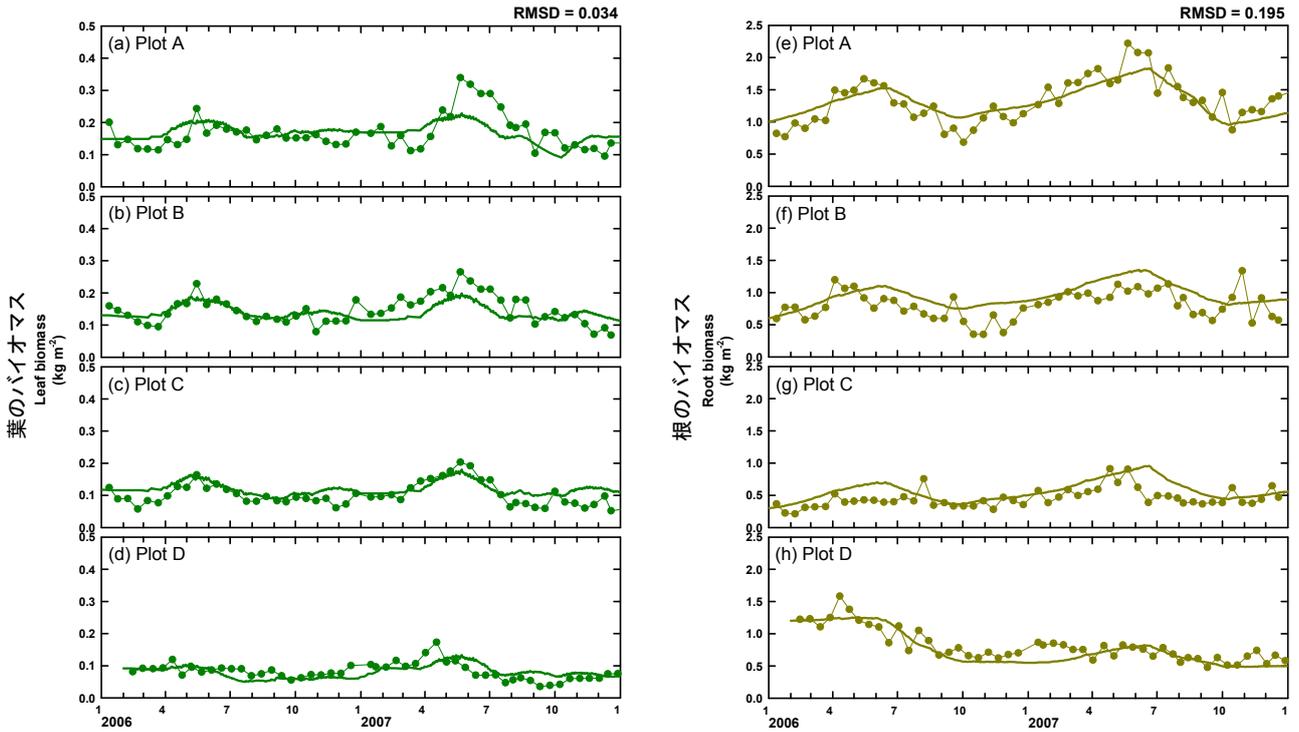


Fig. 5 群落光合成モデルと生長/衰退モデルで予測したPlot A～Dにおける葉・根のバイオマスの年変動 (寒地型芝)
[実線は予測値, 点は実測値を示す]

Estimated results for C₃ cool-season turfgrass using the multilayer model for gas exchange and the vegetation decline/growth model (solid lines indicate estimated data, plots represent observed data). Leaf biomass values are shown for (a) plot A – (d) plot D. Root biomass values are shown for (e) plot A – (h) plot D.

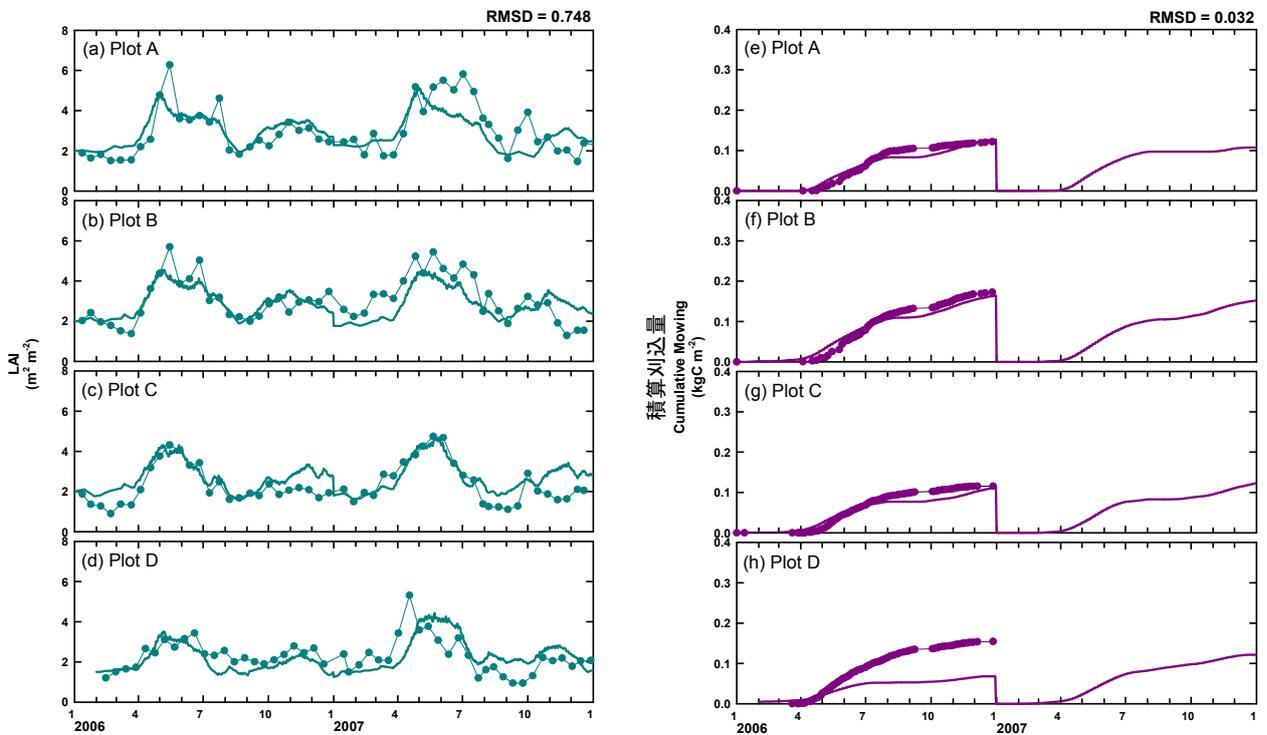


Fig. 6 群落光合成モデルと生長/衰退モデルで予測したPlot A～DにおけるLAIと積算刈込量の年変動 (寒地型芝)
[実線は予測値, 点は実測値を示す]

Estimated results for C₃ cool-season turfgrass using the multilayer model for gas exchange and the vegetation decline/growth model (solid lines indicate estimated data, plots represent observed data). Leaf area index (LAI) values are shown for (a) plot A – (d) plot D. Cumulative mowing values are shown for (e) plot A – (h) plot D.

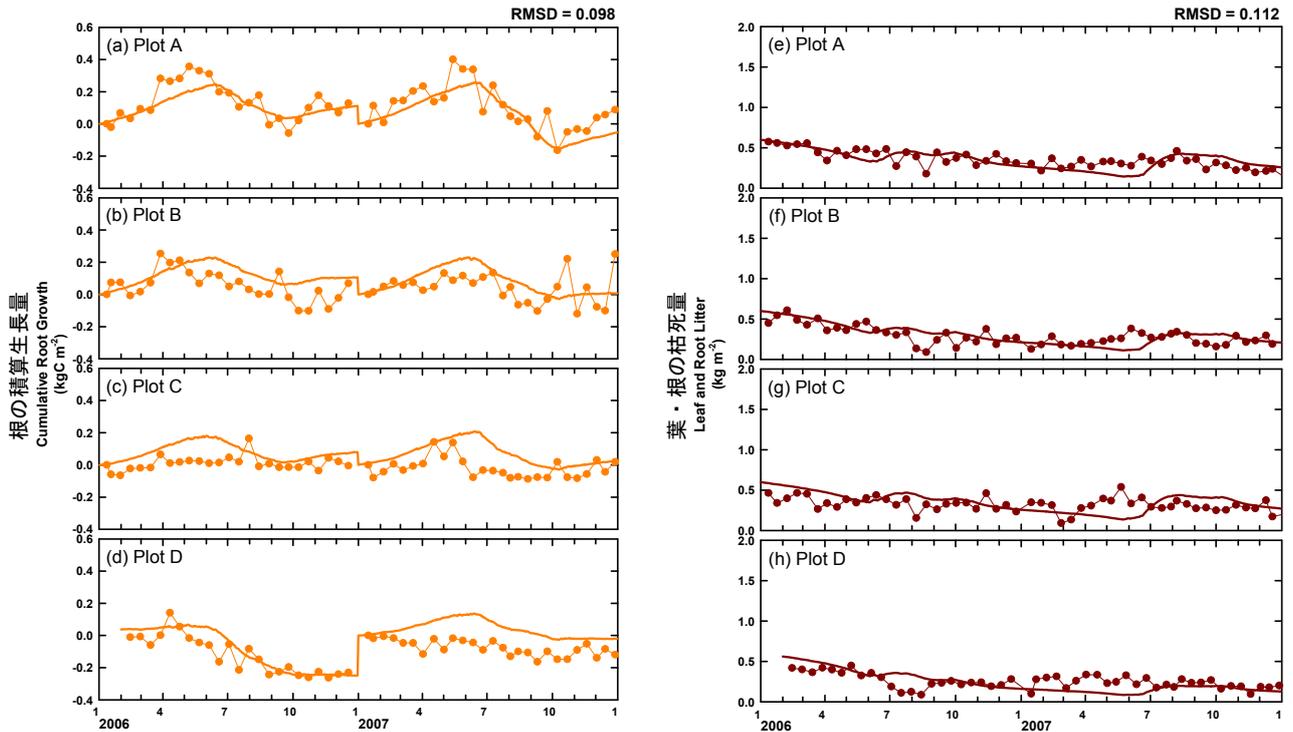


Fig. 7 群落光合成モデルと生長/衰退モデルで予測したPlot A～Dにおける根の積算生長量と葉・根の枯死量の年変動 (寒地型芝) [実線は予測値, 点は実測値を示す]

Estimated results for C₃ cool-season turfgrass using the multilayer model for gas exchange and the vegetation decline/growth model (solid lines indicate estimated data, plots represent observed data). Cumulative root growth values are shown for (a) plot A – (d) plot D. Root and leaf litter values are shown for (e) plot A – plot D.

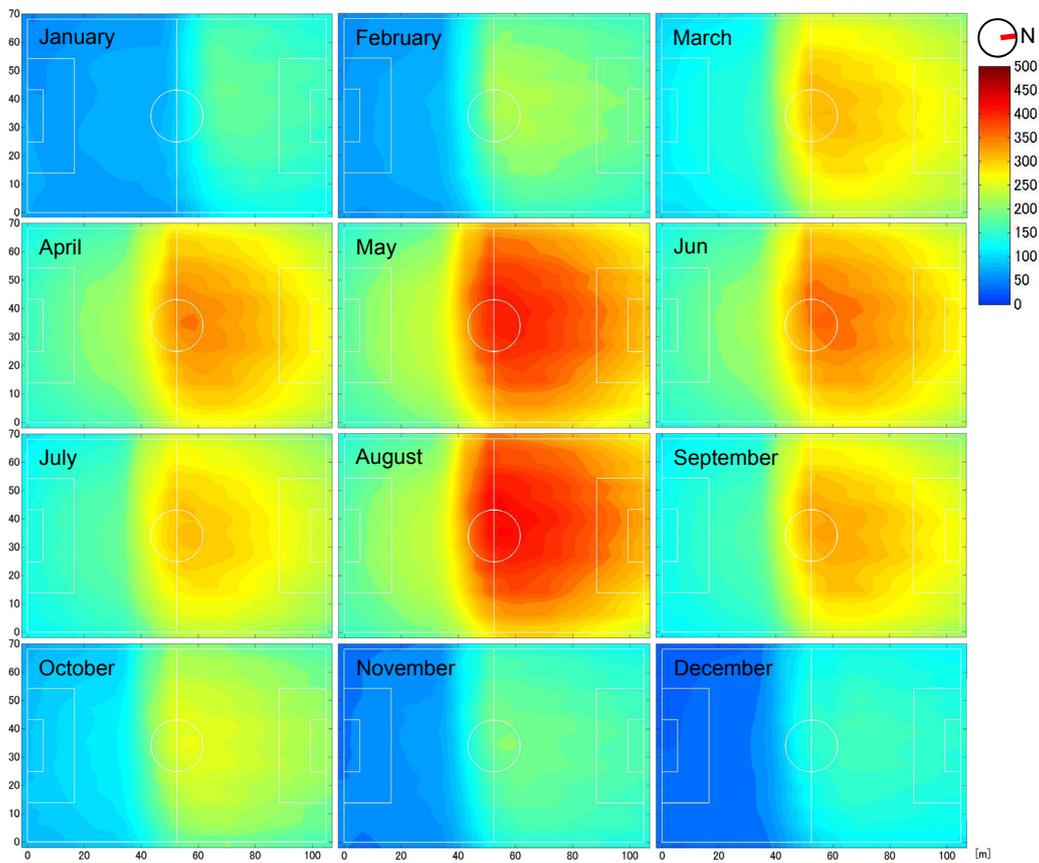


Fig. 8 2007年1～12月のサッカーのピッチにおける月積算日射量分布 (MJ m^{-2}) のシミュレーション結果
Two-dimensional distribution of monthly cumulative solar radiation on a soccer field in January–December, 2007 (MJ m^{-2}).

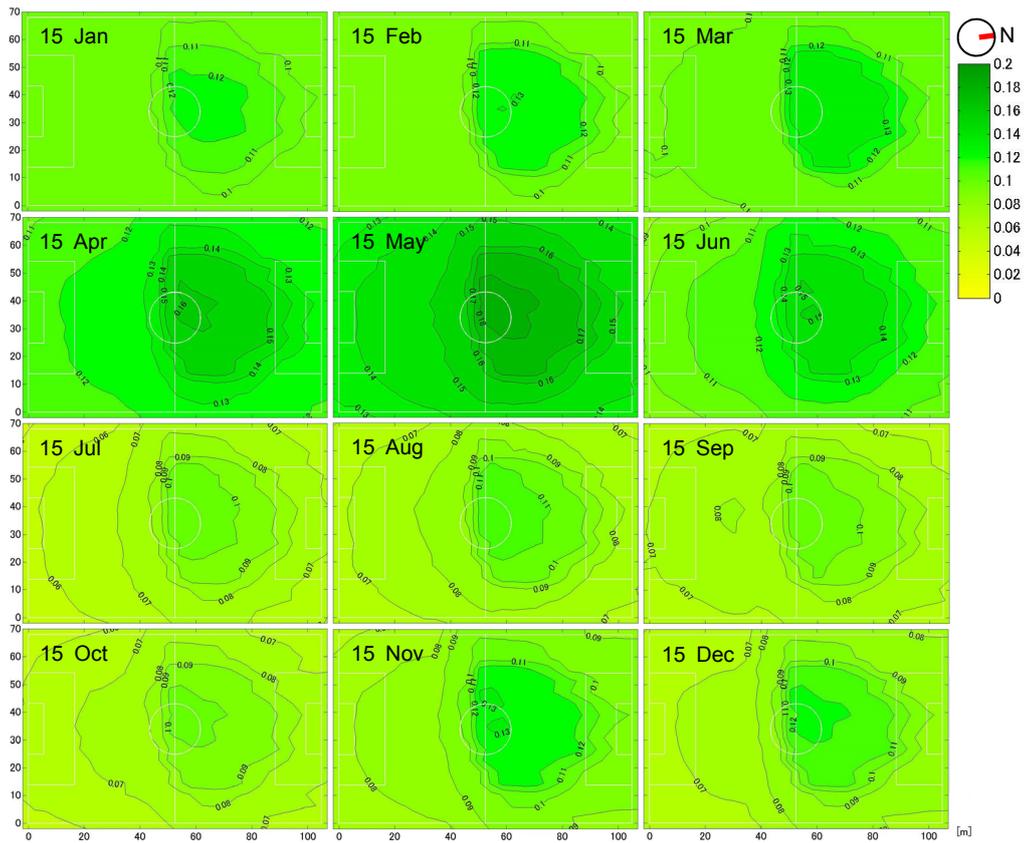


Fig. 9 2007年1月～12月のサッカーのピッチにおける葉のバイオマス (kg/m²) のシミュレーション結果 (寒地型芝)
Two-dimensional distribution of leaf biomass for C₃ cool-season turfgrass on a soccer field in January–December, 2007 (kg/m²).

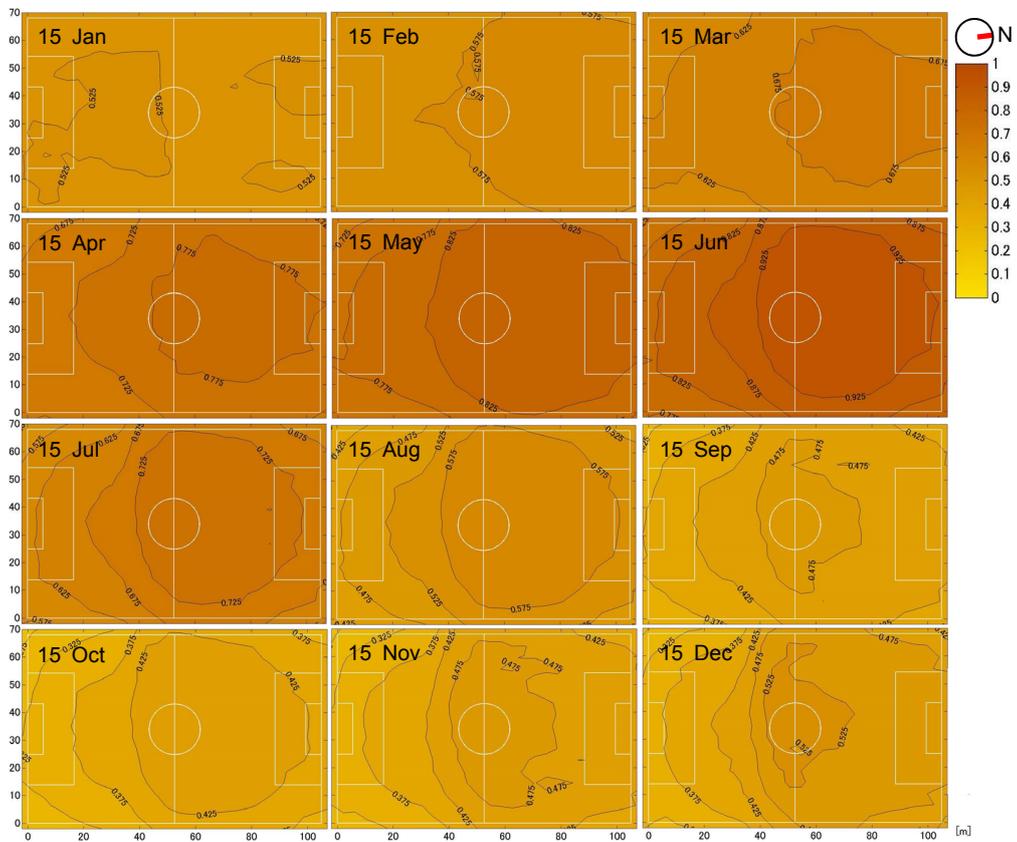


Fig. 10 2007年1～12月のサッカーのピッチにおけるRoot biomass (kg/m²) のシミュレーション結果 (寒地型芝)
Two-dimensional distribution of root biomass for C₃ cool-season turfgrass on a soccer field in January–December, 2007 (kg/m²).

る場所は強い光で葉温と地温が上昇するため、光環境は芝の生長と衰退を結果的に支配している(松原ら⁶⁾)。そのため、大きな生長と衰退は最も明るい試験区で見られた。2006年2月に植えたPlot Dの根の積算生長量は著しく衰退した(Fig. 5d)。Plot Dでは、2006年の夏に、低照度のためにGPPが低くなるにもかかわらず、大きな根で根呼吸が大きく上昇したと推測された(Fig. 4dh)。GPPと根呼吸のアンバランスがPlot Dのバイオマスを急激に衰退させたと考えられる。これらの結果は、大きな根を持つ新しい芝を屋根の影響で日照不足となるピッチに植えると、大きな根呼吸と低いGPPでNPPが低くなり、急激な衰退が発生することを強く示唆していた。

5. まとめ

著者らは、芝の群落光合成モデルと生長モデルを統合し、寒地型芝および暖地型芝の群落光合成-生長衰退モデルを構築した。モデルに芝群落上の気象データを入力して得られた、葉と根のバイオマス、LAI、積算刈込量、根の積算生長量、葉と根の枯死量の予測値と実測値との比較から、本モデルが多様な光環境下における光合成および生長/衰退の様子を概ね再現できることが確認された。また、本モデルを特殊な生育環境を含む広範囲の環境下で実用的に用いるため、任意のスタジアム形状および立地の気象データを入力すると、ピッチ上の芝の生育状態を面的に評価できるアルゴリズムを示した。以上のモデル群を「ターフシミュレータ」として用い、スタジアムの設計時に芝の生育可否の判定を行うことで、芝が良好に生育できる施設を計画できるようになった。また、既存のスタジアムで芝の生育不良が生じている場合でも、原因の特定と解決策の提案が可能になった。さらに、スタジアム運用時の芝の管理法を評価して最善の計画を立てることも可能となった。このように、芝の生育に有利なスタジアムの形状や環境を短時間で評価できるようになり、スタジアム設計の際の有用なツールとなっている。また、草本類のモデルの一例を提示できたことから、農業における最適栽培法の検討への応用も期待される。

謝辞

本研究は、共同研究先である京都大学大学院農学研究科 小杉緑子教授および高梨聡氏(現(独)森林総合研究所)他の協力のもとに進めてきました。また、芝調査に際しては、管理者団体各位のご協力のもとに進めることが出来ました。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

1) Jarvis, P. G.: The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*, 273,

pp.593-610, 1976

2) Kosugi, Y., Itoh, M., Matsubara, T., Takanashi, S., Osaka, K., Mizota, Y., Dannoura, M., Shimamura, T., and Makita, M.: Partitioning of respiratory CO₂ fluxes from a C₃ turfgrass field, *J. Agric. Meteorol.*, 66, pp.151-161, 2010

3) Kosugi, Y., Osaka, K., Itoh, M., Takanashi, S., and Matsubara, T.: Photosynthesis and respiration of C₃ turfgrass fields under various light conditions, *J. Agric. Meteorol.*, 66, pp.163-171, 2010

4) Kosugi, Y., Tanaka, H., Takanashi, S., Matsuo, N., Ohte, N., Shibata, S., Tani, M.: Three years of carbon and energy fluxes from Japanese evergreen broad-leaved forest, *Agric. For. Meteorol.*, 132, pp.329-343, 2005

5) Kosugi, Y., Takanashi, S., Matsuo, N., Tanaka, K., and Tanaka, H.: Impact of Leaf Physiology on Gas Exchange in a Japanese Evergreen Broad-leaved Forest, *Agric. For. Meteorol.*, 139, pp.182-199, 2006

6) Matsubara, T., Kosugi, Y., Takanashi, S., Mizota, Y., Itoh, M., Osaka, K., Fujimoto, M., Ohkubo, S.: Seasonal fluctuations in growth/decline and single-leaf gas exchange of C₃ turfgrass fields under various light conditions, *J. Agric. Meteorol.*, 67, pp.1-12, 2011

7) Matsubara, T., Kosugi, Y., Takanashi, S., Mizota, Y.: Measurement and simulation of single-leaf photosynthesis of Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.) grown under different light conditions, *J. Jpn. Soc. Reveget.*, 37 (3), pp.419-428, 2012

8) Takanashi, S.: Effects of Heterogeneity in Stomatal Behaviour on Gas Exchange, *Kyoto Univ. Phd. Theses*, 2005

9) Takanashi, S., Kosugi, Y., Tani, M., Ohte, N.: Evapotranspiration from a Japanese cypress forest during and after rainfall, *J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.*, 16, pp.268-283, 2003

10) Tanaka, K., Kosugi, Y., Nakamura, A.: Impact of leaf physiological characteristics on seasonal variation in CO₂, latent and sensible heat exchanges over a tree plantation, *Agric. For. Meteorol.*, 114, 103-122, 2002

11) Tanaka, K., Kosugi, Y., Ohte, N., Kobashi, S., Nakamura, A.: Model of CO₂ fluxes between a plant community and the atmosphere and simulation of CO₂ flux over a planted forest, *Jpnese Journal of Ecology*, 48, pp.265-286, 1998

12) Tanaka, K.: Multi-layer model of CO₂ exchange in a plant community coupled with the water budget of leaf surfaces, *Ecol. Modell.*, 147, pp.85-104, 2002

13) Watanabe, T., Yokozawa, M., Emori, S., Takata, K., Sumida, A., Hara, T.: Developing a multilayered integrated numerical model of surface physics-growing plants interaction (MINoSGI), *Global Change Biology*, 10, pp.963-982, 2004