

スギ人工林の二酸化炭素吸収量におよぼす間伐の影響 —光合成法による評価—

小林 元

信州大学農学部附属アルプス圏フィールド科学教育研究センター

要 約

スギ人工林の二酸化炭素吸収量を光合成法によって試算した。樹冠の光合成量は始め、積算葉面積指数が増加するにしたがって直線的に増加し、その後、徐々に増加が小さくなり、積算葉面積指数が $6.24\text{m}^2\text{m}^{-2}$ の時を境として増加から減少へと転じた。吸光係数を0.51とした本計算では、このときの相対光強度は4.17%で、一般に知られるスギ閉鎖林下における相対光強度と近い値であった。積算葉面積指数が $6\text{m}^2\text{m}^{-2}$ のときの収量比数を1と仮定し、間伐による樹冠の光合成量の低下を試算した。その結果、樹冠の光合成量は収量比数0.8まで間伐する密仕立てでは3%とほとんど低下せず、0.7まで間伐する中庸仕立てで6%、0.6まで間伐する疎仕立てでも12%の低下に止まることが判明した。林業経営を目的とした通常の間伐範囲では、葉量の減少に伴う樹冠の光合成量の低下は小さく、森林の二酸化炭素吸収の公益的機能はほとんど損なわれないといえる。

キーワード：群落光合成理論，公益的機能，最適葉面積指数，収量比数，林業経営

はじめに

近年、大気中の二酸化炭素濃度の上昇に起因する地球温暖化の進行が懸念されており、その防止策の一つとして森林の二酸化炭素吸収機能が注目され、森林による二酸化炭素の吸収量を正確に推定することが重要な課題となっている。森林の二酸化炭素吸収量を推定する方法の一つとして、光合成法⁹⁾がある。光合成法では、個葉の光合成速度から樹冠全体の光合成量を推定する。このため、森林の二酸化炭素吸収におよぼす土壌の養水分、大気中の二酸化炭素濃度、温度等の影響を予測する上で利用価値が高い。また光合成法では、そのモデルに葉の量や付き方等の樹冠構造を反映するため、間伐や枝打ち等の育林施策が二酸化炭素吸収におよぼす影響を評価することにも利用出来る。

本研究では、我が国の人工林面積のおよそ4割を占めるスギ林の二酸化炭素吸収量を、光合成法によって試算する。さらに、間伐による葉量の減少に伴って、スギ林の二酸化炭素吸収量がどの程度低下するか定量的に評価する。

計算方法

1. モデル

樹冠の光合成量の計算は、樹冠内の窒素分布から間接的に推定する広瀬³⁾のモデルを一部変更した方法にしたがった。

樹冠内における光強度の分布は、Lambert-Beerの法則を用いた次式⁹⁾で表される。

$$I_z = I_0 \exp(-K_l F_z) \quad (1)$$

ここで、 I_z と I_0 は樹冠内の深さ Z と樹冠最上層における光強度 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 K_l は吸光係数、 F_z は深さ Z までの積算葉面積指数 (m^2m^{-2}) である。

光強度 (I_0) の日変化は、サイン2乗カーブで表される。

$$I_0 = I_{\max} \sin^2 \{ \pi(t-6)/12 \} \quad (6 \leq t < 18) \quad (2)$$

ただし、

$$I_0 = 0 \quad (0 \leq t < 6, 18 \leq t < 24)$$

ここで、 I_{\max} は南中時の光強度、 t は深夜0時から時間 (h) である。

樹冠内における葉の窒素含量の分布は、積算葉面積指数を変数とした次式で表した。

$$N_z = N_0 \exp(-K_n F_z) \quad (3)$$

ここで、 N_z と N_0 は樹冠内の深さ Z と樹冠頂端葉における面積あたりの窒素含量 (gN m^{-2})、 K_n は窒素の減衰比である。

受付日 2010年1月14日

受理日 2010年2月3日

Table 1 Summary of linear regressions relating to model parameters of photosynthesis at leaf scale.

Dependent variable	Independent variable	y-intercept	Slope	r	p <
P_{\max} ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	N_z (gN m^{-2})	2.573	3.321	0.795	0.001
	RLI (%)	9.557	0.0652	0.650	0.001
R ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	N_z (gN m^{-2})	-0.416	0.451	0.752	0.001
	RLI (%)	1.188	0.0151	0.523	0.001
α ($\mu\text{molCO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$)	N_z (gN m^{-2})	0.0347	-0.000121	0.010	ns
	RLI (%)	0.0384	-0.0000885	0.313	0.05
θ (Dimension less)	N_z (gN m^{-2})	0.938	-0.110	0.338	0.05
	RLI (%)	0.783	-0.00383	0.488	0.001

P_{\max} and R represent gross photosynthetic rate under the saturating light density and dark respiration rate. α and θ represent initial slope and convexity of light response curve of leaf photosynthesis. N_z and RLI represent leaf nitrogen content and relative light intensity.

純光合成速度は光—光合成曲線を非直角双曲線で近似した、次式から求められる⁴⁾。

$$P_n = [aI_z + P_{\max} - \{(aI_z + P_{\max})^2 - 4\alpha\theta I_z P_{\max}\}^{1/2}]^{-2\theta} - R \quad (4)$$

ここで、 P_n は純光合成速度 ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 I_z は光強度 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) である。 P_{\max} 、 α 、 θ は光—光合成曲線の係数で、 P_{\max} は光飽和下の最大総光合成速度 ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 α と θ は光—光合成曲線の初期勾配 ($\mu\text{molCO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$)と曲率である。 θ は0から1までの値をとり、光—光合成曲線は θ が0のとき直角双曲線、1のときブラックマン型になる。Rは暗呼吸速度 ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) である。(4)式の光—光合成曲線の3変数 (P_{\max} 、 α 、 θ)と暗呼吸速度 (R)を葉の窒素含量 (N_z)との関数式で表すことによって、窒素含量から任意の光強度のもとでの光合成速度を推定することが出来る²⁾。

樹冠の光合成量は、純光合成速度 (P_n)を時間 (t)と積算葉面積指数 (F_z)で重複積分した次式から求められる³⁾。

$$P_c = \int_0^{24} \int_0^{F_t} P_n(F_z, t) dF_z dt \quad (5)$$

ここで、 P_c は樹冠の光合成量、 F_t は樹冠全体の積算葉面積指数である。

2. モデルのパラメータ

スギ樹冠においては、(1)式の K_1 (吸光係数)は0.3から0.6の範囲にあることがこれまでに報告されている^{1,5,6,8)}。本研究では、7年生スギ林^{1,6)}で得られた0.51を用いた。(2)式の I_{\max} (南中時の光強度)は $1800 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ とした。(3)式の N_0 (樹冠頂端葉における面積あたりの窒素含量)と K_n (窒素の減衰比)は、 K_1 と同じスギ林で9月に測定された値

(N_0 : 5.94 gN m^{-2} , K_n : 0.145)を用いた。(4)式の個葉光合成のパラメータは、当年生スギ挿し木苗⁷⁾で9月に測定された値を用いた。表1に、光合成の各パラメータを葉の窒素含量 (N_z)および相対光強度 (RLI)と一次回帰した結果を示した。回帰の結果、光飽和下の最大総光合成速度 (P_{\max})と暗呼吸速度 (R)は葉の窒素含量 (N_z)から推定し、光—光合成曲線の初期勾配 (α)と曲率 (θ)は相対光強度 (RLI)から推定することにした。

結果と考察

1. スギ樹冠の光合成量

樹冠の光合成量を、積算葉面積指数が $8 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ になるまで計算した (図1)。光合成量は始め、積算

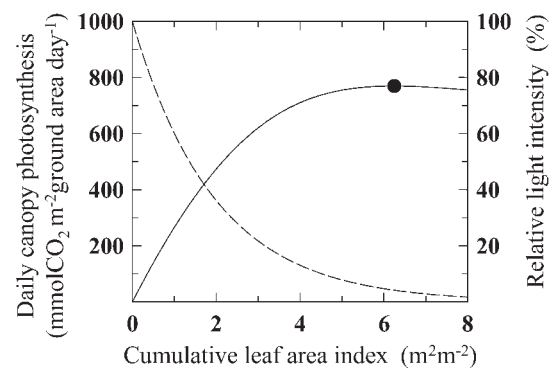


Fig.1 Relationship between cumulative leaf area index and daily canopy photosynthesis, relative light intensity.

Solid and broken lines represent daily canopy photosynthesis and relative light intensity. Daily canopy photosynthesis was calculated at I_{\max} (maximum photosynthetic photon flux density at midday) $1800 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Optimum leaf area index is shown in a black circle.

葉面積指数が増加するにしたがって直線的に増加し、その後、徐々に増加が小さくなり、積算葉面積指数が $6.24\text{m}^2\text{m}^{-2}$ の時を境として増加から減少へと転じた。この樹冠の光合成量を最大にする葉面積指数は最適葉面積指数¹¹⁾として知られており、このときの光強度は、日あたりの純光合成量と暗呼吸量が等しくなる日光補償点にあたる。本計算で示された樹冠の日最大光合成量は $769\text{mmolCO}_2\text{m}^{-2}\text{day}^{-1}$ で、この値は宮浦⁸⁾が21年生のスギ林で報告している夏季の日光合成量 $650\sim 930\text{mmolCO}_2\text{m}^{-2}\text{day}^{-1}$ の範囲内にあった。また、本計算で示された最適葉面積指数 $6.24\text{m}^2\text{m}^{-2}$ は、樹冠のパラメータに用いたスギ林において、プラント・キャノピー・アナライザー¹⁰⁾を用いて測定された積算葉面積指数 $6.36\text{m}^2\text{m}^{-2}$ と一致していた。さらに吸光係数を0.51とした本計算では、日光補償点は相対光強度で4.17%にあたり、一般に知られるスギ閉鎖林下における相対光強度(3~5%)と近い値であった。このように、最適葉面積指数や日光補償点が実際のスギ林の葉面積指数や林床の相対光強度と一致する結果は、本モデルによる計算の妥当性を裏付けるものといえる。

2. 光合成量におよぼす間伐の影響

樹冠の光合成量は積算葉面積指数が $6.24\text{m}^2\text{m}^{-2}$ のときに最大となることから、立木密度は積算葉面積指数がこの値を超えないように維持管理することが望ましい。ここで、積算葉面積指数が $6\text{m}^2\text{m}^{-2}$ のときの収量比数を1と仮定し、さらに、積算葉面積指数は収量比数と比例関係にあると仮定して、間伐による葉量の減少に伴って樹冠の光合成量がどの程度低下するか検討した。表2より、樹冠の光合成量は収量比数0.8まで間伐する密仕立てでは3%とほとんど低下せず、0.7まで間伐する中庸仕立てで6%、0.6まで間伐する疎仕立てでも12%の低下に止まることが分かる。このことから、林業経営を目的とした通常の間伐範囲では、葉量の減少に伴う樹冠の光合成量の低下は小さく、森林の二酸化炭素吸収の公益的機能はほとんど損なわれないといえる。水源涵養機能や生物多様性等の二酸化炭素吸収以外の公益的機能を高める上でも、間伐を適切な強度で積極的に行うことが望ましいといえる。

おわりに

本研究においては、樹冠内の光成分は全て散乱光であることを仮定している。また、葉面境界層抵抗におよぼす風の影響は無視できるほど小さいと仮定している。間伐を行うと林内の微気象は大きく改変

Table 2 Changes in daily canopy photosynthesis due to thinning.

R_y	F_t (m^2m^{-2})	P_c ($\text{mmolCO}_2\text{m}^{-2}\text{day}^{-1}$)	
1.0	6.0	769	—
0.9	5.4	763	(0.99)
0.8	4.8	749	(0.97)
0.7	4.2	722	(0.94)
0.6	3.6	680	(0.88)
0.5	3.0	620	(0.81)
0.4	2.4	539	(0.70)
0.3	1.8	437	(0.57)
0.2	1.2	312	(0.41)
0.1	0.6	166	(0.22)

R_y , F_t and P_c represent yield ratio, cumulative leaf area index and daily canopy photosynthesis. Number in the parenthesis indicates relative value against maximum daily canopy photosynthesis.

され、これに応答して個葉の光合成速度も変化することが予想される。例えば、間伐を行うと林内の光成分に占める直達光の割合は増加するが、散乱光は逆に減少することから、光合成有効放射の大部分を散乱光に依存する樹冠の下層や内側に位置する葉では、光合成速度は低下する可能性がある。また、林内の奥深くまで風が吹き込むことによって葉面境界層抵抗が減少し、光合成速度は増加する可能性がある。

今後、個葉光合成におよぼす光、熱、風、水等の物理環境因子の影響を詳細に調べ、間伐による林内微気象の改変が森林の二酸化炭素吸収量にどのような影響をおよぼすか検討する必要がある。

引用文献

- 1) 玉泉幸一郎・小林 元・齋藤 明 (1994) スギ樹冠内における光環境と葉面積指数の季節変動. 日林誌 76: 465-467.
- 2) HIROSE, T. and WERGER, M. J. A. (1987) Nitrogen use efficiency in instantaneous and daily photosynthesis of leaves in the canopy of a *Solidago altissima* stand. *Physiol. Plant.* 70: 215-222.
- 3) HIROSE, T. and WERGER, M. J. A. (1987) Maximizing daily canopy photosynthesis with respect to the leaf nitrogen allocation pattern in the canopy. *Oecologia* 72: 520-526.
- 4) JOHNSON, I. R. and THORNLEY, J. H. M. (1984) A model of instantaneous and daily canopy photosynthesis. *J. Theor. Biol.* 107: 531-545.
- 5) 勝野真澄・萩原秋男・穂積和夫 (1983) スギの葉面

- 積の推定. 日林論94: 339-340.
- 6) 小林 元・玉泉幸一郎・齋藤 明 (1994) スギ樹冠における葉内窒素の分布. 日林誌76: 276-278.
- 7) 小林 元・玉泉幸一郎 (2002) スギ苗木の光合成速度と窒素含量に及ぼす庇陰と施肥の影響. 日林誌84: 180-183.
- 8) 宮浦真澄・萩原秋男・穂積和夫 (1995) 門司・佐伯の群落光合成理論にもとづくスギ人工林の総生産量の推定. 名大演報14: 49-88.
- 9) MONSI, M. and SAEKI, T. (1953) Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. Jpn. J. Bot. 14: 22-52.
- 10) 岡野哲郎・汰木達郎・小林 元・福山宣高 (1994) プラント・キャノピー・アナライザーによる LAI の測定について. 日林九支研論集47: 69-70.
- 11) SAEKI, T. (1960) Interrelationships between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community. Bot. Mag. 73: 55-63.

Effect of thinning on carbon dioxide absorption in a *Cryptomeria japonica* canopy. Valuation using canopy photosynthesis model

Hajime KOBAYASHI

Education and Research Center of Alpine Field Science, Faculty of Agriculture, Shinshu University

Summary

Canopy dioxide absorption was calculated using a canopy photosynthesis model in a *Cryptomeria japonica* canopy. Canopy photosynthesis increased with increasing cumulative leaf area index with diminishing returns. Canopy photosynthesis began to decrease after reaching a maximum at a cumulative leaf area index of 6.24 m²m⁻². Relative light intensity at the bottom of the canopy was 4.17 percent when canopy photosynthesis reached its maximum. This was comparable to values often observed for closed *Cryptomeria japonica* canopies. There was little decrease in carbon dioxide absorption with decreasing canopy foliage due to thinning. Canopy photosynthesis decreased only 3 to 7 percent, when canopy foliage decreased 20 to 30 percent by thinning. Canopy photosynthesis decreased 12 percent, when canopy foliage fell to nearly half of the original value. I concluded that thinning for commercial harvest does not spoil the public benefit of carbon dioxide absorption in *Cryptomeria japonica* plantations.

Key word : canopy photosynthesis model, commercial harvest, optimal leaf area index, public benefit, yield ratio