

森林の炭素固定量と その算定法による差異について

吉野 純¹・山岡 迪友²・竹市 宗平³・安田 孝志⁴

¹正会員 岐阜大学助教 大学院工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail:jyoshino@gifu-u.ac.jp

²(株)東海旅客鉄道 (〒450-6101 愛知県名古屋市中村区名駅一丁目1番4号JRセントラルタワーズ)
E-mail:oo87don@yahoo.co.jp

³岐阜大学 大学院工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail:o3130015@edu.gifu-u.ac.jp

⁴フェロー 岐阜大学教授 大学院工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail:coyasuda@gifu-u.ac.jp

森林の大気中のCO₂吸収・固定機能を高めるには、森林経営の最小単位である1haを単位として森林の炭素固定量を正しく評価できる手法の確立が必要となる。本研究では、メソスケール大気・陸面結合モデルに基づく方法と林野庁を中心に用いられている森林簿・蓄積変化法によって森林の炭素固定量を算定し、その比較をMODISによる計測結果と併せて行った。その結果、これらによる固定量に大きな差異があり、森林の炭素固定量の評価法の確立にはなお課題があることが明らかとなった。

Key Word : carbon budget, forest ecosystems, net ecosystem production, coupled mesoscale atmosphere-land surface model, forest list, accumulation change method

1. はじめに

我々人類が21世紀に実現すべき社会、それは「自然と共生した持続可能な社会」であろう。このような社会の実現のカギを握るものの1つが、森林の「緑の社会資本」としての活用と言って良い。

森林は「緑のダム」¹⁾と俗称されるように、流出の平準化と蒸散作用によって水源涵養や洪水防止機能など様々な機能を持つが、とりわけ注目されている機能が大気中に放出されてしまったCO₂の吸収・固定機能である。我が国は、京都議定書の目標達成のために森林によって2008～2012年の5年間にCO₂を4.78×10⁷t吸収する計画を策定した。

この計画を実際に実施し、目標を達成するには、森林の所有者や管理者が伐採や間伐によって様々な機能を損ねることなく森林の成長を促す必要がある。そのためには、森林経営単位の最小単位(林家単位)である1haを単位として森林の炭素固定量の評価を行い、成長促進策によって炭素固定量を増やす必要がある森林と、放置したままでも炭素固定量が増える森林を識別できることがまず求められる。

ここでは、ha単位で森林の炭素固定機能評価を行うメソスケール大気・陸面結合モデル、通称SATECO (SATelite ECosystem)モデル²⁾に基づく方法とCOP7 (7th Conference of the Parties)で合意された森林による4.79×10⁷tのCO₂吸収量算定に用いられた森林簿・蓄積変化法によって大八賀川流域森林の炭素固定量の算定を行い、両者の特性を明らかにするとともに、その結果を地球観測衛星に搭載されているMODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)による計測結果とも比較し、これらの評価法の問題点を明らかにしたい。

2. 森林簿・蓄積変化法による炭素固定量の算定

森林簿は、「森林・林業基本法」に基づく森林計画策定の基礎資料として扱われ、日本全国の森林に対して、市町村、流域、森林の種類(保安林、公園、普通林、制限林)、林種、樹種、施業方法、層区分、土地利用など172項目(岐阜県の場合)を最小森林区域である小班ごと(最小面積単位100m²(1アール))で整理されている。

このような森林簿情報を基に、我が国では森林による

炭素吸収量の算定が次式のように行われている。

$$\text{炭素固定量 (kg)} = \text{年間成長量 (m}^3\text{)} \times \text{容積密度} \times \text{拡大係数} \times \text{炭素含有率} \quad (1)$$

ここで、年間成長量は次式によって求められている。

$$\text{年間成長量 (m}^3\text{)} = \text{小班の材積 (m}^3\text{/ha)} \times \text{成長率 (\%)} / 100 \\ \times \text{小班面積 (ha)} \times \text{上層or下層疎密度} \quad (2)$$

容積密度Dは樹種によって異なり、スギで0.314、ヒノキで0.417、ナラで0.619となっており、広葉樹種ほど大きくなっている。この結果、若木の段階での広葉樹の成長率は針葉樹よりも低い、炭素固定量に関しては容積密度が成長率の低さを補うことになっている。また拡大係数とは、葉、枝、幹、根等の樹木全体を補間する係数であり、次式で与えられる。

$$\text{拡大係数} = \text{BEF} \times (1 + R) \quad (3)$$

ここで、BEFは幹に枝葉を加えて地上部バイオマスを求める係数であり、Rは地下部・地上部比で地上部の幹・

表-1 バイオマス算定における係数(京都議定書
3条3および4 LULUCF活動の補足情報に関する
報告書, 日本国, 2008.5)³⁾

		BEF		R	D	炭素含有率
		≤20	>20			
針葉樹	スギ	1.57	1.23	0.25	0.314	0.50
	ヒノキ	1.55	1.24	0.26	0.407	
	サウラ	1.55	1.24	0.26	0.287	
	アカマツ	1.63	1.23	0.27	0.416	
	クロマツ	1.39	1.36	0.34	0.464	
	ヒバ	2.43	1.38	0.18	0.429	
	カラマツ	1.59	1.15	0.29	0.404	
	モミ	1.40	1.40	0.40	0.423	
	トドマツ	1.88	1.38	0.21	0.319	
	ソガ	1.40	1.40	0.40	0.464	
	エゾマツ	1.92	1.46	0.22	0.348	
	アカエゾマツ	2.15	1.67	0.21	0.364	
	マキ	1.39	1.23	0.18	0.455	
	イチイ	1.39	1.23	0.18	0.454	
	イチョウ	1.51	1.15	0.18	0.451	
	外葉針葉樹	1.41	1.41	0.17	0.320	
広葉樹	その他針葉樹	2.55	1.32	0.34	0.352	
	ナ	1.39	1.36	0.34	0.464	0.50
	ナ	1.40	1.40	0.40	0.423	
	ブナ	1.58	1.32	0.25	0.573	
	カシ	1.52	1.33	0.25	0.629	
	クリ	1.50	1.17	0.25	0.426	
	クヌギ	1.36	1.33	0.25	0.668	
	ナラ	1.40	1.26	0.25	0.619	
	ドロノキ	1.33	1.17	0.25	0.291	
	ハンノキ	1.33	1.19	0.25	0.382	
	ミレ	1.33	1.17	0.25	0.494	
	ケヤキ	1.58	1.28	0.25	0.611	
	カツラ	1.33	1.17	0.25	0.446	
	ホオノキ	1.33	1.17	0.25	0.386	
	カエデ	1.33	1.17	0.25	0.519	
	キハダ	1.33	1.17	0.25	0.344	
	シナノキ	1.33	1.17	0.25	0.369	
	センノキ	1.33	1.17	0.25	0.398	
	キリ	1.33	1.17	0.25	0.234	
	外葉広葉樹	1.41	1.41	0.25	0.660	
	カシバ	1.31	1.20	0.25	0.619	
	その他広葉樹	1.37	1.37	0.25	0.473	
	ナ	1.52	1.33	0.25	0.629	
	ナ	1.40	1.26	0.25	0.619	

葉・根量に対する地下部の根量の割合である。炭素含有率は、樹木の重さのうち炭素が占める重さの割合を示し、1996年改訂IPCCガイドラインに示されたデフォルト値0.5を用いている。表-1は樹木の種類に応じたこれらの係数の値を整理したものである。

3. SATECOモデルと森林簿・蓄積変化法による森林像の比較

SATECOモデルと森林簿・炭素蓄積法による炭素固定量の比較を行う場合、これらに入力される森林情報についてまず検討を行う必要がある。前者は、2m解像度のリモートセンシングデータに基づいて作成された15区分の土地被覆分類図を100m解像度で9区分の土地被覆分類図に変換したものである。このため、元になっている2m解像度の土地被覆分類図が精度的にほぼ完全であれば100m解像度土地被覆分類図の誤差は、2m単位の15区分を100m単位の7区分に変換する時に切り捨てられた情報に起因することになる。この誤差が各格子に50%を超えることはなく、特にここで対象とする森林については、haが林家経営単位であることもあり、100m以下のスケールで細かい土地被覆変化は少ないと考えている。

これに対して、森林簿における森林情報に対してもリモートセンシング利用されているが、小班点毎の情報として整理されており、それを100m格子点情報に変換する場合に同様な誤差が生じている。また、SATECOモデルの土地被覆分類図が大八賀川流域のみを対象とした地上での航空機測量データを基本として得られたものであるのに対し、森林簿情報は岐阜県全域を対象とした測量データに基づいているため、大八賀川流域に限っては前者に比べて精度的に低いと考えられる。

このため、図-1および図-2に示すように、共に100m解像度で9区分(表-2)の土地被覆分類図であるが、区分2～4の森林区域だけで見ても、必ずしも一致していない。入力値の差異は、当然ながら出力値の差異に繋がるため、この差異を数値的に検討する必要がある。その結果が表-3であり、図-3は、表-3の格子数算定の基礎となるSATECOモデルにおける森林格子点での樹種と森林簿における森林格子点での樹種の平面分布をそれぞれ示したものである。

この表は、図-1および図-2に示される各格子の土地被覆分類から広葉樹林及び針葉樹林と判定された格子数をカウントしたものである。ここで、一致数とは、図-1の森林簿分類と図-2のSATECO分類において各格子点での樹種が一致した格子数(樹種と位置の両方が一致した格子数)を示す。SATECOモデルでは、広葉樹の格子数が3,591

に対し、森林簿では、2,757であり、流域内での広葉樹林の格子数は最小でも2,757と見ることができる。しかし、共に広葉樹と分類される格子はそのうちの1,896に留まり、834格子は樹種が一致しておらず、森林簿では広葉樹以外と扱われている。一方、針葉樹林について見ると、SATECOモデルでは、針葉樹林と区分されている格子数は1,852に留まり、森林簿の格子数の方がその1.36倍の2,520となっている。共に針葉樹林と区分される格子点の数は、1,026個に過ぎない。

広葉樹と針葉樹では、成長率や炭素固定量に大きな差異があることを考えれば、この差異は流域全体の炭素固定量を評価する上で影響が大きいと考える必要がある。特に、同一格子点で樹種が異なる結果は重大であり、炭素固定量の算定法云々以前の問題として検討が必要である。

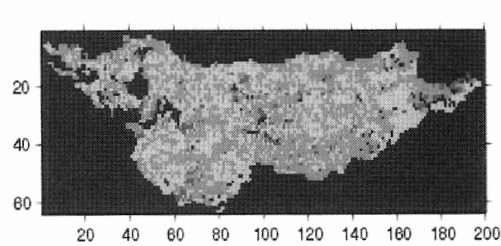


図-1 森林簿による土地利用分類図(100m格子,9区分)

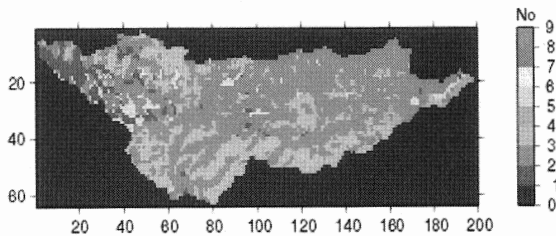


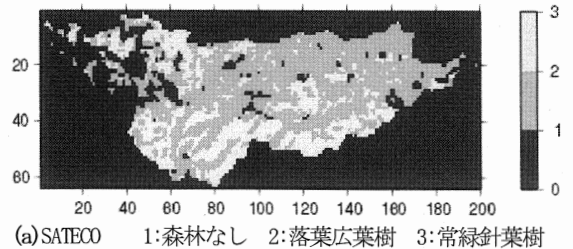
図-2 SATECOモデルで使用している土地利用分類図
(100m格子,9区分)

表-2 土地被覆分類

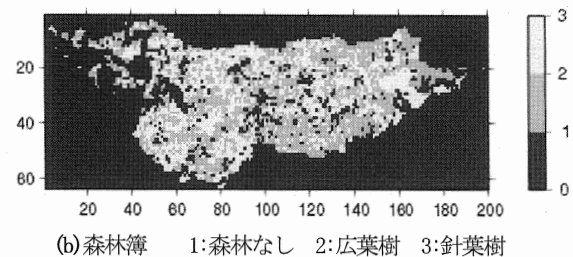
1	無
2	裸地・未木立地
3	落葉広葉樹
4	常緑針葉樹
5	落葉針葉樹
6	牧草地
7	落葉性低木
8	農耕地
9	混在林

表-3 SATECOモデルと森林簿の樹種別格子数比較

	広葉樹の格子数	針葉樹の格子数
SATECO モデル	3591	1852
森林簿	2757	2520
一致数	1896	1026



(a) SATECO 1:森林なし 2:落葉広葉樹 3:常緑針葉樹



(b) 森林簿 1:森林なし 2:広葉樹 3:針葉樹

図-3 SATECOモデルと森林簿における
森林格子点での樹種の比較

4. SATECOモデルと森林簿・蓄積変化法による炭素固定量算定法の比較

森林簿・蓄積変化法は、森林計画図および森林簿を森林の基礎情報とし、そこに含まれる情報を基に年間の成長量を求め、炭素固定量を算出するものである。これは、森林の木材資源量を表す材積情報に基づいており、森林簿情報がそのまま使える点で効率的であるが、多様な樹種や材齢で構成される森林全体の年間の成長量の算定精度や成長量と炭素固定量の関係など不明な点が多い。もちろん、小班点毎の森林情報が正しければ、少なくとも成長量算定精度の問題は生じないが、森林の管理が行き届かず、山林の荒廃が進みつつある現状からすれば、森林簿情報の信頼度についての検討が必要である。

これに対し、成長量と炭素固定量の問題は、光合成によって吸収されたCO₂から呼吸によって放出されるCO₂を差し引いた分が樹木の成長量（材積の増加分）として蓄積されるとの仮定の適否に関わっている。この関係を定式化すると、成長量ΔBは光合成量GPP (Gross Primary

Production)より樹木の総呼吸量RE (Ecosystem Respiration)=Ra (Aboveground Autotrophic Respiration)+SR (Soil Respiration)を差し引いたものとなる。

$$\Delta B = GPP - RE = NEP \text{ (Net Ecosystem Production)} \quad (4)$$

ここで、問題となるのは、一般にSRの半分を占めると仮定される土壤中の微生物・小動物の呼吸量HR (Heterotrophic Respiration)の源資を樹木からの落葉・落枝量Lとしている点である。樹木からの落葉・落枝も広義の呼吸量(炭素の放出)と考え、定常状態では、HR~Lの関係が成立するとすれば、

$$\Delta B = GPP - RE = NEP = GPP - (Ra + RR) - L \quad (5)$$

となり、正味生態系生産量を表すNEPと樹木の成長量 ΔB は一致することになる。ここに、RRは根の呼吸量(Root Respiration)である。 ΔB は落葉・落枝量Lを除いた樹木の成長量となり、材齢の増加量と見なすことができる。これが可能なのは、HR~Lが成立する定常場であるが、実際には年毎に気象条件が変動し、それに応じてLも変動する上、落葉・落枝が分解されて CO_2 として大気中に放出される分と地下水に溶解して放出する分の割合や分解までの時間差などが不確定なため、これらについての検討が必要となる。

このように、 ΔB とNEPの関係に対しては、なお検討すべき課題はあるが、Ohtsukaら⁹⁾による大八賀川流域の広葉樹林約1,100本/haに対する8年間(1999-2006)に及ぶNEPと ΔB の計測は、両者の間に $\Delta B/NEP=0.55\sim1.05$ の関係があることを示している。

5. 炭素固定量算定結果の比較

図-4および図-5は、2006年1年間における大八賀川流域森林の森林簿・蓄積変化法による炭素固定量分布図とSATECOモデルによる年平均炭素吸収量NEP(ここでは、炭素吸収量と同義)の平面分布を同一スケールで表示したものである。これを見てわかるように、SATECOモデルで算定される炭素吸収量NEPと炭素固定量 ΔB の差異が分布だけでなく絶対値を含めて大きい、そこで、このような絶対値およびその正負の差異を明らかにするため、各格子点でのSATECOモデルによるNEPの値と森林簿・炭素蓄積法による ΔB の値を全格子点について比較した。図-6はその結果であり、両者が全く無相関であるだけでなく、樹種によってNEPの値が明確に正負に分かれているのに対し、 ΔB には樹種による差異は見られない。NEPの

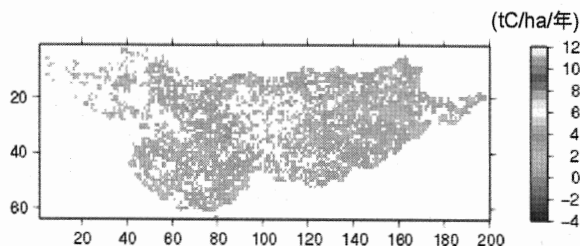


図-4 森林簿・蓄積変化法による年間の炭素固定量 ΔB の分布図

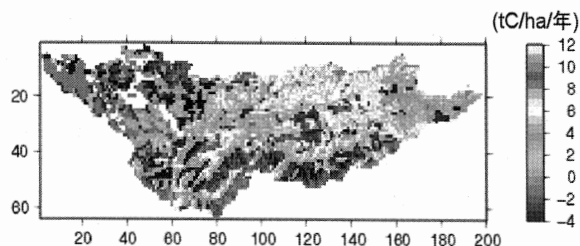


図-5 SATECOモデルで算定されたNEPの年平均分布図

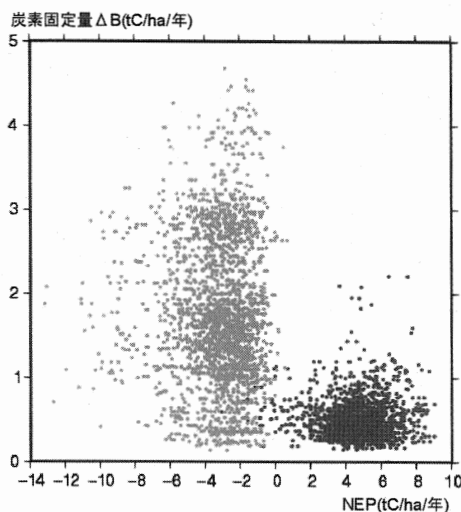


図-6 森林簿・蓄積変化法による炭素固定量 ΔB とSATECOモデルによる森林の炭素固定量NEPとの関係(青:落葉広葉樹 緑:常緑針葉樹)

値が2006年1年間のLAI (Leaf Area Index)や気象値に基づく単年度の値であるため、年変動の影響を大きく受けて負になることがあり得るのに対し、 ΔB の値は年度に依らない全国一律の統計値であるため、常に正となる。このように、経年変化の影響をそのまま反映するNEPと平均化したNEPと ΔB の間では、正負を含めて絶対値に差

異が生じるのは避けられない。絶対値が一致しないだけでなく、樹種による差異を含めて大きく異なる結果となっている。

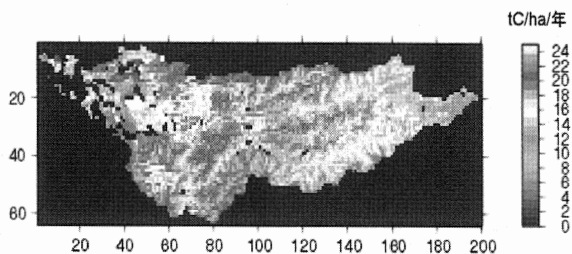
しかし、こうした経年変化の影響以外の差異の原因としてSATECOモデルには、LAIの精度の問題や λ とHRの一致度の問題、森林の成長率が考慮されていない問題などに加え、実測値と比較して過大評価傾向の問題がある。もちろん、TKYおよびTKCの2測点でのフラックス観測の実測値との比較によって精度検証⁹⁾を行っており、SATECOモデルによるNEPの値は一定の精度を有していることは確かである。これに対し、 ΔB 算定の基になるha単位での成長量自体の精度検証は全く行われていない上に、容積密度や拡大係数などは全国一律の値が用いられており、精度的な問題に対する検討の余地は大きいと考えられる。

6. MODISとの比較

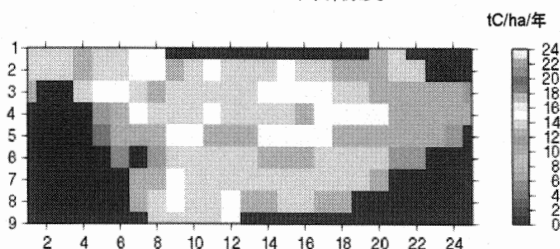
ここでは、SATECOモデルで得られた結果と衛星搭載の中分解能撮像分光放射計MODISを使った観測データとの比較を行う。MODISとは、NASAの地球観測衛星Terra/Aquaに搭載されているNASA/GSFCにより開発された光学センサーの名称であり、波長0.4~14 μ mの範囲で、36スペクトルのバンドを観測し、雲や土地被覆、植生等の観測を行っている。MODISは、それぞれ観測の種類によって計算モデルとアルゴリズムが異なるため、それぞれの観測種類によってMODXXと区別されている。これらは、全世界で利用されており、本研究では、MOD17と呼ばれる植生生産GPPの8日間積算値データ(年)の観測値を使用し、SATECOモデルとの比較を行った。

このMOD17は、SATECOモデルとは異なって、空間解像度が1kmメッシュであるため、100mメッシュのSATECOモデルの結果とは直接比較はできないが、図-7に両モデルによるGPPの年平均値の分布を並列表示する。これから分かるように、MOD17はSATECOモデルによるよりも全体に光合成量を過小評価していることが分かる。また、SATECOモデルでは、場所によってGPPに差異が生じているのに対し、MOD17では空間的にGPPの差異は見られず、SATECOモデルの方が地域特性を捉えていると言える。

図-8にGPPの流域全域月平均を示している。ここで、SATECO1kmはSATECO100mの結果をMOD17で与えられている基準点から1km周囲内に存在する点の平均を取って1km解像度に補間したものである。これを見ると夏期で差が顕著になっているが、季節変化を見ると共に同じような傾向となっている。SATECOとMOD17によるGPPの差異は夏期におけるものであり、MOD17による夏期のGPP評価には注意が必要と言える。



(a) SATECOモデル 空間解像度100m



(b) MOD17 空間解像度1km

図-7 大八賀川におけるSATECOモデルとMODIS(MOD17)によるGPPの分布図

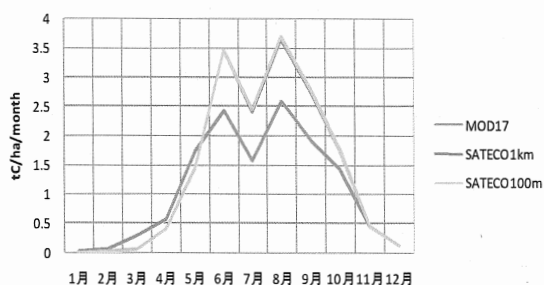


図-8 SATECOモデル100mおよび1kmメッシュとMOD17の流域全域で平均したGPPの月平均値の時系列比較

7. 森林像の差異が及ぼす影響

ここでは、SATECOモデルと森林簿における森林像(林種や森林面積など)の差異がNEPやGPPなどにいかなる影響を及ぼすかについて検討する。

図-9, 10および11は、SATECOモデルの入力値として用いているリモートセンシング土地被覆区分データと森林簿の森林情報との差異の影響がSATECOモデルを通してGPPやNEPにどのように現れるかを示したものである。

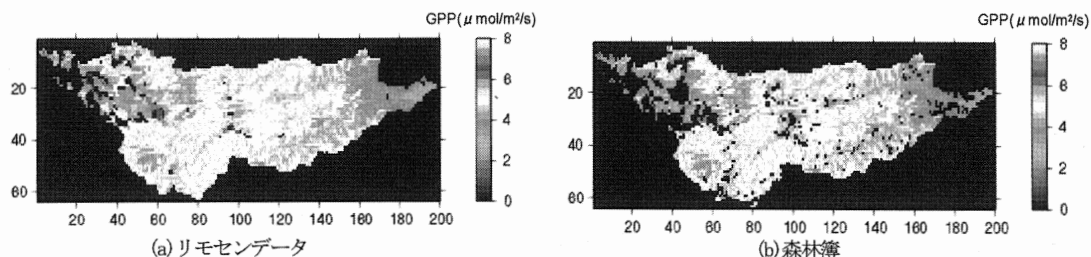


図-9 年平均光合成量GPPの分布

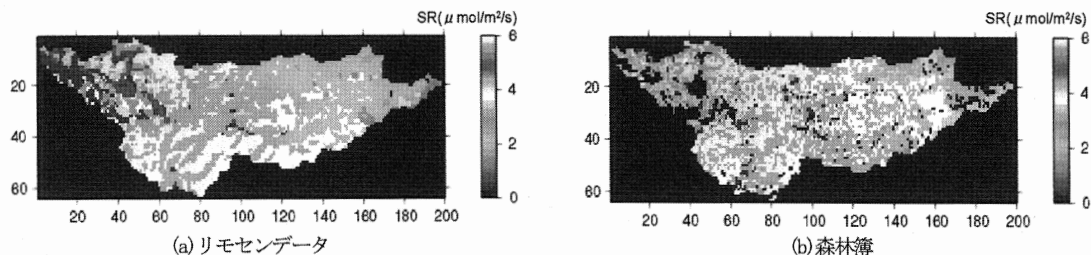


図-10 年平均地下部呼吸量SRの分布

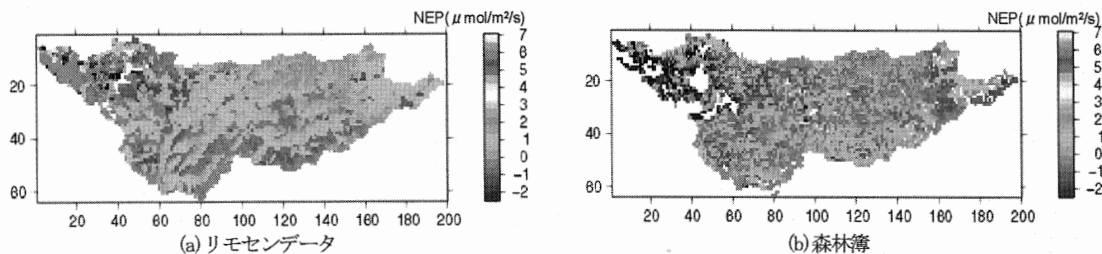


図-11 年平均炭素固定量NEPの分布

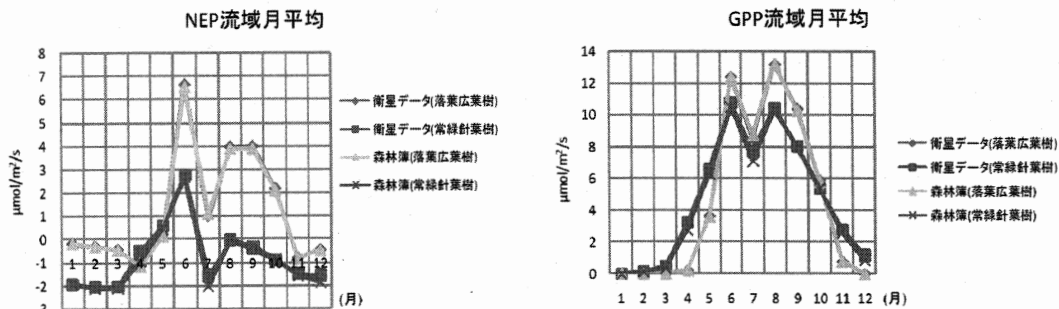


図-12 衛星データと森林簿の各パラメータ別の流域全域で平均した月平均値の時系列変化

GPPの値は、森林簿で空白域としている非森林計画区域や未木立地を除けば、両者はほぼ一致している。

これに対し、図-10の地下部呼吸量SRの差異は大きく、比較してもこの差異が炭素固定量に相当する図-11のNEPの差異に繋がっている。

以上より、GPPに関する限り、森林簿による森林情報の差異に比べ差異は小さく、SATECOモデルの下ではLAI

と気象条件が支配的であると言える。一方、地下部呼吸量SRは気象条件の影響が地温などに限られ、樹種の影響が大きいため、衛星データと森林簿の森林情報の差異がそのまま現れたと考えられる。その結果がNEPに現れており、光合成量GPPに関してはLAIと気象条件が支配因子であり、その評価に対しては、これらの正確な情報が基本となるが、NEPに関しては、それらの情報は樹種な

どの森林情報が基本となると言える。

このように、GPPに比べてNEPの空間分布の差異は大きい、流域全体の平均値で見るとその差異は無視できるレベルとなる。そのことを示したものが図-12であり、広葉樹および針葉樹について、光合成量GPPおよび炭素固定量NEPの流域平均月変化を比較したものである。平面分布では差異が目立ったNEPについても、流域平均で見ると森林像による差異はほとんど無視できることがわかる。

8. おわりに

ここでは、SATECOモデルと森林簿・蓄積変化法によって求めた大八賀川流域森林のha当たり炭素固定量等について比較を行った。その結果、明らかとなった主要な点を以下に列記する。

- ・森林簿による森林情報とSATECOモデルで用いられている森林情報は一致せず、樹種が一致する格子数は大八賀川流域の森林計画区域に対する全格子数5,529の18.6%に過ぎない。
- ・SATECOモデルによる炭素固定量NEPと森林簿・蓄積変化法による炭素固定量 ΔB が一致するには、落葉・落枝によって体外に放出された炭素成分が全て大気中に帰還すると仮定する必要があるが、NEP< ΔB の結果は分解されずに蓄積される炭素量や分解時に地下水に溶出する炭素量が無視できないことを示すものと言える。
- ・蓄積変化法によるha当たり炭素固定量の流域平均値は0.89tC/ha/年であるのに対し、SATECOモデルによるha当たり炭素固定量NEPの流域平均値は、針葉樹林のマイナス固定量-2.99tC/ha/年を差し引いても2.04tC/ha/年となり、蓄積変化法による値を大きく上回る。
- ・蓄積変化法では、樹種を問わず年間の炭素固定量はプラスとなっているが、SATECOモデルの炭素固定量

は、広葉樹林でプラスとなっているものの、針葉樹林では冬期に呼吸量が光合成を上回り、年間を通して見ればマイナスとなる。

- ・蓄積変化法では、材積成長量がそのまま炭素固定量となるため、成長量が大きい針葉樹林の炭素固定量は広葉樹林のそれの4倍近く大きく評価される。これに対し、SATECOモデルでは針葉樹林の総呼吸量が過大に評価され、そのために炭素固定量がマイナスとなる。このような針葉樹林の炭素固定量の算定法の違いについての検討が必要である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、岐阜大学流域圏科学研究センターの村岡裕由氏、永井信氏、石原光則氏、斎藤琢氏、児島利治氏、玉川一郎氏には貴重なご意見をいただきました。また、本研究は岐阜大学21世紀COE衛星生態学創生拠点、及び、国土交通省建設技術研究開発助成の研究成果の一部であることをここに付記する。

参考文献

- 1) 蔵治光一郎・保屋野初子編：緑のダム，築地書館，2004。
- 2) 吉野純ほか：流域圏を支える森林環境保全のための森林健康診断手法，第36回環境システム研究論文発表会講演集，2008。
- 3) 国立環境研究所：LULUCF活動の補足情報に関する報告書，2008。
- 4) Ohtuka, T., N.Saigusa and H.Koigumi: On linking multiyear biometric measurements of tree growth with eddy covariance-based net ecosystem production, *Global Change Biology*, 2009。
- 5) 吉野純・山岡迪友・竹市宗平・安田孝志：SATECOモデルと森林簿情報による大八賀川流域の炭素固定量評価と比較，21世紀COEプログラム「衛星生態学創生拠点」平成20年度報告書，2009。

DISPARITY DUE TO THE METHODS CALCULATING AND MEASURING CARBON BUDGET IN THE FOREST

Jun YOSHINO, Michito YAMAOKA, Sohei TAKEICHI, and Takashi YASUDA

It is required to establish the calculation method that enables us to evaluate correctly carbon budget in forest with one hectare as a unit, in order to improve the forest function absorbing and stocking CO₂ in the atmosphere. The carbon budget amounts in the forest are calculated by using a mesoscale coupled atmosphere-land-vegetation model (SATECO model) and a method based the forest list and accumulation change method employed by the Forestry Agency. The results are compared together with the measurement result by MODIS. As a result, it is clarified that there is a great disparity in the results and still a problem in the evaluation method of the carbon budget in the forest.