

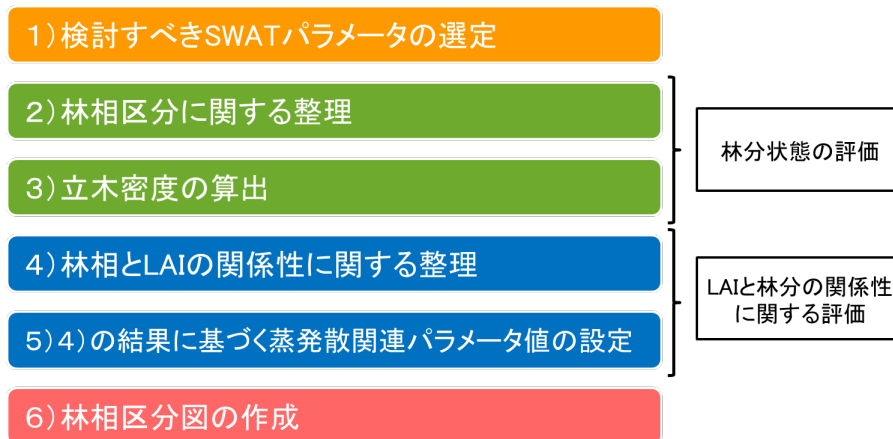


図 3-13 インプット設定およびパラメータ調整にかかる作業手順

(1) 検討すべき SWAT モデルパラメータの選定

ここでは、図 3-14 に示す蒸発散関連パラメータ（「SOL_K」など直接的に蒸発散プロセスとは関わらないパラメータも含む）について主に検討することとする。

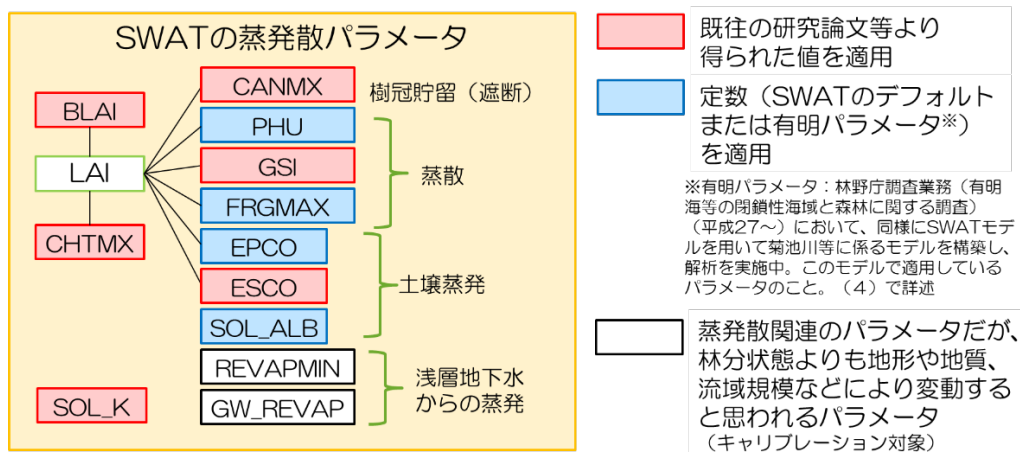


図 3-14 検討すべき SWAT パラメータ

図 3-14 中の赤枠で囲ったパラメータは、実測値またはそれに準ずる値が既往文献などより入手可能と思われるもので、基本的には文献値などから値を決定、青枠で囲ったパラメータは、情報が少ないため、SWAT モデルのデフォルト値または有明パラメータ※を適用する。

※林野庁調査業務（山地保全調査（水源森林保全調査・有明海等の閉鎖性海域と森林に関する調査））（平成 27～）で適用している各パラメータの値。以下、「有明パラメータ」とする。

(2) 林相区分に関する整理

林相は、森林の水源涵養機能に大きく影響すると考えられる樹種、林齢、林分密度の3つの要素で区分することとした。実際に森林を構成する樹種の状況を考慮し、樹種の設定は「スギ、ヒノキ、その他針葉樹、広葉樹」、林齢については細かく分類せず、大きくくりにしても機能の発揮程度を見る上で支障ないと考え、「0～10年生、10～20年生」等、2年齢毎に分類した。また、林分密度の算出には航空レーザ測量データを用いた。貝沢流域については、林野庁より貸与を受けた1m²あたり4点以上の高密度の航空レーザ測量データ（令和2年度神奈川県航空レーザ計測業務成果）を用い、推計された立木密度のうち、800本/ha以上を「密」、400本/ha以下を「疎」、それ以外を「中」とした（詳細は下記(3)に記載）。道志ダム上流域については、国土地理院より入手した航空レーザ測量データ（平成21年度国土交通省航空レーザ計測業務成果）の点密度が1m²あたり1点以上と、立木の樹頂点を抽出するにはやや低いと思われたことから、森林簿上に記載の立木密度「密」、「中」、「疎」をそのまま採用することとし、航空レーザ測量データの利用については引き続き検証を行っていくこととした。

これらの要素には、それぞれ、樹種区分コード、林齢区分コード、林分密度コードを割り当て、足し合わせた4桁の数値が林相区分コード、即ち、SWATモデルに土地利用区分を認識させるための個別IDとして用いられる（表3-10）。

この結果、針葉樹で54区分、広葉樹で2区分の全56区分の林相を作成した。

表 3-10 SWAT への林相区分インプットデータ作成に必要なコード（ユニーク ID）化

林種	樹種	林齢	林分密度	樹種区分コード	林齢区分コード	密度コード	SWAT Landuse ID
針葉樹	スギ ヒノキ その他針葉樹	<10年生	密	スギ：1100 ヒノキ：1200 その他針葉樹：1300	00	3	1103
			中		00	2	1102
			疎		00	1	1101
		10～20年生	密		10	3	1113
			中		10	2	1112
			疎		10	1	1111
		20～30年生	密		20	3	1123
			中		20	2	1122
			疎		20	1	1121
		30～40年生	密		30	3	1133
			中		30	2	1132
			疎		30	1	1131
		40～50年生	密		40	3	1143
			中		40	2	1142
			疎		40	1	1141
		>50年生	密		50	3	1153
			中		50	2	1152
			疎		50	1	1151
広葉樹		<20年生	中	2100	00	9	2109
		>20年生	中		20	9	2129

例) スギの場合

針葉樹：54区分
広葉樹：2区分
全：56区分

(3) 航空 LiDAR データ解析による立木密度の算出

解析手法の汎用性を高め、広域での社会実装を可能とするため、林分の立木密度は、航空レーザ（LiDAR）データの解析により求めることとした。使用したデータは、神奈川県が発注により、令和2年度に計測された現時点における最新のデータである。

LiDAR データは 3 次元の点群データで構成されており、航空機などから発射されたレーザが地物に反射するまでの時間に基づき、対象物の位置情報を測量することができる。反射したレーザはその性質によって分類され、対象物の表面で反射したものは数値表層モデル (DSM)、地表面に反射したものは数値地形モデル (DTM) の作成にそれぞれ用いられる (佐々木, 2012)。森林においては DSM と DTM の差分が樹冠の高さを表しており、数値樹冠高モデル (DCHM) として単木の抽出や樹高の推定に用いられている (図 3-15)。

例えば、ある林分における DTM (地表面の標高) が 1,500m、DSM (林冠表面の標高) が 1,520m であった場合、その林分の DCHM (樹冠の高さ) はそれらの差分 (1,520m - 1,500m) の 20m と算定される。

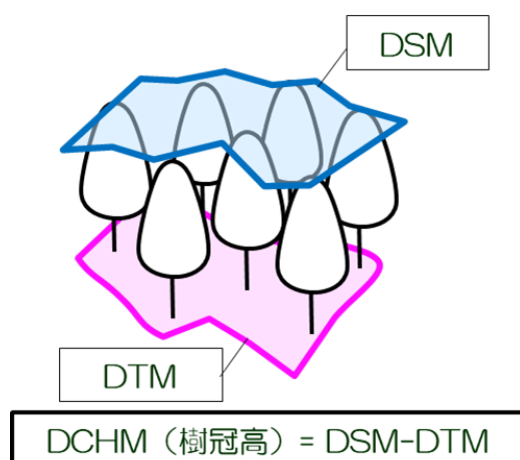


図 3-15 数値樹冠高モデル (DCHM) の算出イメージ

航空レーザより立木密度を求める手法は複数存在するが、本事業では、統計ソフト R の LiDAR データ解析用のスクリプトである「rLiDAR⁴」及びアメリカ合衆国農務省林野局 (USDA Forest Service) によって開発され、無償で配布されている森林用 LiDAR データ処理ソフトウェア「FUSION/LDV (v3.70)⁵」を用いた解析を試みた (図 3-16)。

両手法に共通する、解析作業の大きな流れは以下のとおりである。

- ① LiDAR データを用いた数値樹冠高モデル(DCHM)の作成
- ② DCHM を用いた単木抽出
- ③ 抽出された単木による樹高・立木密度の計測

⁴ R Documentation, rLiDAR version v0.1.1,
<https://www.rdocumentation.org/packages/rLiDAR/versions/0.1.1>

⁵ FUSION, the latest version, <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html>

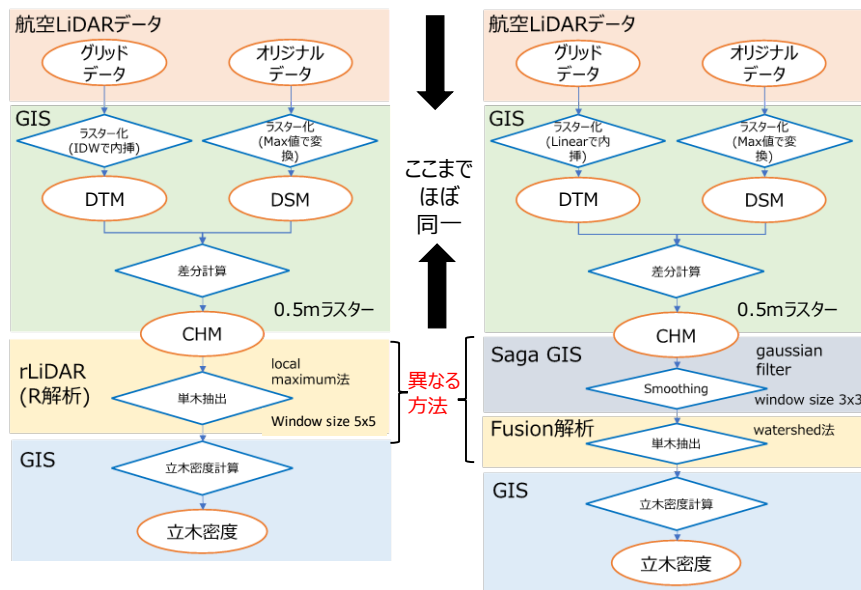


図 3-16 適用した 2 種類の航空レーザ解析手法

次に、詳細な解析手順について述べる。

- ① 3次元点群データ（テキストファイル）を las 形式のファイルに変換
- ② DTM および DSM を作成
 - ArcGIS の Las dataset to Raster 機能を使用
- ③ DSM と DTM の差分を算出
 - ArcGIS のラスタ演算機能を用いて、0.5m メッシュの DCHM ラスターを作成
- ④ DCHM のスムージング化
 - rLiDAR : Gaussian filter、Window size 5×5 でスクリプト処理。
 - FUSION : Saga GIS にて Gaussian filter 処理、Window size 3×3
- ⑤ DCHM ラスターより樹冠の抽出
 - rLiDAR : Local maximum 法
 - FUSION : Watershed 法
- ⑥ 作成した DCHM を元に単木の抽出
 - rLiDAR : スクリプトによりアウトプットされる単木情報（立木位置、樹高）を集計
 - FUSION :
 - ArcGIS の Raster to ASCII 機能を用いて DCHM ラスターを ASCII 形式のテキストファイルに変換
 - コマンドプロンプトの cd 機能で FUSION/LDV ソフトの保存先を指定し、FUSION/LDV の ASCII2DTM 機能のコマンドラインを用いて DCHM を FUSION/LDV で読み込める形式（DTM 形式）に変換

- DTM形式に変換したDCHMを入力ファイルとして、FUSION/LDVのTreeSeg機能を用いて単木を抽出。
 - FUSION/LDVのTreeSeg機能にはWatershed法と呼ばれる単木抽出アルゴリズムが搭載されており、任意の値より高い樹木を自動的に抽出することができる（今回は5mを閾値として設定）。
- ⑦ 抽出された単木ポイントデータ（shape形式）をGIS上で描画
- ⑧ 各小班内に含まれる単木ポイントデータ数から立木密度を算定
- 単木ポイントデータ数を各小班の面積（ha）で除してLiDARベースの立木密度を算定

航空LiDAR解析により推計された、貝沢試験流域の立木密度マップを示す。

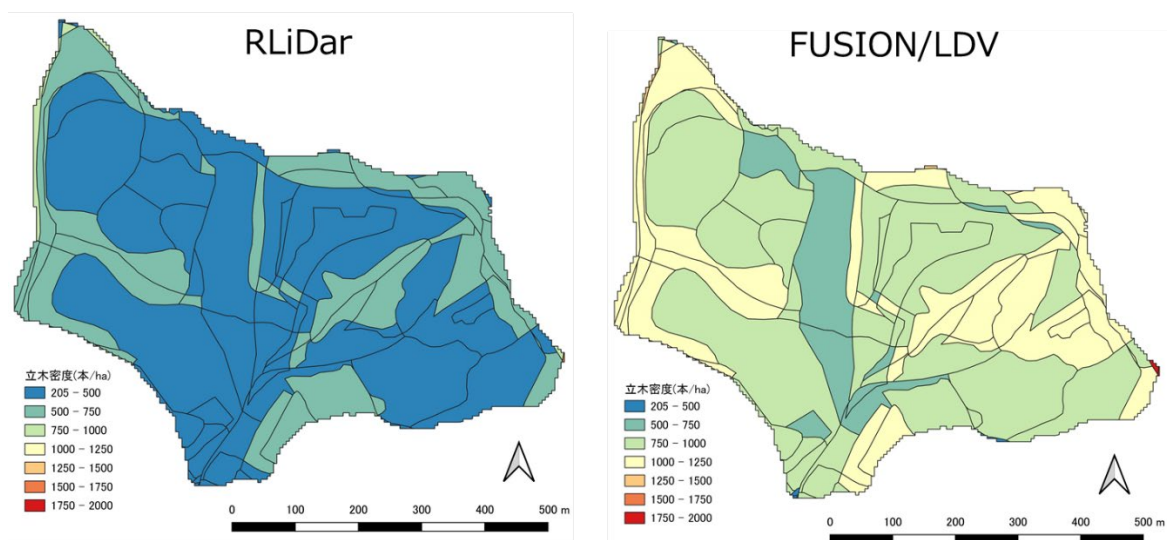


図 3-17 航空 LiDAR 解析により推計された貝沢流域における小班別の立木密度分布図
(左：RLiDAR、右：FUSION/LDV)

また、図 3-18 には、FUSION/LDV を用いて単木抽出した結果による小班別樹高分布図を示す。

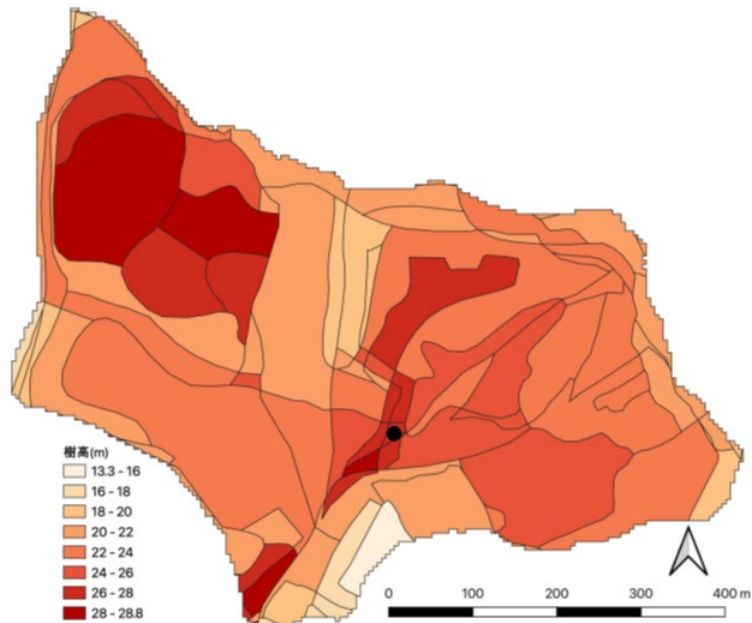


図 3-18 : FUSION/LDV を用いた航空 LiDAR 解析により推計された貝沢流域における
小班別の立木密度分布図 (黒い点は、現地観測プロット)

LiDAR データ解析による単木抽出の結果として、小班毎の立木密度と樹高に違いがみられた。

RLiDAR の小班別立木密度は、200～500 本/ha の分布が多く、全体的に過少推計の傾向であるのに対し、FUSION/LDV では、750～1,000 本/ha 程度の立木密度分布が多く、FUSION/LDV の方がより実態に近い結果が得られた。

以下に、FUSION/LDV 解析のケースにおいて、精度検証を行った結果および考察を述べる。

貝沢試験流域全体の解析した立木密度は、平均 962 本/ha (標準偏差: 246 本/ha)、樹高は平均 22.4m (標準偏差: 3.0m) であった。解析した立木密度と現地調査による立木密度はそれぞれ 1052 本/ha と 800 本/ha であり、現地調査の立木密度は、白木ら(2020)が示した流域 1 全体の立木密度の 710 本/ha に近い結果ではあったものの、LiDAR の解析結果の方が大きい数値を示した。

LiDAR による立木密度が過大評価となったことについては、2 つの理由が考えられる。まず一つは、樹冠の形状の問題である。本調査のプロットはヒノキ林であったが、一般的にヒノキの樹冠形状は円筒型で頂点が不明瞭であり、単木の抽出が難しいことが指摘されている (伊藤ら, 2009)。二つ目は単木の抽出手法による誤差である。単木抽出に利用した Watershed 法は、枝分かれなどによる小さな樹冠を一本の木として抽出し、本数を過大評価してしまう可能性がある (McGaughey, 2007)。

そのような事態を防ぐために本調査では Gaussian Filter を行ったが、平滑化が不十分で

あったことが想定される。Gaussian Filter を行う上ではパラメータとして標準偏差を指定する。この標準偏差が大きいほど平滑化の効果は大きくなる。本調査では標準偏差を 0.5 としたが、他の Watershed 法を用いた研究では、標準偏差を 1.0 や 2.0 としている事例もあり (Wang et al., 2004; Koch et al., 2006)、標準偏差の再検討の必要性が考えられる。

一方、0.5mDCHM から抽出した樹木による林分平均樹高と現地調査による平均樹高は 27.4m と 20.8m である。樹高の違いについては、本調査では、樹高の調査はレーザ測距計で行ったが、レーザが正しく樹冠梢端に当たっていなかった等の可能性が考えられる。

立木密度や樹高の推計にかかる航空 LiDAR の解析については、引き続き、精度を向上させるべく、検証を行っていききたい。

(4) 林相と LAI の関係性に関する文献の整理

発散関連パラメータの調整において重要な葉面積指数 (LAI) について、特に、樹種や林齢、密度別 LAI データの文献収集を行った。SWAT モデルの入力インプットである林相区分と同様、樹種は「スギやヒノキ、その他針葉樹、広葉樹」、林齢は「0~10 年生、10~20 年生」等、2 齢級毎に分類した。また、林分密度の分類については、文献中の収量比数 R_y を参考に、「密 ($0.8 < R_y$)、中 ($0.6 < R_y \leq 0.8$)、疎 ($R_y \leq 0.6$)」の三段階に設定した。

既往文献からスギ人工林の 11 報とヒノキ人工林の 15 報 (表 3-11、表 3-12) を収集し、Murakami et al. (2000) からスギとヒノキの 142 点 (図 3-19) を読み取った情報を樹種別、密度別で整理すると、スギの LAI は 3.6-12.3 であり、ヒノキの LAI は 4.3-8.2 である。

ヒノキ人工林 0~20 年生については、既往文献が収集できないため、Murakami et al. (2000) の推定値を用いた。スギ人工林には、20~30 年生のところでピーク (LAI : 12.3) が見られ、その後、LAI が減少する傾向となる。一方、ヒノキ人工林では、30~40 年生にピーク (LAI : 8.2) が見られ、その後に減少の傾向となる。

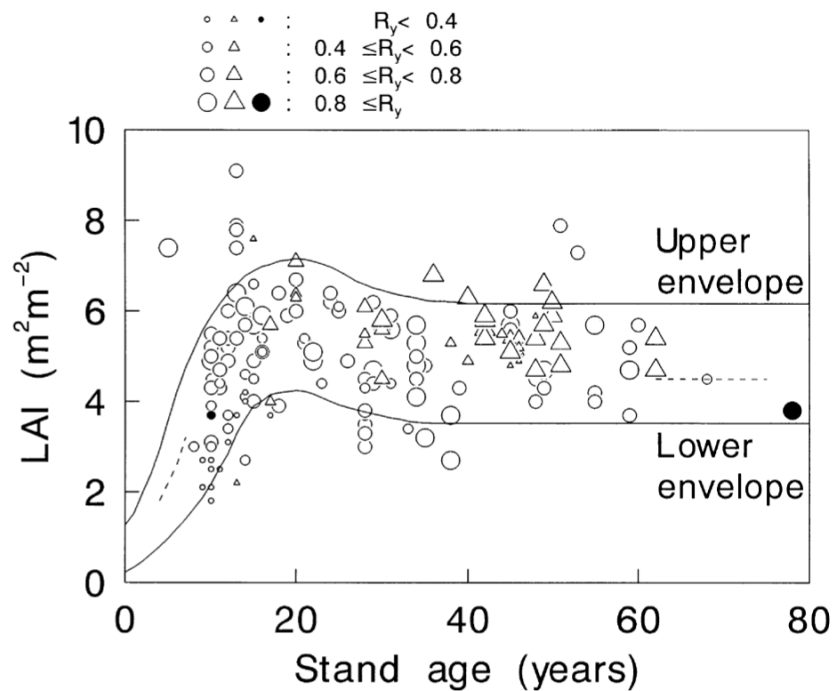


図 3-19 林齢と葉面積指数 (LAI) の関係、△：ヒノキ；○：スギ
(Murakami et al. 2000 より)

本事業で収集したスギ人工林に係る既往の知見(実測)の結果と Murakami et al. (2000) の推定値を比較した結果、表 3-11 にみられるように、20～30 年生以外はほぼ一致したが、20～30 年生は明らかに大きい数値を示した。その理由は、今回収集した文献の中に、過密スギ林の情報(宮浦ら 1995)が入っていたことが考えられる。宮浦ら(1995)は、植栽以来間伐、枝打ちなど管理作業がなされていない 21 年生のヒノキ人工林の森林状態を 6 年間連続観測した。そのため、適切管理された森林より立木密度が大きく(3,275～3,525 本/ha)、LAI の数値も明らかに大きいものであった(16.5～18.2 m²m⁻²)。一方、表 3-12 にみられるように、ヒノキ人工林では、31 年生人工林に大きい LAI 値(10.1～12.4、Miyamoto et al. 2013)が見られた。今後、より網羅的に情報収集することにより、この現象を確認することが望ましい。

このような結果から、今後収集した LAI 情報を SWAT モデルに入力する際には、森林の過密度を踏まえ、慎重に考慮することが必要だと考えられる。

表 3-11 本調査で収集したスギ人工林の LAI 情報

NO	Age	Density(本/ha)	DBH(cm)	Height(m)	Ry	LAI	Reference
1	50	904	40.3	32.0	0.94	4.1	Komatsu et al. 2010 ForEcoManage
2	42	1268	25.7	20.2	0.88	3.8	Saito et al. 2017 HP
3	39	1100	28.9	28.9	0.95	4.7	篠原ら(2014)水水学会要旨
4	25	4800	8.8	14.0	1.02	4.4	藤原ら(2005)水水学会誌
5	33	1100	18.5	10.0	0.57	4.5	藤原ら(2005)水水学会誌
6	55	700	29.2	20.0	0.73	7.6	藤原ら(2005)水水学会誌
7	7	16000	4.5	3.9	0.92	6.0	小林ら(2004)日林誌
8	23	650	18.0	13.2	0.41	2.1	村上ら(2018)水水学会誌
9	72	725	34.0	24.8	0.75	3.7	村上ら(2018)水水学会誌
10	130	800	45.0	36.6	0.95	4.4	村上ら(2018)水水学会誌
11	37	1058	23.7	20.0	0.83	5.9	高橋ら(2002)大気環境学会誌
12	86	792	37.7	25.6	0.85	2.0	小田(2015)河川整備基金助成事業報告書
13	15	2550	15.3	13.1	0.90	2.5	小田(2015)河川整備基金助成事業報告書
14	35	903	28.4	19.3	0.78	1.7	小田(2015)河川整備基金助成事業報告書
15	110	486	52.0	34.4	0.83	1.7	小田(2015)河川整備基金助成事業報告書
16	33	800	31.7	22.5	0.81	4.2	Coppin(2016)ScientificReport
17	17	2400	18.7	14.0	0.91	10.3	Coppin(2016)ScientificReport
18	84	792	36.0	25.0	0.84	2.7	Oda(2019)ForEcoManage
19	12	3000	9.3	9.8	0.84	3.0	Oda(2019)ForEcoManage
20	65	1115	28.6	23.0	0.89	3.6	Iida(2017)JH
21	21	3525	13.6	13.0	0.96	18.2	宮浦(1995)名古屋大学演習林報告
22	22	3500	13.8	13.4	0.97	18.0	宮浦(1995)名古屋大学演習林報告
23	23	3375	14.3	13.9	0.97	17.0	宮浦(1995)名古屋大学演習林報告
24	24	3350	14.5	14.2	0.97	16.5	宮浦(1995)名古屋大学演習林報告
25	25	3300	14.8	14.5	0.97	17.3	宮浦(1995)名古屋大学演習林報告
26	26	3275	15.0	15.0	0.98	17.2	宮浦(1995)名古屋大学演習林報告

表 3-12 本調査で収集したヒノキ人工林の LAI 情報

NO	Age	Density(本/ha)	DBH(cm)	Height(m)	Ry	LAI	Reference
1	31	1750	18.2	13.5	0.81	5.7	服部・近嵐(1988)日林誌
2	78	783	32.0	18.0	0.75	3.7	Murakami et al. (2000) JH
3	89	522	38.9	23.8	0.80	4.2	永野ら(2017)日林誌
4	92	356	44.9	23.3	0.68	4.0	永野ら(2017)日林誌
5	90	915	25.8	17.9	0.79	4.1	Takagi 2013 JFR
6	50	1700	21.2	15.6	0.88	2.4	Kume et al. 2016 Ecohydrology
7	50	1700	14.9	11.5	0.71	2.5	Kume et al. 2016 Ecohydrology
8	50	1450	21.0	15.6	0.84	3.2	Komatsu et al. 2010 ForEcoManage
9	42	1675	19.9	16.0	0.88	3.5	Saito et al. 2017 HP
10	19	2100	13.5	8.0	0.55	4.8	Tsuruta et al. (2015) JFR
11	99	350	44.6	25.0	0.72	3.1	Tsuruta et al. (2015) JFR
12	50	726	24.6	17.3	0.71	5.9	竹内ら(2007)日林誌
13	36	1915	18.1	14.4	0.88	8.0	竹内ら(2007)日林誌
14	10	2944	6.0	4.7	0.34	3.8	Murakami et al. (2000) JH
15	43	1853		21.1	1.01	5.0	Kosugi (2007)
16	21	2675	11.9	9.2	0.71	2.3	Wakiyama (2010)
17	36	2075	16.8	17.4	0.96	2.2	Wakiyama (2010)
18	34	2900	14.5	11.2	0.84	4.7	Miyamoto (2013) JFR
19	34	2775	15.9	13.4	0.91	7.8	Miyamoto (2013) JFR
20	34	2050	16.6	12.8	0.82	7.0	Miyamoto (2013) JFR
21	34	2200	16.7	13.6	0.87	7.7	Miyamoto (2013) JFR
22	34	1775	18.0	14.3	0.84	8.7	Miyamoto (2013) JFR
23	34	1700	20.5	14.6	0.84	12.4	Miyamoto (2013) JFR
24	31	2475	14.3	9.9	0.73	6.8	Miyamoto (2013) JFR
25	31	2400	15.8	10.6	0.76	8.3	Miyamoto (2013) JFR
26	31	2425	15.5	11.0	0.78	8.4	Miyamoto (2013) JFR
27	31	2650	13.8	10.2	0.77	7.1	Miyamoto (2013) JFR
28	31	2125	17.9	13.5	0.86	11.8	Miyamoto (2013) JFR
29	31	2475	15.9	11.9	0.83	9.9	Miyamoto (2013) JFR
30	31	2325	14.2	9.7	0.70	6.5	Miyamoto (2013) JFR
31	31	2925	12.3	9.1	0.73	5.8	Miyamoto (2013) JFR
32	31	2125	16.7	11.9	0.79	9.4	Miyamoto (2013) JFR
33	31	2050	17.7	13.2	0.84	10.9	Miyamoto (2013) JFR
34	31	2175	17.0	12.9	0.84	10.7	Miyamoto (2013) JFR
35	31	2525	15.9	11.8	0.83	10.1	Miyamoto (2013) JFR
36	22	2229	13.6	10.8	0.75	4.7	Kubota (2018) 森林総合研究所研究報告

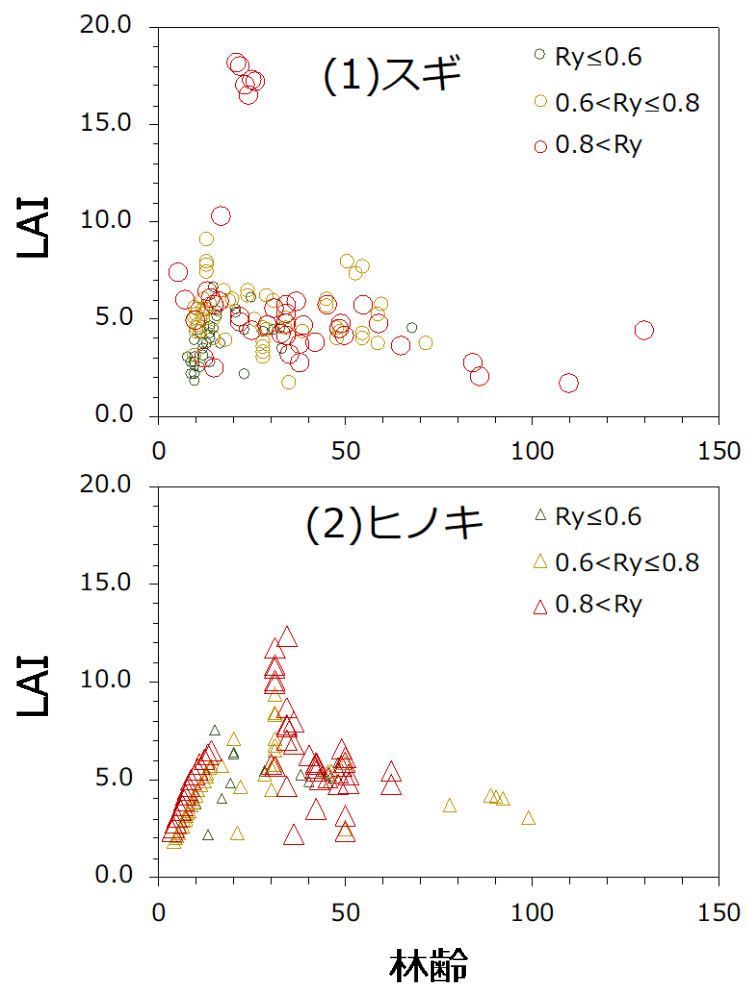


図 3-20 本調査で収集した (1) スギ、 (2) ヒノキの林齢と LAI の関係

表 3-13 樹種、林齢、立木密度別の LAI 一覧表

樹種	密度	0-20 年生	20-30 年生	30-40 年生	40 年生以上
スギ	密	5.8 ± 2.2	12.3 ± 6.5	4.5 ± 1.0	4.0 ± 1.3
	中	5.5 ± 1.4	4.6 ± 1.3	4.3 ± 1.6	5.3 ± 1.5
	疎	3.6 ± 1.2	4.6 ± 1.4	4.1 ± 0.6	4.5
ヒノキ	密	4.5	5.8	8.2 ± 2.7	5.1 ± 1.1
	中	5.0 ± 1.5	4.5 ± 1.3	7.5 ± 1.3	4.3 ± 1.1
	疎	5.0 ± 1.9	5.5	5.1	5.3 ± 0.5

(5) 林相と LAI の関係性に基づくパラメータ値の設定

前項の表 3-13 の結果に基づき、選定された各パラメータの値について検討を行った。

1) LAI の最大値 (BLAI)

LAI の最大値 (BLAI) は、前項の表 3-13 を参考に、LAI 値に近い林相をグループ分けし、最終的に表 3-14 に色分けして示しているとおり、5 グループに分類した上で、各グループの設定値を定めた。

表 3-14 LAI の最大値 (BLAI) の設定値

樹種	密度	0-20 年生	20-30 年生	30-40 年生	40 年生以上
スギ	密	6	12.3	5	5
	中	6	5	5	6
	疎	5	5	5	5
ヒノキ	密	5	6	8.2	6
	中	6	5	7.5	5
	疎	6	6	6	6

2) 最大気孔コンダクタンス (GSI)

最大気孔コンダクタンス (GSI) は、スギ・ヒノキは Osone et al. (2020)⁶、広葉樹は山崎ら (2006)⁷を参考に、それぞれスギ：0.0209 m/s、ヒノキ：0.0116 m/s、広葉樹：0.0177 m/s として設定した。

3) 最大樹冠貯留量 (CANMX)

最大樹冠貯留量 (CANMX) は、Iida et al. (2017)⁸を参考に一律 4mm とすることについて検討委員からは 20mm までの値の中でもう少し大きくても良いのではないかといった意見もあったが、まずは 4mm としたうえで、シミュレーション結果を見つつ、必要に応じて見直す方針とした。

4) 土壌からの蒸発ファクター (ESCO)

土壌からの蒸発ファクター (ESCO) は、唐沢山の林床面蒸発量/可能蒸発量 (間伐前の年平均) より 0.1 とした。今後必要に応じて見直していく必要がある。

⁶ 山崎ら (2006) 潜在的応答特性を用いた北方林での水・熱フラックスのシミュレーション (第 19 回 (2006 年度) 水文・水資源学会総会・研究発表会)

⁷ Osone et al. (2020) Plant trait database for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* (SugiHinoki DB)—their physiology, morphology, anatomy and biochemistry. *Ecological Research* 35(1):274-275

⁸ Iida et al. (2017) Intrastorm scale rainfall interception dynamics in a mature coniferous forest stand, *Journal of Hydrology*, 548: 770-783, May 2017