速　報

石灰質土壌と褐色森林土に植栽したクスノキ科4樹種の成長特性[*1]

香山雅純[*2]

香山雅純：**石灰質土壌と褐色森林土に植栽したクスノキ科４樹種の成長特性　九州森林研究　66：63 － 66，2013**　石灰石鉱山における緑化樹の適合性を検証する目的で，石灰岩地帯に分布するとされるクスノキ科樹木のクスノキ，シロダモ，タブノキ，ヤブニッケイの４種を，石灰質土壌と褐色森林土の試験地に植栽し，成長を比較した。石灰質土壌に植栽した４樹種のうち，タブノキが最も大きい乾重量を示したが，褐色森林土の個体より小さく，葉内の養分が欠乏していた。シロダモは乾重量ではタブノキより小さかったが，成長は抑制されなかった。ヤブニッケイは，ほとんど成長することができず，クスノキは全ての苗木が枯死した。以上の結果から，タブノキとシロダモが緑化樹としての適合性を有していた。

キーワード：クスノキ，石灰岩，光合成速度，養分動態

Ⅰ．はじめに

九州地方では，石灰岩が露出する地域が多く存在し，これらの地域には石灰石を採掘している鉱山も存在する（日本の地質九州地方編集委員会，1992）。石灰石の鉱山において，採掘後に形成される跡地は植生が自然回復しにくいため（漆原，1996），付近の植生に近い植物を用いた緑化が必要である（漆原，1996）。

石灰石鉱山にて植生が自然回復しにくい原因として，土壌養分の問題が挙げられる。石灰質土壌は，多量に含まれるカルシウムの影響によってpHが高く，その影響で鉄やマンガン等の微量元素の植物体への吸収が抑制される（Tyler，1996）。また，リンがカルシウムと強固に結合しており，そのままでは植物に吸収できない（Marchner，1995）。そのため，石灰岩地帯の植生は通常の地域と比較して構成種が異なる（山中，1966；宮脇，1981）。石灰岩地帯に分布する樹木としては，いくつかのクスノキ科の樹木が報告されている（山中，1966；宮脇，1981）。このことから，クスノキ科樹木は石灰岩地帯の採石跡地における緑化樹としての利用が期待される。

本研究は，クスノキ科の樹木を石灰岩地帯と非石灰岩地帯に植栽し，それらの成長特性から，石灰石鉱山における緑化樹としての適合性を検証することを目的とした。

Ⅱ．材料と方法

大分県臼杵市内の国有林（大分県森林管理署内，臼杵事業区167林班）で植栽試験を行った。この林班には石灰岩地帯と非石灰岩地帯（粘板岩）が存在しており（大分県，1980），石灰岩地帯と非石灰岩地帯の林道沿いの開放地を試験地に設定した。試験地の大きさは5 × 20 mとし，周囲をシカ柵で囲んだ。

試験地とした石灰岩地帯の石灰質土壌と，粘板岩の分布する地域の褐色森林土を，苗木を植栽する前の2009年5月に深さ0 － 5 cmよりそれぞれ4地点から採取し，化学性の測定に供した。まずpHをpHメーター（HM－25 R，東亜DKK）で測定し，105 ℃で24時間乾燥させた。そして，炭素と窒素の含有率をNCアナライザー（NC－22 F，住化分析センター）を用いて測定した。リンについてはブレイ第二法で抽出後に，モリブデンブルー法（土壌環境分析法編集委員会，1997）にて分光光度計（UV－2500 PC，島津）を用いて分析した。カルシウム，カリウム，マグネシウム，ナトリウムは１M酢酸アンモニウムを用いて抽出後にICP発光分析装置（Jarrel Ash，USA）を用いて分析した。

植栽樹種は，付近の石灰岩地帯において分布が確認されたクスノキ，シロダモ，タブノキ，ヤブニッケイの４種（山中，1966）とした。これらの苗木を，2009年２月に大分県内の種苗会社から各樹種60本ずつ購入した。購入した苗木は，直ちに大分県津久見市内で採取した石灰質土壌を詰めたポット（直径13 cm，高さ23 cm，容積2.0 L）に各樹種24本，森林総研九州支所内の苗畑の褐色森林土を詰めたポットに各樹種36本ずつ移植した。移植後は支所内の苗畑で育成し，１日に１回灌水を行った。そして，2009年６月に石灰質土壌で育成した苗木は石灰質土壌の試験地に，褐色森林土で育成した苗木は褐色森林土の試験地に，各樹種24本ずつ植栽した。なお，それぞれの試験地は３区画に分けており，１区画に８本ずつ植栽した。残った12本の苗木は，植栽せずに2009年６月に掘り取った。掘り取った苗木は葉，幹・枝，根に分け，根は脱イオン水を用いて洗浄した。その後，60 ℃で４日間乾燥させた後，各器官の重量を測定した。

植栽後は，試験地内に侵入する雑草を定期的に刈り取った。そして，2010年７月と2011年11月にそれぞれの試験地の各区画から４個体を掘り取り，植栽前と同様の手法で各器官の乾重量を測定した。また最後の掘り取りの直前である2011年10月には，光飽和時における最大光合成速度を，開放系の赤外線ガス分析計（LI－6400，Li-Cor，USA）を用いて温度は25 ℃，CO_2濃度は370 ppmに設定して測定した。

最後に掘り取った苗木に関しては，葉と根内に含まれる養分の分析を行った。苗木の葉と根を粉砕し，NCアナライザーを用い

[*1] Kayama, M. : Growth characteristics of four Lauraceae tree species planted on calcareous and brown forest soils.

[*2] 森林総合研究所九州支所　Kyushu Res. Ctr., For. & Forest Prod. Res. Inst., Kumamoto 860-0862, Japan.

て窒素含有率を測定した。また，粉砕したサンプルは硝酸－塩酸－過酸化水素法（植物栄養実験法編集委員会，1990）にて湿式灰化を行った。そして，リンはモリブデンブルー法にて分光光度計を用いて分析した。カルシウム，カリウム，マグネシウムは原子吸光光度計（Z-2310，日立）を用いて分析した。

土壌の化学分析値，苗木重量，光合成速度，各部位の元素濃度は，石灰質土壌と褐色森林土の間でｔ検定を用いて有意差検定を行った。なお，試験区内の３つの区画間では，各樹種とも有意な差はなかった（ANOVA，$P>0.05$）。

Ⅲ．結果

石灰質土壌のpHは平均8.2とアルカリ性を示した（表－1）。石灰質土壌のカルシウム濃度とリン濃度は褐色森林土より有意に高かった。一方，炭素と窒素濃度は石灰質土壌において有意に低かった。

植栽前の乾重量は，タブノキが最も大きかった（表－2）。石灰質土壌に植栽したクスノキは，2009年７月には生存していたが，同年の10月には全ての苗木が枯死した。他の３樹種については，石灰質土壌においても順調に成長した。2010年７月におけるシロダモの乾重量は，石灰質土壌の方で褐色森林土よりも有意に大きかった。タブノキとヤブニッケイの乾重量は，土壌間に有意な差はなかった。2011年11月におけるタブノキとヤブニッケイの乾重量は，石灰質土壌の方が褐色森林土よりも有意に小さかった。一方，シロダモの乾重量は両土壌間に有意な差はなかった。石灰質土壌に植栽した３樹種で比較すると，タブノキの乾重量が最も大きく，シロダモ，ヤブニッケイの順に小さくなった。ヤブニッケイは，約２年間で12ｇしか成長しなかった。

光飽和時における最大光合成速度は，タブノキでは石灰質土壌の個体で有意に低かった（表－３）。シロダモとヤブニッケイは両土壌間に有意な差はなかった。石灰質土壌に植栽した３樹種で比較すると，タブノキの最大光合成速度が最も高く，ヤブニッケイ，シロダモの順に低くなった。

シロダモの葉内元素濃度は，いずれの元素も土壌間において有意な差はなかった（表－４）。シロダモの根内の元素濃度は，リンとカルシウムは石灰質土壌において有意に高かった。一方，カリウムは石灰質土壌において有意に低かった。なお，石灰質土壌におけるシロダモの根内リン濃度は平均783 μmol g^{-1}，最大1193 μmol g^{-1} と高い濃度を示した。

タブノキの葉内元素濃度は，窒素，リン，カリウムにおいて石灰質土壌の方が有意に低かった。カリウムについては，根内の濃度も石灰質土壌の方が有意に低かった。カルシウムとマグネシウムは葉内，根内とも石灰質土壌の方が有意に高かった。

表－１．土壌の分析結果

	石灰	褐色	有意差
pH	8.19±0.26	5.89±0.38	***
C	295± 105	821± 219	**
N	16.2± 5.5	48.0± 8.8	***
P	8.82±0.74	4.41±1.43	**
Ca	179± 7	15± 3	***
Mg	2.06±0.71	1.99±0.31	n.s.
K	4.85±0.79	3.95±0.64	n.s.
Na	1.98±0.39	2.37±0.86	n.s.

pH以外の単位は mmol kg^{-1}，サンプル数は4である。石灰は石灰質土壌，褐色は褐色森林土を示す。値は平均値±標準偏差である。*，**，*** は，石灰質土壌と褐色森林土の間に統計的に有意差があることを示す（* $P<0.05$，** $P<0.01$，*** $P<0.001$，n.s. 有意差無し）。以下の表も同じである。

表－２．２種類の土壌に植栽したクスノキ科樹木の総乾重量の変化

	石灰	褐色	有意差
クスノキ			
植栽前	18.3±3.2		
2010年７月	枯死	20.8±14.7	
2011年11月	枯死	225.0±67.0	
シロダモ			
植栽前	15.7±5.0		
2010年７月	41.1± 9.2	34.8± 2.3	*
2011年11月	82.9±39.2	86.9±31.7	n.s.
タブノキ			
植栽前	43.7±10.8		
2010年７月	55.3±17.3	50.9± 12.3	n.s.
2011年11月	132.0±51.0	263.0±125.0	**
ヤブニッケイ			
植栽前	24.6±10.4		
2010年７月	28.9± 9.4	32.0± 7.9	n.s.
2011年11月	36.4±30.5	97.3±63.9	**

単位は全てｇ，サンプル数は12である。

表－３．２種類の土壌で育成したカシ実生の光飽和時における最大光合成速度

	石灰	褐色	有意差
シロダモ	3.70±0.83	4.64±1.87	n.s.
タブノキ	6.15±2.81	11.3±3.0	***
ヤブニッケイ	5.29±1.93	6.02±3.34	n.s.

単位は全て μ mol $m^{-2}s^{-1}$，サンプル数は12である。光合成は2011年10月に測定した。

表－４．２種類の土壌で育成したクスノキ科樹木の葉内と根内の元素濃度

	葉（石灰）	葉（褐色）	根（石灰）	根（褐色）
シロダモ				
N	610± 73	679±103	1114±103	1067± 66
P	129± 23	128± 20	783±233	509±157**
K	180± 43	185± 33	233± 65	296± 94*
Ca	194± 45	219± 64	347± 63	211± 32***
Mg	33± 7	34± 8	128± 33	113± 26
タブノキ				
N	510± 87	794±173***	639± 63	602± 54
P	73± 16	104± 27**	263± 60	231± 57
K	119± 41	161± 36*	110± 33	136± 29*
Ca	404±153	225± 60***	341± 67	142± 32***
Mg	88± 31	67± 14*	144± 20	77± 12***
ヤブニッケイ				
N	650±182	661±180	621± 70	567± 66**
P	131± 75	112± 26	309±120	199±107*
K	146± 47	189± 36*	142± 47	117± 23
Ca	350±134	170± 76***	219± 45	119± 31***
Mg	79± 22	67± 19	81± 21	65± 15*

単位は全て μ mol g^{-1}，サンプル数は12である。分析値は2011年11月に採取したサンプルである。

ヤブニッケイの葉内元素濃度は，カリウムにおいて石灰質土壌の方が有意に低かった。一方，根内濃度は窒素，リン，カルシウム，マグネシウムにおいて石灰質土壌の方が高かった。カルシウムは，葉内においても石灰質土壌の方が高かった。

Ⅳ. 考　察

植栽したクスノキ科4樹種のうち，クスノキは石灰質土壌では成長できずに枯死した。クスノキが枯死した原因の一つとしては，乾燥ストレスを受けていたことが挙げられる。石灰質土壌に植栽した植物は，特に夏場にかけて乾燥ストレスを受けやすいことに加えて（Grime and Curtis, 1976），クスノキ自体も乾燥ストレスを受けやすい性質を持つ（渡辺，1958）。また，試験地に近い，豊後大野市犬飼町の2009年8月と9月の降水量は，過去30年の平均値と比較してそれぞれ30％，17％であり（気象庁，2009），降水量は少なかった。このことから，石灰質土壌に植栽したクスノキは，この2ヶ月の間に乾燥ストレスを受けて枯死したと推察される。

クスノキ以外のシロダモ，タブノキ，ヤブニッケイは貧栄養かつ高pHの石灰質土壌でも順調に成長することができた。しかし，いずれの樹種も葉が黄化していた。石灰岩地帯においてカルシウムの過剰害を受けた葉は，特有の可視害であるライムクロロシス（Marchner, 1995）と呼ばれる黄斑を生じる。これらの3樹種も，ライムクロロシスを生じるほどの過酷な養分環境であったと推察される。

石灰質土壌における2011年11月の乾重量を3樹種間で比較すると，タブノキが最も大きかった（表－2）。一方，石灰質土壌に植栽したタブノキは光合成速度と葉の窒素，リン，カリウム濃度が褐色森林土の個体より低かった（表－3，4）。光合成速度は特に窒素と正の相関を示すことから（Evans, 1989），低い窒素濃度が光合成速度の低下につながったと考えられる。また，石灰質土壌に適応した植物は，根から有機酸を放出して，カルシウムと強固に結合しているリンを溶解させて吸収する（Zhu *et al*., 2002）。タブノキは他の樹種より葉と根のリン濃度が低く（表－4），リンを吸収する能力も他の樹種より低いと推察される。さらに，カリウムは大量のカルシウムが存在すると拮抗作用を生じ，吸収が抑制される（Jefferies and Willis, 1964）。タブノキは植物体内のカルシウム濃度が高かったことから，拮抗作用によってカリウム欠乏を起こしたと推察される。その一方で，石灰質土壌に植栽したタブノキは葉内窒素濃度が他の樹種より低かったが（表－4），他の樹種より高い光合成速度を示した（表－3）。このことから，石灰質土壌のタブノキは，少ない葉内窒素を光合成器官にできるだけ多く投資して，光合成速度を高めていたと推察される。

シロダモは，石灰質土壌では2011年10月の乾重量はタブノキほど大きくなかったが，褐色森林土の個体と差がなかった（表－2）。また，シロダモの葉はいずれの元素も欠乏症状を示さなかった。このことから，シロダモは石灰質土壌で問題となる養分欠乏に強い樹種であると考えられる。特に，シロダモは根内の窒素とリン濃度が他の樹種よりも特に高かった（表－4）。このことから，シロダモは根から多くの有機酸を放出して，リンを溶解させて吸収していると推察される。なお，シロダモで検出された平均783 μmol g^{-1}（2.43％），最大1193 μmol g^{-1}（3.69％）の根内リン濃度は他の文献と比較しても極めて高い値であった。例えば，Sharma *et al*.（2007）は37種の植物のリン濃度を分析しているが，集積型の植物であってもリン濃度は最大2％であった（キュウリの幹）。このことから，シロダモはリンの超集積植物（hyperaccumlator）であると考えられる。さらに，シロダモは葉内カルシウム濃度が他の樹種と比較しても低かった。この特徴が，大量のカルシウムによる拮抗作用を抑制し，葉のカリウム欠乏を起こさなかった原因になったと推察される。

石灰質土壌に植栽したヤブニッケイは，タブノキと比較しても養分欠乏はカリウムのみで（表－4），光合成速度も低下していなかった（表－3）。しかし，石灰質土壌に植栽したヤブニッケイは成長が悪く，2011年11月における乾重量は約2年間で12 gしか成長しなかった（表－3）。器官別の乾重量を検討すると，石灰質土壌におけるヤブニッケイは幹・枝と根は順調に増加したが，葉は植栽前の8.3 gから2011年11月には7.8 gに低下していた。養分，特に窒素に関しては，葉を落葉させる際に回収し，新しい葉に転流させていることも考えられる（Hikosaka, 2005）。このことから，ヤブニッケイは葉を落葉させて古い葉から新しい葉に養分を転流し，その結果石灰質土壌の個体でも高い葉内窒素濃度と光合成速度を得ていたと考えられる。

本研究結果より，石灰石鉱山における緑化樹としては，タブノキとシロダモが高い適合性を持つと考えられる。しかし，タブノキとシロダモでは成長特性が異なっていた。シロダモは，本試験地のような貧栄養な環境でも養分欠乏症状を示さなかった。このことから，石灰岩の基盤などの特に貧栄養な環境には，シロダモが適していると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，試験地の設定には大分県森林管理署の方々に協力して頂いた。購入した苗木の移植や乾重量の測定など多岐にわたる仕事は，青木菜保子氏に協力して頂き，成松佳美氏と國領妙子氏にも補助して頂いた。現地における苗木の植栽とシカ柵の設置は，（有）佐伯造林の方々に協力して頂いた。現地の苗畑の維持管理と苗木の採取には，佐藤美由紀氏，山川博美氏，世見淳一氏に協力して頂いた。土壌のICP分析は，北海道大学の福澤加里部氏の協力を得て実施した。ここに感謝の意を表す。本研究は，日本学術振興会科学研究費補助金「石灰岩地帯に生育する樹木の生理特性と採石跡地の緑化技術への応用」（課題番号：20780124）によって実施した。

引用文献

土壌環境分析法編集委員会（1997）土壌環境分析法．博友社，東京．
Evans, J.R.（1989）Oecologia 78：9－19．
Grime, J.P. and Curtis, A.V.（1976）J. Ecol. 64：975－988．
Hikosaka, K.（2005）Ann. Bot. 95：521－533．
Jefferies, R.L. and Willis, A.J.（1964）J. Ecol. 52：691－707．
気象庁（2009）気象統計情報，大分県犬飼．

http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php
Marschner H.（1995）Mineral nutrition of higher plants, 2 ed. Academic Press, London.
宮脇　昭（1981）日本植生誌　九州 . 至文堂 , 東京.
日本の地質九州地方編集委員会（1992）日本の地質 9 九州地方 . 共立出版，東京.
大分県（1980）土地分類基本調査，臼杵・保戸島．富士マイクロサービスセンター，熊本.
Sharma, N.C. *et al*.（2007）Environ. Pollut. 146 : 120 – 127 .
植物栄養実験法編集委員会（1990）植物栄養実験法 . 博友社，東京.
Tyler, G.（1996）Ann. Bot. 77 : 649 – 656 .
漆原和子 (1996) カルスト その環境と人々の関わり . 大明堂 , 東京.
渡辺資仲（1958）東京大学農学部演習林報告 54 : 31 – 36.
山中二男（1966）高知大学学術研究報告 15 : 1 – 9.
Zhu, Y.G. *et al*.（2002）Plant Soil 239 : 1 – 8.

（2012 年 11 月 6 日受付；2013 年 2 月 19 日受理）