

森林総合研究所研究報告

Vol.20 No.1 (No.457)

BULLETIN

of the
Forestry and
Forest Products
Research Institute



March 2021



国立研究開発法人 森林研究・整備機構
森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute

The Chief Editor

山中 高史 Takashi YAMANAKA (Principal Research Director, FFPRI)

The Vice-Chief Editor

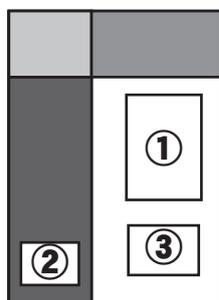
松本 麻子 Asako MATSUMOTO (Public Relations Division, FFPRI)

Editor

阿部 真 Shin ABE (Department of Forest Vegetation, FFPRI)
阿部 俊夫 Toshio ABE (Tohoku Research Center, FFPRI)
平尾 知士 Tomonori HIRAO (Forest Tree Breeding Center, FFPRI)
菱山 正二郎 Shojiro HISHIYAMA (Department of Forest Resource Chemistry, FFPRI)
伊藤 優子 Yuko ITOH (Department of Forest Soils, FFPRI)
小松 雅史 Masabumi KOMATSU (Department of Mushroom Science and Forest Microbiology, FFPRI)
深山 貴文 Takafumi MIYAMA (Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, FFPRI)
西園 朋広 Tomohiro NISHIZONO (Department of Forest Management, FFPRI)
岡 裕泰 Hiroyasu OKA (Forestry Division, Japan International Research Center for Agricultural Sciences)
奥田 史郎 Shiro OKUDA (Department of Plant Ecology, FFPRI)
鈴木 秀典 Hidenori SUZUKI (Department of Forest Engineering, FFPRI)
滝 久智 Hisatomo TAKI (Department of Forest Entomology, FFPRI)
東條 一史 Hitoshi TOJO (Department of Wildlife Biology, FFPRI)
上野 真義 Saneyoshi UENO (Department of Forest Molecular Genetics and Biotechnology, FFPRI)
宇京 斉一郎 Seiichiro UKYO (Department of Wood Engineering, FFPRI)
山田 利博 Toshihiro YAMADA (Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo)

This journal is indexed in CAB Abstracts.

表紙写真 Photographs in Cover



- ①ハーベスタによるスギの造材(和歌山県新宮市)
Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) processing with harvester
- ②クマノザクラの花(三重県熊野市)
Flowers of Kumano cherry (*Cerasus kumanoensis*) at Kumano City, Mie Prefecture
- ③(本文49～67ページ)
宝川森林理水試験地観測報告－本流・初沢試験流域－(2011年1月～2016年12月)
Statistical report of hydrological data from TAKARAGAWA experimental watershed.
- HONRYU and SHOZAWA watershed (January, 2011 to December, 2016) -

目次

論文

弱光環境における個体の炭素収支と葉の機能的形質間のバランス：
沖縄亜熱帯林林床での研究(英文)
宮下 彩奈、館野 正樹 1

製材品の曲げ強度における寸法効果パラメータの検討(第2報)
目視等級区分法による検討
井道 裕史、加藤 英雄、長尾 博文 13

電磁誘導式自動走行フォワーダによる集材作業の無人化に関する研究
毛綱 昌弘、山口 浩和、鈴木 秀典、山口 智、宗岡 寛子、
佐々木 達也、有水 賢吾、飯澤 宇雄、大東 史典、
阿部 慶一、小長井 信宏、辻 浩志 19

超臨界二酸化炭素の圧力差を利用した木材の効率的なアセチル化処理
松永 正弘、小林 正彦、神林 徹、石川 敦子 29

研究資料

照葉樹老齢二次林の21年間にわたる林分構造の変化
佐藤 保、山川 博美、野宮 治人、安部 哲人、
齊藤 哲、釜 稔、大寺 義宏 37

宝川森林理水試験地観測報告
一本流・初沢試験流域(2011年1月～2016年12月)
玉井 幸治、久保田 多余子、野口 正二、清水 貴範、
飯田 真一、澤野 真治、延廣 竜彦、荒木 誠、坪山 良夫 49

Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute
Vol.20 No.1 (No.457) March 2021

CONTENTS

Original article

Balance of leaf traits is important for whole-plant carbon balance in shade:
a study for understory saplings in a subtropical forest in Japan
Ayana MIYASHITA and Masaki TATENO 1

Influence of the size effect parameter on the bending strength of lumber
(Part 2) Examination by the visual grading classification
Hirofumi IDO, Hideo KATO and Hirofumi NAGAO 13

Research on unmanned logging operation by automated traveling
forwarder using electromagnetic induction
Masahiro MOZUNA, Hirokazu YAMAGUCHI,
Hidenori SUZUKI, Satoshi YAMAGUCHI, Hiroko
MUNEOKA, Tatsuya SASAKI, Kengo USUI, Takao IIZAWA,
Fuminori OHIGASHI, Keiichi ABE,
Nobuhiro KONAGAI and Hiroshi TSUJI 19

Efficient acetylation of wood using pressure difference of supercritical carbon
dioxide
Masahiro MATSUNAGA, Masahiko KOBAYASHI,
Toru KANBAYASHI and Atsuko ISHIKAWA 29

Research record

Changes in stand structure of an old secondary lucidophyllous forest
over 21-years monitoring
Tamotsu SATO, Hiromi YAMAGAWA, Haruto NOMIYA,
Tetsuto ABE, Satoshi SAITO, Minoru KAMA
and Yoshihiro OTERA 37

Statistical report of hydrological data from TAKARAGAWA experimental
watershed.
- HONRYU and SHOZAWA watershed (January, 2011 to December, 2016) -
Koji TAMAI, Tayoko KUBOTA, Shoji NOGUCHI,
Takanori SHIMIZU, Shin'ichi IIDA, Shinji SAWANO,
Tatsuhiko NOBUHIRO, Makoto ARAKI
and Yoshio TSUBOYAMA 49

論文 (Original article)

Balance of leaf traits is important for whole-plant carbon balance in shade: a study for understory saplings in a subtropical forest in Japan

Ayana MIYASHITA^{1),2)*} and Masaki TATENO²⁾

Abstract

In the understory of an evergreen forest, how leaf traits and light availability affect whole-plant carbon balance is less investigated. We predicted that variety of leaf traits can contribute to maintain whole-plant carbon balance positive in a shaded understory, and tested it in a subtropical forest in Japan, where typhoon disturbance is relatively frequently occurred. We estimated the potential net assimilation rate (NAR) of understory sites, including typhoon-disturbed sites, by measuring photosynthetic active photon flux density (PPFD). Then, for understory saplings we applied our original 'leaf relative growth rate' (RGR_{leaf}) method to simulate the whole-plant carbon balance according to its relation to leaf mass per area (LMA), leaf lifespan (LL), net assimilation rate (NAR), and leaf partitioning rate (LP). $RGR_{\text{leaf}} > 0$ indicates positive growth. Under the fully closed canopy the potential NAR was estimated to be $< 50 \text{ g glucose m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, where most species were predicted to have a negative RGR_{leaf} . However, with a better NAR of the site which had likely experienced a past typhoon attack, most species would have positive RGR_{leaf} . With those low-level NAR, neither LMA nor LL had significant relationships to RGR_{leaf} . There, saplings' LMA and LL showed positive relationship, but LMA tended to be smaller relative to LL compared to known global trend. With higher-level NAR, it is predicted that having smaller LMA and LL is advantageous to have large RGR_{leaf} . We concluded that balance of the leaf traits is important to maintain positive whole plant carbon balance in the low light understory, and then, various leaf traits were valid for growth in a low light understory. The moderate shade environment brought by typhoon disturbances may help to exist species with various leaf traits.

Key words : forest regeneration, leaf life span, leaf mass per area (LMA), light environment, photosynthesis, relative growth rate (RGR), shade tolerance

Introduction

The feature and performance of shade-tolerant tree species has long been discussed, mainly in comparison with light-demanding species (e.g., Givnish 1988, King 1994, Kitajima 1994, Reich et al. 1998, Kobe 1999, Walter and Reich 1999, Lusk 2002, Baltzer and Thomas 2007, Lusk and Jorgensen 2013). On the other hand, variety among saplings in a low-light forest understory have been less investigated. Regarding the characteristics of shade-tolerant species, previous studies found that lowering the light compensation point of whole-plant growth is one of the most effective strategies (Baltzer and Thomas 2007, Lusk and Jorgensen 2013). Then, potential of positive growth under a low light availability and its relationship to plant traits are worth investigating to understand species variety in a forest floor.

To evaluate whole plant growth potential and its relationship to leaf functional traits, growth analysis theory (Evans 1982) is thought to be profitable, in particular, relative growth rate (RGR) (abbreviations are listed on Table 1), which is biomass gain per plant mass per time, has long been applied. In many

Table 1. Abbreviations

A_{max}	Maximum leaf assimilation rate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
A_{net}	Instantaneous leaf assimilation rate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
LMA	Leaf mass per area (g m^{-2})
LL	Leaf lifespan (years)
LMR	Leaf mass ratio, the ratio of leaf mass to whole plant mass (g g^{-1})
LP	Leaf partitioning rate, the ratio of leaf mass gain to whole plant mass gain (g g^{-1})
NAR	Net assimilation rate ($\text{g glucose m}^{-2} \text{ time}^{-1}$)
PPFD	Photosynthetically active photon flux density ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
R_d	Dark respiration rate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
RGR_{leaf}	Leaf relative growth rate ($\text{g g}^{-1} \text{ year}^{-1}$)
RMR	Root mass ratio, the ratio of root mass to whole plant mass
SMR	Stem mass ratio, the ratio of stem mass to whole plant mass

Received 1 June 2020, Accepted 26 October 2020

1) (present address) Center for Forest Damage and Risk management, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Nikko Botanical Gardens, Graduate School of Science, University of Tokyo

* Center for Forest Damage and Risk management, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, JAPAN; ayanamiyashita@ffpri.affrc.go.jp

cases, RGR is composed by net assimilation rate (NAR), leaf mass per area (LMA), and leaf mass ratio to whole plant mass (LMR). However, although shade-tolerant species often have tissues of low turnover rates, and leaf lifespan (LL) should be a key trait for their carbon balance (Kikuzawa 1991, King 1994, Lusk 2002, 2004), RGR does not include LL. Then, RGR cannot be said suitable for growth potential of shade-tolerant species. Based on this, we proposed using our indicator of the whole-plant carbon balance, the leaf relative growth rate (RGR_{leaf} ; Miyashita and Tateno 2014). RGR_{leaf} has very similar basic structure to the standard RGR, but is focusing only on leaf biomass budget. This contains LL and leaf partitioning rate (LP, proportion of leaf mass gain to whole plant mass gain) as isolated parameters instead of LMR (see ' RGR_{leaf} ' in *Materials and Methods*). Using RGR_{leaf} , we can test effect of LL to whole-plant carbon balance quantitatively, then can precisely predict plant growth potential in a very low-productivity. Actually, our previous study found that (standard) RGR can overestimate seedling growth potential in the very low-light environment (Miyashita and Tateno 2014). Further, use of RGR_{leaf} allows the relationships between leaf traits and possibility of positive growth to be easily understood, and it provides the benefit of evaluating the LL.

Understory 'shade-tolerants' has been suggested to have variety of leaf traits. Montgomery and Chazdon (2001, 2002) reported that even beneath the overstory with no visible gaps, there is spatial gradient of light availability, and that growth responses of species to light availability show different patterns. These findings indicate that not only one kind of 'shade-tolerance', for example, those allows to endure and survive long period of deep shade, is valid for the understory growth. Then, variety of leaf traits should be tested with understory light availabilities. The light availability for a sapling can be represented by NAR in the RGRs. NAR can be estimated using a light–response curve of the CO_2 assimilation rate with incident photosynthetically active photon flux density (PPFD) on the leaf surface. However, understory NAR estimation based on detailed PPFD data is limited, although under field conditions, long-term light availability is unpredictable due to influences of weather conditions and other incidental elements (Miyashita et al. 2012).

In this study we simulated whole plant growth potential, or, RGR_{leaf} , of saplings with various leaf traits in the understory of subtropical forest in Japan. First, to estimate NAR, we made detailed PPFD measurement at several understory sites. We also conducted measurement of growth and the leaf traits of saplings found at apparently the lowest light availability. Then, we compared RGR_{leaf} of saplings with the potential NAR at each site. During the experimental period, about 4 months after the beginning of PPFD measurement, two severe typhoons

struck the region. Thus, we were able to monitor differences in PPFD (and consequently NAR) and LMA of the saplings before and after the disturbances, and also reported it. Finally, we discuss leaf traits diversity and importance of canopy disturbance at the forest floor from the perspective of whole-plant carbon balance.

Materials and methods

Site descriptions

This study was conducted in the Yona Experimental Forest (26°44'N, 128°14'E, 300 m above sea level) on Okinawa Island, southern Japan. The forest is located in a subtropical zone, and the surrounding natural forest is dominated by evergreen broad-leaved trees (*Castanopsis sieboldii*, *Distylium racemosum*, *Schima wallichii*, and *Elaeocarpus japonicus*; Enoki 2003, Kubota et al. 2005). The canopy surface is relatively homogeneous and lacks emergent trees. The canopy height is 7–10 m, the maximum height is < 20 m, and the canopy along ridges has a height of 5–6 m and an indistinct layer structure that is considered an effect of strong winds (Shinzato et al. 1986, Enoki 2003).

Our study took place from May 2012 to May 2014. During this period, the mean air temperatures were 26.3°C in the warmest month (July) and 13.2°C in the coldest month (January). The mean annual precipitation was 2652 mm. During the experimental period, 18 typhoons were recorded on the island (Japan Meteorological Agency). Among these, two remarkably severe typhoons struck, on 27 August 2012 and 29 September 2012. These typhoons uprooted or broke some trees in the experimental forest, and slope failures occurred in several places around the region. Right beneath a large gap, many fallen branches and stems were folded. However, around our experimental sites (mentioned below), no remarkable damage was observed for ground surface or saplings in the understory.

We chose five sites to cover various light availabilities of forest floor in the Yona Experimental Forest: at four understory locations where the canopy had been disturbed by typhoons in 2012 (gap–gap sites 1 and 2, and closed–gap sites 1 and 2, in the name, first and second “gap” or “closed” words represent the overstory condition of the sites before and after disturbance, respectively), and a site that faced a forest road and had no overstory was also selected (open site). The four disturbed sites were along a gently sloping ridge. Among these locations, the gap–gap sites were originally better lit than the closed–gap sites, and before the disturbances in 2012, these overstories were partly open, relatively low, and uneven, and saplings < 1 m occurred intermittently in the respective understories. The closed–gap sites originally had relatively high, closed, and even overstories and sparse understory vegetation. These

sites showed similar understory species composition. After the disturbance, these four sites had several small gaps and nearby large gaps $\geq 5 \text{ m}^2$.

Collection of environmental data

Correlation chart of measured data and estimated values is shown in Fig. 1.

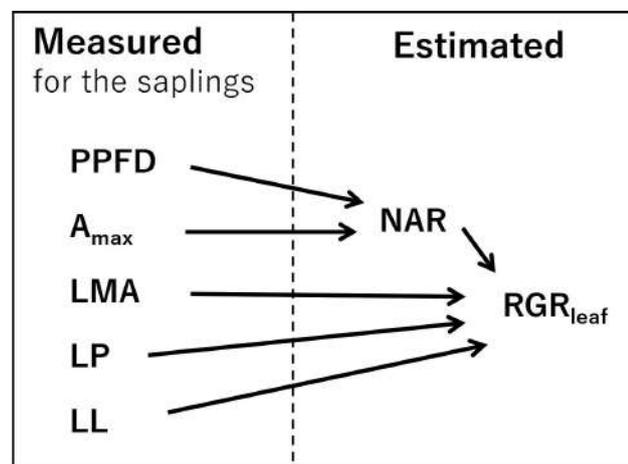


Fig. 1. Correlation chart of measured and estimated values.

PPFD and air temperature were measured at all five sites. At each site we placed one quantum sensor (Photosynthetic Light (PAR) Smart Sensor - S-LIA-M003; Onset Computer, Pocasset, MA, USA) and one temperature sensor (12-bit Temperature Smart Sensors; Onset Computer Corp.). The quantum sensors were set 30 cm above the ground and

carefully leveled. Understory saplings that might have covered the sensors were removed. A datalogger (HOBO Micro Station Data Logger; Onset Computer) was connected to the quantum and temperature sensors to sample the sensor output [PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and air temperature ($^{\circ}\text{C}$)] every minute, an interval that was considered sufficiently short to capture short-term fluctuations such as sunflecks while keeping the quantity of data manageable (cf. Pearcy 1983). Measurements were conducted from 10 May 2012 to 26 May 2014. At the open site, the data logger stopped recording due to an unknown cause during the period 30 October 2012 to 16 January 2013, so data were not collected at this site during this period.

Determination of sapling leaf traits

For naturally occurring saplings at closed-gap site 2 that were within a $\sim 5\text{-m}$ radius of the quantum sensor, we made the following measurements. Because there was scarce vegetation at the site, we sampled from all saplings included evergreen broad-leaved trees or shrubs $\leq 1 \text{ m}$ in height, except for individuals visibly damaged. Number of sampled individuals was one, and two only for *Dendropanax trifidus*. For details of the saplings, species, size and leaf traits, see Table 2 and 3.

LMA was determined twice for the same individual, in May 2012 (before the disturbance) and in May 2014 (after the disturbance). We collected five or more sample leaves from each sapling including leaves of various ages. The leaves were scanned to determine leaf area and then oven-dried at 80°C for 48 hours to determine dry mass.

Table 2. Study individuals found at closed-gap site 2.

Species	Adult Stature	Height (cm)	Whole Plant Mass (g)	Leaf Mass Ratio (g g^{-1})	Stem Mass Ratio (g g^{-1})	Root Mass Ratio (g g^{-1})
<i>Bredia okinawensis</i>	shrub	46	19.3	0.34	0.48	0.18
<i>Castanopsis sieboldii</i>	canopy tree	21	10.1	0.49	0.32	0.20
<i>Cinnamomum doederleinii</i>	canopy tree	50	20.4	0.46	0.38	0.16
<i>Cinnamomum yabunikkei</i>	sub-canopy tree	80	8.6	0.44	0.36	0.20
<i>Dendropanax trifidus</i>	canopy tree	25	2.9	0.41	0.34	0.24
<i>Dendropanax trifidus</i>	canopy tree	64	24.3	0.21	0.63	0.16
<i>Distylium racemosum</i>	canopy tree	75	29.9	0.19	0.60	0.21
<i>Hydrangea liukuensis</i>	shrub	60	14.5	0.16	0.48	0.36
<i>Lasianthus fordii</i>	shrub	72	17.1	0.23	0.52	0.25
<i>Machilus thunbergii</i>	canopy tree	53	8.3	0.30	0.40	0.30
<i>Myrsine seguinii</i>	canopy tree	75	17.4	0.24	0.53	0.23
<i>Neolitsea aciculata</i>	sub-canopy tree	47	7.6	0.38	0.29	0.33
<i>Skimmia japonica</i>	shrub	73	59.3	0.20	0.25	0.56
<i>Syzygium buxifolium</i>	canopy tree	108	85.9	0.17	0.49	0.34

LL was estimated in the following ways, when it was difficult to determine LL precisely during the experimental period. First, we determined the age of the oldest leaf cohort by observing the shoot elongation pattern (most species had a clear seasonal pattern of shoot growth). We assumed this age to be the maximum LL (LL_{\max} , year). This observation was conducted in May 2012. Second, we observed the 1-year leaf turnover rate, following Lusk (2014), and then used its inverse as LL_{obs} , i.e., $LL_{\text{obs}} = (\text{number of leaves present at outset}) / (\text{number of leaves shed during 1 year})$. For this observation, we photographed the same branches in May 2013, September 2013, January 2014, and May 2014 and observed changes in leaf numbers and shoot elongation patterns. Because most species in this area apparently have an LL of around 1–2 years, we did not distinguish LL before the disturbances from that after the disturbances in the observation of the leaf cohort in May 2013. Between LL_{\max} and LL_{obs} , we used the smaller one for sapling LL in order to exclude extremely long LL, which can be estimated because of limitation of observation period and number of samples. The LL determination was conducted for three to four branches per sapling, or for one main stem. The average values of branches or stems were used to determine the species LL at each site.

LP was estimated by one-year above ground growth tracking (May 2013– May 2014) and final whole-plant harvest in May 2014. Because direct determination of LP requires repeated destructive sampling, we could only estimate. We estimated

the maximum and minimum values of LP to present a potential range of RGR_{leaf} for each individual. LP_{\max} is determined only by above ground mass change regardless of root mass, i.e., $LP_{\max} = \text{leaf mass gain} / \text{above ground mass gain}$, expecting the maximum value of LP. LP_{\min} is calculated using root mass ratio (RMR) as, $LP_{\min} = LP_{\max} * (1 - \text{RMR})$, assuming that the mass fractions are directly reflected to tissue investment rates, although LP tend to be larger than LMR (Veneklaas and Poorter 1998, Miyashita and Tateno 2014). Above ground mass gain was determined by the one-year change in stem volume and leaf area. After final harvest, we determined stem density and LMA, then, using it, they were altered to mass growth. We assumed that a sapling architecture consisted of main stem(s) and some iteration of components of branches and leaves. Then, for main stem(s), and for all branches and leaves of one component, we tracked one-year growth, and multiplied it to estimate whole above ground growth. For stem volume diameters at two direction were measured at least three points (base, middle, tip) per stem or branch. We determined stem density using the calculated volume and dry weight for three stems or branches per individual, then, averaged them. For leaf area, we measured leaf number change and average leaf size together with LL estimation.

Photosynthetic capacity of the understory saplings was also determined. The maximum photosynthetic rate (A_{\max}) and dark respiration rate (R_d) of leaves were measured on May 29 and 30, 2013, (after the disturbance) for 19 individuals from 15

Table 3. The leaf traits of study saplings at closed-gap site 2.

Species	May, 2012		May, 2014		LL (yr)
	LMA (g m ⁻²)	LMA (g m ⁻²)	LP(max)* (g g ⁻¹)	LP(min)** (g g ⁻¹)	
<i>Bredia okinawensis</i>	53	65	0.56	0.46	1.9
<i>Castanopsis sieboldii</i>	79	104	0.59	0.47	2.5
<i>Cinnamomum doederleinii</i>	99	122	0.52	0.44	3.3
<i>Cinnamomum yabunikkei</i>	40	104	0.43	0.34	2.0
<i>Dendropanax trifidus</i>	59	50	0.64	0.48	1.8
<i>Dendropanax trifidus</i>	40	66	0.54	0.45	1.8
<i>Distylium racemosum</i>	115	136	0.74	0.58	2.6
<i>Hydrangea liukuensis</i>	17	33	0.66	0.42	0.7
<i>Lasianthus fordii</i>	43	63	0.47	0.35	1.6
<i>Machilus thunbergii</i>	84	109	1.00a	0.84	2.5
<i>Myrsine seguinii</i>	79	118	0.59	0.46	2.0
<i>Neolitsea aciculata</i>	62	72	0.57	0.38	2.0
<i>Skimmia japonica</i>	62	107	1.00 a	0.50	2.0
<i>Syzygium buxifolium</i>	65	97	0.26	0.17	3.0

*: LP values derived only from the above ground (leaf and stems) mass gain, $LP_{(\max)} = (\text{leaf mass gain}) / (\text{above ground mass gain})$.

** : LP values considering the root mass ratio (RMR), $LP_{(\min)} = LP_{(\max)} * (1 - \text{RMR})$. *: In the case of stem mass gain ≤ 0 , $LP_{(\max)}$ is assumed as 1.0.

species around closed-gap site 2 (one leaf per individual, and one to three individuals per species, including individuals not listed on Tables 2 and 3). A branch was collected from each sapling before dawn, brought back to the laboratory in a plastic bag (within 30 min), and then immediately severed again under water. We then selected one fully expanded, young-to medium-aged leaf from each branch. The measurements were made in the early to late morning using an infrared gas-exchange analyzer (Li-6400; Li-Cor, Lincoln, NE, USA) with an ambient CO₂ concentration of 400 μmol mol⁻¹, leaf temperature of 25°C, and relative humidity of 75% and, for A_{max} measurements, a saturated PPFD of 1,500 μmol m⁻² s⁻¹.

Estimating the potential NAR of understory sites

The net assimilation rate (NAR: g glucose m⁻² year⁻¹) at each site was calculated by summing up the instantaneous net assimilation rates of leaves (A_{net}, μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) and converting them to the mass of glucose (180 g mol⁻¹) to be comparable with biomass. We calculated one-year unit NAR for the use of RGR_{leaf} using three periods of PPFD: First, NAR for 'before the disturbances', we used PPFD during May-August 2012. Second, for NAR 'soon after' the disturbances, we used PPFD during Sep 2012 -August 2013. Third, for NAR 'after the disturbances', we used PPFD during May 2013 to Apr 2014. Among those, the first period was short for one year because of the timing of typhoon attacks. We compensated this by calculating average daily NAR during the period × 365 days.

For NAR calculation, we used light-response curves for CO₂ assimilation described by a non-rectangular hyperbola (Thornley, 1976). A_{net} at a given PPFD is

$$A_{net} = \frac{\Phi * PPFD + A_{max} - \sqrt{(\Phi * PPFD + A_{max})^2 - 4\Phi * PPFD * \Theta * A_{max}}}{2\Theta} - R_d, \quad (1)$$

where A_{max} is the light-saturated rate of gross CO₂ assimilation, Φ represents the initial slope of the line (mol CO₂ mol quanta⁻¹), Θ is the curvature factor (nondimensional), and R_d is the dark respiration rate of leaves (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹). We substituted our PPFD data into (1) and summed A_{net} assuming that PPFD lasted for 1 min. For other parameters, because we did not have the specific data, so we computed the NAR by changing the parameters separately in the range of which can cover all the possible values of understory leaves. A_{max} was changed stepwise from 1 to 20 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹; R_d was determined relative to A_{max}; and R_d/A_{max} was set at 1/15, 1/10, and 1/7 at a leaf temperature of 25°C. Φ and Θ were set at 0.04, 0.05, and 0.07 mol CO₂ mol quanta⁻¹ and 0.5, 0.8, and 0.99, respectively. These parameters were set also referring to published works on understory or shaded evergreen broad-leaved trees (Koyama 1981, Turnbull 1991, Kitajima 1994,

Valladares et al. 1997, Thomas and Bazzaz 1998, Veneklaas and Poorter 1998, Walters and Reich 1999, Marengo et al. 2001, Feng et al. 2004, Miyazawa and Kikuzawa 2005). Temperature and PPFD dependence was also applied to R_d value following Oguchi et al. (2008): R_d was changed depending on leaf temperature relative to the value at 25°C using the Arrhenius model, and R_d was not modified when PPFD = 0 μmol m⁻² s⁻¹, but it was multiplied by 0.4 when PPFD > 0. We did not include the leaf temperature dependence of A_{max} in our calculations because air temperature during the daytime in the experimental forest was relatively even and photosynthetically favorable throughout the year. During the experimental period, > 78% of measured air temperatures (when PPFD > 0) were within the 10–25°C range.

After summing A_{net}, which is the leaf-level NAR, considering only leaf respiration rates. To convert it to the (whole-plant) NAR, we need to consider whole-plant carbon consumption (construction and maintenance respirations). We used the following expression in the calculations: NAR = (leaf-level NAR) × 0.45. It has been estimated that ~50% of assimilated glucose remains available for tissue construction and maintenance after respiratory consumption is considered (Mooney 1972), although available data of tree seedlings or saplings at the whole-plant level are scarce. We also estimated the proportion of remaining assimilated glucose during a year for seedlings of cool-temperate deciduous tree species (*Acer* and *Fagus*) growing at several small gap sites, as 32-48% (average 39%) (A Miyashita, FFPRI, unpub. data).

Statistical analyses among the leaf traits (linear regression: LL vs LMA and the leaf traits and RGR_{leaf}, *t*-test; paired two sample for means: LL in 2012 and 2014) were conducted by Excel 2013 (Microsoft Corp. Redmond, WA, USA).

RGR_{leaf}

Our indicator of whole plant growth potential, RGR_{leaf} is calculated as follows (Miyashita and Tateno 2014),

$$RGR_{leaf} = (NAR \times LP)/LMA - (1/LL), \quad (2)$$

In the eq. (2), the part '(NAR×LP)/LMA' represents growth rate of foliage, and '1/LL' represents the mortality rate of foliage. Thus, RGR_{leaf} specifically evaluate leaf biomass growth potential. This is based on our idea of plant growth that in a condition of low productivity and steady-state, a plant never expand its biomass unless its leaf biomass (or leaf area) expand. Note that RGR_{leaf} is only designed for judge the potential of positive growth at the time of the parameters were obtained. So, it is unsuitable for a plant under fluctuating environment. Also note that the value is not the same as whole plant growth rate such as RGR. When RGR_{leaf} > 0, the whole plant carbon balance is positive and a plant potentially continues to grow. RGR_{leaf} ≤ 0 represents that a plant have

the same leaf area or reduced leaf area in the next year. This does not necessarily mean immediate death of a plant, if such condition does not continue over years.

Results

Understory light availability and leaf photosynthetic productivity

During the experimental period before the typhoons (May–August 2012), PPFD values at closed-gap sites 1 and 2 were 1.9 and 1.3% of that at the open site, or, 0.51 and 0.36 mol quanta $m^{-2} day^{-1}$ on average, respectively, while at gap-gap sites 1 and 2, the relative PPFD to the open site were 4.5 and 7.4%, or, 1.2 and 2.0 mol quanta $m^{-2} day^{-1}$, respectively (Fig. 2). After the disturbances, light availability improved remarkably at all sites. In May 2014, the PPFD values relative to the open site (RPPFD, %) at gap-gap sites 1 and 2 and closed-gap sites 1 and 2 were 13.8, 8.4, 13.1, and 14.4%, respectively. The degree of improvement was greater for sites with relatively low light availability before the disturbances. The frequency of PPFD $< 50 \mu mol m^{-2} s^{-1}$, which is considered to represent diffuse light level (Percy 1983, Miyashita et al. 2012), decreased at all sites, and for higher level PPFD, the frequency increased. These higher PPFD levels persisted into the subsequent season, but canopy closure was observable at the beginning of 2014. For instance, relative PPFD on May 2014 was decreased to around 75% of that on May 2013, but the light availability remained relatively high at closed-gap site 2.

There is large variation of calculated NAR depending on the photosynthetic parameter set, which include unrealistic values,

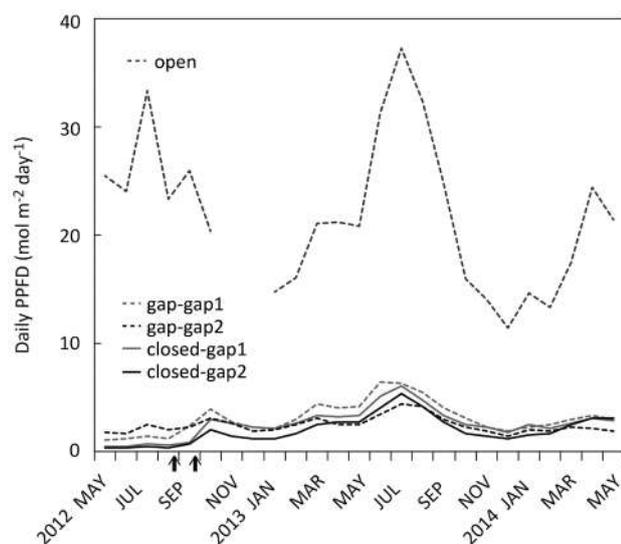


Fig. 2. Monthly trends in the mean daily total photosynthetically active photon flux density (PPFD) at each site from May 2012 to May 2014.

Arrows indicate the dates on which the typhoons struck.

though (Appendix Fig. 1). Considering that the A_{max_net} values of leaves collected at closed-gap site 2 were concentrated around $4 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ (Fig. 3), we chose the parameter sets giving the maximum NAR at A_{max_net} around $4 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ to emphasize that understory NAR is basically too small for plant growth: The parameter set 'R10', i.e., $(\Phi, \Theta, R_d/A_{max}) = (0.05, 0.8, 1/10)$ and the NAR is just about the average of all calculated NAR. Indeed, low-light understory leaves have a similar A_{max_net} value regardless of species, which is almost the optimal value maximizing leaf-level NAR (Kitajima 1994, Feng et al. 2004, Miyashita et al. 2012). With regard to the maximal NAR value, NAR under fully closed and undisturbed canopies were estimated to be $< 50 g glucose m^{-2} year^{-1}$; whereas estimates at the better lit sites exceeded $100 g glucose m^{-2} year^{-1}$ (Table 4). NAR values of soon after the disturbances (September 2012–August 2013) were at least 1.9 times greater than those before the disturbance at gap-gap sites, and more than 7.5 times greater for closed-gap sites.

Sapling leaf traits and RGR_{leaf}

The observed LMA and LL values at closed-gap site 2 covered a wide range (Table 3). LL and LMA had a positive linear relationship [$r^2 = 0.65$ for LMA collected in 2012 (Fig. 4), and $r^2 = 0.59$ for LMA collected in 2014]. After the disturbances, the mean LMA of saplings increased significantly ($p < 0.05$). LPs had no significant relationship with LMA or LL.

With the lowest level of light availability (NAR = $50 g glucose m^{-2} year^{-1}$), most saplings could not maintain a

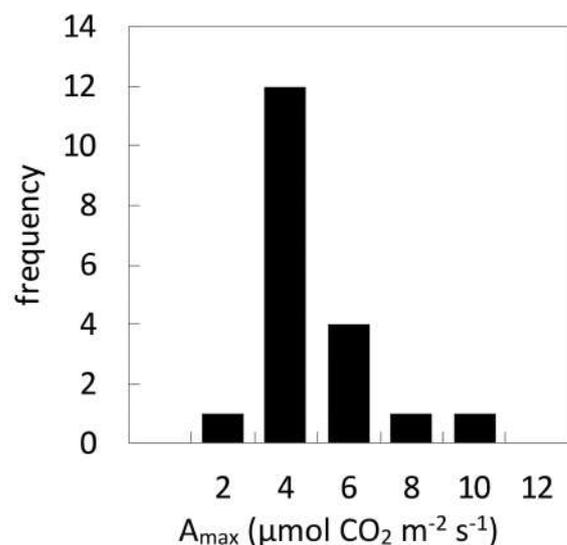


Fig. 3. Frequency distributions of leaf photosynthetic capacity (A_{max_net}) of saplings at closed-gap site 2 measured in May 2013.

A_{max_net} is a net value (i.e., $A_{max} - R_d$; R_d , leaf dark respiration rate). For each species' value, see Appendix Table 1.

positive RGR_{leaf} (with LMA observed at May 2012, Fig. 5 a-c). When $NAR \geq 100$ g glucose m^{-2} year $^{-1}$, Many saplings have positive RGR_{leaf} (with LMA observed at May 2014, Fig. 5 d-f), which corresponds to NAR of gap-gap sites before the disturbances (Table 4). At the low level of NAR such as < 100 g glucose m^{-2} year $^{-1}$, neither LMA nor LL solely contributed to RGR_{leaf} , while LP showed weak positive correlation to RGR_{leaf} . With small values of NAR, saplings having RGR_{leaf} near and above the zero can be regarded as most shade-tolerant. Their combination of LMA and LL showed variety: for examples, *Cinnamomum doederleini*; having relatively large LMA and LL, and *Hydrangea liukiensis* having small LMA and LL (Table 3). At higher level of NAR such as the sites after the disturbances, both LMA and LL showed negative correlation to RGR_{leaf} : having a combination of small LMA and LL apparently be advantageous (Fig. 5 g-i).

Discussion

Leaf traits of shade tolerant species in the low-light understory

Generally, having tough and durable tissues is considered effective to attain a high survival rate, but lower the carbon gain efficiency and growth rate (Kitajima 1994, Kobe 1999). However, several studies have indicated that those enduring tissues can also contribute to carbon gain: long-lived leaves, which is concomitant with a large LMA (Reich et al. 1992 used 'SLA', which is the inverse of LMA) can contribute to maintaining a positive whole-plant carbon balance under low light availability at time scales of a year or longer (Walters and Reich 1999, Lusk 2002, 2004, Miyashita and Taneno 2014). These studies demonstrated that evergreen shade-tolerant saplings that have leaves with relatively large LMA and long LL can accumulate canopy leaves and gain, or avoid the loss

of, carbon in a low-light environment. Therefore, it can be stated that traits associated with longevity are compatible with those that contribute to whole-plant carbon balance. On the other hand, 'fast-growth traits' also can be adoptive to low-light availability. A relatively small LMA, which is concomitant with a short LL (Reich et al. 1992), is known to clearly correlate with higher whole-plant RGR (Poorter and Remkes 1990, Walters et al. 1993, Reich et al. 1998, Walters and Reich 1999). Such sets of traits are often observed in light-demanding species (Poorter and Remkes 1990, Walters et al. 1993, Kitajima 1994, Reich et al. 1998, Walters and Reich 1999), but these traits can also be advantageous in a low-light environment because of potentially higher carbon gain efficiency. Indeed, several studies have reported a larger observed RGR for light-demanding species than for shade-tolerant species under low-light conditions (Kitajima 1994, Walters et al. 1993, Reich et al. 1998, Walters and Reich 1999, Taneno and Taneda 2007). Therefore, our results do not contradict previous studies, and RGR_{leaf} (Equation 2) could make the theoretical integration of the effects of leaf traits on whole plant carbon balance: species with a small LMA and short LL and those with a large LMA and long LL both can be shade-tolerant depending on their balance. Therefore, shade-tolerant species in deep shade can have various combinations of leaf traits. There are also some works reported that both species having a larger LMA and LL and those having a smaller LMA and LL were found in low-light environments (King, 1994, Baltzer and Thomas 2007).

To maintain positive RGR_{leaf} in the deep shade, having a smaller LMA relative to LL is clearly effective. Considering the regression line of LMA versus LL in this study, LMA tended to be smaller than (about 70 % of) that in the reported global trend (e.g. Reich et al. 1992). It can be because of 'shade

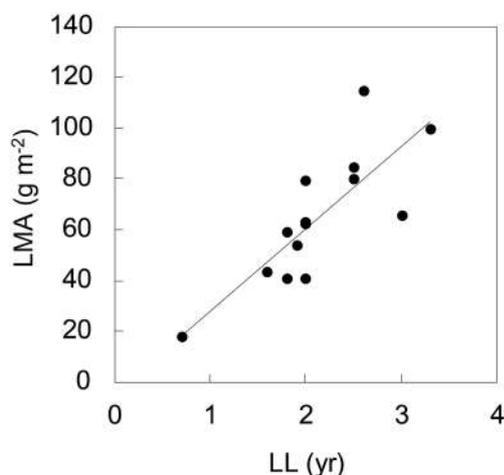


Fig. 4. Leaf mass per area (LMA, g m^{-2}) versus leaf life span (LL, years).

The relationship was observed for the saplings at closed-gap site 2 ($r^2 = 0.65$).

Table 4. Estimated values of NAR at each site

period	before	soon after	after
	disturbances (May 2012- Aug 2012)	disturbances (Sep 2012- Aug 2013)	disturbances (May 2013- Apr 2014)
Open	1,341	-	1,251
gap-gap1	119	442	430
gap-gap2	150	278	262
closed-gap1	43	322	338
closed-gap2	27	237	269

The NAR values calculated using PPFD data at each site and photosynthetic parameters of light response CO_2 assimilation curve which is $(A_{max}, \Phi, \Theta, R_d/A_{max}) = (4.0, 0.05, 0.8, 1/10)$, where A_{max} : the maximum photosynthetic capacity, Φ : initial slope, Θ : convexity and R_d : dark respiration rate.

leaves', which tended to have smaller LMA compared to sun leaves as presented in Onoda et al. (2011). Actually, in this study, LMA became significantly large after improvement of the light availability. For shade leaves LL-LMA relationships has been rarely investigated, but data from King (1994) shows those very similar to ours. LP also indicated to be effective for low-light growth. However, in this study LP was not directly measured, so the results need further investigation. Veneklaas and Poorter (1998), who modeled whole-plant growth of shade-tolerant trees, took 0.55 as LP on the basis of large studies evaluating plant growth allometry: In that study, the

average LMR was shown as 0.37. Our result is comparable to their study: LP values estimated for the saplings are in around 0.45-0.55, and on average, LMR was 0.30. In another study, Miyashita and Tateno (2014) reported average seedling LP values of 0.50 at a closed canopy site (cool-temperate tree species).

Understory light availability and importance of canopy disturbance

Our results suggest that no species can grow vigorously under the fully closed canopy in this forest. In the Yona

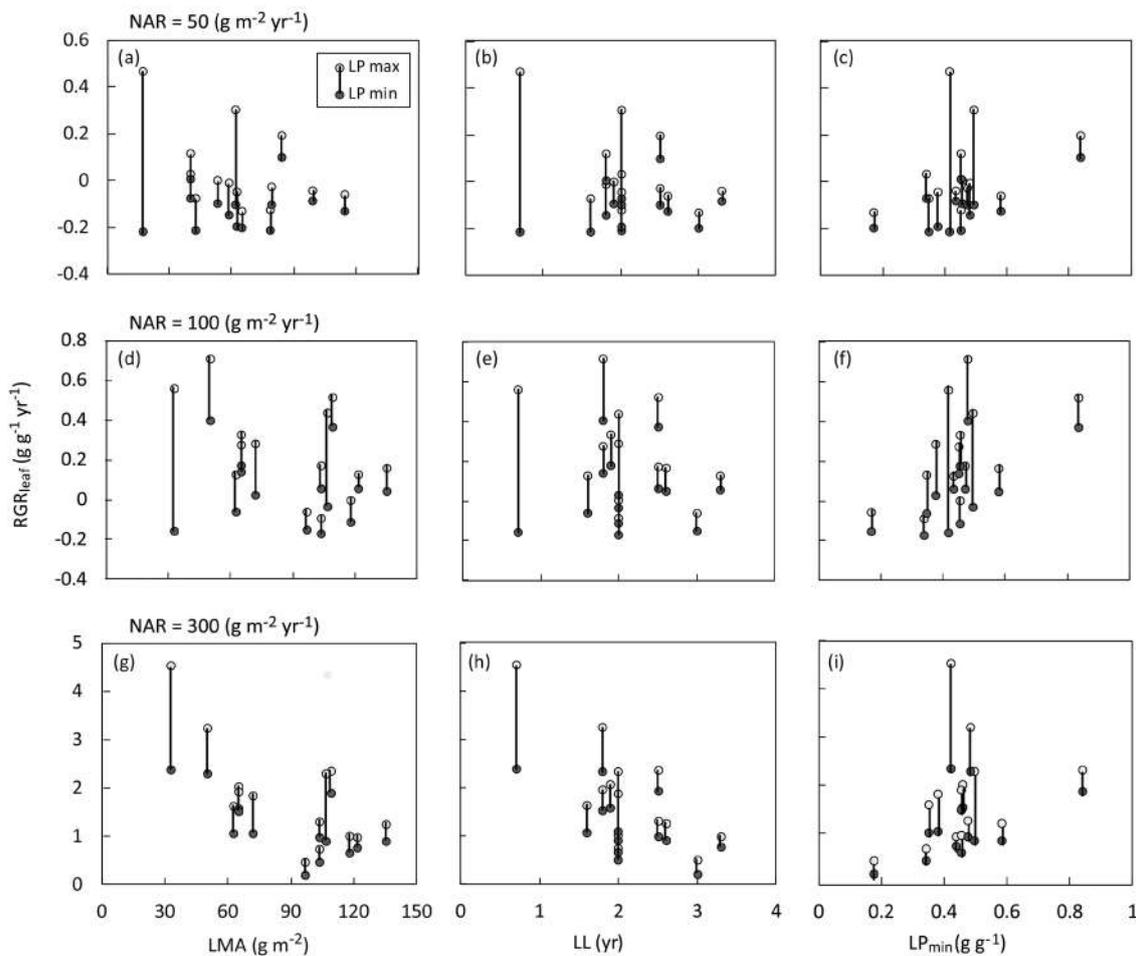


Fig. 5. Simulated RGR_{leaf} of saplings found at closed-gap site 2 shown relative to each leaf traits.

(a-c) Results calculated by using $NAR = 50 \text{ g glucose m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, which is corresponded to NAR beneath the fully closed overstory, and leaf mass per area (LMA) determined in 2012 before the disturbances. (d-f) Results calculated by using $NAR = 100 \text{ g glucose m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, which is corresponded to NAR beneath the canopy with some gaps before the disturbances (which is better lit compared to closed-gap site2 before the disturbance), and LMA determined in 2014 after the disturbances. (g-i) Results calculated by using $NAR = 300 \text{ g glucose m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, which is corresponded to NAR at the understory sites after the disturbances, and LMA determined in 2014 after the disturbances. (a, d, g) The result for LMA, (b, e, h) for leaf life span (LL), and (c, f, i) the minimum value of leaf partitioning rate (LP_{min}). Each line represents an individual showing the range of potential RGR_{leaf} calculated with the maximum value of LP and the minimum value of LP. For relationship of RGR_{leaf} vs each parameter, (a-c) RGR_{leaf} vs LMA, $r^2 = 0.23$ and 0.04 , RGR_{leaf} vs LL, $r^2 = 0.32$ and 0.08 , and RGR_{leaf} vs LP_{min} , $r^2 = 0.11$ and 0.47 for the case of calculation using LP_{max} and LP_{min} , respectively, (d-f) RGR_{leaf} vs LMA, $r^2 = 0.28$ and 0.01 , RGR_{leaf} vs LL, $r^2 = 0.20$ and 0.02 , and RGR_{leaf} vs LP_{min} , $r^2 = 0.28$ and 0.45 for the case of calculation using LP_{max} and LP_{min} , respectively, and (g-i) RGR_{leaf} vs LMA, $r^2 = 0.51$ and 0.46 , RGR_{leaf} vs LL, $r^2 = 0.55$ and 0.36 , and RGR_{leaf} vs LP_{min} , $r^2 = 0.10$ and 0.23 for the case of calculation using LP_{max} and LP_{min} , respectively.

Experimental Forest, the smallest class of NAR required for saplings to have a positive RGR_{leaf} was approximately $50 \text{ g glucose m}^{-2} \text{ year}^{-1}$. This value corresponded to 2% in relative PPFD and $0.5 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ in daily total PPFD. The result is comparable with those of previous studies estimating the whole-plant light compensation points of saplings: understory species were shown to require a NAR of $34\text{--}46 \text{ g m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ (for leaf turnover, King 1994), PPFD of $0.5 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (Lusk and Jorgensen, 2013), or $1.0 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (Baltzer and Thomas 2007). However, there are more shade-tolerant cases, in which the light compensation points were estimated to be less than 0.5% of the relative PPFD (Poorter 1999) or approximately $0.1 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (Lusk et al. 2015). Those high shade-tolerance may be because of so long LL (cf., Lusk et al. 2002). Also, in our previous studies of a cool-temperate deciduous–coniferous mixed forest, we found that even a shade-tolerant tree species (evergreen conifer) had difficulty maintaining a positive carbon balance under a closed evergreen (coniferous) canopy (Miyashita et al. 2012, Miyashita and Tateno 2014). These facts indicate that understory of fully closed evergreen canopy is a hard condition to grow even for a shade-tolerant tree species.

However, light availability in forest understory can be varied even under closed overstory (Montgomery and Chazdon 2001). Further, in our study site, typhoons act as a significant disturbance factor. According to the records of the Japan Meteorological Agency, the two severe typhoons that struck on 27 August 2012 and 29 September 2012 had maximum instantaneous wind velocities of 38.1 m s^{-1} and 57.4 m s^{-1} , respectively. Similar typhoons occur only once every few years and once every two decades, respectively. We thus propose that improvements in understory light availability in this forest will occur at intervals of 5 or more years. Those improvements, however, cannot continue for many years. The decrease in daily total PPFD in May 2014 (Fig. 2) suggests that even a severe disturbance does not improve light availability over few years. Before the 2012 disturbances, in the gap–gap sites that had apparently experienced a disturbance previously, the estimated NAR was around $130 \text{ g glucose m}^{-2} \text{ year}^{-1}$. This value may be sufficient for many tree species to continue to grow, but not allow for vigorous growth. Therefore, in this experimental forest, shade-tolerant species do not need to endure a very low-light availability for decades or more. Instead, they need to wait for a disturbance and continue to grow with the somewhat improved light availability.

Interestingly, such moderate-shade condition may give various species opportunity to regenerate. As suggested in Fig. 5 (g-i), at a higher light availability, species having higher efficiency of productivity (small LMA and short LL) can be further advantageous. In terms of whole plant carbon balance,

relatively low-light understory could work as a nursery for species with various leaf traits.

Conclusion

This study evaluated the saplings whole-plant carbon balance, which is considered to be an important criterion of shade tolerance. For this, we investigated photosynthetic productivity, sapling traits, and RGR_{leaf} in the understory of a subtropical evergreen forest. Then we elucidated that no single trait is advantageous for growth potential in the deep shade, instead, the balance of leaf traits is important in this subtropical forest understory. Our results indicate that most species were unable to maintain a positive whole-plant carbon balance at the fully closed overstory. However, at just a little higher-light availability, saplings having variety of the leaf traits can maintain positive growth. In future, more relationships of leaf traits which directly associate with whole-plant carbon budget, such as LMA, LL and LP, including ontogenic change and environmental plasticity, should be investigated to understand a possibility of maintaining species variety.

Acknowledgements

We sincerely thank Drs. Yasuhiro Kubota, Atsushi Takashima, Buntaro Kusumoto, and Sinjiro Fujii for valuable discussions and technical instruction, and the current and past staff of the Yona Experimental Forest for their technical support. This study was supported by GRENE/NC-CARP.

References

- Baltzer, J. L. and Thomas, S.C. (2007) Determinants of whole-plant light requirements in Bornean rain forest tree saplings. *J. Ecol.*, 95, 1208–1221. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01286.x>
- Enoki, T. (2003) Microtopography and distribution of canopy trees in a subtropical evergreen broad-leaved forest in the northern part of Okinawa Island, Japan. *Ecol. Res.*, 18(2), 103–113. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2003.00549.x>
- Evans, G. C. (1972) *The Quantitative Analysis of Plant Growth*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Feng, Y. L., Cao, K. F. and Zhang, J. L. (2004) Photosynthetic characteristics, dark respiration, and leaf mass per unit area in seedlings of four tropical tree species grown under three irradiances. *Photosynthetica*, 42, 431–437. <https://doi.org/10.1007/s11099-007-0040-2>
- Givnish, T. J. (1988) Adaptation to sun and shade: a whole-plant perspective. *Australian Journal of Plant Physiol.*, 15, 63–92.
- Ichihara, Y. and Yamaji, K. (2009) Effect of light conditions on the resistance of current-year *Fagus crenata* seedlings

- against fungal pathogens causing damping-off in a natural beech forest: fungus isolation and histological and chemical resistance. *J. Chem. Ecol.*, 35, 1077–1085.
- Imaji, A. and Seiwa, K. (2010) Carbon allocation to defense, storage, and growth in seedlings of two temperate broad-leaved tree species. *Oecologia*, 162, 273–281.
- Kikuzawa, K. (1991) A cost-benefit analysis of leaf habit and leaf longevity of trees and their geographical pattern, *Am. Nat.*, 138, 1250–1263. <https://doi.org/10.1086/285281>
- King, D. A. (1994) Influence of light level on the growth and morphology of saplings in a Panamanian forest. *Am. J. Bot.*, 81, 948–957. <https://doi.org/10.2307/2445287>
- Kitajima, K. (1994) Relative importance of photosynthetic traits and allocation patterns as correlates of seedling shade tolerance of 13 tropical trees. *Oecologia*, 98, 419–428. <https://doi.org/10.1007/BF00324232>
- Kobe, R. K. (1999) Light gradient partitioning among tropical tree species through differential seedling mortality and growth. *Ecology*, 80, 187–201. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1999\)080\[0187:LGPATT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[0187:LGPATT]2.0.CO;2)
- Koyama, H. (1981) Photosynthetic rates in lowland rain forest trees of Peninsular Malaysia. *Jap. J. Ecol.*, 31, 361–369.
- Kubota, Y., Katsuda, K. and Kikuzawa, K. (2005) Secondary succession and effects of clear-logging on diversity in the subtropical forests on Okinawa Island, southern Japan. *Biodiver. Conserv.*, 14, 879–901. <https://doi.org/10.1007/s10531-004-0657-4>
- Lusk, C. H. (2002) Leaf area accumulation helps juvenile evergreen trees tolerate shade in a temperate rainforest. *Oecologia*, 132, 188–196. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-0974-9>
- Lusk, C. H. (2004) Leaf area and growth of juvenile temperate evergreens in low light: species of contrasting shade tolerance change rank during ontogeny. *Funct. Ecol.*, 18, 820–828. <https://doi.org/10.1111/j.0269-8463.2004.00897.x>
- Lusk, C. H. and Jorgensen, M. A. (2013) The whole-plant compensation point as a measure of juvenile tree light requirements. *Funct. Ecol.*, 27, 1286–1294. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12129>
- Lusk, C. H., Jorgensen, M. A. and Bellingham, P. J. (2015) A conifer–angiosperm divergence in the growth vs. shade tolerance trade-off underlies the dynamics of a New Zealand warm-temperate rain forest. *J. Ecol.*, 103, 479–488. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12368>
- Marenco, R. A., Gonçalves, J. F. D. C. and Vieira, G. (2001) Leaf gas exchange and carbohydrates in tropical trees differing in successional status in two light environments in central Amazonia. *Tree Physiol.*, 21, 1311–1318. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.18.1311>
- Miyashita, A., Sugiura, D., Sawakami, K., Ichihashi, R., Tani, T. and Tateno, M. (2012) Long-term, short-interval measurements of the frequency distributions of the photosynthetically active photon flux density and net assimilation rates of leaves in a cool-temperate forest. *Agric. For. Meteorol.*, 152, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.08.001>
- Miyashita, A. and Tateno, M. (2014) A novel index of leaf RGR predicts tree shade tolerance. *Funct. Ecol.*, 28, 1321–1329. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12290>
- Miyazawa, Y. and Kikuzawa, K. (2005) Winter photosynthesis by saplings of evergreen broad-leaved trees in a deciduous temperate forest. *New Phytologist*, 165, 857–866. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01265.x>
- Mooney, H. A. (1972) The carbon balance of plants. *Ann. Rev. Ecol. System.*, 3, 315–346. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.03.110172.001531>
- Oguchi, R., Hikosaka, K., Hiura, T. and Hirose, T. (2008) Costs and benefits of photosynthetic light acclimation by tree seedlings in response to gap formation. *Oecologia*, 155, 665–675. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0951-4>
- Onoda, Y., Westoby, M., Adler, P.B., Choong, A.M.F., Clissold, F.J., Cornelissen, J.H.C., Díaz, S., Dominy, N.J., Elgart, A., Enrico, L., Fine, P.V.A., Howard, J.J., Jalili, A., Kitajima, K., Kurokawa, H., McArthur, C., Lucas, P.W., Markesteijn, L., Pérez-Harguindeguy, N., Poorter, L., Richards, L., Santiago, L.S., Sosinski, E.E., van Bael, S.A., Warton, D.I., Wright, I.J., Joseph Wright, S. and Yamashita, N. (2011) Global patterns of leaf mechanical properties. *Ecology Letters*, 14, 301–312. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01582.x>
- Pearcy, R. W. (1983) The light environment and growth of C 3 and C 4 tree species in the understory of a Hawaiian forest. *Oecologia*, 58, 19–25. <https://doi.org/10.1007/BF00384537>
- Poorter, H. and Remkes, C. (1990) Leaf area ratio and net assimilation rate of 24 wild species differing in relative growth rate. *Oecologia*, 83, 553–559. <https://doi.org/10.1007/BF00317209>
- Poorter, L. (1999) Growth responses of 15 rain-forest tree species to a light gradient: the relative importance of morphological and physiological traits. *Funct. Ecol.*, 13, 396–410. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1999.00332.x>
- Reich, P. B., Walters, M. B. and Ellsworth, D. S. (1992) Leaf Life-Span in Relation to Leaf, Plant, and Stand Characteristics among Diverse Ecosystems. *Ecol. Mono.*, 62, 365–392. <https://doi.org/10.2307/2937116>
- Reich, P. B., Tjoelker, M. G., Walters, M. B., Vanderkelen, D. W. and Buschena, C. (1998) Close association of RGR, leaf and root morphology, seed mass and shade tolerance in seedlings of nine boreal tree species grown in high and

low light. *Funct. Ecol.*, 12, 327-338. [https://doi: 10.1046/j.1365-2435.1998.00208.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1998.00208.x)

Shinzato, T., Taba, K., Hirata, E. and Yamamori, N. (1986) Regeneration of *Castanopsis sieboldii* [Fagaceae] forest, 1: Studies on stratification and age structure of a natural stand. *Sci. Bull. College. Agric. Univ. Ryukyus*, 33, 245–256. (in Japanese with English summary).

Tateno, M. and Taneda, H. (2007) Photosynthetically versatile thin shade leaves: A paradox of irradiance-response curves. *Photosynthetica*, 45, 299–302. [https://doi: 10.1007/s11099-007-0049-6](https://doi.org/10.1007/s11099-007-0049-6)

Thornley, J. H. M. (1976) *Mathematical models in plant physiology*. Academic Press, London.

Turnbull, M. H. (1991) The effect of light quantity and quality during development on the photosynthetic characteristics of six Australian rainforest tree species. *Oecologia*, 87, 110-117. [https://doi: 10.1007/BF00323788](https://doi.org/10.1007/BF00323788)

Valladares, F., Allen, M. T. and Pearcy, R. W. (1997) Photosynthetic responses to dynamic light under field conditions in six tropical rainforest shrubs occurring along a light gradient. *Oecologia*, 111, 505–514. [https://doi: 10.1007/s004420050264](https://doi.org/10.1007/s004420050264)

Veneklaas, E. J. and Poorter, L. (1998) Growth and carbon partitioning of tropical tree seedlings in contrasting light environments. In Lambers, H., Poorter, H. and

Van Vuuren, M. M. I. (eds.) “*Inherent variation in plant growth: physiological mechanisms and ecological consequences*”. Backhuys. Leiden, pp. 337–361.

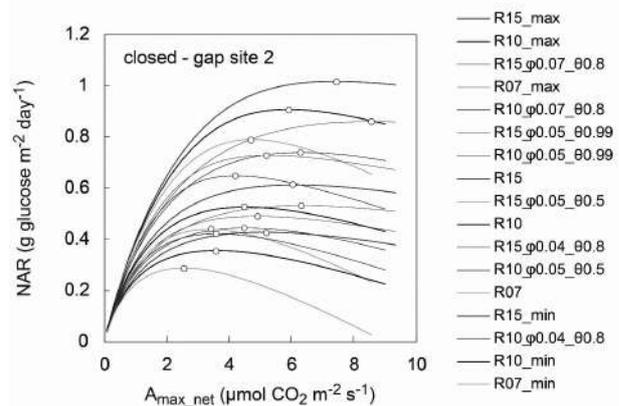
Walters, M.B., Kruger, E.L. and Reich, P.B. (1993) Growth, biomass distribution and CO₂ exchange of northern hardwood seedlings in high and low light: relationships with successional status and shade tolerance. *Oecologia*, 94, 7-16. [https://doi: 10.1007/BF00317294](https://doi.org/10.1007/BF00317294)

Walters, M. B. and Reich, P. B. (1999) Low-light carbon balance and shade tolerance in the seedling of woody plants: do winter deciduous and broad-leaved evergreen differ? *New Phytologist*, 143, 143-154. [https://doi: 10.1046/j.1469-8137.1999.00425.x](https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00425.x)

Way, D. A. and Pearcy, R. W. (2012) Sunflecks in trees and forests: from photosynthetic physiology to global change biology. *Tree Physiol.*, 32, 1066–1081. [https://doi: 10.1093/treephys/tps064](https://doi.org/10.1093/treephys/tps064)

Appendix Table 1. Photosynthetic capacities of leaves at ‘closed-gap patch 2’ after the typhoon disturbances.

Closed-gap site 2	
Species	A _{max_net} ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
<i>Ardisia crenata</i>	2.1
<i>Bredia okinawensis</i>	3.2
	3.3
	1.6
<i>Castanopsis sieboldii</i>	4.1
	5
<i>Cinnamomum doederleinii</i>	3.3
<i>Cinnamomum yabunikkei</i>	4.8
<i>Daphniphyllum teijsmannii</i>	5.1
	2.1
<i>Dendropanax trifidus</i>	3.9
<i>Elaeocarpus japonicas</i>	3.6
<i>Glochidion acuminatum</i>	8.2
<i>Hydrangea liukuensis</i>	2.2
<i>Lasianthus fordii</i>	3.8
<i>Machilus thunbergii</i>	7.3
<i>Meliosma rigida</i>	3.5
<i>Psychotria asiatica</i>	2.3
<i>Pyrenaria virgata</i>	3.6
Mean \pm SD	3.8 \pm 1.7
A _{max_net} : a net value (i.e., A _{max} – leaf dark respiration rate)	



Appendix Fig. 1. An example of the calculated NAR for the understory sites.

Here the results of closed-gap site 2 (May-August 2012) are presented. Potential NARs are shown as several A_{max_net}-NAR curves each of them having different parameter set. A_{max_net} is A_{max} – R_d; R_d, leaf dark respiration rate. The curves show that NAR is maximal at a specific value of A_{max_net}. This is because, especially for a low-light environment, large values of A_{max_net} are ineffectual, but correspond to an increased R_d, which reduces NAR. In each panel, the legend indicates the line and its parameters set applied. Each parameter was changed separately, set at Φ = 0.04, 0.05 or 0.07 CO₂ mol quantum⁻¹, Θ = 0.5, 0.8, or 0.99, and R_d/A_{max} = 1/7, 1/10, or 1/15. ‘R10...’ represents R_d/A_{max} = 1/10 drawn by black lines, and ‘R15...’ and ‘R7...’ represent R_d/A_{max} = 1/15 and 1/7, drawn by gray lines and pale-gray lines, respectively. The standard bold lines labeled ‘R10’, ‘R15’ and ‘R7’ were drawn using (Φ, Θ) = (0.05, 0.8), those labeled ‘_max’ were using (Φ, Θ) = (0.07, 0.99), and ‘_min’ were using (Φ, Θ) = (0.04, 0.5), respectively. Solid thin lines represent Θ = 0.8, and dashed lines represent Φ = 0.5. The circles on each A_{max_net}-NAR curve shows the point at which NAR is maximized, and A_{max_net} is considered to be optimal.

弱光環境における個体の炭素収支と葉の機能的形質間のバランス： 沖縄亜熱帯林林床での研究

宮下 彩奈^{1),2)*}、館野 正樹²⁾

要旨

本研究では、日本の亜熱帯林において、林床稚樹の葉の特性と個体の炭素収支との関連を調べ、弱光下で有利な形質について議論した。はじめに、複数の林床サイトにおいて光量子束密度を計測し、潜在的純生産量 (NAR) を推定した。次に、閉鎖林冠下の稚樹に対して葉の形質を調査し、著者ら開発の「葉に特化した相対成長率 (RGR_{leaf})」を用いて個体の炭素収支を推定した。 RGR_{leaf} は弱光下における個体の成長可能性を、葉面積当たりの乾燥重量 (LMA)、葉寿命 (LL)、葉への資源投資比 (LP) そして NAR のバランスから推定することができる。 $RGR_{leaf} > 0$ の場合、その個体は成長を続けていけると判定される。閉鎖林冠下の NAR 推定値は $< 50 \text{ g glucose m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であり、このような光環境ではほぼすべての稚樹で $RGR_{leaf} \leq 0$ であると予測された。攪乱履歴のあるやや明るいサイトの NAR では、ほとんどの稚樹が正の RGR_{leaf} を持つと予測された。これらの NAR レベルにおいては、LMA、LL とともに RGR_{leaf} と相関関係は認められなかった。ただし LMA と LL には正の相関があり、一般に知られている関係に比べて LL に対する LMA の値が小さかった。一方、より明るいサイトの NAR では、小さな LMA および LL を持つものほど RGR_{leaf} が大きくなると予測された。これらの結果から、弱光環境の林床における炭素収支の維持には、特定の葉の形質よりも形質間のバランスが重要であるといえた。台風攪乱によりもたらされる適度な暗さは、多様な葉の形質を持つ種の存在を可能にしていると考えられる。

キーワード：森林更新、葉寿命、葉面積当たりの乾燥重量 (LMA)、光環境、光合成、相対成長率、耐陰性

原稿受付：令和 2 年 6 月 1 日 原稿受理：令和 2 年 10 月 26 日

1) (現所属) 森林総合研究所 森林災害・被害研究拠点

2) 東京大学大学院理学系研究科附属日光植物園

* 森林総合研究所 森林災害・被害研究拠点 〒 305-8687 茨城県つくば市松の里 1

論文 (Original article)

製材品の曲げ強度における寸法効果パラメータの検討 (第2報) 目視等級区分法による検討

井道 裕史^{1)*}、加藤 英雄¹⁾、長尾 博文¹⁾

要旨

製材の日本農林規格 (JAS 1083) に対応した曲げの基準強度を材せいに応じて低減するための寸法調整係数に対する寸法効果パラメータについて、前報の機械等級区分法による検討に引き続き、本報では目視等級区分法による検討を行った。まず、機械等級区分法も含めた樹種・等級ごとの材せいと曲げ強度との関係から、寸法効果パラメータは樹種・等級ごとに設定するのではなく、単一の値とするのが現実的であると考えられた。次いで、目視等級区分法における基準強度に対する寸法調整係数と、5%下限値/基準強度とを比較した結果、目視等級区分法における曲げ強度の寸法効果パラメータも機械等級区分法による結果から得られたそれと同等の0.4~0.5とすることが妥当であると考えられた。ただし、いくつかの課題は依然残されており、今後得られる材せいの大きい製材品からの曲げ強度のデータも積み重ねた上で、寸法効果パラメータの値は再検証を続けていく必要がある。

キーワード：寸法効果パラメータ、寸法調整係数、曲げ強度、構造用製材、データベース

1. はじめに

前報 (井道ら 2020) では、『「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<8>』(強度性能研究会事務局 2013) に集積された曲げ強度のデータを用いて、寸法効果の影響を調べるとともに、製材の日本農林規格 (JAS 1083) (農林水産省 2007) (以下、製材 JAS という) に対応した機械等級区分構造用製材の曲げの基準強度 (建設省 2000) を、材せいに応じて低減するための寸法調整係数に対する寸法効果パラメータの値を検討した。その結果、標準材せいは 150mm、寸法効果パラメータは 0.4~0.5 程度にするのが適当であるとの結論を得た。

上記の結果は、横架材としての利用が多いスギ、アカマツ、ベイマツの 4 点曲げ試験によるデータを、曲げヤング係数に基づき機械等級区分し、樹種、機械等級、材せいごとに曲げ強度の 5% 下限値を算出し、これを曲げの基準強度 (以下、単に基準強度という) と比較したものである。すなわち、前報は、機械等級区分法により等級区分された製材品の寸法効果パラメータを検討したものであり、目視等級区分法により等級区分された製材品の寸法効果パラメータの検討が課題として残されていた。

そこで、本報では、前報で用いたスギ、アカマツ、ベイマツの 4 点曲げ試験によるデータのうち、目視等級区分法による等級が示されているものを抜き出し、前報と同様の手法により、樹種、目視等級、材せいごとに曲げ

強度の 5% 下限値を算出した。また、5% 下限値と目視等級区分構造用製材の基準強度 (建設省 2000) との比を、前報で提案した寸法効果パラメータと比較することにより、目視等級区分法による寸法効果パラメータの検討を行った。

2. 方法

2.1 検討に用いたデータ

本報で用いたデータは、前報と同様、『「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<8>』に収録されたもののうち、わが国の横架材として用いられることの多いスギ、アカマツ、ベイマツのものである。このうち、試験体寸法、含水率、荷重条件、目視等級、曲げ強度が明示されており、4 点曲げ試験で行われたものを対象とした。さらに、前報および本報の趣旨は、材せいの大きい材料の基準強度を低減することにあるため、製材 JAS の目視等級区分構造用製材のうち、甲種 II、すなわち木口の長辺 (材せい) が 90mm 以上のものを対象とした。目視等級区分の方法は製材 JAS に準じた。ただし、等級区分は試験体の全長で行い、各公立試験研究機関からのデータ提出時に記載された等級と、同じくデータ提出時に記載された節径比のデータを用いて強度性能研究会事務局が等級を求めたもののうち、低い方を採用した。いずれかの記載しかない場合はその等級を採用し、いずれ

原稿受付：令和 2 年 6 月 9 日 原稿受理：令和 2 年 10 月 26 日

1) 森林総合研究所 構造利用研究領域

* 森林総合研究所 構造利用研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

の記載もない場合は検討から除外した。

2.2 曲げ強度の調整と平均値および5%下限値の算出

含水率・試験条件の違いによる曲げ強度の調整方法は、前報と同様の手法を用いた。すなわち、まず、HOWTEC法(飯島ら 2011)に従い、標準含水率を15%として、この状態に曲げ強度を調整した。次に、EN 384 (European Committee for Standardization 2016)に従い、スパンを材せいの18倍とした3等分点4点荷重方式の標準荷重条件での値へ調整した。

以上の方法で得られた含水率15%、標準荷重条件での曲げ強度から、樹種・目視等級・材せいごとのグループを作成した。このうち、ASTM D2915 (ASTM International 2017)の表に記載された最少の試験体数である28体以上の試験体数があるグループから、曲げ強度の各5%下限値を算出した。採用したグループは、スギでは、1級(材せい(mm) = 105、120、210、240)、2級(材せい(mm) = 105、120、180、210、240)、3級(材せい(mm) = 105、120、180、210、240)、アカマツでは、1級(材せい(mm) = 105)、2級(材せい(mm) = 105、210)、3級(材

せい(mm) = 105、210)、ペイマツでは、2級(材せい(mm) = 240、270、300)の合計22グループであった。各グループの曲げ強度の平均値と5%下限値を、前報の機械等級区分法によるものも含めてTable 1に示す。

2.3 曲げ強度の平均値を用いた樹種・等級ごとの寸法効果パラメータの検討

前節で算出された平均値および5%下限値は、当然それぞれの樹種・等級・材せいの影響を受ける。前報で寸法効果パラメータを提案するにあたっては、樹種・機械等級をまとめた総合的な結果から、適切な寸法効果パラメータを判断することを試みた。具体的には、樹種・機械等級・材せいごとに得られた5%下限値を、樹種・機械等級ごとに異なる値が設定されている基準強度で除し(5%下限値/基準強度)で樹種・機械等級を標準化し、材せいと5%下限値/基準強度との関係について検討した。これは、現状、アメリカのASTM D1990 (ASTM International 2016)、ヨーロッパのEN 384、わが国の枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格(JAS 0600) (農林省 1974) (以下、枠組 JAS という)にお

Table 1. 各グループの曲げ強度
Bending strength of each group.

Visual grading													
Sugi (Japanese cedar)				Akamatsu (Japanese red pine)				Douglas fir					
	<i>d</i>	105	120	180	210	240	<i>d</i>	105	210	<i>d</i>	240	270	300
1st grade	<i>n</i>	81	130		60	106	<i>n</i>	34		<i>n</i>			
	Avg	50.6	45.0		34.4	36.2	Avg	59.5		Avg			
	CV	12.8	17.0		24.4	21.0	CV	11.8		CV			
	5% LL	37.8	30.4		19.8	22.6	5% LL	44.9		5% LL			
2nd grade	<i>n</i>	716	440	63	168	216	<i>n</i>	30	46	<i>n</i>	87	28	54
	Avg	47.4	42.8	36.5	31.6	35.7	Avg	58.6	45.3	Avg	39.4	46.3	40.2
	CV	16.7	22.2	14.4	21.5	20.0	CV	21.1	23.3	CV	26.7	16.7	24.0
	5% LL	32.7	26.3	27.9	20.3	25.4	5% LL	31.6	24.8	5% LL	23.1	30.7	22.1
3rd grade	<i>n</i>	286	147	28	82	43	<i>n</i>	47	43	<i>n</i>			
	Avg	47.3	42.5	34.3	32.5	32.8	Avg	43.6	36.8	Avg			
	CV	19.6	18.5	15.1	26.9	22.9	CV	31.7	30.0	CV			
	5% LL	30.8	27.0	25.5	19.6	18.8	5% LL	23.3	17.6	5% LL			
Machine grading													
Sugi (Japanese cedar)													
	<i>d</i>	30	45	60	90	105	120	180	210	240	270		
E50	<i>n</i>	84			34	1140	271	55	140	124	28		
	Avg	44.9			38.7	36.8	34.6	33.6	26.6	26.1	24.5		
	CV	20.4			19.5	16.4	16.5	14.6	15.9	16.0	15.0		
	5% LL	31.2			26.8	26.7	24.2	25.2	19.4	18.1	17.1		
E70	<i>n</i>	104	28	57	45	1582	611	143	252	315			
	Avg	50.0	50.1	47.1	46.5	42.5	40.3	37.9	31.1	31.7			
	CV	15.8	20.5	13.0	14.4	15.0	14.0	15.4	17.2	18.0			
	5% LL	37.4	31.9	35.6	34.7	31.9	30.0	28.5	21.3	21.1			
E90	<i>n</i>	72				956	410	74	98	244			
	Avg	60.4				49.5	46.2	42.2	38.0	38.5			
	CV	10.9				12.9	12.9	14.0	15.4	15.6			
	5% LL	48.0				38.7	36.3	31.9	26.6	28.3			
E110	<i>n</i>					195	93			42			
	Avg					55.7	51.9			46.9			
	CV					11.3	14.8			12.5			
	5% LL					45.0	37.5			34.4			
Akamatsu (Japanese red pine)													
	<i>d</i>	105	120	210	240								
E70	<i>n</i>	34			47								
	Avg	34.1			26.5								
	CV	25.8			23.7								
	5% LL	19.8			16.5								
E90	<i>n</i>	84			43	40							
	Avg	39.9			32.6	33.3							
	CV	24.6			24.3	21.7							
	5% LL	26.5			19.0	18.5							
E110	<i>n</i>	82	42	48									
	Avg	49.7	50.0	41.3									
	CV	22.3	19.2	21.7									
	5% LL	30.6	34.4	25.7									
E130	<i>n</i>	42			37								
	Avg	60.5			49.3								
	CV	18.7			15.5								
	5% LL	41.2			33.1								
Douglas fir													
	<i>d</i>	240	300										
E110	<i>n</i>	46	28										
	Avg	36.5	38.3										
	CV	16.5	21.1										
	5% LL	27.9	22.0										
E130	<i>n</i>	46	29										
	Avg	44.7	44.1										
	CV	17.5	16.8										
	5% LL	33.9	30.3										

d = specimen depth (mm); *n* = number of specimens; Avg = average (N/mm²); CV = coefficient of variation (%); 5% LL = 5% lower limit (N/mm²).

いては、いずれも単一の寸法効果パラメータが用いられており、樹種・等級ごとのそれは設定されていないことを考慮したものである。

しかし、仮に材せいに対する寸法効果が樹種・等級（目視・機械とも）ごとに異なるものであれば、それぞれの条件に応じた寸法効果パラメータを求める必要が生じる。そこで、本報で対象とする目視等級区分法によるものだけでなく前報での機械等級区分法によるものの結果も含めて、樹種・等級ごとに材せい（90mm 以上）と曲げ強度との関係性を求め、各寸法効果パラメータが異なるかどうかの検討を行った。なお、ここでは樹種・等級ごとの平均的な曲げ強度の傾向を検討することとし、曲げ強度は5%下限値ではなく平均値を用いた。

2.4 目視等級区分法における寸法調整係数の検討

2.2 節で、目視等級区分法により樹種・目視等級・材せいごとに5%下限値を算出した。これを用いて、前報と同様に、5%下限値と目視等級区分法による基準強度との比を求めた。この比を、前節の結果を踏まえた上で、前報で提案した機械等級区分法による曲げ強度の寸法効果パラメータ（0.4～0.5）と比較した。標準材せいは、現行の製材 JAS の目視等級区分構造用製材の基準強度の元となった値が正角と平角の実験値から算出したとされている（井道 2018）ことから、前報と同様 150mm とした。材せいが 150mm を超えた範囲において寸法調整係数による

低減を行った。以上は次式で表される。

$$k_1 = \begin{cases} 1, & (d \leq 150) \\ \left(\frac{150}{d}\right)^{s_R}, & (d > 150) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 k_1 は標準荷重条件における寸法調整係数、 d は材せい (mm)、 s_R はスパン／材せい比が一定の場合の寸法効果パラメータ（前報の機械等級区分法では 0.4 または 0.5）である。

3. 結果と考察

3.1 樹種・等級ごとの材せいと曲げ強度の平均値との関係

Fig. 1 に樹種・等級ごとの材せいと曲げ強度の平均値との関係を示す。凡例の各等級の横には、材せいを x 、曲げ強度を y とした累乗方程式を示した。寸法効果パラメータは指数の絶対値で表される。

まず、等級ごとの曲げ強度の違いを見ると、等級が1つしかないベイマツの目視等級区分法を除き、目視等級区分法・機械等級区分法ともに、いずれの樹種においても等級が上位になるにつれ材せいと曲げ強度の回帰曲線も上側にシフトする傾向が見られた。各樹種のうち最もプロットの多いスギでは、目視等級区分法よりも機械等級区分法の方が等級による強度の差が明確に現れた。この要因の一つとして、目視等級区分法は機械等級区分法に比べて強度的な精度は高いとは言えない（井道 2019）ことが挙げられる。さらに、本報による目視等級区分は

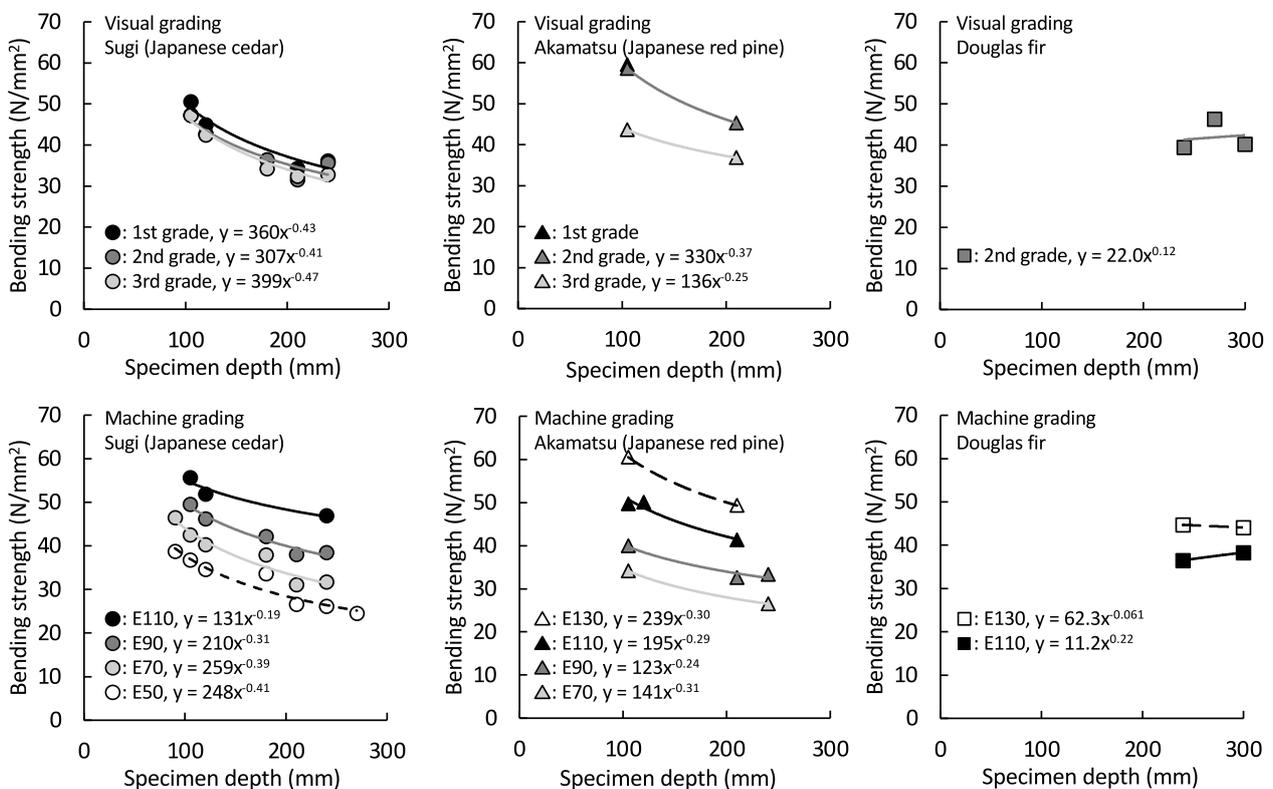


Fig. 1. 樹種・等級ごとの材せいと曲げ強度の平均値との関係
Relationship between specimen depth and average of bending strength by species and grades.

試験体の全長で行ったため、等級を決める要因となった欠点が曲げモーメントが最大で破壊確率の高い荷重点間に存在しなかった試験体では、等級を過小評価する傾向にあった可能性も考えられる。アカマツでは、スギほどプロットが多くはないものの、目視等級区分法においても2級と3級の曲げ強度の差が明確に見られた。この要因として、アカマツは長さ方向に狭い間隔で輪生節が多く含まれるため、荷重点間に破壊の要因となる節が入る確率が高く、等級に応じた傾向が出やすかった可能性が考えられる。また、アカマツの機械等級区分法では、スギのそれと同様、等級による曲げ強度の差が明確に見られた。最もプロットが少ないベイマツでは、機械等級区分法では等級の差は現れたものの、E110では材せいが大きい方が曲げ強度も大きくなった。これは目視等級区分法の2級においても同様であった。ただし、ベイマツは試験体数が非常に少ないため、この結果のみでは材せいによる曲げ強度の影響は明確ではない。

次に、等級ごとの寸法効果パラメータについて各樹種のうち最もプロットの多いスギを見ると、目視等級区分法の寸法効果パラメータは0.41～0.47であり、等級による差異は小さかった。機械等級区分法の寸法効果パラメータの範囲は0.19～0.41であり、E110の0.19のみやや小さいものの、他の等級は0.3～0.5の範囲に収まっていた。他の樹種については、プロットが少なく明確ではないが、アカマツでは目視等級区分法・機械等級区分法ともに寸法効果パラメータは0.3前後にあった。

最後に、樹種ごとの違いについては、スギ以外のプロットが少ないため比較は困難であるが、比較的プロットの多い機械等級区分法によるスギとアカマツとを比べると、ややスギの方が寸法効果パラメータの平均値が大きい傾向にあった。

以上の結果をまとめると、比較的数据が充実しているスギの目視等級区分法・機械等級区分法およびアカマツの機械等級区分法の結果から、平均値を用いた樹種・等級ごとの寸法効果パラメータは概ね0.3～0.5の範囲にあることがわかった。さらに、目視等級区分法の強度的な精度の問題、欠点の存在位置による等級を過小評価する可能性、樹種・等級ごとに寸法効果パラメータを設定するためのデータが十分でないことを考慮に入れると、寸法効果パラメータは、現時点では個別に設定するのではなく、海外規格や枠組JASと同様に単一の値とするのが現実的であると考えられる。

3.2 目視等級区分法における基準強度に対する寸法調整係数と5%下限値/基準強度との比較

前節の結果から、寸法効果パラメータは、樹種・等級ごとに設定するのではなく単一の値とすることとした。次に、その値を検討するため、5%下限値と目視等級区分法における基準強度（建設省2000）の比（5%下限値/基準強度）により樹種・目視等級を標準化したものと、材

せいとの関係を求めた。Fig. 2に、材せいと、樹種・目視等級ごとの5%下限値/基準強度および寸法調整係数との関係を示す。前報の機械等級区分法による結果では、5%下限値/基準強度は、材せいが30～105mmあたりまでは1より大きい値を、120～180mmあたりは1に近い値を、210mmを超えると1より小さくかつ減少傾向を示した。Fig. 2の目視等級区分法による結果を見ると、非常にばらつきは大きいものの、材せいが大きくなるに従い5%下限値/基準強度が減少する傾向は機械等級区分法と同様であった。ただし、目視等級区分法は機械等級区分法に比べて、全体的に5%下限値/基準強度のプロットが寸法調整係数 k_1 よりも上側に位置している傾向にあり、標準材せいとした材せい150mmを超えた範囲においても、材せいが210mmのスギの2プロットを除き、5%下限値/基準強度は、寸法効果パラメータ s_R を0.4あるいは0.5とした寸法調整係数 k_1 よりも大きかった。

このことから、目視等級区分法による寸法効果パラメータは、機械等級区分法によるそれよりも緩やかにするという選択も考えられる。しかし、前述したように、欠点の存在位置により等級を過小評価する傾向で曲げ強度が高めとなり、その結果5%下限値も高めに算出された可能性がある。さらに、目視等級区分法によるデータが乏しいことや、目視等級区分法の強度的な精度の問題を考えると、現時点では目視等級区分法による曲げ強度の寸法効果パラメータは機械等級区分法によるそれと同等の0.4～0.5とするのが妥当であると考えられる。

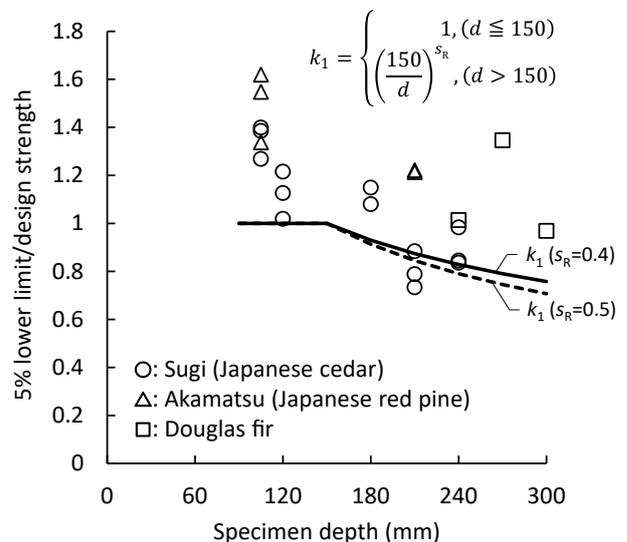


Fig. 2. 材せいと、樹種・目視等級ごとの5%下限値を基準強度で除したものおよび寸法調整係数との関係 Relationship between specimen depth and 5% lower limit/design strength and size effect factor.

d = specimen depth (mm); k_1 = size adjustment factor; s_R = size effect parameter for constant span/specimen depth.

4. 結論

製材 JAS に対応した基準強度を、材せいに応じて低減するための寸法調整係数に対する寸法効果パラメータについて、前報の機械等級区分法による結果に引き続き、『「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<8>』に集積されたスギ、アカマツ、バイマツの曲げ強度データを用いて、目視等級区分法について検討した。

まず、樹種・等級ごとの材せいと曲げ強度との関係について、スギの目視等級区分法・機械等級区分法およびアカマツの機械等級区分法の結果から、平均値を用いた樹種・等級ごとの寸法効果パラメータは概ね 0.3 ~ 0.5 の範囲にあることがわかった。一方、目視等級区分法の強度的な精度の問題、欠点の存在位置による等級を過小評価する可能性、樹種・等級ごとに寸法効果パラメータを設定するためのデータが十分でないことを考慮すると、寸法効果パラメータは、現時点では樹種・等級ごとに設定するのではなく、海外規格や枠組 JAS と同様に単一の値とするのが現実的であると考えられた。

次に、目視等級区分法において、基準強度に対する寸法調整係数と 5% 下限値/基準強度とを比較すると、標準材せい 150mm を超える範囲の 5% 下限値/基準強度は、仮定した寸法調整係数を下回ることは一部を除いてなかった。ただし、上記と同様の理由により、目視等級区分法による寸法効果パラメータも機械等級区分法によるそれと同等の 0.4 ~ 0.5 とすることが妥当であると考えられた。

ただし、特にスギ以外のデータが十分でないこと、目視等級区分法における欠点の存在位置による等級の確認などの課題は依然残されており、今後増加するであろう材せいの大きい製材品から得られる曲げ強度のデータも積み重ねた上で、寸法効果パラメータの値は再検証を続けていく必要がある。

謝辞

本報は、日本建築学会木質構造運営委員会木質材料強度検証小委員会（2016 年 4 月～2020 年 3 月、主査：中島史郎）の一環として行ったものである。また、「製材品の強度性能に関するデータベース」の参画機関である公立試験研究機関の担当者の方々に感謝する。

引用文献

- ASTM International (2016) ASTM D1990 – 16 Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests of full-size specimens.
- ASTM International (2017) ASTM D2915 – 17 Standard practice for sampling and data-analysis for structural wood and wood-based products.
- European Committee for Standardization (2016) EN 384:2016 Structural timber – Determination of characteristic values

of mechanical properties and density.

- 井道 裕史 (2018) 我が国の製材規格と許容応力度の変遷. 森林総合研究所研究報告 17 (1), 1-33.
- 井道 裕史 (2019) 15. グレーディング. 創立 70 周年記念出版等委員会編 “最新 木材工業事典 [新版]”, 日本木材加工技術協会, 29-30.
- 井道 裕史・加藤 英雄・長尾 博文 (2020) 製材品の曲げ強度における寸法効果パラメータの検討. 森林総合研究所研究報告 19 (1), 79-87.
- 飯島 泰男・園田 里見・青井 秀樹 (2011) 構造用木材の強度評価法および基準値算出法. 日本住宅・木材技術センター “構造用木材の強度試験マニュアル”, 88-92.
- 建設省 (2000) 平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1452 号. 木材の基準強度 F_c , F_t , F_b 及び F_s を定める件. (最終改正: 平成 27 年 8 月 4 日国土交通省告示第 910 号).
- 強度性能研究会事務局 (2013) “「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<8>”, 54pp.
- 農林省 (1974) 昭和 49 年 7 月 8 日農林省告示第 600 号. 枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格. (最終改正: 令和 2 年 6 月 1 日農林水産省告示第 1066 号).
- 農林水産省 (2007) 平成 19 年 8 月 29 日農林水産省告示第 1083 号. 製材の日本農林規格. (最終改正: 令和元年 8 月 15 日農林水産省告示第 661 号).

Influence of the size effect parameter on the bending strength of lumber (Part 2) Examination by the visual grading classification

Hirofumi IDO^{1)*}, Hideo KATO¹⁾ and Hirofumi NAGAO¹⁾

Abstract

By extending the previous investigation of the machine grading classification, this study examined the visual grading classification to determine the size effect parameter for the size adjustment factor used to reduce the design bending strength in the Japanese agricultural standard for sawn lumber (JAS 1083). First, by examining the relationship between the specimen depth and bending strength of various species and grades, including the machine grading classification, it was deemed realistic to adopt at present a single value for the size effect parameter for all species and grades, rather not by species and grades. Then, after comparing the size adjustment factor for the design strength for the visual grades with a 5% lower limit/design strength, it was considered logical to assume the same value for the size effect parameter of the visual grading classification as to be 0.4-0.5 that obtained from the machine grading classification. However, some problems persist, and the values of the size effect parameters need to be reexamined after accumulating bending strength data obtained from the large-diameter lumber, which will increase in the future.

Key words : size effect parameter, size adjustment factor, bending strength, structural lumber, database

Received 9 June 2020, Accepted 26 October 2020

1) Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* Department of Wood Engineering, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, JAPAN; E-mail: ido@fpri.affrc.go.jp

論文 (Original article)

電磁誘導式自動走行フォワーダによる集材作業の無人化に関する研究

毛綱 昌弘^{1)*}、山口 浩和¹⁾、鈴木 秀典¹⁾、山口 智¹⁾、宗岡 寛子¹⁾、佐々木 達也¹⁾、
有水 賢吾¹⁾、飯澤 宇雄²⁾、大東 史典²⁾、阿部 慶一³⁾、小長井 信宏⁴⁾、辻 浩志⁵⁾

要旨

集材作業の無人化により伐出作業の労働生産性を向上させることを目的として、自動走行フォワーダを試作開発した。試作機は以下に示す3つの特徴を有する。①作業道上の走行だけでなく、土場における荷おろし作業も自動化されているが、先山における積込作業は有人作業で行う。②既存の作業道を利用できるように、スイッチバック走行も可能な電磁誘導方式による自動走行機能を有する。③作業員が搭乗して運転するときと同じ速度で自動走行可能とすることで、作業能率を落とさない。開発した試作機を用いて集材作業試験を行った結果、先山における積込作業等の有人で行わなければならない作業時間は、一日の約3分の1程度となることが分かった。既存作業道の幅員拡幅工事等を必要としない精度で、試作機は作業道上を走行可能であった。しかしながら、一日の集材量を土場に貯めておくには、極積み作業の行えない荷おろし機構を採用している試作機では広い土場が必要であった。自動走行フォワーダを用いた無人集材作業は出材量が大きく、集材距離が長いほど、労働生産性の向上に貢献できる可能性がある。今後、自動走行に必要な電線の敷設等付帯作業を含めた生産性向上のために、積込作業と造材作業の兼務試験とともに、積込作業の自動化に向けた研究が必要である。

キーワード：フォワーダ、自動走行、自動荷おろし、スイッチバック、電磁誘導式

1. はじめに

高性能林業機械の普及によって伐出作業の生産性は向上してきているが、素材生産量を大きくできない原因の一つとして、フォワーダによる長距離集材があげられている。基幹路網として林道が未整備な地域においては、林道の代わりに森林作業道を開設して、トラックの代わりにフォワーダを用いて集材作業を行っている現場がある。林道とは違い、曲率、幅員、縦断勾配等が厳しい森林作業道を用いた集材作業では、走行速度を大きくすることは、作業の安全性の点からも困難である。先山と土場間の距離である集材距離が長くなると、一サイクル中に占める走行時間が長くなり、一日の往復回数が減ることにより素材生産量とともに労働生産性も低下することになる。

この問題を解決するために、作業班の構成人数を一人減らしても素材生産量を保つことで、労働生産性の向上を図ることを目的として、自動走行フォワーダによる集材作業の無人化を試みたので、その結果について報告する。具体的には、伐木、木寄せ作業を担当する作業員2名、造材作業を担当する作業員1名、フォワーダで集材作業を担当する作業員1名の4名から構成される作業班にお

いて、フォワーダの運転手1名を減らして、3名で作業班を構成しても素材生産量を低下させることなく作業が可能となれば、労働生産性は1.33倍向上することになる。さらに、余剰な作業員によってさらに作業班を再構成することにより、素材生産量を拡大することも可能になると考えられる。

フォワーダによる集材作業は、先山における材の荷台への積込作業、材を積載した状態で先山から土場への実走行、土場における荷おろし作業、空荷で土場から先山まで戻る空走行の繰り返し作業である。本報告の試みでは、フォワーダの運転手を削減することを目的としているので、先山における積込作業のみは有人作業とし、その他の工程である作業道上の走行と荷おろし作業を無人化することとした。これは、先山には伐木、造材作業工程等を担当する作業員が働いているので積込作業を兼務できるのに対し、土場に作業員を配置すると作業班の構成人数を減らすことは不可能となるためである。このため、試作したフォワーダには自動走行機能だけでなく、自動荷おろし機能も装備することとした。また、作業員を削減しても生産量を保つ必要があることから、有人作業と同等の能率で作業を行えるように、自動走行機能に

原稿受付：令和2年4月6日 原稿受理：令和2年12月14日

1) 森林総合研究所 林業工学研究領域

2) 魚谷鉄工株式会社

3) 株式会社舞鶴計器

4) 兵庫県立農林水産技術総合センター森林林業技術センター

5) 丹波市森林組合

* 森林総合研究所 林業工学研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

速度調整機能を組み入れることとした。さらに、既存の作業道を有する現場においても利用可能な技術とするために、自動走行機能はスイッチバック走行にも対応可能となるように、試作機開発を実施した。

筆者らは、今までにフォワーダの自動走行に関する試みを行ってきた。慣性計測装置および車速計等を用いて自己位置推測を行い、既知の走行経路上の位置と比較することで自動走行を行うデッドレコニング方式を試した結果、作業道上という外乱の多い環境下では内界センサだけで走行することは困難であり、外界センサによる補正が必須であることを明らかにするとともに、補正方法として永久磁石を用いる方法を提案している（毛綱ら 2000）。また、全地球測位システム（Global Navigation Satellite System）から得られる位置情報を用いて自動走行を行う試みも行い、皆伐地のような開空度の高い現場では自動走行可能であったが、間伐地のように開空度が低い現場では十分な精度で車両の位置を検出できず、自動走行不可能であった（毛綱ら 2015）。これらの方法では、使用可能な現場が限定的であるとともに、慣性計測装置等の高額なセンサを使用しなければならず実用化にまでは至っていない。このため、自動走行用センサとして誘導方式を用いて試作機の開発を行った。誘導方式ではあらかじめ走行経路上に検出対象物を設置する必要があり、その対象物には永久磁石、光反射テープ、電線等が用いられているが、試作機では電線を用いることとした。これは、光反射テープは粉塵等の多い環境では使用困難であり、永久磁石は作業道の補修時に作業機にくっついてしまうため、検出対象物として不適と判断したからである。電線による誘導方式を用いた屋外自動走行車両には、ゴルフカート、無人防除機等の実用例があるとともに（戸崎ら 1996, 戸崎ら 1997）、検出対象物となる電線、検出器となるピックアップコイルとも安価であることも理由である。

2. 試作機の概要および試験方法

2.1 フォワーダ

試作機は魚谷鉄工株式会社製フォワーダ AK-33 を使用して、各種の改造を実施した。本機は多くの国産フォワーダと同様に走行装置はゴムクローラ式の車両であり、変速機は HST (Hydro Static Transmission) で構成されている。最大積載量は 3t で、国産フォワーダとしては小型機に分類される。無人化集材作業を可能とするために、市販機を改造した点は以下の通りである。①エンジン回転数を調整する调速機を電子制御できるように、従来の機械式操作レバーから電動シリンダ式へ変更した。②走行速度等を調整する走行操作レバーを使用しなくても、油圧パイロット式の HST 操作レバーを電子制御できるように、電磁比例式圧力調整弁を追加して、左右の履帯回転数を電子制御できるように改造した。③エンジン回転数を検出できるように、非接触式の回転数検出センサを装備し

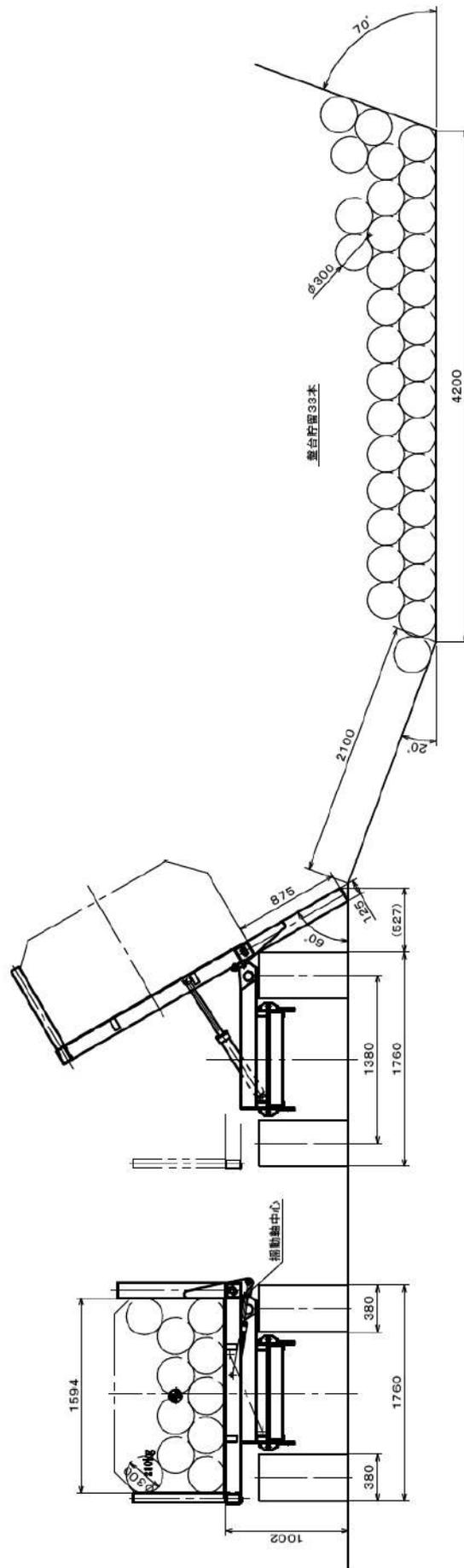


Fig. 1. サイドダンプ式荷台と可動式建て木
Side dump carrier and movable stake

た。④先山ではプロセッサ等による積込作業を想定するとともに、土場では自動荷おろし機構を使用することから、グラップルローダを装備していない。これらの改造を実施した結果、試作機の質量は4,850kgとなり、市販機に比べ350kg増加した。

2.2 自動荷おろし機能

試作機では土場における荷おろし作業を自動化するために、Fig.1に示すように車体右方向に荷台を傾けるサイドダンプ方式を採用している。荷おろし時には建て木を車体外側に倒すことによりスロープとして機能させて、おろした材のばらつきを抑えている。荷台のリフト用シリンダおよび建て木の駆動用シリンダには、それぞれリミットスイッチが装備されており、荷おろし作業時のシリンダ停止位置の検出用として使用している。また、それぞれのシリンダには、絞り弁を装備して伸長速度を調整するとともに、各シリンダの動作タイミングに時間差を設けることが可能な仕様となっている。

荷おろし作業を行う土場では、おろした材がばらつきのを抑えるのに加え、材を貯めておくために荷おろし用の盤台を作設して作業を行う仕様とした。盤台は Photo1



Photo1. 荷おろし盤台
Unloading facility

に示すように間伐材を材料とし、土場の傾斜を利用して作設されている。一つの盤台には、試作機の荷台3杯分の材を蓄積できるように設計している。これは、盤台に貯められた材は、直接トラックのクレーンによって積込作業を行うことを想定しており、クレーンの可動範囲から盤台の大きさを決める必要があるからである。このため、1日の集材量を蓄積するには、一つの盤台だけでは容量が足りないことになり、土場に盤台は複数作設する必要があるのに加え、荷おろし作業時には盤台を識別し、選択して荷おろし作業を行う必要がある。盤台の識別を行うとともに、フォワーダの停止位置の指定には、QRコードを用いた立て看板を利用している。このQRコードは後述するスイッチバック折り返し地点の指定等にも使用されている。先山からフォワーダが自動走行を開始する前に、盤台の識別番号を入力することで、土場では指定された盤台に停止して荷おろし作業を行う仕様としている。

2.3 自動走行機能

試作機の自動走行機能は電磁誘導方式を採用している。あらかじめ走行経路に沿って電線を敷設しておき、自動走行時には電線に交流電気を供給することで電線周りに磁界が生じる。フォワーダの車体底面には Fig.2 および Photo2 に示すように、ピックアップコイルと呼ばれる検



Photo2. 試作機外観
Prototype appearance

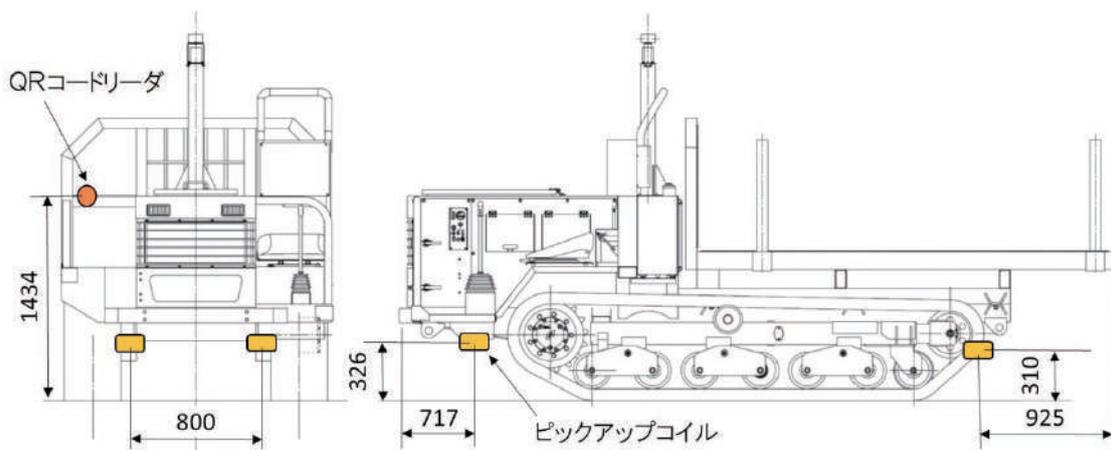


Fig. 2. 試作機のセンサ配置位置
Sensor placement position

出器が左右に装備されており、電線を跨いだ状態で走行することで、電磁誘導作用によって左右のコイルには誘導電流が発生する。この電流の大きさは電線からの距離にほぼ比例するので、左右の誘導電流値を比較することで、電線とフォワーダの相対位置が計測可能となる。この電流値の差を利用して、左右の履帯に速度差を発生させることにより、誘導電線に沿って自動走行が可能となる。

誘導電線の敷設方法は、作業道の中央部に電線を置いていくだけであり、特に固定等は行っていない。しかし、湧水等によって電線が移動してしまう可能性のある個所は、Photo3に示すようにペグを路面に打ち込んで電線を固定している。使用している電線はゴムキャブタイヤケーブル 2PNCTの単線 3.5sq を使用しており、電線の防護具としてポリエチレン製のカバーを装備した状態で使用している。電線に供給される発信機は電源としてポータブルバッテリーを使用しており、一日の集材作業に用いるには、222Whの容量で充分であった。発信機からは、1,597Hzの周波数で、約 900mA の電流が誘導電線に流れている。敷設する電線の長さによって電流が変化してしまうため、発信機には可変抵抗を直列に接続することで対応しており、発信機のアンプの能力による制限から、電気を供給可能な電線の最大長さは 2km であるため、集材距離 1km までの作業道に対応可能な仕様となっている。

試作機では、ピックアップコイルを前後両方に装備することにより、前後進とも自動走行可能な構造としている。前進時には車体前方のコイルを使用し、後進時には後方のコイルを使用している。自動走行機能を前後進ともに対応させた理由は、土場で荷おろし作業を終えたフォワーダが先山まで戻る際に、土場において U ターン動作を行うためには、誘導電線を敷設するだけでは対応不可であることと、土場に旋回するスペースを設けなければならないからである。試作機では、先山から土場までは前進で走行し、土場で荷おろし作業を終えた後は方向転

回せずに、そのままの向きで土場から先山まで後進走行することで、集材工程の 1 サイクルを終了できる仕様としている。

2.4 スイッチバック走行

既存の森林作業道に対して、拡幅、線形変更等の工事を実施しなくても、自動走行機能が使用できるように開発することが望まれるが、森林作業道ではスイッチバックを設ける路線も存在することから、自動走行機能をスイッチバック走行にも対応可能となるように開発した。誘導電線をスイッチバック区間に沿って折り返して敷設するだけでは、折り返し地点で磁界が相殺されて相対位置の検出が不可能となるため、誘導電線を二本用いる方法を考案した。この方法では、誘導電線に電流を供給する発信器を二つ用意しなければならないが、二本の誘導電線に異なる周波数の交流電流 (1,597Hz と 1,477Hz) を供給し、スイッチバックの折り返し地点で追従する周波数の切り替えと同時に進行方向を変更することで、スイッチバック走行を実現している。折り返し地点の検出には、盤台の識別用にも用いている QR コードを利用した立て看板を用いている。スイッチバック区間を有する作業道への誘導電線の敷設方法を Fig.3 に示す。図中の実線は作業道上の誘導電線を示し、この電線を跨いでフォワーダは自動走行を行う。破線は作業道の脇もしくは林内に取り廻される電線を示している。

2.5 走行速度調整機能

フォワーダが作業道上を自動走行できても、走行速度が遅くなり集材量が減ってしまうのは労働生産性を大きくすることはできない。また、森林作業道は、急勾配、急カーブ等のように低速で走行しなければならない区間ばかりではなく、ある程度の速度で走行可能な区間も存在する。電磁誘導方式による自動走行では、車両と電線の相対位置は判別可能であるが、走行経路の線形は判別



Photo3. 誘導電線および固定方法
Induction wire and fixing method

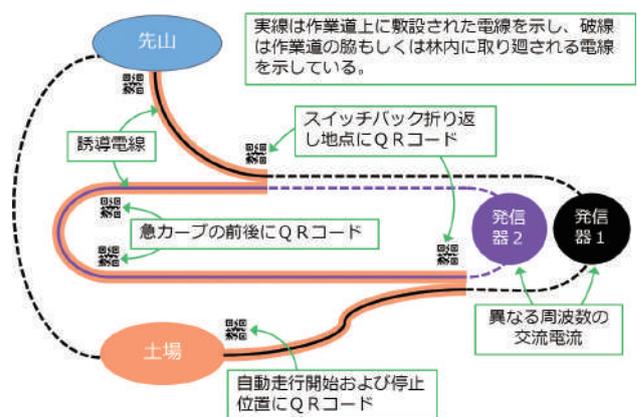


Fig. 3. スイッチバック区間を有する森林作業道への誘導電線敷設方法
Method of laying induction wire on strip road with switchback section

不能であることから、走行速度の設定は困難である。無人搬送車等では急カーブ等の最も走行条件の悪い場所における走行速度を設定速度として、一定速で走行している例が多い。

この問題を解決するために、試作機では有人運転時の走行速度を記憶して、自動走行時にはその速度を再現する方法とした。有人運転による走行を開始してからの経過時間に対する走行速度を記憶しておき、自動走行時には時間再生することで速度設定を行う方法としている。作業道のようなオフロードでは、スリップ等の影響により履帯の回転数が一定でも走行速度は一定にならず、速度制御の誤差がなくても同じ経過時間に同じ場所を走行しているとは限らないため、低速で走行しなければならない箇所を高速で走行してしまう危険性がある。この誤差を修正するためにも、QRコードによる立て看板を用いて修正している。あらかじめ作業道の脇に Photo4 に示すように立て看板を設置しておき、作業員が搭乗して運転した際に、その QR コード脇を通過した時間も記憶しておくことで、自動走行時には時間補正を行う方法とした。立て看板をたくさん設置するほど、設定速度の誤差は小さくなるが、設置の手間がかかる方法となっている。フォワーダには Fig.2 に示すように、QR コードリーダー（キーエンス SR-200W）が車体側面に装備されており、センサは自己発光式のため、林内のような暗い場所においても識別可能な仕様となっている。

作業員による有人運転は、朝始業時に行うことを想定している。これは、森林作業道への落石、倒木、あるいは路肩の崩壊のチェックを兼ねて有人走行することで、自動走行を安全に利用可能であると考えたからである。また、作業する日によって天候、路面状況等が異なることから、降雨等の影響によって走行速度を小さくして作業を行わなければならない場合にも対応可能な方法でもある。このため、一日に先山と土場を十往復できれば、



Photo4. QR コードと立て看板
QR code and vertical sign

試作フォワーダを用いて 30m^3 の集材が可能となるが、10回のうちの1回は有人運転、9回は無人運転で作業を行うこととなり、作業班を構成する作業員の一人は、朝始業時の有人運転も行わなければならないことになる。

3. 結果および考察

3.1 自動荷おろし試験結果

土場に作設しなければならない盤台の大きさを求めるために、サイドダンプ機能によって荷おろしされた材が、どの程度ばらつくのか、盤台を架設して荷おろし作業試験を行った。試験を行う前に、荷台のリフト用シリンダと建て木用シリンダの速度および動作タイミングの調整を実施した。荷おろし試験は自動走行終了時の停止位置精度の計測とともに行った。フォワーダの停止位置に関しては、トータルステーションを用いて停止位置および停止時の車体の向きを計測した。その後、サイドダンプ機能によって荷おろし作業を行い、おろされた材の両端の距離を用いてばらつき程度の計測を行った。荷台からおろす材は変更せずに、試験は繰り返し10回行った。試験に使用した材は24本、材長4.2m、末口径16～23cm、元口径20～27cm、材積 2.92m^3 であった。

フォワーダは進行方向に対して $\pm 10\text{cm}$ 以内、横方向は $\pm 2.5\text{cm}$ 以内の精度で停止可能であった。また、停止時の車体の向きは ± 0.5 度以内で収まっていた。停止時の車体の向き θ とおろした材のばらつき l の関係を Fig.4 に示す。停止時の車体の向きは、ばらつきの大きさにほぼ無関係であり、材長の1.3倍程度までばらつくことが確認できた。荷台からダンプ機能によっておろされる材は一本一本荷台から落ちるわけではなく、荷台がある程度以上にまで傾くと全ての材が一度に滑落して落ちはじめ、落ちた後に材同士がぶつかり合い、材の表面で滑って横方向にすべることが確認できた。材のばらつきは、材表面の湿り具合、皮むけの状態、荷台に積載されているときの材の木口のそろえ方、元口と末口の割合等、様々な要因によって影響されると考えられたが、荷おろし用盤台の横幅は材長の1.3倍以上、可能であれば1.5倍程度確保する必要があることが確認できた。

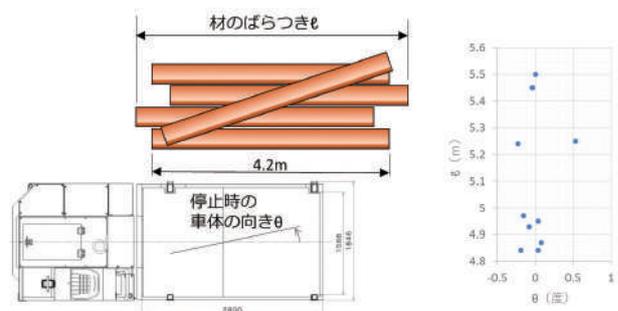


Fig. 4. 車体の向きと材のばらつきの関係
Relationship between body orientation and logs dispersion

3.2 自動走行試験結果

自動走行フォワーダは既存の作業道に対して幅員の拡幅工事等を必要とせず使用可能となるのか検証するために、作業道上を自動走行するフォワーダの走行軌跡を計測して評価を行った。走行試験時には、追尾式トータルステーションによって座標計測を行い、慣性計測装置で車体姿勢を補正して、走行軌跡を取得した。試験条件としては荷台への積載の有無、前後進、縦断勾配、直線部と曲線部等の走行条件を変更して実施した。結果の一例を Fig.5 に示す。試験は同じ経路を 10 回繰り返し走行している。0m 地点から 100m 地点への移動時には、約 5 度の下り勾配となっており、荷台に材を積載して前進で

走行している。100m 付近から 0m 付近への移動時は、上り勾配となり、空荷台で後進走行している結果となる。図には、フォワーダの走行軌跡から作業道幅員方向の走行位置を算出し、最も作業道の右端を走行した際と左端を走行した際の差を最大値として示している。誘導電線は作業道に固定されていないため、自動走行試験を繰り返すことにより電線が左右方向に移動してしまうことが確認できたため、電線の位置ではなく、左端と右端の中間値と計測値の差を誤差として、絶対値の平均値を求めている。走行試験の結果、幅員方向の誤差は平均 10cm 以内で走行可能であった。しかしながら、最大誤差は曲線部において 60cm 程度の誤差が発生することも確認できた。他の路線も用いて走行試験を繰り返した結果、自動走行時の幅員方向の制御誤差は直線部よりも曲線部において、前進よりも後進、無積載時よりも積載時のほうが大きくなり、有人運転で操作が難しい場合には制御誤差も大きくなるという傾向であった。前進時と後進時の誤差に関しては、ピックアップコイルと車体の旋回中心までの距離の差が後進時には短くなるため、誤差が大きくなったと考えられた。最も誤差が大きくなる条件は積載時の下り勾配のときであり、有人運転時において最も運転操作が難しい条件時と同様の結果であった。これらの結果より、作業道を作設する際には曲線部等の走行条件が厳しい箇所では、幅員が拡幅されている（林野庁 2010）ことを考慮すると、試作機は既存の作業道に十分に対応可能な精度で走行可能であると考えられた。

延長距離約 600m の作業道に、QR コードを用いた立て看板を 6 か所配置し、各補正点における通過時間の差を計測した結果を Fig.6 に示す。試験は前進および後進走行ともに材を積載した状態で 3 回ずつ実施し、通過時間が遅れた場合を正として表記している。試験区間では中間点あたりが最も標高が高くなっているため、フォー

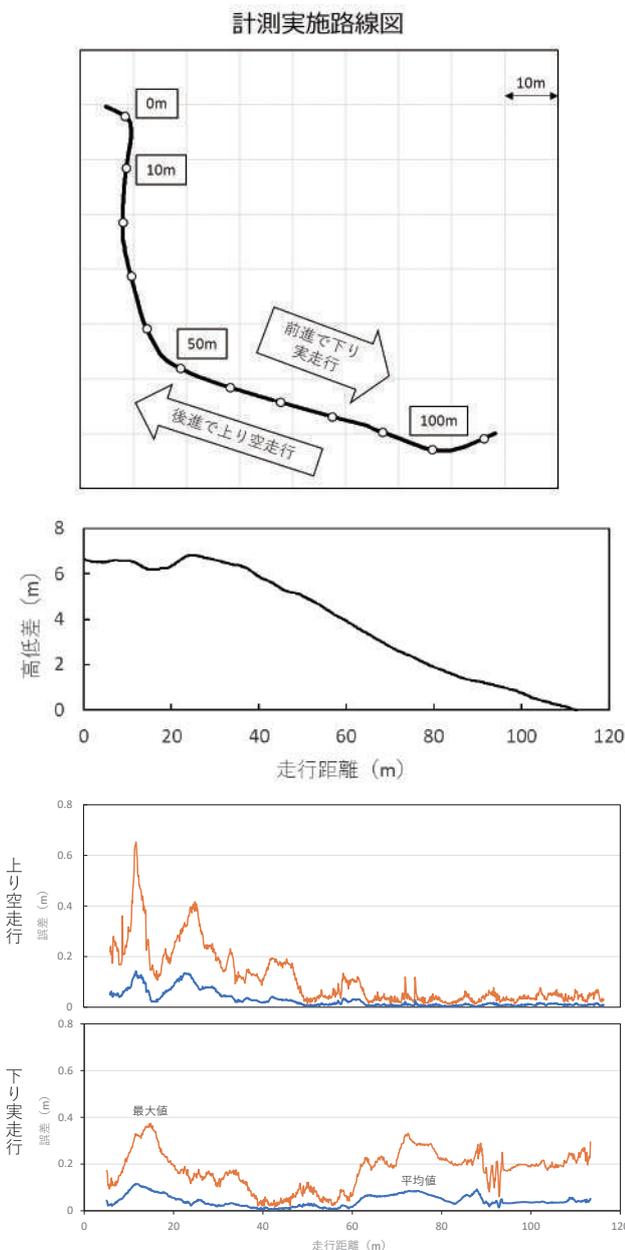


Fig. 5. 自動走行時の幅員方向の制御誤差
Control error in width direction during automated traveling

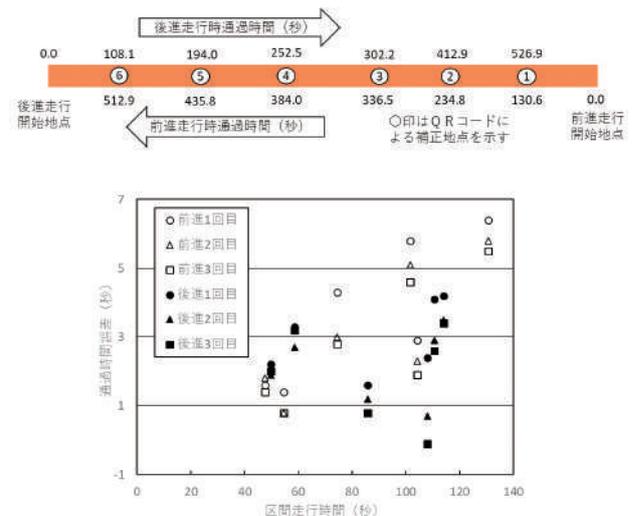


Fig. 6. 自動走行時の進行方向誤差計測結果
Measurement result of traveling direction error during automated traveling

ダは走行を開始してからしばらく上って、その後は下るといふ試験区間設定となっている。区間走行時間が長くなるほど、誤差である時間差は大きくなる傾向はあるが、走行時間と誤差は比例関係でなく、最大で6%程度の誤差が生じていることが確認できる。この結果から、QRコードを用いた時間補正は一定の間隔おきに設置するという方法ではなく、急カーブや横断排水溝のように低速で走行しなければならない箇所を通過する前に確実に実施できるように、立て看板の設置箇所を選択する方法が望ましいと考えられた。

3.3 実証試験結果

兵庫県丹波市山南町五ヶ野の作業地において、試作機を用いた集材作業の実証試験を実施した。Fig.7に示すように、現場は2.2haの伐区と土場を約661mの作業道で接続している間伐作業地であり、伐区内には数百mの作業道が突っ込み型で数本作設されている。土場には、荷おろし用の盤台を4基製作したため、約25mの細長い土場を用意する必要があった。実証試験では、安全性を考慮して伐木造材作業は先行して実施し、伐区内の作業道の脇に集材木数本の樁が散在している状況から実施した。作業員は森林組合の作業員1名であり、先山において油圧ショベルをベースとするグラップルを用いてフォワーダへの積込作業を行い、積込作業終了後には、自動走行開始地点までフォワーダを有人運転で移動し、フォワーダが自動走行している時間は作業を行わないという方法で作業時間の分析を行った。土場まで自動走行して、荷おろし作業を終えたフォワーダは、ほぼ一定の時間で自動走行開始地点まで戻ってくる。作業員は、自動走行開始地点で自動停止したフォワーダを有人運転で積込作業ポイントまで移動させて積込作業を始めるとともに、荷台が満載になるまでグラップルおよびフォワーダの二台の車両を運転して、移動と積込作業を繰り返している。

試験に先立ち、無人集材作業に必要な付帯工事の作業時間を計測した。有人作業では必要のない工事とし

て、誘導電線の敷設工事、荷おろし盤台の作設工事が必要になるとともに、作業終了時にはその撤去作業が必要となる。実証試験地において、それぞれの作業を二人で行った結果、QRコードを用いた立て看板の設置工事も含め、誘導電線を敷設するのに要した時間は22,155秒であり、撤去工事には9,017秒の時間を要した。また、試験地では4基の荷おろし盤台を製作したが、作設時間に19,555秒を要し、撤去作業は2時間以内で終了した。誘導電線の敷設距離と作業時間は比例すると仮定すると、この結果から、作業道1kmに電線を敷設するには3人日、撤去するには1.3人日を要し、荷おろし盤台の作設には1.8人日、撤去には0.7人日を要するので、無人集材作業を行うために必要となる付帯工事人工数は7人日であった。

実証試験は2週間に分けて行い、伐区内の材を全て集材するためにフォワーダが往復した回数は46回となり、総材積122.3m³の集材作業に要した総作業時間は103,083秒であった。平均集材量は2.7m³、1サイクルに要した時間は2,241秒であり、各要素作業の平均割合はFig.8の通りであった。サイドダンプ機能によって荷おろしされた材のばらつき頻度を計測した結果をFig.9に示す。Fig.4の試験時と現場が異なるため、荷おろし盤台の細かな形状は異なっているが、おろした材の材長4mに対して、材のばらつきは約1.4倍以内に収まっていることが確認できる。しかしながら、材長の1.5倍以上の6mを超えるばらつきを示す場合もあり、土場に余裕がある場合は盤台を極力離して作設すべきであると考えられた。先山では、一人の作業員がフォワーダとグラップルの二台の車両を運転して積込作業を行っており、その作業に要した時間の頻度分布をFig.10に示す。積込作業に要した時間の平均値は538秒であったが、作業が進むに従い積込作業ポイントまでの移動距離が長くなり時間を要した結果となっている。

実証試験時の各要素作業の時間分析結果を用いて、集材距離が1kmの場合の作業時間を推定した結果をTable1

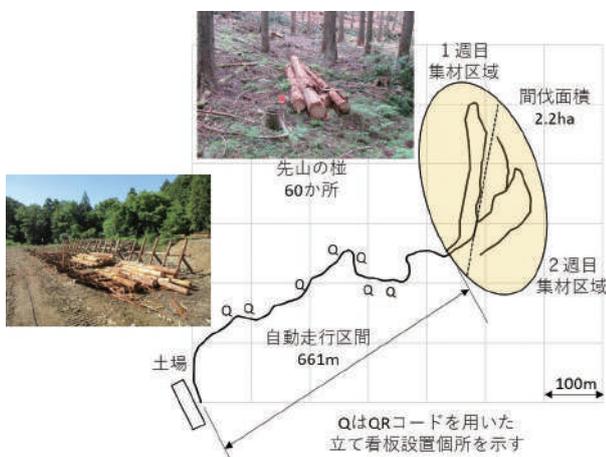


Fig. 7. 実証試験地概況図
Overview of demonstration test site

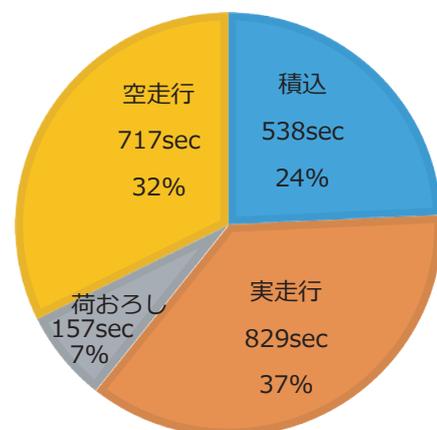


Fig. 8. 各要素作業の平均所要割合
Average required percentage of each elementary operation

に示す。表には積載量が3tの小型フォワーダを用いて10サイクル往復して30m³の集材を行う場合と、5tの大型フォワーダで6サイクル集材する場合を試算した。ただし、走行時間は集材距離に、積込時間は積載量に比例すると仮定して計算している。小型フォワーダの場合、作業に要する時間は30,937秒と試算され、有人作業による積込作業時間は一日の約20%の時間を費やすとともに、1日の作業時間を大きく超える結果となった。大型では作業時間は20,952秒に短縮され、1日で30m³の集材作業が可能となるが、有人作業の積込作業時間が約30%まで

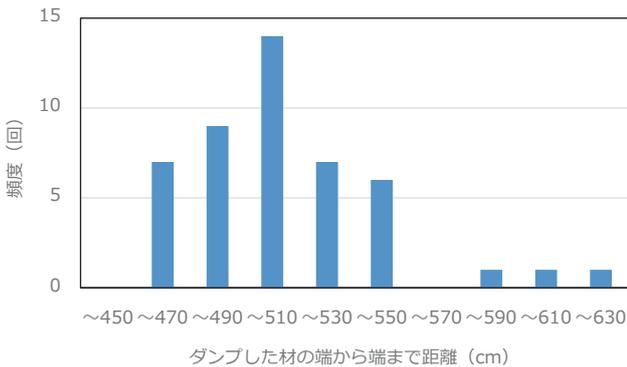


Fig.9. 実証試験地における材のばらつきの度数分布
Frequency distribution of log dispersion at the demonstration test site

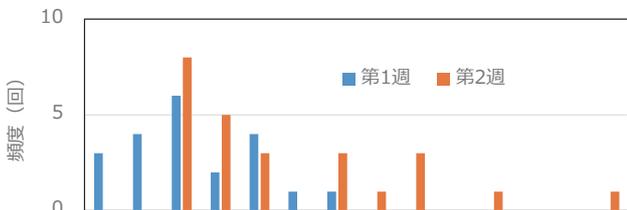


Fig. 10. 実証試験地における積込作業時間の度数分布
Frequency distribution of loading time at the demonstration test site

Table 1. 作業能率の予測結果

Work efficiency prediction results

	平均作業時間 10 サイクル 集材距離 661m 積込材積 2.7m ³	推定作業時間 10 サイクル 集材距離 1km 積込材積 3m ³	推定作業時間 6 サイクル 集材距離 1km 積込材積 5m ³
積込	5,378	5,976	5,976
実走行	8,291	12,543	7,526
荷おろし	1,569	1,569	941
空走行	7,171	10,849	6,509
合計	22,409	30,937	20,952

(単位 秒)

大きくなった。Table1の結果を用いて、集材距離が集材材積及びフォワーダへの積込作業時間の占める割合を試算した結果をFig11に示す。集材距離が短くなれば集材材積は上がるが、積み込み作業時間の占める割合が長くなり、造材作業と兼務することは不可能となる可能性がある。集材距離が長くなると集材材積は低くなるが、作業時間割合が小さくなるため、造材作業との兼務の可能性が高くなると考えられる。今回の実証試験では、造材作業と兼務しながらの試験までは実施できなかったが、プロセッサ等の造材機械は10m³/h程度の作業能率があり待ち時間が発生しやすいことから、集材距離が長くなれば兼務の可能性は十分にありとされる。

実証試験地の条件では、積込作業に要した時間は1サイクルの24%となっていることから、先山の作業員の一人は1日の作業時間を6時間とすると1時間半は自動走行フォワーダへの積込作業に携わらなければならない。さらに、最初の一回目は有人運転によって走行速度を入力しなければならないことから、1サイクルに要する約37分間もフォワーダの運転時間に追加される。これらの時間を合計すると、作業員一名の一日の作業時間のうち、約3分の1は自動走行フォワーダの運転に携わらなければならない結果となった。造材作業等との兼務として、フォワーダへの積込作業がどの程度の時間まで可能であるか、検証の必要があると考えられる。また、先山における積込作業が自動化できれば、このような問題も生じないことから、積込作業の自動化に向けた研究も必要であるとされる。

4. おわりに

試作開発したフォワーダは、GNSSを利用した自動走行フォワーダの試作機(毛綱ら2016)に比べ、電磁誘導方式は立木等の影響を受けないことから利用可能な環境が広がるとともに、自動走行時の制御誤差も小さくなっていることから、より実用化に近い開発が行えたと考え

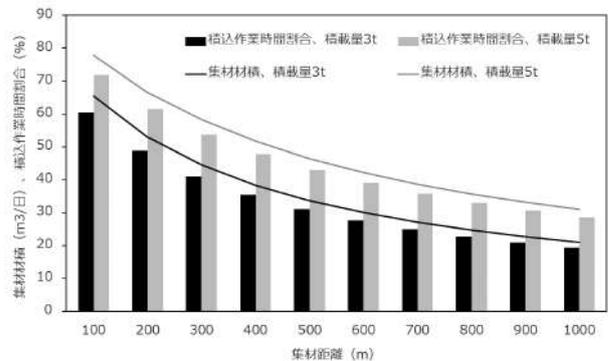


Fig. 11. 集材距離がフォワーダへの積込作業時間割合に与える影響
Effect of logging distance on loading time ratio to forwarder

ている。しかしながら、自動走行時の制御精度が良くなるほど、森林作業道の同じ個所を何回も繰り返し走行するため、曲線部や急勾配な箇所では路面にわだちができてしまうことが確認できた。有人運転時であれば、走行する個所を意図的に変更することでわだちの生成を避けながら作業を行うのに対し、自動走行フォワーダによる作業では誘導電線の位置を変更する以外にわだちを防ぐ手段がない。今回の実証試験では作業道のメンテナンスの手間等を考慮できていないことから、今後検証の必要があると考えられる。

また、誘導制御方式による自動走行の欠点として、電線の破断事故が考えられる。実証試験地の土場等では、誘導電線がトラックや油圧ショベルによって踏みつけられて断線するような事故は起きなかった。しかし、作業道上において、急カーブのような箇所では路面にわだちが形成されるとともに、わだちの土がカーブ外側に押し出されるため、電線もカーブ外側に移動してしまい、破断する事故がみられた。電線が破断すると、電気が流れなくなるので自動走行フォワーダは安全に停止できるように設計されているが、電線の破断箇所を特定することはできない。このため、この電線破断時の対応方法に関しても検討を行う必要がある。

さらに、今回の実証試験ではプロセッサ等の造材機械による作業と兼務しながら、フォワーダへの積込作業を行うまでの試験を実施することはできなかった。集材距離によって積込作業に要する作業時間割合が変化し、集材距離が短すぎると造材作業との兼務が不可能となり、作業員を削減することは不可能となることから、素材生産量を減らすことなく作業員を削減できる集材距離を求めるために、兼務作業の試験を行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究では、実証試験を行うにあたり、丹波市森林組合の協力をいただいた。ここに深謝する。なお、本研究は「革新的技術開発・緊急展開事業(うち地域戦略プロジェクト)」の補助を受けて実施した成果である。

引用文献

- 毛綱 昌弘・山口 浩和(2000) 永久磁石とジャイロの組み合わせによる自律走行運材車の開発. 森林利用学会誌, 15, 197-204.
- 毛綱 昌弘・山口 浩和・伊藤 崇之・鈴木 秀典・千坂 修・高崎 綾信・草野 兼光・北原 成郎(2016) 遠隔操作機能と自動走行機能によるフォワーダの操作支援技術の開発. 森林総合研究所研究報告, 15, 91-102.
- 林野庁(2010) 森林作業道作設指針の制定について. 林野庁長官通知 656号.
- 戸崎 紘一・宮原 佳彦・市川 友彦・水倉 泰治(1996)

誘導ケーブル式果樹無人防除機の開発—無人走行システム—. 農業機械学会誌, 58, 101-110.

戸崎 紘一・宮原 佳彦・市川 友彦・水倉 泰治(1997) 誘導ケーブル式果樹無人防除機の開発—無人散布システム—. 農業機械学会誌, 59, 87-96.

Research on unmanned logging operation by automated traveling forwarder using electromagnetic induction

Masahiro MOZUNA^{1)*}, Hirokazu YAMAGUCHI¹⁾, Hidenori SUZUKI¹⁾, Satoshi YAMAGUCHI¹⁾,
Hiroko MUNEOKA¹⁾, Tatsuya SASAKI¹⁾, Kengo USUI¹⁾, Takao IIZAWA²⁾,
Fuminori OHIGASHI²⁾, Keiichi ABE³⁾, Nobuhiro KONAGAI⁴⁾ and Hiroshi TSUJI⁵⁾

Abstract

To improve labor productivity, we developed an unmanned work system for the logging process in the form of an automated traveling forwarder. As the vehicle does not require a driver for a large part of operating time without reduction in the amount of production, thus resulting in increased labor productivity. The prototype has three features: 1) Traveling on a strip road and the unloading process are automated, whereas the loading of logs from a felling site is performed by workers. 2) The vehicle has an automated traveling function that uses an electromagnetic induction system, which allows switchback driving so that existing strip roads can be used. 3) By making it possible to automatically travel at the same speed as when an operator is driving, working efficiency is not reduced. The result of conducting a logging operation test using the prototype confirmed that the time required for manned work processes such as loading from felling sites was about one-third of the day. In addition, the prototype vehicle was able to travel accurately without the need to widen the existing strip road. However, it was also confirmed that a prototype equipped with an unloading mechanism will require a larger yard to store the logs because it cannot make piles. The present study showed that the unmanned logging using an automatic traveling forwarder have possibility to improve labor productivity. Further researches on automatic loading systems and ancillary work such as laying electric wires for unmanned operation are necessary.

Key words : forwarder, automated traveling, automated unloading, switchback, electromagnetic induction

Received 6 April 2020, Accepted 14 December 2020

1) Department of Forest Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Uotani Co., Ltd.

3) Maizurukeiki Co., Ltd.

4) Forestry Technology Institute, Hyogo Prefectural Technology Center for Agriculture, Forestry and Fisheries

5) Tamba City Forestry Association

* Department of Forest Engineering, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, JAPAN; E-mail: mozuna@ffpri.affrc.go.jp

論文 (Original article)

超臨界二酸化炭素の圧力差を利用した木材の効率的なアセチル化処理

松永 正弘^{1)*}、小林 正彦¹⁾、神林 徹¹⁾、石川 敦子¹⁾

要旨

本研究では、試片寸法が 100 mm (L) × 20 mm (R) × 20 mm (T) のスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) 心材試片について、超臨界二酸化炭素を用いてアセチル化処理し、繊維方向における質量増加率 (WPG) の分布状態を測定した。アセチル化処理には連結された 2 つの反応容器を用い、一方の反応容器には垂直に固定された全乾試片と少量の無水酢酸を入れ、もう一方の反応容器に入っている超臨界二酸化炭素と無水酢酸を注入してアセチル化処理を行った。処理条件は 120 °C・10 ~ 12 MPa・8 時間で、無水酢酸量は様々に変化させて実験を行った。その結果、超臨界二酸化炭素とともに注入された無水酢酸は、主として上部木口面から試片内部へと浸透し、試片上側のアセチル化反応に寄与することが明らかとなった。一方、試片とともに反応容器に入っていた無水酢酸は主として底部木口面から試片内部へと浸透して、試片下側のアセチル化反応に寄与することが示唆された。これは、容器内で気体となっている無水酢酸が、注入された超臨界二酸化炭素によって試片内部へ押し込まれたためと推測される。そして、両方の反応容器に適量の無水酢酸を入れておくことで、試片全体を均一にアセチル化できることが明らかとなった。

キーワード：超臨界二酸化炭素、アセチル化、スギ、質量増加率、無水酢酸

1. はじめに

木材の水分に対する寸法安定性を向上させる優れた改質処理法の一つとして、アセチル化処理が挙げられる。その性能発現機構は、木材の主要構成成分であるセルロース、ヘミセルロースおよびリグニン中に多数存在している親水性の水酸基を疎水性のアセチル基に置換することで水分の吸着点を減少させ、水分の吸脱着による木材の膨潤収縮を抑制するところに依る (Stamm and Tarkow 1947, Clermont and Bender 1957, Rist and Arseneau 1957)。また、嵩高いアセチル基が木材内に導入されて細胞壁が膨潤し、乾燥しても収縮しにくくなることで、水分に対する寸法安定性の向上が図られている (Stamm 1964, Minato et al. 2003)。さらに、アセチル化木材は耐朽性や耐蟻性にも優れていることが知られており (Stamm and Baechler 1960, Goldstein et al. 1961, Rowell et al. 1987)、駅舎やルーバーといった、屋外での使用事例も近年増加している。

通常、木材のアセチル化処理は、木材中に無水酢酸を注入した後に多量の無水酢酸中に浸漬させ、加熱してアセチル化反応を進行させる「液相法」か、もしくは加熱して気化させた無水酢酸中に木材を静置し、アセチル化

反応を進行させる「気相法」と呼ばれる方法で行われる。液相法は木材の内部まで均一にアセチル化することが可能であるが、処理に大量の薬液が必要である。一方、気相法は少量の薬液でのアセチル化処理が可能であり、単板のような薄い材料には有効であるが、厚みのある木材では内部まで均一にアセチル化処理することが困難である。

そこで筆者らは、気体並の高い拡散浸透性と液体並の高い溶解力を有している超臨界二酸化炭素 (臨界温度：31.0 °C、臨界圧力：7.4 MPa) を用いた、新たなアセチル化処理法の開発を進めてきた。繊維方向の寸法が 5 mm のスギ心材をアセチル化処理する実験では、木材と無水酢酸を入れた密閉容器内に超臨界二酸化炭素を注入してアセチル化処理を行ったところ、気相法並みの少ない無水酢酸使用量でも 3 ~ 4 時間の処理で 75 ~ 80 % の抗膨潤能 (ASE) を持つアセチル化木材を製造できることが示された (Matsunaga et al. 2010)。また、スギ以外の国産材やスリランカ産材についても、超臨界二酸化炭素を用いたアセチル化処理によって高い寸法安定性が得られることが示された (松永ら 2014, Matsunaga et al. 2016)。

さらに、繊維方向の寸法が 100 mm のスギ心材試片を

原稿受付：令和 2 年 7 月 6 日 原稿受理：令和 2 年 12 月 28 日

1) 森林総合研究所 木材改質研究領域

* 森林総合研究所 木材改質研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

アセチル化処理する実験では、超臨界二酸化炭素が高压であることを利用し、高压状態の超臨界二酸化炭素および無水酢酸を、真空に近い状態の容器に入った木材へ注入することで、木材の内部まで均一にアセチル化反応が進行することが明らかとなり（松永ら 2015）、この方式で製造されたアセチル化木材は5年間の土中埋設試験においても高い耐朽性および耐蟻性が示された（松永ら 2020）。この圧力差を利用したアセチル化処理は、将来、実大材の処理を検討する際にも有効な手法になり得ると考えられる。ただし前報では、アセチル化処理に使用する無水酢酸の量などについて、最適な処理条件を見出すまでには至らなかったため、無水酢酸が過剰に使用されていた可能性がある。超臨界二酸化炭素を用いたアセチル化処理の大きな利点の一つは無水酢酸使用量の少なさであり、本処理法における無水酢酸の浸透状況を把握することで、処理条件の最適化を図る必要がある。

そこで本研究では、圧力差を利用した超臨界二酸化炭素による木材のアセチル化処理について、様々な無水酢酸使用量でアセチル化処理を実施し、材内のアセチル化反応の進行度を評価した。そして、本処理法における無水酢酸の浸透状況について検討を行うとともに、試片中心部まで均一にアセチル化されるために最適な無水酢酸使用量の決定を試みた。

2. 実験方法

2.1 実験試料

実験には、試片寸法が 100 mm (L) × 20 mm (R) × 20

mm (T) のスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) 心材試片を用いた。60℃で48時間減圧乾燥し、全乾状態にした後（平均全乾比重:0.406）、以下に記すアセチル化処理に供した。

2.2 超臨界二酸化炭素を用いたアセチル化処理

超臨界二酸化炭素を用いたアセチル化処理は、Fig.1 に示すような装置を用いて実施した。バルブ付きの連結管で接続された2つの耐圧容器（内径 80 mm、高さ 180 mm）のうち、反応容器①には無水酢酸（純度 97.0% 以上）を 5 ~ 100 ml 入れ、バルブを閉じて密閉した。10 分間アスピレータで減圧したのちに二酸化炭素（純度 99.9% 以上）ポンペを開栓し、容器内圧力がポンペ内圧力と同じ 6.0 MPa になるまで直接二酸化炭素を充填させた。そして、マグネチックスターラーを用いて約 300 rpm で攪拌させながら、送液ポンプで液体二酸化炭素を容器に送液しつつ、容器外周に取り付けられている電気ヒータで加熱して、容器内温度及び圧力を 120 °C / 20 ~ 24 MPa に調整した。一方、反応容器②には無水酢酸 5 ~ 100 ml と、無水酢酸と直接接触しないよう脚付きのカゴに全乾状態のスギ心材試片 1 本を L 方向が垂直になるようにステンレス製の針金で固定して入れ、連結管の真下に試片が位置するように設置して密閉した。そして、10 分間アスピレータで減圧したのちにマグネチックスターラーで攪拌させながら加熱し、容器内温度を 120 °C に調整した。反応容器①及び②の容器内温度がともに安定したところで連結管のバルブを開栓し、圧力差を利用して反応容器①内の無水酢酸と超臨界二酸化炭素を反応容器②内へ瞬時に注入した。その後、連結管のバルブを再び閉じ、反応

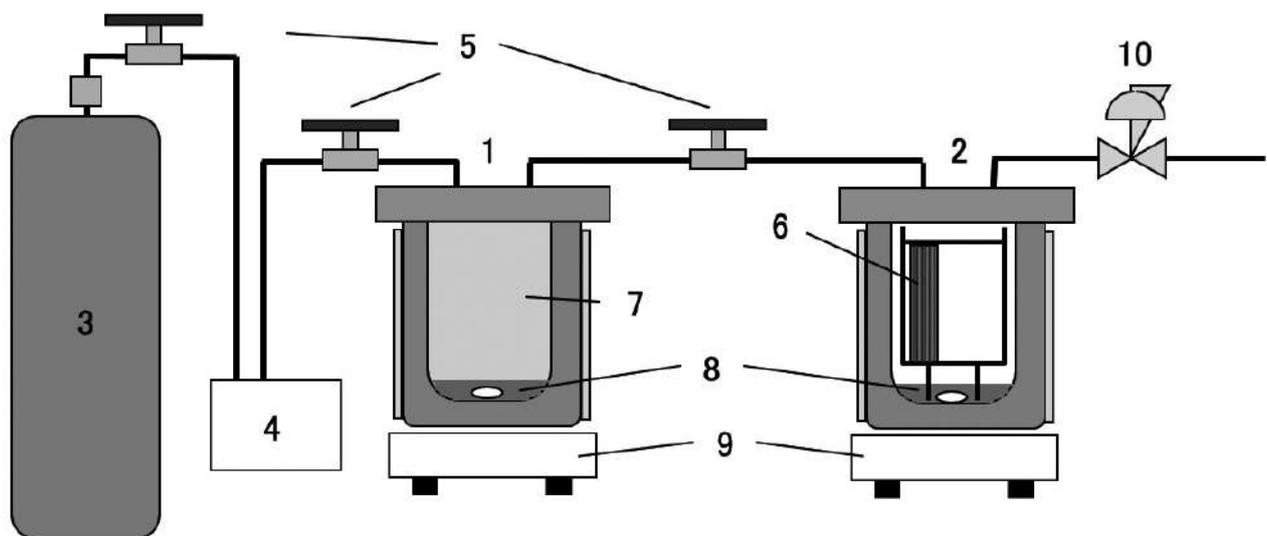


Fig. 1. 超臨界二酸化炭素中での木材試片のアセチル化処理に用いた装置の概略図

Schematic illustration of the apparatus used for the acetylation of the wood specimen in supercritical carbon dioxide.

1: 反応容器①、2: 反応容器②、3: 二酸化炭素ボンベ、4: 送液ポンプ、5: バルブ、6: 試片、7: 超臨界二酸化炭素、8: 無水酢酸、9: マグネチックスターラー、10: 背圧弁

1: batch container #1; 2: batch container #2; 3: carbon dioxide cylinder; 4: pump; 5: valve; 6: specimen; 7: supercritical carbon dioxide; 8: acetic anhydride; 9: magnetic stirrer; 10: back-pressure regulator.

容器②内の温度・圧力が 120 °C / 10 ~ 12 MPa で安定した段階で実験開始とし、8時間のアセチル化処理を行った。アセチル化処理は、両反応容器に入れられた無水酢酸量の組み合わせ1種類につき1回行われた。また、別の処理方法として、実験が開始してから4時間後にアセチル化処理を一時中断し、反応容器②を開封して試片の上下を入れ替えて再設置し、アスピレータでの減圧後、反応容器①側から再度無水酢酸と超臨界二酸化炭素を注入して引き続き4時間のアセチル化処理を行い、合計8時間のアセチル化処理となる実験も行った。

アセチル化処理後、試片は流水中で一週間水洗して風乾した後、次項の方法によって試片内部のアセチル化反応の進行度を測定した。

2.3 試片内部のアセチル化反応進行度の測定

アセチル化処理によって木材中の水酸基がアセチル基に置換し、質量が増加するため、アセチル化反応の進行程度は一般に質量増加率 (WPG) で評価され、WPG が 20% 程度で高い寸法安定性や防腐・防蟻性能が得られることが知られている (則元 1988)。また、フーリエ変換赤外分光分析 (FT-IR) の測定法の一つである全反射測定法 (ATR) を用いることで、アセチル化試片の WPG を簡便に測定することが可能である (Zanuttini et al. 1998, Tserki et al. 2005, Stefke et al. 2008)。そこで、本研究においても、10分割した試片について ATR 法による WPG の測定を行った。

検量線作成のために、スギ心材試片 (5 mm (L) × 20 mm (R) × 20 mm (T)) を前報 (Matsunaga et al. 2010) に従って超臨界二酸化炭素中でアセチル化処理し、処理前後の全乾質量を測定して WPG を算出した。処理時間は 0.4 ~ 8 時間の範囲で変化させ、WPG が異なる 6 種の試片を用意した。全乾状態にした後、木口面中央の早材部について IR 吸収スペクトルを測定した。測定にはフーリエ変換赤外分光光度計 (日本分光、FT/IR-470 Plus) に 1 回反射型全反射測定装置 (日本分光、ATR PRO450-S、プリズム: ZnSe) を付属させたものを用いた。測定条件は、波数分解能: 4 cm⁻¹、測定波数範囲: 4000 ~ 400 cm⁻¹、積算回数: 32 回、測定回数: 1 回、検出器: TGS (硫酸トリグリシン) にて行った。そして、アセチル基由来の吸収ピーク強度 (1738 cm⁻¹) をセルロース・ヘミセルロースの C-O の伸縮に由来する吸収ピーク強度 (1030 cm⁻¹) で除した値を算出し、WPG と吸収ピーク強度比との直線関係を利用した検量線 ($r^2 = 0.987$) を作成した。その結果を前報 (松永ら 2015) より引用し、Fig.2 に示す。

次に、2.2 でアセチル化した試片について、丸鋸盤を用いて繊維方向に 10 mm 間隔で切断して 10 分割した。そして、分割された各試片の木口断面中央の早材部について、検量線作成時と同様の測定条件で IR 吸収スペクトルを測定し (Fig.3)、前述の検量線から各測定部位の WPG を求めた。

3. 結果および考察

3.1 アセチル化試片の WPG 分布と無水酢酸量との関係

まず、反応容器①側の無水酢酸量は 5 ~ 100 ml の範囲で変化させ、反応容器②側の無水酢酸量は 20 ml で固定して 8 時間のアセチル化処理を行った。そして、処理後に試片を 10 分割し、各試片の木口断面中央部を ATR 法で測定して WPG を求めた。その結果を Fig.4 に示す。なお、図中横軸の「上部木口面からの距離」とは、反応容器内で試片を垂直に立ててアセチル化処理を行った際に上側となる木口面からの距離を示している。アセチル化試片の WPG は、上部木口面から 50 mm 以内では 10 ~ 20 ml 程度の少ない無水酢酸量でも 20% 程度の高い WPG を示した。しかし、上部木口面から 60 ~ 80 mm 付近での

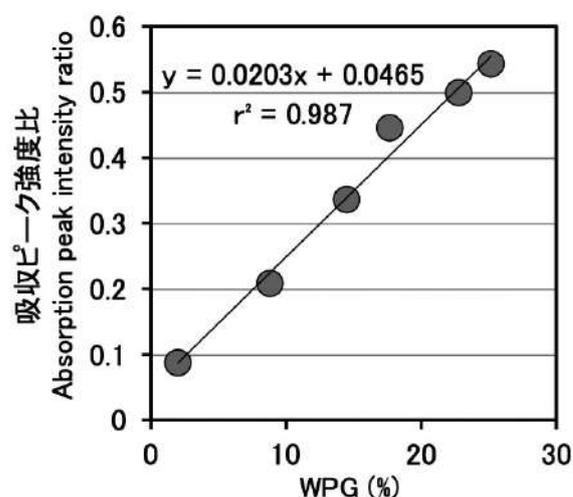


Fig. 2. アセチル化処理による質量増加率 (WPG) とフーリエ変換赤外分光分析 (FT-IR) での吸収ピーク強度比 (1738 cm⁻¹ / 1030 cm⁻¹) との関係

Relationship between the absorption peak intensity ratio (1738 cm⁻¹ / 1030 cm⁻¹) obtained by Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy and the weight percent gain (WPG) obtained by acetylation.

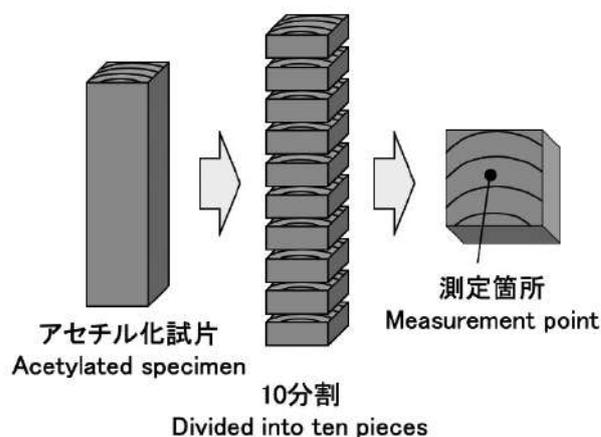


Fig. 3. 全反射測定法 (ATR) に用いた試片の作製工程
Preparation process of the specimen used in the attenuated total reflection (ATR) method.

WPGは低くなる傾向があり、無水酢酸量を100 mlまで増加させてもアセチル化反応の進行はやや不均一であった。本処理法では、連結管から送られてきた無水酢酸と超臨界二酸化炭素が上部木口面へ直接当たるため、試片の上側については無水酢酸の浸透は十分であるのに対し、底部木口面では無水酢酸と超臨界二酸化炭素の注入が間接的になるため、上部木口面に比べて注入時の勢いが弱く、底部木口面からの無水酢酸の浸透が不十分であったと考えられる。

以上の結果から、本処理法において、反応容器①側で超臨界二酸化炭素と混合させる無水酢酸の量は、試片上側のアセチル化に関しては10～20 ml程度で十分であることが明らかとなった。また、試片下側については、無水酢酸量を増加させることでアセチル化反応の進行がある程度均一化されるものの、完全な均一化には至らないことが明らかとなった。

次に、反応容器①側の無水酢酸量は10 mlに固定し、反応容器②側の無水酢酸量を0～100 mlの範囲で変化させて8時間のアセチル化処理を行った。そして、アセチル化処理後に試片各部位のWPGを測定した。その結果をFig.5に示す。無水酢酸量が10 ml以下では試片下側のWPGは非常に低い値であったが、20 ml以上では無水酢酸量の増加に伴い底部木口面に近い部位のWPGが増加し、75 ml以上では試片全体で20%以上のWPGが確認された。この結果は、反応容器②中に一定量以上の無水酢酸を入れておくことで、試片下側のアセチル化反応を十分に進行させることが可能であることを示している。

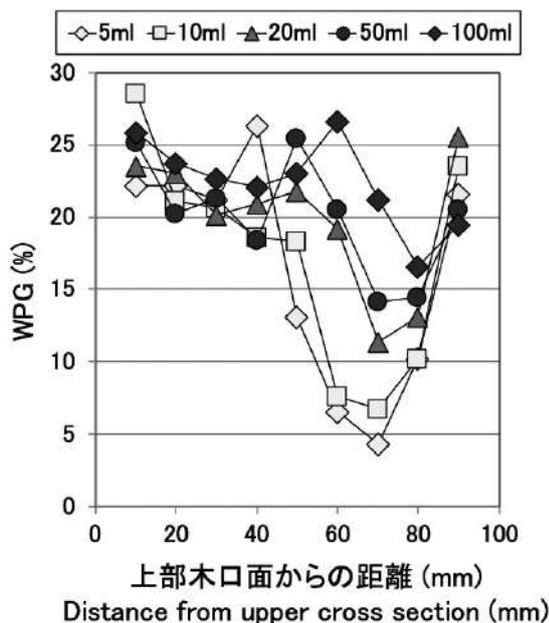


Fig. 4. 反応容器①側の無水酢酸量を変化させた時のアセチル化試片のWPG分布
WPG distribution of the acetylated specimen in the presence of various acetic anhydride amounts in the batch container #1.

実験前、反応容器②はアスピレータで減圧された後に120℃へと加熱されるため、容器内の無水酢酸の一部は気体となって容器内に存在していると考えられる。そして、反応容器①から無水酢酸および超臨界二酸化炭素が注入されることで、反応容器②内に存在していた気体状態の無水酢酸が試片内部へと押し込まれて浸透していくのではないかと推測される。また、Fig.5に示したように、反応容器②内の無水酢酸量が0 mlのときは試片下側のWPGが0%に近い値を示していたことから、底部木口面からの無水酢酸注入は反応容器②に最初から入れられていた無水酢酸量に依存していると考えられる。そして、本処理法においては反応容器②内に無水酢酸を75 ml以上入れておくことで試片全体を均一にアセチル化することが可能となったと推測される。

以上の結果から、試片下側のアセチル化反応は反応容器②内にあらかじめ入れられている無水酢酸の量に依存すること、そして、本処理法においては75 ml以上の無水酢酸を反応容器②に入れておくことで試片下側を均一にアセチル化できることが明らかとなった。

3.2 試片の上下入れ替えによるWPG分布の変化

本処理法では、反応容器①に入っている無水酢酸は主に上部木口面側から浸透し、反応容器②に入っている無水酢酸は主に底部木口面側から浸透してアセチル化反応が進行することが明らかとなった。また、Fig.4および5で示されたように、試片上側は少ない無水酢酸量でもアセチル化反応がよく進行するのに対し、試片下側、特に

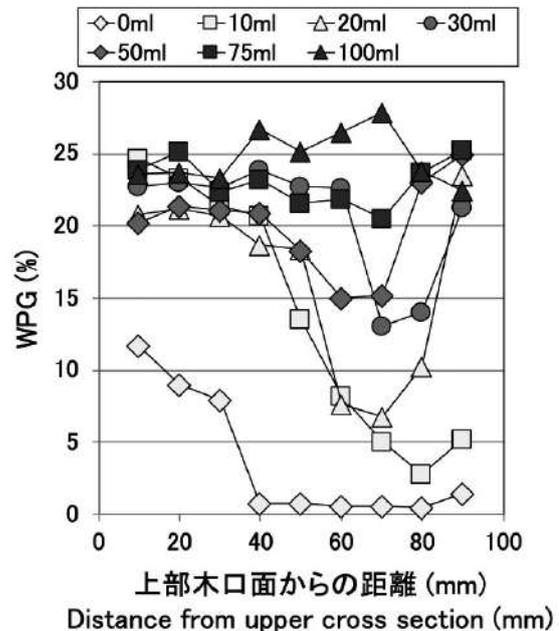


Fig. 5. 反応容器②側の無水酢酸量を変化させた時のアセチル化試片のWPG分布
WPG distribution of the acetylated specimen in the presence of various acetic anhydride amounts in the batch container #2.

底部木口面から 20 ~ 40 mm 付近は他の部位と比較してアセチル化されにくいことも明らかとなった。そこで、試片全体を均一にアセチル化させる別の処理方法として、アセチル化処理開始から 4 時間後にアセチル化処理を一時中断し、反応容器②内の試片を 180 度回転させて上下を入れ替え、反応容器①側から再度無水酢酸と超臨界二酸化炭素を注入して、引き続き 4 時間のアセチル化処理を行った。反応容器に入れておく無水酢酸量は反応容器①・②ともに同量とし、10 ml、20 ml、30 ml の三種類で実験を行った。その結果について、前半 4 時間のアセチル化処理の際に上側になっていた木口を上部木口面として Fig.6 に示した。無水酢酸量が 10 ml のときは、試片中央部の WPG がやや低い値を示したが、20 ml および 30 ml では試片全体で 20% 以上の WPG となり、部位によるバラツキは見られなかった。このことから、両反応容器に 20 ml 以上の無水酢酸を入れ、アセチル化処理の途中で試片の上下を入れ替えることで、試片全体を均一にアセチル化できることが明らかとなった。

なお、この処理方法で均一なアセチル化処理に最低限必要な無水酢酸の総量は、前半 4 時間の処理で 20 ml × 2、後半 4 時間の処理で 20 ml × 2 で、合計 80 ml となる。上述の 3.1 で示した方法で均一にアセチル化するために最低限必要な無水酢酸量は、反応容器①側が 20 ml、反応容器②側が 75 ml で、合計 95 ml となるため、試片の上下入れ替えによる無水酢酸の使用量削減はわずかであったが、試片全体を均一にアセチル化処理するための手法としては有効であった。

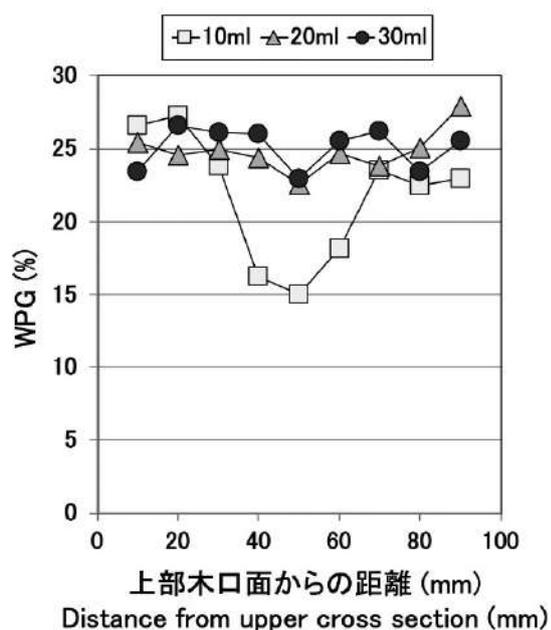


Fig. 6. アセチル化処理の途中で試片を 180 度回転させた時の WPG 分布
WPG distribution of the acetylated specimen rotated by 180° during acetylation.

4. 結論

本研究では、超臨界二酸化炭素を用いてアセチル化処理したスギ心材試片について、試片各部位の WPG を測定し、試片全体を均一にアセチル化させるために必要な無水酢酸量の最適化を図るとともに、本処理法における無水酢酸の浸透状況について検討を行った。処理には二つの反応容器を用い、一方には超臨界二酸化炭素と無水酢酸を入れ、もう一方には垂直に立てて固定した全乾試片と無水酢酸を入れて減圧し、超臨界二酸化炭素の圧力を利用して無水酢酸を試片に注入させてアセチル化処理を行った。その結果、超臨界二酸化炭素と混合させている無水酢酸は、主として上部木口面から試片内部へと浸透し、試片上側のアセチル化反応に寄与することが示唆された。一方、試片とともに反応容器に入っていた無水酢酸は容器内で気体となり、主として底部木口面から試片内部へと浸透して、試片下側のアセチル化反応に寄与することが示唆された。そして、両方の反応容器に適量の無水酢酸を入れておくことで、試片全体を均一にアセチル化できることが明らかとなった。現在所有している装置の構造上、さらに大きな試片での実験や試片を水平に設置しての実験を行うことは不可能なため、今後は装置構造の検討などを行い、本処理法のさらなる最適化を目指す予定である。

引用文献

- Clermont, L. P. and Bender, F. (1957) The effect of swelling agents and catalysts on acetylation of wood. *Forest Prod. J.*, 7, 167-170.
- Goldstein, I. S., Jeroski, E. B., Lund, A. E., Nielsen, J. F. and Weaver, J. M. (1961) Acetylation of wood in lumber thickness. *Forest Prod. J.*, 11, 363-370.
- Matsunaga, M., Kataoka, Y., Matsunaga, H. and Matsui, H. (2010) A novel method of acetylation of wood using supercritical carbon dioxide. *J. Wood Sci.*, 56, 293-298.
- 松永 正弘・片岡 厚・松永 浩史・木口 実・松井 宏昭 (2014) 超臨界二酸化炭素を用いた新規アセチル化処理の主要国産材への適用. *木材工業*, 69, 14-18.
- 松永 正弘・片岡 厚・石川 敦子・松永 浩史・小林 正彦・木口 実 (2015) 超臨界二酸化炭素中でアセチル化した木材の繊維方向における質量増加率の分布. *木材工業*, 70, 106-111.
- Matsunaga, M., Hewage, D. C., Kataoka, Y., Ishikawa, A., Kobayashi, M. and Kiguchi, M. (2016) Acetylation of wood using supercritical carbon dioxide. *J. Trop. For. Sci.*, 28, 132-138.
- 松永 正弘・松永 浩史・石川 敦子・小林 正彦・神林 徹・片岡 厚 (2020) 超臨界二酸化炭素中でアセチル化処理したスギ材の耐朽性評価. *木材保存*, 46, 20-29.

- Minato, K., Takazawa, R. and Ogura, K. (2003) Dependence of reaction kinetics and physical and mechanical properties on the reaction systems of acetylation II: physical and mechanical properties. *J. Wood Sci.*, 49, 519–524.
- 則元 京 (1988) アセチル化木材. *木材研究・資料*, 24, 13–30.
- Rist, J. and Arseneau, D. F. (1957) Dimensional stabilization of wood. *Forest Prod. J.*, 7, 210–213.
- Rowell, R. M., Esemther, G. R., Nicholas, D. D. and Nilsson, T. (1987) Biological resistance of southern pine and aspen flakeboards made from acetylated flakes. *J. Wood Chem. Technol.*, 7, 427–440.
- Stamm, A. J. and Tarkow, H. (1947) Dimensional stabilization of wood. *J. Phys. & Colloid Chem.*, 51, 493–505.
- Stamm, A. J. and Baechler, R. H. (1960) Decay resistance and dimensional stability of five modified woods. *Forest Prod. J.*, 10, 22–26.
- Stamm, A. J. (1964) *“Wood and Cellulose Science”*. The Rolland Press Company, New York, 329–333.
- Stefke, B., Windeisen, E., Schwanninger, M. and Hinterstoisser, B. (2008) Determination of the weight percentage gain and of the acetyl group content of acetylated wood by means of different infrared spectroscopic methods. *Anal. Chem.*, 80, 1272–1279.
- Tserki, V., Zafeiropoulos, N. E., Simon, F. and Panayiotou, C. (2005) A study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres. *Composites: Part A*, 36, 1110–1118.
- Zanuttini, M., Citroni, M. and Martinez, M. J. (1998) Application of diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy to the quantitative determination of acetyl groups in wood. *Holzforschung*, 52, 263–267.

Efficient acetylation of wood using pressure difference of supercritical carbon dioxide

Masahiro MATSUNAGA^{1)*}, Masahiko KOBAYASHI¹⁾, Toru KANBAYASHI¹⁾
and Atsuko ISHIKAWA¹⁾

Abstract

In this study, we evaluated the distribution of weight percent gain (WPG) in the longitudinal direction of a sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) heartwood sample with a size of 100 mm (longitudinal direction) × 20 mm (radial direction) × 20 mm (tangential direction), which was acetylated using supercritical carbon dioxide (CO₂). Two connected batch containers were used for the acetylation treatment. One of them contained a mixture of supercritical CO₂ and acetic anhydride, which was injected into the second batch container containing a vertically fixed oven-dried wood specimen and small amount of acetic anhydride. The acetylation was performed at 120 C° and 10–12 MPa for 8 h using various amounts of acetic anhydride. The experiments revealed that the mixture of acetic anhydride with supercritical CO₂ contributed to the acetylation on the upper side of the specimen, penetrating mainly through the upper cross section. Instead, acetic anhydride contained in the batch container with the specimen, contributed to the acetylation on the lower side of the specimen by penetrating from the bottom cross section. It was thus assumed that gaseous acetic anhydride in the batch container was pushed into the specimen by the injected supercritical CO₂. Therefore, it was demonstrated that the specimen can be uniformly acetylated by adding the appropriate amount of acetic anhydride in both batch containers.

Key words : supercritical carbon dioxide, acetylation, weight percent gain, sugi wood, acetic anhydride

Received 6 July 2020, Accepted 28 December 2020

1) Department of Wood Processing, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* Department of Wood Processing, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; E-mail: cla@ffpri.affrc.go.jp

研究資料 (Research record)

照葉樹老齢二次林の 21 年間にわたる林分構造の変化

佐藤 保^{1)*}、山川 博美²⁾、野宮 治人²⁾、安部 哲人²⁾、齊藤 哲³⁾、
釜 稔⁴⁾、大寺 義宏⁴⁾

要旨

宮崎県宮崎市(旧東諸県郡高岡町)の照葉樹老齢二次林に設定した、1 ha 試験地にて 1998 年から 2019 年までに 21 年間の林分構造を継続観測した。合計 10 回にわたる毎木調査の結果、幹本数は 1998 年の 1532 本/ha から 2019 年には 1379 本/ha に減少していたが、生存個体の成長により、胸高断面積合計(BA)の値は 45.74 m²/ha から 2014 年時点で 50.97 m²/ha にまで増加していた。しかし、台風攪乱が多数発生した 2015 年から 2019 年の期間に生じた枯死個体によって、優占種の一つであるスダジイで大きな減少が見られ、林分全体の BA は期首(1989 年)とほぼ同等の値である 46.57 m²/ha になっていた。全期間を通じての枯死率は 1.51%/年となり、同期間の加入率(1.01%/年)を上回っていた。スダジイやウラジロガシでは小径木個体の枯死が見られたことから、今後の更新にも影響があるものと考えられる。

キーワード：常緑広葉樹、ウラジロガシ、スダジイ、長期モニタリング、森林動態、広葉樹二次林

1. はじめに

我が国の照葉樹林の林分構造に関する研究は、薪炭林の施業改善を目的に端を発しており、例えば三善(1959)は、宮崎県下の幼齢から老齢に至る照葉樹林の林分構造と更新に関する研究を行っている。この中で、老齢林からなる用材林と幼壯齢林からなる薪炭林とに区分し比較した結果、両者の樹種構成は明らかに異なり、薪炭林ではツブラジイの優占度が圧倒的に高いことを示している。薪炭林に着目してみると、粟屋ら(1985)は、長崎県のツブラジイ薪炭林において施業法の違いがツブラジイとカシ類の成長に及ぼす影響を解析した。その結果、ツブラジイは成長速度が速く、択伐による保残によらなければカシ類の優勢、ひいては大径木の成長は期待できないことを明らかにした。

かつて 20～30 年周期で伐採され利用されてきた薪炭林は、利用放棄されて高齢化しているが、このような高齢化した二次林を対象とした森林構造の研究では、宮崎大学田野演習林(Ito et al. 2007, 井藤ら 2009, Hirayama et al. 2019)や水俣(Yamamoto and Manabe 1997, Yamada et al. 2011)での報告がある。これらの報告の中で、成熟した照葉樹林に比べてシイ属の優占度が高いことや、成長の遅いイスノキでは胸高直径(DBH)階分布に見るサイズ構造に大きな変化が認められないことが示されている。加えて、高齢化したツブラジイでは、幹の内部が腐

朽している個体が増え、台風攪乱などによって幹折れや枯死個体が増えることが示されている(埴田 1987, 佐藤ら 2018)。

高岡試験地は宮崎県宮崎市内(旧東諸県郡高岡町)の国有林に、遷移過程解明を目的とした 1ha の長期生態観測用の試験地である(佐藤ら 2005, 曾我部・佐藤 2013)。近接する成熟林分との比較から、生育する各樹種の最大 DBH サイズや種構成の違いにより、高岡試験地は過去に人為攪乱を受けた老齢二次林であると結論づけられている(佐藤ら 2005)。また、人為を含めた攪乱が照葉樹成熟林に生育する主要構成樹種に欠如(マテバシイ)や優占度の低下(バリバリノキやアオガシ)をもたらし、成熟林へ遷移が進行する途中段階であり、今後とも種組成が変化するであろうとの推察もなされている(佐藤ら 2005)。高岡試験地では、1998 年の設定以来、2019 年までの 21 年間に合計 10 回の毎木調査を実施してきており、林分構造に関する長期観測データを蓄積してきた。本報告では、老齢の照葉樹二次林である高岡試験地において、複数の台風が上陸した 1998 年から 2019 年にかけての林分構造の変化を報告する。

2. 方法

2.1 試験地の概要

高岡試験地は、九州森林管理局宮崎森林管理署蜷尻国

原稿受付：令和 2 年 8 月 24 日 原稿受理：令和 2 年 10 月 26 日

1) 森林総合研究所 森林植生研究領域

2) 森林総合研究所 九州支所

3) 森林総合研究所 関西支所

4) 九州森林管理局 森林技術・支援センター

* 森林総合研究所 森林植生研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

有林 228 に 1 林小班の照葉樹林内に設定した、遷移過程解明を目的とする試験地（北緯 31°55′，東経 131°16′）である。1998 年に九州森林管理局（当時は熊本営林局）森林技術センター（旧高岡営林署）（現在の森林技術・支援センター）の主導により、北東向きの斜面の一部（標高 280m～335m）に 1ha（100 m × 100 m）の試験地を設置した（佐藤ら 2005）。試験地を含む林小班的林齢は、森林管理局で作成された第 5 次国有林野施業実施計画図の記録によると 2016 年当時で 147 年生となっている。高岡試験地の土壌は、中生代の砂岩及び頁岩を母材とする乾性褐色森林土（B_c 型）を中心として分布している（熊本営林局 1973）。試験地付近には気象観測施設が無いため、宮崎市の宮崎地方気象台の気象データ（1990-2019 年）から気温通減率（0.6℃/100 m）を用いて求めた高岡試験地（280 m を基準にして算出）の年平均気温は 16.2℃である。また、年平均降水量は近接のアメダス観測地点である国富（宮崎県東諸県郡国富町）で過去 30 年間（1990-2019 年）にわたるデータによると 2,627mm となっている。試験地の上部はなだらかな平坦面が支配的であるが、斜面を下降するにしたがい 2 本の小沢を含み起伏が激しくなる（佐藤ら 2005）。なお、試験地は九州森林管理局が設定した保護林である蝮尻林木遺伝資源保存林（59.14ha）の一部であったが、平成 30 年度からは保護林の再編により、蝮尻ツブラジイ等遺伝資源希少個体群保護林として管理されている。

2. 2 毎木調査

試験地内に生育している樹木個体（ツル植物を除く）の胸高周囲長を計測し胸高直径（DBH）に換算した。対象としたのは DBH 5 cm に相当する、胸高周囲長 15.7cm 以上の生存個体である。DBH 以外に、樹種名、根本位置の座標（水平距離で計測）を記録した。毎木調査は 1998 年 11 月を初回とし、2019 年 11 月までに合計 10 回実施した（Table 1）。なお、本報告における樹種名は、「BG Plants 和名－学名インデックス」（YList）（米倉・梶田 2003-）に従った。

2. 3 新規加入率、枯死率の計算

試験地における一定測定期間内の新規加入率（R、%/年）及び枯死率（M、%/年）は、以下の式（Hall et al. 1998）を用いて計算した。

$$R = \ln [(N_0 - N_d + N_i) / (N_0 - N_d)] / t$$

$$M = \ln [(N_0 - N_d) / N_0] / t$$

ここで、N₀ は初回の幹本数、N_d は測定期間 t 年の間に枯死した幹本数、N_i は測定期間内に新規に加入した幹本数をそれぞれ示す。

毎木調査は基本的に秋季（10～11 月）に実施されていたが、いくつかの毎木調査ではその時期以外に実施さ

れている（Table 1；2002 年 2 月、2004 年 1 月、2006 年 2 月、2008 年 5 月、2011 年 1 月）。毎木調査間の測定期間については生育期間を基準に定めることとしたが、1 月から 2 月にかけて実施された毎木調査は、すでに生育期間が終了した時期であり、前年の成長のみが反映されているとみなした。例えば、2004 年 1 月の調査の場合は 2003 年までの成長データを反映していることから、前回の毎木調査（2002 年 2 月）からの測定期間は「2002 年～2003 年」とした。2008 年 5 月の毎木調査は例外的にすでに新たな生育期間に入っていると考えられたが、前年（2007 年）と当年（2008 年）の成長分の分離が困難なため、前回毎木調査との測定期間としては「2006 年～2007 年」として処理した。新規加入率および枯死率の計算には、これら測定期間を年単位に換算して求めた。

2. 4 台風の記録

本報告では、佐藤ら（2018）の方法に倣い、試験地に近接する気象観測施設（宮崎地方気象台）から台風の中心が 150km 以内を通過した台風のみを調査林分に影響を及ぼしうる台風として考慮した。本報告では、台風の強度を定義する基準として風速に着目し、試験地近接の気象観測施設で記録された台風の中で最大風速が 15 m/s を超えた台風を「強い台風」と定義した。「デジタル台風：台風画像と台風情報」の HP（<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>）にある台風データベースを用いて台風の検索

Table 1. 高岡試験地の毎木調査実施日
Date of each tree census in the plot.

Cycle	Census date	Interval days	Measurement period
1	October 12, 1998	746	1998-2000
2	October 27, 2000	486	2001
3	February 25, 2002	700	2002-2003
4	January 26, 2004	738	2004-2005
5	February 2, 2006	825	2006-2008
6	May 7, 2008	985	2009-2010
7	January 17, 2011	672	2011-2012
8	November 19, 2012	738	2013-2014
9	November 27, 2014	1826	2015-2019
10	November 27, 2019		

を行った。以上の基準をもとに、1998年から2019年までに宮崎市で強い台風と定義されたのは18個であった(Table 2)。

3. 結果と考察

3.1 種数の変化

毎木調査の結果、記録された樹木種数は期首(1998年)、期末(2019年)ともに52種であり、全期間を通じては合計57種が記録された。生活型ごとに分類すると、常緑広葉樹が41種ともっとも多く、残りは落葉広葉樹14種、常緑針葉樹2種であった。期間中に新たに加入した種は、アデク、クスノキ、シロモジ、リンボク、タラノキの5種であった。一方、クロマツ、コナラ、イタヤカエデ、ヤマグワ、タラノキの5種は期間中に毎木調査の対象とした全個体が枯死していた。タラノキは2003年に加入し、2019年時点では全ての個体が枯死していた。

同じ宮崎県内の他の照葉樹林の種数と比較すると、宮崎大学田野フィールドの二次林で58種(Ito et al. 2007)(ただしDBH 3 cm以上が対象)、近隣の成熟林である綾試験地で50種(永松ら2002)が記録されており、本試験地と大きな差は見られなかった。一方で、この21年の間に暖温帯域の二次林の優占種であるコナラ(服部ら1995)とクロマツ(手塚・楠本1960)が消失する一方で、成熟

林の構成種でもあるマテバシイ(北沢1961)を欠く種組成となっており、種組成の観点からは期末時点(2019年)でも成熟林とは異なる状態のままであると考えられた。

3.2 林分構造の変化

期首の幹本数は1532本/haであったが、2004年～2005年と2006年～2007年の測定期間に幹本数の増加が見られた以外は一貫して減少傾向にあった。期末である2019年では、1998年の値より10%減少した、1379本/haであった(Table 3)。一方、胸高断面積合計(BA)では、2014年までは年々増加を繰り返し、50.97 m²/haにまで達していた。しかし、2015年から2019年の間にウラジロガシ、スダジイ、ツブラジイなどが枯死したことにより、最終的には期首の値に対して約2%の増加に留まっていた(Table 4)。

全測定期間の枯死率と加入率は、それぞれ1.51%/年と1.01%/年であった(Table 5)。測定期間ごとの枯死率と加入率を比較すると、2004年～2005年および2006年～2007年の二つの期間をのぞいて、いずれの期間も枯死率の方が加入率の値を上回っており、加入率に比べて測定期間ごとのバラツキが少ない傾向にあった(Table 5)。測定期間の長さが均一ではないので、比較は難しいが、上陸した台風が最も多かった2015年から2019年の期間で

**Table 2. 測定期間中(1998年から2019年)に宮崎地方気象台にて記録された強い台風
Record of strong typhoons between 1998 and 2019 at the Miyazaki Meteorological Office.**

Typhoon number	Name	Landing date	Maximum wind velocity (m/s)	Maximum instantaneous wind velocity (m/s)	Covered measurement period for tree census
199918	BART	September 24, 1999	15.2	32.7	1998-2000,2001
200310	ETAU	August 8, 2003	15.9	31.7	2002-2003
200416	CHABA	August 30, 2004	21.4	44.3	2004-2005
200421	MEARI	September 29, 2004	19.5	38.9	
200423	TOKAGE	October 20, 2004	16.9	33.0	
200514	NABI	September 5, 2005	21.1	43.1	
200704	MAN-YI	July 14, 2007	19.5	38.8	2006-2007
200705	USAGI	August 2, 2007	19.0	34.9	
201106	MA-ON	July 19, 2011	15.9	25.3	2008-2010, 2011-2012
201408	NEOGURI	July 10, 2014	15.1	21.8	2013-2014
201411	HALONG	August 9, 2014	16.3	28.6	
201419	VONGFONG	October 13, 2014	15.4	24.4	
201515	GONI	August 25, 2015	17.1	30.6	2015-2019
201616	MALAKAS	September 20, 2016	19.2	33.1	
201705	NORU	August 6, 2017	15.1	24.8	
201722	SAOLA	October 29, 2017	15.5	25.4	
201824	TRAMI	September 30, 2018	23.4	37.9	
201908	FRANCISCO	August 6, 2019	19.4	31.2	

試験地近接の宮崎地方気象台で記録された台風の中で最大風速が15 m/sを超えた台風を「強い台風」と定義した。

We classified typhoons reaching maximum winds exceeding 15 m/s as "strong typhoons" from the data at the Miyazaki Meteorological Office.

Table 3. 測定期間中（1998年から2019年）の幹本数の変化
Changes in stem density between 1998 and 2019 in the plot.

Species	Japanese name	Life form	1998	2000	2001	2003	2005	2007	2010	2012	2014	2019
<i>Distylium racemosum</i>	イスノキ	EB	373	369	369	372	380	381	380	376	375	368
<i>Camellia japonica</i>	ヤブツバキ	EB	233	234	233	235	238	241	240	244	245	241
<i>Quercus salicina</i>	ウラジロガシ	EB	149	146	145	143	140	138	130	129	126	115
<i>Cleyera japonica</i>	サカキ	EB	130	130	130	130	128	131	131	132	128	124
<i>Eurya japonica</i> var. <i>japonica</i>	ヒサカキ	EB	128	124	122	117	117	115	106	104	99	86
<i>Castanopsis sieboldii</i>	スダジイ	EB	76	76	72	64	63	64	58	58	60	35
<i>Machilus japonica</i>	アオガシ	EB	56	59	58	56	56	58	58	52	54	53
<i>Machilus thunbergii</i>	タブノキ	EB	51	49	50	53	51	50	47	47	47	46
<i>Meliosma rigida</i>	ヤマビワ	EB	39	39	39	38	36	36	36	35	37	35
<i>Castanopsis cuspidata</i>	ツブラジイ	EB	28	27	27	28	32	34	33	30	30	23
<i>Diospyros morrisiana</i>	トキワガキ	EB	25	25	25	26	25	25	25	25	24	23
<i>Daphniphyllum teijsmannii</i>	ヒメユズリハ	EB	23	20	19	17	15	14	12	12	8	5
<i>Quercus gilva</i>	イチイガシ	EB	22	22	22	22	20	20	19	19	19	19
<i>Cinnamomum tenuifolium</i>	ヤブニッケイ	EB	20	20	20	22	23	23	23	23	22	21
<i>Quercus acuta</i>	アカガシ	EB	20	19	19	19	19	18	18	18	17	16
<i>Elaeocarpus japonicus</i>	コバンモチ	DB	18	21	21	22	24	22	21	19	17	13
<i>Ficus erecta</i> var. <i>erecta</i>	イヌビワ	DB	16	14	14	14	15	17	17	16	16	19
<i>Neolitsea sericea</i>	シロダモ	EB	13	14	15	16	18	18	18	19	20	21
<i>Litsea coreana</i>	カゴノキ	EB	11	10	9	7	7	7	7	7	7	6
<i>Neolitsea aciculata</i>	イヌガシ	EB	10	10	9	8	8	8	8	8	7	9
<i>Quercus hondae</i>	ハナガガシ	EB	10	10	10	10	10	10	10	11	11	11
<i>Podocarpus macrophyllus</i>	イヌマキ	EC	9	9	10	10	10	10	10	11	11	11
<i>Ilex integra</i>	モチノキ	EB	9	9	9	9	9	10	10	10	9	9
<i>Symplocos theophrastifolia</i>	カンザブドウノキ	EB	5	8	8	9	9	8	8	8	8	8
<i>Ilex chinensis</i>	ナナミノキ	EB	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6
<i>Myrsine seguinii</i>	タイミンタチバナ	EB	4	5	5	5	5	8	8	8	8	8
<i>Quercus serrata</i>	コナラ	DB	4	4	4	4	4	3	2	2	2	0
<i>Cerasus jamasakura</i>	ヤマザクラ	DB	4	3	3	3	2	2	2	2	2	1
<i>Actinodaphne acuminata</i>	バリバリノキ	EB	3	4	5	5	5	5	5	5	5	4
<i>Quercus glauca</i>	アラカシ	EB	3	3	3	3	3	3	4	4	5	3
<i>Dendropanax trifidus</i>	カクレミノ	EB	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
<i>Ligustrum japonicum</i>	ネズミモチ	EB	2	4	5	5	5	6	5	5	5	3
<i>Ilex rotunda</i>	クロガネモチ	EB	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
<i>Cornus controversa</i>	ミズキ	DB	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2
<i>Premna microphylla</i>	ハマクサギ	DB	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
<i>Kalopanax septemlobus</i>	ハリギリ	DB	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<i>Ternstroemia gymnanthera</i>	モッコク	EB	2	2	3	3	2	2	2	2	3	3
<i>Daphniphyllum macropodum</i>	ユズリハ	EB	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
<i>Aucuba japonica</i> var. <i>japonica</i>	アオキ	EB	2	1	1	0	1	1	1	1	1	2
<i>Symplocos myrtacea</i>	ハインノキ	EB	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Symplocos kuroki</i>	クロキ	EB	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<i>Euscaphis japonica</i>	ゴンズイ	DB	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1
<i>Acer mono</i> subsp. <i>marmoratum</i>	イタヤカエデ	DB	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
<i>Magnolia compressa</i>	オガタマノキ	EB	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Pinus thunbergii</i>	クロマツ	EC	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
<i>Ehretia acuminata</i> var. <i>obovata</i>	チシャノキ	DB	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Ilex goshiensis</i>	ツゲモチ	EB	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1
<i>Ficus erecta</i> var. <i>erecta</i> f. <i>sieboldii</i>	ホソバイヌビワ	EB	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
<i>Symplocos glauca</i>	ミミズバイ	EB	1	1	1	2	2	2	2	3	4	5
<i>Morella rubra</i>	ヤマモモ	EB	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Diospyros japonica</i>	リュウキュウマメガキ	DB	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Morus bombycis</i>	ヤマゲワ	DB	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Syzygium buxifolium</i>	アデク	EB	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Cinnamomum camphora</i>	クスノキ	EB	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
<i>Lindera triloba</i>	シロモジ	DB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Aralia elata</i>	タラノキ	DB	0	0	0	2	2	1	1	1	1	0
<i>Laurocerasus spinulosa</i>	リンボク	EB	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Unidentified	不明		2	1	0	0	0	0	0	0	1	3
Total			1532	1524	1518	1515	1519	1523	1488	1476	1464	1379

EB：常緑広葉樹；DB：落葉広葉樹；EC：常緑針葉樹

EB: evergreen broad-leaved species; DB: deciduous broad-leaved species; EC: evergreen conifer species

Table 4. 測定期間中（1998年から2019年）の胸高断面積合計（BA）の変化
Changes in basal area (BA) between 1998 and 2019 in the plot.

Species	Japanese name	Life form	1998	2000	2001	2003	2005	2007	2010	2012	2014	2019
<i>Quercus salicina</i>	ウラジロガシ	EB	10.43	10.83	10.87	10.74	10.65	10.89	11.24	11.61	11.86	11.36
<i>Distylium racemosum</i>	イスノキ	EB	7.79	7.96	8.05	8.27	8.55	8.89	9.25	9.25	9.29	9.80
<i>Castanopsis sieboldii</i>	スダジイ	EB	7.73	8.07	7.90	7.82	8.03	8.20	8.43	8.33	8.33	4.65
<i>Machilus thunbergii</i>	タブノキ	EB	5.52	5.29	5.43	5.64	5.81	6.01	6.15	6.34	6.55	7.06
<i>Quercus acuta</i>	アカガシ	EB	2.88	2.81	2.84	2.90	2.93	2.91	2.93	2.99	2.86	2.78
<i>Camellia japonica</i>	ヤブツバキ	EB	1.69	1.73	1.75	1.79	1.86	1.92	1.96	1.98	2.00	2.11
<i>Quercus gilva</i>	イチイガシ	EB	1.36	1.40	1.42	1.45	1.42	1.44	1.50	1.53	1.53	1.63
<i>Cleyera japonica</i>	サカキ	EB	1.10	1.14	1.16	1.17	1.19	1.24	1.29	1.32	1.27	1.30
<i>Castanopsis cuspidata</i>	ツブラジイ	EB	1.05	1.10	1.03	1.12	1.15	1.10	1.16	1.20	1.24	0.40
<i>Eurya japonica</i> var. <i>japonica</i>	ヒサカキ	EB	0.58	0.58	0.57	0.56	0.57	0.57	0.52	0.52	0.49	0.45
<i>Meliosma rigida</i>	ヤマビワ	EB	0.58	0.55	0.56	0.54	0.54	0.56	0.58	0.58	0.57	0.58
<i>Machilus japonica</i>	アオガシ	EB	0.57	0.60	0.59	0.59	0.59	0.62	0.66	0.65	0.67	0.73
<i>Quercus serrata</i>	コナラ	DB	0.47	0.48	0.48	0.49	0.50	0.41	0.24	0.24	0.25	0.00
<i>Elaeocarpus japonicus</i>	コバンモチ	DB	0.43	0.48	0.44	0.47	0.49	0.50	0.53	0.41	0.32	0.27
<i>Cerasus jamasakura</i>	ヤマザクラ	DB	0.42	0.36	0.36	0.36	0.26	0.26	0.26	0.25	0.26	0.21
<i>Diospyros morrisiana</i>	トキワガキ	EB	0.41	0.42	0.42	0.43	0.43	0.45	0.46	0.47	0.45	0.46
<i>Daphniphyllum teijsmannii</i>	ヒメユズリハ	EB	0.39	0.35	0.35	0.32	0.30	0.28	0.20	0.21	0.16	0.04
<i>Cinnamomum tenuifolium</i>	ヤブニッケイ	EB	0.34	0.37	0.37	0.40	0.42	0.44	0.47	0.48	0.49	0.37
<i>Quercus hondae</i>	ハナガガシ	EB	0.33	0.35	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.47	0.48	0.52
<i>Ilex integra</i>	モチノキ	EB	0.22	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.26	0.26	0.21	0.22
<i>Kalopanax septemlobus</i>	ハリギリ	DB	0.22	0.23	0.23	0.23	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28
<i>Pinus thunbergii</i>	クロマツ	EC	0.15	0.16	0.17	0.17	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Litsea coreana</i>	カゴノキ	EB	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12
<i>Quercus glauca</i>	アラカシ	EB	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.12	0.12	0.14	0.14	0.07
<i>Diospyros japonica</i>	リュウキュウマメガキ	DB	0.10	0.10	0.11	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12
<i>Neolitsea sericea</i>	シロダモ	EB	0.07	0.09	0.10	0.11	0.13	0.15	0.17	0.18	0.20	0.23
<i>Ficus erecta</i> var. <i>erecta</i>	イヌビワ	DB	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.08
<i>Ehretia acuminata</i> var. <i>obovata</i>	チシャノキ	DB	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07
<i>Morella rubra</i>	ヤマモモ	EB	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07
<i>Podocarpus macrophyllus</i>	イヌマキ	EC	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09
<i>Neolitsea aciculata</i>	イヌガシ	EB	0.05	0.06	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
<i>Dendropanax trifidus</i>	カクレミノ	EB	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
<i>Actinodaphne acuminata</i>	バリバリノキ	EB	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
<i>Cornus controversa</i>	ミズキ	DB	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03
<i>Myrsine seguinii</i>	タイミンタチバナ	EB	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
<i>Ilex chinensis</i>	ナナミノキ	EB	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06
<i>Daphniphyllum macropodium</i>	ユズリハ	EB	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.01
<i>Symplocos theophrastifolia</i>	カンザブロウノキ	EB	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07
<i>Ligustrum japonicum</i>	ネズミモチ	EB	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
<i>Premna microphylla</i>	ハマクサギ	DB	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
<i>Acer mono</i> subsp. <i>marmoratum</i>	イタヤカエデ	DB	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01				
<i>Symplocos kuroki</i>	クロキ	EB	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
<i>Ilex rotunda</i>	クロガネモチ	EB	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Magnolia compressa</i>	オガタマノキ	EB	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
<i>Euscaphis japonica</i>	ゴンズイ	DB	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Symplocos myrtacea</i>	ハイノキ	EB	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
<i>Ternstroemia gymnanthera</i>	モッコク	EB	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
<i>Morus bombycis</i>	ヤマグワ	DB	0.01									
<i>Aucuba japonica</i> var. <i>japonica</i>	アオキ	EB	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Ilex goshiensis</i>	ツゲモチ	EB	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Ficus erecta</i> var. <i>erecta</i> f. <i>sieboldii</i>	ホソバイヌビワ	EB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
<i>Symplocos glauca</i>	ミミズバイ	EB	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
<i>Syzygium buxifolium</i>	アデク	EB		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Cinnamomum camphora</i>	クスノキ	EB				0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
<i>Lindera triloba</i>	シロモジ	DB										0.00
<i>Aralia elata</i>	タラノキ	DB				0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	
<i>Laurocerasus spinulosa</i>	リンボク	EB				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Unidentified	不明		0.01	0.00							0.00	0.01
Total			45.74	46.58	46.70	47.24	47.96	48.86	50.11	50.73	50.97	46.57

EB：常緑広葉樹；DB：落葉広葉樹；EC：常緑針葉樹

EB: evergreen broad-leaved species; DB: deciduous broad-leaved species; EC: evergreen conifer species

斜体で表した数値は、有効数字の関係で0.00表記している。

Numbers in italics are shown as 0.00 due to the significant figures.

Table 5. 測定期間中（1998年から2019年）の加入率および枯死率の変化
Changes in recruitment rate and mortality rate between 1998 and 2019 in the plot.

	1998	2000	2001	2003	2005	2007	2010	2012	2014	2019	Whole period
Stem number (n/ha)	1532	1524	1518	1515	1519	1523	1488	1476	1464	1379	
Recruit (n/ha)	43	16	22	36	42	34	18	18	21	38	266
Dead (n/ha)	51	51	22	39	38	30	53	30	33	123	419
Recruitment rate (%/year)	1.40	0.80	1.25	1.39	1.00	0.45	0.67	0.71	0.56	1.01	
Mortality rate (%/year)	1.66	1.09	1.36	1.26	0.88	1.31	1.11	1.12	1.75	1.51	

枯死率が一番高かった。加入率が1%未満を示す期間が9期間中、5期間あり、このことが幹本数の減少に繋がっていた。一般に照葉樹林は台風攪乱に対して耐性を持つ種が生育していることが知られている (Bellingham et al. 1996, 齊藤・佐藤 2007)。本試験では、台風攪乱が多かった2015～2019年の期間においても枯死率は2%未満であった。試験地の地形や個々の台風攪乱の強度や風向など考慮すべき点は多々あるが、老齢二次林である本試験地でも台風攪乱による枯死率の著しい増加は認められなかった。

次に林分全体のDBH階分布の変化を見てみると、測定期間を通じて逆J字型の分布を示すことに変わりなかったが、小径木 (DBH10cm未満) の個体が年々減少していた (807本から665本) (Fig. 1)。一方、DBH70cm以上の大径木は1998年の6本に対して最終的には10本まで増加していた。成熟林である綾試験地では、林冠を構成する樹種の最大DBHは100cmを超えており (永松ら 2002)、本試験地が示す最大DBHのクラスとは開きがある。今後、これらの大径木がどのような経過を辿って成長し、成熟林の林分構造に近づくのかを把握するためにも、より長期の観測を継続していく意義がある。

樹種別に見ると、最も幹本数の多いイスノキは測定期間中、幹本数とDBH分布の形状にほとんど変化が見られなかった (Table 3, Fig. 2)。ウラジロガシでは、期末にはDBH30cm未満の個体の減少 (105本から60本) とDBH30～50cmクラスの個体の増加 (26本から38本) が見られ (Fig. 3)、期首に比べて期末のDBH階分布はやや二山に近い形状になったが両者のDBH階分布の形状に有意な差は認められなかった (χ^2 検定、 $p=0.069$)。スダジイではDBH60cm以上のクラスで増加 (4本から6本) が見られたものの、それ以下のDBHクラスでは半分以下に本数が減少していた。DBH40cm以下の個体が全て枯死したツブラジイの本数減少と合わせて、シイ属2種の期末のDBH階分布は不連続な形状になっていた (Fig. 4)。

樹種ごとにBAの変化を見ると、期首ではウラジロガシ、イスノキ、スダジイの3種でBA全体の57%を示したが、期間を通じてその割合はほぼ変わらなかった (Table 4)。さらにタブノキ、アカガシを加えた上位5種ではその割合が75%まで増加しており、いわゆる成熟した林分の林冠構成種 (北沢 1961) が優占することが改めて示された。2015年～2019年の間にスダジイの枯死個体が多かったため、タブノキに抜かれて順位は4番目となっていた。ツブラジイも同時期に半分以下にBAが減少していた。このようなシイ属のBAの減少傾向は、近隣の高齢二次林でも見られており (Hirayama et al. 2019)、シイ属が示す台風攪乱への耐性の低さ (埜田 1987, 齊藤・佐藤 2007) によるものと考えられた。

これら主要樹種の枯死率と加入率を比較すると、いずれの樹種も全測定期間の枯死率が同期間の加入率を上回っており、特にスダジイとツブラジイの枯死率は5%

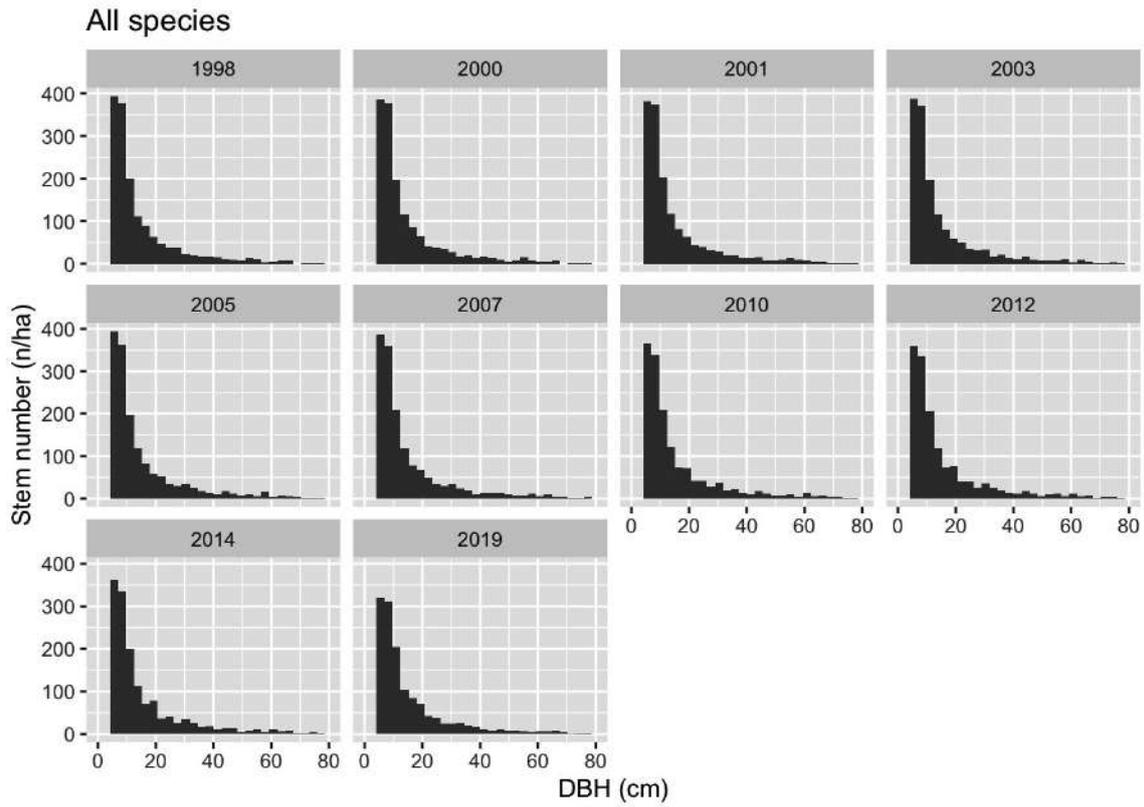


Fig. 1. 高岡試験地の DBH 階分布
DBH class distribution at each tree census in the study plot.

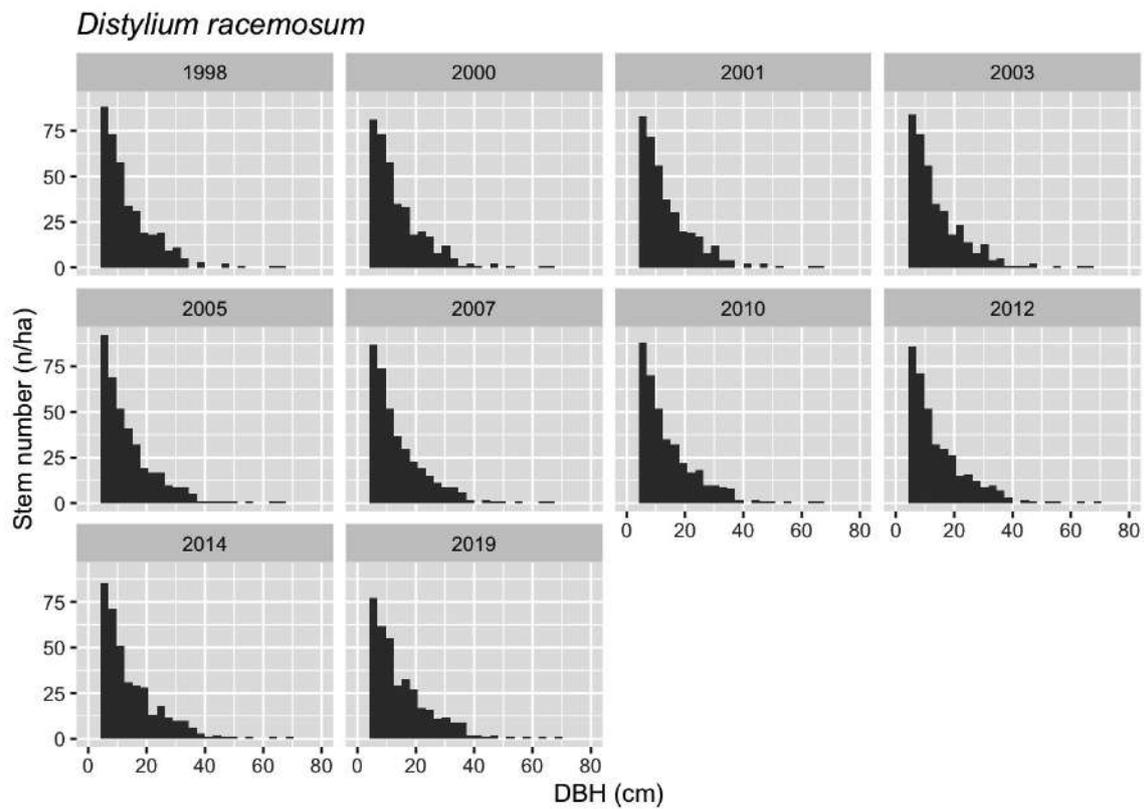


Fig. 2. イスノキの DBH 階分布
DBH class distribution of *Distylium racemosum* at each tree census in the study plot.

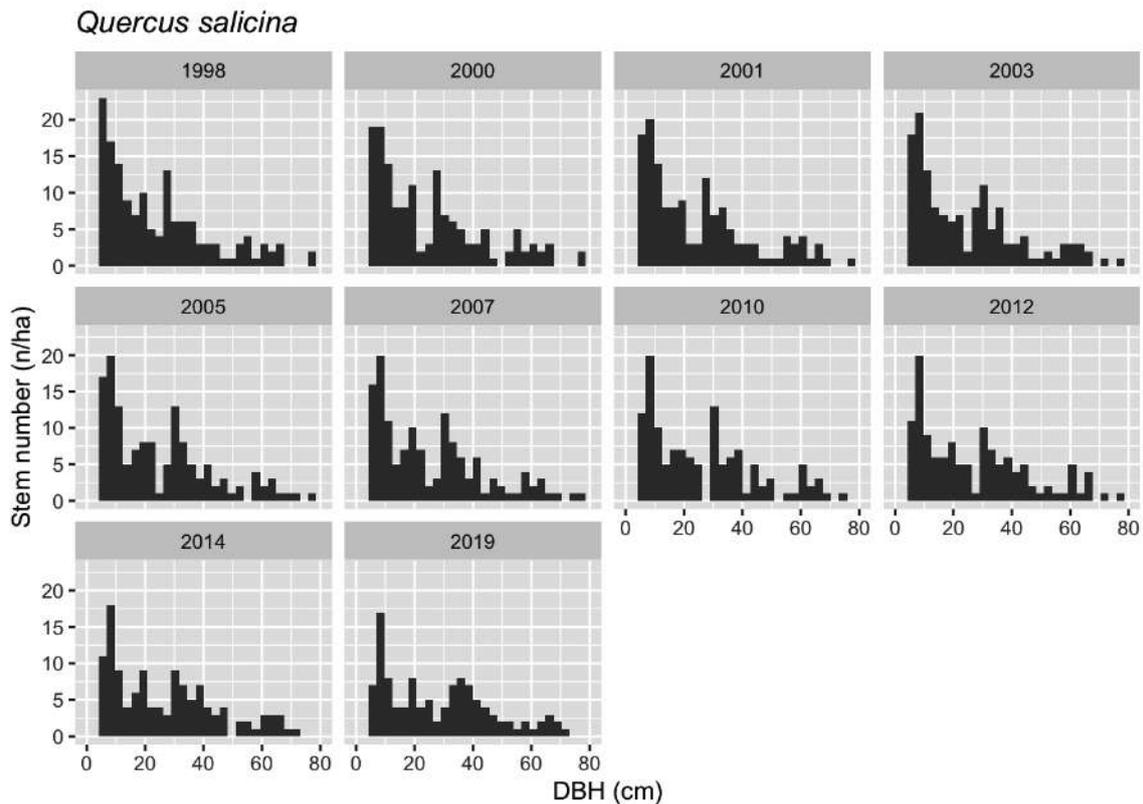


Fig. 3. ウラジロガシの DBH 階分布
DBH class distribution of *Quercus salicina* at each tree census in the study plot.

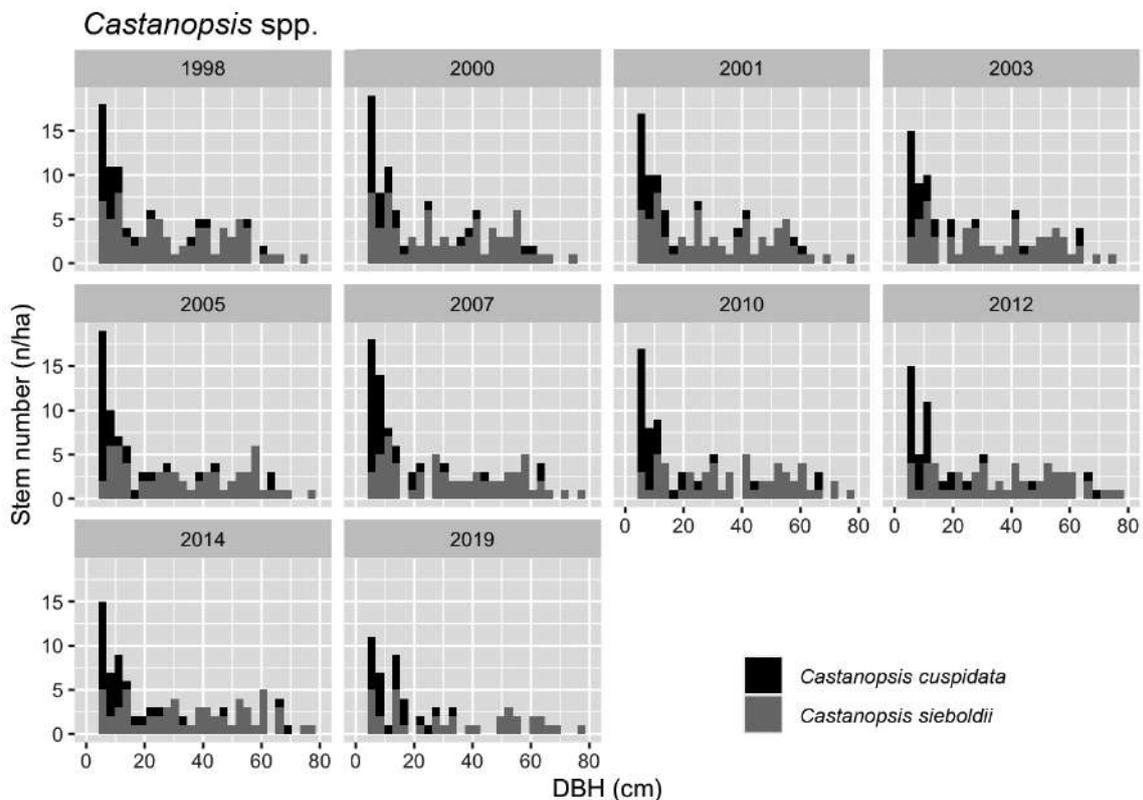


Fig. 4. スダジイとツブラジイの DBH 階分布
DBH class distribution of *Castanopsis cuspidata* and *Castanopsis sieboldii* at each tree census in the study plot.

Table 6. 測定期間中 (1998年から2019年) の主要樹種の加入率および枯死率の変化
Changes in recruitment and mortality rates of dominant species between 1998 and 2019 in the plot.

Species	Japanese name	1998-2000	2001	2002-2003	2004-2005	2006-2007	2008-2010	2011-2012	2013-2014	2015-2019	Whole period
Recruitment rate (%/year)											
<i>Distylium racemosum</i>	イスノキ	0.53	0.41	0.71	1.72	0.58	0.29	0.73	0.13	0.44	0.63
<i>Quercus salicina</i>	ウラジロガシ	0.34	0.52	0.73	0.35	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
<i>Castanopsis sieboldii</i>	スダジイ	1.30	1.05	0.00	0.00	1.40	0.64	0.94	1.68	0.00	1.41
<i>Machilus thunbergii</i>	タブノキ	0.00	1.52	3.04	0.98	0.00	0.00	0.00	1.06	0.00	0.66
<i>Castanopsis cuspidata</i>	ツブラジイ	3.77	2.83	3.86	12.21	4.09	1.14	0.00	1.68	0.00	6.36
Mortality rate (%/year)											
<i>Distylium racemosum</i>	イスノキ	1.06	0.41	0.28	0.67	0.47	0.39	1.30	0.26	0.82	0.70
<i>Quercus salicina</i>	ウラジロガシ	1.33	1.04	1.46	1.40	0.96	2.21	0.42	1.16	1.83	1.48
<i>Castanopsis sieboldii</i>	スダジイ	1.30	5.11	6.14	0.78	0.71	4.29	0.94	0.00	10.77	5.07
<i>Machilus thunbergii</i>	タブノキ	1.96	0.00	0.00	2.88	0.88	2.29	0.00	1.06	0.43	1.15
<i>Castanopsis cuspidata</i>	ツブラジイ	5.54	2.83	1.97	5.61	1.40	2.25	5.18	1.68	5.31	7.29

を超える値を示していた (Table 6)。逆にイスノキでは、枯死率と加入率はほぼ同じ値であった。種ごとの枯死率が0%を示す期間がほとんどなかったのに対し、イスノキを除いた4種で加入率が0%を示す期間が存在しており、特に2015年～2019年の期間では同時に加入率が0%となっていた。また、ウラジロガシやタブノキでは、複数の期間で加入率が0%を示しており、ウラジロガシは2008年から加入率が0%で推移していた。加えてウラジロガシでは、期首に比べて小径木の密度が低下してきており (Fig. 3)、安定した個体群構造を示すイスノキとは対照的な変化を示している。このように相対的に低い加入率を示す一方で、本試験地ではDBH 5 cm以上の個体を測定対象としているため、対象サイズよりも小さい個体の更新状況を反映できていない。Yamamoto and Manabe (1997) は、約80年生の照葉樹二次林で大型台風攪乱後にシイ属 (ツブラジイ) の林冠木が枯死し、ウラジロガシとイスノキがギャップ更新木として頻繁に出現することで優占度が増すことを指摘している。21年間にわたる林分構造の変化傾向からは、本試験地においても台風攪乱後のシイ属の個体数減少と、イスノキの安定した更新が認められており、佐藤ら (2005) が指摘したように成熟林への移行が進んでいるものと考えられる。一方で小径木を中心に個体数の変動が大きかったウラジロガシでは、若齢の二次林で主体となる萌芽による更新が期待できないため、今後、どのように更新するのか不明な点も残る。老齡二次林が成熟林に移行する際にどのような林分構造の変化を示すのかを明らかにするためにも、更なる継続観測が必要である。

謝辞

本報告の執筆にあたっては、文部科学省科学研究費助成事業JP17H01477による助成を受けた。本試験地の設定および測定に関して、九州森林管理局ならびに同局森林技術・支援センターの職員の方々に多大な協力を賜った。また、新山馨博士、小南陽亮博士、永松大博士、重永英年博士、金谷整一博士、荒木眞岳博士、八木貴信博士、釣田竜也博士、川合浩太氏ならびに宮崎大学の学生諸氏には、現地調査に際してご援助いただいた。以上の方々に心よりお礼申し上げる。

引用文献

- 粟屋 仁志・西川 匡英・本田 健二郎・小幡 進 (1985) 暖帯広葉樹の生長と林分構造 第3報 固定標準地による樹種および樹种群の生長特性. 林試研報, 331, 1-38.
- Bellingham P. J., Kohyama T. and Aiba, S. I. (1996) The effects of a typhoon on Japanese warm temperate rainforests. *Eco. Res.*, 11, 229-47.
- Hall, P., Ashton, P. S., Condit, R., Manokaran, N. and Hubbell, S. P. (1998) Signal and noise sampling tropical forest

- structure and dynamics. In Dallmeier, F. and Comiskey, J. A. (eds.) "Forest Biodiversity Research, Monitoring and Modeling". Parthenon Publisher, New York, 63-77.
- 服部 保・赤松 弘治・武田 義明・小館 誓治・上甫 木 昭春・山崎 寛 (1995) 里山の現状と里山管理. 人と自然, 6, 1-32.
- Hirayama, T., Ito, S., Yamagawa, H., Hirata, R. and Mitsuda, Y. (2019) Dynamics of an old evergreen coppice in southwestern Japan with special focus on a typical coppice species (*Castanopsis cuspidata*) and a climax species (*Distylium racemosum*). Landsc. Ecol. Eng., 15(2), 205-214.
- 井藤 宏香・伊藤 哲・中尾 登志雄 (2009) 南九州の壮齢照葉樹二次林における主要構成樹種の台風被害の特徴—斉萌芽に由来する二次林構造と地形の影響—. 日林誌, 91, 35-41.
- Ito, H., Ito, S., Matsuda, A., Mitsuda, Y. and Buckley, P. G. (2007) The effect of micro-topography on habitat segregation and tree species diversity in a warm temperate evergreen broadleaved secondary forest in southern Kyushu, Japan. Veg. Sci., 24, 171-182.
- 北沢右三 (1961) 南九州における生態系の成帯構造. 資源研彙報. 54-55, 75-85.
- 熊本営林局 (1973) 熊本営林局土壌調査報告 (第9報). 高岡営林署高岡事業区土壌調査説明書. 82pp, 熊本営林局, 熊本.
- 三善 正市 (1959) カシ・シイの中心郷土地帯における常緑広葉樹林の林分構成・成長・更新ならびに施業に関する研究. 宮崎大農演報, 3, 1-141.
- 永松 大・小南 陽亮・佐藤 保・齊藤 哲 (2002) 綾照葉樹林の個体群構造と更新. 九州森林研究, 55, 50-53.
- 齊藤 哲・佐藤 保 (2007) 照葉樹林の主要樹種の台風被害の特性—綾の LTER サイトにおける複数の台風攪乱の比較解析—. 日林誌, 89, 321-328.
- 佐藤 保・齊藤 哲・荒木 眞岳 (2018) 台風攪乱を伴った壮齢コジイ二次林の地上部純一次生産量の変動. 森林総研研報, 17, 325-332.
- 佐藤 保・齊藤 哲・江藤 幸二・加藤 省三 (2005) 宮崎県高岡のイスノキ・ウラジロガシ林における個体群構造と動態. 森林立地, 47, 105-112.
- 曾我部 亮輔・佐藤 保 (2013) 照葉樹林の林分構造及び遷移過程の解明. 九州森林研究, 66, 136-138.
- 埜田 宏 (1987) 風害によるコジイ林植生遷移の促進. 神戸群落生態研究会編 "中西 哲博士追悼植物生態・分類論文集". 神戸群落研究会, 379-382.
- 手塚 泰彦・楠元 司 (1960) 大隅半島南部の二次林について. 資源研彙報, 52-53, 48-56.
- Yamada, T., Aiba, S. I., Kubota, Y., Okubo, K., Miyata, I., Suzuki, E., Maenaka, H. and Nagano, M. (2011) Dynamics of species diversity in a Japanese warm-temperate secondary forest. Ecosphere, 2, art80.
- Yamamoto, S. I. and T. Manabe (1997) Typhoon disturbance and tree replacement pattern in a secondary evergreen broad-leaved forest, JIBP Special Research Area at Minamata, southwestern Japan. Jpn. J. For. Env., 39, 13-20.
- 米倉 浩司・梶田 忠 (2003-) "BG Plants 和名-学名インデックス" (YList) ", <http://ylist.info> (参照 2020-7-13) .

Changes in stand structure of an old secondary lucidophyllous forest over 21-years monitoring

Tamotsu SATO^{1)*}, Hiromi YAMAGAWA²⁾, Haruto NOMIYA²⁾,
Tetsuto ABE²⁾, Satoshi SAITO³⁾, Minoru KAMA⁴⁾ and Yoshihiro OTERA⁴⁾

Abstract

We monitored the stand structure of an old secondary lucidophyllous forest in Takaoka, Miyazaki, southwestern Japan for 21 years (1998–2019). Based on data collected from 10 tree censuses of the 1-ha permanent plot, stem density decreased from 1,532 stems/ha in 1998 to 1,379 stems/ha in 2019. Basal area (BA) increased from 45.74 m²/ha in 1998 to 50.97 m²/ha in 2014, but decreased during the period from 2015 to 2019 because of *Castanopsis sieboldii* mortality due to a number of typhoon disturbances. The average mortality rate throughout the monitoring period was 1.51%/year, which was higher than the recruitment rate for the same period (1.01%/year). The tree census in 2019 revealed the loss of some small size trees of *Quercus salicina* and *C. sieboldii*, which suggests typhoon impacts on the regeneration and species composition of this forest in the near future.

Key words : warm temperate evergreen broad-leaved forest, *Quercus salicina*, *Castanopsis sieboldii*, long-term monitoring, forest dynamics, secondary forest

Received 24 August 2020, Accepted 26 October 2020

1) Department of Forest Vegetation, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Kyushu Research Center, FFPRI

3) Kansai Research Center, FFPRI

4) Forestry Technology Development and Support Center, Kyusyu Regional Forest Office, Forestry Agency

* Department of Forest Vegetation, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, JAPAN; E-mail: satoo@affrc.go.jp

研究資料 (Research record)

宝川森林理水試験地観測報告

一本流・初沢試験流域－(2011年1月～2016年12月)

玉井 幸治^{1)*}、久保田 多余子¹⁾、野口 正二¹⁾、清水 貴範¹⁾、飯田 真一¹⁾、
澤野 真治²⁾、延廣 竜彦³⁾、荒木 誠¹⁾、坪山 良夫⁴⁾

要旨

宝川森林理水試験地(気象観測露場:東経139°01′、北緯36°51′、標高816-1945 m)は、1937年11月より降水量と流出量の観測を開始して以来、精度の高い観測を継続してきた。本報では宝川森林理水試験地で観測した、2011年1月から2016年12月までの日降水量と日流出量を公表する。この期間中には転倒マス式雨量計を更新したので、これについても述べる。

キーワード:宝川森林理水試験地、日降水量、日流出量

1. はじめに

宝川森林理水試験地(群馬県利根郡みなかみ町大字藤原大利根国有林内)は奥利根水源地域のブナを主とする天然林を開発するにあたり、治水と水源涵養の観点から森林の伐採と流出量の関係を明らかにすることを目的として、東京営林局(現 関東森林管理局)が林業試験場(現 森林総合研究所)の協力の下に1936年6月に設置した(志水1997,坪山2007)。1937年11月から気象観測と流量観測を開始し、森林総合研究所が現在も観測を継続している。これまでに、1937年11月から2010年12月までの日降水量と日流出量の観測値を公表してきた(農林省林業試験場1961,宝川試験地・防災部理水第一研究室1979,藤枝・志水1994,久保田ら2020a,久保田ら2020b,森林総合研究所2020)。本報では2011年1月から2016年12月までの日降水量と日流出量を公表し、研究や行政活動に資するデータを提供する。

2. 試験地の概要と沿革

2-1. 試験地の概要

宝川森林理水試験地は群馬県利根郡みなかみ町大字藤原大利根国有林内にあり(気象観測露場:東経139°01′、北緯36°51′、標高816 m)、本流試験流域(1905.66 ha)と初沢試験流域(117.90 ha)で構成されている。地形、地質、土壌、気候等の詳細および観測施設については、すでに刊行された試験地報告、「森林理水試験地観測報告(日降水量・日流出量)」(農林省林業試験場1961)、「宝

川森林理水試験地観測報告 本流・初沢試験流域(1957年1月～1977年12月)」「宝川試験地・防災部理水第一研究室1979)、「宝川森林理水試験地観測報告一本流・初沢試験流域－(1978年1月～1990年12月)」「藤枝・志水1994)、「宝川森林理水試験地観測報告一本流・初沢試験流域－(1991年1月～2000年12月)」「(久保田ら2020a)および「宝川森林理水試験地観測報告一本流・初沢試験流域－(2001年1月～2010年12月)」「(久保田ら2020b)を参照されたい。

2-2. 試験地の沿革

観測報告期間(2011～2016年)中の主な出来事は次の通りである。これ以前の沿革については藤枝ら(1996)、久保田ら(2020a)、久保田ら(2020b)などを参照されたい。

2011年(平成23年)3月11日 東北地方太平洋沖地震が発生。これ以降、初沢試験流域での観測水位が負値となる期間が多くなる。水位計室の地下部にある観測水槽からの漏水が発生したためと思われる。

2011年(平成23年)7月27～30日 新潟・福島豪雨の最中に、初沢試験流域の量水堰堤が土砂で埋まる。宝川理水試験地へのアクセス路が山腹崩壊により通行不能になる。

2016年11月 初沢試験流域水位計室の観測水槽が補修される。

原稿受付:令和2年9月29日 原稿受理:令和2年11月2日

1) 森林総合研究所 森林防災研究領域

2) 森林総合研究所 北海道支所

3) 森林総合研究所 東北支所

4) 森林総合研究所 理事

* 森林総合研究所 森林防災研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

3. 観測方法

3-1. 降水量観測

2011～2014年では自記式転倒ます型雨量計 (B-432 中浅測器社製、一転倒 0.5 mm) による値を、2015～2016年では転倒マス型雨量計 (OW-34-BP 太田計器社製、一転倒 0.5 mm) によるパルスデータをデータロガー (HOBO イベント Onset 社製) に記録した値を、それぞれ公表値とした。日界を 0 時 -24 時とした。また冬期間の日降水量の公表を従来と同様に行わない。

3-2. 水位観測

本流試験流域、初沢試験流域ともに、観測小屋の地下部において放水路 (本流試験流域) あるいは静水池 (初沢試験流域) と通水している観測水槽に設置した圧力式水位計 (CS420-L Druck 社製) により水位を 10 分毎に計測した。データロガー (CR10 Campbell Scientific 社製) を通じてデータストレージモジュール (SM4M Campbell Scientific 社製) に観測値を記録し、データストレージモジュールを交換することでデータの回収を行った。圧力式水位計によって計測された水位は、ポイントゲージによる水位の直読値により補正した。

3-3. 流量計算

日界を 0 時 -24 時とした。

3-3-1. 本流試験流域

本流試験流域の流量計算には、久保田ら (2020b) が用いた以下の式を用いた。

$$\begin{aligned} Q &= 0 & H < 2.164 \\ Q &= (0.032 - 0.047H^{-0.5}) \cdot H^{1.5} & 2.164 \leq H < 9.769 \\ Q &= (0.056 - 0.122H^{-0.5}) \cdot H^{1.5} & 9.769 \leq H < 36.001 \\ Q &= (0.049 - 0.080H^{-0.5}) \cdot H^{1.5} & 36.001 \leq H \end{aligned}$$

さらに、2002 年 7～9 月の改修工事により放水路は側壁が左右とも 20 cm 厚みを増して、水路幅が 14.0m から 13.6m となったことに伴う措置として流量 Q' ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) を以下の式で計算した。これも久保田ら (2020b) と同様の方法である。

$$Q' = Q \cdot 13.6 / 14.0$$

3-3-2. 初沢試験流域

初沢試験流域の量水施設は、幅 1 m である 7 基の矩形堰が横に並び、中央の堰が他の 6 基よりも 50 cm 低い位置に取り付けられている。これらの堰の構造は同一で、個々の堰の流量計算には以下の式を用いる (久保田ら 2020b)。

$$\begin{aligned} f(H) &= 3089.58 \cdot H^{1.1873} & 0 < H \leq 4.615 \\ g(H) &= \left\{ \frac{0.01 \cdot B + 4.5}{16.44 \cdot \log H + 30.56} + 0.3 \right\} \cdot \sqrt{2g} \cdot B \cdot H^{1.5} & 4.615 < H \end{aligned}$$

ここで、 $f(H)$ 、 $g(H)$: 流量 ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)、 H : 越流水深 (cm)、

B : 堰堤幅 (100 cm)、 g : 重力加速度 (980 cm s^{-2})。

7 基の矩形堰全体からの初沢試験流域流量の計算には、久保田ら (2020b) が用いた以下の式を用いた。

$$\begin{aligned} Q &= f(H) & 0 < H \leq 4.615 \\ Q &= g(H) & 4.615 < H \leq 50 \\ Q &= g(H) + f(H - 50) \times 6 & 50 < H \leq 54.615 \\ Q &= g(H) + g(H - 50) \times 6 & 54.615 < H \end{aligned}$$

4. 日降水量および日流出量

日降水量と本流試験流域の日流出量を Table 1 に、初沢試験流域の日流出量を Table 2 に示した。

4-1. 降水量

3-1. に記述したように、2011～2014年と 2015～2016年では降水量の公表値に用いた観測システムが異なる。2013～2014年には両システムによる観測を並行して行った。これらの観測値をイベント毎と月降水量 (Fig. 1)、6～9月の総降水量 (Table 3) にて比較した。それによると OW-34-BP によるパルスをデータロガーに記録する新しいシステムによる観測値の方が、古いシステムである B-432 による観測値よりも 7～8% 多い結果となった。

4-2. 本流試験流域の流出量

ここでは観測報告期間において観測された降水量と流出量の関係と比較し、既に報告されている値と比較する。

4-2-1. 積雪期、融雪期、無雪期の設定

観測報告期間中では露場における冬期間の降水量観測値を公表しないため、年間での水収支を評価することはできない。そこで冬期間を含まない期間における水収支の評価をまず試みる。水収支を評価する期間は、その前後での流域内での貯留量の変動が少ないことが必要である。そのため流域内での貯留量となる積雪の影響の少ない期間を見出すために、本流流域における積雪期、融雪期、無雪期を大まかに設定する。

玉井 (2016) は農林省林業試験場 (1961) にて報告されている 1937 年 11 月～1958 年 10 月の露場での月降水量と本流試験流域での月流出量との相関関係を求めた。この期間中には冬期間における降水量も報告されている。例として 1 月、5 月、10 月を Fig. 2 に示す。それによると、7～11 月には両者に正の相関が認められた。流域に降った降雨のうち、月をまたがずに流出する量が主であったためであると考えられる。両者に相関が認められなかった 12～6 月のうち 12～3 月では月降水量に対する月流出量の値が概ね半分以下、4～6 月では概ね 2 倍以上であった。12～3 月では流域に降った降雪が流域内に貯留されたため、4～6 月では流域に貯留されていた積雪が融けて流出したためと考えられる。そのため 12～3 月を積雪期、4～6 月を融雪期、7～11 月を無雪期とした。

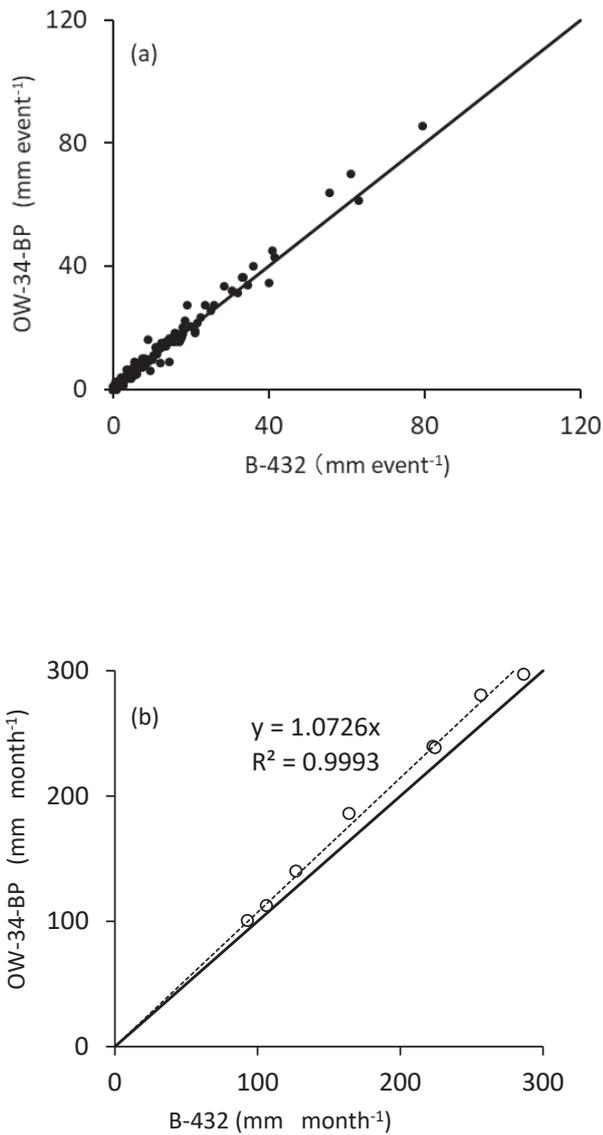


Fig. 1. 新旧システムによる降水量の比較 (2003、2004 年 6 ~ 9 月)

Comparison of precipitation observed with old and new systems.

- (a) 降水イベント毎での比較 Comparison in every event
直線は 1:1 のラインを示す Solid line indicates 1:1 line.
- (b) 月降水量の比較 Comparison in every month
直線は 1:1 のラインを、破線は直線回帰式を、それぞれ示す。
Solid and broken lines indicate 1:1 line and regression line, respectively.

Table 3. 新旧システムによる降水量の比較 (2003、2004 年 6 ~ 9 月)

Comparison of precipitation observed by old and new systems in Jun.- Sep., 2003 and 2004.

	B-432	OW-34-BP	OW-34-BP /B-432
Jun.-Sep. 2013	813.5	876.0	108%
Jun.-Sep. 2014	667.5	718.5	108%

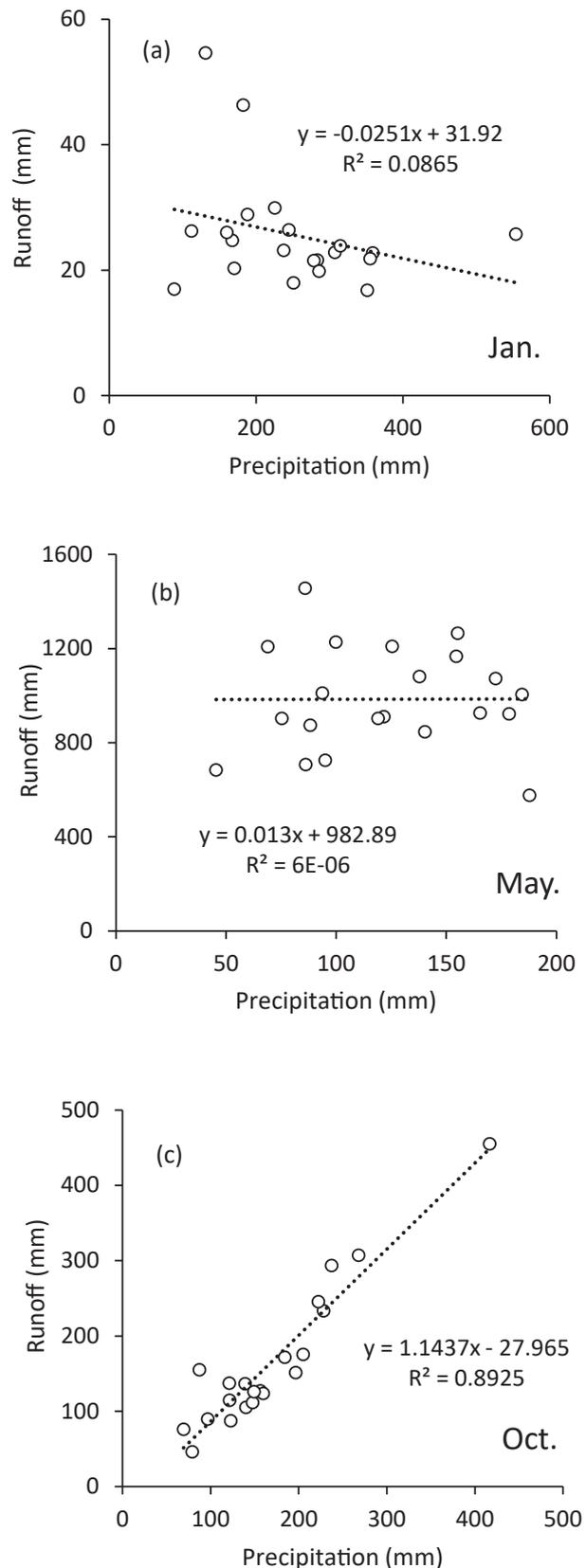


Fig. 2. 月降水量と月流出量の比較 (玉井、2016)。

(a) 1 月、(b) 5 月、(c) 10 月

Comparison between monthly precipitation and monthly runoff (Tamai, 2016).

(a) January, (b) May, (c) October.

4-2-2. 無雪期における露場での降水量との比較

積雪による流域内の貯留量変化を排除できる無雪期であり、かつ露場における降水量観測値が比較的そろっている7～10月の期間の降水量と流出量の比較を行った (Fig. 3)。但し2011年には7～10月にも露場における降水量観測の休止期間が含まれているので、Fig. 3には示していない。2012年の流出量は約233mmと、これまで観測された中では最も少なかった。そのためFig. 3の中で最も左下にプロットされた。他の年の値を示す点は、いずれも1938～2000年の値を示す点の分布域内にプロットされた。

4-2-3. 藤原アメダスによる降水量との年間値の比較

宝川理水試験地に最寄りの藤原アメダス (東経 139° 4′、北緯 36° 52′、標高 700 m) では1978年以降、1年を通じて降水量の観測値が報告されている。藤原アメダスによる降水量観測値 (気象庁、2020) を露場における降水量観測値に代えて、年間値の比較を行う。

それに先立って、露場と藤原アメダスによる観測値の相関関係をFig. 4に示す。Fig. 4に示された点は、露場における月降水量データが比較的そろっている6～10月における観測値に基づいている。1978～2010年の値による両者の直線回帰式の傾きは、約0.85であった。すなわち藤原アメダスにおける観測値は、露場における観測値よりも約15%程度少ない結果となった。

年間値の比較を行うのに際し、玉井 (2016) による積雪期の始まる12月から無雪期の終わる11月までを1水年とした。これ以降、例えば2016年の年流出量とは2015年12月～2016年11月の値を集計したものである。2011～2016年の6年間での年流出量は、2012年に1,760.76mm、2015年に1,888.89mmと、2,000mmを下回った。これは1963年の1,550.26mmに次ぐ少ない値であった。藤原ア

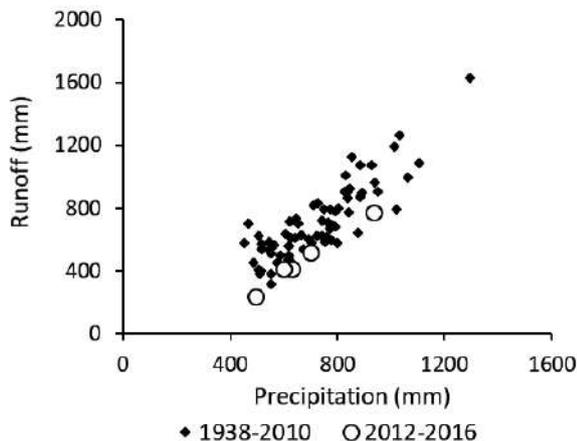


Fig. 3. 無雪期 (7～10月) における本流流出量と露場での降水量の比較

Comparison between runoff in Honryu Watershed and precipitation in Weather station in Takaragawa experimental site in no snow season (Jul.- Oct.).

メダスでの観測値のある1978年以降での年降水量と年流出量の比較をFig. 5に示した。年流出量の少なかった2012年、2015年の値を示す2つの点は、1978～2010年の値を示す点の分布域よりも左下にある。その他の年の値を示す4点は、概ね1978～2010年の値を示す点の分布域内にある。

Fig. 3とFig. 5から、2011～2016年における本流流域からの流出量は極めて少ない年があったものの、降水量との比較においては概ねこれまでの報告と同程度であっ

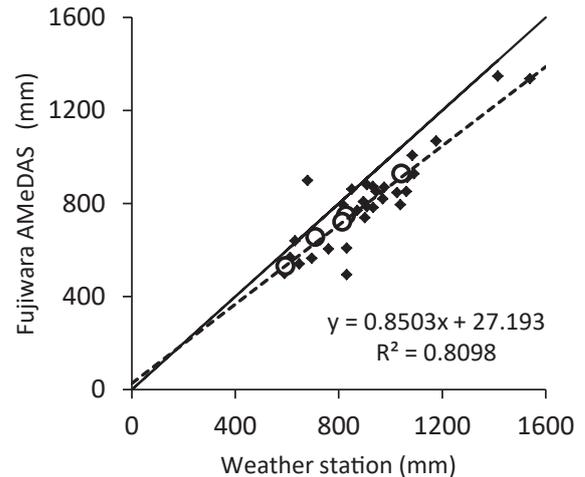


Fig. 4. 露場と藤原アメダスにおける6～10月での降水量の比較

Comparison of precipitation in Jun.-Oct. between Weather station and Fujiwara AMeDAS

◆ : 1978-2010, ○ : 2012-2016

Solid Line : 1:1, Broken line : Regression line

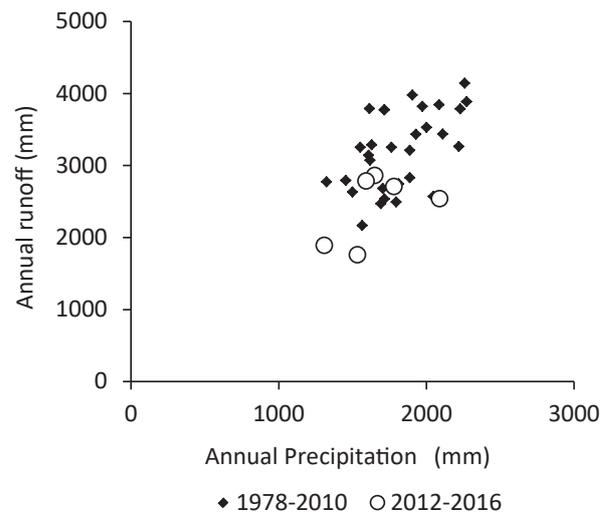


Fig. 5. 本流流域の年流出量と藤原アメダスでの年降水量の比較

Comparison between annual runoff in Honryu Watershed and annual precipitation at Fujiwara AMeDAS.

たと判断される。

4-3. 初沢試験流域の流出量

初沢試験流域での観測水位は、東北地方太平洋沖地震が発生した2011年(平成23年)3月11日以降、負値となる期間が多くなった。観測水槽からの漏水が生じるようになったためと考えられた。また2011年(平成23年)7月26～30日に発生した新潟・福島豪雨により、初沢試験流域の観測堰堤が土砂で埋まり、特に高水位時には横に7つ並んでいる矩形堰のすべてにおいて水面が均一ではない可能性が考えられた。

観測水槽の補修は2016年11月に実施されたが、量水堰堤の浚渫は2017年になって実施された。そのため2011年3月10日以降の初沢試験流域の流出量を欠測とした。

謝辞

関東森林管理局および利根沼田森林管理署には試験地の運営および観測水槽の補修工事などにおいて多大なご協力を頂きました。細見久美子氏と土屋恒子氏には自記紙の読み取りやデータ入力において多大なご支援を頂きました。ここに記し深甚の謝意を表します。なお、本資料の取りまとめに際し、環境省地球環境保全等試験研究費(農1942)によるサポートを受けたことを付記します。

引用文献

- 藤枝基久・志水俊夫(1994)宝川森林理水試験地観測報告—一本流・初沢試験流域—(1978年1月～1990年12月)。森林総合研究所研究報告, 368, 207-245.
- 藤枝基久・野口正二・小川真由美・志水俊夫・坪山良夫・細田育広(1996)宝川森林理水試験地水文観測53年間の記録。森林総合研究所研究報告, 370, 77-120.
- 気象庁(2020)気象庁アメダス。https://www.jma.go.jp/jp/amedas/, (参照2020-05-18)。
- 久保田多余子・野口正二・清水貴範・細田育広・村上茂樹・壁谷直記・清水晃・阿部俊夫・坪山良夫・玉井幸治(2020a)宝川森林理水試験地観測報告—一本流・初沢試験流域—(1991年1月～2000年12月)。森林総合研究所研究報告, 19(2), 159-184.
- 久保田多余子・野口正二・清水貴範・阿部俊夫・清水晃・壁谷直記・延廣竜彦・飯田真一・玉井幸治・村上茂樹・澤野真治・坪山良夫(2020b)宝川森林理水試験地観測報告—一本流・初沢試験流域—(2001年1月～2010年12月)。森林総合研究所研究報告, 19(4), 印刷中。
- 農林省林業試験場(1961)森林理水試験地観測報告(日降水量・日流出量)。農林省林業試験場, pp.225.
- 宝川試験地・防災部理水第一研究室(1979)宝川森林理水試験地観測報告 本流・初沢試験流域(1959年1月～1977年12月)。林業試験場研究報告, 302, 97-154.
- 宝川試験地・防災部理水第一研究室(1984)宝川森林理水試験地観測報告 初沢小試験流域1, 2, 3号沢(1957

年1月～1981年12月)。林業試験場研究報告, 327, 83-190.

志水俊夫(1997)宝川森林理水試験地における水研究の歩み。水利科学, 40, 1-29.

森林総合研究所(2020)森林総合研究所森林理水試験地データベース。https://www2.ffpri.go.jp/labs/fwdb/, (参照2020-05-18)。

玉井幸治(2016)群馬県みなかみ町宝川森林理水試験地における流出量の季節変動特性。農業農村工学会大会講演要旨集(平成28年度), 5:33.

坪山良夫・清水晃・真島征夫(2007)森林総合研究所宝川森林理水試験地。砂防学会誌, 60, 78-81.

Table 1. 日降水量と本流試験流域からの日流出量

Daily precipitaion and runoff of HONRYU Watershed.

(単位 Unit : mm)

項目	2011年 1月～6月 (Jan.-Jun., 2011)											
Item	1月	Jan.	2月	Feb.	3月	Mar.	4月	Apr.	5月	May.	6月	June.
	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量
	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff
	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流
	Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-	
日	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU
Day	station		station		station		station		station		station	
1		1.44		0.36		0.32		0.75		23.08		17.63
2		1.65		0.35		0.26		1.16		27.98		13.29
3		1.41		0.35		0.24		1.17		21.20		15.45
4		1.31		0.30		0.22		0.89		24.14		15.62
5		1.32		0.29		0.21		0.91		24.01		15.10
6		1.31		0.25		0.18		1.75		27.22		14.23
7		1.32		0.26		0.18		2.33		31.45		12.69
8		1.22		0.19		0.18		2.86		35.98		12.50
9		1.06		0.23		0.17		6.03		33.77		14.14
10		1.13		0.26		0.18		8.18		78.57		12.86
11		0.94		0.18		0.22		6.75		50.08		10.86
12		0.89		0.21		0.28		5.04		45.87		8.72
13		0.93		0.28		0.38		5.47		50.53		9.51
14		0.77		0.21		0.64		8.66		32.29		8.89
15		0.66		0.23		0.85		12.96		27.41		6.49
16		0.80		0.27		0.91		15.83		26.43		5.09
17		0.76		0.20		0.57		13.21		25.40		5.75
18		0.65		0.48		0.40		12.93		25.33		5.80
19		0.67		0.36		0.31		18.05		27.94		4.76
20		0.60		0.29		0.39		10.18		31.58		6.15
21		0.58		0.31		1.41		7.31		35.79		6.92
22		0.49		0.36		1.46		10.14		29.90		6.64
23		0.49		0.41		0.97		23.20		20.27		6.05
24		0.42		0.43		0.68		31.69		21.53		4.66
25		0.44		0.45		0.59		14.55		22.71		16.38
26		0.37		0.47		0.53		9.41		18.09		7.37
27		0.37		0.42		0.43		18.68		20.25		5.41
28		0.34		0.46		0.38		59.79		20.00		4.49
29		0.23				0.45		26.10		40.89		5.02
30		0.36				0.69		16.34		46.94		3.13
31		0.40				0.75				30.17		
計		25.33		8.86		15.43		352.32		976.80		281.60
Total												

Table 1. 日降水量と本流試験流域からの日流出量 (つづき)

Daily precipitaion and runoff of HONRYU Watershed. (Continued)

(単位 Unit : mm)

項目 2011 年 7 月 ~ 12 月 (Jul.-Dec., 2011)												
Item	7 月	July.	8 月	Aug.	9 月	Sep.	10 月	Oct.	11 月	Nov.	12 月	Dec.
	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量
	Precipi- tation	Runoff	Precipi- tation	Runoff	Precipi- tation	Runoff	Precipi- tation	Runoff	Precipi- tation	Runoff	Precipi- tation	Runoff
	露 場	本 流	露 場	本 流	露 場	本 流	露 場	本 流	露 場	本 流	露 場	本 流
	Meteoro- logical	HONRYU	Meteoro- logical	HONRYU	Meteoro- logical	HONRYU	Meteoro- logical	HONRYU	Meteoro- logical	HONRYU	Meteoro- logical	HONRYU
日	station		station		station		station		station		station	
Day												
1		3.01	0.5	7.42	27.5	4.26	0.5	5.69		0.82		2.21
2		2.31	0.5	4.27	25.0	11.94	1.0	1.58		0.67		1.50
3		4.30	2.5	2.91	35.5	29.50	3.5	1.89		0.59		4.77
4		4.62	1.0	2.11	9.0	15.98	0.0	1.53		0.50		7.41
5		6.77	0.0	1.71	47.0	18.15	25.5	3.83		0.42		3.81
6		4.34	0.0	1.39	2.0	22.96	8.0	9.10		1.21		2.77
7		3.14	29.0	6.79	0.0	10.95	12.0	6.46		8.40		2.23
8		2.47	3.0	3.83	0.0	6.01	0.0	4.00		4.41		1.86
9		3.54	0.0	1.97	0.0	3.70	0.0	2.67		2.45		1.58
10		2.52	37.0	4.20	0.0	2.52	0.0	1.94		1.69		1.43
11		1.76	0.0	4.42	3.0	1.92	0.5	1.57		3.71		1.14
12	観測中止 No data collected	1.39	0.0	1.94	0.0	1.53	0.0	1.25	冬期間の観測中止 No data collected during winter	3.26	冬期間の観測中止 No data collected during winter	0.97
13		1.19	0.0	1.59	0.0	1.17	0.0	1.03		2.10		0.84
14		1.00	1.0	1.23	0.0	0.92	1.0	0.88		1.72		0.74
15		0.86	0.5	1.08	0.0	0.75	5.5	1.06		1.69		0.68
16		0.75	0.5	0.91	0.0	0.59	15.0	2.51		1.69		0.61
17		0.67	8.0	1.08	5.5	0.95	0.0	0.93		2.41		0.56
18		0.58	12.0	3.75	0.0	0.52	0.0	1.15		1.92		0.64
19		0.53	8.0	3.86	37.0	2.76	0.0	0.79		8.28		0.55
20		0.41	9.0	2.52	28.5	3.93		0.69		15.67		0.51
21		0.58	13.5	5.10	69.0	43.55		0.62		9.11		0.46
22	0.35	11.0	5.21	4.5	13.22	冬期間の観測中止 No data collected during winter	0.83	5.66	0.42			
23	0.32	1.0	3.88	0.0	9.29		1.14	3.92	0.43			
24	0.29	17.0	2.82	0.0	5.21		0.97	3.09	0.42			
25	0.44	12.0	7.83	0.0	3.19		1.76	2.38	0.41			
26	7.01	2.0	4.11	0.0	2.13		2.09	2.09	0.67			
27	11.04	1.5	2.84	0.0	1.56		1.66	1.74	1.03			
28	125.5	61.13	0.0	2.31	0.0		1.19	1.16	1.68	0.74		
29	170.0	59.53	0.0	1.68	0.0		0.92	0.93	1.77	0.53		
30	76.5	110.61	0.0	1.29	5.0		1.72	0.80	2.73	0.47		
31	9.0	10.99	2.5	1.06				1.29		0.46		
計	(381.0)	308.45	173.0	97.11	298.5	222.99	(72.5)	63.80		97.78		42.85
Total												

Table 1. 日降水量と本流試験流域からの日流出量 (つづき)

Daily precipitaion and runoff of HONRYU Watershed. (Continued)

(単位 Unit : mm)

項目	2012年 1月～6月 (Jan.-Jun., 2012)												
Item	1月	Jan.	2月	Feb.	3月	Mar.	4月	Apr.	5月	May.	6月	June.	
	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	
	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	
	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	
	Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		
日	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	
Day	station		station		station		station		station		station		
1		0.41		0.06		0.13		2.09		23.92		14.5	17.72
2		0.41		0.06		0.25		1.39		30.09		1.0	13.18
3		0.40		0.06		0.29		2.71		41.80		9.0	14.04
4		0.36		0.05		0.23		8.97		36.93		0.0	12.52
5		0.45		0.04		0.33		3.61		55.17		0.0	10.49
6		0.43		0.02		1.97		2.31		20.58		3.0	9.58
7		0.38		0.55		2.25		1.86		19.18		0.0	9.12
8		0.35		0.43		1.16		1.61		19.81		0.0	9.65
9		0.30		0.21		1.21		2.19		19.94		14.5	14.96
10		0.28		0.16		0.97		4.88		18.68		0.5	14.94
11		0.25		0.16		0.70		6.90		18.12		1.5	11.44
12		0.25		0.18		0.63		14.33		19.03		1.0	8.98
13		0.21		0.15		0.59		13.68		15.48		0.0	7.59
14		0.16		0.12		0.49		14.29		16.15		0.0	7.14
15		0.14		0.11		0.51		14.49		19.09		0.0	7.49
16		0.15		0.10		0.46		14.34		23.07		8.0	7.60
17		0.18		0.09		0.46		13.70		19.61		9.0	8.70
18		0.20		0.12		1.28		14.53		25.36		0.0	6.62
19		0.19		0.13		1.80		15.52		18.13		20.5	12.61
20		0.17		0.12		1.14		17.91		18.68		0.5	17.02
21		0.17		0.10		0.91		14.84		18.66		1.5	7.74
22		0.11		0.11		0.70		15.20		19.54		16.0	9.24
23		0.07		0.17		0.59		17.14		19.03		0.0	6.70
24		0.07		0.37		1.09		18.04		18.00		0.0	5.08
25		0.05		0.18		1.09		19.04		18.32		0.0	4.07
26		0.07		0.18		0.82		39.50	0.0	17.69	0.0	0.0	3.10
27		0.10		0.14		0.72		27.82	0.0	15.67	0.0	0.0	2.79
28		0.11		0.13		0.74		17.31	0.5	14.69	0.0	0.0	2.68
29		0.10		0.12		0.81		18.20	9.5	14.83	0.0	0.0	2.47
30		0.10				1.44		16.32	0.5	15.92	0.0	0.0	2.45
31		0.08				2.63			0.0	14.99			
計		6.70		4.42		28.39		374.72	(10.5)	666.16		100.5	267.71
Total													

Table 1. 日降水量と本流試験流域からの日流出量 (つづき)

Daily precipitaion and runoff of HONRYU Watershed. (Continued)

(単位 Unit : mm)

項目 2012 年 7月~12月 (Jul.-Dec., 2012)												
Item	7月	July.	8月	Aug.	9月	Sep.	10月	Oct.	11月	Nov.	12月	Dec.
	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量
	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff
	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流
	Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-	
日	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU
Day	station		station		station		station		station		station	
1	6.5	2.35	0.0	0.68	2.0	0.06	1.0	17.22	7.0	1.66		0.60
2	0.0	2.47	14.0	2.29	0.5	0.06	15.5	5.43		3.52		0.49
3	1.5	1.74	0.0	0.82	3.0	0.06	1.0	5.92		2.30		0.23
4	0.0	1.90	0.0	0.62	4.0	0.75	0.0	2.73		2.35		1.01
5	0.0	1.47	0.0	0.54	0.0	0.12	0.0	2.33		2.13		0.65
6	34.5	2.10	1.0	0.50	1.5	0.18	6.0	1.56		5.63		0.32
7	65.0	16.38	0.0	0.42	0.0	0.07	1.5	1.58		3.42		0.27
8	4.0	22.30	0.0	0.36	0.5	0.04	0.0	1.20		5.01		0.33
9	0.0	7.14	0.0	0.31	0.0	0.11	0.0	0.84		15.41		0.54
10	0.0	4.67	0.0	0.28	0.0	0.03	0.0	0.70		12.87		1.97
11	0.0	3.59	5.5	0.43	12.5	0.27	0.5	0.50		9.07		4.76
12	11.5	4.80	0.5	0.32	0.5	0.23	0.0	0.97		13.45		4.30
13	0.0	2.67	4.5	0.41	0.0	0.05	0.5	0.63	No data collected during winter 冬期間の観測中止	7.46	No data collected during winter 冬期間の観測中止	6.55
14	21.0	5.36	14.0	1.08	0.0	0.03	0.0	0.49		5.37		4.51
15	10.0	3.56	0.5	0.55	0.0	0.02	0.0	0.44		4.97		4.15
16	0.0	2.72	0.0	0.31	0.0	0.08	0.0	0.38		4.19		6.54
17	0.0	2.17	8.5	1.69	0.0	0.03	19.5	0.41		4.16		9.28
18	0.0	1.82	0.5	0.61	1.0	0.06	1.5	2.97		10.39		6.01
19	0.0	1.62	0.0	0.35	19.5	2.79	0.0	1.06		4.59		7.17
20	18.5	1.57	0.0	0.28	11.0	0.71	0.0	0.73		3.92		0.55
21	23.0	11.73	0.0	0.25	4.5	0.78	0.0	0.61		3.27		0.52
22	1.0	3.78	0.0	0.22	0.0	0.26	0.0	0.39		2.05		0.13
23	0.0	2.55	0.5	0.21	19.5	1.77	25.5	2.43		1.46		0.26
24	0.0	2.03	0.5	0.24	0.0	1.97	1.0	3.88		1.33		0.40
25	0.0	1.67	0.0	0.16	0.0	1.46	0.0	1.49		0.81		0.25
26	0.0	1.43	0.0	0.14	0.0	0.87	0.0	1.16		1.00		0.45
27	1.0	1.26	0.0	0.12	0.0	0.49	0.5	1.11		1.86		0.56
28	0.0	1.11	0.0	0.10	0.0	0.24	8.5	1.31		1.23		0.60
29	1.5	0.96	0.0	0.08	0.0	0.22	5.0	6.25		0.90		0.59
30	0.5	1.55	0.0	0.08	75.5	11.84	0.0	2.45		0.78		0.80
31	0.0	0.81	0.0	0.07			1.0	2.63				2.06
計	199.5	121.28	50.0	14.52	155.5	25.65	88.5	71.80	(7.0)	136.56		66.85
Total												

Table 1. 日降水量と本流試験流域からの日流出量 (つづき)

Daily precipitaion and runoff of HONRYU Watershed. (Continued)

(単位 Unit : mm)

項目	2013年 1月～6月 (Jan.-Jun., 2012)											
Item	1月	Jan.	2月	Feb.	3月	Mar.	4月	Apr.	5月	May.	6月	June.
	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量
	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff
	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流
	Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-	
日	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU
Day	station		station		station		station		station		station	
1		1.13		0.83		0.63		8.75	2.5	11.94	0.0	19.27
2		0.82		0.94		0.79		9.54	0.5	9.95	0.0	17.15
3		0.92		1.24		0.73		25.30	0.0	8.37	0.0	17.57
4		1.05		0.91		0.63		31.51	0.0	9.13	0.0	16.41
5		0.95		1.07		0.68		24.87	0.0	12.20	0.0	16.74
6		0.75		0.90		0.64		34.22	0.5	15.62	0.0	14.31
7		0.71		0.87		0.76		65.40	9.5	17.65	5.5	11.86
8		0.55		0.97		1.17		33.67	2.0	12.09	2.0	11.82
9		0.45		0.96		3.64		19.42	0.0	13.07	0.0	12.75
10		0.52		0.76		3.78		15.52	0.0	20.38	0.0	13.48
11		1.10		0.85		2.34		12.56	17.0	32.43	0.0	12.79
12		1.13		0.79		1.84		10.86	0.5	45.57	0.0	13.60
13		1.11		0.71		2.66		10.22	0.0	39.38	0.0	14.79
14		0.78		0.70		4.45		11.25	0.0	39.15	0.0	11.71
15		0.96		0.49		2.66		15.05	0.5	42.58	17.5	13.74
16		0.75		0.79		3.00		17.66	0.0	40.11	3.0	13.34
17		0.57		0.87		3.88		22.27	0.0	35.86	0.0	10.41
18		0.73		0.72		4.45		28.34	0.0	30.57	2.0	8.22
19		1.24		0.83		10.21		25.94	7.5	30.77	21.5	16.03
20		1.00		0.80		12.38		15.54	0.0	38.78	1.0	11.01
21		0.91		0.85		12.00		10.56	0.0	39.20	9.0	8.15
22		0.65		0.78		7.60		8.22	0.0	36.72	13.5	19.52
23		0.85		0.76		6.84		6.64	0.0	30.40	2.5	12.56
24		0.61		0.71		5.60		5.96	0.0	25.73	11.0	9.70
25		0.73		0.76		5.60		13.34	0.0	23.42	0.0	8.53
26		1.45		0.79		5.24		14.64	0.0	26.19	15.0	8.87
27		1.63		0.74		4.40	24.5	13.46	0.0	27.60	1.0	8.87
28		1.22		0.68		5.28	0.0	10.47	0.0	25.72	1.5	6.64
29		1.18				12.08	0.0	8.98	8.0	27.81	0.5	5.74
30		1.10				12.91	0.0	11.62	7.5	25.27	0.0	5.19
31		0.94				9.43			0.5	22.95		
計		28.49		23.07		148.30	(24.5)	541.78	56.5	816.61	106.5	370.77
Total												

Table 1. 日降水量と本流試験流域からの日流出量 (つづき)

Daily precipitaion and runoff of HONRYU Watershed. (Continued)

(単位 Unit : mm)

項目 2013 年 7月~12月 (Jul.-Dec., 2012)												
Item	7月	July.	8月	Aug.	9月	Sep.	10月	Oct.	11月	Nov.	12月	Dec.
	降水量	流出量										
	Precipi- tation	Runoff										
	露場	本流										
	Meteoro- logical	HONRYU										
日	station											
Day												
1	0.0	4.11	63.0	23.49	3.5	3.31	0.0	0.55	0.0	3.74		1.99
2	0.0	3.76	2.5	18.08	14.5	6.06	0.0	0.50	0.0	2.81		1.80
3	4.0	3.71	1.0	10.76	0.5	4.69	5.5	1.11	3.0	2.04		1.72
4	0.5	3.73	0.0	6.82	21.0	8.05	1.0	1.36	9.5	4.86		1.61
5	6.0	3.95	3.5	4.72	33.0	30.63	4.0	0.74	0.5	3.88		1.51
6	2.5	3.71	16.0	5.29	2.5	14.50	0.0	0.59	0.0	2.68		1.51
7	14.5	4.84	0.5	3.36	18.0	11.43	0.0	0.48	14.0	2.42		1.68
8	1.0	3.81	0.0	2.43	36.0	29.76	0.0	0.40	5.0	5.87		1.84
9	0.0	3.31	0.0	1.92	0.0	14.47	1.0	0.38	0.0	4.26		1.79
10	0.0	2.95	0.0	1.73	0.0	8.72	2.5	1.41	2.0	3.89		2.13
11	0.0	2.58	0.0	1.48	0.0	5.74	1.0	0.88	0.0	3.25		2.66
12	0.0	2.27	0.0	1.21	2.5	3.86	6.5	2.69	2.0	3.12		2.56
13	0.5	1.82	0.0	1.08	1.0	2.79	0.0	2.60	3.5	2.95		2.67
14	3.5	1.89	0.0	0.96	0.0	2.09	0.0	1.19	1.5	2.67		3.37
15	3.5	3.39	0.0	0.76	9.5	1.98	26.5	2.18	10.0	2.56		3.50
16	0.0	1.83	30.5	2.47	113.5	91.41	65.0	37.33	4.5	3.07		4.57
17	15.0	1.35	0.0	0.90	0.0	18.07	5.5	18.45		2.94		4.89
18	10.5	4.53	0.0	0.62	0.0	9.49	0.0	9.04		3.03		4.56
19	0.0	3.20	0.0	0.52	0.0	5.78	0.0	5.06		2.42		4.68
20	0.0	1.69	16.0	1.44	0.0	3.77	23.5	6.98		2.05		4.58
21	0.0	1.45	26.0	3.30	0.0	2.62	0.0	5.17		1.86		4.96
22	8.0	1.34	2.0	1.83	0.0	2.07	3.0	3.88		1.67		5.35
23	7.0	3.05	79.5	24.72	1.0	1.80	4.0	3.70		2.13		5.52
24	9.0	3.91	7.0	14.74	0.0	1.36	3.5	3.25		1.99		5.53
25	4.5	2.34	1.5	7.14	0.0	1.09	31.0	11.77		2.66		6.27
26	33.5	9.24	2.0	4.60	0.0	1.64	16.5	18.76		5.01		6.18
27	11.5	11.37	12.5	4.63	0.0	1.24	22.0	18.61		2.63		6.06
28	5.0	8.02	0.5	3.83	0.0	0.90	0.5	14.17		2.18		6.32
29	20.0	10.05	0.0	2.30	0.0	0.74	2.0	8.80		2.10		6.34
30	4.0	8.64	6.0	2.58	0.0	0.64	3.5	6.89		2.38		6.28
31	0.5	5.86	16.5	2.72			0.0	4.94				6.14
計	164.5	127.70	286.5	162.43	256.5	290.70	228.0	193.86	(55.5)	89.12		120.57
Total												

No data collected during winter
冬期間の観測中止No data collected during winter
冬期間の観測中止

Table 1. 日降水量と本流試験流域からの日流出量 (つづき)

Daily precipitaion and runoff of HONRYU Watershed. (Continued)

(単位 Unit : mm)

項目	2014年 1月～6月 (Jan.-Jun., 2012)											
Item	1月	Jan.	2月	Feb.	3月	Mar.	4月	Apr.	5月	May.	6月	June.
	降水量	流出量	降水量	流出量								
	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff								
	露場	本流	露場	本流								
	Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-	
日	logical	HONRYU	logical	HONRYU								
Day	station		station									
1		5.93		0.70		1.44		11.18		60.44		22.36
2		6.35		0.72		1.05		8.48		45.95		21.53
3		6.07		0.80		1.03		8.80		38.44		20.49
4		6.03		0.98		1.03		16.40		33.77		19.84
5		6.17		0.81		1.09		13.36		24.60		20.91
6		6.08		0.70		1.11		7.74		24.21	7.5	21.13
7		5.01		0.70		0.91		5.72		23.10	8.0	20.18
8		3.11		0.66		0.84		5.58	No data collected during winter 冬期間の観測中止	26.96	16.0	16.61
9		3.24		0.64		0.80		6.66		30.57	1.0	15.06
10		3.26		0.62		0.81		9.97		26.76	0.0	14.14
11		2.83		0.59		0.76		8.35		25.45	5.5	14.03
12	No data collected during winter 冬期間の観測中止	2.14	No data collected during winter 冬期間の観測中止	0.56	No data collected during winter 冬期間の観測中止	0.81	No data collected during winter 冬期間の観測中止	6.99		25.84	17.5	18.01
13		1.84		0.53		0.97		8.05		29.81	3.0	17.71
14		1.53		0.26		1.45		8.90		30.06	3.0	14.99
15		1.16		0.53		1.10		10.82		34.35	0.0	11.88
16		1.01		0.58		0.96		14.56		34.25	0.0	10.23
17		0.89		0.54		1.17		16.94		35.72	2.5	9.36
18		0.82		0.54		1.98		18.55	27.39	9.0	9.15	
19		0.84		0.60		5.67		16.12	25.83	0.0	9.06	
20		0.73		0.60		3.59		12.94	28.61	0.0	6.40	
21				0.89				0.87		4.10		11.80
22		0.91		0.87		2.39		16.31	28.5	64.75	16.5	10.34
23		0.91		0.87		1.83		17.38	0.5	41.20	0.0	8.61
24		0.87		0.84		1.89		18.90	0.0	27.54	0.0	5.83
25		0.82		0.81		2.66		20.44	0.0	27.95	0.0	4.86
26		0.83		0.89		3.91		22.84	18.5	30.07	0.0	5.21
27		0.76		1.07		6.29		25.93	1.0	37.56	5.0	4.94
28		0.75		1.38		7.15		24.93	0.0	26.70	0.5	5.03
29		0.76				9.67		24.47	0.0	25.75	11.5	7.87
30		0.69				16.53		39.62	0.0	23.31	12.5	5.19
31		0.77				24.76			0.0	23.19		
計		74.00		20.26		109.75		438.73	(48.5)	1003.20	127.0	377.82
Total												

Table 1. 日降水量と本流試験流域からの日流出量 (つづき)

Daily precipitaion and runoff of HONRYU Watershed. (Continued)

(単位 Unit : mm)

項目 2014 年 7月~12月 (Jul.-Dec., 2012)												
Item	7月	July.	8月	Aug.	9月	Sep.	10月	Oct.	11月	Nov.	12月	Dec.
	降水量	流出量										
	Precipi- tation	Runoff										
	露場	本流										
	Meteoro- logical	HONRYU										
日	station											
Day												
1	0.0	4.64	0.0	0.93	13.0	3.72	0.0	0.40	13.0	2.64		19.24
2	1.5	3.74	0.0	0.79	0.5	3.94	0.0	0.33	6.0	1.85		13.27
3	6.0	3.56	0.0	0.65	0.5	2.81	0.0	0.48	3.5	4.51		8.94
4	11.0	7.49	0.0	0.49	1.0	2.66	0.0	0.41	4.5	3.30		6.18
5	2.0	5.36	0.0	0.42	6.0	2.54	40.0	4.14	0.5	2.68		4.49
6	0.0	4.53	0.0	0.38	34.5	2.81	19.0	18.36	1.5	2.29		3.99
7	22.5	9.63	17.5	0.74	5.5	8.15	5.0	19.37	2.5	3.34		4.26
8	21.0	12.67	18.0	2.22	0.0	3.78	0.0	6.24	0.0	2.38		4.51
9	55.5	33.55	4.0	1.63	0.0	2.76	0.0	3.35	4.0	2.17		4.17
10	2.0	13.27	41.5	8.57	11.0	2.63	0.0	2.16	0.0	2.74		4.09
11	4.0	12.88	4.5	6.72	5.5	2.85	0.0	1.64	0.0	1.75		3.86
12	0.0	10.56	25.0	7.83	0.0	1.85	0.0	1.30	0.0	1.50		3.58
13	1.0	6.50	0.5	5.18	0.0	1.61	32.0	2.95	0.0	1.60		3.22
14	0.0	5.64	0.0	3.13	0.0	1.37	23.5	34.78	0.0	1.53		3.36
15	0.0	3.96	1.0	1.87	0.0	1.18	0.0	11.64	12.0	1.69		4.00
16	1.5	3.14	13.5	2.94	0.0	1.06	0.0	5.99	10.0	1.63		3.49
17	14.5	2.31	1.0	2.03	0.0	0.97	3.5	4.43	0.5	1.34		3.06
18	61.0	19.69	1.5	1.82	1.5	1.11	0.0	2.86	15.0	1.57		6.16
19	15.0	14.49	0.5	1.64	0.0	0.91	0.5	2.08		1.64		6.42
20	4.0	9.98	5.0	1.57	0.0	0.79	11.5	2.21		1.40		4.61
21	0.0	7.21	2.5	1.37	0.0	0.70	0.5	1.97		1.55		4.46
22	0.0	5.05	9.0	3.36	0.0	0.64	15.0	3.77		1.80		4.00
23	0.0	3.37	0.5	1.97	0.0	0.55	0.0	2.51		1.83		4.34
24	0.5	4.23	3.0	1.63	7.5	0.49	0.0	1.96		1.90		3.70
25	0.0	2.85	3.5	1.38	6.0	2.80	0.0	1.67		5.04		3.78
26	0.0	1.95	41.0	6.20	0.0	1.28	0.0	1.36		9.72		4.05
27	0.0	2.23	6.5	8.20	0.5	0.70	4.0	2.22		15.68		4.07
28	0.0	2.28	0.0	5.28	0.0	0.52	5.0	2.09		11.10		3.48
29	0.0	1.54	12.0	3.64	0.0	0.46	0.0	1.89		13.74		3.38
30	0.0	1.28	5.5	4.54	0.0	0.50	0.0	1.72		13.94		3.33
31	0.0	1.03	7.5	3.82			1.0	1.30				3.21
計	223.0	220.61	224.5	92.94	93.0	58.14	160.5	147.58	(73.0)	119.85		156.70
Total												

No data collected during winter
冬期間の観測中止No data collected during winter
冬期間の観測中止

Table 1. 日降水量と本流試験流域からの日流出量 (つづき)

Daily precipitaion and runoff of HONRYU Watershed. (Continued)

(単位 Unit : mm)

項目	2015年 1月～6月 (Jan.-Jun., 2012)													
Item	1月	Jan.	2月	Feb.	3月	Mar.	4月	Apr.	5月	May.	6月	June.		
	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量		
	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff		
	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流		
	Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-			
日	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU		
Day	station		station		station		station		station		station			
1		3.34		0.69		0.76		7.75		34.80		0.0	15.49	
2		3.39		0.61		0.78		8.73		34.73		0.0	14.65	
3		3.77		0.47		0.68		10.33		33.62		3.0	13.30	
4		3.38		0.50		0.69		18.45		34.81		0.5	12.23	
5		3.51		0.58		0.73		18.39		38.74		13.5	8.66	
6		2.94		0.61		0.72		29.14		32.19		12.0	14.10	
7		3.17		0.56		0.70		31.53		31.49		0.0	11.49	
8		3.26		0.54		0.74		18.17		31.01		0.0	11.31	
9		3.05		0.54		1.07		12.19		27.23		12.0	17.54	
10		2.80		0.57		1.88		9.50		24.39		0.0	15.01	
11		2.47		0.54		1.28		10.66	冬期間の観測中止	No data collected during winter		21.65	0.0	10.65
12		2.43		0.51		0.98		12.58		20.46		2.0	9.68	
13	冬期間の観測中止	No data collected during winter		0.57		0.84		13.02		32.76		0.0	9.69	
14		1.62		0.55		0.73		16.31		30.72		2.0	8.70	
15		1.45		0.59		0.72		30.64		30.93		19.0	13.16	
16		1.41		0.50		0.90		25.58		32.47		0.0	10.15	
17		1.36		0.50		1.55		21.70		29.65		25.5	12.69	
18		1.40		0.55		3.04		18.34		26.84		2.0	12.45	
19		1.30		0.59		6.12		16.35		33.49		9.0	10.56	
20		1.26		0.61		7.98		20.16		29.91		16.5	10.00	
21		1.16		0.63		6.85		43.04		23.12		4.0	10.78	
22		1.21		0.61		5.31		31.86		18.27		0.5	8.32	
23		1.31		0.70		4.41		29.49		17.94		8.0	9.40	
24		1.27		0.98		2.83		32.32		19.86		0.0	8.00	
25		1.07		0.93		2.08		32.55		21.53		0.5	7.44	
26		0.94		0.87		1.72		28.66		21.54		22.5	8.18	
27		0.95		0.86		1.56		29.56	0.0	19.25		4.0	11.04	
28		0.91		0.85		1.76		32.47	0.5	18.22		25.0	25.68	
29		0.85				2.46		33.36	0.0	19.73		0.0	21.11	
30		0.79				5.29		33.93	0.5	21.15		0.0	10.47	
31		0.70				7.27				18.87				
計		60.42		17.61		74.43		676.76	(1.0)	831.37		181.5	361.93	
Total														

Table 1. 日降水量と本流試験流域からの日流出量 (つづき)

Daily precipitaion and runoff of HONRYU Watershed. (Continued)

(単位 Unit : mm)

項目 2015 年 7月~12月 (Jul.-Dec., 2012)												
Item	7月	July.	8月	Aug.	9月	Sep.	10月	Oct.	11月	Nov.	12月	Dec.
	降水量	流出量										
	Precipi- tation	Runoff										
	露場	本流										
	Meteoro- logical	HONRYU										
日	station											
Day												
1	14.5	10.08	0.0	3.87	5.0	5.07	2.5	1.54	0.0	1.49		2.30
2	0.5	10.12	9.5	3.63	0.5	4.63	26.5	9.74	20.0	3.76		2.00
3	0.0	6.73	0.0	2.23	9.5	4.01	0.0	4.37	3.5	4.12		3.51
4	8.0	6.26	0.0	1.70	1.0	4.33	0.0	3.16	0.5	3.21		2.87
5	8.5	5.53	0.0	1.43	2.5	3.53	0.5	2.54	0.0	2.44		2.58
6	0.0	4.06	0.0	1.30	15.0	4.37	0.0	2.06	0.0	2.00		2.51
7	0.0	3.47	0.0	1.23	18.0	7.94	0.0	1.71	0.5	1.72		2.22
8	17.5	4.31	0.0	0.90	7.5	8.63	5.5	1.93	12.5	2.77		2.04
9	2.0	5.46	0.0	0.73	31.5	10.23	0.0	1.54	14.0	3.01		1.97
10	0.0	4.01	0.0	0.64	1.0	9.10	0.0	1.29		4.11		1.72
11	0.0	3.25	0.0	0.56	0.5	6.50	2.0	1.23		3.52		15.58
12	0.0	2.79	0.0	0.48	0.0	4.73	0.0	1.09		2.70		11.85
13	0.0	2.56	24.5	1.21	0.0	3.70	6.0	1.06		2.27		7.04
14	0.0	2.18	30.0	3.85	0.5	2.94	3.0	2.89		4.93		5.86
15	0.0	1.93	0.0	0.95	0.0	2.40	0.0	1.34		8.43		5.42
16	49.5	5.68	0.0	0.65	0.5	2.04	0.0	1.20		8.45		5.61
17	11.5	8.59	13.0	2.69	6.0	2.04	0.0	1.12		5.24		4.92
18	9.5	6.24	0.0	1.71	12.5	2.80	0.0	1.01		5.91		4.45
19	13.0	5.63	0.0	1.26	0.0	1.86	0.0	0.93		6.93		4.01
20	8.5	5.90	4.5	1.23	0.0	1.57	0.0	0.89		5.04		3.75
21	0.0	4.24	10.5	1.33	0.0	1.40	0.5	0.87		4.59		3.96
22	0.0	2.91	1.0	1.42	0.0	1.22	0.0	0.81		3.62		4.15
23	18.5	4.19	13.5	1.52	0.0	1.10	0.5	0.81		2.92		3.73
24	7.5	13.98	2.0	1.61	10.5	1.12	10.0	0.79		3.83		4.46
25	0.0	5.27	2.0	1.72	24.0	6.20	2.5	2.25		3.14		4.52
26	0.0	3.72	9.0	4.10	0.0	3.13	0.0	1.00		3.31		4.15
27	0.0	2.44	0.5	3.03	0.0	2.40	0.0	0.81		3.19		3.94
28	8.0	2.36	4.0	2.57	0.0	1.99	0.5	2.38		2.97		3.81
29	0.0	1.68	23.5	6.80	5.0	1.90	0.0	1.40		2.55		3.74
30	76.5	22.64	8.5	5.33	0.0	2.22	4.0	1.29		2.22		3.73
31	0.0	5.98	6.0	5.93			1.0	1.76				3.45
計	253.5	174.19	162.0	67.61	151.0	115.10	65.0	56.81	(51.0)	114.39		135.85
Total												

No data collected during winter
冬期間の観測中止No data collected during winter
冬期間の観測中止

Table 1. 日降水量と本流試験流域からの日流出量 (つづき)

Daily precipitaion and runoff of HONRYU Watershed. (Continued)

(単位 Unit : mm)

項目	2016年 1月～6月 (Jan.-Jun., 2012)											
Item	1月	Jan.	2月	Feb.	3月	Mar.	4月	Apr.	5月	May.	6月	June.
	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量	降水量	流出量
	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff	Precipitation	Runoff
	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流	露場	本流
	Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-		Meteoro-	
日	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU	logical	HONRYU
Day	station		station		station		station		station		station	
1		4.04		2.74		1.81		9.91	2.0	13.98	1.0	1.56
2		3.63		3.14		1.65		10.58	0.0	17.19	0.5	1.28
3		3.68		2.92		1.44		14.90	0.0	17.67	0.0	1.19
4		4.16		2.61		1.81		22.18	22.5	36.07	0.0	1.10
5		4.58		2.03		2.96		17.07	0.0	18.38	0.0	1.16
6		4.14		1.77		5.45		14.49	0.0	13.47	0.0	1.05
7		3.91		1.43		8.02		19.12	0.0	17.02	0.0	0.93
8		3.41		0.92		13.75		23.73	0.0	14.15	1.0	1.06
9		3.28		0.73		10.92		19.32	3.0	11.50	3.5	1.10
10		3.02		1.13		6.70		15.87	7.0	13.25	0.0	1.15
11		2.85		1.14		4.62		13.01	3.0	13.20	0.0	0.87
12		2.37		0.89		3.61		9.67	0.5	12.98	0.0	0.74
13		1.90		1.04		2.93		9.34	0.0	11.18	17.0	1.66
14		1.44		11.02		2.51		22.01	0.0	9.24	0.0	1.68
15		1.33		11.80		2.25		19.26	0.0	8.04	5.5	1.69
16		1.38		7.74		2.09		12.83	0.0	6.42	6.5	1.42
17		1.34		7.02		2.56		18.78	15.5	7.45	2.0	2.30
18		1.18		6.66		3.45		18.97	0.0	5.48	0.0	1.53
19		1.15		6.80		8.61		17.15	0.0	5.00	5.0	1.84
20		1.02		6.86		9.64	0.5	15.77	0.0	3.89	3.5	3.30
21		1.40		9.73		5.56	10.5	14.77	0.0	4.24	1.5	1.72
22		1.24		7.92		4.78	0.5	22.42	0.0	3.76	0.5	1.30
23		0.99		7.41		4.43	0.5	21.19	0.0	3.32	14.0	4.52
24		0.82		7.02		3.53	0.0	20.35	0.0	2.91	24.5	3.59
25		0.84		5.99		3.04	0.0	17.77	0.5	2.36	8.5	7.87
26		0.86		2.68		2.81	0.0	18.25	0.0	2.60	0.0	3.58
27		0.85		2.01		2.71	6.0	18.34	2.5	2.35	0.0	2.44
28		0.84		2.07		3.26	35.0	27.43	0.0	1.68	13.0	4.05
29		0.97		2.06		4.52	25.0	23.23	0.0	1.79	0.5	2.29
30		1.08				7.32	11.0	15.65	6.5	1.93	4.5	2.60
31		1.90				9.19			4.5	1.43		
計		65.60		127.28		147.93	(89.0)	523.36	67.5	283.93	112.5	62.57
Total												

Table 1. 日降水量と本流試験流域からの日流出量 (つづき)

Daily precipitaion and runoff of HONRYU Watershed. (Continued)

(単位 Unit : mm)

項目 2016年 7月~12月 (Jul.-Dec., 2012)												
Item	7月	July.	8月	Aug.	9月	Sep.	10月	Oct.	11月	Nov.	12月	Dec.
	降水量	流出量										
	Precipi- tation	Runoff										
	露場	本流										
	Meteoro- logical	HONRYU										
日	station											
Day												
1	3.0	1.79	13.5	1.58	0.0	3.47	3.0	3.11	2.0	1.36		3.15
2	0.5	2.59	33.0	5.03	0.0	2.48	0.0	2.35	0.0	1.33		3.80
3	0.0	1.97	2.5	2.96	0.0	2.01	1.5	2.03	1.5	1.14		3.13
4	1.0	1.93	0.0	1.75	0.0	1.71	0.0	1.78	12.5	1.57		2.57
5	0.5	1.95	0.0	1.47	0.0	1.48	5.5	1.65	0.0	2.17		3.74
6	3.0	2.03	0.0	1.18	0.0	1.26	5.0	5.82	1.5	3.41		3.29
7	1.0	1.97	0.0	0.99	0.0	1.07	0.0	2.85	0.5	1.94		2.87
8	0.0	1.64	0.5	0.81	32.5	5.49	0.0	1.90	1.0	2.18		2.36
9	17.5	3.49	6.0	4.05	0.0	7.36	7.5	4.40	1.5	2.23		2.06
10	0.0	2.74	0.0	1.16	0.0	2.82	0.0	3.00	6.5	2.04		2.47
11	0.0	1.18	0.0	0.92	0.0	1.99	0.0	2.31	27.5	6.33		2.54
12	0.0	1.00	0.0	0.76	7.0	2.02	2.0	2.26	2.0	6.73		2.75
13	5.5	0.93	0.0	0.64	26.0	13.40	0.0	1.90	0.0	5.85		2.55
14	7.5	1.15	0.0	0.54	3.5	6.07	0.0	1.61	12.0	5.35		5.03
15	72.0	22.12	0.5	0.50	0.5	4.15	0.0	1.49		13.80		3.59
16	1.0	7.45	0.5	0.47	0.5	3.12	0.0	1.29		8.59		3.09
17	0.5	4.47	1.5	0.62	2.5	2.40	14.0	1.88		5.97		3.46
18	0.0	3.38	0.0	0.43	69.0	14.91	0.0	1.27		4.49		3.36
19	0.0	2.46	0.0	0.38	23.5	14.88	0.0	1.16		4.77		2.42
20	0.0	2.03	3.0	0.37	52.5	26.64	0.0	1.08		8.37		2.27
21	0.0	1.72	0.0	0.31	0.5	21.96	0.0	1.04		6.48		2.79
22	2.5	1.64	31.0	5.19	5.5	12.53	0.0	0.93		4.88		2.78
23	0.0	1.41	1.5	3.36	8.0	9.44	0.0	0.92		4.19		14.63
24	0.0	1.16	0.5	1.23	1.0	7.14	0.0	0.95		3.19		7.19
25	0.5	1.06	0.0	2.14	0.5	5.23	0.0	0.85		2.78		5.27
26	17.0	2.58	5.5	1.88	4.0	4.12	2.5	0.84		2.40		3.97
27	3.0	2.73	30.0	8.99	1.0	3.06	0.0	1.53		3.12		4.26
28	0.0	1.68	0.5	5.24	13.5	3.53	16.5	1.10		6.25		4.63
29	0.0	1.39	0.0	3.21	6.0	5.79	1.5	4.75		4.03		4.10
30	0.5	1.34	14.0	7.43	0.0	3.88	0.0	1.84		3.12		3.90
31	0.0	1.01	0.0	4.19			0.0	1.33				3.38
計	136.5	85.99	144.0	69.78	257.5	195.41	59.0	61.22	(68.5)	130.06		117.40
Total												

No data collected during winter
冬期間の観測中止

Table 2. 初沢試験流域からの日流出量
Daily precipitation and runoff of SHOZAWA Watershed.
 (単位 Unit : mm)

項目 2011年 1月～3月 (Jan.-May., 2011)						
Item	1月 Jan.	2月 Feb.	3月 Mar.			
	流出量 Runoff	流出量 Runoff	流出量 Runoff			
	初 沢	初 沢	初 沢			
日 Day	SHOZAWA	SHOZAWA	SHOZAWA			
1	1.02	0.91	2.44			
2	0.91	0.82	1.76			
3	0.83	0.76	1.64			
4	0.80	0.74	1.69			
5	0.78	0.78	1.39			
6	0.85	0.75	1.04			
7	0.74	0.61	1.00			
8	0.65	0.68	0.94			
9	0.63	0.65	1.24			
10	0.62	1.02	1.35			
11	0.58	0.76				
12	0.59	0.57				
13	0.57	1.00				
14	0.54	0.75				
15	0.57	0.81				
16	0.62	0.80				
17	0.61	0.82				
18	0.57	1.65				
19	0.53	1.79				
20	0.56	1.70				
21	0.70	1.75				
22	0.72	2.67				
23	0.92	3.31				
24	0.63	3.18				
25	0.97	3.38				
26	0.80	3.99				
27	1.01	3.35				
28	0.95	4.07				
29	0.59					
30	0.61					
31	0.80					
計 Total	22.27	44.07	(14.49)			

No data collected caused by water leak in observation tank
 観測槽からの漏水により観測中止

Statistical report of hydrological data from TAKARAGAWA experimental watershed. - HONRYU and SHOZAWA watershed (January, 2011 to December, 2016) -

Koji TAMAI^{1)*}, Tayoko KUBOTA¹⁾, Shoji NOGUCHI¹⁾, Takanori SHIMIZU¹⁾, Shin'ichi IIDA¹⁾,
Shinji SAWANO²⁾, Tatsuhiko NOBUHIRO³⁾, Makoto ARAKI¹⁾ and Yoshio TSUBOYAMA⁴⁾

Abstract

Observations of precipitation and runoff have been conducted since the inception of the Takaragawa Experimental Watershed (Meteorological observation site: 36°51' N and 139°01' E, MSL 816-1945 m). This report describes daily precipitation and runoff from 2011 through 2016. During this period, the tipping bucket was replaced with a new one.

Key words : Takaragawa Experimental Watershed, daily precipitation, daily runoff

Received 29 September 2020, Accepted 2 November 2020

1) Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Hokkaido Research Center, FFPRI

3) Tohoku Research Center, FFPRI

4) Vice-President, FFPRI

* Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, JAPAN; E-mail: a123@affrc.go.jp

森林総合研究所研究報告の基本方針

1. 審 査

投稿された論文（論文、短報、ノート、総説、研究資料）は、すべて審査を受けてその採否が決定される。論文の審査方針を次のように定める。

1. 審査の目的

投稿された論文（論文、短報、ノート、総説、研究資料）が、審査の基準に照らして掲載可能か否かを判断することが審査の目的である。

2. 審査の基準

- (1) 新規性：論文の内容が、公知、既発表、または既知のことから容易に導き得るものでないこと。
- (2) 有用性：論文の内容が、学術的に、または実用上なんらかの意味で価値があること。
- (3) 信頼性：論旨が通っており、結論等を信頼するに十分な根拠が示されていること。

さらに、論文はその内容が読者に十分理解できるように簡潔かつ明瞭に記述され、その内容に誤りないことが必要で投稿規程及び執筆要領に規定されたとおりに論文が構成され、記述されていなければならない。

3. 査読者

投稿された論文の査読者2名（ノート及び研究資料の場合1人）は、担当編集委員が選定し、森林総合研究所研究報告編集委員会（以下、「委員会」という）において決定する。査読者の氏名は公表しない。著者との連絡はすべて委員会が行い、査読者は著者と直接連絡しないこととする。

4. 査読の結果

論文は、上記の各項の基準に照らして総合的に審査され、次のいずれかに判定される。

- (1) このまま掲載可。
- (2) 指摘の点を検討・修正の上、編集委員の了承をもって掲載可。
- (3) 指摘の点を検討・修正の上、再審査の必要あり。
- (4) 却下した方がよい（掲載するほどの内容を含まない場合及び掲載すべきでない場合）。
- (5) その他。

(1) から (4) のいずれかに判定し難い時は、(5) と判定されるが、その場合は担当編集委員によって、その理由が具体的に示される。

(2)、(3) と判定された論文の場合は、掲載条件が具体的に示されるので、指摘に沿って原稿を修正する。(2) の判定の場合は、重要な内容の訂正を掲載条件としないことを原則とする。2人の査読者がともに(1)または(2)と判定すれば、査読は終了し、掲載可とする。2人の査読者がともに(4)と判定した場合は、却下とする。

1人が(4)と判定し、担当編集委員が必要と認めた場合は別の査読者によってさらに査読を行い、その査読者も(4)と判定すれば却下となります。その査読者が掲載可と判定すれば査読は終了し、掲載可となります。(5)については、その理由により委員会の討議を経て、編集委員長が著者及び査読者と協議して対応する。

(2020年8月6日)

2. 投 稿

1. 投稿資格

投稿者は原則として国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所、森林総合研究所林木育種センター、森林総合研究所森林バイオ研究センター（以下「森林総合研究所等」という。）の在職職員とする。その他、元職員、依頼研究員及び共同研究者等が、森林総合研究所等あるいは森林総合研究所等と関係のある場所において研究した成果を含む内容も投稿できる。

2. 原稿の種類

原稿の種類は論文、総説、短報、ノート及び研究資料とする。論文は、原著論文として他の出版物に投稿または掲載されていないものに限る。総説は特定の課題に関する研究を広くかつ普遍的に総括・説明したものである。短報は、速報性の高いものを刷り上がり4頁以内にまとめる。ノートは、価値のある新事実または結論を含むものを刷り上がり2頁以内にまとめる。研究資料は観測データ、調査資料等とする。

3. 原稿の提出

投稿者は、別に定める執筆要領に基づき作成した原稿を「研究報告原稿提出書」とともに広報普及科編集刊行係に提出する。なお、共著原稿の提出にあたっては、共著者全員の同意を得ることとする。提出する原稿は電子ファイルとする。

原稿の提出先 〒305-8687 つくば市松の里1
国立研究開発法人 森林研究・整備機構
森林総合研究所 広報普及科
編集刊行係
Tel：029-829-8373 Fax：029-873-0844
E-mail：kanko@ffpri.affrc.go.jp

4. 原稿の修正

修正原稿が2ヶ月以内に、短報及びノートでは3週間以内に再提出されない場合には受付を取り消す。なお、特別な理由により期限内に提出できない場合は、期間延長を編集委員長に文書で申し入れる。

5. 原稿の却下

再審査を終えても受理されない論文等については委員会により却下されることがある。

6. 使用言語

使用言語は日本語または英語とする。

7. 著作権

報告の著作権は国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所に帰属する。掲載論文の全体または一部を他の著作物に利用する場合、事前に編集刊行係に申し出て、編集委員長の許可を得るものとする。

(2020年8月6日)

3. 執筆要領

1. 原稿の書式

原稿は Word ®形式の電子ファイルとし、次の書式に従う。

- 1) 和文原稿は、A 4 判白紙に、天地左右各 30mm 程度の余白を残し、原則として 10.5 ポイントの文字を使用し、40 字詰め 20 行で横書きで印字する。語や句を区切る際には、「、」「。」を使用。
- 2) 英文原稿は、A 4 判白紙に、天地左右各 30mm 程度の余白を残し、原則として 10.5 ポイントの文字を使用し、25 行で印字する。

2. 原稿の構成

原稿の構成は次の順による。

- 1) 和文原稿
 - (1) 表紙<原稿の種類・表題・著者名・所属・英文表題・英文著者名・英名所属・和文ランニングタイトル(全角 25 文字以内)>
 - (2) 英文要旨 (Abstract) (ノートについては不要)
 - (3) 英語キーワード (ノートについては不要)
 - (4) 和文要旨 (ノートについては不要)
 - (5) 日本語キーワード
 - (6) 本文
 - (7) 引用文献
 - (8) 図・表・写真の表題と説明・注釈 (和文、英文または和英併記)
 - (9) 補足電子資料 (Supplementary data) の表題と説明・注釈
 - (10) 図・表・写真 (別添)
- 2) 英文原稿
 - (1) 表紙<原稿の種類・表題・著者名・所属・和文表題・和文著者名・和名所属・英文ランニングタイトル(空白含め半角 50 文字以内)>
 - (2) 英文要旨 (Abstract) (ノートについては不要)
 - (3) 英語キーワード
 - (4) 和文要旨 (ノートについては不要)
 - (5) 日本語キーワード (ノートについては不要)
 - (6) 本文
 - (7) 引用文献
 - (8) 図・表・写真の表題と説明・注釈
 - (9) 補足電子資料 (Supplementary data) の表題と説明・注釈
 - (10) 図・表・写真 (別添)

3. 表題

英文表題 (サブタイトルを含む) の記載は、先頭の単語の頭文字を大文字とし、その他の単語は小文字とする。

4. 著者名

英文の場合、著者名の記載は執筆者が通常使用しているローマ字で、名 (頭文字を大文字、以後は小文字)、姓 (大文字) を記載する (例: Taro SHINRIN)。共著者のあるときは、” ” で区切り、最後の共著者の前に and を入れる。

5. 所属と連絡先

著者の所属は、論文が受付された時点の所属とする。退職者については退職時の所属 (和文にのみ元をつける) とする。なお、著者の所属をその対応が容易にわかるように著者の右肩に 1)、2) の番号を付し、脚注に森林総合研究所、研究領域・支所・試験地名等を記載する。また、著者のうち 1 名を連絡先 (corresponding author) とし右肩に所属の番号等に続いて * (アスタリスク) を付し、脚注に連絡先 (現在の所属、住所、E-mail アドレス (推奨)) を入れる。所属が無い場合は、個人の連絡先 (住所または E-mail アドレス等) とする。

6. 要旨

要旨は、論文の目的、方法、結果などを和文では 600 字 (短報は 300 字)、英文では 300 語 (短報は 150 語) 以内で簡潔に記述する。その際、原則として改行は避け、できるだけ略語、慣用語を用いない。また、原則として表、図、式などを本文中の番号で引用しない。

7. キーワード

原稿の内容を的確に表すキーワード (論文、短報、総説及び研究資料は 7 語以内、ノートは 5 語以内) を記載する。キーワードの選定は検索に用いられることを考慮し (調査年等は不適)、英語と日本語を対応させ、記載の順序を揃える。英語は、固有名詞の最初の文字を除き、すべて小文字で書く。

8. 本文/見出し

本文の区分けの表題は中央に 1 行取りで書く。表題をさらに細分化する場合は、左詰めにしてゴシック指定にする。

見出しで必要な場合は、ポイントシステムを採用してもよい。

英文の見出しは、英文表題の記載と同様に最初の単語の頭文字を大文字表記とする。

9. 英文字記号および英数字

本文中、引用文献中ともに、括弧、カンマ (,), アポストロフィ ('), ピリオド (.), セミコロン (;) 等の英文記号を使う場合には、すべて半角で記述する。

ローマ数字も半角アルファベットの組み合わせとして記述する。括弧の前後や記号の後には原則として半角スペースを入れる。

具体的には下記の例を参照（_ は半角スペースを表す）。

- ・・・であると考えられる（堀・河合_1965a, b, Dropkin et al._1979）。
- ・・・堀ら_(1965)_の報告がある。
- ・・・ウスバシロチョウ_(別名ウスバアゲハ)_は、・・・

引用文献

Ahmad, Q. A. (1952) Fungi of East Bengal. _ Pakist. J. For., 2, 91-115.

10. 引用文献

1) 本文中の引用文献の記載は下記の例に従う。

（_ は半角スペースを表す）

本文末につける場合

(Ahmad_1952) (堀_1965) (Ahmad_1952, 堀_1965)

文中での説明の場合

Ahmad_(1952)_は～ 近年、堀_(1965)_は～

著者が複数の場合等

- ・連名の場合：(Ahmad_and_Baker_1952) (堀・川合_1965a, b) 中点は全角
- ・著者が3名以上の場合：第1著者名の後に「et al.」または「ら」を付す。
(Dropkin_et_al._1979) (Dropkinら_1979)
- ・複数の文献の場合：年代順に記載し、同年の文献については、著者名のアルファベット順に記載し、単名を先行とする。また、同名の著者は年代順にまとめて記載する。同名で同年の文献については、年の後に a, b をつけて記載する。
(田中_1984, 1989, 石塚_1988, 1990a, b)
- ・訳本の場合：原著者名（訳本の表記に従い、原著者のファミリーネーム）と原著発行年を引用する。(プレーヌ_1989)

2) 引用文献リストは著者名のアルファベット順に記載し、単名を先行とする。同名の著者は年代順に記載する。詳細は下記の例に従う。（_ は半角スペースを表す）

①雑誌を引用する場合

例 Ahmad, Q. A. (1952) Fungi of East Bengal. _ Pakist. J. For., 2, 91-115.
Baker, C. F. (1914a) A review of some Philippine plant diseases. Philip. Agr. & For., 3, 157-164.
Baker, C. F. (1914b) First supplement to the list of the lower fungi of the Philippine Islands. Leaflet. Philip. Bot., 7 (Art113), 2417-2542.
Dropkin, V. H. and Foudin, A. S. (1979) Report of the occurrence of *Bursaphelenchus lignicolus*

induced pine wilt disease in Missouri. Plant Dis. Rep., 63, 904-905.

Reunanen, M., Ekman, R. and Heinonen, M. (1989) Analysis of Finnish pine tar from the wreck of Frigate St. Nikolai. Holzforschung, 43, 33-39.

- ・誌名の略記法は慣例にならう。
- ・氏名が和文体の場合は、姓と名の間に全角スペースを入れる。（■は全角スペースを、_ は半角スペースを表す）

例

堀■高夫_(1965)_路網計画のための図上地形判定について。_日林誌, 47, 168-170.

森■章_(2001)_イチイガシの種子生産における同化産物投資。_日林誌, 83, 93-100.

田島■正啓・宮島■寛・宮崎■安貞_(1977)_ヒノキパーオキシターゼ・アイソザイムの遺伝子分析。_日林誌, 59, 173-177.

上野■洋二郎_(2000)_森林計画における森林諸機能の最適配分。_日林誌, 82, 360-363.

- ・巻の定めがなく、号のみが定められた雑誌の場合、以下のように表記する。

例

猪内■正雄_(2001)_森林作業の機械化が森林環境にどんな影響を及ぼすのか。_森林科学, 32, 25-33.

岡田■恵子_(2013)_国民の意識の変化の的確な把握に向けて：内閣府の世論調査から。_社会と調査, 10, 87-96.

②書籍を引用する場合

例（本一冊を引用する場合）

三浦■伊八郎・西田■屹二_(1948)_木材化学。_丸善, 690pp.

（複数の著者によって書かれた編集本の特定部分を引用する場合）

沼田■真_(1967)_植物的環境の解析と評価。_森下■正明・吉良■竜夫編_“自然：生態学的研究”。_中央公論社, 163-187.

（叢書の特定部分を引用する場合）

川合■眞一・田中■早苗_(1963)_“実用化学講座 17 巻有機化合物の反応(下)”, 第2版。_日本化学会編, 丸善, 210-212.

（欧文の単行書のタイトルはイタリックとする）

Ishii, M. (1996b) Decline and conservation of butterflies in Japan. In Ae, S. A., Hirowatari, T., Ishii, M. and Brower L. P. (eds.) “Decline and Conservation of Butterflies in Japan III”. The Lepidopterological Society of Japan, Osaka, 157-167.

（訳本を引用する場合は、原著者名（訳本の表記に従い、姓・名の順）や原著発行年等を引用する）

プレーヌ■ジャン_(1989)_ (永塚鎮男訳, 2011)_人は土をどうとらえてきたか：_土壌学の歴史とペド

ロジスト群像, 農山漁村文化協会, 415pp.

- ③ Web ページの引用は、適当な文献資料が利用できないか、または電子テキスト利用の利便性が特に高い場合に限る。引用する場合には、文献の発行年にあたる部分は、当該 Web ページの公表年(更新年)とするが、公表年が無い場合は筆者が当該ページを確認した年次とし、URL と参照日を記載する。ただし、官公庁等の冊子体資料がそのまま PDF ファイル等の形態で公表されている場合には、冊子体の発行年、発行所、ページ数等を引用し、URL のみを併記する。一連の資料・文書が別ファイル化されている場合には、トップページのみ典拠すればよい。

例

Finger Lakes Resource Conservation & Development Council (2007) "Forest land best management practices in the Finger Lakes Region of New York State", <http://www.dnr.cornell.edu/ext/bmp/index.html>, (accessed 2007-11-30).

環境省 (2002) "平成 13 年度オゾン層等の監視結果に関する年次報告書", 環境省, 122 pp,

<http://www.env.go.jp/earth/report/h14-03/index.html>.

環境省 (2004) "農林水産省と環境省の連携による田んぼの生きもの調査",

<http://www.env.go.jp/nature/satoyama/tanbo.html>, (参照 2008-01-24).

- 3) 私信扱いの情報は、下記の例に従い、本文中に記載する。(_ は半角スペースを表す)

なお、所属については、省略することができる。

(氏名, _ 所属, _ 私信)

(Name, _ Affiliation, _ pers, _ comm.)

11. 英文校閲

英文原稿及び和文原稿の英文摘要は原稿提出前に必ず英文校閲を受ける。

12. 図・表・写真

- 1) 図・写真はなるべく高解像度の Jpeg、表は Excel ®形式とする。表については、表題は表の上部に、説明・注釈は表の下部に記載し、図・写真については、表題及び説明・注釈は本文末にまとめて記載する(印刷では図・写真の下部に記載される)。和文原稿の場合は、表題、説明・注釈及び図表は和文、英文または和英併記とする。また、本文中では「Fig.」「Table」「Photo」を使用。

- 2) 印刷時の図・写真の大きさは、段組幅(82 mm)か頁幅(170 mm)のどちらかを明示する。なお、図・表・写真の挿入箇所を本文に朱書きで明示する。

- 3) 原則として、表には縦の罫線を用いない。

13. 補足電子資料 (Supplementary data)

紙面の都合上掲載できない図表は、補足電子資料として引用文献の後に付記することができ、本文中にも引用できる。印刷版には引用文献の後に図表の表題と公開 URL を、電子版には全てを公開する(例; Fig._S1, Table._S1)。

補足電子資料の掲載は、論文、短報、ノート、総説、研究資料の全てが対象となる。

14. 付録 (Appendix)

本文の内容に補足して掲載したい図表を、付録として誌面の引用文献の後に掲載することができ、本文中にも引用できる(例; Appendix_Fig.1, Appendix_Table_1)

また付録の掲載対象は、論文、総説、研究資料とする。

(2020年8月6日)

担当者 御中
To the person concerned

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute

森林総合研究所研究報告を送付させていただきますのでお受け取り下さい。
貴刊行物と交換願えれば幸いです。なお、貴研究所の名称、住所などを変更
された場合は、下記まで連絡を御願い致します。

Please, find an enclosed Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute.
We greatly appreciate receiving any relevant publications in exchange.
Let us know when the name of your institution and mailing address are changed.

Officer in charge at publication section
Forestry and Forest Products Research Institute
1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 Japan
Tel : + 81-29-829-8373 Fax : + 81-29-873-0844
e-mail : kanko@ffpri.affrc.go.jp

2021年3月 発行 森林総合研究所研究報告 第20巻1号 (通巻457号)

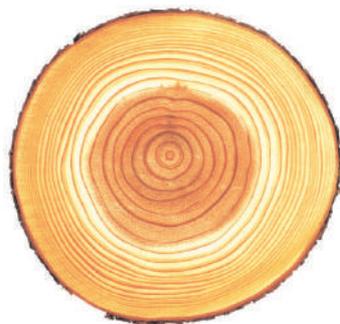
編 集 人 森林総合研究所研究報告編集委員会

発 行 人 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地
電話 : 029-829-8373 Fax : 029-873-0844

製 版・印 刷 朝日印刷株式会社 つくば支社
〒305-0046 茨城県つくば市東2-11-15
電話 : 029-851-1188 Fax : 029-856-5009

©2021 Forestry and Forest Products Research Institute

本誌から転載・複写する場合は、森林総合研究所の許可を得てください。



page1

弱光環境における個体の炭素収支と葉の機能的形質間のバランス：
沖縄亜熱帯林林床での研究 (英文)
：宮下彩奈、館野正樹

Balance of leaf traits is important for whole-plant carbon balance in shade:
a study for understory saplings in a subtropical forest in Japan
Ayana MIYASHITA and Masaki TATENO

page13

製材品の曲げ強度における寸法効果パラメータの検討 (第2報)
目視等級区分法による検討
：井道 裕史、加藤 英雄、長尾 博文

Influence of the size effect parameter on the bending strength of lumber
(Part 2) Examination by the visual grading classification
Hirofumi IDO, Hideo KATO and Hirofumi NAGAO

page19

電磁誘導式自動走行フォワーダによる集材作業の無人化に関する研究
：毛綱 昌弘、山口 浩和、鈴木 秀典、山口 智、宗岡 寛子、佐々木 達也、有水 賢吾、飯澤 宇雄、
大東 史典、阿部 慶一、小長井 信宏、辻 浩志

Research on unmanned logging operation by automated traveling forwarder using electromagnetic induction
Masahiro MOZUNA, Hirokazu YAMAGUCHI, Hidenori SUZUKI, Satoshi YAMAGUCHI, Hiroko
MUNEOKA, Tatsuya SASAKI, Kengo USUI, Takao IIZAWA, Fuminori OHIGASHI, Keiichi ABE,
Nobuhiro KONAGAI and Hiroshi TSUJI

page29

超臨界二酸化炭素の圧力差を利用した木材の効率的なアセチル化処理
：松永 正弘、小林 正彦、神林 徹、石川 敦子

Efficient acetylation of wood using pressure difference of supercritical carbon dioxide
Masahiro MATSUNAGA, Masahiko KOBAYASHI, Toru KANBAYASHI and Atsuko ISHIKAWA

page37

照葉樹老齢二次林の21年間にわたる林分構造の変化
：佐藤 保、山川 博美、野宮 治人、安部 哲人、齊藤 哲、釜 稔、大寺 義宏

Changes in stand structure of an old secondary lucidophyllous forest over 21-years monitoring
Tamotsu SATO, Hiromi YAMAGAWA, Haruto NOMIYA, Tetsuto ABE, Satoshi SAITO, Minoru KAMA
and Yoshihiro OTERA

page49

宝川森林理水試験地観測報告－本流・初沢試験流域－(2011年1月～2016年12月)
：玉井 幸治、久保田 多余子、野口 正二、清水 貴範、
飯田 真一、澤野 真治、延廣 竜彦、荒木 誠、坪山 良夫

Statistical report of hydrological data from TAKARAGAWA experimental watershed.
- HONRYU and SHOZAWA watershed (January, 2011 to December, 2016) -
Koji TAMAI, Tayoko KUBOTA, Shoji NOGUCHI, Takanori SHIMIZU, Shin'ichi IIDA, Shinji SAWANO,
Tatsuhiko NOBUHIRO, Makoto ARAKI and Yoshio TSUBOYAMA