

熱帯地域でのバイオマス生産： コロナ禍の先を見据えて

梅澤 俊明 (生存圏研究所 教授)



ご紹介ありがとうございます。生存圏研究所の梅澤でございます。今日は熱帯地域でのバイオマス生産というタイトルで少しお話しさせていただきます。よろしくお願いいたします。

それでは本日の内容でございますが、大体このような順番でお話しさせていただきます。

まず、言葉の説明から入らせていただきます。バイオマスとは何かということですが、バイオマスとは動植物、生物に由来する有機物である資源ということであり、化石資源は除きます。それから生態学の方ではもう少し広い意味で少し違う意味で使っておりまして、ある時点で任意の空間内に存在する生物体の量ということになっております。今日は上のほうの意味で使わせていただきますが、その意味合いにおいて少し種類分けをさせていただきました。いろいろな分け方がございますが、今日はこのように分けさせていただきます。

まずリグノセルロース。耳慣れないかもしれませんがこれは次のスライドでもう少しご説明をさせていただきますけれども、ここでは木質というふうにお考えいただければ結構でございます。

木質は日常会話的には木材あるいは木材のようなもの、木材のような硬いものという意味合いになるかと思っておりますけれども、我々は学術的には草の茎、例えば稲わらとかススキとかそういったものも含めるわけでありまして、と申しますのは、化学成分を見ますと、こういっ

コロナ禍を越えた新しい世界へ 未知の原野を行く
京都からの挑戦 - 地球社会の調和ある共存に向けて

熱帯地域でのバイオマス生産
コロナ禍の先を見据えて

梅澤俊明
京都大学 生存圏研究所
Toshiaki Umezawa
Research Institute for Sustainable Humansphere, Kyoto University

第16回京都大学附属研究所・センターシンポジウム、京都大学熊本講演会, Mar06, 2021

本日の内容 P2

1. バイオマスの説明
2. 背景
 大気中二酸化炭素温度上昇
 世界の一次エネルギーの使用状況
 森林減少
 樹木系バイオマス利用状況
3. 熱帯荒廃草原における持続的バイオマス生産・利用
4. バイオマス利用とコロナ禍後の社会
 - まとめて代えて -

謝辞

バイオマス (Biomass) P3

バイオマスとは
 動植物に由来する有機物である資源 (化石資源を除く)。生物資源 (bio) の量 (mass) を示す概念。
 農林水産省ウェブサイト: <https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/>
 生態学の用語。ある時点で任意の空間内に存在する生物体の量。重量またはエネルギー量で示す。生物量。
 広辞苑 (第六版)

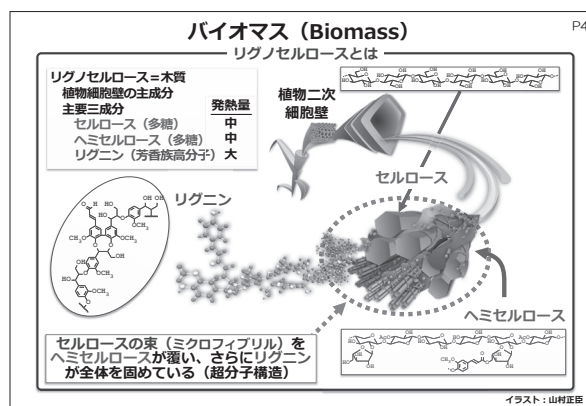
バイオマスの種類

リグノセルロース (木質) (木材や草の茎など) 樹木系木質バイオマス (人工林由来、天然林由来) 草本系木質バイオマス (ススキ、エリアンサスなど) 非リグノセルロース デンプン・糖質 (サトウキビ、イモなど) 炭化水素 [石油植物 (アオサグロ、ユーカリなど)] 油脂 [油脂植物 (アブラヤシ、ヤトロファなど)] 産業廃棄物* ハルブ工場廃液 (黒液) など 農林産廃棄物 フラ、ハガス、製材廃物 (おが屑、木片、樹皮)、 家畜排せつ物など 都市ゴミなど 紙屑、廃食品、水産、畜産廃棄物など	*産業・家庭 廃棄物には 大量の腐ブ ラスチック などが含ま れる
---	--

た草の茎も木材も本質的にはほとんど変わらないからであります。それで樹木系それから草本系に分けられるということになります。

非リグノセルロースであります。これはでんぷんとか糖質、炭化水素、油脂、食べる分じゃない資源、工業原材料として使う分をお考えいただきたいと思います。産業廃棄物、これも非常に重要な資源なわけでございますけれども、この中にはご承知のとおり、廃プラスチックのような化石資源由来のものもかなり混ざっているわけであります。

それでリグノセルロースのほうをご説明させていただきますのですが、先ほど木質のようにお考えくださいと申し上げましたが、もう少し専門的に申しますと、植物の細胞壁。厳密に言いますと維管束植物の細胞壁ということになります。その主成分であります。もうちょっと詳しく言いますと、細胞壁のほとんどがいわゆる二次細胞壁ということになります。これは植物の茎をぶつ切ってやりま



して、さらにずっと拡大しますとこういうパイプ状の構造が見えてまいります。二次細胞壁はこのパイプの壁の部分というふうにお考えいただければ結構かと思えます。

それでリグノセルロースは、もう少し分けますと、さらに三つの成分からなっていることになるのですが、セルロース、ヘミセルロース、それからリグニン、3成分からなっています。セルロースとヘミセルロースはいわゆる多糖でグルコースのような単糖がたくさん、たくさんつながったようなものというふうにお考えください。

それからリグニンは芳香族高分子化合物で非常に複雑な構造を持っておりますが、例えて言うならば、フェノール樹脂接着剤のようなものとお考えいただいても結構かと思えます。

セルロースは非常に細長い分子で、それが寄り集まって束を形成します。それをマイクロフィブリル、あるいは分野によっては微繊維とも申しますが、そういうセルロースの束をここでは青く書いていますが、それをヘミセルロースが覆ってさらにリグニンが全体を固めているという複合体であります。

これは超分子構造と申しますが、実はリグノセルロースの超分子構造こそが、植物が重力に抵抗してずっと立ち上がることができる根本であります。要するにこれが植物の体を支えている根本で、いわゆる構造材料であります。従いまして我々がこのリグノセルロースを何か化学成分として使いたいと思うときには、そもそもそう簡単に使い回せるようにはできていない。そこにリグノセルロースを使うときの難しさの根本がございまして、またそこにいるいろいろ研究する余地があるということにもなります。

あとの話の都合上、少し発熱量についても説明をさせていただきますと、セルロースやヘミセルロースは、いわゆる多糖ですが、これはかなり酸化が進んでいますので、燃やしても

発熱量はまあそんなに高くない。一方リグニンはまだ酸化が進んでいないので燃やせば発熱量は大きいということになります。そこでリグノセルロースを燃焼利用するような場合は、実はリグニンの含量が多いほうが有利であるということになります。

もう少しバイオマスの特徴についてご説明をさせていただきますと、幾つか挙げさせていただきますが、まず一番は環境適合性、いわゆるカーボンニュートラルと申します。これは二つぐらいの意味合いで使われておりますが、

1番、ここでの私の今日の話はこの1番の意味合いになるのですけれども、植物由来のバイオマス燃料などに関して、燃焼するときに二酸化炭素が出ますが、植物の成長過程で光合成により二酸化炭素を吸収しておりますので、実質的にプラスマイナスゼロになると、そういう状態のことをしてカーボンニュートラルと言っています。

2番目のほうは、社会や企業における活動において二酸化炭素が出ますが、その排出権の購入とかによって相殺して実質的にゼロの状態にすること、これをカーボンニュートラルと言っております。

そしてこちら戻りまして再生可能、それから3番、化学物質供給性があること。これは非常に重要であります。例えば太陽光発電とか風力発電は非常に重要で、エネルギーは取れますけれども、いわゆるものですね、有機化合物、炭素資源、工業原材料、そういったものは太陽光発電とかでは取れないわけでありまして。化石資源からこういう工業原材料を今どんどん取っておりますけれども、その使用をやめて何かから、他のものから取りたいとなりますとやはりバイオマスからと、バイオマスにおいて他にないということになります。

それから今よく脱炭素社会とか申しますけれども、実は我々にとって炭素資源は必須ですね。この意味合いは脱化石資源という意味なので、脱炭素というよりは脱化石資源と言ってもらったほうがより実態をよく表しているのではないかなと私は常々思っております。それから供給量はそこそこ多い、それから、地域的な利用が重要である、ということになります。エネルギー利用、つまり燃やして使う場合を考えますと、我々が必要とする全エネルギーをバイオマスで賄うのはちょっと難しいですが、地域的に使うのは今でも非常に重要であります。

これがまとめのようなものでございますけれども、長期的に考えますと工業原材料として使うほうがいだろうと思っておりますけれども、短期的、あるいは地域的には燃やして使うほうも非常に重要であります。

例えば最近ですと、石炭火力発電所で石炭を燃やすのに非常に抵抗が強くなっておりますけれども、まだ発電所の施設は使えますから、代わりに何か燃やしたいということになるとカーボンニュートラルのバイオマスということになってまいります。

バイオマス (Biomass) PS

——— バイオマスの特徴 ———

<ol style="list-style-type: none"> 1) 環境適合性・・・カーボンニュートラル 2) 再生可能 3) 化学物質供給性 工業原材料の供給 炭素資源は必須 脱炭素と言うより 脱化石資源 4) 供給量・・・多い(少なくない) 5) 地域特性・・・地域利用が重要 地域毎に適した種がある バイオマス全体としては地域普遍的/比較的薄く広く産出 6) エネルギー利用 燃料として必要な全エネルギーを賄うのは難しい(地域利用は重要) 7) 利用の方向性と時間軸・地域性 長期的：工業原材料利用(有機化合物としての利用)が望ましい (エネルギーは太陽光発電などで取得) 短期的・地域的：燃焼利用(ペレットなど)も重要 (例、石炭火力発電所代替燃料) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 植物由来のバイオマス燃料などに、燃焼するときにCO₂を排出するが、植物の成長過程で光合成によりCO₂を吸収しているため、実質的にはCO₂の排出量はプラスマイナスゼロになる状態のこと 2. 社会や企業における生産活動において、CO₂排出分を排出権の購入や植樹などによって相殺し、実質的にゼロの状態にすること*
--	---

*<https://ideasforgood.jp/glossary/carbon-neutral/>

それでやっと本論でございますけれども、大気中の二酸化炭素濃度が上がってきているというのもご承知のとおりで、先ほどの総長のほうからもお話しもございましたが、その結果といたしまして、地上の気温が上昇してきているというわけです。

そして、人為的な影響によって二酸化炭素濃度が上がってきているということは、極めて確からしいということになっております。IPCCの報告書なんかからはこういう文言もございます。

二酸化炭素の排出、これが原因になっているということになっているわけではありますが、ではどこから出てきているかと申しますと、化石資源の使用による分が大きくて、また森林減少による分もかなりあるということになっています。従いまして、今後は化石資源の使用量を極力抑えて、上から下に行く分を太くして戻りを小さくすると。そこでバイオマスを使う。ただし、森林減少には注意しながらバイオマスを使っていく必要があるとそういう流れになっているわけでありませう。

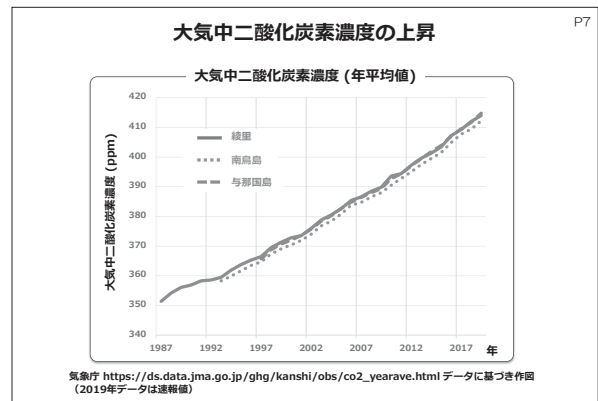
ここで我々のエネルギー消費、一次エネルギー消費について見てまいります。一次エネルギーと申しますと、自然界から得られた加工される前のエネルギー。石炭、石油とかこういうものをお考えいただければ結構なのですが、全体の中でバイオマスがどのくらいの割合を占めているのかについて触れさせていただきますと、一番右を見ていただきますと、これは2013年のデータであります。石炭、石油、天然ガスで大体30パーセント、30パーセント、20パーセントぐらい。それで全体の8割で、残りの2割のうちの半分、つまり全体の1割ぐらいがバイオマス燃料に由来してい

P6

本日の内容

1. バイオマスの説明
2. 背景
 - 大気中二酸化炭素濃度上昇
 - 世界の一次エネルギーの使用状況
 - 森林減少
 - 樹木系バイオマス利用状況
3. 熱帯荒廃草原における持続的バイオマス生産・利用
4. バイオマス利用とコロナ禍後の社会
 - まとめて代えて —

謝辞



P8

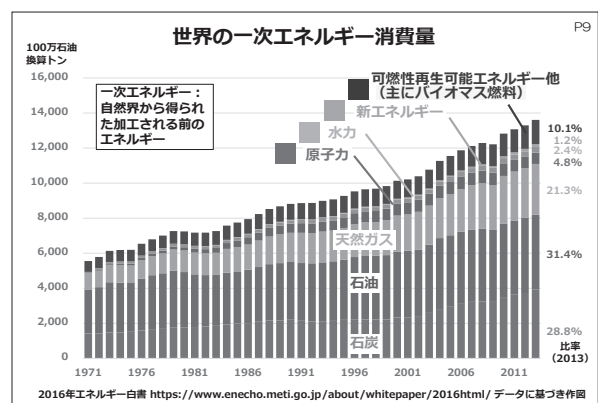
大気中二酸化炭素濃度の上昇

“人間の影響が20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な (dominant) 要因であった可能性が極めて高い”*

“CO₂の累積総排出量とそれに対する世界平均地上気温の応答は、ほぼ比例関係にある”*

CO₂排出量 化石燃料の使用による： 304億トン/年**
森林減少による： 37億トン/年**

* IPCC第五次評価報告書の概要-第1作業部会(自然科学的根拠) (2014年12月改訂) <http://www.emv.go.jp/earth/ipcc/5tr/>
** 国立環境研究所 地球環境研究センター ウェブサイト https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/13-1/qa_13-1-j.html



るわけでありませう。世界的にそうなっています。

もう少し地域的なものを見てまいりますと、この紫っぽいところを見ていただきますと、アフリカとか中南米とか中国を除くアジアで特にバイオマスを燃やしてエネルギーを取っている分が多くなっています。我が国はそれほど多くはないのですが、実は我が国でも最近ではバイオマスを燃やして使っている量が非常に増えてきています。

そして森林のバイオマスを使いますと、当然森林面積が影響を受けてくるわけがございますけれども、そのデータは左半分にお示ししております。濃い緑のほうは1990年から2015年、薄い緑が2010年から2015年のデータで1年当たりのデータではありますが、世界全体で見ますと左側は減っている分ですね、非常に減っていると。特に南アメリカとかアフリカで減っている。

一方アジアは少し増えているのですね。これは、実は中国で大いに増えている分はかなり引っ張られている。例えばインドネシア、これは私どもの研究のパートナー、インドネシアなのですけれども、かなり減っている。ブラジルも非常に減っているのはご承知のとおりでございます。

それでこのスライドでは樹木系のリグノセルロースバイオマス、要するに木材であります。その生産量について少しまとめてみたものであります。

まず左上からまいりますと、地球面積全体のうちの3割が陸地、その陸地の3割が森林です。森林面積は、約40億ヘクタール、最近40億をちょっと切ったと言われておりますが、まあそのぐらいありまして、そこに溜っておりますバイオマス量、これが全陸上バイオマス蓄積量の大半を占めているというふうに言われております。

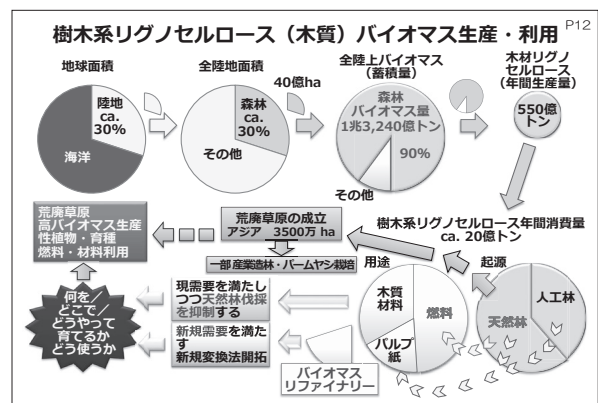
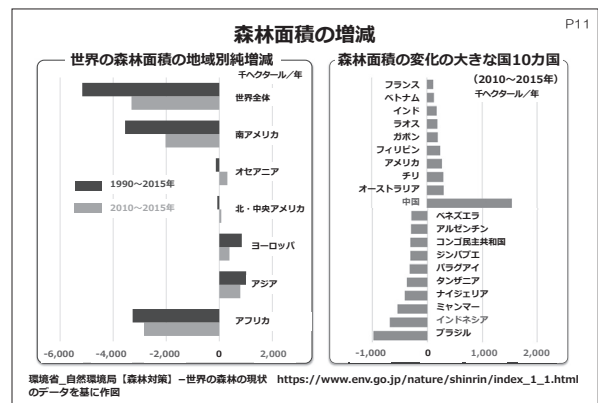
そして我々はこの樹木系のリグノセルロースバイオマスを年間大体20億トンぐらい消費しています。これは密度の取り方によって少し変わってきますけれども、大体このぐらい使っている。

P10

世界の一次エネルギー消費量
Mtoe: 100万石油換算トン

地域	バイオマス (Mtoe)	一次エネルギー供給量 (Mtoe)	バイオマス比率 (%)	
OECD	欧州	138.8	1,723.4	8.1
	米州	126.4	2,669.7	4.7
	アジア・オセアニア	17.8	881.7	2.0
	小計	283.0	5,274.8	5.4
非OECD	アフリカ	390.4	817.8	47.7
	中南米	124.5	617.1	20.2
	アジア (中国を除く)	382.2	1,816.3	21.0
	中国	108.0	2,972.5	3.6
	非OECD欧州及びユーラシア	19.2	1,130.4	1.7
	中東	0.8	734.1	0.1
	小計	1,025.1	8,088.2	12.7
合計	1,308.1	13,761.4	9.5	
日本*	8.0	425.6	1.9	

OECD: 経済協力開発機構
エネルギー白書2019 <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019pdf/> データに基づき作成
*過去20年間 (1995-2017) で木質バイオマスの燃焼利用量は約10倍に増加している [Annual Report on Forest and Forestry in Japan, Fiscal Year 2018 (summary), Forestry Agency, p37]



用途でございますが、左側の丸い図をご覧くださいますと、今でも世界的にはまだほぼ半分を燃やして使っている。残り半分の6割ぐらいが木質材料、建材とか家具材。残りが紙パルプ用材ということになります。

どこから出てきているかということでございますが、人工林と天然林、なかなか切り分けが難しいところもありますし、また人工林と天然林の定義がちょっと変遷してきているようなところもございますが、ややこしいのですけれども、ここで天然林と申しております中には原生林だけではなく自然に植生が回復してきているようなところも含まれています。

ともかく人工林から出てきているものはあまり燃やして使っていない、1割ぐらいしか燃やして使っておりませんので、ほとんどはこの丸い図の左半分、つまり木質材料と紙パルプ用材として使っている。ということは、今でもいわゆる天然林を切って燃料として使っている分が非常に多いということになります。世界的に見たらそうなっているわけでございますが、主に発展途上国で天然林を切って燃料として使っているわけでありませう。

もちろんそれを急にやめろとかそういうことを言うのは非常に傲慢なことで、というのはいろいろな理由があってやっているわけでございますので、偉そうなことは言えないのですけれども、しかしながらいずれにしても天然林伐採は抑制する必要がありますし、また一方で要るものは要るということになります。

さらに我々もバイオマスリファイナリーが重要であると言っているわけでございますけれども、つまり今は化石資源からいろいろな化学物質を取り出しておりますが、今後化石資源を使わないでバイオマスからいろいろな化学物質を取りたいと言っているわけでありませうが、今でもこんな栽培状態なのに、じゃあバイオマスリファイナリーに持っていく分はどこで育てるのだということになってまいります。

そこで、こういった種類のバイオマス植物種を、どこで、どうやって育ててどう使うか、総合的に考えるというのが非常に重要になってきております。



実は、天然林を切った後に非常に広大な荒廃した草原が成立しておりますが、我々はこれに今着目しております。一部は産業造林とかあるいはパームヤシの栽培なんかにも、一部というかかなり取っていかれているのですけれども、それでもまだかなり広い面積が残っているのです、そこに単位面積当たりの収量の高いバイオマスを持続的に植えて育ててうまく使う、こういうことが重要だろうというふうに思っているところであります。

この荒廃草原についてももう少しご説明をさせていただきます。

東南アジアの熱帯バイオマスの利用の関連ではありますが、その前にまず、我が国の針葉樹林業について考えてみますと、スギ、ヒノ

東南アジア熱帯広葉樹バイオマスの利用 P13

熱帯：高バイオマス生産性 → バイオマス生産地として重要

<p>温帯、針葉樹林業 スギ、ヒノキ 数百年の歴史、施業技術確立</p>	 スギ林 京大再生研究林
<p>熱帯、広葉樹林業 熱帯天然林（フタバガキ科など）の伐採 第二次世界大戦後増大</p> <p>「第2次世界大戦後、熱帯林資源の開発が始まった当初は、熱帯林は、その成長量と蓄積の大きさから、容易に再生されると考えられ、安易に伐採が行われていた。ところが、熱帯林の生態学的研究が1960年代頃から発展するにつれ、熱帯林は伐採に対して非常に脆弱で、フタバガキ科などの林冠木の再生は非常に困難であることがあきらかになってきた。」 (編者調査、学位論文、2012 “マレーシアサバ州におけるマンギフアカシア人工林の養分循環と荒地地回復に関する研究”)</p> <p>伐採跡地 → 荒廃草原 (チカヤ、<i>Imperata cylindrica</i>, アランアラン)</p> <p>アカシア、ユーカリ 20~30年程度の歴史、持続的施業技術確立への途上</p>	 東カリマンタンの荒廃草原

キの林業はもうすでに施業技術が十分確立しているわけです。例えば、九州ですと日田の林業とか飢肥杉（おびすぎ）とか非常に有名であります。一方、東南アジアの広葉樹をどう使ってきたか、第二次世界大戦後にこれらをどう使ってきたかと申しますと、要するに天然林を切って使ってきたわけでありまして、

その結果といたしまして、広大な荒廃した草原が広がってしまいました。ここに主に、チガヤ、これは日本にもよく生えておりますが、学名は *Imperata cylindrica*、インドネシア語ではアラン・アランと申しますが、これを主たる構成成分とするような草原が成立してしまっているわけです。これには実は人為的な攪乱が繰り返し入って、火が入ったりしまして、この草原の状態からなかなか脱却しなくて非常に大きな問題だと言われているわけでありまして。

そこで私どもはこの荒廃草原における持続的バイオマス生産利用について少しプロジェクトを進めさせていただいております。これについてちょっとご紹介させていただきます。

まず何を植えるかであります。樹木か大型のイネ科植物かということになりますが、この表は樹木と大型のイネ科植物の比較を示しています。イネ科植物は草なのですけれども、樹木と草では適材適所でいろいろ使い道が違いますが、バイオマス生産性ということで見ると、実は草のほうが、つまり大型のイネ科植物の方が樹木より圧倒的にバイオマス生産性が大きいということになります。我々はこの点に特に着目をして、イネ科植物を対象に選んでおりますが、ただ表の一番下の燃やして使う場合のことを考えますと、先ほど申しましたリグニンという成分がやや少ないので、やや発熱量が全体的に少なくなってまいります。だから、リグニン量を上げてやることは育種目標になります。

我々はこのイネ科植物の中でもソルガム、これはタカキビとか、あるいはコウリヤンとか申しますが、これが特にバイオマス生産性が高いのでこれに着目しています。

このソルガムは品種によって違いはありますが、穀物とかシヨ糖、サトウキビのように茎からシヨ糖も取れますし、場合によっては飼料も取れます。また成育時の乾燥耐性が大きい、こういった理由からソルガムを対象に選んでいます。

こういった荒廃草原にバイオマスを植えて、持続的に育てて、ものを作らせていただくよ


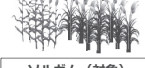

P14

本日の内容

1. バイオマスの説明
2. 背景
 - 大気中二酸化炭素濃度上昇
 - 世界の一次エネルギーの使用状況
 - 森林減少
 - 樹木系バイオマス利用状況
3. 熱帯荒廃草原における持続的バイオマス生産・利用
4. バイオマス利用とコロナ禍後の社会
 - まとめて代えて -

謝辞

標的植物：リグノセルロース（木質）バイオマスの比較 P15

	樹木	大型イネ科植物	
バイオマス生産性	○ 5~20 ton ha ⁻¹ y ⁻¹	◎ 20~100 ton ha ⁻¹ y ⁻¹	 世界の石油消費量 約40億 ton y ⁻¹
バイオマス消費/生産量	◎ ~20億 ton y ⁻¹ *	◎ 36億 ton y ⁻¹ **	
木質ボード	◎	◎	 ソルガム（対象） バイオマス生産性：特大 穀物、シヨ糖、飼料：利用可 乾燥耐性：大
紙・パルプ	◎	×	
製材（柱・梁材）	◎	×	
高付加価値生産物	△	◎ 穀類、シヨ糖、飼料他	
化学成分分離特性	△	◎	
育種特性	△	◎	
発熱量（リグニン含量）	○+	○- リグニン含量やや少	

*Consumption: Umezawa (2018) Phytochem Rev. 17: 1305-1327
Calculated based on FAO data and Miles P.O., Smith W.B. (2008) Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America, USDA Forest Service, Northern Research Station Research Note
**Production: Yee W., Lee K.T., Abdulah W.W., Leh C.P. (2016) Renew Sust Energ Rev 60:155-172

イラスト：山村正臣

うなプロジェクトを進めさせていただいています。これはJICA国際協力機構、それからJST科学技術振興機構の共同のプロジェクトで、いわゆるSATREPSという枠組みのプロジェクトの一つであります。

こういう荒廃草原は土壌条件が非常に貧栄養なので、まず施肥が重要であり、それから発熱量を上げるような育種や、それから出てきたバイオマスをうまく使う、こういう三つのサブプロジェクトを同時に進めているところであります。

これは全体の建付けで詳細は省略させていただきますけれども、日本側の代表研究機関は京都大学でありまして、私が全体の取りまとめを仰せつかっておりまして、インドネシア側はインドネシア科学院が代表研究機関で、その傘下のいろいろな研究センター、生物多様性保全研究センターとか、こういうところが入ってきています。いろいろな専門性を持ったいろいろな研究者が共同して、このプロジェクトに当たっているというところでございます。

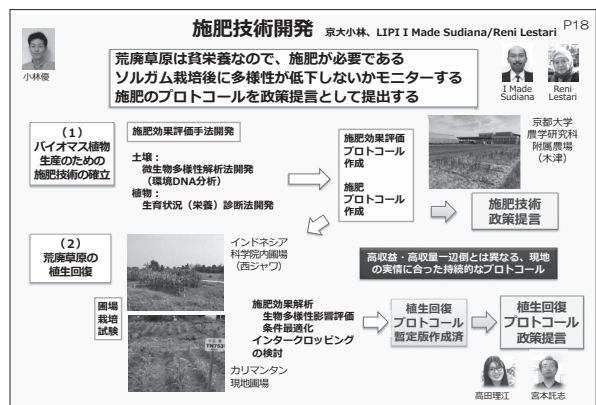
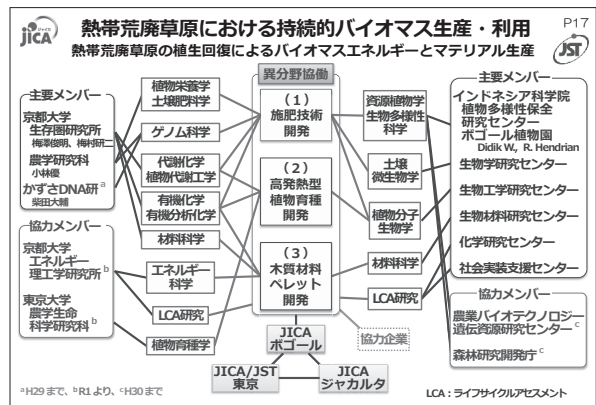
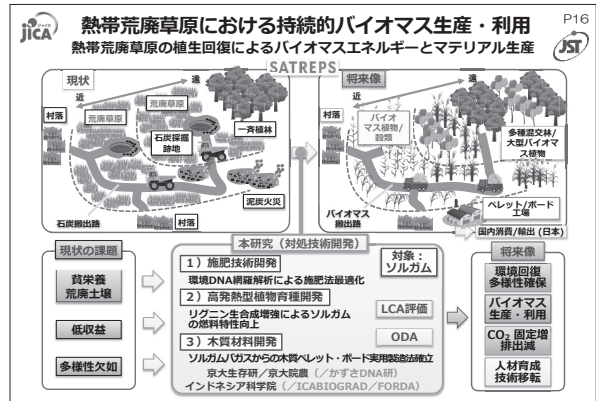
以下この三つのサブプロジェクトについて、少し説明を続けさせていただきます。

まず、施肥技術の開発であります。京大側は農学研究科の小林優先生が代表で、インドネシア側ですがLIPI、リピと言っておりますが、これはインドネシア科学院の略称ですが、I Made Sudiana先生とReni Lestari先生が代表であります。

そして施肥をやる、それから多様性はやはり重要ですのでそれをモニターする、それから施肥のプロトコルを作ってそれに基づいて政策提言をする、こういうことを目的としています。

施肥技術の確立であります。まず土壌の中の生物多様性はどうなっているか、微生物の多様性はどうなっているかを調べるような分析条件を決めようということでございます。

これには、いわゆるメタゲノム解析という手法を使います。これは、例えば我々の腸内の菌相ですね、つまり微生物の集まりの状態なんかを調べるのにも使われる手法であります。



要するに土壌中の微生物から全部まとめてDNAを一気に抽出しまして、そのDNAの混合物ですよね、それをDNAの解析装置、いわゆる次世代シーケンサーというものにかけます。そうしますと非常に膨大なDNAの塩基配列データが出てまいります、それをインフォマティクスと言いましょか、情報処理いたしまして解析いたしますと、大体どういったタイプの微生物がどのくらい存在するかということが分かってまいります。

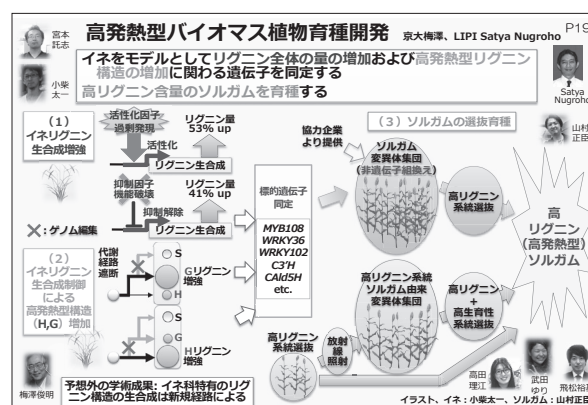
植物側につきましては、栄養状態とか生育状況の診断のメルクマールになるようなものを決めまして、そういったものも使って施肥効果の評価、あるいは施肥のプロトコルを作っ、それを現場に当てまして、修正して、最終的な施肥技術及び植生開発のプロトコルを策定しているところであります。

また、我々は、高収益、高収量、一辺倒ではなくて、現地の実情に合ったような穏やかな持続的なプロトコルを作ることが重要だろうなと思っています。

この写真はこのサブプロジェクトの主要メンバーであります。

それから二つ目のバイオマス植物育種であります、これは日本側では私の研究室でやっていますが、インドネシア側はSatya Nugroho先生が代表であります。

我々はイネをモデルとして使っています。イネは大型のイネ科植物のモデルにもなります。そこでイネでリグニンの総量を上げると共に、リグニンにいろいろなタイプがありまして、その中で少しやや発熱量が高いタイプ



がありますので、それを増やしてやるというような実験を進めています。そしてリグニン総量や発熱量の高いリグニンを増やすことに関わるイネの遺伝子を同定して、その遺伝子情報に基づいてソルガムを育成するような建付けを組んでいます。

まずリグニンを増やすほうであります、要するに生合成を増強するのですけれども、リグニンの生合成に限りませんけれども、代謝には裏で代謝を活性化するような因子、あるいは抑制するような因子、これらはタンパク性の因子ですが、そういったものがあります。

それで活性化するほうは過剰に働かせてやって、抑制するほうは抑制を止めると、抑制解除するわけです。これには最近非常に発展しております、ゲノム編集という手法を使っています。これは非常にうまくいきましてかなりリグニン量が増えてまいりました。これで大体計算値ですが、発熱量が5パーセントぐらい上がるかなというところあります。

それで次に構造を変えてこの発熱量がやや多い、H型とかG型のリグニンを増やす話であります、これもまたゲノム編集という手法を使ってこの段階の代謝を止めてみたわけです。これもまあまあうまく働まして、結局こういった標的の遺伝子、これは名前だけ書いておりますけれども、こういったものの働きを止めれば、目的の形質が出てくるということが分か

りましたので、それでソルガムをその情報に基づいて選抜するというにしています。

協力企業から提供していただいたソルガムの変異体の集団、これは大体5千系統ぐらいあります。これは実は遺伝子組換えではないのですが、その中からこういった遺伝子が働きを失っているようなものを拾っているわけです。専門的にはTILLINGという方法を使いますが、道具立てとしては、今毎日のように耳にしますPCRという機器をよく使っています。

実は一昨日どうも当たりが取れた、選抜できたと思うというような報告が研究員から上がっておりますが、最終的にはちゃんと目的の形質が現れるかどうかを評価しないといけないですが、そのような状態でございます。

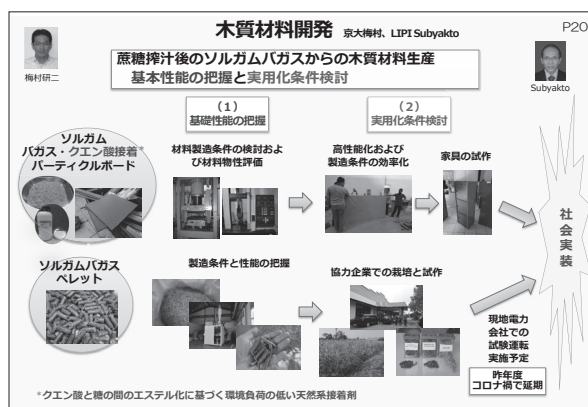
もう一つ全く違う系統の実験もやっております、と申しますのは世の中にはいろいろなタイプのソルガムがすでに存在しています。それを協力企業から提供してもらって片っ端からリグニンの量を測っています。結構手間のかかる時間のかかる仕事なのですが、泥臭い仕事なのですが、まあともかく高リグニン系統がある程度取れてきて、それだけでも目的の一部達成にはなるのですが、さらに放射線を当てて変異体を作りまして、その中から生育のいいものを拾おうとしています。これは主にインドネシア側でやっています。

それからこういった代謝制御をやりまして、その結果ちょっと予想外の、本来のプロジェクトとあまり関係ないですけども、学術的な成果も出てまいりまして、そういうのが出てくると我々は非常に嬉しいわけでありまして。この写真は、このサブプロジェクトの主要メンバーであります。

それで最後に材料開発であります、これはソルガムのバガスといういわゆる茎の部分ですね、これを砕きまして、ある程度小さな小片というかパーティクルと言っていますが、そういったものにしまして、それを接着剤で固めて板材料、パーティクルボードにする。また、一部は粉にして、さらに粉を固めてペレットにする、そういったこともやっています。それで、次にこれらをうまく使うという話になりますが、板材料のほうは現地の家具会社で、キャビネットなんかを試作したりしているところであります。

こちらのペレットのほうは、実は昨年の5月ぐらいの段階で、現地電力会社の燃焼試験運転をやろうというところまで来ていたのですが、実はコロナで止まってしましまして、なんとか次年度はこれを進めたいと思っておるところでございます。日本側は当研究所の梅村先生、それからインドネシア側はSubyakto先生が代表であります。

これは今ご説明した1、2、3のサブプロジェクトのまとめで、この小さい字の部分は成果公表のまとめでございます。ちょっとここで触れさせていただきたいのは、このプロジェ



クトは京大の生存圏研究所が、インドネシア科学院ともう30年以上、1980年代からずっと共同研究を続けておった、その基礎の上にやっている。また生存圏研究所だけでなく京大のいろいろな部局、あるいは京大全体がインドネシア科学院と太いパイプを持っておりますが、そういったものが背景にあるということでございます。

それからこの三谷さん、彼は現地調整員という立場ですが、また、Safendri Komara Ragamustari先生、彼はうちの研究室で学位を取ってインドネシアに帰った方なのですが、彼らが社会実装とか現地企業との調整で非常に尽力いただきました。三谷さんはインドネシア語も堪能なのですが、彼らの尽力がないとこの社会実装は進まないで、だいぶ違ったかたちになっていただろうなと思って非常にありがたく思っております。

それから最後に、社会における位置づけについて少し触れさせていただきます。このへんはもう皆さんご承知のとおりなのですが、十数年前にバイオエコノミーという概念がヨーロッパ中心に出てまいりました。バイオマス資源依存の経済活動に転換する必要があるということでございます。

それから2015年に三つほど重要な枠組みが出てまいりました。ちょうど私どものプロジェクトが始まったのが2015年春なのですが、その年の秋から冬にかけて三つほど出てまいりました。

まず一つ目は申し上げるまでもない、いわゆる持続可能な開発目標SDGsであります。17個の目標が立てられております。それから2番目のサーキュラー・エコノミー・パッケージ。これはヨーロッパ中心に再生・再利用を続けるようなビジネスモデル。それからこれは言うまでもないと申しますか、いわゆるパリ協定であります。温室効果ガスの削減を世界的に必死になって取り組む必要があるという話でございます。

さらにRE100とかESG投資の拡大、こういったものも重要になっているのはご承知のとおりであります。

熱帯荒廃草原における持続的バイオマス生産・利用
熱帯荒廃草原の植生回復によるバイオマスエネルギーとマテリアル生産

1) 施肥技術開発
環境DNA網羅解析による施肥法最適化
テグニカルガイドライン策定/施肥による土壌微生物多様性の低下は認められない
Takeda et al., Proc. 5th SATREPS Conf. p.28 (2020); Reza et al., Proc. 5th SATREPS Conf. p.15 (2020); Reza et al., J. Plant Nutr. 44, 773-790 (2020); Didi Usmani et al., J. Biol. Div., 21, 2804-2813 (2020)

2) 高発熱型植物育種開発
イネリグニン生成増強: 41~53%増 (発熱量5%程度増加、計算値)
高リグニン含種系群ソルガム選抜
既存のソルガム系統から選抜済み
イネ実験で同定された遺伝子が変異したソルガム・グループ選抜中
イネ科特異的なリグニン構造は新規未知経路により生成される
Koshida et al., Plant Biotechnol. 34, 7-15 (2017); Takeda et al., Planta, 246, 337-349 (2017); Takeda et al., Plant J. 95, 796-811 (2018); Miyamoto, Takeda, et al., Plant J. 98, 975-987 (2019); Takeda et al., Plant J. 97, 245-254 (2019); Waiyanti, Miyamoto et al., Ind. Crops Prod. 142, 111840 (2019); Miyamoto, Takeda, et al., Plant Sci. 296, 110466 (2020); Umegawa, Phytochem. Rev., 17, 1365-1377 (2018); Umegawa et al., Lignin, 1, 30-41 (2020); Miyamoto et al., Curr. Plant Biol. 24, 100174 (2020)

3) 木質材料開発
ソルガムバスの木質ペレット・ボード実用
製造法確立
現地企業における栽培とペレット試作
→ 現地電力会社での試験運転へ
→ 現地家具会社における試作
Sulma S. Kusumah et al., Ind. Crop. Prod. 84, 24-32 (2019); Sulma Surva Kusumah et al., J. Wood Sci. 63, 161-172 (2017); Sulma S. Kusumah et al., BioRes., 12, 2498-7514 (2017); Rahma Nur KOMARAH et al., Ind. Crop. Prod., 141, 111761 (2019); Edo Widodo et al., Forest Prod. J., 70, 151-157 (2020); Edo Seto Wibowo, et al., Int. J. Adhes. Adhes., in press (2020); Edi Ewarto Wiloso et al., Biofuel Res. J., 27, 1178-1194 (2020)

京大生存圏とインドネシア科学院: 30年以上共同研究
プロジェクト現地調整員等の多大な貢献 (特に社会実装・現地企業との調整)
Sanfendri Komara Ragamustari

本日の内容

1. バイオマスの説明

2. 背景
大気中二酸化炭素濃度上昇
世界の一次エネルギーの使用状況
森林減少
樹木系バイオマス利用状況

3. 熱帯荒廃草原における持続的バイオマス生産・利用

4. バイオマス利用とコロナ禍後の社会
-まとめて代えて-

謝辞

バイオマス利用の世界的社会背景

1970 1980 1990 2000 2010 2020

1) バイオエコノミー (Bioeconomy) (2005)
化石資源依存の経済活動を持続可能なバイオマス資源依存の経済活動に転換
地球規模の持続性や再生可能性を重視した経済活動 (バイオテクノロジー利用そのものは問題ではない)
経済協力開発機構 (OECD) 報告書 "Bioeconomy to 2030, Designing a Policy Agenda" 公表 (2009) を契機に世界へ広まる

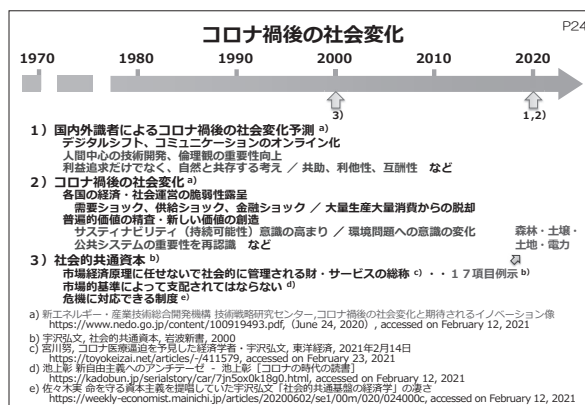
2) 持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals, SDGs) (2015)
誰一人取り残さない持続可能で多様性と包摂性のある社会の実現: 17の目標 ⇨ 陸の豊かさ

3) サーキュラー・エコノミー・パッケージ (2015)
製品・部品・資源を最大限に活用し、永続的に再生・再利用し続けるビジネスモデル
気候変動対策
クリーンエネルギー
技術革新

4) 気候変動抑制に関する多国間の国際的協定 (パリ協定) (2015)
第21回気候変動枠組条約締約国会議 (COP21) で採択
主要排出国が温室効果ガス排出削減に取り組むよう国際社会を主導、地球温暖化対策と経済成長の両立
さらに・・・
RE100: 企業で使用するエネルギーを全て再生可能エネルギーで開く動き (289社, Feb24, 2021)
ESG投資拡大: 環境 (Environment)、社会 (Society)、企業統治 (Governance) を重視した企業投資拡大
石炭燃焼の削減が希求されている・・・代替バイオマス燃料の重要性

こういった色付けしたのが重要なキーワードになると思いますが、ESG投資の場合ですと、例えば石炭を燃やしてエネルギー取ってそれを使うような企業活動には、もう投資がいかないとか、そういうふうな話になろうと思います。そして、SDGsの17目標のうちの幾つか、こういったものについては私もプロジェクトはよく適合しているなど思っているところであります。

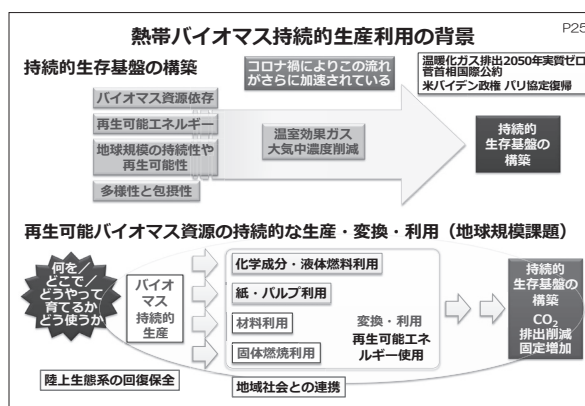
それからコロナ禍後の話になると思いますが、例えば今年の6月ぐらいにいわゆるNEDOと略称で呼ばれている新エネルギー・産業技術総合開発機構が「コロナ禍後の社会変化と期待されるイノベーション像」というレポートを出されました。こういった経済学分野については私は専門ではないのですが、大変興味深く拝見させていただいて、幾つか私なりにキーワードを拾いました。



人間中心とか利益追求だけではないとか、共助、利他、互酬性とか、倫理観とか、サステナビリティ意識の高まりとか、環境問題の意識の変化、あるいは公共システムの重要性とかこういったことが指摘されております。

また、随分前に宇沢によって提唱された社会的共通資本というものが非常に重要だという論説も、たくさん最近拝見するところであります。この中に17項目挙げられておりますが、その中の幾つか、森林土壌、土地、電力、こういったものには我々のプロジェクトもよく適合するかなと思っております。

前の前のスライドでお示しましたようなこういう重要なキーワードを重く見て、そして持続的な生存基盤の構築を図るということがもう随分前から進められているわけですが、コロナ禍後にまさにこの流れが一層加速されたのではないかと感じているところがございます。

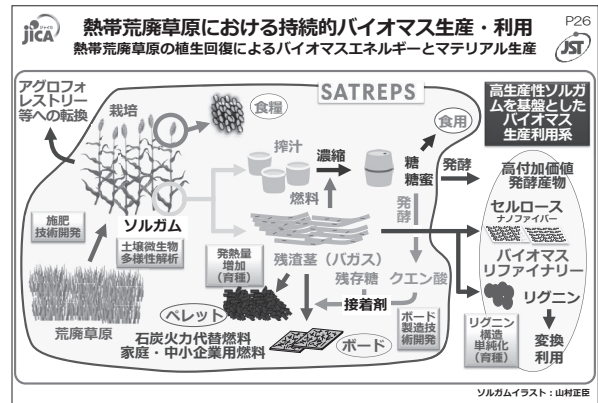


このためには、再生可能バイオマス資源を持続的に生産変換利用する、いわゆる地球規模課題としてこういうのを進めることは重要かと思いますが、一つの流れ、ロードマップのようなものを示しておりますけれども、ちょうどこの赤字、青枠で囲ってあるものが、我々のプロジェクトがちょうどマッピングできるところかなと思っております。

荒廃草原というのは放っておくとなかなか厄介な存在ではありますが、これにある程度のまとまった場所でソルガムを育てることができるようになれば、そしてそれを持続的に

使うような生産、利用するようなシステムの一つの例を提示することができれば、将来的にアグロフォレストリーに転換するとか、あるいは化学成分を利用するような方向にも展開することができるかなと思っています。

このプロジェクトでは、いろいろな方が日夜努力していただいています、特にこの青字とか水色とか赤字で書いたところのメンバーが直接的なメンバーでありまして、それからまた黒字で書きましたような方には、いろいろな意味でご教示いただいたり、サポートいただいているところがございます。この場をお借りいたしまして篤く御礼申し上げます。以上でございます。どうもご清聴ありがとうございました。



謝 辞 (敬称略、順不同)

<p>京都大学生存圏研究所 梅村 二 Sukma Surya Kusumah 飛松 雅彦 藤野 英文 藤野 史朗 Satya Nugroho Sanfendri Komara Ragamustari 高田 隆江 家田 妙子 村上 貴也 Md. M. Rahman 百川 博幸 中俣 諭文 廣瀬 孝江 林 智太 Andri Fadillah Martin Supatni 向井 まい 土田 聡子 五原 由佳 越久由美子 森 恵 京都大学大学院農学研究科 小林 徹 坂本 正弘 富永 達 Reza Ramdan Rival 義田 隆子 高野 俊幸</p>	<p>かずさDNA研究所 大塚 花野 鈴木 秀幸 徳島大学 京都大学 工学部 アースノート (株) 東京大学大学院 農学生命科学研究科 理学研究所 京都大学地球環境学 森 昌寿 京都大学東南アジア地 域研究研究所 水野 広祐 京都大学化学研究所 梶 弘典 JICA/JST 地球規模課題 京都大学生存圏研究所 京都大学生存圏科学研 究ユニット 京都大学研究連携基盤 新エネルギー技術研究 開発 (NEDO)</p>	<p>インドネシア科学院 Bambang Subiyanto Endang Sukara Didik Widyatmoko R. Hendriah I Made Sudiana Reni Lestari Subyakto Satya Nugroho Edi Iswanto Wiloso Sulaeman Yusuf I Nyoman Sumarta Arief Noor Rachmadyanto Hendra Helmanto Amy Estiahi Wahyuni Vincento Esti Windiastri Sasa Sofyan Munawar Ruby Sellawan Sukma Surya Kusumah Reza Ramdan Rival 船越 十名 Dede Hermawan インドネシア農業バイオ テクノロジーセンター インドネシア環境林業 省森林研 究開発庁</p>	<p>JICA (東京) 梅崎 謙 永井 進 廣中 進 JICA (ジャカルタ) 橋本 洋 JICA (ポゴール) 三谷 智 Sanfendri Komara Ragamustari JST 上原 圭介 中央農研北陸研究セン ター 島根大学農学実験施設 中川 強 農業生物資源研究所 高尾 洋 土岐 晴 三上 博史 奈良先端科学技術大 学 島本 功 三木 大介 森林総合研究所 稲垣 昌宏</p>
---	---	--	--