



北海道に適した 新たなバイオマス資源の 導入に向けて

北海道開発局開発監理部開発調査課

北海道開発局開発監理部開発調査課は、北海道総合開発計画の推進のために行う開発計画調査の一環として、平成20～22年度に「北海道に適した新たなバイオマス資源等の導入促進事業」を実施しました。

近年、地球温暖化の防止や、化石燃料の枯渇可能性等の観点から、バイオマス資源の有効活用が求められています。そのうち、バイオマス資源作物の生産及び利用は、低・未利用地の活用や農山村地域における産業創出の観点からも注目されます。一方で、サトウキビやトウモロコシから生産されるバイオエタノールの利用拡大は、穀物価格の高騰や森林の乱開発を招くといった指摘もあります。

これらのことを踏まえ、北海道開発局では、寒冷環境下でも熱帯早生樹に匹敵するバイオマスを蓄積し、再生力が強いことから粗放的な栽培が可能であり、食料需給に影響しないヤナギに着目しました。北海道が有する広大な土地資源を活かして、ヤナギを栽培し、再生可能なエネルギー源として利用することにより、新たな地域産業の創出が期待されます。

しかし、ヤナギの栽培は国内では事例がなく、栽培・収穫方法、エネルギー等としての利用可能量やコストなど、不明な点が多く存在しています。

このため、本事業では、下川町・白糠町・札幌市に試験ほ場を設置し、道内に自生しているエゾノキヤナギ、オノエヤナギの2樹種を対象として生育・収量調査を行い、ヤナギの最適生育条件や収穫目標量を検討するとともに、機械収穫の可能性、ヤナギからのバイオエタノール製造技術を実証的に検証しました。また、それらを基に、暖房用燃料や家畜敷料としての利用の有効性を明らかにし、地域の新たな産業とする可能性を検討しました。

1 バイオマス資源としてのヤナギ栽培に関する調査

(1) 目標収量と最適生育条件に関する調査

目標収量と最適生育条件を検討するため、既存のヤナギの系統及び自生ヤナギから採取した挿し穂を用

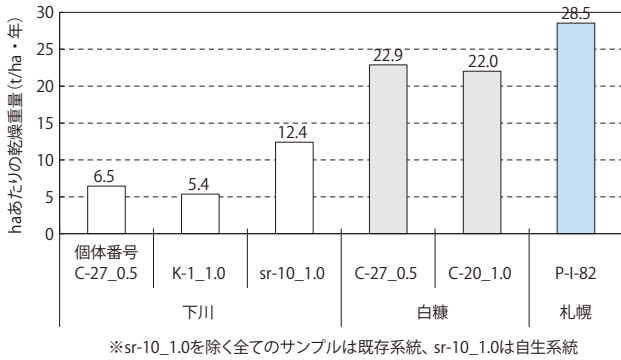


図1 3試験ほ場の系統別最大収量の比較

い、試験ほ場で生育及び収穫量（幹や枝の重量）を調査しました。

各試験ほ場での系統別の収穫量の最大値は図1のとおりであり、後述する利用モデルの検討で想定した、1ha当たり乾燥重量で10t^{*1}を目標収量とした栽培は可能であると考えられます。

また、各試験ほ場における収穫量の差は、気象条件による影響よりも、土壌条件による影響が大きいと考えられました。原野を造成し、土壌養分が少なかった道北試験ほ場（下川町）では収穫量が少なく、農作物の展示ほ場に設置し、養分が豊富な札幌試験ほ場で収穫量が多くなりました。実用の際には、土壌条件に応じて造成方法や施肥に配慮する必要があります。

(2) 収穫機械の利用可能性に関する調査

一般にバイオマス資源は、薄く広くかつ不均一に存在し、収集・運搬にかかるコストや安定的な確保が課題となります。栽培はそれらを軽減しますが、収穫を手作業で行っては、利点を活かせません。しかし、国内にはヤナギの収穫機械が存在しないため、海外の事例を参考に、デントコーンハーベスタ（ヤナギ収穫用アタッチメントを装着）とサトウキビハーベスタを候補とし、メリット・デメリットを整理しました。

サトウキビハーベスタは、デントコーンハーベスタより導入コストが安価で、燃料消費量が少なく、メンテナンスの面からも適していますが、実際にヤナギを

※1 ヤナギ乾燥重量1tは、ヤナギ生重量では2.2tに相当。

収穫した例はないことから、実証試験を行いました。

収穫実証試験は、実栽培に近い状態で収穫時間、消費燃料等のデータを取得することを目的に、下川町、弟子屈町に収穫ほ場を設置して行いました。

試験による計測データを基に、約5ha（270m×180m）ほ場での収穫作業時間を計算すると、サトウキビハーベスタでは、ha当たりの作業時間は7.01時間となりました。作業の効率化を図るため、収納物を収納する網袋の容量を増やし、交換を極力少なくするような改良を想定して作業時間を試算すると、ha当たり5.40時間となりました。

表1 収穫用作業候補機器の特性

	サトウキビハーベスタ (魚谷鉄工(株)製UT-100K-1)	デントコーンハーベスタ (CLAAS Jaguar 950 + HS-2)
イメージ図		
汎用性	北海道における導入事例はない。	ベースマシンについてはデントコーン等の収穫で用いられる。
作業性	クローラ式であるため、軟弱地盤の作業にも対応可能。ある程度の礫質土壌での収穫にも対応できることを確認済み。ただし、刃の損傷の可能性も同時に指摘された。	タイヤ式であるため、軟弱土壌や礫質土壌での作業性低下が懸念される。
運搬	クローラ式であるため、トレーラー等での運搬が必要となる。	タイヤ式であるため、ある程度の道路走行が可能。
導入コスト	購入価格：約¥21,000,000 ※繰り返し利用を想定した場合、沖縄からのレンタル使用よりも割安となる。	※アタッチメント価格 中古価格：¥17,200,000 新品価格：¥22,200,000 ※道内への輸送コストを含めた値段。 (メーカー代理店への問い合わせによる。)
メンテナンス対応	国内メーカー製品であるため比較的対応しやすい。	国内での対応は現時点では難しい。 (メーカー問い合わせによる。)
作業効率	7.01hr/ha ※H22年度実証値を元に算出	2.0hr/ha ※先進事例文献値による
燃料(軽油)消費量	55.4 L/ha (実証値)	120 L/ha (メーカー問い合わせによる。)

表2 収穫実証実験での作業時間

〔試験ほ場での実測結果〕

項目	①	実測結果
時間当り刈取距離	①	1.91 km/hr
収穫列移動時間	②	20.8 秒
収納袋交換時間	③	144.0 秒
収納袋内乾物重量	④	0.33 t

表3 5ヘクタールほ場での収穫作業時間の試算

〔実測結果を基にした試算結果〕

項目	実測結果による 試算作業時間	収納用網袋の改良 による試算作業時間
ha当り年実収穫量	⑤ 30 t	30 t
ほ場面積	⑥ 5 ha	5 ha
ほ場長辺	⑦ 270 m	270 m
ほ場短辺	⑧ 180 m	180 m
年間収穫量	⑨=⑤×⑥ 150 t	150 t
必要収納袋数	⑩=⑨÷④ 455 袋	227 袋*
収穫列数	⑪ 101 列	101 列
列当り必要収納袋	⑫=⑩÷⑪ 4.5 袋	2.2 袋
刈り取り時間	⑬=⑦÷① 509 sec	509 sec
列移動時間	⑭=② 21 sec	21 sec
収納袋交換	⑮=③×⑫ 720 sec	432 sec
小計	⑯=Σ⑬~⑮ 1,250 sec	962 sec
列当たり時間	⑰=⑯÷⑪ 35.07 hr	26.99 hr
ha当たり時間	⑱=⑰÷⑥ 7.01 hr/ha	5.40 hr/ha

※ha当たり年実収穫量は、収穫サイクル3年による値。収納袋交換の効率化による試算所要時間では、収納袋内乾物重量を0.66tと設定。畦幅は文献等から1.75mと設定。

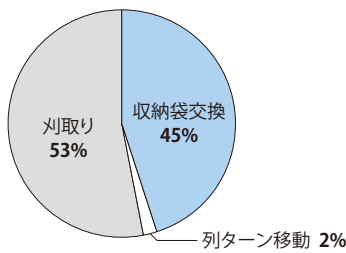


図2 収納用網袋の改良による作業時間構成割合

2 ヤナギからのエタノール等製造に関する調査

(1) エタノール製造技術に関する調査

バイオマス資源の利用法の一つに、燃料用のバイオエタノールがあります。サトウキビやトウモロコシから製造されるバイオエタノールは実用されていますが、食料と競合しない木質バイオマスからの製造は研究段階にあります。本事業では、北海道立総合研究機構林産試験場との共同研究により、ヤナギからのエタノール生産技術を確立するべく、実証試験を行いました。

木質バイオマスからのエタノール製造は、複数の方法が検討されていますが、セルロースを酵素で糖化し、発酵によってエタノールを得る手法を検討しました。

木材に含まれるセルロースを糖化するためには、前処理^{※2}が必要です。前処理は、蒸煮^{※3}とアルカリ蒸解の2方式を比較し、環境負荷が小さいこと、副産物としてのキシロオリゴ糖が高収率で得られること、工程の単純化が可能であることから、蒸煮が有効と判断しました。

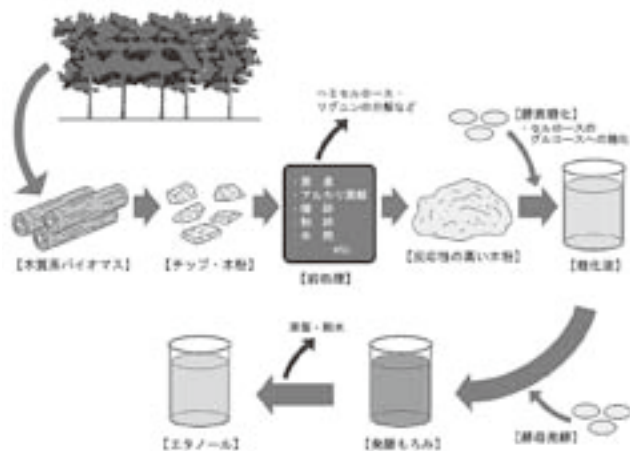


図3 木質バイオマスの酵素糖化によるエタノール生産イメージ

※2 酵素によるセルロースの糖化を容易にするため、木質バイオマスのセルロースとヘミセルロース、リグニンの結合を弱める工程。蒸煮のほか、硫酸処理、アルカリ蒸解処理等が試みられている。

※3 高温、高圧下で、水蒸気によって加熱すること。

※4 重量% (無水エタノール重量/原料ヤナギ乾物重量)

※5 エタノールの比重0.789g/cm³を考慮した生産量。

また、発酵阻害要因の除去とキシロオリゴ糖の回収に、蒸煮後の温水処理が有効なことがわかりました。

糖化では、蒸煮後の試料を1mm未満に粉碎することで、酵素使用量が少ない場合でも、糖化速度を上げることが可能なことがわかりました。

発酵については、糖化と発酵を一連の工程で行う並行複発酵が、単行複発酵に比べて、エタノールの生産性や処理時間、エネルギーコスト等の観点から利点が大きいと考えられました。

これらの条件でヤナギからエタノールを製造すると、エタノールが16%^{※4}と11%のキシロオリゴ糖が生産できました。すなわち、ヤナギ乾物1tからエタノール205L^{※5}、副産物としてキシロオリゴ糖110kgを製造することが可能となります。

(2) ヤナギエタノール混合ガソリンによる自動車走行試験

ヤナギから製造したエタノールの自動車燃料としての適正を検証するため、E3ガソリン(エタノールを3%混合させたガソリン)を製造して、道内2カ所で走行試験を実施しました。

試験の結果、1L当たりの平均走行距離数は13.16kmで、レギュラーガソリンの走行と大差がなく、走行時のエンジン始動性、加速性、アイドリング安定性も良好であり、レギュラーガソリンの代替燃料として使用できることを確認しました。

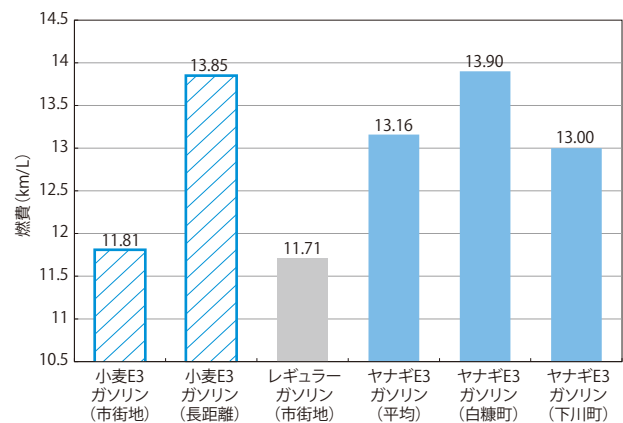


図4 ヤナギE3ガソリン走行試験における消費及び小麦E3、レギュラーガソリンとの比較

3 ヤナギの栽培～利用のモデルの検討と評価

上記のような技術面での検討を踏まえて、地域においてヤナギを栽培・利用するモデルを設定し、産業化の可能性を検討しました。エネルギー利用としてチップの暖房用熱利用及びエタノールの自動車燃料利用、地域産業の資材としてオガ粉の畜産敷料利用のモデルを設定し、経済性に加えて地球温暖化ガス（以下「GHG」という）の排出量削減の観点から評価しました。

(1) 栽培～収穫～運搬に関するコスト

栽培面積を200ha（年収穫面積は1/3）、その他の条件を下記のとおりとした場合、年当たりのコストは21,118千円、1ha当たり106千円、乾物1t当たりでは10.6千円と試算しました。

【試算条件】

- ① 植付け1回当たり栽培期間：
20年（3年ごと計6～7回の収穫）
- ② ほ場整備：機械利用（20年に1回）
- ③ 挿し穂の植付け：
植付け用機械^{※6}の利用（20年に1回）を想定
- ④ 施肥：機械利用（3年ごと（収穫の翌年））
- ⑤ 収穫：サトウキビ収穫機械（網袋改良後）を使用
- ⑥ 収穫量：10t（乾物）/ha・年（=22.2t（生重）/ha・年）
- ⑦ 収穫物の運搬距離：20km

表4 ヤナギの栽培～収穫～運搬のコスト試算

区分	項目	試算結果
コスト	耕起	186千円/年
	整地	295
	施肥	3,987
	シカ柵設置	344
	植付け	4,833
	除草	295
	小計	9,940
	収穫	2,793
	収集	3,947
	運搬	4,438
	小計	11,178
	コスト計	21,118
		10.6千円/t-dry

※6 現時点で実用的な植付け機械はなく、開発が必要である。試算は、ながいもの植付け機械（自走式）を参考とした。

(2) 暖房用等熱利用モデル

下川町では、林地残材等をチップ化し、公共施設の暖房等に用いる計画を策定し、既に一部で実用しています。そこで、ヤナギを栽培・収穫し、バイオマスボイラー用の燃料（チップ）を製造して、直接燃焼による熱利用を行うモデルを、下川町の施設や実績等を参考として検討しました。

栽培面積を200haとした場合、年間4,484t（生重）のヤナギが収穫され、2,640t（含水率65%）の燃料用チップと副産物として500t（含水率25%、3,333m³）のオガ粉が得られます。

チップをバイオマスボイラーに用いると、A重油682klに相当する26,664ギガジュールの熱量が発生し、公共施設の暖房等に利用できます。

年当たりのコストは44,679千円（うち栽培～収穫～運搬21,118千円、チップ化～運搬23,561千円）で、A重油1Lと等熱量のチップ3.87kgをA重油1Lと同価の75円で、オガ粉を2,000円/m³で販売する場合、収益がコストを13,203千円上回ると試算しました（表5）。

A重油の購入コストは1メガジュール当たり1.92円であるのに対し、オガ粉収益を控除したチップのコストは同1.43円となります。

GHG排出量については、バイオマスを燃焼させて発生する二酸化炭素はゼロと考慮します（カーボンニュートラル）が、ヤナギの栽培や収穫、運搬、チップ化で使用するエネルギーや、燃焼時に発生するメタンや一酸化二窒素等を考慮して、1メガジュール当た

表5 暖房用熱利用モデル収支試算

区分	項目	試算結果
コスト	栽培・収穫	
	栽培	9,940千円/年
	収穫	2,793
	収集	3,947
	運搬	4,438
	小計①	21,118
	チップ化	
	積下し	4,569
	チップ投入	4,531
	二次破碎	3,135
	運搬	6,973
	オガ粉選別	4,353
	小計②	23,561
コスト計（①+②）	44,679	
収益	チップ化	
	チップ売値	51,216
	オガ粉売値	6,666
収益計	57,882	
収支	収益計－コスト計	13,203
	（単位当たり製造コスト）	1.43円/M J

表6 暖房用熱利用モデルとA重油とのGHG排出量比較

	単位熱量	GHG 換算係数	年間 燃焼量	年間 熱量	年間GHG量	熱量当たり GHG量
チップ(含水率65%)①	MJ/kg (低位) 10.1		t 2,640	GJ 26,664	kg-CO2eq 234,492	g-CO2eq/MJ 8.8
等熱A重油②	MJ/L (高位) 39.1	kg-CO2eq/L 2.92	L 681,943	26,664	1,991,274	74.7
差(②-①)又は 割合(①/②*100)					1,756,782	12%

り8.8g(二酸化炭素に換算。以下同じ。)と試算されました。A重油1メガジュールの使用によるGHG排出量は74.7gであることから、年間で1,757tの排出量を削減できると考えられます。

(3) 畜産敷料利用モデル

白糠町では、肉用牛の飼育が盛んであり、敷料やふん尿の水分調整のため、オガ粉や乾草が利用されています。しかし、地域における製材業の不振等を背景に、オガ粉が不足し、一部のオガ粉は関東(栃木県)から輸送しています。そこで、ヤナギを栽培・収穫し、家畜の敷料等として販売するモデルを、白糠町の実績等を参考として検討しました。

栽培面積を100haとした場合、年間2,242t(生重)のヤナギが収穫され、1,250t(含水率25%、8,333m³)のオガ粉が得られます。

オガ粉は、肉用牛446頭分、乾草では1,025t分に相当する敷料等に利用できます。

年当たりのコストは21,974千円(うち栽培～収穫～

運搬10,891千円、オガ粉製造～運搬11,083千円)、すなわち、2,637円/m³で、オガ粉を2,700円/m³で販売する場合、収益がコストを525千円上回ると試算しました。

GHG排出量については、年間109tと試算され、関東で製造されたオガ粉を同量購入・運搬する場合は339t、近隣の牧草畑で乾草を生産・運搬する場合は137tであることから、年間で28～230tの排出量が削減できると考えられます。

(4) 自動車燃料用エタノール等生産利用モデル

バイオエタノール生産実験の結果を踏まえて、栽培・収穫したヤナギからエタノールを製造し、ガソリンと混合して自動車用燃料(E3)の製造を行うモデルを検討しました。エタノールの製造は、エネルギーの効率的な確保等のため近隣の中規模都市で、E3の製造は消費地に近い大都市で行うものとしました。

栽培面積を200haとした場合、年間4,484t(生重)のヤナギが収穫でき、410kl(324t)のエタノールと副産物として220tのキシロオリゴ糖が得られます。さらに、エタノールとガソリンと混合して13,667klのE3が製造できます。

栽培～エタノール製造にかかる年当たりのコストは428,700千円(うち栽培～収穫～運搬24,891千円、エタノール製造+キシロオリゴ糖の製造403,809千円)と試算しました。また、エタノールの運搬～E3製造に

表7 畜産敷料利用モデル収支試算

区分	項目	試算結果	
コスト	栽培・収穫	栽培	5,310千円/年
		収穫	1,451
		収集	1,944
		運搬	2,186
		小計①	10,891
	オガ粉製造	オガ粉製造	10,250
		オガ粉運搬	833
		小計②	11,083
		コスト計(①+②)	21,974
	収益	オガ粉製造	
オガ粉売値		22,499	
収益計		22,499	
収支	収益計-コスト計	525	
	(単位当たり製造コスト)	2,637円/m ³	

表8 畜産敷料利用モデルと道外購入・乾草生産とのGHG排出量比較

	単収 (生重)	乾重率	ほ場面積	収穫量 (生重)	オガ粉又は乾草		年間 GHG量
					含水率 (乾物ベース)	製造量 又は同等量	
オガ粉事業モデル①	t/ha 22.4	% 44.6	ha 100.0	t/年 2,242.2	% 25	t/年 1,250.0 (8,333m ³ /年)	kg-CO2eq 108,925
オガ粉② (道外から購入)	-	-	-	-	25	1,250.0	339,133
牧草③	60.0	20.0	74.2	4,454.7	15	1,024.6	136,954
差(②-①)							230,208
差(③-①)							28,029

表9 自動車燃料用エタノールモデル収支試算

区分	項目	試算結果	
コスト	栽培・収穫	栽培	9,940千円/年
		収穫	2,793
		収集	3,947
		運搬	8,211
		小計①	24,891
	エタノール製造	エタノール製造	190,650
		キシロオリゴ糖製造	213,159
		小計②	403,809
		計(①+②)	428,700
	E3ガソリン製造	エタノール運搬	824
ガソリン元値		1,063,211	
ガソリン税		713,227	
E3ガソリン製造		63,962	
小計③		1,841,224	
コスト計(①+②+③)	2,269,924		
収益	エタノール製造	オリゴ糖売値	594,432
		小計④	594,432
	E3ガソリン製造	E3ガソリン売値	1,831,378
		小計⑤	1,831,378
	収益計(④+⑤)	2,425,810	
収支	収益計-コスト計	155,886	
	(単位当たり製造コスト)	166円/ℓ	

表10 自動車燃料用エタノール等生産利用モデルとガソリンとのGHG排出量比較

	単位熱量	GHG 換算係数	年間製造量 又は等熱数量	年間熱量 又は等熱量	年間GHG量	熱量当たりGHG量 (1L当たりGHG量)
	MJ/L (高位) 34.2	kg-CO2eq/L	kL	GJ	kg-CO2eq	g-CO2eq/MJ (2.61kg-CO2eq/L)
製造E3 ①			13,667	467,373	35,731,212	76.5
製造エタノール (3%) 原料ガソリン (97%) E3製造等	(高位) 21.2 (高位) 34.6	2.66	410 13,257	8,692 458,681	461,822 35,262,733	
ガソリン	(高位) 34.6	2.66	13,508	467,373	35,930,962	77.0
差 (②-①)					199,750	

排出を考慮し、地域のエネルギー利用や既存産業との関連で、追加投資が最も少なくすみ、付加価値を得られる利用方法を選択することが重要です。

なお、その実現性を高めるためには、より一層の栽培・収穫コスト

は、年間1,841,224千円（うちガソリン購入費1,776,438千円）を要し、E3をガソリン1Lと同価の134円で販売する場合、全体での収益がコストを上回る額は155,886千円と試算しました。

栽培～エタノール製造のGHG排出量は、年間462t（メガジュールあたり53.1g）と試算され、同熱量のガソリン251klを使用した場合の668t（メガジュール当たり77.0g）の69%であり、E3とした場合でも、ガソリンの使用と比べて年間で200tの排出量が削減できると考えられます。

ただし、バイオエタノールのGHG排出量はガソリンの50%未満であることが求められており、ヤナギ栽培やエタノール製造におけるエネルギー使用量等をより一層低減する必要があると考えられます。

4 実用化に向け残された課題

このように、栽培ヤナギのエネルギー資源としての活用では、収穫したヤナギをチップ燃料とし、地域の暖房等に用いることが、経済・地球温暖化の防止の両面で有効であることを示しました。

また、収穫したヤナギからオガ粉を製造し、地域の産業である畜産の敷料として活用することは、地球温暖化の防止の面で有効であることを示しました。

一方で、ヤナギからエタノールを製造し、自動車用燃料として利用することは、コストやエネルギー使用量の低減に向け、さらなる技術革新が必要であるとともに、生産規模を大きくするための検討が必要です。

これらを踏まえ、地域における新たな産業化に当たっては、物の運搬にかかるコストやそれに伴うGHGの

排出を考慮し、地域のエネルギー利用や既存産業との関連で、追加投資が最も少なくすみ、付加価値を得られる利用方法を選択することが重要です。

また、低・未利用地を活用したヤナギの栽培は、国内では例がなく、林業や農業としての位置づけが明確ではありません。「栽培林業」または「農業」などとして社会的に位置づけ、栽培地の土地利用上の扱いを明確にすることや、栽培・利用及びそれらに関する技術開発等への政策的な支援が必要と考えられます。

本事業では、ヤナギの栽培、ヤナギを原料としたバイオエタノール生産、地域におけるヤナギの栽培・利用の事業化の可能性について検討しました。

将来的な化石燃料の枯渇が現実味を帯びる中で、それを代替する再生可能エネルギーについては、いずれも決定打がないのが現状ですが、北海道内においては、先進的、意欲的にバイオマスの利活用に取り組む地域や企業が増えていきます。木質系バイオマスの利活用を通じた北海道の地域活性化と低炭素社会の実現に向け、栽培から利用の技術、事業化の可能性まで一貫して整理した本事業の成果を各方面で活用していただくことを願ってやみません。

また、植え付け後、20年以上にわたって繰り返し収穫するヤナギの栽培に関するノウハウは、3年間の栽培試験では解明できなかった事項もあり、関係各位による今後の実践の中で、地域に適合した有益な知見を追加いただければ幸いです。

※ 本事業の結果は、北海道開発局ホームページ (<http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/toukei/chousa/h22keikaku/top.html>) に掲載しています。