

多様な植生を活用した吹雪対策とその付加価値 —米国のLiving Snow Fenceに関する調査研究から—

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 雪氷チーム ○櫻井 俊光
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 雪氷チーム 伊東 靖彦
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 雪氷チーム 松澤 勝

道路防雪林は、自然環境が持つ多様な付加価値をインフラ整備に活用でき、第4次社会資本整備重点計画における「グリーンインフラ」の一つとみなすことができる。一方、米国では植生による吹雪防止フェンスが注目されており、複数州における運輸局等からガイドラインが示されている。そこで、これらを我が国の吹雪対策技術に活かすことを目的として米国の事例を紹介し、我が国の植生による吹雪対策の将来展開について提案する。

キーワード：防雪、緑化・植生、保全・共生、地域活性化

1. はじめに

我が国における第4次社会資本整備重点計画では、グリーンインフラ（Green Infrastructure）の取組を推進することが盛り込まれている¹⁾。グリーンインフラは、2008年に米国²⁾で、2013年に欧州³⁾で策定された政策概念である。国土形成計画（全国計画）⁴⁾の中でグリーンインフラとは「社会資本整備、土地利用等のハード・ソフト両面において、自然環境が有する多様な機能（生物の生息・成育の場の提供、良好な景観形成、気温上昇の抑制等）を活用し、持続可能で魅力ある国土づくりや地域づくりを進めるもの」と定義され、ここに防災・減災も含まれている¹⁾。他方、環境省をはじめ国際連合、国際自然保護連合等は、生態系を活用した防災・減災（Ecosystem based Disaster Risk Reduction, Eco-DRR）⁵⁾という概念を頻繁に用いており⁶⁾、グリーンインフラの一つの機能にEco-DRRが位置づけられる考えもある⁷⁾。Eco-DRRの機能、たとえば国際自然保護連合の報告書⁸⁾では、雪崩、地すべり、落石を防ぐことを目的として、スイスアルプスにおける道路の沿線にある森林を保護管理することで、人工的な対策施設を造成するよりも高い費用対効果が見込まれる⁹⁾ことが紹介されている。

我が国でも古くから自然環境の多機能性を活用した取組は存在する。たとえば、経済的便益に資する札幌市の「さっぽろ雪まつり」が開催される大通公園などはグリーンインフラの一つにあたる¹⁰⁾。このようにグリーンインフラとは、既存の取組を後押しするとともに、一層大きな社会、経済的な便益の確保を目指す動きでもある。すなわち、グリーンインフラの概念は、自然を「保護する」だけではなく、社会資本整備、防災・減災対策や国土管理に「活用する」という視点を重視するものである⁶⁾。

北海道のような積雪寒冷地では、暴風雪を起因とする吹雪が、安全な生活環境や社会・経済活動への阻害要因となる。そのため吹雪による交通障害を防ぐ対策技術の推進が求められており、当研究所ではアカエゾマツ等の常緑針葉樹を活用した道路防雪林（以下、防雪林という）の防雪効果に関する研究を進めている¹¹⁾。自然環境が有する多様な機能を活用している点で、防雪林もグリーンインフラの一つと位置づけられる。一方、公共投資予算には限りがあり、防雪対策施設の維持管理などを含めたコストの削減が必要とされている。

我が国における吹雪対策の推進に役立てることを目的として、特に米国における植生を活用した吹雪対策とその付加価値について調査したので本稿でレビューを報告する。なお、米国では植生を活用した吹雪対策をLiving Snow Fence（LSF）としており、我が国の防雪林もLSFに含まれる。

2. LSFの歴史

LSFに関する最近の研究報告に先立ち、まず米国でLSFに対する取り組みの歴史に触れることとする。なお本稿では、米ドルから円の換算については一律1ドル=114円（2017年12月現在）とし、当時の米ドル価格を括弧内に示す。

2.1 北米におけるLSFの歴史

北米大陸におけるLSFの歴史についてはShaw (1991)¹²⁾が良くまとめているので、本稿では主にこれを要約する。

1905年、米国ではミネソタ州とワシントン州をつなぐ大陸横断鉄道において、鉄道会社によって鉄道防雪林が造成された。植種は低木のヤナギ属やグミ科などであり、1915年には50万木が植栽された。しかし、米国西部の大草原で自然環境のままLSFを生育するのは、多

大な労力と大量の水分供給が必要であるため適さないとし、1916年にLSFの造成が中断された。一方、同年にカナダの鉄道会社が苗床で栽培されたヒマラヤスギやマツ科の苗による植栽を開始した。これは成功し、1934年には非常に長い距離のLSFが造成されている。カナダの鉄道会社が植栽した樹木の樹高を8フィート(約2.4m)に制限したことは興味深い。景観を重視した結果と考えられる。

1927年、道路LSFは、米国における自動車の普及を契機に、ワイオミング州とミシガン州で造成され始めた。また、ミシガン州ではLSFによる吹雪への影響について研究が開始された¹³⁾。1934年、ミシガン州では100万木が植栽され、1樹木あたり7~11円(\$0.06~0.10)程度の価格であった。安価に育成されたLSFの余剰分は、木製の防雪柵として利用された。これは利用価値があると考え、同州ではLSFを造成し続けた。また、1929年にペンシルバニア州では、旅行者の増加と吹雪による交通障害を軽減させることを目的に、常緑樹をLSFとして利用することが州議会で承認された。これによって、常緑樹のLSFの造成が促進された。しかし、1930年代の大干ばつで多くの樹木が枯れ上がる。その大干ばつ中ワイオミング州では第一次世界大戦時に利用していた重機で散水したという記録がある。

2.2 米国における LSF の造成費に関する歴史

自動車の普及と LSF が積極的に造成されはじめたことから、米国の各州では LSF の造成費に関心が寄せられることになる。

1963年、アイオワ州における LSF のマルチング(保温や保水の目的でビニールシートなどを樹木の周囲に覆うこと)や散水を含めた造成費は、1kmあたり148万円(\$21,000/mile)であった。ミネソタ州は1940年代に造成を開始して1970年代には隣り合う州と協力して州をまたぐ約274kmのLSFを造成した。他の機関(この場合は州間)が協力してLSFを造成した点は特記される。

1986年、ミネソタ州議会は”Reinvest in Minnesota”(RIM)プログラムを設置して、放置された牧草地をLSFの敷地に転用するための費用として5,700万円(\$500,000)が投入された。牧草地に無秩序に樹木が植栽されることを防ぐため、RIMプログラムはLSFの造成をマニュアル化した。樹木の配列は最少6列で道路から約90m以内であること、地権者に半永久的に利用費を支払うこと、またその費用は他の要素や容量によって異なり、1ヘクタールあたり8万~28万円(\$300~1,000/acre)を支払うことなどの制約を設けた。この時、地権者はLSFを特定の時期に維持管理するよう義務づけられた。しかし、地権者にとっては、広大であるLSFの維持管理には、あまりにも低価格と後日認識することとなった。

1975年、ネブラスカ州では州道管理局だけでなく米

国農務省の土壌保全局、国立公園や林野庁などと協力してLSFの造成を開始した。これは順調であり、一機関だけでなく他の機関や自治体に働きかけるこのネブラスカモデルが他の州にも波及した。1982年、コロラド州では、地権者、企業、ユース協会、スポーツ協会、道路を管理する州だけでなく市町村の自治体、土壌保全局や資源エネルギー庁、加えて州知事室の協力も得てLSFの造成が実施された。コンセプトは、”common pot”(pot:植木鉢)と呼ばれ、少ない単位で誰でもLSFの造成に携わることができる、というものである。1989年には、平均3列の林帯で延長約180kmの造成に成功している。このような各省庁や自治体が協力し合うネブラスカモデルはコロラド州だけでなく、1983年にはワイオミング州、モンタナ州、カンザス州などに波及した。加えてカンザス州では、1988年にLSFを野生動物の生息環境として着目し始め、LSFの造成に利用される費用の半額を野生動物保護協会が負担している¹²⁾。

ワイオミング州では1998年から、LSFの造成方法を自治体などに教え伝える活動を実施している。このような活動が波及し、ニューヨーク州¹⁴⁾、コロラド州¹⁵⁾、ミネソタ州¹⁶⁾などの運輸局はLSFに関する調査を実施しており、2015年にガイドラインとしてまとめられていることから、近年でもLSFに関心が高い状況が継続している。

3. LSFの付加価値

吹雪対策としての機能が必要となることはもちろんであるが、それ以外の付加価値として、1)費用対効果が良いこと、2)バイオマス、3)二酸化炭素の貯留、4)土壌の侵食抑制などが挙げられる。家畜のフェンスとして利用することも一例として挙げられるが、この場合はフェンスそのものの機能が必要とされる。

3.1 費用対効果

Shaw (1991)¹²⁾は、ワイオミング州におけるLSFの造成費について他の吹雪対策と比較している(表1)。

表1. 吹雪対策における造成費の比較

種類	高さ (m)	吹雪捕捉量 (トン/m)	寿命 (年)	設置費 (円/km)	年間吹雪捕捉効果 (円/km/トン/年)
杭	1.7	17.7	7	7,000	4,786
ワイオミングフェンス	4.2	219.8	35	47,520	212
LSF	6.1	223.0	75	16,000	23

※ 造成時における費用であるため、維持管理費は含まれていない。

吹雪捕捉量は、高さに依存する関数として定義している。たとえば、高さが2倍になれば吹雪捕捉量は4倍になる。LSFの75年という寿命の長さは、北米大陸の大干ばつ後も生き残ったワイオミング州のLSFに基づくと思慮される。LSFの造成費には、雑草の除去やビニールシートによるマルチング、灌漑、苗床の育成などが含まれている。LSFの1km当たりの年間吹雪捕捉効果は

ワイオミングフェンスに比べて約7倍良いことが表1からわかる。なお、重さの単位について、表に記されているトン、メートルトンである（以下、同様）。一方、Powell et al.(1992)¹⁷⁾は年間の複利 5.25 %を考慮した場合には LSF の造成費はワイオミングフェンス（木製の防雪柵）と同等であるとしている。その計算過程は定かではないが、維持管理費を考慮すると防雪柵と同等になるということであると思われる。

トウモロコシを LSF に利用したときの費用対効果に関する報告もある。後述するように、トウモロコシは防雪柵と同程度の吹雪捕捉量であった。Table¹⁸⁾は、この LSF としてのトウモロコシの生産者へ支払う利用費は、1 km あたり年間約 5,500 円（\$ 298 / mile）で、防雪柵の設置・撤去費の 5% の費用であるため、非常に費用対効果が良いとしている。

3.2 バイオマス

1980 年代から、廃棄された工業用地および汚染物質の利活用、環境保全、生態系の復元、食物生産や景観の維持管理などの生態工学に関する研究開発が進められてきた。このような研究動向によって環境技術が進化し、持続可能な生態系の知見が得られるようになり、特定の地域における生態系を設計できるような、重要な歩みもたらされてきた¹⁹⁾。

米国で LSF に利用される頻度の高いヤナギ属 (*salix*)（以下、ヤナギという）についても例外ではない²⁰⁾。ヤナギはバイオ燃料となるバイオマスとして期待されており、米国だけでなくカナダ、スウェーデン、ドイツや英国でも注目されている植物で^{21,22)}、21 世紀に入り、ヤナギの生物学・生態学的な理解が急速に進んでいる。

ヤナギは、積雪寒冷地における成長可能な樹木のなかで、最も成長速度が早い点の特徴である²⁴⁾。なお、ヤナギの種類には、極域寒冷地、たとえば北極圏や高山地域に適している亜属は *Chamaetia* であるが、これは成長速度が比較的遅い、ほふく性の *S. herbacea*（ヘルバセア、英名で通称 snowbed willow）も含まれる²⁵⁾ことに注意が必要である。高密度（1ヘクタールあたり 14,000~18,000 本）で植栽されたヤナギが成木になるまでの成長速度は、およそ 3~5 年である²⁶⁾。ヤナギは積雪寒冷地でも成長速度が早いのでバイオマスとして注目されているだけでなく、LSF としても期待が高まっていると考えられる。

人の手が加えられた場所では、野生動物の個体数が増えすぎるなど生態系への影響が懸念される。すなわち、動物の個体数の増減が制御されていることが理想的である。ヤナギは 3~4 年で成木になり、バイオマスとして利用されるため伐採される。植栽から伐採までの期間が比較的短い連作(short-rotation woody crops, SRWC)は、野生動物の増減を制御するためには都合が良い。そこで、Dhondt et al. (2007)²⁶⁾は、繁殖鳥が巣作りを行った SRWC を含む樹木について調査を実施した。SRWC に繁

殖した野生鳥の個体数は、人の手が加えられていない他の樹木と比較すると平均的であり、野生鳥の繁殖が制御されているという結果であった。SRWC の環境下であれば野生動物の生息環境が維持されると言える。なお、SRWC に関して、一回目に植栽し伐採して二回目に植栽された方が二酸化炭素の貯留率が上昇するという報告もある²⁷⁾。

3.3 二酸化炭素の貯留

地球温暖化の一因は、二酸化炭素濃度の増加であると言われているが、二酸化炭素を貯留することで地球の平均気温の上昇を抑えるという動きがある²⁸⁾。その視点でも LSF は注目されている。たとえば、ネブラスカ州の農地における林帯幅 15.2 m（延長は明らかにされていない）の LSF では 20 年で 1 km あたりおよそ 100~200 トンもの二酸化炭素が貯留可能である。なお、林帯幅 6.1 m（延長 0.64 km）の防風林では 20 年で 1 km あたり 22~45 トンの二酸化炭素を貯留することが期待される²⁹⁾と言われている。

バイオマスや野生動物の生息環境だけでなく二酸化炭素の貯留としても注目されていることから、環境変化に強いヤナギのクローンや交配の研究も進められている³⁰⁾。一方で、苗床から育成された樹木から、カドミウムなどの生体異物が野生動物に影響を与えているという報告もある³⁰⁾。そのためヤナギに利用価値があるとしても、特に絶滅危惧種などに配慮が必要である。

3.4 土壌の侵食抑制

LSF における土壌の侵食抑制の付加価値に関する考えは、もともと防風林の研究から波及している。土壌の侵食には土質、表面の粗密性、植生面積、林帯幅、主風向に対する造成された防風林の角度などが風による侵食の関数として定義されている³¹⁾。北米大陸の内陸では我が国のような海に囲まれた土地に比べて、乾燥した土地である。そのため、砂嵐による農場などへの被害が著しい。LSF はこのような土地でも、冬期に飛雪を捕捉し、春期以降の土壌水分として利用することで風食を抑えるという役割がある^{32,33)}。

4. LSFに利用される植物の種類と吹雪捕捉量

米国で利用されている LSF の樹種は様々である。我が国でも利用されている 1)常緑針葉樹だけでなく、2)ヤナギ、3)ハニーサックル、4)トウモロコシも LSF として研究されている。

4.1 常緑針葉樹

針葉樹の多くは常緑樹であるが、カラマツやヌマスギなどの落葉樹もある。LSF には主に針葉樹のうち、分類学的にはマツ科が用いられ、米国ではマツ科トウヒ属

(*Picea*)が主である。たとえば、オウシュウトウヒ(*Picea abies*)、コロラドモミ(*abies concolor*)などがある³⁴⁾。

4.2 ヤナギ

前章で述べたようにヤナギは、バイオマス、野生動物の生息環境、二酸化炭素の隔離だけでなく LSF に利用することで複数の利点が期待されている。そのため、ヤナギに関する先行研究の件数も群を抜いて多い (Heavey & Volk (2014)³⁴⁾など)。

4.3 ハニーサックル (スイカズラ)

ハニーサックル(*lonicera tatarica*)はスイカズラ科の落葉つる性木本であり、我が国では単にスイカズラあるいは忍冬 (にんどう) と呼ばれている。ここでハニーサックルに関する歴史に少し触れる。

1963 年、アイオワ州の運輸局は、ハニーサックルの多様性に着目しており、吹雪対策の試験を開始した。1966 年、吹雪対策効果だけでなく費用対効果の面でもハニーサックルが LSF として最適であるとした。これがきっかけで、ハニーサックルが米国北部で普及し始めた²²⁾。4.5 章で示すように、確かにその吹雪対策効果が確認されている。

4.4 トウモロコシ

言うまでもないがトウモロコシ (*zea mays*) は、バイオ燃料として着目されている植物である³⁵⁾。米国農務省によると、トウモロコシの生産量は食用を含めて年間 4 億トンにもなり、世界の輸出量の 40 % を占めている³⁶⁾。ここで LSF としてのトウモロコシに関する過去の研究事例を示す。

1984 年頃、ミネソタ州を含む 2 つの州では、収穫し終えたトウモロコシの茎と葉に着目し吹雪対策効果を検証した。トウモロコシの茎の高さは約 2 m で、空隙率は 50 % の金属製の防雪柵と同等と考えて良い。方法は、トウモロコシ 6~8 列を 2 組、その間隔は 50~60 m で、冬季間刈り取らずに残して防雪効果を検証し、春に刈り取るものである。

吹雪捕捉量は 1 m あたり 7.6 トンで、およそ 2.7 m の防雪柵と同等である。また、セットバック (LSF から道路までの距離) は 30 m では近すぎるため、最低 46 m は必要としている¹⁸⁾。

4.5 LSF の吹雪捕捉量

LSF における樹種別の吹雪捕捉量について、樹高、空隙率、吹走距離、セットバックの条件を考慮した調査結果を以下に示す。

Heavey & Volk (2014)³⁴⁾はニューヨーク州に造成されている LSF の吹雪捕捉量について、造成してからの年数、樹高、空隙率、吹走距離、セットバックの条件を調査し (表 2)、トウヒ、ヤナギ、ハニーサックル、トウモロ

コシの吹雪捕捉量を調べた (表 3)。その結果、トウヒとヤナギに関して、造成から 3 年以内の LSF では吹雪捕捉量を樹木を通り抜けた積雪量で除した値 (Q_c/Q) が 1 以上であることが示された。これは造成後すぐに防雪効果があることを示している。造成後 4 年から 11 年のトウヒとヤナギの LSF では Q_c/Q が非常に大きいため、十分な吹雪捕捉量が得られている。特にヤナギの吹雪捕捉量が著しいことがわかる。なお、トウモロコシについては Tabler (1994)¹⁸⁾が指摘したセットバックよりも短く Q_c/Q が 1 よりも小さい。設置条件を最適化すれば、トウモロコシも LSF として活用できると思われる。

以上のように、我が国でも利用されているマツ科だけでなく、LSF に利用されているヤナギ、トウモロコシ等も吹雪対策効果が確認されている。

表 2. 調査対象の樹高、空隙率、吹走距離、セットバックと

造成してからの年数.					
	樹高(m)	空隙率(%)	吹走距離(m)	セットバック(m)	年数
トウヒ属	2.9	27	855	52	3年以内
	4.0	42	400	37	4年~11年
ヤナギ属	1.9	86	339	27	3年以内
	5.0	47	383	27	4年~9年
ハニーサックル	2.2	63	206	38	8年
トウモロコシ	1.3	0	340	71	1年

※Heavey & Volk (2014)³⁴⁾のデータより作成

表 3. 調査対象の吹雪捕捉量

	Q_c (tons/m)	Q (tons/m)	Q_c/Q	L(m)	D35(m)	D35/L	年数
トウヒ属	40	15	2.7	12	41	3.4	3年以内
	180	9	19.2	11	32	3.0	4年~11年
ヤナギ属	10	10	1.0	28	31	1.1	3年以内
	246	9	41.0	11	31	3.1	4年~9年
ハニーサックル	47	5	9.4	8	24	3.0	8年
トウモロコシ	5	7	0.7	18	29	1.6	1年

Q_c : 樹木に堆積した吹雪捕捉量、 Q : 樹木を通り抜けた積雪量、 Q_c/Q : 吹雪捕捉量樹木を通り抜けた積雪量の比、L: ドリフト (風下側のふきだまり) の長さ、D35: 標準的なセットバック、D35/L: セットバックとドリフトの比。

※Heavey & Volk (2014)³⁴⁾のデータより作成。

5. 考察

北海道における国道防雪林は、1976 年から道北・道東を中心に造成が開始され、現在では 210 箇所にもなるが、総延長はおよそ 80 km³⁷⁾と米国に比べればまだ短い。防雪林の一部にはヤナギも植栽されているが、これは防雪効果を意図したものではなく、防雪効果を期待する基本林としては、アカエゾマツ、ヨーロッパトウヒ、トドマツなどが植栽されている³⁷⁾。しかし、これらマツ科は、防雪効果が発揮されるまで成長に時間を要する。さらに、土層の確保や排水などにより、生育不良とならないよう生育基盤の整備も必要となる。最近の研究結果から、防雪林では密に樹木が植栽されているため日照不足により下枝の枯れ上がりがみられることが指摘されている³⁸⁾。吹雪の現象は地表面に近いほど飛雪流量が多く、下枝の

維持が必要であるが、下枝を維持するための間引きの作業の維持管理費用が負担となっている。そこで、マツ科だけでなく低木やトウモロコシ（デントコーン等）を組合せて LSF を一つのシステムとして造成することも有意義と考えられる。積雪寒冷地における在来種の生残率と成長速度を調査した結果²⁹⁾によると、低木のエゾヤマハギやアキグミ等は生残率も成長速度も高いとある。生残率が高いこと、成長速度も早いこと、在来種であることを考慮すれば、エゾヤマハギやアキグミ等は LSF として適した低木であると考えられる。また、春先には花が咲くので良い景観も期待できる。ただし、エゾヤマハギやアキグミ等の低木による周囲への影響について配慮する必要がある。造成においてはネブラスカモデルのような、道路を管理・運営する一機関だけでなく、市区町村の自治体、地権者も含めた組織的な取り組みが、北海道における経済的便益も視野に入れた LSF の造成を促進させるきっかけになると考えられる。米国の歴史が述べているように、防雪林の造成・管理運営方法について、我が国でも再検討することも有意義である。

6 まとめ

本稿は、米国における LSF に関する歴史から紐解き、最近の研究動向についてレビューを行った。吹雪対策としての LSF だけでなく、費用対効果、バイオマスや野生動物の生育環境、二酸化炭素の貯留、土壌の侵食抑制としても LSF は注目されている。樹種に着目してみれば、我が国でも利用されている常緑針葉樹だけでなく、寒冷地でも成長速度が著しいヤナギやハニーサックル、トウモロコシなどが利用されている。また、一機関が LSF の造成・管理運営を実施しているわけではなく、市区町村の自治体や地権者も含めて LSF の造成を促進させるという視点がある。かつて、米国の防雪柵の研究結果が、我が国の防雪柵の開発や吹雪対策の進展に大きく貢献したように、諸外国における植生を利用した吹雪対策を知ること、グリーンインフラに根差した今後の効果的かつ効率的な吹雪対策の立案に参考になると考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省のホームページ：政策・仕事>総合政策>環境>グリーンインフラ。URL：http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_mn_000034.html, (2017年12月14日確認)。
- 2) United States Environmental Protection Agency: "What is Green Infrastructure?", URL: <https://www.epa.gov/green-infrastructure/what-green-infrastructure>, (2017年12月14日確認)。
- 3) European Commission: "Green Infrastructure", URL: http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/index_en.htm, (2017年12月14日確認)。
- 4) 国土交通省のホームページ：報道・広報>報道発表資料>国土形成計画（全国計画）について。URL：http://www.mlit.go.jp/report/press/kokudoseisaku03_hh_000079.html

- (2017年12月21日確認)
- 5) 環境省自然環境局、生態系を活用した防災・減災に関する考え方、環境省自然環境局自然環境計画課生物多様性地球戦略企画室発行、2016。
- 6) 西田貴明：グリーンインフラと何か、三菱 UFJ リサーチ & コンサルティング、季刊 政策・経済研究、Vol.1、1-10、2017。
- 7) 一ノ瀬友博：人口減少時代の農村グリーンインフラストラクチャーによる防災・減災、農村計画学会誌、Vol.34、No.3、353-356、2015。
- 8) International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN): Environmental guidance note for disaster risk reduction – Healthy Ecosystems for human security and climate change adaptation, *Ecosystem management ser.* No.8, 2013。
- 9) Wehrli, A. and L. Dorren: Protection forests: A key factor in integrated risk management in the Alps, In: *The role of ecosystems in disaster risk reduction*, Renaud, Sudmeier-Rieux and Estrella (eds), United Nations University Press, 2013。
- 10) 長谷川啓一、上野裕介：道路を核にしたグリーンインフラと地域づくり：全国の事例分析を基に、第32回日本道路会議(1)計画・環境・安全・情報・マネジメント部門、1091、2017。
- 11) 国立研究開発法人土木研究所：平成29年度年度計画。
- 12) Shaw, D.L.: *Living snow fences: Protection that just keeps growing*, Colorado Interagency Living Snow Fence Program, Colorado State University, Fort Collins, CO., 1991。
- 13) Finney, A.E.: *Snow control on the highways*, Bulletin No.57, Michigan Engineering Experiment Station, Michigan State College, East Lansing, MI., 1934。
- 14) Heavey, J.P. et al.: *Designing, Developing and implementing a living snow fence program for New York State – Final report -*, New York State Department of Transportation Research Project, C-06-09, 2015。
- 15) Sundstrom, G.: *Assessment and placement of living snow fences to reduce highway maintenance costs and improve safety (living snow fences)*, study No. 047-10, Report No. CDOT-2015-01, 2015。
- 16) Zamora, D.: *Assessing the use of shrub-willows for living snow fences in Minnesota*, Minnesota Department of Transportation, Research Services & Library, Office of Transportation System Management, Research Project Final Report 2015-46, 2015。
- 17) Powell, K., et al.: *The use of trees and shrubs for control of blowing snow in select locations along Wyoming highways*, Final Report, Project No. HRP-1(18), Wyoming Department of Transportation, Federal Highway Administration Report No. FHWA-92-WY-001, National Technical Information Service, 5285 Port Royal Road, Springfield, VI 22161 (written in Tabler, 1994), 1992。
- 18) Tabler, R.D.: *Design guidelines for the control of blowing and drifting snow*, Strategic highway research program, Report SHRP-H-381, 1994。
- 19) Todd, J. et al.: Ecological design applied, *Ecological Engineering*, 20, 421-440, 2003。
- 20) Kuzovkina, Y.A., and T.A. Volk: The characterization of willow (*Salix L.*) varieties for use in ecological engineering applications: Coordination of structure, function and autecology, *Ecological Engineering*, 35, 1178–1189, 2009。
- 21) Hoffmann, D., and M. Weih: Limitations and improvement of the potential utilization of woody biomass of energy derived from short rotation woody crops in Sweden and Germany, *Biomass and Bioenergy*, 28(3), 267–279, 2005。
- 22) Keoleian, G.A., and T.A. Volk: Renewable energy from willow biomass crop: Life cycle energy, environmental and economic

- performance, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(5-6), 385 – 406, 2005.
- 23) Labrecque, M., and T.I. Teodorescu: Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada), *Biomass and Bioenergy*, 1–9, 2005.
 - 24) Dickmann, D.I.: Silviculture and biology of short-rotation woody crops in temperate regions: then and now, *Biomass Bioenergy*, 30, 696–705, 2006.
 - 25) Argus, G.W.: *Salix* (Salicaceae) distribution maps and synopsis of their classification in North America, North Mexico, *Harvard Papers in Botany*, 12, 335-368, 2007.
 - 26) Dhondt, A.A., et al.: Avian species richness and reproduction in short-rotation coppice habitats in central and western New York, *Bird Study*, 54, 12-22, 2007.
 - 27) Volk, T.A. et al.: First- and second-rotation yields of willow clones at two sites in New York State. In: *Fifth Biomass Conference of the Americas*, Orlando, FL, September 17-21, 2001.
 - 28) IPCC: *Carbon Dioxide Capture and Storage*, [Eds.: B. Metz et al.] Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press UK, 2005.
 - 29) Schoeneberger, M.M.: *Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands*, United States Department of Agriculture, Forest Service/University of Nebraska-Lincoln, Faculty Publications, Paper 2, 2008.
 - 30) Ohlson, M. and H. Staaland: Mineral diversity in wild plants: benefits and bane for moose, *Oikos*, 94, 442-454, 2001.
 - 31) Woodruff, N.P., and F.H. Siddoway: A wind erosion equation, *Soil Science Society of America Proceedings*, 29(5), 602-608, 1965.
 - 32) Bilbro, J.D. and D.W. Fryrear: Annual herbaceous windbarriers for protecting crops and soils and managing snowfall. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 22-23, 149-161, 1988.
 - 33) Clark, W.R., and K.F. Reeder: *Agricultural buffers and wildlife conservation: a summary about linear practices*, Fish and Wildlife Response to Farm Bill Conservation Practices [Ed. J.B. Haufler]. The Wildlife Society, Technical Review 07-1, 45-55, 2007.
 - 34) Heavey, J.P., and T.A. Volk: Living snow fences show potential for large storage capacity and reduced drift length shortly after planting, *Agroforestry Systems*, 88(5), 803-814, 2014.
 - 35) Lynd, L.R. et al.: How biotech can transform biofuels, *Nature Biotechnology*, 26(2), 169-172, 2008.
 - 36) United States Department of Agriculture, Economic Research Service, Online URL: <http://www.ers.usda.gov/topics/crops/com.aspx>, (2017年12月21日確認) .
 - 37) 独立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所（編）：道路吹雪対策マニュアル（平成23年改訂版）、2011.
 - 38) 伊東靖彦：道路防雪林の生育課題について、北海道開発土木研究所 月報、Vol.595、48–50, 2002.
 - 39) 長坂晶子ら：北海道産木本17種を用いた道路法面の植栽試験-樹種特性からみた植栽の確実性-、北海道林業試験場研究報告 第45号、9-20、2008.