

在来種による堤防植生の施工・維持管理に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 26～令 1

担当チーム：水環境保全チーム

研究担当者：村山雅昭、谷瀬敦、村上泰啓、新目竜一、佐藤喜昭

【要旨】

北海道内の河川堤防の法面緑化には、冷涼な気候下において早期に被覆することが出来る外来草本を用いてきた。近年、在来種の保全の観点から法面緑化に用いる草本を外来種から在来種へ切り替えることが望まれているが、寒冷地で適用可能な種や導入工法、耐侵食性などが明らかにされていないことから進んでいない。本研究では、寒冷地域の堤防法面緑化に適した在来種の選定とその導入工法を確立するため、現地試験を実施したほか、在来種の流水に対する耐侵食性を評価するために室内実験を実施した。その結果、ヨシ、ビロードスゲ、ヤマアワ、オオヨモギが堤防法面緑化に利用可能な在来種であり、工法としてオオヨモギの種子吹付あるいは植生シート工と併用したヨシ、ビロードスゲ、ヤマアワの苗からの導入が適している事を明らかにした。

キーワード：堤防植生、在来種、耐侵食、現地試験

1. はじめに

河川堤防は一般的に盛土で造られていることから、降雨や洪水などによる法崩れまたは洗掘を防止するため法面を芝などにより被覆することを基本としている¹⁾。本州以南では堤防植生として在来種である野芝が用いられており、近年では、草刈りおよび刈草の処分コスト削減を目的としてチガヤの導入も試行されている。一方、北海道のような冷涼な気候では、野芝やチガヤの生育には適せず、他の在来種も生育が遅いため、在来種では、工事後短期間で堤防法面全面を被覆することが難しいと考えられてきた。そのため、北海道では、冷涼な気候下で短期間に法面を被覆することが可能なケンタッキーブルーグラスなどの外来草本が堤防植生では広く用いられている。

近年、北海道でも在来種の保全の観点から堤防植生を外来種から在来種への切り替えが望まれていることを受けて、堤防の築造を行う国土交通省北海道開発局では堤防法面植生として在来種の使用が可能となるように工事の仕様書が変更されたが、具体的に使用できる草種が明示されていないこと、在来種を用いた導入工法が確立されていないことから、実際の工事で在来種が使用された実績はほとんどないのが現状である。

そのため、寒地土木研究所では平成 22 年から在来種による堤防法面緑化を目指した研究を開始し、寒冷地域に適用可能な在来種の選定と導入工法の確立を目指し、千歳川堤防側帯で現地試験を実施してきた²⁾。

平成 26 年からの本研究では、この先行研究で実施した千歳川堤防側帯の試験地の追跡調査を行うとともに、異なる地域、異なる試験条件で追加の現地試験を行い、在来種による堤防法面緑化の施工方法の確立を図った。併せて、在来種の流水に対する耐侵食性を評価するため、根系形態調査や室内水路実験を行った。

本報告書では、第 2 章で北海道の堤防法面植生として適した種の選定について検討した結果を、第 3 章で平成 23 年度に千歳川堤防で試験施工を実施した後の長期にわたる追跡調査の結果を、第 4 章で天塩川下流において実施した試験施工の内容と結果を、第 5 章で種子からの導入を目指して千歳川の根志越遊水地周囲堤で実施した試験施工の内容と結果を、第 6 章で耐侵食性を評価するための室内水路実験の内容と結果について述べる。

2. 根の形態などからみた草本類の法面緑化への適正判定

2.1 本章の目的及び内容

平成 23 年 6 月より千歳川堤防側帯法面において、試験区を設けて在来種による堤防法面緑化の試験施工と、その後の植生調査を継続して行っている²⁾。その結果、意図した在来種による堤防植生の実現にまでは至っていない。一方で、自然侵入した草本により法面全体の植被は確保された状態が確認されており、自然侵入種も含めて、法面保護等治水上の機能及び生物多様性保全の観点から植生を評価することも重要である。そのため、千歳川堤防側帯試験

地内で確認された草種について、外来種草本類の指定状況や生育型、根系、草丈などを文献調査及び現地調査を実施し、堤防法面植生としての適性判定基準の作成と判定を試みた³⁾。

2.2 試験地の概要

在来種による堤防法面緑化の試験施工は、治水安全度上の懸念から、堤防本体での実施は困難であったため、堤防と物理的に分離された緊急時用の土砂備蓄である側帯を河川管理者の了解のもと、利用させて頂いた。試験施工箇所は、北海道恵庭市東部の千歳川左岸堤防の新設の側帯（千歳川左岸 KP30.1）で平成23年と24年に実施している。本調査は、平成23年に施工した試験地において平成28年に実施した。試験地の1区画は法面幅5m×法面斜面長8mとし、在来種の導入を図った試験区8区画と無施工の対照区4区画を設けた。区画内の上部と下部には植被率などの調査を行う2m×2mのモニタリング枠を設けた。在来種の導入を図った試験区には多年草で地下茎繁殖するイネ科のヨシ、オギ、ヤマアワ及びカヤツリグサ科のビロードスゲの4種を長期的、安定的に自生する主力種として選定（以下、主力種と呼ぶ）し施工した。また、主力種が安定的に生育するまでの間に、法面を早期に被覆する先駆種として多年草でキク科のオオヨモギ、イネ科のエゾヌカボ、1年草でタデ科のオオイヌタデを選定し、主力種に混播して播種した。主力種のヨシ、オギ、ビロードスゲは種子吹付と植生シート工及び苗植えによる導入を、ヤマアワは苗植えによる導入を行った。先駆種としてオオヨモギ、エゾヌカボ、オオイヌタデは種子吹付と植生シート工により混播した。各試験区の配置と導入工法は図-1に示す通りである。施工は平成23年6月21日に実施し、その後、対照区の一部を除いて、平成28年9月まで植生調査を実施した。

図-2に調査結果の一例として、主力種であるヨシ、オギ、ビロードスゲを種子吹付で施工した試験区1における植被率の調査結果を示す。

各モニタリング枠の種別植被率を単純合計すると殆どの試験区で全体植被率を超える結果となり100%を超える試験区も出てくる。そのため、(1)式に示す全体植被率に

占める相対的な割合を示す相対植被率を算出して結果を示す。

$$Pi^* = Pi \cdot W / \sum Pi \quad (1)$$

Pi^* : 相対植被率、 Pi : 種別植被率、 W : 全体植被率

試験区1では、施工初年度から翌年までは主力種の相対植被率は極端に低く推移し、植栽2年後以降に徐々に拡大した。全体植被率は植栽初年度の1ヶ月後の調査と植栽2年目の6月下旬と8月上旬の調査を除いて、90%を超える高い値で推移したが、殆どを自然侵入種が占めた。植栽初年度は1年草のイヌビエが旺盛に繁茂し、植栽翌年以降はイヌビエが衰退し、主力種を含め他の草本に遷移した。その結果、植栽翌年夏期は前年秋期の全体植被率を大きく下回り、その後回復した。

2.3 自然侵入種及び導入種の堤防植生としての適性評価

在来主力種による堤防法面の被覆には、施工後数年単位の時間の経過が必要である。そのため、自然に侵入する草本の堤防保護機能の評価や環境上の評価を行い、適正であると判断できなければ、在来種による堤防緑化の現場への適用は難しい。そのため、試験区及び対照区で1回以上5%以上の種別植被率を示した草本を対象に、堤防保護機能と生物多様性保全の観点による環境面から適性評価を行った。表-1に現地調査及び文献調査を基に適性を評価した結果を示す。環境面では試験地が北海道内であることから、北海道の外来種をリスト化している「北海道ブルーリスト2010」⁴⁾を基に、適性度を○△×の3段階で評価した。なお、参考に国の「我が国の生態系等に被害を及ぼす恐れ



図-2 試験区1の植被率の推移

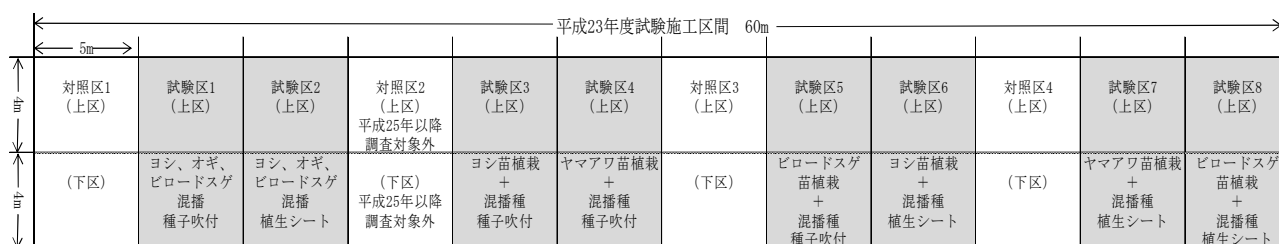


図-1 試験区・対照区の配置及び導入工法

表-1 自然侵入種及び導入種の堤防植生としての適性評価結果一覧

区分	種和名	科和名	外来種指定状況		堤防植生適性				区分	種和名	科和名	外来種指定状況		堤防植生適性					
			道BL	環境省	生育型	根系形態	根毛量	根系深達				草丈	道BL	環境省	生育型	根系形態	根毛量	根系深達	草丈
自然侵入種	スギナ	トウサ科			○	△	×	○	○	自然侵入種	ツクサ	ツクサ科			△	×	×	○	○
自然侵入種	ヤナギタデ	タデ科			△	×	×	○	○	自然侵入種	コヌカグサ	イネ科	A3	産業	○	○	○	○	△
自然侵入種	イヌタデ	タデ科			△	×	×	○	○	自然侵入種	カモガヤ	イネ科	A3	産業	○	○	○	○	△
自然侵入種	ナガバギンシ	タデ科	A3	総合	○	×	×	×	△	自然侵入種	イヌビエ	イネ科			△	△	△	○	△
自然侵入種	エゾギンシ	タデ科	A3	総合	○	×	×	×	△	自然侵入種	ケイビエ	イネ科			△	△	△	○	△
自然侵入種	ハイキンボウグ	キンボウグ科			○	△	×	○	○	自然侵入種	オニクシノグサ	イネ科	A3	産業	○	○	○	○	△
自然侵入種	スカタコボウ	アラナ科			△	×	×	×	○	自然侵入種	オオクシノグサ	イネ科	B		○	○	○	○	○
自然侵入種	エゾミツモトウ	バラ科	A3		△	×	×	○	○	自然侵入種	ホソムギ	イネ科	A3	産業	○	○	○	○	○
自然侵入種	エゾムシクサ	マメ科			○	△	×	○	△	自然侵入種	ヌカキビ	イネ科			△	△	△	○	△
自然侵入種	タチオランダグン	マメ科	A3		○	×	×	○	○	自然侵入種	クサヨシ	イネ科	A3		○	○	○	○	△
自然侵入種	ムラサキツメクサ	マメ科	A2		○	×	×	×	○	自然侵入種	オオアワガエリ	イネ科	A3	産業	○	○	○	○	△
自然侵入種	シロツメクサ	マメ科	A2		○	△	△	○	○	自然侵入種	スズメノカタビラ	イネ科			△	△	△	○	○
自然侵入種	クサフジ	マメ科			○	×	×	○	△	自然侵入種	ヌマイチゴツナギ	イネ科	B		○	△	△	○	△
自然侵入種	エゾミハギ	ミハギ科			○	○	○	○	△	自然侵入種	ナガバグサ	イネ科	A3		○	○	○	○	△
自然侵入種	イヌホオズキ	ナス科	A3		△	△	△	○	○	自然侵入種	キンエノコ	イネ科			△	×	×	○	○
自然侵入種	セイヨオオバコ	オオバコ科	B		○	×	×	×	○	自然侵入種	エノコグサ	イネ科			△	×	×	○	○
自然侵入種	ヨモギ	キク科	A3		○	○	○	○	△	導入種(主力種)	ヨシ	イネ科			○	△	△	○	△
自然侵入種	オトヨモギ	キク科			○	△	△	○	△	導入種(主力種)	オギ	イネ科			○	△	△	○	△
自然侵入種	ユウゼンギク	キク科	A3	総合	○	○	○	○	○	導入種(主力種)	ヤマアワ	イネ科			○	△	△	○	△
自然侵入種	ヒメカシヨモギ	キク科	A3		△	△	△	○	△	導入種(主力種)	ヒロードスグ	カヤツリグサ科			○	○	○	○	○
自然侵入種	シカヤク	キク科			△	△	△	○	○	導入種(混播種)	オオイヌタデ	タデ科			△	×	×	○	△
自然侵入種	オオアワダチク	キク科	A2	重点	○	△	×	○	○	導入種(混播種)	オオヨモギ	キク科			○	○	○	○	△
自然侵入種	ヒメジョオン	キク科	A3	総合	△	△	×	○	△	導入種(混播種)	エソスカホ	イネ科			△	○	○	○	○
自然侵入種	セイヨウタンポポ	キク科	A2	重点	○	×	×	×	○										

ある外来種リスト⁵⁾での指定状況も記した。北海道ブルーリスト2010でA1~A3に区分されている種は、北海道の生態系等への影響が報告・懸念されている種であり、河川堤防法面の植生にも適しないと判断し評価を×とした。同じく同リストでBに区分されている種は、生態系等への影響が報告・懸念まで至らない外来種とされているため評価は△とした。同リストに掲載されていない種は、堤防法面の植生として支障のない種と判断し評価を○とした。

堤防法面の保護機能からの面では、流水に対する耐侵食性、維持管理などの面から5項目の評価項目を設けた。

「生育型」では、長期間安定的に法面を保護する必要があることから、多年生の草種は適しているとして○、その他の1年生などの草種を△の2分類とした。

「根系の形態」では、堤体表面での根毛層発達及び枯死体による堤体への影響の観点から、根が太く発達する直根より網状の根系が望ましいと判断し、網状根系の評価を○、主根が垂直に深く発達する直根型及び根系が小さく貧弱なものを×、それ以外の網状根系を発生しない地下匍匐茎型、球根型などを△と評価した。

「根毛量」は堤防の耐侵食と大きく関連する⁶⁾。そのため、芝と同程度に根毛が多い種が適しているとして○、殆ど無いを×、その中間を△とした。同じく、耐侵食力及び枯死体の堤体への影響の観点から根の主要部が地表面近くにあるものが望ましいため、「根系深達」を主要部が10

cm未満に存在する種を○、10cm以深を×とした。

維持管理の面からは「草丈」を評価した。除草や堤防点検のためには草丈が低い方が望ましい。そのため、最大草丈80cm未満を○、最大草丈80cm以上を△とした。

千歳川堤防試験地で生育を確認した主要47種を評価した。その結果、環境面からは、北海道の生態系等への影響が報告・懸念されている種として該当した種(A2,3評価)20種を不適と判定した。堤防保護機能面からは、その重要性から、1つでも×がついた種を不適と判定すると、12種が不適に該当した。両者を合わせて評価すると、在来種の堤防植生として、適していると判定された種は導入種の主力種4種と混播種2種も合わせて15種となり、表-1中の太枠で示した。

2.4 本章のまとめ

植生試験地で確認された主要47種について、堤防植生としての適性評価を実施した結果、主力種4種、混播種2種の外、自然に侵入し一定の植被率を示した種9種が堤防植生として問題ないと判定することができた。ただし、堤防保護機能評価で重要な項目の根毛量については、定性的な評価しか出来なかった。在来種の堤防植生への導入に向けては、根毛量を含め、根系の定量的な評価基準の検討も必要であると考えられる。なお、詳細な各試験区の調査結果は次章で説明する。

3. 千歳川堤防側帯在来種植生試験地における追跡調査

3.1 本章の目的及び内容

近年、北海道でも在来種の保全の観点から堤防植生を外来種から在来種への切り替えが望まれていることを受けて、堤防の築造を行う北海道開発局では堤防法面の草本として在来種の使用が可能となるように工事の仕様書が変更されたが、具体的に使用できる種が明示されていないこと、在来種を用いた導入工法が確立されていないこと、堤防の安全性に関わる事項のため安易な試験施工が出来ないことなどの理由から、実際の工事で在来種が使用された実績はほとんどないのが現状である。

寒地土木研究所では、在来種による堤防緑化のため、千歳川河川堤防の側帯を試験地として、寒冷地に適用可能な在来種の選定と導入工法の検討を行ってきた²⁾³⁷⁾。

本章では、平成23年に試験施工を実施して以降8年経過した令和元年まで追跡調査した結果について整理し、取りまとめる。

3.2 方法

3.2.1 試験地の概要

石狩川の支川、千歳川左岸KP30.1 付近の堤防側帯法面を試験地とした。側帯の法勾配は4割、法面斜面長は14m程度、法面は南向き、試験区延長は95m、周辺は畑地が広がっている。法長8m×幅5mを1区画とし、平成23年度に8試験区を、平成24年度に6試験区を設けた。

各試験区の上半分を上区、下半分を下区と呼び上区、下区それぞれの中央に図-3に示す通り、2m×2mのモニタリング枠を設けた。

3.2.2 導入試験種

導入試験を行う種は、平成22年度に文献調査および千歳川堤防で植生調査を行い堤防法面の一部に群落を形成するなど自生していることを確認した、前述の主力種とした。また、主力種が生育するまでに時間を要することが予

想されたため、早期に法面を被覆する先駆種としてキク科のオオヨモギ、イネ科のエゾヌカバ、1年草でタデ科のオオイヌタデを選定し混播種とした。

3.2.3 試験区及び導入工法

先駆種のオオヨモギ、エゾヌカバ、オオイヌタデは種子からの導入を行った。種子からの導入は、北海道の堤防植生工事で一般的に行われている肥料分などを添加した吹付工と植生シートに種子を挟み込む植生シート工の2種類の工法により行った。

試験区は1から14まで設けた。表-2に各試験区の導入種と導入工法を示す。試験区1から8までは平成23年度施工、試験区9から14までは平成24年度施工である。

試験区1は主力種のヨシ、オギ、ビロードスゲを混播して吹き付けた試験区である。試験区2は同じくヨシ、オギ、ビロードスゲを植生シート工により施工した試験区である。

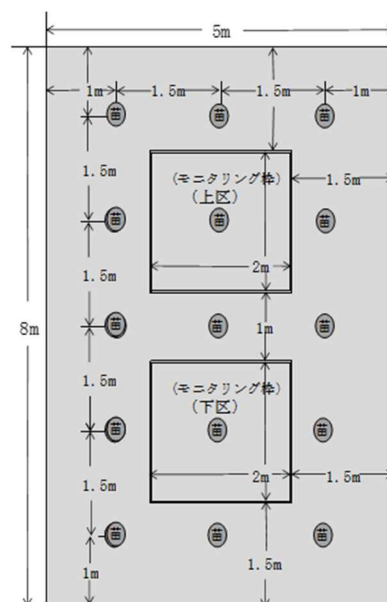


図-3 試験区 3~14 の試験区内の配置模式図

表-2 各試験区の導入種、導入工法及び導入年

種別	種名	生育形	導入工法: 導入年		
			種子吹付け	植生シート	苗
主力種	ヨシ	多年生 種子・地下茎繁殖	(1):H23	(2):H23	(3), (6)H23 (9), (12):H24
主力種	オギ	多年生 種子・地下茎繁殖	(1):H23	(2):H23	(10), (13):H24
主力種	ビロードスゲ	多年生 種子・地下茎繁殖	(1):H23	(2):H23	(4), (7)H23
主力種	ヤマアワ	多年生 種子・地下茎繁殖			(5), (8)H23 (11), (14):H24
混播種	オオヨモギ	多年生 種子・地下茎繁殖	(3), (4), (5):H23 (9), (10), (11):H24	(6), (7), (8):H23 (12), (13), (14):H24	
混播種	エゾヌカバ	多年生 種子・地下茎繁殖	(3), (4), (5):H23 (9), (10), (11):H24	(6), (7), (8):H23 (12), (13), (14):H24	
混播種	オオイヌタデ	1年生 種子繁殖	(3), (4), (5):H23	(6), (7), (8):H23	

()は試験区を示す

試験区3から14までは主力種苗により植栽し、表に示す通り組み合わせ、先駆種を混播種として吹付工若しくは植生シート工により施工した。

吹付工で実施した試験区では表-3に示す肥料等を添加して施工した。植生シート工は水溶性のある紙2枚で種子を挟んで接着し表面にワラムシロを取り付け施工した。

主力種の苗による導入は図-3に示すように1.5m間隔で1試験区あたり15本植え付けた。吹付工及び植生シート工では表-4に示す発生期待本数となるように種子量を設定して施工した。

現地の試験施工は試験区1から8までを平成23年6月21日に試験区9から14までを平成24年7月6日に実施した。試験施工を実施した翌年に通常の河川管理と同様に草刈りを行った。上区は7月上旬に、下区は8月下旬に堤防除草工事の仕様に合わせて草丈が10 cm以下となるように草刈りを実施した。刈草は収集せずに残置した。

3. 2. 4 調査方法

植生調査として、2m×2mのモニタリング枠内の全体植被率と種別植被率と草丈を計測した。種別植被率は自然に侵入してきた種についても計測した。植被率はモニタリング枠の1/100の面積となる20 cm×20 cm のフレームを作成し、これを参考に目視により1 %単位で計測した。

各モニタリング枠の種別植被率を単純合計すると全体植被率を超える結果となる箇所が殆どのため、(1)式(再掲)に示す全体植被率に占める相対的な割合を示す相対植被率で結果を整理した。

$$Pi^* = Pi \cdot W / \sum Pi \quad (1)$$

Pi^* : 相対植被率、 Pi : 種別植被率、 W : 全体植被率

3. 3 結果と考察

各試験区のモニタリング枠内の種別植被率の計測結果を主力種、混播種、自然侵入種毎に集計し、相対植被率を求めた結果について図-4に示す。植被率は上下枠の平均値で示す。自然侵入種については北海道ブルーリスト2010年⁴⁾で外来種に指定されている種とそれ以外の種(在来種)に分類し集計した。図-5に導入種毎の各試験区の種別植被率の推移を示す。ヨシ、オギ、ビロードスゲの主力種3種を種子から導入した試験区1と試験区2では、試験施工当年は在来の自然侵入種で、1年草のイヌビエが植被の殆どを占めた。翌年の6月下旬の調査では、イヌビエが枯れたことにより植被率が低下したが、8月上旬以降の調査では徐々に外来種が侵入し植被率は回復した(図-4)。主力種合計の相対植被率は植栽翌年までは低い値で推移し、2年後以降になって20%を超えた(図-4)。種別植被率では、ヨシは試験区2の下区で施工翌年の8月上旬と9月下旬に一旦20%を超えたが、その後低下した。継続的に10%以上となったのは植生シート工区で3年後以降、吹付工区で5年後以降であった。ヨシ種子による法面緑化には長い時間が必要であることが示唆された(図-5(a))。オギは2年後の6月下旬から拡大傾向の調査区が現れ5年後まで継続して10%程度以上の植被率を示した。8年後の調査では全ての調査区で50%を超える高い植被率を示した(図-5(c))。ビロードスゲは5年後まで5%以下の極端に低い植被率で推移したが、8年後の調査では30%

表-3 吹付工施工時に添加した材料一覧

名称	規格等	単位	数量
高度化成肥料	15-15-15	g/m ²	160
磷酸肥料	熔成燐肥	g/m ²	80
養生材	ファイバー	g/m ²	200
土壌改良材(A)	有機質含有量30%以上	g/m ²	120
土壌改良材(B)	ピートモス(A)級	L/m ²	2
接合剤	高分子系樹脂(粉末)	g/m ²	2

表-4 吹付工及び植生シート工における播種量

工法	種名	種子重量 (粒/g)	純度 (%)	発芽率 (%)	期待本数 (株/m ²)	工法 補正	播種量 (g/m ²)	換算播種量 (粒/m ²)	
H23	試験区1 吹付工	ヨシ	4,474	7	30	500	1.00	5.32	23,802
		オギ	1,815	21	30	500	1.00	4.37	7,932
		ビロードスゲ	900	95	30	100	1.00	0.39	351
	試験区2 植生シート工	ヨシ	4,474	7	30	500	0.49	10.86	48,588
		オギ	1,815	21	30	500	0.49	8.92	16,190
		ビロードスゲ	900	95	30	100	0.49	0.80	720
	試験区3, 4, 5 吹付工	オオヨモギ	8,200	75	40	200	1.00	0.08	656
		エゾヌカボ	11,000	70	85	250	1.00	0.04	440
		オオイヌタデ	809	97	50	100	1.00	0.25	202
試験区6, 7, 8 植生シート工	オオヨモギ	8,200	75	40	200	0.49	0.17	1,394	
	エゾヌカボ	11,000	70	85	250	0.49	0.08	880	
	オオイヌタデ	809	97	50	100	0.49	0.52	421	
H24	試験区9, 10, 11 吹付工	オオヨモギ	8,200	75	40	200	1.00	0.08	656
		エゾヌカボ	11,000	70	85	350	1.00	0.05	550
		オオヨモギ	8,200	75	40	200	0.49	0.17	1,394
試験区12, 13, 14 植生シート工	エゾヌカボ	11,000	70	85	350	0.49	0.11	1,210	

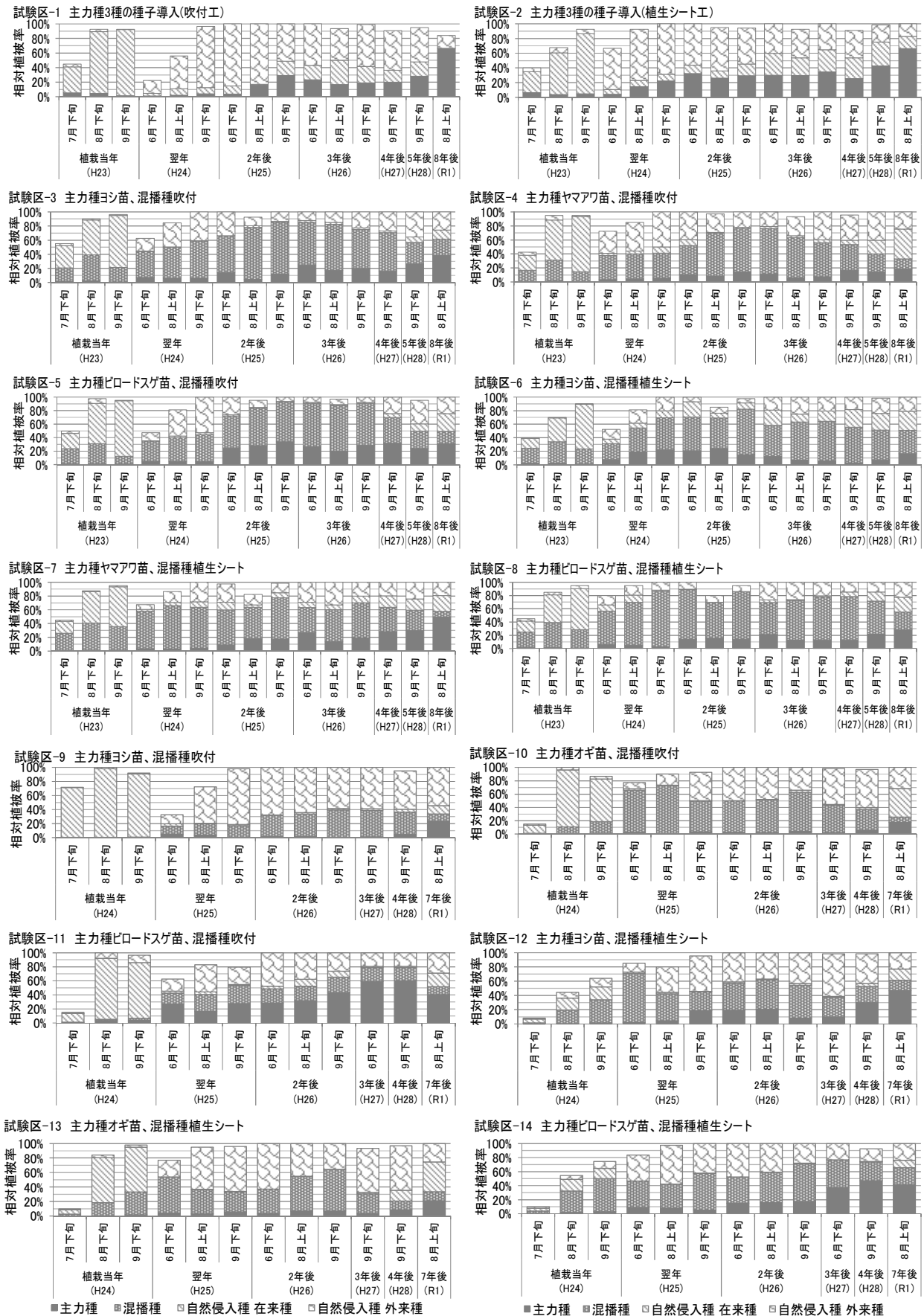


図-4 各試験区のモニタリング枠内の植被率（上下試験区の平均）の推移

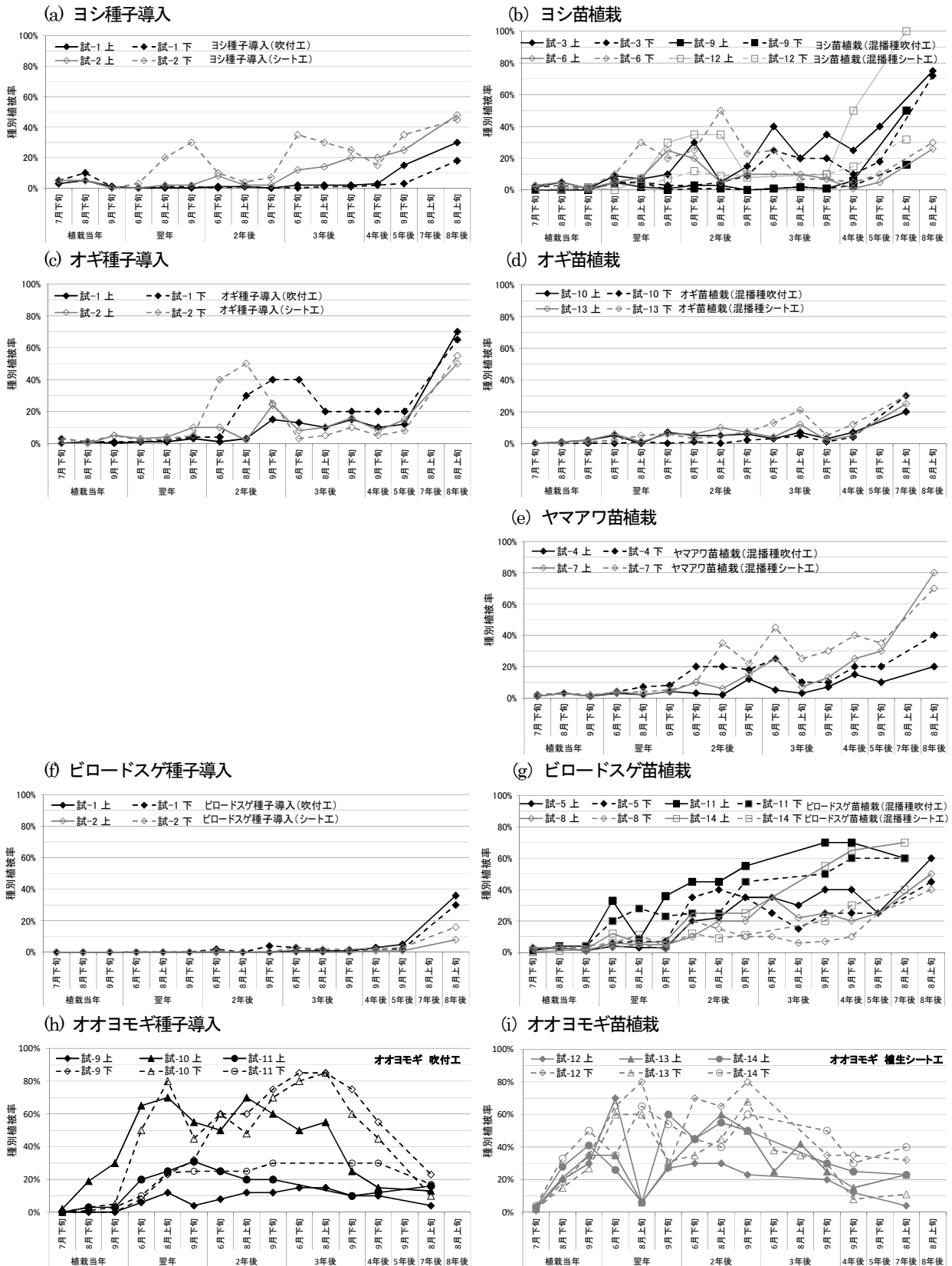


図-5 各試験種の種別植被率の推移 (図中の試○上、試○下は試験区を表す)

を超える調査区もあった(図-5(f))。オギ、ビロードスゲの種子からの導入については、ヨシと同様に播種後数年間は低い植被率で推移し、植被率の拡大には長い時間が必要であることが示唆された。主力種を苗により、オオヨモギなどの混播種を種子から導入した試験区 3~14 の結果、試験区 6、12、14 を除いて、試験施工当年の 8 月下旬には 80% を超える高い植被率となった(図-4)。高い植被率の内訳は在来の自然侵入種であるイヌビエが多くを占め、混播種の植被率も高かった。高い植被率を示した混播種であるが、どの試験区においても、その殆どをオオヨモギが占め、エゾヌカボとオオイヌタデの生育は僅かであった。試験区 1、2 と比較すると翌年の在来の自然侵入種が低下する傾向は同様の傾向であるが、外来の自然侵入種の植被率は低かった。混播種の植被率が 20% を超える試験区が多く、混播種(オオヨモギ)の導入による効果が出現したものと推察される。図-5(i)のオオヨモギを植生シートで導入した試験区の翌年 8 月上旬の植被率が低下した原因は、8 月上旬に草刈りを実施したことによる影響であると考えられる。3 年後から 4 年後以降オオヨモギの植被率は低下したが、導入初期の自然侵入種抑制対策として、オオヨモギの混播が有効であると言える。オオヨモギの導入工法として種子吹付と植生シートの 2 工法で比較試験を実施したが、工法による顕著な差はみられなかった。

主力種の苗植栽の結果を種別にみる。

- ・ヨシは翌年以降植被率が 20% を超える試験区が出現したものの、5% 以下の試験区も多く見られた。7 年後、8 年後の調査ではすべての試験区で植被率が上昇し、半数で 40% を超えた。試験区によって結果に差が見られた(図-5(b))。

- ・オギは植栽当年から殆どの調査区で 10% 以下の低い植被率で推移し、調査最終年の 7 年後調査で初めて植被率が 20% を超えた。他の種と比較して最も植被率が低かった(図-5(d))。

- ・ヤマアワは翌年までの植被率は 10% に満たなかったが、2 年後以降上昇傾向を示し、40% を超える試験区も現れた(図-5(e))。

- ・ビロードスゲは翌年から植被率が上昇する試験区が現れ、7~8 年後には全ての試験区で 40% 以上の植被率を記録した(図-5(g))。

7~8 年後までの主力種 4 種の植被率の推移結果から、ヨシとビロードスゲは植栽翌年から、ヤマアワは植栽 2 年後から植被率が拡大傾向を示す試験区が現れ、堤防法面緑化に使用できると示唆された。しかし、全ての試験区で高い植被率が得られた訳ではない。そのため、実際に適用す

る際は経過を観察しながら、追加の植栽を行うなどの順応的な管理も必要であると考えられる。一方、オギは 4 年後でも植被率が低く、堤防法面緑化に使用することは困難であると考えられる。

主力種の苗植栽の施工後 2~3 年間は主力種の植被率が低い状態が続く。また、植栽当年は在来種のイヌビエが自然侵入することにより全体植被率が高くなるが、翌年には低下する試験区が多く現れた。そのため、特に植栽翌年から 2 年後までの間の在来種の植被率低下を防ぐためには、オオヨモギの混播が有効であるという結果が得られた。

3. 4 本章のまとめ

千歳川堤防側帯で在来種により堤防法面を緑化するための工法と導入に適した種を試験した結果を以下に示す。

- ・ヨシ、ヤマアワ及びビロードスゲは千歳市周辺の堤防緑化の主力種として適した在来種と考えられる。オギは植栽当年時より植被率が低いため、堤防植生への導入は困難であると考えられる。

- ・導入初期の外来種侵入抑制及び先駆種を含めて在来種の植被率確保のため、オオヨモギを混播することが望ましい。エゾヌカボ及びオオイヌタデの生育はほとんど見られなかった。オオヨモギの導入工法として、種子吹付工あるいは植生シート工による方法が可能である。

4. 天塩川下流域における試験施工結果

4. 1 本章の目的及び内容

在来種による寒冷地の河川堤防の法面緑化に向け平成 23 年度からは道央の恵庭市内の千歳川堤防側帯において試験・調査を継続して実施し、ヨシ、ヤマアワ、ビロードスゲ及びオオヨモギの播種あるいは苗による植栽により実現の可能性を見出したところである。今後、これらの知見を用いて、千歳川流域以外での寒冷地の河川堤防で在来種による緑化が実現されるよう、地域毎の適用可能在来種と緑化工法を明らかにすることが必要である。そのため、本章では、道北を流れる天塩川下流において導入工法や施工時期を変えて試験施工を実施した結果について取りまとめて報告する。

4. 2. 1 試験箇所

北海道北部を流れる天塩川下流の幌延町の右岸堤防の側帯法面で実施した(図-6)。この側帯は試験施工を実施する前年に盛り土工事が完成しており、法面緑化は実施されていない。法面勾配はおよそ 1:3 で、斜面は北向き、周辺は牧草地が広がっている。試験施工は 1 区画を幅 5m、法長方向 8m とし、試験区 4 区画及び無施工の対照区を 1 区画の全 5 区画設けて行った。各試験区の上部と下部に、

それぞれ 2 m×2 m のモニタリング枠を設定して植生調査を行った。試験区の配置を図-7 に示す。

4. 2. 1 試験箇所

北海道北部を流れる天塩川下流の幌延町の右岸堤防の側帯法面で実施した(図-6)。この側帯は試験施工を実施する前年に盛り土工事が完成しており、法面緑化は実施されていない。法面勾配はおよそ 1:3 で、斜面は北向き、周辺は牧草が広がっている。試験施工は 1 区画を幅 5m、法長方向 8m とし、試験区 4 区画及び無施工の対照区を 1 区画の全 5 区画設けて行った。各試験区の上部と下部に、それぞれ 2 m×2 m のモニタリング枠を設定して植生調査を行った。試験区の配置を図-7 に示す。

4. 2. 2 導入種の選定

導入種は天塩川下流域で平成 26 年に行ったの現地調査時に群生を確認した種で、前述の主力種とした。また、堤防法面を早期に被覆するための混播種として、千歳川試験地と同様にキク科のオオヨモギを選定した。施工に用いた種子は、ヨシおよびオオヨモギについては平成 26 年秋に、ヤマアワおよびピロドスゲについては平成 27 年夏にそれぞれ天塩川下流域で採取したものを使用した。

4. 2. 3 試験工法および播種量

試験工法および植栽本数を表-5 に、播種量を表-6 に、種子吹付工の添加材料を表-7 に示す。試験区 27a と 27b は平成 27 年の秋(平成 27 年 11 月 4 日、5 日)に、試験区 28a と 28b は翌春(平成 28 年 6 月 14 日、15 日)に試験施工した。試験区 27a、28a は主力種のヨシ、ヤマアワ、ピロドスゲをセル苗(セルサイズ φ27.8 mm、H48.5 mm)により植栽し、混播種のオオヨモギは種子とともに肥料とファイバーと有機物を含んだ土壌改良材を機材により吹付ける種子吹付工により播種した。試験区 27b、28b の主力種の植栽には 27a、28a と同様セル苗を用いたが、オオヨモギは植生シート工で播種した。植生シートは 2 枚の植生用紙の間に種子を挟み込み、用紙を圧着後、ワラムシロに縫い付けたものを用いた。施工は、①法面に自生していた植物を手で抜き取り整地、②種子吹付工あるいは植生シート工によりオオヨモギを播種、③主力種の苗を植え付け、の順に行った。セル苗は秋植え、春植とも草丈が 5 cm~10 cm 程度に生育したものを用いた。植栽間隔は 50 cm とし、試験区内に各種 48 本、3 種合計で 144 本植栽した。オオヨモギの発生期待本数は種子吹付工および植生シート工とも 150 本/m² となるよう種子量を調節した。植生シート工はシート製作時に種子のロスが発生するため工法補正(補正值 0.49(メーカー聞き取り値。純度、発芽率も同様))を行っている(表-6)。その

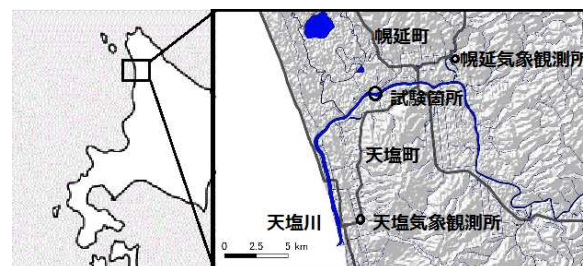


図-6 現地試験箇所

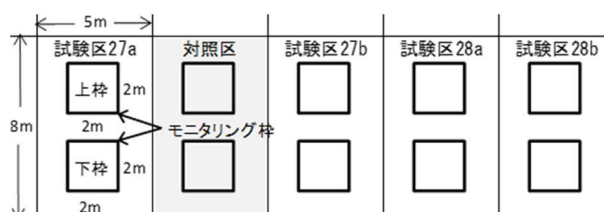


図-7 試験区および調査枠の配置

表-5 各試験区の導入種、工法および導入本数

試験区	導入種	種別	導入工法	苗植栽本数、 発生期待本数 (本/m ²)
27a, 28a	ヨシ, ヤマアワ, ピロドスゲ	主力種	セル苗植栽	各 1.2 (50cm 間隔)
	オオヨモギ	混播種	種子散布工	150
27b, 28b	ヨシ, ヤマアワ, ピロドスゲ	主力種	セル苗植栽	各 1.2 (50cm 間隔)
	オオヨモギ	混播種	植生シート工	150

表-6 各試験区のオオヨモギ播種量

試験区	工法	発生期待 本数 (本/m ²)	種子 重量 (粒/g)	純度 (%)	発芽 率 (%)	工法 補正	種子量 (g/m ²) (粒/m ²)
27a, 28a	種子散布工	150	5,600	70	90	1.00	0.043 238
27b, 28b	植生シート工	150	5,600	70	90	0.49	0.087 486

表-7 種子吹付工で使用した材料と数量

工法	名称	規格等	単位	数量
種子散布工	高度化成肥料	15-15-15	g/m ²	160
	りん酸肥料	熔成燐肥	g/m ²	80
	養生材	ファイバー	g/m ²	200
	土壌改良材(A)	有機質含有量30%以上	g/m ²	120
	土壌改良材(B)	ピートモス(A)級	L/m ²	2
	接合剤	高分子系樹脂(粉末)	g/m ²	2

ため、実際にシート製作に使用した種子量は 1 m² 当たり 0.087 g で種子吹付工の 0.043 g と比較して約 2 倍多い。

4. 2. 4 調査方法

植生調査として、試験施工実施時に設定したモニタリング枠(2 m×2 m)内の導入種の全体植被率と種別植被率、草丈のほか、自然に侵入してきた植物種とその植被率を調査した。植被率はモニタリング枠の 1/100 の面積となる 20 cm×20 cm のフレームを作成し、これを参考に目視により 1%単位で計測した。草丈は最大の個体について自然高を測定した。調査は、平成 28 年 6 月下旬、8 月上旬、

9月下旬、平成29年6月下旬および8月上旬の5回実施した。

土壌分析として、施工後の各試験区内の硬度を山中式土壌硬度計により、含水比、全窒素、全リン、pH、りん酸吸収係数および腐植含有量を室内分析により計測した。室内分析試料は吹付け直後に地表から15cm×15cm×15cm程度の土壌を試験区内の調査枠外で採取した。また、平成28年7月から9月にかけて、土壌水分計(HOBO:S-SMC-M005)により、各モニタリング枠内下部の土壌水分量を連続観測した。計測は5cmのセンサー部を根元まで垂直に地面に刺して行った。

4.3 調査結果と考察

4.3.1 気象の状況と土壌の調査結果

平成28年および平成29年の4月から10月までの気象庁天塩観測所の旬別の気温⁹⁾の推移を図-8に、旬毎の積算日照時間⁹⁾を図-9に示す。平成28年、29年とも旬平均気温は平年並みか平年より高い気温で推移した。9月下旬までの日照時間は、平成28年は4月中旬と6月上・中旬および9月上旬を除いて、平年並みか平年より長かった。平成29年は6月下旬から7月中旬の日照時間が極端に短かった。

気象庁幌延観測所で観測された平成28年7月から9月までの降水量⁹⁾を図-10に、各モニタリング枠内で計測した土壌水分量を図-11に示す。

土壌水分量を試験区毎に比較すると、試験区27bを除いて各試験区とも上部のモニタリング枠の計測値が下部よりも小さい値を示している。降水量との応答関係を見ると、連続雨量が概ね20mmを超えると、全ての計測箇所ですべて土壌水分量は0.4m³/m³程度まで上昇するが、それ以上降雨が続いても、土壌水分量はほとんど増加しなかった。降雨終了後の土壌水分量は、0.1m³/m³程度まで直ちに低下した試験区27aを除くと、降雨終了直後に0.2~0.3m³/m³程度まで一気に低下したが、その後の低下は緩やかだった。

施工直後に計測した土壌硬度は、試験区27a、27bは平均で20mmと19mm、試験区28a、28bは15mmと13

mmであった。27年植栽区の27a、27bの土壌はやや堅めであったが、表層土の根の生長と乾湿から適しているとされている土壌硬度10~22mmの範囲内⁹⁾にあった。

表-8に土壌分析の結果を示す。全窒素、全リンは肥料分を吹付けた試験区27a、28aの分析結果が肥料を与えていない試験区27b、28bおよび対照区と比較して高い値を示したものの、全窒素については試験区28aを除いて、北村¹⁰⁾が示した養分不足により改良が必要な土壌の範囲内(0.6g/kg未満)であった。pHは試験区27aを除いて5.0以下で、いずれも弱酸性土壌を示した。これは全農が示した¹¹⁾水稻の生育に好適なpH値5.0~6.5や、トールフェスクの生育に好適なpH値5.0~6.0を下回った。りん酸吸収係数は一番高い値を示した試験区28bでも584であった。りん酸吸収係数とはりん酸肥料の効きやすさを示す指標で、数値が低いほど肥料の効果が得られやすいことを表す。沖積土壌では700以下の値を示し、りん酸施用量が少なく済むが¹¹⁾、本試験地の土壌も沖積土壌由来で同程度の値であった。腐植含有量は最も高い値を示した試験区28aでも2.3%であり、普通畑の土壌改良目標値¹¹⁾の3%を下回っている。これらの結果、本試験地の土壌は弱酸性で栄養分も低く、種子と一緒に肥料を吹付けた試験区においても十分な改良が出来たとは言えないと考えられる。

4.3.2 植生調査結果

表-9に植生調査を実施した結果のうち、平成28年9月と平成29年8月の調査結果を示す。上段の表は上枠の、下段は下枠の調査結果であり、全確認種のうち5%以上の種別植被率を一度でも記録した種を示した。図-12に各植栽種の種別植被率を、図-13に確認種を主力種、混播種、外部からの侵入種の3つに分類して、(1)式により求めた相対植被率で示す。各モニタリング枠の全体植被率は植栽1年目の9月調査では92%以上の高い値を示したものの、侵入種の植被率が高く、60%を超えていた(表-9、図-13)。主な侵入種はコヌカグサとクサヨシ、スギナ、シロツメクサ等であった。スギナとシロツメクサについては1年目に比べ2年目の種別植被率が拡大した調査枠が多く確認

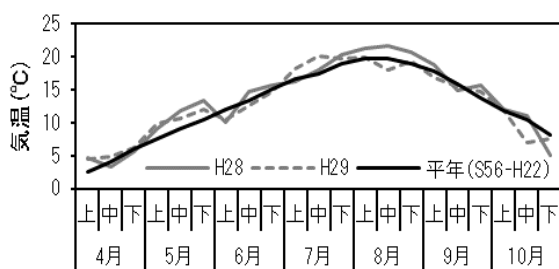


図-8 天塩観測所旬平均気温

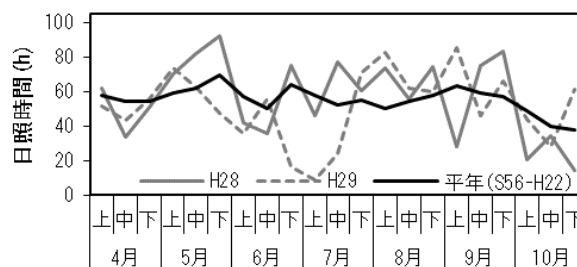


図-9 天塩観測所旬別積算日照時間

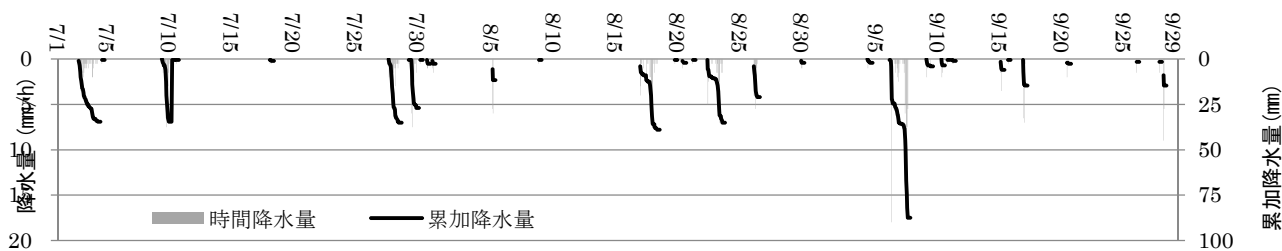


図-10 幌延観測所降水量（平成28年7月1日～9月30日）

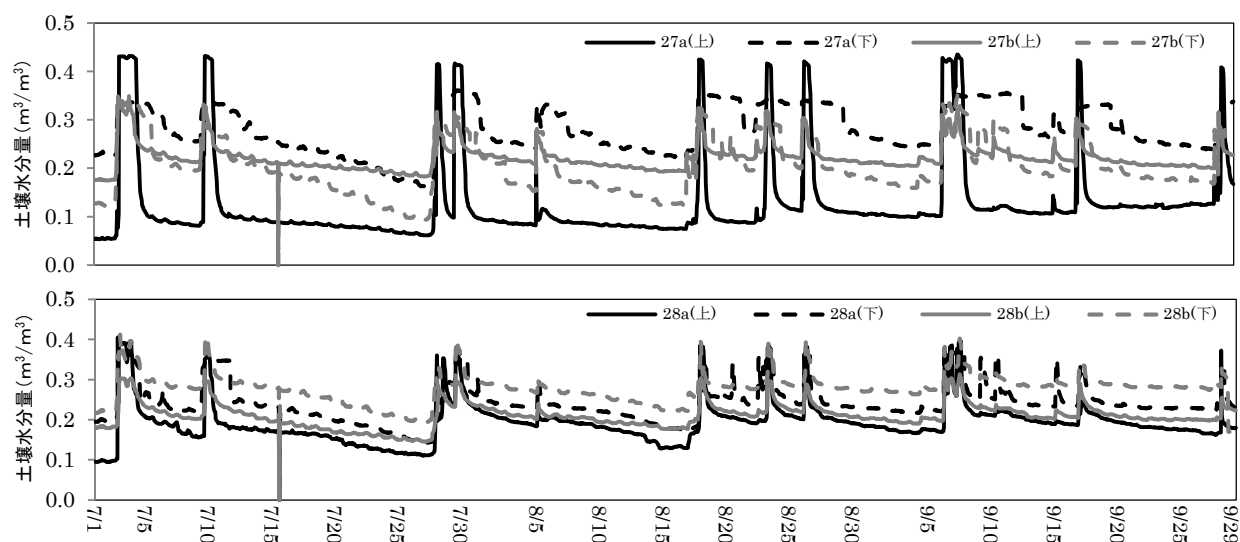


図-11 各モニタリング枠で連続観測した土壌水分量の計測結果（平成28年7月1日～9月30日）

表-8 各試験区の土壌分析結果

試験区 採取日	27a		27b		28a		28b		対照区			
	H27.11.5		H28.6.15		H27.11.5		H28.6.15		H27.11.5		H28.6.15	
含水比(%)	25.0	26.1	31.4	29.2	23.0	21.0						
全窒素(mg/g)	0.71	0.44	1.10	0.68	0.52	0.52						
全リン(mg/g)	0.31	0.26	0.59	0.27	0.24	0.26						
pH(H ₂ O法)	6.5	5.0	4.9	4.6	4.9	4.9						
りん酸吸収係数	402	412	548	584	368	413						
腐植含有量(%)	1.7	0.9	2.3	1.9	2.1	1.4						

されたが、その他の侵入種の種別植被率はほとんど拡大しないか、縮小した（表-9）。

特に、1年目の調査でイヌビエは試験区28aの上枠と下枠でそれぞれ90%と高い種別植被率であったが、平成29年の調査では生育を確認できず、他の種と置き換わっていた。平成29年6月調査時の全体植被率は前年9月調査時の100%と比較すると80%以下と低く、1年草であるイヌビエの繁茂による植被率低下は20ポイント程度あったが、8月には全体植被率は95%となり、イヌビエ繁茂による堤防植生への影響も解消した。

次に、試験区27aを除いて弱酸性であった試験地の土壌の影響を考察する。試験区27a、27bおよび28a、28bの全てのモニタリング枠で初回の調査から全体植被率は60%を超え、期間を通して高い値を維持していた。また、

対照区でも2回目の調査の8月上旬以降はほぼ60%を超えていたことから、弱酸性土壌による影響は見られなかったと考えられる。図-13より、試験区27a上枠の主力種の相対植被率は初回調査の平成28年6月から5%を超えていたが、セル苗からの生長では説明がつかないほどの大きい個体（草丈70cm超）のヨシが確認されており、前年の植栽作業時の整地の際に、既に自生していたヨシを完全にする。このため、主力種については、この試験区27aの上枠の結果を除いて考察する。主力種の相対植被率は試験区27aの上枠を除くといずれの枠も調査1年目は数%であったが、2年目にかけて徐々に増加し、2年目の8月には10~20%まで達した。

混播したオオヨモギの播種方法の違いによる主力種の生育の傾向の違いは認められなかった。

苗を植栽した年度別で比較すると、調査2年目の8月調査のヨシ以外の主力種の種別植被率は、試験区27aより28a、試験区27bより28bの方が高い結果となり（図-12）、苗による堤防法面積は秋に施工するより、一冬越して春に施工する方がその後の生育状況は良くなる傾向が見受けられた。に除去しきれず、残っていた株からの成長であると推察された。

表-9 各モニタリング枠内で確認された主要な草本種と植被率（上段は試験区上枠、下段は試験区下枠の結果）

科名	草種名	調査日		H28.9.28（上枠）					H29.8.1（上枠）				
		試験区	全体植被率	27b	28a	28b	対照区	27a	27b	28a	28b	対照区	
													100%
イネ科	ヨシ（主力種）		25%	1%	-	+	1%	60%	3%	1%	+	5%	
	ヤマアワ（主力種）		2%	3%	1%	6%	2%	5%	5%	10%			
カヤツリグサ科	ピロードスゲ（主力種）		2%	1%	3%	7%	3%	2%	8%	8%			
キク科	オオヨモギ（混播種）		15%	4%	17%	20%	+	15%	12%	35%	25%	1%	
イネ科	コスカグサ (<i>Agrostis gigantea</i> Roth)		50%	30%			2%	20%	10%			1%	
	クサヨシ (<i>Phalaris arundinacea</i> L.)		1%	5%	15%	15%	+	+	5%	10%	15%	+	
	イヌビエ (<i>Echinochloa crus-galli</i> (L.) P.Beauv.)		+		90%	12%	1%						
	エゾヌカバ (<i>Agrostis scabra</i> Willd.)		+	1%	+	+	+	+			+	1%	
イグサ科	イグサ (<i>Juncus decipiens</i> (Buchenau) Nakai)		1%	3%	+	+	1%	1%	5%	2%	+	3%	
カヤツリグサ科	オオカワズスゲ (<i>Carex stipata</i> Muhl. ex Willd.)						+	3%				+	
キク科	セイヨウタンポポ (<i>Taraxacum officinale</i> Weber ex F.H.Wigg.)		2%		1%	1%	2%	+		+	+	5%	
タデ科	ヒメスイバ (<i>Rumex acetosella</i> L.)					5%	+				1%	+	
トクサ科	スギナ (<i>Equisetum arvense</i> L.)		7%	10%	3%	25%	25%	25%	30%	25%	35%	30%	
マメ科	シロツメクサ (<i>Trifolium repens</i> L.)		5%	70%	+	7%	50%	6%	50%	10%	10%	60%	
	タチオランダゲンゲ (<i>Trifolium hybridum</i> L.)										3%		
	ムラサキツメクサ (<i>Trifolium pratense</i> L.)						8%					3%	

科名	草種名	調査日		H28.9.28（下枠）					H29.8.1（下枠）				
		試験区	全体植被率	27a	27b	28a	28b	対照区	27a	27b	28a	28b	対照区
イネ科	ヨシ（主力種）		6%	+	+	+	8%	15%	2%	+	1%	12%	
	ヤマアワ（主力種）		2%	3%	3%	4%		3%	5%	13%	8%		
カヤツリグサ科	ピロードスゲ（主力種）		1%	3%	5%	10%	3%	2%	5%	10%	6%	3%	
キク科	オオヨモギ（混播種）		35%	20%	30%	12%	+	40%	15%	50%	15%	2%	
イネ科	コスカグサ (<i>Agrostis gigantea</i> Roth)		15%	2%	5%	2%		3%	1%	5%	1%		
	クサヨシ (<i>Phalaris arundinacea</i> L.)		2%			45%	2%	+		1%	30%	1%	
	イヌビエ (<i>Echinochloa crus-galli</i> (L.) P.Beauv.)		1%	+	90%	3%	+						
	エゾヌカバ (<i>Agrostis scabra</i> Willd.)		10%	30%	+	1%	10%	+	1%	+	1%	3%	
イグサ科	イグサ (<i>Juncus decipiens</i> (Buchenau) Nakai)		2%	1%	2%	+	1%	2%	2%	1%	+	4%	
カヤツリグサ科	オオカワズスゲ (<i>Carex stipata</i> Muhl. ex Willd.)		1%					1%					
キク科	セイヨウタンポポ (<i>Taraxacum officinale</i> Weber ex F.H.Wigg.)		5%			1%	1%	2%			+	+	
タデ科	ヒメスイバ (<i>Rumex acetosella</i> L.)			3%	+	+	+		+		+	+	
トクサ科	スギナ (<i>Equisetum arvense</i> L.)		20%	13%	2%	25%	35%	10%	30%	15%	45%	35%	
マメ科	シロツメクサ (<i>Trifolium repens</i> L.)		15%	35%		2%	30%	50%	50%		3%	60%	
	タチオランダゲンゲ (<i>Trifolium hybridum</i> L.)					3%					10%		
	ムラサキツメクサ (<i>Trifolium pratense</i> L.)												

オオヨモギの結果を図-12、13 から考察する。種子吹付工で播種した試験区 27a、28a が植生シートによる試験区 27b、28b に比べて植被率が大きい結果となった。植生シートを製作する際の種子のロスなども考慮して判断すると、ヨモギの播種方法は種子吹付工の方が適していると言える。播種時期の比較では試験区 27a より 28a、試験区 27b より 28b の方が良好な結果が得られている。このことから、オオヨモギの播種も秋より春の方が良好に発芽・生育することが分かった。

最後に土壌水分量と植生調査結果の関係について考察する。土壌水分量の連続測定の結果では、試験区 27b を除き各試験区とも上枠と比較して下枠の土壌水分量が多い（図-11）。植栽した主力種はいずれも湿性の土壌を好む種であるが、上枠と比較して土壌水分量の多い下枠の植被率が高い試験区は 28a のみであり、他は上枠の方が高いか同じであった（表-9）。オオヨモギは、試験区 28b を除いて土壌水分量の多い下枠の植被率が大きい結果であった。オオヨモギは湿性を好む種とはされていないことから、今

回試験した在来種においては、勾配 1:3 程度の堤防法面における土壌水分量の違いによる、生育への影響はほとんどないものと推察される。

4. 4 本章のまとめ

天塩川は一級河川最北であり、かつ、管理区間の最北端に位置する右岸堤防の北向き側帯法面において、在来植物による堤防法面緑化に向け、試験施工の実施とその後 2 年に渡って植生調査と土壌調査、気象の分析を行った。その結果をまとめると次のとおりである。

- ・ヨシ、ヤマアワ、ピロードスゲおよびオオヨモギは、弱酸性土壌（pH 4.6 まで確認）で生育可能である。
- ・オオヨモギを混播した場合、ヤマアワとピロードスゲはセル苗による植栽が堤防法面緑化に有効である。
- ・天塩川下流の今回の試験ではヨシの生育は僅かしか確認出来なかった。
- ・セル苗による現地への植栽は秋施工と比較して、翌春に施工した方がその後の生長は良好である。
- ・オオヨモギは直接播種により発芽生育が可能であり、播

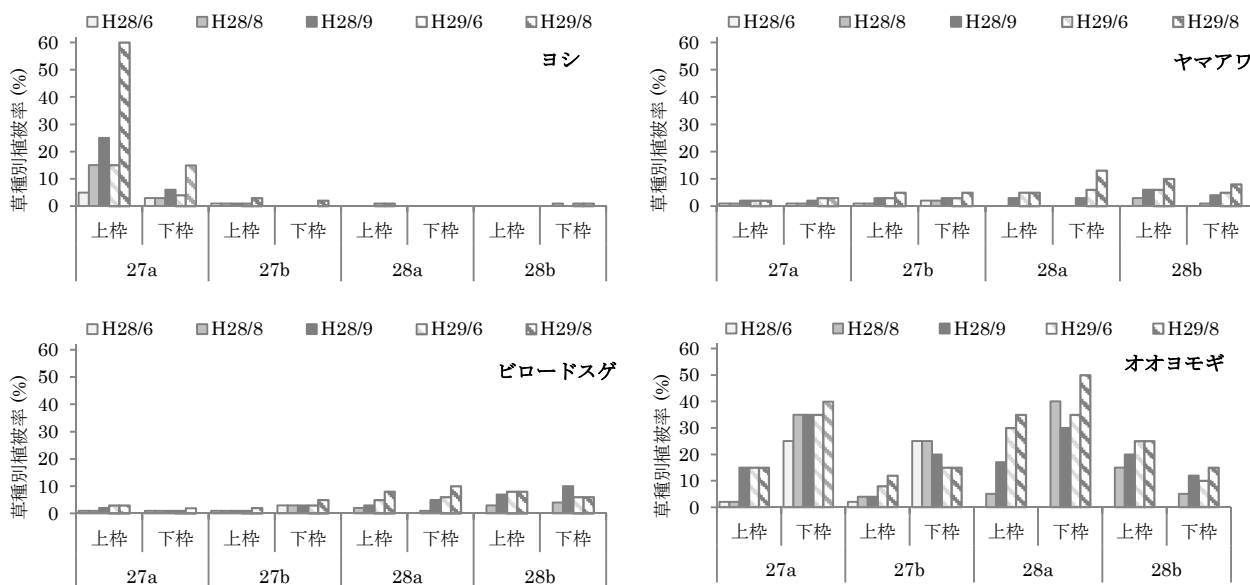


図-12 各導入種のモニタリング柵毎の種別植被率の推移

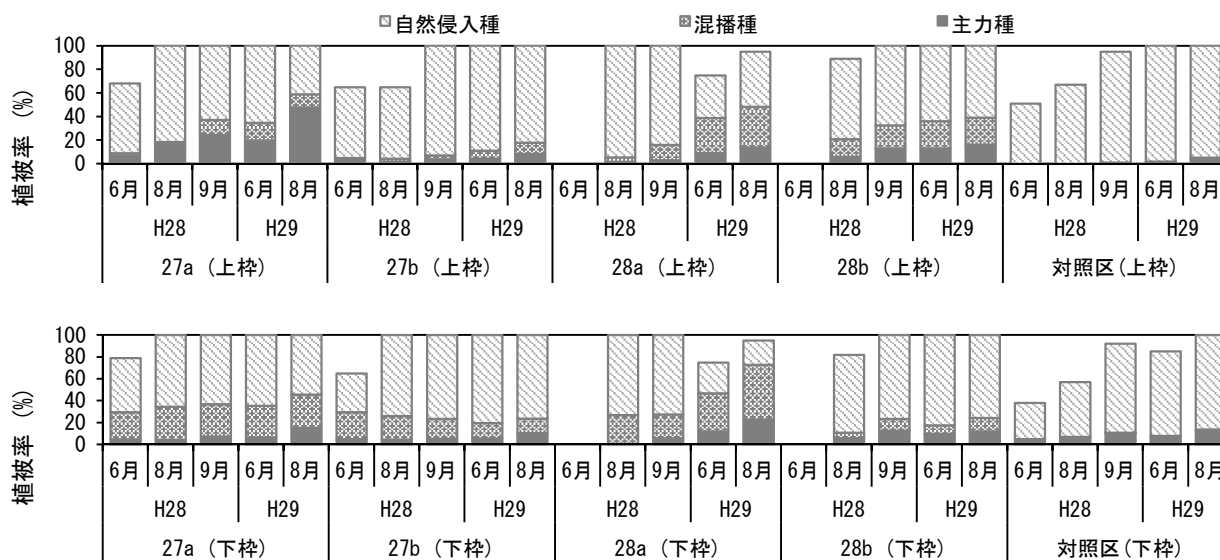


図-13 モニタリング柵毎の植被率の推移 (対照区の主力種および混播種は自然侵入由来)

種時期は秋より春が良い。施工方法は植生シート工と比べ、種子吹付工で実施した方が生育が良く、種子量も少なくて済む。

- ・1年草であるイヌビエの繁茂が2年目の在来種による堤防法面緑化に与える影響はわずかである。
- ・今回の試験範囲では土壌水分の違いによる在来種の生育への影響は認められなかった。

天塩川下流で施工時期や工法を変えた試験施工の結果、在来種の生育状況の違いなど、貴重なデータを取得することができ、千歳川試験地と同様に在来種による堤防緑化の実現可能性があることが示唆された。在来種の被度拡大はゆっくりとしたペースで進行するため、今後とも生育の経

過を適宜調査し、現場への適用に向けて継続して研究を実施していくことが望まれる。また、堤防植生向け在来種の選定においては、気象条件に適応し、種子採取の容易な種を選定していく必要があると考えられる。

5. 種子散布による導入方法検討

5.1 本章の目的及び内容

北海道の河川においても外来牧草による緑化から在来種による緑化への転換を目指し、実際の河川堤防を利用した法面緑化試験を平成23年度から実施している。平成23年度からは道央の恵庭市内の千歳川堤防側帯において、平成27年度からは道北の幌延町内の天塩川下流堤防側帯において試験・調査を継続して実施している。その結果、ヨ

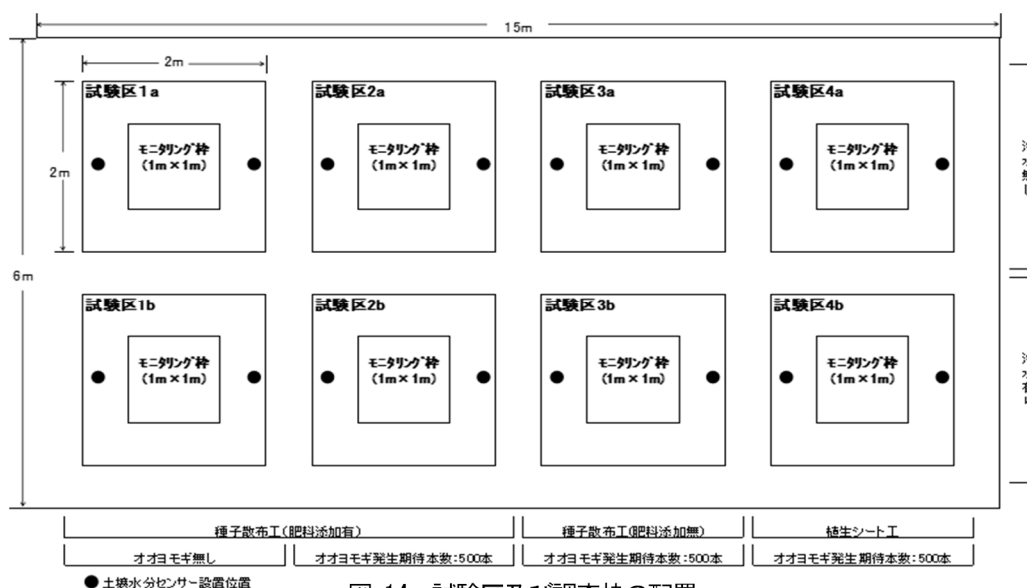


図-14 試験区及び調査枠の配置

シ、ヤマアワ、ビロードスグについては苗による植栽により、オオヨモギについては種子吹付あるいは植生シート工により堤防法面緑化の実現の可能性を見出したところである。

本章では、実際の現場での適用を見据え、苗植栽と比較して施工が容易かつ導入コストも安価と考えられる種子吹付による堤防法面緑化工法の確立をめざし、灌水の実施の有無や肥料分などの添加材条件などを変えた現地試験施工を実施し、結果を分析した内容について報告する。

5. 2 試験方法

5. 2. 1 試験箇所と試験区の配置

現地試験及び調査は、北海道中央部を流れる石狩川水系千歳川において現在建設中の根志越遊水地堤防法面で実施した。緑化試験を行った堤防法面は試験施工の前年に盛土工事が完了した箇所であり、法面緑化工事は実施されていない裸地斜面である。法面勾配は概ね 1:3 から 1:4 で、斜面は東向き、周辺には農地が広がっている。試験施工は 1 区画当たり 2 m×2 m で 8 区画設けて行き、各試験区の中央部に 1 m×1 m のモニタリング枠を設定して植生調査を行った。試験区の配置を図-14 に示す。

5. 2. 2 導入種

導入種は千歳川流域の高水敷上で群生を確認した前述の主力種とした。また、堤防法面を早期に被覆するための混播種として、種子吹付工による法面の早期緑化に施工事例のあるキク科のオオヨモギを選定した。本試験では試験施工前年の平成 29 年に試験地周辺の遊水地内などでそれぞれ採取した種子を使用した。

5. 3 試験条件及び施工方法

5. 3. 1 概要

試験施工は平成 30 年 6 月 25 日に実施した。試験施工の実施に先立ち、15 m×6 m の試験区画内の法面上に生息していたシロザ、イヌタデなどの既存草本を除去し、その後レーキにより整地し、各 2 m×2 m の試験区に区画割して播種した。各試験区の区画は図-14 に示した通りである。試験区名の 1~4 は工法や導入種及び添加材の違いがあり、添字の a、b は、a は灌水の実施なしで b は灌水の実施有りの試験区を表す。各試験区の導入工法と播種量を表-10 に、試験条件の概要を図-14 の外枠に示す。

5. 3. 2 導入工法

植生の導入は植生シート工と種子散布工で行った。種子散布工は小規模面積での施工のため、次の通りの手順で実施した。①種子散布工で施工する各試験区で共通する資材（ファイバー、土壌改良剤、粘着剤）を基層として使用量の半量を機械吹付する。②試験区毎に種子または種子と肥料を混合した資材を人力で塗布する。③半量残しておいた①の共通資材を各試験区に再度機械吹付を行う。植生シート工は工場内で事前に 2 枚の植生用紙の間に種子を挟み込み、用紙を圧着後、ワラムシロに縫い付けたものを現場アンカーピンにより固定した。

5. 3. 3 播種量と添加材数量

導入工法と播種量は表-10 に示した通りであり、種子散布工で使用した添加材は表-11 の通りである。各試験区で播種した工法は、試験区 1、2、3 は種子散布工、試験区 4 は植生シート工である。導入した種は試験区 1 がヨシ、オギ、ヤマアワ、ビロードスグの主力種のみで、それぞれの発生期待本数は 1,200 本/m² とした。試験区 2、3、4 は試験区 1 と同じ主力種に加えて、植栽初期の被度向上を図るためオオヨモギ（発生期待本数 500 本/m²）を導入し

た。植生シート工で実施した試験区 4 のそれぞれの種の発生活待本数は試験区 1、2、3 と同じであるが、シート作製時のロスを考慮した補正をしているため、実際に使用した種子量は種子散布工の 2 倍程度である (表-10)。試験区 1、2、3 には種子の飛散防止と保水性などを高めるためにファイバー、土壌改良材及び粘着剤を添加した (表-11)。

5. 3. 4 灌水試験

人為的な灌水の有無による植生定着・生育への影響を検討するため、下段の試験区 (試験区名の添字 b の試験区) において、定期的な灌水を行った。灌水は発芽の促進と発芽した個体の定着を期待して、試験施工後から 8 月末までの期間、気象庁恵庭島松観測所において 1 mm 以上の降雨が観測されない日が 2 日連続した場合に、その翌日に行った。1 回当たりの灌水は降水量 5 mm に相当する 1 試験区 (面積 4 m²) 当たり 20 L とした。灌水作業は気温・地温の上昇する日中を避けて午前 9 時までに行うことを基本とした。手順は、5 L のじょうろ内の水を灌水実施試験区 4 区当たり 7~8 分程度で灌水し、その後 2~3 分程度の時間において、再度 5 L の灌水を 4 試験区毎に繰返し、合合計 1 試験区 1 日当たり 5 L×4 回の灌水を行った。

5. 4 調査方法

5. 4. 1 植生調査

植生調査として、各試験区内に設定したモニタリング (1 m×1 m) 内で確認できた導入種の本数、草丈の他、全体植被率と種別植被率及び自然に侵入してきた植物種とその植被率を調査した。草丈は各導入種 10 個体程度の自然高をメジャーで測定して平均を算出した。植被率はモニタリング枠の 1/100 の面積となる 10 cm×10 cm のフレームを作製し、これを参考に目視により 1 % 単位で計測した。調査は播種後の概ね 1 か月後、2 か月後、3 か月後に各 1 回、計 3 回実施した。

5. 4. 2 土壌調査

各試験区で施工した肥料分などの添加材の有無の違いなどによる土壌の物理化学性を確認するため、各試験区及び無施工箇所において、施工翌日と秋季の 2 回、土壌を採取し室内分析などを実施した。土壌分析として含水比、pH、全窒素、有効態リン酸、交換性カリウム、電気伝導度、塩基置換容量、磷酸吸収係数及び腐植含有量を室内分析により測定した。また、各試験区内の硬度を山中式土壌硬度計により計測した。室内分析用試料の採取は、内径 10 cm の筒状サンプラーを用いて、地表から深さ 5 cm までの土壌を各試験区の 4 隅及び無施工域の 4 隅で採取し、試験区ごとに混合して各 1 検体とした。土壌分析のほか、調査期間中の土壌水分量の連続観測を行った。計測には 0~

表-10 各試験区の導入工法及び播種量

工法 (試験区)	種名	発生活待本数 (本/m ²)	種子重量 (粒/g)	純度 (%)	発芽率 (%)	工法補正	播種量* (g/4m ²)	播種量* (粒/4m ²)
種子散布工 (1a,1b)	ヨシ	1,200	5,263	10.0	30.0	1.00	31.92	168,000
	オギ	1,200	2,222	40.0	30.0	1.00	18.90	42,000
	ヤマアワ	1,200	10,000	40.0	30.0	1.00	4.20	42,000
	ヒロードスゲ	1,200	800	98.0	30.0	1.00	21.42	17,136
(2a,2b,3a,3b)	オオヨモギ	500	5,600	70.0	90.0	1.00	0.59	3,304
	ヨシ	1,200	5,263	10.0	30.0	0.49	65.15	342,895
	オギ	1,200	2,222	40.0	30.0	0.49	38.56	85,689
	ヤマアワ	1,200	10,000	40.0	30.0	0.49	8.57	85,700
植生シート工 (4a,4b)	ヒロードスゲ	1,200	800	98.0	30.0	0.49	43.73	34,984
	オオヨモギ	500	5,600	70.0	90.0	0.49	1.22	6,832

*播種量には5%の施工割増分が加えられている

表-11 種子散布工で使用した添加材と数量

試験区	添加材名称	使用量 (4m ² 当り)	適用
(1a,1b,2a,2b)	高度化成肥料	640g	15-15-15
	磷酸肥料	320g	
	ファイバー	800g	
(1a,1b,2a,2b), (3a,3b)	土壌改良材(A)	480g	有機含有量30%以上
	土壌改良材(B)	8L	ピートモスA級
	粘着剤	8g	粉末
	粘着剤	320g	液体

0.550 m³m³まで測定可能な HOBO : S- SMC-M005 を用い、各試験区の左右中段 2 か所で計測した。

5. 5 結果と考察

5. 5. 1 気象の状況

平成 30 年 4 月から 10 月までの気象庁恵庭島松観測所の旬別の気温⁸⁾の推移を図-15 に、旬毎の積算日照時間を図-16 に示す。4 月から 10 月までの平均気温は平年を 0.4 °C 上回った。期間別では 6 月中旬に平年を 3.0 °C 下回ったが、播種した 6 月下旬以降は平年に戻り、7 月下旬には平年を 1.2 °C 上回るなど、播種してから 1 回目の植生調査を実施するまでの約 1 か月間は平年より高い気温で推移した。1 回目の植生調査を実施した 8 月上旬以降 2 回目の植生調査を実施した 8 月下旬までは平年を下回る気温となった。9 月上旬以降、3 回目の植生調査を行った 9 月下旬までの気温はほぼ平年並みで推移した。日照時間は 4 月から 10 月までの合計で 1,042 時間であり、平年を 36 時間下回った。播種した 6 月下旬以降 9 月上旬まで、7 月下旬と 8 月上旬を除き、平年を大きく下回った。特に 7 月上旬は 10 日間での日照時間が 12.9 時間と非常に短い旬間であった。

5. 5. 2 降水量と土壌水分

気象庁恵庭島松観測所で観測された平成 30 年 6 月 26 日計測した土壌水分量を図-17、図-18 に示す。なお、土壌水

分の計測には一部欠測がある。施工した6月25日以後10日間程度降雨の多い日が続いた。その後7月6日から2日間無降雨が続いたため、初めて灌水を行った。7月中旬以降は無降雨の日が多く、7月18日から8月8日までの間に6回灌水を実施した。灌水を実施したのは図-17の矢印で示したタイミングである。1回の灌水では1試験区当たり20Lを4回に分けて行ったが、3回目から4回目の灌水の際には、灌水した水の全てが地中に浸透せず、一部表面流となって流下した。灌水による土中の水分量上昇は図-18の通りであり、灌水による上昇の程度は、降雨と比べ小さく、継続時間も短かった。

8月中旬以降は雨の日が多く続き、土壌水分量も雨の少なかつた7月と比較して高い値で推移した。

5.5.3 土壌調査結果

試験施工の翌日に検体を採取した土壌の分析結果を表-12に示す。表-12には北村¹⁰⁾が示した芝生の基盤土壌としての適性度評価基準(案)を併せて示す。

含水比は施工翌日の6月の調査では全試験区とも23~26%程度の湿潤状態であった。9月の調査では試験区2aでは17.3%と比較的水分量が少なかつた。その他の試験区では21%~26%の湿潤状態であった。

pHは6月と9月の全試験区で5.1~5.5と弱酸性を示しており、芝生の土壌としては適性があると判定された。全窒素は試験区4bの6月の調査を除き全試験区で1.2mg/g以上を示し、適正が高いと判定された。

有効態リン酸及び交換性カリウムは種子散布時に肥料分を添加した試験区1a、1b、2a、2bで、6月の調査時には施肥の効果により高い値を示し、適正がある若しくは適性が高いと判定されたが、9月の調査では試験区2aの有効態リン酸を除いて要土壌改良に判定された。

施肥をしなかつた試験区3a、3b、4a、4bの有効態リン酸と交換性カリウムの値は低く要土壌改良に判定された。9月の値が特に低く、6月と比較して低下した。腐植含有量は植生工実施前に施肥の必要性を検討するために実施する試験項目である。無施工域の腐植含有量は2.3%と低

く、施肥が必要な土壌であると判定された。

一方、電気伝導度は土壌中の肥料分が多いほど高くなる。日から9月25日までの降水量⁸⁾と各モニタリング枠内で土壌中の硝酸態窒素とも相関があり、電気伝導度の高い土に知られている。そのため、施肥直後の土壌では電気伝導度は高くなる。本試験地では、施肥をした試験区において6月の調査で高い値を示した。特に試験区1b、2aで高く、施肥過剰の恐れもあったものの、9月の調査では適性が高いと判定される範囲以下に低下した。

土壌硬度は6月の調査では10.7~12.7mmの範囲、9月の調査では11.7~15.7mmの範囲にあり適正が高いと判定された。その他の計測値は表-12に示す通りである。全体を俯瞰して評価すると、施肥を行った試験区では施工直後は十分な栄養分が含まれていたが9月までは継続できなかつた。施肥を行っていない試験区では期間を通してリン、カリウム不足であったと評価できる。

5.5.4 植生調査結果

試験施工後概ね1か月後(8月1日)、2か月後(8月31日)、3か月後(9月25日)に各試験区で調査した各導入種の発芽確認本数を表-13、図-19、図-20に、平均草丈を表-14に示す。表には主力種を含むイネ科の種で同定が出来なかつた個体についてはイネ科として集計し、便宜上主力種に含めた。表-15に主力種、オオヨモギ及び自然侵入種の種別相対植被率と全体植被率を示す。種子散布工で肥料を添加していない試験区1a、1bは8月1日の調査では主力種小計でそれぞれ300本/m²程度確認出来たが、9月25日の調査では118本/m²、59本/m²と確認本数が減少した。9月に確認できた主力種の殆どヤマアワが占めており、ヨシ、オギ、ビロードスゲは確認本数が0もしくは数本であった。主力種の平均草丈は20cm程度まで成長していたが、相対植被率の合計は2~3%とわずかであった。全体植被率は60~90%程度であったが、その殆どは自然侵入種であった。試験区1a、1bと工法は同じであるが、オオヨモギを添加した試験区2a、2bは8月1日の調査では主力種小計の確認本数はそれぞれ96本/m²、56本/m²

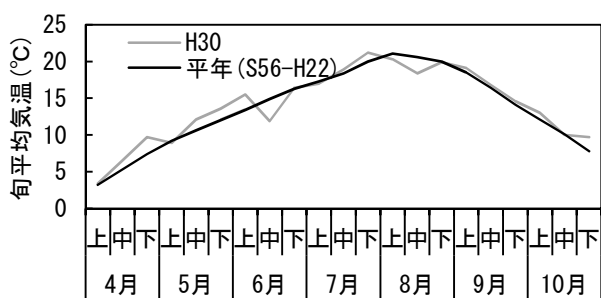


図-15 恵庭島松観測所旬平均気温

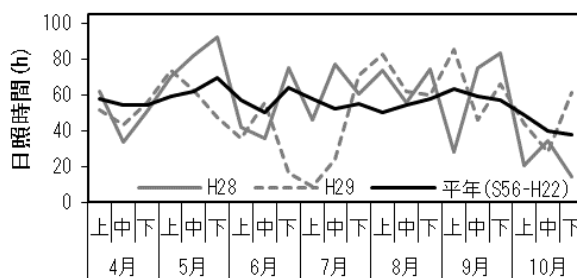


図-16 恵庭島松観測所旬別積算日照時

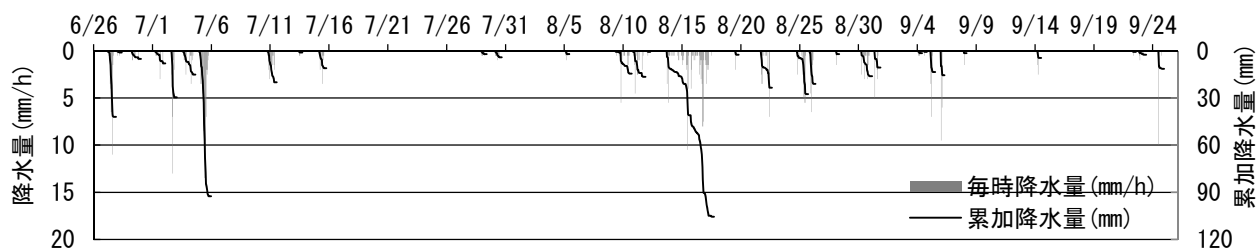


図-17 恵庭島松観測所降水量（平成30年6月26日～9月25日）

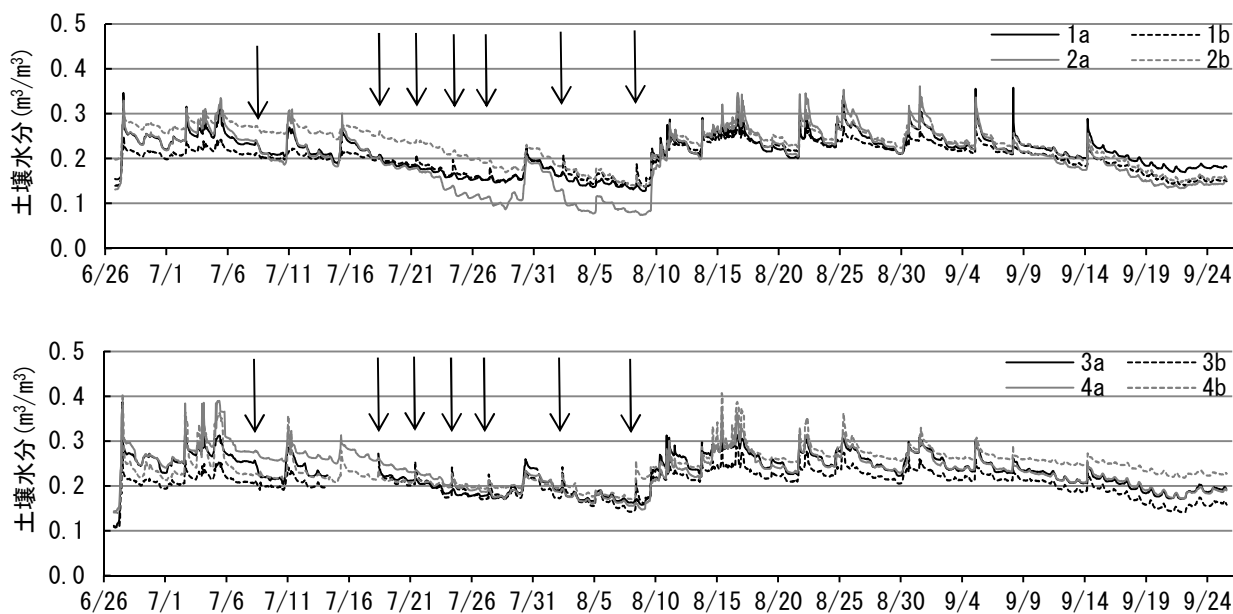


図-18 各モニタリング枠で連続観測した土壌水分量の計測結果（平成30年6月26日～9月25日）

（矢印の位置は灌水を実施したタイミングを表す）

であったが、8月31日以降の調査で確認できた本数は0であった。これは、オオヨモギに被圧され、十分な日照を得られなかった可能性が考えられる。オオヨモギの確認本数は調査期間を通して259～360本/m²であった。草丈は8月1日の調査では24cmと35cmであり、9月25日には50cmを超えるまで成長していた。被度も8月1日の調査時点から70%を超え、9月25日には90%を超え、他の試験区と比較して最も生育が良かった。試験区2a、2bと工法及び播種量は同一であるが、肥料の添加が無い試験区3a、3bは8月1日の調査では主力種の確認本数は試験区2a、2bとほぼ同じであった。9月25日時点での確認本数でも100本/m²以上あり、確認本数が0であった試験区2a、2bと異なる結果となった。オオヨモギの確認本数も試験区2a、2bと比較して全3回の調査とも多かった。一方、9月25日の調査でも平均草丈は2～7cmで、主力種の相対植被率も0.2%と小さく、オオヨモギでも19.6%、14.8%と肥料を添加した試験区2a、2bと比較して大幅に生育が遅れていた。全体の植被率も肥料を添加した試験区と比較して小さい値を示した。

植生シート工で施工した試験区4a、4bの主力種の確認本数は肥料を添加していない試験区3a、3bと同程度であり、草丈・植被率も同様の結果を示した。オオヨモギの確認本数は試験区4aの8月1日調査結果が他の試験区と比較して少なかったのを除いて、肥料を添加した試験区と同程度の本数であった。試験区3a、3bと比較すると確認本数は少なかったが、草丈と植被率は同程度であった。

5.5.5 オオヨモギ混播の有無による比較

主力種の生育に影響をおよぼすオオヨモギ混播の有無による違いを考察する。オオヨモギを混播しない試験区1の確認本数及び植被率はオオヨモギを混播した試験区2より大きい値を示したが、自然侵入種の占める割合も大きくなった。一方、オオヨモギを混播した試験区2の植被率の殆どをオオヨモギが占め、主力種と自然侵入種はわずかであった。早期法面被覆のためには、オオヨモギの混播は有効であるが、主力種とバランスの取れた植被率構成とするためには、オオヨモギの播種量を本試験より少なくする必要があると考えられる。

5.5.6 施肥の有無による比較

表-12 各試験区の土壌分析結果（上段6月28日、下段9月27日検体採取）

調査日・試験区	2018/6/26	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	無施工 域	適正判定基準			
											適性が高い	適性がある	要土壌改良	適正に乏しい
含水比	(%)	24.1	24	25	25.3	23.9	26.4	24.2	23.3	23.6	—	—	—	—
pH		5.3	5.5	5.5	5.5	5.4	5.4	5.2	5.1	5.4	5.6~6.8	4.5~5.6 6.8~8.0	3.5~4.5 8.0~9.5	3.5未満 9.5以上
全窒素 T-N	(mg/g)	1.7	2.4	2.4	1.7	1.5	1.6	1.2	1.1	1.2	1.2以上	1.2~0.6	0.6未満	—
有効態リン酸 P ₂ O ₅	(mg/kg)	200	520	260	130	70	60	70	70	80	200以上	200~100	100未満	—
交換性カリウム K ₂ O	(cmol(+)/kg)	1.17	2.97	1.97	0.91	0.36	0.34	0.32	0.32	0.36	3.0以上	3.0~0.6	0.6未満	—
電気伝導度 EC	(mS/cm)	0.52	1.25	1.04	0.3	0.12	0.08	0.13	0.12	0.11	0.2未満	0.2~1.0	1.0~1.5	1.5以上
塩基置換容量 CEC	(me/100g)	6	6	6	6	6	6	6	5	5	20以上	20~6	6未満	—
磷酸吸収係数		—	—	—	—	—	—	—	—	767	600以下	600~1,000	1,000~2,000	2,000以上
腐食含有量	(%)	—	—	—	—	—	—	—	—	2.3	10以上	10~5	5~3	3以下
粒度分布		—	—	—	—	—	—	—	—	壤土	壤土等	埴壤土等	砂土等	重埴土
土壌硬度	(mm)	11.0	11.3	12.7	12.3	10.7	10.7	11.3	12.0	11.3	23以下	23~27	27~30	30以上

調査日・試験区	2018/9/27	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	無施工 域	適正判定基準			
											適性が高い	適性がある	要土壌改良	適正に乏しい
含水比	(%)	22.7	23.3	17.3	21.7	21.1	22.6	22.5	25.6	22.1	—	—	—	—
pH		5.1	5.3	5.2	5.3	5.4	5.4	5.2	5.2	5.2	5.6~6.8	4.5~5.6 6.8~8.0	3.5~4.5 8.0~9.5	3.5未満 9.5以上
全窒素 T-N	(mg/g)	1.3	1.5	1.4	1.5	1.3	1.4	1.4	1.4	1.3	1.2以上	1.2~0.6	0.6未満	—
有効態リン酸 P ₂ O ₅	(mg/kg)	70	50	100	60	40	20	30	20	30	200以上	200~100	100未満	—
交換性カリウム K ₂ O	(cmol(+)/kg)	0.55	0.47	0.40	0.30	0.23	0.15	0.23	0.25	0.23	3.0以上	3.0~0.6	0.6未満	—
電気伝導度 EC	(mS/cm)	0.05	0.03	0.05	0.04	0.05	0.05	0.1	0.08	0.09	0.2未満	0.2~1.0	1.0~1.5	1.5以上
塩基置換容量 CEC	(me/100g)	7	8	8	8	7	9	7	7	8	20以上	20~6	6未満	—
磷酸吸収係数		—	—	—	—	—	—	—	—	833	600以下	600~1,000	1,000~2,000	2,000以上
腐食含有量	(%)	—	—	—	—	—	—	—	—	2.6	10以上	10~5	5~3	3以下
粒度分布		—	—	—	—	—	—	—	—	壤土	壤土等	埴壤土等	砂土等	重埴土
土壌硬度	(mm)	12.7	12.3	13.3	14.0	15.3	15.7	12.0	11.7	15.7	23以下	23~27	27~30	30以上

施肥の有無について結果を考察する。オオヨモギについては、肥料を添加した試験区の草丈及び被度が大きい結果となり、肥料の添加が有効であると考えられる。主力種については1か月後の調査では肥料を添加した試験区の方が確認本数は多かったが、2か月以降の調査では肥料を添加しない試験区の方が確認本数は多くなった。これは肥料を添加した試験区では、自然侵入種やオオヨモギの生育が拡大し、草丈の低い主力種が被圧されたことも要因の一つと考えられる。

5. 5. 7 灌水の有無による比較

灌水有無による植生調査結果の比較では、灌水有りの方がオオヨモギの平均草丈が大きく、全体植生率も高く灌水の効果があつたと考えられる。一方、主力種については調査結果の差が殆どなかった。自然侵入種については灌水を実施した試験区の方が植生率は大きくなる結果となった。今回の灌水条件では主力種の生育に対する効果は認められなかった。

5. 5. 8 施工方法の違いによる比較

施工方法の違いによる生育の差は、オオヨモギについては植生シート工（試験区4）より種子散布工（試験区3）の方がわずかに良い結果となった。主力種については、施工方法の違いによる、生育と自然侵入種の侵入状況の差は殆ど見られなかった。

5. 6 まとめ

本研究では在来草種による堤防法面緑化に向けて、寒冷

地河川の実堤防上で、播種による生育試験を行った。その結果、オオヨモギについては肥料分を添加した種子散布工により早期に法面緑化が可能であることが確認できた。ヨシ、オギ、ヤマアワ、ビロードスグについてはオオヨモギ混播の有無や肥料分の有無、灌水実施の有無、植生シート工による施工など各種条件を変えて試験を行ったが、早期の法面緑化に対しては、どれも良好な結果が得られなかった。室内での発芽試験¹²⁾では発芽率は30%を超え、試験圃場では播種によっても順調に生育（雪印種苗：未発表）していることも確認されている。しかし、実堤防上においては2章で示した事例と同様、種子吹付により早期に法面を緑化することは難しく、長期間の時間経過や灌水頻度、灌水量の増加などが必要であると考えられた。

本章では、より安価により施工性がよく大規模な面積を一度に緑化する方法として種子吹付と植生シートによる植生導入を目指し、オオヨモギについては肥料分を添加した種子散布工が一定の効果が認められたが、その他の手法については良好な結果が得られなかった。堤防法面の耐浸食性の向上に向けた早期緑化については、緊急性に応じ、繁茂が容易な1年草と多年草なども組み合わせた導入種を検討していく必要があると考えられる。

6. 水路実験による在来種の耐浸食性評価分析

6. 1 本章の目的及び内容

前章までで、現地試験による植生率などの調査結果から、

表-13 各試験区の主力種及びオオヨモギの確認本数

試験区名称	試験区1a			試験区1b			試験区2a			試験区2b			試験区3a			試験区3b			試験区4a			試験区4b		
工法	種子散布工(肥料添加有)												種子散布工(肥料添加無)						植生シート工					
灌水有無(7~8月)	無						有						無						有					
調査月日	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25
ヨシ	-	4 ^{*3}	4	2 ^{*3}	-	3	-	0	0	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
オギ	-	-	0	-	-	0	-	0	0	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ヤマアワ	-	79 ^{*3}	114	1 ^{*3}	61 ^{*3}	53	-	0	0	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ヒロードスゲ	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	5	5	5	11	15	17	6	13	15	4	5	7
(イネ科) ^{*2}	323	18	0	266	8	0	96	0	0	56	0	0	75	173	127	39	126	85	56	94	65	130	75	98
主力種小計	323 ^{*4}	101 ^{*4}	118	270 ^{*4}	69 ^{*4}	59	96 ^{*4}	0	0	56 ^{*4}	0	0	80 ^{*4}	178 ^{*4}	132 ^{*4}	50 ^{*4}	141 ^{*4}	102 ^{*4}	62 ^{*4}	107 ^{*4}	80 ^{*4}	134 ^{*4}	80 ^{*4}	105 ^{*4}
オオヨモギ	/	/	/	/	/	/	284	284	323	360	259	311	506	607	395	362	584	424	92	225	234	268	283	287
導入種合計	323 ^{*4}	101 ^{*4}	118	270 ^{*4}	69 ^{*4}	59	380 ^{*4}	284	323	416 ^{*4}	259	311	586 ^{*4}	785 ^{*4}	527 ^{*4}	412 ^{*4}	725 ^{*4}	526 ^{*4}	154 ^{*4}	332 ^{*4}	314 ^{*4}	402 ^{*4}	363 ^{*4}	392 ^{*4}

*1: 表中の本数「-」は、同定不能のイネ科植物が確認され、かつ、イネ科主力種(ヨシ、オギ、ヤマアワ)で同定可能な個体がなかった場合とした。
 *2: (イネ科)は、個体サイズが小さく同定不能であったイネ科植物であり、イネ科のヨシ、オギ、ヤマアワが含まれる可能性がある。
 *3: 種の同定が可能だった本数である。同定不能の(イネ科)も確認されているため、実際の個体数は記載より多かった可能性がある。
 *4: (イネ科)を含む集計値であり、実際の主力種ないし導入種の個体数は記載より少なかった可能性がある。

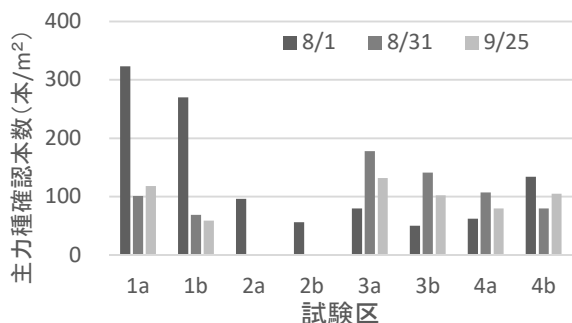


図-19 各モニタリング枠の主力種確認本数

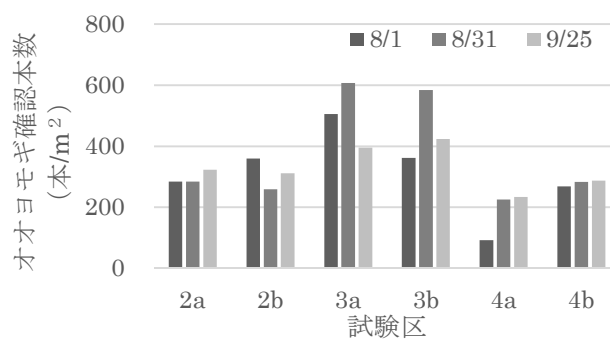


図-20 各モニタリング枠のオオヨモギ確認本数

表-14 試験区毎の各導入種の草丈

試験区名称	試験区1a			試験区1b			試験区2a			試験区2b			試験区3a			試験区3b			試験区4a			試験区4b		
調査月日	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25
ヨシ	-	23	21	13	-	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
オギ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ヤマアワ	-	20	21	17	24	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ヒロードスゲ	-	-	-	14	-	18	-	-	-	-	-	-	5	7	7	5	6	6	4	6	7	5	7	6
(イネ科) ^{*2}	4	3	-	9	4	-	3	-	-	7	-	-	2	2	2	4	3	3	2	2	2	2	2	2
オオヨモギ	/	/	/	/	/	/	24	57	54	35	69	62	1	3	2	1	3	3	2	2	2	2	3	3

表-15 試験区毎の種別の相対植被率と全体植被率

試験区名称	試験区1a			試験区1b			試験区2a			試験区2b			試験区3a			試験区3b			試験区4a			試験区4b		
調査月日	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25	8/1	8/31	9/25
試験種別																								
主力種	1.0	1.2	2.1	2.2	1.0	3.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
オオヨモギ	-	-	-	-	-	-	87.5	89.9	93.8	74.3	89.3	90.1	1.7	19.8	19.6	4.7	14.9	14.8	1.0	7.7	10.0	2.0	9.9	14.8
自然侵入種	29.0	78.8	60.9	42.8	99.0	85.8	12.4	10.1	6.2	25.6	10.7	9.9	4.1	10.0	13.2	7.2	17.9	32.0	1.8	8.1	11.8	4.8	19.9	22.0
全体植被率(%)	30	80	63	45	100	89	100	100	100	100	100	100	6	30	33	12	33	47	3	16	22	7	30	37

寒冷地の堤防植生としてヨシ、ヒロードスゲ、ヤマアワが長期に安定的に生育する主力種として、オオヨモギが主力種が拡大するまでの間の先駆種として、適用可能な在来種である可能性を明らかにした。

一方、堤防植生は降雨や流水に対しての耐侵食機能が求

められている。近年の豪雨に伴う堤防越水被害が頻発したことなど受け、堤防の質的強化の重要性が高まっており、堤防植生の耐侵食性の評価の重要性も益々高まっている。本州以南の河川堤防植生には野芝が多用されており、その耐侵食性については多くの研究事例があり、定量的な評価

もされている(例えば^{3), 14)}。一方、寒冷地で法面植生として使用されている外来草本や今後導入を目指している在来種の耐侵食性については未だ十分には明らかにされていない。

そのため本研究では、在来種の実河川への導入に向けて、従来の堤防植生種と比較してどの程度耐侵食性を有しているのかを評価することを目的に室内水路実験を行った。実験結果の整理に当たっては、既往の研究^{6), 14), 15)}では草本の耐侵食性を表すパラメータとして、根毛量(単位体積当りの土塊に含まれる根と茎の重量)や根系強度並びに土壌硬度との関係性が高いことが示されているため、これらを調査し耐侵食性の評価を行った。

6. 2 材料

6. 2. 1 実験に使用した材料の概要

耐侵食試験に用いる在来種は前章まで検討していた在来種の内、比較的草丈が低く、根毛量も多いイネ科のヤマアワとカヤツリグサ科のビロードスゲを選定した。また、同一の生育条件で耐侵食性を比較検討するために、外来草本のケンタキブルーグラス、クリーピングレッドフェスク及びハードフェスクを2:2:1の割合で混播して育成した芝(以後、外来堤防芝)でも実験を行った。

植生を育成するためのピット(以後、植生ピット)の構造は、透水性床面を配しており、形状は長さ2.0m、幅0.9m、深さ0.3mである。植生ピットに充填する用土は、千歳川根志越遊水地の築堤盛土工事の盛土材として使用している土砂の提供を受け使用した。

植生ピットには発生期待本数が1m²当り5,000本となるよう種子量を調整し播種した。生育1年と生育2年の植生の耐侵食性の比較検討を行うため、植生ピットへの播種は平成29年8月29日に3基、平成30年9月5日に3基の合計6基を行った。播種後、耐侵食水路実験を行った令和1年11~12月までの1年ないし2年間、屋外の圃場で育成した。育成期間中には適宜除草、灌水を行い、発芽状況を確認した。植生ピット6基とも概ね3か月後までの発芽生育の状況が良くなかったため、当初の播種量と同様の種子量を追加播種した。耐侵食水路実験実施直前の植生の生育状況を写真-1に示す。なお、水路実験は比較検討のため、植生の無い裸地のケースも実施した。

6. 2. 2 各植生ピットの土質、植生試験結果

(1) 土質試験結果

耐侵食水路実験の実施前に植生ピット内の試料を採取して土質試験を行った。分析用の試料は各試験ピットの上流側の箇所を内径150mmの塩ビ管を用いて、表面から底面まで試料を乱さないように抜き取り、各3本採取し

た。試料を抜き取った後の植生ピットは、耐侵食実験の際の支障とならないように板でふさいだ。

図-21に実験に使用した2種類の土試料の粒径加積曲線を示す。この結果から、平成29年に使用した土試料は細粒分礫まじり砂(S-FG)、平成30年に使用した土試料は礫まじり砂(S-G)に分類できる。平成29年に使用した土試料の細粒分含有率は $F_c=16\%$ であり、平成30年に使用した土試料の $F_c=2\%$ に比べて高いことがわかる。次に、土粒子密度は平成29年度に使用した土試料で2.698g/cm³、平成30年に使用した土試料で2.601g/cm³であった。図-22に締固め試験の結果を示す。図中には各試験ケースのピット内で採取した土試料の乾燥密度、含水比についても併せて示している。いずれのケースにおいても、土試料の含水比は最含水比 w_{opt} よりも高く、乾燥密度は最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、よりも小さい。また、裸地のケースにおける乾燥密度が最も大きいこともわかる。各試験ケースの土試料の締固め度 D_c について、裸地のケースでは堤防の締固め基準の下限值である $D_c=90\%$ を示したが、他のケースではこれを下回っている。これは、締固めて作製した土試料中に、各種の植物の根系が侵入し、土試料が膨軟になったためと考えられる。

(2) 植生の生育状況

耐侵食水路実験の実施前に植生ピット内の植生の生育状況を調べた。単位面積当たりの生育株数と草丈を求めするため、10cm×10cmの調査枠を各3箇所設定し計測した。表-16に植生の生育状況と併せて土試料の締固め度 D_c の結果を示す。

平均株数は外来堤防芝が一番多く平成29年播種で25株、平成30年播種で26株であった。次に多いのはビロードスゲで、平成29年播種で19株、平成30年播種で17株であった。ヤマアワが最も少なく、平成29年播種で10株、平成30年播種で13株であった。各種とも生育1年と生育2年の株数の差はわずかであった。草丈はヤマアワ及びビロードスゲは生育1年と生育2年の差は殆どなかった。外来堤防芝は生育1年が36cm、生育2年が22cmと1.5倍程度の大きな差があった。植生用の購入種子は同じ種でも購入先毎に草丈が異なるなどの矮性があり、草丈の差は矮性によるものと考えられる。

(3) 根毛量

根毛量の計測を行うため、土質試料の採取と同様の手順とタイミングで内径100mmの供試体を各植生ピットから採取した。採取した試料を、表層より1cm、3cm、5cm、7cm及び9cmの深さで5層に切り分けサンプルし、水洗いによって根及び地下茎のみを取り出し、キッチンペ

パーで表面の水分を取り除いた後に質量を計測した。この結果を、各々のサンプルにおける単位体積当りの根毛量に換算して整理した。図-23は、表層から深さ9cmまでの根毛量の鉛直分布を生育1年の植生と2年の植生でまとめたものである。根毛量は表層から1cm(表面から1cmまでの根毛量は図中深さ0.5cmにプロットした)までが多く、この傾向は深さ3cmまで根毛が多く発達している本州以南の堤防芝として広く使われている野芝⁶⁾と比較して、根の発達深さが浅い傾向を示した。宇多らの研究では⁶⁾、耐侵食性と関連があるパラメータ α は表層から3cmまでの深さの根毛量 σ_0 から推定できるとの報告があり、比較のため根毛量から α を求めた(表-17)。根毛量は、生育1年と2年ともに外来堤防芝、ピロードスゲの順に多く、ヤマアワが最も少なかった。また、どの種も生育1年よりも2年の根毛量が少なかった。これは、植生ピットに充填した用土の土質や土壌硬度の相違が根の発達に影響を及ぼした可能性がある。

(4)根系強度

侵食性と関連があると言われている根系強度 θ をベーン式根系強度計(写真-2、図-24)で計測した。

ベーン式根系強度計の計測部は、内側の回転する金属製円盤と外側の固定した円盤の2種類の円盤で構成されている。円盤には、堤体土中に差し込む金属の棒が同心円状に固定されている。内側円盤の突起部は30mmあり、30mm深さまでの根系の強度を計測するものとなっている。上部はハンドルとトルク計が設置されており、外側の円盤を固定点にして、内側の円盤をハンドルにより回転させ、金属棒上部に設置されたトルク計によって最大値を読み取る方式である。ベーン式根系強度計を用いて、耐侵食実験実施前後に各3回根系強度を測定し平均した結果を図-25に示す。耐侵食実験実施前は外来堤防芝とピロードスゲの根系強度が高く40N・m以上であり、ヤマアワは30N・m以下の低い値を示した。野芝の場合、根系強度が30N・m程度以上で根系量が多く状態も良いと判定⁶⁾されていることから、外堤防芝とピロードスゲは良好な野芝と同程度の根の状態に達していたと考えられる。

実験前後の比較を行うと、生育1年は実験後にはそれぞれ15.0~16.7N・mに大きく強度が低下したが、生育2年では殆ど低下しなかった事が分かる。生育1年の植生グループは、いずれも耐侵食試験後に大きく侵食したため(写真-4、図-28参照)、支持層が破壊し根系強度が低下したと考えられる。一方、生育2年の植生グループでは試験後の根系強度の低下は僅かしか生じなかったこれは、耐侵食試験による侵食の程度が小さかったためであると考え



写真-1 耐侵食試験に使用した植生の生育状況

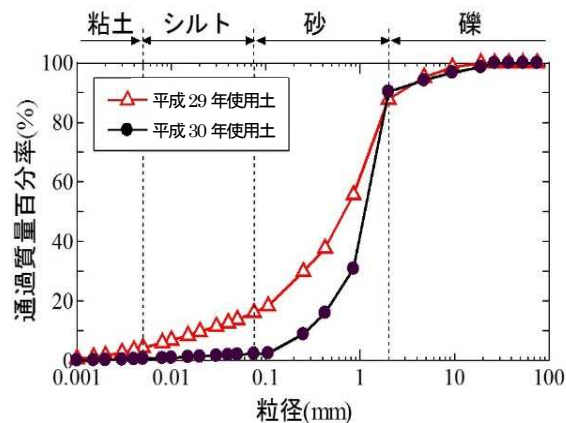


図-21 土試料の粒径加積曲線

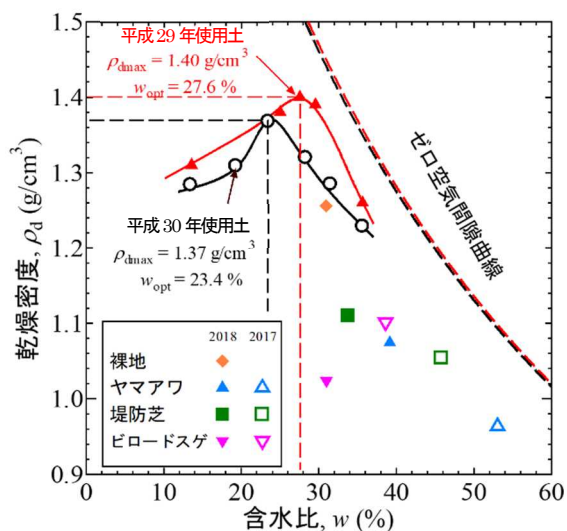


図-22 土試料の締固め曲線

られる。図-26に計測した根毛量と根系強度の関係を散布図で示す。外来堤防芝とビロードスゲは、本州の堤防植生として多用されている野芝と同程度の根毛量と根系強度を示し、ヤマアワはチガヤと同程度の根毛量、根系強度であった。

(5) 土壌硬度

各植生ピットの土壌硬度を土層強度検査棒¹⁷⁾(以後、土検棒)を使用し、耐侵食実験実施前後に鉛直深さ5cmと15cm地点で各5回計測した。土検棒は、先端にコーンつきの細いロッドを人力で静的に押し込むことにより土壌硬度や土質定数を簡易に測定する試験器具である。今回使用した土検棒による土壌硬度の測定上限値は1722 kN/m²である。裸地の実験前後の全測定及びビロードスゲと外来堤防芝の実験前の計測の一部で計測限界を数回超えたため、計測結果を中央値で図-27に示す。実験前の計測では深さ5cmと比べて深さ15cmの土壌硬度が大きく、また、生育2年より生育1年の方が大きい値を示した。実験後は実験前と比較してヤマアワの深さ5cmを除き土壌硬度が低下した。生育1年と生育2年の差は減少した。なお、裸地は全ケースで計測限界を超える土壌硬度であった。

6.3 耐侵食室内水路実験の結果

6.3.1 実験装置の概要

実験は、寒地土木研究所が所有する水路幅1m、水路長25.2mの高速流れを確実に確保できる閉管路式の高速循環水路を使用して行った。

植生ピットを水路中央に固定して上蓋をすると、植生を底面とする水深20cmの閉管路となる。水路側面は強化ガラス、上蓋には窓がついており実験中に侵食状況を目視で確認した他、デジタルビデオカメラを設置して流況や侵食状況を連続観察した。また、水路下流端から5.0m、6.95m、9.05m、13.0mの水路底中央の4箇所にピエゾ管を設置し、圧力センサーの測定値から植生面の摩擦速度を求めた。

6.3.2 試験の方法

実験は流量調節の後、通水開始→圧力測定・ビデオ撮影→1時間通水→侵食状況確認という手順を繰り返し、試験終了後に10cm×10cm格子で植生面の侵食形状を計測した(図-27)。各植生ピットの植生は、耐侵食性を主に根系の発達程度から評価するために、実験開始前に草丈5cm程度に切り揃えた(写真-3)。実験は断面平均の流速で1m/sから5m/sまで1m/s刻みで各1時間通水し、流水による植生の耐侵食性を把握した。ここで断面平均流速とは、通水設定流量を初期断面積(0.2m²)で割った値であ

表-16 試験に使用した各ピットの植生状況と締固め度

ケース	植生名	播種年月	調査区(10cm×10cm)		土試料の締固め度
			平均株数	平均草丈	
Case1	外来堤防芝	平成30年9月	26株	36cm	81%
Case2	ヤマアワ	平成30年9月	13株	57cm	78%
Case3	ビロードスゲ	平成30年9月	17株	49cm	75%
Case4	外来堤防芝	平成29年8月	25株	22cm	75%
Case5	ヤマアワ	平成29年8月	10株	59cm	69%
Case6	ビロードスゲ	平成29年8月	19株	46cm	79%
Case7	裸地	-	-	-	90%

※侵食深の計測可能な最大値は0.28mである。

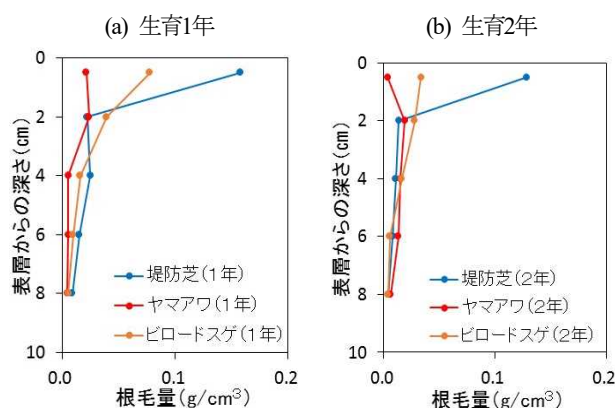


図-23 根毛量の鉛直分布

表-17 各植生の深さ3cmまでの根毛量σ₀とα

ス	植生名	根毛量σ ₀ (g/cm ³)	α α = -50σ ₀ ⁴
e1	外来堤防芝1年	0.067	5.65
e2	ヤマアワ1年	0.023	7.85
e3	ビロードスゲ1年	0.052	6.40
e4	外来堤防芝2年	0.052	6.40
e5	ヤマアワ2年	0.014	8.30
e6	ビロードスゲ2年	0.030	7.50

る。

6.3.3 耐侵食試験結果

耐侵食実験通水中では、流水によって地表面が侵食されるが、高速流により葉や茎が下流方向へ倒伏する状況が確認できた。また侵食の進行に伴い地中の根や地下茎が地表面を覆っているのが確認できた。実験終了後に植生ピット斜め上から撮影した写真を写真-4に、実験結果の概要を表-18に、実験終了時の平均侵食深と最大侵食深を図-28に示す。図-28で最大侵食深が0.28mとなっているのは、侵食が植生ピット底面まで達したことを表す。



写真-2 根系強度計

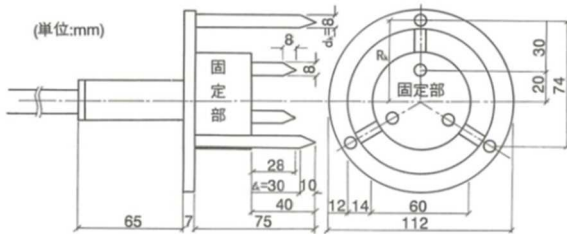


図-24 根系強度計の先端部分 (文献⁶⁾ から転記)

(a) Case1 : 外来堤防芝生育1年

生育期間1年の外来堤防芝は、平均流速を4 m/sから5 m/sに上昇後8分40秒経過時点から植生が流出し始め、その後9分経過した時点で上流端部から一気に侵食し実験を終了した。実験終了時点で植生ピット内の半分程度の土砂が流出し、最大侵食深は植生ピット底面まで達した。

(b) Case2 : ヤマアワ生育1年

生育期間1年のヤマアワは、平均流速を4 m/sから5 m/sに上昇中に上流端部から一気に侵食し実験を終了した。実験終了時点で植生ピット内の半分以上の土砂が流出し、最大侵食深は植生ピット底面まで達した。

(c) Case3 : ビロードスゲ生育1年

生育期間1年のビロードスゲは、平均流速を3m/sから4 m/sに上昇開始直後から表土とともに植生が流出し始め、5分間経過した時点で上流端部から一気に侵食し実験を終了した。実験終了時点の最大侵食深は14.6 cmであった。

生育1年の植生は、植生ピットの下流端部で表土と植生が侵食され裸地化することで植生の耐侵食機能が失われ、一気に侵食した。生育1年の植生の侵食限界流速は外来堤防芝とヤマアワで4 m/s程度、ビロードスゲで3 m/s程度であった。

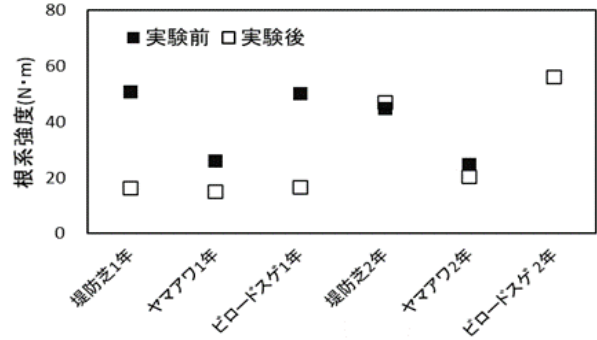


図-25 ベーン式根系強度計による根系強度

※ビロードスゲ生育2年の通水前は計測未実施

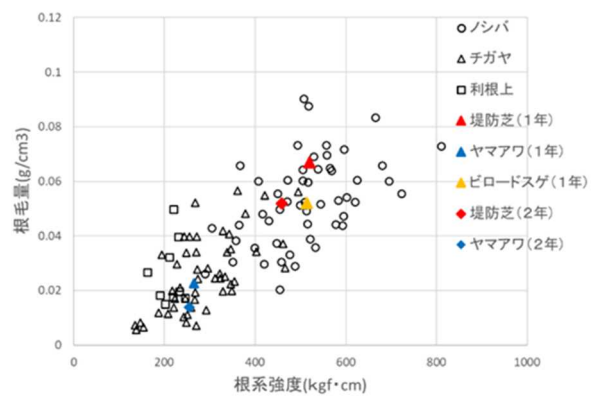


図-26 根毛量と根系強度の関係 (文献¹⁶⁾ に加筆)

(d) Case4 : 外来堤防芝生育2年

生育期間2年の外来堤防芝は、平均流速を5 m/sまで上昇後2時間通水しても大きく侵食しなかった。最大侵食深は2.8 cmであった。

(e) Case5 : ヤマアワ生育2年

生育期間2年のヤマアワは、平均流速を5 m/sまで上昇後2時間通水後に侵食形状を計測した結果、下流端部付近で大きな侵食を確認し、侵食深の平均は4.5 cm、最深部で17.5 cmであった。

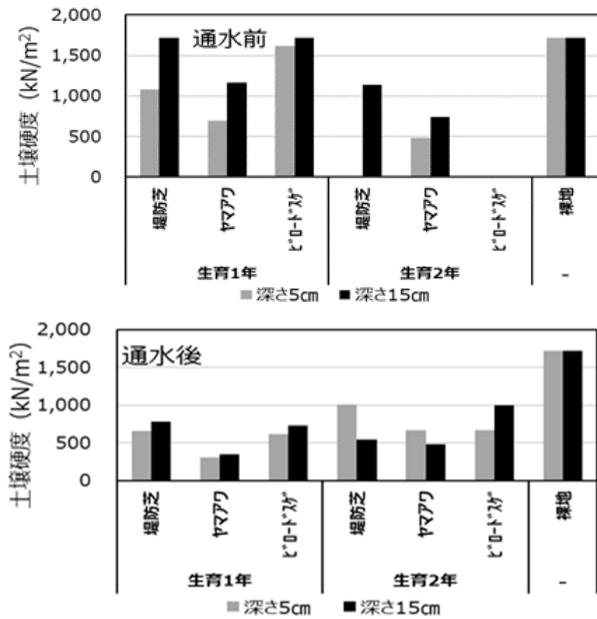
(f) Case6 : ビロードスゲ生育2年

生育期間2年のビロードスゲは、平均流速を5 m/sまで上昇後2時間通水しても大きく侵食しなかった。最大侵食深は2.7 cmであった。

(g) Case7 : 裸地

裸地は、平均流速を5 m/sまで上昇後2時間通水しても大きく侵食しなかった。最大侵食深は4.4 cmであった。

生育2年の植生及び裸地の実験の結果は、ヤマアワが平均流速5m/sで大きく侵食したものの、外来堤防芝とビロードスゲは侵食が少なく最大でも3 cm以下の侵食深であった。裸地の最大侵食深は4.4 cmであり、ヤマアワと比べて侵食深は小さかったが、外来堤防芝とビロードスゲと



※堤防芝生育2年の実験前の深さ5cmとピロースグ生育2年の実験前の深さ5cm及び15cmの計測は未実施
 ※通水前の堤防芝とピロースグ及び通水前後の裸地は測定限界値以上

図-27 土検棒の貫入試験による土壤硬度
 (上図：通水前、下図：通水後)

比べて侵食深は大きかった。これらから、生育2年の植生の侵食限界流速はヤマアワでは4 m/s以上5 m/s未満、外来堤防芝とピロースグは5 m/s程度であり、また、固く締め固めた裸地でも5 m/s程度であると考えられる。

6. 3. 4 摩擦速度と粗度係数

植生の耐侵食力を評価するためには断面平均の流速だけではなく、植生底面の流速で評価することも必要である。しかし、本実験は高流速を出すために矩形断面の閉水路で流量を制御しており、植生に接する面の流速の測定を行うことは困難である。そのため、宇多らの野芝の耐侵食性を評価した既往の研究⁹⁾において、摩擦速度に対する耐侵食性を根毛量で評価しているのならい、本研究においても植生面に働く摩擦速度を推定し、実験結果の比較・考察を行う。また、実験結果の評価の参考のため粗度係数も求めた。

摩擦速度と粗度係数は水路内底面中央4か所に設置したピエゾ管により各地点間の圧力差を計測した結果を用いて以下の手順で推定した。その際、管路内の底面のみ植生で側面は強化ガラス、上面は一部にのみ観察用の強化ガラスがはめ込まれた鋼製の板であるため、以下の手順で植生面の摩擦速度と粗度係数を推定した。

①耐侵食実験の実施に先立ち、水路内の植生ピット設置箇所を表面が滑らかな木板で塞いで通水し、植生がない状態での摩擦速度と粗度係数を求める。ピエゾメータにより計

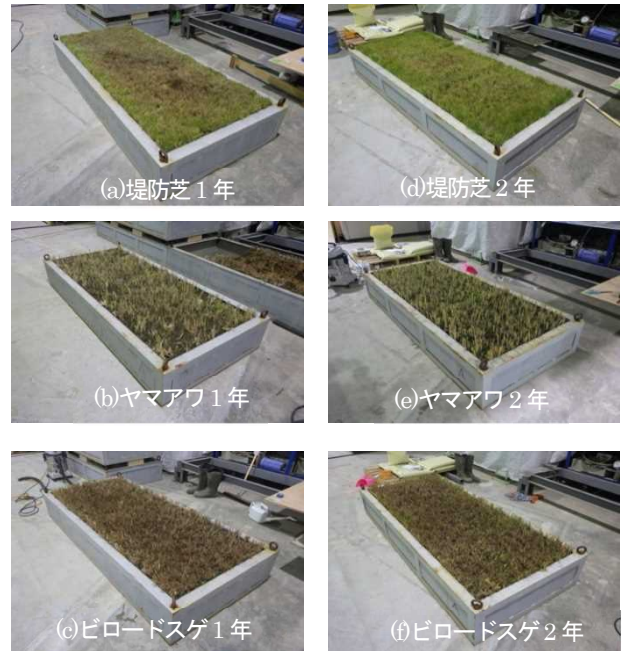


写真-3 草丈を切揃えた後の実験前の植生ピットの状況

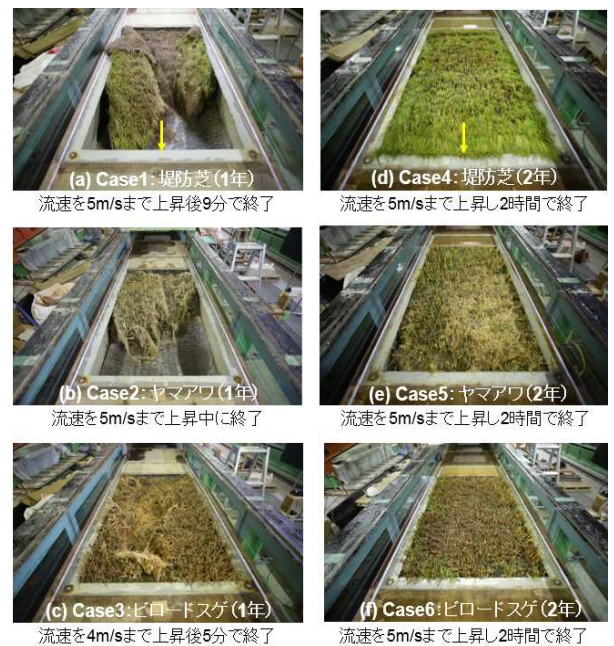


写真-4 通水試験後の植生状況（下流から望む）

表-18 実験結果の概要（最大流速と最大侵食深）

実験ケース	通水最大流速と継続時間	最大侵食深
Case1 堤防芝 1年	5m/s : 9分後に一気に侵食	0.280 m
Case2 ヤマアワ 1年	5m/s に上昇中に一気に侵食	0.280 m
Case3 ピロースグ 1年	4m/s : 5分後に一気に侵食	0.146 m
Case4 堤防芝 2年	5m/s:2時間	0.028 m
Case5 ヤマアワ 2年	5m/s:2時間	0.175 m
Case6 ピロースグ 2年	5m/s:2時間	0.027 m
Case7 裸地	5m/s:2時間	0.044 m

※侵食深の計測可能な最大値は0.280 mである。

測した全水頭と縦断距離からエネルギー勾配を計算し、式(1)により摩擦速度 U_{*1} を、式(2)より摩擦損失係数 f_1 を求める。得られた摩擦損失係数 f_1 から式(3)により粗度係数 n_1 を推定する。この時、水路の底面、側面及び上面が同一の摩擦速度及び粗度と仮定した。

$$U_{*1} = \sqrt{gRI} \quad (1)$$

$$f_1 = 2gD_h I / V^2, D_h = 4A/S \quad (2)$$

$$n_1 = \sqrt{f_1 D_h^{1/3} / 124.5} \quad (3)$$

ここで、 g :重力加速度、 R :径深、 I :エネルギー勾配、

②次に植生ピットを設置した各実験ケースの合成摩擦速度 U_{*0} と合成粗度係数 n_0 を①と同様の手法で求める。

③①②で求めた摩擦速度 U_{*0} 及び U_{*1} と粗度係数 n_1 及び n_0 を用いて式(4)、式(5)から植生底面の摩擦速度 U_{*2} 及び粗度係数 n_2 を推定する。この時、 A_1 、 A_2 は摩擦水路底面長、 S_2 は水路側面長と上面長の合計であり、 $A_1:A_2=S_1:S_2$ と仮定した。

$$U_{*2} = \sqrt{(AU_0^2 - A_1U_1^2)/A_2} \quad (4)$$

$$n_2 = ((n_0^3 S - n_1^3 S_1)/S_2)^{1/3} \quad (5)$$

図-29に推定した摩擦速度の結果を示す。図より同じ断面平均流速でも摩擦速度は植生の違いにより異なる値を示した。これは、植生ピットに充填した用土の不陸の大小や流水に対する植生の抵抗の違いから生じるものと推察される。

図-30に推定した粗度係数の結果を示す。ピット無では流速にかかわらずほぼ同一の粗度係数が得られた。裸地は流速が大きくなるに伴い粗度係数も大きくなった。これは、実験が進むにつれ徐々に侵食が進行し、底面が粗くなり粗度が大きくなったと推察される。一方、各植生の実験では、流速が大きくなるに従い粗度係数は小さくなった。これは、実験中の観察では流速が大きくなるに従い、植生の倒伏の程度も大きくなっており、これにより流水に対する植生の抵抗が徐々に低下したものと推察される。

6. 4 考察

Case1~3の生育1年の実験では、通水中に大きな侵食が生じ各植生の耐侵食限界流速以上まで試験することが出来た。生育2年のCase4とCase6及び裸地の実験では断面平均流速5 m/sを2時間通水してもわずかな侵食し

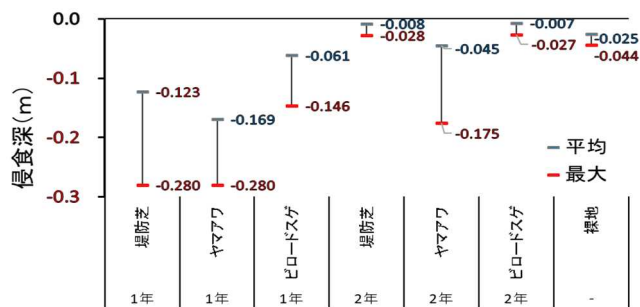


図-28 耐侵食試験後の平均侵食深と最大侵食深

D_h : 等価直径、 v : 断面平均流速、 A : 通水断面積、 S : 潤辺

か生じず、侵食限界の確認はできなかった。Case5のヤマアワの生育2年では断面平均流速5 m/sを2時間通水した後の計測で比較的大きな侵食が認められ、侵食限界の確認ができた。各試験ケースの流速に対する侵食の程度に差が生じたことについて、摩擦速度の推定値と土壌硬度や根毛量などの結果から分析する。表-19に各実験ケースの通水実験の結果及び土質、根毛量など試料の計測結果の一覧を示す。侵食限界速度は侵食が一気に進行した1段階前の流速値とし、その時の摩擦速度を侵食限界摩擦速度とした。耐侵食限界を断面平均流速でみると、生育2年の植生及び裸地と比較して生育1年の植生の方が小さい速度で限界に達した。この理由として、同一の流速下では各植生とも摩擦速度及び粗度が生育2年及び裸地と比較して生育1年の方が大きい値を示し、流水から受ける抵抗が大きかったことも要因の一つと推定される。また、植生ピットに充填した用土が生育1年と生育2年では異なる(図-21)。生育1年と比較して生育2年の用土の細粒分が多かったことも、結果に差が生じた要因の一つである可能性がある。侵食限界まで確認できた生育1年の結果から、侵食限界摩擦速度と土質及び根毛量などの関係を考察する。図-31に侵食限界速度と締固め度などについて散布図で示す。図には限界まで至らなかった生育2年と裸地のケースも併せて示す。図-31から、締固め度が大きいほど耐侵食性が高いことが確認できる。土壌硬度と明瞭な関係は見られない。

生育2年の結果では、外来堤防芝の通水中の摩擦速度が他と比べて大きくなり、侵食も少なく、限界摩擦速度の推定値が実際の耐侵食性よりかなり低く評価されている可能性があるため、外来堤防芝を除き、ヤマアワとビロードスゲとの比較を行う。侵食限界摩擦速度はビロードスゲの方が大きく、締固め度、土壌硬度及び根系強度もビロードスゲの方が大きく、 α は小さかった(根毛量が多い)。

以上のことから、固い土壌ほど程侵食力は強く、地表面近傍の根毛量が多いほど根毛層が侵食を抑制する効果が強く発揮していると考えられる。

野芝での既往の研究結果^{6),13)}と比較するため、耐侵食限界時間と摩擦速度の関係を図-32に示す。既往研究と実験方法が異なるため、断定的な評価はできないが、本研究で実施した植生は $\alpha=2\sim3$ (野芝の根毛量 $\sigma_0=0.12\sim0.14\text{ g/cm}^3$) の耐侵食力に相当し、表層から深さ 3cm までの根毛量 σ_0 が $0.02\sim0.05\text{ g/cm}^3$ 程度でも良好な状態の野芝と同等の耐侵食力を発揮する可能性があることが分かった。

6. 5 本章のまとめ

本研究では、在来種の実河川への導入に先立ち、従来の外来草本種や野芝と比較して、どの程度流水に対する耐侵食性があるのかの確認実験を行った。その結果を以下に列記する。

- ・生育1年の植生は、植生ピットの下流端部で表土と植生が侵食され裸地化することで植生の耐侵食機能が失われ一気に侵食した。生育1年の植生の侵食限界流速は平均流速で3 m/s~4 m/s程度、摩擦速度で0.46 m/s~0.56 m/sであった。
- ・一方、生育2年の植生では、ヤマアワは平均流速5 m/sで大きく侵食したが、他植生は流速5 m/sで2時間通水しても平均侵食深は1 cm以下と大きく侵食しなかった。これらから、生育2年の植生の侵食限界はヤマアワで流速 5 m/s、摩擦速度で0.57 m/s程度、外来芝とビロードスゲは流速5 m/s

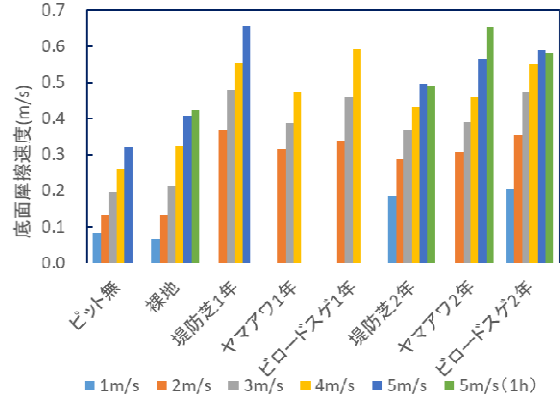


図-29 各実験ケースの流速毎の推定摩擦速度

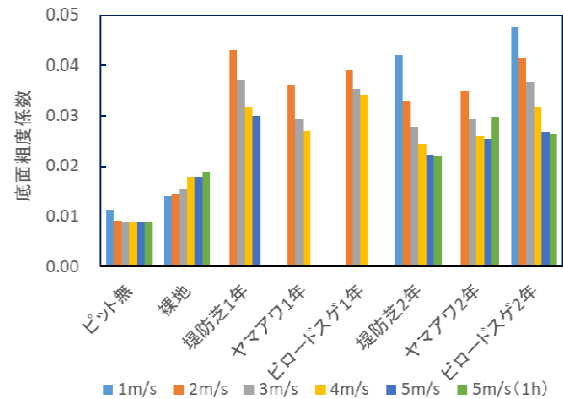


図-30 各実験ケースの流速毎の推定粗度係数

以上、摩擦速度で0.5 m/s以上であり、良好な状態の野芝と同等の耐侵食力があると考えられる。

表-19 実験結果の一覧

実験ケース	侵食限界速度 m/s	侵食限界摩擦速度 m/s	限界侵食速度での通水可能時間(推定値)	締固め度 %	細粒分含有率 %	根毛量 σ_0 g/cm^3	α	根系強度(通水前) $\text{kgf}\cdot\text{cm}$	土壌硬度(深度15cm) kgf/cm^2
Case1堤防芝1年	4.0	0.556	60分以上	81%	2%	0.067	5.65	520	17.56
Case2ヤマアワ1年	4.0	0.475	60分以上	78%	2%	0.023	7.85	265	11.91
Case3ビロードスゲ1年	3.0	0.461	60分以上	75%	2%	0.052	6.40	513	17.56
Case4堤防芝2年	5.0以上	0.496以上	120分以上	75%	16%	0.052	6.40	459	11.62
Case5ヤマアワ2年	5.0	0.565	60分程度	69%	16%	0.014	8.30	255	7.56
Case6ビロードスゲ2年	5.0以上	0.590以上	120分以上	79%	16%	0.030	7.50	574	10.17
Case7裸地	5.0以上	0.423以上	120分以上	90%	2%	-	-	-	17.56

※ Case4,6,7は流速は耐侵食限界まで達していない

※ Case6ビロードスゲ2年生の根系強度及び土壌硬度は通水実験後の計測値

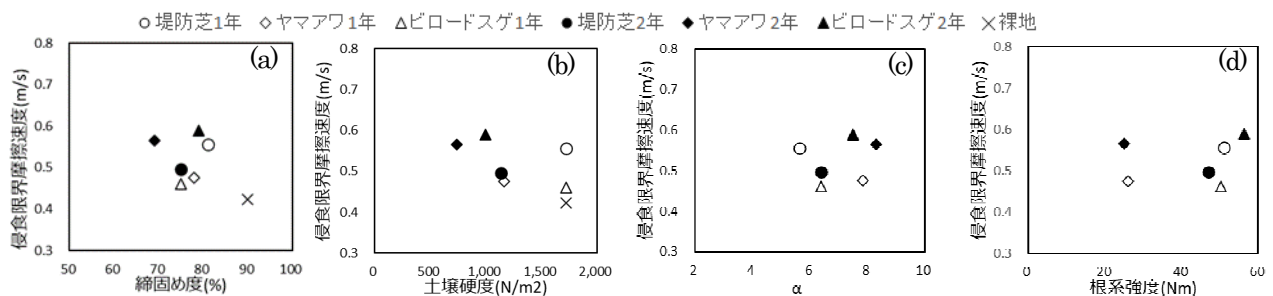


図-31 各実験ケースの侵食限界摩擦速度と(a)締固め度、(b)土壌硬度、(c) α 、(d)根系強度との関係

- ・他種と比較してヤマアワの耐侵食性が低い評価となった要因として、根毛量が少ないことが考えられる。
- ・各草種とも、生育1年と比較して2年の方が根毛量は少ないものの、侵食限界速度は大きく、侵食限界摩擦速度は同等かそれ以上であった。これは、用土の細粒分含有率や、植生ピット表面の不陸状態が異なることなども要因であると推察される。

7. おわりに

本研究では、在来植生種を用いた堤防植生への導入可能性と耐侵食性を主眼に調査、実験を行ってきた。北海道は積雪寒冷地であり、場所によっては気温がマイナス20度を下回るだけでなく、数か月もの間、堤防が雪に覆われるなど過酷な環境下にあるといえる。本研究では、千歳川、及び我が国最北端の一級河川天塩川下流部において、ヨシ、ビロードスゲ、ヤマアワ、オオヨモギの4種が積雪寒冷地の堤防植生に適する可能性が高いことが把握された。しかしながら、北海道内でも比較的温暖な道南地方や、降雪が比較的少ないオホーツク海側などで、堤防植生に適した植生は異なる可能性がある。また、在来種の種子の採取・供給・導入方法の課題もあり、今後も継続して調査・検討を進めていく必要性は高い。また、あくまで実験水路での結果ではあるが、植生ピットにより2年育成したビロードスゲと外来種芝が流速5m/s、2時間までの耐侵食性を保持することが把握された。今後、堤防植生への在来種の導入にあたっては、緊急性や導入コストを勘案し、比較的治水安全度に余裕のある地域や都市区間など頻りに維持管理を行う地域など、施工を行う地域に適した合理的な指針を定めていく必要がある。

参考文献

- 1) (財) 国土開発技術研究センター編：解説・河川管理施設等構造令、pp. 125、2000。
- 2) 矢部浩規ら：寒冷地域に適応した堤防法面植生に関する研究、平成25年度土木研究所成果報告書、<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-seika/2013/report-seika2013.html>
- 3) 谷瀬敦、杉原幸樹、新目竜一：千歳川堤防植生試験地において確認された草種の堤防植生としての適正検討、土木学会第72回年次学術講演会、pp.223-224、2017
- 4) 北海道ブルーリスト2010、<http://bluelist.pref.hokkaido.lg.jp/>
- 5) 環境省：我が国の生態系等に被害を及ぼす恐れのある外来種リスト、<https://www.env.go.jp/nature/intro/>

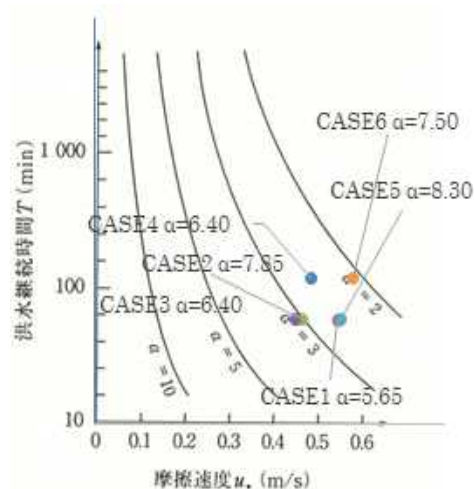


図-32 根毛量と根系強度の関係 (文献¹⁷⁾ に加筆)

2outline/iaslist.html (2020年〇月〇日確認)

- 6) 宇多高明ら：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動、土木研究所資料第3489号、1997。
- 7) 矢部浩規、丸山政浩、林田寿文、数馬田貢：在来植生を用いた堤防法面緑化過程に関する研究、土木学会第40回環境システム研究論文発表講演集、pp. 361-366、2012。
- 8) 気象庁。“過去の気象データ検索”、気象庁ホームページ、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2020年8月13日確認)
- 9) 京都府農林水産部農産流通課(2002) 持続的な農業推進のための土づくり推進指導資料、74 pp。
- 10) 北村文雄：公共緑地の芝生、ソフトサイエンス社、p.253、1994。
- 11) JA 全農肥料農薬部。“土壌診断なるほどガイド”、全農ホームページ、https://www.zennoh.or.jp/activity/hiryo_sehi/pdf/gijyutu_1-01b.pdf (2020年8月13日確認)
- 12) 谷瀬敦、杉原幸樹、新目竜一：寒冷地における在来種による堤防法面緑化試験報告、日本緑化工学会誌、43(1)、pp.279-282、2017。
- 13) 福岡 捷二・渡辺 和足・柿沼 孝治：堤防芝の流水に対する侵食抵抗、土木学会論文集、No.491/II-27、pp.31-40、1994。
- 14) 服部 敦・平館 治・藤田 光一・宇多 高明・関口 利昭・宮下 光泰：堤防の耐侵食性の評価方法に関する研究、第2回河道の水理と河川環境シンポジウム論文集、pp.73-80、1995。
- 15) 中陳 実咲希・中村 大・川口 貴之・川尻 峻三・山下 聡・山口 滉平：X線CTスキャンを活用した土の侵食抵抗試験に関する基礎的研究、河川技術論文集、第25巻、pp.505-510、2019。
- 16) 佐々木 寧・戸谷 英雄・石橋 祥宏・伊坂 充・平田 真二：堤防植生の特性と堤防植生管理計画、河川環境総合研究所報告第6号、pp.69-105、2000。

- 17) 独立行政法人 土木研究所 材料地盤研究グループ 地質チーム：土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル（案）、土木研究所資料第 4176 号、2010.7.
- 18) 土木学会水工学委員会：水理公式集（2018 年版）、2019.

STUDIES ON THE PLANTING METHOD AND MAINTENANCE OF NATIVE VEGETATION ON LEVEES

Research Period : FY2014-2019

Research Team : Cold Region Hydraulic and Aquatic Environment
Engineering Research Group
(Watershed Environmental Engineering)

Author : MURAYAMA Masaaki
TANISE Atsushi,
MURAKAMI Yasuhiro
SHINME Ryuichi
SATO Yoshiaki

Abstract : Non-native grasses are used for slope revegetation of river banks in Hokkaido, Japan, which can be covered early in cooler climates. In recent years, it has become desirable to replace non-native species with native species for slope revegetation in order to conserve native species, but it has been a challenge to find out which species are applicable to cold regions and which methods to introduce them.

In this study, field tests were conducted to select native species suitable for slope revegetation of embankments in cold regions and to establish a method for introducing these species.

The results showed that reeds, velvet sedge, foxtail, and Japanese mugwort could be used for slope revegetation of the embankment, and that the introduction of reeds, velvet sedge, and Japanese mugwort seedlings sprayed with wormwood seeds or used in combination with vegetation sheeting was suitable.

Key words : Levee vegetation, native vegetation species, erosion-resistant, field planting test