

日本における気候変動に対する地盤工学的適応策の事例分析と考察

安原一哉¹・足立雅樹²・山田岳峰³・岸田隆夫⁴・浅田寛喜⁵・小浪岳治⁶・小林 薫⁷
¹(一社)地域国土強靱化研究所・²みらい建設工業(株)・³鹿島建設(株)・⁴メトリー技術研究所(株)・
⁵熊本大学・⁶岡三リビング(株)・⁷茨城大学大学院

概要

令和4年度に日本における気候変動適応策の実情調査を行った。調査内容には、事業者が取り組んでいる適応策が約 1/3 (439 件中 137 件) 含まれており、日本における気候適応策に関する要素技術は民間組織が受けもっていることを指摘した。その中には土や地盤に関わる技術に言及したものもあるが極めて少ないことが分かった。そのなかから、地盤工学に関係あるものを抽出して考察を加えた。

その結果、産業廃棄物や植物資源などの排出資源を有効利用することによって、シナジー効果のある適応策技術の展開の可能性があることを指摘した。また、過去のシンポジウム等で公表されている研究の中から、調査対象以外の有望な具体的な事例も併せて紹介し、この事例も含めて地盤工学的気候変動適応策の今後の展望を述べた。

目次

1. はじめに	2
2. これまでに取り組まれてきた地盤工学的対応策	2
3. 地盤工学的気候変動緩和策	5
4. 地盤工学的気候変動適応策	6
5. シナジー効果のある適応策の事例	9
6. 今後が期待されるシナジー効果のある適応策の事例	10
7. まとめ	15

Geotechnical contribution to climate change adaptation: case studies and their consideration

Kazuya YASUHARA¹, Takao KISHIDA², Masaki ADACHI³, Hiroyoshi ASADA⁴,
 Takemine YAMADA⁵, Takeharu KONAMI⁶, and Kaoru KOBAYASHI⁷

- 1 Local Resilience Research Institute, Ibaraki, Japan
- 2 Local Resilience Research Institute, Ibaraki, Japan
- 3 Mirai Construction Co., LTD, Tokyo, Japan
- 4 Metry Research Institute Co. LTD, Saitama, Japan
- 5 Kumamoto University, Kumamoto, Japan
- 6 Okasan Livic Co. LTD, Tokyo, Japan
- 7 Ibaraki University, Ibaraki Japan

Technical Report of Local Resilience Research Institute, Vol. 4, No.2, pp. 1-17, 2026.3.

Abstract

After reviewing information published by public institutions in Japan, it was found that key technologies related to climate adaptation measures are mainly handled by the private sector, but very few of these refer to technologies related to soils and foundations. Among these, items related to geotechnical engineering were extracted and examined to clarify the roles and responsibilities within these engineering fields. Additionally, promising specific examples beyond the scope of the current survey, which were presented at past symposiums and similar events, were also introduced. Including these cases, the prospects for geotechnical engineering-based climate change adaptation measures were discussed. It is emphasized that the utilization of emission resources produced by industries, fisheries, and agricultural and forestry activities is one of the promising technologies, from the viewpoint of exerting synergistic and multi-purpose effects on both disaster reduction and environmental impact mitigation.

Key words: climate change adaptation, disaster risk reduction, emission resource, green infrastructure, synergy effect

1. はじめに

令和4年度に日本における気候変動適応策の実情調査（2022年11月30日現在）を行った、調査内容には、事業者が取り組んでいる適応策が約1/3（439件中137件）含まれており、日本における気候適応策に関する要素技術は民間組織が受けもっていること、また、その中には土や地盤に関わる技術に言及したものもあるが極めて少ないことが分かった。そのなかから、地盤工学に関係あるものを抽出して考察を加えた。また、過去のシンポジウム等で公表されている研究の中から、調査対象以外の有望な具体的な事例も紹介し、この事例も含めて地盤工学的気候変動適応策の今後の展望を述べた。

2. これまでに取り組まれてきた地盤工学的対応策

周知のように、気候変動に対する対応策は、カーボンニュートラルに代表される緩和策とレジリエンス強化に代表される適応策に分けられるが、図-1に示したように、緩和策と適応策を融合する施策や技術が求められている。

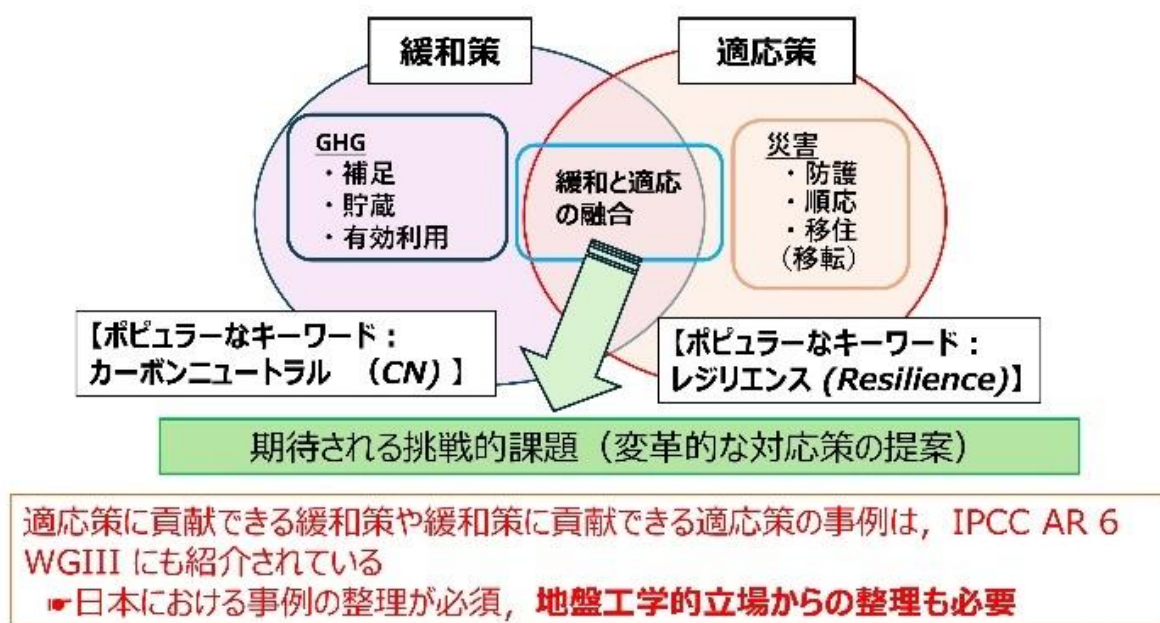


図-1 気候変動緩和策、適応策と二つの融合策 1),2),3),4)

上記のことを念頭において地盤工学の分野で取り組まれてきた学会等をレビューしてみると、国際学会で、“気候変動”のセッションが取りあげられたのは、2023年6月ギリシャで開かれた第9回国際環境地盤工学会議（9th ICGE）が最初ではないかと思われる²⁾。一方、国内では、同じ2023年11月に熊本で開かれた第15回環境地盤工学シンポジウムにおいてであると思われる。ただ、第15回環境地盤工学シンポジウムのセッションの設定に混乱があると思われるので、このシンポジウムにおける発表論文の中で、気候変動に関連すると判断されたものを抽出して筆者が整理し直したものが表-1である。これをみると、カーボンニュートラル（CN）を念頭に置いたと思われる緩和策の取組みが多いことがわかる。加えて、CO₂に代表される温室効果ガスの低減だけでなく地盤改良など、複合的な効果を目指したいいくつかの研究は、後述するシナジー効果を目指した気候変動対応策として注目すべきである。会のプログラムに見られた分類は発表者の提示したキーワードに従って分類したものと想像するが、12.植生・微生物、13. 斜面安定、14.CO₂固定・貯留、15.気候変動・持続可能性の4セッションに分散している。これを筆者らは、表-1で【気候変動対応】セッションと【持続可能性（SDGs）】セッションの二つにまとめてみたが、この方がすっきりすると思われる。このうち、CNに含まれるものが学会分類の「14.CO₂固定・貯留」である。一方で、気候変動に対する対応では、“緩和策と適応策を両輪として考えていく必要がある”という観点³⁾から考察してみると、緩和策に比べて、適応策に関する研究が少ないことがわかる。適応策に関する地盤工学の知見を活かした研究を増やすとともに、(i) 適応策に貢献できる緩和策、(ii) 緩和策にも貢献できる適応策も念頭に置いた研究の推進が望まれる。

表-1 第15回環境地盤工学シンポジウム（2023、熊本）における気候変動関連発表論文の再整理²⁾

整理番号	セッション名（筆者提案）	サブセッション名（筆者提案）	論文タイトル
1	【持続可能性（SDGs）】	17. パートナーシップ	合意形成の過程で行われるコミュニケーションの要点と課題
2		4. 教育	環境問題や防災・減災に貢献する人材育成を目的とした中空泥だんご出前教室の概論と事例
3	【気候変動対応】	緩和策	環境配慮型地盤圧入材を用いた「地盤改良をしながらCO ₂ を地盤中に貯留する技術」の開発
4			処分場CCSに向けたCO ₂ 固定化副産物の性能評価とカーボンキャプチャー効果の推算
5			遊離Caを保有する産業副産物を活用したCO ₂ 固定化における反応メカニズムの実験的考察とpH調整による反応促進効果
6			破碎コンクリートを用いた埋戻し地盤の二酸化炭素固定化に関する研究
7			管理型海面処分場の埋戻し地盤を模擬した二酸化炭素固定実験
8			二酸化炭素ハイドレートによるCO ₂ 貯留と地盤の強度増加に関する研究
9			建設発生土の曝気養生による二酸化炭素固定化技術の効果検証
10			回転式ストーカ主灰の地盤材料特性及び炭素固定能力の評価
11			簡易炭化装置による廃棄物系バイオマスの炭化と吸水性材料としての活用
12			CO ₂ 吸着させた木質バイオマス灰を添加した土壌からの元素溶出挙動とコマツナへの生育応答
13			適応策
14	気候変動対応策を通じた地盤工学のIPCCへの貢献		

表-2 適応策に貢献できる緩和策の例⁴⁾

政策行動	相互関係の説明
<p>◆グリーンインフラストラクチャー: 複数の生態系サービスと利点を提供する -炭素の貯蔵と隔離 -エネルギー消費の削減</p>	<p>◆洪水管理を含む適応の利益 ◆環境教育を含む社会的共益</p>
<p>◆REDD+^{*1} 戦略 -炭素の貯蔵と隔離への貢献 -再生可能エネルギーの開発</p>	<p>◆貧困削減や生態系サービスなどの社会的利益を生み出すことを目指す</p>
<p>◆家庭のエネルギー効率と再生可能エネルギー施策: エネルギー政策は社会経済発展に寄与する。 -エネルギー使用の削減</p>	<p>エネルギー効率 (EE) 向上 ➢エネルギー消費を最小限に抑え、競争力レベルを向上させ、炭素フットプリント^{*2}を削減するための実現可能で持続可能な解決策として浮上</p>
<p><備考> *1 REDD+: 発展途上国における森林伐採と森林劣化からの排出削減 *2 炭素フットプリント: 製品やサービスのライフサイクル全体を通して排出される温室効果ガスの量をCO₂排出量に換算して表示する仕組み</p>	

表-3 緩和策に貢献できる適応策の例⁴⁾

Adaptation That Contributes to Mitigation (after IPCC AR6 WGIII)	
政策行動	相互関係の説明
<p>◆沿岸適応とブルーカーボン ➢炭素の貯蔵と隔離に貢献する</p>	<p>◆生息地と生態系の保護は、コミュニティを極端な事象から守り、食料安全保障を高め、生態系サービスを提供する</p>
<p>◆自然に基づく解決策 (Nbs) ➢個別およびクラスター化された樹木を使用して、炭素の貯蔵と隔離に貢献する</p>	<p>◆Nbsは、社会生態系のレジリエンスを構築するためのさまざまな他のアプローチと共通の要素を持ち、補完し合う</p>
<p>◆生態系に基づく適応 (EbA)</p>	<p>◆EbAは、森林、草地、湿地、マングローブ、またはサンゴ礁などの生態系の保全、適切な管理、及び遅延を含む</p>
<p>◆都市の緑化 ➢炭素の貯蔵と隔離に貢献する ➢エネルギー使用の削減</p>	<p>◆都市の造林・再造林は、冷却効果と水の保持を生み出し、同時に大気中の二酸化炭素を削減するのに役立つ</p> <p>◆グリーンウォールと屋上緑化は、(i) 建物のエネルギー効率を高め、(ii) 水の流出を減少させ、(iii) 建物の断熱を提供する</p>
<p>◆都市レベルの気候適応計画 ➢炭素の貯蔵と隔離に貢献する ➢エネルギー使用の削減 ➢再生可能エネルギー</p>	<p>◆気候行動計画を持つ都市は、都市の空間計画や能力構築の取り組みを含む</p> <p>◆都市での気候変動対策によって生み出される共益の一例は洪水水を減少させる地下水貯蔵施設である</p>

地盤工学には直接関わるものではないが、IPCC AR 6 WGIII (2022)⁴⁾にもいくつか紹介されている。表-2 と表-3 に一部をまとめている。これらは、気候変動対応施策や技術の展開によって社会に大きな変革（トランスフォーメーション）をもたらす C²X（Climate Change Transformation）技術として開発の

推進が国際的にも大いに期待されていると判断される²⁾。なお、C²Xは、Climate Changeに関する方策と技術をもって社会の変革を目指すことを意味していることから、DX（Digital Transformation）やGX（Green Transformation）とは定義を異にしている。また、この略語は、筆者らのネーミングによるもので、広く認知されているものではない。

なお、シナジー効果（Synergy effect）のある対応策には、トレードオフ（Trade-off）や誤った適応（Mal-adaptation）をもたらすものもあるので注意を要する、表-4にはその事例を示している。

表-4 トレードオフ（利益相反）のある対応策の例⁴⁾

政策行動	相互関係の説明
◆土地利用戦略：緩和または適応のために考慮された隔離は、土地計画において対立を引き起こす可能性がある	◆土地の密度や利用の増加、土地利用の混合、交通接続性の向上は、気候ストレスを増加させ、緑のオープンスペースを減少させる可能性がある。 ➢これにより、都市のヒートアイランドの影響が増し、人間の健康に悪影響を及ぼし、人口を沿岸の浸水にさらす可能性がある。
◆低炭素、ネットゼロ、気候変動に強い建築基準が、手頃な価格を考慮していない場合がある	◆トレードオフは、個別ではなく包括的に実施されるべき政策メカニズムに関連している可能性がある。しかし、異なる行政レベルや機関が横断的な調整への障壁を生むことがある。

このことを考慮して、IPCC AR6（第6次報告書）では、気候変動リスクの中に図-2に示すように緩和策や適応策への対応をリスクの関数の一つに取り入れている。

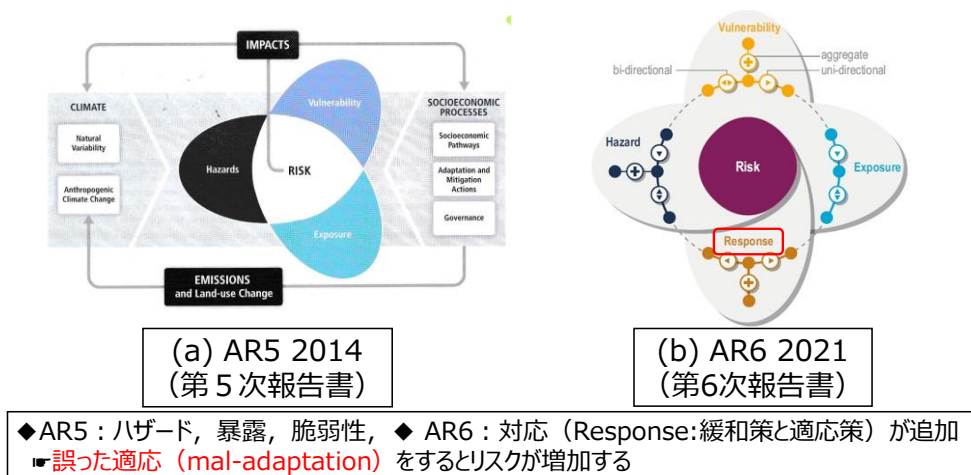


図-2 気候変動リスクの定義（AR5からAR6へ定義の変更）⁴⁾

3. 地盤工学的気候変動緩和策

表-5は、これまでの記述を踏まえて地盤工学の立場から考えられる気候変動緩和策をまとめてみたものである。最近よく聞かれるようになったカーボンニュートラル（CN）は、緩和策を構成する。貯蔵策・吸収策と削減策を実現させるための方策と理解される。地盤工学の立場からの緩和策としては、温暖化効果ガス（GHGs）の低減（CNへの貢献）のために、後述する排出資源の有効利用は可能性の高い技術として期待される。

表-5 地盤工学的気候変動緩和策の概要（参考文献3）に加筆）

対応策	対応策の例	施策・技術の例	解決すべき課題例
貯蔵策・ 吸収策	GHG の貯蔵	地中貯蔵（CDR）	・土や植物などの自然生態系にCO ₂ などのGHGが及ぼす影響の解明 ・地下水への影響評価
		CO ₂ 回収貯留（CCS）	
	森林整備などによる植物のGHGの吸収	マングローブ保全技術	・適応策（地盤補強と地盤改良）との組み合わせ ・現地におけるパイロットテストの実施
		バイオマスCCS技術	・土壌や植物などの自然生態系への影響解明
削減策	省エネルギー		
	代替エネルギー&再生可能エネルギーの開発・普及・拡大	太陽光利用	・気候変動に起因する外力（巨大台風、集中豪雨など）に対する安定性の評価
		風力発電	
		地中熱利用	・地下水質への影響評価
		地熱発電	・大容量の発電所ができていく
	新たなエネルギー開発	メタンハイドレート	・漁業や水産業への影響評価 ・深海底の生態系に及ぼす影響評価
水素エネルギー		・低コスト化 ・長期にわたる技術開発と普及戦略構築 ・社会的受容性の拡大	

ここで言う排出資源とは、小峯⁹⁾によって提案された地盤工学的な適用が可能な廃棄物（主として、産業廃棄物、一部、災害廃棄物も含む）を指している。表-6 はこれらに該当する排出資源の例をまとめたものである。これらの排出資源は地盤改良などの現地で利用された実績はあるが、気候変動緩和策や適応策を念頭に置いて実務で適用された例は多くない。

表-6 地盤工学的気候変動対応策に資すると考えられる排出資源例²⁾

材料	想定される適応場面例	適用分野
石炭灰	基礎、盛土、空洞充填	適応（緩和の可能性もある）
鋳滓（スラグ）	廃棄物施設の覆土、キャピラリーバリア、砕石杭	緩和と適応の相乗
廃棄タイヤ	河川堤防や海岸堤防の後背地の防御	適応技術、グリフラ
廃コンクリート	擁壁の裏込め 砕石杭	緩和と適応の相乗
破碎貝殻 （特に、ホタテ貝）	河川堤防補強	緩和と適応の相乗
木材（間伐材）	軟弱地盤改良・補強	緩和技術、地盤改良技術、グリフラ
竹材	舗装、土構造物補強	緩和技術、地盤改良・補強技術、グリフラ

（注）グリフラは、グリーンインフラストラクチャー（Green Infrastructure）の略

排出資源の利用とともに期待されるのがグリーンインフラストラクチャー（GI）である。植物によっては、GHGs を吸着し、貯蔵できる可能性があるものがあり、災害低減などにも資することによって、気候変動緩和策と適応策への相乗効果を発揮するものがあると考えられるが、十分な整理が行われていない。例えば、GIについては、国土交通省の“グリーンインフラ官民連携プラットフォーム”¹⁰⁾があるが、気候変動との関係性を集約した記述は少ないようである。

4. 地盤工学的気候変動適応策

4.1 地盤工学的気候変動適応策の概要

気候変動適応策は周知のように、防護、順応、退避（移転や移住も含む）に分けられる。地盤工学の分野におけるこれらに該当する技術例を表-7 にまとめている。後述するように、地盤災害についていえば、水害における流域治水⁶⁾のような革新的&システム転換的な施策や技術が期待される。

表-7 地盤工学的気候変動適応策と緩和策との融合例⁷⁾

対応策	具体的な対応策例	地盤工学的対応策例
適応策	防護 ・気候変動の影響を引き起こす外力の制御	・堤防のかさ上げ ・ジオンセティックスや地盤改良技術を援用した多重防護施設 ・事前対応に資する強化復旧技術 ・地震との複合影響を考慮した強靱な補強技術
	順応 ・気候変動の影響をある程度許容して対応する	・粘り強い土構造物の構築 ・損傷してもすぐ取り換えられる壁体構造物
	退避 ・気候変動の影響を受ける地域からの撤退・移住	・ICTを利用したモニタリングシステム ・ICTを利用した早期警戒システム
緩和策と適応策の融合	・ヒートアイランド対策技術の開発 ・極端化事象に対抗できるコンパクトシティの実現 ・気候予測に基づく早期警戒システム	・GHGsを吸着できる地盤材料の防災施設への適用 ・間伐材による二酸化炭素の吸着・固定 ・ECO-DRR とCCA との融合

なお、災害に限っていえば、従来の防災・減災との関係は図-3 のようになると考えられるが、二つの分野（地球環境分野と防災・減災分野）の相互理解は必ずしも成功しているとは言えない。

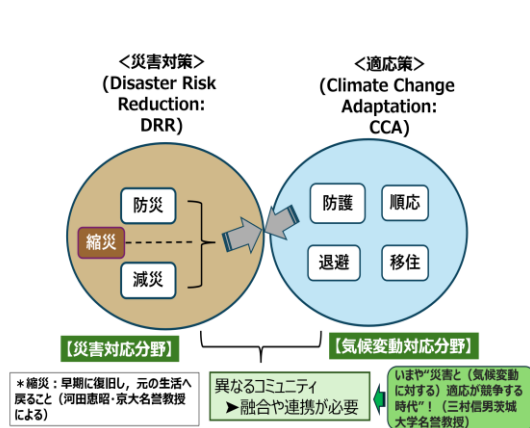


図-3 DRR と CCA との関係

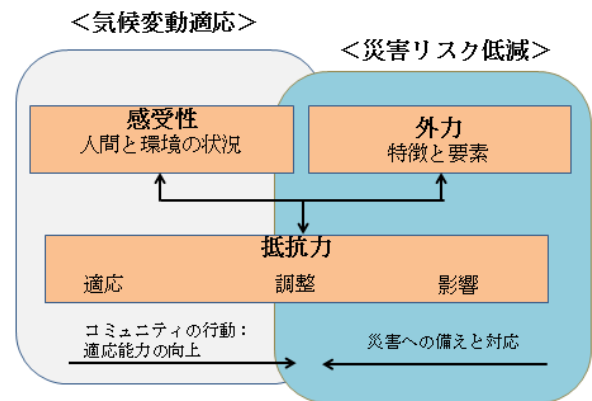


図-4 気候変動適応と災害リスク(Turner et al., 2003)³¹⁾

図-3 における災害対策と気候変動適応策は、表現は異なっているが、相互の関係は図-4 のようになる。また、災害低減 (DRR) と気候変動適応 (CCA) で使用されている用語は、表-8 に示すようにそれぞれ相互に関連づけられる。

表-8 DRR と CCA との関係

災害分野	気候変動分野	関連するキーワード
防災 (Prevention)	防護 (Protection)	インフラの強化、主として、ハードウェアの構築 (グレーインフラ、グリーンインフラなど)
減災 (Reduction)	順応 (Accomodation)	避難情報、避難経路、被災住宅
縮災 (Recovery and reconstruction)	避難 (Evacuation)	被災しても、迅速に回復できるインフラ構築やシステムづくり
	移住 (Relocation)	強靱なまちづくり

4.2 気候変動適応策データベースにおける地盤工学的適応策^{7) 8) 9)}

冒頭でも述べたように、令和4年度に、日本における気候変動適応策の実情調査を行った。調査結果の中には、事業者が取り組んでいる適応策が約1/3（439件中137件）が含まれており、日本における気候適応策に関する要素技術は主として民間組織が受けもっていることがわかった。ただ、その中には、土、土質、地盤に関わる技術は極めて少ない。その中から、地盤工学に関係あるものを抽出して考察を加え、適応策の実情と今後の展望を述べた。

4.2.1 情報の集約と整理方法

情報集約対象は、公的機関のホームページにアップされている適応策で、これらを政府機関、自治体および事業者別に分類した。情報の集約と分析の手順は図-5に示すとおりである。各適応策の内容の詳細は「個票」に記載した。「個票」は結果的に439件であったが、機関別の個数の割合は図-5に示すとおりである。これによれば、政府機関と自治体はほぼ同じ割合だが、事業者の取り組みはやや少ない。このうち事業者の適応策は、国立環境研究所のA-PLATにおける「事業者の適応」¹⁰⁾と「経産省適応グッドプラクティス2022」¹¹⁾から情報集約している。

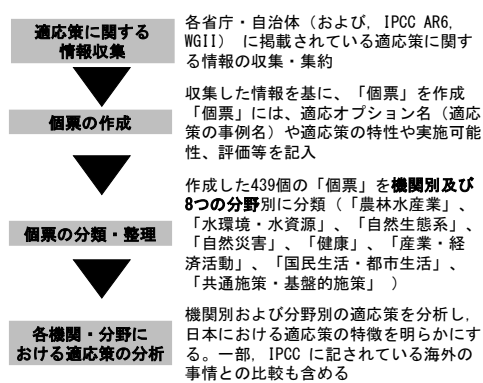


図-5 情報集約と分析の方法

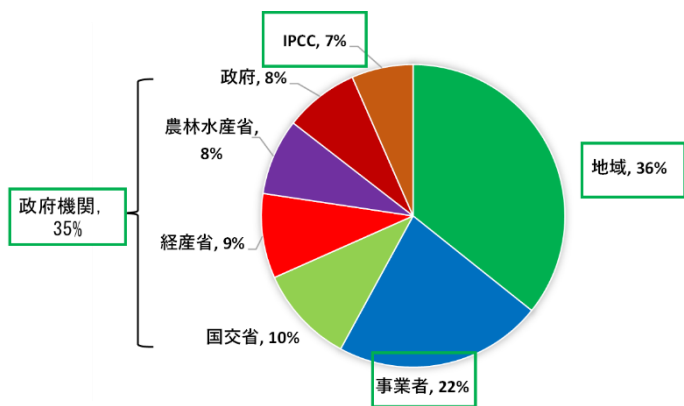


図-6 適応策の機関別の個数の割合

4.2.2 適応策の分析

周知のように、気候変動適応策の分野オプションは、日本政府によって、(1)農業・林業・水産業・畜産業、(2)水環境・水資源、(3)自然生態系、(4)自然災害・沿岸域、(5)健康、(6)産業・経済活動、(8)国民生活に分けられている。本研究では、これに、(8)共通施策・基盤的施策を追加して分析を行った。その結果を示したものが図-7である。これによれば、日本の気候変動適応策は、①自然災害・沿岸域、②農林・水産業、③健康の3分野に力点が置かれていることがわかる。一方、適応策のカテゴリー別の分析結果を分布を示した図-8によれば、a. 技術的対策が最も多く、b. 社会的対策とc. 空間計画・インフラが続いている。

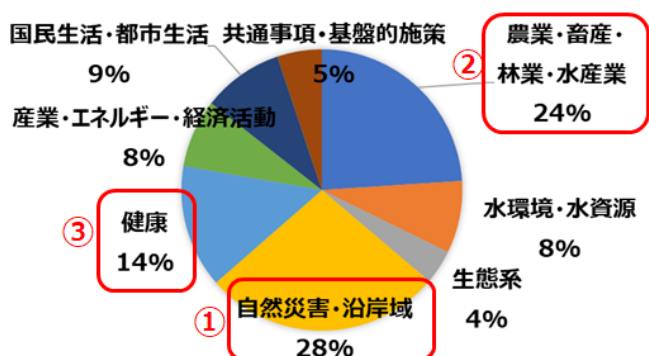


図-6 適応策の分野オプション分布

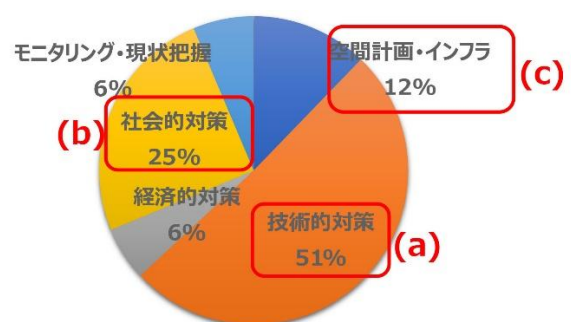


図-7 適応策のカテゴリー別の分析結果

4.2.3 地盤工学の立場からみた気候変動適応策

今回調査した気候変動適応策のうち、土、土壌、土質、地盤をキーワードにした事例をまとめたものが表-9である。事例数は少ないが下記のような特徴がみられる。

- 1) 適応策の分野オプション：11件すべて、(4)自然災害・沿岸域に関するものである。
- 2) 適応策カテゴリー：ハードウェア、ソフトウェアを含めて、a. 技術的対策が多くを占めているが、e. モニタリング・現状把握に属するものも2件取り上げられている。
- 3) 適応策の革新性&システム転換性：IPCC等で適応策に求められていることの一つに、革新性&システム転換性がある。適応策の革新性評価方法としては、Klein et al.¹²⁾ や Fedele et al.^{13), 14)} による方法があるが、ここでは、Kleinらの方法を採用した。彼らによると、革新性&システム転換性とは、①「新しい設計条件や新しい考え方を含むもの」、②「制度的に革新的なもの」、③「対策手法が画期的なもの」としているが、筆者らは、「④実施可能性の高いもの」を加えた。この評価項目に2点ずつ与えて、8点満点として、本データベースの事例を定量化した。その結果、最高点の6点のものが整理番号2, 4, 5, 7, 11であった。これらの中身を見ると、適応オプションの④自然災害・沿岸域に資するだけでなく、他の課題にも適応できるという“多機能性”を有していることから“シナジー効果”が適応策の革新性&システム転換性の中で重要な位置を占めることがわかる。加えて、整理番号6や10にも見られるように、“排出資源”の有効利用を試みているものが多いのは、日本における地盤工学的適応策の革新性&システム転換性の特徴のひとつと考えられる。

表-9 分析に基づく地盤工学的適応策の事例

整理番号	適応オプション名	取得先	適応分野	適応策カテゴリー	内容 (革新性含む)	評点	重要なキーワード
1	防災・減災に役立つ情報サービス	事業者 (A-PLAT)	自然災害 ・沿岸域	モニタリング ・現状把握	・自然災害リスクの調査から、予測診断、被害想定やリスク評価、リスク低減策の検討まで、防災・減災の実現に向けた 総合的なサービス で、“斜面崩壊対策サービス”が含まれている。	2	総合的な災害情報サービス
2	地域の防災力を強化する災害情報システム	事業者 (A-PLAT)	自然災害 ・沿岸域	モニタリング ・現状把握	・災害の段階プロセス(①平常時、②警戒時、③復旧時)を通じてトータルに防災に対する課題への解決策に応じた機能を有する地域の防災力を強化する 総合災害情報システム である。	6	総合災害情報システム
3	ネットワークカメラを活用した自然災害への事前対応システム	事業者 (A-PLAT)	自然災害 ・沿岸域	技術的対策 (ソフト)	・土砂災害に対しては、河川のリアルタイム監視によって、高解像度カメラと水分量センサーの連携を通じて、土砂に水分が入っていく過程で変化する土砂の水分量を検知するものであり、 事前対応策 を目指している点で 革新的・システム転換的 と判断される。	5	事前対応 革新的・システム 転換的
4	リアルタイム土砂災害予測システム	事業者 (A-PLAT)	自然災害 ・沿岸域	技術的対策 (ソフト)	・都道府県が指定する「土砂災害警戒区域」の欠点を克服するために提案された数値地形モデル(DEM)を用いた表層崩壊危険度予測手法により、降雨に伴って刻々と変化する斜面崩壊の危険度(安全率)を定量的に評価することで、危険な場所をピンポイントで表示することができる。	6	リアルタイム
5	技術の融合による敷地保全・災害復旧	事業者 (A-PLAT)	自然災害 ・沿岸域	技術的対策 (ハード)	・手に入れやすい 排出資源 (① ストーンバッグ(雨水による地表面の浸食を防止)、② 鋼製しながら(緑化回復)、③ 雨水誘導マット(水流抑制)、④ 獣害対策樹アセビ(緑化植物の食害による斜面崩壊を防ぐ)を組み合わせて斜面崩壊を抑制する 多目的な経済的 災害対策技術である。	6	排出資源 多目的&経済的
6	浸水対策用「吸水土のう」	事業者 (A-PLAT)	自然災害 ・沿岸域	技術的対策 (ハード)	・袋内に吸水性のあるポリマー素材を包含した 高性能新型土のう は、短時間採みこむだけで、吸水性を発揮できる技術である。軽量かつコンパクトな形状で保存場所も要しないといった利点もあるので、大雨や洪水による浸水対策として自宅の玄関前や地下鉄の入り口などに活用できる。	4	高性能新型土のう
7	有機土壌増殖材による洪水抑制と生態系保護による循環型ビジネスモデル	事業者 (A-PLAT)	自然災害 ・沿岸域	技術的対策 (ハード)	・有機土壌改良剤を利用した増殖材によって、防風や土砂災害の抑制や生態系の回復を促し、農産物及び医薬品原料の生産能力の向上に貢献できる点で 多機能で相乗効果 を有する技術である。	6	多機能で相乗効果
8	サンドバックによる浜崖後退抑止工	事業者 (A-PLAT)	自然災害 ・沿岸域	技術的対策 (ハード)	・サンドバック(砂袋詰め工)とその背後に行う養浜盛土とを一体として構築された浜崖後退抑止工により浜崖背後の砂丘を保全する “柔な”防御技術 である。	1	“柔な”防御技術
9	未舗装道路の簡易な路面水排水技術	事業者 (A-PLAT)	自然災害 ・沿岸域	技術的対策 (ハード)	・林道など未舗装道路における排水対策技術である。路面の水を適宜左右に分散して排水することで、雨水による路面の浸食や崩壊等を防ぐとともに、作業員の人員不足や 高齢化の課題解決 にも貢献することができる技術である。	2	高齢化の課題解決
10	土壌藻類を活用した表面侵食防止工法	経産省 (GP)	自然災害 ・沿岸域	技術的対策 (ハード)	・降雨強度の増加などに伴う土壌流出や斜面の崩壊に対し、世界中に広く分布する土壌藻類を資材化し散布することで、侵食を防止し、周辺植生の侵入を促進するというユニークな技術である。 排出資源 の利用技術の一つである。	4	排出資源
11	機能性舗装材で都市型洪水軽減とヒートアイランド現象を抑制する技術	経産省 (GP)	自然災害 ・沿岸域	技術的対策 (ハード)	・破砕された廃瓦やレンガは多孔質のため、これらを使った透水性・保水性舗装材は都市型洪水の軽減やヒートアイランド現象の抑制に繋がる。 排出資源 の有効利用という視点から、複合的な機能を有する。災害低減、ヒートアイランド対策、廃棄物対策を兼ねており、このような点からも 多機能 な技術であると高く評価できる。また、緩和策にも資する シナジー効果 を有する。	6	排出資源 多機能 or シナ ジー効果

5. シナジー効果のある適応策の事例

表-9に示した事例のうち、いくつかの事例を紹介する。

5.1 排出資源を利用した斜面安定技術：技術の融合による敷地保全・災害復旧 (表-5 整理番号5)

手に入れやすい排出資源(① ストーンバッグ(雨水による地表面の侵食を防止)、② 鋼製しながら(緑化回復)、③ 雨水誘導マット(水流抑制)、④ 獣害対策樹アセビ(緑化植物の食害による斜面崩壊を防ぐ)を組み合わせて斜面崩壊を抑制する多目的な経済的災害対策技術である。



(a) ストーンバッグ (b) 鋼製しがら (c) 雨水誘導マット

図-8 排出資源を利用した斜面安定技術例：“小土木”技術を活かした敷地保全・災害復旧
 (https://adaptation-platform.nies.go.jp/private_sector/opportunities/biz-120.html)

なお、ここでいう小土木（KODOBOKU）技術とは、山間地などで送電鉄塔周辺など重機が入れない場所で、人力による搬入・施工が可能な環境負荷の小さい斜面保全・災害復旧技術を指している。

5.2 排出資源を利用した舗装（図-9。 図-10）

廃瓦・レンガを破砕機で破砕して砂利・砂製品を製造し、園芸資材・瓦チップや舗装材とする。瓦やレンガは多孔質のため、これらを使った透水性・保水性舗装材は都市型洪水の軽減やヒートアイランド現象の抑制に繋がる。このアップサイクル技術は都市の発展に伴い増加する建設廃材のリサイクルと適応&緩和といった側面における効果が見込めることが特徴である。また、現地の環境や景観。強度。コストといったニーズに合う形で舗装材を提供することで、様々な需要に対応していける。さらに導入した地域の環境意識の向上も期待できる。



(a) 廃瓦・レンガ (b) 透水性ブロック (c) 廃瓦・レンガブロックで舗装した道路

図-9 排出資源から道路舗装までのプロセス (https://eco-system.ne.jp/)

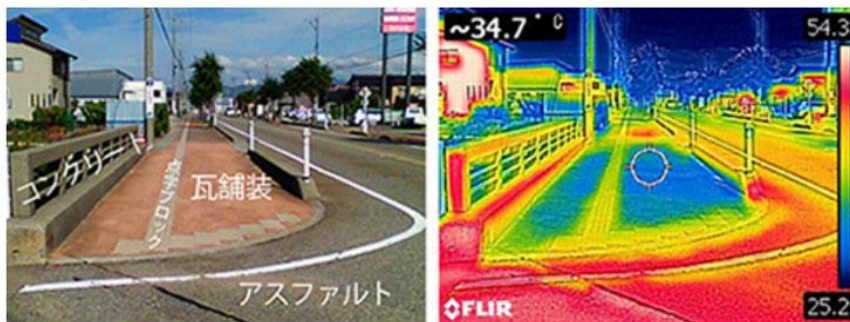


図-10 排出資源を活用した舗装のサーモグラフィ画像 (https://eco-system.ne.jp/)

6. 今後が期待されるシナジー効果のある適応策の事例

6.1 排出資源を利用した河川堤防安定技術

上記に挙げたリストには掲載されていないが、排出資源によるシナジー効果のある革新的適応策の事

すること

iii) 上記から、流域治水に資する具体的な技術として水害低減に貢献できること

なお、本研究の実務での適用性については、現在、実規模大堤防裏のり面を模擬した越流実験¹⁷⁾を経て、茨城県内の自治体と連携した検証実験が行われている²⁰⁾ことを付記する。

6.2 グリーンインフラの事例

6.2.1 グリーンインフラストラクチャーの考え方と事例

グリーンインフラストラクチャー（略して、グリーンインフラ、あるいは、グリフラ）は、社会資本整備や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を活用し、持続可能で魅力ある国土・都市・地域づくりを進める取組みである。平成 27 年に閣議決定された国土形成計画にグリーンインフラの取組みが盛り込まれて、インフラツーリズムとの連携、環境アセスメントにと合わせて推進、SDGs やまちづくりに合わせて推進するなど、取組みの方向性が変化してきている。

グリーンインフラの取組事例としては、国土交通省が中心になって 2020 年に設立された「グリーンインフラ官民連携プラットフォーム」(G-PLAT と略称) では、「気候変動・防災・減災に関するもの」、「緑と水の豊かな生活空間の形成に関するもの」、「投資や人材を呼び込む都市空間の形成に関するもの」、「生態系保全や地域振興に関するもの」に関する行政、自治体、大学・研究機関、非政府組織・事業者の研究や取組みの事例を集約している。一例を表-10 に示している。

表-10 グリーンインフラの取組事例の一例²⁹⁾、³⁰⁾

事例	取組内容	場所
気候変動・防災・減災に関するもの		
	水質浄化や修景機能も併せ持つ「雨庭」	四条堀川交差点(京都府京都市)
	歩行者ネットワークの整備によるウォーカブルなまちづくり	南町田グランベリーパーク(東京都町田市)
	雨水流出抑制および“あまみず”活用技術	Green Infrastructure Model(東京都杉並区)
緑と水の豊かな生活空間の形成に関するもの		
	線路跡地に整備したみどりの連なりによる良好な生活空間	小田急線上部利用の街づくり(東京都世田谷区)
	豊かな自然資源を活かした働き方・暮らし方の提案	東京ポートシティ竹芝(東京都港区)
	食べられる都市緑化のモデル(屋上菜園)	Edible KAYABEN project(東京都中央区)
投資や人材を呼び込む都市空間の形成に関するもの		
	自然環境と調和したオフィス空間	二子玉川ライズ(東京都世田谷区)
	都市を再生しながら自然を再生	大手町の森(東京都千代田区)
	まちづくり・ひとづくりの拠点整備。放棄林の活用	にぎわいの森(三重県いなべ市)
生態系保全や地域振興に関するもの		
	コウノトリ野生復帰に向けた。自然環境の回復	円山川直轄河川改修事業(兵庫県豊岡市)
	多自然川づくり・塩性湿地および干潟の再生	震災復興と流域圏創成(宮城県気仙沼市)
	緑地を活用した魅力あるまちづくり	キンビール横浜工場(神奈川県横浜市)

グリーンインフラを気候変動適応策に活用することで、防災・減災、生物多様性の保全、地域創生等、複数の目的を同時に達成するシナジー効果が期待できるものがある。例えば、都市部における緑地や樹林の配置は、雨水の流出を抑制し、浸水対策に貢献することができる。さらに、湿地やため池の造成・管理は、洪水や濁水のリスク軽減に繋がる。緑地の増加は、都市部におけるヒートアイランド現象の緩

和にも寄与する。加えて、生態系の回復や保護は、生物多様性の保全と回復にも貢献することが期待されている。表-11 はこれらに関する事例をまとめたものである。

表-11 グリーンインフラのシナジー効果の一例^{29)・30)}

事業主	内容	場所	期間	文献
大阪府	雨水貯留浸透機能を備えた植樹帯を整備し。冠水被害を軽減する	大阪府 八尾市	令和4年度～ 令和6年度	https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/kouhou/5kanen/pdf/jirei-all.pdf
福岡県	雨水貯留浸透機能を有する植樹帯の整備	福岡県 久留米市	施工計画中	https://green-infra-pdf.s3.ap-northeast-1.amazonaws.com/R6_グリーンインフラ事例集.pdf
—	屋上緑化・壁面緑化	全国	実施中	https://adaptation-platform.nies.go.jp/data/measures/np-009.html

6.2.2 グリーンインフラによる適応策の事例：森林管理による斜面災害の低減機能

森林は、二酸化炭素の重要な吸収源の1つであり、森林経営計画に基づいて間伐や植林等の森林管理を実施すると、Jクレジットが発行される仕組みが整備されている（林野庁）。特に、間伐は樹木の成長を促し²¹⁾、炭素蓄積量を増加させるだけでなく、土壌中の炭素貯蔵量も増加させることが明らかになっている²²⁾。また、間伐を実施していない場合、災害リスクが大きくなる、間伐が実施されずに長期間放置されている森林では、樹冠が密閉し薄暗い林内環境であるため、雨滴に対してクッションの役割を有する下層植生が生育できず、土壌侵食量が多くなることが報告されている。土壌侵食に加え、降雨に対する地表流の流出応答が大きくなるため²³⁾、洪水緩和機能が低下するおそれがある（図-12）。

土砂災害のうち、斜面崩壊については、図-13に示すように間伐により根系の強度や量が増加し²⁴⁾、斜面崩壊リスク低減に有効であることが報告されている²⁶⁾。土石流と森林管理に関する研究事例は少ないが、間伐によって土石に対する抵抗力を示す引き倒しモーメントが増加することが示されている²⁷⁾。

実践面においては、林野庁が「森林が持つ表層崩壊防止機能を高めるための森林施業の計画に関するガイドライン」²⁸⁾を公表し、国として災害リスクの低減を図るために適切な森林管理を推進している。また、国だけでなく、長野県や三重県などの地方自治体においても「災害に強い森林づくり指針」が定められ、災害リスクを低減させるための森林管理に関する知見の蓄積がますます求められる。上記のように、森林管理、特に間伐は炭素蓄積量を増加させる緩和策として有効な施業であるとともに、災害リスクも低減させることができ、シナジー効果を有する適応策であると位置づけられる。

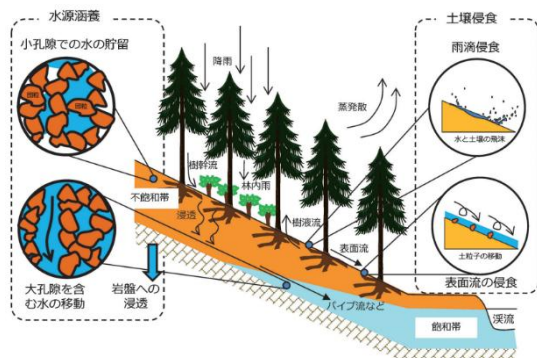


図-12 森林斜面における水源涵養機能と土壌侵食（五味他、2010）²³⁾

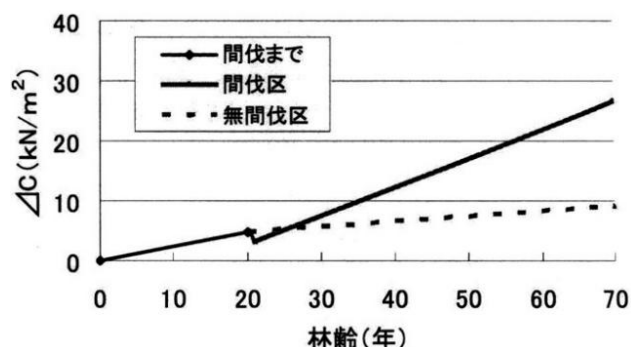
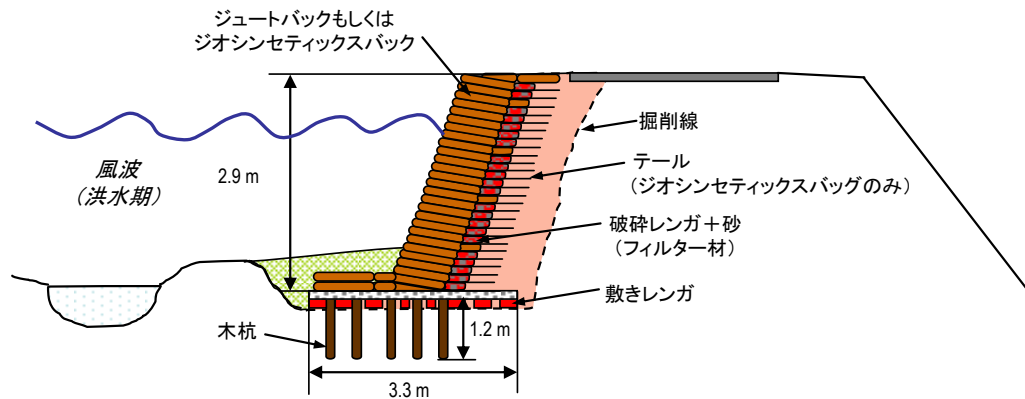


図-13 間伐区と無間伐区の Δc （粘着力の増加分）の経年変化モデル（北原、2010）²⁴⁾

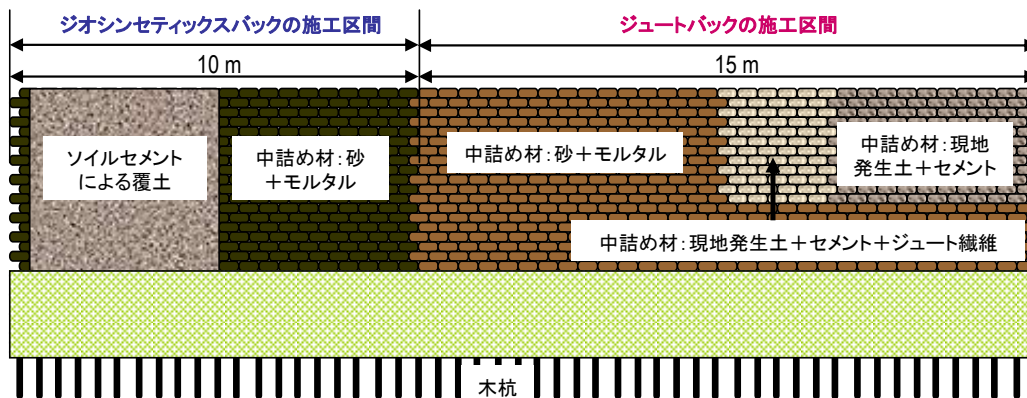
6.2.3 グレーインフラとグリーンインフラを融合した地盤工学的気候変動対応策

(1) 黄麻 (Jute) の利用例

バングラデッシュは、気候変動に起因する海岸侵食や洪水に対して脆弱な途上国の一つである。途上国ということもあって、適応策の採用にあたっては、経済性が特に求められる。そのことを克服する一つの方策として、新しい技術の導入にあたっては、現地で得られる安価な材料を併用することが期待されることの一つである。



(a) 土嚢工法を適用した波浪侵食対策工の断面図



(b) 正面図(すり付け部3m区間を含まず)

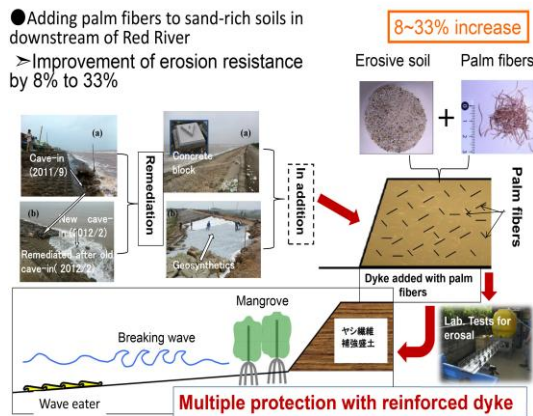
図-14 ローカル材料 (ジュート) を利用した洪水に強い道路盛土の成功事例 (松島他、2011)³¹⁾

このような要請にこたえるために、波浪の影響を受ける農道に、現地で得られるレンガや木杭とともに黄麻 (ジュート) とセメントを混合したソイルセメントとジオシンセティックスを組み合わせた新たな「土嚢積層工法」を適用する試みを行った例がある (図-14)。ここで採用された黄麻 (こうま、Jute) は、東インド (インド西ベンガル州とバングラデッシュ) が世界生産高の9割程度を占有するもので、天然繊維の中でも抜群に耐久性が高いという特徴を有している。

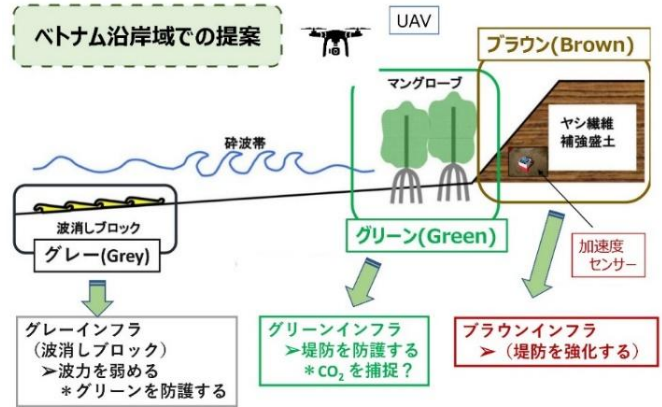
この事例は、アジア地域で施工したグレー・グリーンインフラを併用した典型的な成功事例である。なお、この技術は、洪水とともに、地震に対しても強いことが実証されている。

(2) GGB 構想

同様な融合の概念に属するものとして、著者ら^{2),32),33)}は、図-15に示すような、グレー (コンクリート構造物など)、グリーン (植物) とブラウン (土構造物) を融合して強靱なインフラを整備する技術の提案 (スマート GGB 構想) を行っている。これも GI の一つと位置づけられる。



(a) 堤防へのパームファイバーの利用



(b) スマート GGB 構想“に基づく海岸堤防適応技術

図-15 グレー(G)、グリーン(G)とブラウン(B)インフラを融合した“スマート GGB 構想”^{32), 33)}

7. まとめ

- 1) 日本における気候変動適応策の主たる分野オプションは、自然災害・沿岸域、農業他、健康の三分野である。また、適応策のカテゴリーでは、技術的対策が過半数を占め、社会的対策と空間計画・インフラ対策が続いている。
- 2) 日本における事業者が取り組む気候変動適応策の中には地盤工学に関連する技術は少ないが、多くは自然災害に関するものである。また、地盤工学に関する学会の発表事例では、緩和策に偏っており、適応策に属するものは極めて少ない。
- 3) 適応策の革新性・システム転換性という立場からは、多目的でシナジー効果のある技術がいくつかみられるが、この場合もほとんどが自然災害・沿岸域に属するものである。
- 4) シナジー効果のある技術には、“排出資源”を有効利用されたものがあり、日本的な技術として今後の一層の展開が期待される。その一例として水産業副産物の一つである破碎貝殻（ホタテ貝殻）を利用した革新的適応技術を紹介した。この技術は水害に伴う河川堤防の損傷低減とともに、温暖化効果ガス（GHGs）の固定化能力もあることから、適応策と緩和策に資する点など多目的でシナジー効果を発揮できることが期待される。
- 5) グリーンインフラを気候変動対応策としてに活用することでシナジー効果が期待できる事例としては、(i) 気候変動によって都市部短時間豪雨の増加する中で都市部の植樹帯などの緑地や樹木の配置は、雨水の浸水対策に貢献する、(ii) 屋上緑化や壁面緑化による緑地の増加は都市部のヒートアイランド現象の緩和にも寄与する、(iii) さらに、生態系の回復や保護は、生物多様性の保全と回復にも貢献する事例などがある。
- 6) 森林経営計画に基づく間伐等の森林管理は、樹木の成長促進と土壌への炭素貯留を通じて炭素蓄積量を増大させるため、J-クレジット制度においても有効な緩和策として位置づけられる。同時に、間伐は下層植生の発達を促して土壌侵食や洪水リスクを抑制するほか、根系の強化により斜面崩壊等の災害リスクを低減させる適応策としての側面も有する。森林業は、気候変動対策と国土強靱化を同時に達成するシナジー効果の高い取り組みである。とりわけ、ここで取り上げた事例は、グリーンインフラにも関連する有効な気候適応策である。

なお、本文は、第15回環境地盤工学シンポジウム（2024年熊本で開催）で投稿された論文のレビューと、令和4年（2021年）に行った日本における気候変動適応策の調査から、事業者が取り組む事例（139件）のうち、地盤工学に関わる事例に考察を加えて現状の考察とそれ以外の有望技術も含めて今後の技術展開の展望を述べたものである。したがって、限られた情報に基づくものであることをお断り

しておきたい。今後は、2022年以降の情報や他の機関での情報を追加してより客観的で普遍性のある技術提案つなげられるよう、改善していきたいと考えている。

謝辞：本研究の一部は、環境省環境研究推進費 S-18 プロジェクト（研究代表者・三村信男茨城大学客員教授（当時、現在は、茨城大学名誉教授））からの受託業務の一環で実施した結果に基づくものである。また、本研究の一部に対しては、JSPS 科研費（課題番号 JP24K07653 研究代表者：茨城大学小林薫教授）の援助も受けた。ともに付記して深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 安原一哉・浅田寛喜・岸田隆夫・足立雅樹・山田岳峰・小浪岳治：気候変動適応策の革新性・システム転換性の分析と考察、第32回地球環境シンポジウム論文集、pp. 47-52, 2024.
- 2) 安原一哉：地盤工学の気候変動対応戦略におけるカーボンニュートラル（CN）：C²X の展開へ向けて、地盤工学会誌、72(9), pp. 1-8, 2024.
- 3) 安原一哉：気候変動に対する地盤工学的戦略：緩和策に視座を据えて、地盤工学会誌、67-4(735), pp. 1-5, 2019.
- 4) IPCC:AR5 WGIII, 1114p. Cambridge University Press, 2014.
- 5) 小峯秀雄：持続可能な都市環境創生に向けた環境地盤工学の役割と展望、土と基礎（地盤工学会誌）、Vol.53, No.9, pp.1-5, 2005.
- 6) <https://gi-platform.com/>（2025.4.14 閲覧）
- 7) 安原一哉・村上 哲：2.気候変動に伴う地盤工学的リスクと対応、講座：平野が抱える地盤工学的リスクと対応、地盤工学会誌、67-4(735), pp. 43-50, 2019.
- 8) 安原一哉・山田岳峰：気候変動対応策を通じた地盤工学のIPCC への貢献、第15回環境地盤工学シンポジウム講演集、pp. 583-590, 2023.
- 9) 安原一哉・足立雅樹：土、地盤および土構造物に関する気候変動適応策の事例と考察、第21回地盤工学会関東支部研究発表会（Geo-Kanto 2024）講演概要集、2024.
- 10) <https://adaptation-platform.nies.go.jp/local/area.html>（2025.4.14 閲覧）
- 11) https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/pdf/JCM_FS/R3FY_adaptation_practice_Japanese.pdf（2025.4.14 閲覧）
- 12) Klein, R.J.T., G. F. Midgley, B. L. Preston, M. Alan, F. G. H. Berkhoout, K. Dow, and M. R. Shaw: Adaptation opportunities, constraints, and limits. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, IPCC WGII Fifth Assessment Report, Cambridge University Press, pp. 899-943, 2014.
- 13) Fedele, G., Donatti, C.I., Harvey, C.A., Hannah, L., and Hole, D.G.: Transformative adaptation to climate change for sustainable social-ecological systems, Environmental Science and Policy, 101, pp.116 - 125, 2019.
- 14) 三村信男・楨田容子・真砂佳史・藤田昌史：気候変動適応策オプション・データベースの構築と適応策の現状分析、第32回地球環境シンポジウム論文集、pp. 57-62, 2024.
- 15) 大埜明日香・小林 薫・大和田 繁・釜土則幸・安原一哉：堤防の越水に対する破碎貝殻を用いた侵食・吸出し抑制に関する基礎的検討、土木学会論文集 B3（海洋開発）、Vol.77, No.2, pp. I_373-I_378, 2021.
- 16) 小林 薫・原龍正・松元和伸・安原一哉：ホタテ貝殻の地盤工学的活用による環境保全と超浅層地盤内へのCO₂固定化、土木学会論文集、Vol.79, No.27, pp.1-9, 2024.
- 17) 根本嵩也・小林 薫・松元和伸・武田茂樹・孫冉：実規模堤防裏法面浅層部に敷設した破碎貝殻層の越水時侵食抑制効果に関する実験的研究、河川技術論文集、第30巻、pp.179-184, 2024.
- 18) 小林 薫・原龍正・松元和伸・釜土則幸・足立雅樹・本多颯治郎・安原一哉：河川堤防裏法面浅層

部への貝殻を用いたキャピラリーバリア土層構築による雨水浸透抑制を兼ねた CO₂ 固定化、地盤工学会誌、72(9), pp.33-39, 2024.

- 19) 岡本隆明・夏目将嗣・小高猛司・李圭太・松本知将・山上路生：堤防法尻侵食に伴う越流水の流れ構造の変化と法尻保護工の効果に関する実験的研究、土木学会論文集/81 巻 16 号、論文 ID: 24-16115, 2025.
- 20) 神澤実優・多田音葉・小林 薫・大藪国博・釜土則幸・大和田繁・佐藤雄紀：小規模堤防裏法面の実河川越流水を利用した侵食抑制工に関する実証実験、第 51 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、III-53, 2024.
- 21) 渡邊仁志、茂木靖和、大洞智宏：間伐が高齢級ヒノキ過密林の林分構造と成長に及ぼす影響、日本森林学会誌、Vol.97, No.4, pp. 182-185, 2015.
- 22) Zhang, H., Liu, S., Yu, J., Li, J., Shangguan, Z. and Deng, L. (2024): Thinning increases forest ecosystem carbon stocks. *Forest Ecology and Management*, 555, 121702.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121702> (令和 8 年 3 月 4 日閲覧)。
- 23) 五味 高志、宮田 秀介、恩田 裕一：ヒノキ人工林流域における表面流の発生と流域の降雨流出特性、水利科学、Vol.53, No.6, pp. 77-94, 2010.
- 24) 北原 曜：森林根系の崩壊防止機能、水利科学、Vol.53、No.6, pp. 11-37, 2010
- 25) 掛谷 亮太、瀧澤 英紀、小坂 泉、園原 和夏、石垣 逸朗、阿部 和時：スギ林分の間伐が根系生長と表層崩壊防止機能に与える影響、日本緑化工学会、Vol.42, No.2, pp. 299-307, 2016.
- 26) Asada, H., Hasegawa, Y., Minagawa, T.: Development of shallow landslide susceptibility maps incorporating relative spacing index for forest management. *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 24, p. 100515, 2024.
- 27) 藤堂千景・山瀬敬太郎・谷川東子・大橋瑞江・池野英利・檀浦正子・平野恭弘：間伐がスギの最大引き倒し抵抗モーメントにもたらす影響、日本緑化工学会、Vol.41, No.2, pp. 308-314, 2015.
- 28) 林野庁：森林が持つ表層崩壊防止機能を高めるための森林施業の計画に関するガイドライン、2023.
- 29) <https://www.mlit.go.jp/common/001297376.pdf> (令和 8 年 3 月 4 日閲覧)。
- 30) <https://gi-platform.com/archive/example> (令和 8 年 3 月 4 日閲覧)。
- 31) 松島健一・毛利栄征・堀俊和・有吉充・中津克彦・山田耕士：バン格拉デューにおける農村道路の波浪侵食対策に関するパイロット試験、ジオシンセティックス技術情報、27(1)、27-36、2011.3.
- 32) 佐藤恭兵・小峯秀雄・村上哲・安原一哉・菅野将人：ベトナム北部紅河流域を想定した種々の土質材料の浸透破壊抵抗性および自然由来の繊維材の混合による補強効果の実験的評価、ジオシンセティックス論文集、Vol. 27, pp. 101-108, 2012.
- 33) 安原一哉・山田岳峰：気候変動対応策を通じた地盤工学の IPCC への貢献、第 15 回環境地盤工学シンポジウム論文集、熊本、pp. 583-590, 2023.